

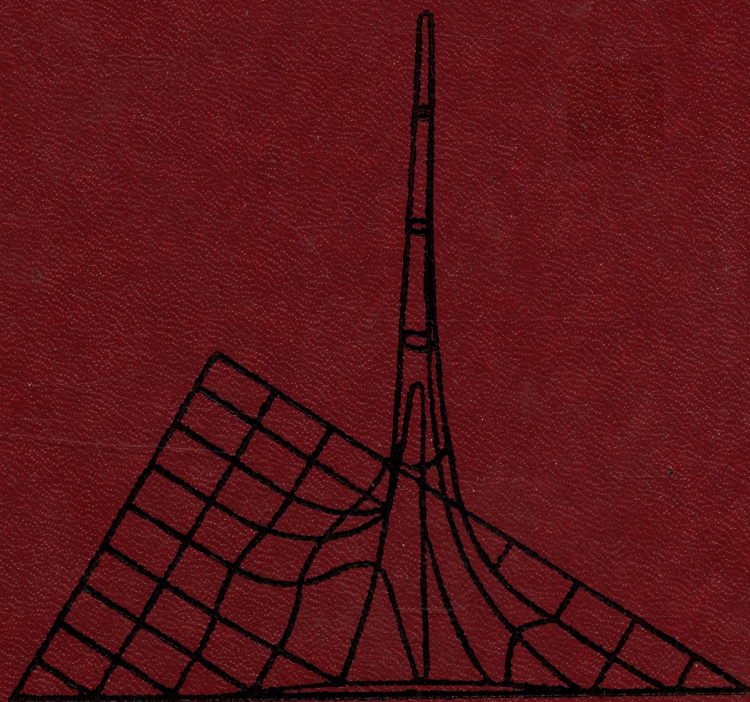
Н. П. Богородицкий,
В. В. Пасынков, Б. М. Тареев

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Н. П. Богородицкий
В. В. Пасынков
Б. М. Тареев

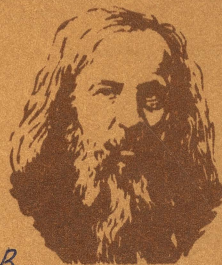
ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Для студентов вузов



ЛЭТИ
100 лет
1886-1986



		ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА										VII		VIII		 88 Периодический закон открыт Д. И. МЕНДЕЛЕЕВЫМ в 1869 году		
I		II		III		IV		V		VI		(H)		2				
1	H водород 1,00794											(H)		2 He гелий 4,00260				
2	Li литий 6,94	Be бериллий 9,01218	5	B бор 10,81	6	C углерод 12,011	7	N азот 14,0067	8	O кислород 15,999	9	F фтор 18,998403	10	Ne неон 20,17				
3	Na натрий 22,98977	Mg магний 24,305	13	Al алюминий 26,98154	14	Si кремний 28,085	15	P фосфор 30,97376	16	S сера 32,06	17	Cl хлор 35,453	18	Ar аргон 39,94				
4	K калий 39,098	Ca кальций 40,08	20	Sc скандий 44,9559	21	Ti титан 47,90	22	V ванадий 50,9415	23	Cr хром 51,996	24	Mn марганец 54,9380	25	Fe железо 55,84	26	Co кобальт 58,9332	27	Ni никель 58,70
	29	Cu медь 63,54	30	Zn цинк 65,38	31	Ga галлий 69,72	32	Ge германий 72,5	33	As мышьяк 74,9216	34	Se селен 78,9	35	Br бром 79,904	36	Kr криптон 83,80		
5	Rb рубидий 85,467	Sr стронций 87,62	38	Y иттрий 88,9059	39	Zr цирконий 91,22	40	Nb ниобий 92,9064	41	Mo молибден 95,94	42	Tc технеций 98,9062	43	Ru рутений 101,0	44	Rh родий 102,9055	45	Pd палладий 106,4
	47	Ag серебро 107,8682	48	Cd кадмий 112,41	49	In индий 114,82	50	Sn олово 116,6	51	Sb сурьма 121,7	52	Te теллур 127,6	53	I йод 126,9045	54	Xe ксенон 131,30		
6	Cs цезий 132,9054	Ba барий 137,33	56	La-Lu ⁵⁷⁻⁷¹ *	72	Hf гафний 178,4	73	Ta тантал 180,947	74	W вольфрам 183,8	75	Re рений 186,207	76	Os осмий 190,2	77	Ir иридий 192,2	78	Pt платина 195,0
	79	Au золото 196,9665	80	Hg ртуть 200,5	81	Tl таллий 204,3	82	Pb свинец 207,2	83	Bi висмут 208,9804	84	Po полоний [209]	85	At астат [210]	86	Rn радон [222]	Обозначение элемента Атомный номер	
7	Fr франций [223]	Ra радий 226,0254	88	Ac-(Lr) ⁸⁹⁻¹⁰³ **	104	Ku курчатовий [261]	105	Ns нильсборий [261]	= s-элементы = p-элементы = d-элементы = f-элементы		Атомные массы приведены по Международной таблице 1981 года. Точность последней значащей цифры ±1 или ±3, если она выделена мелким шрифтом. В квадратных скобках приведены массовые числа наиболее устойчивых изотопов.		<div>Li литий 6,94</div> Атомная масса					
* лантаноиды																		
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71				
La лантан 138,905	Ce церий 140,12	Pr празеодим 140,9077	Nd неодим 144,2	Pm прометий [145]	Sm самарий 150,4	Eu европий 151,96	Gd гадолиний 157,2	Tb тербий 158,9254	Dy диспрозий 162,5	Ho гольмий 164,9304	Er эрбий 167,2	Tm тулий 168,9342	Yb иттербий 173,0	Lu лютеций 174,967				
** актиноиды																		
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103				
Ac актиний [227]	Th торий 232,0381	Pa протактиний 231,0359	U уран 238,02	Np нептуний 237,0482	Pu плутоний [244]	Am амерций [243]	Cm кюриум [247]	Bk берклий [247]	Cf калийфорний [251]	Es эйнштейний [254]	Fm фермий [257]	Md менделевий [258]	(No) (нобелий) [255]	(Lr) (лоуренсий) [256]				

Н. П. Богородицкий
В. В. Пасынков
Б. М. Тареев

ЭЛЕКТРО- ТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Издание седьмое,
переработанное и дополненное

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР
в качестве учебника для студентов
электротехнических и энергетических
специальностей вузов



Ленинград

ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ
Ленинградское отделение
1985

ББК 31.23

Б 74

УДК 621.315.6 (075.8)

**ВТОРОЕ ИЗДАНИЕ
УДОСТОЕНО ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРЕМИИ СССР**

Рецензент — кафедра автоматики и телемеханики Северо-Западного политехнического института (зав. кафедрой Б. В. Шамрай)

Богородицкий Н. П., Пасынков В. В., Тареев Б. М.

Б 74 Электротехнические материалы: Учебник для вузов. — 7-е изд., перераб. и доп. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1985. — 304 с., ил.

В пер.: 1 р. 10 к. 60 000 экз.

В книге излагаются основы физики явлений, происходящих в диэлектрических, полупроводниковых и магнитных материалах. Приводится классификация материалов и описываются их электрические, физико-химические и механические свойства. Рассматривается технология производства электротехнических материалов. В седьмое издание включены сведения о новых материалах: сверхпроводниках, полупроводниках и активных диэлектриках, расширены сведения о качестве материалов.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов электротехнических и энергетических специальностей вузов, а также может быть полезна инженерам электротехнических специальностей.

Б 2302020000—148
051 (01)—85 136—86

ББК 31.23

ПРЕДИСЛОВИЕ К СЕДЬМОМУ ИЗДАНИЮ



Между седьмым и шестым изданием учебника прошло восемь лет, а после выхода в свет первого издания — свыше 35 лет.

За этот период были сделаны серьезные открытия в науке и технике, появились новые материалы, разработана и внедрена в промышленность новейшая технология получения и обработки материалов. В связи с этим учебные планы вузов также претерпели существенные изменения с целью улучшения теоретической, технологической и экономической подготовки инженерных кадров. Некоторые положения учебника прошли проверку временем и сохранены в седьмом издании. Добавлены сведения о новых материалах и их использовании. Обновлено и дополнены разделы о тех материалах, значение которых повысилось, а производство их увеличилось.

Настоящее издание учебника выходит накануне 100-летия первого в нашей стране высшего электротехнического учебного заведения — Ленинградского ордена Ленина электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина). Впервые занятия студентов в нем начались 4 сентября (старого стиля) 1886 г. Имя В. И. Ульянова (Ленина) было присвоено институту 28 ноября 1918 г.

На рубеже XIX и XX веков ЭТИ стал признанным центром электротехнической мысли в России. Почти всем пионерам электротехники в России — Д. А. Лачинову, А. Н. Лодыгину, Н. Н. Бенардосу, А. С. Попову, И. И. Боргману, М. О. Доливо-Добровольскому советом института было присвоено звание почетных инженеров-электриков. Изобретатель радио А. С. Попов был избран профессором кафедры физики, а 26 сентября 1905 г. — первым выборным директором института.

Работавшие в институте видные деятели науки и техники своими трудами внесли крупный вклад в получение, исследование, технологию и производство различных электротехнических материалов. Так, электрохимиками ЛЭТИ в 1909—1913 гг. впервые в России был получен из отечественного сырья алюминий, а в 1915 г. — магний.

Под руководством участвовавшего в разработке плана ГОЭЛРО профессора А. А. Смурова, изучавшего в ЛЭТИ вопросы электрической прочности диэлектриков, были разработаны различные типы

высоковольтных керамических и бакелито-бумажных изоляторов и сформулированы требования к трансформаторному маслу для высоковольтных устройств.

Создателем высокочастотной электротермии чл.-корр. АН СССР В. П. Вологдиным в ЛЭТИ были предложены и внедрены в промышленность методы сушки, полимеризации диэлектриков и плавки магнитов в высокочастотных электромагнитных полях.

Профессор Н. П. Богородицкий (ректор ЛЭТИ с 1954 до 1967 гг.) совместно с другими сотрудниками разработал основные виды высокочастотной керамики для радиоизоляционных деталей и конденсаторов.

Чл.-корр. АН СССР С. Я. Соколов впервые в мире создал ультразвуковые дефектоскопы для исследования металлов и использовал ультразвук для обработки материалов и воздействия на химические реакции в веществе.

Выпускник ЛЭТИ послевоенных лет заведующий кафедрой оптоэлектроники ЛЭТИ академик Ж. И. Алферов внес существенный вклад в развитие науки о гетеропереходах в полупроводниках.

Седьмое издание учебника посвящается 100-летию ЛЭТИ имени В. И. Ульянова (Ленина).

Авторы выражают глубокую благодарность профессору Б. В. Шамраю за ценные замечания и советы, сделанные им при рецензировании рукописи настоящего издания учебника.

Замечания и пожелания просьба направлять по адресу: 191065, Ленинград, Марсово поле, д. 1, Ленинградское отделение Энергоатомиздата.

В. В. Пасынков, Б. М. Тареев

ИЗ ПРЕДИСЛОВИЯ К ПРЕДЫДУЩИМ ИЗДАНИЯМ

Разработка новых материалов и непрерывное совершенствование уже известных происходят одновременно с общим развитием электротехники и расширением требований промышленности к качеству материалов.

Первым практическим применением материала для создания сравнительно мощного источника электрической энергии можно считать изготовление большой батареи, электродвижущая сила которой создавалась за счет контактной разности потенциалов между дисками из разных металлов. Эта батарея была создана в 1802 г. академиком В. В. Петровым. В ней использовалось 8400 медных и цинковых дисков с прокладками из бумаги, пропитанной электролитом. С помощью этой батареи впервые в мире была получена электрическая дуга.

В 1832 г. в своих опытах по созданию электромагнитного телеграфа русский ученый П. Л. Шиллинг использовал в качестве изоляции пленку, пропитанную воском, невулканизированный каучук и шелковую пряжу.

В 1872 г. изобретатель А. Н. Лодыгин создал первую угольную лампу накаливания; инженер П. Н. Яблочков в 1876 г. изобрел электрическую «свечу», положившую начало широкому применению электрического освещения.

В этих изобретениях были использованы проводники, магнитные материалы и электрическая изоляция.

По мере развития электротехники все большее значение приобретал правильный выбор материалов, помогавший успешно разрешать возникавшие задачи.

Быстрый рост промышленности во всех ее многочисленных отраслях сопровождается непрерывным увеличением номенклатуры применяемых материалов, совершенствованием технологии их изготовления и все более широким использованием новых, ранее не применявшихся в технике видов сырья.

Развитие отечественной электротехники выдвинуло на одно из первых мест проблему быстрого совершенствования электротехнических материалов высокого качества, полностью отвечающих новейшим техническим требованиям и изготавливаемых из отечественного сырья по самой совершенной технологии.

В настоящее время новые электротехнические материалы появляются в результате предварительного глубокого изучения физических, механических и химических характеристик таких веществ, которые могли бы быть использованы в качестве технических материалов.

Для понимания электрических, магнитных и механических свойств материалов и других их особенностей необходимо исследовать структуру и химический состав материалов.

Изучение и дальнейшая разработка нужных промышленности электротехнических материалов входит в тематику научно-исследовательских институтов.

Новейшая технология изготовления материалов разрабатывается в опытных цехах институтов и заводов.

Сочетание научно обоснованных требований с реальными возможностями производства создало в нашей стране те благоприятные условия, при которых промышленность электроматериалов сумела достичь больших успехов.

Обеспечение высокого качества материалов для современной электротехники потребовало включения в программу подготовки инженеров-электриков специального курса «Электротехнические материалы», в котором рассматриваются:

1) теоретические положения, на основе которых изучаются и испытываются материалы, применяемые в электротехнике;

2) классификация электротехнических материалов по их назначению, составу и свойствам;

3) основные характеристики, по которым оценивается пригодность материалов для их использования в электротехнике;

4) основные особенности технологии электротехнических материалов;

5) наиболее характерные, технически и экономически обоснованные применения электротехнических материалов в практике.

В создании учебника участвовали сотрудники Ленинградского электротехнического института имени В. И. Ульянова (Ленина) и Всесоюзного заочного энергетического института. Первое издание учебника было выпущено в начале 1950 г., а в конце 1951 г. уже было напечатано и второе издание.

Между вторым и третьим изданиями учебника прошло четыре года. За это время наша промышленность стала использовать в массовом производстве новые материалы, например фторорганические соединения, обладающие нагревостойкостью до 300 °С, новые виды электротехнической керамики с повышенной механической прочностью и хорошими электрическими свойствами, полупроводниковые изделия (германиевые диоды и триоды), тонкие листовые текстурированные стали, магнитную керамику и специальные сплавы. Авторы стремились в третьем издании учебника отразить все достижения науки в области электротехнических материалов. Но при этом, руководствуясь тем, что в учебниках должны излагаться основы соответствующей отрасли науки и передовой опыт социалистического строительства, из учебника был изъят устаревший материал и введены уточнения и дополнения на основе опыта учебной работы советских и зарубежных вузов. Кроме того, из третьего издания были исключены методики испытания материалов, рассматриваемые в специальных руководствах.

Четвертое издание настоящего учебника было выпущено в 1961 г. и дополнительным тиражом в 1963 г.

В четвертом издании учебника, как и в предыдущих, авторы попытались осветить успехи науки и техники за годы, прошедшие после выхода в свет предыдущего издания, и дать основные сведения как о применяемых в этот период промышленности электротехнических материалах, так и о новых перспективных материалах, создаваемых в нашей стране и за рубежом.

Для дальнейшего развития электрификации и автоматизации промышленности потребовались многие виды электротехнических материалов и в первую очередь новейшие гибкие высокомолекулярные диэлектрики с нагревостойкостью до 600—650 °С, надежные в эксплуатации полупроводниковые элементы, ферромагнетики с высокими магнитными характеристиками и т. д.

Пятое издание учебника было выпущено в 1969 г., шестое — в 1977 г. Общий тираж всех изданий превысил четверть миллиона экземпляров.

Авторы выражают благодарность коллективам кафедр, профессорам, научным работникам, инженерам, оказавшим помощь в создании и переизданиях учебника.

Авторы

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

γ — удельная проводимость	ω — угловая частота
γ_s — удельная поверхностная проводимость	B — магнитная индукция
γ_T — коэффициент теплопроводности	C — емкость конденсатора, теплоемкость
δ — угол диэлектрических потерь	c — скорость света, удельная теплоемкость
ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость	D — электрическое смещение, коэффициент диффузии
η — динамическая вязкость	d — диаметр
λ — длина свободного пробега частицы, длина электромагнитной волны	E — напряженность электрического поля, модуль упругости
μ — дипольный момент молекулы, коэффициент ослабления излучения	$E_{\text{пр}}$ — электрическая прочность
μ_r — относительная магнитная проницаемость	e — заряд электрона
ν — молярная концентрация, кинематическая вязкость, коэффициент упругой связи	F — сила
ρ — объемная плотность электрического заряда, удельное (объемное) сопротивление	f — частота
ρ_s — удельное поверхностное сопротивление	H — напряженность магнитного поля
ρ_T — удельное тепловое сопротивление	h — постоянная Планка, высота, толщина, длина
σ — поверхностная плотность заряда, механическая прочность	I — сила тока
τ — время	J — плотность тока
φ — относительная влажность воздуха, угол	k — постоянная Больцмана
ψ — влажность материала	l — длина
	M — относительная молекулярная масса, момент силы
	m — масса
	N_A — постоянная Авогадро
	N — концентрация примеси
	n — показатель преломления света, концентрация
	n_0 — концентрация электронов, носителей
	P — мощность
	p — давление, удельные потери мощности
	p_0 — концентрация дырок
	Q — заряд конденсатора, добротность

q — заряд
 R — радиус, сопротивление
 r — радиус, сопротивление
 S — поверхность, площадь
 T — термодинамическая температура, твердость
 ТК ϵ_r или α_{ϵ_r} — температурный коэффициент диэлектрической проницаемости
 ТК l или α_l — температурный коэффициент линейного расширения

ТК ρ или α_ρ — температурный коэффициент удельного сопротивления
 t — температура, °C
 U — разность потенциалов
 u — подвижность носителей заряда
 v — скорость
 V — объем
 \mathcal{W} — энергия, энергия активации, ширина запрещенной зоны
 Z — номер элемента в таблице Менделеева
 z — полное сопротивление переменному току

ВВЕДЕНИЕ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА

Виды связи. Основными элементарными частицами, из которых строятся все известные нам вещества, являются *протоны, нейтроны и электроны*.

Из протонов и нейтронов состоит атомное ядро, электроны заполняют оболочки атома, компенсируя положительный заряд ядра. Строение ядра атома, периодичность заполнения оболочек электронами можно находить с помощью таблицы Д. И. Менделеева.

Газы, жидкие и твердые тела состоят из атомов, молекул или ионов. Размеры атомов около 0,1 нм, размеры положительных ионов, получившихся из атомов, лишившихся части электронов, меньше, чем размеры атомов, а размеры отрицательных ионов, присоединивших дополнительные электроны, больше, чем размеры соответствующих атомов. Ионами могут быть и группы атомов, потерявших или присоединивших электроны.

Молекулы газов содержат различное число атомов. Так, например, гелий, аргон, неон — одноатомные газы; водород, азот, кислород, оксид углерода состоят из двухатомных молекул; углекислый газ, водяной пар — из трехатомных. Молекула аммиака построена из четырех атомов, а метана — из пяти. В зависимости от строения внешних электронных оболочек атомов могут образовываться различные виды связи.

Наиболее часто встречаются молекулы, в которых существуют ковалентные и ионные химические связи.

Ковалентная связь возникает при обобществлении электронов двумя соседними атомами. Химическая связь такого типа осуществляется в молекулах H_2 , O_2 и CO (рис. В-1), а также наблюдается в молекулах, образованных металлоидными атомами, например в молекуле хлора и др.

Молекулы, в которых центры одинаковых по величине положительных и отрицательных зарядов совпадают, являются *неполярными*. Если же в отдельных молекулах центры противоположных по знаку зарядов не совпадают и находятся на некотором расстоянии друг от друга, то такие молекулы называются *полярными* или *дипольными*.

Полярная молекула характеризуется дипольным моментом, который определяется произведением заряда и расстояния между центрами положительного и отрицательного зарядов.

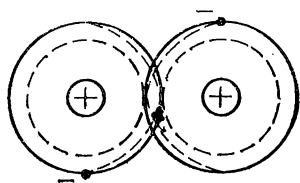


Рис. В-1

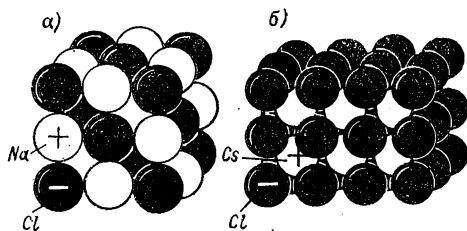


Рис. В-2

Рис. В-1. Схематическое изображение двухатомной молекулы с ковалентной связью

Рис. В-2. Структура и плотная упаковка ионов хлористого натрия (а) и неплотная упаковка ионов хлористого цезия (б)

Ковалентная связь может быть как в молекулах (в трех агрегатных состояниях вещества), так и между атомами, образующими решетку кристалла (например, алмаз, кремний, германий). Ковалентной связью могут удерживаться не только одинаковые атомы ($\text{Cl}-\text{Cl}$,



Второй вид связи — *ионная связь* — определяется силами притяжения между положительными и отрицательными ионами. Твердые тела ионной структуры характеризуются повышенной механической прочностью и относительно высокой температурой плавления. Типичными примерами ионных кристаллов являются галогениды щелочных металлов.

Из рис. В-2 видна плотная упаковка ионов хлористого натрия и неплотная — хлористого цезия.

Третий вид связи — *металлическая связь*, которая приводит также к образованию твердых кристаллических тел. Металлы можно рассматривать как системы, построенные из расположенных в узлах решетки положительно заряженных ионов, находящихся в среде свободных электронов (рис. В-3). Притяжение между положительными атомными остовами и электронами является причиной монолитности металла. Наличием свободных электронов объясняется высокая электропроводность и теплопроводность металла, что также является причиной блеска металлов. Ковкость металла объясняется перемещением и скольжением отдельных слоев атомных остовов.

Четвертый вид связи — *молекулярная связь* (связь Ван-дер-Ваальса). Такая связь существует в некоторых веществах между молекулами с ковалентными внутримолекулярными связями. Межмолекулярное притяжение в этом случае обуславливается согласованным движением валентных электронов в соседних молекулах (рис. В-4). В любой момент времени электроны максимально удалены друг от друга и максимально приближены к положительным зарядам. При этом силы притяжения валентных электронов положительно заряженными остовами соседних молекул оказываются сильнее сил

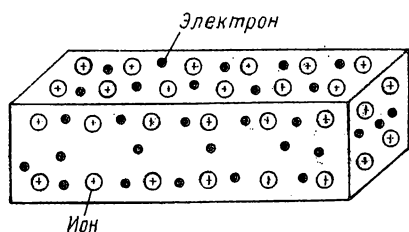


Рис. В-3

Рис. В-3. Схема строения металлического проводника

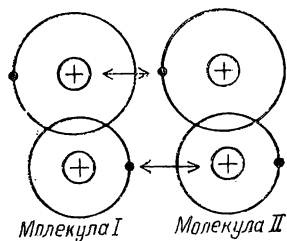


Рис. В-4

Рис. В-4. Схематическое изображение двух взаимодействующих молекул (связь Ван-дер-Ваальса)

взаимного отталкивания электронов внешних орбит. Связь Ван-дер-Ваальса наблюдается между молекулами некоторых веществ, например парафина, имеющих низкую температуру плавления, свидетельствующую о непрочности их кристаллической решетки.

Строение и дефекты твердых тел. Кристаллическая решетка — это присущее кристаллическому состоянию вещества регулярное расположение частиц (атомов, ионов, молекул), характеризующееся периодической повторяемостью, в трех измерениях. Полное описание кристаллической решетки дается пространственной группой, параметрами элементарной ячейки, координатами атомов в ячейке. В этом смысле понятие кристаллической решетки эквивалентно понятию атомарной структуры кристалла. Русский ученый Е. С. Федоров почти на 40 лет раньше, чем были найдены методы рентгеноструктурного анализа, рассчитал возможные расположения частиц в кристаллических решетках различных веществ. Он подразделил кристаллы на 32 класса симметрии, объединяющих 230 возможных пространственных групп. Кристаллы могут различаться по двойному лучепреломлению, по пьезо- и пьезоэлектрическим свойствам, образованию адсорбционных центров, работе выхода электронов и т. п.

Причина образования каким-либо элементом или соединением данной пространственной решетки в основном зависит от размеров атома и электронной конфигурации его внешних оболочек.

Известно, что наиболее высоким как ближним (в пределах элементарной ячейки), так и дальним (на больших расстояниях) порядком расположения частиц отличаются химические соединения, находящиеся в твердом (кристаллическом) состоянии. Говорить о той или иной степени ближнего и дальнего порядка расположения частиц (рис. В-5) можно лишь для твердых растворов кристаллических веществ, а также стеклообразного состояния. Упорядоченное и неупорядоченное состояние можно наблюдать и у высокомолекулярных — полимерных материалов. Практически полное отсутствие порядка в расположении частиц должно быть у аморфных тел.

В электротехнике широко применяются материалы как с упорядоченным, так и неупорядоченным строением.

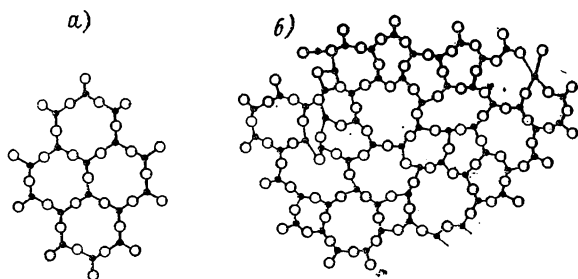


Рис. В-5. Схематическое двухмерное изображение строения: *а* — решетки кристалла; *б* — стекла

«Дефекты» строения кристаллической решетки, определяющие особые физические свойства вещества, широко используются для получения самых различных материалов, которые применяются, в частности, в люминесцентной технике (кристаллофосфоры для осветительных целей, оптические преобразователи, светящиеся краски и др.).

К дефектам кристаллического твердого тела относятся любые нарушения периодичности электростатического поля кристаллической решетки (рис. В-6): нарушение стехиометрического состава, наличие посторонних примесей, механически напряженные участки структуры, дополнительные кристаллографические плоскости (дислокации, трещины, поры) и т. д.

По своей природе перечисленные дефекты могут быть или тепловыми или «биографическими». Последние связаны с технологическим процессом получения данного материала.

Классификация веществ по электрическим свойствам. Все вещества в зависимости от их электрических свойств относят к диэлектрикам, проводникам или полупроводникам. Различие между проводниками, полупроводниками и диэлектриками наиболее наглядно можно показать с помощью энергетических диаграмм зонной теории твердых тел.

Исследование спектров излучения различных веществ в газообразном состоянии, когда атомы расположены относительно друг друга на больших расстояниях, показывает, что для атомов каж-

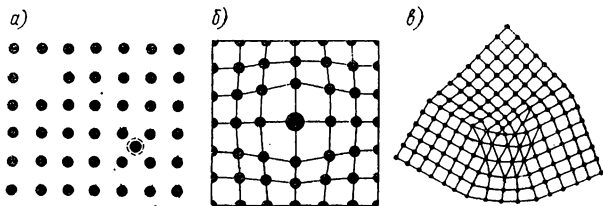
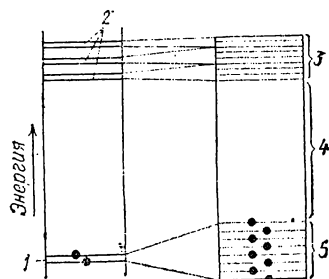


Рис. В-6. Дефекты кристаллической решетки: *а* — пустой узел и собственный ион в междоузлии; *б* — посторонний атом в узле решетки; *в* — блочное строение кристалла — дислокация

Рис. В-7. Схема расположения энергетических уровней уединенного атома (слева) и неметаллического твердого тела (справа)

1 — нормальный энергетический уровень атома; 2 — уровни возбужденного состояния атома; 3 — свободная зона; 4 — запрещенная зона; 5 — заполненная электронами зона



дого вещества характерны вполне определенные спектральные линии. Это говорит о наличии определенных энергетических состояний (уровней) для разных атомов.

Часть этих уровней (рис. В-7) занята электронами в нормальном, невозбужденном состоянии атома, на других уровнях электроны могут находиться только после того, как атом испытает внешнее энергетическое воздействие; при этом он возбуждается. Стремясь прийти к устойчивому состоянию, атом излучает избыток энергии в момент возвращения электронов на уровни, при которых энергия атома минимальна. При переходе газообразного вещества в жидкость, а затем при образовании кристаллической решетки твердого тела все имеющиеся у данного типа атомов электронные уровни (как заполненные электронами, так и незаполненные) несколько смещаются вследствие действия соседних атомов друг на друга. Таким образом, из отдельных энергетических уровней уединенных атомов в твердом теле образуется целая полоса — зона энергетических уровней.

Энергетические диаграммы диэлектриков, полупроводников и проводников различны (рис. В-8).

Диэлектриками будут такие материалы, у которых запрещенная зона настолько велика, что электронной электропроводности в обычных случаях не наблюдается.

Полупроводниками будут вещества с более узкой запрещенной зоной, которая может быть преодолена за счет внешних энергетических воздействий.

Проводниками будут материалы, у которых заполненная электронами зона вплотную прилегает к зоне свободных энергетических уровней или даже перекрывается ею. Вследствие этого электроны в металле свободны, т. е. могут переходить с уровней заполненной зоны на незанятые уровни свободной зоны под влиянием слабой напряженности приложенного к проводнику электрического поля.

При отсутствии в полупроводнике свободных электронов (при нуле Кельвина) приложенная к нему разность электрических потенциалов не вызовет тока. Если извне будет подведена энергия, достаточная для переброса электронов через запрещенную зону, то, став свободными, электроны смогут перемещаться под действием электрического поля, создавая электронную электропроводность полупроводника.

В заполненной зоне, откуда ушел электрон, образовалась «электронная дырка», а потому в полупроводнике начнется другое, «эстафетное», движение электронов, заполняющих образовавшуюся дырку, причем под воздействием электрического поля дырка будет двигаться

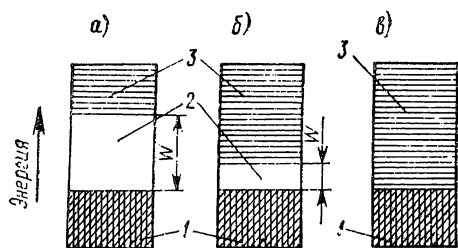


Рис. В-8. Энергетические диаграммы диэлектриков (а), полупроводников (б) и проводников (в) при нуле Кельвина в соответствии с зонной теорией твердого тела

1 — заполненная электронами зона; 2 — запрещенная зона; 3 — зона свободных энергетических уровней

в направлении поля, как эквивалентный положительный заряд. Процесс перехода электронов в свободное состояние сопровождается и обратным явлением, т. е. возвратом электронов в нормальное состояние. В результате в веществе наступает равновесие, т. е. число электронов, переходящих в свободную зону, становится равным числу электронов, возвращающихся обратно в заполненную зону.

С повышением температуры число свободных электронов в полупроводнике возрастает, а с понижением температуры до абсолютного нуля — убывает вплоть до нуля. Таким образом, электропроводность веществ при различных температурах может быть существенно различной.

Энергию, необходимую для перехода электрона в свободное состояние или для образования дырки, может доставить не только тепловое движение, но и другие источники энергии, например свет, поток электронов и ядерных частиц, электрические и магнитные поля, механические воздействия и т. д.

Электрические свойства определяются условиями взаимодействия атомов вещества и не являются непременной особенностью данного атома. Например, углерод в виде алмаза является диэлектриком, а в виде графита обладает большой проводимостью.

Примеси и дефекты кристаллической решетки сильно влияют на электрические свойства твердых тел.

Классификация веществ по магнитным свойствам. По магнитным свойствам материалы подразделяются на *слабмагнитные* (диамагнетики и парамагнетики) и *сильномагнитные* (ферромагнетики и ферримагнетики).

Диамагнетиками являются вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r < 1$, значение которой не зависит от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся водород, инертные газы, большинство органических соединений, каменная соль и некоторые металлы (медь, цинк, серебро, золото, ртуть), а также висмут, галлий, сурьма.

К *парамагнетикам* относятся вещества с магнитной проницаемостью $\mu_r > 1$, также не зависящей от напряженности внешнего магнитного поля. К ним относятся кислород, оксид азота, соли железа, кобальта, никеля и редкоземельных элементов, щелочные металлы, алюминий, платина.

Диамагнетики и парамагнетики имеют магнитную проницаемость, близкую к единице, и по магнитным свойствам нашли себе ограниченное применение в технике.

У сильномагнитных материалов $\mu_r \gg 1$ и зависит от напряженности магнитного поля. К ним относятся железо, никель, кобальт и их сплавы, сплавы хрома и марганца, гадолиний, ферриты различного состава.

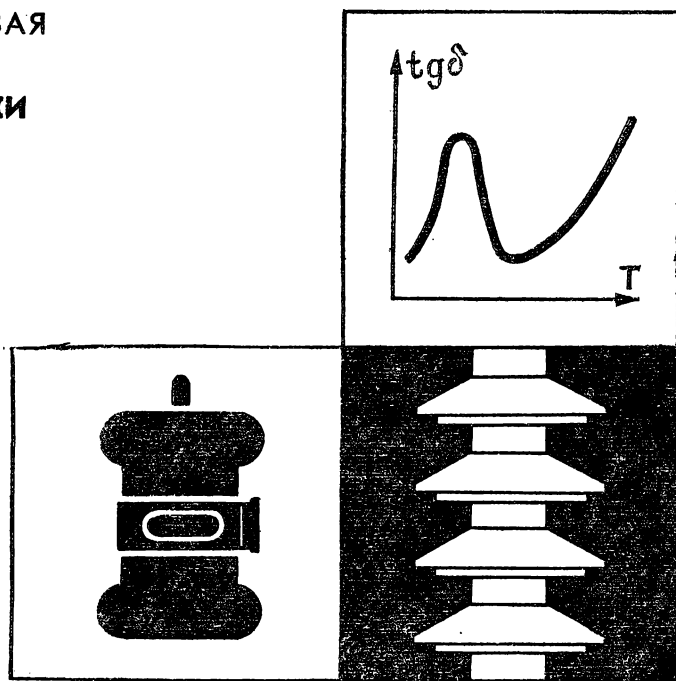
В дальнейшем изложении проводится рассмотрение диэлектрических, проводниковых, полупроводниковых и магнитных материалов, применяемых в электротехнике.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем состоят основные представления о строении вещества?
2. Классификация материалов с помощью зонной теории твердого тела и по магнитным свойствам.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ДИЭЛЕКТРИКИ



ГЛАВА ПЕРВАЯ

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

1-1. ДИЭЛЕКТРИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Основным, характерным для любого диэлектрика процессом, возникающим при воздействии на него электрического напряжения, является *поляризация* — ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул.

О явлениях, обусловленных поляризацией диэлектрика, можно судить по значению *диэлектрической проницаемости*, а также *угла диэлектрических потерь*, если поляризация диэлектрика сопровождается рассеянием энергии, вызывающим нагрев диэлектрика. В нагреве технического диэлектрика могут участвовать содержащиеся в нем немногочисленные свободные заряды, обуславливающие возникновение под воздействием электрического напряжения малого сквозного тока, проходящего через толщу диэлектрика и по его поверхности. Наличием сквозного тока объясняется явление электропроводности технического диэлектрика, численно характеризуемой значениями удельной объемной электрической проводимости и удель-

ной поверхностной электрической проводимости, являющимися обратными соответствующим значениям удельных *объемного* и *поверхностного* электрических сопротивлений.

Любой диэлектрик может быть использован только при напряжениях, не превышающих предельных значений, характерных для него в определенных условиях. При напряжениях выше этих предельных значений наступает *пробой диэлектрика* — полная потеря им диэлектрических свойств.

Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется *пробивным напряжением*, а соответствующее значение напряженности внешнего однородного электрического поля — *электрической прочностью* диэлектрика.

1-2. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ

Под влиянием электрического поля связанные электрические заряды диэлектрика смещаются в направлении действующих на них сил и тем больше, чем выше напряженность поля. При снятии электрического поля заряды возвращаются в прежнее состояние. В полярных диэлектриках, содержащих дипольные молекулы, воздействие электрического поля вызывает еще и ориентацию диполей в направлении поля; при отсутствии поля диполи дезориентируются вследствие теплового движения.

Большинство диэлектриков характеризуется линейной зависимостью электрического смещения от напряженности электрического поля, созданного в диэлектрике. Особую группу составляют диэлектрики, в которых с изменением напряженности поля смещение меняется нелинейно, обнаруживая насыщение при некотором значении напряженности поля. Такие диэлектрики называются *сегнетоэлектриками*.

Наименование «сегнетоэлектрик» связано с тем, что нелинейность поляризации впервые была обнаружена у *сегнетовой соли* (подробнее см. стр. 28, 29).

Любой диэлектрик с нанесенными на него электродами, включенный в электрическую цепь, может рассматриваться как конденсатор определенной емкости (рис. 1-1, а).

Заряд конденсатора, как известно, равен

$$Q = CU, \quad (1-1)$$

где C — емкость конденсатора; U — приложенное напряжение.

Заряд Q при заданном значении приложенного напряжения складывается из заряда Q_0 , который присутствовал бы на электродах, если бы их разделял вакуум, и заряда Q_d , который обусловлен поляризацией диэлектрика, фактически разделяющего электроды:

$$Q = Q_0 + Q_d. \quad (1-2)$$

Одной из важнейших характеристик диэлектрика является его *относительная диэлектрическая проницаемость* ϵ_r . Эта величина представляет собой отношение заряда Q , полученного при некотором

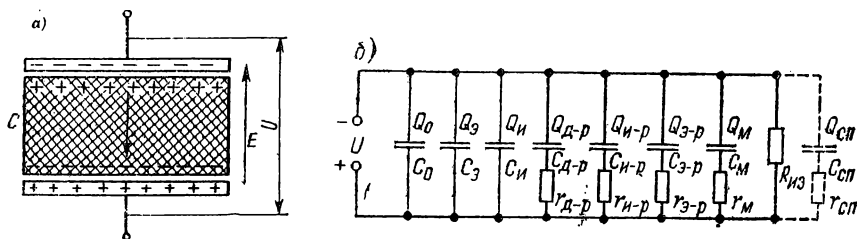


Рис. 1-1. Диэлектрик сложного состава с различными механизмами поляризации в электрическом поле (а) и его эквивалентная схема (б)

U — источник напряжения; C_0 и Q_0 — емкость и заряд в вакууме соответственно; C и Q — соответственно емкости и заряды от электронной, ионной, дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной, электронно-релаксационной, миграционной и спонтанной поляризации; r — сопротивления, эквивалентные потерям энергии при этих механизмах поляризации; $R_{и.з}$ — сопротивление изоляции сквозному току через диэлектрик

напряжении на конденсаторе, содержащем данный диэлектрик, к заряду Q_0 , который можно было бы получить в конденсаторе тех же размеров и при том же напряжении, если бы между электродами находился вакуум:

$$\epsilon_r = \frac{Q}{Q_0} = \frac{Q_0 + Q_d}{Q_0} = 1 + \frac{Q_d}{Q_0}. \quad (1-3)$$

Из выражений (1-3) следует, что относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества больше единицы и равна единице только для вакуума.

Относительная диэлектрическая проницаемость любого вещества не зависит от выбора системы единиц. В дальнейшем для характеристики качества диэлектриков используется именно эта величина, причем слово «относительная» для краткости опускается.

Соотношение (1-1), приведенное выше, может быть представлено в виде

$$Q = Q_0 \epsilon_r = CU = C_0 U \epsilon_r, \quad (1-4)$$

где C_0 — емкость, которую имел бы данный конденсатор, если бы его электроды разделял вакуум.

Из формулы (1-4) следует, что диэлектрическую проницаемость вещества ϵ_r можно определить как отношение емкости конденсатора с данным диэлектриком к емкости конденсатора тех же размеров, диэлектриком которого является вакуум.

1-3. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Переходя к рассмотрению явления поляризации, следует сказать о двух основных видах поляризации диэлектриков:

поляризация под воздействием электрического поля практически мгновенная, вполне упругая, без рассеяния энергии, т. е. без выделения теплоты;

поляризация, совершаемая не мгновенно, а нарастающая и убывающая замедленно и сопровождаемая рассеянием энергии в диэлектрике, т. е. его нагреванием. Такой вид поляризации называют релаксационной поляризацией.

К первому виду поляризации относятся *электронная* и *ионная*, остальные механизмы принадлежат к *релаксационной* поляризации. Особым механизмом поляризации является резонансная, наблюдаемая в диэлектриках при весьма высоких частотах.

Емкость конденсатора с диэлектриком и накопленный в нем электрический заряд обуславливаются суммарным воздействием различных механизмов поляризации. Разные виды поляризации могут наблюдаться у разных диэлектриков, а также могут быть одновременно у одного и того же материала.

Эквивалентная схема диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, содержит емкости, включенные параллельно источнику напряжения U (рис. 1-1, б). Емкость C_0 и заряд Q_0 соответствуют собственному полю электродов, если между ними нет диэлектрика (вакуум). Величины C_3 и Q_3 соответствуют электронной поляризации.

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около 10^{-15} с). Диэлектрическая проницаемость вещества с чисто электронной поляризацией численно равна квадрату показателя преломления света n . Смещение и деформация электронных орбит атомов или ионов не зависит от температуры, однако электронная поляризация вещества уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема. Изменение диэлектрической проницаемости диэлектрика с электронной поляризацией при изменении температуры обуславливается лишь изменением его плотности (подробнее см. далее стр. 23). Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерей энергии.

Ионная поляризация ($C_{и}$, $Q_{и}$ на рис. 1-1, б) характерна для твердых тел с ионным строением и обуславливается смещением упруго-связанных ионов. С повышением температуры она усиливается в результате ослабления упругих сил, действующих между ионами, из-за увеличения расстояния между ними при тепловом расширении.

Время установления ионной поляризации около 10^{-13} с.

Дипольно-релаксационная поляризация ($C_{д-р}$, $Q_{д-р}$, $\tau_{д-р}$) для краткости называется дипольной, отличается от электронной и ионной тем, что она связана с тепловым движением частиц. Дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации.

Дипольная поляризация возможна, если молекулярные силы не препятствуют диполям ориентироваться вдоль поля. С увеличением температуры молекулярные силы ослабевают, вязкость вещества понижается, что должно усиливать дипольную поляризацию, однако в то же время возрастает энергия теплового движения молекул, что уменьшает ориентирующее влияние поля. Поэтому с увеличением температуры дипольная поляризация сначала возрастает (пока ослабление молекулярных сил сказывается сильнее, чем возраста-

ние хаотического теплового движения), а затем, когда хаотическое движение становится интенсивнее, дипольная поляризация с ростом температуры начинает падать.

Поворот диполей в направлении поля в вязкой среде требует преодоления некоторого сопротивления, а потому дипольная поляризация связана с потерями энергии. На эквивалентной схеме диэлектрика (рис. 1-1, б) это отражено последовательно включенным с емкостью активным сопротивлением $r_{д-р}$. В вязких жидкостях сопротивление поворотам молекул настолько велико, что в быстропеременных полях диполи не успевают ориентироваться в направлении поля, и дипольная поляризация при повышенных частотах приложенного напряжения может полностью исчезать.

Промежуток времени, в течение которого упорядоченность ориентированных полей диполей после его снятия уменьшится вследствие теплового движения в 2,7 раза по сравнению с первоначальным значением, называют *временем релаксации*.

Дипольная поляризация свойственна полярным газам и жидкостям. Этот вид поляризации может наблюдаться также и в твердых полярных органических веществах, но в этом случае поляризация обычно обусловлена уже не поворотом самой молекулы, ауповоротом имеющихся в ней радикалов по отношению к молекуле. Примером вещества с этим видом поляризации является целлюлоза, полярность которой объясняется наличием гидроксильной группы ОН.

В кристаллах с молекулярной решеткой и слабыми Ван-дер-Ваальсовыми связями возможна ориентация и более крупных частиц.

Ионно-релаксационная поляризация ($C_{и-р}$, $Q_{и-р}$, $r_{и-р}$) наблюдается в неорганических стеклах и в некоторых ионных кристаллических неорганических веществах с неплотной упаковкой ионов (см. рис. В-2, б). В этом случае слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля среди хаотического теплового движения смещаются в направлении поля.

После снятия электрического поля ионно-релаксационная поляризация постепенно ослабевает по экспоненциальному закону, а с повышением температуры — заметно усиливается.

Электронно-релаксационная поляризация ($C_{э-р}$, $Q_{э-р}$, $r_{э-р}$) отличается от электронной и ионной и возникает вследствие возбуждения тепловой энергией избыточных (дефектных) электронов или дырок.

Электронно-релаксационная поляризация характерна для диэлектриков с высоким показателем преломления, большим внутренним полем и электронной электропроводностью; например, диоксид титана, загрязненный примесями Nb^{+5} , Ca^{+2} , Ba^{+2} ; диоксид титана с анионными вакансиями и примесью ионов Ti^{+3} ; некоторые соединения на основе оксидов металлов переменной валентности — титана, ниобия, висмута.

Следует отметить высокое значение диэлектрической проницаемости, которое может быть при электронно-релаксационной поляризации, а также наличие максимума в температурной зависимости ϵ_r .

Диэлектрическая проницаемость титаносодержащей керамики с электронно-релаксационной поляризацией в соответствии с теоретическими положениями, уменьшается с возрастанием частоты электрического поля.

Миграционная поляризация (C_m , Q_m , r_m) понимается как дополнительный механизм поляризации, проявляющийся в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях и наличии примесей. Эта поляризация проявляется при низких частотах и связана со значительным рассеянием электрической энергии. Причинами такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т. д.

При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, образуя большие поляризованные области. В слоистых материалах на границах раздела слоев и в приэлектродных слоях может быть накопление зарядов медленно движущихся ионов.

Все емкости эквивалентной схемы на рис. 1-1, б шунтированы сопротивлением $R_{из}$, представляющим собой сопротивление изоляции сквозному току через диэлектрик.

На рис. 1-1 штриховыми линиями показаны также $C_{сп}$, $Q_{сп}$ и $r_{сп}$, относящиеся к механизму *самопроизвольной*, или *спонтанной*, *поляризации*, существующей у сегнетоэлектриков.

В веществах с самопроизвольной поляризацией имеются отдельные области (*домены*), обладающие электрическим моментом в отсутствие внешнего поля. Однако при этом ориентация электрических моментов в разных доменах различна. Наложение внешнего поля способствует преимущественной ориентации электрических моментов доменов в направлении поля, что дает эффект очень сильной поляризации. В отличие от других видов поляризации при некотором значении напряженности внешнего поля наступает насыщение, и дальнейшее усиление поля уже не вызывает возрастания интенсивности поляризации. Поэтому диэлектрическая проницаемость при спонтанной поляризации зависит от напряженности электрического поля. В температурной зависимости ϵ , наблюдается один или несколько максимумов. В переменных электрических полях материалы с самопроизвольной поляризацией характеризуются значительным рассеянием энергии, т. е. выделением теплоты.

1-4. КЛАССИФИКАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ ПО ВИДУ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Все диэлектрики по виду подразделяются на несколько групп.

К первой группе можно отнести диэлектрики, обладающие в основном только электронной поляризацией, например *неполярные* и *слабополярные* твердые вещества в кристаллическом и аморфном состояниях (парафин, сера, полистирол), а также неполярные и слабополярные жидкости и газы (бензол, водород и др.).

Ко второй группе относятся диэлектрики, обладающие одновременно электронной и дипольно-релаксационной поляризациями.

Сюда принадлежат *полярные* (дипольные) органические, полужидкие и твердые вещества (масляно-канифольные компаунды, эпоксидные смолы, целлюлоза, некоторые хлорированные углеводороды и т. п.).

Третью группу составляют *твердые неорганические* диэлектрики с электронной, ионной и ионно-электронно-релаксационной поляризациями. В этой группе целесообразно выделить две подгруппы материалов ввиду существенного различия их электрических характеристик:

диэлектрики с электронной и ионной поляризациями;

диэлектрики с электронной, ионной и релаксационными поляризациями.

К первой подгруппе преимущественно относятся кристаллические вещества с плотной упаковкой ионов [кварц, слюда, каменная соль (см. рис. В-2, а), корунд, рутил]. Ко второй подгруппе принадлежат неорганические стекла, материалы, содержащие стекловидную фазу (фарфор, микалекс), и кристаллические диэлектрики с неплотной упаковкой частиц в решетке.

Четвертую группу составляют *сегнетоэлектрики*, характеризующиеся спонтанной, электронной, ионной и электронно-ионно-релаксационной поляризациями (сегнетова соль, титанат бария и др.).

Приведенная выше классификация диэлектриков отражает в достаточной степени основные электрические свойства.

1-5. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ГАЗОВ

Газообразные вещества характеризуются весьма малыми плотностями вследствие больших расстояний между молекулами. Поэтому диэлектрическая проницаемость всех газов незначительна и близка к единице.

Поляризация газа может быть чисто электронной или же дипольной, если молекулы газа полярны, однако и для полярных газов основное значение имеет электронная поляризация.

Из табл. 1-1 видно, что диэлектрическая проницаемость газа тем выше, чем больше радиус молекулы.

Таблица 1-1

Показатель преломления и диэлектрическая проницаемость некоторых газов

Газ	Радиус молекулы, нм	Показатель преломления n	n^2	Диэлектрическая проницаемость ϵ_r
Гелий	0,112	1,000035	1,000070	1,000072
Водород	0,135	1,00014	1,00028	1,00027
Кислород	0,182	1,00027	1,00054	1,00055
Аргон	0,183	1,000275	1,00055	1,00056
Азот	0,191	1,00030	1,00060	1,00060
Углекислый газ	0,230	1,00050	1,00100	1,00096
Этилен	0,278	1,00065	1,00130	1,00138

Примечание. Приведенные значения справедливы при температуре 20 °С и давлении 760 мм рт. ст. (0,1 МПа).

Таблица 1-2

Зависимость диэлектрической проницаемости некоторых газов от давления при $t = 20^\circ\text{C}$

Газ	Давление, МПа		
	0,1	2	4
Воздух	1,00058	1,0108	1,0218
Углекислый газ	1,00098	1,0200	1,0500
Азот	1,00060	1,0109	1,0550

Таблица 1-3

Зависимость диэлектрической проницаемости воздуха от температуры при $p = 0,1$ МПа

Температура		ϵ_r
$^\circ\text{C}$	К	
+60	333	1,00052
+20	293	1,00058
-60	213	1,00081

Изменение числа молекул в единице объема газа n_0 при изменении температуры и давления вызывает изменение диэлектрической проницаемости газа (табл. 1-2, 1-3). Число молекул N пропорционально давлению и обратно пропорционально абсолютной температуре.

В табл. 1-2 и 1-3 приведены значения ϵ_r для сухих газов. При изменении влажности воздуха его диэлектрическая проницаемость (при $t = 20^\circ\text{C}$ и $p = 0,1$ МПа) изменяется:

Относительная влажность воздуха, %	0	50	100
Диэлектрическая проницаемость	1,00058	1,00060	1,00064

Влияние влажности воздуха незначительно при $t = 20^\circ\text{C}$, но заметно усиливается при повышенной температуре.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости обычно характеризуется выражением

$$\text{TK } \epsilon_r = \alpha_{\epsilon_r} = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dT}. \quad (1-5)$$

По формуле (1-5) можно вычислить относительное изменение диэлектрической проницаемости при повышении температуры на 1 К — так называемый *температурный коэффициент диэлектрической проницаемости*.

Значение ТК ϵ_r неполярного газа можно найти по формуле

$$\text{TK } \epsilon_r = (\epsilon_r - 1)/T.$$

Для воздуха при $t = 20^\circ\text{C}$

$$\text{TK } \epsilon_r = -(1,00058 - 1)/293 = -2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}.$$

Зависимость диэлектрической проницаемости неполярного газа от давления характеризуют выражением

$$\frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dp} = \frac{\epsilon_r - 1}{p}.$$

Для воздуха при $p = 0,1$ МПа

$$\frac{1}{\epsilon_r} \frac{d\epsilon_r}{dp} = \frac{1,00058 - 1}{0,1} = 0,0058 \text{ МПа}^{-1}.$$

Число молекул в единице объема газа n_0 определяется

$$n_0 = p/(kT).$$

1-6. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Жидкие диэлектрики могут быть построены из неполярных молекул или из полярных (дипольных). Значения диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей невелики и близки к значе-

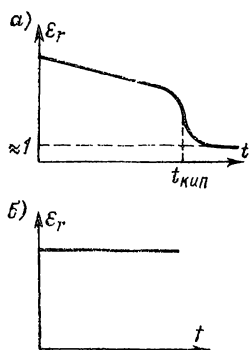


Рис. 1-2. Зависимости диэлектрической проницаемости неполярной жидкости от температуры (а) и от частоты (б)
 $t_{\text{кип}}$ — температура кипения

нию квадрата показателя преломления света $\epsilon_r \approx n^2$.

Зависимость диэлектрической проницаемости неполярной жидкости от температуры (рис. 1-2) связана с уменьшением числа молекул в единице объема, как это пояснялось на стр. 19. По абсолютному значению $\text{ТК}\epsilon_r$ неполярной жидкости приближается к температурному коэффициенту объемного расширения

жидкости β . Следует помнить, что $\text{ТК}\epsilon_r$ и β отличаются знаком. Значение диэлектрической проницаемости неполярных жидкостей обычно не превышает 2,5 (табл. 1-4). Поляризация жидкостей, содержащих дипольные молекулы, определяется одновременно электронной и дипольной поляризациями. Такие жидкости обладают тем большей диэлектрической проницаемостью, чем больше электрический момент диполей и число молекул в единице объема.

Температурная зависимость диэлектрической проницаемости полярных жидкостей (рис. 1-3) более сложная, чем неполярных.

Объяснение хода кривых легко дать на основе рассмотрения механизма дипольной поляризации (см. стр. 19).

Значение $\text{ТК}\epsilon_r$ для различных температур чаще всего находят методом графического дифференцирования кривой $\epsilon_r(t)$ (при $f = \text{const}$), как это показано на рис. 1-3. Например, для определения $\text{ТК}\epsilon_r$ при температуре t_1 и заданной частоте f_1 проводят касательную к кривой в интересующей нас точке (А) и строят на этой прямой, как на гипотенузе, прямоугольный треугольник произвольных размеров.

Отношение его катетов с учетом масштабов ϵ_r и t , деленное на значение ϵ_r в точке А, даст искомое значение температурного коэффициента:

$$\text{ТК}\epsilon_r = \frac{1}{\epsilon_r} \frac{\Delta\epsilon_r}{\Delta t} = \frac{1}{5,5} \frac{2,25}{46} = 0,0089 \text{ К}^{-1}.$$

Этот метод применим для определения $\text{ТК}\epsilon_r$ при любом механизме поляризации и для зависимости $\epsilon_r(t)$ любой формы.

Таблица 1-4

Диэлектрическая проницаемость и ее температурный коэффициент для неполярных и слабополярных жидкостей

Жидкость	n	n^2	ϵ_r	$\text{ТК}\epsilon_r \cdot 10^3, \text{ К}^{-1}$	$\beta \cdot 10^3, \text{ К}^{-1}$
Бензол	1,50	2,250	2,218	—0,93	1,240
Толуол	1,50	2,250	2,294	—1,16	1,100
Четыреххлористый углерод	1,46	2,135	2,163	—0,91	1,227

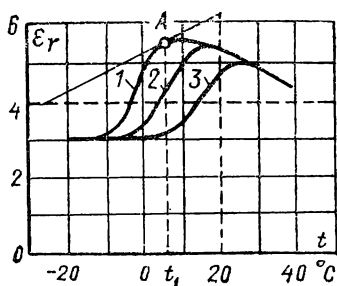


Рис. 1-3

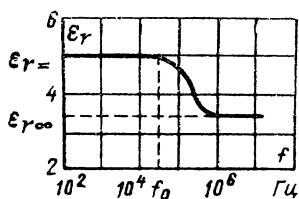


Рис. 1-4

Рис. 1-3. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для полярной жидкости — совола (хлорированного дифенила)

1 — $f_1 = 50$ Гц; 2 — $f_2 = 400$ Гц; 3 — $f_3 = 1000$ Гц

Рис. 1-4. Зависимость диэлектрической проницаемости от частоты для полярной жидкости — совола

Значительное влияние на ϵ_r дипольной жидкости оказывает частота. Зависимость ϵ_r от частоты для полярной жидкости (рис. 1-4) подтверждает положение, высказанное выше: пока частота настолько мала, что диполи успевают следовать за полем, ϵ_r велика и близка к значению $\epsilon_{r\infty}$, определенному при постоянном напряжении. Когда же частота становится настолько большой, что молекулы уже не успевают следовать за изменениями поля, диэлектрическая проницаемость уменьшается, приближаясь к значению $\epsilon_{r\sim}$, обусловленному электронной поляризацией ($\epsilon_{r\sim} = n^2$). Частота f_0 при которой начинается снижение ϵ_r (рис. 1-4), определяется по формуле

$$f_0 = \frac{kT}{8\pi\eta r^3},$$

где η — динамическая вязкость; r — радиус молекулы.

Время релаксации молекул τ_0 связано с частотой f_0 следующим соотношением:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\tau_0}. \quad (1-6)$$

Диэлектрическая проницаемость полярных жидкостей, использующихся в качестве технических диэлектриков, изменяется в пределах 3,5—5, т. е. заметно повышена по сравнению с ϵ_r неполярных жидкостей (см. табл. 1-4).

1-7. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Диэлектрическая проницаемость твердых тел зависит от структурных особенностей твердого диэлектрика. В твердых телах возможны все виды поляризации. Для твердых неполярных диэлектриков характерны те же закономерности, что и для неполярных жидкостей и газов. Это подтверждается данными табл. 1-5 и зависимостью $\epsilon_r(t)$ для парафина, показанной на рис. 1-5. При переходе парафина из твердого состояния в жидкое (температура плавления около

Таблица 1-5

Диэлектрическая проницаемость
и показатель преломления
некоторых неполярных твердых диэлектриков
при температуре 20 °С

Материал	n	n^2	ϵ_r
Парафин	1,43	2,06	1,9—2,2
Полистирол	1,55	2,40	2,4—2,6
Сера	1,92	3,69	3,6—4,0
Алмаз	2,40	5,76	5,6—5,8

54 °С) происходит резкое уменьшение диэлектрической проницаемости вследствие понижения плотности вещества.

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с плотной упаковкой частиц, обладают электронной и ионной поляризацией и имеют диэлектрическую проницаемость, изменяющуюся в широких пределах. Температурный ко-

эффициент диэлектрической проницаемости ионных кристаллов в большинстве случаев положителен. Примером одного из таких диэлектриков служит KCl (рис. 1-6).

Исключением являются кристаллы, содержащие ионы титана (рутил TiO_2 и некоторые титанаты), температурный коэффициент диэлектрической проницаемости которых отрицателен. Это объясняется преобладающей в них электронной поляризацией, усиленной под влиянием добавочного внутреннего поля при ионном смещении.

Твердые диэлектрики, представляющие собой ионные кристаллы с неплотной упаковкой частиц (например, электротехнический фарфор), в которых наблюдается, помимо электронной и ионной, также и ионно-релаксационная поляризация, характеризуются в большинстве случаев сравнительно невысоким значением диэлектрической проницаемости и большим положительным температурным коэффициентом ТК_{ϵ_r} (рис. 1-7).

Насколько различны значения ϵ_r и ТК_{ϵ_r} ионных кристаллических диэлектриков, видно из табл. 1-6.

Для неорганических стекол (квазиаморфных диэлектриков) диэлектрическая проницаемость изменяется в пределах, примерно от 4 до 20, причем ТК_{ϵ_r} стекол положителен.

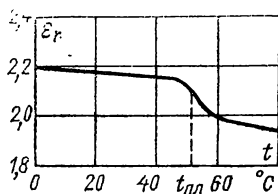


Рис. 1-5

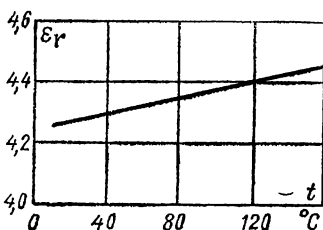


Рис. 1-6

Рис. 1-5. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для неполярного диэлектрика — парафина

Рис. 1-6. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для ионного кристалла KCl

При наличии в стекле легкоподвижных щелочных ионов TK_{ϵ_r} достигает больших значений $+(500 - 1000) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Можно получить материал и с отрицательным TK_{ϵ_r} , если ввести в стекло в виде механической примеси кристаллические компоненты с отрицательным TK_{ϵ_r} , например рутил.

Полярные органические диэлектрики обнаруживают, как указывалось ранее, дипольно-релаксационную поляризацию в твердом состоянии. К таким диэлектрикам относятся целлюлоза и продукты ее переработки, полярные полимеры. Дипольно-релаксационная поляризация наблюдается также у льда. Диэлектрическая проницаемость указанных материалов в большой степени зависит от температуры и от частоты приложенного напряжения, подчиняясь тем же закономерностям, какие наблюдаются для полярных жидкостей.

Можно отметить, что диэлектрическая проницаемость льда резко меняется в зависимости от температуры и частоты (рис. 1-8). При низких частотах и температуре, близкой к 0°C , лед, как и вода, имеет $\epsilon_r \approx 80$, однако с понижением температуры ϵ_r быстро падает и доходит до 2,85.

В табл. 1-7 приведены значения диэлектрической проницаемости некоторых твердых тел.

Как было сказано выше (см. стр. 22), диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков велика и имеет резко выраженную зависимость от напряженности поля и от температуры. Характерной особенностью сегнетоэлектриков является наличие у них *диэлектрического гистерезиса* (отставание изменений электрического смещения от изменений

Таблица 1-6

Значение ϵ_r и TK_{ϵ_r} ионных кристаллов при температуре 20°C

Кристалл	ϵ_r	$\text{TK}_{\epsilon_r} \cdot 10^6, \text{ K}^{-1}$
Каменная соль	6	+150
Корунд	10	+100
Рутил	110	-750
Титанат кальция	150	-1500

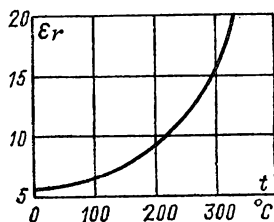


Рис. 1-7

Рис. 1-7. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости электро-технического фарфора

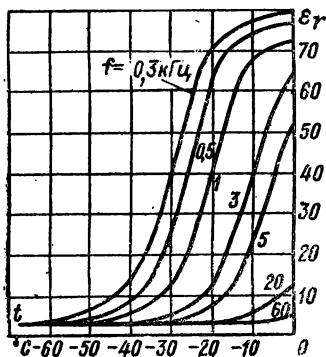


Рис. 1-8

Рис. 1-8. Зависимость диэлектрической проницаемости льда от температуры при различных частотах

**Значение ϵ_r неорганических стекол
и органических полярных диэлектриков при 20 °С**

Неорганическое стекло	ϵ_r	Органический твердый диэлектрик	ϵ_r
Плавленный кварц	4,5	Органическое стекло	4,0
Щелочное стекло	6,5	Фенолформальдегидная смола	4,5
Баритовое стекло	10,0	Целлюлоза	6,5

напряженности электрического поля). К сегнетоэлектрикам относятся сегнетова соль $\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, титанат бария BaTiO_3 , кислый фосфорнокислый калий KH_2PO_4 и др.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры имеет резко выраженный максимум при температуре 125 °С (рис. 1-9). Температура, при которой ϵ_r имеет максимум, называется *температурой (точкой) Кюри*. В области температур выше точки Кюри теряются сегнетоэлектрические свойства материала, в частности исчезает зависимость ϵ_r от напряженности электрического поля. Нелинейная зависимость электрического смещения D от напряженности электрического поля и соответствующая ей сложная зависимость диэлектрической проницаемости приведены на рис. 1-10, а, б. Результаты получены при температуре, близкой к точке Кюри для этого состава.

Приведем значения диэлектрической проницаемости некоторых сегнетоэлектриков в слабых полях при $t = 20^\circ\text{C}$:

Сегнетова соль	500—600
Титанат бария	1500—2000
Титанат бария с добавками . .	7000—9000

В сегнетоэлектриках наблюдается явление электрического старения, выражающееся в уменьшении диэлектрической проницаемости со временем (рис. 1-11). Возможная причина этого явления — перегруппировка доменов. Особенно резкое изменение диэлектрической проницаемости со временем наблюдается в сегнетоэлектриках при температурах, близких к точке Кюри. Нагревание сегнетоэлектрика до температуры выше точки Кюри и последующее охлаждение возвращает диэлектрическую проницаемость к прежнему значению. Такое же восстановление диэлектрической проницаемости можно осуществить, воздействуя на сегнетоэлектрик электрическим полем повышенной напряженности.

Диэлектрическая проницаемость сложных диэлектриков, представляющих собой

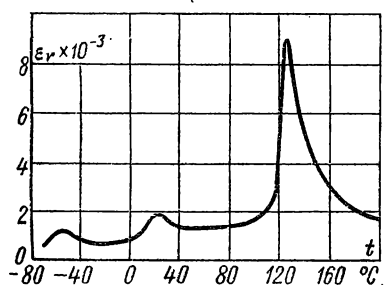
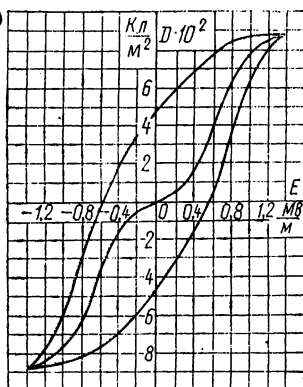


Рис. 1-9. Зависимость диэлектрической проницаемости титаната бария от температуры в слабом электрическом поле

Рис. 1-10. Гистерезисная петля и основная кривая электрического смещения в зависимости от напряженности поля (а), зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности поля (б), построенная исходя из основной кривой $D = f(E)$



механическую смесь двух компонентов с разными диэлектрическими проницаемостями, может быть в первом приближении (при не слишком большом различии диэлектрических проницаемостей — ϵ_r компонентов) определена на основании логарифмического закона смешения, который в общем случае применим для расчета самых различных свойств (например, коэффициента теплопроводности, показателя преломления и др.):

$$\epsilon_r^x = \theta_1 \epsilon_{r1}^x + \theta_2 \epsilon_{r2}^x. \quad (1-7)$$

Здесь ϵ_{r1} — относительная диэлектрическая проницаемость первого компонента смеси;

ϵ_{r2} — относительная диэлектрическая проницаемость второго компонента смеси;

θ_1 — объемная концентрация первого компонента смеси;

θ_2 — объемная концентрация второго компонента смеси;

сумма концентраций удовлетворяет условию: $\theta_1 + \theta_2 = 1$;

x — константа, характеризующая распределение компонентов и принимающая значения от $+1$ до -1 .

В частном случае при параллельном включении компонентов $x = +1$ формула (1-7) принимает вид

$$\epsilon_r = \theta_1 \epsilon_{r1} + \theta_2 \epsilon_{r2}. \quad (1-8)$$

При последовательном включении компонентов, когда $x = -1$:

$$\frac{1}{\epsilon_r} = \frac{\theta_1}{\epsilon_{r1}} + \frac{\theta_2}{\epsilon_{r2}}. \quad (1-9)$$

Наконец, когда оба компонента распределены хаотически (что наблюдается в некоторых интересующих нас технических диэлектриках, например в керамике), x стремится к нулю и, продифференцировав уравнение (1-7) по x , получим

$$\ln \epsilon_r = \theta_1 \ln \epsilon_{r1} + \theta_2 \ln \epsilon_{r2}. \quad (1-10)$$

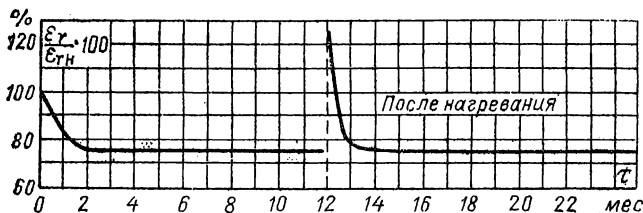
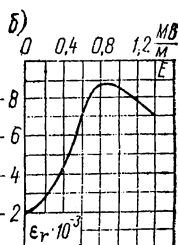


Рис. 1-11. Изменение диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика во времени
 ϵ_{rn} — начальное значение диэлектрической проницаемости

Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости сложного диэлектрика определяется дифференцированием уравнения (1-10) по температуре:

$$\frac{1}{\varepsilon_r} \frac{d\varepsilon_r}{dt} = \frac{\theta_1}{\varepsilon_{r1}} \frac{d\varepsilon_{r1}}{dt} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_{r2}} \frac{d\varepsilon_{r2}}{dt}$$

или

$$TK \varepsilon_r = \theta_1 TK \varepsilon_{r1} + \theta_2 TK \varepsilon_{r2}. \quad (1-11)$$

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите виды поляризации и их особенности.
2. Какие виды поляризации характерны для твердых тел, жидкостей и газов?
3. Какие диэлектрики относят к линейным и нелинейным?

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ

2-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Поляризационные процессы смещения связанных зарядов в веществе до момента установления равновесного состояния протекают во времени, создавая токи смещения, в диэлектриках. Токи смещения упругосвязанных зарядов при электронной и ионной поляризациях столь кратковременны, что их обычно не удается зафиксировать прибором. Токи смещения различных видов замедленной поляризации, наблюдаемые у большого числа технических диэлектриков, называют абсорбционными токами. При постоянном напряжении абсорбционные токи, меняя свое направление, протекают только в моменты включения и выключения напряжения; при переменном напряжении они протекают в течение всего времени нахождения материала в электрическом поле.

Наличие в технических диэлектриках небольшого числа свободных зарядов приводит к возникновению слабых по величине *сквозных токов*. Ток утечки в техническом диэлектрике представляет собой сумму сквозного тока и тока абсорбции. Для плотностей токов можно записать:

$$J_{yt} = J_{ск} + J_{аб}.$$

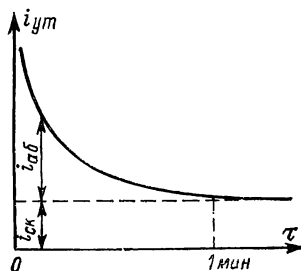
Плотность тока смещения определяется скоростью изменения вектора электрического смещения **D**:

$$J_{см} = \frac{\partial D}{\partial t} \approx J_{аб},$$

обусловленного мгновенными (электронными, ионными) и замедленными смещениями зарядов.

Как видно из рис. 2-1, после завершения процессов поляризации через диэлектрик протекает только сквозной ток. Токи смещения необходимо принимать во внимание при измерениях проводимости

Рис. 2-1. Зависимость тока утечки через диэлектрик от времени



диэлектриков ввиду того, что при небольшой выдержке образца диэлектрика под напряжением обычно регистрируется не только *сквозной ток*, но и сопровождающий его *ток абсорбции*, вследствие чего может создаться неправильное представление о большой проводимости. Проводимость диэлектрика при постоянном напряжении определяется по сквозному току, сопровождающемуся выделением и нейтрализацией зарядов на электродах. При переменном напряжении активная проводимость определяется не только сквозным током, но и активными составляющими абсорбционных токов.

Особенностью электропроводности диэлектриков в большинстве случаев является ее неэлектронный (*ионный*) характер.

Истинное сопротивление диэлектрика $R_{из}$, определяющее сквозной ток, может быть вычислено по следующей формуле:

$$R_{из} = \frac{U}{i_{ут} - \sum i_{аб}} = \frac{U}{i_{ск}}, \quad (2-1)$$

где $i_{ут}$ — наблюдаемый ток утечки; U — приложенное напряжение; $i_{аб}$ — суммарный ток абсорбции.

Поскольку при определении абсорбционных токов даже замедленных видов поляризации возникают некоторые трудности, сопротивление диэлектрика рассчитывают обычно как частное от деления напряжения на ток, измеренный через одну минуту после включения напряжения и принимаемый за сквозной ток.

Для твердых электроизоляционных материалов необходимо различать объемную и поверхностную проводимость.

Для сравнительной оценки объемной и поверхностной проводимости различных материалов пользуются значениями *удельного объемного сопротивления* ρ и *удельного поверхностного сопротивления* ρ_s .

По удельному объемному сопротивлению может быть определена *удельная объемная проводимость*, по удельному поверхностному сопротивлению — *удельная поверхностная проводимость*.

В системе СИ удельное объемное сопротивление ρ равно объемному сопротивлению куба с ребром в 1 м, мысленно вырезанного из исследуемого материала (если ток проходит сквозь куб, от одной его грани к противоположной), умноженному на 1 м.

Для плоского образца материала в однородном поле удельное объемное сопротивление (ом-метр) рассчитывается по формуле

$$\rho = RS/h, \quad (2-2)$$

где R — объемное сопротивление образца, Ом; S — площадь электрода, м²; h — толщина образца, м.

Удельная объемная проводимость γ измеряется в сименсах на метр.

Удельное поверхностное сопротивление равно сопротивлению квадрата (любых размеров), мысленно выделенного на поверхности материала, если ток проходит через квадрат, от одной его стороны к противоположной.

Удельное поверхностное сопротивление (в омах) рассчитывается по формуле

$$\rho_s = R_s d/l, \quad (2-3)$$

где R_s — поверхностное сопротивление образца материала, Ом, между параллельно поставленными электродами шириной d , отстоящими друг от друга на расстояние l .

Удельная поверхностная проводимость γ_s измеряется в сименсах.

Полная проводимость твердого диэлектрика, соответствующая его сопротивлению изоляции, складывается из объемной и поверхностной проводимостей.

Электропроводность изоляционных материалов обуславливается состоянием вещества: газообразным, жидким или твердым, а также зависит от влажности и температуры окружающей среды. Некоторое влияние на проводимость диэлектриков оказывает также напряженность поля в образце, при которой проводится измерение.

При длительной работе под напряжением ток через твердые и жидкие диэлектрики с течением времени может уменьшаться или увеличиваться. Уменьшение тока со временем говорит о том, что электропроводность материала была обусловлена ионами посторонних примесей и уменьшалась за счет электрической очистки образца. Увеличение тока со временем говорит об участии в нем зарядов, являющихся структурными элементами самого материала, и о протекающем в нем под напряжением необратимом процессе старения, способном постепенно привести к разрушению — пробое диэлектрика.

Произведение сопротивления изоляции диэлектрика конденсатора и его емкости принято называть *постоянной времени саморазряда конденсатора*:

$$\tau_0 = R_{из}C.$$

Значение τ_0 определяется из выражения

$$U = U_0 \exp(-\tau/\tau_0);$$

$$U_{\tau_0} = U_0 \exp(-\tau_0/\tau_0) = U_0/e,$$

где U — напряжение на электродах конденсатора спустя время τ после отключения его от источника напряжения; U_0 — напряжение, до которого был заряжен конденсатор ($\tau = 0$); $R_{из}$ — сопротивление изоляции (сопротивление сквозному току); C — емкость конденсатора.

Легко показать, что

$$\tau_0 = R_{из}C = \rho \epsilon_0 \epsilon_r.$$

Величину τ_0 выражают в ом-фарадах или в секундах:

$$\text{Ом} \cdot \text{Ф} = \frac{\text{В}}{\text{А}} \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{В}} = \text{с}.$$

Таким образом, определив постоянную времени как время, по истечении которого напряжение на выводах конденсатора уменьшится вследствие саморазряда в $e = 2,7$ раза, зная вид материала (а следовательно, и его диэлектрическую проницаемость) и предполагая наличие только объемного тока утечки, можно оценить удельное сопротивление использованного диэлектрика.

2-2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ГАЗОВ

Газы при небольших значениях напряженности электрического поля обладают исключительно малой проводимостью. Ток в газах может возникнуть только при наличии в них ионов или свободных электронов. Ионизация нейтральных молекул газа возникает либо под действием внешних факторов, либо вследствие соударений заряженных частиц с молекулами.

Внешними факторами, вызывающими ионизацию газа, являются рентгеновские лучи, ультрафиолетовые лучи, космические лучи, радиоактивное излучение, а также термическое воздействие (сильный нагрев газа). Электропроводность газа, обусловленная действием внешних ионизаторов, называется *несамостоятельной*.

С другой стороны, особенно в разреженных газах, возможно создание электропроводности за счет ионов, образующихся в результате соударения заряженных частиц с молекулами газа. Ударная ионизация возникает в газе в тех случаях, когда кинетическая энергия заряженных частиц, приобретаемая под действием электрического поля, достигает достаточно больших значений. Электропроводность газа, обусловленная ударной ионизацией, носит название *самостоятельной*.

В слабых полях ударная ионизация отсутствует и самостоятельной электропроводности не обнаруживается. При ионизации газа, обусловленной внешними факторами, происходит расщепление молекул на положительные и отрицательные ионы. Одновременно часть положительных ионов, соединяясь с отрицательными частицами, образует нейтральные молекулы. Этот процесс называется *рекомбинацией*.

Наличие рекомбинации препятствует безграничному росту числа ионов в газе и объясняет установление определенной концентрации ионов спустя короткое время после начала действия внешнего ионизатора.

Предположим, что ионизированный газ находится между двумя плоскими параллельными электродами, к которым приложено электрическое напряжение. Ионы под влиянием напряжения будут перемещаться, и в цепи возникает ток. Часть ионов будет нейтрализовываться на электродах, часть — исчезать за счет рекомбинации.

На начальном участке кривой (до напряжения насыщения U_n), характеризующей зависимость тока в газе от напряжения (рис. 2-2), выполняется закон Ома, при этом запас положительных и отрицательных ионов достаточный и его можно считать постоянным. Ток пропорционален напряжению на газовом промежутке. По мере возрастания приложенного напряжения ионы уносятся к электродам,

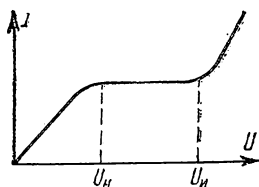


Рис. 2-2. Зависимость тока в газе от напряжения.

не успевая рекомбинировать, и при некотором напряжении все ионы, создаваемые в газовом промежутке, будут разряжаться на электродах. Очевидно, что дальнейшее увеличение напряжения уже не будет вызывать возрастания тока, что соответствует горизонтальному участку кривой на рис. 2-2. Ток насыщения достигается для воздуха в нормальных условиях при расстоянии между электродами, равном 10 мм, и напряженности поля около 0,6 В/м. Реальное значение плотности тока насыщения в воздухе весьма мало и составляет примерно 10^{-16} А/м². Поэтому воздух можно рассматривать как весьма совершенный диэлектрик до тех пор, пока не создадутся условия для появления ударной ионизации. При увеличении напряжения ток остается постоянным лишь до тех пор, пока ионизация осуществляется под действием внешних факторов. При возникновении ударной ионизации появляется самостоятельная электропроводность (при напряжении, большем напряжения ионизации $U_и$), и ток вновь начинает увеличиваться с возрастанием напряжения (рис. 2-2). Для воздуха $E_и \approx 10^6 \div 10^6$ В/м.

2-3. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ЖИДКОСТЕЙ

Электропроводность жидких диэлектриков тесно связана со строением молекул жидкости. В неполярных жидкостях электропроводность зависит от наличия диссоциированных примесей, в том числе влаги; в полярных жидкостях электропроводность определяется не только примесями, но иногда и диссоциацией молекул самой жидкости. Ток в жидкости может быть обусловлен как передвижением ионов, так и перемещением относительно крупных заряженных коллоидных частиц. Невозможность полного удаления способных к диссоциации примесей из жидкого диэлектрика затрудняет получение электроизоляционных жидкостей с малыми значениями удельной проводимости.

Полярные жидкости всегда имеют повышенную проводимость по сравнению с неполярными, причем возрастание диэлектрической проницаемости приводит к росту проводимости. Сильнополярные жидкости отличаются настолько высокой проводимостью, что рассматриваются уже не как жидкие диэлектрики, а как проводники с ионной электропроводностью.

Очистка жидких диэлектриков от содержащихся в них примесей заметно повышает их удельное сопротивление. При длительном пропускании электрического тока через неполярный жидкий диэлектрик также можно наблюдать возрастание сопротивления за счет переноса свободных ионов к электродам (*электрическая очистка*).

Удельная проводимость любой жидкости сильно зависит от температуры. С увеличением температуры возрастает подвижность ионов в связи с уменьшением вязкости и может увеличиваться сте-

пень тепловой диссоциации. Оба эти фактора повышают проводимость.

Математически удельная проводимость жидкого диэлектрика наиболее точно описывается выражением

$$\gamma = A \exp(-a/T), \quad (2-4)$$

где A и a — постоянные, характеризующие данную жидкость.

В большинстве случаев температурная зависимость удельной проводимости жидких диэлектриков от температуры может быть выражена следующей формулой:

$$\gamma = \gamma_0 \exp \alpha t, \quad (2-5)$$

где γ_0 и α — постоянные величины для данной жидкости; t — температура, °C.

Для того чтобы показать зависимость удельной проводимости жидкости от ее вязкости, воспользуемся законом Стокса для движения шара в вязкой среде под действием постоянной силы. При этом установившаяся скорость

$$v = \frac{F}{6\pi r \eta}, \quad (2-6)$$

где F — сила; r — радиус шара; η — динамическая вязкость жидкости.

Сила, действующая на носитель заряда и вызывающая его направленное перемещение,

$$F = qE, \quad (2-7)$$

где q — заряд носителя; E — напряженность электрического поля.

Воспользовавшись общим выражением для удельной проводимости, полученным из закона Ома, запишем

$$\gamma = n_0 q u = n_0 q v / E \quad (2-8)$$

и, подставляя в него выражения (2-6) и (2-7), получим

$$\gamma = \frac{n_0 q^2}{6\pi r \eta}, \quad (2-9)$$

где u — подвижность носителей заряда, равная средней скорости направленного движения носителей, в поле напряженностью, равной единице, $\text{м}^2/(\text{с} \cdot \text{В})$; n_0 — концентрация носителей заряда.

Отсюда

$$\gamma \eta = \frac{n_0 q^2}{6\pi r}. \quad (2-10)$$

Полагая, что n_0 , q , r не изменяются с температурой, т. е. пренебрегая тепловой диссоциацией, из равенства (2-10) получаем, что произведение удельной проводимости и вязкости при разных температурах для данной жидкости остается постоянным (правило Л. В. Писаржевского и П. И. Вальдена).

Из выражения (2-9) при тех же условиях следует, что проводимость возрастает при уменьшении вязкости. При влиянии температуры на степень диссоциации частиц жидкости произведение $\gamma \eta$ не остается постоянным и растет с температурой. Для полярной жидкости — льняного масла — произведение $\gamma \eta$ остается почти

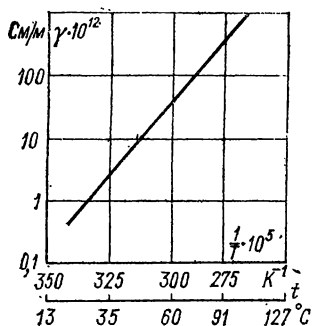


Рис. 2-3

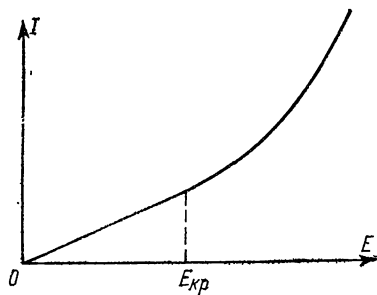


Рис. 2-4

Рис. 2-3. Зависимость удельной проводимости жидкого масляно-канифольного компаунда от величины, обратной абсолютной температуре

Рис. 2-4. Зависимость тока от напряженности поля в жидких диэлектриках

постоянным при разных температурах; электропроводность трансформаторного масла обусловлена движением ионов примесей, степень диссоциации которых с температурой растет, а потому произведение $\eta\eta$ увеличивается с ростом температуры.

Зависимость удельной проводимости жидкого масляно-канифольного компаунда от температуры (рис. 2-3) соответствует уравнению (2-4) при $a = 9100$ К. На рис. 2-3, как и на некоторых последующих, по оси ординат отложена удельная проводимость в логарифмическом масштабе, по оси абсцисс — числа, обратные абсолютным температурам, и соответствующие значения температуры по столбчатой шкале.

При больших напряженностях электрического поля, около 10—100 МВ/м, как показывает опыт, ток в жидкости не подчиняется закону Ома, что объясняется увеличением числа движущихся под влиянием поля ионов.

В отличие от газов в кривой зависимости тока от напряженности поля в жидких диэлектриках отсутствует горизонтальный участок (рис. 2-4). Для жидкостей высокой степени очистки на кривой возможен горизонтальный участок, отвечающий току насыщения (как и для газов).

В табл. 2-1 сопоставляются значения ϵ_r и ρ для различных диэлектриков.

В коллоидных системах наблюдается *молионная*, или *электрофоретическая* электропроводность, при которой носителями заряда являются группы молекул — молионы.

Из коллоидных систем в электротехнике используются *эмульсии* (оба компонента — жидкости), *суспензии* (твердые частицы в жидкости), аэрозоли (твердые и жидкие частицы в газе). При наложении поля молионы приходят в движение, что проявляется как явление электрофореза. Электрофорез отличается от электролиза тем, что при нем не наблюдается образования новых веществ, а лишь меняется относительная концентрация дисперсной фазы в различных слоях жидкости.

Таблица 2-1

**Удельное объемное сопротивление и диэлектрическая проницаемость
некоторых жидкостей при температуре 20 °С**

Жидкость	Особенности строения	ρ , Ом·м	ϵ_r
Бензол	Неполярная	$10^{11}—10^{12}$	2,2
Трансформаторное масло		$10^{10}—10^{13}$	2,3
Бензин			2,0
Совол	Полярная	$10^8—10^{10}$	4,5
Касторовое масло			4,6
Ацетон	Сильнополярная	$10^4—10^5$	22,0
Этиловый спирт			33,0
Дистиллированная вода		$10^3—10^4$	81,0

Электрофоретическая электропроводность наблюдается, в частности, в маслах, содержащих эмульгированную воду, и в органических жидкостях, содержащих смолы.

2-4. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Электропроводность твердых тел обуславливается передвижением как ионов самого диэлектрика, так и ионов случайных примесей, а у некоторых материалов может быть вызвана наличием свободных электронов. Электронная электропроводность наиболее заметна при сильных электрических полях. Вид электропроводности устанавливают экспериментально, используя закон Фарадея. Ионная электропроводность сопровождается переносом вещества. При электронной электропроводности это явление не наблюдается. В процессе прохождения электрического тока через твердый диэлектрик содержащиеся в нем ионы примеси могут частично удаляться, выделяясь на электродах, как это наблюдается в жидкостях.

В твердых диэлектриках ионного строения электропроводность обусловлена главным образом перемещением ионов, освобождаемых под влиянием флуктуаций теплового движения. При низких температурах передвигаются слабозакрепленные ионы, в частности ионы примесей. При высоких температурах освобождаются и некоторые ионы из узлов кристаллической решетки.

В диэлектриках с атомной или молекулярной решеткой электропроводность связана только с наличием примесей, удельная проводимость их весьма мала.

В каждом отдельном случае механизм электропроводности определяется на основании данных об энергии активации носителя заряда. Известно, например, что для каменной соли энергия активации ионов натрия при нормальной температуре составляет примерно 0,85 эВ. Энергия активации ионов хлора в три раза больше, а энергия активации электронов равна 6 эВ, тогда как средняя

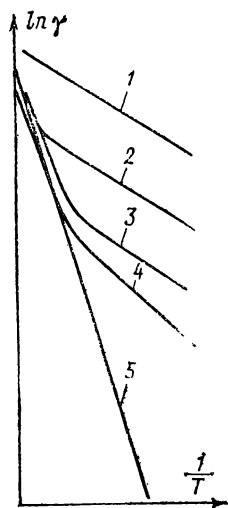


Рис. 2-5. Зависимость удельной проводимости диэлектрика (в логарифмическом масштабе) от величины, обратной абсолютной температуре, в области собственной и примесной электропроводности при различном содержании примеси $N_1 > N_2 > N_3 > N_4$
1, 2, 3, 4 — примесная электропроводность; 5 — собственная электропроводность

энергия теплового движения при комнатной температуре составляет всего лишь 0,025 эВ.

Удельная проводимость при некоторой температуре T выражается той же простой зависимостью, что и для жидкостей [см. формулу (2-8)].

Подвижность электронов на много порядков больше, чем подвижность ионов. В диоксиде титана, например, подвижность электронов составляет примерно 10^{-4} м²/(с·В), тогда как подвижность ионов в алюмосиликатной керамике всего лишь 10^{-13} — 10^{-16} м²/(с·В). В связи

с указанным в диэлектрике с электронной электропроводностью концентрации электронов в 10^9 — 10^{13} раз меньше, чем концентрация носителей в диэлектрике с ионной электропроводностью, при одинаковом заряде носителей и одинаковом значении удельной проводимости.

Полагая, что при ионной электропроводности число диссоциированных ионов и их подвижность находятся в экспоненциальной зависимости от температуры, имеем

$$n_0 = n_{0 \text{ макс}} \exp \left(-\frac{W_0}{kT} \right); \quad u = u_{\text{макс}} \exp \left(-\frac{W_n}{kT} \right), \quad (2-11)$$

где $n_{0 \text{ макс}}$ и $u_{\text{макс}}$ соответствуют значения $T = \infty$, W_0 — энергия освобождения ионов; W_n — энергия перемещения иона, определяющая переход его из одного неравновесного положения в другое.

Используя формулы (2-8), (2-11) и объединяя постоянные $n_{0 \text{ макс}}$, q , $u_{\text{макс}}$ в один коэффициент A , получаем

$$\gamma = A \exp (-b/T), \quad (2-12)$$

где $b = (W_0 + W_n)/k$.

Формула (2-12) показывает, что чем больше значения энергии диссоциации и перемещения, тем сильнее изменяется удельная проводимость с температурой. Численное значение коэффициента b находится из экспериментально полученной зависимости удельной проводимости от величины, обратной температуре.

Ввиду того что обычно $W_0 > W_n$, удельная проводимость при изменении температуры определяется главным образом изменением концентрации носителей.

Формула (2-12) аналогична формуле (2-4), характеризующей удельную проводимость жидкостей, однако коэффициент a в формуле (2-4) отражает подвижность ионов, зависящую от вязкости, в то время как коэффициент b в формуле (2-12), в первую очередь,

учитывает увеличение числа свободных ионов в твердом теле при возрастании температуры. Величина b для твердых веществ изменяется в пределах 10 000—22 000 К.

Если в диэлектрике ток обусловлен передвижением разнородных ионов, то выражение (2-12) имеет вид:

$$\gamma = \sum_i A_i \exp \left(-\frac{W_i}{kT} \right). \quad (2-13)$$

В связи с этим логарифмическая зависимость удельной проводимости от величины, обратной температуре, имеет изломы, что видно из рис. 2-5.

Для приближенных расчетов удельной проводимости твердых диэлектриков можно пользоваться выражением (2-5).

Заменяя в формуле (2-13) γ на $1/\rho$, после преобразований получаем выражение зависимости удельного объемного сопротивления от температуры

$$\rho = B \exp (b/T) \quad (2-14)$$

или

$$\rho = \rho_0 \exp (-\alpha T). \quad (2-15)$$

При использовании выражения (2-14) температурный коэффициент удельного сопротивления

$$TK\rho = \alpha_\rho = -b/T^2, \quad (2-16)$$

т. е. является величиной, зависящей от температуры, а при использовании выражения (2-15)

$$TK\rho = \alpha_\rho = -\alpha. \quad (2-17)$$

В телах кристаллического строения с ионной решеткой электропроводность связана с валентностью ионов. Кристаллы с одновалентными ионами обладают большей проводимостью, чем кристаллы с многовалентными ионами. Так, для кристалла NaCl проводимость значительно выше, чем для кристаллов MgO или Al_2O_3 .

В кристаллах проводимость неодинакова по разным осям кристалла. Так, проводимость кварца в направлении, параллельном главной оси примерно в 1000 раз больше, чем в направлении, перпендикулярном этой оси, что видно из рис. 2-6.

Для большинства ионных кристаллов коэффициент b в формулах (2-12) и (2-14) близок к 10 000 К.

Удельная проводимость аморфных тел одинакова во всех направлениях и обуславливается составом материалов и наличием примесей. У высокомолекулярных органических и элементоорганических полимеров она зависит также от степени полимеризации (например, для фенолформальдегидной смолы) и от степени вулканизации (для эбонита). Органические неполярные аморфные диэлектрики, например полистирол, отличаются очень малой удельной проводимостью.

Большую группу квазиаморфных тел составляют неорганические стекла. Электропроводность стекол самым тесным образом связана

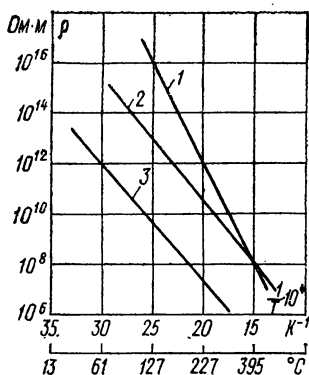


Рис. 2-6

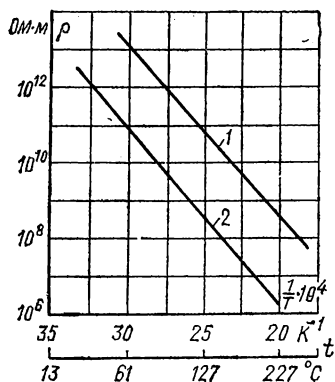


Рис. 2-7

Рис. 2-6. Зависимость удельного объемного сопротивления кварца от величины, обратной абсолютной температуре

1 — плавленый кварц (аморфное состояние); 2 — кристаллический кварц (перпендикулярно главной оси); 3 — кристаллический кварц (параллельно главной оси)

Рис. 2-7. Зависимости удельного объемного сопротивления радиофарфора (кривая 1) и фарфора (кривая 2) от температуры

с химическим составом, что дает возможность в некоторых случаях получать заранее заданное значение удельной проводимости.

Кварцевое стекло — плавленый кварц — и плавленый борный ангидрид обладают весьма малой удельной проводимостью. Температурная зависимость удельной проводимости этих стекол значительна: коэффициент $b \approx 18\,000\text{ K}$, что указывает на большую энергию освобождения ионов.

Введение в состав стекла оксидов металлов разных групп таблицы Менделеева по-разному отражается на электропроводности. Введение в состав стекла оксидов щелочных металлов первой группы сильно увеличивает удельную проводимость, это увеличение зависит от радиуса иона. Ион натрия, имеющий меньший радиус, чем ион калия, увеличивает удельную проводимость в большей мере, чем последний.

Коэффициент b стекла со щелочными ионами близок к $10\,000\text{ K}$.

Введение в состав стекла тяжелых оксидов (например, оксидов бария или свинца) не только нейтрализует вредное влияние щелочных оксидов, но и приводит к значительному понижению удельной проводимости стекол.

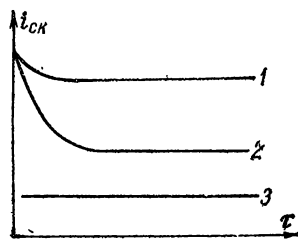
Удельное объемное сопротивление ρ некоторых типичных стекол при 200°C :

	ρ , Ом·м
Натриевый пирекс	$2 \cdot 10^6$
Калиевый пирекс	$8 \cdot 10^9$
Свинцовое стекло	$2 \cdot 10^{10}$

При рассмотрении электротехнического фарфора как системы, содержащей стекло, оказалось возможным понизить удельную проводимость этого диэлектрика введением в его состав оксида бария.

Рис. 2-8. Зависимость сквозного тока от времени при постоянном напряжении

1 — ионная электропроводность (серебряные электроды); 2 — ионная электропроводность (платиновые электроды); 3 — электронная электропроводность (платиновые и серебряные электроды)



Удельное объемное сопротивление электротехнического фарфора ниже, чем у радиофарфора, содержащего оксид бария (рис. 2-7). Твердые пористые диэлектрики при наличии в них влаги, даже в ничтожных количествах, резко увеличивают свою удельную проводимость. Высушивание материалов повышает их удельное сопротивление, но оно падает при нахождении высушенных материалов во влажной среде.

Выше была рассмотрена электропроводность твердых тел при относительно невысоких напряженностях электрического поля. При больших напряженностях поля необходимо учитывать возможность появления в кристаллических диэлектриках электронного тока, быстро возрастающего с увеличением напряженности поля, вследствие чего закон Ома нарушается.

При напряженности поля, превышающей 10—100 МВ/м, зависимость удельной проводимости от напряженности поля может быть выражена эмпирической формулой Пуля:

$$\gamma_E = \gamma \exp \beta E, \quad (2-18)$$

где E — напряженность поля; γ — удельная проводимость в области, в которой соблюдается закон Ома; β — коэффициент, характеризующий материал.

При напряженностях поля, близких к пробивным значениям, более точной оказывается формула Я. И. Френкеля:

$$\gamma_E = \gamma \exp (\beta_1 \sqrt{E}). \quad (2-19)$$

Керамика в отличие от органической изоляции при отсутствии электрического поля практически не стареет, т. е. не происходит необратимых изменений ее свойств под действием высоких температур. Однако в электрическом поле наблюдается электрохимическое старение керамики, часто вызывающее потерю ее электрической прочности. Необратимые изменения свойств в керамике объясняются выходом кислорода из решетки. Наиболее вероятен выход кислорода с поверхности образца и вблизи всякого рода дефектов (трещины, поры и др.). В этом случае возникает отклонение от стехиометрического состава материала, которое может быть устранено лишь путем прокалки образца при высокой температуре в окислительной газовой среде.

Обязательным условием электрохимического старения керамики является участие в электропроводности ионов диэлектрика (с малым радиусом). Если электропроводность чисто электронная, электрохимическое старение невозможно. Старение керамики с электронной и ионной электропроводностью зависит также и от материала электродов (рис. 2-8). Серебро мигрирует в керамику и увеличивает ее проводимость.

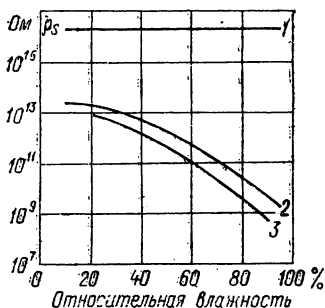
2-5. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Поверхностная электропроводность обусловлена присутствием влаги или загрязнений на поверхности диэлектрика. Вода отличается, как указывалось выше, значительной удельной проводимостью. Достаточно тончайшего слоя влаги на поверхности диэлектрика, чтобы была обнаружена заметная проводимость, определяемая в основном толщиной этого слоя. Однако, поскольку сопротивление адсорбированной пленки влаги связано с природой материала, на поверхности которого она находится, поверхностную электропроводность обычно рассматривают как свойство самого диэлектрика.

Адсорбция влаги на поверхности диэлектрика находится в тесной зависимости от относительной влажности окружающей среды. Поэтому относительная влажность является важнейшим фактором, определяющим значение удельной поверхностной проводимости диэлектрика. Особенно резкое уменьшение удельного поверхностного сопротивления наблюдается при относительной влажности, превышающей 70—80 %.

Удельная поверхностная проводимость тем ниже, чем меньше полярность вещества, чем чище поверхность диэлектрика и чем лучше она отполирована. Наиболее высокими значениями удельного поверхностного сопротивления обладают неполярные диэлектрики, поверхность которых не смачивается водой. Полярные диэлектрики характеризуются более низкими значениями ρ_s , заметно уменьшающимися во влажной среде. Особенно резкое понижение удельного поверхностного сопротивления можно наблюдать у полярных диэлектриков, частично растворимых в воде, у которых на поверхности образуется пленка электролита. Кроме того, к поверхности полярных диэлектриков легко прилипают различные загрязнения, также приводящие к снижению ρ_s . Низкие значения удельного поверхностного сопротивления имеют и объемно-пористые материалы, так как процесс поглощения влаги толщей материала стимулирует также и образование поверхностных пленок воды.

Удельное поверхностное сопротивление церезина, являющегося неполярным диэлектриком, существенно выше по сравнению с ρ_s щелочного стекла и фенопласта и не зависит от влажности окружающей среды (рис. 2-9).



Загрязнение поверхности некоторых диэлектриков уменьшает их удельное поверхностное сопротивление (табл. 2-2).

Стремясь повысить удельное поверхностное сопротивление, применяют разнообразные приемы очистки поверхности: промывку (водой, растворителями), прокаливание при температуре 600—700°C.

Рис. 2-9. Зависимость удельного поверхностного сопротивления от относительной влажности для различных диэлектриков

1 — церезин; 2 — щелочное стекло; 3 — фенопласт

Таблица 2-2

**Удельное поверхностное сопротивление
некоторых материалов
при относительной влажности, равной 70 %**

Диэлектрик	ρ_S при не- очищенной поверхности, Ом	ρ_S после очистки по- верхности, Ом
Щелочное стекло . .	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{11}$
Плавленный кварц	$2 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^{13}$
Микалекс	$1 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{13}$

Наиболее эффективной является очистка поверхности изделия, не впитывающего воду, продолжительным кипячением в дистиллированной воде. Пропитка поверхностных слоев детали церезином не обеспечивает достаточной устойчивости значений ρ_S при высокой влажности ввиду возможности проникновения влаги в микропоры поверхности изделия сквозь защитные покрытия. Покрытие керамики и стекол кремнийорганическими лаками значительно повышает удельное поверхностное сопротивление изделий во влажной среде. В итоге можно сделать следующие выводы. Зависимость удельной поверхностной проводимости от влажности обуславливается наличием на поверхности диэлектрика диссоциирующих на ионы веществ, вода, адсорбируемая поверхностью, способствует их выявлению. Если эти вещества случайно попали на поверхность диэлектрика, то путем их удаления можно получать высокие значения удельного поверхностного сопротивления при любой влажности воздуха. Если вещества, диссоциирующие на ионы, являются составной частью материала, то удельное поверхностное сопротивление будет сильно снижаться при увеличении влажности.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими параметрами оценивают электропроводность диэлектриков?
2. Основные механизмы электропроводности газов, диэлектрических жидкостей и твердых диэлектриков.
3. Чем обуславливается поверхностная электропроводность твердых диэлектриков?

ГЛАВА ТРЕТЬЯ

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

3-1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Диэлектрическими потерями называют мощность, рассеиваемую в диэлектрике при воздействии на него электрического поля и вызывающую нагрев диэлектрика.

Потери в диэлектриках наблюдаются как при переменном напряжении, так и при постоянном, поскольку в материале обнаруживается

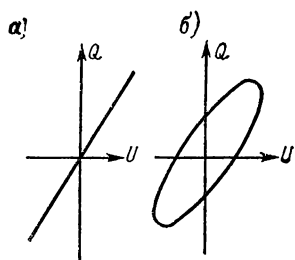


Рис. 3-1. Зависимость заряда от напряжения для линейного диэлектрика без потерь (а), с потерями (б)

сквозной ток, обусловленный проводимостью. При постоянном напряжении, когда нет периодической поляризации, качество материала характеризуется, как указывалось выше, значениями удельных объемного и поверхностного сопротивлений. При переменном напряжении необходимо использо-

вать какую-то другую характеристику качества материала, так как в этом случае, кроме сквозного тока, возникают дополнительные причины, вызывающие потери в диэлектрике.

Диэлектрические потери в электроизоляционном материале можно характеризовать рассеиваемой мощностью, отнесенной к единице объема, или *удельными потерями*; чаще для оценки способности диэлектрика рассеивать мощность в электрическом поле пользуются углом диэлектрических потерь, а также тангенсом этого угла.

Углом диэлектрических потерь называется угол, дополняющий до 90° угол фазового сдвига φ между током и напряжением в емкостной цепи. Для идеального диэлектрика вектор тока в такой цепи будет опережать вектор напряжения на 90° , при этом угол диэлектрических потерь δ будет равен нулю. Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в теплоту, тем меньше угол фазового сдвига φ и тем больше угол δ и его функция $\operatorname{tg} \delta$.

Недопустимо большие диэлектрические потери в электроизоляционном материале вызывают сильный нагрев изготовленного из него изделия и могут привести к его тепловому разрушению. Даже если напряжение, приложенное к диэлектрику, недостаточно велико для того, чтобы за счет диэлектрических потерь мог произойти недопустимый перегрев, то и в этом случае большие диэлектрические потери могут принести существенный вред, увеличивая, например, активное сопротивление колебательного контура, в котором использован данный диэлектрик, а следовательно, и величину затухания.

Природа диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах различна в зависимости от агрегатного состояния вещества. Диэлектрические потери могут обуславливаться сквозным током или, как указывалось при рассмотрении явления поляризации, активными составляющими токов смещения. При изучении диэлектрических потерь, непосредственно связанных с поляризацией диэлектрика, можно характеризовать это явление поляризации кривыми, представляющими зависимость электрического заряда на электродах конденсатора с данным диэлектриком от приложенного к конденсатору напряжения (рис. 3-1). При отсутствии потерь, вызываемых явлением поляризации, заряд линейно зависит от напряжения (рис. 3-1, а) и такой диэлектрик называется *линейным*. Если в линейном диэлектрике наблюдается замедленная поляризация, связанная с потерями энергии, то кривая зависимости заряда от напряжения приобретает вид эллипса (рис. 3-1, б). Площадь этого

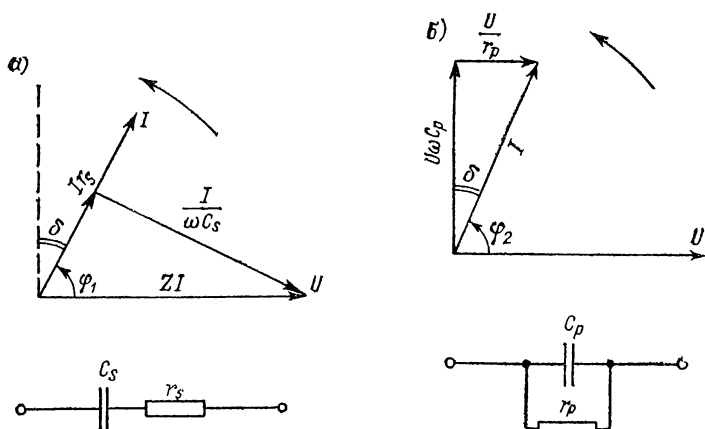


Рис. 3-2. Векторные диаграммы и эквивалентные схемы диэлектрика с потерями:
а — последовательная; б — параллельная

эллипса пропорциональна количеству энергии, которая поглощается диэлектриком за один период изменения напряжения.

Для нелинейного диэлектрика—сегнетоэлектрика—кривая зависимости заряда от напряжения приобретает вид петли гистерезиса, характерной для магнитных материалов (см. рис. 1-10); и в этом случае площадь петли пропорциональна потерям энергии за один период в единице объема диэлектрика.

В технических электроизоляционных материалах, помимо потерь от сквозной электропроводности и потерь от замедленной поляризации, возникают диэлектрические потери, которые сильно влияют на электрические свойства диэлектриков. Эти потери вызываются наличием изолированных друг от друга посторонних проводящих или полупроводящих включений углерода, оксидов железа; они значительны даже при малом содержании таких примесей в электроизоляционном материале.

При высоких напряжениях потери в диэлектрике возникают вследствие ионизации газовых включений внутри диэлектрика, особенно интенсивно происходящей при высоких частотах.

Рассмотрим схему, эквивалентную конденсатору с диэлектриком, обладающим потерями, находящемуся в цепи переменного напряжения. Эта схема должна быть выбрана так, чтобы активная мощность, расходуемая в данной схеме, была равна мощности, рассеиваемой в диэлектрике конденсатора, а ток опережал напряжение на тот же угол, что и в рассматриваемом конденсаторе.

Поставленная задача может быть решена заменой конденсатора с потерями идеальным конденсатором с последовательно включенным активным сопротивлением (рис. 3-2, а) или идеальным конденсатором, шунтированным активным сопротивлением (рис. 3-2, б). Такие эквивалентные схемы, конечно, не дают полностью объяснения механизма диэлектрических потерь в реальных диэлектриках.

Последовательная и параллельная схемы, представленные на рис. 3-2, *a* и *б*, эквивалентны друг другу, если при равенстве полных сопротивлений $z_1 = z_2 = z$ равны их активные и реактивные составляющие. Это условие будет соблюдено, если углы сдвига тока относительно напряжения φ равны и значения активной мощности одинаковы.

Из теории переменных токов известно, что активная мощность

$$P_a = UI \cos \varphi. \quad (3-1)$$

Выразим мощности для последовательной и параллельной схем через емкости C_s и C_p и угол δ , который является дополнением угла φ до 90° .

Для последовательной схемы, используя выражение (3-1) и соответствующую векторную диаграмму, имеем

$$P_a = \frac{U}{z} \frac{U r_s}{z} = \frac{U^2 r_s}{x^2 + r_s^2} = \frac{U^2 r_s}{x^2 \left(1 + \frac{r_s^2}{x^2}\right)} = \frac{U^2 \omega C_s \operatorname{tg} \delta}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad (3-2)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \omega C_s r_s. \quad (3-3)$$

Для параллельной схемы

$$P_a = UI_a = U^2 \omega C_p \operatorname{tg} \delta; \quad (3-4)$$

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C_p r_p}. \quad (3-5)$$

Приравнивая друг к другу выражения (3-2) и (3-4), а также (3-3) и (3-5), находим соотношения между C_p и C_s и между r_s и r_p :

$$C_p = \frac{C_s}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad (3-6)$$

$$r_p = r_s \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}\right). \quad (3-7)$$

Для высококачественных диэлектриков можно пренебречь значением $\operatorname{tg}^2 \delta$ по сравнению с единицей в формуле (3-6) и считать $C_p \approx C_s \approx C$. Выражения для мощности, рассеиваемой в диэлектрике, в этом случае будут одинаковы для обеих схем:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (3-8)$$

где P_a — активная мощность, Вт; U — напряжение, В; ω — угловая частота, с^{-1} ; C — емкость, Ф.

Сопротивление r_p в параллельной схеме, как следует из выражения (3-7), во много раз больше сопротивления r_s .

Выражение для удельных диэлектрических потерь, т. е. мощности, рассеиваемой в единице объема диэлектрика, имеет вид:

$$p = \frac{P_a}{V} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \operatorname{tg} \delta E^2 = \frac{\varepsilon_r f \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}} E^2 = \gamma_a E^2, \quad (3-9)$$

где p — удельные потери, Вт/м^3 ; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота, с^{-1} ; E — напряженность электрического поля, В/м.

Таблица 3-1

Значения $\operatorname{tg} \delta$ и ϵ_r диэлектриков с большими потерями

Характеристика	Увлажненный материал	
	Фенопласт	Кабельная бумага
$\operatorname{tg} \delta$	0,66	0,35
ϵ_r по последовательной схеме . .	28,00	4,80
ϵ_r по параллельной схеме . . .	19,50	4,30

Действительно, емкость между противоположными гранями куба со стороной 1 м будет $C_1 = \epsilon_0 \epsilon_r$, реактивная составляющая удельной проводимости

$$\gamma_c = \omega C_1 = \frac{\epsilon_r f}{1,8 \cdot 10^{10}}, \quad (3-10)$$

а активная составляющая

$$\gamma_a = \frac{\epsilon_r f \operatorname{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{10}}. \quad (3-11)$$

Следует отметить, что емкость диэлектрика с большими потерями становится совершенно условной величиной, зависящей от выбора той или иной эквивалентной схемы. Отсюда и диэлектрическая проницаемость материала с большими потерями при переменном напряжении также условна. Угол диэлектрических потерь от выбора схемы не зависит.

В качестве примера в табл. 3-1 приведены значения ϵ_r для некоторых материалов, имеющих высокое значение $\operatorname{tg} \delta$.

Определив каким-либо методом при некоторой частоте параметры эквивалентной схемы исследуемого диэлектрика (C_p и r_p или C_s и r_s), в общем случае нельзя считать полученные значения емкости и сопротивления присущими данному конденсатору и пользоваться этими данными для расчета угла потерь при другой частоте. Такой расчет может быть сделан только в том случае, если эквивалентная схема имеет определенное физическое обоснование. Так, например, если известно для данного диэлектрика, что потери в нем определяются только потерями от сквозной электропроводности в широком диапазоне частот, то угол потерь конденсатора с таким диэлектриком может быть вычислен для любой частоты, лежащей в этом диапазоне:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1}{\omega C r_p}, \quad (3-12)$$

где C и r_p — постоянные емкость и сопротивление, измеренные при данной частоте.

Потери в таком конденсаторе, как легко видеть, не зависят от частоты:

$$P_a = U^2 / r_p. \quad (3-13)$$

Наоборот, если потери в конденсаторе обуславливаются главным образом сопротивлением подводящих проводов, а также сопротив-

лением самих электродов (например, тонкий слой серебра), то рассеиваемая мощность в таком конденсаторе будет возрастать пропорционально квадрату частоты:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta = U^2 \omega C \omega C r_s = U^2 \omega^2 C^2 r_s. \quad (3-14)$$

Из последнего выражения можно сделать весьма важный практический вывод: конденсаторы, предназначенные для работы на высокой частоте, должны иметь по возможности малое сопротивление как электродов, так и соединительных проводов и переходных контактов.

В большинстве случаев потери в конденсаторе не могут быть полностью объяснены ни первым, ни вторым из вышеприведенных факторов, и тогда необходимо определять параметры конденсатора именно при той частоте, при которой он будет использоваться.

Рассматривая формулы (3-8) и (3-9), можно видеть, что диэлектрические потери приобретают серьезное значение для материалов, используемых в установках высокого напряжения, в высокочастотной аппаратуре и особенно в высоковольтных высокочастотных устройствах, поскольку диэлектрические потери пропорциональны квадрату приложенного к диэлектрику напряжения и частоте поля. Материалы, предназначенные для применения в указанных условиях, должны отличаться малыми значениями угла потерь и диэлектрической проницаемости, так как в противном случае мощность, рассеиваемая в диэлектрике, может стать недопустимо большой.

3-2. ВИДЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ

Диэлектрические потери по их особенностям и физической природе можно подразделить на четыре основных вида:

- 1) диэлектрические потери, обусловленные поляризацией;
- 2) диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью;
- 3) ионизационные диэлектрические потери;
- 4) диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры.

Диэлектрические потери, обусловленные поляризацией, особенно отчетливо наблюдаются в веществах, обладающих релаксационной поляризацией: в диэлектриках дипольной структуры и в диэлектриках ионной структуры с неплотной упаковкой ионов.

Релаксационные диэлектрические потери обусловлены нарушением теплового движения частиц под влиянием сил электрического поля.

В температурной зависимости тангенса угла релаксационных диэлектрических потерь наблюдается максимум при некоторой температуре, характерной для данного вещества. При этой температуре время релаксации частиц диэлектрика примерно совпадает с периодом изменения приложенного переменного электрического поля. Если температура такова, что время релаксации частиц значительно больше полупериода изменения приложенного переменного напряжения,

то тепловое движение частиц будет менее интенсивным, и потери уменьшатся; если температура такова, что время релаксации частиц значительно меньше полупериода изменения напряжения, то интенсивность теплового движения будет больше, связь между частицами уменьшится, в результате чего потери также снизятся.

Диэлектрические потери, наблюдаемые в сегнетоэлектриках, связаны с явлением спонтанной поляризации. Поэтому потери в сегнетоэлектриках значительны при температурах ниже точки Кюри, когда наблюдается спонтанная поляризация. При температурах выше точки Кюри потери в сегнетоэлектриках уменьшаются. Электрическое старение сегнетоэлектрика со временем сопровождается некоторым уменьшением потерь.

К диэлектрическим потерям, обусловленным поляризацией, следует отнести также так называемые *резонансные потери*, проявляющиеся в диэлектриках при высоких частотах. Этот вид потерь с особой четкостью наблюдается в некоторых газах при строго определенной частоте и выражается в интенсивном поглощении энергии электрического поля.

Резонансные потери возможны и в твердых веществах, если частота вынужденных колебаний, вызываемых электрическим полем, совпадает с частотой собственных колебаний частиц твердого вещества. Наличие максимума в частотной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ характерно также и для резонансного механизма потерь, однако в данном случае температура не влияет на положение максимума.

Диэлектрические потери, обусловленные сквозной электропроводностью, обнаруживаются в диэлектриках, имеющих заметную объемную или поверхностную проводимость. Тангенс угла диэлектрических потерь в этом случае можно вычислить по формуле

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon_r f \rho}. \quad (3-15)$$

Диэлектрические потери этого вида не зависят от частоты поля; $\operatorname{tg} \delta$ уменьшается с частотой по гиперболическому закону.

Диэлектрические потери, обусловленные электропроводностью, возрастают с температурой по экспоненциальному закону:

$$P_{aT} = A \exp(-b/T), \quad (3-16)$$

где A , b — постоянные материала. Приближенно формулу (3-16) можно переписать так:

$$P_{aT} = P_{a0} \exp(\alpha t), \quad (3-17)$$

где P_{aT} — потери при температуре t , °C; P_{a0} — потери при температуре 0 °C; α — постоянная материала. Тангенс диэлектрических потерь в зависимости от температуры изменяется по тому же закону, который использован для аппроксимации температурной зависимости P_a , так как температурным изменением емкости можно пренебречь.

Ионизационные диэлектрические потери свойственны диэлектрикам в газообразном состоянии. Ионизационные потери проявляются

в неоднородных электрических полях при напряженностях, превышающих значение, соответствующее началу ионизации данного газа.

Ионизационные потери можно вычислить по формуле

$$P_{a.и} = A_1 f (U - U_{и})^3, \quad (3-18)$$

где A_1 — постоянный коэффициент; f — частота поля; U — приложенное напряжение; $U_{и}$ — напряжение, соответствующее началу ионизации.

Формула (3-18) справедлива при $U > U_{и}$ и линейной зависимости $\operatorname{tg} \delta$ от E . Ионизационное напряжение $U_{и}$ зависит от давления, при котором находится газ, поскольку развитие ударной ионизации молекул связано с длиной свободного пробега носителей заряда.

Диэлектрические потери, обусловленные неоднородностью структуры, наблюдаются в слоистых диэлектриках, из пропитанной бумаги и ткани, в пластмассах с наполнителем, в пористой керамике в миканитах, микалексе и т. д.

Ввиду разнообразия структуры неоднородных диэлектриков и особенностей содержащихся в них компонентов не существует общей формулы расчета диэлектрических потерь этого вида.

3-3. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ГАЗАХ

Диэлектрические потери в газах при напряженностях поля, ниже тех, которые необходимы для развития ударной ионизации молекул газа, очень малы. В этом случае газ можно практически рассматривать как идеальный диэлектрик.

Источником диэлектрических потерь газа может быть в основном только электропроводность, так как ориентация дипольных молекул газов при их поляризации не сопровождается диэлектрическими потерями.

Все газы отличаются весьма малой электропроводностью, и угол диэлектрических потерь в связи с этим будет ничтожно мал, особенно при высоких частотах. Значение $\operatorname{tg} \delta$ может быть вычислено по формуле (3-15).

Удельное объемное сопротивление газов — около 10^{16} Ом·м, $\epsilon_r \approx 1$ и $\operatorname{tg} \delta$ при $f = 50$ Гц (в отсутствие ионизации) менее $4 \cdot 10^{-8}$.

При высоких напряжениях и неоднородном поле, когда напряженность в отдельных местах превышает некоторое критическое значение, молекулы газа ионизируются, вследствие чего в газе возникают потери на ионизацию. Выше (см. стр. 45) уже было сказано, что увеличение $\operatorname{tg} \delta$ с ростом напряжения говорит о наличии газовых включений в твердой изоляции.

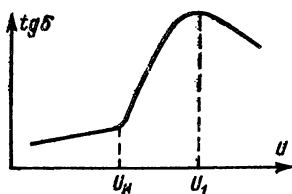
Газовые включения увеличивают $\operatorname{tg} \delta$ с увеличением напряжения (рис. 3-3). При напряжении ионизации $U_{и}$ газ в порах ионизируется и $\operatorname{tg} \delta$ заметно возрастает. При напряжении свыше U_1 начинается пробой газа (см. стр. 59). Зависимость $\operatorname{tg} \delta = f(U)$ часто называют *кривой ионизации*.

Ионизация газа, заполняющего закрытые поры в твердой изоляции, может привести к разогреву и разрушению изделий с газовыми

Рис. 3-3. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от напряжения для изоляции с воздушными включениями

включениями. Ионизация воздуха сопровождается образованием озона и оксидов азота, что вызывает химическое разложение органической изоляции, содержащей газы включения.

На линиях электропередачи высокого напряжения потери на ионизацию воздуха у поверхности проводов (явление короны) снижают КПД линии.



3-4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

В неполярных жидкостях диэлектрические потери обусловлены только электропроводностью, если жидкость не содержит примесей с дипольными молекулами. Удельная проводимость неполярных чистых жидкостей, как было указано ранее, чрезвычайно мала, благодаря чему малы и диэлектрические потери. Примером может служить тщательно очищенное от примесей нефтяное конденсаторное масло, $\operatorname{tg} \delta$ которого очень мал и может быть рассчитан по формуле (3-15).

Полярные жидкости в зависимости от условий (температура, частота) могут обладать заметными потерями, связанными с дипольно-релаксационной поляризацией, помимо потерь, обусловленных электропроводностью.

Применяемые в технике жидкие диэлектрики часто представляют собой смеси неполярных и полярных веществ (например, масляно-канифольные компаунды) или являются полярными жидкостями (совол).

У жидких диэлектриков с полярными молекулами заметно проявляется зависимость диэлектрических потерь от вязкости. Удельная проводимость таких жидкостей при комнатной температуре 10^{-10} — 10^{-11} См/м. Диэлектрические потери, наблюдаемые в полярных вязких жидкостях при переменном напряжении, значительно превосходят потери, обусловленные электропроводностью. Такие потери называют *дипольно-релаксационными потерями*. Объяснение природы потерь в полярных вязких жидкостях можно дать, основываясь на представлениях о механизме дипольно-релаксационной поляризации.

Дипольные молекулы, следуя за изменением электрического поля, поворачиваются в вязкой среде и вызывают потери электрической энергии на трение с выделением теплоты. Если вязкость жидкости достаточно велика, молекулы не успевают следовать за изменением поля и дипольная поляризация практически исчезает; диэлектрические потери при этом будут малы. Дипольные потери будут также малы, если вязкость жидкости мала и ориентация молекул происходит без трения. При средней вязкости дипольные потери могут быть существенны и при некотором значении вязкости имеют максимум. Температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ (рис. 3-4) мас-

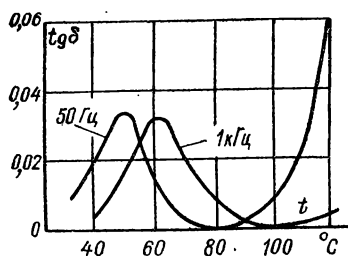


Рис. 3-4

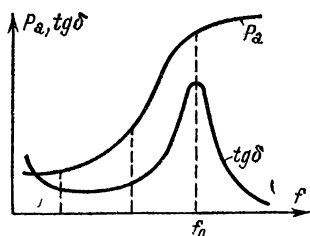


Рис. 3-5

Рис. 3-4. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры при разных частотах для масляно-канифольного компаунда

Рис. 3-5. Зависимость рассеиваемой мощности и $\operatorname{tg} \delta$ от частоты для дипольной жидкости

ляно-канифольного компаунда при двух значениях частоты представляет собой в измененном масштабе температурную зависимость диэлектрических потерь P_a .

При повышении частоты максимум $\operatorname{tg} \delta$ смещается в область более высокой температуры: большая частота требует меньшего времени релаксации, необходимого для получения максимума угла потерь, а для уменьшения времени релаксации необходимо снижение вязкости, т. е. повышение температуры.

Наименьшие значения $\operatorname{tg} \delta$ на рис. 3-4 соответствуют температурам, при которых вязкость жидкости становится настолько малой, что ориентация диполей происходит практически без трения. Потери в этом случае малы. Дальнейшее возрастание $\operatorname{tg} \delta$ с повышением температуры объясняется ростом электропроводности, определяющей механизм диэлектрических потерь при повышенных температурах.

Рассеиваемая мощность P_a при дипольно-релаксационных потерях в жидком диэлектрике возрастает с частотой до тех пор, пока поляризация успевает следовать за изменением поля (рис. 3-5). Когда же частота становится настолько велика, что дипольные молекулы уже не успевают полностью ориентироваться в направлении поля и $\operatorname{tg} \delta$ падает, то потери P_a становятся постоянными в соответствии с формулой (3-8). Таким образом, зависимость диэлектрических потерь P_a от частоты не соответствует частотной зависимости $\operatorname{tg} \delta$.

Дипольно-релаксационные потери в маловязких жидкостях при низких частотах незначительны и могут быть меньше потерь сквозной электропроводности. Ниже для сравнения приведены значения ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ для неполярной и полярной жидкостей при частоте 50 Гц:

	ϵ_r	$\operatorname{tg} \delta$
Трансформаторное масло	2,3;	0,001
Совол	4,5;	0,020

Как видно, тангенс угла диэлектрических потерь неполярной жидкости, например трансформаторного масла, значительно меньше, чем полярной жидкости — совола.

3-5. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКАХ

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках необходимо рассматривать в связи с их структурой. Твердые вещества обладают разнообразным составом и строением; в них возможны все виды диэлектрических потерь.

Для удобства рассмотрения диэлектрических потерь в твердых веществах последние можно подразделить на четыре группы: диэлектрики молекулярной структуры, ионной структуры, сегнетоэлектрики и диэлектрики неоднородной структуры.

Диэлектрические потери в диэлектриках молекулярной структуры зависят от вида молекул.

Диэлектрики с неполярными молекулами, не имеющие примесей, обладают ничтожно малыми диэлектрическими потерями. К таким диэлектрикам относятся: церезин, неполярные полимеры — полиэтилен, политетрафторэтилен, полистирол и др. Указанные вещества в связи с их весьма малыми потерями применяются в качестве высокочастотных диэлектриков.

Диэлектрики молекулярной структуры с полярными молекулами представляют собой главным образом органические вещества, широко используемые в технике. К ним принадлежат материалы на основе целлюлозы (бумага, картон), полярные полимеры: полиметилметакрилат (органическое стекло), полиамиды (капрон) и полиуретаны, каучуковые материалы (эбонит), фенолформальдегидные смолы (бакелит), эфиры целлюлозы (ацетилцеллюлоза), и другие материалы. Эти вещества из-за присущей им дипольно-релаксационной поляризации обладают большими потерями, которые существенно зависят от температуры; при некоторых температурах обнаруживаются максимум и минимум потерь; возрастание потерь после минимума объясняется увеличением потерь от сквозной электропроводности.

У бумажных диэлектриков даже в высушенном состоянии наблюдается максимум $\operatorname{tg} \delta$ при низких температурах (рис. 3-6).

Диэлектрические потери твердых веществ ионной структуры связаны с особенностями упаковки ионов в решетке.

В веществах кристаллической структуры с плотной упаковкой ионов при отсутствии примесей, искажающих решетку, диэлектрические потери весьма малы. При повышенных температурах в таких веществах появляются потери от сквозной электропроводности. К веществам этого типа относятся многочисленные кристаллические неорганические соединения, имеющие большое значение в современном производстве электротехнической керамики, например корунд (Al_2O_3), входящий в состав ультрафарфора. Примером соединений такого рода является также каменная соль, чистые кристаллы которой обладают ничтожными потерями; малейшие примеси, искажающие решетку, резко (на два-три порядка) увеличивают диэлектрические потери.

К диэлектрикам кристаллической структуры с неплотной упаковкой ионов относятся кристаллические вещества, характеризую-

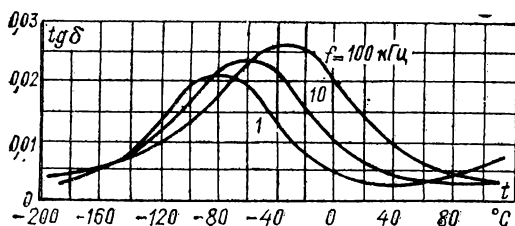


Рис. 3-6

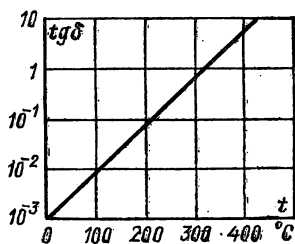


Рис. 3-7

Рис. 3-6. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для высушенной бумаги при различных частотах

Рис. 3-7. Температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ титаносодержащей керамики при частоте 50 Гц

емые релаксационной поляризацией, вызывающей повышенные диэлектрические потери. К этим веществам относятся: муллит, входящий в состав изоляторного фарфора, кордиерит — компонент керамики с малым температурным коэффициентом расширения, β -глинозем, получающийся при обжиге глиноземистых изделий, γ -глинозем, циркон, входящий в состав огнеупорной керамики, и др. (подробнее см. стр. 174).

Так как для большинства видов электрокерамики число ионов, участвующих в релаксационной поляризации, непрерывно возрастает с температурой, то максимум $\operatorname{tg} \delta$ отсутствует и температурная зависимость $\operatorname{tg} \delta$ подобно температурной зависимости удельной проводимости в первом приближении имеет экспоненциальный характер (рис. 3-7).

Диэлектрические потери в аморфных веществах ионной структуры — неорганических стеклах — связаны с явлением поляризации и электропроводности.

Рассматривая механизм диэлектрических потерь в стеклах, следует различать:

а) потери, мало зависящие от температуры и возрастающие прямо пропорционально частоте ($\operatorname{tg} \delta$ не зависит от частоты);

б) потери, заметно возрастающие с температурой по закону экспоненциальной функции и мало зависящие от частоты ($\operatorname{tg} \delta$ уменьшается с возрастанием частоты).

Потери первого вида обуславливаются релаксационной поляризацией и сильно выражены во всех технических стеклах. Чисто кварцевое стекло обладает весьма малыми релаксационными потерями. Введение в плавленный кварц небольшого количества оксидов вызывает заметное возрастание диэлектрических потерь из-за нарушения структуры стекла.

Термическая обработка — отжиг или закалка — заметно влияет на угол диэлектрических потерь стекла в связи с изменением его структуры.

В табл. 3-2 показано влияние способа термической обработки некоторых стекол на тангенс угла потерь.

Таблица 3-2

Влияние термической обработки
на тангенс угла потерь
стекол при 20°C и $f = 1 \text{ МГц}$

Способ обработки	tg δ	
	Стекло силикатно-натриевое	Стекло свинцовое
Длительный отжиг	0,0073	0,0012
Закалка	0,1250	0,0020

Потери второго вида вызываются передвижением слабосвязанных ионов и должны рассматриваться как потери, обусловленные электропроводностью. Такие потери появляются обычно при температурах выше $50\text{—}100^\circ\text{C}$.

Чем большую сквозную электропроводность имеет стекло, тем при более низкой температуре наблюдается возрастание тангенса угла потерь.

Тангенс угла диэлектрических потерь для стекол разного состава уменьшается с ростом удельного сопротивления (рис. 3-8).

Тангенс угла диэлектрических потерь алюмооксида очень мал и почти не зависит от температуры, напротив, tg δ электротехнического фарфора велик и резко зависит от температуры (рис. 3-9).

Диэлектрические потери в неорганических стеклах определяются входящими в стекло оксидами. Наличие в стекле щелочных оксидов (Na_2O , K_2O) при отсутствии тяжелых оксидов (BaO , PbO) вызывает значительное повышение диэлектрических потерь стекла. Введение тяжелых оксидов уменьшает tg δ щелочных стекол.

Диэлектрические потери в сегнетоэлектриках выше, чем у обычных диэлектриков. Особенностью сегнетоэлектриков, как указыва-

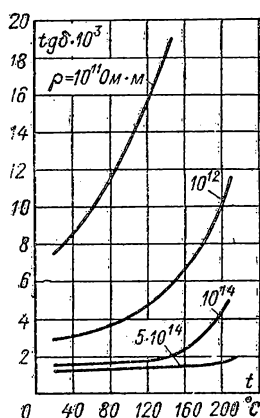


Рис. 3-8

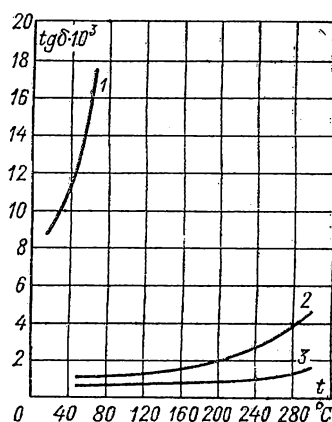


Рис. 3-9

Рис. 3-8. Зависимость tg δ от температуры при частоте 1 МГц для щелочных стекол, имеющих различное удельное объемное сопротивление (значения ρ измерялись при температуре 50°C)

Рис. 3-9. Зависимость tg δ установочной керамики от температуры при частоте 1 МГц

1 — электротехнический фарфор; 2 — ультрафарфор; 3 — алюминоксид

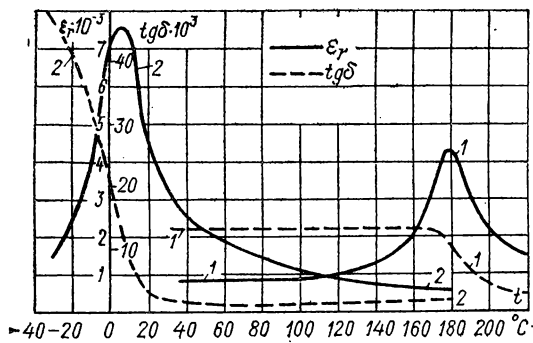


Рис. 3-10

Рис. 3-10. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ и диэлектрической проницаемости от температуры для образцов титаната бария с различными добавками (1 и 2 — номера образцов)

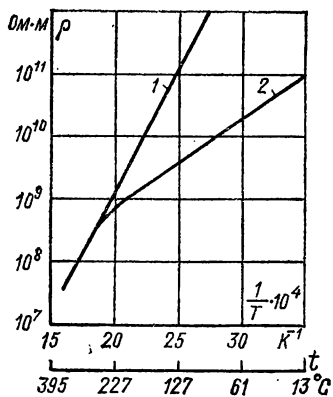


Рис. 3-11

Рис. 3-11. Зависимость удельного объемного сопротивления слюды мусковита от температуры

1 — ρ , измеренное на постоянном токе; 2 — ρ , вычисленное по $\operatorname{tg} \delta$ при $f = 50$ Гц

лось ранее, является наличие в них самопроизвольной поляризации, проявляющейся в определенном температурном интервале, вплоть до точки Кюри. Диэлектрические потери в сегнетоэлектриках мало изменяются с температурой в области самопроизвольной поляризации и резко падают при температуре выше точки Кюри, когда самопроизвольная поляризация исчезает.

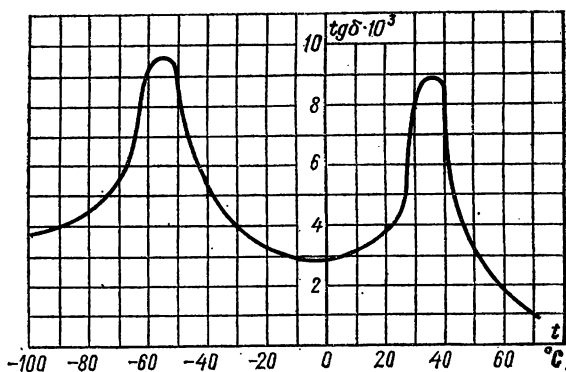
На рис. 3-10 представлены температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости двух керамических сегнетоэлектриков, имеющих разный состав и соответственно этому разные точки Кюри.

Диэлектрические потери в твердых веществах неоднородной структуры. К твердым веществам этого типа, используемым в качестве диэлектриков, принадлежат материалы, в состав которых входит не менее двух компонентов, механически смешанных друг с другом. К неоднородным диэлектрикам относится прежде всего керамика. Любой керамический материал представляет собой сложную многофазную систему. В составе керамики различают кристаллическую фазу, стекловидную и газовую (газы в закрытых порах).

Диэлектрические потери в керамике определяются видом кристаллической и стекловидной фаз и количественного соотношения между ними. Газовая фаза в керамике вызывает повышение диэлектрических потерь при высоких напряженностях поля вследствие развития ионизации (см. стр. 50).

Потери в керамике могут оказаться повышенными, если в процессе производства в керамическом изделии образуются полупроводящие включения с электронной электропроводностью. Увеличение потерь в керамике происходит также за счет адсорбированной влаги при наличии открытой пористости (см. стр. 42, 45).

Рис. 3-12. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для конденсаторной бумаги, пропитанной компаундом (80 % канифоли и 20 % трансформаторного масла)



К числу неоднородных материалов следует отнести слюду, обладающую слоистой структурой. Наличие полупроводящих прослоек в пластинках слюды вызывает увеличение $\operatorname{tg} \delta$

при переменном напряжении низкой частоты по сравнению со значением $\operatorname{tg} \delta$ самих весьма тонких монокристаллов этого материала. Как видно из рис. 3-11, значения удельного объемного сопротивления слюды мусковита при постоянном токе и при переменном токе совпадают лишь при высоких температурах, когда активная проводимость определяется только электропроводностью самой слюды.

Пропитанную бумагу следует также отнести к диэлектрикам неоднородной структуры. Такая бумага, кроме волокон целлюлозы, содержит пропитывающее вещество того или иного состава. Диэлектрические потери пропитанной бумаги определяются электрическими свойствами обоих компонентов, их количественным соотношением и остаточными воздушными включениями.

Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры для бумаги, пропитанной масляно-канифольным компаундом (рис. 3-12), имеет два максимума: первый (при низких температурах) характеризует дипольно-радикальные потери самой бумаги (целлюлозы), второй (при более высокой температуре) обусловлен дипольно-релаксационными потерями пропитывающего компаунда.

В электроизоляционной технике применяется большое количество композиционных материалов. В одних случаях это определяется требованиями механической прочности (волокнистая основа), в других — удешевлением стоимости и приданием необходимых свойств (наполнители в пластмассах и резинах), в третьих — использованием ценных отходов (сланцевые материалы и т. д.).

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких случаях интересуются диэлектрическими потерями в материалах и с помощью каких параметров оценивают их величину?
2. Каковы основные виды диэлектрических потерь и зависимости их от внешних факторов?
3. Какие диэлектрики относят к высокочастотным?

ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ

4-1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЯВЛЕНИЯ ПРОБОЯ

Диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название *пробоя диэлектрика* или нарушения его электрической прочности. Значение напряжения, при котором происходит пробой диэлектрика, называется *пробивным напряжением*, а соответствующее значение напряженности поля — *электрической прочностью диэлектрика*.

Пробивное напряжение обозначается $U_{пр}$ и измеряется чаще всего в киловольтах. Электрическая прочность определяется пробивным напряжением, отнесенным к толщине диэлектрика в месте пробоя:

$$E_{пр} = U_{пр}/h, \quad (4-1)$$

где h — толщина диэлектрика.

Удобные для практических целей численные значения электрической прочности диэлектриков получаются, если пробивное напряжение выражать в киловольтах, а толщину диэлектрика — в миллиметрах. Тогда электрическая прочность будет в киловольтах на миллиметр. Для сохранения численных значений и перехода к единицам системы СИ можно пользоваться единицей МВ/м:

$$1 \text{ МВ/м} = 1 \text{ кВ/мм} = 10^6 \text{ В/м.}$$

Пробой газа обуславливается явлением ударной и фотонной ионизации. Пробой жидких диэлектриков происходит в результате ионизационных и тепловых процессов. Одним из главнейших факторов, способствующих пробую жидкостей, является наличие в них посторонних примесей. Пробой твердых тел может вызываться как электрическим, так и тепловым процессами, возникающими под действием поля.

Явление электрического пробоя связано с электронными процессами в диэлектрике, возникающими в сильном электрическом поле и приводящими к внезапному резкому местному возрастанию плотности электрического тока к моменту пробоя.

Тепловой пробой является следствием уменьшения активного сопротивления диэлектрика под влиянием нагрева в электрическом поле, что приводит к росту активного тока и дальнейшему увеличению нагрева диэлектрика вплоть до его термического разрушения.

При длительном действии напряжения пробой может быть вызван электрохимическими процессами, происходящими в диэлектрике под воздействием электрического поля.

Из изложенного следует, что пробой газов — явление чисто электрическое. Поэтому все численные результаты экспериментов по пробую газов относятся к максимальным (амплитудным) значениям

напряжения. Поскольку в разрушении жидких и особенно твердых диэлектриков существенную роль играют тепловые процессы, то при приложении к диэлектрикам переменного напряжения численные значения пробивного напряжения относятся к действующим.

4-2. ПРОБОЙ ГАЗОВ

Внешней изоляцией во многих видах электротехнических конструкций: в трансформаторах, конденсаторах, на линиях электропередачи — служит воздух. Электрическая прочность воздуха в нормальных условиях невелика по сравнению с $E_{пр}$ большинства жидких и твердых диэлектриков.

Небольшое число содержащихся в газе положительных и отрицательных ионов и электронов, находящихся, как и нейтральные молекулы газа, в беспорядочном тепловом движении, при наложении поля получает некоторую добавочную скорость и начинает перемещаться в направлении поля или в противоположном в зависимости от знака заряда. При этом заряженная частица газа приобретает дополнительную энергию

$$W = qU_{\lambda},$$

где q — заряд; U_{λ} — падение напряжения на длине свободного пробега λ .

Если поле достаточно однородно, то можно принять $U_{\lambda} = E\lambda$, где E — напряженность поля. Отсюда

$$W = Eq\lambda. \quad (4-2)$$

Добавочная энергия заряженных частиц сообщается молекулам, с которыми они сталкиваются. Если эта энергия достаточно велика, происходит возбуждение атомов и молекул, связанное с переходом электрона на более удаленную от ядра орбиту, или даже ионизация молекул, т. е. их расщепление на электроны и положительные ионы. Условие, определяющее возможность ионизации:

$$W \geq W_{и}, \quad (4-3)$$

причем W включает в себя и энергию теплового движения, обычно небольшую при нормальной температуре.

Из формул (4-2) и (4-3) получаем:

$$Eq\lambda \geq W_{и}. \quad (4-4)$$

Энергию ионизации $W_{и}$ обычно характеризуют ионизационным потенциалом

$$U_{и} = W_{и}/q. \quad (4-5)$$

Ионизационный потенциал большинства различных газов изменяется в пределах от 4 до 25 В, что соответствует энергии ионизации 4—25 эВ.

При заданных значениях давления газа и температуры ударная ионизация начинается при определенной напряженности поля, по-

скольку q и λ постоянны для каждого газа. Эта напряженность поля E_{II} называется *начальной напряженностью*.

В некоторых газах, например в кислороде, углекислом газе, парах воды, отделившийся электрон при одной из ближайших встреч с другой нейтральной молекулой соединяется с ней, превращая ее в электроотрицательный ион. Присоединение, «прилипание» электрона к нейтральной молекуле приводит в подобных случаях к такой перестройке ее электронной оболочки, что в итоге энергия молекулы, захватившей лишний электрон, оказывается меньше энергии нейтральной молекулы на некоторую величину, которую называют *энергией сродства к электрону*. Она колеблется у большинства различных газов 0,75—4,5 эВ. В инертных газах — в аргоне, неоне, гелии, криптоне, ксеноне, а также в азоте — отрицательные ионы не возникают. При разряде в воздухе образуются положительные ионы O^+ , O_2^+ , N^+ , N_2^+ , NO^+ .

Скорость электрона (километр в секунду), прошедшего без столкновений разность потенциалов U (вольт), определяется выражением

$$v \approx 600 \sqrt{U}. \quad (4-6)$$

Подставляя в эту формулу ионизационные потенциалы, видим, что электрон ионизирует газовые молекулы, когда скорость его движения свыше 1000 км/с.

Казалось бы, что, подобно электронам, и положительные ионы, разогнанные полем, сталкиваясь с нейтральными частицами газа, должны вызывать ионизацию газа. В действительности при энергиях до сотен и тысяч электрон-вольт соударения положительных ионов с частицами газа непосредственно не приводят к ионизации газа. Такое различное действие электронов и положительных ионов на частицы газа объясняется тем, что электроны имеют значительно большую подвижность, чем ионы. Кроме того, отщепляемый электрон отталкивается электроном, столкнувшимся с частицей газа, и, наоборот, притягивается положительным ионом. Сказывается также и то, что для электрона длина свободного пробега больше, чем для иона. Если положительный ион, разогнанный полем, испытывает соударение с периферическим электроном нейтральной частицы, то условия для отщепления электрона оказываются неблагоприятными, так как при большом различии массы энергия, отдаваемая электрону при ударе, мала. Ионизация при соударении ионов с частицами газа зависит от химической природы столкнувшихся частиц, ибо соударения являются элементарным актом химической реакции. При разряде в газе, находящемся между металлическими электродами, положительные ионы высвобождают электроны из металла, бомбардируя поверхность катода.

В некоторых случаях электрон, разогнанный полем, может не ионизировать молекулу, а привести ее, как указывалось выше, в возбужденное состояние. В следующий момент эта возбужденная молекула отдает свою избыточную энергию в форме излучения — испускает фотон. Фотон поглощается какой-либо другой молекулой, которая при этом может ионизироваться. Такая внутренняя *фотон-*

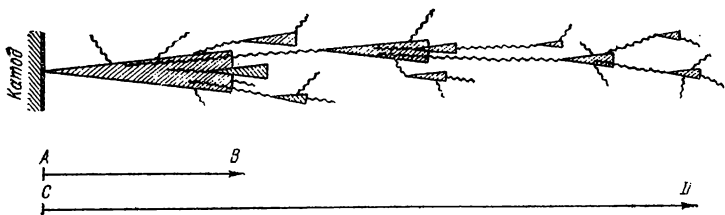


Рис. 4-1. Схематическое изображение распространения стримера при пробое газа

ная ионизация газа благодаря большой скорости распространения излучения приводит к особенно быстрому развитию в разрядном промежутке каналов с повышенной проводимостью газа.

На рис. 4-1 представлена схема, поясняющая, почему рост электропроводящего канала — *стримера* — происходит быстрее, чем продвижение электронной лавины. На рис. 4-1 лавины условно показаны в виде заштрихованных конусов, а волнистыми линиями изображены пути фотонов. Внутри каждого конуса, представляющего собой развивающуюся лавину, газ ионизируется ударами электронов; вновь отщепленные электроны, разгоняемые полем, ионизируют встречаемые ими частицы газа, и таким образом лавинообразно нарастает число электронов, движущихся к аноду, и число положительных ионов, направляющихся к катоду.

Волнистые линии исходят из атомов, которые были возбуждены ударами электронов и вслед за тем испустили фотоны. Двигаясь со скоростью $3 \cdot 10^8$ м/с, фотоны обгоняют лавину и в каком-то месте, соответствующем концу волнистой линии, ионизируют частицу газа. Отщепленный здесь электрон, устремляясь к аноду, порождает новую лавину далеко впереди первой лавины. Таким образом, пока первая лавина вырастает, скажем, на длину малой стрелки *AB* (рис. 4-1), намечающийся канал повышенной проводимости газа, т. е. стример, распространяется на длину большой стрелки *CD*.

В следующей стадии отдельные лавины в отрицательном стримере, нагоняя друг друга, сливаются, образуя сплошной канал ионизированного газа.

Одновременно с ростом стримера, направленного от катода к аноду, начинается образование встречного лавинного потока положительно заряженных частиц, направленного к катоду. Положительный стример представляет собой канал газоразрядной плазмы. Поясним это подробнее. Электронные лавины оставляют на своем пути большое число вновь образованных положительных ионов, концентрация которых особенно велика там, где лавины получили свое наибольшее развитие, т. е. около анода. Если концентрация положительных ионов здесь достигает определенного значения (близкого к 10^{12} ионов в 1 см^3), то, во-первых, обнаруживается интенсивная фотонная ионизация, во-вторых, электроны, освобожденные частицами газа, поглотившими фотоны, притягиваются положительным пространственным зарядом в головную часть положительного стримера и, в-третьих, вследствие ионизации концентрация

положительных ионов на пути стримера увеличивается. Насыщение электронами пространства, заполненного положительными зарядами, превращает эту область в проводящую газоразрядную плазму. Под влиянием ударов положительных ионов на катоде образуется катодное пятно, излучающее электроны. В результате указанных процессов и возникает пробой газа. Обычно пробой газа совершается практически мгновенно: длительность подготовки пробоя газа при длине промежутка 1 см составляет 10^{-7} — 10^{-8} с. Чем больше напряжение, приложенное к газовому промежутку, тем быстрее может развиться пробой. Если длительность воздействия напряжения очень мала, то пробивное напряжение повышается. Это повышение обычно характеризуют коэффициентом импульса

$$\beta = U_{\text{пр}} / U_{\text{пр } 50}, \quad (4-7)$$

где $U_{\text{пр}}$ — пробивное напряжение при данном импульсе; $U_{\text{пр } 50}$ — пробивное напряжение при постоянном или переменном напряжении, частотой 50 Гц. Коэффициент импульса в резко неоднородных электрических полях достигает 1,5.

Явление пробоя газа зависит от степени однородности электрического поля, в котором осуществляется пробой. Рассмотрим явление пробоя газа в *однородном поле*. Однородное поле можно получить между плоскими электродами с закругленными краями, а также между сферами при расстоянии между ними, соизмеримом с диаметром сферы. В таком поле пробой наступает практически мгновенно при достижении строго определенного напряжения, зависящего от температуры и давления газа. Между электродами возникает искра, которая затем переходит в дугу, если источник напряжения имеет достаточную мощность. Появление искры при заданном расстоянии между электродами используют для определения значения приложенного напряжения (измерение высоких напряжений при помощи шаровых разрядников).

При малых расстояниях между электродами наблюдается значительное увеличение электрической прочности воздуха (рис. 4-2).

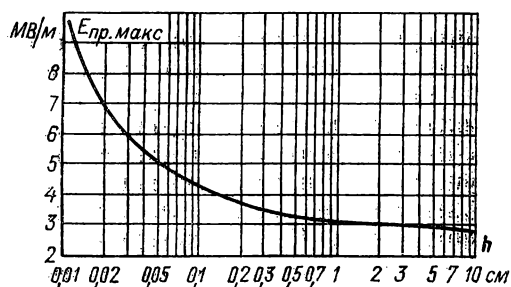


Рис. 4-2

Рис. 4-2. Зависимость электрической прочности воздуха от расстояния между электродами в однородном поле при $f = 50$ Гц, $t = 20^\circ\text{C}$, $p \approx 0,1$ МПа

Это явление можно объяснить трудностью формирования разряда при малом расстоянии между

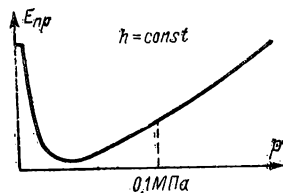


Рис. 4-3

Рис. 4-3. Зависимость электрической прочности газа от давления

электродами. При нормальных условиях, т. е. при давлении 0,1 МПа и температуре около 20 °С, электрическая прочность воздуха при расстоянии между электродами 1 см составляет примерно 3 МВ/м; она достигает 70 МВ/м при $h = 5$ мкм. Электрическая прочность газа в сильной степени зависит от его плотности (т. е. от давления, если температура постоянна). При малых изменениях температуры и давления газа пробивное напряжение пропорционально плотности газа. Поэтому для расчета пробивных напряжений воздуха применяется формула

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пр}0} \delta, \quad (4-8)$$

где $U_{\text{пр}}$ — пробивное напряжение при данных температуре и давлении; $U_{\text{пр}0}$ — пробивное напряжение при нормальных условиях ($t = 20$ °С и $p = 0,1$ МПа). Относительная плотность воздуха δ рассчитана по соотношению

$$\delta = 0,386 \frac{p}{t + 273},$$

где t — температура, °С; p — давление, мм рт. ст. При нормальных условиях $\delta = 1$.

При больших давлениях и соответственно повышенной плотности газа расстояние между отдельными молекулами становится меньше; тем самым уменьшается длина свободного пробега электронов и, как следует из формулы (4-4), для того чтобы пробой произошел, должна быть увеличена напряженность поля.

При уменьшении давления вначале наблюдается падение электрической прочности, как это видно из рис. 4-3; когда же давление доходит до некоторого предела, ниже атмосферного давления, и разрежение достигает высоких степеней, электрическая прочность начинает снова возрастать. Это возрастание объясняется уменьшением числа молекул газа в единице объема при сильном разрежении и снижением вероятности столкновений электронов с молекулами. При высоком вакууме пробой можно объяснить явлением вырывания электронов из поверхности электрода (*холодная эмиссия*). В этом случае электрическая прочность доходит до весьма высоких значений и зависит от материала и состояния поверхности электродов и больше не изменяется («полочка» на рис. 4-3). Большую электрическую прочность вакуума используют в технике при конструировании вакуумных конденсаторов для больших напряжений высокой частоты.

Газы при больших давлениях применяются в качестве изоляции для высоковольтной аппаратуры, а также в производстве кабелей и конденсаторов высокого напряжения.

Химический состав газа заметно влияет на электрическую прочность (см. § 6-2).

Закономерности, которым подчиняется пробой газов в *неоднородном поле*, заметно отличаются от описанных выше закономерностей, наблюдаемых при пробое в однородном поле. Неоднородное поле возникает между двумя остриями, острием и плоскостью, между про-

водами линий электропередачи, между сферическими поверхностями при расстоянии между ними, превышающем диаметр сферы, и т. д.

Особенностью пробоя газа в неоднородном поле является возникновение частичного разряда в виде *короны* в местах, где напряженность поля достигает критических значений, с дальнейшим переходом короны в искровой разряд и дугу при возрастании напряжения.

Между электродами игла — плоскость при положительной полярности иглы пробой происходит при меньшем напряжении, чем при обратной полярности (рис. 4-4). Это объясняется следующим образом. Ионизация газа при любой полярности на электродах происходит около иглы, т. е. там, где существуют наибольшие значения напряженности электрического поля, и, следовательно, около нее образуется «облако» из положительно заряженных ионов — молекул, с орбит которых ушли электроны. При положительной полярности на игле этот объемный заряд служит продолжением иглы и сокращает протяженность разрядного промежутка. Положительный объемный заряд отталкивается и уходит от положительно заряженной иглы, однако более подвижные электроны, обуславливающие процесс ионизации, все время успевают его восстанавливать, т. е. получается картина «прорастания» положительного объемного заряда, связанного с иглой, в сторону отрицательно заряженной плоскости. Поэтому пробой и наступает при меньшем напряжении, чем при противоположной полярности электродов, когда объемный заряд частично нейтрализует и экранирует иглу с отрицательной полярностью от плоскости, заряженной положительно.

При высоких частотах напряжение, соответствующее появлению короны, почти совпадает с пробивным напряжением, которое мало возрастает с уве-

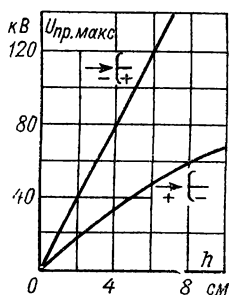


Рис. 4-4

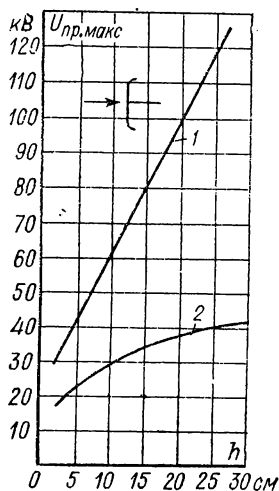


Рис. 4-5

Рис. 4-4. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами в неоднородном поле при $p = 0,1$ МПа

Рис. 4-5. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами при различных частотах

1 — $f = 50$ Гц; 2 — $3,85 \cdot 10^8$ Гц

личением расстояния между электродами (рис. 4-5), этого не наблюдается при промышленной частоте, где зависимость практически линейная. Разряд в воздухе у поверхности твердого диэлектрика, называемый в технике *поверхностным разрядом (перекрытием)*, возникает обычно при более низких напряжениях, чем в том случае, когда между электродами имеется только воздух. На разрядное напряжение влияют форма электрического поля, обусловленная конфигурацией электродов и диэлектрика, частота поля, состояние поверхности диэлектрика, давление воздуха.

Относительная влажность воздуха сильно влияет на разрядные напряжения изоляторов при низкой частоте и постоянном напряжении и мало сказывается при радиочастотах. При частоте 50 Гц повышение относительной влажности воздуха с 60 до 80—90 %, например, снижает почти вдвое разрядные напряжения керамических изоляторов бочоночного типа.

4-3. ПРОБОЙ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Жидкие диэлектрики отличаются более высокой электрической прочностью, чем газы в нормальных условиях.

Предельно чистые жидкости получить чрезвычайно трудно. Постоянными примесями в жидких диэлектриках являются вода, газы и твердые частицы. Наличие примесей и определяет в основном явление пробоя жидких диэлектриков и вызывает большие затруднения для создания точной теории пробоя этих веществ.

Теорию электрического пробоя можно применить к жидкостям, максимально очищенным от примеси. При высоких значениях напряженности электрического поля может происходить вырывание электронов из металлических электродов и, как и в газах, разрушение молекул самой жидкости за счет ударов заряженными частицами. При этом повышенная электрическая прочность жидкого диэлектрика по сравнению с газообразным обусловлена значительно меньшей длиной свободного пробега электронов. Пробой жидкостей, содержащих газовые включения, объясняют местным перегревом жидкости (за счет энергии, выделяющейся в относительно легко ионизирующихся пузырьках газа), который приводит к образованию газового канала между электродами. Вода в виде отдельных мелких капелек, находящихся в трансформаторном масле, при нормальной температуре значительно снижает $E_{пр}$ (рис. 4-6). Под влиянием электрического поля сферические капельки воды — сильно дипольной жидкости — поляризуются, приобретают форму эллипсоидов и, притягиваясь между собой разноименными концами, создают между электродами цепочки с повышенной проводимостью, по которым и происходит электрический пробой.

Электрическая прочность подсушенного масла не зависит от температуры в пределах до 80 °С, когда начинается кипение легких масляных фракций и образование большого числа пузырьков пара внутри жидкости (рис. 4-7). Наличие воды снижает электрическую прочность масла при нормальной температуре. Подъем $E_{пр}$ при

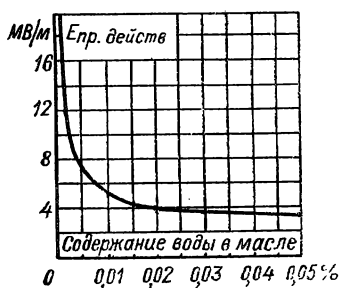


Рис. 4-6

Рис. 4-6. Зависимость электрической прочности от содержания воды в масле
Испытание произведено в стандартном разряднике ($h = 2,5$ мм)

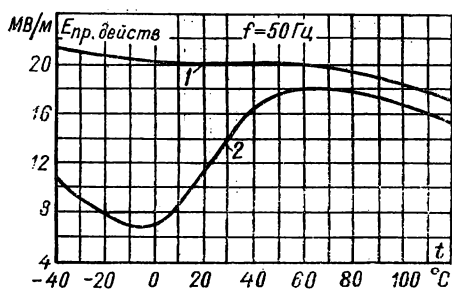


Рис. 4-7

Рис. 4-7. Зависимость электрической прочности трансформаторного масла от температуры

1 — подсушенное масло; 2 — масло, содержащее следы воды

повышении температуры обусловлен переходом воды из состояния эмульсии в состояние молекулярного раствора. Дальнейшее снижение электрической прочности объясняется процессом кипения жидкости. Увеличение электрической прочности при низких температурах связано с увеличением вязкости масла и меньшими значениями диэлектрической проницаемости льда по сравнению с водой (см. рис. 1-8). Сажа и обрывки волокон искажают электрическое поле внутри жидкости и также приводят к снижению электрической прочности жидких диэлектриков.

Очистка жидких диэлектриков, в частности масел, от примесей заметно повышает электрическую прочность. Так, например, неочищенное трансформаторное масло имеет $E_{пр} \approx 4$ МВ/м; после тщательной очистки электрическая прочность масла повышается до 20—25 МВ/м.

4-4. ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Различают четыре вида пробоя твердых диэлектриков:

- 1) электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков;
- 2) электрический пробой неоднородных диэлектриков;
- 3) тепловой (электротепловой) пробой;
- 4) электрохимический пробой.

Каждый из указанных видов пробоя может иметь место для одного и того же материала в зависимости от характера электрического поля (постоянного или переменного, импульсного, низкой или высокой частоты), наличия в диэлектрике дефектов, в частности закрытых пор, от условий охлаждения, времени воздействия на-пряжения.

Электрический пробой макроскопически однородных диэлектриков. Этот вид пробоя характеризуется весьма быстрым развитием, он протекает за время, меньшее 10^{-7} — 10^{-8} с, и не обусловлен тепловой

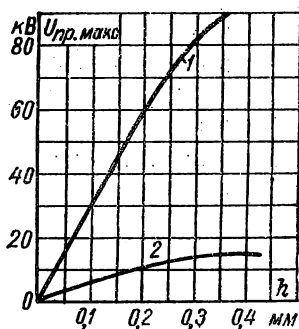


Рис. 4-8

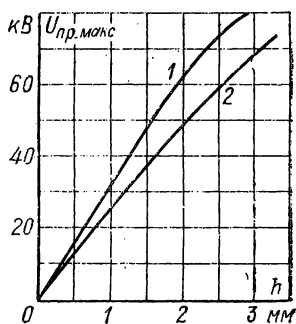


Рис. 4-9

Рис. 4-8. Зависимость пробивного напряжения от толщины при 50 Гц для одного из сортов технического стекла

1 — однородное поле; 2 — резко неоднородное поле

Рис. 4-9. Зависимость пробивного напряжения от толщины при 50 Гц для электро-технического фарфора

энергией, хотя электрическая прочность при электрическом пробое в некоторой степени зависит от температуры.

Электрический пробой по своей природе является чисто электронным процессом, когда из немногих начальных электронов в твердом теле создается электронная лавина. Электроны рассеивают энергию своего движения, накопленную в электрическом поле, возбуждая упругие колебания кристаллической решетки. Электроны, достигшие определенной критической скорости, производят отщепление новых электронов, и стационарное состояние нарушается, т. е. возникает ударная ионизация электронами в твердом теле.

Чисто электрический пробой имеет место, когда исключено влияние электропроводности и диэлектрических потерь, обуславливающих нагрев материала, а также отсутствует ионизация газовых включений. Для однородного поля и полной однородности структуры материала напряженность поля при электрическом пробое может служить мерой электрической прочности вещества. Такие условия удастся наблюдать для монокристаллов щелочно-галогидных соединений и некоторых органических полимеров. В этом случае $E_{пр}$ достигает сотен мегавольт на метр и более.

Для однородных материалов наблюдается заметная разница между значениями пробивного напряжения в однородном и неоднородном полях (рис. 4-8).

Электрический пробой неоднородных диэлектриков. Такой пробой характерен для технических диэлектриков, содержащих газовые включения, и так же, как и электрический пробой однородного диэлектрика, весьма быстро развивается.

Пробивные напряжения для неоднородных диэлектриков, находящихся во внешнем однородном или неоднородном поле, как правило, невысоки и мало отличаются друг от друга (рис. 4-9).

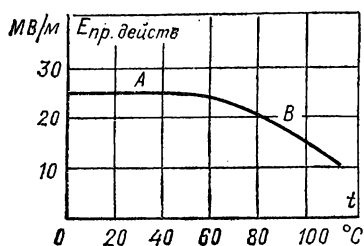


Рис. 4-10. Зависимость электрической прочности электротехнического фарфора от температуры при $f = 50$ Гц
А — область электрического пробоя; В — область теплового пробоя

Принято считать, что в однородном поле электрическая прочность стекол, фарфора и других твердых диэлектриков не зависит от толщины образца. Однако основные работы по изучению влияния степени однородности поля на электрическую прочность проводились лишь со стеклом при очень малых толщинах образцов — от 0,05 до 0,2—0,5 мм, когда число дефектов невелико. Из рис. 4-8 и 4-9 видно, что с увеличением толщины образца усиливается неоднородность структуры, возрастает число газовых включений и снижаются электрические прочности как в однородном, так и в неоднородном поле. Иногда на опыте можно наблюдать, что электрическая прочность керамики при электродах, создающих внешнее неоднородное поле, будет даже выше, чем при электродах, обеспечивающих однородное поле. Так, электрическая прочность образцов рутиловой керамики толщиной 1,6—1,7 мм при постоянном напряжении для электродов игла — плоскость составляет примерно 24 МВ/м, а для плоских электродов — всего 12,5—15 МВ/м.

Из этого следует, что чем меньше площадь электродов, тем выше может быть значение электрической прочности керамических материалов вследствие уменьшения числа инородных включений, попадающих в пределы поля, хотя поле в этом случае резко неоднородное. Снижение электрической прочности твердых диэлектриков при увеличении площади электродов наблюдается не только у керамики, но и у других материалов: бумаги, картона, лакотканей.

Таблица 4-1

Электрическая прочность некоторых твердых диэлектриков в однородном поле при частоте 50 Гц

Материал	$E_{\text{пр. действ.}}$ МВ/м	Особенности структуры
Стекло	100—300	Однородные плотные диэлектрики и слоистые, если поле перпендикулярно слоям
Каменная соль	100—150	
Слюда	100—200	
Пропитанная бумага	100—300	
Органические пленки (полистирол, фторопласт)	100—200	Неоднородные по структуре диэлектрики с закрытыми или сообщающимися между собой капиллярами
Керамика	10—30	
Микалекс	10—15	
Пластические массы с наполнителем (фенолформальдегидные, аминопласты)	8—15	
Пористая керамика	3—5	Диэлектрики с открытыми крупными порами
Дерево	4—5	
Непропитанная кабельная бумага	3—7	

Электрическая прочность твердых диэлектриков практически не зависит от температуры до некоторого ее значения. Выше этого значения наблюдается заметное снижение электрической прочности, что говорит о появлении механизма теплового пробоя (рис. 4-10).

Низкой электрической прочностью отличаются диэлектрики с открытой пористостью (непропитанная бумага, дерево, пористая керамика). Электрическая прочность их сравнительно мало отличается от таковой для воздуха; исключение составляет бумага с повышенной плотностью. Твердые диэлектрики с закрытыми порами, например плотная керамика, характеризуются более высокой электрической прочностью. Наличие газовых включений в твердой изоляции особенно опасно при высоких частотах.

Высокой электрической прочностью характеризуются диэлектрики, имеющие плотную структуру и не содержащие газовых включений. К ним относятся: слюда, бумага, тщательно пропитанная жидким диэлектриком, стекла (табл. 4-1).

4-5. ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ ПРОБОЙ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Тепловой пробой. Тепловой пробой возникает в том случае, когда количество теплоты, выделяющейся в диэлектрике за счет диэлектрических потерь, превышает количество теплоты, которое может рассеиваться в данных условиях; при этом нарушается тепловое равновесие, а процесс приобретает лавинообразный характер.

Явление теплового пробоя сводится к разогреву материала в электрическом поле до температур, соответствующих расплавлению и обугливанию. Электрическая прочность при тепловом пробое является характеристикой не только материала, но и изделия из него, тогда как электрическая прочность при электрическом пробое служит характеристикой самого материала. Пробивное напряжение, обусловленное нагревом диэлектрика, связано с частотой напряжения, условиями охлаждения, температурой окружающей среды. Кроме того, «электротепловое» пробивное напряжение зависит от нагревостойкости материала; органические диэлектрики (например, полистирол) имеют более низкие значения «электротепловых» пробивных напряжений, чем неорганические (кварц, керамика), при прочих равных условиях вследствие их малой нагревостойкости.

Как показано на рис. 4-10, электрическая прочность при тепловом пробое уменьшается с ростом температуры.

Рассмотрим методику упрощенного расчета пробивного напряжения при тепловом пробое. Пусть пластинка однородного диэлектрика, обладающего потерями, находится между двумя электродами, как показано на рис. 4-11. К электродам от достаточно мощного источника переменного тока прикладывается напряжение, которое можно увеличивать до пробивного. Рассеиваемая в диэлектрике мощность будет определяться выражением (3-8).

Механизм теплового пробоя (см. рис. 4-10) наиболее вероятен при повышенных температурах, когда можно ожидать, что преобла-

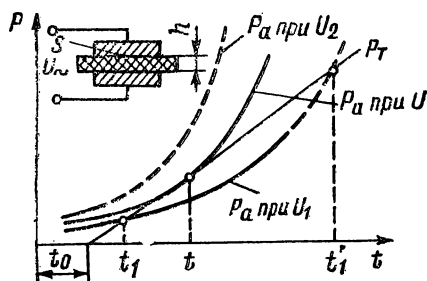


Рис. 4-11. Пояснение к расчету пробивного напряжения при тепловом пробое

дающими будут потери сквозной электропроводности. Поэтому, используя экспоненциальную зависимость $\operatorname{tg} \delta$ от температуры и преобразуя выражение (3-8), получим

$$P_a = \frac{U^2 f \epsilon_r S \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(t-t_0)}}{1,8 \cdot 10^{10} h}, \quad (4-9)$$

где U — приложенное напряжение; f — частота; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость (считаем ее не зависящей от температуры); $\operatorname{tg} \delta_0$ — тангенс угла потерь диэлектрика при температуре окружающей среды; α — температурный коэффициент тангенса угла диэлектрических потерь; t — температура нагретого за счет диэлектрических потерь материала; t_0 — температура электродов, приблизительно равная температуре окружающей среды; S — площадь электрода; h — толщина диэлектрика.

Температура t по всему объему материала, находящемуся в электрическом поле между электродами (краевым эффектом пренебрегаем), одинакова, если толщина диэлектрика не очень велика и теплопроводность его не слишком плохая (достаточно справедливое допущение).

Так как теплопроводность металла электродов за редким исключением на два-три порядка больше, чем теплопроводность диэлектрика, будем считать, что теплота из нагревающегося объема его передается в окружающую среду через электроды. Мощность, отводимую от диэлектрика, выразим с помощью формулы Ньютона:

$$P_T = 2\sigma S (t - t_0), \quad (4-10)$$

где σ — коэффициент теплопередачи системы диэлектрик — металл электродов.

Для наглядности дальнейших рассуждений воспользуемся графическим построением, показанным на рис. 4-11, где в выбранной системе координат изображены экспоненты тепловыделения $P_a = F(t)$ при различных значениях приложенного напряжения и прямая теплопередачи $P_T = \varphi(t)$. При значении приложенного напряжения U_1 прямая теплопередачи является секущей кривой тепловыделения, а следовательно, диэлектрик нагреется до температуры t_1 , при которой наступит состояние устойчивого теплового равновесия, так как мощность тепловыделения равна мощности, отводимой от образца. Если бы по каким-то причинам температура хотя бы немного превысила значение t_1 , то ординаты отводимой мощности были бы больше ординат тепловыделения и образец самопроизвольно должен был бы возвратиться в устойчивое состояние при температуре t_1 . (Считаем, что никаких внешних источников радиации, способных повысить температуру образца выше t'_1 , нет.) Напряжение U_1 будет не опасным для образца диэлектрика в данных условиях, если на-

грев до температуры t_1 не приведет к механическому или химическому разрушению структуры материала. Поэтому начнем увеличивать напряжение и доведем его до такого значения U , при котором прямая теплопередачи окажется касательной к кривой тепловыделения, и, следовательно, будет только неустойчивое тепловое равновесие при температуре t . При значении приложенного напряжения U_2 , большем напряжения U , никакого теплового равновесия не будет, температура станет нарастать безгранично до разрушения диэлектрика. Таким образом, напряжение U , при котором имеет место неустойчивый граничный режим, может быть принято за напряжение теплового пробоя $U_{пр}$. Его можно определить по двум условиям:

$$P_a = P_r; \quad (4-11)$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial t} = \frac{\partial P_r}{\partial t}. \quad (4-12)$$

Условие (4-12) может быть записано только для одного граничного режима, условие (4-11) справедливо для всех случаев устойчивой работы диэлектрика под напряжением.

Используя формулы (4-9)—(4-12), получаем

$$\frac{U^2 f \epsilon_r S \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(t-t_0)}}{1,8 \cdot 10^{10} h} = 2\sigma S(t - t_0); \quad (4-13)$$

$$\frac{\alpha U^2 f \epsilon_r S \operatorname{tg} \delta_0 e^{\alpha(t-t_0)}}{1,8 \cdot 10^{10} h} = 2\sigma S. \quad (4-14)$$

Разделив выражение (4-13) на (4-14), получим

$$1/\alpha = t - t_0. \quad (4-15)$$

Подставляя формулу (4-15) в (4-14) и решая полученное уравнение относительно U , получаем

$$U_{пр} = K \sqrt{\frac{\sigma h}{f \epsilon_r \operatorname{tg} \delta_0 \alpha}}, \quad (4-16)$$

где K — числовой коэффициент, равный $1,15 \cdot 10^3$, если все величины, имеющие размерности, выражены в единицах СИ.

Полученное выражение показывает, что напряжение теплового пробоя будет выше, если условия теплоотвода лучше (σ больше) и диэлектрик толще; а меньше — при высоких частотах, большом коэффициенте диэлектрических потерь $\epsilon_r \operatorname{tg} \delta_0$ и большом температурном коэффициенте тангенса угла потерь α .

В общем случае тепловой пробой — более сложное явление, чем было рассмотрено. По толщине диэлектрика получается перепад температуры, средний слой оказывается нагретым выше, чем прилегающие к электродам, сопротивление первого резко падает, что ведет к искажению электрического поля и повышенным градиентам напряжения в поверхностных слоях. Играет роль также и теплопроводность материала электродов. Все это способствует пробую образцов при более низких напряжениях, чем получаемые из приближенного расчета.

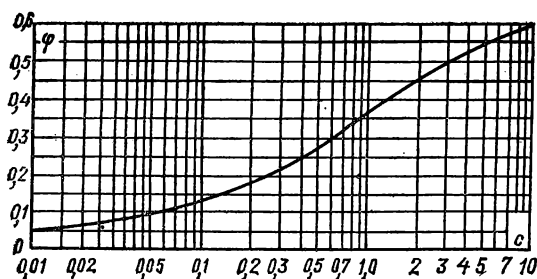


Рис. 4-12. Зависимость $\varphi(c)$, используемая при расчете напряжения теплового пробоя по В. А. Фоку и Н. Н. Семенову

Более строгое рассмотрение механизма теплового пробоя при постоянном и переменном напряжении для одномерного потока теплоты через электроды выполнено В. А. Фоком и

Н. Н. Семеновым. Формулы их пригодны для изделий простейшей конфигурации, в частности для тонких пластин или полых цилиндров с большим отношением длины к диаметру (при радиальном поле). При этом считается, что электроды охватывают всю площадь, перпендикулярную к потоку теплоты, а диэлектрические потери увеличиваются с ростом температуры по экспоненциальному закону.

Ввиду сложности использованного математического аппарата приведем только окончательные выражения:

$$U_{\text{пр.эф}} = 3,82 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\gamma_T}{\epsilon_r \operatorname{tg} \delta_0 \alpha}} \varphi(c). \quad (4-17)$$

Здесь γ_T — коэффициент теплопроводности диэлектрика, Вт/(м·К); $\varphi(c)$ — функция, значения которой для плоских образцов находят по рис. 4-12; c — аргумент, вычисляемый из выражения

$$c = \frac{\gamma_{Ti} \sigma l}{2\gamma_T (\gamma_{Ti} + \sigma l)}, \quad (4-18)$$

где γ_{Ti} — коэффициент теплопроводности материала электродов; σ — коэффициент теплопередачи в электроды, Вт/(м²·К); l — толщина электрода, м.

Расчеты по формуле (4-17) также не всегда дают значение пробивного напряжения, совпадающее с полученным при опыте, так как сделанные допущения могут отличаться от условий на практике. Например, $\operatorname{tg} \delta$ может меняться не обязательно по экспоненциальному закону с постоянным коэффициентом α , коэффициент теплопередачи σ также не постоянен и зависит от многих факторов. Все это говорит о том, что аналитический метод теплового расчета в некоторых случаях не может отобразить сложные закономерности, определяющие процессы выделения теплоты в диэлектрике и рассеивания его в окружающую среду.

Уменьшение электрической прочности с ростом толщины в данном случае объясняется ухудшением теплоотвода от внутренней области диэлектрика.

Электрохимический пробой. Электрохимический пробой электротехнических материалов имеет существенное значение при повышенных температурах и высокой влажности воздуха. Этот вид пробоя наблюдается при постоянном и переменном напряжении низкой частоты, когда в материале развиваются процессы, обуславливающие необратимое уменьшение сопротивления изоляции (электрохимическое старение). Кроме того, электрохимический пробой может иметь место при высоких частотах, если в закрытых порах материала происходит ионизация газа, сопровождающаяся тепловым эффектом и восстановлением, например в керамике, оксидов металлов переменной валентности.

Для развития электрохимического пробоя требуется длительное время, поскольку он связан с явлением электропроводности. В керамике, содержащей оксиды металлов переменной валентности (например, TiO_2), электрохимический пробой встречается значительно чаще, чем в керамике, состоящей из оксидов алюминия, кремния, магния, бария. Электрохимический пробой наблюдается и у многих органических материалов. Электрохимический пробой во многом зависит от материала электродов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем различие в терминах: пробивное напряжение и электрическая прочность материала?
2. Каковы механизмы пробоя газов, жидкостей и твердых тел?
3. Выведите выражение для пробивного напряжения при тепловом пробое по упрощенной теории Н. И. Семенова и В. А. Фока.

ГЛАВА ПЯТАЯ

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

5-1. ВЛАЖНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Электронизоляционные материалы в большей или меньшей степени *гигроскопичны*, т. е. обладают способностью впитывать в себя влагу из окружающей среды, и *влагопроницаемы*, т. е. способны пропускать сквозь себя пары воды. Атмосферный воздух всегда содержит некоторое количество водяного пара.

Абсолютную влажность воздуха оценивают массой m водяного пара, содержащейся в единице объема воздуха (в одном кубическом метре). Каждой температуре соответствует определенное значение абсолютной влажности при насыщении $m_{\text{нас}}$. Большого количества воды воздух содержать не может, и она выпадает в виде росы. Абсолютная влажность, необходимая для насыщения воздуха, резко возрастает с увеличением температуры, т. е. растет и давление водяных паров.

Относительной влажностью воздуха называют выражаемое в процентах отношение

$$\varphi = \frac{m}{m_{\text{нас}}} \cdot 100 = \frac{p}{p_{\text{нас}}} \cdot 100 \% . \quad (5-1)$$

Абсолютной влажности воздуха (при нормальном атмосферном давлении) соответствуют различные значения относительной влажности φ (рис. 5-1). Верхняя кривая соответствует воздуху, полностью насыщенному водяным паром. При температуре 20 °С и нормальном атмосферном давлении 0,1 МПа значение $m_{\text{нас}}$ составляет 17,3 г/м³.

За нормальную влажность воздуха (для различных испытаний, для определения свойств гигроскопических материалов в стандартных условиях увлажнения и т. п.) в СССР принимают относительную влажность воздуха $\varphi = 65 \%$. В воздухе с нормальной влажностью при 20 °С содержание водяных паров $m = 17,3 \cdot 0,65 = 11,25$ г/м³. Вода является сильно полярным диэлектриком с низким удельным сопротивлением, около 10^3 — 10^4 Ом·м, а поэтому попадание ее в поры твердых диэлектриков ведет к резкому снижению их электрических свойств. Особенно заметно воздействие влажности при по-

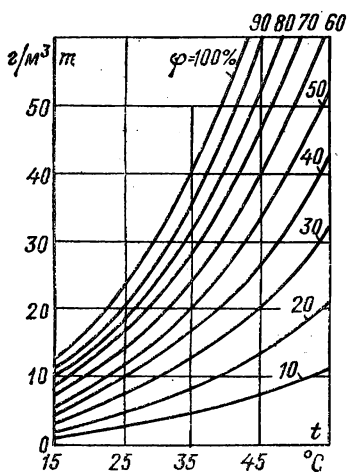


Рис. 5-1. Абсолютная влажность воздуха при нормальном атмосферном давлении и различных значениях относительной влажности в функции температуры

вышенных температурах (30—40 °C) и высоких значениях ϕ , близких к 98—100 %. Подобные условия наблюдаются в странах с влажным тропическим климатом, причем в период дождей они могут сохраняться в течение длительного периода времени, что неблагоприятно сказывается на работе электрических машин и аппаратов. В первую очередь, воздействие повышенной влажности воздуха отражается на поверхностном сопротивлении диэлектриков (см. § 2-5). Для предохранения поверх-

ности электроизоляционных деталей, выполненных из полярных твердых диэлектриков, от действия влажности их покрывают лаками, не смачивающимися водой.

Способность диэлектриков *смачиваться* водой (или другой жидкостью) характеризуется краевым углом смачивания θ капли воды, нанесенной на плоскую поверхность тела. Чем меньше θ , тем сильнее смачивание; для смачиваемых поверхностей $\theta < 90^\circ$ (рис. 5-2, а), для несмачиваемых $\theta > 90^\circ$ (рис. 5-2, б).

При наличии в диэлектрике объемной открытой пористости или при неплотной структуре влага попадает и внутрь материала.

Влажность материалов. Образец электроизоляционного материала, помещенный в среду с определенной влажностью и температурой, через неограниченно большое время достигает состояния с равновесной влажностью. Если сравнительно сухой образец материала поместить во влажный воздух (с относительной влажностью ϕ), то будет наблюдаться постепенное поглощение материалом влаги из воздуха, причем влажность материала ψ , т. е. содержание влаги в единице массы материала, в течение

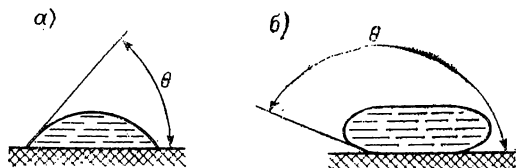


Рис. 5-2

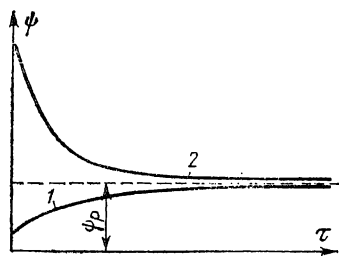


Рис. 5-3

Рис. 5-2. Капля жидкости на смачиваемой поверхности диэлектрика (а) и на несмачиваемой поверхности (б)

Рис. 5-3. Изменение влажности ψ образца материала при увлажнении (кривая 1) и сушке (кривая 2) для постоянных значений относительной влажности окружающего воздуха и температуры

времени τ будет повышаться, асимптотически приближаясь к равновесной влажности φ_p , соответствующей данному значению φ (рис. 5-3, кривая 1). Наоборот, если в воздухе той же относительной влажности φ будет помещен образец того же материала с начальной влажностью, большей φ_p , то влажность образца будет уменьшаться, асимптотически приближаясь к равновесной влажности φ_p ; в этом случае происходит *сушка* материала (кривая 2). Для различных материалов значения равновесной влажности при одном и том же значении относительной влажности воздуха φ могут быть весьма различны. Определение влажности электроизоляционных материалов важно для уточнения условий, при которых производится испытание электрических свойств данного материала. Кроме того, определение влажности гигроскопичных материалов, приемка и сдача которых происходит по массе, важно для их строгого учета. Для текстильных материалов устанавливается так называемая *кондиционная влажность*, соответствующая равновесной влажности материала при нахождении его в воздухе в нормальных условиях; так, для кабельной бумаги кондиционная влажность принимается равной 8 %. На гигроскопичность материала существенное влияние оказывает его строение, наличие и размер капиллярных промежутков внутри материала, в которые проникает влага. Сильно пористые материалы, в частности волокнистые, более гигроскопичны, чем материалы плотного строения.

Приводим ориентировочные размеры пор (в нанометрах), встречающихся в различных электроизоляционных материалах:

Микропоры в керамике	10^2-10^5
Капилляры в волокнах целлюлозы	100
Поры в стенках волокна	1-10
Межмолекулярные поры различных материалов	1-5
Внутримолекулярные поры	<1

Для сравнения укажем, что эффективный диаметр молекулы воды равен примерно 0,27 нм, поэтому маленькие по размерам молекулы воды могут проникать даже во внутримолекулярные поры целлюлозных электроизоляционных материалов.

Определяемая по увеличению массы увлажняемого образца гигроскопичность хотя и дает некоторое представление о способности материала поглощать влагу, но не полностью отражает степень изменения электрических свойств этого материала при увлажнении. В том случае, если поглощенная влага способна образовывать нити или пленки по толщине изоляции, которые могут пронизывать весь промежуток между электродами (или значительную область этого промежутка), уже весьма малые количества поглощенной влаги приводят к резкому ухудшению электрических свойств изоляции. Если же влага распределяется по объему материала в виде отдельных, не соединяющихся между собой малых включений, то влияние влаги на электрические свойства материала менее существенно.

Наиболее заметное снижение удельного объемного сопротивления под влиянием влажности наблюдается у пористых материалов, со-

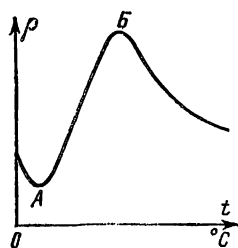


Рис. 5-4. Зависимость от температуры удельного объемного сопротивления влажного образца материала, содержащего электролитические примеси

держатся растворимые в воде примеси, создающие электролиты с высокой удельной проводимостью. Для подобных материалов получается интересная зависимость ρ влажного образца от температуры, показанная на рис. 5-4.

При нагревании влажного образца вначале ρ падает за счет увеличения степени диссоциации примесей в водном растворе (до точки A), затем идет удаление влаги — сушка (участок AB) и только при более высоких температурах наблюдается снижение ρ по законам, приведенным в гл. 2.

При переменном напряжении наиболее чувствительным параметром пористых диэлектриков является $\operatorname{tg} \delta$, заметно возрастающий с увлажнением материала. Менее чувствительна величина ϵ_r , однако и она, как правило, увеличивается с поглощением влаги ввиду большого значения диэлектрической проницаемости воды по сравнению с другими диэлектриками (для воды $\epsilon_r \approx 80$). Поэтому в ряде случаев о гигроскопичности материала судят по увеличению электрической емкости образца под действием влажности.

Влагопроницаемость. Кроме гигроскопичности, большое практическое значение имеет влагопроницаемость электроизоляционных материалов, т. е. способность их пропускать сквозь себя пары воды. Эта характеристика чрезвычайно важна для оценки качества материалов, применяемых для защитных покровов (шланги кабелей, опрессовка конденсаторов, компаундные заливки, лаковые покрытия деталей). Благодаря наличию мельчайшей пористости большинство материалов обладает поддающейся измерению влагопроницаемостью. Только для стекол, хорошо обожженной керамики и металлов влагопроницаемость практически равна нулю.

Количество влаги m , проходящее за время τ сквозь участок поверхности S слоя изоляционного материала толщиной h под действием разности давлений водяных паров p_1 и p_2 с двух сторон слоя, равно

$$m = \Pi (p_1 - p_2) S \tau / h. \quad (5-2)$$

Это уравнение аналогично уравнению, описывающему прохождение сквозь тело электрического тока: разность давлений $p_1 - p_2$ аналогична разности потенциалов, m/τ — току, а $h/\Pi S$ — сопротивлению тела; коэффициент Π , аналогичный удельной объемной проводимости, есть *влагопроницаемость* данного материала. В системе СИ он измеряется в секундах:

$$\Pi = \frac{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}}{\frac{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2}} = \text{с}.$$

Для различных материалов влагопроницаемость изменяется в широких пределах:

	П, с
Церезин	$1,5 \cdot 10^{-10}$
Полистирол	$6,2 \cdot 10^{-10}$
Триацетат целлюлозы	$2,1 \cdot 10^{-10}$

Для уменьшения гигроскопичности и влагопроницаемости пористых изоляционных материалов широко применяется их пропитка. Необходимо иметь в виду, что пропитка целлюлозных волокнистых материалов и других органических диэлектриков лишь замедляет увлажнение материала, не влияя на удельное объемное сопротивление после длительного воздействия влажности. Это объясняется тем, что молекулы пропиточных веществ, имеющие весьма большие размеры по сравнению с размерами молекул воды, не в состоянии создать полную непроницаемость пор материала для влаги, а в наиболее мелкие поры пропитываемого материала они вообще не могут проникнуть.

При длительном использовании электроаппаратуры, особенно в тропических условиях, на органических диэлектриках развивается плесень. Появление плесени уменьшает удельное поверхностное сопротивление диэлектриков, приводит к росту потерь, может снизить механическую прочность изоляции и вызвать коррозию соприкасающихся с ней металлических частей. Плесень развивается чаще всего в канифоли, масляных лаках, целлюлозных материалах, в том числе и в пропитанных (гетинакс, текстолит). Наиболее стойкими к образованию плесени являются неорганические диэлектрики: керамика, стекло, слюда, кремнийорганические материалы и некоторые органические, например эпоксидные смолы, фторопласт-4, полиэтилен, полистирол.

В тропиках приходится считаться с опасностью повреждения электрической изоляции, кабельных оболочек насекомыми (термитами) и животными. В некоторых случаях весьма опасны для электроизоляционных и других материалов даже транспортировка и хранение на складах.

Испытывая на *тропикостойкость*, электроизоляционные материалы и различные электротехнические изделия длительно выдерживают при температуре 40—50 °С в воздухе, насыщенном парами воды, и при воздействии культур плесневых грибов (точные условия этих испытаний установлены Международной электротехнической комиссией), после чего определяется степень ухудшения электрических и других свойств исследуемых образцов и отмечается интенсивность роста плесени на них.

С целью улучшения плесенестойкости органической электрической изоляции в ее состав вводят добавки *фунгицидов*, т. е. веществ, ядовитых для плесневых грибов и задерживающих их развитие, или же покрывают изоляцию лаком, содержащим фунгициды. Имеется большое число рецептов фунгицидов, пригодных для введения в те или иные электроизоляционные материалы. К числу сильно действующих фунгицидов принадлежат, в частности, некоторые органические соединения, содержащие азот, хлор, ртуть.

5-2. МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

Поскольку детали из электроизоляционных материалов подвергаются воздействию механических нагрузок, большое практическое значение имеют механическая прочность этих материалов и способность их не деформироваться под действием механических напряжений.

Прочность при растяжении, сжатии и изгибе. Простейшие виды статических механических нагрузок — растягивающих, сжимающих и изгибающих — изучаются на основании элементарных закономерностей, известных из курса прикладной механики (сопротивления материалов).

Значения пределов прочности при растяжении σ_p , сжатии σ_c и изгибе $\sigma_{\text{и}}$ в системе единиц СИ выражаются в паскалях ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 \approx 10^{-6} \text{ кгс/см}^2$).

Для электроизоляционных материалов анизотропного строения (слоистых, волокнистых) значения механической прочности сильно зависят от направления приложения нагрузки. Важно отметить, что для некоторых диэлектриков (стекло, керамические материалы, многие пластмассы) предел прочности при сжатии значительно больше, чем при растяжении и изгибе (в то время как у металлов σ_p , σ_c и $\sigma_{\text{и}}$ имеют один и тот же порядок). Так, например, у кварцевого стекла при сжимающих напряжениях можно получить $\sigma_c \approx 200 \text{ МПа}$, а при растяжении $\sigma_p \approx 50 \text{ МПа}$.

Механическая прочность ряда диэлектриков сильно зависит от площади поперечного сечения образцов.

Предел прочности стеклянного волокна увеличивается при уменьшении его диаметра, при диаметрах порядка $0,01 \text{ мм}$ он становится равным пределу прочности бронзы (см. § 6-16).

Механическая прочность электроизоляционных материалов сильно зависит от температуры, как правило, уменьшаясь с ее ростом (рис. 5-5). Прочность гигроскопичных материалов нередко существенно зависит от влажности.

Определение предела прочности и относительной деформации при разрушении дает некоторое представление о механической прочности материала и его способности деформироваться под нагрузкой (о пластических свойствах материала). Однако эти испытания еще не дают исчерпывающих сведений о поведении материала под действием механической нагрузки. Так, некоторые материалы (в особенности термопластичные) способны деформироваться при *длительном воздействии*. Это так называемое *пластическое*, или *холодное*, *течение* материала. Пластическое течение весьма нежелательно, если изделие в эксплуатации должно длительно сохранять неизменными форму и размеры. При повышении температуры и приближении ее к температуре размягчения данного материала пластическое течение материала сильно увеличивается.

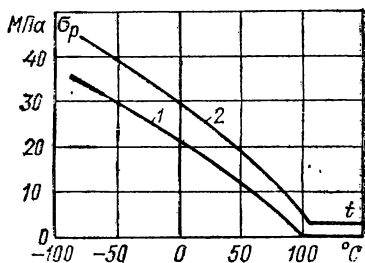


Рис. 5-5

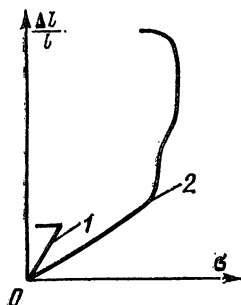


Рис. 5-6

Рис. 5-5. Зависимость от температуры предела прочности при растяжении полиэтилена низкой плотности

1 — необлученный материал; 2 — облученный материал

Рис. 5-6. Зависимость относительного удлинения при растяжении от удельной нагрузки для керамики (кривая 1) и металла (кривая 2)

Рис. 5-7. Зависимость вязкости жидкости от температуры

В некоторых случаях большое практическое значение имеют хрупкость, вязкость и другие механические характеристики электроизоляционных материалов.

Хрупкость — способность разрушаться без заметной пластической деформации. Хрупкость зависит от структуры материала и условий испытания; увеличивается при увеличении скорости нагружения и при понижении температуры, при повышении степени концентрации напряжений. Хрупкость материала, наблюдающаяся только при ударных нагрузках, называется ударной хрупкостью. Многие материалы хрупки, т. е. обладая сравнительно высокой прочностью по отношению к *статическим* нагрузкам, в то же время легко разрушаются *динамическими* (внезапно прилагаемыми) усилиями.

Из рис. 5-6 следует, что у керамики предел упругости и предел прочности при статическом растяжении практически совпадают, а у металла перед разрушением обнаруживается пластическое течение.

Распространенный прием для оценки способности материала выдерживать динамические нагрузки (хрупкости материала) — испытание на *ударный изгиб* (определение *ударной вязкости*). Ударная вязкость $\sigma_{уд}$ материала — это затраченная на излом образца энергия W , отнесенная к площади поперечного сечения образца S . Ударная вязкость в системе СИ измеряется в Дж/м² (1 Дж/м² \approx 10⁻³ кгс \times см/см²).

Очень высокой ударной вязкостью обладает полиэтилен, у которого $\sigma_{уд}$ превышает 100 кДж/м², для керамических материалов и микаלקса $\sigma_{уд}$ составляет всего 2—5 кДж/м².

В некоторых случаях проверяют способность электроизоляционных материалов выдерживать без разрушения длительное воздействие *вибраций*, т. е. повторяющихся колебаний определенной частоты и амплитуды. Такая проверка чаще всего производится на готовых изделиях, которые для этой цели крепятся на платформах (вибростендах), подвергающихся вибрациям по заданному режиму от соответствующего приводного механизма. Определение вибропрочности важно, например, для оценки изоляции ракетного и самолетного электрооборудования.

Вязкость. Для жидких и полужидких электроизоляционных материалов, масел, лаков, заливочных и пропиточных компаундов важной механической характеристикой является вязкость. Вязкость (внутреннее трение) — свойство жидкостей и газов оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Количественно вязкость характеризуется значением величины η , называемой *коэффициентом динамической вязкости*, или *коэффициентом внутреннего трения*. Вязкость представляет собой величину, входящую во многие законы гидродинамики вязких сред, а именно в закон Пуазейля — истечения вязких жидкостей через капиллярные трубки, в закон Стокса — движения шарика в вязкой среде под действием небольшой постоянной силы [см. формулу (2-6)]. Динамическая вязкость η в системе СИ измеряется в паскалях, умноженных на секунды, а в системе СГС — в сантипуазах:

$$1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ П} = 1000 \text{ сП}.$$

Кинематическая вязкость ν равна отношению динамической вязкости жидкости к ее плотности ρ :

$$\nu = \eta / \rho. \quad (5-3)$$

В системе СИ кинематическая вязкость измеряется в м²/с, а в системе СГС в стокахх (1 м²/с = 10⁴ Ст).

Вязкость всех веществ, не претерпевающих при нагреве химических изменений, сильно уменьшается с повышением температуры (рис. 5-7).

Как правило, закон изменения вязкости с температурой соответствует уравнению экспоненты

$$\eta = A \exp W/kT, \quad (5-4)$$

где A — постоянная, характеризующая данную жидкость; W — энергия активации, равная работе перехода молекулы из одного устойчивого положения в другое.

5-3. ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ

К важнейшим тепловым свойствам диэлектриков относятся нагревостойкость, холодостойкость, теплопроводность и тепловое расширение.

Нагревостойкость. Способность диэлектрика выдерживать воздействие повышенной температуры в течение времени, сравнимого со сроком нормальной эксплуатации, без недопустимого ухудшения его свойств. В зависимости от значений допустимых в эксплуатации температур диэлектрики различают по классам нагревостойкости. Нагревостойкость неорганических диэлектриков определяют, как правило, по началу существенного изменения электрических свойств, например, по заметному росту $\operatorname{tg} \delta$ или снижению удельного электрического сопротивления. Нагревостойкость оценивают соответствующими значениями температуры, при которой появились эти изменения. Нагревостойкость органических диэлектриков часто определяют по началу механических деформаций растяжения или изгиба, погружению иглы в материал под давлением при нагреве. Однако и для них возможно определение нагревостойкости по электрическим характеристикам.

В качестве примера давно существующего способа оценки нагревостойкости электроизоляционных материалов можно отметить *способ Мартенса*. По этому способу нагревостойкость синтетических веществ органического происхождения (пластмасс) характеризуют таким значением температуры, при котором изгибающее напряжение, равное 5 МПа, вызывает заметную деформацию испытуемого образца. При этом скорость повышения температуры должна составлять около 1 К/мин. Как видим, метод Мартенса является условным методом определения кратковременной нагревостойкости по изменению механических свойств материала. Для различных диэлектриков по этому методу получают следующие численные значения нагревостойкости:

Полистирол	70—85 °С
Гетинакс	150—180 °С

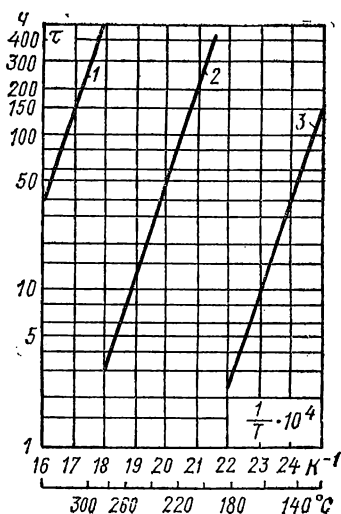
Существуют другие способы оценки температуры размягчения электроизоляционных материалов, например *способ кольца и шара*. Испытуемый материал (битум или другие подобные ему пластичные легкоплавкие вещества) заливают в металлическое кольцо и помещают на него стальной шарик определенного диаметра; отмечается температура, при которой испытуемый материал настолько размягчается, что шарик может его продавить и пройти сквозь кольцо. Легко видеть, что этот способ определения температуры размягчения условный, так как форма и размеры образца, характер и значение механической нагрузки, скорость возрастания температуры и предельные деформации выбираются произвольно.

Температурой вспышки называют температуру жидкости, при нагреве до которой смесь паров ее с воздухом вспыхивает при поднесении к ней небольшого пламени. *Температура воспламенения* — еще более высокая температура, при которой при поднесении пламени испытуемая жидкость загорается.

Эти характеристики представляют особый интерес при оценке качества трансформаторного масла, а также растворителей, применяемых в производстве электроизоляционных лаков.

Наивысшая допустимая рабочая температура определяется на основании тщательного изучения кратковременной и длительной нагревостойкости материала с учетом коэффициента запаса, зависящего от условий эксплуатации, необходимой степени надежности и срока службы изоляции.

Рис. 5-8. Зависимость продолжительности старения τ пленок до появления трещин при изгибе от температуры масляно-битумного лака (кривая 3), кремнийорганического лака (кривая 2) и полиимидного лака (кривая 1)



Необратимое ухудшение качества изоляции лишь при длительном воздействии повышенной температуры вследствие медленно протекающих химических процессов называется *тепловым старением* изоляции. Старение может проявляться, например, у лаковых пленок и целлюлозных материалов в виде повышения твердости и хрупкости, образования трещин и т. п. Для проверки стойкости электроизоляционных материалов к тепловому старению образцы этих материалов длительно выдерживают при сравнительно невысокой температуре, не вызывающей немедленного разрушения материала, а затем их свойства сравнивают со свойствами исходного материала. При прочих равных условиях скорость теплового старения органических и элементоорганических полимеров значительно возрастает с повышением температуры, подчиняясь общим закономерностям температурного изменения скорости химических реакций (теория Аррениуса—Эйринга). Продолжительность старения τ (считая, например, от момента начала снижения механической прочности до момента получения заданной доли ее начального значения) связана с температурой старения T следующей зависимостью:

$$\ln \tau = \frac{A}{T} + B, \quad (5-5)$$

где A и B — величины, постоянные для данного материала и данных условий теплового старения.

Таким образом, зависимость τ (в логарифмическом масштабе) от величины, обратной температуре старения, должна выражаться прямой линией (рис. 5-8). В большинстве случаев наклон этих прямых таков, что уменьшение вдвое продолжительности старения τ соответствует повышению температуры старения в среднем на 10 К. Аналогичные зависимости наблюдаются для срока жизни (т. е. продолжительности работы до выхода из строя) изоляции электрических машин и других электроизоляционных конструкций.

Помимо температуры существенное влияние на скорость старения могут оказать изменение давления воздуха или концентрации кислорода, присутствие озона, являющегося более сильным окислителем, чем кислород, а также различных химических реагентов, ускоряющих или замедляющих старение. Тепловое старение образца ускоряется под действием ультрафиолетовых лучей, электрического поля, механических нагрузок и т. п.

Возможность повышения рабочей температуры изоляции для практики чрезвычайно важна. В электрических машинах и аппаратах повышение нагревостойкости, которая обычно определяется нагревостойкостью электрической изоляции, позволяет получить более высокую мощность при неизменных габаритах или же при сохранении мощности достичь уменьшения габаритных размеров и стоимости изделия. Повышение рабочей температуры особенно важно для тяговых и крановых электродвигателей, самолетного электрооборудования и других передвижных устройств, где, в первую очередь, необходимо уменьшить массу и габаритные размеры. С вопросами о допустимой температуре тесно связаны меры пожарной безопасности и взрывобезопасности (масляные хозяйства электрических подстанций, электрооборудование для нефтяной и угольной промышленности и др.). Наконец, в электрических печах и нагревательных приборах, в электросварочной аппаратуре, в осветительных устройствах, электронных и ионных приборах значительной мощности высокая рабочая температура электрической изоляции определяется особенностями работы всего устройства.

ГОСТ 8865—70 предусматривает в соответствии с рекомендациями Международной электротехнической комиссии разделение электроизоляционных материалов для электрических машин, трансформаторов и аппаратов на классы нагревостойкости, для которых фиксируются наибольшие допустимые рабочие температуры при использовании этих материалов в электрооборудовании общего применения, длительно (в течение нескольких лет) работающего в нормальных для данного вида электрооборудования эксплуатационных условиях:

Класс нагревостойкости	Y	A	E	B	F	H	C
Наибольшая допустимая рабочая температура, °C	90	105	120	130	155	180	>180

При указанных температурах обеспечиваются технико-экономически целесообразные сроки службы электрооборудования. В особых случаях (электрооборудование с весьма коротким сроком службы) возможно некоторое повышение рабочих температур соответствующих электроизоляционных материалов по сравнению с приведенными.

К классу Y относятся волокнистые материалы на основе целлюлозы и шелка (пряжа, ткани, ленты, бумаги, картоны, древесина), если они не пропитаны и не погружены в жидкий электроизоляционный материал.

К классу A относятся те же самые органические волокнистые материалы, будучи пропитанными лаками, либо компаундами, или же погруженными в жидкий электроизоляционный материал, т. е. защищенными от непосредственного соприкосновения с кислородом воздуха, который ускоряет тепловое старение материалов (провод с хлопчатобумажной изоляцией в пропитанной лаком обмотке электрической машины или же в погруженной в электроизоляционное масло обмотке маслонаполненного трансформатора; лакоткани на хлопчатобумажной или шелковой основе и масляных или битумно-

масляных лаках; лакобумаги на тех же лаках). К классу А относятся также полиамидные пленки, литые полиамидные смолы, изоляция эмаль-проводов на масляно-смоляных и поливинилацетатных лаках и т. п.

К классу Е принадлежат пластические массы с органическим наполнителем и термореактивным связующим типа фенолформальдегидных и подобных им смол (гетинакс, текстолит, пресс-порошки с наполнением древесной мукой), полиэтилентерефталатные пленки, эпоксидные, полиэфирные и полиуретановые смолы и компаунды, изоляция эмалированных проводов на полиуретановых и эпоксидных лаках и т. д. Таким образом, к классам нагревостойкости У, А и Е относятся главным образом чисто органические электроизоляционные материалы.

В класс В входят материалы, для которых характерно большое содержание неорганических компонентов, например щепаная слюда, асбестовые и стекловолоконные материалы в сочетании с органическими связующими и пропитывающими материалами; таковы большинство миканитов (в том числе с бумажной или тканевой органической подложкой), стеклолакоткани, стеклотекстолиты на фенолформальдегидных термореактивных смолах, эпоксидные компаунды с неорганическими наполнителями и т. п.

К классу F принадлежат миканиты, изделия на основе стекловолокна без подложки или с неорганической подложкой, с применением органических связующих и пропитывающих материалов повышенной нагревостойкости: эпоксидных, термореактивных полиэфирных, кремнийорганических.

Материалы класса Н получают при использовании кремнийорганических смол особо высокой нагревостойкости.

К классу нагревостойкости С относятся чисто неорганические материалы, не содержащие склеивающих или пропитывающих органических составов (слюда, стекло и стекловолоконные материалы, кварц, асбест, микалекс, непропитанный асбодцемент, нагревостойкие (на неорганических связующих) миканиты и т. п.). Из всех органических электроизоляционных материалов к классу нагревостойкости С относятся только политетрафторэтилен (фторопласт-4) и материалы на основе полиимидов (пленки, волокна, изоляция эмалированных проводов и т. п.).

Вопрос об отнесении того или иного электроизоляционного материала или комбинации электроизоляционных материалов к определенному классу нагревостойкости требует длительных и трудоемких испытаний образцов материалов на тепловое старение в условиях, наиболее приближающихся к тем условиям, в которых эти материалы будут находиться в эксплуатации.

Для некоторых электроизоляционных материалов, в особенности *хрупких* (стекла, керамические материалы), весьма важна стойкость по отношению к резким сменам температуры (термоударам), в результате которых в материале могут образовываться трещины.

В качестве примера определения нагревостойкости материала по электрическим свойствам могут быть использованы зависимости $\lg \delta$ от температуры, приведенные на рис. 3-8. Допустимый для материала или изделия температурный режим может определяться различными факторами. Например, из рис. 1-8 видно, что температура,

Таблица 5-1

Значения коэффициентов теплопроводности некоторых диэлектриков

Материал	γ_T , Вт/(м·К)	Материал	γ_T , Вт/(м·К)
Воздух (в небольших зазорах)	0,05	Плавленый кварц	1,25
Битумы	0,07	Фарфор	1,6
Бумага	0,10	Стеатит	2,2
Лакоткань	0,13	Диоксид титана	6,5
Текстолит	0,25	Кристаллический кварц	12,5
Гетинакс	0,35	Алюмооксид	30,0
Вода	0,58	Оксид магния	36,0
		Оксид бериллия	218,0

при которой наблюдается быстрый рост диэлектрической проницаемости, зависит и от частоты действующего на диэлектрик электрического поля.

В результате испытаний устанавливается стойкость материала к тепловым воздействиям, причем она в различных случаях может быть неодинаковой: например, материал, выдерживающий кратковременный нагрев до некоторой температуры, может оказаться неустойчивым по отношению к тепловому старению при длительном воздействии даже более низкой температуры и т. п. Как указывалось, испытания на действие повышенной температуры иногда проводятся при одновременном воздействии повышенной влажности воздуха (тропические условия) или электрического поля.

Холодостойкость. Во многих случаях эксплуатации изоляции, скажем, изоляции оборудования открытых подстанций, полевой аппаратуры связи, важна *холодостойкость*, т. е. способность изоляции выдерживать воздействие низких температур (например, от -60 до -70°C) без недопустимого ухудшения ее свойств. При низких температурах, как правило, электрические свойства изоляционных материалов улучшаются, однако многие материалы, гибкие и эластичные в нормальных условиях, при низких температурах становятся весьма хрупкими и жесткими, что создает затруднения для работы изоляции. Испытания электроизоляционных материалов и изделий из них на действие низких температур нередко проводятся при одновременном воздействии вибраций.

Теплопроводность. *Теплопроводность* — один из видов переноса теплоты от более нагретых частей к менее нагретым, приводящий к выравниванию температуры. Практическое значение теплопроводности объясняется тем, что теплота, выделяющаяся вследствие потерь мощности в окруженных электрической изоляцией проводниках в магнитопроводах, а также вследствие диэлектрических потерь в изоляции, переходит в окружающую среду через различные материалы. Теплопроводность влияет на электрическую прочность при тепловом пробое (см. § 4-5) и на стойкость материала к импульсным тепловым воздействиям. Теплопроводность материалов характеризуют *коэффициентом теплопроводности* γ_T (табл. 5-1), входящим в уравнение Фурье:

$$\Delta P_T = \gamma_T \frac{dT}{dl} \Delta S, \quad (5-6)$$

где ΔP_T — мощность теплового потока сквозь площадку ΔS , нормальную к потоку; dT/dl — градиент температуры.

Значения γ_T электроизоляционных материалов за исключением оксида бериллия меньше, чем большинства металлов. Наименьшими значениями γ_T обладают пористые электроизоляционные материалы с воздушными включениями. При пропитке, а также при уплотнении материалов давлением γ_T увеличивается. Как правило, кристаллические диэлектрики имеют более высокие значения γ_T , чем аморфные. Кроме того, γ_T зависит от температуры.

**Температурные коэффициенты линейного расширения
некоторых диэлектриков**

Материал	$\alpha_l \cdot 10^6,$ К ⁻¹	Материал	$\alpha_l \cdot 10^6,$ К ⁻¹
Поливинилацетат	265	Поливинилформаль	64,0
Поливинилхлорид (пластикат)	160	Эпоксидные смолы	55,0
Полиэтилен	145	Слюда	37,0
Ацетат целлюлозы	120	Силикатное стекло	9,2
Нейлон	115	Глиноземистая керамика	7,0
Политетрафторэтилен	100	Стеатит	6,6
Полиметилметакрилат	70	Фарфор	3,5
Полистирол	68	Плавленый кварц	0,55

Тепловое расширение диэлектриков, как и других материалов, оценивают температурным коэффициентом линейного расширения (ТК l), измеряемым в К⁻¹:

$$TK\ l = \alpha_l = \frac{1}{l} \frac{dl}{dT}. \quad (5-7)$$

Материалы, обладающие малыми значениями ТК l , имеют, как правило, наиболее высокую нагревостойкость и наоборот. Для определения α_l по графическим зависимостям $l(T)$ можно пользоваться методом, аналогичным описанному в § 1-6 для определения ТК ϵ_r .

В качестве примера в табл. 5-2 приведены средние ТК l некоторых электроизоляционных материалов при температуре 20—100 °С. Как видно из табл. 5-2, органические диэлектрики имеют резко повышенные ТК l по сравнению с неорганическими диэлектриками. Поэтому детали, изготовленные из неорганических материалов, имеют улучшенную стабильность размеров при колебаниях температуры.

5-4. ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ И ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МАТЕРИАЛЫ ИЗЛУЧЕНИЙ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Химические свойства. Знание химических свойств диэлектриков важно для оценки надежности их в эксплуатации и для разработки технологии.

При длительной работе диэлектрики должны не разрушаться с выделением побочных продуктов и не вызывать коррозии соприкасающихся с ними металлов; не взаимодействовать с различными веществами (например, газами, водой, кислотами, щелочами, растворами солей и т. п.). Стойкость к воздействию всех этих веществ у различных диэлектриков весьма разнообразна.

Материалы в производстве деталей могут обрабатываться различными химикотехнологическими способами: склеиваться, растворяться в растворителях с образованием лаков и т. д. Растворимость твердых материалов может быть оценена количеством материала, переходящим в раствор за единицу времени с единицы поверхности материала, соприкасающейся с растворителем. Кроме того, нередко оценивают растворимость по тому наибольшему количеству вещества, которое может быть растворено в данном растворе (т. е. по концентрации насыщенного раствора). Легче всего растворяются вещества, близкие к растворителю по химической природе и содержащие в молекулах похожие группировки атомов; полярные вещества легче растворяются в полярных жидкостях, неполярные — в неполярных. Так, неполярные или слабополярные углеводороды (каучук, церезин) легко растворяются в жидких углеводородах, например в бензине; полярные смолы, содержащие гидроксильные группировки (фенолформальдегидные и другие смолы), растворяются в спирте и иных полярных растворителях. Растворимость уменьшается с повышением степени полимеризации (см. § 6-4), высокомолекулярные вещества с линейной структурой

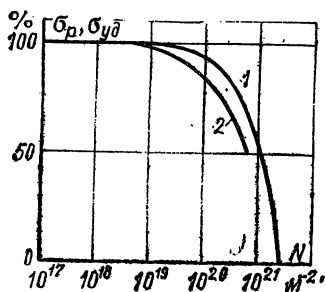


Рис. 5-9. Предел прочности при растяжении (кривая 1) и ударная вязкость (кривая 2) фенольной смолы как функция числа быстрых нейтронов

молекул растворяются сравнительно легко, а с пространственной структурой — весьма трудно. При повышении температуры растворимость обычно увеличивается.

В последующих главах при рассмотрении характеристик материалов будут отмечаться наиболее опасные внешние факторы, оказывающие разрушающее химическое воздействие на тот или иной материал.

Воздействие излучений высокой энергии. В современной технике возможны такие условия использования электроаппаратуры, при которых она оказывается под кратковременным или длительным воздействием корпускулярных либо волновых радиоактивных излучений высокой энергии. При этом важно знать степень стойкости материалов к воздействию излучений, сохранения ими своих электрических и механических свойств, т. е. *радиационную стойкость*. Поэтому к известным физическим, электрическим и химическим характеристикам материала должно добавляться и требование его радиационной стойкости.

С другой стороны, излучения высокой энергии могут быть использованы в технологических процессах создания новых материалов и получения у них ценных свойств (например, повышения нагревостойкости, механической прочности) или применены для синтеза необходимых материалов. Могут быть разработаны новые классы материалов с такими свойствами, которые нельзя было получить ранее.

Наконец, в некоторых случаях от материалов требуется выполнение функций поглотителей-экранов для излучений наряду с использованием их основных электрических и механических свойств.

К *корпускулярным излучениям* относятся быстрые и медленные нейтроны, осколки ядер, α -частицы и β -лучи (электроны различных скоростей).

К *волновым излучениям* принадлежат γ -лучи, жесткое и мягкое рентгеновское излучение.

Интенсивность излучения измеряют в ваттах на квадратный метр, а для нейтронов часто указывают плотность потока энергии быстрых или медленных нейтронов сквозь поверхность площадью 1 м². Иногда для характеристики процесса облучения используют произведение плотности потока энергии нейтронов, скорости и времени облучения.

Энергия излучения, попадая на поверхность материала, убывает по мере проникновения в глубину по закону

$$P_x = P_0 \exp(-\mu x), \quad (5-8)$$

где P_0 — энергия в воздухе у поверхности материала; x — глубина проникновения излучения; μ — эффективный коэффициент ослабления излучения в материале.

Эффективный коэффициент ослабления для простых веществ

$$\mu \approx K \lambda^3 Z^3 \rho, \quad (5-9)$$

где λ — длина волны излучения; Z — номер элемента в таблице Менделеева; ρ — плотность; K — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, поглощение излучения в материале, как видно из выражения (5-9), зависит от природы материала и качества самого излучения. Рассеяние энергии излучения происходит в основном из-за ионизации (внутренний фотоэффект), возбуждения атомов, комптоновского эффекта, а при очень больших энергиях — из-за ядерных преобразований. Часть энергии расходуется на выбивание атомов или ионов в междоузлия, причем в решетке появляются вакансии и дефектные центры (см. рис. В-6).

Ионизация вещества может быть ступенчатой, с образованием вторичных и даже третичных атомов отдачи. Подобные процессы происходят и при облучении вещества заряженными частицами. Под действием нейтронов значительно нарушается структура вещества и в больших объемах, так как нейтроны не испытывают торможения

электрическими полями электронных оболочек и ядер атомов, а следовательно, обладают большей длиной пробега. Нарушение структуры вещества заряженными частицами происходит в основном в поверхностном слое. Облучение материалов осколками деления ядер вызывает рассмотренные выше процессы, сопровождающиеся образованием большого числа атомов отдачи, а иногда и ядерными превращениями.

Воздействие излучения может привести к молекулярным преобразованиям и химическим реакциям. Ионизационные процессы вызывают мгновенный поток электронов, разрыв и перемещение химических связей и образование свободных радикалов. Электроны скапливаются в местах дефектов. Иницируются различные химические реакции. В частности, в органических полимерах происходит выделение газа, образование и ликвидация двойных связей, полимеризация, образование поперечных связей, вулканизация. Характер и степень изменения свойств полимера за время испытания определяются преобладающим процессом. При образовании поперечных связей могут наблюдаться различные изменения физических свойств. В результате длительного или очень интенсивного облучения может произойти разрушение любого полимера, подвергаемого облучению.

Материалы, стойкие к облучению, должны обладать двумя свойствами: 1) способностью поглощать энергию без чрезмерной ионизации; 2) способностью в большей степени образовывать двойные связи, чем обнаруживать разрыв цепей.

Под действием облучения у полимеров возможен переход из одного структурного состояния в другое.

Влияние облучения на неорганические диэлектрики, кварц, слюду, глинозем, оксид циркония, оксид бериллия и слюдяные материалы со стекловидным связующим — менее сильное. У них образуются центры окрашивания; удельное электрическое сопротивление и электрическая прочность их могут снизиться.

Наибольшее влияние облучение оказывает на поверхностные свойства материалов. После отжига облученных неорганических диэлектриков возможно восстановление первоначальных свойств. Рассмотрение процессов, вызываемых воздействием излучения на материалы, показывает, что у последних может произойти изменение практически всех свойств: электрических, физико-химических и механических. Как видно из рис. 5-9, при $N = 10^{19} \div 10^{20} \text{ м}^{-2}$ механические свойства смолы очень резко ухудшаются. Политетрафторэтилен при сильном облучении становится очень хрупким и рассыпается, полиизобутилен из резиноподобного вещества превращается в вяз-

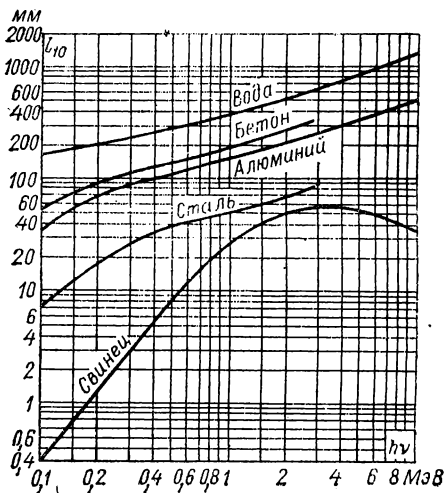


Рис. 5-10

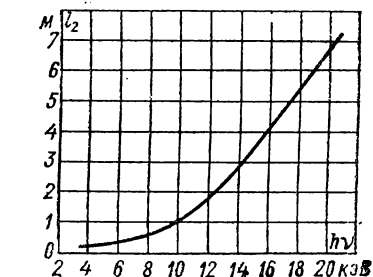


Рис. 5-11

Рис. 5-10. Слой десятикратного ослабления для различных материалов в зависимости от энергии квантов излучения

Рис. 5-11. Слой половинного ослабления для воздуха при $p = 0,1 \text{ МПа}$ (760 мм рт. ст.) и 20°C в зависимости от энергии излучения

кую жидкость, и молекулярная масса его снижается более чем в 15 раз, предел прочности при растяжении облученного полиэтилена, наоборот, повышается по сравнению с σ_p необлученного материала (см. рис. 5-5), а нагревостойкость его увеличивается от 100 до 200 °С. Это объясняется тем, что молекулярные цепи облученного полиэтилена в четыре — пять раз длиннее обычных; при этом электрические свойства его не ухудшаются: так, $\lg \delta$ остается меньше $5 \cdot 10^{-4}$. Под влиянием облучения меняется удельное объемное сопротивление многих диэлектриков. Степень изменения удельного объемного сопротивления полимеров при облучении существенно зависит от температуры диэлектрика. Например, после сильного облучения жесткими рентгеновскими лучами отношение $\rho_{\text{необ}}/\rho_{\text{обл}}$ образцов при температуре 20 °С составляло $1 \cdot 10^4$, а при температуре 90 °С уменьшилось до десяти.

Электрическая прочность диэлектриков под влиянием облучения может и увеличиваться, и уменьшаться в зависимости от процессов, протекающих в материале.

Работы по изучению устойчивости диэлектриков к корпускулярным и волновым излучениям высокой энергии должны развиваться и углубляться, так как поведение уже исследованных и еще малоизученных в этих условиях материалов недостаточно ясно, требует уточнения и проверки.

Защитные свойства различных материалов удобно характеризовать понятием слоя десятикратного ослабления, т. е. толщиной слоя вещества, после прохождения которого интенсивность излучения ослабляется в десять раз. Эта характеристика значительно облегчает расчеты элементов защиты. Например, для ослабления в 100 раз необходимо взять толщину защитного вещества, равную двум слоям десятикратного ослабления. Очевидно, n слоев десятикратного ослабления снизит интенсивность излучения в 10^n раз.

На рис. 5-10 приведены кривые зависимости толщины слоя десятикратного ослабления для воды, баритового бетона (состав: 80 % по массе BaSO_4 и 20 % цемента), некоторых металлов от энергии квантов излучения. С ростом плотности материалов увеличивается поглощение.

На рис. 5-11 приведена зависимость толщины слоя половинного ослабления для воздуха от энергии излучения. Как видно из рис. 5-11, с увеличением энергии излучения толщина слоя сильно возрастает и при энергии 10 кэВ становится больше метра.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие физико-химические и механические свойства диэлектриков необходимо учитывать при эксплуатации материалов?
2. Какие из этих свойств являются специфическими для диэлектриков?
3. К чему сводится влияние на диэлектрики излучений высокой энергии?

ГЛАВА ШЕСТАЯ

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

6-1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Диэлектрические материалы имеют чрезвычайно важное значение для электротехники. К ним принадлежат *электроизоляционные материалы*; они используются для создания электрической изоляции, которая окружает токоведущие части электрических устройств и отделяет друг от друга части, находящиеся под различными электрическими потенциалами. Назначение электрической изоляции — не допускать прохождения электрического тока по каким-либо нежелательным путям, помимо тех, которые предусмотрены электрической схемой устройства. Очевидно, что никакое, даже самое простое,

электрическое устройство не может быть выполнено без использования электроизоляционных материалов.

Кроме того, электроизоляционные материалы используются в качестве диэлектриков в электрических конденсаторах для создания определенного значения электрической емкости конденсатора, а в некоторых случаях для обеспечения определенного вида зависимости этой емкости от температуры или иных факторов.

Наконец, к диэлектрическим материалам принадлежат и *активные диэлектрики*, т. е. диэлектрики с управляемыми свойствами: сегнетоэлектрики, пьезоэлектрики, электреты (см. стр. 28, 173).

Наибольшая часть содержания гл. 6 посвящена электроизоляционным материалам, которые образуют самый многочисленный тип электротехнических материалов вообще, однако невозможно описать все виды электроизоляционных материалов. Поэтому основная задача — дать представление об основах рациональной классификации электроизоляционных материалов и общие для тех или иных групп этих материалов особенности. Будут описаны также некоторые наиболее типичные и широко распространенные виды современных электроизоляционных материалов, причем их параметры и зависимости последних от различных факторов будут использоваться для иллюстрации общих положений учения о диэлектриках.

В различных случаях применения к электроизоляционным материалам предъявляются самые разнообразные требования. Помимо электрических свойств, которые были рассмотрены в первых четырех главах, большую роль играют механические, тепловые и другие физико-химические свойства (см. гл. 5), способность материалов подвергаться тем или иным видам обработки при изготовлении из них необходимых изделий, а также стоимость и дефицитность материалов.

Электроизоляционные материалы подразделяются по их агрегатному состоянию на *газообразные, жидкие и твердые*. В особую группу могут быть выделены *твердеющие материалы*, которые в исходном состоянии, во время введения их в изготавливаемую изоляцию, являются жидкостями, но затем отверждаются и в готовой, находящейся в эксплуатации, изоляции представляют собой твердые тела (например, лаки и компаунды).

Большое практическое значение имеет также разделение электроизоляционных материалов в соответствии с их химической природой на *органические и неорганические*. Под органическими веществами (подробнее см. § 6-4) подразумеваются соединения углерода; обычно они содержат также водород, кислород, азот, галогены или иные элементы. Прочие вещества считаются неорганическими; многие из них содержат кремний, алюминий (и другие металлы), кислород и т. п.

Многие органические электроизоляционные материалы обладают ценными механическими свойствами, гибкостью, эластичностью, из них могут быть изготовлены волокна, пленки и изделия других разнообразных форм, поэтому они нашли весьма широкое применение. Однако органические электроизоляционные материалы, за

исключением фторлонов, полиимидов, имеют относительно низкую нагревостойкость.

Неорганические электроизоляционные материалы в большинстве случаев не обладают гибкостью и эластичностью, часто они хрупки; технология их обработки сравнительно сложна. Однако, как правило, неорганические электроизоляционные материалы обладают значительно более высокой нагревостойкостью, чем органические, а потому они с успехом применяются в тех случаях, когда требуется обеспечить высокую рабочую температуру изоляции.

Существуют и материалы со свойствами, промежуточными между свойствами органических и неорганических материалов: это элементо-органические материалы, в молекулы которых, помимо атомов углерода, входят атомы других элементов, обычно не входящих в состав органических веществ и более характерных для неорганических материалов: Si, Al, P и др. (см. § 6-6).

Поскольку значение длительно допускаемой рабочей температуры электрической изоляции часто играет первостепенную роль на практике, электроизоляционные материалы и их комбинации (электроизоляционные системы электрических машин, аппаратов) часто относят к тем или иным классам нагревостойкости (см. § 5-3).

Необходимо иметь в виду, что электроизоляционные, механические, тепловые, влажностные и другие свойства диэлектриков заметно изменяются в зависимости от технологии получения и обработки материалов, наличия примесей, условий испытания и т. д. Поэтому численные значения параметров материалов, приводимые в гл. 6, во многих случаях следует рассматривать лишь как ориентировочные.

6-2. ГАЗООБРАЗНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Среди газообразных диэлектриков прежде всего должен быть упомянут воздух, который в силу своей всеобщей распространенности даже помимо нашей воли, часто входит в состав электрических устройств и играет в них роль электрической изоляции, дополнительной к твердым или жидким электроизоляционным материалам. В отдельных частях электрических установок, например на участках воздушных линий электропередачи между опорами, воздух образует единственную изоляцию между неизолированными проводами линии. При недостаточно тщательно проведенной пропитке изоляции электрических машин, кабелей, конденсаторов в ней могут оставаться воздушные включения, часто весьма нежелательные, так как они при высоком рабочем напряжении изоляции могут стать очагами образования ионизации (см. § 4-2).

Поскольку электроизоляционные свойства воздуха уже рассмотрены ранее, а общие физико-химические свойства его широко известны из курсов физики и химии, нет надобности более подробно останавливаться на этих вопросах. Рассмотрим кратко некоторые газы, которые могут представлять интерес для практики.

В табл. 6-1 приведены свойства воздуха и некоторых широко применяемых в технике газов, а также свойства тех же газов в сжиженном состоянии, имеющих большое значение для электротехнических устройств, работающих при весьма низких давлениях (так называемые устройства *криоэлектротехники*).

При прочих равных условиях (при одинаковых давлении и температуре, форме электродов, расстоянии между ними) различные газы могут иметь заметно различающиеся значения электрической прочности. Азот имеет практически одинаковую с воздухом электрическую прочность; он нередко применяется вместо воздуха для заполнения газовых конденсаторов и для других целей, поскольку, будучи близок по электрическим свойствам к воздуху, не содержит кислорода, который оказывает

Таблица 6-1

Свойства газов

Параметр	Воз- дух	Азот N ₂	Кисло- род O ₂	Водо- род H ₂	Уголь- ный ангид- рид CO ₂	Метан CH ₄	Элегаз SF ₆	Гелий He	Неон Ne	Аргон Ar	Крип- тон Kr	Ксенон Xe
Молекулярная масса	28,961	28,013	32,000	2,016	44,011	16,043	146,050	4,003	20,183	39,948	83,800	131,300
Температура кипения $T_{\text{кип}}$, К	79,0	77,4	90,2	20,4	194,7	111,7	209,3	4,2	27,2	87,5	120,2	166,0
Температура плавления, $T_{\text{пл}}$, К	60,0	63,2	54,4	14,0	—	89,2	—	—	24,5	84,0	115,6	161,0
Плотность, кг/м ³ : газа	1,29	1,25	1,4	0,09	1,98	0,72	6,39	0,18	0,90	1,78	3,47	5,58
жидкости	920,0	804,0	1142,0	7,1	1630,0	424,0	1910,0	125,0	1204,0	1392,0	—	—
Теплота испарения жидкости, кДж/кг	212	197	213	458	573	510	—	21	88	162	110	—
Коэффициент теплопроводности газа, мВт/(м·К)	24,0	24,00	24,00	166,00	15,00	26,00	—	142,00	45,50	16,30	8,73	5,00
Удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, кДж/(кг·К)	1,005	1,06	0,915	14,20	0,82	2,18	0,62	5,20	1,03	0,52	0,25	0,16
Динамическая вязкость газа, мкПа·с	19	18	21	9,5	16	12	15	19	30	21	25	22

Примечание. 1. Значения $T_{\text{кип}}$ и $T_{\text{пл}}$ относятся к нормальному атмосферному давлению 101,325 кПа = 760 мм рт. ст. 2. Параметры газов относятся к температуре 273,15 К = 0°С и нормальному атмосферному давлению. 3. Параметры жидкостей относятся к $T_{\text{кип}}$ и нормальному атмосферному давлению. 4. Для воздуха, представляющего собой смесь химических индивидуальных газов, приведена средняя молекулярная масса. 5. Параметры угольного ангидрида, приведенные в строках с параметрами жидкостей, даны для твердого CO₂ («сухого льда»); под $T_{\text{кип}}\text{CO}_2$ следует понимать температуру сублимации.

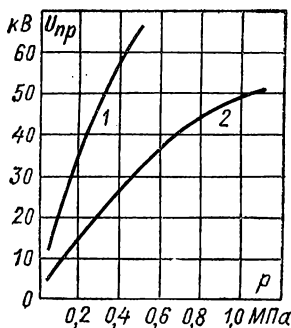


Рис. 6-1

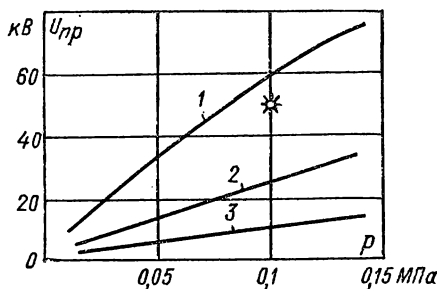


Рис. 6-2

Рис. 6-1. Пробивное напряжение (постоянное напряжение или амплитудные значения переменного напряжения) в элегазе (кривая 1) и в воздухе (кривая 2) в зависимости от абсолютного давления газа

Однородное поле, расстояние между электродами 3,8 мм

Рис. 6-2. Пробивное напряжение (при частоте 50 Гц, действующее значение) в парах C_7F_{14} (кривая 1), в SF_6 (кривая 2) и в воздухе (кривая 3), в зависимости от абсолютного давления

Электроды — сферы диаметром 12,5 мм, расстояние между ними 5 мм. Для сопоставления звездочкой отмечено значение пробивного напряжения трансформаторного масла средней степени очистки между теми же электродами при нормальном атмосферном давлении

окисляющее действие на соприкасающиеся с ним материалы. Однако некоторые газы, имеющие высокую молекулярную массу, и соединения, содержащие галогены (фтор, хлор), для ионизации которых требуется большая энергия, имеют заметно повышенную по сравнению с воздухом электрическую прочность.

Так, гексафторид серы (шестифтористая сера) SF_6 имеет электрическую прочность примерно в 2,5 раза выше, чем у воздуха; в связи с этим гексафторид серы был назван впервые исследовавшим этот газ советским ученым Б. М. Гохбергом *элегазом* (сокращение от слов «электричество» и «газ»). На рис. 6-1 приведены значения пробивного напряжения между двумя металлическими дисковыми электродами с закругленными краями в воздухе и в элегазе в зависимости от абсолютного давления газа. Как видно из табл. 6-1, элегаз примерно в 5,1 раза тяжелее воздуха и обладает низкой температурой кипения; он может быть сжат (при нормальной температуре) до давления 2 МПа без сжижения. Элегаз нетоксичен, химически стоек, не разлагается при нагреве до 800 °С, его с успехом можно использовать в конденсаторах, кабелях и т. п. Особенно велики преимущества элегаза при повышенных давлениях (рис. 6-2).

Дихлордиформетан CCl_2F_2 — так называемый *хладон-12*, имеет электрическую прочность, близкую к электрической прочности элегаза, но его температура кипения всего лишь 242,7 К (−30,5 °С), и он при нормальной температуре может быть сжат без сжижения лишь до 0,6 МПа. Хладон-12 вызывает коррозию некоторых твердых органических электроизоляционных материалов, что надо иметь в виду при конструировании электрических холодильников.

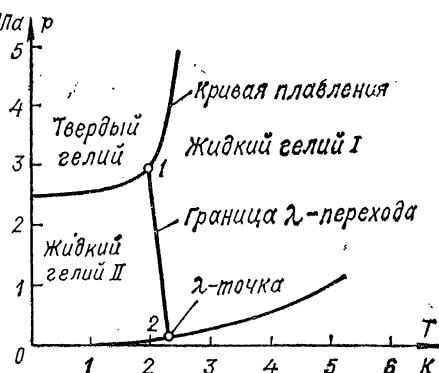
Многие перфторированные углеводороды, т. е. углеводороды, в молекулах которых все атомы водорода заменены атомами фтора, имеющие общий состав C_xF_y при нормальных условиях, являются газами (например, CF_4 , C_2F_6 , C_3F_8 , C_4F_{10} , C_5F_{12}) или жидкостями (например, C_6F_{14} , C_7F_{16} , C_8F_{18} , C_9F_{20} , $C_{10}F_{22}$). Электрическая прочность некоторых из этих газов, а также паров жидкостей существенно (в шесть—десять раз) превосходит электрическую прочность воздуха. Как видно из рис. 6-2, электрическая прочность фторсодержащих газов и паров при нормальных условиях может быть того же порядка, что и электрическая прочность электроизоляционных жидкостей; в то же время рассматриваемые газы по сравнению с жидкими диэлектриками (§ 6-3, 6-4) имеют такие преимущества, как значительно меньшая плотность (что приводит к уменьшению массы заполняемых газом аппаратов), более высокая на-

Рис. 6-3. Фазовая диаграмма гелия МПа р

гревостойкость и стойкость к старению. Даже небольшая примесь к воздуху элегаза, фреона, перфторорганических газов или паров заметно повышает его электрическую прочность, что используется в некоторых электрических устройствах высокого напряжения.

Значительный интерес для электротехники представляет водород. Это очень легкий газ, обладающий весьма благоприятными свойствами для использования его в качестве охлаждающей среды вместо воздуха (как видно из табл. 6-1, водород характеризуется высокой теплопроводностью и удельной теплоемкостью). При использовании водорода охлаждение вращающихся электрических машин существенно улучшается. Кроме того, при замене воздуха водородом заметно снижаются потери мощности на трение ротора машины о газ и на вентиляцию, так как эти потери приблизительно пропорциональны плотности газа. Ввиду отсутствия окисляющего действия кислорода воздуха замедляется старение органической изоляции обмоток машины и устраняется опасность пожара при коротком замыкании внутри машины. Наконец, в атмосфере водорода улучшаются условия работы щеток. Так как водородное охлаждение позволяет повысить мощность машины и ее КПД, и поэтому крупные турбогенераторы и синхронные компенсаторы выполняются с водородным охлаждением (еще более эффективное охлаждение достигается циркуляцией жидкости внутри полых проводников обмоток статора и даже — что, конечно, технически сложнее — ротора). Применение циркуляционного водородного охлаждения требует герметизации машины (подшипники уплотняются при помощи масляных затворов). Чтобы избежать попадания внутрь машины воздуха (водород при содержании его в воздухе от 4 до 74 % по объему образует взрывчатую смесь — гремучий газ), внутри машины поддерживается некоторое избыточное давление, сверх атмосферного; постепенная утечка водорода восполняется подачей газа из баллонов. При прочих равных условиях электрическая прочность водорода примерно на 40 %, а угольного ангидрида CO_2 — на 10 % ниже, чем электрическая прочность воздуха. Для заполнения газоразрядных приборов употребляются инертные газы аргон, неон и другие, а также пары ртути и натрия. Инертные газы обладают низкой электрической прочностью. Следует отметить весьма малую теплопроводность криптона и ксенона; это обстоятельство используется в производстве некоторых типов электрических ламп. Особо большое значение в качестве низкотемпературного хладагента, в частности для устройств, использующих явление сверхпроводимости, имеет сжиженный гелий. Гелий представляет собой исключительно интересный газ, обладающий уникальными свойствами. Так, у него самая низкая по сравнению с другими газами (если не считать легкого изотопа того же элемента, см. ниже) температура сжижения (4,216 К при атмосферном давлении). Жидкий гелий имеет очень малую плотность (примерно в восемь раз меньше плотности воды при нормальной температуре; однако еще меньшей плотностью обладает жидкий водород). Квантовомеханические явления в жидком гелии делают его поведение во многом сходным с поведением газов, а не жидкостей. Диэлектрическая проницаемость жидкого гелия 1,047 при температуре кипения и 1,056 при 1,8 К; эти значения того же порядка, что и ϵ_r газов. Весьма мало различие коэффициентов теплопроводности жидкого и газообразного гелия: отношение коэффициентов теплопроводности жидкости и газа составляет лишь 1,3. Мало и поверхностное натяжение жидкого гелия. Теплоота испарения его чрезвычайно низка, что существенно для криогенной техники.

При дальнейшем охлаждении нормальный жидкий гелий (гелий I) переходит в новую модификацию — гелий II. Этот фазовый переход, открытый в 1937 г. академиком П. Л. Капицей, носит название λ -перехода (точки 1, 2), а точка пересечения границы λ -перехода с кривой испарения на фазовой диаграмме гелия (рис. 6-3) называется λ -точкой; температура λ -точки равна 2,1735 К. Вязкость



гелия II практически равна нулю (это состояние П. Л. Капица назвал сверхтекучестью; так, гелий II легко проникает сквозь щель между шлифованными стеклянными пластинками). Коэффициент теплопроводности гелия II практически бесконечно велик, удельная теплоемкость жидкого гелия при λ -переходе возрастает во много раз. Теоретическое объяснение необычайных свойств гелия II было дано академиком Л. Д. Ландау.

Твердый гелий, как видно из рис. 6-3, может быть получен лишь при давлении не ниже 2,5 МПа.

Легкий изотоп гелия He^3 с атомной массой 3, находится в природном гелии, в количестве примерно равном одной части на миллион частей обычного гелия He^4 , имеющего атомную массу, равную четырем. He^3 также может быть получен искусственным путем в атомных реакторах, в частности, из лития. Легкий гелий сжижается при еще более низкой температуре (3,195 К), чем He^4 ; он не переходит в сверхтекучее состояние вплоть до температуры 0,001 К, однако растворы He^3 и He^4 при некоторых соотношениях между компонентами обладают сверхтекучестью. Разделить изотопы He^3 и He^4 можно дробной перегонкой, благодаря различию их температур кипения, а также используя явление сверхтекучести He^4 . Свойства растворов He^3 — He^4 используются в некоторых системах особо глубокого охлаждения.

Иногда в качестве криогенного хладагента применяется жидкий неон, температура кипения которого лишь ненамного превосходит температуру кипения водорода. Для неона, как и для других инертных газов, характерно весьма малое различие между температурой кипения $T_{\text{кип}}$ и температурой плавления $T_{\text{пл}}$. Так, для неона разность $T_{\text{кип}} - T_{\text{пл}}$ составляет всего 3,5 К, в то время как для азота, например, эта разность около 14 К, а для кислорода — около 36 К.

Химическая инертность неона — это его преимущество перед взрывоопасным (см. стр. 93) водородом. Однако неон очень дорогой газ: если принять относительную стоимость 1 м³ азота за единицу, то стоимость водорода будет около 2, гелия — 80 и неона — 30 000 единиц.

Жидкий азот легко получается при разделении воздуха на азот и кислород; жидкий водород производится промышленностью многих стран (как ракетное топливо) в больших количествах.

Для получения умеренно низких температур широко применяется твердый угольный ангидрид CO_2 — «сухой лед» (см. табл. 6-1).

6-3. НЕФТЯНЫЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАСЛА

Трансформаторное масло, которым заливают силовые трансформаторы, из всех жидких электроизоляционных материалов находит наибольшее применение в электротехнике. Его назначение двояко: во-первых, масло, заполняя поры в волокнистой изоляции, а также промежутки между проводами обмоток и между обмотками и баком трансформатора, значительно повышает электрическую прочность изоляции; во-вторых, оно улучшает отвод теплоты, выделяемой за счет потерь в обмотках и сердечнике трансформатора. Лишь некоторые силовые и измерительные трансформаторы выполняются без заливки маслом («сухие» трансформаторы). Еще одна важная область применения трансформаторного масла — масляные выключатели высокого напряжения. В этих аппаратах разрыв электрической дуги между расходящимися контактами выключателя происходит в масле или в находящихся под повышенным давлением газах, выделяемых маслом под действием высокой температуры дуги; это способствует охлаждению канала дуги и быстрому ее гашению. Трансформаторное масло применяется также для заливки маслонаполненных вводов, некоторых типов реакторов, реостатов и других электрических аппаратов.

Трансформаторные, а также другие *нефтяные* («минеральные») *электроизоляционные* масла получают из нефти посредством ее ступенчатой перегонки с выделением на каждой ступени определенной (по температуре кипения) фракции и последующей тщательной очистки от химически нестойких примесей в результате обработки серной кислотой, затем щелочью, промывки водой и сушки. Часто электроизоляционные масла дополнительно обрабатываются адсорбентами, т. е. веществами (особые типы глин или же получаемые искусственным путем материалы), которые обладают сильно развитой поверхностью и при соприкосновении с маслом поглощают воду и различные полярные примеси. Такая обработка производится или перемешиванием нагретого масла с измельченным адсорбентом с последующим отстаиванием, или же фильтрованием масла сквозь слой адсорбента (перколяция). Применяются и другие способы очистки масла.

Трансформаторное масло — это жидкость от почти бесцветной до темно-желтого цвета, по химическому составу представляющая собой смесь различных углеводородов. Нефти разных месторождений отличаются по своим параметрам и зависимостям этих параметров от температуры.

Практически важные свойства трансформаторного масла нормируются стандартом ГОСТ 982—80. По средним фактическим данным (при различных способах очистки) кинематическая вязкость этого масла составляет 17—18,5 мм²/с при 20 °С и 6,5—6,7 мм²/с при 50 °С; кислотное число 0,03—0,1 г КОН/кг; температура вспышки паров 135—140 °С; температура застывания около минус 45 °С. Типичная температурная зависимость кинематической вязкости трансформаторного масла показана на рис. 6-4, кривая 1). Ограничение вязкости весьма важно, так как слишком вязкое масло хуже отводит теплоту потерь от обмоток и магнитопровода трансформатора.

Трансформаторное масло — горючая жидкость; большие количества (часто тысячи тонн) масла, находящиеся в масляных хозяйствах энергосистем, представляют собой большую пожарную опасность. Поэтому в масляных хозяйствах необходимо тщательно соблюдать все требования, предписываемые правилами пожарной безопасности. Пожарная опасность масла оценивается по температуре вспышки (см. § 5-3).

Температура застывания масла — параметр, особенно важный для масла, заливаемого в масляные выключатели, устанавливаемые на открытых подстанциях в районах с суровой зимой. Специальное «арктическое» масло (марки АТМ-65) имеет температуру застывания минус 70 °С.

Помимо температуры застывания, для работающих при низких температурах окружающей среды электроизоляционных жидкостей, имеющих плотность менее 1 Мг/м³, важна *критическая температура плаваемости льда*. Ниже этой температуры кристаллики льда, образующегося при замерзании примесей воды, плавают в электроизоляционной жидкости и таким образом снижают ее электрическую прочность (иными словами, в этом интервале температур плотность

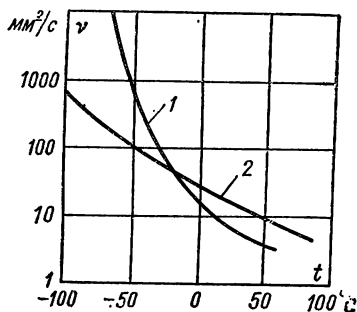


Рис. 6-4

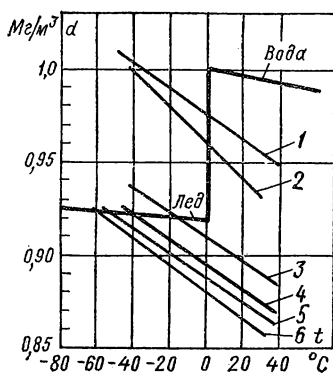


Рис. 6-5

Рис. 6-4. Зависимости кинематической вязкости от температуры для трансформаторного масла (кривая 1) и кремнийорганической жидкости (кривая 2)

Рис. 6-5. Зависимости плотности воды, льда, трансформаторных масел (кривые 3, 4, 5) и кремнийорганических жидкостей (кривые 1, 2, 6) от температуры
1 — ПЭС № 3; 2 — ПМС № 10; 3 — масло Т-750; 4 — по ГОСТ 982—68; 5 — арктическое масло АТМ-65; 6 — ПЭС № 1

электроизоляционной жидкости больше плотности льда). Сказанное иллюстрируется рис. 6-5. Электрическая прочность масла — величина, чрезвычайно чувствительная к его увлажнению. В § 4-3 было показано, что незначительная примесь воды в масле резко снижает его электрическую прочность (см. рис. 4-6). Это объясняется тем, что ϵ_r воды (около 80) значительно выше, чем масла (ϵ_r чистого масла около 2,2). Под действием сил электрического поля капельки эмульгированной в масле воды втягиваются в места, где напряженность поля особенно велика и где, собственно, и начинается развитие пробоя. Еще более резко понижается электрическая прочность масла, если в нем, кроме воды, содержатся волокнистые примеси. Волокна бумаги, хлопчатобумажной пряжи легко впитывают в себя влагу из масла, причем значительно возрастает их ϵ_r . Под действием сил поля увлажненные волокна не только втягиваются в места, где поле сильнее, но и располагаются по направлению силовых линий, что весьма облегчает пробой масла.

Вода легко может попасть в масло при его перевозке, хранении, переливке в недостаточно просушенную тару и т. п. Для сушки масла имеется несколько способов: пропускание под давлением сквозь фильтровальную бумагу в специальных установках — фильтро-прессах; воздействие на масло центробежной силы в центрифуге, причем вода, имеющая плотность, большую, чем у масла, отжимается к периферии сосуда и отделяется от масла; уже упоминавшаяся обработка адсорбентами; распыление нагретого масла в камере, заполненной азотом, и т. п. При сушке электрическая прочность увлажненного масла восстанавливается.

Согласно «Правилам технической эксплуатации электростанций» (ПТЭ) предусматриваются наименьшие значения электрической

прочности трансформаторного масла (табл. 6-2). В соответствии с этими «Правилами» пробой образца масла производят между двумя погруженными в масло металлическими дисковыми электродами диаметром 25 мм с закругленными краями при расстоянии между ними 2,5 мм (рис. 6-6); определяют действующее значение пробивного напряжения при частоте 50 Гц (усредненное для нескольких последовательных пробоев одного и того же образца). В табл. 6-2 даны значения пробивного напряжения (в киловольттах), отнесенные к междуэлектродному расстоянию 2,5 мм. ПТЭ предусматривают различные нормы для чистого и сухого масла, подготовленного к заливке в трансформатор или иной аппарат, и для масла, находившегося в эксплуатации в маслonaполненном аппарате (из всякого маслonaполненного аппарата периодически должны отбираться пробы масла для испытания).

Зависимости $\operatorname{tg} \delta$ трансформаторных масел от температуры имеют вид, характерный для неполярных диэлектриков (рис. 6-7).

Плотность трансформаторного масла 0,85—0,90 Мг/м³. Его температурный коэффициент объемного расширения около 0,00065 К⁻¹ (эта величина важна для расчета расширителей трансформаторов, в которые выдавливается из бака часть масла при повышении тем-

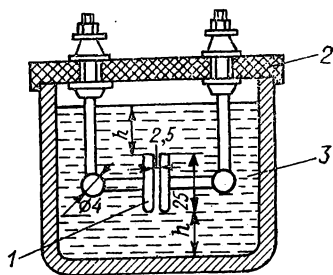


Рис. 6-6

Рис. 6-6. Стандартный сосуд с электродами для испытания на пробой трансформаторного масла

1 — дисковые металлические электроды; 2 — крышка; 3 — испытуемое масло. Расстояние $h \geq 15$ мм

Рис. 6-7. Зависимость $\operatorname{tg} \delta$ трансформаторного масла от температуры при частоте 50 Гц

1 — масло, полученное методом кислотной очистки; 2 — то же, но доочищенное путем обработки адсорбентом

Таблица 6-2
Нормы электрической прочности трансформаторного масла

Для аппаратов с рабочим напряжением, кВ	Электрическая прочность $U_{пр/2,5}$, кВ/мм, не менее	
	сухого масла	масла, находящегося в эксплуатации
≤ 6	25	20
35	30	25
110 и 220	40	35
≥ 330	50	45

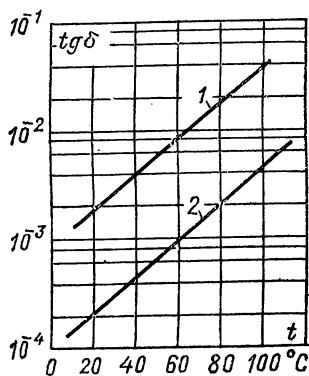


Рис. 6-7

пературы). При нормальной температуре удельная теплоемкость масла примерно $1,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, а коэффициент теплопроводности — около $1 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; при росте температуры как удельная теплоемкость, так и коэффициент теплопроводности масла увеличивается. Масло отводит теплоту потерь от погруженных в него обмоток и магнитопровода трансформатора в 25—30 раз интенсивнее, чем воздух (при свободной конвекции).

При работе в трансформаторе или ином маслозаполненном электрическом аппарате масло постепенно стареет. При старении оно становится более темным, в нем образуются загрязняющие его продукты — кислоты, смолы, которые частично растворимы в масле, а частично оказываются нерастворимыми; последние, как более тяжелые, осаждаются на дне бака и на погруженных в масло деталях в виде слоя «ила», значительно ухудшающего теплоотвод от нагревающихся деталей. Образующиеся в масле низкомолекулярные кислоты разрушают изоляцию обмоток и вызывают коррозию соприкасающихся с маслом металлов. При старении увеличиваются вязкость и кислотное число масла, ухудшаются его электроизоляционные свойства. Обычно температура вспышки паров масла в эксплуатации постепенно повышается вследствие испарения углеводородов с малой молекулярной массой, однако при местных перегревах масла в трансформаторах (а также после разрыва электрической дуги в масляном выключателе) может произойти *крекинг* (разрыв молекул с образованием углеводородов пониженной молекулярной массы), что приводит к понижению температуры вспышки.

Скорость старения масла возрастает: а) при доступе воздуха, так как старение масла в значительной степени связано с его окислением кислородом воздуха; особенно интенсивно идет старение при соприкосновении масла с озоном; б) при повышении температуры (обычно наивысшей рабочей температурой масла считают 95°C); в) при соприкосновении масла с некоторыми металлами (медь, железо, свинец) и другими веществами — катализаторами старения; г) при воздействии света; д) при воздействии электрического поля.

При старении в электрическом поле некоторые сорта масел выделяют газы; это очень вредно, так как пузырьки газов могут стать очагами ионизации. Способность не выделять газов при старении в электрическом поле или даже поглощать ранее выделившиеся газы называется *газостойкостью* масла.

Масло различного происхождения обладает различной стойкостью к старению, поэтому перед введением в эксплуатацию трансформаторное масло подвергают испытанию на ускоренное старение в особо жестких условиях.

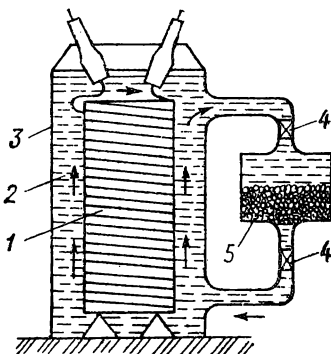
Регенерация начавшего стареть масла, т. е. удаление из него продуктов старения и восстановление исходных свойств, достигается обработкой масла адсорбентами (как говорилось выше, адсорбенты поглощают не только воду, но и другие полярные вещества; продукты старения масла являются полярными примесями в непolarном масле).

Помимо регенерации определенного количества масла с последующей заливкой его в трансформатор возможно вести непрерывный процесс регенерации масла в работающем трансформаторе. Для этой цели трансформатор снабжают термосифонным фильтром (рис. 6-8). Масло, нагреваясь во время работы трансформатора и уменьшая при этом свою плотность, поднимается в верхнюю часть бака, попадает в трубопровод термосифона, проходит сверху вниз сквозь фильтр со слоем адсорбента и поступает в нижнюю часть бака трансформатора. Фильтр при помощи вентилей можно отключать для смены адсорбента.

Применяют и другие мероприятия для замедления старения масла. Так, воздух над уровнем масла в трансформаторах (а также в баках, в которых хранится запас масла) сообщается с наружным воздухом через воздухоочистительные фильтры; эти фильтры заполняются силикагелем, хлористым кальцием и тому подобными веществами и поглощают из воздуха влагу, пыль и химически активные загрязнения. Часто заполняют промежутки над маслом в герметичном баке трансформатора вместо воздуха азотом, чтобы исключить доступ кислорода к маслу (азотная защита).

Рекомендуется добавление к трансформаторному маслу *ингибиторов* (антиокислительных присадок), которые в противоположность катализаторам замедляют старение масла; таковы ионол, амидопирин и некоторые другие вещества. Для

Рис. 6-8. Схема непрерывной термосифонной регенерации масла в работающем трансформаторе
1 — трансформатор; 2 — масло в баке; 3 — бак; 4 — вентили; 5 — фильтр с адсорбентом



каждого типа масла необходим подбор соответствующего ингибитора. Применение правильно выбранных ингибиторов позволяет увеличить срок эксплуатации масла и дает большой экономический эффект.

В стеклянных консерваторах маслonaполненных вводов рекомендуется покрывать наружную поверхность стекла темной краской, чтобы предохранить масло от действия света.

Помимо трансформаторного масла в электротехнической промышленности широко применяются и другие виды нефтяных электроизоляционных масел.

Конденсаторное масло служит для пропитки бумажных конденсаторов, в особенности силовых, предназначенных для компенсации индуктивного фазового сдвига. При пропитке бумажного диэлектрика повышаются как его ϵ_r , так и $E_{пр}$; то и другое дает возможность уменьшить габаритные размеры, массу и стоимость конденсатора при заданном рабочем напряжении, частоте и емкости.

Нефтяное конденсаторное масло имеет плотность $0,86-0,89 \text{ Мг/м}^3$, температуру застывания минус 45°C , $\epsilon_r = 2,1-2,3$ и $\text{tg } \delta \text{ } 0,002$ (при частоте 1 кГц).

Вазелиновое конденсаторное масло по плотности и электрическим свойствам близко к нефтяному, но имеет более высокую температуру застывания (минус 5°C). Электрическая прочность конденсаторных масел не менее 20 МВ/м .

Кабельные масла используются в производстве силовых электрических кабелей; пропитывая бумажную изоляцию этих кабелей, они повышают ее электрическую прочность, а также способствуют отводу теплоты потерь. Кабельные масла бывают различных типов. Для пропитки изоляции силовых кабелей на рабочие напряжения до 35 кВ в свинцовых или алюминиевых оболочках (кабели с вязкой пропиткой) применяется масло марки КМ-25 с кинематической вязкостью не менее $23 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 100°C , температурой застывания не выше минус 10°C и температурой вспышки не ниже $+220^\circ\text{C}$. Для увеличения вязкости к этому маслу дополнительно добавляется канифоль (стр. 125) или же синтетический загуститель.

В маслonaполненных кабелях используются менее вязкие масла. Так, масло марки МН-4 применяется для маслonaполненных кабелей на напряжения $110-220 \text{ кВ}$, в которых во время эксплуатации с помощью подпитывающих устройств поддерживается избыточное давление $0,3-0,4 \text{ МПа}$. Кинематическая вязкость этого масла при 100°C не более $3,5 \text{ мм}^2/\text{с}$, при 50°C не более $10 \text{ мм}^2/\text{с}$, при 20°C не более $40 \text{ мм}^2/\text{с}$ и при 0°C не более $110 \text{ мм}^2/\text{с}$; температура застывания не выше минус 45°C и температура вспышки не ниже $+135^\circ\text{C}$.

Для маслonaполненных кабелей высокого давления (до $1,5 \text{ МПа}$) на напряжения от 110 до 500 кВ , прокладываемых в стальных трубах, применяется особо тщательно очищенное масло марки С-200; оно имеет кинематическую вязкость при 100°C не более $11 \text{ мм}^2/\text{с}$, при 50°C не более $50 \text{ мм}^2/\text{с}$, при 20°C не более $800 \text{ мм}^2/\text{с}$ и при 0°C не более $5000 \text{ мм}^2/\text{с}$. Температура застывания масла С-200 не выше минус 30°C ; температура вспышки не ниже плюс 200°C ; $\text{tg } \delta$ (при 50 Гц и 100°C) не более $0,003$; электрическая прочность (при 50 Гц и 20°C) не менее 20 МВ/м .

6-4. СИНТЕТИЧЕСКИЕ ЖИДКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Трансформаторное и другие описанные в § 6-3 электроизоляционные масла нефтяного происхождения обладают преимуществами, которые и обеспечили им весьма широкое применение: они сравнительно дешевы и могут производиться заводами нефтеперерабатывающей промышленности в больших количествах; при хорошей очистке $\text{tg } \delta$, как это и свойственно чистым неполярным диэлектрикам, мал, а электрическая прочность, достаточно высока. Однако в некоторых случаях качество этих масел оказывается недостаточно высоким. Например, когда требуется полная пожарная безопасность и взрывобезопасность, маслonaполненные транс-

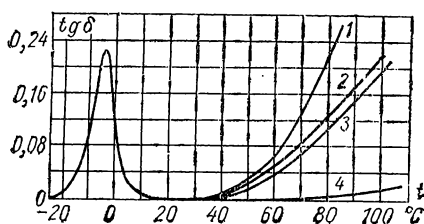


Рис. 6-9. Зависимости $\operatorname{tg} \delta$ совола разной степени очистки от температуры при частоте 50 Гц

1 — совол после первой перегонки; 2 — после второй перегонки; 3 — после обработки адсорбентом силикагелем; 4 — после обработки адсорбентом — специальной глиной

форматоры и другие аппараты применяться не могут.

Нефтяные масла склонны и к электрическому старению, т. е. они могут ухудшать свои свойства под действием электрического поля высокой напряженности. Для пропитки конденсаторов с целью получения повышенной емкости в данных габаритных размерах конденсатора желательно иметь полярный жидкий диэлектрик с более высоким, чем у неполярных нефтяных масел, значением ϵ_r .

Имеются синтетические жидкие диэлектрики, по тем или иным свойствам превосходящие нефтяные электроизоляционные масла. Рассмотрим важнейшие из них.

Хлорированные углеводороды получают из различных углеводородов путем замены в их молекулах некоторых (или даже всех) атомов водорода атомами хлора. Наиболее широкое применение имеют полярные продукты хлорирования *дифенила*, имеющие общий состав $C_{12}H_{10-n}Cl_n$. Молекула дифенила $C_{12}H_{10}$ (или $H_5C_5 - C_6H_5$) состоит из двух фенильных остатков. Чаще всего применяются смеси различных изомеров хлорированных дифенилов со средней степенью хлорирования n от 3 до 6.

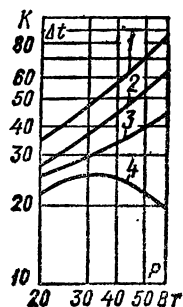
Хлорированные дифенилы (ХД) обладают ϵ_r , повышенной по сравнению с неполярными нефтяными маслами; так, пентахлордифенил $C_{12}H_5Cl_5$ (в СССР называется *совол*) имеет при 50 Гц и 20 °C $\epsilon_r = 5$, а при 90 °C — $\epsilon_r = 4,1$. Поэтому замена масел на ХД при пропитке конденсаторов уменьшает объем конденсатора (при той же электрической емкости) почти в два раза. Преимуществом ХД является также их негорючесть. Однако ХД имеют и свои недостатки. Они сильно токсичны, из-за чего применение их для пропитки конденсаторов в некоторых странах запрещено законом. В связи с сильно выраженной полярностью ХД на их электроизоляционные свойства весьма значительно влияют примеси (рис. 6-9); наличие примесей существенно сказывается на потерях сквозной электропроводности при повышенной температуре, но практически не влияет на $\operatorname{tg} \delta$ в области дипольного максимума потерь. Недостатком ХД является заметное снижение их ϵ_r и, следовательно, емкости пропитанных ХД конденсаторов при пониженных температурах. Хлорированные дифенилы обладают сравнительно высокой вязкостью, что в некоторых случаях вызывает необходимость разбавления ХД менее вязкими хлорированными углеводородами. Так, при 50 °C кинематическая вязкость совола составляет 75 мм²/с, а трихлордифенила ($C_{12}H_7Cl_3$) — 126 мм²/с; совтол (смесь 90 % совола и 10 % трихлорбензола $C_6H_3Cl_3$) имеет при той же температуре вязкость 25 мм²/с, а гексол (смесь 20 % совола и 80 % гексхлорбутадиена C_4Cl_6) — всего 1,8 мм²/с. Температура застывания совола равна +5° С, совтола — минус 7° С, гексола — ниже минус 60° С.

Кремнийорганические жидкости обладают малым $\operatorname{tg} \delta$, низкой гигроскопичностью и повышенной нагревостойкостью. Для них характерна слабо выраженная зависимость вязкости от температуры (см. рис. 6-4). Как и другие кремнийорганические продукты, эти жидкости весьма дорогие. В зависимости от характера радикалов, присоединенных к атомам Si (стр. 123), различают полиметилсилоксановые (ПМС), полиэтилсилоксановые (ПЭС), полифенилсилоксановые (ПФС) и другие кремнийорганические жидкости. Кремнийорганические жидкости имеют ϵ_r от 2,5 до 3,3 и $\operatorname{tg} \delta$ от 0,0001 до 0,0003 (при 1 кГц и 20 °C); наивысшая допустимая рабочая температура некоторых из этих жидкостей доходит до 250 °C (длительно) и до 350 °C (кратковременно). Кинематическая вязкость жидкости марки ПМС-10 (ГОСТ 13032—77) около 10 мм²/с, а марки ПМС-20 — около 20 мм²/с (при 20 °C).

Фторорганические жидкости имеют малый $\operatorname{tg} \delta$, ничтожно малую гигроскопичность и высокую нагревостойкость. Некоторые фторорганические жидкости могут длительно работать при температуре 200 °C и выше. Как отмечалось (стр. 63, 92), пары некоторых фторорганических жидкостей имеют необычно высокую для газообразных диэлектриков электрическую прочность.

Рис. 6-10. Превышение температуры обмоток над температурой бака малогабаритного трансформатора как функция нагрузки трансформатора для различных заполняющих жидкостей

1 — кремнийорганическая жидкость; 2 — нефтяное трансформаторное масло; 3 — фторорганическая жидкость (C_4F_9)₃N (температура кипения 178 °C); 4 — фторорганическая жидкость (C_4F_9)₂O (температура кипения 101 °C)



Характерными свойствами фторорганических жидкостей являются малая вязкость, низкое поверхностное натяжение (что благоприятствует пропитке пористой изоляции), высокий температурный коэффициент объемного расширения (значительно больший, чем у других электроизоляционных жидкостей), сравнительно высокая летучесть. Последнее обстоятельство требует герметизации аппаратов, заливаемых фторорганическими жидкостями. Фторорганические жидкости способны обеспечивать значительно более интенсивный отвод теплоты потерь от охлаждаемых ими обмоток и магнитопроводов, чем нефтяные масла или кремнийорганические жидкости. Существуют специальные конструкции малогабаритных электротехнических устройств с заливкой фторорганическими жидкостями, в которых для улучшения отвода теплоты используется испарение жидкости с последующей конденсацией ее в охладителе и возвратом в устройство (*кипящая изоляция*); при этом теплота испарения отнимается от охлаждаемых обмоток, а наличие в пространстве над жидкостью фторорганических паров, в особенности под повышенным давлением, значительно увеличивает электрическую прочность газовой среды в аппарате.

Преимущество фторорганических жидкостей перед нефтяным маслом и, тем более, перед кремнийорганической жидкостью хорошо иллюстрирует рис. 6-10. Переход кривой 4 через максимум объясняется достижением температуры кипения жидкости при повышении нагрузки.

Важным преимуществом фторорганических жидкостей по сравнению с кремнийорганическими является полная негорючесть и высокая дугостойкость (кремнийорганические жидкости, как и нефтяные масла, сравнительно легко загораются и горят сильно коптящим пламенем). Как и кремнийорганические соединения, фторорганические жидкости пока еще весьма дорогие.

Прочие синтетические жидкости. Представляют интерес и некоторые другие полярные электроизоляционные жидкости. *Нитробензол* $H_5C_6-NO_2$, *этиленгликоль* $HO-CH_2-CH_2-OH$ и *цианоэтилсахароза* $C_{88}H_{46}N_8O_{11}$ имеют высокую диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 35 \div 39$.

Помимо синтетических электроизоляционных жидкостей, отличающихся по химическому составу и свойствам от нефтяных масел, существуют и *синтетические жидкости углеводородного состава*. Эти неполярные жидкости в некоторых случаях обладают более ценными свойствами (лучшие электроизоляционные свойства, стойкость к тепловому старению, газостойкость) по сравнению с нефтяными маслами.

Так, пропитка бумажных конденсаторов полиизобутиленом (стр. 111) с низкой (10—20) степенью полимеризации приводит к повышению постоянной времени самозаряда (см. § 2-1) конденсатора примерно на порядок по сравнению с пропиткой нефтяным конденсаторным маслом или вазелином (стр. 129).

Сравнительно дешевый отечественный материал (*октол*) представляет собой смесь полимеров изобутилена и его изомеров, имеющих общий состав C_4H_8 и получаемых из газообразных продуктов крекинга нефти. Откол имеет молекулярную массу от 400 до 1500 и плотность 0,850—0,875 $Mг/м^3$; его вязкость при плюс 70 °C составляет 1,3—3,0 $мПа \cdot с$.

Значение ϵ_r около 2,0—2,2; $\tan \delta$ (при 1 кГц) 0,0001; температура застывания минус 12 °C.

6-5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОРГАНИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРАХ

Среди диэлектриков особое значение имеют высокомолекулярные органические материалы. Для того чтобы разобраться в свойствах и возможностях этих материалов, необходимо предварительно озна-

комиться с общими закономерностями, касающимися их строения и свойств, а также установить некоторые термины и понятия, которые неоднократно будут использоваться в дальнейшем изложении.

Как отмечалось выше, *органическими веществами* называют соединения углерода с другими элементами. Углерод обладает высокой способностью к образованию большого числа химических соединений с весьма разнообразным строением молекулы; он участвует в образовании веществ с цепочечным, разветвленным или кольцевым «скелетом» молекул, состоящим или только из атомов углерода, или же из атомов углерода, между которыми заключены атомы других элементов.

Учение о строении органических веществ, до наших дней являющееся основой для познания этих веществ и создания новых их видов, было разработано в 60-х годах прошлого столетия выдающимся русским химиком А. М. Бутлеровым. Сейчас известно более миллиона органических соединений, в то время как соединений, не содержащих углерода, известно всего лишь около пятидесяти тысяч.

Некоторые органические электроизоляционные материалы представляют собой низкомолекулярные вещества, молекулы которых образованы единицами или десятками атомов. Из уже рассмотренных нами веществ к ним относятся, например, хладоны, углеводороды, нефтяные масла, хлорированные дифенилы.

Однако наибольшее число органических электроизоляционных материалов принадлежит к *высокомолекулярным соединениям*, т. е. к веществам с весьма большими молекулами, содержащими иногда многие тысячи атомов. Молекулярная масса таких веществ может достигать примерно до миллиона, а геометрические размеры молекул настолько велики, что растворы этих веществ, если вообще способны растворяться, по свойствам приближаются к коллоидным системам.

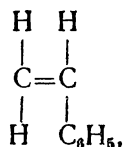
К высокомолекулярным материалам принадлежат некоторые встречающиеся в природе (входящие в состав растительных и животных организмов) вещества, например целлюлоза, шелк, белки, каучук и т. п.

Получаемые искусственным путем высокомолекулярные материалы могут быть разделены на два класса. Во-первых, сюда относятся *искусственные материалы*, изготавливаемые путем химической обработки природных высокомолекулярных веществ: так, например, при переработке целлюлозы получают эфиры целлюлозы (стр. 125). Но наибольшее значение как для электроизоляционной техники, так и для многих других отраслей техники имеет второй класс — *синтетические высокомолекулярные материалы*, изготавливаемые из низкомолекулярных веществ. Многие из этих материалов обладают ценными техническими свойствами, к тому же некоторые из них могут быть получены из дешевого и легко доступного сырья (природный газ, нефть, ископаемые угли и пр.). Поэтому изучению, разработке и применению таких материалов для самых разнообразных целей, в том числе и для электрической изоляции, уделяется весьма большое внимание и промышленный выпуск их неуклонно увеличивается.

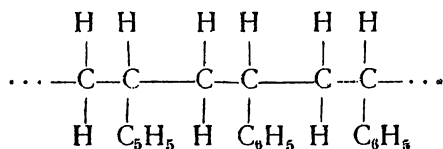
Практически важные высокомолекулярные соединения по своей химической природе являются *полимерами*, т. е. веществами, молекулы которых представляют собой совокупность большого числа имеющих одинаковое строение групп атомов, и получаются в результате объединения друг с другом молекул сравнительно простых по своему составу веществ, так называемых *мономеров*.

Реакция образования полимера из мономера носит название *полимеризации*. При полимеризации молекулярная масса, естественно, увеличивается; возрастает температура плавления и кипения, повышается вязкость: в процессе полимеризации вещество может переходить из газообразного или жидкого состояния в состояние весьма густой жидкости и далее в состояние твердого тела; уменьшается растворимость и т. д.

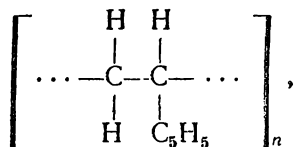
Приведем простой пример: *стирол* — жидкий ненасыщенный углеводород, имеющий элементарный состав C_8H_8 и строение молекулы



благодаря наличию двойной связи между двумя соседними атомами углерода обладает способностью легко полимеризоваться. Образующийся в результате полимеризации из стирола (мономера) полимер стирола — так называемый *полистирол* — является уже твердым веществом; его молекула имеет строение



и может быть представлена как цепочка, состоящая из одинаковых повторяющихся звеньев, каждое из которых представляет собой одну молекулу мономера — стирола, но с измененным характером связей между атомами C (простая связь C—C, а не двойная C=C):



где n — *степень полимеризации*, т. е. число молекул мономера, объединившихся в одну молекулу полимера.

Для полистирола значение n может доходить до 6000; таким образом, в то время как молекулярная масса стирола равна примерно $12 \cdot 8 + 1 \cdot 8 = 104$, молекулярная масса полистирола $C_{48000}H_{48000}$ составляет уже 624 000. Температура плавления стирола равна

минус 33 °С, а температура размягчения полистирола составляет +(70—85) °С.

Полимеры представляют собой не строго индивидуальные химические вещества, а смеси веществ несколько различающейся степени полимеризации (так называемых *полимеров-гомологов*), так что практически можно говорить лишь о некоторой *средней* степени полимеризации. Так как различные полимеры-гомологи имеют различные температуры плавления (чем выше степень полимеризации, тем выше и температура плавления), полимеры не имеют резко выраженной температуры плавления, которая свойственна низкомолекулярным веществам, а переходят из твердого состояния в жидкое при нагреве постепенно, на протяжении некоторого температурного *интервала размягчения*, поэтому для полимеров значение температуры размягчения (см. § 5-3) определяют с помощью условных методов.

Процесс полимеризации протекает при различных условиях с различной скоростью. Например, стирол не теряет своих свойств на холоде и в темноте продолжительное время, однако повышение температуры, освещение, добавление катализаторов способны резко ускорить переход жидкого стирола в твердый полистирол. Таким образом, скорость полимеризации можно регулировать, изменяя условия, в которых протекает процесс полимеризации. Чем выше заданная скорость полимеризации, тем в большем числе мест одновременно происходит процесс присоединения новых мономерных молекул к начавшим образовываться полимерным молекулам, и поэтому в данном объеме материала по окончании полимеризации будет большее число молекул полимера, так что средняя молекулярная масса полученного полимера станет меньше.

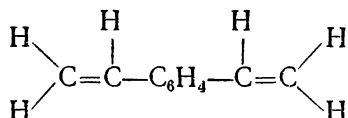
При определенных условиях (воздействие сравнительно высокой температуры, механическая обработка) полимер может разлагаться на вещества с меньшей степенью полимеризации. Такой процесс, противоположный процессу полимеризации, называется *деполимеризацией*.

В случаях, подобных рассмотренной выше полимеризации стирола, когда все атомы молекул мономера полностью входят в состав молекулы полимера, содержание каждого химического элемента в полимере должно быть таким же, как и в мономере. Но могут быть и более сложные случаи полимеризации. Таковы, например, совместная полимеризация (*сополимеризация*) нескольких мономеров различного состава и *поликонденсация*, когда не все атомы мономерных молекул входят в состав образующихся полимерных молекул, а одновременно с образованием полимера выделяется вода или иные низкомолекулярные вещества.

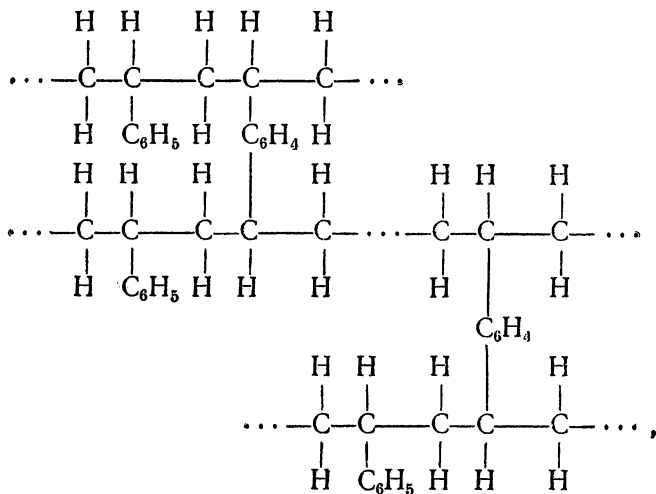
Полимеры делятся на две группы: *линейные* и *пространственные полимеры*. Молекулы *линейных* полимеров имеют вид цепочек или нитей (вообще говоря, не прямых, а изогнутых и переплетенных друг с другом), так что отношение длины молекулы к ее поперечным размерам чрезвычайно велико и может быть, например, около тысячи. Так, молекула полистирола при $n = 6000$ имеет длину около $1,5 \times 10^{-6}$ м; молекулы таких природных полимеров, как целлюлоза

и каучук, имеют длину около 10^{-7} — 10^{-6} м при поперечнике 10^{-10} — 10^{-9} м. Молекулы *пространственных* (трехмерных) полимеров развиты в пространстве в различных направлениях более равномерно, так что они имеют более компактную форму, приближаясь, грубо говоря, к форме шара.

Легко понять закономерность образования линейных или пространственных полимеров. Если молекулы мономера (различных мономеров при сополимеризации) имеют только по две реактивные точки, т. е. по две валентности, способные освобождаться и соединяться с другими молекулами, то в результате полимеризации получится линейный полимер — цепь, не имеющая никаких ответвлений. Это видно на примере полимеризации стирола, молекула которого обладает как раз двумя реактивными точками (образующимися при разрыве одной из связей, входящих в двойную связь; остающаяся связь более устойчива и в обычных условиях полимеризации не разрывается). Если же объединяются мономерные молекулы, из которых хотя бы часть имеет три (или более) реактивные точки, то возможно получение молекул сложного, разветвленного строения, присущего пространственным полимерам. Например, при сополимеризации стирола с небольшим количеством дивинилбензола, молекула которого



благодаря наличию двух двойных связей имеет четыре реактивные точки, получается пространственный полимер



молекулу которого можно рассматривать как ряд линейных молекул полистирола, в некоторых местах «сшитых» друг с другом посредством «мостиков» — в данном случае фениленовых групп $-\text{C}_6\text{H}_4-$.

При наличии в каждой мономерной молекуле только одной реактивной точки полимеризация вообще невозможна, так как после соединения друг с другом двух молекул мономера возможность дальнейшего присоединения молекул будет уже исчерпана.

Между свойствами линейных и пространственных полимеров имеются весьма существенные различия. Как правило, линейные полимеры сравнительно гибки и эластичны; многие из них при умеренном повышении температуры размягчаются, а затем расплавляются. Пространственные полимеры обладают большей жесткостью; размягчение их происходит лишь при весьма высоких температурах, а многие из них еще до достижения температуры размягчения химически разрушаются (сгорают, обугливаются и т. п.). Линейные полимеры обычно способны растворяться в растворителях; пространственные полимеры — труднорастворимы; многие из них практически нерастворимы.

Со строением полимеров связана и их способность при вытягивании из раствора или расплава образовывать тонкие, гибкие и прочные волокна, пригодные для изготовления текстильных материалов, а также гибкие пленки (см. § 6-11). Такой способностью обладают многие из линейных полимеров с достаточно длинными молекулами; пространственные полимеры не могут образовывать ни текстильных волокон, ни гибких пленок.

В практике весьма распространено разделение полимеров (и полимеризующихся при нагреве материалов) на две группы: термопластичные и термореактивные материалы.

Термопластичные материалы при достаточно низких температурах тверды, но при нагреве становятся мягкими (пластичными) и легко деформируются; они могут растворяться в соответствующих растворителях. Характерной особенностью термопластичных материалов является то, что нагрев до температуры, соответствующей их пластичному состоянию, не вызывает необратимых изменений их свойств. После охлаждения эти материалы сохраняют способность растворяться и при новом подъеме температуры размягчаться.

В противоположность материалам этой группы *термореактивные* (термоотверждающиеся) материалы (*реактопласты*) при нагреве претерпевают необратимое изменение свойств: как говорят, они *запекаются* (*отверждаются*), т. е. приобретают значительную механическую прочность и твердость, теряя при этом свойства растворимости.

Из сказанного становится понятным различие химической природы упомянутых двух групп материалов. Термопластичные материалы — это линейные полимеры, сохраняющие линейное строение молекул и при нагреве; таков, например, полистирол. Термореактивными же являются материалы, которые при нагреве приобретают строение, свойственное пространственным полимерам; так, стирол с добавкой дивинилбензола является уже термореактивным материалом.

Если электрическая изоляция в эксплуатации должна выдерживать воздействие повышенных температур, не размягчаясь, не де-

формируясь и сохраняя высокую механическую прочность, или если она должна быть также стойкой к действию соприкасающихся с ней растворителей (пример — изоляция обмоток маслонаполненного трансформатора), то для такой изоляции более подходят термореактивные материалы. Термопластичные материалы имеют свои преимущества: многие из них более эластичны и менее хрупки, чем термореактивные, и к тому же менее подвержены тепловому старению; в ряде случаев технология обработки термопластичных материалов проще.

Следует отметить, что за последние годы появились термопластичные материалы, обладающие повышенной нагревостойкостью (политетрафторэтилен, полиимиды, которые могут применяться для изоляции, работающей при сравнительно высоких температурах. Гигроскопичность, механическая прочность, электроизоляционные свойства полимеров в значительной степени зависят от химического состава и строения молекулы. Полимеры с несимметрично построенными звеньями полярны и часто обладают заметной гигроскопичностью, но механическая прочность их при той же степени полимеризации обычно выше, чем у неполярных полимеров. Высокомолекулярные углеводороды практически неполярны, и гигроскопичность их ничтожно мала.

6-6. СМОЛЫ

Смолы — применяемое в практике, хотя и не вполне строгое научное название обширной группы материалов, характеризующихся как некоторым сходством химической природы (это сложные смеси органических веществ, главным образом высокомолекулярных), так и некоторыми общими для них физическими свойствами. При достаточно низких температурах смолы — это аморфные, стеклообразные массы, более или менее хрупкие. При нагреве смолы (если только они ранее не претерпевают химических изменений) размягчаются, становясь пластичными, а затем жидкими. Применяемые в электроизоляционной технике смолы большей частью нерастворимы в воде и мало гигроскопичны, но растворимы в близких по химической природе органических растворителях. Обычно смолы обладают клейкостью и при переходе из жидкого состояния в твердое (при охлаждении расплава или при испарении летучего растворителя из раствора) прочно прилипают к соприкасающимся с ними твердым телам.

Смолы широко применяются в виде важнейшей составной части лаков, компаундов, пластических масс, пленок, искусственных и синтетических волокнистых материалов и т. п. По своему происхождению смолы делятся на природные, искусственные и синтетические.

Природные смолы представляют собой продукты жизнедеятельности животных организмов (например, шеллак) или растений-смолоносов (канифоль); их получают в готовом виде и лишь подвергают сравнительно несложным операциям очистки, переплавки

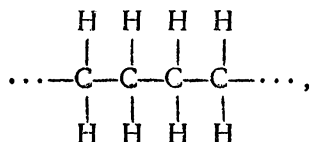
и т. п. Сюда же относятся ископаемые смолы (копалы), представляющие собой остатки разложившихся в земле деревьев-смолоносов.

Наибольшее значение в электрической изоляции имеют *синтетические смолы* — полимеризационные и конденсационные (см. § 6-3). Общим недостатком конденсационных смол является то, что при их отверждении происходит выделение воды или других низкомолекулярных веществ, остатки которых могут ухудшить электроизоляционные свойства смолы. Кроме того, молекулы конденсационных смол, как правило, содержат полярные группы, что повышает их тангенс угла диэлектрических потерь и гигроскопичность; полимеризационные же смолы могут быть и неполярными (например, полимеры углеводородного состава, политетрафторэтилен).

СИНТЕТИЧЕСКИЕ СМОЛЫ

Полиолефины. Простейший олефин (т. е. ненасыщенный углеводород с одной двойной связью $C=C$ в молекуле — *этилен* $H_2C=CH_2$ или C_2H_4 при нормальной температуре является газообразным веществом. Этилен в весьма широком масштабе производится из продуктов крекинга нефти.

Идеализированная формула строения молекулы полимера этилена — *полиэтилена*, являющегося уже твердым веществом, имеет вид цепи



но фактически строение молекулы более сложно: у цепи молекулы имеются, хотя и в малом числе, боковые ответвления ($-CH_3$, $-C_2H_5$ и более сложные группы); имеются и двойные связи — как в цепи, так и в ответвлениях; в ПЭВД (см. ниже) в составе карбонильных групп $>C=O$ присутствует и кислород.

Долгое время единственным способом получения полиэтилена была полимеризация этилена при весьма высоком (до 300 МПа) давлении и температуре около 200 °С; при этом инициатором реакции является кислород, вводимый в небольших количествах в реактор. Получаемый материал называется полиэтиленом высокого давления (ПЭВД). Впоследствии было создано производство полиэтилена низкого давления (ПЭНД): давление при полимеризации всего 0,3—0,6 МПа, температура около 80 °С; катализатор из смеси $TiCl_4$ с одним из алюминийорганических соединений: $(C_2H_5)_2AlCl$, $C_2H_5AlCl_2$, $Al(C_2H_5)_3$ или $Al(C_4H_9)_3$. Возможно также изготовление полиэтилена среднего давления (ПЭСД): давление 3—7 МПа, температура от 160 до 275 °С, катализаторы полимеризации — оксиды хрома CrO_3 или молибдена MoO_3 .

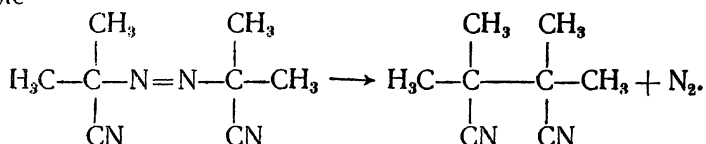
ПЭВД имеет сравнительно низкую плотность (0,92—0,93 Мг/м³) и температуру плавления (105—110 °С); его молекулярная масса 18 000—35 000. Режим полимеризации при высоком давлении и температуре способствует как получению продукта с малой молеку-

лярной массой, так и появлению боковых ответвлений, которые затрудняют образование участков материала с упорядоченным расположением цепей (кристаллитов). ПЭВД имеет 35—40 боковых ответвлений на каждую тысячу атомов углерода в главной цепи молекулы, в то время как ПЭНД содержит лишь три-пять боковых ответвлений на тысячу атомов С; содержание кристаллической фазы в ПЭВД и ПЭНД соответственно 55—60 % и 80—90 % (остальное — аморфная фаза). ПЭНД имеет более высокую плотность (0,94—0,96 Мг/м³) и молекулярную массу и выгодно отличается от ПЭВД более высокой температурой плавления 120—125 °С, а также более высокой прочностью при растяжении, что объясняется более высокой степенью кристаллизруемости. ПЭСД имеет плотность 0,96—0,97 Мг/м³ и температуру плавления 127—130 °С; его степень кристаллизруемости может достигать до 93 %. Примерные пределы значений прочности при растяжении: для ПЭВД 7—14, для ПЭНД 20—23, для ПЭСД 27—33 МПа. По электроизоляционным свойствам ПЭНД и ПЭСД, если они хорошо очищены от следов катализатора и других примесей, не уступают ПЭВД. Особым преимуществом ПЭСД является его меньшая по сравнению с другими типами полиэтилена газопроницаемость. Полиэтилен различных типов с учетом приведенных выше особенностей каждого типа широко используется в изоляции кабелей (как радиочастотных и кабелей телефонной связи, так и силовых); выпускается в виде пленок, лент и других изделий. Следует иметь в виду, что технология переработки ПЭВД в изделия значительно легче технологии переработки полиэтилена других типов.

Нагревостойкость полиэтилена при кратковременном нагреве ограничивается быстрым снижением механической прочности (характер этой зависимости показан на рис. 5-5, кривая 1), а при длительном воздействии повышенной температуры — окислением в условиях доступа воздуха, в особенности при одновременном освещении. Процесс теплового старения полиэтилена может быть замедлен введением в состав материала антиокислителей (в частности, антиокислителями являются некоторые ароматические вещества с наличием между бензольными кольцами аминогрупп —NH—). Старение под действием света ослабляется введением в состав полиэтилена сажи (до 2 %), однако стабилизированный сажой полиэтилен обладает, естественно, пониженными электроизоляционными свойствами и используется лишь для защитных оболочек кабельных изделий, но не для электрической изоляции.

Введение в полиэтилен (а также в другие полимерные материалы) *порофоров*, т. е. веществ, способных при нагреве разлагаться с выделением газов, дает возможность получать пористые материалы, причем газовые включения (поры) в них распределены равномерно по всей толще материала. Пористый полиэтилен имеет малую объемную массу (практически в пределах 0,4—0,5 Мг/м³) и соответственно малую диэлектрическую проницаемость (1,4—1,5), что важно в ряде случаев, в частности, при использовании его в радиочастотной электрической изоляции. Распространенным порофором для получения пористого полиэтилена является азодинитрил изомасляной кислоты,

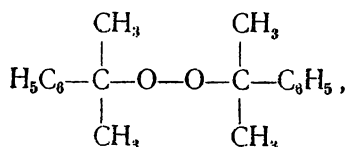
разлагающейся при температуре 120 °С с выделением азота согласно формуле



Для повышения нагревостойкости полиэтилена возможно подвергать его воздействию ионизирующих излучений (например, потока электронов от ускорителя электронов или от радиоактивного изотопа кобальта Co^{60}); при этом происходит частичное сшивание цепей молекул полиэтилена благодаря наличию в них уже упомянутых двойных связей, т. е. образование пространственной структуры. Облученный полиэтилен при кратковременном нагреве до 200 °С еще сохраняет механическую прочность около 1 МПа, достаточную для сохранения формы изделия, если оно не подвергается внешним механическим усилиям (см. рис. 5-5, кривая 2). Длительная нагревостойкость полиэтилена, ограниченная его тепловым старением, может быть оценена для облученного ПЭВД примерно значением 105 °С, а для облученного ПЭНД она еще выше. Для сравнения напомним, что длительная нагревостойкость обычного необлученного полиэтилена не выше 90 °С (табл. 6-3). Так как облученный полиэтилен более тверд, чем необлученный, и формовка его была бы затруднительна, облучению подвергаются уже отформованные изделия; так, например, полиэтиленовая пленка или изолированное полиэтиленом кабельное изделие для сшивания непрерывным процессом может пропускаться с определенной скоростью сквозь облучающий поток электронов.

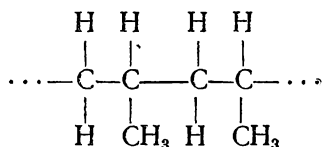
Облученный в деформированном состоянии полиэтилен (и некоторые другие полимеры) обладают весьма интересной способностью при умеренном нагреве восстанавливать форму и размеры изделия, которые существовали до облучения. Это явление называется *термоусадкой* и успешно используется в электроизоляционных трубках и муфтах, герметичных покрытиях обмоток; такие изделия после монтажа и последующего нагрева дают заметную усадку, и изоляция плотно обжимает проводники, находящиеся внутри нее. Намотка из нескольких слоев облученной полиэтиленовой пленки после термоусадки становится практически монолитной, так как отдельные слои плотно соединяются друг с другом.

Помимо облучения возможен и чисто химический способ получения имеющего пространственное строение (сшитого или структурированного) полиэтилена с добавлением к материалу органических пероксидов, обычно пероксида дикумила



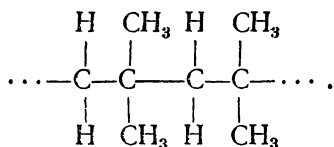
молекулы пероксида при действии повышенной температуры разлагаются на свободные радикалы, которые отрывают от молекул полиэтилена атомы водорода. Химическое структурирование полиэтилена обычно осуществляется на высокопроизводительных агрегатах непрерывного действия; этот процесс дешевле и технологически удобнее, нежели сшивание облучением.

Следующий после этилена член гомологического ряда олефинов — пропилен $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CH}_3$. Полипропилен — полимер этого мономера имеет структурную формулу



при относительно большой правильности расположения в пространстве боковых групп $-\text{CH}_3$ и атомов $-\text{H}$ (изотактическое или стереорегулярное строение). Полипропилен имеет плотность 0,90—0,91 $\text{Mg}/\text{м}^3$, весьма эластичен (относительное удлинение при растяжении 500—700 %), у него высокая температура плавления, 160—170 °C, обусловленная его стереорегулярной структурой; «длительная» нагревостойкость около 105 °C. Электроизоляционные свойства полипропилена и полиэтилена одинаковы. Одна из перспективных областей применения полипропилена — диэлектрик намотанных (плёночных, а также комбинированных — бумажно-плёночных) силовых конденсаторов.

Полимер изобутилена $\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_3)_2$ — полиизобутилен — имеет строение молекулы



Высокомолекулярный (с молекулярной массой до 400 000) полиизобутилен — каучукоподобное вещество, обладающее значительной липкостью. Он отличается хорошей холодостойкостью (сохраняет эластичность при температуре минус 80 °C). Плотность полиизобутилена 0,91—0,93 $\text{Mg}/\text{м}^3$; по химической стойкости он близок к полиэтилену и полипропилену. Для увеличения твердости полиизобутилен часто смешивают с другими полимерами, например полиэтиленом, или же в полиизобутилен вводят наполнители. Полиизобутилен обладает чрезвычайно малой влагопроницаемостью.

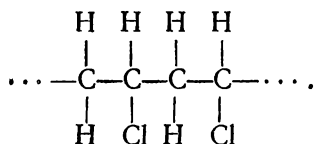
Как мы уже упоминали (стр. 101), полиизобутилен с низкой степенью полимеризации представляет собой вязкую жидкость.

Полистирол. Строение молекулы полистирола приводилось выше (стр. 103); он получается полимеризацией стирола, в свою очередь получаемого путем синтеза, а также в качестве побочного продукта при сухой перегонке каменного угля.

Свойства полистирола приведены на стр. 122, 123. Недостатками его являются хрупкость при пониженных температурах, склонность к постепенному образованию поверхностных трещин, малая стойкость к действию растворителей (в частности, жидких углеводородов) и невысокая нагревостойкость.

Рассмотренные выше полимеры чисто углеводородного состава — полиэтилен, полипропилен, полиизобутилен, полистирол — являются практически неполярными диэлектриками, с чем и связаны их высокие электроизоляционные свойства и низкая гигроскопичность. Рассмотрим некоторые полимеры производных этилена: поливинилхлорид, поливиниловый спирт, полиакрилаты.

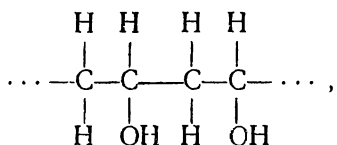
Поливинилхлорид — твердый продукт полимеризации газообразного мономера — винилхлорида $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{Cl}$, представляющего собой этилен, в молекуле которого один атом Н замещен атомом Cl (винилом называется остаток $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-$). Структурная формула поливинилхлорида имеет вид



Вследствие асимметрии строения (из-за наличия атомов Cl) поливинилхлорид является полярным диэлектриком и имеет пониженные свойства по сравнению с неполярными полимерами (табл. 6-3). Влажность слабо сказывается на удельном сопротивлении поливинилхлорида (его ρ даже при 90 %-ной влажности воздуха выше $5 \cdot 10^{13}$ Ом·м), но заметнее влияет на ρ_s . Поливинилхлорид стоек к действию воды, щелочей, разбавленных кислот, масел, бензина и спирта. Он используется в технике и в быту для изготовления пластических масс и резиноподобных продуктов, в частности для изоляции проводов, защитных оболочек кабелей и т. п.

Для улучшения эластичности и холодостойкости поливинилхлорида к нему часто добавляют пластификаторы, представляющие собой трудно испаряющиеся органические жидкости, обычно сильно полярные и еще более ухудшающие электроизоляционные свойства материала. Так, для непластифицированного поливинилхлорида при нормальной температуре и частоте 50 Гц значение $\epsilon_r = 3,2 \div 3,6$, а для пластифицированного (поливинилхлоридного пластика) $\epsilon_r = 5 \div 6$.

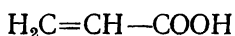
Поливиниловый спирт, имеющий строение молекулы



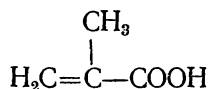
может рассматриваться как полимер гипотетического винилового спирта $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{OH}$. Поливиниловый спирт почти не нашел

применения в электрической изоляции из-за слишком сильно выраженной полярности, высокого $\operatorname{tg} \delta$ и растворимости в воде. Он служит исходным продуктом для синтеза смол типа поливинилацеталей, находящихся широкое применение, в частности, для изготовления эмаль-лаков. Изоляция проводов (винифлекс, металвин), выполненная на основе этих лаков, имеет более высокую механическую прочность, чем ранее применявшаяся изоляция на основе высыхающих масел (см. § 6-7). Высокопрочные эмалированные провода с поливинилацетатевой изоляцией (а также разработанные впоследствии эмалированные провода с изоляцией на основе полиамидных, полиэфирных, эпоксидных и других смол) в некоторых случаях (например, всыпные обмотки электрических машин) могут использоваться непосредственно, в то время как эмалированные провода на масляных эмаль-лаках должны были в этих случаях во избежание механического повреждения слоя эмали применяться лишь с дополнительной обмоткой хлопчатобумажной или иной нитью. Поэтому применение высокопрочных эмалированных проводов для обмоток электрических машин и приборов дает существенный выигрыш в габаритах, массе и стоимости изделий.

Полиакрилаты — полимеры эфиров акриловой

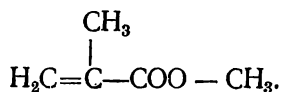


и метакриловой



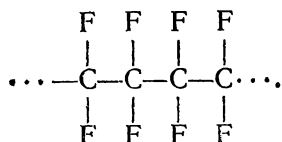
кислот. Полиакрилаты имеют хорошую холодо-, масло- и щелочестойкость; в зависимости от вида спиртового остатка в молекуле мономера они могут иметь различные механические свойства — прочность, твердость, эластичность.

Наиболее распространенный из этих материалов — *полиметилметакрилат*, т. е. полимер метилового эфира метакриловой кислоты (*метилметакрилата*)



Полиметилметакрилат известен под названиями органическое стекло, *плексиглас* и др. Этот прозрачный бесцветный материал широко применяется как конструкционный. Свойство выделять при воздействии электрической дуги большое количество газов (CO , H_2 , пары H_2O , CO_2) придает ему качество *дугогасящего материала*; при разрыве дуги в ограниченном пространстве, в котором находится деталь из органического стекла, выделяющиеся газы создают высокое давление, что способствует гашению дуги (дугогасящими свойствами обладают также поливинилхлорид, фибра — см. стр. 144). Поэтому органическое стекло применяют в разрядниках высокого напряжения, где требуется быстрое гашение возникающей дуги.

Фторорганические полимеры. Фторорганические смолы могут быть как неполярными, так и полярными. Некоторые из диэлектриков, в состав которых входит весьма химически активный элемент фтор F, обладают ценными свойствами. Фтор входит в состав газов, имеющих особо высокую электрическую прочность (стр. 91), и жидких диэлектриков (стр. 100). Из фторорганических смол в первую очередь рассмотрим *политетрафторэтилен*, который получается путем полимеризации тетрафторэтилена $F_2C=CF_2$ (этилен, в молекуле которого все четыре атома водорода замещены атомами фтора; греческое «тетра» означает «четыре») и имеет строение молекулы



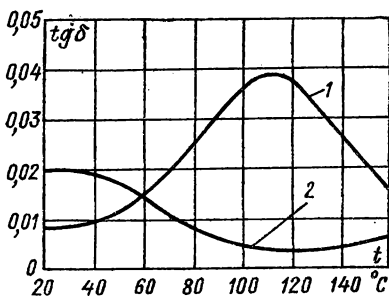
Благодаря симметричному строению молекул политетрафторэтилен неполярен. Этот материал выпускается в СССР под названием *фторлон-4* (*фторопласт-4*); цифра 4 указывает на число атомов F в мономере. Аналогичный материал известен за рубежом под названиями «тефлон», «дайфлон» и др.

Фторлон-4 обладает необычайно высокой для органического вещества нагревостойкостью (около $+250^\circ C$), что объясняется высокой энергией связи C—F и экранирующим влиянием атомов F на связи между атомами C. Он исключительно химически стоек, превосходя в этом отношении даже золото и платину (на него не действуют соляная, серная, азотная и плавиковая кислоты, щелочи; некоторое действие на него оказывают лишь расплавленные щелочные металлы, фтор и фтористый хлор при повышенной температуре). Фторлон-4 совершенно негорюч, абсолютно негигроскопичен и не смачивается водой и другими жидкостями.

Фторлон-4 — белый или сероватый полупрозрачный материал; его плотность ($2,1\text{--}2,3 \text{ Мг/м}^3$) велика по сравнению с плотностью обычных органических полимеров. Материал сравнительно мягок и обладает склонностью к хладотекучести; его предел прочности при растяжении $14\text{--}25 \text{ МПа}$, предел прочности при изгибе $11\text{--}14 \text{ МПа}$. По электроизоляционным свойствам фторлон-4 принадлежит к лучшим из известных диэлектриков: его ϵ_r в диапазоне частот от 50 до 10^{10} Гц составляет $1,9\text{--}2,2$; $\text{tg } \delta = 0,0001\text{--}0,0003$; $\rho \approx 10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Холодостойкость материала характеризуется сохранением гибкости при температурах ниже минус $80^\circ C$, а для тонких пленок — даже ниже минус $100^\circ C$.

Фторлон-4 в определенных условиях может перерабатываться как пластическая масса; из него получают различные фасонные изделия, листы, гибкие пленки, изоляцию кабельных изделий и т. п. Выдающиеся свойства фторлона-4 позволяют применять его в особо ответственных случаях: при одновременном воздействии на изоляцию высоких или низких температур, химически активных сред, влаги и т. п. Широкому внедрению фторлона-4 препятствуют его

Рис. 6-11. Зависимости $\operatorname{tg} \delta$ фторлона-3 от температуры при двух значениях частоты
1 — $f = 10^6$ Гц; 2 — $f = 10^8$ Гц

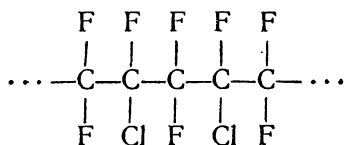


высокая стоимость и сложность технологии. Фторлон-4 не смачивается смолами и лаками. Для придания этому материалу адгезионных свойств его поверхность должна активироваться. Два основных способа активации: 1) обработка фторлона-4 раствором металлического натрия в безводном аммиаке или тетрагидрофуране; 2) воздействие на фторлон-4 тлеющего разряда в вакууме. Оба эти процесса создают на поверхности фторлона-4 губчатую структуру, после чего клеящие вещества, заполняя поры этой структуры, прилипают к поверхности материала.

При температурах выше $+400^\circ\text{C}$ политетрафторэтилен начинает разлагаться с выделением весьма ядовитого газообразного фтора. Кроме того, этот материал обладает малой радиационной стойкостью и короностойкостью.

Помимо политетрафторэтилена в электропромышленности применяют и другие фторорганические полимеры. Так, совместный полимер тетрафторэтилена с гексафторпропиленом $\text{F}_2\text{C}=\text{CF}-\text{CF}_2$, имеющий практически важные свойства, приближающиеся к свойствам политетрафторэтилена, значительно технологичнее последнего в переработке.

Политрифторхлорэтилен, имеющий строение молекулы



и являющийся полимером трифторхлорэтилена $\text{F}_2\text{C}=\text{CFCl}$, выпускается в СССР под названием *фторлон-3 (фторопласт-3)*.

Фторлон-3 имеет плотность $2,14 \text{ Мг/м}^3$; предел прочности при растяжении $30\text{--}40 \text{ МПа}$; относительное удлинение перед разрывом $125\text{--}200 \%$; предел прочности при изгибе $60\text{--}80 \text{ МПа}$. По нагревостойкости (около 130°C) фторлон-3 уступает фторлону-4. Фторлон-3 имеет несимметричное строение молекул из-за наличия в них атомов хлора (большого размера, чем атомы фтора) и является полярным диэлектриком; это видно как из структурной формулы политрифторхлорэтилена, так и из представленных на рис. 6-11 зависимостей $\operatorname{tg} \delta$ от температуры при разных частотах. Значение ϵ_r фторлона-3 при низких частотах — около 3,3, а при 1 МГц — 2,7; ρ — около $10^{16} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Температура разложения выше 300°C . Химическая стойкость фторлона-3 весьма высока, хотя все же ниже, чем фторлона-4, но зато радиационная стойкость выше. Технология переработки фторлона-3 сравнительно проста.

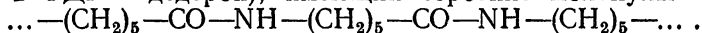
Все рассмотренные до сих пор смолы — карбоцепные; основная цепочка строения полимера в них образована только атомами углерода С.

Рассмотрим теперь смолы, в основную цепочку строения которых помимо атомов С входят и атомы других элементов.

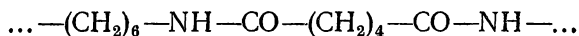
Гетероцепные термопластичные смолы. *Полиамидные смолы* имеют цепочечные молекулы, образованные повторяющимися от четырех до восьми раз группами $-\text{CH}_2-$ и пептидными группами $-\text{CO}-\text{NH}-$. Они обладают весьма высокой механической прочностью и эластичностью; растворимы лишь в ограниченном числе растворителей (в частности, в крезоле и расплавленном феноле).

Полиамиды широко применяются для изготовления синтетических волокон, гибких пленок и пластических масс. Полиамидные смолы обладают относительно высокой гигроскопичностью, малой радиационной стойкостью, низкой светостойкостью и легко деформируются при повышенных температурах.

В нашей стране особенно широко применяется капрон (в ЧССР — силон, в ГДР — дедерон), имеющий строение молекулы

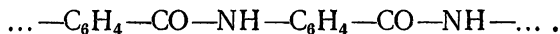


Большое значение имеет также найлон (в СССР — анид) со строением молекулы

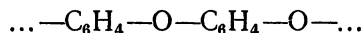


и несколько более высокой температурой размягчения.

Значительно более высокой нагревостойкостью обладают полиамидные смолы, в состав молекулы которых вместо алифатических остатков входят ароматические остатки, например,



Фениленовые группы $-\text{C}_6\text{H}_4-$ в главной цепи полимеров вообще способствуют повышению их нагревостойкости. Так, *полифениленоксид*



чрезвычайно нагревостоек, но хрупкость и практическое отсутствие плавкости и растворимости затрудняет его переработку.

Модифицированные материалы типа полифениленоксида (с введением дополнительных алифатических остатков, атомов хлора и т. п.) более технологичны. Некоторые из этих материалов имеют длительно допускаемую рабочую температуру 250—300 °С и в то же время исключительную холодостойкость (сохраняют гибкость почти до температуры абсолютного нуля).

Перспективным материалом является также *полисульфон*, в цепочке молекулы которого между фениленовыми группами $-\text{C}_6\text{H}_4-$ имеются группы трех типов: сульфоновые $-\text{SO}_2-$, способствующие повышению нагревостойкости материала, эфирные $-\text{O}-$ и изопропилиденовые $\text{C}-(\text{CH}_3)_2$, уменьшающие жесткость материала. Изделия из полисульфона обладают стабильностью размеров и не склонны к текучести. Полисульфон имеет предел прочности при растяжении 70 МПа и удлинение перед разрывом 50—100 %, предел проч-

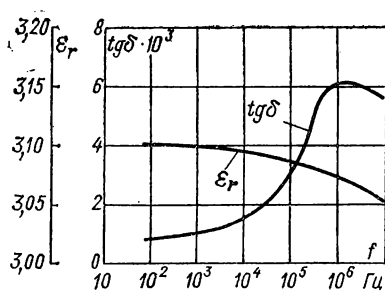


Рис. 6-12

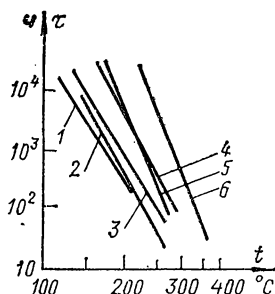


Рис. 6-13

Рис. 6-12. Зависимости ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ полисульфона от частоты

Рис. 6-13. Зависимости времени жизни эмалированных проводов с изоляцией на основе различных лаков от температуры

1 — поливинилацетальный лак; 2 — полиуретановый; 3 — эпоксидный; 4 — полиэфирный; 5 — кремнийорганический; 6 — полиимидный

ности при сжатии 280 МПа и при изгибе 110 МПа. Электроизоляционные свойства полисульфона иллюстрируются рис. 6-12.

Полиуретаны — линейные полимеры, в цепочках молекул которых между углеродородными остатками располагаются группы $-\text{NHCOO}-$. Полиуретаны в известной степени сочетают в себе свойства полиамидов, содержащих группы $-\text{NHCO}-$, и полиэфиров, содержащих группы $-\text{COO}-$. В определенных условиях полиуретаны могут образовывать и молекулы пространственной структуры.

Следует сказать об использовании полиуретанов для эмалирования проводов. Такие провода более нагревостойки, чем провода с изоляцией на основе поливинилацетальных лаков, но уступают в этом отношении проводам с полиэфирной изоляцией. Особенность полиуретановых эмалированных проводов — способность их облуживаться без предварительной зачистки эмалевой изоляции, при простом погружении конца незащищенного провода в расплавленный припой или (для тонких проводов) непосредственно при обработке паяльником, почему эти «самооблуживающиеся» провода весьма удобны при монтаже. Недостатком полиуретановых эмалированных проводов является склонность к размягчению эмалевой пленки при повышенных температурах (начиная примерно со 150°C).

Полиимиды, содержащие имидную группу атомов $-\text{CO}-\text{N}-\text{CO}-$ (не смешивать полиимиды с полиамидами, стр. 116), весьма перспективны. Полиимиды выпускаются в виде лаков, пленок (см. стр. 83, 137), пластических масс. Они принадлежат к числу наиболее нагревостойких органических полимеров (рис. 6-13): их длительная рабочая температура $200-250^\circ\text{C}$, кратковременная — до 500°C .

Совместные полимеры — **полиамидимиды** имеют свойства, промежуточные между свойствами полиамидов и полиимидов.

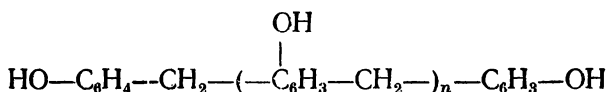
Фенолформальдегидные смолы принадлежат к наиболее ранним по времени разработки (начало XX века) синтетическим смолам; еще и поныне они производятся в значительных количествах. Это

продукты поликонденсации фенола $\text{H}_5\text{C}_6\text{—OH}$ (или крезол $\text{H}_3\text{C—C}_6\text{H}_4\text{—OH}$ и аналогичных веществ) с формальдегидом H_2CO . Они производятся посредством нагрева в закрытом котле водного раствора фенола и формальдегида в присутствии катализатора.

Фенолформальдегидные смолы могут быть изготовлены как термореактивными, так и термопластичными. Если в реакции смолообразования на один моль фенола приходится не менее одного моля формальдегида, получается термореактивная смола, так называемый *бакелит*. При изготовлении бакелита берется щелочной катализатор, обычно (для смол электроизоляционного назначения) аммиак, не оставляющий в готовой смоле электролитических примесей. В результате реакции в смолварочном котле получается бакелит в стадии А; он обладает плавкостью (температура размягчения $55\text{—}80^\circ\text{C}$) и легко растворяется в спирте и ацетоне. При нагреве бакелит подвергается дополнительной полимеризации, переходя при этом через обладающую промежуточными свойствами стадию В в окончательную стадию С. Переход из стадии А в стадию С практически требует температуры не ниже $110\text{—}140^\circ\text{C}$, причем чем выше температура, тем быстрее совершается этот переход; при 160°C он происходит всего за $1\text{—}3$ мин. Повышение давления также ускоряет запекание бакелита. Бакелит в стадии С (в которой он находится в готовой, работающей изоляции) обладает высокой механической прочностью. Он мало эластичен; отрицательным свойством его является также склонность к *трекингу*, т. е. образованию на его поверхности проводящих электрический ток (науглероженных) следов при воздействии электрических разрядов. Бакелит применяют для пропитки дерева и других материалов, при изготовлении пластических масс, в том числе слоистых — гетинакса, текстолита и др.

Если же при варке смолы из фенола и формальдегида взять менее одного моля формальдегида на один моль фенола и применить не щелочной, а кислотный катализатор (например, соляную кислоту), то получится смола типа новолака. *Новолак* является термопластичной смолой и после нагрева сохраняет плавкость и растворимость. Он широко применяется для изготовления пластических масс (пресс-порошков).

Добавление к новолачной смоле формальдегида или уротропина $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$ (уротропин при нагреве распадается на формальдегид и аммиак) придает ей термореактивные свойства; сшивание линейных молекул новолака



осуществляется мостиками — метиленовыми группами $\text{—CH}_2\text{—}$, каждая из которых получается из одной молекулы формальдегида. Это обстоятельство используется в производстве пластических масс (см. § 6-13).

Фенолформальдегидные смолы вследствие наличия в их молекулах гидроксильных групп —OH полярны. Электроизоляционные

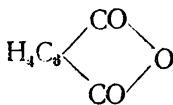
свойства бакелита А совсем невысоки, но при запекании смолы они улучшаются: для бакелита С значение ρ составляет 10^{11} — 10^{12} Ом·м, ρ_s — около 10^{13} Ом. Плотность бакелита С равна $1,25$ Мг/м³, влагопоглощаемость 0,1 %.

Крезольные смолы менее полярны по сравнению с фенольными, так как в крезоле углеводородный остаток больше, чем в феноле. При реакции с формальдегидом анилина $H_5C_6-NH_2$ получаются *анилиноформальдегидные смолы*; полярные свойства их выражены еще слабее, и они менее гигроскопичны благодаря замене группы $-OH$ менее полярной группой $-NH_2$.

Карбамидоформальдегидные и меламиноформальдегидные смолы изготовляют посредством поликонденсации формальдегида с карбамидом $(NH_2)_2CO$, меламином $C_3H_6N_6$ и их производными. Эти смолы обладают сравнительно высокой трекинговстойкостью и клеящей способностью; они используются для изготовления пластических масс, лаков, клеев и т. п.

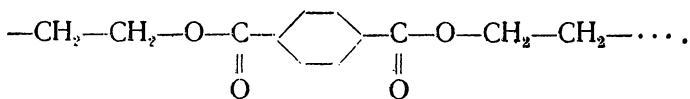
Полиэфирные смолы — продукты поликонденсации различных спиртов и кислот (или их ангидридов). В соответствии с изложенным в § 6-5 смолы, получаемые из двухатомных спиртов (гликолей), имеющих две гидроксильные группы $-OH$ в молекуле, и из двухосновных органических кислот, имеющих две карбоксильные группы $-COOH$ в молекуле, термопластичны. Смолы же, получаемые из трехатомных спиртов и не менее чем двухосновных кислот, термореактивны.

Глифталевые смолы, которые получают поликонденсацией трехатомного спирта — глицерина $HO-CH_2-CH(OH)-CH_2-OH$ и фталевого ангидрида (продукт окисления нафталина)



термореактивны, хотя для запекания требуют более высокой температуры и большего времени, чем бакелит. Преимуществами глифталя перед бакелитом являются более высокие эластичность, клейкость, стойкость к тепловому старению и трекинговстойкость. Незапеченный глифталь растворим в смеси спирта с бензолом, в ацетоне и некоторых других растворителях; полностью запеченный глифталь чрезвычайно стоек к действию растворителей.

Полиэтилентерефталат — термопластичный полимер, получаемый поликонденсацией гликоля $HO-CH_2-CH_2-OH$ и терефталевой кислоты $HOOC-C_6H_4-COOH$, имеет строение

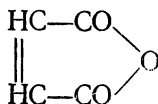


При молекулярной массе около 30 000, полиэтилентерефталат имеет значительную механическую прочность и высокую температуру размягчения (примерно 200 °С). Он применяется для изготов-

ления синтетических волокон, гибких пленок, для обладающей высокой механической прочностью изоляции эмалированных проводов и для других целей. В СССР он производится под названием *лавсан*, а за рубежом — под названием «майлар», «хостафан» и прочие пленки, «терилен», «терен», «дакрон» и другие волокна. При повышенных температурах полиэтилентерефталат на воздухе заметно окисляется, поэтому обработка размягченного нагревом материала должна производиться в атмосфере химически нейтрального газа (азота).

Поликарбонаты — полиэфиры угольной кислоты $\text{HO}-\text{COOH}$. Они обладают высокими механическими свойствами и применяются для изготовления пленок, в качестве связующего для текстолита, для производства литых изделий и т. п.

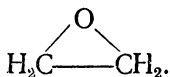
Ненасыщенные полиэфирные смолы — продукты поликонденсации гликолей или многоатомных спиртов с ненасыщенными кислотами либо их ангидридами, например фталевым ангидридом (см. выше), малеиновым ангидридом



и другими, широко применяются для изготовления термореактивных компаундов (§ 6-10), для изоляции электрических машин и аппаратов, как связующие в производстве слоистых пластиков и т. п. Многие из них имеют хорошие электроизоляционные свойства и нагревостойкость.

Полиэфиракрилаты получают из фталевого ангидрида, этиленгликоля, метакриловой кислоты и т. п. Они обладают малой вязкостью при нормальной температуре, что особенно удобно для целей пропитки и заливки на холоде; отверждение их происходит без выделения низкомолекулярных продуктов.

Эпоксидные смолы характеризуются наличием в их молекуле эпоксидных групп («колец»)



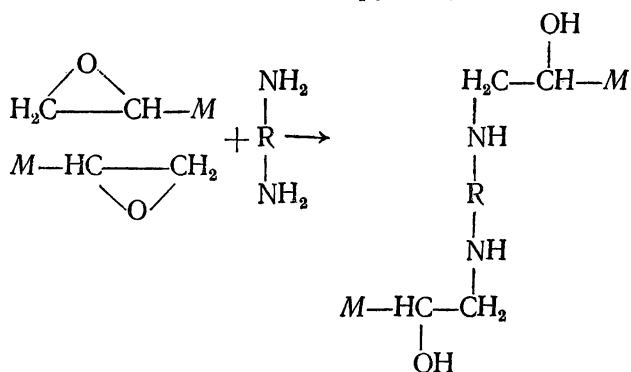
В зависимости от химического состава соединений, из которых осуществляется синтез эпоксидных смол, последние подразделяются на *диановые* (или бисфенольные) и *циклоалифатические*. Диановые смолы получают из дифениолпропана (диана) и эпихлоргидрина; циклоалифатические смолы получают эпоксидированием некоторых непредельных соединений. Циклоалифатические смолы более трекинговостойки и короностойки, чем диановые смолы. Изготавливаются также эпоксиноволачные смолы, получаемые эпоксидированием смол типа новолака (стр. 118); такие смолы в отвержденном состоянии обладают повышенной нагревостойкостью.

Диановые смолы, получившие наибольшее распространение из числа всех эпоксидных смол, могут быть получены различной моле-

кулярной массы — от вязких жидкостей до твердых при нормальной температуре веществ с температурой размягчения выше 100 °С.

Эпоксидные смолы в чистом виде являются термопластичными материалами; они растворяются в ацетоне и других растворителях, могут длительно храниться, не изменяя свойств. Однако после добавления к ним *отвердителей* смолы сравнительно быстро отверждаются, приобретая пространственное строение. Процесс отверждения смолы представляет собой чистую полимеризацию, без выделения воды или других низкомолекулярных веществ. Поэтому эпоксидные смолы, к которым непосредственно перед их употреблением были добавлены отвердители, являясь уже термореактивными материалами, могут равномерно отверждаться в весьма толстом слое, образуя при этом монолитную, в высокой степени водонепроницаемую изоляцию.

Например, при использовании в качестве отвердителей диаминов (т. е. веществ, имеющих общий состав $\text{H}_2\text{N}-\text{R}-\text{NH}_2$) отверждение происходит по схеме с «раскрытием» эпоксидного кольца (через *М* обозначена остальная часть линейной молекулы эпоксидной смолы, связанная с концевой эпоксидной группой):



В зависимости от типа отвердителя отверждение эпоксидных смол может производиться либо при нагреве (обычно до 80—150 °С), либо при комнатной температуре (холодное отверждение); отверждение может производиться без внешнего давления, что технологически проще, либо при повышенном давлении. В последнем случае получается изоляция, обладающая более высокой электрической прочностью. Распространенными отвердителями для холодного отверждения являются азотсодержащие вещества (амины, см. выше), для отверждения при нагреве — ангидриды органических кислот. Выбор отвердителя оказывает большое влияние на свойства (эластичность, нагревостойкость) отвержденной эпоксидной смолы.

Отверждение диановых смол ангидридами обычно производится в две стадии: при температуре около 100 °С в течение 4—6 ч и при 150 °С в течение 10—16 ч. Типичным представителем отвердителей ангидридного типа является изометилтетрагидрофталевый ангидрид.

Подразделение смол по их физико-химической природе				Смолы	Плотность, Мг/м³	Предел прочности при растяжении, МПа	Относительное удлинение перед разрывом, %
Органические	Полимеризационные	Термопластичные	Неполярные	Полиэтилен	0,91—0,97	10—15	300—750
				Полистирол	1,05	35—60	1—4
				Политетрафторэтилен	2,30	15—30	250—300
		Полярные	Поливинилхлорид	1,40—1,70	30—50	50—150	
			Полиметилметакрилат	1,20	40—70	2—10	
			Полиамиды	1,10—1,15	70—90	90	
Элементоорганические	Поликонденсационные	Термореактивные	Эпоксидные	1,10—1,25	80—90	—	
			Фенолформальдегидные	1,25—1,30	50—60	1,0—1,5	
			Полиэфирные	1,10—1,45	30—70	5—10	
			Кремнийорганические	1,60—1,75	20—45	—	

Примечание. В таблице приведены приближенные данные электроизоляции

Отвердители аминного типа отверждают эпоксидную смолу при комнатной температуре за 3—6 ч; процесс отверждения может быть ускорен нагревом.

Большим преимуществом эпоксидных смол является сравнительно малая усадка их при отверждении (0,5—2 %), способствующая получению монолитной изоляции. Другим важным преимуществом эпоксидных смол является весьма высокая их адгезия к различным пластическим массам, стеклам, керамике, металлам и другим материалам (адгезия усиливается наличием в отвержденной смоле гидроксильных групп —ОН). Отвержденные эпоксидные смолы обладают также довольно высокой нагревостойкостью, благодаря чему в некоторых случаях они могут заменить, например, кремнийорганические смолы (см. ниже), более дорогие и имеющие невысокую механическую прочность.

Для изготовления клеев, лаков, заливочных компаундов, например для заливки небольших трансформаторов или узлов аппаратуры, применяются эпоксидные смолы или их композиции с дру-

Тяжеских смол

Нагревостой- кость, °C	Коэффициент теплопроводно- сти, Вт/(м·К)	Температурный коэффициент ли- нейного расши- рения, $\alpha_l \cdot 10^6$, К ⁻¹	Водопоглоще- ние за 24 ч, % (по массе)	ρ , Ом·м	ϵ_r	$\lg \delta$	$E_{пр}$, МВ/м
80—90	0,30—0,40	16—18	0,01	10^{13} — 10^{15}	2,3—2,4	0,0001— 0,0005	15—20
70—80	0,10	6—8	0,04	10^{14} — 10^{15}	2,4—2,6	0,0001— 0,0005	20—35
250	0,23	10	0,01	10^{15} — 10^{16}	1,9—2,1	0,0001— 0,0003	20—30
60—70	0,10	5—8	0,10	10^{13} — 10^{14}	3,0—5,0	0,03— 0,08	15—20
70—90	0,14—0,18	9	0,35	10^{11} — 10^{12}	3,5—4,5	0,02— 0,08	20—35
100—120	0,30	10—13	1,50	10^{11} — 10^{12}	3,0—4,0	0,015— 0,035	15—20
120—140	0,20	6,0—6,5	0,10	10^{12} — 10^{13}	3,0—4,0	0,01— 0,03	20—80
105—120	0,13—0,25	4—7	0,15	10^{11} — 10^{12}	5,0—6,5	0,01— 0,10	10—20
110—150	0,30	8—10	0,10— 0,60	10^{11} — 10^{14}	3,0—4,5	0,002— 0,020	15—25
180—220	0,08	10—11	0,10	10^{12} — 10^{14}	3,5—5,0	0,01— 0,03	15—25

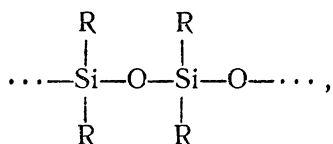
ционных смол в неориентированном состоянии без наполнителей.

гими материалами. Удачный пример применения эпоксидной смолы — кабельные соединительные и концевые муфты вместо чугунных муфт, заливаемых битумными или масло-канифольевыми компаундами (см. ниже); при использовании эпоксидной смолы достигается значительное уменьшение размеров муфты и существенный экономический эффект.

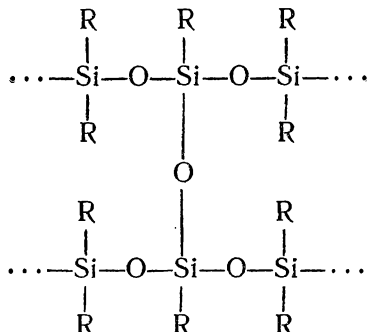
Многие эпоксидные смолы (с отвердителями) оказывают на организм человека токсическое действие, вызывая, в частности, кожные заболевания. Это требует при работе с ними соответствующих мер по охране труда. Отвержденные эпоксидные смолы уже нетоксичны.

Кремнийорганические смолы (полиорганосилоксаны, силиконы). В их состав помимо характерного для органических полимеров углерода С входит кремний, являющийся одной из важнейших составных частей многих неорганических диэлектриков: слюды, асбеста, ряда стекол, керамических материалов и пр. Таким образом, эти материалы должны быть отнесены к элементоорганическим (см. стр. 105). Основу строения их молекул образует силоксановая

группировка чередующихся атомов кремния и кислорода. Полиорганосилоксаны могут быть как термопластичными и иметь линейное строение



так и термореактивными и образовывать пространственные структуры, например



(под R подразумеваются органические радикалы, например метил $-\text{CH}_3$, этил $-\text{C}_2\text{H}_5$, фенил $-\text{C}_6\text{H}_5$).

Силоксановая связь $\text{Si}-\text{O}$ более прочна, чем связь между двумя атомами углерода $\text{C}-\text{C}$ (хотя и менее прочна, чем связь $\text{C}-\text{F}$ во фторорганических соединениях), что и определяет более высокую нагревостойкость кремнийорганических полимеров по сравнению с большинством рассматриваемых в настоящем параграфе органических полимеров.

Кремнийорганические полимеры используются в лаках, компаундах, пластмассах; некоторые из них весьма эластичны (кремнийорганические каучуки, см. стр. 159). Кремнийорганические соединения могут быть получены и в виде жидкостей (см. стр. 100).

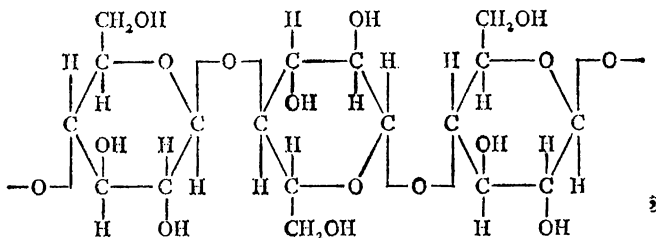
Электроизоляционные свойства кремнийорганических соединений высоки даже при повышенных температурах. Нагревостойкость кремнийорганических соединений указывает на целесообразность ее использования в композиции с нагревостойкими неорганическими материалами (слюда, стеклянное волокно, асбест) в виде миканитов, стеклолакотканей, пластмасс. Кроме того, кремнийорганические соединения обладают малой гигроскопичностью и практически не смачиваются водой. Покрытие этими соединениями целлюлозных материалов, пластических масс, керамики создает гидрофобизацию обрабатываемых материалов, т. е. снижает их смачиваемость, делая их водоотталкивающими. Однако кремнийорганические материалы сравнительно дороги. К тому же кремнийорганические смолы, как правило, имеют низкую механическую прочность (даже в исходном

состоянии, до теплового старения), обладают плохой адгезией к большинству других материалов и мало маслостойки.

В табл. 6-3 даны ориентировочные значения важнейших параметров типичных синтетических смол (при нормальной температуре).

ЭФИРЫ ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Это искусственные полимеры, получаемые химической переработкой природного полимера — целлюлозы (см. § 6-12). Как видно из структурной формулы части молекулы целлюлозы



каждое звено цепочки содержит три гидроксильные группы — OH. При изготовлении эфиров целлюлозы атомы водорода в этих группах — все или часть из них — замещаются различными группами атомов. Если эти группы атомов — углеводородные остатки, то при переработке получают так называемые простые эфиры, а если эти группы — остатки кислоты, то — *сложные эфиры*.

К сложным эфирам целлюлозы принадлежат: нитроцеллюлоза, в которой атомы водорода в гидроксильных группах целлюлозы заменяются нитрогруппами NO₂ (остатками азотной кислоты); *ацетилцеллюлоза*, в которой эти атомы заменены остатками уксусной кислоты —CO—CH₃ и др. Нитроцеллюлоза весьма горюча, а при большом содержании в ней нитрогрупп даже взрывоопасна; ацетилцеллюлоза значительно менее огнеопасна.

Из простых эфиров целлюлозы наибольшее значение имеют *этилцеллюлоза*, в которой атомы водорода гидроксильных групп замещены группами этила —C₂H₅, и *бензилцеллюлоза*; они имеют высокие электроизоляционные свойства и хорошую холодостойкость (этилцеллюлоза сохраняет гибкость при минус 50 °C).

По сравнению с природной целлюлозой ее эфиры имеют то преимущество, что они являются термопластичными материалами и обладают плавкостью и способностью растворяться в соответствующих растворителях, а потому удобны для переработки; эфиры целлюлозы широко используются для изготовления искусственных текстильных волокон, пленок, лаков, пластических масс. Кроме того, благодаря замене сильнополярных гидроксильных групп менее полярными эфиры целлюлозы имеют более слабо выраженные свойства полярных диэлектриков, повышенные электрические свойства и меньшую гигроскопичность по сравнению с природной целлюлозой (это особенно характерно для простых эфиров целлюлозы). Общим недостатком эфиров целлюлозы является низкая нагревостойкость.

ПРИРОДНЫЕ СМОЛЫ

Канифоль — хрупкая смола, получаемая из живицы (природной смолы сосны) после отгонки ее жидких составных частей (скипидара). Канифоль в основном состоит из органических кислот (абиеиновой и других); соли этих кислот, получающиеся при нагреве канифоли с соответствующими металлами или их оксидами, называются *резинатами*. Канифоль растворима в нефтяных маслах (особенно при нагреве) и других углеводородах, растительных маслах, спирте, скипидаре и пр.

Электроизоляционные свойства канифоли: $\rho = 10^{12} - 10^{13}$ Ом·м; $E_{пр} = 10 - 15$ МВ/м; зависимость ϵ_r и $\tan \delta$ от температуры (рис. 6-14) характерна для полярных

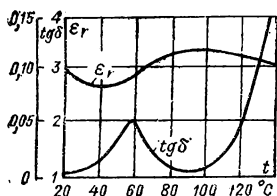


Рис. 6-14. Зависимости ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ канифоли от температуры при частоте 50 Гц

диэлектриков. Температура размягчения канифоли составляет 50—70 °С. На воздухе канифоль постепенно окисляется, причем температура размягчения ее повышается, а растворимость снижается.

Канифоль, растворенная в нефтяных маслах, применяется при изготовлении пропиточных и заливочных кабельных компаундов; резинаты служат сиккативами для масляных лаков (см. § 6-10).

Копалы — тугоплавкие смолы с характерным блеском, большой твердостью, и сравнительно труднорастворимые. Эти смолы добывают частично как ископаемые продукты разложения ранее произраставших деревьев-смолоносов, частично как смолы ныне растущих деревьев (преимущественно в тропических странах). Копалы применяют в качестве добавки к масляным лакам, увеличивающей твердость их пленок.

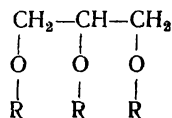
6-7. РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА

Растительные масла — вязкие жидкости, получаемые из семян различных растений. Из этих масел особо важны *высыхающие масла*, способные под воздействием нагрева, освещения, соприкосновения с кислородом воздуха и других факторов переходить в твердое состояние. Тонкий слой масла, налитый на поверхность какого-либо материала, высыхает и образует твердую блестящую, прочно пристающую к подложке электроизоляционную пленку. Высыхание масел отнюдь не объясняется испарением части жидкости, а является сложным химическим процессом, связанным с поглощением маслом некоторого количества кислорода из воздуха. Поэтому при высыхании льняного и подобных ему масел масса масла не уменьшается, а даже несколько увеличивается. Для полного высыхания масел, например, при сушке масляных лаков (см. § 6-10), необходим доступ свежего воздуха.

Скорость высыхания масел увеличивается с повышением температуры, при освещении, а также в присутствии катализаторов химических реакций высыхания — так называемых *сиккативов*. В качестве сиккативов используют соединения свинца, кальция, кобальта и др. Технологически удобно вводить эти металлы в масло в виде способных растворяться в нем солей различных кислот, например резинатов (стр. 125).

Отвержденные пленки высыхающих масел в тяжелых углеводородах, например в трансформаторном масле, не растворяются даже при нагреве, так что являются практически маслостойкими, но к ароматическим углеводородам, например бензолу, они менее стойки. При нагреве отвержденная пленка не размягчается.

По химической природе высыхающие масла (как и другие растительные масла и животные жиры) — это эфиры глицерина (см. стр. 119) и органических (жирных) кислот; общая схема строения этих веществ



где R — остаток жирной кислоты. Масло является термореактивным (высыхающим) только в том случае, если в остатках R имеется много двойных связей между соседними атомами углерода; тогда при разрыве этих связей может происходить процесс полимеризации, т. е. отверждение масляной пленки. Наиболее распространенные высыхающие масла — льняное и тунговое.

Льняное масло золотисто-желтого цвета, получается из семян льна. Его плотность 0,93—0,94 Мг/м³, температура застывания — около минус 20 °С.

Тунговое (древесное) масло получают из семян тунгового дерева, которое разводится на Дальнем Востоке и на Кавказе. Тунговое масло не является пищевым (как льняное) и даже токсично. Плотность тунгового масла 0,94 Мг/м³, температура застывания — от 0 до минус 5 °С.

По сравнению с льняным маслом тунговое высыхает быстрее, причем в прстествоположность льняному маслу, которое сохнет, начиная с поверхности, тунговое масло даже в сравнительно толстом слое высыхает более равномерно и дает более водонепроницаемую пленку, чем льняное. Высыхающие масла применяются в электропромышленности для изготовления электроизоляционных масляных лаков, лакотканей, для пропитки дерева и для других целей. В последнее время наблюдается тенденция к замене высыхающих масел синтетическими материалами. Не все растительные масла высыхающие; некоторые из них высыхают чрезвычайно медленно или даже являются практически не высыхающими. Невысыхающие масла могут применяться в качестве жидких диэлектриков.

Касторовое масло получается из семян клещевины; иногда используется для пропитки бумажных конденсаторов. Плотность касторового масла $0,95\text{--}0,97 \text{ Мг/м}^3$, температура застывания от -10 до -18°C . Его ϵ_r при 20°C составляет $4,0\text{--}4,5$, а при 90°C $\epsilon_r = 3,5\text{--}4,0$; $\text{tg } \delta$ при 20°C равен $0,01\text{--}0,03$, а при 100°C $\text{tg } \delta = 0,2\text{--}0,8$; $E_{\text{пр}}$ при 20°C равна $15\text{--}20 \text{ МВ/м}$. Касторовое масло не растворяется в бензине, но растворяется в этиловом спирте. В отличие от нефтяных масел касторовое не вызывает набухания обычной резины.

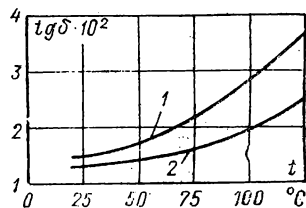
6-8. БИТУМЫ

Битумы — аморфные материалы, представляющие собой сложные смеси углеводородов (обычно они содержат также некоторое количество кислорода и серы) и обладающие характерным комплексом свойств. Они имеют черный (или темно-коричневый) цвет, при достаточно низких температурах хрупки и дают характерный излом в виде раковин. Битумы растворяются в углеводородах — легче ароматических (бензол, толуол), несколько труднее в бензине, немаслостойки. В спирте и воде битумы нерастворимы, они имеют малую гигроскопичность и в толстом слое практически водонепроницаемы. Битумы термопластичны, плотность их близка к 1 Мг/м^3 .

Различают битумы *искусственные* (нефтяные), представляющие собой тяжелые продукты перегонки нефти, и *природные* (ископаемые), называемые также асфальтами. Залежи асфальтов связаны с нефтяными месторождениями, так как в природных условиях асфальты также образовались из нефти. Асфальты обычно бывают загрязнены минеральными примесями. В электроизоляционной технике из нефтяных битумов применяют битумы марок БН-III, БН-IV и БН-V, а также более тугоплавкие спецбитумы марок В и Г. Температура размягчения (по способу кольца и шара) для них должна быть не ниже определенных значений (от 50°C для БН-III до 125°C для В).

Температура размягчения асфальтов доходит до 200°C . Более тугоплавкие битумы, как правило, имеют лучшие электроизоляционные свойства, которые медленно ухудшаются при повышении температуры (рис. 6-15); они труднее растворимы и при низких температурах более тверды и хрупки. Температура размягчения битума может быть повышена продувкой, т. е. пропусканием воздуха сквозь расплавленный битум. Повышение температуры размягчения битума происходит при этом вследствие окисления и дополнитель-

Рис. 6-15. Зависимости $\text{tg } \delta$ от температуры для битумов марок БН-V (кривая 1) и Г (кривая 2) при частоте 50 Гц



ной полимеризации битума. Если, наоборот, температуру размягчения битума требуется снизить, это может быть достигнуто сплавлением битума с небольшим количеством нефтяного масла. Добавление нефтяного масла улучшает холодостойкость битума, т. е. делает его менее хрупким при низких температурах. Битумы — слабополярные вещества с $\epsilon_r = 2,5 \div 3,0$; $\operatorname{tg} \delta$ около 0,01; $E_{пр} = 10 \div 25$ МВ/м и $\rho = 10^{13} \div 10^{14}$ Ом·м; эти параметры мало зависят от влажности. Битумы используются для изготовления лаков и компаундов.

6-9. ВОСКООБРАЗНЫЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Воскообразные материалы представляют собой твердые легкоплавкие вещества, обладающие кристаллическим строением, низкой механической прочностью и малой гигроскопичностью. Они употребляются для пропитки и заливки. Существенным недостатком их при использовании в качестве пропиточных масс является значительная усадка при застывании, достигающая до 15—20 %. Поэтому большая часть объема пор изоляции оказывается заполненной воздухом, что приводит к понижению электрической прочности пропитанной изоляции. В связи с этим воскообразные вещества, в особенности для пропитки изоляции, работающей при высоких напряжениях, вытесняются жидкими и полужидкими пропиточными массами.

Давший название рассматриваемой группе материалов пчелиный воск для электрической изоляции в настоящее время не употребляется.

Парафин. Это наиболее дешевое и широко известное неполярное воскообразное вещество. Получают его разгонкой и вымораживанием из соответствующей фракции дистиллата парафинистой нефти. Очищенный парафин имеет плотность 0,85—0,90 Мг/м³ и температуру плавления 50—55 °С. Зависимость ϵ_r от температуры для парафина была приведена на рис. 1-5 и обсуждена на стр. 25 учебника. Значение $\operatorname{tg} \delta$ парафина 0,0003—0,0007, а ρ — более 10^{16} Ом·м. Парафин не смачивается водой, и его удельное поверхностное сопротивление ρ_s не менее 10^{15} Ом даже при высокой влажности окружающего воздуха; $E_{пр}$ составляет 20—25 МВ/м. При нормальной температуре парафин обладает высокой химической стабильностью, но при нагреве до 130—140 °С на воздухе легко окисляется, снижая ρ в 100 раз и более. Парафин иногда применяют для пропитки бумажных конденсаторов низкого напряжения, для пропитки дерева и картона, для заливки катушек с невысокой рабочей температурой. Парафин, как и другие вещества, состоящие из предельных углеводородов, нерастворим в воде и спиртах, но растворяется в жидких углеводородах: нефтяных маслах, бензине, бензоле. При испарении растворителя парафин (как и другие воскообразные продукты) не образует сплошной прочной пленки, поэтому он непригоден для изготовления лаков.

Церезин подобно парафину представляет собой смесь твердых углеводородов метанового ряда с общей формулой C_nH_{2n+2} , но число атомов углерода в его молекулах ($n = 39 \div 53$) больше, чем в молекулах парафина ($n = 10 \div 36$); кроме того, молекулы церезина имеют сильно разветвленные цепочки углеродных атомов в отличие от слабо разветвленных цепочек молекул парафина. Церезин изготавливают путем очистки минерала озокерита (горного воска), представляющего собой продукт естественного перерождения нефти в условиях доступа воздуха. Преимуществами церезина по сравнению с парафином являются более высокая температура плавления (65—80 °С) и стойкость к окислению; ρ у церезина несколько больше, а $\operatorname{tg} \delta$ несколько меньше, чем у парафина. Поэтому церезин, несмотря на его повышенную стоимость по сравнению с парафином, вытесняет его, в частности при пропитке бумажных и слюдяных конденсаторов.

Синтетический парафин и синтетический церезин. Необходимость повышения рабочих температур бумажных конденсаторов привела к разработке пропиточных воскообразных материалов с температурой плавления 100—130 °С. Они представляют собой высокомолекулярные углеводороды, получаемые в качестве побочных продуктов при изготовлении синтетического бензина и масел. Электроизоляционные свойства этих материалов близки к свойствам натурального парафина и натурального церезина.

Вазелин — близкая к собственно воскообразным веществам масса, при нормальной температуре полужидкая (мазеобразная); применяется для пропитки бумажных конденсаторов. Вазелин является смесью твердых и жидких углеводородов, получаемой из нефти. Свойства конденсаторного вазелина: ρ не менее $5 \cdot 10^{13}$ Ом·м при 20°C и $5 \cdot 10^9$ Ом·м при 100°C ; $\text{tg } \delta$ при 1 кГц и тех же температурах — не более 0,0002 и 0,002 соответственно; $E_{\text{пр}}$ при 50 Гц и 20°C не менее 20 МВ/м.

6-10. ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫЕ ЛАКИ И КОМПАУНДЫ

Большое значение в электроизоляционной технике имеют лаки и компаунды. В процессе изготовления изоляции их используют в жидком виде, но в готовой изоляции они находятся уже в твердом состоянии. Таким образом, лаки и компаунды являются твердеющими материалами.

ЛАКИ

Это коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел, составляющие так называемую *лаковую основу* в летучих растворителях. При сушке лака растворитель улетучивается, а лаковая основа переходит в твердое состояние, образуя (в тонком слое) лаковую пленку.

По применению электроизоляционные лаки разделяются на три группы: пропиточные, покрывные и клеящие.

Пропиточные лаки служат для пропитки пористой, и в частности волокнистой изоляции (бумага, картон, пряжа, ткань, изоляция обмоток электрических машин и аппаратов). После пропитки поры в изоляции оказываются заполненными уже не воздухом, а высохшим лаком, имеющим значительно более высокую электрическую прочность и теплопроводность, чем воздух. Поэтому в результате пропитки повышается пробивное напряжение, увеличивается теплопроводность (это важно для отвода теплоты потерь), уменьшается гигроскопичность, улучшаются механические свойства изоляции. После пропитки органическая волокнистая изоляция в меньшей мере подвергается окисляющему влиянию воздуха, а потому ее нагревостойкость повышается (см. стр. 82, 83 — переход целлюлозных материалов при пропитке из класса нагревостойкости Y в класс A).

Покрывные лаки служат для образования механически прочной, гладкой, блестящей, влагостойкой пленки на поверхности твердой изоляции (часто — на поверхности предварительно пропитанной пористой изоляции). Такая пленка повышает напряжение поверхностного разряда и поверхностное сопротивление изоляции, создает защиту лакируемого изделия от действия влаги, растворителей и химических активных веществ, а также улучшает внешний вид изделия и затрудняет прилипание к нему загрязнений.

Некоторые покрывные лаки (*эмаль-лаки*) наносят не на твердую изоляцию, а непосредственно на металл, образуя на его поверхности электроизоляционный слой (например, изоляция эмалированных проводов, изоляция листов электротехнической стали в расслоенных магнитопроводах электрических машин и аппаратов).

К покрывным лакам принадлежат также *пигментированные эмали*; это — лаки, в состав которых входит пигмент, т. е. порошок неорганического состава (обычно — оксиды металлов), придающий пленке определенную окраску, улучшающий ее механическую прочность, теплопроводность и адгезию к поверхности, на которую нанесен лак. В полупроводящих лаках пигментом является углерод (сажа); пленки таких лаков имеют низкое удельное поверхностное сопротивление (от 10^2 до 10^{10} Ом) и наряду с лентами из железистого асбеста используются в производстве электрических машин на высокие рабочие напряжения для улучшения картины электрического поля на границе пазовых и лобовых частей обмоток.

Клеящие лаки применяются для склеивания между собой твердых электроизоляционных материалов (например, клейка листочков расщепленной слюды при изготовлении миканитов) или для приклеивания их к металлу. Помимо высоких электроизоляционных свойств и малой гигроскопичности (общие требования для всех электроизоляционных лаков), клеящие лаки должны обеспечивать особо высокую адгезию к склеиваемым материалам. Приведенное разделение лаков по областям применения не всегда может быть выдержано достаточно строго. Так, при изготовлении гетинакса и текстолита (§ 6-13) лак, пропитывающий отдельные слои бумаги

или ткани и склеивающий эти слои друг с другом, является одновременно пропиточным и клеящим.

По режиму сушки различают лаки *горячей* (печной) *сушки*, которые требуют для сушки повышенной температуры (выше 70 °С), и лаки *холодной* (воздушной) *сушки*, которые достаточно быстро и хорошо сохнут при комнатной температуре.

Режим сушки лака определяется как его основой, так и растворителем. Если основа лака термореактивна, для сушки нужна повышенная температура; лаки с термопластичной основой не требуют запекания пленки при высокой температуре. С другой стороны, лаки, в состав которых входит растворитель, кипящий при высокой температуре (например, керосин), требуют печной сушки независимо от вида лаковой основы; лаки с растворителем, легко испаряющиеся при нормальной температуре (например, бензин или ацетон), могут быть лаками воздушной сушки, если только их основа не требует высокой температуры для запекания пленки. Как правило, лаки печной сушки дают более высококачественную пленку, чем лаки воздушной сушки; последние применяются в основном при ремонтных работах.

Смоляные лаки — растворы синтетических, искусственных или природных смол.

Бакелитовые лаки — растворы бакелита (в стадии А) в спирте. Это пропиточные и клеящие термореактивные лаки, дающие механически прочную, но малоэластичную и обладающую заметной склонностью к тепловому старению пленку. Они используются в производстве гетинакса и текстолита, при изготовлении изоляции электрических аппаратов высокого напряжения и т. п.

Глифталевые лаки — это растворы глифталевой смолы в смесях спиртов с жидкими углеводородами и тому подобных растворителях. Это термореактивные лаки, обладающие клеящей способностью и используемые для клейки миканитов, микроленты; гибкость их пленок выше, чем пленки бакелитового лака, но влагостойкость ниже.

Кремнийорганические лаки требуют сушки при повышенной температуре и образуют нагретую и влагостойкую пленку.

Поливинилхлоридные лаки стойки к действию бензина, масла, многих химически активных веществ и применяются как покрывные лаки для защиты изоляции, работающей, например, в содержащей кислотные пары атмосфере.

Целлюлозные лаки — растворы эфиров целлюлозы; пленки их термопластичны. Большая часть целлюлозных лаков — лаки холодной сушки. Особое значение из них имеют нитроцеллюлозные лаки (*нитролаки*). Пленки нитролаков механически прочны, отличаются блеском, хорошо сопротивляются действию воздуха, влаги, масел и пр. Нитролаки плохо пристают к металлам, поэтому перед нанесением нитролака на металл обычно предварительно создают слой грунтового лака, хорошо пристающего к металлу, но менее стойкого к действию воздуха, света и влаги (например, глифталевого), а затем уже наносят слой нитролака; в рассматриваемом случае первое покрытие требует горячей сушки, которую нитролак не выдержал бы, но эту сушку для запекания грунта-производят еще до нанесения нитролака. Нитролаки применяют также для пропитки хлопчатобумажных оплеток автомобильных и самолетных проводов (поверх слоя резиновой изоляции) с целью защиты резины от влияния озона, масла и бензина.

Масляные лаки. Основу этих лаков составляют высыхающие масла. В их состав входят также сиккативы, ускоряющие процесс отверждения пленки, и растворители (бензин или керосин, иногда с примесью ароматических углеводородов). Иногда употребляют масляные лаки без растворителей, поскольку их основа сама по себе является жидкостью, но такие лаки имеют повышенную вязкость и менее удобны для применения. Скорость сушки масляного лака в очень большой мере зависит от содержания в нем сиккатива. При высоком содержании сиккативов и легколетучем растворителе могут быть получены лаки холодной сушки. Однако при увеличении содержания сиккативов в масляном лаке значительно ускоряется тепловое старение лаковой пленки при длительном воздействии на нее повышенной температуры (пленка становится хрупкой, в ней появляются трещины, она отстает от подложки). Поэтому высококачественные электроизоляционные масляные лаки изготавливают с малым содержанием сиккативов; эти лаки требуют горячей сушки.

Масляные лаки применяют для производства светлых лакотканей и лакобумаг (см. стр. 83), а также для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов; в частности, они могут быть использованы для пропитки обмоток маслонаполненных

трансформаторов, так как запеченная пленка этих лаков маслостойка. Однако такие лаки менее влагостойки, чем «черные» масляно-битумные (см. ниже).

Масляные лаки быстрой горячей («огневой») сушки применяют при эмалировании листовой электротехнической стали для расслоенных магнитопроводов электрических машин и аппаратов с целью изоляции листов друг от друга, чтобы уменьшить потери на вихревые токи в переменных магнитных полях. Растворитель таких лаков — труднолетучий (керосин). Листы стали на конвейерной установке покрывают лаком и затем быстро пропускают сквозь печь, в которой поддерживают температуру около 500 °С.

Черные лаки. В состав этих лаков входят битумы, которые и определяют черный цвет как жидкого лака, так и лаковой пленки. По сравнению с масляными лаками они дешевле и образуют менее гигроскопичные пленки с более высокими электроизоляционными свойствами, слабо подверженные старению, но зато менее эластичные. Пленки битумных лаков практически немаслостойки и заметно растворяются в легких углеводородах, особенно ароматических. При нагреве пленки этих лаков склонны к размягчению.

Чисто битумные лаки — растворы битумов в органических растворителях — являются лаками холодной сушки; эти лаки в качестве электроизоляционных непригодны, так как у них особенно резко выражены указанные выше отрицательные свойства лаковой пленки: малая гибкость, низкая нагревостойкость и небольшая стойкость к растворителям. Обычно такие лаки используют в качестве антикоррозионных покрытий металлических изделий.

Масляно-битумные лаки помимо битумов содержат в своей основе высыхающие масла. Свойства этих лаков занимают промежуточное положение между свойствами чисто битумных и чисто масляных лаков; благодаря присутствию высыхающих масел пленки данных лаков более гибки, менее подвержены действию растворителей и размягчению при нагреве, чем пленки битумных лаков.

Наилучшими растворителями для масляно-битумных лаков являются углеводороды (бензол, толуол), а также скипидар. Вследствие значительной вредности паров, особенно бензола, для организма человека, эти растворители применяются в смеси с бензином.

Масляно-смоляные лаки — это масляные лаки на основе природных или синтетических смол. Отметим масляно-глифталевые лаки; по сравнению с чисто масляными лаками они обладают повышенной эластичностью, нагревостойкостью и клеящей способностью, а по сравнению с чисто глифталевыми лаками — пониженной гигроскопичностью. Такие лаки широко применяют для пропитки обмоток маслонаполненных трансформаторов, обеспечивая маслостойкость и высокую механическую прочность пропитанных обмоток; для пропитки обмоток, подвергающихся действию кислотных паров и хлора; для покрытия изоляции, содержащей фенолформальдегидные смолы, с целью повышения трекинговостойкости изоляции.

Помимо описанных выше, применяют и многие другие лаки, главным образом, на основе синтетических смол (нередко в рецептуру лака вводится несколько различных смол).

Лаки имеют буквенно-цифровые обозначения: буквы обозначают состав лаковой основы, первые цифры — общее назначение лака (в частности, первая цифра «9» — электроизоляционный лак), последующие цифры — конкретный вид лака. В табл. 6-4 приведены стандартизованные свойства некоторых широко применяемых электроизоляционных пропиточных лаков: фенольного ФЛ-98, полиуретанового УР-9144, кремнийорганического КО-964 и масляно-глифталевого ГФ-95.

Основные области применения лаков ФЛ-98, УР-9144 и КО-964 — пропитка обмоток электрических машин (лак КО-964 — для машин с повышенной рабочей температурой), а лак ГФ-95 используется для пропитки обмоток маслонаполненных трансформаторов.

Отметим, что под *термоэластичностью* лаковой пленки (см. табл. 6-4) понимают время выдержки при повышенной температуре нанесенной на тонкую медную пластинку лаковой пленки толщиной 0,05 мм, по истечении которого она стареет настолько, что при изгибе вокруг стержня диаметром 3 мм дает трещины, заметные в лупу с пятикратным увеличением; таким образом, термоэластичность характеризует стойкость лаковой пленки к тепловому старению. Другой критерий стойкости к тепловому старению — *термостабильность* — определяется по уменьшению массы пленки при длительном нагреве. Этот критерий учитывает совершенно иные физико-

Свойства некоторых электроизоляционных лаков

Свойство	ФЛ-98	УР-9144	КО-964	ГФ-95
Время сушки, ч, на более	2 (при 105 °С)	0,5 (при 130 °С)	1 (при 200 °С)	2 (при 165 °С)
Термопластичность плен- ки, ч, не менее	30 (при 155 °С)	—	200 (при 200 °С)	48 при 150 °С)
Электрическая прочность пленки, МВ/м, не менее: при нормальных усло- виях при повышенной темпе- ратуре	70 40 (при 130 °С)	80 40 (при 155 °С)	75 40 (при 200 °С)	70 40 (при 130 °С)
после выдержки 24 ч в атмосфере с 95 % отно- сительной влажностью при 20 °С	—	50	50	—
после выдержки 24 ч в воде при 20 °С	10	—	—	40

химические процессы, происходящие в лаковой пленке, например, для пленок глифталевых лаков термопластичность сравнительно велика, но термостабильность мала, так как эти пленки при нагреве теряют много летучих веществ.

КОМПАУНДЫ

Компаунды отличаются от лаков отсутствием в их составе растворителя. Они состоят из различных смол, битумов, воска, масел; если компаунд в исходном состоянии тверд, его перед употреблением нагревают до необходимой температуры, чтобы получить массу достаточно низкой вязкости.

По применению компаунды делятся на две основные группы.

Пропиточные компаунды, назначение которых аналогично назначению пропиточных лаков.

Заливочные компаунды служат для заполнения сравнительно больших полостей, промежутков между различными деталями в электрических машинах и аппаратах, а также для получения сравнительно толстого покрытия на тех или иных электротехнических деталях, узлах, блоках. Применение заливочных компаундов преследует цели защиты изоляции от увлажнения и от действия химически активных веществ, увеличения разрядного напряжения, улучшения условий отвода теплоты и пр.

Наиболее старыми по времени внедрения в электропромышленность компаундами являются битумы с определенной температурой размягчения (тугоплавкие битумы требуют высокой температуры при компаундировании, но зато имеют более высокие электроизоляционные свойства, нагревостойкость и стойкость к действию растворителей). Иногда битумные компаунды используют для пропитки статорных обмоток электрических машин. По сравнению с пропиточными лаками они способны обеспечить лучшую влагостойкость и влагонепроницаемость изоляции, так как при охлаждении после пропитки затвердевают полностью и в них не остается крупных пор (каналов) — следов растворителя, испаряющегося из затвердевающего материала, что может иметь место при пропитке лаками. Для пропитки роторных обмоток

битумные компаунды непригодны из-за своей термопластичности; битум, размягченный при нагреве до рабочей температуры машины, может быть выброшен из вращающейся обмотки под действием центробежной силы. Чтобы несколько повысить нагревостойкость и маслостойкость битумного компаунда, к нему примешивают некоторое количество высыхающего масла. Если же требуется понизить температуру размягчения компаунда, к нему добавляют некоторое количество компаунда-разбавителя, т. е. битума с низкой температурой размягчения (60—70 °С). В этом, в частности, возникает необходимость, когда компаунд долгое время применялся для пропитки различных изделий и от нагрева в присутствии воздуха повысил температуру размягчения (явление, аналогичное продувке битума, см. стр. 127). При заполнении компаундом воздушных промежутков между катушками электрических аппаратов и металлическими кожухами существенно улучшаются условия отвода теплоты, вследствие чего мощность аппарата может быть повышена. Теплоотвод можно улучшить еще больше, если применить обладающий повышенным коэффициентом теплопроводности кварц-компаунд, т. е. битум, смешанный с минеральным кристаллическим наполнителем — чистым кварцевым песком.

В кабельной технике большое значение имеют *кабельные компаунды*. К ним относятся: а) пропиточные компаунды (*пропиточные кабельные массы*), служащие для пропитки бумажной изоляции силовых кабелей и изготовляющиеся из нефтяного масла, к которому для повышения вязкости добавляют канифоль или синтетические смолы; б) заливочные компаунды (*заливочные кабельные массы*), применяемые для заливки соединительных, ответвительных и концевых муфт. Заливка компаундом разделанных концов кабелей в муфтах имеет целью устранение возможности проникновения влаги в изоляцию кабелей и повышение пробивных напряжений между отдельными разделанными жилами кабеля и между жилами и корпусом муфты. Заливочные кабельные массы состоят из битумов или же (для кабелей на более высокое напряжение) из нефтяного масла и канифоли.

Описанные выше компаунды — термопластичные; они размягчаются (для пропитки и заливки) посредством нагревания, а отвердевают при последующем охлаждении. За последние годы все большее значение приобретают термореактивные компаунды, необратимо отверждающиеся в результате происходящих в жидком компаунде химических превращений. Как правило, термореактивные компаунды обладают более высокой нагревостойкостью по сравнению с термопластичными, так как при нагреве (после отверждения) они уже не размягчаются. Термореактивные компаунды применяются для пропитки и заливки различных деталей и узлов: сухих трансформаторов, изоляции водостойких электрических машин; заливка значительно улучшает электрические свойства изоляции, защищает от увлажнения, механических повреждений и пр. Однако заливка термореактивным компаундом затрудняет ремонт детали при ее пробое или ином повреждении, в большинстве случаев при повреждении залитой детали требуется ее замена.

Весьма распространены *эпоксидные компаунды*, представляющие собой эпоксидную смолу с добавлением наполнителей, пластификаторов и других ингредиентов. Непосредственно перед употреблением компаунда в него вводится отвердитель; в зависимости от вида отвердителя эпоксидные компаунды могут отверждаться или на холоде, или при нагреве (см. стр. 121).

Эпоксидные компаунды в последнее время применяются, в частности, в качестве кабельных заливочных масс; благодаря высокой механической прочности отвержденного эпоксидного компаунда в некоторых случаях залитая таким компаундом муфта может выполняться без металлического кожуха.

Важное значение имеют также термореактивные *полиэфирные компаунды* на основе ненасыщенных полиэфирных смол (стр. 119), часто со стиролом (стр. 103, 111), метилметакрилатом (стр. 133) и другими ненасыщенными мономерами, которые служат активными (т. е. вступающими в реакцию совместной полимеризации) разбавителями; катализаторами отверждения являются органические пероксиды. Полиэфирные компаунды, как правило, дают значительную (около 6 %) усадку при отверждении; в этом отношении они хуже эпоксидных компаундов, дающих значительно меньшую усадку.

Сушка и пропитка изоляции. Назначение пропитки, а также покрытия электроизоляционными лаками и компаундами пористой изоляции уже неоднократно рассматривалось нами ранее. Перед пропиткой изоляция должна быть тщательно просушена, иначе содержащаяся в ней влага будет закупорена пропитывающим

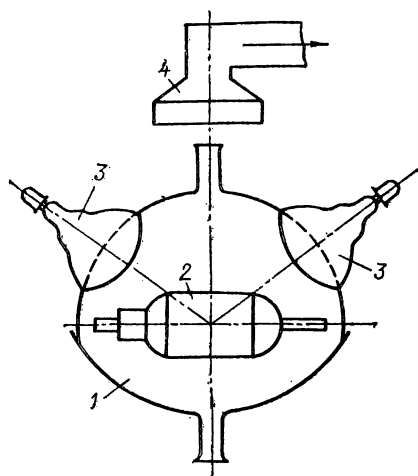


Рис. 6-16. Схема установки для инфракрасной сушки якорей малых электрических машин

1 — кожух печи; 2 — якорь; 3 — лампы инфракрасного излучения; 4 — вытяжка

составом в порах и в дальнейшем будет вредно влиять на свойства пропитанной изоляции. После пропитки или покрытия лаками необходима вторая сушка для удаления растворителя, а для термоактивного лака или термоактивного компаунда термообработка требуется и с целью его отверждения; после пропитки или заливки термопластичными компаундами последующий нагрев не нужен.

Обычный процесс пропитки изоляции (например, изоляции обмоток электрических машин) лаком заключается в том, что после сушки в печи (при температуре 100—110 °C в течение 5—10 ч в зависимости от размеров обрабатываемых изделий) еще довольно горячие (при температуре 60—70 °C, чтобы не вызвать бурного кипения растворителя) изделия погружают в ванну с лаком, где их оставляют до полного прекращения выделения пузырьков воздуха. Затем обрабатываемые изделия вынимают из ванны, дают стечь избытку лака и сушат по режиму, соответствующему примененному типу лака (например, для электрических машин общего назначения среднего размера при пропитке масляно-битумными лаками — 10—20 ч при 100—110 °C). Пропитку с последующей сушкой повторяют по крайней мере один раз, а для машин влагонепроницаемого исполнения — несколько раз, после чего наносят покровный лак и производят окончательную сушку.

Покровный лак также лучше наносить путем погружения обрабатываемого изделия в ванну с лаком; кроме того, можно производить обливание лаком, нанесение лака пульверизатором или даже кистью (наименее совершенный способ, дающий неравномерную пленку). Горячую сушку чаще всего производят, размещая обрабатываемые изделия на подставках или подвесках в печи (термостате). Обогрев печи может быть паровой, когда пар пропускают через расположенные в печи змеевики, или электрический (ток пропускают через нагревательные элементы, размещенные внутри печи). Можно также подогревать воздух вне печи в особом калорифере и прогонять его сквозь печь. Печь оборудуется приспособлениями для измерения температуры, а иногда и устройствами для автоматического регулирования ее по заданной программе.

Иногда сушку и запекание пропитанной лаком изоляции осуществляют инфракрасным облучением. Источником такого облучения служат специальные лампы накаливания. Температура нити накала этих ламп несколько ниже, чем у обычных осветительных ламп, что обеспечивает большой срок службы; кроме того, в этих лампах по сравнению с осветительными меньшая часть электроэнергии превращается в видимый свет, а большая — в тепловое (инфракрасное) излучение. Лампы имеют отражатели или же непосредственно на баллон лампы наносят зеркальный слой, чтобы поток лучей можно было направить желаемым образом. Инфракрасные лампы устанавливают на штативах вблизи нагреваемого изделия (для ремонтных работ, когда требуется произвести сушку на месте, а также для сушки особо крупных изделий, для которых потребовались бы слишком большие печи) либо в специальных печах. Пример такой печи для сушки пропитанных лаком якорей схематически изображен на рис. 6-16. Сушильные устройства могут быть конвейерного типа: в них подвергаемые сушке изделия движутся на бесконечной ленте сквозь туннельную печь, в которой установлен ряд ламп инфракрасного излучения или электрических плит. Преимущества инфракрасного обогрева по сравнению с паровым или электрическим обогревом заключаются в значительном ускорении процесса сушки и сокращении площади сушильного помещения, а также (по сравнению с электрическим обогревом) в сокращении расхода энергии.

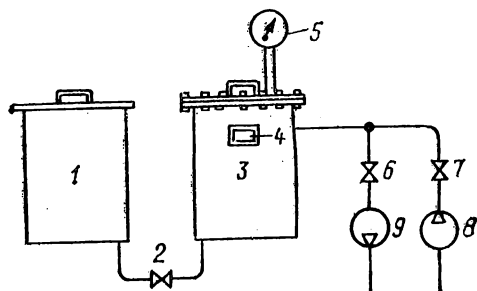


Рис. 6-17

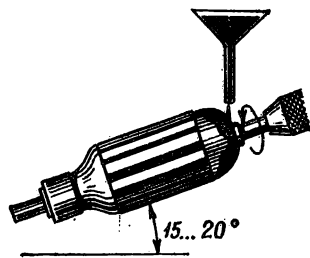


Рис. 6-18

Рис. 6-17. Схема установки для пропитки с применением вакуума и давления

1 — бак для пропиточного состава; 2 — вентиль на трубопроводе для засоса пропиточного состава; 3 — сушильно-пропиточный котел (автоклав); 4 — смотровое окно; 5 — манометр; 6 — кран на трубопроводе вакуумного насоса; 7 — кран на трубопроводе сжатого газа; 8 — баллон со сжатым газом; 9 — вакуумный насос

Рис. 6-18. Капельный способ пропитки изоляции ротора

В некоторых случаях применяются водные электроизоляционные лаки, которые представляют собой коллоидные растворы лаковой основы не в органических растворителях, а в воде. Их преимущества перед лаками на органических растворителях следующие: нет необходимости в расходовании дорогостоящих растворителей, исключается токсичность и пожарная опасность, устраняется вредное действие растворителя на пропитываемую изоляцию (лакоткань, эмаль и т. п.). При применении водных лаков нет необходимости в предварительной сушке изоляции перед пропиткой.

Процесс пропитки изоляции компаундом аналогичен пропитке лаком: если в исходном состоянии при нормальной температуре компаунд твердый, его надо предварительно разогреть, чтобы перевести в жидкое состояние. Пропитанные изделия следует извлекать из компаунда, не дожидаясь его застывания. Подвергаемые компаундированию катушки и тому подобные изделия перед погружением в расплавленный компаунд обвязывают хлопчатобумажной лентой. После компаундирования ленту сматывают; с ней удаляются сгустки застывшего компаунда, что придает гладкость поверхности компаундированного изделия.

Более совершенный способ компаундирования состоит в том, что изделия сперва подвергаются вакуумной сушке для возможно лучшего удаления как паров воды, так и воздуха, а затем в том же резервуаре (чтобы в поры вакуумированного изделия не проник воздух) пропитываются компаундом под давлением, чтобы принудительно заполнить компаундом поры изоляции.

Упрощенная схема соответствующего сушильно-пропиточного устройства показана на рис. 6-17. Сушку ведут в автоклаве 3, из которого воздух и пары воды откачиваются вакуумным насосом 9. По окончании сушки открывают кран 2 на трубопроводе, соединяющем нижнюю часть автоклава с резервуаром 1, в котором находится расплавленный компаунд. Компаунд под атмосферным давлением подается в автоклав, после чего вакуумный насос отключают, краны 2 и 6 перекрывают, а кран 7 открывают, и на компаунд в автоклаве подают давление в несколько сот килопаскалей от компрессора (или из баллона со сжатым углекислым газом 8), чтобы достигнуть более быстрой и глубокой пропитки. При этом обогрев автоклава не прекращают, чтобы сохранить малую вязкость компаунда до конца процесса пропитки.

Дальнейшим усовершенствованием метода пропитки с использованием вакуума и давления является тренировочный режим пропитки: на компаунд, которым залиты пропитываемые объекты, подается в течение 5—10 мин давление, затем на такой же промежуток времени давление сбрасывается, после чего снова подается (всего до трех — пяти циклов). Процесс требует весьма малого времени и обеспечивает глубокую и надежную пропитку.

Термореактивные компаунды также используются для заливки в аппаратуру. Для заливки (обволакивания, «окукливания») обмоток электрических машин, аппа-

ратов, узлов, деталей подлежащие заливке изделия помещаются в соответствующие формы, в которые и заливается компаунд; после его отверждения форма удаляется. Если требуется, перед заливкой производят вакуумирование, а при отверждении подают повышенное давление.

Из сравнительно новых способов пропитки отметим *капельный способ* пропитки вращающихся обмоток. Нагретый до 120—130 °С ротор машины устанавливается под углом 15—20 °С к горизонтали и медленно (с частотой вращения 15—20 об/мин) вращается; на лобовую часть (находящуюся выше другой) обмотки каплями подается расплавленный термореактивный компаунд (например, эпоксидный), который растекается по обмотке и пропитывает ее (рис. 6-18).

Отверждение некоторых термореактивных компаундов затрудняется при соприкосновении с медью, которая действует как ингибитор (замедлитель) химической реакции отверждения; в этом случае неизолированные (неэмалированные) медные провода, например, выводы, подлежащие заливке компаундом, необходимо предварительно лудить или иным способом защищать от контакта с компаундом.

Для нанесения тонкого электроизоляционного слоя компаунда на поверхность изделия применяется также способ вихревого напыления: в специальную ванну с пористым дном помещается измельченный в тонкий порошок электроизоляционный состав и сквозь дно вдувается сжатый воздух (под избыточным давлением 0,01—0,02 МПа). Таким образом, в ванне образуется суспензия порошка в воздухе, внешне напоминающая кипящую жидкость (ее иногда называют псевдокипящим слоем) и имеющая довольно резко выраженную верхнюю границу. В эту суспензию на короткое время вводится предварительно нагретое обрабатываемое изделие; частицы порошка, соприкасаясь с нагретым изделием, плавятся, образуя на его поверхности электроизоляционный слой. Если требуется, затем производится дальнейшая термообработка покрытого изделия. Вихревое напыление используется в поточном массовом производстве. В частности, этот способ весьма пригоден для нанесения электроизоляционных покрытий на якоря небольших электрических машин с полужакрытыми пазами — взамен трудоемкого и ненадежного изолирования пазов картоном и тому подобными материалами.

6-11. ГИБКИЕ ПЛЕНКИ И ЖИДКИЕ КРИСТАЛЛЫ

Гибкие пленки. Особый вид изделий из органических полимеров — тонкие (толщиной до 0,02 мм и даже менее) прозрачные гибкие пленки, выпускаемые в рулонах. Эти пленки, обладающие высокой электрической и механической прочностью, широко применяются в изоляции электрических машин, кабелей и обмоточных проводов, в качестве диэлектрика конденсаторов и т. п.

Гибкие пленки могут быть изготовлены из линейных полимеров с достаточно высокой молекулярной массой, т. е. с большой длиной молекул. Основные способы их изготовления: а) разлив на гладкую металлическую поверхность раствора полимера и б) разлив на гладкую охлаждаемую поверхность расплавленного полимера. Гибкость пленки может быть повышена двумя способами: добавлением к материалу пленки (перед ее формовкой) пластификатора; вытяжкой пленки при температуре, несколько превышающей температуру размягчения ее материала; при этом линейные молекулы материала пленки получают преобладающую ориентацию в направлении растяжения, что способствует повышению как гибкости пленки, так и ее прочности при растяжении в направлении вытяжки.

Пленки из эфиров (и других производных) целлюлозы весьма распространены в технике и быту; к ним относятся фото- и кинопленки (обычно из нитроцеллюлозы; негорючие пленки — из ацетилцеллюлозы) и упаковочные материалы (целлофан — пластифи-

цированная глицерином пленка из материала, аналогичного по составу искусственному вискозному шелку — см. стр. 146). Для электроизоляционной техники важны пленки из триацетата целлюлозы. Они изготавливаются как без пластификатора, так и с различным содержанием пластификаторов. Их удлинение перед разрывом — не менее 15 % для непластифицированных пленок и 20 % для пластифицированных. Значение ϵ_r этих пленок — около 3,6; $\operatorname{tg} \delta = 0,007$; гигроскопичность 2—3 %. Триацетатные пленки применяются в качестве изоляции секций обмоток электрических машин и аппаратов, а также некоторых типов обмоточных проводов. Эти пленки малоозоностойки, что затрудняет их использование для изоляции машин высокого напряжения. Длительно допускаемая для них рабочая температура 90—100 °С.

Имея довольно высокий предел прочности при растяжении, триацетатные пленки (как и пленки многих других типов) весьма чувствительны к надрыву — образовавшаяся по краю пленки трещина легко распространяется дальше. Поэтому пленку иногда используют, наклеивая на картон; получается композиционный материал с высокой электрической (благодаря наличию пленки) и механической (благодаря присутствию картона) прочностью. Такой картон широко используется в изоляции электрических машин.

Из полярных синтетических пленок большое значение имеют полиэтиленерефталатные пленки (майлар, мелинекс, хостафан и др.) толщиной от 0,04 до 0,35 мм. Они имеют хорошие электроизоляционные и механические свойства, химически стойки и нагревостойки; по короностойкости они превосходят как триацетатные, так и полиэтиленовые и полистирольные (см. ниже) пленки. Их параметры: плотность 1,38—1,40 Мг/м³; предел прочности при растяжении 120—180 МПа; относительное удлинение перед разрывом 50—100 %; $\rho = 10^{14}$ Ом·м; $\epsilon_r = 3,0$; $\operatorname{tg} \delta = 0,007$ (при 50 Гц); интервал рабочих температур от —60 до +150 °С.

Пленки из полиамидных смол имеют предел прочности при растяжении до 150 МПа, относительное удлинение перед разрывом 150—400 %.

Псликарбонатные пленки (макрофоль) имеют плотность 1,2 Мг/м³, предел прочности при растяжении 100—200 МПа и относительное удлинение перед разрывом 300—100 %; $\rho = 10^{14} \div 10^{15}$ Ом·м; $\epsilon_r = 2,9$; $\operatorname{tg} \delta = 0,006$ (при 50 Гц); $E_{пр} = 60 \div 90$ МВ/м (при толщине пленки 0,1 мм).

К наиболее нагревостойким органическим пленкам помимо политетрафторэтиленовых (см. ниже) принадлежат полиимидные пленки (каптон). Их рабочая температура 200—240 °С; плотность 1,42 Мг/м³; температурные зависимости механических свойств представлены на рис. 6-19, а температурно-частотные зависимости ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ — на рис. 6-20. Перспективны двухслойные пленки из полиимида и сополимера тетрафторэтилена с гексафторпропиленом.

Среди неполярных пленок большое значение имеют пленки из полиэтилена, полипропилена, полистирола, политетрафторэтилена. Электроизоляционные пленки из полистирола (стирофлекс) изготов-

ляются механически ориентированными без введения пластификаторов, которые заметно ухудшили бы высокие электроизоляционные свойства полистирола. Эти пленки мало нагревостойки. Нагревостойкостью класса С при весьма высоких электроизоляционных свойствах и малой гигроскопичности характеризуются пленки из политетрафторэтилена.

Различные виды синтетических пленок применяются для изготовления конденсаторов, причем неполярные пленки (в частности, полистирольная) обеспечивают высокое сопротивление изоляции, малый $\operatorname{tg} \delta$ конденсатора (до $5 \cdot 10^{-4}$), малые токи абсорбции (что важно для ряда устройств) и стабильность емкости; зато полярные пленки имеют более высокую ϵ_r и потому позволяют получать меньшие габариты конденсатора при той же емкости. Пленки из стирофлекса используются при изготовлении некоторых типов высокочастотных кабелей; отдельные типы пленок, в частности поликарбонатные, весьма перспективны для изготовления силовых кабелей на сверхвысокие напряжения (сотни киловольт). Как правило, ρ , ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ пленок из синтетических полимеров близки к ρ и ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ тех же материалов в толстом слое. Электрическая прочность при уменьшении толщины возрастает, однако у очень тонких пленок, благодаря влиянию местных неоднородностей, опять уменьшается. Предел прочности при растяжении и относительное удлинение перед разрывом пленок, особенно ориентированных, выше, чем у тех же материалов в толстом слое.

Жидкие кристаллы. Особенности этих органических соединений заключаются в том, что по своим механическим свойствам они напо-

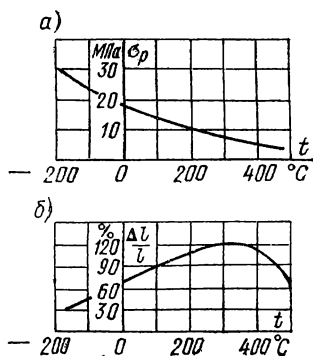


Рис. 6-19

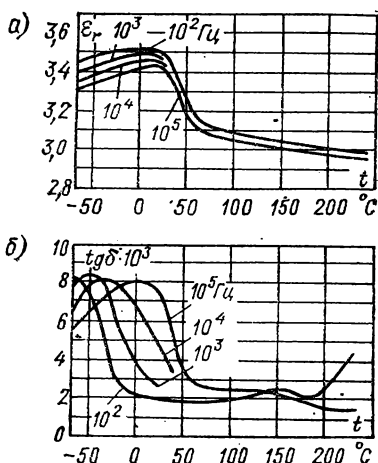
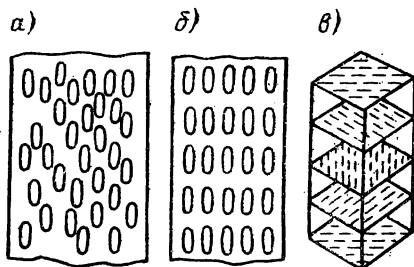


Рис. 6-20

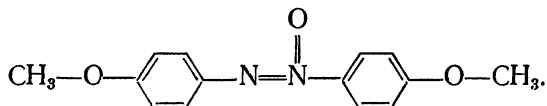
Рис. 6-19. Зависимости предела прочности при растяжении (а) и относительного удлинения перед разрывом (б) полиимидной пленки от температуры

Рис. 6-20. Зависимости ϵ_r (а) и $\operatorname{tg} \delta$ (б) полиимидной пленки от температуры при различных частотах

Рис. 6-21. Схематическое изображение строения жидких кристаллов: *а* — нематический (от греческого нитевидный), у которого молекулы расположены параллельно друг другу, но их продольные сдвиги беспорядочны; *б* — смектический (от греческого — мыло), у которого молекулы расположены слоями, винтообразно повернутыми относительно друг друга по вертикальной оси



минают вязкие жидкости, но при этом проявляют анизотропию оптических, электрических и магнитных свойств. Жидкие кристаллы начали исследовать еще в 1888 г., когда австрийский ботаник Ф. Райнитцер заметил, что бензойнокислый холестерин из состояния твердого (очень вязкого) при 145 °С переходит в мутную жидкость, которая при температуре 179 °С просветляется и становится прозрачной. Вещества с подобным изменением состояний в зависимости от температуры получили название термотропных жидких кристаллов. Примером такого вещества может служить параазоксианизол строения:



Кроме термотропных различают лиотропные жидкие кристаллы, представляющие собой растворы мыла в воде и некоторых органических веществ в дихлорэтаноле и других полярных растворителях.

Анизотропия и связанные с этим особенности свойств жидких кристаллов обусловлены закономерностями в расположении молекул, по которым их подразделяют на нематические, смектические, холестерические. На рис. 6-21 показано расположение молекул в этих разновидностях жидких кристаллов. В практике жидкие кристаллы используют в виде тонких пленок.

Жидкие кристаллы весьма чувствительны (десятые доли градуса) к температуре и при этом меняют свою окраску. Подбирая различные по составу вещества, можно получить индикаторы в пределах температуры $-20 \div +250$ °С. Они также сильно реагируют на изменения напряженности электрического и магнитного полей, изменяя при этом свою прозрачность и другие оптические характеристики, что используется в технике. Анизотропия электропроводности жидких кристаллов связана с анизотропией их вязкости, определяющейся закономерностями в расположении молекул. Большое число световых эффектов, таких, как поворот плоскости поляризации луча, двойное лучепреломление, спектральное изменение поглощения и отражения «световая память», делает их интересными и для применения в оптике. Жидкие кристаллы реагируют также и на пары различных химических веществ. При использовании жидких кристаллов в качестве световых индикаторов следует помнить, что они

требуют внешнего освещения, а индикация может зависеть от угла зрения. Большая чувствительность к различным энергетическим воздействиям обязывает не забывать о соотношениях сигнал-помеха. Как и во всех органических материалах, в жидких кристаллах наблюдаются процессы старения.

6-12. ВОЛОКНИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ

В электротехнике весьма широко применяются волокнистые материалы, т. е. материалы, которые состоят преимущественно (или целиком) из частиц удлиненной формы — волокон. В некоторых материалах, а именно в текстильных, волокнистое строение совершенно очевидно. В других волокнистых материалах, таких, как дерево, бумага, картон, волокнистое строение может быть изучено с помощью микроскопа при небольшом увеличении.

Преимущества многих волокнистых материалов: дешевизна, довольно большая механическая прочность и гибкость, удобство обработки. Недостатками их являются невысокие электрическая прочность и теплопроводность (из-за наличия промежутков между волокнами, заполненными воздухом); гигроскопичность — более высокая, чем у массивного материала того же химического состава (так как развитая поверхность волокон легко поглощает влагу, проникающую в промежутки между ними). Свойства волокнистых материалов могут быть существенно улучшены путем пропитки (см. § 6-10) — вот почему эти материалы в электрической изоляции обычно применяют в пропитанном состоянии.

Большая часть волокнистых материалов — органические вещества. К ним принадлежат материалы растительного происхождения (дерево, хлопчатобумажное волокно, бумага и прочие материалы, состоящие в основном из целлюлозы) и животного происхождения (шелк, шерсть), искусственные волокна, получаемые путем химической переработки природного волокнистого (в основном целлюлозного) сырья и, наконец, приобретающие особо важное значение в последнее время синтетические волокна, изготавливаемые из синтетических полимеров.

Целлюлозные волокнистые материалы имеют сравнительно большую гигроскопичность, что связано как с химической природой целлюлозы, содержащей большое число полярных гидроксильных групп (см. ее структурную формулу на стр. 125), так и особенностями строения растительных волокон, а также невысокую нагревостойкость (в непропитанном состоянии — класс Y, а в пропитанном — A, см. стр. 82). Некоторые искусственные, и в особенности синтетические, волокнистые материалы имеют значительно меньшую гигроскопичность и повышенную нагревостойкость по сравнению с целлюлозными материалами.

В тех случаях, когда требуется особо высокая рабочая температура изоляции, которую органические волокнистые материалы обеспечить не могут, применяют неорганические волокнистые материалы — на основе стеклянного волокна и асбеста (§ 6-16 и 6-19).

ДЕРЕВО

Благодаря своей распространенности, дешевизне и легкости механической обработки дерево явилось одним из первых электроизоляционных и конструкционных материалов, получивших применение в электротехнике. Дерево обладает неплохими механическими свойствами, в особенности если учесть его легкость: прочность дерева, отнесенная не к геометрическим размерам, а к массе, не ниже, чем у стали. Более тяжелые породы деревьев прочнее, чем более легкие. Прочность дерева в различных направлениях различна: прочность поперек волокон меньше, чем вдоль; плохо работает дерево на раскалывание вдоль волокон.

Недостатки дерева: 1) высокая гигроскопичность, обуславливающая резкое снижение электроизоляционных свойств дерева при его увлажнении, а также коробление и растрескивание деталей, изготовленных из влажного дерева, при его высушивании (вследствие того, что влажное дерево при сушке дает уменьшение размеров, неодинаковое в различных направлениях); 2) нестандартность свойств дерева даже одной и той же породы; неоднородность свойств образцов дерева в зависимости от направления их выпиливания, наличие сучков и других дефектов; 3) низкая нагревостойкость, а также горючесть.

Свойства дерева улучшаются при его пропитке льняным маслом, различными смолами и т. д. Для плотных пород дерева (наиболее широко в электротехнике применяется береза, бук и граб) увеличение массы при пропитке составляет 60—70 %. Пропитку дерева следует производить только после окончания всей механической обработки (распиловки, сверления и пр.). Наиболее интенсивно дерево впитывает влагу вдоль волокон, и поэтому торцы досок должны быть защищены особенно тщательно, их следует после пропитки дополнительно лакировать. Если деревянные детали предназначаются для работы в трансформаторном масле, то их после сушки пропитывают тем же маслом.

Дерево в электротехнике применяется для изготовления штанг приводов разрядников и масляных выключателей, рукояток рубильников, опорных и крепежных деталей трансформаторов высокого и низкого напряжения, пазовых клиньев электрических машин, фанерного шпона для производства клееных материалов, деревянных опор линий электропередачи и связи и т. п.

БУМАГА И КАРТОН

Бумага и картон — это листовый или рулонный материал коротковолокнистого строения, состоящий в основном из целлюлозы. Для производства бумаги обычно применяют древесную целлюлозу. В состав древесины помимо целлюлозы и воды входят различные вещества, которые рассматриваются как примеси: лигнин (придающий древесине хрупкость), смолы (особенно в древесине хвойных пород), соли и др. Для удаления примесей размельченная в щепу древесина подвергается варке в котлах, содержащих водные растворы щелочей или кислот, которые переводят в растворимые в воде соединения; затем целлюлоза тщательно отмывается водой от примесей. Обычная писчая и печатная бумага, в том числе и бумага, на которой напечатана настоящая книга, изготавливаются из сульфитной целлюлозы, полученной в результате варки древесины в растворе, содержащем сернистую кислоту H_2SO_3 ; такая целлюлоза в процессе ее изготовления легко приобретает белый цвет.

При изготовлении же бумаги, применяемой в качестве электрической изоляции, а также особо прочной упаковочной и тому подобной бумаги применяется сульфатная и натронная целлюлоза, получаемая путем варки древесины в растворах, содержащих едкий натрий NaOH. Щелочная целлюлоза обычно не отбеливается и сохраняет желтоватый цвет, обусловленный неудаляемыми красящими веществами древесины. Щелочная целлюлоза дороже сульфитной. Однако, поскольку в процессе щелочной варки исходная целлюлоза древесины в меньшей мере подвергается деструкции (разрушению макромолекул) и сохраняет более высокую молекулярную массу и длину волокон, чем в процессе кислотной варки, щелочные бумаги имеют более высокую механическую прочность и более стойки к тепловому старению, что для технических бумаг, в частности электроизоляционных, чрезвычайно важно. Для изготовления бумаги механически обработанная (размолотая) целлюлоза с большим количеством воды отливается сплошным слоем на движущуюся бесконечную сетку бумагоделательной машины. При удалении воды сквозь ячейки сетки, уплотнении и сушке при пропускании между стальными валками, некоторые из которых

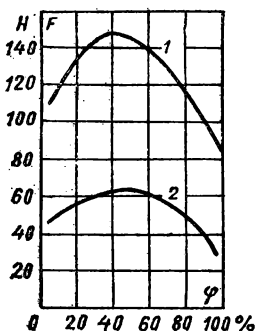


Рис. 6-22. Разрывающее усилие кабельной бумаги марки К-080 толщиной 80 мкм для полоски шириной 15 мм в направлении вдоль рулона (кривая 1) и поперек рулона (кривая 2) в зависимости от относительной влажности воздуха φ

имеют обогрев, получается бумага в виде рулона. Прочность бумаги при растяжении больше в направлении вдоль рулона, т. е. вдоль длины сетки бумажной машины, чем поперек, так как вероятность ориентации волокон вдоль рулона больше, чем поперек него. Прочность также сильно зависит от влажности бумаги: как слишком сухая, так и увлажненная бумага имеет пониженную механическую прочность (рис. 6-22).

Кабельная бумага согласно ГОСТ 645—77 выпускается различных марок, обозначаемых буквами К, М, В, У и КМУ (эти буквы обозначают: К — кабельная, М — многослойная, В — высоковольтная, У — уплотненная) и цифрами от 15 до 240 (обозначающими номинальную толщину бумаги — от 15 до 240 мкм). Бумаги марок К и КМ применяются для силовых кабелей напряжением до 35 кВ, В и ВУ — 35 кВ и выше, КМ и КМУ — 110 кВ и более. Объемная масса неуплотненных кабельных бумаг двух различных марок составляет 0,76 или 0,87 Мг/м³, а уплотненных бумаг 1,09—1,10 Мг/м³. Уплотненные бумаги, пропитанные нефтяным маслом, имеют более высокую диэлектрическую проницаемость (примерно 4,3), чем неуплотненные (примерно 3,5). В связи с этим в конструкциях кабелей на напряжение выше 35 кВ используется следующая комбинация уплотненных и неуплотненных бумаг: ближайшие к жиле слои ее выполняются из уплотненной бумаги, а последующие слои — из неуплотненной, поэтому при удалении от жилы ϵ , изоляции уменьшается, что (имеется в виду работа кабеля при переменном напряжении) обеспечивает более равномерное распределение напряженности электрического поля в изоляции.

В бумажной изоляции силового кабеля слабыми местами — очагами развития пробоя — являются зазоры между отдельными лентами бумаги в каждом повиве. В кабелях с вязкой пропиткой (например, масляно-канифольным компаундом, стр. 133) в эксплуатации после многократных последовательных нагревов и охлаждений кабеля часть зазоров, ближайших к жиле, оказывается не заполненной пропиточным компаундом. В этих зазорах возникает ионизация, разрушающая как компаунд, так и бумагу и способствующая постепенному прорастанию ветвистого разряда от жилы к свинцовой оболочке кабеля. Старение кабельной изоляции заставляет принимать для кабелей с вязкой пропиткой невысокую рабочую (длительную) напряженность электрического поля, равную 3—4 МВ/м. Кабели такого типа используют лишь при сравнительно небольших рабочих напряжениях, не превышающих 35 кВ. При более высоких напряжениях применяют масло- и газонаполненные кабели, в которых рабочая напряженность поля доходит до 10—12 МВ/м.

Телефонная бумага марок КТ и КТУ согласно ГОСТ 3553—73 имеет толщину 50 мкм. Объемная масса телефонных бумаг должна быть малой (не более 0,80—0,82 Мг/м³), чтобы уменьшить емкость изоляции телефонных кабелей (в этих кабелях, работающих при сравнительно низком напряжении, бумага находится в непропитанном состоянии). Телефонная бумага выпускается как натурального цвета (желтоватого, свойственного сульфатной целлюлозе), так и окрашенная в красный, синий или зеленый цвет; различная расцветка служит для различения жил телефонных кабелей.

Пропиточная бумага марок ЭИП-50, ЭИП-63 и ЭИП-75 (числа обозначают массу 1 м³ бумаги в граммах; толщины этих бумаг 0,09; 0,11 и 0,13 мм соответственно) употребляется для изготовления листового гетинакса (стр. 152).

Намоточная бумага марок ЭН-50 и ЭН-70 (числа обозначают номинальную толщину в микронах) — более тонкая и плотная по сравнению с пропиточной.

Конденсаторная бумага — весьма важный и ответственный материал в пропитанном виде она используется как диэлектрик бумажных конденсаторов. Выпускается двух видов: КОН — обычная конденсаторная бумага и силкон — бумага

для силовых конденсаторов. По объемной массе различают марки: 0,8 (только силкон), 1 и 2. Бумаги марки 0,8 имеют объемную массу около $0,8 \text{ Мг/м}^3$; марки 1 — $1,0 \text{ Мг/м}^3$ и марки 2 — от $1,17$ до $1,25 \text{ Мг/м}^3$. Номинальные толщины различных марок этих бумаг — от 4 до 30 мкм. Конденсаторная бумага выпускается в рулонах (бобиных) шириной от 12 до 750 мм. Помимо механических свойств, химического состава (так, «разрывная длина» должна быть не менее 8000—8500 м, зольность — не более 0,4 % для бумаг КОН и не более 0,3 % для бумаг силкон) ГОСТ нормирует электроизоляционные свойства, в том числе наибольшее число токопроводящих включений (от 5 включений на 1 м^2 для бумаги силкон-1 толщиной 30 мкм до 1800 включений на 1 м^2 для бумаги КОН-2 толщиной 4 мкм) и наименьшее пробивное напряжение (от 240 В для бумаги КОН-2 толщиной 4 мкм до 600 В для бумаги силкон-1 толщиной 30 мкм).

Малая толщина конденсаторной бумаги позволяет получить высокую удельную (на единицу объема) емкость конденсатора, поскольку в первом приближении, при невысоких рабочих напряжениях удельная емкость обратно пропорциональна квадрату толщины диэлектрика.

Как уже отмечалось, бумага используется в конденсаторе в пропитанном состоянии. Поэтому весьма важно иметь расчетные формулы, позволяющие определить электроизоляционные свойства (ϵ_r , $\text{tg } \delta$ и $E_{\text{пр}}$) пропитанной бумаги, исходя из заданных свойств бумаги и пропиточного состава. Такие формулы получил В. Т. Ренне, исходя из эквивалентной схемы диэлектрика, предусматривающей последовательное соединение слоев целлюлозы, пропиточной массы и воздуха, оставшегося при пропитке в порах бумаги.

Приведем лишь одну из формул Ренне, определяющую диэлектрическую проницаемость пропитанной бумаги:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_{r2}}{x(1-y) \frac{\epsilon_{r2}}{\epsilon_{r1}} + x(y\epsilon_{r2} - 1) + 1} \quad (6-1)$$

Здесь обозначено: ϵ_{r1} — диэлектрическая проницаемость пропиточной массы; $\epsilon_{r2} = 6,6$ — диэлектрическая проницаемость целлюлозы; $x = 1 - \rho_1/\rho_2$ — объемное содержание пор в непропитанной бумаге (ρ_1 — объемная масса сухой непропитанной бумаги, $\rho_2 = 1,55 \text{ Мг/м}^3$ — плотность целлюлозы); y — объемная усадка пропиточной массы при ее застывании или отверждении.

При пропитке жидким диэлектриком, полностью вытесняющим воздух из пор

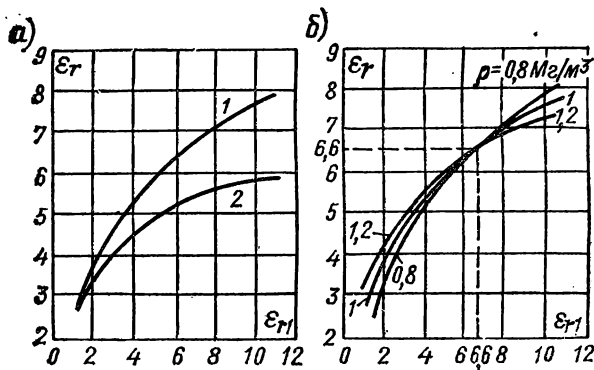


Рис. 6-23

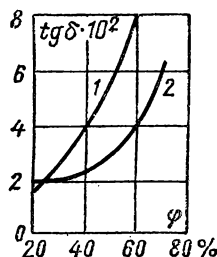


Рис. 6-24

Рис. 6-23. Зависимости диэлектрической проницаемости ϵ_r пропитанной конденсаторной бумаги от диэлектрической проницаемости ϵ_{r1} пропиточной массы: а — влияние типа массы; б — влияние плотности бумаги при пропитке жидкой массой 1 — жидкая масса; 2 — твердая масса с усадкой 10 %

Рис. 6-24. Зависимости $\text{tg } \delta$ обычной (кривая 1) и ацетилированной (кривая 2) бумаги от относительной влажности воздуха ϕ при нормальной температуре

бумаги, формула (6-1) упрощается, так как в ней можно принять $y = 0$. Еще более упрощается формула (6-1) для расчета ϵ_r сухой непропитанной бумаги, так как в этом случае не только $y = 0$, но и $\epsilon_{r1} = 1$.

На рис. 6-23 представлено влияние диэлектрической проницаемости ϵ_{r1} пропиточной массы на диэлектрическую проницаемость пропитанной конденсаторной бумаги. Учитывая старение пропитанной бумаги при длительном воздействии электрического поля, рабочую напряженность для бумажных конденсаторов с жидкой пропиткой обычно принимают 25—35 МВ/м при постоянном напряжении и 12—15 МВ/м при переменном напряжении частоты 50 Гц.

В качестве диэлектрика силовых электрических конденсаторов наряду с конденсаторной бумагой все шире применяют синтетические пленки (§ 6-11); весьма перспективна для этой цели неполярная полипропиленовая пленка, имеющая малый $\operatorname{tg} \delta$ при довольно высокой нагревостойкости. Выпускаются и бумажно-пленочные конденсаторы, диэлектрик которых состоит из двух слоев — бумаги и пленки; при этом бумага играет роль фитиля, по которому в процессе пропитки проникает в глубь конденсатора пропиточная масса (пропитка чисто пленочных конденсаторов затруднена).

Микалентная бумага, применяемая в качестве подложки микаленты (§ 6-17), — одна из немногих разновидностей электроизоляционных бумаг, производимых не из древесной целлюлозы щелочной варки, а из длинноволокнистого хлопка. Она имеет толщину 20 ± 2 мкм и массу 1 м^2 , равную 17 г; выпускается в рулонах шириной 450 или 900 мм.

Картон в основном отличается от бумаги большей толщиной. Электроизоляционные картонные изготавливаются двух типов: воздушные более твердые и упругие, предназначенные для работы на воздухе (прокладки для пазов электрических машин, каркасы катушек, шайбы), и масляные — более рыхлой структуры и более мягкие, предназначенные в основном для работы в трансформаторном масле (например, в изоляции маслонеполненных трансформаторов). Масляные картонные хорошо пропитываются маслом и в пропитанном виде имеют высокую электрическую прочность. В рулонах выпускаются только наиболее тонкие электроизоляционные картонные. Обычно же картонные (употребительные толщины — до 3 мм, в отдельных случаях выше) выпускаются в листах. Электроизоляционные картонные изготавливаются из древесной или хлопковой целлюлозы.

Особая бумага и картон. Помимо описанных выше материалов типа бумаг и картонов, изготавливаемых из целлюлозы, для электрической изоляции с успехом применяются бумаги из целлюлозы с добавками других волокнистых материалов и даже бумаги, совсем не содержащие целлюлозы. Так, бумаги из смеси целлюлозы с полиэтиленовым волокном имеют ϵ_r , $\operatorname{tg} \delta$ и гигроскопичность меньшие, а механическую прочность большую, чем чисто целлюлозные бумаги. Такие бумаги, в частности, находят применение в изоляции кабелей весьма высокого напряжения.

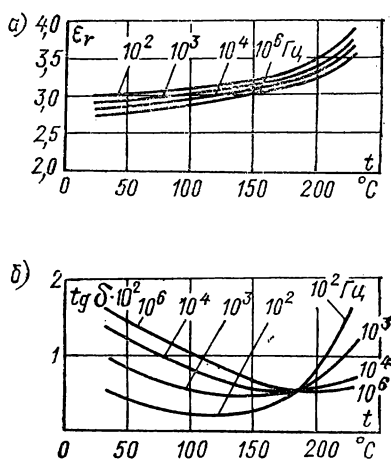
Как уже отмечалось (стр. 125), эфиры целлюлозы имеют меньшие ϵ_r , $\operatorname{tg} \delta$ и гигроскопичность по сравнению с целлюлозой. Помимо полного превращения целлюлозы в ее эфиры и изготовления из них волокна, возможна ее химическая обработка, превращающая поверхностный слой волокна в эфир, но не изменяющая остальной части волокна. Так, ацетилованная бумага из целлюлозы, частично превращенной в ацетилцеллюлозу, имеет лучшие электроизоляционные свойства и меньшую гигроскопичность (рис. 6-24), а также несколько более высокую нагревостойкость по сравнению с целлюлозной бумагой. Еще выше (на 10—25 °C) нагревостойкость бумаги, обработанной раствором цианамида CN_2H_2 .

ФИБРА

Она изготавливается из тонкой бумаги, которая пропускается через теплый раствор хлористого цинка ZnCl_2 и затем наматывается на стальной барабан до получения слоя нужной толщины, причем отдельные слои бумаги прилипают друг к другу; затем фибра срезается с барабана, тщательно промывается водой и прессуется. Промывка фибры необходима для того, чтобы удалить остатки хлористого цинка, легко диссоциирующего на ионы и ухудшающего электроизоляционные свойства фибры. Листовая электротехническая фибра (марка ФЭ) по ГОСТ 14613—69 выпускается толщиной от 0,6 до 3 мм (конструкционные сорта фибры изготавливаются толщиной до 35 мм). Цвет фибры может быть черным, серым, красным и опреде-

Рис. 6-25. Зависимости ϵ_r (а) и $\operatorname{tg} \delta$ (б) бумаги номекс от температуры при различных частотах

ляется окраской бумаги, взятой для ее изготовления. Фибра имеет невысокие электроизоляционные свойства и значительную гигроскопичность; однако ее механическая прочность значительна (предел прочности при растяжении вдоль листа не менее 70—75 МПа, удельная ударная вязкость 20—30 кДж/м²). Она хорошо обрабатывается: режется, пилится, строгаются, принимает винтовую резьбу; размоченная в горячей воде тонкая фибра может формироваться. Плотность фибры 1—1,5 Мг/м³; более плотная фибра лучше как по механическим, так и по электроизоляционным характеристикам. При воздействии электрической дуги фибра разлагается, выделяя большое число газов, способствующих гашению дуги. В связи с этим фибровые трубки применяют для изготовления стреляющих разрядников. В последнее время вместо фибры в качестве дугогасящего материала часто употребляют полиметилметакрилат (§ 6-6). Перспективны бумаги типа *фенилон* (за рубежом — номекс), изготавливаемые из синтетического волокна (ароматический полиамид); отдельные волокна с примесью фибридов, т. е. мелких волокон из материала, аналогичного по составу основному волокну, но имеющего пониженную температуру размягчения. При пропускании фениловой бумаги между горячими валками фибриды прочно связывают основные волокна. Фенилоновые бумаги, имеющие нагревостойкость 200—220 °С, могут применяться как в чистом виде (для изоляции электрических машин, сухих трансформаторов, кабелей), так и в композициях с пленками, слюдяными материалами, а также в виде основы для слоистых пластиков (§ 6-13). На рис. 6-25 представлены температурно-частотные зависимости ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ бумаги номекс.



ТЕКСТИЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие сведения. Текстильные материалы получают методами специальной обработки (прядение, тканье) длиноволокнистого сырья. Ткани отличаются от бумаг вполне определенным строением (переплетение нитей), в то время как в бумаге отдельные волокна расположены по отношению друг к другу неправильно, беспорядочно. При прочих равных условиях текстильные материалы (ткани, ленты) имеют более высокую механическую прочность, особенно при перегибе и при истирании, и не столь сильно снижают прочность при увлажнении, но эти материалы и пропитанные изделия из них намного дороже и обладают меньшей электрической прочностью, чем бумаги и пропитанные бумаги.

Непосредственное определение диаметра волокон и изделий из них затруднительно, так как волокна часто не имеют правильной цилиндрической формы. Поэтому для оценки толщины волокон, пряжи и нитей согласно ГОСТ 10878—70 указывается масса (в граммах) единицы длины (километра) нити; эта единица (г/км) называется текс. Единица СИ толщины нити — килограмм на метр; очевидно, что один килограмм на метр равен одному мегатексу. Для пряжи, скрученной из нескольких нитей, в ее марке после значения толщины отдельных нитей и знака умножения записывается число нитей: так, обозначение 50 текс × 3 относится к пряже, скрученной из трех нитей толщиной по 50 текс. Определение толщины нити в тексах исходит из предположения об известной плотности материала нити. Так, для полиэтиленового волокна плотность равна 0,92 Мг/м³, для капронового и нейлонового 1,14, для полиэтилентерефталатного 1,40, для хлопчатобумажного 1,52, для политетрафторэтиленового 2,3, для стеклянного (§ 6-16) примерно 2,5 Мг/м³.

В соответствии с химической природой и технологией получения различные волокна имеют сильно различающиеся нагревостойкость (стр. 82), гигроскопичность

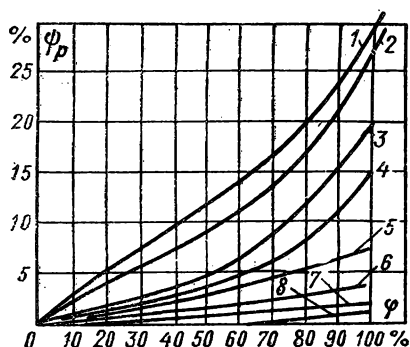


Рис. 6-26. Зависимости равновесной влажности ϕ_r различных волокон от относительной влажности воздуха ϕ

1 — вискозный шелк; 2 — натуральный шелк; 3 — хлопчатобумажное волокно; 4 — ацетатный шелк; 5 — полиамидные волокна (капрон, нейлон); 6 — нитрон и хлорин; 7 — полиэтилентерефталатное и полистирольное волокно; 8 — полиэтиленовое волокно

(рис. 6-26), электроизоляционные и механические свойства. Предел прочности при растяжении и относительное удлинение перед разрывом для хлопчатобумажной пряжи равны соответственно 4,5 МПа и 8%, а для нейлона — 6 МПа и 25%.

В электроизоляционной технике пряжу применяют в качестве защитных покровов кабелей (хлопчатобумажная пряжа от 1700 до 3400 текс) и для изоляции (обмотки и оплетки) обмоточных проводов (более тонкая хлопчатобумажная пряжа и другие виды пряж и нитей); ленты и ткани используют для защиты изоляции электрических машин и аппаратов (особо прочные ленты — киперные с диагональным — «елочкой» — переплетением нитей). Ткани используются также для изготовления лакотканей (стр. 147) и текстолитов (стр. 154).

Природные волокна. К ним относятся хлопчатобумажная пряжа и натуральный шелк. Из последнего получается более тонкая изоляция. Однако шелк много дороже хлопчатобумажного волокна и в технике электрической изоляции вытесняется искусственными и синтетическими волокнами.

Искусственные волокна. Основные типы этих волокон — вискозный и ацетатный шелк, получаемые из эфиров целлюлозы (стр. 125). В отличие от исходной целлюлозы ее эфиры обладают растворимостью в подходящих по составу растворителях и позволяют изготавливать из них тонкие нити при вытекании растворов сквозь отверстия (фильеры) малого диаметра.

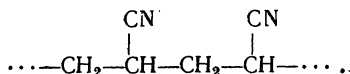
Вискозный шелк изготавливают переработкой целлюлозы с последующим переводом вытянутых из прядильного раствора волокон в вещество, близкое по своей химической природе к исходной целлюлозе. Ацетатный шелк по составу представляет собой уксуснокислый эфир целлюлозы (ацетат целлюлозы).

По внешнему виду оба эти типа искусственного шелка напоминают натуральный шелк, но пряжа из них такой же толщины, что и хлопчатобумажная. По электроизоляционным свойствам вискозный шелк не имеет преимуществ перед хлопчатобумажным волокном, он даже несколько более гигроскопичен, чем хлопчатобумажное волокно [см. рис. (6-26)], но ацетатный шелк превосходит как хлопчатобумажную пряжу, так и натуральный шелк. Возможно и поверхностное ацетилирование (стр. 144) хлопчатобумажной пряжи; подвергнутая такой обработке пряжа обладает меньшей гигроскопичностью, чем у исходной хлопчатобумажной пряжи.

Синтетические волокна. Из синтетических волокнистых материалов следует отметить полиэтилентерефталатные (лавсан, терилен, терен, дакрон), полиамидные (капрон, дедерон, нейлон, анид), полиэтиленовые, полистирольные, поливинилхлоридные (хлорин) и политетрафторэтиленовые. Понятие о химической природе и основных свойствах материалов, из которых изготавливаются (вытягиванием из растворов или расплавов) эти волокна, было дано выше (§ 6-5, 6-6 и 6-11). Напомним, что такие материалы, равно как и материалы, из которых изготавливаются гибкие пленки (§ 6-11), — это линейные полимеры с высокой молекулярной массой. Многие синтетические волокна, например, полиамидные, после изготовления подвергаются вытяжке для дополнительной ориентации линейных молекул вдоль волокон и улучшения механических свойств волокна; при этом, очевидно, увеличивается и длина волокна, и оно становится тоньше. В СССР из синтетических волокон в электроизоляционной технике большое применение имеет **капрон**. Использование капрона вместо натурального шелка и хлопчатобумажной пряжи высоких номеров в производстве обмоточных проводов дает большой экономический эффект, ибо капрон не только много дешевле, чем шелк и тонкая хлопчатобумажная пряжа,

и легко доступен, но и дает большую длину нити того же сечения из единицы массы, так как плотность капрона сравнительно невелика (стр. 122).

Полиамидное волокно *знант* превосходит капрон и нейлон по нагревостойкости и механической прочности. *Нитрон* (за границей — орон) — это полимер акрил-нитрила (§ 6-15), молекула его имеет строение



Он характеризуется большой механической прочностью и нагревостойкостью (температура размягчения его выше 235 °C). Электрическая прочность непропитанных текстильных материалов определяется электрической прочностью воздуха в сквозных отверстиях между нитями, а потому весьма мала. Путем пропитки лаком (см. ниже) можно закрыть эти отверстия лаковой пленкой и этим резко повысить электрическую прочность ткани и ее влагостойкость.

ЛАКОТКАНИ

Лакотканью называется гибкий электроизоляционный материал, представляющий собой ткань, пропитанную электроизоляционным лаком. Ткань обеспечивает значительную механическую прочность, а лаковая пленка — электрическую прочность материала. Лакоткань широко применяют для изоляции в электрических машинах, аппаратах, кабельных изделиях в виде обмоток (из лакоткани, нарезанной лентами), оберток, прокладок и др.

В качестве ткани для изготовления лакоткани чаще всего применяют хлопчатобумажную и реже шелковую ткань; соответственно этому различают *лакоткани хлопчатобумажные* и *шелковые* (лакошелк). Шелковые лакоткани по сравнению с хлопчатобумажными дороже, но зато тоньше, что позволяет получить изоляцию с малыми габаритами, и имеют более высокую электрическую прочность. Как хлопчатобумажные, так и шелковые лакоткани принадлежат к числу электроизоляционных материалов класса нагревостойкости А (предельная рабочая температура 105 °C). Применение находят также лакоткани на основе тканей из синтетических волокон, в частности капрона и стеклоткани.

По роду пропитывающего лака наиболее распространенные лакоткани подразделяются на *светлые* (желтые) — на масляных лаках и *черные* — на масляно-битумных лаках. Светлые лакоткани относительно стойки к действию органических растворителей; недостатком их является склонность к тепловому старению, обусловленная большим содержанием сиккативов в масляных лаках (для достижения большой скорости сушки при прохождении ткани через пропиточную машину). Электрическая прочность светлых лакотканей: хлопчатобумажных 35—50 МВ/м, шелковых 55—90 МВ/м. Плотность хлопчатобумажных лакотканей, как светлых, так и черных близка к 1,1 Мг/м³; шелковые лакоткани имеют плотность 0,9—1,0 Мг/м³. Черные лакоткани в соответствии с общими свойствами масляно-битумных лаков обладают лучшими электроизоляционными свойствами: так, $E_{пр}$ черных хлопчатобумажных лакотканей примерно 50—60 МВ/м. Гигроскопичность черных лакотканей значительно меньше, чем светлых. Недостатком черных лакотканей является их пониженная стойкость к действию органических растворителей. Предел прочности при растяжении лакотканей наибольший в направлении вдоль рулона. Удлинение перед разрывом больше всего в направлении под острым углом к длине рулона (по диагонали). Хлопчатобумажные, шелковые и капроновые электроизоляционные лакоткани выпускаются в соответствии с ГОСТ 2214—78. Обычно они поставляются в рулонах шириной от 700 до 1050 мм. Толщины различных лакотканей составляют: хлопчатобумажных от 0,15 до 0,30 мм, шелковых от 0,04 до 0,15 мм, капроновых от 0,10 до 0,15 мм.

При пропитке бумаги лаками (обычно масляными) получают лакобумаги, которые могут использоваться как заменитель лакоткани. Лакобумаги дешевле лакотканей и обладают повышенными электроизоляционными свойствами, но имеют меньшую механическую прочность (особенно при растяжении поперек рулона) и меньшее удлинение перед разрывом. В последнее время наблюдается тенденция к замене лакотканей и лакобумаг более прогрессивными гибкими электроизоляционными материалами — гибкими пленками (§ 6-11).

6-13. ПЛАСТИЧЕСКИЕ МАССЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Под влиянием внешнего давления и в большинстве случаев при одновременном нагреве *пластмассы* (пластики) характеризуются способностью приобретать определенную форму, соответствующую очертаниям *пресс-формы*, используемой для изготовления (прессования) изделий. Изготовив один раз пресс-форму требующихся размеров и конфигурации, можно отпрессовать в ней большое число изделий, точно повторяющих очертания внутренней полости пресс-формы. При массовом производстве изделий одинаковой формы и размеров применение пластических масс обеспечивает весьма высокую производительность труда и снижение стоимости готовых изделий. После изготовления нескольких тысяч изделий пресс-форма снашивается и начинает давать неточные размеры прессуемых деталей.

Пластмассы широко применяют в электротехнике как в качестве электроизоляционных, так и в качестве чисто конструкционных материалов. На рис. 6-27 показано несколько изделий сложной конфигурации, отпрессованных из пластмассы. Легко представить, сколь трудоемко было бы изготовление этих изделий обычной механической обработкой, в то время как прессование из пластмассы позволяет получить изделие за одну технологическую операцию в готовом виде. Многие пластмассы имеют высокую механическую прочность и хорошие электроизоляционные свойства; к их преимуществам принадлежит также легкость (плотность пластмасс обычно от 0,9 до 1,8 Мг/м³).

В большинстве случаев пластмассы состоят из двух основных компонентов: связующего и наполнителя. *Связующее* — обычно органический полимер, обладающий способностью деформироваться под воздействием давления. Иногда применяется и неорганическое связующее, например стекло в микалексе, цемент в асбоцементе (§ 6-1, 6-19). Наполнитель, прочно сцепляющийся со связующим веществом, может быть порошкообразным, волокнистым, листовым («древесная мука» — мелкие опилки, «каменная мука», хлопчатобумажное, асбестовое или стеклянное волокно, слюда, бумага, ткань); наполнитель существенно удешевляет пластмассу и в то же время может улучшать ее механические характеристики (увеличивать прочность, уменьшать хрупкость). Гигроскопичность и электроизоляционные свойства в результате введения наполнителя, как правило, ухудшаются, поэтому в пластмассах, от которых требуются высокие электроизоляционные свойства, наполнитель чаще всего отсутствует.

Однако такой наполнитель, как например, кварцевый песок (мука), улучшая теплопроводность пластмассы и понижая $\text{tg } \delta$, может увеличивать и электрическую прочность при тепловом пробое. Кварцевый наполнитель приводит к ускоренному износу пресс-формы.

В состав пластмасс вводят *пластификаторы*, увеличивающие пластичность и уменьшающие хрупкость материала, *красители*,

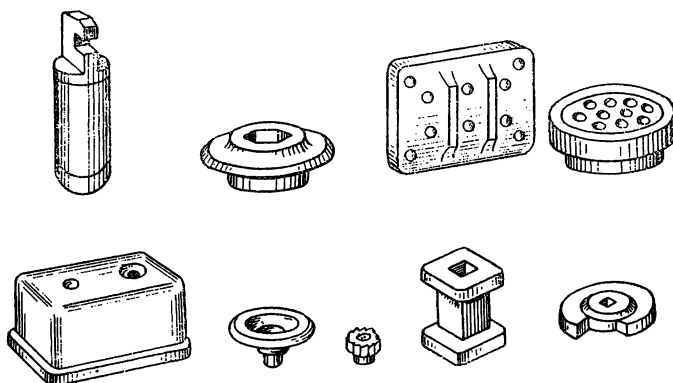


Рис. 6-27. Примеры электроизоляционных деталей из пресс-порошков

придающие пластмассе определенную окраску, и другие добавки.

Особенности технологии изготовления изделий из пластмасс в основном определяются связующим. В зависимости от вида связующего различают пластмассы горячей прессовки, требующие при прессовке нагрева, и пластмассы холодной прессовки, которые прессуются при нормальной температуре. Большинство электроизоляционных пластмасс с органическим связующим требует горячего прессования, эти пластмассы разделяются на термopластичные (*термопласты*) и термореактивные (*реактопласты*) (§ 6-5). Связующие термopластичных масс горячего прессования сохраняют способность к повторному размягчению и растворению в тех или иных растворителях. Связующие в термореактивных пластмассах после воздействия нагрева во время прессования (или при последующей тепловой обработке) переходят в неплавкое и нерастворимое состояние. К термопластам принадлежат пластмассы на основе поливиниловых и полиамидных смол, эфиров целлюлозы и пр., а к реактопластам — пластмассы на основе фенолформальдегидных, карбамидных и других термореактивных смол.

ПРЕСС-ПОРОШКИ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФАСОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Пресс-порошки, т. е. отвешенные в нужных соотношениях, измельченные, высушенные и тщательно перемешанные составные части пластмасс, служат исходным материалом для изготовления большинства изделий самой разнообразной формы. Пресс-порошки, содержащие наполнитель, могут изготавливаться либо сухим способом, т. е. измельчением и перемешиванием наполнителя и связующего в твердом состоянии, либо мокрым (лаковым) способом, с предварительной пропиткой наполнителя раствором связующего в подходящем растворителе, последующим нагревом для испарения растворителя и измельчением полученного материала. Лаковый способ требует расходования растворителя, но в некоторых случаях обеспечивает лучшую однородность пресс-порошка. При изготовлении пресс-порошков применяют мельницы, мешалки, вальцы, вакуумные сушилки, сита для просеивания готового порошка и другое оборудование.

Прессование фасонных изделий. Обычно его производят на гидравлических прессах, обеспечивающих создание достаточно большого давления. В пресс-форму, изготовленную из твердой стали и хромированную, засыпают требуемое количество

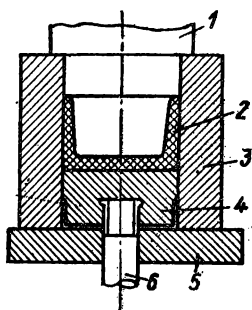


Рис. 6-28. Пример конструкции пресс-формы для компрессионного прессования

1 — верхний пуансон; 2 — изделие; 3 — матрица; 4 — нижний пуансон; 5 — плита пресса; 6 — выталкиватель

пресс-порошка и ставят ее на нижнюю плиту пресса. Затем плиты пресса сближают и на находящийся внутри пресс-формы пресс-порошок подают давление. Если требуются одновременно нагрев и давление, то пластины пресса или сама пресс-форма снабжаются электронагревательным устройством либо обогреваются паром или горячей водой, которые пропускаются сквозь каналы, просверленные в плитах пресса или стенках пресс-формы. По окончании прессования снимают давление, разводят плиты пресса и

вынимают из пресс-формы готовое изделие. Если применяются термореактивный пресс-порошок, отпрессованные изделия можно вынимать из пресс-формы еще горячими; если же пресс-порошок термопластичный, то во избежание повреждения еще мягких изделий они должны охлаждаться в пресс-форме, для чего по каналам в ней пропускается холодная вода. Для изготовления несложной детали (рис. 6-28) пресс-порошок засыпают в пространство, ограниченное матрицей и нижним пуансоном; при сведении плит пресса верхний пуансон входит в отверстие матрицы до упора. По окончании прессования готовое изделие удаляют из пресс-формы с помощью выталкивателя. При конструировании пресс-формы необходимо учитывать, что объем, занимаемый пресс-порошком, значительно больше объема готового изделия. Для уменьшения рабочего пространства пресс-формы, улучшения теплопроводности пресс-порошка и получения более строгой дозировки часто применяют таблетирование, т. е. предварительно прессуют (при небольшом давлении и без нагрева) таблетки из заданной порции порошка. С целью сокращения времени нагрева в пресс-форме и, следовательно, повышения производительности прессования широко применяется предварительный подогрев таблеток. Этот подогрев может производиться в термостате; еще лучшие результаты дает подогрев в высокочастотном электрическом поле, причем подогреваемый материал в специальном устройстве помещается между обкладками конденсатора, на которые подается напряжение от высокочастотного генератора. При этом в материале выделяется теплота диэлектрических потерь, причем выделение теплоты происходит равномерно по всей толщине материала, что обеспечивает быстрый нагрев. Высокочастотный предварительный подогрев дает возможность уменьшить время выдержки материалов в пресс-форме в пять-десять раз, даже больше. Все операции технологического процесса прессования: отвешивание пресс-порошка, таблетирование, закладка таблеток в пресс-форму, разогрев, подача давления, выдержка в пресс-форме, удаление готовых изделий — при массовом производстве автоматизируются.

Литье под давлением. Для получения изделий из термопластов часто используют способ литья под давлением; материал размягчают вне пресс-формы в обогреваемом цилиндре и затем вдавливают в пресс-форму движущимся в цилиндре поршнем (плунжером). Литье под давлением — прерывный процесс, при ходе плунжера в одну сторону происходит загрузка полости машины, при ходе в другую сторону — прессование. При выдавливании размягченной нагретом термопластичной массы через наконечник нужной формы посредством червяка (шнека) осуществляется непрерывный процесс изготовления изделия. Этот способ (шприцевание, экструзия) дает возможность изготовления стержней, лент, труб и тому подобных изделий, имеющих неизменное по всей длине поперечное сечение. Экструзия широко применяется также для наложения изоляции и защитных оболочек из полиэтилена, поливинилхлорида и других термопластов на кабельные изделия (рис. 6-29 и 6-30).

Сварка и склеивание. Многие термопластичные пластмассы могут хорошо соединяться сваркой, наподобие сварки металлов. Нагрев при сварке пластмасс осуществляется струей горячего воздуха; с успехом используется сварка с применением нагрева в поле высокой частоты. Применяется также склеивание пластмасс друг с другом и с другими материалами при помощи соответствующих клеев.

Свойства изделий из термореактивных пластмасс зависят от состава пластмассы и режима прессовки. Например, из широко распространенного пресс-порошка марки К-21-22 (крезолформальдегидная термореактивная смола с наполнителем) при компрессионной прессовке (режим: удельное давление в пресс-форме 25—30 МПа,

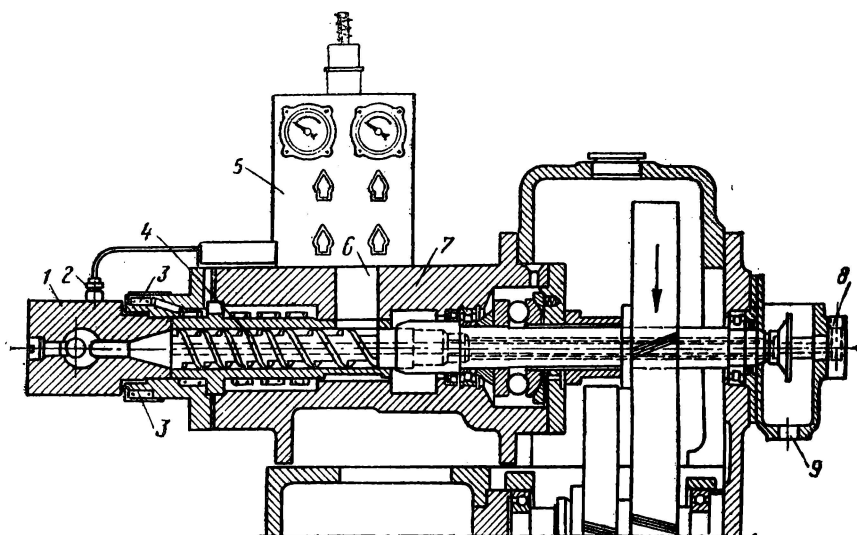


Рис. 6-29. Разрез рабочей части червячного пресса для наложения пластмассовой изоляции на провод

1 — головка; 2 — термопара; 3 — нагревательные элементы; 4 — червяк; 5 — щиток с приборами для измерения и регулирования температуры; 6 — отверстие для загрузки пластмассы; 7 — корпус; 8 — подвод воды для охлаждения червяка; 9 — слив воды

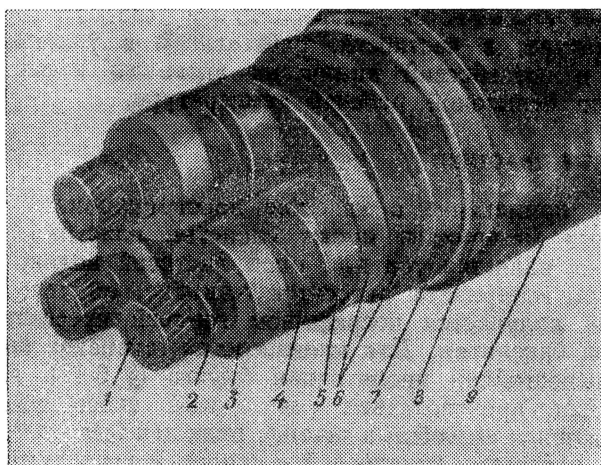


Рис. 6-30. Трехжильный силовой кабель с изоляцией и защитными оболочками из полиэтилена

1 — медная токопроводящая жила; 2 — полупроводящий экран поверх жилы; 3 — полиэтиленовая изоляция фазы; 4 — полупроводящий экран поверх изоляции фазы; 5 — экран из медной ленты; 6 — бандаж из медной и текстильной лент поверх скрученных вместе трех фаз кабеля; 7 и 9 — защитные оболочки из полиэтилена с наполнителем (сажей); 8 — броня из алюминиевых лент

температура пресс-формы 155—160 °С, время выдержки в пресс-форме под давлением и при нагреве 0,5—1 мин на каждый миллиметр толщины прессуемого изделия) получают изделия со следующими свойствами: плотность 1,33—1,40 Мг/м³; предел прочности при растяжении не менее 30 МПа, при сжатии не менее 150 МПа; удельная ударная вязкость не менее 4,2 кДж/м²; теплостойкость по Мартенсу 120—128 °С; коэффициент теплопроводности 0,16—0,22 Дж/(м·К); температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l = (4,9—5,3) \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$; водопоглощение за 24 ч не более 0,25 % по массе; удельное объемное сопротивление не менее $5 \times 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\text{tg } \delta$ не более 0,05 (при нормальной температуре и частоте 50 Гц).

Свойства термопластиков. Пластмассы из полиэтилена, полистирола и других неполярных полимеров без наполнителей обладают весьма малым $\text{tg } \delta$, но недостатком большинства этих пластмасс за исключением полипропилена и сшитого полиэтилена является их сравнительно низкая нагревостойкость.

Пластмасса из поливинилхлорида (без наполнителей и пластификаторов), называемая *винипластом*, изготавливается в виде листов толщиной от 0,3 до 10 мм. При горячей прессовке в этажерочных прессах из уложенных в стопки листов получается материал в виде монолитных пластин или досок. Кроме того, из винипласта изготавливаются трубы, стержни и различные фасонные изделия. Винипласт имеет предел прочности при растяжении не менее 50 МПа, относительное удлинение перед разрывом от 10 до 50 %, удельную ударную вязкость не менее 120 кДж/м²; он обладает ничтожной гигроскопичностью и высокой стойкостью ко многим растворителям и химически активным веществам. Электроизоляционные свойства винипласта: $\rho = 10^{13} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\rho_s = 10^{14} \text{ Ом}$; $\epsilon_r = 3,2—4,0$; $\text{tg } \delta = 0,01 \div 0,05$; $E_{\text{пр}} = 15 \div 35 \text{ МВ/м}$. Теплостойкость по Мартенсу не ниже 65 °С.

Винипласт применяется для изоляции в разного рода электрической аппаратуре, в частности, работающей в условиях высокой влажности и воздействий химически активных веществ, но при относительно невысокой рабочей температуре.

6-14. СЛОИСТЫЕ ПЛАСТИКИ

Широкое применение в качестве конструкционных и электроизоляционных материалов имеют слоистые пластики, в которых наполнителем является тот или иной листовый волокнистый материал. К этим материалам относятся гетинакс, текстолит и др.

Гетинакс получается посредством горячей прессовки бумаги, пропитанной бакелитом. Для производства гетинакса берется прочная и нагревостойкая пропиточная бумага (§ 6-12). Пропитка ее смолой может производиться различными способами. Наиболее распространенным способом в течение ряда лет был способ пропитки лаком, т. е. раствором бакелита А в спирте, с последующей сушкой. В пропиточной машине бумага (или ткань — для производства текстолита, см. ниже), разматываясь с рулона, проходит через ванну с лаком, поднимается в сушильную шахту и через валики наматывается на приемный механизм. Существенным недостатком этого способа пропитки является расходование больших количеств дорогого растворителя — спирта, пары которого при сушке удаляются,

Таблица 6-5

Свойства гетинакса марок I и V, текстолита марки Б
и стеклотекстолита марки СТЭФ (образцы толщиной более 10 мм)

Свойство	Гетинакс		Текстолит Б	Стекло-текстолит СТЭФ
	I	V		
Плотность, Мг/м ³	1,4	1,4	1,4	1,8
Предел прочности, МПа:				
при растяжении	120	110	60	400
при изгибе	120	100	100	440
Ударная вязкость, кДж/м ²	20	22	28	140
Теплостойкость по Мартенсу, °С	185	190	160	260
Класс нагревостойкости	A	A	A	B

к тому же применение легкогорючего спирта повышает пожарную опасность производства.

В СССР была разработана технология производства слоистых электроизоляционных пластиков, для которой характерна пропитка бумаги или ткани жидкими водными суспензиями фенолформальдегидных смол; при сушке пропитанной бумаги вода испаряется. Данная технология производства слоистых пластиков совершенно не требует применения спирта, и внедрение ее в производство некоторых марок слоистых пластиков дало большую экономию. Пропитанная (бакелитизированная) бумага нарезается листами требуемого формата, собирается пачками нужной толщины и укладывается между стальными плитами гидравлического пресса. Прессы для производства слоистых пластиков с целью повышения производительности выполняются с располагаемыми в несколько «этажей» плитами и заготовки из пропиточной бумаги закладываются одновременно во все этажи. Во время прессования через просверленные в плитах каналы пропускается пар, который нагревает плиты, от плит теплота передается прессуемому материалу, бакелит в нем расплавляется, заполняет поры между волокнами бумаги и отдельными листами ее и, запекаясь (переходя в стадию С), твердеет и связывает отдельные слои бумаги. При прессовке гетинакса обычно устанавливают давление около 1 МПа; температура плит пресса 160—165 °С; время выдержки под давлением от 2 до 5 мин на каждый миллиметр толщины досок, считая с момента достижения плитами пресса указанной выше температуры. По окончании прессования, перед выемкой отпрессованных досок, последние охлаждаются примерно до температуры +60 °С, для чего подача пара в каналы плит прекращается, и в эти же каналы пропускается холодная вода. У отпрессованного материала края обрезают под прямым углом циркульной пилой.

Согласно ГОСТ 2718—74 листовой электротехнический гетинакс выпускается различных марок (табл. 6-5). Отметим только две из них: I — для панелей распределительных устройств, щитов, изоляционных перегородок в устройствах низкого напряжения (вы-

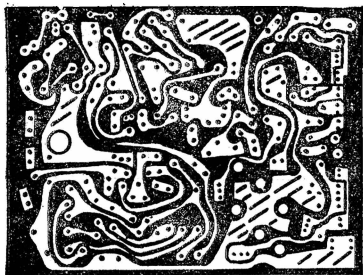


Рис. 6-31. Печатная схема, полученная травлением фольгированного гетинакса

пускается в листах толщиной от 0,2 до 50 мм); V — для деталей, работающих в маслозаполненной аппаратуре высокого напряжения (выпускается в листах толщиной от 5 до 50 мм). Для всех марок гетинакса длина — не менее 700 мм, ширина — не менее 550 мм.

Электрическая прочность гетинакса в направлении, перпендикулярном слоям, $E_{пр} = 20—40$ МВ/м, диэлектрическая проницаемость ϵ_r от 5 до 6. Дугостойкость гетинакса, как и других пластиков на фенолформальдегидном связующем, невысока: после воздействия разряда на поверхности материала остается науглероженный след, обладающий значительной электрической проводимостью (явление трекинга). Слоистая структура гетинакса, как и других слоистых пластиков (а также слюды и слюдяных материалов, см. § 6-18), приводит к заметной анизотропии свойств в направлениях, перпендикулярном и параллельном слоям. Так, например, удельное объемное сопротивление гетинакса вдоль слоев в 50—100 раз, а электрическая прочность вдоль слоев в 5—8 раз ниже, чем поперек слоев. Гетинакс может обрабатываться режущим инструментом из твердых сплавов, причем скорости резания при небольших подачах велики; станки должны быть оборудованы вытяжной вентиляцией для удаления пыли; охлаждение ведется воздушной струей. Торцы штампованных деталей рекомендуется защищать электроизоляционным лаком. Не следует снимать фрезой поверхностный слой материала, ибо такая обработка ведет к ухудшению влагостойкости гетинакса. Гетинакс нашел применение в высоко- и низковольтном аппаратуростроении, а также в технике связи.

Фольгированный гетинакс. Для изготовления печатных схем низковольтных цепей аппаратуры используют фольгированный гетинакс. В настоящее время выпускается около десяти марок такого материала. Он представляет собой гетинакс, облицованный с одной стороны или с двух сторон электролитической красно-медной фольгой толщиной 0,035—0,05 мм. На рис. 6-31 показан печатный монтаж, полученный травлением фольгированного гетинакса.

Текстолит. Этот пластик аналогичен гетинаксу, но изготавливается из пропитанной ткани. Свойства различных марок листового электротехнического текстолита определяются ГОСТ 2910—74. Свойства текстолита на основе хлопчатобумажной ткани (например, марка Б, см. табл. 6-5) в общем близки к свойствам гетинакса; текстолит имеет повышенную удельную ударную вязкость, стойкость к истиранию и сопротивление раскалыванию (при вдавливании клина в торец доски). Текстолит в пять-шесть раз дороже гетинакса, так как стоимость ткани значительно выше стоимости бумаги, и применяется лишь в отдельных случаях для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или работающих на истирание (детали переключателей

и т. п.). Текстолит марки ЛТ на основе синтетической (лавсановой) ткани с пропиткой эпоксидно-фенолформальдегидной смолой более влагостоек, но его нагревостойкость (до 85 °С) понижена.

Другие виды слоистых пластиков. Это *текстогетинакс* (комбинированный слоистый пластик с внутренними слоями бумаги и наружными — с обеих сторон — слоями хлопчатобумажной ткани); *древеснослоистые пластики* (ДСП) — типа фанеры на бакелитовой смоле, более дешевые, чем гетинакс, но с худшими электроизоляционными свойствами и более гигроскопичные; более нагревостойкие слоистые пластики — на неорганических основах: *асбогетинакс* на основе асбестовой бумаги и *асботекстолит* на основе асбестовой ткани (см. § 6-19); наиболее нагревостойкие, влагостойкие и механически прочные слоистые пластики — *стеклотекстолиты* на основе неорганической — стеклянной (см. § 6-16) ткани с нагревостойкими связующими (см. характеристики для стеклотекстолита марки СТЭФ на эпоксидном связующем в табл. 6-5). Наряду со стеклотекстолитами выпускаются и более дешевые слоистые пластики на основе не стеклоткани, а стекломата, получаемого без тканья, т. е. без переплетения нитей друг с другом.

Фасонные и намотанные изделия. Помимо описанных выше листовых слоистых пластиков, находят применение и фасонные слоистые изделия. Таковы намотанные изделия, известные под названием гетинаксовых (бакелитовых) трубок (внутренний диаметр от 10 до 30 мм) и цилиндров (внутренний диаметр от 30 до 600 мм). Бакелитовые трубки и цилиндры выпускаются различной длины при толщине стенки от 1,5 до 3 мм. Они изготавливаются из лакированной с одной стороны (на специальных лакировочных машинах) намоточной бумаги (§ 6-12), более тонкой и плотной, чем пропиточная бумага, которая идет на производство листового гетинакса. Лакированная бумага туго наматывается на металлическую оправку и вместе с ней подвергается запеканию в термостате, после чего готовое изделие снимается с оправки. Свойства намотанных изделий уступают свойствам листового гетинакса. Изготавливаются также текстолитовые цилиндры, стержни и различные фасонные детали сложной формы, в частности гасильные камеры для масляных выключателей. Текстолит применяется и как конструкционный материал, например, для изготовления подшипников и бесшумных зубчатых передач. Зубчатые колеса для таких передач прессуются из набранных в стопки заготовок, отштампованных из пропитанной ткани.

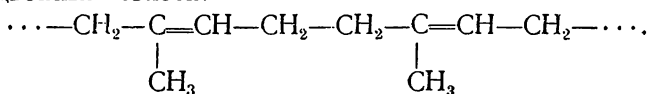
6-15. ЭЛАСТОМЕРЫ

Большое значение в самых разнообразных отраслях техники и в быту имеют материалы на основе каучука и близких к нему по свойствам веществ — так называемых эластомеров.

НАТУРАЛЬНЫЙ КАУЧУК

Натуральный каучук получается из особых растений — *каучуконосов*. Большая часть каучуконосов содержит каучук в млечном соке (*латексе*), представляющем собой взвесь в воде микроскопиче-

ских частиц округленной формы (*глобул*); глобулы имеют тонкую оболочку из белковых веществ и жирных кислот. Каучук выделяется при коагуляции латекса и удалении примесей. По химическому составу натуральный каучук представляет собой полимерный углеводород, имеющий состав $(C_5H_8)_n$ и строение, характеризующее наличием двойных связей:



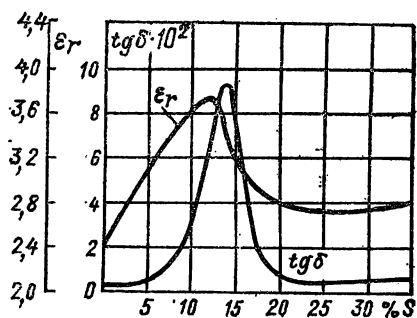
Уже при нагреве до температуры $50^\circ C$ каучук размягчается и становится липким, а при низких температурах он хрупок. Каучук растворяется в углеводородах и сероуглероде. Раствор каучука в бензине, называемый обычно резиновым клеем, может применяться для прочного склеивания каучука и резины. Высокая эластичность каучука связана с зигзагообразной, «шарнирной» формой цепочек его молекул; при действии на каучук растягивающего усилия форма цепочки приближается к прямолинейной. Каучук — аморфное вещество, но в растянутом состоянии он дает рентгенограммы, характерные для кристаллических тел, имеющих упорядоченное расположение молекул в пространстве. После снятия растягивающего усилия каучук вновь приобретает свойства аморфного тела. Из-за малой стойкости к действию как повышенных, так и пониженных температур, а также растворителей чистый каучук для изготовления электрической изоляции не употребляют. Для устранения указанных выше недостатков каучук подвергают так называемой *вулканизации*, т. е. нагреву после введения в него серы. При вулканизации происходит частичный разрыв двойных связей цепочечных молекул и сшивание цепочек через атомы $-S-$ с образованием пространственной структуры.

РЕЗИНА

Вулканизация улучшает как нагревостойкость, так и холодостойкость каучука, повышает его механическую прочность и стойкость к растворителям. В зависимости от количества серы, добавляемой к каучуку, при вулканизации получают: при содержании 1—3 % серы — мягкую резину, обладающую весьма высокой растяжимостью и упругостью, а при 30—35 % серы — твердую резину (*эбонит*) — твердый материал, обладающий высокой стойкостью к ударным нагрузкам. Относительное удлинение перед разрывом для технических резин составляет 150—500 %, а для эбонита — 2—6 % (остаточное удлинение — соответственно 10—45 % и 0,8—1,2 %).

Помимо каучука и серы при изготовлении резины и эбонита в состав резиновой смеси вводят различные *наполнители* (мел, тальк), а также красители, катализаторы (*ускорители*) процесса вулканизации и другие вещества. Резину широко применяют в электропромышленности для изоляции установочных и монтажных проводов, гибких переносных проводов и кабелей. Она употребляется также для изготовления защитных перчаток, галош, ковриков и изоляционных труб, применяемых при монтаже проводов. К недо-

Рис. 6-32. Зависимости ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ вулканизированного каучука от содержания в нем серы



статкам резины как электроизоляционного материала следует отнести низкую нагревостойкость (при нагреве резина стареет, становится хрупкой и трескается), малую стойкость к действию неполярных жидкостей (бензол, бензин); малую стойкость к действию света, особенно ультрафиолетового, под влиянием которого резина быстро стареет. Губительно действует на резину озон, образующийся при ионизации в воздушных включениях или в окружающем воздухе: озон резко ускоряет старение резины, в особенности работающей в растянутом состоянии; в этих случаях образующиеся при начавшемся старении трещины имеют тенденцию к увеличению и озон по ним проникает в глубь материала. В связи с этим применение резины для работы при высоких напряжениях, когда может иметь место ионизация воздуха, сопряжено с большими трудностями. Содержащиеся в резине остатки свободной (не связанной химически с каучуком) серы могут оказывать вредное действие на медь, соприкасающуюся с резиной, особенно при повышенной температуре: медь соединяется с серой, образуя сернистую медь. Поэтому недопустимо непосредственно накладывать обычную резиновую изоляцию на медную жилу кабельного изделия; предварительно медь покрывают так называемым разделителем — слоем олова либо другого не подверженного влиянию серы металла, или бумаги. На алюминиевые жилы резина может накладываться непосредственно, без разделителя.

В необходимых случаях применяют тиурамтовую резину, при изготовлении которой берут не чистую серу, а *тиурам* — органическое сернистое соединение, при нагреве передающее часть содержащейся в нем серы каучуку, что и обеспечивает вулканизацию; тиурамтовая резина не содержит свободной серы, и потому ее можно накладывать непосредственно на медь. Кроме того, тиурамтовая резина обладает более высокой нагревостойкостью: так, в кабельных изделиях для сернистых резин допускается рабочая температура $+55^\circ\text{C}$, а для тиурамтовых резин $+65^\circ\text{C}$ (если тиурамтовая резина защищена свинцовой или поливинилхлоридной оболочкой — даже до $+80^\circ\text{C}$).

Резины, содержащие в качестве наполнителя сажу и имеющие поэтому черный цвет, обладают хорошими механическими свойствами, но электроизоляционные свойства их низки. Поэтому сажевые резины в электротехнике используют лишь в тех случаях, когда от них не требуются высокие электрические свойства; пример — наружные защитные оболочки (шланги) резиновых кабелей.

Чистый каучук практически неполярен; он имеет ρ около 10^{14} Ом·м; $\epsilon_r = 2,4$; $\operatorname{tg} \delta = 0,002$. Примерный характер изменения ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ при вулканизации каучука, имеющего различное коли-

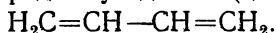
чество серы, показан на рис. 6-32; рост ϵ_r и $\operatorname{tg} \delta$ вызван усилением полярных свойств материала из-за влияния атомов серы, но при большом содержании серы (материал типа эбонита) ориентация дипольных молекул затрудняется увеличенной вязкостью вещества. Свойства резины сильно зависят от состава резиновой смеси и от технологии; для обычных электроизоляционных резин $\rho \approx 10^{13}$ Ом·м; $\epsilon_r = 3 \div 7$; $\operatorname{tg} \delta = 0,02 \div 0,10$ (для сажевых резин — до 0,25); $E_{\text{пр}} = 20\text{—}30$ МВ/м.

СИНТЕТИЧЕСКИЙ КАУЧУК

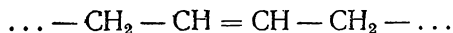
В течение многих лет натуральный каучук добывали исключительно в тропических странах, сначала из дикорастущих каучуконосных деревьев (Бразилия), затем из тех же деревьев, но разводимых на каучуковых плантациях (Индонезия, Шри Ланка и др.).

До Великой Октябрьской социалистической революции каучук в Россию полностью ввозился из-за границы. В дальнейшем эта задача была разрешена как нахождением отечественных растений-каучуконосов (например, кок-сагыз), так и, главным образом, разработкой способов промышленного получения синтетического каучука — СК; (натуральный каучук — НК). Сырьем для получения СК служит спирт, нефть и природный газ. В кабельной промышленности резины для защитных оболочек изготавливаются исключительно на основе СК, а в изоляционных смесях более половины НК заменяется СК.

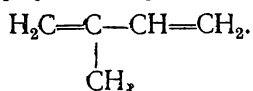
Бутадиеновый каучук (СКБ) получается при полимеризации газообразного углеводорода бутадиена (дивинила):



При полимеризации в присутствии катализатора (металлического натрия) бутадиен дает СКБ, цепочки молекул которого имеют вид



Таким образом, по составу СКБ близок к НК, который можно представить как полимер углеводорода изопрена (метилдивинила):



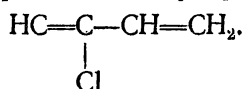
Синтетический бутадиеновый каучук, используемый в качестве электрической изоляции, должен быть тщательно отмыт от остатков катализатора (натрия), которые могут ухудшать его электроизоляционные свойства. При нагреве до $200\text{—}300^\circ\text{C}$ СКБ (без добавки вулканизирующих веществ) дополнительно полимеризуется в результате частичного разрыва двойных связей и переходит в *эскапон*, по механическим свойствам приближающийся к эбониту, но более нагревостойкий и мало подверженный действию кислот и органических растворителей. По мере увеличения времени полимеризации материал получается все более твердым. Эскапон, название которого происходит от первых букв слов «синтетический каучук» и фамилии изобретателя материала Л. Т. Пономарева, имеет высокие электро-

изоляционные свойства (ρ около 10^{15} Ом·м; $\epsilon_r = 2,7 \div 3,0$; $\operatorname{tg} \delta$ около $5 \cdot 10^{-4}$), что объясняется неполярной природой этого пространственного полимера чисто углеводородного состава. На основе эскапона изготавливается целый ряд электроизоляционных материалов (лаки, лакоткани, компаунды и т. п.).

Бутадиен-стирольный каучук (СКС) получается при совместной полимеризации бутадиена и стирола. По электроизоляционным свойствам СКС приближается к НК. Он обладает повышенной нагревостойкостью, маслостойкостью и бензиностойкостью.

Бутилкаучук получают совместной полимеризацией изобутилена $\text{H}_2\text{C}=\text{C}(\text{CH}_3)_2$ с небольшим количеством изопрена или бутадиена. Число двойных связей в молекуле бутилкаучука значительно меньше, чем в СКБ или СКС; этим обусловлена относительно высокая нагревостойкость бутилкаучука и резин на его основе, а также повышенная его стойкость к действию кислорода, озона и кислот. Его газопроницаемость в 10—20 раз меньше, чем НК; эластичность его невысока, но сохраняется и при температурах ниже минус 60°C , что характеризует высокую холодостойкость бутилкаучука.

Хлоропреновый каучук (в СССР — наирит, за рубежом — неопрен) получается полимеризацией хлоропрена:



Это полярный (вследствие присутствия атомов хлора) материал с невысокими электроизоляционными свойствами; зато он сравнительно стоек к действию масла и бензина, а также озона и других окислителей, благодаря чему может применяться для защитных оболочек кабельных изделий, маслостойких прокладок и т. п. Он более устойчив к тепловому старению и менее проницаем для газов, чем НК.

Бутадиен-нитрилакрильный каучук (СКН) получается совместной полимеризацией бутадиена и акрилонитрила $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}-\text{CN}$. Он также имеет дипольную природу (из-за наличия сильно полярных групп $-\text{CN}$) и невысокие электроизоляционные свойства. Все синтетические каучуки углеводородного состава (СКБ, СКС, бутилкаучук), как и НК, набухают и частично растворяются в нефтяных маслах; СКН и, как уже отмечалось, хлоропреновые каучуки более стойки к действию растворителей. Хлоропреновые каучуки обладают пониженной горючестью (не распространяют горение).

Кремнийорганические каучуки. В основе строения молекулы такие каучуки имеют полисилоксановую цепочку (см. стр. 124). Они вулканизируются лишь при введении специальных добавок, например органических пероксидов. Кремнийорганические каучуки обладают высокой нагревостойкостью (около $+250^\circ\text{C}$), хорошей холодостойкостью (сохраняют гибкость при температуре от -70 до -100°C) и хорошими электроизоляционными свойствами, но имеют невысокие механические свойства, малостойки к действию растворителей и дороги. По механическим свойствам рассмотренные

выше каучуки могут быть разделены на две группы. Резины из каучуков первой группы имеют относительно высокую прочность при растяжении даже без добавления наполнителей. Резины из каучуков второй группы обладают высоким пределом прочности при растяжении только при наличии в их составе активных наполнителей; каучуки второй группы не обладают способностью кристаллизоваться, как об этом упоминалось при описании НК. К каучукам первой группы относятся НК, хлоропреновые каучуки и бутылкаучук, а к каучукам второй группы — СКБ, СКС и кремнийорганические каучуки.

Изделия из различных резин изготавливаются с помощью прессования (§ 6-13). Нанесение изоляции защитных оболочек из резиновых смесей на кабельные изделия производится чаще всего на шприц-машинах, аналогичных по своему устройству экструдерам, служащим для наложения термопластов (см. стр. 151). Изолированные или покрытые резиновой смесью кабельные изделия подвергаются вулканизации. Прогрессивным способом является вулканизация на агрегатах непрерывной вулканизации (АНВ), когда провод или кабель непосредственно после червячного пресса пропускается через имеющее несколько десятков метров в длину нагревательное устройство, в котором резиновая смесь и вулканизируется.

6-16. СТЕКЛА

Стекла — неорганические квазиаморфные вещества — представляют собой сложные системы различных оксидов. Кроме стеклообразующих оксидов, т. е. таких, каждый из которых способен сам по себе в чистом виде образовывать стекло (SiO_2 , B_2O_3), в состав стекол входят и другие оксиды: щелочные Na_2O , K_2O , щелочноземельные CaO , BaO , а также PbO , Al_2O_3 и др. Основу большинства стекол составляет SiO_2 ; такие стекла называются силикатными.

СВОЙСТВА СТЕКОЛ

Свойства стекол меняются в широких пределах в зависимости от их состава и режима тепловой обработки.

Плотность. Стекла имеют плотность, которая колеблется от 2 до 8,1 Мг/м^3 . К тяжелым стеклам принадлежат стекла с высоким содержанием свинца (хрустали, флинт). Плотность обычных силикатных стекол (например, оконного стекла) близка к 2,5 Мг/м^3 .

Механические свойства. Прочность стекол на сжатие много больше, чем прочность на разрыв: предел прочности при сжатии составляет 6000—21 000 МПа, при растяжении — 100—300 МПа.

Тепловые свойства. Как аморфные вещества, стекла не имеют резко выраженной температуры плавления. При нагреве вязкость стекол уменьшается постепенно; за температуру размягчения стекла принимается температура, при которой вязкость его составляет 10^7 — 10^8 Па·с. Температуры размягчения большинства стекол находятся в пределах от 400 до 1600 °C; последнее значение соответствует кварцевому стеклу (состава 100 % SiO_2). Добавки к SiO_2 ,

в частности щелочные оксиды, понижают температуру размягчения. Значение α_l стекол различного состава изменяется в пределах от $0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (это значение также относится к кварцевому стеклу) до $15 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; α_l играет большую роль в оценке стойкости стекол к резким сменам температуры (термоударам). При внезапном нагреве или охлаждении снаружи предмета из стекла (или другого хрупкого материала) вследствие неравномерного распределения температур в наружном слое материала возникают механические (температурные) напряжения, которые могут явиться причиной растрескивания стекла. При быстром нагреве поверхностный слой стекла стремится расширяться, в то время как внутренние слои еще не успели прогреться, и в них создаются напряжения сжатия. Если же имеет место внезапное охлаждение поверхности стекла, то вследствие теплового сокращения поверхностного слоя создается тенденция к отрыву друг от друга соседних участков этого слоя. Так как у стекол прочность при растяжении много меньше, чем прочность при сжатии (см. выше), то внезапное внешнее охлаждение более опасно, чем внезапный нагрев.

Сравнительная стойкость к термоударам изделий из стекла различного состава при одной и той же толщине приближенно оценивается величиной

$$SW = \frac{\sigma_p}{\alpha_l E} \sqrt{\frac{\gamma_T}{c\rho}}, \quad (6-2)$$

где σ_p — предел прочности при растяжении; α_l — температурный коэффициент линейного расширения; E — модуль упругости; γ_T — коэффициент теплопроводности; c — удельная теплоемкость; ρ — плотность стекла.

Из всех величин, входящих в правую часть этой формулы, именно α_l меняется для стекол различного состава в наиболее широких пределах и имеет основное практическое значение для оценки стойкости стекла к термоударам. Тонкостенные изделия из стекла данного состава значительно более стойки к термоударам, чем толсто-стенные.

Температурный коэффициент линейного расширения стекол играет важную роль при спайке и сварке друг с другом различных стекол, при впайке металлической проволоки или ленты в стекло, при нанесении стеклоэмали на ту или иную поверхность. Необходимо подобрать значения α_l стекла и соединяемых с ним материалов приблизительно одинаковыми, иначе при смене температур может произойти растрескивание стекла, нарушение герметичности в месте ввода металлической проволоки в стекло. Применяемые в практике названия стекла «вольфрамовое» и «молибденовое» объясняются не составом их, а тем, что значения α_l этих стекол близки к α_l вольфрама и соответственно молибдена, что весьма важно для электроразрядной техники.

Оптические свойства. Обычные стекла прозрачны для лучей видимой части спектра. Некоторые добавки придают стеклам определенную окраску (CoO — синюю, Cr_2O_3 — зеленую, UO_2 — жел-

тую), что используется при получении цветных стекол, эмалей и глазурей.

Большинство технических стекол, благодаря содержанию примеси оксидов железа, сильно поглощают ультрафиолетовые лучи. *Увиолевые* стекла, содержащие менее 0,02 % Fe_2O_3 , обладают прозрачностью для ультрафиолетовых лучей; весьма хорошо пропускает эти лучи кварцевое стекло, которое применяется в специальных «кварцевых» лампах, дающих ультрафиолетовое излучение.

Показатель преломления n различных стекол колеблется от 1,47 до 1,96; высокие значения n имеют тяжелые свинцовые стекла — хрустали.

Стекла, в состав которых входят элементы с малой атомной массой, весьма прозрачны для рентгеновских лучей; таково, например, специальное стекло, имеющее состав 83 % B_2O_3 , 2,5 % BeO и 14,5 % Li_2O ; это стекло нестойко к действию влаги и должно покрываться лаком; из него изготовляют «окошки» в рентгеновских трубках, сквозь которые рентгеновские лучи выходят из трубки наружу. Напротив, стекла с большим содержанием свинца сильно поглощают рентгеновские лучи.

Гидролитическая стойкость. Стойкость к действию влаги оценивается массой составных частей стекла, переходящей в раствор с единицы поверхности стекла при длительном соприкосновении его с водой; растворимость стекла увеличивается при возрастании температуры. Стекла с низкой гидролитической стойкостью обладают малым поверхностным удельным сопротивлением в условиях влажной среды. Наивысшей гидролитической стойкостью обладает кварцевое стекло; гидролитическая стойкость сильно уменьшается при введении в стекло щелочных оксидов.

Стекла состава $\text{Na}_2\text{O} \cdot m \text{SiO}_2$ (реже $\text{K}_2\text{O} \cdot m \text{SiO}_2$) с силикатным модулем m от 1,5 до 4,2 являются растворимыми стеклами; при повышенном давлении и температуре они растворяются в воде, образуя вязкие клейкие растворы щелочной реакции; такой раствор концентрации 30—50 % с плотностью 1,27—1,92 Мг/м^3 называется *жидким стеклом*.

Силикатные стекла практически стойки к действию кислот, за исключением лишь плавиковой кислоты HF , но малостойки к щелочам. Специальные типы стекол с высоким содержанием B_2O_3 и Al_2O_3 стойки к парам натрия, что важно для некоторых электроосветительных приборов.

Электрические свойства (см. также стр. 40, 42) в весьма большой степени зависят от их состава. Для различных технических стекол при нормальной температуре $\rho = 10^6 \div 10^{15}$ Ом·м; $\epsilon_r = 3,8 \div 16,2$; $\text{tg } \delta = 0,0002 \div 0,01$.

Для кварцевого стекла при 20 °С $\epsilon_r = 3,8$ и $\text{tg } \delta = 0,0002$; ρ при 200 °С составляет примерно 10^{15} Ом·м. Сильно уменьшает ρ и ρ_s введение в стекло оксидов щелочных металлов; наличие имеющих меньший размер ионов натрия более вредно, чем наличие ионов калия (рис. 6-33). При воздействии на щелочное стекло постоянного напряжения происходит электролиз, который благодаря про-

зрачности стекла можно наблюдать непосредственно: при длительной выдержке стекла под достаточно большим напряжением, в особенности при повышенной температуре, когда проводимость стекла велика, у катода наблюдаются отложения металла (обычно натрия) в виде характерных ветвистых образований — дендритов.

Стекла с большим содержанием щелочных оксидов при отсутствии или при малом содержании оксидов тяжелых металлов имеют значительный $\text{tg } \delta$, который при повышении температуры заметно возрастает (см. рис. 3-8). Одновременное присутствие в составе стекла двух различных щелочных оксидов увеличивает ρ и уменьшает $\text{tg } \delta$ по сравнению со стеклом, содержащим только один щелочной оксид (явление называется *нейтрализационным* или *полищелочным эффектом*, см. рис. 6-34 и 3-8). Стекла, содержащие в больших количествах тяжелые оксиды металлов (PbO , BaO), имеют низкий $\text{tg } \delta$ даже при наличии в их составе щелочных оксидов.

Содержание щелочных оксидов (N_2O в большей степени, чем K_2O) повышает ϵ_r силикатных стекол (рис. 6-35). Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости α_{ϵ_r} различных технических стекол находится в пределах от $+30 \cdot 10^{-6}$ до $+500 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Поверхностная проводимость сильно зависит от состояния поверхности стекла, возрастая при ее загрязнении. При повышенной влажности окружающей среды поверхностная проводимость также возрастает, особенно у стекол, обладающих низкой гидролитической стойкостью (см. выше).

Электрическая прочность стекол при электрическом пробое мало зависит от их состава. Решающее влияние на $E_{\text{пр}}$ оказывают воздушные включения — пузыри в толще стекла.

При постоянном напря-

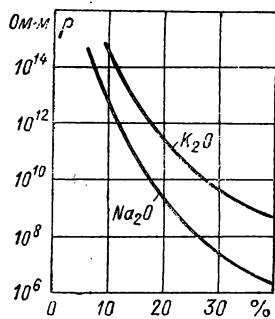


Рис. 6-33

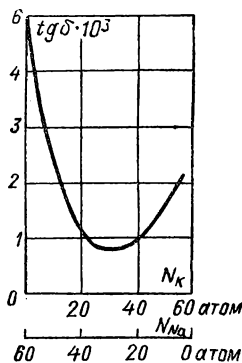


Рис. 6-34

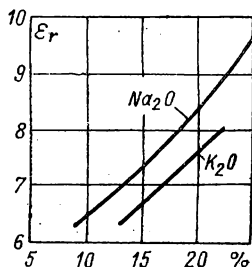


Рис. 6-35

Рис. 6-33. Зависимости ρ стекол систем $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O}$ и $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ от состава
По оси абсцисс отложено содержание соответствующего щелочного оксида в процентах по массе (остальное — SiO_2)

Рис. 6-34. Зависимость $\text{tg } \delta$ стекол системы $\text{B}_2\text{O}_3\text{—Na}_2\text{O—K}_2\text{O}$ от состава
По оси абсцисс отложено число атомов Na и K, приходящихся на 100 молекул B_2O_3 (сумма атомных концентраций Na и K во всех случаях равна 60)

Рис. 6-35. Зависимости ϵ_r стекол системы $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O}$ и $\text{SiO}_2\text{—K}_2\text{O}$ от состава
По оси абсцисс отложено содержание соответствующего щелочного оксида в процентах по массе

жений в однородном электрическом поле электрическая прочность стекла весьма велика и достигает 500 МВ/м. При высоких частотах (а при высоких температурах — и при низких частотах и даже при постоянном напряжении) пробой стекла имеет электротепловой характер.

ПОЛУЧЕНИЕ И ОБРАБОТКА СТЕКОЛ

Стекло получается при быстром охлаждении расплавленного материала. Если вести охлаждение расплава медленно, то увеличивается вероятность перехода вещества в кристаллическое состояние; быстрое охлаждение с соответственно быстрым возрастанием вязкости приводит к тому, что молекулы не успевают образовать кристаллическую решетку и остаются закрепленными в тех случайных положениях, в которых они оказались к моменту повышения вязкости, препятствующего молекулярным перемещениям.

Стекла изготавливаются в стекловаренных печах («варятся»). В крупном заводском производстве применяют ваннные печи, а для получения небольших количеств стекла с точно выдержанным составом — горшковые печи. Сырьевые материалы: кварцевый песок SiO_2 , соду Na_2CO_3 , поташ K_2CO_3 , известняк CaCO_3 , доломит $\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$, сульфат натрия Na_2SO_4 , буру $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, борную кислоту H_3BO_3 , сурик Pb_3O_4 , каолин, полевой шпат — измельчают, отвешивают в нужных соотношениях и тщательно перемешивают; полученная при этом шихта загружается в стеклоплавильную печь. В печи шихта плавится, летучие составные части (H_2O , CO_2 , SO_2) удаляются, а оставшиеся оксиды химически реагируют между собой, в результате чего получается однородная стекломасса, которая и идет на выработку стеклянных изделий.

Горячее стекло благодаря пластичности легко обрабатывается путем выдувания (ламповые баллоны, химическая посуда), вытяжки (листовое стекло, трубки, штабики), прессования и отливки; нагретые стеклянные части приваривают друг к другу, а также к деталям из других материалов (металлы, керамика и пр.). Листовое стекло получается на машинах Фурко посредством вытягивания полосы стекла сквозь фильеру в шамотной заслонке, погруженной в расплавленную стекломассу; бутылки, ламповые баллоны производятся на машинах-автоматах чрезвычайно большой производительности. Изготовленные стеклянные изделия должны быть подвергнуты отжигу, чтобы устранить механические напряжения, образовавшиеся в стекле при быстром и неравномерном его остывании. При отжиге изделие нагревают до некоторой, достаточно высокой температуры (температура отжига), а затем подвергают весьма медленному охлаждению. Механическая обработка стекла в холодном состоянии сводится к резке (алмазом), сверловке, шлифовке и полировке. Сверловка стекла может производиться инструментами из сверхтвердых сплавов, например победита, или латунными сверлами с применением абразивов. Металлизация стекла осуществляется различными путями в зависимости от особенностей изделия: нанесением металла методом возгонки в вакууме, методом вжигания серебряной или платиновой пасты, шоопированием и химическим методом осаждения серебра.

ТИПЫ СТЕКОЛ

В зависимости от назначения можно отметить следующие основные виды электротехнических стекол:

1. Конденсаторные стекла используются в качестве диэлектрика конденсаторов, применяемых в высоковольтных фильтрах, импульсных генераторах, колебательных контурах высокочастотных устройств. Они должны иметь по возможности повышенную ϵ_r и (для высокочастотных конденсаторов) малый $\text{tg } \delta$.

2. Установочные стекла служат для изготовления установочных деталей, изоляторов (телеграфных, антенных, опорных, проходных), бус и т. п.

3. Ламповые стекла применяются для баллонов и ножек осветительных ламп, различных электронных приборов и т. д. К ним предъявляется требование сплавимости с металлом (вольфрамом, молибденом и др.), что связано с подбором нужного значения α_l (см. выше).

4. Стекла с наполнителем; к ним принадлежит пластмасса горячей прессовки из стекла и слюдяного порошка — микалекс (стр. 181).

По химическому составу технические силикатные стекла могут быть разбиты на три группы:

1. Щелочные стекла без тяжелых оксидов или с весьма незначительным содержанием их. К ним принадлежат наиболее распространенные в быту оконные, бутылочные и тому подобные стекла, а также стекла «пайрекс», имеющие довольно малое значение α_l (около $3,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) и сравнительно стойкие к термоударам.

2. Щелочные стекла с большим количеством тяжелых оксидов. К ним принадлежат флинты с содержанием PbO и кроны с содержанием BaO , применяемые в качестве оптических и электроизоляционных стекол. Эти стекла имеют высокую ϵ_r и малый $\text{tg } \delta$. К флинтам принадлежат специальные конденсаторные стекла с повышенным значением ϵ_r (около 8).

3. Бесщелочные стекла — кварцевое стекло, а также стекла с очень малым содержанием щелочных оксидов применяются для оптических, электроизоляционных и различных специальных целей.

Выпускаемые промышленностью стекла получают определенные номера, или марки.

СТЕКЛОЭМАЛИ

Стеклоэмалями или просто эмалями (не смешивать с лаковыми эмалями!) называются стекла, наносимые тонким слоем на поверхность металлических и других предметов с целью защиты от коррозии, придания определенной окраски и улучшения внешнего вида, создания отражающей поверхности (эмалированная посуда, абажуры, рефлекторы, декоративные эмали и т. п.). Эмали получают сплавлением измельченных составных частей шихты, выливанием расплавленной массы тонкой струей в холодную воду и размолом полученной *фритты* на шаровой мельнице в тонкий порошок. Иногда к фритте перед ее размолом добавляются небольшие количества глины и других веществ. Для нанесения эмали на различные предметы нагретый в печи до соответствующей температуры предмет посыпается порошком эмали, которая оплавляється и покрывает его прочным стекловидным слоем; если требуется, покрытие повторяется несколько раз до получения слоя нужной толщины; во время оплавления эмалируемый предмет (например, трубчатый резистор) может медленно вращаться в печи для более равномерного покрытия. Важно, чтобы α_l эмали был приблизительно равен α_l материала, на который наносится эмаль, иначе эмаль будет давать мелкие трещины (цек) при резкой смене температур. При эмалировании предметов из стали или чугуна для улучшения сцепления эмали с металлом производят предварительное покрытие металла грунтовой эмалью (с содержанием оксидов никеля или кобальта); на нее уже наносится основная эмаль любой окраски. Важная область применения стеклоэмалей в качестве электроизоляционных материалов — покрытие трубчатых резисторов. В этих резисторах на наружную поверхность керамической трубки нанесена проволочная обмотка (из никрома или константана), поверх которой наплавляется слой эмали, создающий изоляцию между отдельными витками обмотки и окружающими предметами и защищающий обмотку от влаги, загрязнения и окисления кислородом воздуха при высокой рабочей температуре (примерно 300°C). Кроме того, стеклоэмали используются в электроаппаратостроении для получения прочного и нагревостойкого электроизоляционного покрытия на металле, а также для устройства вводов в металлические вакуумные приборы. Стеклоэмали применяются и в качестве диэлектрика в некоторых типах конденсаторов.

СТЕКЛОВОЛОКНО

Волокна и ткани. Стекло в толстом слое — хрупкий материал, но тонкие стеклянные изделия обладают повышенной гибкостью. Весьма тонкие (диаметром 4—7 мкм) стеклянные волокна имеют уже настолько высокую гибкость, что могут обрабатываться приемами текстильной технологии. На рис. 6-36 дана зависимость прочности при растяжении такого волокна от его диаметра. Большая гибкость и прочность стекловолокна объясняется ориентацией молекул поверхностного слоя стекла, имеющей место при вытягивании стекловолокна из расплавленной стекло-массы и его быстрым охлаждением.

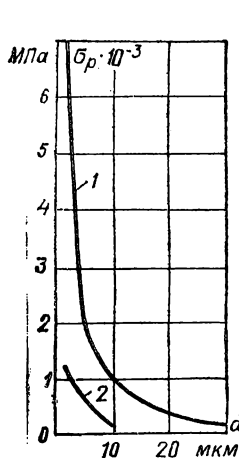


Рис. 6-36

Рис. 6-36. Зависимости предела прочности при растяжении от диаметра d элементарного стеклянного волокна (кривая 1) и нити, скрученной из 100 элементарных волокон (кривая 2)

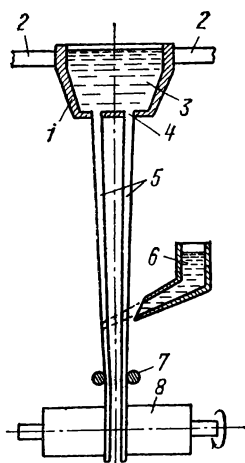


Рис. 6-37

Рис. 6-37. Схема вытяжки тонкого стеклянного волокна

1 — лодочка; 2 — подвод тока к лодочке; 3 — расплавленная стекломасса; 4 — фильеры; 5 — вытягиваемые элементарные стеклянные волокна; 6 — замасливатель; 7 — водилка для правильной раскладки нитей на барабане; 8 — быстро вращающийся барабан

Стекловолокно получают следующим образом: стекло расплавляют в изготовленной из тугоплавкого сплава лодочке (рис. 6-37), которая накаливается пропусканием через нее электрического тока. В дне лодочки имеются отверстия (фильеры) диаметром около 1 мм. Расплавленная стекломасса под действием собственного веса медленно вытекает сквозь отверстия в виде нитей, диаметр которых примерно равен диаметру отверстий. Выходящая из фильеры нить наматывается на быстро вращающийся барабан, увлекаемый им с очень большой скоростью (около 30 м/с), и, пока она еще не успела полностью охладиться и затвердеть, вытягивается в тонкое волокно. Отдельные волокна числом до ста — по числу фильер в лодочке (на рис. 6-37 показаны для простоты только две нити), соединяются в одну прядь маслом, подаваемым из замасливателя. Благодаря наличию замасливателя при дальнейшей перемотке нити с барабана не происходит спутывания волокон из различных прядей.

Из стеклянных нитей, скрученных из отдельных волокон, ткнут стеклянные ткани, ленты и шланги; эти же нити используют для изоляции обмоточных проводов.

Ткани и ленты из стеклянного волокна для целей электрической изоляции имеют обычно толщину от 0,02 до 0,7 мм. Стеклянные ткани используются в производстве нагревостойких стеклотканей и стеклотекстолитов (см. выше). Короткое стекловолокно употребляется как наполнитель в пресс-порошках. Преимущества стеклянной волокнистой изоляции по сравнению с органическими волокнами: высокая нагревостойкость, а также высокая механическая прочность, относительно малая гигроскопичность и хорошие электроизоляционные свойства. По трем последним показателям стеклянное волокно выгодно отличается и от асбеста. Поэтому стеклянную изоляцию можно применять для наиболее трудных условий эксплуатации (при высокой температуре, большой влажности и пр.). Недостатки стекловолокна: малая эластичность (удлинение перед разрывом всего около 2 %), пониженная по сравнению с органическими волокнами гибкость, а также малая стойкость по отношению к истиранию — вот почему стеклянная изоляция может сравнительно легко повреждаться при задевании об острые края пазов электрических машин.

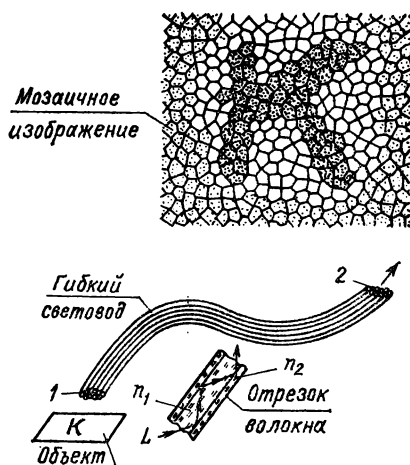
Световоды. Своеобразное применение стекловолокна — изготовление световодов. Это жгуты, скрученные из волокон, имеющих сердцевину и оболочку из стекла разного состава, с различными показателями преломления n_1 и n_2 , причем n_1 сердцевин больше n_2 оболочки. Световой луч, падая из среды, оптически более плотной (сердцевина), на поверхность раздела со средой, оптически менее плотной, под углом, большим предельного угла, испытывает полное внутреннее отражение и, многократно отражаясь, идет вдоль волокна, не выходя в окружающее пространство. Изображение целого освещенного объекта передается по изогнутому производным образом световоду в виде мозаики, состоящей из отдельных точек, каждая из которых соответствует одному стекловолокну (рис. 6-38). Диаметр двухуслойного стекловолокна выбирается 20—30 мкм; в световоде диаметром 5—6 мм помещается несколько десятков тысяч волокон. Для правильной, без искажений, передачи изо-

Рис. 6-38. Пояснение к принципу действия световода

бражений по световоду необходимо, чтобы отдельные волокна в сечении приемного конца световода 2 были фиксированы в таком же порядке, как в сечении передающего конца 1. Возможно также изготовление световодов из прозрачных органических полимеров, причем также должно соблюдаться соотношение между показателями преломления оболочки n_2 и сердцевины n_1 в виде $n_2 < n_1$. Полимерные световоды более гибкие, но менее нагревостойки по сравнению со стеклянными. Возможно также изготовление плоских световодов, в частности в виде покрытий на соответствующих подложках (печатные платы).

СИТАЛЛЫ

Изготавливаются путем кристаллизации стекол специального состава (название «ситалл» — сокращение слов «силикат» и «кристалл»). Они занимают промежуточное положение между обычными стеклами и керамикой (§ 6-17), поэтому иногда их называют *стеклокерамикой*. Ранее процесс частичной кристаллизации (*растекловывание*) при изготовлении стеклянных изделий, приводящий к появлению неоднородности строения и ухудшению прозрачности стекла, считался весьма нежелательным. Однако, если в состав склонного к кристаллизации стекла ввести добавки веществ, образующих зародыши кристаллизации, удастся стимулировать процесс кристаллизации стекла по всему его объему и получить обладающий ценными химическими и электроизоляционными свойствами материал с однородной микрокристаллической структурой. В отличие от стекол ситаллы непрозрачны, но многие из них в тонком слое заметно пропускают свет. Технология изготовления ситалловых изделий включает в себя несколько операций. Сначала изготавливают обычными способами изделия из стекломассы специально подобранного состава. Затем их подвергают двухступенчатой термообработке: на первой ступени (500—700 °C) происходит образование зародышей кристаллизации, а на второй (900—1100 °C) — развитие кристаллической фазы. Содержание кристаллической фазы в материале после второй ступени термообработки составляет 80—95 % и даже более; размеры оптимально развитых кристаллов — до 2 мкм. Усадка при кристаллизации — до 2 %. В качестве стимуляторов кристаллизации применяются TiO_2 , FeS, фториды и фосфаты некоторых металлов и другие вещества. Получаемые по описанной выше технологии ситаллы называют иногда *термоситаллами* (за рубежом — пирокерамами). Другой тип ситаллов — *фотоситаллы* (фотокерамы). Особенность их состоит в том, что стимуляторами кристаллизации являются мельчайшие (коллоидные) частицы металлов — серебра, золота, меди, которые выделяются из соответствующих оксидов, входящих в состав стекла, под влиянием его облучения с последующей низко-



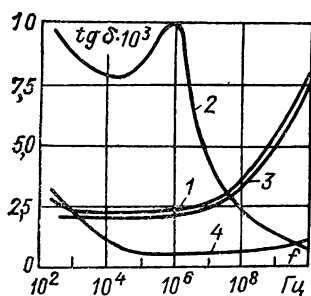


Рис. 6-39. Зависимости $\operatorname{tg} \delta$ ситаллов и исходных стекол от частоты при нормальной температуре 1 — стекло системы $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—MgO}$; 2 — ситалл того же состава; 3 — стекло системы $\text{SiO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—BaO}$; 4 — ситалл того же состава

температурной обработкой (процесс проявления); при проявлении материал, ранее бесцветный, приобретает определенную окраску.

Примерные свойства ситаллов: плотность 2,3—3,0 Мг/м^3 ; температура размягчения 900—1300 $^{\circ}\text{C}$ (в отличие от стекол интервал размягчения ситаллов значительно более узкий); предел прочности при изгибе 150—200 МПа, при сжатии 500—1200 МПа, коэффициент теплопроводности 0,8—2,2 $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$; α_l от $0,1\cdot 10^{-6}$ до $12\cdot 10^{-6}$ К^{-1} ; $\rho = 10^{10}\text{—}10^{12}$ $\text{Ом}\cdot\text{м}$; $\epsilon_r = 5\div 7$; $\operatorname{tg} \delta$ от $10\cdot 10^{-4}$ до $800\cdot 10^{-4}$ (при 1 МГц); $E_{\text{пр}} = 20\text{—}80$ МВ/м . Как правило, электротехнические типы ситаллов обладают более высокими электроизоляционными параметрами, чем аморфные стекла того же состава; однако в некоторых случаях частотные и температурные зависимости ситаллов имеют сложный характер (рис. 6-39).

Ситаллы применяются для изготовления ответственных изделий. Помимо хороших электроизоляционных свойств, важную роль играют высокая механическая прочность и пониженная (по сравнению со стеклами) хрупкость, возможность широкого варьирования значений α_l , высокая точность размеров изделий. Особую область применения имеют фотоситаллы: после воздействия на заготовки из светочувствительного стекла (возможно по определенному рисунку, сквозь отверстия в трафарете) ультрафиолетового облучения и кристаллизации засвеченной заготовки последняя может подвергаться травлению в кислоте, причем менее кислотостойкая закристаллизовавшаяся часть изделия растворяется; таким образом, получается изделие сложной формы, которое вновь подвергается всестороннему облучению и дополнительно кристаллизуется уже при более высокой температуре.

6-17. КЕРАМИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Керамическими материалами (*керамикой*) называют неорганические материалы, из которых могут быть изготовлены изделия той или иной формы, подвергаемые в дальнейшем обжигу при высокой температуре; в результате обжига в керамической массе происходят сложные физико-химические процессы, благодаря которым готовое (обожженное) изделие приобретает нужные свойства. Ранее керамические материалы изготовлялись на основе глины, образующей в смеси с водой пластичную, способную формироваться массу и после обжига приобретать значительную механическую прочность. Впоследствии появились и другие виды керамических материалов,

в состав которых глина входит лишь в очень малом количестве или же совсем не входит.

Керамические материалы могут быть весьма разнообразны по свойствам и области применения; в электротехнике используют керамические материалы в качестве полупроводниковых (стр. 265) и магнитных (ферриты, стр. 283) материалов. Чрезвычайно большое значение имеют керамические диэлектрические, в частности электроизоляционные, а также сегнетоэлектрические и некоторые другие специальные керамические материалы. Многие керамические электроизоляционные материалы имеют высокую механическую прочность, очень малый угол диэлектрических потерь, значительную нагревостойкость и другие ценные свойства. По сравнению с органическими электроизоляционными материалами керамика, как правило, более стойка к электрическому и тепловому старению, не дает остаточных деформаций при продолжительном приложении к ней механической нагрузки. Металлизация керамики (обычно нанесением серебра методом вжигания) обеспечивает возможность осуществления спайки с металлом, что имеет особое значение для создания герметизированных конструкций.

ФАРФОР

С самого начала развития электротехники фарфор широко использовался как электроизоляционный материал, и в настоящее время он является одним из основных изоляционных материалов. Для изготовления фарфора применяют специальные сорта глин (каолин — высококачественная светлая глина большой чистоты, а также другие виды огнеупорных пластичных глин) и минералы — кварц SiO_2 и полевой шпат. Сущность технологического процесса изготовления фарфора сводится к очистке от примесей всех составных частей, тщательному их измельчению и перемешиванию в однородную массу с водой. Из фарфоровой массы той или иной консистенции различными способами: обточкой, прессовкой, отливкой в гипсовые формы, выдавливанием сквозь отверстие — получают изделия нужной конфигурации. Отформованные изоляторы или другие фарфоровые изделия сушат для удаления избытка воды. Следующие операции — глазуровка и обжиг. Глазурь — масса, наносимая в виде водной суспензии тонким слоем на поверхность фарфорового изделия. При обжиге глазурь расплавляется и покрывает поверхность фарфора гладким блестящим слоем. Глазурь защищает фарфор от проникновения влаги внутрь неизбежно образующихся в нем пор; глазурованные изоляторы достаточно водостойки и могут работать в открытых установках, на воздушных линиях электропередачи, подвергаясь действию атмосферных осадков. Глазурь улучшает внешний вид фарфора и позволяет придавать фарфоровым изделиям окраску в желаемый цвет. К гладкой поверхности глазури менее пристают различные загрязнения; глазурь уменьшает ток утечки по поверхности изоляторов и повышает их напряжение перекрытия. Наконец, глазурь, «заглаживая» трещины и другие дефекты на

поверхности фарфора, которые являются местами начала разрушения при механических нагрузках, существенно повышает механическую прочность фарфоровых изделий. Температура размягчения глазури несколько ниже температуры обжига, чтобы во время обжига она уже плавилась и хорошо остекловывала поверхность фарфора. Глазурь должна иметь температурный коэффициент линейного расширения α_l , близкий к α_l фарфора, иначе она при изменениях температуры будет давать мелкие трещины — *цек* (см. стр. 165).

Обжиг — чрезвычайно важная операция, придающая фарфору высокую механическую прочность, водостойкость и хорошие электроизоляционные свойства. При обжиге глина изменяет кристаллическую структуру и теряет входящую в ее состав кристаллизационную воду; полевои шпат — наиболее легкоплавкая составная часть фарфора — плавится, образуя стекловидную массу, заполняющую промежутки между зернами подвергнутых обжигу глины и кварца, и прочно связывает друг с другом эти зерна. Обжиг фарфоровых изоляторов в зависимости от их размеров может длиться от 20 до 70 ч. При этом собственно обжиг при максимальной температуре (для установочного фарфора 1300—1350 °С, для высоковольтного 1330—1410 °С) занимает сравнительно небольшое время; много времени требует постепенный подъем температуры (во избежание повреждения изделий бурно выделяющимися водяными парами и газами), а также медленное охлаждение изделий перед их извлечением из печи (во избежание появления температурных напряжений и трещин). Подвергающиеся обжигу фарфоровые изделия помещаются в печь, отапливаемую мазутом, газом или углем (весьма хороши электрические печи), в изготовляемых из огнеупорной глины (шамота) цилиндрах или коробках, так называемых *капселях*, чтобы предохранить изделия от непосредственного воздействия пламени, неравномерного нагрева с разных сторон и загрязнения копотью (рис. 6-40). Поверхность, которой обжигаемое изделие из фарфора или аналогичного керамического материала ставится на дно капселя, должна быть свободна от глазури, иначе изделие приплавится к капселю (читатель может убедиться в этом, рассмотрев донешко любой чайной чашки).

Печи для обжига фарфора бывают двух типов: прерывного действия (горны) и непрерывного действия (туннельные печи). Горн после обжига каждой партии фарфоровых изделий приходится охлаждать для выемки обожженных изделий

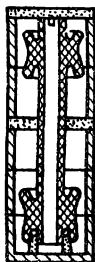
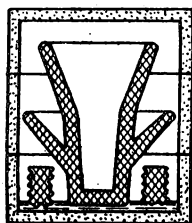


Рис. 6-40

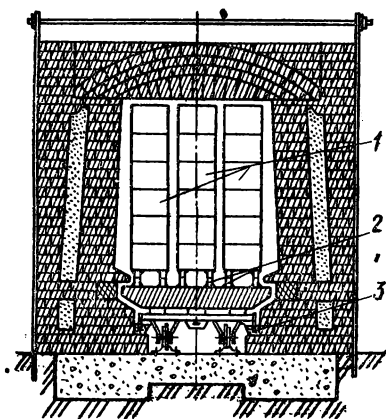


Рис. 6-41

Рис. 6-40. Фарфоровые изоляторы, размещенные в капселях для обжига

Слева — штыревой изолятор и два маленьких изолятора, помещенные для лучшего использования объема капселя; справа — проходной изолятор

Рис. 6-41. Поперечный разрез туннельной печи

1 — капсели с изделиями; 2 — огнеупорный под вагонетки; 3 — песочный затвор

и загрузки новых. *Туннельные печи*, в которых обжигаемые изделия на особая вагонетках подаются с одной стороны печи, медленно проходят сквозь печь и выходят с другой стороны ее, дают возможность непрерывной работы при более высокой производительности. В средней части печи (*зона обжига*) поддерживается наиболее высокая температура; от середины к концам печи температура постепенно понижается. На фарфоровых заводах применяют туннельные печи (рис. 6-41) длиной свыше 100 м. На огнеупорном полу 2 вагонетки установлены капсулы 1 с обжигаемыми изделиями; для устранения подсоса в печь холодного воздуха и для защиты от нагрева металлических деталей вагонеток служат песочный затвор 3, образованный желобами, заполненными песком; в песке скользят связанные с вагонетками фартуки, выполненные из стали и футерованные огнеупорным кирпичом.

При обжиге вследствие потери составными частями фарфора воды и уплотнения структуры наблюдается *усадка* — значительное (до 20 %) уменьшение размеров обжигаемого изделия. Усадка бывает больше в вертикальном направлении (считая по положению изолятора в печи во время обжига), чем в горизонтальном. Принимая во внимание усадку, необходимо при формовке фарфоровых изоляторов давать им завышенные размеры против требующихся окончательных размеров готовых изделий. Однако вследствие колебаний состава сырья и режима обжига точно предугадать усадку практически невозможно, а потому фарфоровые изделия изготовляют с большими допусками на размеры (от 2 до 5 %). Отдельные фарфоровые детали соединяют друг с другом при помощи склеивания (например, эпоксидной смолой), цементирования, заливки расплавленным легкоплавким металлом, но не при помощи таких способов, которые требуют точности размеров соединяемых деталей.

При рассмотрении в микроскоп образца обожженного фарфора устанавливается его структура: фарфор состоит из кристаллов муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ и кварца SiO_2 , промежутки между которыми заполнены стеклообразным материалом, образовавшимся в основном в результате расплавления полевого шпата. Наличие стекловидной фазы определяет довольно высокую механическую прочность фарфора. Электротехнический фарфор содержит примерно 70 % SiO_2 и 25 % Al_2O_3 (прочее — K_2O , Na_2O , Fe_2O_3 и другие оксиды).

Обожженный фарфор имеет плотность 2,3—2,5 г/см^3 ; его α_t составляет (3—4,5) $\cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. Предел прочности при сжатии 400—700 МПа; значительно меньше предел прочности при растяжении 45—70 МПа и при изгибе 80—150 МПа. Удельная ударная вязкость фарфора 1,8—2,2 кДж/м^2 . Электрические свойства фарфора при нормальной температуре удовлетворительны для его использования при низких частотах: его ρ составляет 10^{12} — $10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{м}$, $\epsilon_r = 6 \div 8$, $\text{tg } \delta = 0,015 \div 0,025$, $E_{пр} = 10 \div 30 \text{ МВ/м}$ (см. также рис. 4-9). Однако при повышении температуры электроизоляционные свойства фарфора сильно ухудшаются (см. рис. 1-7, 2-7, 3-9, 4-10), так как стекловидная фаза, полученная из минералов типа полевого шпата, содержащих значительное количество калия и натрия, представляет собой щелочное силикатное стекло (стр. 163). Из фарфора изготавливают самые разнообразные электрические изоляторы.

РАЗЛИЧНЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИКИ

Классификация. Как указывалось, фарфор имеет широкое применение в электротехнике. Однако отмеченные недостатки фарфора — прежде всего сравнительно высокий угол диэлектрических потерь, быстро увеличивающийся к тому же при повышении температуры, — затрудняют применение фарфора в качестве электрической изоляции при высоких частотах, а также при высоких температурах.

Развитие радиоэлектронной промышленности и электротермии вызвало необходимость в новых керамических материалах, обладающих улучшенными свойствами по сравнению с фарфором. Разработка этих материалов велась как в направлении усовершенствования фарфора, так и в направлении синтеза керамических материалов,

совершенно отличных от фарфора по составу. Отметим лишь небольшое число наиболее характерных материалов этой группы.

Изделия из различных керамических масс формируются перед обжигом способами, близкими к способам формовки фарфоровых изделий. В качестве прогрессивного метода изготовления изделий точных размеров, допускающего широкую механизацию, отметим способ горячего литья из порошка керамического сырья с технологической связкой (например, парафином), удаляемой при обжиге.

Радиокерамические материалы в зависимости от назначения изготавливаются следующих типов: А — высокочастотные для конденсаторов; Б — низкочастотные для конденсаторов; В — высокочастотные для установочных изделий и других радиотехнических деталей. Для каждого типа изготавливают материалы различных классов и групп с определенными техническими показателями. Химический состав и исходные сырьевые материалы не предусматриваются.

Керамика с низкой диэлектрической проницаемостью. Эта группа материалов содержит в виде основной кристаллической фазы кварц β - SiO_2 , корунд α - Al_2O_3 , муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (уже упоминавшийся выше при рассмотрении фарфора), целезиан $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, клиноэнстатит $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, форстерит $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, шпинель $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, периклаз MgO , анортит $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, волластонит $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ и циркон $\text{ZrO}_2 \cdot \text{SiO}_2$.

Радиофарфор представляет собой фарфор, стекловидная фаза которого обогащена введением в нее тяжелого оксида BaO (см. стр. 163).

Ультрафарфор, изготавливаемый различных марок и представляющий собой дальнейшее усовершенствование радиофарфора, характеризуется большим содержанием Al_2O_3 . У радиофарфора $\text{tg } \delta$ значительно меньше, а ρ больше, чем у обычного электротехнического фарфора, а электроизоляционные свойства ультрафарфора еще лучше (см. рис. 3-9). Кроме того, ультрафарфор имеет существенно повышенную по сравнению с обычным фарфором механическую прочность.

Высокоглиноземистая керамика (алюмооксид) в основном состоит из оксида алюминия (глинозема) Al_2O_3 . Этот материал, требующий сложной технологии изготовления с весьма высокой температурой обжига (до 1750°C), обладает высокой нагревостойкостью (рабочая температура до 1600°C), высоким ρ и малым $\text{tg } \delta$ при повышенных температурах (см. рис. 3-9), чрезвычайно высокой механической прочностью и теплопроводностью (его теплопроводность в 10—20 раз выше, чем у фарфора — см. табл. 5-1). Значение ϵ , алюмооксида — около 10.

Обладающий особо плотной структурой (его плотность близка к теоретической плотности Al_2O_3) поликор (за рубежом — люкалокс), в отличие от обычной непрозрачной корундовой керамики, прозрачен; кроме того, он имеет ρ на порядок выше, чем непрозрачная глиноземистая керамика. Поликор, в частности, применяется для изготовления колб некоторых специальных электрических источников света.

Стеатит — вид керамики, изготавливаемый на основе минерала талька $3\text{MgO} \cdot \text{X} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Таким образом, в то время как обычная керамика (фарфор и его разновидности) состоит в основном из силикатов алюминия, стеатитовая керамика — из силикатов магния, прежде всего клиноэнстатита.

Тальк — хорошо известный минерал, обладающий способностью благодаря его чрезвычайной мягкости легко размалываться в порошок. Стеатитовая керамика обычно изготавливается обжигом массы, составляемой из талькового порошка с некоторыми добавками. Возможно также изготавливать детали из талькового камня путем его непосредственной механической обработки (которая проста ввиду мягкости материала) с последующим обжигом. Специальные сорта стеатита с особо малым содержанием примесей оксидов железа, предназначенные для высокочастотной изоляции, имеют малый $\text{tg } \delta$ (до $2 \cdot 10^{-4}$) и хорошие механические свойства. Преимуществом стеатитовой керамики является также малая усадка при обжиге, позволяющая получать изделия сравнительно точных размеров. К тому же он не нуждается в глазуровке (благодаря плотной структуре) и может сравнительно легко дополнительно обрабатываться шлифовкой. Стеатит широко используется

для установочной изоляции в радиотехнической аппаратуре, а также и в силовой электротехнике.

Прочие радиокерамические материалы. Материалы на основе минерала цельвина имеют $\epsilon_r = 6,5 \div 7,0$ и $\operatorname{tg} \delta = (1-2) \cdot 10^{-4}$ (при 1 МГц), на основе анортита — соответственно $7,0-7,5$ и $(2-3) \cdot 10^{-4}$, на основе шпинели $7,5-8,0$ и $(4-6) \cdot 10^{-4}$, на основе волластонита $6,0-6,5$ и $(5-6) \cdot 10^{-4}$, на основе циркона $7,0-8,0$ и $(50-60) \cdot 10^{-4}$. У всех этих материалов положительный α_{ϵ_r} .

Керамика с высокой диэлектрической проницаемостью. Такая керамика применяется, в частности, для изготовления керамических конденсаторов; по сравнению с конденсаторами из керамики с малой ϵ_r , такие конденсаторы имеют значительно меньшие размеры и массу. Большая часть керамических материалов с высокой ϵ_r имеет в качестве основной составной части диоксид титана TiO_2 .

Диоксид титана существует в различных кристаллических модификациях; одна из них — рутил — имеет в направлении главной кристаллографической оси диэлектрическую проницаемость $\epsilon_r = 173$. В керамических материалах на основе рутила благодаря беспорядочному расположению в пространстве кристаллов рутила и наличию различных добавок диэлектрическая проницаемость меньше указанного значения, но все же превосходит ϵ_r большинства применяемых твердых диэлектриков.

Помимо TiO_2 во многие конденсаторные радиокерамические материалы входят в виде кристаллической фазы соединения $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ (титанат кальция, перовскит), $\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$ (титанат стронция), $\text{BaO} \cdot 4\text{TiO}_2$ (тетратитанат бария), $\text{MgO} \cdot \text{TiO}_2$, $\text{NiO} \times \text{TiO}_2$, $\text{BaO} \cdot \text{ZrO}_2$, $\text{CaO} \cdot \text{SnO}_2$, $\text{SrO} \cdot \text{SnO}_2$ и др.

Для керамики, в основном состоящей из рутила, значение ϵ_r в диапазоне частот до 10^7 Гц — около 100, а $\operatorname{tg} \delta$ снижается с ростом частоты от $23 \cdot 10^{-4}$ при 10^3 Гц до $3 \cdot 10^{-4}$ при 10^6 Гц; для керамики титаната кальция в тех же условиях ϵ_r составляет 168, а $\operatorname{tg} \delta = 14 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-4}$; для керамики титаната стронция соответственно ϵ_r будет 233, а $\operatorname{tg} \delta = 2 \cdot 10^{-4} \div 21 \cdot 10^{-4}$ (все данные приведены для нормальной температуры).

У многих керамических конденсаторных материалов значение ϵ_r снижается при повышении температуры. Так, средний ТК диэлектрической проницаемости α_{ϵ_r} в интервале температур от $+20$ до $+80^\circ\text{C}$ составляет для керамики TiO_2 минус $850 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, для $\text{CaO} \cdot \text{TiO}_2$ минус $1500 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Однако некоторые материалы с более низкой ϵ_r при нормальной температуре имеют меньший по абсолютному значению отрицательный или даже положительный α_{ϵ_r} : так, керамика $\text{BaO} \cdot \text{SnO}_2$ имеет $\epsilon_r = 20$ и $\alpha_{\epsilon_r} = -40 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; для $2\text{MgO} \cdot \text{TiO}_2$ $\epsilon_r = 16$ и $\alpha_{\epsilon_r} = +40 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; для $\text{CaO} \cdot \text{SnO}_2$ $\epsilon_r = 16$ и $\alpha_{\epsilon_r} = +115 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и т. п.

Сегнетокерамика — это особая группа материалов, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами: резкой зависимостью ϵ_r от температуры и напряженности электрического поля, наличием диэлектрического гистерезиса и пр. (см. § 1-7). Первым по времени открытия (академиком Б. М. Вулом) сегнетокерамическим (обладающим сегнетоэлектрическими свойствами не только в виде монокристалла, но и в поликристаллическом состоянии, т. е. в виде керамики) материалом, сохранившим весьма большое значение до настоящего времени, был титанат бария BaTiO_3 . На рис. 1-9 была приведена примерная зависимость ϵ_r от температуры для керамики титаната бария. Добавлением к титанату бария некоторых других материалов (как сегнетоэлектрических, так и несегнетоэлектрических) удается существенно изменять его свойства, и в частности сильно смещать точку Кюри в область более высоких температур. Так, на рис. 6-42 даны зависимости ϵ_r от температуры для керамики, состоящей из титаната бария и титаната стронция $\text{SrO} \cdot \text{TiO}_2$ в разных соотношениях; хорошо видно перемещение точки Кюри в широком интервале

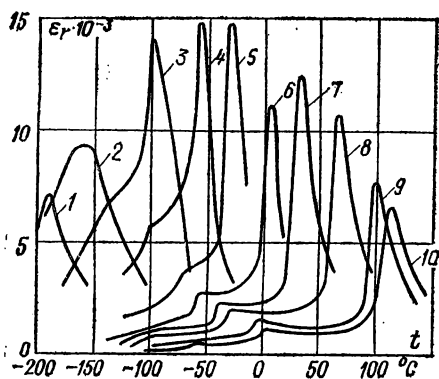


Рис. 6-42. Температурные зависимости ϵ_r сегнетокерамики $\text{BaTiO}_3\text{—SrTiO}_3$ (в слабом электрическом поле при частоте 1 кГц)

Состав (в молекулярных процентах): BaTiO_3 — 10 % (кривая 1); 20 % (кривая 2); 30 % (кривая 3); 40 % (кривая 4); 50 % (кривая 5); 60 % (кривая 6); 70 % (кривая 7); 80 % (кривая 8); 90 % (кривая 9); 100 % (кривая 10), остальное во всех случаях — SrTiO_3

Весьма большой нелинейностью емкости обладают сегнетокерамические конденсаторы, получившие название вариконды (сокращение слов «варияция» и «конденсатор»).

Керамика особо высокой нагревостойкости. Для работы при высоких температурах и их резких сменах (термодарах, см. стр. 161) применяются специальные виды керамических материалов с малым α_l , в частности на основе кордиерита $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ [р при 20 °C составляет $10^{11}\text{—}10^{13}$ Ом·м, при 600 °C — $10^8\text{—}10^{10}$ Ом·м; α_l около $7 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹; коэффициент теплопроводности 2—4 Вт/(м·К), диоксид циркония ZrO_2 (α_l около $4 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹), титаната алюминия $\text{Al}_2\text{O}_3\text{TiO}_2$ (α_l около $0,1 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹).

Большой интерес представляют чистые оксиды различных металлов, некоторые из них имеют высокую нагревостойкость. Ряд оксидов обладает также необычно высокой для электроизоляционных материалов теплопроводностью: таковы оксиды бериллия BeO , магния MgO и алюминия Al_2O_3 (рис. 6-43). Характерно, что оксид бериллия имеет теплопроводность выше, чем металлический бериллий. Некоторые свойства керамики из BeO : плотность 3,0 Мг/м³; температура плавления 2670 °C; $\epsilon_r = 7,4$; ρ при 1000 °C составляет 10^6 Ом·м; $\text{tg } \delta$ при 20 °C и 1 МГц равен $(2\text{—}5) \times 10^{-4}$; α_l около $10 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹. Соединения бериллия токсичны, поэтому работа с ними требует соблюдения необходимых мер техники безопасности. Керамика из BeO применяется в тех случаях, когда основным требованием к электроизоляционному материалу является особо высокая теплопроводность.

Наивысшей температурой плавления (3250 °C) из всех оксидов металлов обладает диоксид тория ThO_2 .

Керамика на основе диоксида циркония ZrO_2 сильно снижает ρ при высоких температурах (при 2000 °C значение ρ составляет всего 0,01 Ом·м), поэтому она иногда применяется даже как высокотемпературный проводниковый материал (стр. 228).

Безоксидные керамические материалы. Это нитриды, карбиды, силициды, бориды и их композиции. Некоторые из них являются полупроводниками (например, карбид кремния SiC — см. стр. 257), а некоторые — диэлектриками. Электроизоляционными материалами высокой нагревостойкости являются нитриды бора BN , кремния Si_3N_4 и др.

Нитрид бора (боразон), получаемый действием аммиака NH_3 на B_2O_3 или на

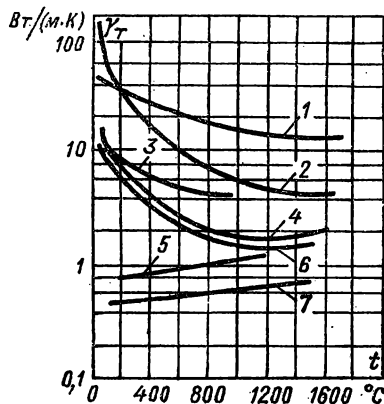


Рис. 6-43. Зависимости коэффициента теплопроводности некоторых высоконагревостойких материалов от температуры

1 — графит; 2 — BeO ; 3 — монокристалл кремния SiO ; 4 — MgO ; 5 — шамот; 6 — Al_2O_3 ; 7 — ZrO_2

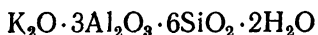
BCl_3 может работать при весьма высоких температурах, но в нейтральной или восстановительной среде; на воздухе он окисляется уже при температуре 800°C ; кипящая вода и слабые кислоты разрушают его с образованием H_3BO_3 и NH_3 . Температура плавления нитрида бора около 3000°C . Его коэффициент теплопроводности около $28 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, α_l (в интервале температур $20\text{—}1000^\circ\text{C}$) равен $7,5 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; $\rho = 2 \cdot 10^{11} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 20°C , $2 \cdot 10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 500°C и $300 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 1000°C ; ϵ_r и $\text{tg } \delta$ при нормальной температуре соответственно равны 4,15 и $7 \cdot 10^{-3}$.

Нитрид кремния Si_3N_4 . Температура плавления его 1600°C , коэффициент теплопроводности $17 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, $\alpha_l = 17 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$, $\rho = 10^{12} \text{ Ом}\cdot\text{м}$ при 20°C , 10^7 при 500°C и 20 при 1000°C ; при нормальной температуре $\epsilon_r = 9$.

6-18. СЛЮДА И СЛЮДЯНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Слюда является важнейшим из природных минеральных электроизоляционных материалов. Благодаря ее исключительно ценным качествам: высокой электрической прочности, нагревостойкости, влагостойкости, механической прочности и гибкости слюду применяют в ответственных случаях, в частности в качестве изоляции электрических машин высоких напряжений и больших мощностей (в том числе крупных турбогенераторов и гидрогенераторов, тяговых электродвигателей) и в качестве диэлектрика в некоторых конструкциях конденсаторов. Слюда встречается в природе в виде кристаллов, характерной особенностью которых является способность легко расщепляться на пластинки по параллельным друг другу плоскостям (*плоскости спайности*). Богатые месторождения слюд имеются и в нашей стране. Из зарубежных стран крупнейшими слюдяными месторождениями располагает Индия.

По химическому составу различные виды слюд представляют собой водные алюмосиликаты. Важнейшие из них: *мусковит*, состав которого приблизительно может быть выражен формулой



и *флогопит*



кроме того, в слюды могут входить соединения железа, натрия, кальция и др.

Мусковиты бывают бесцветными или имеют красноватый, зеленоватый и другие оттенки, флогопиты чаще всего темные: янтарные, золотистые, коричневые до почти черных, однако иногда встречаются флогопиты и весьма светлые. По электрическим свойствам мусковит лучше флогопита, кроме того, он более прочен механически, более тверд, гибок и упруг, чем флогопит (табл. 6-6).

Приведенные выше электроизоляционные параметры слюд относятся к случаю, когда электрическое поле перпендикулярно плоскостям спайности. Вдоль плоскостей спайности электроизоляционные свойства слюд значительно хуже: ρ всего лишь $10^6\text{—}10^8 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, ϵ_r от 11 до 16 (мусковит) и даже 23—46 (флогопит), $\text{tg } \delta$ порядка десятых долей. Так же сильно анизотропна и теплопроводность слюд. Коэффициент теплопроводности составляет примерно $0,44 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ для мусковита и $0,51 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ для флогопита перпендикулярно плоскостям спайности, а параллельно плоскостям спайности он на порядок выше. Плотность слюд $2,7\text{—}2,9 \text{ Мг/м}^3$, удельная теплоем-

Таблица 6-6

Электрические свойства слюды

Виды слюды	ρ , Ом·м	ϵ_r	tg $\delta \cdot 10^4$ при частоте		
			50 Гц	1 кГц	1 МГц
Мусковит	$10^{12}—10^{16}$	6—8	150	25	3
Флогопит	$10^{11}—10^{12}$	5—7	500	150	15

кость 0,86—0,87 кДж/(кг·К) — как для мусковита, так и для флогопита. На рис. 6-44 и 6-45 представлены типичные зависимости tg δ от температуры и $E_{пр}$ от толщины пластинки для мусковита среднего качества. Мусковит более стоек по отношению к истиранию, чем флогопит. Это важно для коллекторных миканитов (см. ниже); такой миканит, изготовленный из мусковита, истирался бы щетками машины в меньшей степени, чем медь коллектора, вследствие чего поверхность коллектора делалась бы неровной и в эксплуатации машины приходилось бы время от времени производить «продоразживание» коллектора. Коллекторный миканит из флогопита истирается наравне с медью, и при его применении «продоразживания» не требуется. Большинство применяемых в электротехнике слюд при нагреве до нескольких сот градусов Цельсия еще сохраняет сравнительно хорошие электрические и механические свойства, поэтому слюда относится к электроизоляционным материалам высшего класса нагревостойкости С (§ 5-3). При достижении некоторой достаточно высокой температуры из слюды начинает выделяться входящая в ее состав вода; при этом слюда теряет прозрачность, толщина ее увеличивается (слюда вспучи-

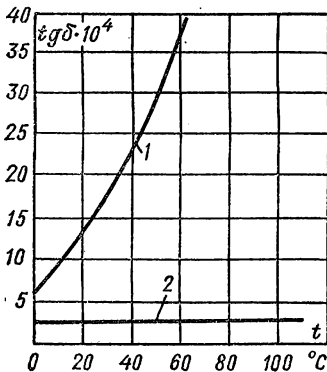


Рис. 6-44

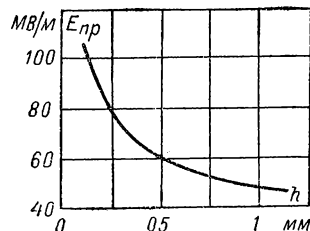


Рис. 6-45

Рис. 6-44. Зависимость tg δ слюды мусковит от температуры при частоте, равной 50 Гц (кривая 1) и 2 МГц (кривая 2)

Рис. 6-45. Зависимость электрической прочности слюды мусковит от толщины пластинки в неоднородном поле

вается), механические и электрические свойства ее ухудшаются. Плавятся слюды лишь при температуре 1145—1400 °С. Температура начала обезвоживания и резкого ухудшения свойств у различных слюд колеблется в весьма широких пределах: у мусковитов она обычно 200—600 °С, у флогопитов 800—900 °С. Однако у некоторых разновидностей флогопита с повышенным содержанием воды (гидратированный флогопит), характеризующихся пониженной твердостью и сравнительно низкими электроизоляционными параметрами, заметное ухудшение свойств наблюдается уже при нагреве до температур 150—250 °С; такая слюда может применяться лишь для малоответственных целей.

Слюда в природе обычно сопровождается другими минералами (кварцем, полевым шпатом) и встречается в виде жил, вкрапленных в твердые горные породы — обычно пегматиты. После взрывных работ и извлечения слюды из жилы она очищается от посторонних минералов и в таком виде носит название *забойного сырца*. Средний выход слюды в виде забойного сырца из породы составляет 1—2 % (редко — до 10 %). Забойный сырец подвергают ручной разборке и расщепляют ножом на пластинки, дефекты на краях которых (глубокие трещины) обрезают; затем слюда расщепляется на еще более тонкие пластинки; полученная *щепаная* слюда применяется для производства миканитов (см. стр. 178). Качество щепаной слюды прежде всего определяется размером пластинок. *Размер* условно определяется площадью наибольшего прямоугольника (с соотношением сторон от 1 : 1 до 1 : 3), который может быть вписан в контур пластинки:

Условный размер	50	40	30	20	15
Площадь прямоугольника, см²	50—65	40—50	30—40	20—30	15—20
Условный размер	10	6	4	4М	0,5
Площадь прямоугольника, см²	10—15	6—10	4—5	4—6	0,5—4

Слюда размеров 4М и 0,5 получается механическим расщеплением, а всех прочих размеров — ручным расщеплением. Площадь слюды размера 4М определяется по общей площади пластинки, а слюды размера 0,5 — просевом сквозь сито. Чем больше размер щепаной слюды, тем она дороже (считая на единицу массы). Слюда особо крупных размеров встречается весьма редко и добывается в ограниченных количествах. По *толщине* пластинок щепаная слюда разделяется на четыре группы:

I	0,01—0,02 мм	(для размеров от 50 до 6)
II	0,02—0,03 мм	
III	0,005—0,035 мм	(для размера 4)
IV	0,005—0,045 мм	(для размеров 4М и 0,5)

Кроме того, щепаная слюда разделяется на *сорты* по количеству минеральных включений и загрязнений (*пятен*) и по гладкости поверхности; учитывается также *форма* пластинок (чем более она приближается к квадратной, тем выше качество слюды).

Помимо щепаной слюды, которая в виде миканитов широко используется в изоляции электрических машин, слюда в электро- и радиопромышленности применяется в виде штампованных пластинок прямоугольной формы для конденсаторов (*конденсаторная слюда*), фасонных штампованных деталей в электронных и осветительных лампах, штампованных шайб в различных аппаратах и т. п. Конденсаторная слюда — мусковит наивысшего качества (так называется *образцовая конденсаторная слюда* марки СО, применяемая для изготовления измерительных конденсаторов) выпускается в виде пластин длиной от 7 до 60 мм и шириной от 4 до 50 мм; стандартные толщины этих пластин 20—25; 25—35; 35—45; 45—55 мкм. Значение $\text{tg } \delta$ слюды марки СО при частоте 1 МГц должно быть не более $3,3 \cdot 10^{-4}$.

ГОСТ предусматривает и другие марки конденсаторной слюды: фильтровую СФ, низкочастотную СНЧ, высокочастотную СВЧ и защитную СЗ, обладающие пониженными характеристиками по сравнению с СО. Для изоляции электрических машин слюду используют в виде клееных слюдяных изделий — миканитов, а также в виде слюдяных бумаг.

Миканиты — листовые или рулонные материалы, склеенные из отдельных лепестков слюды с помощью клеящего лака или сухой смолы, иногда с применением волокнистой подложки из бумаги или ткани, которая наклеивается с одной стороны или с обеих сторон; подложка увеличивает прочность материала на разрыв и затрудняет отставание лепестков слюды при изгибе материала.

Важнейшие виды миканитов, различающихся как областью применения, так и составом и технологией изготовления, получают условные обозначения, состоящие из двух или трех букв, иногда с добавлением цифры. Первая буква обозначает тип миканита (К — коллекторный, П — прокладочный, Ф — формовочный, Г — гибкий, М — микафолый, Л — микалента), вторая — тип примененной для изготовления миканита слюды (М — мусковит, Ф — флогопит, С — смесь мусковита и флогопита), третья и дальнейшие буквы и цифры — вид клеящего вещества и дополнительные характеристики материала.

Вследствие содержания большого количества (не менее 50 % по массе) слюды миканиты обладают сравнительно высокой нагревостойкостью и относятся к классу В даже при употреблении обычных клеящих веществ и органических подложек; при использовании специальных клеящих веществ и неорганических подложек (например, стеклоткани) получают материалы классов F и H, а нагревостойкие (без содержания органических веществ) миканиты, как и чистая слюда, относятся даже к классу нагревостойкости С.

Для производства *многослойных* (коллекторных, прокладочных) *миканитов* применяют механизированный способ клейки на башенной машине: порции слюды, отвешенные в количестве, необходимом для образования одного слоя, высыпает в верхнюю часть «башни» высотой в несколько метров, причем падающие на дно башни лепестки укладываются сравнительно равномерно; связующее или насыпают таким же образом между каждыми двумя слоями слюды в виде тонкого порошка сухой смолы, или же насыпанную до нужной толщины слюдяную заготовку пропитывают клеящим составом.

Твердые миканиты. К ним принадлежат коллекторный и прокладочный миканиты. Они являются твердыми как при нормальной, так и при повышенной (около 100 °С) температуре и применяются для плоских, не подвергающихся изгибу электроизоляционных прокладок.

Коллекторный миканит применяют в виде штампованных заготовок, которые прокладываются между медными пластинами коллекторов электрических машин (междупластинная изоляция коллектора). Коллекторный миканит изготавливается из слюды флогопит, как более легко истирающейся (см. стр. 176), размером от 6 до 0,5; связующим служит глифталъ или другие смолы; по сравнению с остальными типами миканитов он имеет наименьшее содержание связующего (не более 4 %) и высокую плотность (2,4—2,6 Мг/м³); при ударе издает характерный звенящий звук. Благодаря малому содержанию связующего и высокому давлению во время прессовки описываемый миканит имеет хорошие механические свойства, и в ча-

стности дает весьма малую усадку при работе в условиях большого давления и повышенной температуры; это обеспечивает прочность коллектора во время работы машины. Коллекторный миканит выпускается в листах толщиной от 0,4 до 1,5 мм. Он не должен давать скопления слюды и вытекания связующего при температуре 160 °С и давлении 60 МПа. Усадка по толщине при температуре 20 °С и давлении до 60 МПа должна быть не более 9—10 %, усадка при давлении 60 МПа и повышенной температуры до 160 °С — не более 2 %.

Прокладочный миканит. Его применяют для разного рода электроизоляционных прокладок, шайб и т. п. Изготавливается из мусковита, флогопита или их смеси размером от 6 до 0,5; связующее — глифталъ или кремнийорганическая смола. Содержит от 80 до 97 % слюды.

Формовочные миканиты при нормальной температуре также тверды, но при нагреве приобретают способность принимать ту или иную форму, которую сохраняют и при охлаждении. Их применяют при изготовлении коллекторных манжет (изоляция коллектора от вала электрической машины), а также фланцев, карасов катушек, трубок и других фасонных изделий. Формовочные миканиты изготавливают в листах толщиной от 0,1 до 0,5 мм. Содержание слюды от 80 до 95 %; связующее — глифталъ или кремнийорганическая смола в количестве от 5 до 20 %.

Особая разновидность формовочного миканита — микафолит. Он имеет с одной стороны подложку из бумаги, стеклоткани или стеклосетки и применяется для изготовления твердой изоляции стержней якорных обмоток машин высокого напряжения, где требуются большие усилия при намотке. Микафолит изготавливается из флогопита или мусковита, связующее — глифталевый, полиэфирный или кремнийорганический лак. Выпускается в рулонах или листах толщиной 0,15—0,30 мм. Содержание слюды в микафолите не менее 45—50 %. Средняя электрическая прочность микафолита из флогопита не менее 13 МВ/м, а из мусковита — не менее 15—16 МВ/м.

Гибкие миканиты обладают гибкостью при нормальной температуре. Они предназначаются для изоляции различных частей электрических машин и аппаратов (гибкие прокладки, обмотка секций, пазовая изоляция). Изготавливаются в листах толщиной от 0,15 до 0,50 мм из мусковита или флогопита на масляно-битумном лаке без сиккативов, масляно-глифталевом или кремнийорганическом лаке. Кроме того, выпускаются гибкие миканиты, оклеенные с обеих сторон бумагой. Содержание слюды в гибких миканитах без подложки должно составлять 75—90 %, а в оклеенных — не менее 50 %.

Разновидность гибкого миканита — микалента — клеится из щепаной слюды крупных размеров (от 30 до 6) только в один слой, с перекрытием пластин примерно на одну треть; она имеет с обеих сторон подложки из стеклоткани, стеклосетки или микалентной бумаги. Толщина микаленты 0,1; 0,12; 0,15 и 0,17 мм. Она выпускается в рулонах шириной от 10 до 35 мм. Микалента является очень ответственным видом продукции; она образует основную изоляцию обмоток многих электрических машин высокого напряжения. Для того чтобы микалента сохраняла гибкость до момента употребления, ее следует держать в герметически запаиваемой таре (например, в запаиваемых жестянках), заполненной насыщенным паром соответствующего лакового растворителя. При пересыхании микаленты ее надо выдержать в парах растворителя.

Нагревостойкий (термоупорный) миканит, не содержащий органических веществ, применяют для изоляции электронагревательных приборов и в других случаях, когда миканитовая изоляция должна работать при температуре в несколько сот градусов. Такой миканит изготавливается в листах толщиной 0,2—1,0 мм из нагревостойких разновидностей слюды флогопит; связующим служит раствор фосфорнокислого аммония (аммофоса); при изготовлении миканит подвергается специальной термообработке. Изготавливается также нагревостойкий миканит, в котором связующим служит легкоплавкое стекло.

Слюдиниты и слюдопласты. Высокая трудоемкость изготовления щепаной слюды и миканитовой изоляции стимулировали разработку новых материалов из слюдяных отходов без предварительной ручной щепки. Эти материалы называют слюдяными бумагами. Два основных вида слюдяных бумаг — слюдиниты и слюдопласты.

Слюдаиниты (за рубежом — самика) изготавливают по следующей технологической схеме: слюда мусковит (в частности, отходы, получаемые при щепке слюды) подвергается термообработке при температуре до 900 °С. При этом кристаллы слюды теряют входящую в их состав воду и сильно вспучиваются. Вспученные кристаллы обрабатывают щелочными и кислотными растворами и тщательно промывают водой. Масса (пульпа) из измельченной слюды с водой отливается на сетку бумагоделательной машины (стр. 141), причем получается слюдаинитовая бумага толщиной от 10 до 150 мкм; элементарные частицы слюдаинитов имеют плоскую форму: толщина их около 1 мкм, длина и ширина порядка десятых долей миллиметра. Электрическая прочность слюдаинитов в сухом состоянии 15—20 МВ/м; бумага разрушается при соприкосновении с водой или другими полярными жидкостями. При пропитке, склеивании с одной или двумя подложками и тому подобной обработке получают листовые слюдаиниты (коллекторный, формовочный, гибкий), слюдаинитофоль (рулонный материал из слюдаинитовой бумаги с целлюлозным подслоем, пропитанный лаком) и слюдаинитовые ленты, которые в некоторых случаях с успехом могут заменить соответствующие миканиты, микафоль и микаленту. Слюдаинитовые материалы по свойствам приближаются к миканитовым и даже имеют преимущество — большую равномерность свойств по площади; при применении связующих (эпоксидных, кремнийорганических и других) и подложек (стекловолоконистых) они могут иметь достаточно высокую механическую прочность и нагревостойкость. Но слюдаинитовые материалы имеют и недостатки: пониженную, как правило, по сравнению с миканитами влагостойкость, малое удлинение перед разрывом.

Слюдопласты изготавливают, используя свойство чистых поверхностей недавно расколотых кристаллов природной слюды при их сложении вместе вновь прочно соединяться когезионными силами. В производстве слюдопластовой бумаги измельченные чешуйки слюды флогопит или мусковит отливаются на бумагоделательной машине как и слюдаинитовые бумаги: получают бумаги толщиной от 0,4 до 0,2 мм с пределом прочности при растяжении до 90 МПа даже без применения связующих. На основе слюдопластовых бумаг соответствующими технологическими приемами с использованием связующих, а если требуется — подложек, изготавливаются слюдопласты: коллекторный, прокладочный, формовочный и гибкий, стеклослюдопласт, слюдопластофоль, слюдопластовая лента и др. Слюдопласты, как правило, имеют более высокую механическую прочность, а также более высокую короностойкость по сравнению со слюдаинитами.

В настоящее время в СССР выпускается 80 марок слюдосодержащих материалов на основе слюдаинитовых и слюдопластовых бумаг, в том числе коллекторные, формовочные, гибкие и ленточные электроизоляционные материалы, заменяющие традиционные миканиты, получаемые из природной щепаной слюды. Коллективу работников Всесоюзного научно-исследовательского института электроизоляционных материалов и фольгированных диэлектриков (ВНИИЭИМ)

и других организаций Н. В. Александрову, В. Б. Березину, В. Г. Огонькову, А. И. Петрашко, А. В. Хвальковскому и другим в 1983 г. была присуждена Государственная премия СССР за комплекс работ по разработке и внедрению в народное хозяйство широкой номенклатуры электроизоляционных материалов на основе слюдяных бумаг. Разработанные этими авторами многочисленные новые слюдинитовые и слюдопластовые материалы обеспечивают повышение надежности электротехнического оборудования, улучшение качества и повышение удельной мощности электрических машин. Практически во всех типах электрических машин разного назначения, классов нагревостойкости В, F и H слюдинитовые и слюдопластовые материалы являются основой термореактивности системы изоляции.

Микалекс — твердый материал с большим содержанием наполнителя (слюды) и с легкоплавким стеклом в качестве связующего. Пластины, стержни и детали различной формы из микалекса получают смешением порошков молотой слюды мусковит и стекла, горячим (при температуре около 600 °C) прессованием и последующей термообработкой отпрессованных изделий. Микалекс обладает высокой нагревостойкостью, дугостойкостью, большой механической прочностью, допускает механическую обработку, шлифовку и т. п. Этот материал используется, главным образом, в радиотехнике и электровакуумной технике; из него изготавливают держатели мощных ламп, гребенки катушек индуктивности, платы и т. п. В некоторых случаях используется возможность запрессовывать в микалекс металлические детали. Физические свойства микалекса приведены ниже:

Плотность	2,6—3,0 Мг/м ³
Допустимая рабочая температура	300—350 °C
Температурный коэффициент линейного расширения	$8 \cdot 10^{-6}$ К ⁻¹
Удельная ударная вязкость	2—5 кДж/м ²
Предел прочности	
при растяжении	30—70 МПа
при сжатии	100—400 МПа
при изгибе	70—140 МПа
Удельное объемное сопротивление	10^{10} — 10^{12} Ом·м
Диэлектрическая проницаемость	6,0—8,5
Температурный коэффициент диэлектрической проницаемости	$3 \cdot 10^{-4}$ К ⁻¹
Тангенс угла диэлектрических потерь при 1 МГц	0,003—0,010
Электрическая прочность при 50 Гц	10—20 МВ/м

Так как технологический процесс изготовления микалекса сложен и требует специальных электрических печей и прессов, пресс-форм из нагревостойкой нержавеющей стали и других устройств, материал весьма дорог и не получил широкого распространения. В последнее время микалекс часто заменяется специальными видами керамических материалов.

Синтетическая слюда. Большой интерес представляет возможность получения (путем расплавления в высокотемпературной печи шихты специально подобранных химического состава с последующей кристаллизацией расплава при весьма медленном охлаждении) *синтетической слюды*. При соответствующем подборе состава шихты удается получить синтетическую слюду (*фторфлогопит*), обладающую более высокой химической стойкостью, нагревостойкостью, радиационной стойкостью, чем природный флогопит; по составу фторфлогопит отличается от флогопита тем, что в нем гидроксильные группы ОН заменены ионами фтора. Синтетическая слюда много дороже природной, получается в виде кристаллов сравнительно малых размеров и труднее, чем природная слюда, расщепляется, поэтому синтетическая слюда не может рассматриваться как заменитель природной слюды, однако, вслед-

ствие высоких электрических свойств и большой однородности их, представляет собой перспективный материал. Фторфлогопит применяется для изготовления штампованных деталей (работающих в интервале температур от -200 до $+800^{\circ}\text{C}$), а также для изготовления микалекса (обладающего более высокими свойствами, чем микалекс, основанный на природной слюде).

6-19. АСБЕСТ И АСБЕСТОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Асбест — название группы минералов, обладающих волокнистым строением. Наиболее распространенный тип асбеста — *хризотилевый* — представляет собой волокнистую разновидность минерала хризотила $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Асбест залегает в каменной породе в виде жил, состоящих из параллельных друг другу волокон. Длина волокна, равная толщине жил, колеблется от десятых долей миллиметра до нескольких сантиметров; чем длиннее волокно, тем выше сорт асбеста и тем он дороже, но длиноволокнистый асбест встречается сравнительно редко. При добыче асбеста особо длинное волокно выбирают вручную во избежание его повреждения; основная масса коротковолокнистого асбеста извлекается механизированным путем. В Советском Союзе имеются значительные месторождения асбеста, в частности, на Урале (вблизи города Асбеста).

Преимуществом асбеста перед волокнистыми органическими материалами (см. § 6-12) является высокая нагревостойкость: прочность асбеста практически еще сохраняется при температурах, при которых обычные органические волокна уже полностью разрушаются. Лишь при температуре 400 — 500°C из асбеста удаляется входящая в его состав вода, он изменяет свою кристаллическую структуру и теряет механическую прочность. Плавится асбест при температуре выше 1150°C . Предел прочности при растяжении асбестового волокна 30 — 40 МПа; однако изгиб и всякого рода механическая обработка (распушка, прядение) волокон сильно снижают прочность асбеста. Асбест обладает заметной гигроскопичностью, которая уменьшается при пропитке смолами, битумами и т. п. Хризотилевый асбест растворяется в кислотах, даже слабых; но некоторые, сравнительно редкие виды асбестов обладают повышенной кислотостойкостью. Диэлектрические свойства асбеста невысоки, поэтому он не применяется в изоляции для высоких напряжений и высоких частот. В асбесте часто встречаются примеси, в частности соединения железа. Железо, химически не связанное с основным веществом асбеста, мало влияет на электроизоляционные свойства последнего, но высокое содержание примеси отдельных зерен полупроводящего магнетита Fe_3O_4 весьма вредно. Часть магнетита может быть удалена из асбеста путем магнитной сепарации.

Асбест широко применяется в различных областях электротехники. Из асбеста изготавливают пряжу, ленты, ткани, бумаги, картон и другие изделия. Они сравнительно грубые, жесткие и толстые по сравнению с аналогичными материалами из органических волокон; так, асбестовые ленты выпускаются толщиной $0,4$ — $0,5$ мм при ширине ленты 27 , 25 и 30 мм, асбестовые ткани — толщиной $1,6$ — $2,9$ мм, асбестовые бумаги — толщиной $0,2$ — $1,0$ мм. Ленты из асбеста с высоким содержанием магнетита (железистые асбестовые ленты) наряду с полупроводящими лаками используются в электрических машинах высокого напряжения для улучшения картины электрического поля в местах выхода секций обмотки из пазов. В последнее время асбест в виде текстильных электроизоляционных изделий часто заменяют стеклянным волокном (см. § 6-16), также имеющим высокую нагревостойкость, но обладающим лучшими электроизоляционными свойствами и образующим изоляцию меньшей толщины.* Асбест в качестве волокнистого наполнителя входит в состав пластических масс с органическими связующими, которые обычно имеют более высокие нагревостойкость и механическую прочность по сравнению с массами на том же связующем, но с органическим наполнителем. Асбестовая бумага и ткань образуют основу слоистых пластиков — *асбогетинакса* и *асботекстолита* (стр. 155).

Асбоцемент — твердый материал холодной прессовки чисто неорганического состава, в котором наполнителем является асбест, а связующим — цемент. При изготовлении асбоцемента распушенное асбестовое волокно смешивают с цементом и водой и прессуют, причем цемент твердеет под действием воды и прочно соединяет волокна асбеста. Асбоцемент выпускается в виде досок толщиной 4 — 40 мм,

труб и фасонных изделий. Он имеет неплохие механические свойства и высокую нагревостойкость, искростоек и дугостоек, поэтому его применяют для изготовления распределительных досок и щитов, стенок искрогасительных камер и перегородок. Пропитка асбоцементных изделий для уменьшения гигроскопичности и улучшения электроизоляционных свойств производится по окончании механической обработки (сверление, фрезерование), если такая обработка требуется. Перед пропиткой изделия сушат при температуре 150 °С. При пропитке льняным маслом изделия выдерживают в горячем масле и вынимают из него лишь после охлаждения, а затем прогревают при доступе воздуха и температуре 105 °С для запечки масла. При пропитке битумом асбоцементные изделия выдерживают в расплавленном битуме при температуре не ниже 200 °С в течение 1—2 ч на миллиметр толщины изделия, после чего изделия вынимают и дают стечь избытку битума.

6-20. НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ

В различных областях электротехники используются тонкие нагревостойкие диэлектрические пленки, которые наносятся на поверхность металла, или полупроводника, или на иные подложки. Такие пленки из заранее подготовленного вещества могут наноситься способами испарения в вакууме, шоопированием и другими способами; возможно также осаждение исходных веществ, которые в результате химической реакции между собой дают диэлектрическую пленку. Рассмотрим представляющие большой интерес пленки, получаемые *окислированием* — термическим, электрохимическим или плазменным — металла-подложки; таким образом, диэлектрическая пленка получается на поверхности металла в виде химического соединения этого металла с кислородом. Это так называемая *оксидная изоляция*. Для суждения о том, может ли на данном металле образовываться оксидная изоляция в виде *сплошного* слоя, вводится *объемный коэффициент окислирования*, т. е. отношение объема оксида к объему металла, вошедшего в этот оксид:

$$K = \frac{M\rho_M}{nA\rho_O}, \quad (6-3)$$

где M — молекулярная масса оксида; ρ_M — плотность металла; n — число атомов металла, входящих в молекулу оксида; A — атомная масса металла; ρ_O — плотность оксида.

Если $K > 1$, образующийся оксидный слой может дать на металле сплошное покрытие, если же $K < 1$, то сплошное покрытие получено быть не может.

Например, для алюминия, который в обычных условиях всегда покрыт на воздухе тонкой пленкой оксида Al_2O_3 (см. стр. 202), имеем $A = 26,97$; $\rho_M = 2,7 \text{ Мг/м}^3$; $M = 101,91$; $n = 2$; $\rho_O = 3,2 \text{ Мг/м}^3$, так что формула (6-3) дает $K = 1,6$. В то же время, например, для железа $K < 1$, вследствие чего сплошной оксидный слой на железе не получается.

Чаще всего на практике применяется оксидная изоляция именно на алюминии (имеется в виду не естественный, весьма тонкий слой оксида, использующийся для изоляции лишь при малых, менее 1 В, напряжениях между соприкасающимися алюминиевыми проводниками, а получаемый путем специальной обработки сравнительно более толстый оксидный слой), которая имеет существенно большие пробивные напряжения (рис. 6-46). Практически оксидная изоляция алюминия получается посредством электрохимической анодной обработки этого металла. Если в ванну с кислотным электролитом погрузить два электрода, один из которых выполнен из алюминия, и подать на них постоянное напряжение так, чтобы алюминиевый электрод являлся анодом и на нем выделялся бы кислород, то сила тока, идущего через ванну, будет быстро уменьшаться, а на поверхности алюминиевого электрода, погруженного в ванну, будет образовываться все более толстая оксидная пленка. Возможно применение для окислирования алюминия и переменного напряжения, причем оба электрода или большее их число (при многофазном напряжении) изготовляются из алюминия.

По методам получения, свойствам и областям применения оксидные пленки из алюминия могут быть разделены на два класса. Оксидные пленки первого класса предназначены для работы как в контакте с жидким электролитом, находящимся

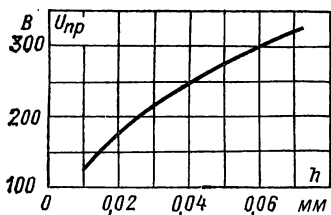


Рис. 6-46. Зависимость пробивного напряжения оксидной изоляции алюминия (пленки второго класса) от ее толщины

в свободном состоянии или пропитывающим твердый пористый материал (в оксидных электролитических конденсаторах), так и в контакте с твердым веществом (в оксидно-полупроводниковых конденсаторах или с металлическими слоями в металлооксидных конденсаторах). Оксидная пленка *первого класса* — практически сплошная (непористая), высокой плотности, приближающейся к теоретической плотности оксида алюминия $3,2 \text{ Мг/м}^3$, и тонкая, толщиной не более 2 мкм . Эта пленка получается электрохимическим оксидированием алюминия в слабых, не растворяющих оксидную пленку электролитах (например, в водных растворах борной кислоты и ее солей); такой процесс получения оксидной пленки называют *формовой*. Оксидные пленки *второго класса* могут использоваться как электрическая изоляция исключительно в виде покрытий на проводниках, работающих в сухом состоянии (изоляция алюминиевых проводов сухих трансформаторов, электромагнитов и т. п.). Оксидные пленки второго класса обладают заметно выраженной пористостью: их объемная масса составляет лишь $2,5 \text{ Мг/м}^3$. Пленки второго класса могут применяться в качестве покрытий: не только электроизоляционного, но и антикоррозионного, а также декоративного (для получения алюминия, окрашенного в разные цвета); используются и для получения различных изображений на алюминии. Оксидные пленки второго класса обычно получают электрохимическим оксидированием в сильных электролитах, растворяющих оксидную пленку, например в водных растворах серной или хромовой кислоты; этот процесс называется *анодированием*. Через ванну с электролитом пропускается алюминиевая проволока, поверхность которой предварительно тщательно очищается. Меняя скорость прохождения проволоки через ванну заданной длины и другие условия, можно регулировать толщину наносимой на проволоку оксидной изоляции.

Оксидная изоляция алюминия относится к классу нагревостойкости С. Так как температура плавления оксида алюминия очень высока, около 2050°C , можно нагреть алюминиевый оксидированный провод до температуры плавления металла (см. стр. 188) без повреждения изоляции. Однако недостатками оксидной анодированной изоляции являются ее малая гибкость и заметная из-за пористости пленки гигроскопичность. В тех случаях, когда не требуется особо высокой нагревостойкости, оксидная изоляция может пропитываться и покрываться лаком.

Из оксидированного алюминия могут изготавливаться катушки, работающие при высокой плотности тока. Малая толщина оксидной изоляции, облегчая теплоотвод, иногда позволяет компенсировать увеличение удельного сопротивления материала проволоки при замене меди алюминием (см. стр. 201). В некоторых случаях оказывается предпочтительным изготавливать обмотки не из проводов круглого сечения, а из алюминиевой анодированной ленты; в последние годы анодированные алюминиевые лента и фольга применяются в электротехнике даже чаще, чем круглые анодированные провода.

Однако массовое применение имеет оксидная изоляция первого класса на алюминии в уже упоминавшихся алюминиевых оксидных конденсаторах, обладающих весьма высокой емкостью при малых габаритных размерах и массе, так как диэлектриком такого конденсатора является тонкая оксидная пленка с диэлектрической проницаемостью около 10.

Более перспективны танталовые (ϵ_r оксида тантала Ta_2O_5 около 27) и ниобиевые (ϵ_r оксида ниобия Nb_2O_5 примерно 40) оксидные конденсаторы.

Для получения оксидной изоляции на поверхности сплавов высокого сопротивления типа нихрома, константана и других (см. стр. 220) можно применять *термическое оксидирование*. Покрытую оксидной изоляцией проволоку из сплава высокого сопротивления можно наматывать при изготовлении проволочных резисторов плотно, виток к витку, конечно, если напряжение между ними не слишком велико. Достаточно гибкая и механически прочная оксидная изоляция на поверхности константана получается при кратковременном (не более 3 с) нагреве проволоки на воздухе примерно до 900°C . Для этой цели перематывающаяся с одной катушки на другую проволока проходит через два металлических ролика, к которым подведено

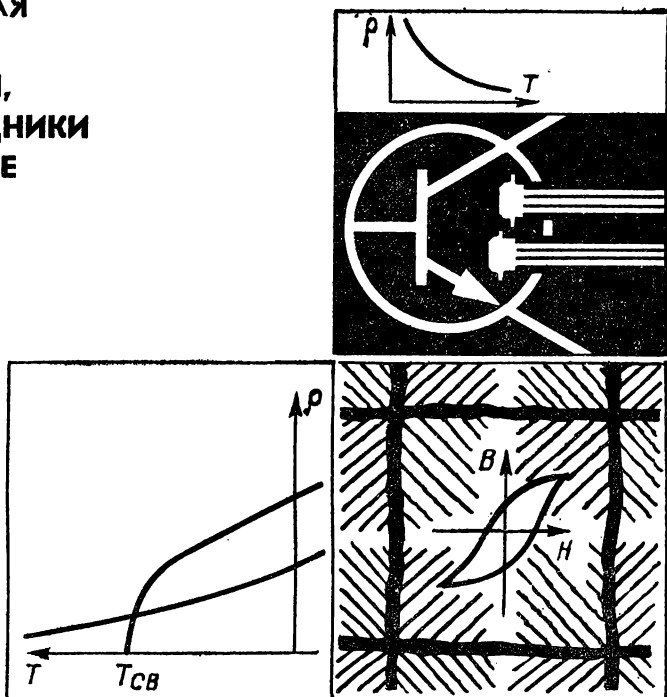
напряжение. Регулируя скорость движения проволоки и напряжение, можно подобрать режим, наиболее подходящий для термического оксидирования проволоки определенного диаметра из сплава данного состава.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Оцените особенности газов, жидкостей и твердых тел в отношении требований, предъявляемых к электрической изоляции.
2. Приведите классификацию диэлектриков по их свойствам и областям применения.
3. Перечислите наиболее широко применяемые линейные и пространственные полимеры и укажите их особенности.
4. Какую роль играют волокнистые материалы в электрической изоляции? Приведите их виды и отличительные свойства.
5. Какие пропитывающие вещества используются в электрической изоляции? Перечислите основные методы сушки, пропитки и компаундировки изделий.
6. Какие преимущества обеспечивает применение электроизоляционной керамики и стекол?
7. Для каких целей в электротехнике используется слюда и ее производные?
8. Что такое сегнетоэлектрики и каковы их особенности?
9. Какие электроизоляционные материалы наиболее пригодны для современных гибких автоматизированных производств (ГАП)?
10. Каковы экономические предпосылки применения пластмасс и керамики?

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ПРОВОДНИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ



ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

7-1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Классификация. В качестве проводников электрического тока могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются *металлы* и их *сплавы*.

Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены *металлы высокой проводимости*, имеющие удельное сопротивление ρ при нормальной температуре не более $0,05 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, и *сплавы высокого сопротивления*, имеющие ρ при нормальной температуре не менее $0,3 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$. Металлы высокой проводимости используются для проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов и т. п. Металлы и сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т. п.

Особый интерес представляют собой обладающие чрезвычайно малым удельным сопротивлением при весьма низких (криогенных)

температурах материалы — *сверхпроводники* и *криопроводники*; они будут рассмотрены ниже.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Для большинства металлов температура плавления высока (см. табл. 7-1, в которой приведены приблизительные значения важнейших физических параметров металлов, представляющих интерес для электротехники); только ртуть, имеющая температуру плавления около минус 39 °С, может быть использована в качестве жидкого металлического проводника при нормальной температуре. Другие металлы являются жидкими проводниками при повышенных температурах.

Механизм прохождения тока в металлах — как в твердом, так и в жидком состоянии — обусловлен движением (дрейфом) свободных электронов под воздействием электрического поля; поэтому металлы называют *проводниками с электронной электропроводностью* или *проводниками первого рода*. *Проводниками второго рода*, или *электролитами*, являются растворы (в частности, водные) кислот, щелочей и солей. Прохождение тока через эти вещества связано с переносом вместе с электрическими зарядами ионов в соответствии с законами Фарадея, вследствие чего состав электролита постепенно изменяется, а на электродах выделяются продукты электролиза. Ионные кристаллы в расплавленном состоянии также являются проводниками второго рода. Примером могут служить соляные закалочные ванны с электронагревом.

Все газы и пары, в том числе и пары металлов, при низких напряжениях электрического поля не являются проводниками. Однако, если напряженность поля превзойдет некоторое критическое значение, обеспечивающее начало ударной и фотоионизации, то газ может стать проводником с электронной и ионной электропроводностью. Сильно ионизированный газ при равенстве числа электронов числу положительных ионов в единице объема представляет собой особую проводящую среду, носящую название *плазмы*.

Электропроводность металлов. Общие представления о строении металлических проводников и о зонной теории электропроводности твердых тел были даны в § В-1.

Классическая электронная теория металлов представляет твердый проводник в виде системы, состоящей из узлов кристаллической ионной решетки, внутри которой находится электронный газ из коллективизированных (свободных) электронов. В свободное состояние от каждого атома металла переходит от одного до двух электронов. К электронному газу применялись представления и законы статистики обычных газов. При изучении хаотического (теплого) и направленного под действием силы электрического поля движения электронов был выведен закон Ома. При столкновениях электронов с узлами кристаллической решетки энергия, накопленная при ускорении электронов в электрическом поле, передается металлической основе проводника, вследствие чего он нагревается. Рассмотрение этого вопроса привело к выводу закона Джоуля—Ленца. Таким образом, электронная теория металлов дала возможность аналити-

Главнейшие усредненные

Металл	Температура плавления, °C	Температура кипения, °C	Плотность, Мг/м³
Ртуть Hg	—38,9	357	13,60
Цезий Cs	28,5	700	1,87
Галлий Ga	29,7	2070	5,91
Калий K	63,7	775*	0,87
Натрий Na	97,8	883	0,97
Индий In	156,0	2075	7,28
Литий Li	186,0	1220	0,53
Олово Sn	232,0	2260	7,31 *
Кадмий Cd	321,0	767	8,65
Свинец Pb	327,0	1620	11,40
Цинк Zn	420,0	907	7,14
Магний Mg	651,0	1103	1,74
Алюминий Al	657,0	1800	2,70
Барий Ba	710,0	1637	3,50
Серебро Ag	961,0	1950	10,50
Золото Au	1063,0	2600	19,30
Медь Cu	1083,0	2300	8,94
Бериллий Be	1284,0	2500	1,85
Никель Ni	1455,0	2900	8,90
Кобальт Co	1492,0	2900	8,71
Железо Fe	1535,0	3000	7,87
Палладий Pd	1554,0	2200	12,10
Титан Ti	1725,0	2800	4,50
Хром Cr	1850,0	2430	7,10
Платина Pt	1770,0	4240	21,40
Торий Th	1850,0	3500	11,50
Цирконий Zr	1860,0	4900	6,50
Иридий Ir	2350,0	4800	22,50
Нюбий Nb	2410,0	3300	8,57
Молибден Mo	2620,0	3700	10,20
Тантал Ta	2850,0	4200	16,70
Рений Re	3180,0	—	20,50
Вольфрам W	3380,0	5500	19,30

* В гексагональной β -модификации.

чески описать и объяснить найденные ранее экспериментальным путем основные законы электропроводности и потерь электрической энергии в металлах. Оказалось возможным также объяснить и связь между электропроводностью и теплопроводностью металлов [см. формулу (7-7)]. Кроме того, некоторые опыты подтвердили гипотезу об электронном газе в металлах, а именно:

1. При длительном пропускании электрического тока через цепь, состоящую из одних металлических проводников, не наблюдается проникновения атомов одного металла в другой.

2. При нагреве металлов до высоких температур скорость теплового движения свободных электронов увеличивается, и наиболее

Таблица 7-1

свойства металлов при 20 °C

Удельная теплоем- кость, Дж/(кг·К)	Коэффициент теплопроводно- сти, Вт/(м·К)	ТК линейного расширения $\times 10^6$, К ⁻¹	Удельное сопротивле- ние, мкОм·м	ТК удельно- го сопроти- вления $\times 10^4$, К ⁻¹	Работа выхо- да электро- нов, эВ
138	10	61,0	0,958	9	4,5
234	—	95,0	0,210	48	1,9
381	—	18,0	0,560	—	—
753	92	80,0	0,069	58	2,2
1260	125	70,0	0,046	50	2,3
243	25	25,0	0,090	47	—
3620	71	—	—	—	—
226	65	23,0	0,120	44	4,4
230	93	30,0	0,076	42	4,0
130	35	29,0	0,210	37	—
390	111	31,0	0,059	—	—
1040	167	26,0	0,045	42	3,6
922	209	24,0	0,028	42	4,3
268	—	17,0	0,500	25	—
234	415	19,0	0 016	40	4,4
126	293	14,0	0,024	38	4,8
385	390	16,0	0,017	43	4,3
200	167	13,0	0 040	60	3,9
444	95	13,0	0,073	65	5,0
435	79	12,0	0,062	60	—
452	73	11,0	0,098	60	4,5
243	72	12,0	0,110	—	—
577	15	8,1	0,480	33	—
—	—	6,5	0,210	—	—
134	71	9,0	0,105	—	—
113	—	11,2	0,186	23	3,3
276	17	5,4	0,410	45	3,7
—	—	—	—	—	—
272	50	7,2	0,140	30	4,4
264	151	5,1	0,057	46	4,2
142	54	6,5	0,135	38	4,1
138	71	4,7	0,210	32	4,8
218	168	4,4	0,055	46	4,5

быстрые из них могут вылетать из металла, преодолевая силы поверхностного потенциального барьера.

3. В момент неожиданной остановки быстро двигавшегося проводника происходит смещение электронного газа по закону инерции в направлении движения. Смещение электронов приводит к появлению разности потенциалов на концах заторможенного проводника, и стрелка подключаемого к ним измерительного прибора отклоняется по шкале.

4. Исследуя поведение металлических проводников в магнитном поле, установили, что вследствие искривления траектории электронов в металлической пластинке, помещенной в поперечное магнитное

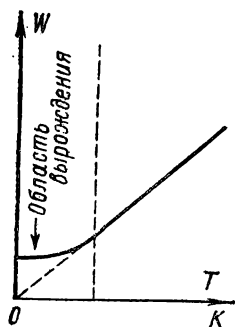


Рис. 7-1. Зависимость энергии электронного газа от термодинамической температуры

поле, появляется поперечная ЭДС и изменяется электрическое сопротивление проводника.

Однако выявились и противоречия некоторых выводов теории с опытными данными. Они состояли в расхождении температурной зависимости удельного сопротивления, наблюдаемой на опыте и вытекающей из положений теории; в несоответствии теоретически полученных значений теплоемкости металлов опытным данным.

Наблюдаемая теплоемкость металлов меньше теоретической и такова, как будто электронный газ не поглощает теплоту при нагреве металлического проводника. Эти противоречия удалось преодолеть, рассматривая некоторые положения с позиций квантовой механики. В отличие от классической электронной теории в квантовой механике принимается, что электронный газ в металлах при обычных температурах находится в состоянии вырождения. В этом состоянии энергия электронного газа почти не зависит от температуры, как это показано на рис. 7-1, т. е. тепловое движение почти не изменяет энергию электронов. Поэтому на нагрев электронного газа теплота не затрачивается, что и обнаруживается при измерении теплоемкости металлов. В состоянии, аналогичное обычным газам, электронный газ приходит при температуре порядка тысяч кельвинов. Представляя металл как систему, в которой положительные ионы скрепляются посредством свободно движущихся электронов, легко понять природу всех основных свойств металлов: пластичности, ковкости, хорошей теплопроводности и высокой электропроводности.

Свойства проводников. К важнейшим параметрам, характеризующим свойства проводниковых материалов, относятся: 1) удельная проводимость γ или обратная ей величина — удельное сопротивление ρ , 2) температурный коэффициент удельного сопротивления $\text{TK}\rho$ или α_ρ , 3) коэффициент теплопроводности γ_t , 4) контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС), 5) работа выхода электронов из металла, 6) предел прочности при растяжении σ_p и относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$.

Удельная проводимость и удельное сопротивление проводников. Связь плотности тока J (в амперах на квадратный метр) и напряженности электрического поля (в вольтах на метр) в проводнике дается известной формулой:

$$J = \gamma E \quad (7-1)$$

(дифференциальная форма закона Ома); здесь γ (в сименсах на метр) параметр проводникового материала, называемый его *удельной проводимостью*; в соответствии с законом Ома γ металлических проводников не зависит от напряженности электрического поля E при изменении последней в весьма широких пределах. Величина $\rho = 1/\gamma$,

обратная удельной проводимости и называемая удельным сопротивлением, для имеющего сопротивление R проводника длиной l с постоянным поперечным сечением S вычисляется по формуле

$$\rho = RS/l. \quad (7-2)$$

Удельное сопротивление измеряется в ом-метрах. Для измерения ρ проводниковых материалов разрешается пользоваться внесистемной единицей Ом·мм²/м; очевидно, что проволока из материала длиной 1 м с поперечным сечением 1 мм² имеет сопротивление в омах, численно равно ρ материала в Ом·мм²/м. Вместо единицы Ом·мм²/м предпочтительно применять равную ей по размеру единицу СИ мкОм·м. Связь между названными единицами удельного сопротивления:

$$1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ мкОм} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}.$$

Диапазон значений удельного сопротивления ρ металлических проводников (при нормальной температуре) довольно узок: от 0,016 для серебра и до примерно 10 мкОм·м для железохромоалюминиевых сплавов, т. е. он занимает всего три порядка. Значения удельного сопротивления ρ некоторых металлов приведены в табл. 7-1. Удельная проводимость металлических проводников согласно классической теории металлов может быть выражена следующим образом:

$$\gamma = \frac{e^2 n_0 \lambda}{2m v_T}, \quad (7-3)$$

где e — заряд электрона; n_0 — число свободных электронов в единице объема металла; λ — средняя длина свободного пробега электрона между двумя соударениями с узлами решетки; m — масса электрона; v_T — средняя скорость теплового движения свободного электрона в металле.

Преобразование выражения (7-3) на основе положений квантовой механики приводит к формуле

$$\gamma = K n_0^{2/3} \lambda, \quad (7-4)$$

где K — численный коэффициент; остальные обозначения — прежние.

Для различных металлов скорости хаотического теплового движения электронов v_T (при определенной температуре) примерно одинаковы. Незначительно различаются также и концентрации свободных электронов n_0 (например, для меди и никеля это различие меньше 10 %). Поэтому значение удельной проводимости γ (или удельного сопротивления ρ) в основном зависит от средней длины свободного пробега электронов в данном проводнике λ , которая, в свою очередь, определяется структурой проводникового материала. Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления; примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ . К такому же выводу можно прийти, исходя из волновой природы электронов. Рассеяние электронных волн происходит на дефектах кристаллической решетки, которые соизмеримы с расстоянием около четверти

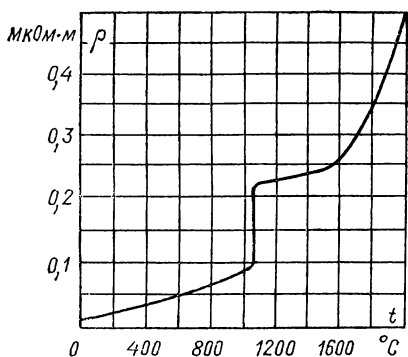


Рис. 7-2. Зависимость удельного сопротивления ρ меди от температуры. Скачок соответствует температуре плавления меди 1083 °C

длины электронной волны. Нарушения меньших размеров не вызывают заметного рассеяния волн. В металлическом проводнике, где длина волны электрона около 0,5 нм, микродефекты создают значительное рассеяние, уменьшающее подвижность электронов, и, следовательно, приводит к росту ρ материала.

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов. Число носителей заряда (концентрация свободных электронов) в металлическом проводнике при повышении температуры практически остается неизменным. Однако вследствие усиления колебаний узлов кристаллической решетки с ростом температуры появляется все больше и больше препятствий на пути направленного движения свободных электронов под действием электрического поля, т. е. уменьшается средняя длина свободного пробега электрона λ , уменьшается подвижность электронов и, как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 7-2). Иными словами, температурный коэффициент (см. стр. 39) удельного сопротивления металлов (кельвин в минус первой степени)

$$\text{TK}\rho = \alpha_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} \quad (7-5)$$

положителен. Согласно выводам электронной теории металлов значения α_ρ чистых металлов в твердом состоянии должны быть близки к температурному коэффициенту расширения идеальных газов, т. е. $1/273 \approx 0,0037 \text{ K}^{-1}$ (см. табл. 7-1; повышенными значениями α_ρ обладают некоторые металлы, в том числе ферромагнитные металлы — железо, никель и кобальт). При изменении температуры в узких диапазонах на практике допустима кусочно-линейная аппроксимация зависимости $\rho(T)$; в этом случае принимают, что

$$\rho_2 = \rho_1 [1 + \bar{\alpha}_\rho (T_2 - T_1)], \quad (7-6)$$

где ρ_1 и ρ_2 — удельные сопротивления проводникового материала при температурах T_1 и T_2 соответственно (при этом $T_2 > T_1$); $\bar{\alpha}_\rho$ — так называемый *средний температурный коэффициент удельного сопротивления* данного материала в диапазоне температур от T_1 до T_2 .

Изменение удельного сопротивления металлов при плавлении. При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение удельного сопротивления ρ , как это видно, например для меди, из рис. 7-2; однако у некоторых металлов ρ при плавлении уменьшается.

Изменение удельного сопротивления
некоторых металлов при плавлении

Металл	Hg	Cu	Au	Zn	Sn	Ag	Al	Na	Ga	Bi
$\rho_{жидк}$ $\rho_{тверд}$	3,2	2,4	2,28	2,19	2,1	1,9	1,64	1,45	0,58	0,43

Удельное сопротивление увеличивается при плавлении у тех металлов, у которых при плавлении увеличивается объем, т. е. уменьшается плотность; и, наоборот, у металлов, уменьшающих свой объем при плавлении, — галлия, висмута, сурьмы (аналогичным фазовому переходу лед—вода) ρ уменьшается (табл. 7-2).

Удельное сопротивление сплавов. Как уже указывалось, примеси и нарушения правильной структуры металлов увеличивают их удельное сопротивление. Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют друг с другом твердый раствор, т. е. при отверждении совместно кристаллизуются, и атомы одного металла входят в кристаллическую решетку другого. Зависимость удельного сопротивления сплава двух металлов, образующих друг с другом *твердый раствор*, от изменения содержания каждого из них в пределах от 0 до 100 % представлена на рис. 7-3, а. Кривая ρ имеет максимум,

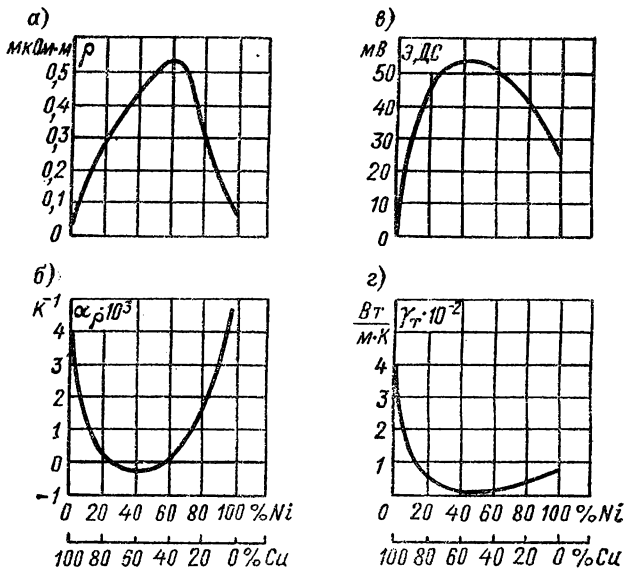


Рис. 7-3. Зависимости параметров сплавов медь—никель от состава (в процентах по массе): а — удельное сопротивление ρ ; б — температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ ; в — термо-ЭДС по отношению к железу при разности температур сплавов 815 °С; г — коэффициент теплопроводности γ_T

соответствующий некоторому определенному соотношению между содержанием компонентов в сплаве. Обычно при этом наблюдается определенная закономерность и в изменении α_p : относительно высокими значениями температурного коэффициента удельного сопротивления обладают чистые металлы, а у сплавов α_p меньше и даже может приобретать небольшие отрицательные значения (рис. 7-3, б). Такое изменение ρ и α_p от содержания компонентов сплава можно объяснить тем, что вследствие более сложной структуры сплава по сравнению с чистыми металлами его уже нельзя рассматривать как классический металл, т. е. изменение удельной проводимости γ сплава обуславливается не только изменением подвижности носителей заряда, но в некоторых случаях и частичным возрастанием концентрации носителей заряда при повышении температуры. Сплав, у которого уменьшение подвижности с ростом температуры компенсируется возрастанием концентрации носителей заряда, будет иметь нулевой температурный коэффициент удельного сопротивления.

На кривых зависимости удельного сопротивления от состава для некоторых систем двух различных металлов можно наблюдать и весьма резкие отклонения от рассмотренной выше закономерности. Так, Н. С. Курнаков установил, что в тех случаях, когда при определенном соотношении между компонентами они образуют друг с другом явно выраженные химические соединения (интерметаллиды), на кривых зависимости ρ (а также и α_p) от состава наблюдаются изломы (рис. 7-4). Исследования А. Ф. Иоффе показали, что многие интерметаллиды являются не веществами с металлическим характером электропроводности, а электронными полупроводниками.

Если же сплав двух металлов создает раздельную кристаллизацию и структура застывшего сплава представляет собой смесь кристаллов каждого из компонентов (т. е. если эти металлы не образуют

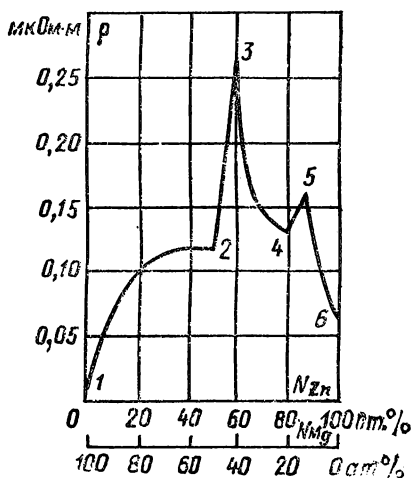


Рис. 7-4

Рис. 7-4. Зависимость удельного сопротивления ρ сплавов цинк—магний от состава. Точка 1 соответствует чистому Mg; 2 — соединению $MgZn$; 3 — Mg_2Zn_3 ; 4 — $MgZn_4$; 5 — $MgZn_6$; 6 — чистому Zn.

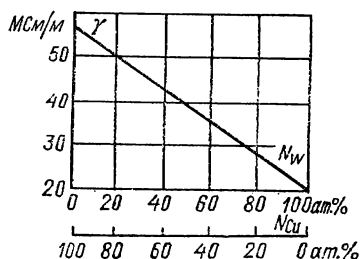


Рис. 7-5

Рис. 7-5. Зависимость удельной проводимости γ сплавов медь—вольфрам от состава.

твердого раствора и искажение кристаллической решетки каждого компонента не наблюдается), то удельная проводимость γ сплава меняется с изменением состава приблизительно линейно, т. е. определяется арифметическим правилом смешения (рис. 7-5).

Теплопроводность металлов. За передачу теплоты через металл в основном ответственны те же свободные электроны, которые определяют и электропроводность металлов и число которых в единице объема металла весьма велико. Поэтому, как правило, коэффициент теплопроводности γ_T металлов намного больше, чем коэффициент теплопроводности диэлектриков (см. табл. 5-1). Очевидно, что при прочих равных условиях, чем больше удельная электрическая проводимость γ металла, тем больше должен быть и его коэффициент теплопроводности. Легко также видеть, что при повышении температуры, когда подвижность электронов в металле и соответственно его удельная проводимость γ уменьшаются, отношение коэффициента теплопроводности металла к его удельной проводимости γ_T/γ должно возрастать. Математически это выражается законом Видемана—Франца—Лоренца:

$$\gamma_T/\gamma = LoT, \quad (7-7)$$

где T — термодинамическая температура, К; Lo — число Лоренца, равное

$$Lo = \frac{\pi^2 k^2}{3e^2}. \quad (7-8)$$

Подставляя в формулу (7-8) значения постоянной Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К и заряда электрона $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, получаем $Lo = 2,45 \cdot 10^{-8}$ В²/К².

Закон Видемана—Франца—Лоренца выполняется (в области температур, близких к нормальной или несколько повышенных)

для большинства металлов (исключение составляют марганец и бериллий). Проверим справедливость этого закона для меди при

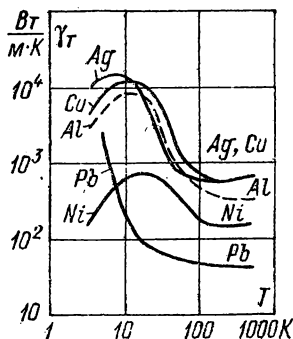


Рис. 7-6

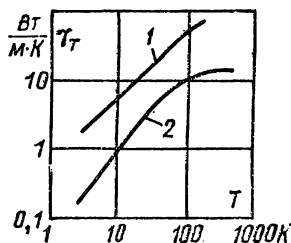


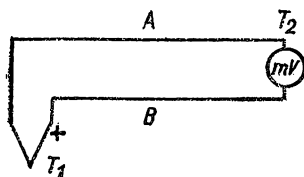
Рис. 7-7

Рис. 7-6. Зависимости коэффициентов теплопроводности γ_T металлов от термодинамической температуры

Рис. 7-7. Зависимости коэффициентов теплопроводности γ_T сплавов от термодинамической температуры

1 — нержавеющая сталь; 2 — бериллиевая бронза (98 % по массе Си + 2 % по массе Ве)

Рис. 7-8. Схема термопары



нормальной температуре. Подставляя в формулу (7-7) параметры меди $\gamma = 58 \cdot 10^6$ См/м и $\gamma_r = 390$ Вт/(м·К) и температуру $T = 293$ К, получаем $L_0 = 2,47 \cdot 10^{-8}$ В²/К², что весьма близко к теоретическому значению. При нормальной температуре для алюминия $L_0 = 2,1 \cdot 10^{-8}$, для серебра $2,35 \cdot 10^{-8}$, для цинка $2,45 \cdot 10^{-8}$, для свинца и олова $2,5 \cdot 10^{-8}$, для платины $2,6 \cdot 10^{-8}$, для железа $2,9 \times 10^{-8}$ В²/К². Однако в области низких температур отношение $\gamma_r/(\gamma T)$ уже не остается неизменным. На рис. 7-6 и 7-7 даны в билогарифмическом масштабе зависимости коэффициентов теплопроводности некоторых чистых металлов и сплавов от термодинамической температуры. Чистота и характер механической обработки металла могут заметно влиять на его теплопроводность, в особенности при низких температурах.

Термоэлектродвижущая сила. При соприкосновении двух различных металлических проводников (или полупроводников, см. гл. 8) между ними возникает *контактная разность потенциалов*. Причина появления этой разности потенциалов заключается в различии значений работы выхода электронов из различных металлов (см. табл. 7-1), а также в том, что концентрация электронов, а следовательно, и давление электронного газа у разных металлов и сплавов могут быть неодинаковыми. Из электронной теории металлов следует, что контактная разность потенциалов между металлами *A* и *B* равна

$$U_{AB} = U_B - U_A + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (7-9)$$

где U_A и U_B — потенциалы соприкасающихся металлов; n_{0A} и n_{0B} — концентрации электронов в металлах *A* и *B*; k — постоянная Больцмана; e — абсолютная величина заряда электрона.

Если температуры «спаев» одинаковы, то сумма разности потенциалов в замкнутой цепи равна нулю. Иначе обстоит дело, когда один из спаев имеет температуру T_1 , а другой — температуру T_2 (рис. 7-8). В этом случае между спаями возникает термо-ЭДС, равная

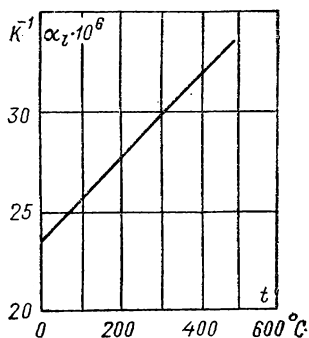
$$U = U_{AB} + U_{BA} = U_B - U_A + \frac{kT_1}{e} \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}} + U_A - U_B + \\ + \frac{kT_2}{e} \ln \frac{n_{0B}}{n_{0A}} = \frac{k}{e} (T_1 - T_2) \ln \frac{n_{0A}}{n_{0B}}, \quad (7-10)$$

что можно записать в виде

$$U = \psi (T_1 - T_2), \quad (7-11)$$

где ψ — постоянный для данной пары проводников коэффициент термо-ЭДС, т. е. термо-ЭДС должна быть пропорциональна разности температур спаев.

Рис. 7-9. Зависимость температурного коэффициента линейного расширения α_l алюминия от температуры



Фактически соотношение (7-11) соблюдается не всегда и зависимость термо-ЭДС от разности температур спаев может быть не строго линейной (см. кривую 7 на рис. 7-27). Провод, составленный из двух изолированных друг от друга проволок из различных металлов или сплавов (*термопара*), применяют для измерения температур. В термопарах используются проводники, имеющие большой и стабильный коэффициент термо-ЭДС. Наоборот, для обмоток измерительных приборов и резисторов стремятся применять проводниковые материалы и сплавы с возможно меньшим коэффициентом термо-ЭДС относительно меди, чтобы избежать появления в измерительных схемах паразитных термо-ЭДС, которые могли бы вызвать ошибки при точных измерениях.

Температурный коэффициент линейного расширения проводников. Этот коэффициент, вычисляемый по тому же выражению (5-7), что и для диэлектриков, интересен не только при рассмотрении работы различных сопряженных материалов в той или иной конструкции (возможность растрескивания или нарушения вакуум-плотного соединения со стеклами, керамикой при изменении температуры и т. п.). Он необходим также и для расчета температурного коэффициента электрического сопротивления провода

$$\text{TK } R = \alpha_R = \alpha_p - \alpha_l. \quad (7-12)$$

Правда, для чистых металлов, как это видно из табл. 7-1, обычно $\alpha_l \ll \alpha_p$, так что в формуле (7-12) можно пренебречь α_l по сравнению с α_p и считать приближенно $\alpha_R \approx \alpha_p$. Однако для сплавов, имеющих малый α_p (см. рис. 7-3, б и § 7-5), формула (7-12) может иметь существенное практическое значение. Значение α_l металлов возрастает при повышении температуры и приближении к температуре плавления (рис. 7-9). Поэтому, как правило, при нормальной температуре легкоплавкие металлы имеют сравнительно высокие, а тугоплавкие — сравнительно низкие значения α_l (см. табл. 7-1).

Механические свойства проводников характеризуют пределом прочности при растяжении σ_p и относительным удлинением перед разрывом $\Delta l/l$, а также хрупкостью, твердостью и тому подобными свойствами. Механические свойства металлических проводников в большой степени зависят от механической и термической обработки, от наличия легирующих примесей и т. п. Влияние отжига приводит к существенному уменьшению σ_p и увеличению $\Delta l/l$. Такие физические параметры проводниковых материалов, как температура плавления и кипения, удельная теплоемкость (см. табл. 7-1) и другие, не требуют особых пояснений.

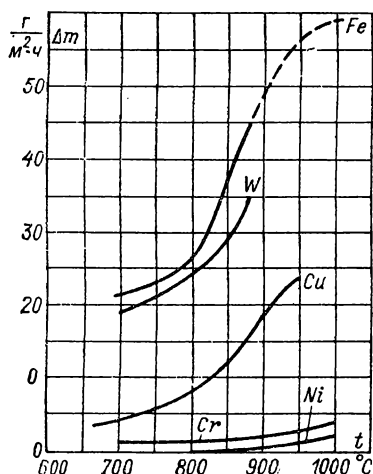
7-2. МАТЕРИАЛЫ ВЫСОКОЙ ПРОВОДИМОСТИ

К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести медь и алюминий (см. табл. 7-1).

Медь. Преимущества меди, обеспечивающие ей широкое применение в качестве проводникового материала, следующие: 1) малое удельное сопротивление (из всех материалов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь); 2) достаточно высокая механическая прочность; 3) удовлетворительная в большинстве случаев стойкость по отношению к коррозии (медь окисляется на воздухе даже в условиях высокой влажности значительно медленнее, чем, например, железо; интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах (см. рис. 7-10); 4) хорошая обрабатываемость (медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра); 5) относительная легкость пайки и сварки.

Получение меди. Медь получают чаще всего путем переработки сульфидных руд. После нескольких плавок руды и обжигов с интенсивным дутьем медь, предназначенная для электротехники, обязательно проходит процесс электролитической очистки. Полученные после электролиза *катодные* пластины меди переплавляют в болванки массой 80—90 кг, которые прокатывают и протягивают в изделия требующегося поперечного сечения. При изготовлении проволоки болванки сперва подвергают горячей прокатке в так называемую *катанку* диаметром 6,5—7,2 мм; затем катанку про травливают в слабом растворе серной кислоты, чтобы удалить с ее поверхности оксид меди CuO , образующийся при нагреве, а затем уже протягивают без подогрева в проволоку нужных диаметров — до 0,03—0,02 мм.

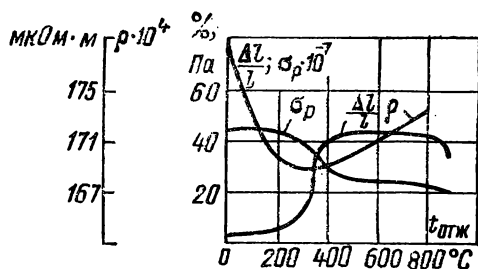
Марки меди. В СССР в качестве проводникового материала используется медь марок М1 и М0. Медь марки М1 содержит 99,9 %



Си, а в общем количестве примесей (0,1 %) кислорода должно быть не более 0,08 %. Присутствие в меди кислорода ухудшает ее механические свойства. Лучшими механическими свойствами обладает медь марки М0, в которой содержится не более 0,05 % примесей, в том числе не свыше 0,02 % кислорода. Из меди марки М0 может быть изготовлена тонкая проволока. При холодной протяжке получают *твердую* (твердотянутую) медь (МТ), которая благодаря влиянию наклепа имеет высокий предел прочности при

Рис. 7-10. Зависимости скорости окисления некоторых металлов от температуры окружающего воздуха

Рис. 7-11. Зависимости удельного сопротивления ρ , предела прочности при растяжении σ_p и относительного удлинения перед разрывом $\Delta l/l$ меди от температуры отжига (продолжительность отжига 1 ч)



растяжении и малое относительное удлинение перед разрывом, а также обладает твердостью и упругостью при изгибе; проволока из твердой меди несколько пружинит. Если же медь подвергать отжигу, т. е. нагреву до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, то получится *мягкая* (отожженная) медь (ММ), которая сравнительно пластична, имеет малую твердость и небольшую прочность, но весьма большое удлинение перед разрывом и (в соответствии с рассмотренными выше общими закономерностями) более высокую удельную проводимость. Отжиг меди производят в специальных печах без доступа воздуха, чтобы избежать окисления. Влияние отжига на удельное электрическое сопротивление и механические свойства меди иллюстрирует рис. 7-11.

Стандартная медь, в процентах по отношению к удельной проводимости которой иногда выражают удельные проводимости металлов и сплавов, в отожженном состоянии при 20 °С имеет удельную проводимость 58 МСм/м, т. е. $\rho = 0,017241$ мкОм·м. Удельная проводимость меди — параметр весьма чувствительный к наличию примесей (рис. 7-12, см. также рис. 7-3, а). Нормированные свойства твердой и мягкой медной (а также для сравнения алюминиевой) проволоки даны в табл. 7-3. Удельная теплоемкость и коэффициент

теплопроводности меди как функции температуры представлены на рис. 7-13. Твердую медь употребляют там, где надо

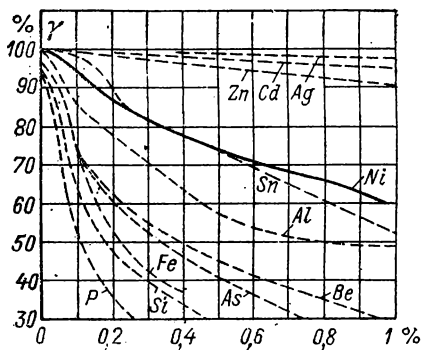


Рис. 7-12

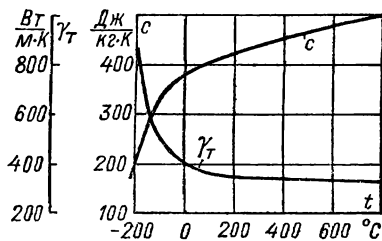


Рис. 7-13

Рис. 7-12. Зависимости удельной проводимости γ меди от содержания примесей (в % по массе)

Удельная проводимость чистой меди принята за 100 %. Примеси указаны возле кривых

Рис. 7-13. Зависимости удельной теплоемкости c и коэффициента теплопроводности γ_T меди от температуры

Свойства медной и алюминиевой проволоки

Параметр	Медь		Алюминий	
	МТ	ММ	АТ	АМ
Предел прочности при растяжении σ_p , МПа, не менее	360—390	260—280	160—170	80
Относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$, %, не менее	0,5—2,5	18—35	1,5—2,0	10—18
Удельное сопротивление ρ , мкОм·м, не более	0,0179—0,0182	0,01754	0,0295	0,0290

обеспечить особо высокую механическую прочность, твердость и сопротивляемость истиранию (для контактных проводов, для шин распределительных устройств, для коллекторных пластин электрических машин и пр.). Мягкую медь в виде проводов круглого и прямоугольного сечения применяют главным образом в качестве токопроводящих жил кабелей и обмоточных проводов, где важна гибкость и пластичность (не должна пружинить при изгибе), а не прочность. Медь является сравнительно дорогим и дефицитным материалом. Поэтому она должна расходоваться весьма экономно. Отходы меди на электротехнических предприятиях необходимо тщательно собирать; важно не смешивать их с другими металлами, а также с менее чистой (не электротехнической) медью, чтобы можно было эти отходы переплавить и вновь использовать в качестве электротехнической меди. Медь как проводниковый материал все шире заменяется другими металлами, в особенности алюминием.

С п л а в ы м е д и. В отдельных случаях помимо чистой меди в качестве проводникового материала применяются ее сплавы с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием. Такие сплавы, носящие название *бронз*, при правильно подобранном составе имеют значительно более высокие механические свойства, чем чистая медь: σ_p бронз может быть 800—1200 МПа и более. Бронзы широко применяют для изготовления токопроводящих пружин и т. п. Введение в медь кадмия при сравнительно малом снижении удельной проводимости (см. рис. 7-12) значительно повышает механическую прочность и твердость. *Кадмиевую бронзу* применяют для контактных проводов и коллекторных пластин особо ответственного назначения. Еще большей механической прочностью обладает *бериллиевая бронза* (σ_p — до 1350 МПа). Сплав меди с цинком — *латунь* — обладает достаточно высоким относительным удлинением перед разрывом при повышенном по сравнению с чистой медью пределе прочности при растяжении. Это дает латуни технологические преимущества перед медью при обработке штамповкой, глубокой вытяжкой и т. п. В соответствии с этим латунь применяют в электро-технике для изготовления всевозможных токопроводящих деталей.

Алюминий является вторым по значению (после меди) проводниковым материалом. Это важнейший представитель так называемых легких металлов (т. е. металлов с плотностью менее 5 Мг/м^3); плотность литого алюминия около 2,6, а прокатанного — $2,7 \text{ Мг/м}^3$. Таким образом, алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди. Температурный коэффициент расширения (см. рис. 7-9), удельная теплоемкость и теплота плавления алюминия больше, чем меди. Вследствие высоких значений удельной теплоемкости и теплоты плавления для нагрева алюминия до температуры плавления и перевода в расплавленное состояние требуется большая затрата теплоты, чем для нагрева и расплавления такого же количества меди, хотя температура плавления алюминия ниже, чем меди.

Алюминий обладает пониженными по сравнению с медью свойствами — как механическими, так и электрическими. При одинаковых сечении и длине электрическое сопротивление алюминиевого провода больше, чем медного, в $0,028 : 0,0172 = 1,63$ раза. Следовательно, чтобы получить алюминиевый провод такого же электрического сопротивления, как и медный, нужно взять его сечение в 1,63 раза большим, т. е. диаметр должен быть в $\sqrt{1,63} \approx 1,3$ раза больше диаметра медного провода. Отсюда понятно, что если ограничены габариты, то замена меди алюминием затруднена. Если же сравнить по массе два отрезка алюминиевого и медного проводов одной длины и одного и того же сопротивления, то окажется, что алюминиевый провод хотя и толще медного, но легче его приблизительно в два раза:

$$8,9 / (2,7 \cdot 1,63) \approx 2.$$

Поэтому для изготовления проводов одной и той же проводимости при данной длине алюминий выгоднее меди в том случае, если тонна алюминия дороже тонны меди не более чем в два раза. Весьма важно, что алюминий менее дефицитен, чем медь. В настоящее время в СССР алюминий не только заменил медь в воздушных линиях электропередачи, но и внедряется в производство изолированных кабельных изделий.

Для электротехнических целей используют алюминий, содержащий не более 0,5 % примесей, марки А1. Еще более чистый алюминий марки АВ00 (не более 0,03 % примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги, электродов и корпусов *оксидных конденсаторов*. Алюминий наивысшей чистоты АВ0000 имеет содержание примесей, не превышающее 0,004 %. Разные примеси в различной степени снижают удельную проводимость γ алюминия. Добавки Ni, Si, Zn или Fe при содержании их 0,5 % снижают γ отожженного алюминия не более чем на 2—3 %. Более заметное действие оказывают примеси Cu, Ag и Mg, при том же массовом содержании снижающие γ алюминия на 5—10 %. Очень сильно снижают γ алюминия добавки Ti и Mn.

Прокатка, протяжка и отжиг алюминия аналогичны соответствующим операциям над медью. Из алюминия может прокатываться тонкая (до 6—7 мкм) фольга, применяемая в качестве электродов бумажных и пленочных конденсаторов. Свойства твердой и мягкой

(отожженной) алюминиевой проволоки даны в табл. 7-3. Защитные (от ионизирующей радиации) свойства алюминия были приведены на рис. 5-10.

Алюминий весьма активно окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением (см. § 6-20). Эта пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов и делает невозможной пайку алюминия обычными методами. Для пайки алюминия применяются специальные пасты-припой или используются ультразвуковые паяльники. В местах контакта алюминия и меди возможна гальваническая коррозия. Если область контакта подвергается действию влаги, то возникает местная гальваническая пара с довольно высоким значением ЭДС, причем полярность этой пары такова, что на внешней поверхности контакта ток идет от алюминия к меди и алюминиевый проводник может быть сильно разрушен коррозией. Поэтому места соединения медных проводников с алюминиевыми должны тщательно защищаться от увлажнения (покрытием лаками и тому подобными способами).

Иногда, например для замены свинца в защитных кабельных оболочках, используется алюминий с содержанием примесей не более 0,01 % (вместо 0,5 % для обычного проводникового алюминия). Такой особо чистый алюминий сравнительно с обычным более мягок и пластичен и притом обладает повышенной стойкостью по отношению к коррозии. Сравнение Al с Cu при криогенных температурах дано в § 7-3.

Алюминиевые сплавы обладают повышенной механической прочностью. Примером такого сплава является *альдрей*, содержащий 0,3—0,5 % Mg, 0,4—0,7 % Si и 0,2—0,3 % Fe (остальное Al). Высокие механические свойства альдрей приобретает после особой обработки (закалки катанки—охлаждение в воде при температуре 510—550 °C, волочение и последующая выдержка при температуре около 150 °C). В альдрее образуется соединение Mg_2Si , которое сообщает высокие механические свойства сплаву; при указанной выше тепловой обработке достигается выделение Mg_2Si из твердого раствора и перевод его в тонкодисперсное состояние. Альдрей в виде проволоки имеет плотность 2,7 Мг/м³, его $\sigma_p = 350$ МПа, $\Delta l/l = 6,5$ %; $\alpha_l = 23 \cdot 10^{-6}$ К⁻¹, $\rho = 0,0317$ мкОм·м, $\alpha_p = 0,0036$ К⁻¹. Таким образом, альдрей, практически сохраняя легкость алюминия и будучи довольно близким к нему по удельной проводимости, в то же время по механической прочности приближается к твердотянутой меди. В настоящее время разработаны алюминиевые сплавы типа альдрей, не требующие термической обработки.

Сталеалюминиевый провод, широко применяемый в линиях электропередачи, представляют собой сердечник, свитый из стальных жил и обвитый снаружи алюминиевой проволокой. В проводах такого типа механическая прочность определяется главным образом стальным сердечником, а электрическая проводимость — алюминием. Увеличенный наружный диаметр сталеалюминиевого

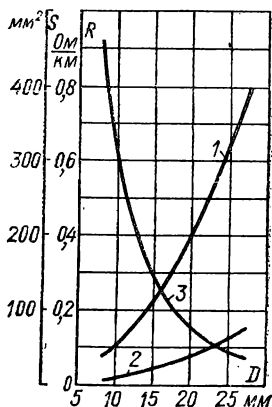


Рис. 7-14

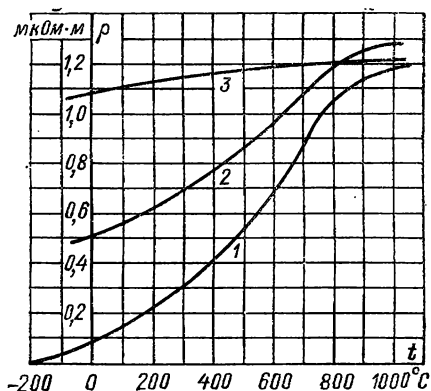


Рис. 7-15

Рис. 7-14. Зависимость полного сечения сталеалюминиевого провода марки АС (кривая 1), сечения стального сердечника (кривая 2) и активного электрического сопротивления (при частоте 50 Гц) единицы длины провода (кривая 3) от внешнего диаметра провода D

Рис. 7-15. Зависимость удельного сопротивления ρ от температуры для чистого железа (кривая 1), листовой электротехнической стали с содержанием 4 % кремния (кривая 2) и сплава Fe—Ni—Cr (кривая 3)

провода по сравнению с медным на линиях передачи высокого напряжения является преимуществом, так как уменьшается опасность возникновения *короны* вследствие снижения напряженности электрического поля на поверхности провода. На рис. 7-14 приведены некоторые характеристики сталеалюминиевого провода марки АС.

Железо (сталь) как наиболее дешевый и доступный металл, обладающий к тому же высокой механической прочностью, представляет большой интерес для использования в качестве проводникового материала. Однако даже чистое железо имеет значительно более высокое сравнительно с медью и алюминием удельное сопротивление ρ (около 0,1 мкОм·м); значение ρ стали, т. е. железа с примесью углерода и других элементов, еще выше.

При переменном токе в стали как в ферромагнитном материале заметно сказывается *поверхностный эффект*, поэтому в соответствии с известными законами электротехники активное сопротивление стальных проводников переменному току выше, чем постоянному току. Кроме того, при переменном токе в стальных проводниках появляются потери мощности на гистерезис. В качестве проводникового материала обычно применяется мягкая сталь с содержанием углерода 0,10—0,15 %, имеющая предел прочности при растяжении $\sigma_p = 700—750$ МПа, относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l = 5—8$ % и удельную проводимость γ , в 6—7 раз меньшую по сравнению с медью. Такую сталь используют в качестве материала для проводов воздушных линий при передаче небольших мощностей. В подобных случаях применение стали может оказаться достаточно

выгодным, так как при малой силе тока сечение провода определяется не электрическим сопротивлением, а его механической прочностью.

Сталь как проводниковый материал используется также в виде шин, рельсов трамваев, электрических железных дорог (включая «третий рельс» метро) и пр. Для сердечников сталеалюминиевых проводов воздушных линий электропередачи (см. выше) применяется особо прочная стальная проволока, имеющая $\sigma_p = 1200—1500$ МПа и $\Delta l/l = 4—5$ %. Обычная сталь обладает малой стойкостью к коррозии: даже при нормальной температуре, особенно в условиях повышенной влажности, она быстро ржавеет; при повышении температуры скорость коррозии резко возрастает. Поэтому поверхность стальных проводов должна быть защищена слоем более стойкого материала. Обычно для этой цели применяют покрытие цинком. Непрерывность слоя цинка проверяется опусканием образца провода в 20 %-ный раствор медного купороса; при этом на обнаженной стали в местах дефектов оцинковки откладывается медь в виде красных пятен, заметных на общем сероватом фоне оцинкованной поверхности провода. Железо имеет высокий температурный коэффициент удельного сопротивления (см. табл. 7-1 и рис. 7-15). Поэтому тонкую железную проволоку, помещенную для защиты от окисления в баллон, заполненный водородом или иным химическим неактивным газом, можно применять в *бареттерах*, т. е. в приборах, использующих зависимость сопротивления от силы тока, нагревающего помещенную в них проволочку, для поддержания постоянства силы тока при колебаниях напряжения.

Биметалл. В некоторых случаях для уменьшения расходов цветных металлов в проводниковых конструкциях выгодно применять так называемый *проводниковый биметалл*. Это сталь, покрытая снаружи слоем меди, причем оба металла соединены друг с другом прочно и непрерывно по всей поверхности их соприкосновения.

Для изготовления биметалла применяют два способа: *горячий* (стальную болванку ставят в форму, а промежуток между болванкой и стенками формы заливают расплавленной медью; полученную после охлаждения биметаллическую болванку подвергают прокатке и протяжке) и *холодный*, или *электролитический* (медь осаждают электролитически на стальную проволоку, пропускаемую через ванну с раствором медного купороса). Холодный способ обеспечивает равномерность толщины медного покрытия, но требует значительного расхода электроэнергии; кроме того, при холодном способе не обеспечивается столь прочное сцепление слоя меди со сталью, как при горячем способе.

Биметалл имеет механические и электрические свойства, промежуточные между свойствами сплошного медного и сплошного стального проводника того же сечения; прочность биметалла больше, чем меди, но электрическая проводимость меньше. Расположение меди в наружном слое, а стали внутри конструкции, а не наоборот, весьма важно: с одной стороны, при переменном токе достигается более высокая проводимость всего провода, в целом, с другой — медь

защищает расположенную под ней сталь от коррозии. Биметаллическая проволока выпускается наружным диаметром от 1 до 4 мм содержанием меди не менее 50 % полной массы проволоки. Значение σ_p (из расчета на полное сечение проволоки) должно быть не менее 550—700 МПа, а $\Delta l/l$ не более 2 %. Сопротивление 1 км биметаллической проволоки постоянному току (при 20 °C) в зависимости от диаметра от 60 (при 1 мм) до 4 Ом/км (при 4 мм).

Такую проволоку применяют для линий связи, линий электропередачи и т. п. Из проводникового биметалла изготавливаются шины для распределительных устройств, полосы для рубильников и различные токопроводящие части электрических аппаратов.

Защитные свойства стали от излучений высокой энергии были приведены на рис. 5-10.

7-3. СВЕРХПРОВОДНИКИ И КРИОПРОВОДНИКИ

Сверхпроводники. Как уже упоминалось, при понижении температуры удельное сопротивление ρ металлических проводников уменьшается. Исключительный интерес представляет вопрос об электропроводности металлов при весьма низких (криогенных) температурах, приближающихся к абсолютному нулю.

В 1911 г. нидерландский физик Х. Камерлинг-Оннес, незадолго перед тем (в 1908 г.) впервые получивший жидкий гелий (гелий был последним газом, который до того еще не удавалось перевести в жидкое состояние), исследовал электропроводность металлов при «гелиевых» температурах (температура сжижения гелия при нормальном давлении около 4,2 К; еще более низкие температуры могут быть получены при испарении жидкого гелия). При этом Камерлинг-Оннес сделал поразительное открытие: он обнаружил, что при охлаждении до температуры, примерно равной температуре сжижения гелия, сопротивление кольца из замороженной ртути внезапно, резким скачком падает до чрезвычайно малого, не поддающегося измерению, значения.

Такое явление, т. е. наличие у вещества практически бесконечной удельной проводимости, было названо *сверхпроводимостью*, температура T_c , при охлаждении до которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, — *температурой сверхпроводящего перехода*, а вещества, переходящие в сверхпроводящее состояние, — *сверхпроводниками*.

Переход в сверхпроводящее состояние является обратимым; при повышении температуры до значения T_c сверхпроводимость нарушается и вещество переходит в нормальное состояние с конечным значением удельной проводимости γ (рис. 7-16).

• В настоящее время известно уже 35 сверхпроводниковых металлов и более тысячи сверхпроводниковых сплавов и химических соединений различных элементов. В то же время многие вещества, в том числе и такие, обладающие весьма малыми значениями ρ при нормальной температуре металлы, как серебро, медь, золото, платина (рис. 7-16) и другие, при наиболее низких достигнутых в настоящее

время температурах (около милликельвина) перевести в сверхпроводящее состояние не удалось.

Явление сверхпроводимости связано с тем, что электрический ток, однажды наведенный в сверхпроводящем контуре, будет длительно (годами) циркулировать по этому контуру без заметного уменьшения своей силы, и притом без всякого подвода энергии извне (конечно, если не учитывать неизбежного расхода энергии на работу охлаждающего устройства, которое должно поддерживать температуру сверхпроводящего контура ниже значения T_c , характерного для данного сверхпроводникового материала); такой сверхпроводящий контур создает в окружающем пространстве магнитное поле, подобно постоянному магниту. Поэтому обтекаемый электрическим током сверхпроводящий соленоид должен представлять собой сверхпроводниковый электромагнит, не требующий питания от источника тока. Однако первоначальные попытки изготовить практически пригодный сверхпроводниковый электромагнит, создающий в окружающем пространстве магнитное поле с достаточно высокими напряженностью H и магнитной индукцией B , закончились неудачей. Оказалось, что сверхпроводимость нарушается не только при повышении температуры до значений, превышающих T_c , но и при возникновении на поверхности сверхпроводника магнитного поля с магнитной индукцией, превышающей индукцию перехода B_c (в первом приближении, по крайней мере для чистых сверхпроводниковых металлов, безразлично, создается ли индукция B_c током, идущим по самому сверхпроводнику, или же сторонним источником магнитного поля). Это поясняется диаграммой состояния сверхпроводника, изображенной на рис. 7-17. Каждому значению температуры T данного материала, находящегося в сверхпроводящем состоянии, соответствует свое значение индукции перехода B_c . Наибольшая возможная температура перехода T_{c0} (критическая температура) данного сверхпроводникового материала достигается

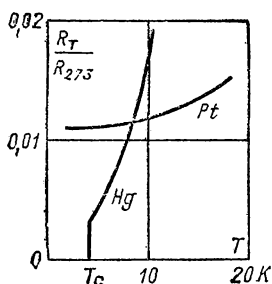


Рис. 7-16

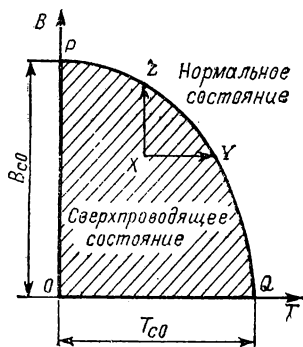


Рис. 7-17

Рис. 7-16. Изменение отношения сопротивления образцов ртути и платины при текущем значении температуры к их сопротивлению при $T = 273$ К при глубоком охлаждении

Рис. 7-17. Общий вид диаграммы состояния сверхпроводника первого рода

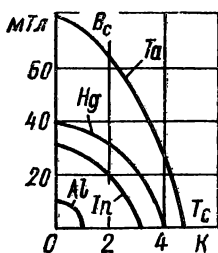


Рис. 7-18

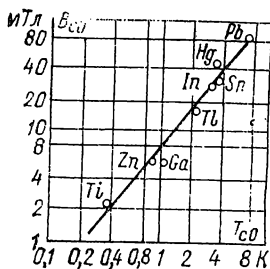


Рис. 7-19

Рис. 7-18. Диаграммы состояния элементарных сверхпроводников первого рода для наиболее известных элементов

Рис. 7-19. Связь значения B_{c0} и T_{c0} элементарных сверхпроводников первого рода

при ничтожно малой магнитной индукции, т. е. для сверхпроводникового электромагнита — при весьма малой силе тока, идущего через обмотку этого электромагнита. Соответственно и наибольшее возможное значение B_{c0} магнитной индукции перехода (критическая магнитная индукция) соответствует температуре сверхпроводника, ничтожно отличающейся от нуля Кельвина. Заштрихованная область OPQ на рис. 7-17 соответствует сверхпроводящему состоянию, а незаштрихованная область вне кривой PQ — нормальному состоянию материала. Если материал работает при температуре и магнитной индукции, соответствующих точке X на диаграмме состояния, то сверхпроводимость может быть нарушена нагревом (переход через кривую PQ в точке Y), повышением магнитной индукции (переход через кривую PQ в точке Z), а также в общем случае и одновременным изменением как T , так и B , что переводит материал в нормальное состояние (кривая PQ пересекается в любой ее точке). Так как впервые ставшие известными элементарные проводники (чистые металлы) имели весьма малые значения B_{c0} (см. рис. 7-18 и табл. 7-4), попытки технического использования явления сверхпроводимости были оставлены на несколько десятилетий, вплоть до открытия сверх-

Таблица 7-4

Параметры некоторых сверхпроводниковых материалов

Сверхпроводники	T_{c0} , К	B_{c0} , Тл
Элементарные:		
Иридий Ir	0,14	0,002
Алюминий Al	1,20	0,010
Олово Sn	3,70	0,031
Индий In	3,40	0,030
Ртуть Hg	4,20	0,046
Тантал Ta	4,50	0,083
Ванадий V	5,30	0,130
Свинец Pb	7,20	0,080
Ниобий Nb	9,40	0,195
Сложные:		
Сплав 50 % Nb + 50 % Ti	8,70	12,000
Сплав 50 % Nb + 50 % Zr	9,50	11,000
Соединения:		
Галлид ванадия V_3Ga	14,00	50,000
Станнид ниобия Nb_3Sn	18,00	22,000
$Nb_{0,79}(Al_{0,75}Ge_{0,25})_{0,21}$	21,00	41,000

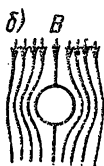


Рис. 7-20

Рис. 7-20. Эффект Майснера—Оксенфельда: а — охлаждаемый шар из сверхпроводника в нормальном состоянии, помещенный в равномерное магнитное поле; б — при переходе материала шара из нормального состояния в сверхпроводящее магнитное поле выталкивается из шара

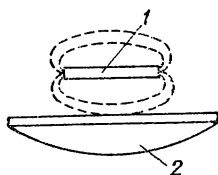


Рис. 7-21

Рис. 7-21. Опыт В. К. Аркадьева с «висящим магнитом»

1 — магнит, 2 — чашка из сверхпроводящего материала

альными диамагнетиками, т. е. их относительная магнитная проницаемость μ_r (см. стр. 14) скачком падает от конечных значений, для подавляющего большинства сверхпроводников, весьма близких к 1, до значения $\mu_r = 0$. Поэтому внешнее магнитное поле не может проникать в сверхпроводящее тело (рис. 7-20); если же переход этого тела в сверхпроводящее состояние произошел в магнитном поле, то поле «выталкивается» из сверхпроводника. Этот эффект был продемонстрирован в 1935 г. В. К. Аркадьевым в его знаменитом опыте с висящим магнитом. Когда магнит 1 (рис. 7-21) опускают в чашку из находящегося в сверхпроводящем состоянии материала 2, этот магнит отталкивается от чашки и остается в уравновешенном состоянии в воздухе, не касаясь чашки. Аналогично можно заставить сверхпроводящее тело висеть над поверхностью магнита. В 50-х годах нашего столетия были открыты новые сверхпроводники, представляющие собой уже не чистые металлы, а сплавы или химические соединения. Эти сверхпроводники в отличие от чистых сверхпроводниковых металлов (*сверхпроводников I рода*), названные *сверхпроводниками II рода*, обладают рядом особенностей. Переход из нормального в сверхпроводящее состояние при охлаждении у них происходит не скачком (как у сверхпроводников I рода), а постепенно; у них существует промежуточное состояние («фаза А. И. Шальникова») между нижним B_{c1} и верхним B_{c2} значениями критической магнитной индукции перехода для значений температур $T < T_{c0}$. В промежуточном состоянии сверхпроводимость при постоянном напряжении сохраняется, т. е. $\rho = 0$, но эффект Майснера—Оксенфельда—Аркадьева выражен не полностью, т. е. относительная магнитная проницаемость сверхпроводника $\mu_r > 0$; при воздействии на сверхпроводник переменного напряжения в нем наблюдаются некоторые потери энергии и т. п. Кроме того, свойства сверхпроводников II рода в большой степени зависят от технологического режима изготовления и т. п.

проводников с высокими значениями B_{c0} (см. ниже). Как видно из рис. 7-18, а также из табл. 7-4, металлы с более высокой T_{c0} имеют, в большинстве случаев, и более высокую B_{c0} . Еще отчетливее это видно на рис. 7-19.

В 1933 г. немецкие физики В. Майснер и Р. Оксенфельд сделали новое фундаментальное открытие: они обнаружили, что сверхпроводники при переходе из нормального в сверхпроводящее состояние становятся иде-

Рис. 7-22. Диаграммы состояния сверхпроводника II рода — станида ниобия Nb_3Sn (кривые 1 и 2) и сверхпроводника I рода — свинца Pb (кривая 3)

Из чистых металлов к сверхпроводникам II рода относятся лишь ниобий Nb , ванадий V и технеций Tc .

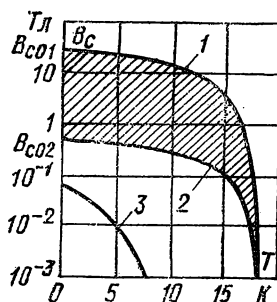
На рис. 7-22 представлена диаграмма состояния типичного сверхпроводника II рода — интерметаллического соединения, станида ниобия Nb_3Sn . Кривая 1 дает значения B_{c01} , кривая 2 — значения B_{c02} ; заштрихована область промежуточного состояния. Для сопоставления здесь же приведена диаграмма состояния для типичного сверхпроводника I рода — свинца Pb (кривая 3 аналогична диаграммам состояния сверхпроводников I рода, изображенных на рис. 7-17 и 7-18).

Оказалось, что некоторые сверхпроводники II рода обладают не только сравнительно высокими значениями T_c , но, что особенно важно, и весьма высокими значениями B_c . Это вызвало появление большого интереса к сверхпроводникам; в настоящее время проблема сверхпроводимости и ее технического использования является одной из наиболее актуальных проблем современной науки и техники.

Для сверхпроводников II рода в табл. 7-4 в качестве B_{c0} дано верхнее критическое значение B_{c01} .

Из результатов исследований последних лет в области сверхпроводимости важно отметить открытие того, что помимо понижения температуры появлению сверхпроводимости способствует и повышение давления; у некоторых веществ, не переходящих при нормальном давлении в сверхпроводящее состояние, удалось обнаружить сверхпроводимость при воздействии на вещество высокого гидростатического давления. Установлены даже сверхпроводящие свойства не только у веществ, являющихся при нормальных условиях проводниками (прежде всего у металлов, сплавов металлов и интерметаллических соединений), но и у полупроводников (например, у антимонида индия $InSb$ — см. стр. 263, который имеет температуру сверхпроводящего перехода T_c около 5 К при давлении около 30 ГПа). В Институте высоких давлений Академии наук СССР открыта сверхпроводимость у серы ($T_c = 9,7$ К) и ксенона ($T_c = 6,8$ К).

Помимо сверхпроводниковых электромагнитов, которые в настоящее время производятся в большом количестве и применяются для самых разнообразных целей, можно отметить возможности использования сверхпроводников для создания электрических машин, трансформаторов и тому подобных устройств малой массы и габаритов, но с высоким КПД; линий электропередачи весьма больших мощностей на дальние расстояния; волноводов с особо малым затуханием; накопителей энергии и пр. Некоторые устройства памяти и управления основываются на переходе сверхпроводника в сверхпроводящее или нормальное состояние при изменении магнитной индукции (силы



тока) или температуры. Эффект Майснера—Оксенфельда—Аркадьева может использоваться в работающих практически без трения подшипниках с «магнитной смазкой» (взаимным отталкиванием вала и подшипника), для магнитной подвески вагонов сверхскоростного железнодорожного транспорта и т. п.

• В настоящее время для изготовления обмоток сверхпроводниковых электромагнитов и других технических целей применяются главным образом две группы материалов: 1) сравнительно легко деформируемые (дуктильные), из которых возможно изготовление проволок и лент (таковы, в частности, сплавы в системах Nb—Zr и Nb—Ti, а также чистый ниобий); 2) трудно поддающиеся деформациям из-за хрупкости (таковы, в частности, интерметаллические соединения типа Nb₃Sn и аналогичные ему). Провода из станида ниобия обычно получают пропусканием тонких ниобиевых лент через расплавленное олово с последующей термообработкой, при которой слой осевшего на ленте олова вступает в химическую реакцию с ниобием; такие ленточные провода обладают достаточной гибкостью. Часто сверхпроводниковые провода покрываются «стабилизирующей» оболочкой из меди или другого, обладающего высокими удельной электрической проводимостью и коэффициентом теплопроводности, металла или сплава; это дает возможность избежать большого перегрева и повреждения сверхпроводника при нарушении сверхпроводимости в отдельных участках провода. Более того, весьма распространены многоволоконные провода, в которых большое число тонких, нитевидных сверхпроводниковых проволок заключено в массивную матрицу из меди или бронзы; такие провода допускают значительно большую плотность тока, чем более толстые проволоки или ленты из того же сверхпроводникового материала.

Большинство известных сверхпроводников, даже и сверхпроводников II рода, имеет все же весьма низкую температуру перехода T_c . Поэтому устройства, в которых используется явление сверхпроводимости, обычно работают при охлаждении жидким гелием, что сложно и дорого. Было бы неплохо иметь сверхпроводники с T_c выше температуры сжижения водорода (20,3 K) или, тем более, выше температуры сжижения азота (77,4 K). Совершенно исключительные возможности дали бы материалы, сохраняющие состояние сверхпроводимости при нормальной или еще более высоких температурах. Наиболее высокую T_{c0} из всех известных элементарных сверхпроводников имеет ниобий, а из всех широко применяемых — станид ниобия Nb₃Sn. Имеются сведения о получении материалов (в частности, в системах Nb — Ge и Nb — Ge — Al) со значением T_{c0} , превышающим температуру сжижения водорода, и к тому же с высоким значением B_{c0} . В настоящее время (из еще не внедренных в промышленное производство) сверхпроводниковых материалов наивысшее значение T_{c0} (около 23 K) имеет NbGe, а наивысшее значение B_{c0} (около 60 Тл) — Gd_{0,2}PbMo_{0,8}S₆.

Поиски «теплых» сверхпроводников усиленно продолжаются. В частности, большой интерес имеет (пока не подтвержденное экспериментально) теоретическое высказывание акад. В. Л. Гинзбурга

о том, что «металлический» водород (который предполагается получить из обычного твердого водорода, имеющего температуру плавления при нормальном давлении около 14 К, посредством воздействия на него чрезвычайно высокого гидростатического давления) может находиться в сверхпроводящем состоянии при температурах, равных десяткам и даже сотням кельвинов.

Теория сверхпроводимости исключительно сложна*. В создание этой теории основной вклад внесли советские ученые — Л. Д. Ландау, Н. Н. Боголюбов, В. Л. Гинзбург, А. А. Абрикосов, Л. П. Горьков и другие, а также ученые зарубежных стран — Д. Бардин, Л. Купер, Д. Шриффер и другие. По современным представлениям в основе явления сверхпроводимости лежит образование связанных пар электронов («куперовских пар»); такая пара не может выделять энергию малыми дозами, так что обычные джоулевы потери мощности, которые наблюдаются в металлах при нормальных условиях, здесь уже не имеют места. Разъединение ассоциированных в куперовскую пару электронов при повышении температуры или магнитной индукции представляет собой нарушение сверхпроводимости, т. е. фазовый переход сверхпроводника из сверхпроводящего состояния в нормальное. Отмечается глубокая аналогия в физической сущности явления сверхпроводимости и явления сверхтекучести, открытого П. Л. Капицей у жидкого гелия-II и теоретически обоснованного Л. Д. Ландау.

Криопроводники. Помимо явления сверхпроводимости, в современной электротехнике все шире используется явление *криопроводимости* (прежнее название — гиперпроводимость), т. е. достижение металлами весьма малого значения удельного сопротивления при криогенных температурах (но без перехода в сверхпроводящее состояние). Металлы, обладающие таким свойством, называются *криопроводниками*.

Очевидно, что физическая сущность криопроводимости не сходна с физической сущностью явления сверхпроводимости. Криопроводимость — частный случай нормальной электропроводности металлов в условиях криогенных температур.

Весьма малое, но все же конечное значение ρ криопроводников ограничивает допустимую плотность тока в них, хотя эта плотность может быть все же гораздо выше, чем в обычных металлических проводниках при нормальной или повышенной температуре. Криопроводники, у которых при изменении температуры в широком диапазоне ρ меняется плавно, без скачков, не могут использоваться в устройствах, действие которых основано на триггерном эффекте возникновения и нарушения сверхпроводимости (например, в сверхпроводниковых запоминающих устройствах). Не обнаруживаются при криопроводимости и другие, специфические для сверхпроводников явления, такие как эффект Майснера — Оксенфельда и др.

Применение криопроводников вместо сверхпроводников в электрических машинах, аппаратах и других электротехнических устройствах может иметь свои преимущества. Использование в качестве хладагента жидкого водорода или жидкого азота (вместо жидкого

МКОМ·М

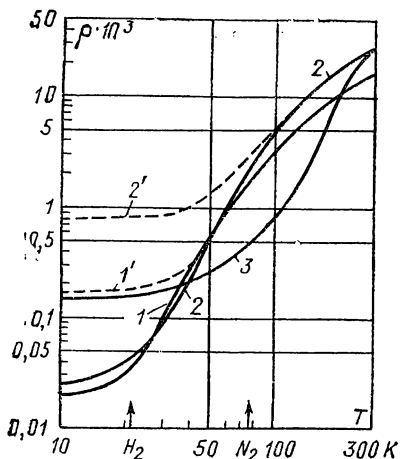


Рис. 7-23. Температурные зависимости ρ криопроводников

1 и 1' — медь; 2 и 2' — алюминий; 3 — бериллий (сплошные кривые относятся к особо чистым металлам, а штриховые — к обычным проводникам — меди и алюминию). Стрелками отмечены температуры сжижения азота и водорода

гелия, который значительно дороже других хладагентов) упрощает и удешевляет выполнение тепловой изоляции устройства и уменьшает расход мощности на охлаждение. Кроме того, в сверхпроводящем контуре с большим током накапливается большое количество энергии магнитного поля, равное $LI^2/2$ Дж (L — индуктивность, Гн; I — ток, А). При

случайном повышении температуры или магнитной индукции свыше значений, соответствующих переходу сверхпроводника в нормальное состояние хотя бы в малой части сверхпроводящего контура, сверхпроводимость будет нарушена, что приведет к внезапному освобождению большого количества энергии. Для криопроводящей цепи такой опасности нет, так как повышение температуры может повлечь за собой лишь постепенное, плавное увеличение сопротивления. Для того чтобы представить себе, сколь малым может быть удельное сопротивление криопроводника при рабочей температуре по сравнению с его удельным сопротивлением при нормальной температуре, достаточно рассмотреть рис. 7-23, на котором в билогарифмическом масштабе показано изменение удельного сопротивления как функции температуры для двух практически наиболее важных проводниковых металлов — меди и алюминия, а также для бериллия. Как видно, наибольший интерес для применения в качестве криопроводникового материала представляют собой: при температуре жидкого водорода — алюминий, а при температуре жидкого азота — бериллий.

Таким образом, проблема выбора оптимального (т. е. имеющего при рабочей температуре наименьшее удельное сопротивление при наилучших других технико-экономических показателях) криопроводникового материала сводится в основном к следующему: применить легко доступный и дешевый алюминий и получить наименьшее возможное для криопроводника значение удельного сопротивления, но пойти на использование для охлаждения устройства жидкого водорода, что все же требует преодоления некоторых затруднений и, в частности, необходимости учета взрывоопасности водородовоздушной смеси; или же применить более дорогой, дефицитный, сложный в технологическом отношении бериллий, но зато использовать в качестве хладагента более дешевый и легко доступный жидкий азот и тем самым уменьшить затраты мощности на охлаждение.

Таблица 7-5

Изменение удельного сопротивления алюминия различной чистоты

Вид образца	Чистота, %	$\rho_{300\text{K}}/\rho_{20\text{K}}$
Холодотянутый провод	99,5	41
Отожженный провод . .	99,5	57
То же	99,99	690
»	99,9975	1100
»	99,9992	2400
Подвергнутый зонной плавке	—	2700
Сверхчистый, полученный в лабораторных условиях	—	> 6000

Во всех случаях для получения высококачественных криопроводников требуются исключительно высокая чистота металла (отсутствие примесей) и отсутствие наклепа (отожженное состояние). Вредное влияние примесей (это ясно из сравнения графиков 1 с 1' и 2 с 2' на рис. 7-23) и наклепа на удельное сопротивление металлов при криогенных температурах выражено значительно более сильно, чем при нормальной температуре. Отношение ρ при температуре 300 К к ρ при 20 К для различных по чистоте материалов алюминиевых проводов приведено в табл. 7-5.

7-4. РАЗЛИЧНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Вольфрам — чрезвычайно тяжелый твердый металл серого цвета. Из всех металлов он обладает наиболее высокой температурой плавления (см. табл. 7-1). Вольфрам получают из руд различного состава; промежуточным продуктом является вольфрамовая кислота H_2WO_4 , из которой восстановлением водородом при нагреве до 900 °С получается металлический вольфрам в виде мелкого порошка. Из этого порошка при высоком давлении прессуют стержни, которые подвергаются сложной термической обработке в атмосфере водорода (во избежание окисления), ковке и волочению в проволоку диаметром до 0,01 мм, прокатке в листы и т. п. Для вольфрама характерна слабая связанность отдельных кристаллов, поэтому при зернистом строении сравнительно толстые вольфрамовые изделия хрупки и легко ломаются. При механической обработке ковкой и волочением вольфрам приобретает волокнистую структуру (рис. 7-24); этим объясняется гибкость тонких вольфрамовых нитей. С уменьшением толщины вольфрамовой проволоки сильно возрастает и ее предел прочности при растяжении (от 500—600 МПа для стержней диаметром 5 мм до 3000—4000 МПа для тонких нитей; относительное

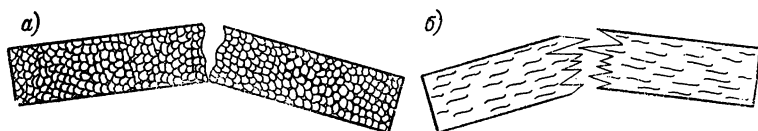


Рис. 7-24. Схема излома образцов вольфрама; а — зернистого строения; б — волокнистого строения

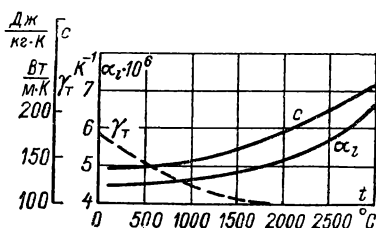


Рис. 7-25

Рис. 7-25. Зависимости температурного коэффициента линейного расширения α_L , удельной теплоемкости c и коэффициента теплопроводности γ_T вольфрама от температуры

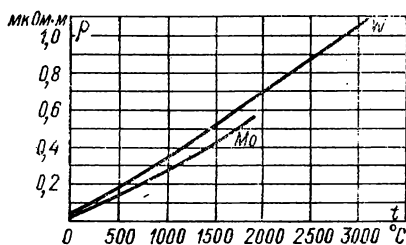


Рис. 7-26

Рис. 7-26. Зависимости удельного сопротивления ρ вольфрама и молибдена от температуры

удлинение перед разрывом таких нитей около 4 %). Вольфрам является одним из важнейших металлических материалов электровакуумной техники. Применение вольфрама для изготовления нитей ламп накаливания было впервые предложено русским изобретателем А. Н. Лодыгиным в 1890 г.

Вследствие тугоплавкости и большой механической прочности при повышенных температурах вольфрам может работать при высокой температуре (более 2000 °C), но лишь в глубоком вакууме или в инертном газе (азот, аргон и т. п.), так как уже при нагреве до температуры в несколько сот градусов Цельсия в присутствии кислорода он сильно окисляется (см. рис. 7-10). Температурные зависимости некоторых параметров вольфрама приведены на рис. 7-25, 7-26. Благодаря высокому α_0 вольфрам иногда используют для бареттеров. Такие бареттеры из-за тугоплавкости вольфрама обладают повышенной способностью выдерживать значительные перегрузки током.

Вольфрам применяют также для изготовления контактов. К достоинствам вольфрамовых контактов можно отнести: устойчивость в работе, малый механический износ ввиду высокой твердости материала, способность противостоять действию дуги и отсутствие привариваемости вследствие большой тугоплавкости, малую подверженность электрической эрозии (т. е. износу с образованием кратеров и наростов в результате местных перегревов и плавления металла). Недостатками вольфрама как контактного материала являются: трудная обрабатываемость, образование в атмосферных условиях оксидных пленок, необходимость применять большие давления для обеспечения малого электрического сопротивления контакта.

Для контактов на большие значения разрываемой мощности используют металлокерамические материалы. Заготовку прессуют из порошка вольфрама под большим давлением, спекают в атмосфере водорода, получая достаточно прочную, но пористую основу, которую затем пропитывают расплавленным серебром или медью для увеличения проводимости.

Молибден широко применяют в электровакуумной технике при менее высоких температурах, чем вольфрам; накаливаемые детали из молибдена должны работать в вакууме, в инертном газе или в восстановительной атмосфере. Характеристики молибдена приведены в табл. 7-1 и на рис. 7-26. Механическая прочность молибдена в очень большой степени зависит от механической обработки материала, вида изделия, диаметра стержней или проволоки и последующей термообработки. Предел прочности при растяжении молибдена — от 350 до 2500 МПа, а относительное удлинение перед разрывом от 2 до 55 %. Плотность молибдена почти в два раза меньше, чем вольфрама. В электровакуумной технике наиболее распространены марки молибдена МЧ (молибден чистый) и МК (молибден с кремниевой присадкой). Последний обладает повышенной механической прочностью при высоких температурах. Молибден применяется в качестве материала для электрических контактов.

Золото — металл желтого цвета, обладающий высокой пластичностью (предел прочности при растяжении 150 МПа, относительное удлинение перед разрывом 40 %). В электротехнике золото используется как контактный материал для коррозионно-стойких покрытий, электродов фотоэлементов и для других целей.

Серебро — белый, блестящий металл, стойкий против окисления при нормальной температуре. Серебро имеет меньшее удельное сопротивление ρ (при нормальной температуре), чем какой бы то ни было другой металл (см. табл. 7-1). Механические свойства серебряной проволоки: σ_r около 200 МПа, $\Delta l/l$ примерно 50 %. Такую проволоку используют для изготовления контактов, рассчитанных на небольшие токи. Серебро применяют также для непосредственного нанесения на диэлектрики в качестве электродов в производстве керамических и слюдяных конденсаторов. Для этой цели используют метод вжигания или испарения в вакууме. Недостатком серебра является его склонность к миграции внутрь диэлектрика, на который нанесено серебро, в условиях высокой влажности, а также при высоких температурах окружающей среды. Химическая стойкость серебра по сравнению с другими благородными металлами пониженная.

Платина — металл, практически не соединяющийся с кислородом и весьма стойкий к химическим реагентам. Платина прекрасно поддается механической обработке, вытягивается в очень тонкие нити и ленты. Значение σ_r платины после отжига около 150 МПа, а $\Delta l/l$ составляет 30—35 %. Платину применяют, в частности, для изготовления термпар для измерения высоких температур — до 1600 °С (в паре со сплавом платинородий, см. рис. 7-27). Особо тонкие нити из платины (диаметром около 1 мкм) для подвесок подвижных систем в электрометрах и других чувствительных приборах получают многократным волочением биметаллической проволоки платина — серебро с последующим растворением наружного слоя серебра в азотной кислоте (на платину азотная кислота не действует). Вследствие малой твердости платина редко применяется для контактов в чистом виде, но служит основой для контактных сплавов. Сплавы платины с иридием стойки к окислению и к износу, имеют

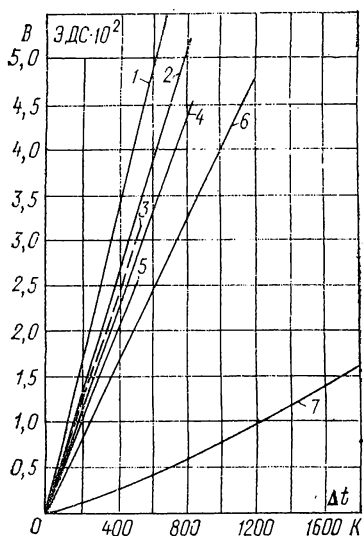


Рис. 7-27. Зависимости термоэлектродвижущей силы от разности температур Δt горячего и холодного спаев для термопар

1 — хромель—копель; 2 — железо—копель; 3 — медь—копель; 4 — железо—константан; 5 — медь—константан; 6 — хромель—алюмель; 7 — плати-
нородий—платина

высокую твердость и допускают большую частоту включений, но дороги и применяются только в особых случаях.

Палладий по многим свойствам близок к платине и в некоторых случаях служит ее заменителем. Палладий используют в электровакуумной технике для поглощения водорода. Палладий и его сплавы с серебром и медью применяются в качестве контактных материалов. Механические свойства палладия весьма хорошие: в отожженном состоянии σ_p равен 200 МПа при $\Delta l/l$ до 40 %.

Никель — серебристо-белый металл, широко применяемый в электровакуумной технике; его достаточно легко получить в очень чистом виде (99,99 % Ni); иногда в него вводят специальные легирующие присадки (кремний, марганец и др.). Получаемый из руд никель подвергают электролитическому рафинированию. Очень чистый порошкообразный никель можно получить путем термического разложения пентакарбонила никеля $Ni(CO)_5$ при температуре 220 °С. Никель выпускается различных марок (в зависимости от чистоты) в виде полос, пластин, лент, трубок, стержней и проволоки. К положительным свойствам никеля следует отнести достаточную механическую прочность после отжига ($\sigma_p = 400$ —600 МПа при $\Delta l/l = 35$ —50 %). Никель легко поддается даже в холодном состоянии механической обработке (ковке, прессовке, прокатке, штамповке, волочению и т. п.). Из никеля могут быть изготовлены различные по размерам, сложные по конфигурации изделия с жестко выдержанными допусками. Стойкость никеля к окислению наглядно видна из рис. 7-10. Помимо применения в электровакуумной технике, никель используют в качестве компонента ряда магнитных и проводниковых сплавов, а также для защитных и декоративных покрытий изделий из железа и т. п.

Кобальт получают металлургическим путем с последующей очисткой или восстановлением оксидов кобальта водородом. В отожженном состоянии кобальт имеет $\sigma_p = 500$ МПа при $\Delta l/l$ более 50 %. Кобальт мало активен химически. Он применяется в качестве составной части многих магнитных и жаростойких сплавов, а также сплавов с небольшими температурными коэффициентами линейного расширения.

Свинец — металл сероватого цвета, дающий на свежем срезе сильный металлический блеск, но затем быстро тускнеющий вслед-

ствие поверхностного окисления. Он имеет крупнокристаллическое строение; если протравить свинец азотной кислотой, его кристаллы становятся видны невооруженным глазом. Свинец — мягкий, пластичный, малопропрочный металл: σ_p около 15 МПа при $\Delta l/l$ более 55 %. Он имеет высокое удельное сопротивление ρ (см. табл. 7-1). Преимуществом свинца является его высокая коррозионная стойкость; он устойчив к действию воды, серной и соляной кислот (при низких температурах) и других реагентов; однако азотная и уксусная кислоты, гниющие органические вещества, известь и некоторые другие соединения разрушают свинец. Свинец в больших количествах применяли раньше для оболочек, защищающих изоляцию кабелей от проникновения в нее влаги. Кроме того, свинец используют для изготовления плавких предохранителей, пластин свинцовых аккумуляторов и т. п. Свинец широко употребляют как материал, сильно поглощающий рентгеновские лучи. Рентгеновские установки с напряжением 200—300 кВ по нормам безопасности должны иметь свинцовую защиту при толщине слоя соответственно 4—9 мм. Слой свинца толщиной 1 мм по защитному действию в этих условиях эквивалентен слою стали 11,5 мм или слою обычного кирпича толщиной 110 мм. Защитные свойства свинца в зависимости от энергии квантов падающего излучения приведены на рис. 5-10. Свинец поставляют в чушках, т. е. продолговатых слитках массой до 50 кг. Сплавы свинца с малыми количествами сурьмы, теллура, кадмия, меди, кальция и олова имеют мелкозернистое строение, повышенную механическую прочность и стойкость к вибрациям; однако коррозионная стойкость этих сплавов несколько ниже, чем у чистого свинца. Они находят применение в кабельной технике. В некоторых случаях свинец для кабельных оболочек заменяется очень чистым алюминием (имеющим высокую пластичность, что важно для опрессовки кабелей при сравнительно невысоком давлении) или используются пластмассовые оболочки, значительно более дешевые и легкие, чем свинцовые. Свинец и его соединения ядовиты.

Олово — серебристо-белый металл, обладающий ясно выраженным кристаллическим строением. При изгибе прутка олова слышен треск, вызываемый трением кристаллов друг о друга. Олово — мягкий, тягучий металл, позволяющий получать путем прокатки тонкую фольгу. Предел прочности при растяжении белого олова колеблется от 16 до 38 МПа. Кроме обыкновенного белого олова, кристаллизующегося в тетрагональной системе, существует серое порошкообразное олово (плотность 5,6 Мг/м³). При сильном морозе на белом олове появляются серые пятна (выделение серого олова), получившие название оловянной чумы. При нагреве серое олово снова переходит в белое. Если нагреть олово до температуры выше 160 °С, оно переходит в третью (ромбическую) модификацию и становится хрупким. При нормальной температуре олово на воздухе не окисляется, вода на него не влияет, а разведенные кислоты действуют очень медленно. Олово используют в качестве защитных покрытий металлов (лужение); оно входит в состав бронз и припоев. Тонкая оловянная фольга (6—8 мкм), применяемая в производстве

некоторых типов конденсаторов, обычно содержит присадки: до 15 % свинца и до 1 % сурьмы — для облегчения прокатки и улучшения механической прочности. Оловянно-свинцовую фольгу толщиной 20—40 мкм применяют в качестве электродов в слюдяных конденсаторах.

Цинк — светлый металл, получаемый металлургическими методами и очищаемый электролитически. Цинк марки ЦВ (высокоочищенный) содержит не менее 99,99 % Zn и не более 0,01 % примесей (Pb, Fe, Cd, Cu). При комнатной температуре цинк хрупок; при нагреве до 100 °С он становится тягучим и пластичным, а при дальнейшем нагреве (свыше 200 °С) — снова хрупким. Цинк применяется в качестве защитных покрытий, составной части латуней, из него изготавливаются электроды гальванических элементов. Кроме того, он используется в фотоэлементах и для металлизации бумаги в малогабаритных металлобумажных конденсаторах. Нанесение металлического слоя на бумагу производят путем испарения цинка в вакууме при температуре 600 °С.

Кадмий — серебристо-белый металл, являющийся постоянным спутником цинка в его рудах и добываемый как побочный продукт при металлургии цинка; подвергается электролитической очистке. Кадмий выпускается нескольких марок, в зависимости от чистоты (наиболее высокая степень чистоты 99,997 %). Кадмий применяется в электровакуумной технике для изготовления фотоэлементов. Он входит в состав припоев, бронз, используется в производстве гальванических элементов и как замедлитель в атомных реакторах.

Индий — металл с низкой температурой плавления, используемый в качестве акцепторной примеси (см. стр. 235) и контактного материала в производстве транзисторов и полупроводниковых диодов.

Галлий интересен тем, что плавится при комнатной температуре (см. табл. 7-1). Как и индий, он применяется в полупроводниковой технике в качестве легирующей примеси для германия и кремния.

Ртуть — единственный металл, находящийся в жидком состоянии при нормальной температуре (см. табл. 7-1). Ее добывают из киновари HgS путем термического разложения при температуре около 500 °С и затем подвергают многократной очистке, заканчивающейся вакуумной перегонкой при температуре около 200 °С. Ртуть легко испаряется и имеет значительное давление паров при комнатной температуре. Пары ртути отличаются более низким потенциалом ионизации по сравнению с обычными и инертными газами, что и обуславливает применение ртути в газоразрядных приборах. Ртуть окисляется на воздухе лишь при температурах, близких к температуре ее кипения.

Щелочные, щелочно-земельные металлы, магний, алюминий, цинк, олово, свинец, кадмий, платина, золото и серебро растворяются в ртути, образуя амальгамы. Слабо растворяются в ртути медь и никель.

Поэтому приборы, содержащие ртуть, должны иметь металлическую арматуру из вольфрама, железа или тантала, так как эти металлы нерастворимы в ртути.

Ртуть применяют в качестве жидкого катода в ртутных выпрямителях, в ртутных лампах и газоразрядных приборах, в лампах дневного света, а также используют для ртутных контактов в реле и т. п.

Ртуть и ее соединения весьма ядовиты; очень вредны пары ртути.

7-5. РАЗЛИЧНЫЕ СПЛАВЫ, ПРИПОИ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ **СПЛАВЫ ВЫСОКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ** **ДЛЯ РЕЗИСТОРОВ И НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ**

Общие сведения. Определение понятия «сплав высокого сопротивления» и области применения этих сплавов уже были указаны выше (стр. 186). При использовании этих сплавов для электроизмерительных приборов и образцовых резисторов, помимо высокого удельного сопротивления ρ , требуются высокая стабильность ρ во времени, малый температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ и малый коэффициент термо-ЭДС в паре данного сплава с медью. Сплавы для электронагревательных элементов должны длительно работать на воздухе при высоких температурах (иногда до 1000 °C и даже выше). Кроме того, во многих случаях требуется технологичность сплавов — возможность изготовления из них гибкой проволоки, иногда весьма тонкой (диаметром порядка сотых долей миллиметра). Наконец, желательно, чтобы сплавы, используемые для приборов, производимых в больших количествах, — реостатов, электроплиток, электрических чайников, паяльников, — были дешевыми и по возможности не содержали дефицитных компонентов.

Манганин. Это наиболее типичный и широко применяемый для изготовления образцовых резисторов сплав. Примерный состав его: Cu — 85 %, Mn — 12 %, Ni — 3 %; название происходит от наличия в нем марганца (латинское *manganum*); желтоватый цвет объясняется большим содержанием меди. Значение ρ манганина 0,42—0,48 мкОм·м; α_ρ весьма мал, $(5—30) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; коэффициент термо-ЭДС в паре с медью всего лишь 1—2 мкВ/К. Манганин может вытягиваться в тонкую (диаметром до 0,02 мм) проволоку: часто манганиновая проволока выпускается с эмалевой изоляцией. Для обеспечения малого значения α_ρ и стабильности ρ во времени манганиновая проволока подвергается специальной термообработке (отжиг в вакууме при температуре 550—600 °C с последующим медленным охлаждением; намотанные катушки иногда дополнительно отжигаются при 200 °C. Предельно длительно допустимая рабочая температура сплавов манганина не более 200 °C; механические свойства: $\sigma_p = 450—600 \text{ МПа}$, $\Delta l/l = 15—30 \%$. Плотность манганина 8,4 Мг/м³.

Константан — сплав, содержащий около 60 % меди и 40 % никеля; этот состав отвечает минимуму α_ρ в системе Cu — Ni при довольно высоком значении ρ (см. рис. 7-3, а и б). Название «константан» объясняется значительным постоянством ρ при изменении температуры [для сплавов типа константана α_ρ при нормальной температуре составляет минус $(5—25) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при $\rho = 0,48—0,52 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$]. По механическим свойствам константан близок к ман-

Таблица 7-6

Свойства сплавов типа нихрома

Марка сплава	Состав, %, по массе *			Плотность, Мг/м ³	ρ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^6$, К ⁻¹	Предельная рабочая температура **, °С
	Cr	Ni	Mn				
X15H60	15—18	55—61	1,5	8,2—8,3	1,1—1,2	100—200	1000
X20H80	20—23	75—78	1,5	8,4—8,5	1,0—1,1	100—200	1100

* Остальное Fe.

** Это температура, при которой электронагревательный элемент может длительно работать на воздухе без заметного окисления и без механических деформаций.

ганину ($\sigma_p = 400—500$ МПа, $\Delta l/l = 20—40$ %). Его плотность 8,9 Мг/м³.

Нагревостойкость константана выше, чем манганина: константан можно применять для изготовления реостатов и электронагревательных элементов, длительно работающих при температуре 450 °С.

Существенным отличием константана от манганина является высокая термо-ЭДС константана в паре с медью, а также с железом: его коэффициент термо-ЭДС в паре с медью составляет 45—55 мкВ/К (рис. 7-27). Это является недостатком при использовании константановых резисторов в измерительных схемах; при наличии разности температур в местах контакта константановых проводников с медными возникают термоэлектродвижущие силы, которые могут явиться источником ошибок, особенно при мостовых и потенциометрических методах измерений. Зато константан с успехом может быть использован при изготовлении термпар, служащих для измерения температуры, если последняя не превышает нескольких сотен градусов (рис. 7-27), кривые 3 и 4).

Широкому применению константана препятствует большое содержание в его составе дорогого и дефицитного никеля.

Сплавы на основе железа. Эти сплавы в основном применяются для электронагревательных элементов. Высокая нагревостойкость таких элементов объясняется введением в их состав достаточно больших количеств металлов, имеющих высокое значение объемного коэффициента оксидации K (стр. 183), потому при нагреве на воздухе образующих практически сплошную оксидную пленку. Такими металлами являются никель, хром и алюминий. Железо, как уже отмечалось выше, имеет объемный коэффициент оксидации меньше единицы и потому при нагреве легко окисляется (см. рис. 7-10); чем больше содержание железа в сплаве, например, с Ni и Cr, тем менее нагревостоек этот сплав.

Сплавы системы Fe — Ni — Cr называются *нихромами* или (при повышенном содержании Fe) *ферронихромами* (табл. 7-6); сплавы системы Fe — Cr — Al называются *фехралями* и *хромалями* (табл. 7-7). Происхождение названий этих сплавов не требует разъяснения. Следует отметить, что для самых различных сплавов по

Таблица 7-7

Свойства хромалюминиевых сплавов

Марка сплава	Состав, %, по массе *				Плотность, Мг/м ³	ρ , мкОм·м	$TK_{\rho} \times 10^6$, К ⁻¹	Предельно допустимая рабочая температура, °С	σ_p , МПа	Относительное удлинение перед разрывом, %
	Mn	Ni	Cr	Al						
X13Ю4	0,7	0,6	12—15	3,5—5,5	7,1—7,5	1,2—1,35	100—120	900	700	20
X23Ю5	0,7	0,6	22—25	4,5—5,5	6,9—7,3	1,3—1,5	65	1200	800	10—15

* Остальное железо.

принятым в СССР стандартам часто применяются условные обозначения, составляемые из букв и чисел. Буквы эти обозначают наиболее характерные элементы, входящие в состав сплава, причем буква входит в название элемента, но не обязательно является первой буквой этого названия (например, Б обозначает ниобий, В — вольфрам, Г — марганец, Д — медь, К — кобальт, Л — бериллий, Н — никель, Т — титан, Х — хром, Ю — алюминий и т. п.), а число — приблизительное содержание данного компонента в сплаве (в процентах по массе); дополнительные цифры в начале обозначения определяют повышенное (цифра 0) или пониженное качество сплава. Так, в табл. 7-7 обозначение X23Ю5 соответствует сплаву с содержанием хрома 23 % и алюминия — около 5 %.

Помимо скорости окисления того или иного чистого металла или компонента сплава большое влияние на срок жизни нагревательного элемента, работающего на воздухе, оказывают свойства образующегося оксида. Если он летуч, то он удаляется с поверхности металла и не может защитить оставшийся металл от дальнейшего окисления. Так, оксиды вольфрама и молибдена легко улетучиваются, а потому эти металлы не могут работать в накаливаемом состоянии при доступе кислорода. Если же оксид нелетуч, то он при окислении образует слой на поверхности металла.

Стойкость хромо-никелевых сплавов при высокой температуре в воздушной среде объясняется близкими значениями температурных коэффициентов линейного расширения этих сплавов и их оксидных пленок. Поэтому растрескивание оксидных пленок имеет место только при резких сменах температуры; тогда при последующих нагревах кислород воздуха будет проникать в образовавшиеся трещины и производить дальнейшее окисление сплава. Поэтому при многократном кратковременном включении электронагревательного элемента из нихрома он может перегореть значительно скорее, чем при непрерывной работе элемента при той же температуре.

Срок жизни элементов из нихрома и других нагревостойких сплавов существенно укорачивается также при наличии колебаний сечения проволоки: в местах с уменьшенным сечением («шейки») нагревательные элементы перегреваются и легче перегорают.

Длительность работы электронагревательных элементов из нихрома и аналогичных сплавов может быть во много раз увеличена при исключении доступа кислорода к поверхности проволоки. В трубчатых нагревательных элементах спираль из сплава высокого сопротивления проходит по оси трубки из стойкого к окислению металла; промежуток между проволокой и трубкой заполняется порошком диэлектрика с высокой теплопроводностью (например, магнезией MgO). При дополнительной протяжке такой трубки ее внешний диаметр уменьшается, магнезия уплотняется и образует механически прочную изоляцию внутреннего проводника. Такие нагревательные элементы применяются, например, в электрических кипятильниках; они могут работать весьма длительно без повреждений.

Некоторые свойства сплавов типа нихрома даны в табл. 7-6. Их механические параметры: $\sigma_p = 650-700$ МПа, $\Delta l/l = 25-30$ %. Нихромы весьма технологичны, их можно легко протягивать в сравнительно тонкую проволоку или ленту, они имеют высокую рабочую температуру. Однако, как и в константане, в этих сплавах велико содержание дорогого и дефицитного компонента — никеля.

Хромо-алюминиевые сплавы (фехраль, хромаль) намного дешевле нихромов, так как хром и алюминий сравнительно дешевы и легко доступны. Однако эти сплавы менее технологичны, более тверды и хрупки, из них могут быть получены проволоки и ленты лишь большего поперечного сечения, чем из нихромов. Поэтому эти сплавы в основном используются в электротермической технике для электронагревательных устройств большой мощности и промышленных электрических печей. Некоторые свойства этих сплавов приведены в табл. 7-7.

СПЛАВЫ ДЛЯ ТЕРМОПАР

Для изготовления термопар применяются следующие сплавы:

копель (56 % Cu и 44 % Ni),
алюмель (95 % Ni, остальное Al, Si и Mg),
хромель (90 % Ni и 10 % Cr),
платинородий (90 % Pt и 10 % Rh).

На рис. 7-27 были приведены зависимости термо-ЭДС от разности температур горячего и холодного спаев для наиболее употребительных термопар.

Термопары могут применяться для измерения следующих температур:

платинородий — *платина* — до 1600°C ,
медь — *константан* и *медь* — *копель* — до 350°C ,
железо — *константан*, *железо* и *хромель* — *копель* — до 600°C ,
хромель — *алюмель* — до $900-1000^\circ\text{C}$.

Наибольшую термо-ЭДС при данной разности температур развивает термопара хромель — копель. Знак термо-ЭДС у приведенных на рис. 7-27 термопар таков, что в холодном спае ток идет от первого названного в паре материала ко второму (т. е. от хромеля к копелю, от меди к константану), а в горячем спае — в обратном направлении.

Весьма значительными коэффициентами термо-ЭДС обладают некоторые полупроводниковые материалы, которые, в частности, могут использоваться для изготовления термоэлектрических генераторов (см. стр. 266).

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ СПЛАВЫ

Эти сплавы применяются в преобразователях деформации различных конструкций под действием механических (обычно растягивающих) усилий. Действие таких преобразователей основано на изменении сопротивления при деформациях тензометрического элемента. Коэффициент тензочувствительности определяется выражением

$$d = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l}, \quad (7-13)$$

где ΔR — изменение сопротивления R при изменении Δl длины элемента l .

Значение d может быть рассчитано по формуле

$$d = 1 + \frac{\Delta \rho}{\rho} \frac{ES}{F} + 2\mu. \quad (7-14)$$

Здесь $\Delta \rho$ — изменение удельного сопротивления ρ материала тензопреобразователя под влиянием механической нагрузки F ; S — площадь поперечного сечения проволоки преобразователя; E — модуль Юнга; μ — коэффициент Пуассона материала этой проволоки.

Основным материалом для тензопреобразователей, работающих при сравнительно невысоких температурах, является описанный выше константан.

КОНТАКТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Наиболее ответственными контактами, применяемыми в электротехнике, являются контакты, служащие для периодического замыкания и размыкания электрических цепей (разрывные, а также скользящие контакты).

Материалы для разрывных контактов, применяемые для размыкания цепей при больших силах тока и высоких напряжениях, должны обеспечивать высокую надежность (исключение возможности обгорания контактирующих поверхностей, а также приваривания их друг к другу под действием возникающей при разрыве контакта электрической дуги) при малом переходном электрическом сопротивлении контакта в замкнутом состоянии.

В качестве контактных материалов для разрывных контактов, помимо чистых тугоплавких металлов, применяются различные сплавы и металлокерамические композиции. Большое применение имеет материал системы Ag—CdO при содержании оксида кадмия 12—20 % по массе. Такой материал получается при нагреве в окислительной атмосфере сплава серебро — кадмий. Для разрывных контактов в установках большой мощности применяют композиции Ag с Co , Ni , Cr , W , Mo и Ta ; Cu с W и Mo ; Au с W и Mo .

Материалы для скользящих контактов должны обладать высокой стойкостью к истиранию. Для этой цели применяют холоднокатаную (твердую) медь, бериллиевую бронзу (см. выше), а также материалы системы Ag—CdO . Щетки, служащие для создания скользящего контакта во вращающихся электрических машинах, описаны ниже на стр. 226.

ПРИПОИ

Припой представляют собой специальные сплавы, применяемые при пайке. Пайка осуществляется или с целью создания механически прочного (иногда герметичного) шва, или с целью получения постоянного электрического контакта с малым переходным сопротивлением. При пайке места соединения и припой нагреваются. Так как припой имеет температуру плавления значительно меньшую, чем у соединяемых металлов, то он плавится, в то время как спаиваемые металлы остаются твердыми. На границе соприкосновения расплавленного припоя и твердого металла происходят сложные физико-химические процессы. Припой смачивает металл, растекается по нему и заполняет зазоры между соединяемыми деталями.

Состав и свойства припоев

Тип припоя	Марка припоя	Основные компоненты	Свойства			Материалы, спаиваемые данным припоем
			Плотность, Мг/м^3	Предел прочности при растяжении, МПа	Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	
Припой оловянно-свинцовые	От ПОС-18 до ПОС-90	Sn 18—90 %, Sb 0,15—2,5 %, Pb — остальное	7,6—10,2	28—43	190—277	Медь и ее сплавы, серебро, оцинкованное железо
Припой оловянно-свинцово-кадмиевые	ПОСК-47	Sn 47—50 %, Pb 32—36 %, Cd 17—18 %	—	—	145—180	Медь и ее сплавы, серебро, нанесенное методом взвешивания на керамику
Припой оловянно-свинцово-серебряно-кадмиевые	ПСрК	Sn 30 %, Pb 63 %, Cd 5 %, Ag 2 %	—	—	225	То же
Слав Вуда	—	Sn 12,5 %, Pb 25 %, Cd 11,5 %, Bi 50 %	—	—	60,5	Различные, спаиваемые при особо низких температурах
Припой оловянно-кадмиево-цинковые	—	Sn 40—55 %, Cd 20 %, Zn 25 %, (Al 15 %)	—	—	200—250	Алюминий и его сплавы
Припой медно-цинковые	ПМЦ-36, ПМЦ-54	Cu 36—54 %, Zn — остальное	7,7—8,3	220	825—860	Медь и ее сплавы, сталь
Припой медно-серебряно-цинковые	От ПСр-25 до ПСр-70	Cu 26—40 %, Ag 25—70 %, Zn 4—35 %	8,9—9,8	280—350	720—765	Медь и ее сплавы; серебро, платина, вольфрам, сталь

При этом припой диффундирует в основной металл, основной металл растворяется в припое, в результате чего образуется промежуточная прослойка, которая после застытия соединяет детали в одно целое.

Припой принято делить на две группы: *мягкие* и *твердые*. К мягким относятся припои с температурой плавления до 400 °С, а к твердым — припои с температурой плавления свыше 500 °С. Кроме температуры плавления, припои существенно различаются и по механическим свойствам. Мягкие припои имеют предел прочности при растяжении σ_p не выше 50–70 МПа, а твердые — до 500 МПа.

Тип припоя выбирают, сообразуясь с родом спаиваемых металлов или сплавов, требуемой механической прочностью, коррозионной стойкостью, стоимостью и — при пайке токоведущих частей — с удельной электрической проводимостью припоя.

Мягкими припоями в основном являются припой оловянно-свинцовые (марка ПОС) с содержанием олова от 18 % (ПОС-18) до 90 % (ПОС-90). Удельная проводимость этих припоев составляет 9–13 % удельной проводимости стандартной меди, а температурный коэффициент линейного расширения α_l — $(26–27) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Существуют также мягкие припои с добавками алюминия, серебра. Еще более легкоплавки припои, в состав которых входят висмут и кадмий. Они применяются там, где требуется пониженная температура пайки; механическая прочность их очень незначительна. Висмутовые припои обладают большой хрупкостью.

Наиболее распространенные твердые припои — медно-цинковые (ПМЦ) и серебряные (ПСР).

Обобщенные характеристики некоторых припоев приведены в табл. 7-8.

Не относящиеся к собственно припоям особые виды металлических материалов применяются в электровакуумной технике для вводов, впаляемых в стекло и работающих при сравнительно низких температурах, так что использование здесь особо тугоплавких, но дорогих металлов (вольфрам, молибден, платина) не требуется. Для этих материалов особую важность имеет температурный коэффициент линейного расширения α_l , который для получения вакуумплотного ввода должен согласовываться с α_l стекла. Отметим *ковар* (марка 29НК), применяемый для впаивания в твердые стекла; это сплав примерного состава: Ni 29 %, Co 18 %, Fe остальное; его ρ равно 0,49 мкОм·м, α_l составляет $(4–5) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Платинит представляет собой биметаллическую проволоку с сердечником из никелевой стали марки Н42 (с содержанием Ni 42–44 % по массе) и наружным слоем из меди марки М0 (стр. 198). Содержание меди в платините — от 25 до 30 % общей массы проволоки. Название «платинит» объясняется тем, что α_l платинитовой проволоки близок к α_l платины (см. табл. 7-1).

ФЛЮСЫ

Это вспомогательные материалы для получения надежной пайки. Они должны: 1) растворять и удалять оксиды и загрязнения с поверхности спаиваемых металлов; 2) защищать в процессе пайки поверхность металла, а также расплавленный припой от окисления; 3) уменьшать поверхностное натяжение расплавленного припоя и смачиваемость им соединяемых поверхностей.

По действию, оказываемому на металл, подвергающийся пайке, флюсы делятся на несколько групп.

Активные или кислотные флюсы. Они готовятся на основе активных веществ: соляной кислоты, хлористых и фтористых соединений металлов и т. д. Эти флюсы интенсивно растворяют оксидные пленки на поверхности металла, благодаря чему обеспечивается хорошая адгезия, а следовательно, и высокая механическая прочность спая. Остаток флюса после пайки вызывает интенсивную коррозию спая и основного металла. Применяются эти флюсы только в том случае, когда возможна тщательная промывка и полное удаление остатков флюса.

При монтажной пайке электрорадиоприборов применение активных флюсов недопустимо.

Бескислотные флюсы. Так называют канифоль и флюсы, приготовляемые на ее основе с добавлением неактивных веществ (спирт, глицерин).

Активированные флюсы. Так называют флюсы, приготовляемые на основе канифоли с добавкой активаторов — небольших количеств солянокислого или фосфорнокислого анилина, салициловой кислоты, солянокислого диэтиламина и т. п. Высокая активность некоторых активированных флюсов позволяет производить пайку без предварительного удаления оксидов после обезжиривания.

Антикоррозийные флюсы. Это флюсы на основе фосфорной кислоты с добавлением различных органических соединений и растворителей, а также флюсы на основе органических кислот. Остатки этих флюсов не вызывают коррозии.

НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПРОВОДНИКИ

Электроугольные изделия. Из числа твердых неметаллических проводниковых материалов наибольшее значение имеют материалы на основе углерода (электротехнические угольные изделия, сокращенно электроугольные изделия). Из угля изготовляют щетки электрических машин, электроды для прожекторов, электроды для дуговых электрических печей и электролитических ванн, аноды гальванических элементов. Угольные порошки используют в микрофонах для создания сопротивления, изменяющегося от звукового давления. Из угля делают высокоомные резисторы, разрядники для телефонных сетей; угольные изделия применяют в электровакуумной технике.

В качестве сырья для производства электроугольных изделий можно использовать *сажу*, *графит* или *антрацит*. Для получения стержневых электродов измельченная масса со связующим, в качестве которого используется каменноугольная смола, а иногда и жидкое стекло, продавливается сквозь мундштук. Изделия более сложной формы изготовляют в соответствующих пресс-формах. Угольные заготовки проходят процесс обжига. Режим обжига определяет форму, в которой углерод будет находиться в изделии. При высоких температурах достигается искусственный перевод углерода в форму графита, вследствие чего такой процесс носит название *графитирования*.

Обжиг обычных щеток для электрических машин ведут при температуре около 800 °С; графитированные щетки нагревают при обжиге до 2200 °С.

Угольные электроды (табл. 7-9), работа которых будет протекать при высоких температурах, обжигаются также при очень высокой температуре, вплоть до 3000 °С. Угольные электроды, как и другие угольные изделия, имеют отрицательный температурный коэффициент удельного сопротивления (рис. 7-28).

Щетки служат для образования скользящего контакта между неподвижной и вращающейся частями электрической машины, т. е. для подвода (или отвода) тока к коллектору или контактными кольцам.

Щетки выпускают различных размеров (прилегающая к коллектору контактная поверхность щетки — от 4 × 4 до 35 × 35 мм, высота щетки — от 12 до 70 мм). Имеется несколько марок щеток, отличающихся друг от друга составом и технологическим процессом изготовления. Для различных марок характерны определенные значения удельного сопротивления, допустимой плотности тока, линейной скорости на коллекторе, коэффициента трения, твердости щетки и т. д.

Различают щетки *угольно-графитные* (УГ), *графитные* (Г), *электрографитированные*, т. е. подвергнутые термической электрообработке — графитированию (ЭГ), *медно-графитные* — с содержанием металлической меди (М и МГ).

Щетки с содержанием порошкового металла обладают особенно малым электрическим сопротивлением и дают незначительное контактное падение напряжения (между щеткой и коллектором).

Важнейшие характеристики щеток приведены в табл. 7-10.

Параметры угольных электродов

Таблица 7-9

Тип электродов	Удельное сопротивление ρ , мкОм·м	Плотность, Мг/м³	Зольность, %, по массе	Предел прочности при растяжении σ_r , МПа	Предел прочности при сжатии σ_c , МПа
Угольные	50	1,5	5—12	700—1100	2300—4100
Графитированные	15	2,0	0,03—0,2	600—700	200—500

Параметры угольных щеток

Типы щеток	Удельное сопротивление ρ , кОм·м	Допустимая плотность тока, МА/м ²	Допустимая линейная скорость, м/с
Т и УГ	18—60	6—8	10—15
Г	10—46	7—11	12—25
ЭГ	10—45	9—11	25—45
М и МГ	0,05—1,20	12—20	12—25

Угольные порошки для микрофонов изготавливаются из антрацита. Удельное сопротивление порошка зависит от крупности зерен, режима обжига порошка и плотности засыпки.

Микрофонные порошки выпускают двух типов: мелкозернистые, проходящие сквозь сито с 52 отверстиями на 1 см², и крупнозернистые, проходящие сквозь сито с 45 отверстиями на 1 см².

Обжиг порошков, увеличивающий их электрическое сопротивление, производят при температуре 600—800 °С. Сопротивление порошков измеряют в кубике объемом 1 см³, куда порошок засыпают из бюретки с высоты 1 см в течение 6—7 с. Значение ρ мелкозернистого порошка должно быть 0,4 Ом·м. Масса объема 1 см³, заполненного угольным порошком вышеуказанным методом, должна равняться 0,8—0,9 г.

Порошки не должны слеживаться с течением времени и слипаться при воздействии повышенной влажности.

Непроволочные резисторы, отличающиеся от проволочных уменьшенными размерами и высоким верхним пределом номинального сопротивления, широко применяются в автоматике, измерительной и вычислительной технике и некоторых других областях электротехники. Они должны иметь малую зависимость сопротивления от напряжения и отличаться высокой стабильностью при воздействии температуры и влажности.

В качестве проводящих материалов непроволочных линейных резисторов могут быть использованы природный графит, сажа, пиролитический углерод, бороуглеродистые пленки, а также высокоомные сплавы металлов и другие материалы.

Природный графит представляет собой одну из модификаций чистого углерода слоистой структуры (рис. 7-29) с большой анизотропией как электрических, так и механических свойств. Основные свойства графита (а также пиролитического углерода, см. ниже) приведены в табл. 7-11. Следует отметить, что чистый углерод в модификации алмаза представляет собой диэлектрик с весьма высоким удельным сопротивлением.

Сажа представляет собой мелкодисперсный углерод. Лаки, в состав которых в качестве пигмента введена сажа, обладают малым удельным сопротивлением и могут быть использованы для выравнивания электрического поля в электрических машинах высокого напряжения.

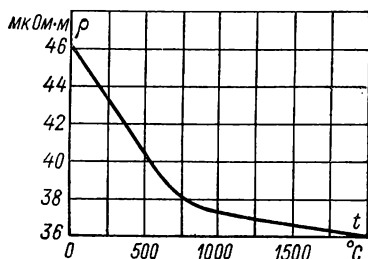


Рис. 7-28

Рис. 7-28. Зависимость удельного сопротивления ρ угольного электрода от температуры

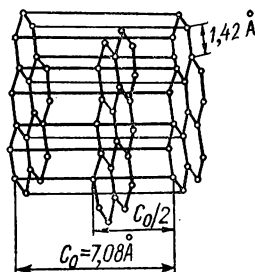


Рис. 7-29

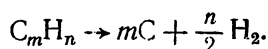
Рис. 7-29. Структура графита

Параметры графита и пиролитического углерода

Материал	Удельное сопротивление ρ , мкОм·м	Плотность, Мг/м³	Температурный коэффициент удельного сопротивления $\alpha_\rho \cdot 10^4$, К⁻¹	Температурный коэффициент линейного расширения $\alpha_l \cdot 10^6$, К⁻¹
Поликристаллический графит	8	2,26	—10	7,5
Монокристалл графита				
вдоль базисных плоскостей	0,4	2,24	—9	6,6
поперек базисных плоскостей	100	2,24	—400	2,6
Пиролитический углерод	10—50	2,10	—2	6,5—7,0

Пиролитический углерод получают путем пиролиза (термического разложения без доступа кислорода) газообразных углеводородов (метан, бензин, гептан) в камере, где находятся керамические или стеклянные основания заготовок для резисторов.

Схема реакции пиролиза углеводородов общего состава C_mH_n :



Особенностью структуры пиролитического углерода является отсутствие строгой периодичности в расположении слоев (в отличие от графита) при сохранении их параллельности.

Бороуглеродистые пленки получают пиролизом борорганических соединений, например $B(C_4H_9)_3$ или $B(C_3H_7)_3$. Эти пленки обладают малым температурным коэффициентом удельного сопротивления.

Проводниковые материалы особо высокой нагревостойкости. В некоторых случаях (нагревательные элементы высокотемпературных электрических печей, электроды магнетогидродинамических (МГД-) генераторов) требуются проводниковые материалы, которые могли бы достаточно надежно работать при температурах 1500—2000 К и даже выше. В МГД-генераторах условия работы проводниковых материалов еще усложняются из-за соприкосновения материала с плазмой и возможности электролиза при прохождении через материал постоянного тока.

Проблема получения проводниковых материалов, полностью удовлетворяющих всем этим требованиям, окончательно еще не решена; по-видимому, решение может быть найдено исключительно в применении специальных керамических материалов. Среди высоконагревостойких проводящих материалов могут быть отмечены некоторые оксиды (прежде всего керамика диоксида циркония ZrO_2 , стабилизированная добавкой оксида иттрия Y_2O_3), керамика диоксида церия CeO_2 , некоторые хромиты. На рис. 7-30 представлены температурные зависимости ρ таких материалов. Некоторые свойства керамики $ZrO_2 - Y_2O_3$ (после обжига, при пористости 25 % по объему): средняя плотность 2,9 Мг/м³,

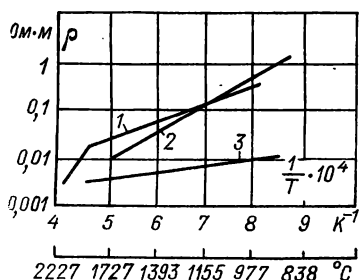


Рис. 7-30. Температурные зависимости удельного сопротивления ρ керамики $ZrO_2 - Y_2O_3$ (кривая 1), диоксид церия CeO_2 (кривая 2) и хромита лантана $LaCrO_3$ (кривая 3)

$\alpha_l = 13 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, коэффициент теплопроводности (при 1500°C) равен $1,45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Стабилизируя диоксид циркония ZrO_2 добавлением оксида иттрия Y_2O_3 (или оксидов некоторых других металлов), можно избежать структурных превращений чистого ZrO_2 во время охлаждения после обжига, связанных с уменьшением объема и вызываемых этим повреждением обожженных изделий.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Дайте классификацию проводниковых материалов.
2. Какими основными параметрами определяются свойства проводников электрического тока?
3. В чем состоит явление сверхпроводимости и что такое сверхпроводники I и II рода?
4. Какие вещества имеют высокую проводимость, их свойства и применение?
5. Для каких целей используются сплавы высокого сопротивления, их состав и свойства?

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

8-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Большая группа веществ с электронной электропроводностью, удельное сопротивление которых при нормальной температуре больше, чем у проводников, но меньше, чем у диэлектриков (табл. 8-1), относится к полупроводникам. Как было указано в § В-1, электропроводность полупроводников в большой степени зависит от внешних энергетических воздействий, а также от различных примесей, иногда в ничтожных количествах присутствующих в теле *собственного* полупроводника.

Управляемость электропроводностью полупроводников посредством температуры, света, электрического поля, механических усилий положена в основу принципа действия соответственно терморезисторов (термисторов), фоторезисторов, нелинейных резисторов (варисторов), тензорезисторов и т. д.

Удельное сопротивление электротехнических материалов различных классов при 20°C и постоянном напряжении

Таблица 8-1

Класс материалов	ρ , Ом·м	Число порядков по значению ρ	Знак α_ρ в широком интервале температур	Тип электропроводности
Проводники . . .	$10^{-8}—10^{-5}$	3	Положительный	Электронная
Полупроводники	$10^{-6}—10^{+8}$	14	Отрицательный	Электронная
Диэлектрики	$10^{+7}—10^{+16}$	9	Отрицательный	Ионная и электронная

Таблица 8-2

Простые электронные полупроводники

Элемент	Группа в таблице Менделеева	Ширина запрещенной зоны		Элемент	Группа в таблице Менделеева	Ширина запрещенной зоны	
		эВ	$\times 10^{-18}$ Дж			эВ	$\times 10^{-18}$ Дж
Бор	III	1,10	1,76	Мышьяк	V	1,20	1,92
Кремний	IV	1,12	1,79	Сера	VI	2,50	4,00
Германий	IV	0,72	1,15	Селен	VI	1,70	2,72
Фосфор	V	1,50	2,40	Теллур	VI	0,36	0,58
				Йод	VII	1,25	2,00

Примечание. В некоторых модификациях свойствами полупроводников обладают еще олово (серое), сурьма и углерод.

Наличие у полупроводников двух типов электропроводности — электронной (n) и электронно-дырочной (p) позволяет получить полупроводниковые изделия с $p-n$ -переходом. Сюда относятся различные типы как мощных, так и маломощных выпрямителей, усилителей и генераторов. Полупроводниковые системы могут быть с успехом использованы для преобразования различных видов энергии в энергию электрического тока с такими значениями коэффициента преобразования, которые делают полупроводниковые преобразователи сравнимыми с существующими преобразователями других типов, а иногда и превосходящими их. Примерами полупроводниковых преобразователей могут служить солнечные батареи и термоэлектрические генераторы. При помощи полупроводников можно понизить температуру на несколько десятков градусов. В последние годы особое значение приобрело рекомбинационное свечение при низком напряжении постоянного тока электронно-дырочных переходов, которые используются для создания сигнальных источников света и в устройствах вывода информации из вычислительных машин.

Полупроводники могут служить также нагревательными элементами (силитовые стержни), индикаторами радиоактивных излучений, с их помощью также можно измерять напряженность магнитного поля (преобразователи Холла) и т. д.

Использующиеся в практике полупроводники могут быть подразделены на *простые* полупроводники (их основной состав образован атомами одного химического элемента) и *сложные полупроводниковые композиции*, основной состав которых образован атомами двух или большего числа химических элементов. В настоящее время изучаются также *стеклообразные* и *жидкие* полупроводники. *Простых* полупроводников существует около десятка, они приведены в табл. 8-2. В современной технике особое значение приобрели кремний, германий и частично селен. *Сложными* полупроводниками являются соединения элементов различных групп таблицы Менделеева, соответствующие общим формулам $A^{IV}B^{IV}$ (например, SiC), $A^{III}B^V$ (InSb, GaAs, GaP), $A^{II}B^{IV}$ (CdS, ZnSe), а также некоторые

оксиды (например, Si_2O) и вещества сложного состава. К *полупроводниковым композициям* можно отнести материалы с полупроводящей или проводящей фазой из карбида кремния и графита, сцепленных керамической или другой связкой. Наиболее распространенными из них являются тирит, силит и др.

Изготовленные из полупроводниковых материалов приборы обладают преимуществами, к ним относятся: 1) большой срок службы; 2) малые габариты и масса; 3) простота и надежность конструкции, большая механическая прочность (не боятся тряски и ударов); 4) отсутствие цепей накала при замене полупроводниковыми приборами электронных ламп, потребление малой мощности и малая инерционность; 5) экономичность при массовом производстве.

Дальнейшее развитие электроники твердого тела позволило перейти от дискретных полупроводниковых приборов к созданию и серийному производству узлов электронной аппаратуры и схем, устройств и приборов в целом. Это прогрессивное направление техники получило название микроэлектроники. Научной задачей, решаемой с помощью микроэлектроники, является создание сложнейших кибернетических систем для использования в народном хозяйстве, для освоения космоса, для исследований в области биологии и медицины. Техническая задача микроэлектроники сводится к дальнейшему сокращению размеров и массы электронной аппаратуры, увеличению плотности монтажа при одновременном повышении ее долговечности и надежности. Осуществить это возможно только на основе резкого сокращения затрат мощности в электронных схемах на полупроводниковых элементах. Экономическая задача микроэлектроники заключается в существенном сокращении потребности в материалах, трудоемкости и капитальных вложений в производство электронной аппаратуры и приборов, в перевозку деталей и аппаратуры, а также в снижении энергетических затрат при ее производстве и эксплуатации.

Советская наука и техника полупроводников развивалась по своему пути, обогащая мировую науку достижениями и в то же время используя все прогрессивное, что давала зарубежная наука и техника.

8-2. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

СОБСТВЕННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

Собственный полупроводник — полупроводник, не содержащий примесей, влияющих на его электропроводность. Общие представления зонной теории твердого тела, приведенные во введении, указывают, что для полупроводников характерно наличие не очень широкой запрещенной зоны в энергетической диаграмме (см. рис. В-8). Ширина запрещенной зоны полупроводниковых элементов приведена в табл. 8-2. Для наиболее широко используемых полупроводников она составляет $(0,8-4,0) \cdot 10^{-19}$ Дж $(0,5-2,5$ эВ). На рис. 8-1, а приведена энергетическая диаграмма собственного полупроводника, т. е.

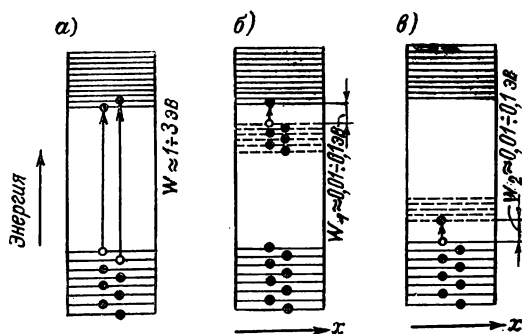


Рис. 8-1. Влияние примесей на энергетическую диаграмму полупроводников: *а* — собственный полупроводник; *б* — полупроводник с донорной примесью, электропроводность электронная (*n*-типа); *в* — полупроводник с акцепторной примесью, электропроводность дырочная (*p*-типа)

ней (зону проводимости) могут поставляться только из заполненной электронами зоны (валентной зоны). Распределение электронов по уровням энергии, изображенное на рис. 8-1, *а*, соответствует некоторой температуре T , при которой в зону проводимости перешло несколько электронов, образовав в валентной зоне соответствующее число дырок. Так как при каждом акте возбуждения в собственном полупроводнике одновременно создаются два заряда противоположных знаков, то общее число носителей заряда будет в два раза больше числа электронов в зоне проводимости, т. е.

$$n_{oi} = p_{oi}; \quad n_{oi} + p_{oi} = 2n_{oi}. \quad (8-1)$$

Индекс *i* (от слова intrinsic — присущий, внутренний) у концентрации электронов и концентрации дырок означает, что это собственные носители зарядов. В рассматриваемом случае удельная проводимость

$$\gamma = en_{oi}u_n + ep_{oi}u_p. \quad (8-2)$$

В результате процессов возбуждения и рекомбинации при любой температуре тела устанавливается равновесная концентрация возбужденных носителей:

электронов

$$n_{oi} = 2N_c \exp\left(-\frac{W}{2kT}\right), \quad (8-3)$$

дырок

$$p_{oi} = 2N_v \exp\left(-\frac{W}{2kT}\right), \quad (8-4)$$

где W — ширина запрещенной зоны полупроводника; N_c — число энергетических уровней в единице объема полупроводника в свободной зоне (зоне проводимости); N_v — то же, в валентной зоне. Коэффициент, равный двум, показывает, что на каждом уровне могут находиться два электрона.

Подвижности электронов u_n и дырок u_p в выражении (8-2) неодинаковы. Электроны и дырки обладают различной инерционностью при движении в поле кристаллической решетки полупроводника, т. е. отличаются друг от друга эффективными массами m_n^* и m_p^* . В большинстве случаев $m_n^* < m_p^*$. Отсюда собственная электропроводность полупроводников имеет слабо преобладающий электронный характер.

Общие представления. Для большинства полупроводниковых приборов используются примесные полупроводники. Поэтому в практике важное значение имеют такие полупроводниковые материалы, у которых ощутимая концентрация собственных носителей заряда появляется при возможно более высокой температуре, т. е. полупроводники с достаточно широкой запрещенной зоной. В рабочем интервале температур поставщиками свободных носителей заряда являются примеси. Примесями в простых полупроводниках служат чужеродные атомы. Под примесями в полупроводниковых химических соединениях понимают не только включения атомов посторонних элементов, но и избыточные по стехиометрическому составу атомы тех самых элементов, которые входят в химическую формулу самого соединения. Кроме того, роль примесей играют всевозможные дефекты кристаллической решетки: пустые узлы, атомы или ионы, оказавшиеся в междоузлиях решетки, дислокации или сдвиги, возникающие при пластической деформации кристалла, микротрещины и т. д. (стр. 12). Если примесные атомы находятся в узлах кристаллической решетки, то они называются *примесями замещения*, если в междоузлиях — *примесями внедрения*.

Доноры и акцепторы. Рассмотрим роль тех примесей, атомы которых создают дискретные энергетические уровни в пределах запрещенной зоны полупроводника. При небольшой концентрации примесей их атомы расположены в решетке полупроводника на таких больших расстояниях друг от друга, что они не взаимодействуют, а потому энергетические уровни их почти такие же, как в отдельном свободном атоме. Вероятность непосредственного перехода электронов с одного примесного атома на другой ничтожно мала. Однако примеси могут либо поставлять электроны в зону проводимости полупроводника, либо принимать их с уровней его валентной зоны.

Д о н о р ы. Заполненные при отсутствии внешних энергетических воздействий (теплота, свет) примесные уровни расположены в запрещенной зоне около «дна» зоны проводимости (рис. 8-1, б). При этом энергия активации примесных атомов меньше, чем ширина запрещенной зоны основного полупроводника, а потому при нагреве тела переброс электронов примеси будет опережать возбуждение электронов решетки. Положительные заряды, возникшие у отдаленных друг от друга примесных атомов (на рис. 8-1, б уровни примеси показаны с разрывами), остаются локализованными, т. е. не могут блуждать по кристаллу и участвовать в электропроводности. Полупроводник с такой примесью имеет концентрацию электронов, большую, чем концентрация дырок, появившихся за счет перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости, и его называют *полупроводником n-типа*, а примеси, поставляющие электроны в зону проводимости, — *донорами*.

А к ц е п т о р ы. Другие примеси могут внести незаполненные уровни, располагающиеся в запрещенной зоне основного полупроводника вблизи «потолка» валентной зоны. Тепловое возбуждение

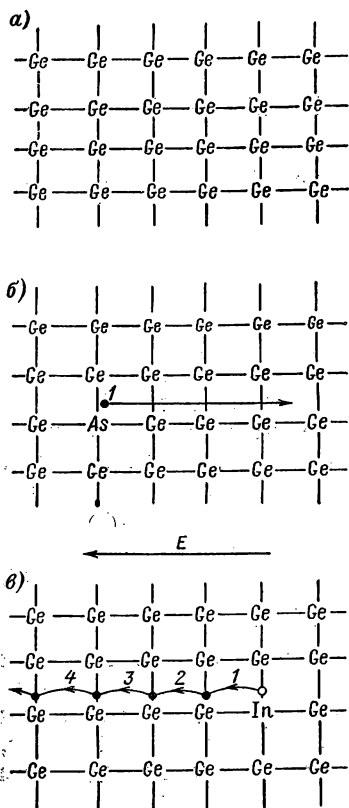


Рис. 8-2. Схематическое изображение кристаллической решетки германия: а — без примесей; б — с донорной примесью мышьяка; в — с акцепторной примесью индия (1—4 — номера электронов)

будет в первую очередь забрасывать электроны из валентной зоны на эти свободные примесные уровни. Ввиду разобщенности атомов примеси электроны, заброшенные на примесные уровни, не участвуют в электрическом токе. Такой полупроводник будет иметь концентрацию дырок, большую, чем концентрация электронов, перешедших из валентной зоны в зону проводимости, и его называют *полупроводником р-типа*. Примеси, захватывающие электроны из валентной зоны полупроводника, называют *акцепторами* (рис. 8-1, в).

Основные и неосновные носители заряда. Те носители заряда, концентрация которых в данном полупроводнике больше, называются *основными*, а те, концентрация которых меньше, — *неосновными*. Так, в полупроводнике *n*-типа электроны являются основными носителями, а дырки — неосновными. В полупроводнике *p*-типа основные носители — дырки, а неосновные — электроны. Примесная электропроводность для своего появления требует меньших энергетических воздействий (сотые или десятые доли электрон-вольта), чем собственная, поэтому она обнаруживается при более низкой температуре, чем собственная электропроводность полупроводника. Рассмотрев энергетическую сторону явлений, перейдем к пространственным структурам и реальным примесям, определяющим тот или иной тип электропроводности.

Примеси замещения. Ковалентные структуры типа алмаза. Германий и кремний — элементы четвертой группы таблицы Менделеева — имеют структуру алмаза, в которой каждый атом окружен четырьмя ближайшими соседями. В данной структуре действуют ковалентные связи.

Для выяснения роли атома замещения в решетке германия заменим реальную трехмерную решетку плоской сеткой, как показано на рис. 8-2, а. Валентные электроны закреплены за своими атомами и не блуждают по кристаллу. Если на место одного из атомов полупроводника (в данном случае германия) в какой-либо узел решетки попадает посторонний атом другой химической природы и иной валентности, то система валентных связей в этом месте кристалла

оказывается нарушенной, и могут быть два случая (рис. 8-2, б и в).

Рассмотрим кристаллическую решетку германия с примесью мышьяка — элемента пятой группы, у которого на внешней орбите расположено пять электронов (рис. 8-2, б). Попад в узел решетки германия и связав четыре из своих электронов, такая примесь дает избыточный слабо связанный электрон 1, который под влиянием тепловой энергии может начать беспорядочно блуждать по кристаллу, а под воздействием электрического поля он станет направленно перемещаться (электропроводность типа *n*). Атом примеси, потерявший электрон, представляет собой положительно заряженную частицу, неподвижно закрепленную в данном месте решетки полупроводника. В рассмотренном случае примесь элемента пятой группы периодической системы будет *донорной*.

Если в решетке германия находится примесь — элемент третьей группы — индий, имеющий на внешней орбите три валентных электрона, то такая примесь создает в решетке дырку (рис. 8-2, в). В данном случае атом примеси может заимствовать электрон у одного из соседних атомов германия и стать отрицательно заряженной частицей, неподвижно закрепленной в данном месте решетки полупроводника, а дырка начнет блуждать по кристаллу. При приложении электрического поля, как показано на рис. 8-2, в, электрон будет взят от левого атома германия, который при этом получит положительный заряд и, в свою очередь, захватит электрон от следующего атома, т. е. дырка будет направленно передвигаться справа налево (электропроводность типа *p*). На самом деле в этом случае движутся только электроны 1, 2, 3, 4-й, но их эстафетное перескакивание с атома на атом можно формально описать как движение одной дырки, перемещающейся в направлении, обратном направлению движения электронов, т. е. в направлении поля. Примесь элемента третьей группы периодической системы будет *акцепторной*.

Ковалентные полупроводниковые соединения. В полупроводниковых соединениях, например $Al^{III}B^V$ (InSb, GaSb, InAs), обычно примесные атомы замещения II группы (Mg, Zn), имеющие меньшую валентность, являются акцепторами, а примесные атомы VI группы (Se, Te), обладающие большей валентностью, — донорами. Примесные атомы IV группы в полупроводниковых соединениях $Al^{III}B^V$ могут быть и донорами и акцепторами, в зависимости от того, какой атом соединения замещается примесным атомом. Если, например, примесный четырехвалентный атом замещает в решетке InAs трехвалентный атом In, то он будет донором, а если пятивалентный атом As, то — акцептором. Соотношения между размерами атомов играют большую роль в результатах замещения. Так, например, если примесный атом Pb, имеющий сравнительно большие размеры, замещает в решетке InSb атом In, то он ведет себя как донор, а попадая в решетку AlSb и занимая место атома Sb, он является акцептором. Замещение элементов, входящих в состав полупроводниковых соединений, другими из тех же групп периодической системы (III и V) не вызывает заметного изменения удельной проводимости этих полупроводников.

Полупроводники с ионными решетками (CdS, PbS, оксиды). Экспериментальные данные о ионных полупроводниках показывают, что в оксидах и сульфидах большей частью наблюдается следующая закономерность. Если полупроводник может обладать электропроводностью *n*- и *p*-типов, как, например, PbS, то избыток серы по отношению к его стехиометрическому составу или примесь кислорода вызывает у него дырочную электропроводность, и избыток металла — электронную. В полупроводниках с одним типом примесной электропроводности увеличение числа дырок в полупроводнике *p*-типа получается за счет избытка кислорода или серы, а увеличение числа электронов в полупроводнике *n*-типа — за счет уменьшения числа этих элементов. Из опыта известно, что выдержка Cu_2O (дырочный полупроводник) в печи с кислородной средой ведет к увеличению проводимости, а ZnO (электронный полупроводник) — к уменьшению ее.

Примеси внедрения. Структуры типа алмаза. Тип электропроводности определяется размерами и электроотрицательностью примесных атомов, внедряющихся в междоузлия решеток полупроводников IV группы периодической системы. Эксперимент показывает, что, в противоречие с указанным выше правилом валентности, литий (I группа), внедряясь в междоузлия решетки германия, будет донором, а кислород (VI группа) — акцептором. Внедрение большого по размерам атома лития в тесные междоузлия решетки германия оказывается возможным только после его ионизации вследствие слабой связи валентного электрона, легко отрывающегося от своего атома в среде с большой диэлектрической проницаемостью (ϵ , германия-16). Образовавшийся ион лития меньших размеров может уже внедряться в тесные междоузлия решетки, а освободившийся электрон обуславливает электропроводность *n*-типа. Внедрение в междоузлия решетки полупроводника атомов кислорода, имеющих сравнительно небольшие размеры и большую электроотрицательность, приводит к захватам электронов из атомов полупроводника, вследствие чего возникает электропроводность *p*-типа. Если атом Ge или Si под влиянием энергетического воздействия перебрасывается в междоузлие, то образуются два примесных уровня: донорный внедренного атома и акцепторный пустого узла.

Ионные структуры. Атомы металлов могут внедряться в тесные междоузлия ионов решетки лишь в том случае, если они резко уменьшают свои размеры, лишившись внешних электронов, которые обуславливают электропроводность *n*-типа. Ионы многих металлоидов, имеющие большие радиусы, не могут внедряться в междоузлия ионных соединений.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Оба типа электропроводности полупроводников представляют собой реальные физические процессы, в чем легко убедиться при помощи опытов.

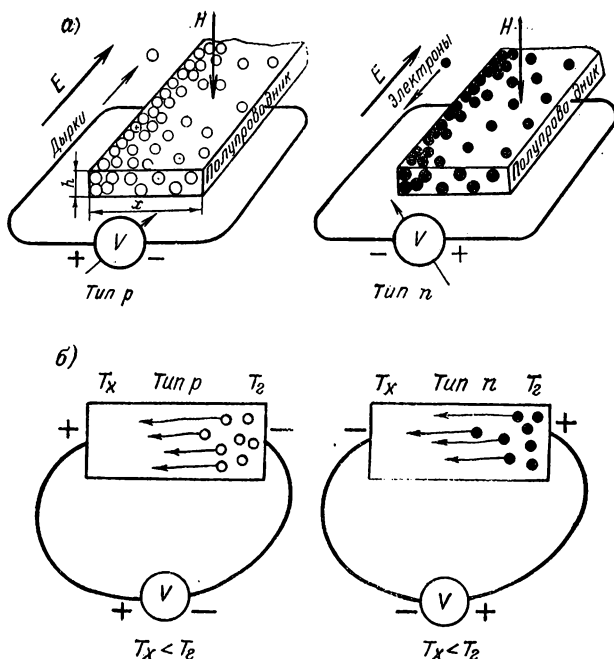


Рис. 8-3. Определение типа электропроводности полупроводников: а — при помощи эффекта Холла; б — при помощи нагрева одного из концов испытуемого полупроводника

Сущность метода определения типа электропроводности (p или n) испытуемого полупроводника по изменению знака поперечной ЭДС Холла поясняется на рис. 8-3, а. Если поместить пластину из полупроводника во внешнее поперечное магнитное поле H и приложить в направлении длины ее разность потенциалов, создающую электрическое поле E , то вследствие смещения движущихся носителей заряда к одной из граней пластинки возникает поперечная ЭДС, измеряемая вольтметром V . Направление смещения зарядов определяется по правилу «левой руки», относящемуся к техническому направлению тока. Из рис. 8-3, а видно, что при изменении типа электропроводности меняется и направление отклонения указателя вольтметра.

Другой метод состоит в нагреве одного конца испытуемого полупроводника, как показано на рис. 8-3, б. При этом, если испытывается полупроводник p -типа, то в нагретом конце за счет затраты тепловой энергии большее число электронов будет переброшено из заполненной зоны на акцепторные уровни примесей по сравнению с холодным концом. Из горячего конца в холодный начнется диффузия дырок, и он окажется заряженным отрицательно по отношению к холодному концу.

При испытании полупроводника n -типа на горячем конце за счет затраты внешней тепловой энергии будет освобождено большее число электронов, чем на холодном конце, и начнется их диффузия к хо-

лодному концу, где их в свободном состоянии было меньше. Вследствие ухода электронов горячий конец заряжается положительно, а холодный — отрицательно.

Для полупроводников с одним типом носителей заряда (n или p) справедливы равенства

$$\gamma = en_0u_n \text{ или } \gamma = ep_0u_p. \quad (8-5)$$

Концентрация носителей заряда и их подвижность являются характеристическими параметрами полупроводника. Измерение удельной проводимости полупроводников позволяет определить только произведение этих двух параметров. Для их разделения можно воспользоваться эффектом Холла. Смещение носителей заряда в поперечном направлении в полупроводнике прекратится, когда сила Лоренца уравнивается силой возникшего поперечного электрического поля сместившихся зарядов:

$$\left. \begin{aligned} ev_{cp}B &= eE_x; E_x x = U_x; \\ I &= n_0 S v_{cp} e = n_0 x h v_{cp} e. \end{aligned} \right\} \quad (8-6)$$

Используя выражения (8-6), получим

$$U_x = \frac{1}{en_0} \frac{IB}{h} = X \frac{IB}{h}. \quad (8-7)$$

Поперечная ЭДС U_x , ток I , магнитная индукция B и толщина полупроводниковой пластинки h легко могут быть измерены, что позволяет вычислить значение коэффициента Холла X . В системе СИ коэффициент Холла измеряется в кубических метрах на кулон. Значение коэффициента, получаемое по формуле (8-7), справедливо только для *вырожденных* полупроводников, с очень большой концентрацией примеси, при которой энергия активации ее практически равна нулю и можно не учитывать распределение носителей заряда по скоростям, что и допускалось при выводе формул (8-6). Более точное значение коэффициента Холла для полупроводников с различной концентрацией примеси будет отличаться от получаемого по формуле (8-7) множителем A . Для полупроводников различных групп (с атомной, ионной решетками) численное значение A изменяется от единицы до двух в зависимости от механизма рассеяния носителей при различных температурах (например, для германия $A \approx 1,18$). Таким образом, для полупроводников n -типа

$$X = -A / (|e| n_0). \quad (8-8)$$

Для дырочных полупроводников легко получить аналогичное выражение, отличающееся знаком и включающее в себя концентрацию носителей p . Используя уравнения (8-8) и (8-5), можно находить численные значения концентрации и подвижности носителей зарядов в полупроводниках.

Вышеприведенные формулы относились к полупроводникам резко выраженного n - или p -типа, у которых концентрация неосновных носителей пренебрежимо мала по сравнению с концентрацией основных носителей. Если концентрация неосновных носителей такова,

что они начинают заметно влиять на движение частиц в полупроводнике, находящемся в магнитном поле, то необходимо учитывать оба типа носителей. Расчет коэффициента Холла с учетом двух типов носителей получается более сложным:

$$X = \frac{A}{|e|} \frac{n_0 \left(\frac{u_n}{u_p} \right)^2 - p_0}{\left(n_0 \frac{u_n}{u_p} + p_0 \right)^2}. \quad (8-9)$$

Приняв $p_0 = 0$, легко из выражения (8-9) получить выражение (8-8).

В германии и кремнии подвижность электронов заметно превышает подвижность дырок. У образца *p*-типа любого из этих материалов с большой концентрацией примесей при низкой температуре коэффициент Холла будет положительным (при $n_0 \approx 0$). При повышении температуры до состояния компенсации ($p_0 u_p^2 = n_0 u_n^2$) и дальше знак коэффициента Холла становится отрицательным из-за большей подвижности электронов, хотя концентрация дырок все еще превышает концентрацию электронов.

Эффект Холла интересен не только как основа метода определения характеристик полупроводниковых материалов, но и как принцип действия некоторых полупроводниковых приборов, использующихся, например, для измерения напряженности магнитного поля, перемножения двух величин и других целей.

8-3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ

Температурная зависимость концентрации носителей заряда. Концентрация носителей в полупроводнике, например n -типа зависит от температуры и концентрации примесей (рис. 8-4). В области низких температур участок нижней ломаной между точками a и b характеризует только концентрацию носителей, обусловленную примесями. Наклон прямой на этом участке определяется энергией активации примесей $W_{\text{д.}}$. С увеличением температуры число носителей, поставляемых примесями, возрастает до тех пор, пока не истощатся электронные ресурсы примесных атомов (точка b). На участке b — $в$ примеси уже истощены, а электроны еще не переходят через запрещенную зону. Участок кривой с постоянной концентрацией носителей заряда называют областью истощения примесей. Дальнейший рост температуры приводит к быстрому росту концентрации носителей вследствие перехода электронов через запрещенную зону

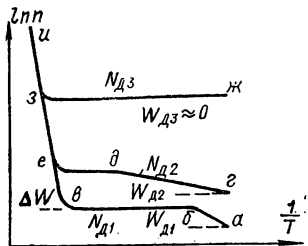


Рис. 8-4. Зависимость концентрации носителей заряда в полупроводнике от температуры при различной концентрации донорной примеси ($N_{дз} > N_{дз} > > N_{д1}$; $W_{д1} > W_{дз}$)

(участок $\epsilon-u$). Наклон этого участка характеризует ширину запрещенной зоны полупроводника W . Угол наклона участка $a-b$ зависит от концентрации примесей $N_{д1}$, потому что энергия активации примесных атомов определяется их взаимодействием, а последнее зависит от расстояния между ними l_{N1} , которое в первом приближении связано с концентрацией выражением

$$l_{N1} = \frac{1}{\sqrt[3]{N_{д1}}} \quad \text{или} \quad l = \frac{1}{\sqrt[3]{N_n}}. \quad (8-10)$$

Из рис. 8-4 видно, что с увеличением концентрации примесей в полупроводнике переход от участка $a-b$ (или $\epsilon-d$), на котором концентрация носителей обусловлена примесями, к участку $b-\epsilon$ (или $d-e$), соответствующему истощению примесей, смещается в сторону высоких температур (ср. точки b и d). При достаточно большой концентрации примесей $W_{дз} \approx 0$ кривая состоит из двух участков $ж-з$ и $з-u$; на первом участке концентрация носителей заряда постоянна до температуры, при которой носители начнут переходить через запрещенную зону, т. е. полупроводник является вырожденным.

Температурная зависимость подвижности носителей. Согласно экспериментальным данным у некоторых полупроводников и даже диэлектриков — веществ со значительно меньшей удельной проводимостью, чем металлы, подвижность носителей может быть на несколько порядков больше, т. е. электроны в плохо проводящих кристаллах могут двигаться более свободно, чем в металлах. Подвижность носителей заряда

$$u = \frac{e}{m^*} \tau = \frac{e}{m^*} \frac{l_{ср}}{v_T}. \quad (8-11)$$

Большая подвижность может быть обусловлена малой эффективной массой носителя заряда m^* и большим временем свободного пробега или, точнее, временем релаксации τ_0 . В полупроводниках эффективная масса носителей заряда может быть как больше, так и меньше массы свободного электрона. Время релаксации, характеризующее спадание тока после снятия поля, обуславливается процессами рассеяния движущихся в полупроводниках электронов. Чем больше частота столкновений и чем они интенсивнее, тем меньше время релаксации, а следовательно, и подвижность. При комнатной температуре средняя скорость теплового движения свободных электронов v_T в невырожденном полупроводнике и в диэлектрике (если они в нем имеются) около 10^6 м/с. При этом эквивалентная длина волны электрона будет около 7 нм, тогда как в металлах она составляет примерно 0,5 нм. Таким образом, вследствие большей длины волны электрона в полупроводнике и в диэлектрике по сравнению с металлом, неоднородности порядка размеров атома мало влияют на рассеяние электронов. У некоторых чистых полупроводников подвижность может быть очень большой, 10^4 м²/(В·с) и выше, у других она меньше 10^{-4} м²/(В·с). Вычисляемая по последнему значению длина свободного пробега составляет лишь долю межатомных расстояний в решетках. Физический смысл требует, чтобы длина свобод-

ного пробега была не меньше расстояния между соседними атомами. Это значит, что электропроводность полупроводников с малой подвижностью носителей заряда не может изучаться в рамках существующей теории.

Причинами рассеяния носителей заряда в полупроводниках, по-разному влияющими на температурную зависимость подвижности, являются: 1) тепловые колебания атомов или ионов кристаллической решетки; 2) примеси в ионизированном или в нейтральном состоянии; 3) всевозможные дефекты решетки (пустые узлы, искажения, вызванные атомами внедрения, дислокации, трещины, границы кристаллов и т. д.). Взаимным рассеянием электронов из-за малой концентрации электронного газа теория полупроводников пренебрегает.

Подвижность носителей в полупроводниках с атомной решеткой. В полупроводниках с атомной решеткой рассеяние носителей заряда происходит на тепловых колебаниях решетки и на ионизированных примесях. Эти два механизма рассеяния приводят к появлению двух участков в температурной зависимости подвижности. При рассеянии носителей на тепловых колебаниях решетки средняя длина свободного пробега $l_{\text{ср}}$ одинакова для носителей заряда с различными скоростями и обратно пропорциональна абсолютной температуре полупроводника. Это следует из того, что рассеяние носителей заряда должно быть прямо пропорционально поперечному сечению того объема, в котором колеблется атом, а оно пропорционально квадрату амплитуды колебания атома, определяющему энергию решетки, которая с температурой растет, как известно, по линейному закону. Поэтому, так как в формуле (8-11) $l_{\text{ср}} \sim 1/T$, а $v_T \sim \sqrt{T}$, то

$$\mu \sim \frac{1}{T^{3/2}}. \quad (8-12)$$

На практике эта зависимость не всегда соблюдается. Имеются случаи и более резкой зависимости подвижности от температуры, вплоть до $\mu \sim 1/T^3$. При низких температурах тепловое рассеяние, согласно (8-12), становится незначительным и в материалах с атомными решетками преобладающим оказывается резерфордский механизм рассеяния носителей на ионизированных примесях. Для этого механизма характерно уменьшение рассеяния движущихся заряженных частиц при увеличении скорости, так как они находятся меньшее время под влиянием поля рассеивающих заряженных примесных атомов. Поэтому длина свободного пробега носителя заряда растет с увеличением температуры в соответствии с выражением

$$l_{\text{ср}} \sim T^2,$$

а подвижность — в соответствии с выражением

$$\mu \sim T^{3/2}. \quad (8-13)$$

Если в рассеянии носителей заряда участвуют оба механизма (и колебательный — решеточный, и ионный) с преобладанием того или другого в различных интервалах температуры, то результиру-

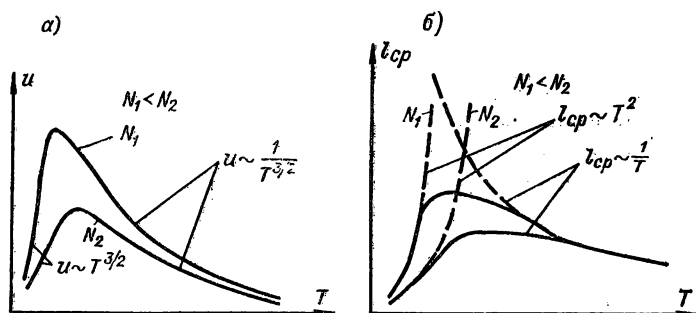


Рис. 8-5. Зависимость подвижности носителей заряда (а) и средней длины свободного пробега их (б) в полупроводнике от температуры при различных концентрациях примеси

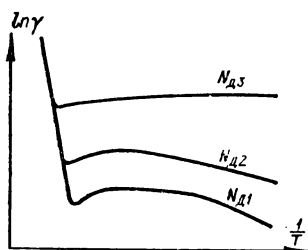
ющая температурная зависимость подвижности имеет максимум (рис. 8-5, а). Ход кривых и положения максимумов зависят от концентрации примесей. При увеличении концентрации максимумы смещаются в область высоких температур. Это можно объяснить с помощью рис. 8-5, б, на котором средняя длина свободного пробега носителей заряда при низких температурах, определяемая рассеянием на примесях, представлена в виде парабол, характеризующих два образца с различной концентрацией примесей. Падающая гиперболическая кривая иллюстрирует второй основной механизм рассеяния, несущественный при очень низких температурах, но преобладающий при высоких температурах. Эта кривая характеризует само кристаллическое вещество. Сплошными линиями показаны результирующие температурные зависимости длины свободного пробега, имеющие максимумы. На рис. 8-5, б показано смещение максимума в зависимости от концентрации примесей в полупроводнике.

Подвижность носителей в ионных кристаллах. Взаимодействие носителей заряда с колеблющимися ионами в ионных кристаллах гораздо сильнее, чем их взаимодействие с нейтральными атомами в материалах с атомной решеткой. Поэтому рассеяние носителей заряда в результате тепловых колебаний ионов гораздо интенсивнее, и подвижность носителей у этой группы полупроводников в большинстве случаев более низкая. Качественно характеристика температурной зависимости подвижности в ионных кристаллах такая же, как и в атомных кристаллах.

Температурная зависимость удельной проводимости полупроводников. Рассмотрев влияние температуры на концентрацию и подвижность носителей заряда, можно представить и характер изменения удельной проводимости при изменении температуры. В полупроводниках с атомной решеткой (а также в ионных кристаллах при повышенных температурах) подвижность меняется при изменении температуры сравнительно слабо (по степенному закону), а концентрация — очень сильно (по экспоненциальному закону). Поэтому температурная зависимость удельной проводимости подобна

Рис. 8-6. Кривые зависимости удельной проводимости полупроводников от температуры при различных концентрациях примеси ($N_{д1} < N_{д2} < N_{д3}$)

температурной зависимости концентрации. В области истощения (концентрация постоянна) изменение удельной проводимости обусловлено температурной подвижностью.



Температурная зависимость удельной проводимости полупроводника есть результат изменения концентрации и подвижности носителей заряда (рис. 8-6). В области низких температур полупроводник характеризуется примесной электропроводностью, а в области высоких температур — собственной электропроводностью. В области примесной электропроводности приведены три кривые для различных значений концентрации примесей, вплоть до вырождения полупроводника, когда зависимость его удельной проводимости в некотором интервале температур становится подобной зависимости удельной проводимости металлов.

С помощью кривых рис. 8-6 можно находить как ширину запрещенной зоны полупроводника W , так и энергию активации примесей W_d или W_a . У реальных полупроводников эти кривые могут значительно отклоняться от указанных как вследствие того, что физические явления описываются в теории приближенно, так и потому, что в материалах, применяемых на практике, имеется не один, а несколько видов примесей, у которых энергии активации могут быть различными. На основании рис. 8-4 или 8-6 для наклонных линейных (или квазилинейных) участков кривых в области примесной электропроводности можем написать

$$\ln n = \ln A - b \frac{1}{T} \quad \text{или} \quad \ln \gamma = \ln A - b \frac{1}{T}, \quad (8-14)$$

откуда, например,

$$\gamma = A \exp(-b/T). \quad (8-15)$$

Теория электропроводности полупроводников показывает, что для монокристаллов типа германия и кремния постоянная

$$b = W/(2k), \quad (8-16)$$

где W — энергия активации; k — постоянная Больцмана.

Преобразуя выражение (8-15) и написав его для удельного сопротивления, получим

$$\rho = A \exp \frac{W}{2kT}. \quad (8-17)$$

Используя данные конкретных материалов, взятые из кривых, вычисляют энергию активации W примесной электропроводности полупроводника при различной концентрации примеси. В области собственной электропроводности по подобному выражению может быть определена ширина запрещенной зоны данного полупроводникового материала.

При ширине запрещенной зоны германия 0,72 эВ число собственных носителей заряда в нем при комнатной температуре около

10^{19} м^{-3} , в то время как примеси, входящие в количестве тысячной доли процента, при малой энергии активации W вносят в него в десятки тысяч раз большее число свободных зарядов. Поэтому для управления электропроводностью полупроводник вначале должен быть тщательно очищен от случайных примесей. На 10^8 — 10^9 атомов основного вещества должно быть не более одного чужеродного атома.

Температурный коэффициент удельного сопротивления (стр. 39) полупроводников

$$\text{TK}_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} = -\frac{1}{Ae^{b/T}} Ae^{b/T} b T^{-2} = -\frac{b}{T^2} \quad (8-18)$$

не постоянен, с повышением температуры уменьшается и находится в прямой зависимости от энергии активации электропроводности полупроводника ($b \sim W$).

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Электропроводность твердых кристаллических тел изменяется при деформации вследствие увеличения или уменьшения (растяжение, сжатие) межатомных расстояний, приводящих к изменению концентрации и подвижности носителей. Концентрация носителей заряда может стать меньше или больше вследствие изменения ширины энергетических зон кристалла и смещения примесных уровней, что в свою очередь изменяет энергию активации носителей и изменяет их эффективные массы, входящие в выражения концентрации носителей заряда. Подвижность носителей заряда меняется из-за уменьшения (увеличения) амплитуды колебания атомов при их сближении (удалении). Для металлов основным является изменение подвижности, а для полупроводников изменение концентрации носителей заряда, определяемое энергией активации. Ширина запрещенной зоны может как увеличиваться, так и уменьшаться при сближении атомов, и у разных полупроводников одна и та же деформация может вызывать как увеличение, так и уменьшение удельной проводимости.

Величиной, численно характеризующей изменение удельной проводимости (удельного сопротивления) полупроводников при определенном виде деформации, является *тензочувствительность*

$$d_\rho = \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta l/l}, \quad (8-19)$$

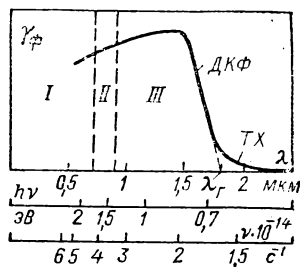
которая представляет собой отношение относительного изменения удельного сопротивления полупроводника к относительной деформации в данном направлении.

ВОЗДЕЙСТВИЕ СВЕТА НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Световая энергия, поглощаемая полупроводником, вызывает появление в нем избыточного (по сравнению с равновесным при данной температуре) количества носителей зарядов, приводящего к возрастанию электропроводности.

Рис. 8-7. Фотопроводимость германия в зависимости от длины волны падающего излучения

I — видимая область спектра; II — красная; III — инфракрасная; ДКФ — длинноволновый край фотопроводимости; ТХ — «тепловой хвост» кривой



Фотопроводимостью называют увеличение электрической проводимости вещества под действием электромагнитного излучения.

Длинноволновый край фотопроводимости. В фотопроводимости обнаруживается квантовая природа света. Энергия фотона

$$h\nu = \frac{1,23}{\lambda} \quad (8-20)$$

(где λ — длина волны, мкм) затрачивается в собственном полупроводнике на образование электронно-дырочных пар за счет переброса электронов из валентной зоны в зону проводимости. Поэтому существует граничная длина волны, определяемая энергией кванта, достаточной для перехода электрона с самого верхнего уровня валентной зоны на самый нижний уровень зоны проводимости, т. е. равная ширине запрещенной зоны полупроводника. Отсюда по длинноволновому краю фотопроводимости (ДКФ) можно определить ширину запрещенной зоны полупроводника (рис. 8-7). Для этого, экстраполировав круто падающий участок кривой до пересечения с осью абсцисс, находят граничную длину волны λ_r и энергию квантов, обуславливающую начало фотопроводимости. Так как запрещенная зона различных полупроводниковых веществ имеет ширину от десятых долей электрон-вольта до 3 эВ, то фотопроводимость может обнаруживаться в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой части электромагнитного спектра. Из рис. 8-7 видно, что оптическая ширина запрещенной зоны германия 0,7 эВ, пороговая длина волны равна примерно 1,8 мкм, т. е. лежит в инфракрасной области спектра. Фотопроводимость при волнах короче 1,8 мкм определяется переходом электронов с более низких уровней валентной зоны на более высокие уровни зоны проводимости. На кривой рис. 8-7 показан «тепловой хвост», тянущийся до 1,9–2 мкм. Наличие «теплового хвоста» (т. е. небольшой фотопроводимости), вызываемое квантами света с энергией, несколько меньшей ширины запрещенной зоны полупроводника, можно объяснить двумя физическими явлениями:

1. Отдельные электроны могут оказаться под суммарным воздействием энергии фотонов и энергии тепловых колебаний кристаллической решетки. Тогда эти электроны перейдут в зону проводимости.

2. Ширина запрещенной зоны не является абсолютно постоянной, а подвержена флуктуациям, так как тепловые колебания решетки приводят к колебаниям мгновенной локальной плотности в объеме кристалла и, следовательно, к изменению мгновенных расстояний между атомами, от которых она зависит. Фотон энергией $h\nu < W$, поглощенный в том месте объема кристалла, где мгновенная ширина запрещенной зоны меньше средней, возбуждает пару электрон—

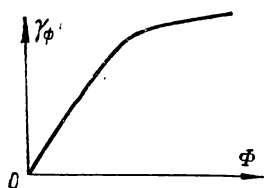


Рис. 8-8. Зависимость фотопроводимости полупроводников от интенсивности облучения

дырка. Таким образом, «хвост» кривой на рис. 8-7 имеет тепловую природу.

Численные значения ширины запрещенной зоны, определенные для одного и того же полупроводника по температурной зависимости проводимости и по оптическому краю поглощения, в большинстве случаев близки друг к другу, но могут и отличаться, особенно у полупроводников с ионной кристаллической решеткой.

Частотная зависимость фотопроводимости. Как видно из рис. 8-7, в области малых длин волн (левее максимума кривой) наблюдается спад фотопроводимости. Это объясняется быстрым увеличением коэффициента поглощения с ростом частоты и уменьшением глубины проникновения падающей на тело электромагнитной энергии. Поглощение происходит в тонком поверхностном слое, где и образуется основное количество носителей заряда. Появление большого числа избыточных носителей заряда только у поверхности слабо отражается на проводимости всего объема полупроводника, потому что скорость поверхностной рекомбинации больше, чем объемной, и проникающие внутрь неосновные носители заряда увеличивают скорость рекомбинации в объеме полупроводника.

При длинах волн, превышающих граничную (с учетом теплового «хвоста»), энергии квантов оказываются недостаточными для образования электронно-дырочных пар, и простые полупроводники можно считать прозрачными в этих областях спектра (правее максимума кривой). Однако небольшое оптическое поглощение все же происходит вследствие того, что в полупроводнике имеется некоторое число свободных электронов и дырок.

Зависимость фотопроводимости от интенсивности облучения. При энергии квантов, обеспечивающей появление фотопроводимости, значение ее возрастает с увеличением интенсивности облучения, так как одновременно происходят два процесса с противоположным влиянием на фотопроводимость: с одной стороны, увеличивается число носителей, а с другой — возрастает рекомбинация с увеличением концентрации носителей как одного, так и другого знака. В результате получается зависимость, показанная на рис. 8-8. Закономерности возрастания фотопроводимости с изменением интенсивности облучения у разных полупроводников различные. На практике в некоторых случаях пользуются зависимостью вида

$$\gamma_{\phi} = B\Phi^x, \quad (8-21)$$

где B — постоянная, характеризующая полупроводник; Φ — интенсивность облучения; x — величина, подчиняющаяся условию $0 < x < 1$.

Квантовым выходом внутреннего фотоэффекта называют число пар носителей заряда, приходящееся на один поглощенный квант.

В фотоэлектрически активной области электромагнитного спектра квантовый выход чаще всего равен единице, т. е. каждый фотон создает при возбуждении решетки одну пару носителей заряда. Экспериментально это подтверждается, например, для германия, в котором каждый фотон с длиной волны от 1 до 1,8 мкм образует одну пару — электрон и дырку. В других полупроводниках сравнительно слабые дозы облучения вызывают фотопроводимость с квантовым выходом больше единицы. Это объясняется вторичными процессами, развивающимися после возбуждения первичной пары носителей заряда из-за несовершенства кристалла. Так, например, очень большая фотопроводимость у поликристаллических образцов некоторых полупроводников обусловлена наличием на поверхности зерен окисдных изолирующих пленок, проводимость которых резко возрастает под влиянием первичных фотоэлектронов. Воздействие света на такой полупроводник приводит к очень сильному снижению электрического сопротивления всего образца, хотя проводимость тела зерен меняется незначительно. Отличать вторичные процессы в полупроводниках от первичных иногда удается по различной длительности их протекания. Поэтому для экспериментального разделения первичных и вторичных процессов используют импульсную методику очень кратковременного облучения испытуемых образцов, при котором вторичные процессы не успевают развиться.

Квантовый выход, превышающий единицу, отмечается при облучении полупроводников фотонами, энергия которых в несколько раз превышает энергию возбуждения первичных носителей заряда. При этом первичные носители, обладающие высокой энергией, оказываются способными возбуждать добавочные, вторичные носители, т. е. имеет место эффект фотоумножения.

Влияние температуры на фотопроводимость. С понижением температуры уменьшается темновая проводимость, служащая фоном, на котором появляется фотопроводимость, а поэтому роль последней возрастает. Кроме того, с понижением температуры увеличивается и сама фотопроводимость, так как с уменьшением концентрации темновых носителей заряда снижается вероятность рекомбинации носителей. Температура влияет и на граничную длину волны (см. рис. 8-7), причем у одних полупроводников она смещается при понижении температуры вправо, а у других — влево. Это объясняется тем, что с понижением температуры ширина запрещенной зоны у одних полупроводников уменьшается, а у других — увеличивается.

Релаксация фотопроводимости. Изменение электрических свойств полупроводников под влиянием электромагнитного излучения зависит от времени (релаксация). После прекращения облучения проводимость более или менее быстро возвращается к тому значению, которое она имела до облучения. У одних полупроводников это длится микросекунды, у других измеряется минутами и даже часами. Знание инерционности фотопроводимости различных полупроводниковых веществ важно при разработке, например, фоторезисторов, к быстроедействию которых

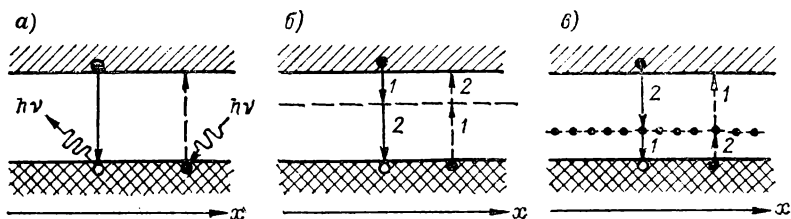


Рис. 8-9. Возможные пути рекомбинации и генерации носителей: *а* — прямая рекомбинация и генерация; *б* — рекомбинация и генерация через незаполненные уровни; *в* — рекомбинация и генерация через заполненные уровни. Сплошными вертикальными стрелками показан путь рекомбинации, штриховыми — генерации; цифрами обозначена последовательность ступеней процесса

предъявляются высокие требования. Кроме того, по быстроте возрастания или затухания фотопроводимости соответственно после включения или выключения света можно определить время жизни τ_0 неравновесных носителей заряда в полупроводниках.

Время жизни неравновесных носителей заряда в объеме полупроводника определяют как отношение избыточной концентрации Δn_0 неравновесных носителей к скорости изменения этой концентрации вследствие рекомбинации в объеме:

$$\tau_{0V} = \frac{\Delta n_0}{d \Delta n_0 / dt}. \quad (8-22)$$

Кроме *объемного времени жизни*, различают еще *поверхностное время жизни* неравновесных носителей заряда, при учете которого *эффективное время жизни* неравновесных носителей заряда определяется уравнением

$$\frac{1}{\tau_{0\text{эфф}}} = \frac{1}{\tau_{0V}} + \frac{1}{\tau_{0S}}. \quad (8-23)$$

Диффузионная длина — это расстояние, на котором в однородном полупроводнике при одномерной диффузии в отсутствие электрического и магнитного полей избыточная концентрация неравновесных носителей заряда уменьшается вследствие рекомбинации в e раз, т. е. это среднее расстояние, на которое носитель диффундирует за время жизни. Решая уравнение диффузии, можно получить выражения, связывающие диффузионную длину с временем жизни:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_{0n}}; \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_{0p}}, \quad (8-24)$$

где D — коэффициент диффузии носителей заряда соответствующего типа.

Генерация носителей заряда в полупроводнике, создающая избыточную концентрацию их, может быть вызвана не только светом, но и другими причинами.

Рекомбинация неравновесных носителей. Прямая рекомбинация. Рекомбинацию в самом простом виде (рис. 8-9, *а*) можно представить с помощью энергетической диаграммы (на кото-

рой введена условная штриховка энергетических зон) как процесс перехода электрона из зоны проводимости в валентную зону, на имеющийся там свободный уровень. Такой процесс называют непосредственной или *прямой рекомбинацией*. Разность энергий при этом выделяется в виде кванта электромагнитного излучения либо передается кристаллической решетке в виде механических колебаний. При этом электромагнитное излучение будет, очевидно, ограничено довольно узким диапазоном спектра. Однако такой процесс прямой рекомбинации маловероятен, так как для его осуществления электрон и дырка должны оказаться одновременно в одном и том же месте кристалла. Кроме того, должен выполняться закон сохранения импульса, т. е. рекомбинация электрона и дырки может произойти только в том случае, если и электрон, и дырка вначале имеют одинаковые, но противоположно направленные импульсы. Последнее приводит к тому, что, например, в германии на $1 \cdot 10^4$ рекомбинаций лишь одна происходит в результате непосредственной аннигиляции с выделением фотона, уносящего всю освобождаемую при рекомбинации энергию.

Рекомбинация с участием ловушек. Иные возможные пути рекомбинации схематически показаны на рис. 8-9, б и в. Эти процессы непрямой рекомбинации происходят через энергетические уровни, называемые ловушками.

Рекомбинационными ловушками являются донорные или акцепторные уровни, достаточно удаленные от границ запрещенной зоны. Процесс рекомбинации через ловушку может происходить следующим образом. На первой ступени 1 процесса электрон захватывается незанятым уровнем ловушки (рис. 8-9, б). Таким образом, электрон выбывает из процесса электропроводности, а ловушка становится отрицательным ионом. В этом состоянии ловушка будет находиться до тех пор, пока к ней не подойдет дырка. Электрон перейдет на свободный уровень в валентной зоне, т. е. осуществится вторая ступень рекомбинации 2.

Аналогично может происходить и рекомбинация дырок через ловушку, имеющую в исходном состоянии лишний электрон (рис. 8-9, в). На первой ступени 1 происходит переход электрона из ловушки на свободный уровень валентной зоны, а на второй 2 — переход электрона из зоны проводимости на уровень ловушки. Двухступенчатый процесс рекомбинации более вероятен, так как он не требует одновременного присутствия в данной точке полупроводника электрона и дырки. Ловушка воспринимает также и количество движения, необходимое для соблюдения закона сохранения импульса, и часть энергии, освобождаемой в процессе рекомбинации. Рекомбинационными ловушками могут быть любые дефекты в кристаллах: примесные атомы или ионы, различные включения, незаполненные узлы в решетке, трещины и другие дефекты в объеме или на поверхности. Рассмотренные процессы перехода носителей из зоны в зону через ловушку могут происходить и в обратном направлении (штриховые стрелки на рис. 8-9). Таким образом, с помощью ловушек происходит и генерация носителей.

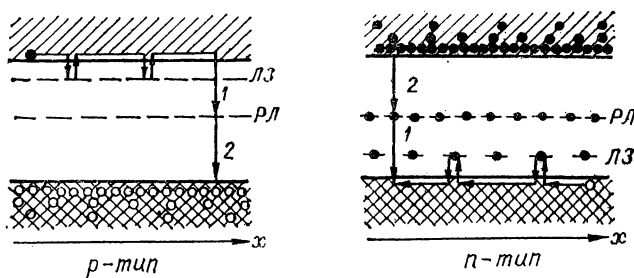


Рис. 8-10. Схемы расположения уровней ловушек захвата (ЛЗ) и рекомбинационных ловушек (РЛ)

Ловушки захвата. Кроме рекомбинационных ловушек, в запрещенной зоне полупроводника существуют уровни, которые могут захватывать только один какой-либо тип носителей. Такие уровни называют ловушками захвата. Носитель заряда, находящийся на таком уровне, через некоторое время освобождается и снова участвует в электропроводности. Этот процесс может повторяться. Ловушки захвата обычно расположены вблизи границ запрещенной зоны (рис. 8-10).

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Электропроводность полупроводников зависит от напряженности электрического поля. Как видно из рис. 8-11, при низких значениях напряженности поля (до некоторого критического значения E_K) соблюдается закон Ома, и удельная проводимость не зависит от напряженности поля, а при более высоких напряженностях поля начинается интенсивный рост удельной проводимости по экспоненциальному закону, приводящий к разрушению структуры полупроводника. С ростом температуры кривая удельной проводимости перемещается вверх, а наклон возрастающей части становится меньше. Для некоторых полупроводников зависимость удельной проводимости от напряженности поля описывается выражением

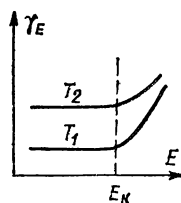
$$\gamma_E = \gamma \exp(\beta \sqrt{E}), \quad (8-25)$$

где γ — удельная проводимость полупроводника при $E < E_K$; β — коэффициент, характеризующий полупроводник.

Возрастание проводимости обусловлено ростом числа носителей заряда, так как под влиянием поля они легче освобождаются тепловым возбуждением. При дальнейшем росте поля может появиться механизм ударной ионизации, иногда приводящий к разрушению структуры полупроводника.

Наиболее важные технические применения полупроводников основаны на создании в одном куске материала контактирующих областей с различными типами электропроводности (p — n -переходов), с одним типом электропроводности, но различной величины

Рис. 8-11. Зависимость удельной проводимости полупроводника от напряженности электрического поля при различной температуре окружающей среды ($T_1 < T_2$)



($n - n^+$ или $p - p^+$), а также контактов металл — полупроводник (МП), металл — диэлектрик — полупроводник (МДП) и т. п.

8-4. ЭЛЕМЕНТЫ, ОБЛАДАЮЩИЕ СВОЙСТВАМИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Из девяти элементов, обладающих свойствами полупроводников (см. табл. 8-2), рассмотрим те, которые получили наибольшее распространение в технике.

Исторически элемент германий определил научно-техническую революцию в полупроводниковой электронике, однако кремний быстро завоевал первое место как в дискретных приборах, так и в микросхемах.

Германий. Содержание германия в земной коре невелико, около $7 \cdot 10^{-4} \%$. В результате химической переработки исходного сырья образуется тетрахлорид германия, который путем дальнейших операций переводят в диоксид германия (GeO_2) — порошок белого цвета. Диоксид германия восстанавливается в водородной печи при температуре $650-700^\circ\text{C}$ до элементарного германия, представляющего собой серый порошок. В некоторых случаях порошок германия получают непосредственно из GeCl_4 путем разложения этого соединения при высокой температуре в атмосфере паров цинка. Порошок германия подвергают травлению в смеси кислот и сплавляют в слитки. Слитки германия используют в качестве исходного материала для получения особо чистого германия *методом зонной плавки* или же для непосредственного получения монокристаллов *методом вытягивания из расплава* (метод Чохральского).

При зонной плавке слиток германия 3 обычно помещают в графитовую лодочку 4, заключенную в кварцевую трубу 1, по которой непрерывно проходит инертный газ (рис. 8-12). При помощи витка высокочастотного контура 2 получают узкую зону плавления 6, которая медленно перемещается вдоль очищаемого образца, так как виток движется вместе с кареткой 5. Для ускорения процесса очи-

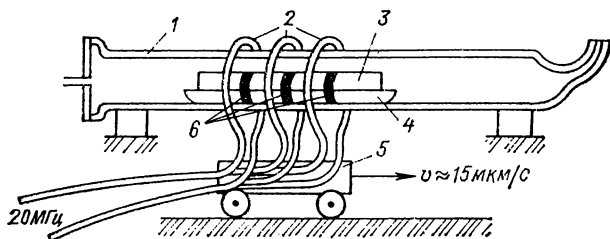


Рис. 8-12. Схема устройства для зонной плавки

1 — кварцевая труба; 2 — витки контура высокочастотного генератора; 3 — слиток очищаемого германия; 4 — графитовая лодочка; 5 — перемещающаяся каретка, на которой укреплены витки; 6 — зоны плавления (зачернены) в плоскости витков

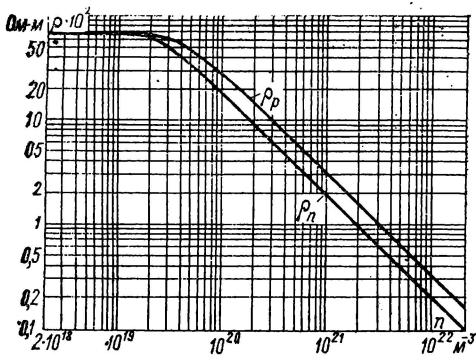


Рис. 8-13. Зависимость удельного сопротивления германия ρ - и n -типов от концентрации носителей заряда при 20 °С

стики используется не один виток, а несколько, что эквивалентно нескольким последовательным очисткам при одном нагревателе. В германии в небольших концентрациях обычно присутствуют Ni, Ca, Cu, Mn, As, Fe, Si. Большинство примесей обладает большей растворимостью в жидкой фазе германия, чем в твердой, и уносится с расплавленной зоной. Поэтому в результате очистки примеси концентрируются у одного конца слитка, от которого затем отрезается загрязненная часть длиной 20—25 мм. Удельное сопротивление в остальной части слитка после многократного прохождения его расплавленными зонами может быть выше 0,5 Ом·м. Удельное сопротивление германия зависит от концентрации носителей, определяемой степенью очистки (рис. 8-13). Для получения

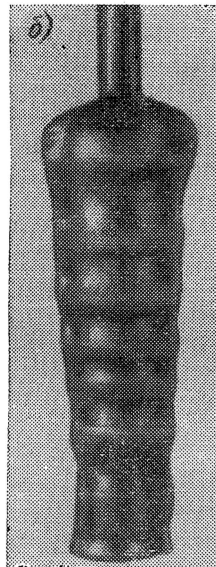
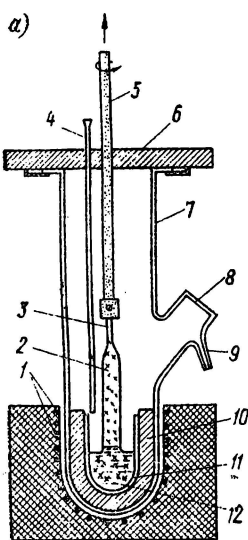


Рис. 8-14

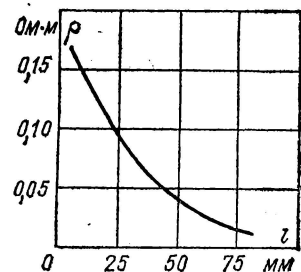


Рис. 8-15

Рис. 8-14. Схема установки для вытягивания монокристаллов германия из расплава (а) и внешний вид монокристалла германия с затравкой (б)

1 — нихромовая печь сопротивления или индукционная катушка; 2 — растущий монокристалл; 3 — затравка; 4 — кварцевая трубка для введения примесей; 5 — шток для вытягивания и вращения кристалла; 6 — латунная плита; 7 — кварцевый цилиндр; 8 — смотровое окно; 9 — патрубок для ввода водорода или аргона; 10 — графитовый тигель; 11 — кварцевый вкладыш; 12 — расплавленный германий

Рис. 8-15. Изменение удельного сопротивления по длине монокристалла германия

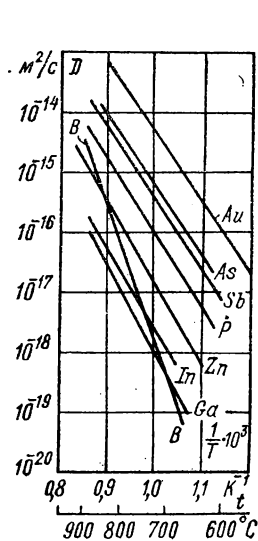


Рис. 8-16

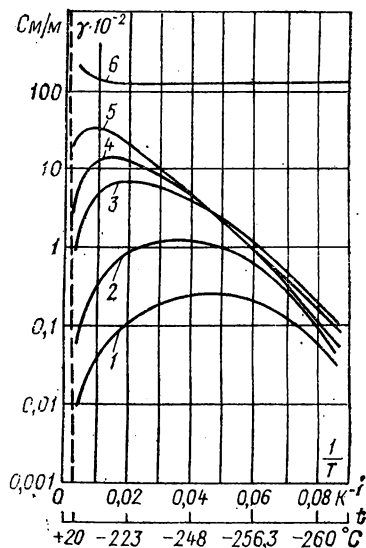


Рис. 8-17

Рис. 8-16. Зависимость коэффициента диффузии различных примесей в германии от температуры

Рис. 8-17. Зависимость удельной проводимости германия *n*-типа от температуры и от концентрации примеси — мышьяка

1 — $N = 8 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$; 2 — $8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$; 3 — $1,2 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$; 4 — $7 \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$; 5 — $6 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$; 6 — $8 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Штриховой линией показана собственная проводимость

вается около 10^{-3} Па ($10^{-5} \text{ мм рт. ст.}$). При постепенном опускании штока в расплав медленно вводится монокристаллическая затравка, которая может быть ориентирована в определенном кристаллографическом направлении. Затравка выдерживается в расплаве, пока не оплавится с поверхности. Когда это достигнуто, затравку, вращая, начинают медленно поднимать. За затравкой тянется жидкий столбик расплава, удерживаемый поверхностным натяжением. Попадая в область низких температур над поверхностью тигля, расплав затвердевает, образуя одно целое с затравкой. Скорость вытягивания может изменяться в пределах 10^{-5} — 10^{-4} м/с . Диаметр вытягиваемого слитка можно по желанию менять, несколько понижая (увеличение диаметра) или повышая (уменьшение диаметра) температуру расплава. Чтобы получить монокристаллы строго постоянного диаметра по всей длине, необходимо температуру расплава поддерживать постоянной с точностью до десятых долей градуса. Этим способом получают монокристаллы германия диаметром в десятки миллиметров. Слитки имеют неодинаковое сопротивление по длине (рис. 8-15), так как верхняя часть слитка содержит меньшее число примесей, чем нижняя, вытягиваемая из остатков расплавленного германия с повышенной концентрацией примесей. При вытягивании монокристалла в него вводят в строго контролируемом количестве примеси для получения германия с определенной величиной и типом

Свойства германия, кремния и селена

Свойства	Германий	Кремний	Селен
Атомная масса	72,60	28,06	—
Атомный объем	13,5	11,7	—
Постоянная решетки, нм	0,566	0,542	—
Плотность при 20 °С, Мг/м ³	5,3	2,3	4,8
Средний температурный коэффициент линейного расширения (0—100 °С), К ⁻¹	$6,0 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	55	80	4
Средняя удельная теплоемкость (0—100 °С), Дж/(кг·К)	333	710	330
Температура плавления, °С	936	1414	217—220
Удельная теплота плавления, Дж/кг	$4,1 \cdot 10^5$	$1,6 \cdot 10^6$	$64,2 \cdot 10^3$
Коэффициент поверхностного натяжения (при температуре плавления), Н/м	0,6	0,72	0,11
Собственное удельное сопротивление при 20 °С, Ом·м	0,47	2000	—
Собственная концентрация основных носителей, м ⁻³	$2,5 \cdot 10^{19}$	$1 \cdot 10^{18}$	—
Ширина запрещенной зоны при 20 °С, эВ	0,72	1,12	1,70—1,90
Подвижность электронов, м ² /(В·с)	0,39	0,14	—
Подвижность дырок, м ² /(В·с)	0,19	0,05	$0,2 \cdot 10^4$
Диффузионная длина неосновных носителей, мм	0,2—3,0	0,1—0,5	—
Работа выхода электронов, эВ	4,8	4,3	—
Первый ионизационный потенциал, В	8,10	8,14	9,75
Диэлектрическая проницаемость	16	12,5	—
Термо-ЭДС относительно платины при $\Delta T = 100$ К, мВ	33,0	41,6	—

электропроводности. Коэффициенты диффузии примесей уменьшаются при понижении температуры (рис. 8-16).

Германий, использующийся в производстве полупроводниковых приборов, подразделяется на марки, отличающиеся легирующими примесями, значением удельного сопротивления и диффузионной длины неосновных носителей заряда. Для изготовления полупроводниковых приборов слитки германия распиливаются на пластинки, поверхность которых протравливается для устранения дефектов обработки.

Физические свойства германия приведены в табл. 8-3. Удельная проводимость германия с различной концентрацией мышьяка зависит от температуры. Из рис. 8-17 видны области температур, в которых проявляются собственная и примесная составляющие электропроводности германия. Кроме того, видно, что при большом содержании примесей (кривая 6) имеем вырожденный полупроводник.

При плавлении удельная проводимость германия возрастает скачком примерно в 13 раз. При дальнейшем нагреве удельная проводимость сначала почти не изменяется, а начиная с температуры 1100 °С — падает. В момент плавления германия происходит увеличение его плотности на 5—6 %. Спектральная зависимость фото-

проводимости германия была показана на рис. 8-7. Максимум фотопроводимости достигается при $\lambda \approx 1,5$ мкм в области инфракрасной части спектра.

Германий применяется для изготовления выпрямителей переменного тока различной мощности, транзисторов разных типов. Из него изготавливаются преобразователи Холла и другие, применяемые для измерения напряженности магнитного поля, токов и мощности, умножения двух величин в приборах вычислительной техники и т. д. Оптические свойства германия позволяют использовать его для фототранзисторов и фоторезисторов, оптических линз с большой светосилой (для инфракрасных лучей), оптических фильтров, модуляторов света и коротких радиоволн. Внутренний фотоэффект в германии наблюдается и при поглощении средних и быстрых электронов, а также при торможении элементарных частиц больших масс. Так, при поглощении α -частицы отмечается импульс тока продолжительностью около 0,5 мкс, соответствующий прохождению 10^6 электронов. Поэтому германий может быть использован и для изготовления счетчиков ядерных частиц. На рис. 8-18 приведена вольт-амперная характеристика мощного германиевого выпрямителя с воздушным охлаждением. Рабочий диапазон температур германиевых приборов от -60 до $+70^\circ\text{C}$; при повышении температуры до верхнего предела прямой ток, например у диодов, увеличивается почти в два раза, а обратный — в три раза. При охлаждении до $-(50-60)^\circ\text{C}$ прямой ток падает на 70—75 %.

Германиевые приборы должны быть защищены от действия влаги и воздуха.

Кремний, как и германий, относится к ковалентным кристаллам

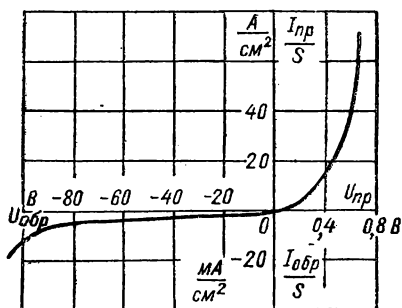


Рис. 8-18

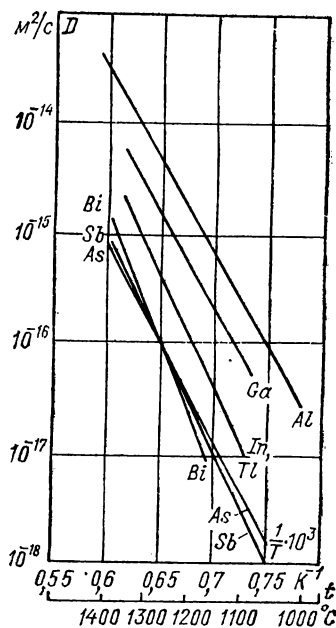


Рис. 8-19

Рис. 8-18. Вольт-амперная характеристика силового германиевого выпрямителя с воздушным охлаждением

Рис. 8-19. Зависимость коэффициента диффузии различных примесей в кремнии от температуры

четвертой группы таблицы Д. И. Менделеева и имеет кубическую решетку типа алмаза. Это один из наиболее распространенных элементов земной коры (около 30 %). Технический кремний (около одного процента примесей) получают в электрических печах восстановлением его оксидов углеродсодержащими веществами. Затем химическим путем образуют легколетучие хлористые соединения кремния, например трихлорсилан (SiHCl_3), представляющий собой жидкость с температурой кипения около 32°C . После тщательной дополнительной очистки трихлорсилан с потоком водорода поступает в камеру восстановления, в которой на нагретые электрическим током до 1250°C кремниевые стержни — затравки оседает чистый поликристаллический кремний. Процесс ведут до получения нужного диаметра стержня (до 100 и более мм). Выращивание объемных монокристаллов кремния осуществляют методами вытягивания из расплава и бестигельной зонной плавки. При этом имеются трудности. Температура плавления кремния (см. табл. 8-3) значительно выше температуры плавления германия и близка к температуре размягчения труб, изготовленных из кварцевого стекла. Из этих труб в стержень может попасть кислород и другие примеси. Кроме того, кремний реагирует с углеродом, а потому зонную плавку стержня приходится вести без графитовой лодочки и не в кварцевых трубах, а в камерах из тугоплавких металлов. При вертикальном расположении стержня в процессе бестигельной зонной плавки узкая расплавленная зона удерживается вследствие большого поверхностного натяжения расплавленного кремния и малой плотности этого вещества (см. табл. 8-3). В табл. 8-3 приведены и другие

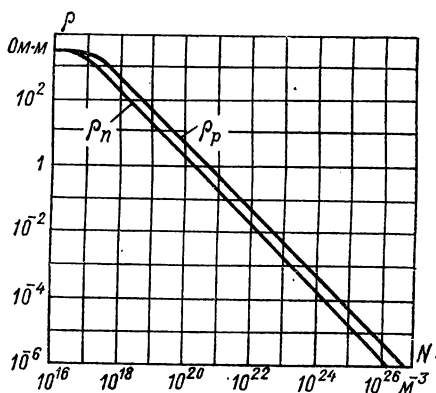


Рис. 8-20

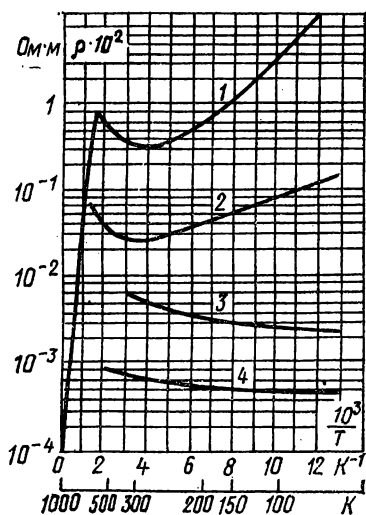


Рис. 8-21

Рис. 8-20. Зависимость удельного сопротивления кремния с электронной и дырочной электропроводностью от концентрации примесей

Рис. 8-21. Зависимость удельного сопротивления кремния n -типа от температуры при разной концентрации фосфора в образцах

1 — $N = 4,7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$; 2 — $2,7 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$; 3 — $4,7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$; 4 — $4,7 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

физические свойства кремния. Коэффициент диффузии различных примесей в кремний возрастает с повышением температуры (рис. 8-19). Электропроводность кремния, как и германия, очень сильно зависит от концентрации примесей (рис. 8-20). Температурная зависимость удельного сопротивления для кремния *n*-типа аналогична и для кремния *p*-типа (рис. 8-21).

В настоящее время кремний является основным материалом для изготовления полупроводниковых приборов: диодов, транзисторов, фотоэлементов, тензопреобразователей и твердых схем микроэлектроники. При использовании кремния верхний предел рабочей температуры приборов может составлять в зависимости от степени очистки материала 120—200 °С, что значительно выше, чем для германия.

Селен — элемент шестой группы таблицы Д. И. Менделеева. Его получают на заводах при электрической очистке меди. Селен существует в нескольких разновидностях — как аморфных, так и кристаллических, разных цветов. Физические свойства серого кристаллического селена гексагонального строения приведены в табл. 8-3.

Удельное сопротивление селена изменяется в очень широких пределах $1\text{--}10^{11}$ Ом·м и зависит от рода и концентрации примесей, температуры, освещенности. Селен обычно является дырочным полупроводником.

Примеси галогенов (хлор, бром, йод) уменьшают удельное сопротивление селена, если концентрация этих примесей меньше $5 \cdot 10^{-4}$ % по массе. При дальнейшем увеличении содержания этих примесей сопротивление возрастает. Примеси теллура, ртути и ряда других металлов увеличивают сопротивление технически чистых образцов селена. Из селена изготавливались фотоэлементы и выпрямители. В настоящее время применение селена существенно сократилось.

8-5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ СОЕДИНЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ

Полупроводниковые соединения могут обладать самыми разнообразными электрофизическими свойствами. Рассмотрим наиболее важные для электротехники материалы.

Карбид кремния. Это соединение элементов IV группы таблицы Д. И. Менделеева кремния и углерода ($A^{IV}B^{IV}$), соответствующее формуле SiC_x ($x \approx 1$). Карбид кремния стехиометрического состава содержит 70,045 % Si и 29,955 % C (по массе). Технический карбид кремния изготавливается в электрических печах при восстановлении диоксида кремния (кварцевого песка) углеродом. До температуры 2000 °С образуется кубическая β -модификация SiC, при более высокой температуре — гексагональные α -модификации. После окончания процесса и охлаждения печи из нее извлекают сросшиеся пакеты кристаллов SiC, называемые *друзами*, которые после размола дают порошки с остроконечными, зубчатыми зернами разной круп-

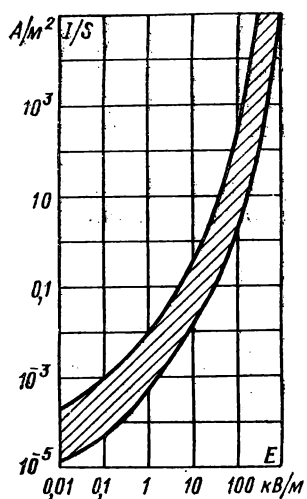


Рис. 8-22. Зависимость плотности тока, протекающего через сжатый порошок карбида кремния, от средней напряженности электрического поля. Удельное давление на порошок 60 МПа. Размер зерен 63—75 мкм

ности, средний размер зерен от 40 до 300 мкм. В зависимости от исходного сырья и особенностей технологического процесса получают кристаллы различной окраски. Окраска кристаллов SiC и тип электропроводности зависят от инородных примесей либо избытка атомов Si или C над количеством их, отвечающим стехиометрическому составу. Примеси элементов пятой группы N, P, As, Sb, Bi) и железа в SiC дает зеленую окраску и электропроводность n -типа; элементы второй группы (Ca, Be, Mg) и третьей группы (B, Al, Ga, In) дают голубую и фиолетовую окраску (в толстых

слоях черную) и электропроводность p -типа; избыток Si дает SiC n -типа, а избыток C дает SiC p -типа. Чистые кристаллы SiC прозрачны. Электропроводность кристаллов SiC при нормальных температурах — примесная и колеблется в широких пределах. Основные физические свойства кристаллов SiC:

Плотность	3,2 Мг/м ³
Коэффициент теплопроводности при 20 °С	10—40 Вт/(м·К)
Удельная теплоемкость	620—750 Дж/(кг·К)
Температурный коэффициент линейного расширения	(4—7)·10 ⁻⁶ К ⁻¹
Твердость по минералогической шкале	9,5
Ширина запрещенной зоны	2,8—3,1 эВ
Подвижность электронов при 20 °С	0,01—0,05 м ² /(В·с)
Подвижность дырок при 20 °С	0,002—0,005 м ² /(В·с)
Диэлектрическая проницаемость	6,5—7,5
Термо-ЭДС относительно меди	300 мкВ/К

Электропроводность порошкообразного карбида кремния зависит от электропроводности зерен исходного материала, крупности помола, степени сжатия частиц, напряженности электрического поля и температуры. Например, если истинная удельная проводимость материала примерно 150 См/м, то при температуре 20 °С, размере зерен 63—75 мкм и давлении на порошок 60 МПа в области слабого поля (до 5 В на сантиметр высоты порошка) удельная проводимость порошка будет примерно $2 \cdot 10^{-6}$ См/м. При увеличении зерна до 85—105 мкм и при всех прежних условиях удельная проводимость порошка возрастает до значений больших 10^{-3} См/м. Как видно из рис. 8-22, значения удельной проводимости отличаются большим разбросом, а вся зависимость плотности тока от напряженности электрического поля имеет нелинейный характер, т. е. электропроводность порошков карбида кремния не подчиняется закону Ома.

При низких напряжениях ток идет через запирающие слои на контактирующих поверхностях зерен, при более высоких напряже-

Рис. 8-23. Пояснение принципа действия варистора из карбида кремния: а — разрез варистора; б — эквивалентная схема варистора; в — вольт-амперная характеристика, соответствующая эквивалентной схеме; г — реальная вольт-амперная характеристика на переменном токе

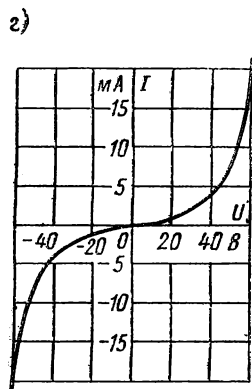
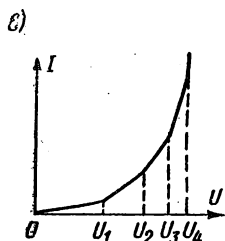
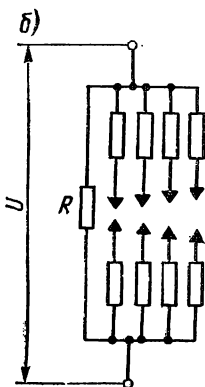
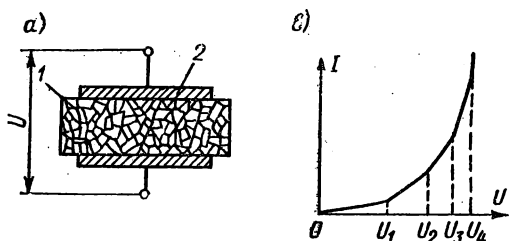
1 — диск из зерен карбида кремния, скрепленных неорганическим связующим; 2 — электроды

ниях начинают перекрываться зазоры между зернами. Наряду с этим вступает в действие и контактный микронагрев.

Нелинейный резистор, называемый *варистором*, состоящий из конгломерата зерен карбида кремния, показан на рис. 8-23, а.

Электропроводность варистора определяется многими параллельными цепочками контактирующих зерен, причем пробивное напряжение контактов в различных цепочках (рис. 8-23, б) имеет большой разброс. Так, до значения приложенного напряжения U_1 (рис. 8-23, в) ток идет только через сопротивление R , после чего при напряжениях U_1 , U_2 , U_3 и последующих включаются друг за другом остальные параллельные цепочки зерен, и вольт-амперная характеристика представляет собой ломаную линию. В реальном варисторе таких цепочек может быть очень много, поэтому реальная вольт-амперная характеристика (рис. 8-23, г) представляет собой плавную кривую. Варисторы, изготовленные из несвязанных зерен карбида кремния, являются нестабильными, боясь тряски, ударов и легко изменяют свои характеристики. Поэтому зерна SiC надо скреплять связующим веществом. В качестве связующих веществ используются глина, ультрафарфоровая масса, жидкое стекло, легкоплавкие стекла, кремнийорганические лаки и т. д. Материал с глинистой связкой называют *тиритом*, со связкой из жидкого стекла — *вилитом*.

Карбид кремния в электротехнике применяется для изготовления резисторов вентильных разрядников, защищающих линии передачи высокого напряжения и аппаратуру; для производства различных низковольтных варисторов, используемых в автоматике, вычислительной технике, электроприборостроении, в технике получения высоких температур и т. д. В качестве примера рассмотрим использование карбида кремния в вентильных разрядниках высоковольтных линий передач и в силовых стержнях.



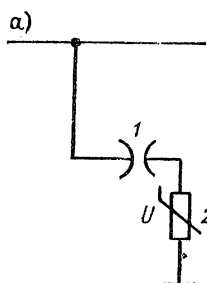
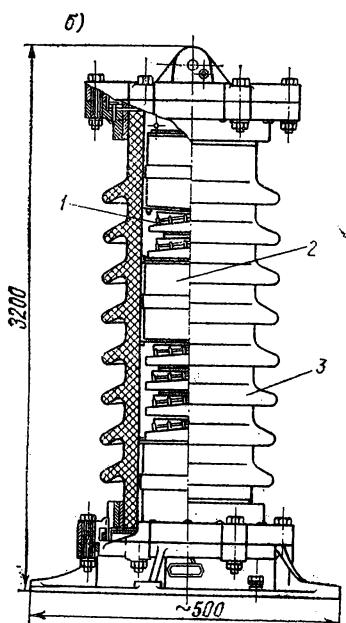


Рис. 8-24. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) вентильного разрядника
1 — искровой промежуток; 2 — варисторы (вилитовые диски); 3 — фарфоровый корпус



Вентильным разрядником называют разрядник, имеющий однократный или многократный искровой промежуток, в комплекте с варисторами (рис. 8-24). При перенапряжении на высоковольтной линии пробивается искровой промежуток, нелинейные диски оказываются под большим напряжением, сопротивление их резко падает, линия оказывается заземленной, и через разрядник течет импульсный ток длительностью десятки или сотни микросекунд. Помимо этого импульсного тока рабочее напряжение линий переменного тока поддерживает протекающий через разрядник «сопровождающий» ток, однако в первый же момент прохождения этого тока через нулевое значение линия отключается от земли, вилитовые диски восстанавливают свое сопротивление, а разрядные промежутки деионизируются. Защита линии автоматически восстанавливается.

Силитовые стержни изготавливаются на основе карбида кремния, кристаллического кремния и углерода. Плотность силита составляет $3,2 \text{ Мг/м}^3$, температурный коэффициент линейного расширения силитовых стержней очень мал, удельное электрическое сопротивление может колебаться в значительных пределах, но для наиболее часто применяющихся нагревателей оно составляет $0,001—0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Силитовые нагреватели применяются в электрических печах различной мощности, рассчитанных на максимальные температуры до 1500°C . Кривая относительного изменения электрического сопротивления силитового стержня от температуры показана на рис. 8-25. Срок службы нагревателей в электрической печи может колебаться в пределах от сотен до тысяч часов.

Соединения $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ являются перспективными материалами для создания того или иного полупроводникового прибора. Они имеют

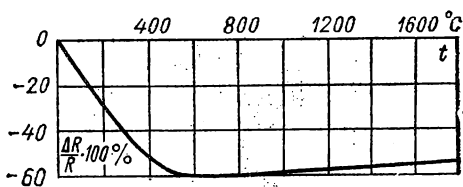


Рис. 8-25

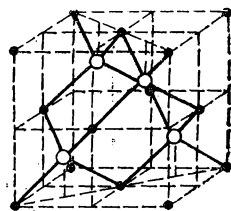


Рис. 8-26

Рис. 8-25. Изменение сопротивления литового стержня от температуры

Рис. 8-26. Сфалеритная структура соединений $A^{III}B^V$. Черные кружки — атомы A^{III} , белые — атомы B^V

структуру цинковой обманки (сфалерита), которая подобна структуре алмаза, отличаясь лишь тем, что природа и размеры входящих в нее частиц различны (рис. 8-26).

Наиболее исследованными и технологически не очень сложными из них являются фосфиды, арсениды и антимониды. Серьезное практическое значение в настоящее время приобрели арсенид и фосфид галлия и антимонид индия. Основной метод получения соединений $A^{III}B^V$ — непосредственное взаимодействие компонентов в вакууме или в атмосфере инертного газа. В свойствах соединений $A^{III}B^V$ (табл. 8-4) наблюдаются некоторые закономерности, которые показаны на рис. 8-27.

Свойства полупроводниковых соединений типа $A^{III}B^V$ Таблица 8-4

Свойства	Группа и соединение								
	Фосфиды			Арсениды			Антимониды		
	AlP	GaP	InP	AlAs	GaAs	InAs	AlSb	GaSb	InSb
Порядковый номер A^{III}	13	31	49	13	31	49	13	31	49
B^V	15	15	15	33	33	33	51	51	51
Постоянная решетки, нм . . .	0,542	0,545	0,587	0,564	0,565	0,605	0,613	0,609	0,648
Плотность, Мг/м ³	2,4	4,1	4,8	3,6	5,4	5,7	4,3	5,7	5,8
Показатель преломления	—	3,4	3,3	—	3,2	3,2	3,3	3,7	4,1
Температурный коэффициент линейного расширения, $\alpha_l \cdot 10^6$, К ⁻¹	—	4,8	4,5	3,5	5,4	4,8	4,2	6,2	5,0
Твердость по минералогической шкале	5,5	5,0	—	5,0	4,5	4,0	4,8	4,5	3,8
Подвижность, м ² /(В·с) электронов	0,008	0,019	0,50	0,03	0,95	3,30	0,02	0,40	10,00
дырок	0,003	0,012	0,015	—	0,045	0,050	0,055	0,140	0,100

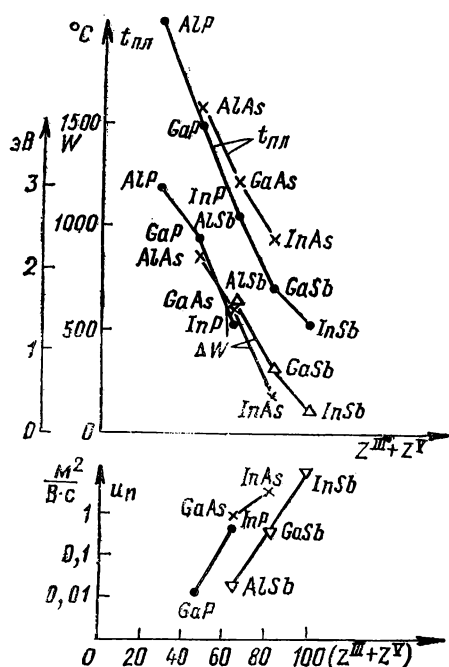


Рис. 8-27. Зависимости температуры плавления ширины запрещенной зоны и подвижности электронов соединений $A^{III}B^V$ от суммарного атомного номера

Температура плавления соединений $A^{III}B^V$ понижается с ростом суммарного атомного номера и атомных масс, входящих в соединение элементов. Точки плавления лежат выше соответствующих температур плавления элементов, из которых состоит соединение, за исключением антимолида индия, температура плавления которого ($536^{\circ}C$) лежит между температурой плавления сурьмы ($630^{\circ}C$) и индия ($156^{\circ}C$). С увеличением атомной массы и суммарного атомного номера соединений уменьшается ширина запрещенной зоны, так как происходит размывание «электронных облаков» ковалент-

ных связей и они все более приближаются к металлическим. Скачкообразный переход к металлической связи наблюдается у сплавов индия с висмутом, галлия с сурьмой и т. д. Прямые, характеризующие изменение ширины запрещенной зоны в зависимости от суммарного атомного номера соединения (рис. 8-27), и прямые, показывающие изменение температуры плавления соединений, приблизительно можно считать параллельными. Следовательно, между шириной запрещенной зоны и температурой плавления соединений имеется прямая пропорциональность. Наблюдаемая закономерность объяснима, если исходить из теоретических представлений о том, что ширина запрещенной зоны зависит от вида связи, а видом и прочностью связи определяется энергия кристаллической решетки и, следовательно, температура плавления вещества.

Из табл. 8-4 видно, что с увеличением суммарного атомного номера компонентов в пределах каждой из групп соединений происходит уменьшение твердости вещества. С уменьшением ширины запрещенной зоны в пределах каждой группы соединений наблюдается закономерный рост подвижности носителей зарядов, более ярко выраженный для электронов, чем для дырок. Абсолютное значение подвижности электронов для большинства соединений существенно превышает подвижность дырок. Исключение представляет только антимолид алюминия, у которого подвижность дырок почти в три раза превышает подвижность электронов. Плотность веществ по мере увеличения «металличности» соединений возрастает.

А р с е н и д г а л л и я — один из самых перспективных полупроводниковых материалов, так как ширина запрещенной зоны его превышает ширину запрещенной зоны германия и кремния, но еще не очень велика (1,43 эВ). При этом подвижность электронов у него больше, чем у германия и кремния, а подвижность дырок сравнима с таковой для кремния (см. табл. 8-4).

Цинк, кадмий, медь являются акцепторами, уровни которых лежат выше потолка валентной зоны 0,08—0,37 эВ. Донорами служат сера, селен, теллур, а также элементы IV группы системы Д. И. Менделеева при малой концентрации, когда они замещают атомы галлия.

При больших концентрациях элементы IV группы становятся нейтральными примесями, так как входят в решетку парами, замещая и атомы Ga и As.

Из арсенида галлия изготавливают фотоэлементы с КПД около 7 %, дозиметры рентгеновского излучения, полупроводниковые лазеры. Из вырожденного арсенида галлия производят туннельные диоды.

Полупроводниковые приборы из арсенида галлия по частотному пределу превосходят германиевые, а по максимальной рабочей температуре (до 450 °C) — кремниевые.

А н т и м о н и д и н д и я получают сплавлением в стехиометрическом соотношении высокочистых индия и сурьмы. Материал проходит зонную очистку, а монокристаллы из него получают по методу вытягивания.

Основные свойства InSb приведены в табл. 8-4 и иллюстрируются рис. 8-27. Из табл. 8-4 видно, что InSb отличается очень высокой подвижностью электронов. Вследствие малой ширины запрещенной зоны (0,18 эВ) при комнатной температуре электропроводность его становится не примесной, а собственной. В области примесной электропроводности материал близок к вырождению. Фотопроводимость InSb охватывает широкую область, лежащую в инфракрасной части спектра, доходя до 8 мкм. Максимум фотопроводимости соответствует длине волны 6,7 мкм.

Антимонид индия применяют для изготовления фотоэлементов высокой чувствительности (основанных на использовании различных видов фотоэффекта), датчиков ЭДС Холла и оптических фильтров. Кроме того, InSb используют для термоэлектрических генераторов и холодильников.

Ф о с ф и д г а л л и я — материал с широкой запрещенной зоной (2,3 эВ), используемый в практике для изготовления светодиодов с красным или зеленым свечением в зависимости от вводимых в него примесей. Основные свойства его приведены в табл. 8-4.

К материалам с еще большей шириной запрещенной зоны (выходящей за пределы, характерные для полупроводников) из соединений $A^{III}B^V$ относятся нитриды бора, алюминия и галлия. Последний из них ($W \approx 3,4$ эВ) перспективен для изготовления светодиодов с голубым свечением.

Твердые растворы соединений $A^{III}B^V$ расширяют возможности получения материалов с нужными для техники параметрами.

Соединения A^{II} и B^{VI} и другие полупроводниковые материалы.

Свойства сульфидов, селенидов, теллуридов и оксидов

Соединения	Плотность, Мг/м ³	$\gamma_{\text{т}}$, Вт/(м·К)	$t_{\text{пл}}$, °С	W , эВ	u , м ² /(В·с)	
					для n -типа	для p -типа
PbS	7,60	2,9	1114	0,37	0,06	0,070
Bi ₂ S ₃	7,39	2,0	720	1,30	—	—
CdS	4,82	—	1750 *	2,40	0,02	0,005
PbSe	8,15	1,7	1076	0,25	0,12	0,100
Bi ₂ Se ₃	7,40	2,5	706	0,28	0,10	—
CdSe	5,81	—	1258	1,80	0,08	—
HgSe	8,26	5,6	800	0,60	1,00	—
PbTe	8,16	1,7	917	0,30	0,18	0,090
Bi ₂ Te ₃	—	1,1	585	0,15	0,12	0,050
CdTe	5,86	8,5	1098	1,60	0,076	0,006
HgTe	8,42	6,0	670	0,25	1,50	—
Cu ₂ O	5,90	6,1	~1230	0,34	—	0,005
ZnO	5,60	—	—	3,20	0,05	—
TiO ₂	4,20	—	1640	2,90	~0,001	—

* При давлении 10 МПа.

Рассмотрим некоторые сульфиды, селениды, теллуриды и оксиды, которые нашли техническое применение и представляют определенный интерес.

Сульфиды — сернистый свинец (PbS), сернистый висмут (Bi₂S₃) и сернистый кадмий (CdS) — используют для изготовления фоторезисторов (фотосопротивлений).

Сернистый свинец встречается в природе в виде материала галенита (свинцовый блеск) и может быть получен искусственно несколькими способами. PbS бывает в аморфной и кристаллической модификациях. Сернистый висмут получают сплавлением висмута с серой в отсутствии кислорода. Кристаллы относятся к ромбической системе и имеют серо-черный цвет. Сернистый кадмий получают различными способами; он может быть аморфным и кристаллическим. Цвет его зависит от модификации и содержания примесей. Чувствителен к рентгеновскому излучению.

Некоторые свойства сульфидов даны в табл. 8-5.

Сульфиды применяют и в качестве люминофоров. Кроме перечисленных в табл. 8-5 сульфидов, электролюминофором является сульфид цинка, активированный медью. Ширина запрещенной зоны ZnS около 3,6 эВ.

Селениды — селенистый свинец (PbSe), селенистый висмут (Bi₂Se₃), селенистый кадмий (CdSe), селенистую ртуть (HgSe) — применяют для изготовления фоторезисторов, полупроводниковых термоэлементов и источников когерентного излучения (лазеров). Основные свойства этих веществ даны в табл. 8-5.

Теллуриды — теллуристый свинец (PbTe), теллуристый висмут (Bi₂Te₃), теллуристый кадмий (CdTe), теллуристая ртуть (HgTe) — так же, как сульфиды и селениды, находят себе приме-

нение в фоторезисторах, термоэлементах и излучательных приборах. Теллуристый кадмий чувствителен к рентгеновскому излучению и обладает фоторезистивным эффектом в этой области спектра. Теллуристая ртуть имеет малую ширину запрещенной зоны, как и некоторые другие соединения, но при этом отличается почти на порядок большей по сравнению с ними подвижностью электронов, что объясняется малой эффективной массой носителей заряда в этом соединении.

Соединения рассмотренных подгрупп обладают узкой областью гомогенности. К недостаткам их относится изменение параметров с течением времени.

О к с и д ы. Гемиоксид меди (Cu_2O) — вещество малинового цвета, является полупроводником только p -типа. Гемиоксид меди кристаллизуется в кубической системе. Проводимость Cu_2O в сильной степени зависит от инородных примесей, термической обработки и температуры. При прогреве на воздухе (в присутствии кислорода) проводимость Cu_2O возрастает.

Из окисленных медных пластин, на поверхности которых образовался слой Cu_2O , были получены первые типы полупроводниковых выпрямителей и фотоэлементов.

К другим полупроводниковым оксидам относится оксид цинка (ZnO) с избытком цинка по сравнению со стехиометрическим составом, являющийся примесным полупроводником только n -типа. При прокаливании на воздухе (в атмосфере, содержащей кислород) проводимость ZnO уменьшается. К полупроводникам относится и частично восстановленный диоксид титана TiO_2 (см. табл. 8-5). Полупроводниковые оксиды используются в основном для изготовления терморезисторов с большим отрицательным температурным коэффициентом удельного сопротивления [$-(3\div 4) \text{ \%}/\text{K}$].

Терморезисторы (термисторы) изготавливают в виде стерженьков, пластинок или таблеток методами керамической технологии. Сопротивление и другие свойства терморезисторов зависят не только от состава, но и от крупности зерна, от технологического процесса изготовления: давления при прессовании (если полупроводник берут в виде порошка) и температуры обжига. Терморезисторы используются для измерения, регулирования температуры и термокомпенсации, для стабилизации напряжения, ограничения импульсных пусковых токов, измерения теплопроводности жидкостей, в качестве бесконтактных реостатов и токовых реле времени.

Из полупроводниковой керамики, обладающей точкой Кюри (см. стр. 173), изготавливаются терморезисторы, отличающиеся от всех других терморезисторов тем, что имеют не отрицательный, а очень большой положительный температурный коэффициент сопротивления (свыше $+20 \text{ \%}/\text{K}$) в узком интервале температур (около 10°C). Такие терморезисторы называют *позисторами*. Их изготавливают в виде дисков небольшой толщины и предназначают для контроля и регулирования температуры, использования в системах пожарной сигнализации, предохранения двигателей от перегрева, ограничения токов, измерения потоков жидкостей и газов.

Таблица 8-6

Полупроводниковые материалы сложного состава,
использующиеся в термоэлектрических устройствах

Материал	Тип электро- проводности	Ширина за- прещенной зоны, эВ	Максималь- ная рабочая температура, °C	Коэффициент теплопро- водности, Вт/(м·К)
$\text{Bi}_{0,4}\text{Sb}_{1,6}\text{Te}_3$	p	0,19	650	1,0
$\text{Bi}_2\text{Te}_{2,7}\text{Se}_{0,3}$	n	0,20	600	1,1
AgSbTe_2	p	0,30	750	0,6
$\text{Ge}_{0,3}\text{Si}_{0,7}$	n	1,10	1200	3,8

Полупроводниковые материалы сложного состава находят техническое применение при изготовлении термоэлементов, термогенераторов и холодильных устройств. К таким материалам относятся, например, тройной сплав Bi—Sb—Zn , употребляющийся для положительных ветвей термоэлементов, твердые растворы $0,25 \text{ PbS} \cdot 0,5 \text{ PbSe} \cdot 0,25 \text{ PbTe}$ и $0,3 \text{ PbS} \cdot 0,7 \text{ PbSe}$ и другие материалы, из которых изготовляют отрицательный электрод термоэлементов. Эффективность использования материала в термоэлектрических устройствах в простейшем случае оценивается критерием А. Ф. Иоффе

$$Z = \alpha^2 \gamma / \gamma_T, \quad (8-26)$$

где α — коэффициент термо-ЭДС.

В этом выражении заключены противоречивые требования к материалу, так как для получения большого значения Z удельная проводимость вещества γ должна быть большой, а его коэффициент теплопроводности γ_T — малым. В табл. 8-6 приведены свойства некоторых материалов, разработанных для использования в термоустройствах.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие физические явления в полупроводниках являются наиболее важными и для каких целей они используются?
2. Какую роль в свойствах полупроводников играют дефекты строения материала и вводимые примеси?
3. Какие виды полупроводниковых материалов применяются в технике?
4. Почему кремний стал важнейшим материалом полупроводниковой электроники?
5. Назовите перспективные полупроводниковые вещества.

МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

9-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

О МАГНИТНЫХ СВОЙСТВАХ МАТЕРИАЛОВ

В качестве магнитных материалов (стр. 14) техническое значение имеют ферромагнитные вещества и ферримагнитные химические соединения (ферриты).

Ферромагнетик — кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Антиферромагнетик — кристаллическое вещество, в котором результирующие магнитные моменты каждого из доменов равны нулю.

Ферримагнетик — кристаллическое вещество, магнитную структуру которого можно представить в виде двух или более подрешеток, причем результирующие магнитные моменты каждого из доменов отличны от нуля.

Магнитные свойства материалов обусловлены внутренними скрытыми формами движения электрических зарядов, представляющими собой элементарные круговые токи. Такими круговыми токами являются: вращение электронов вокруг собственных осей — *электронные спины* и орбитальное вращение электронов в атомах. Явление ферромагнетизма связано с образованием внутри некоторых материалов ниже определенной температуры (точки Кюри) таких кристаллических структур, при которых в пределах макроскопических областей, называемых *магнитными доменами*, электронные спины оказываются ориентированными параллельно друг другу и одинаково направленными. Таким образом, характерным для ферромагнитного состояния вещества является наличие в нем самопроизвольной (спонтанной) намагниченности без приложения внешнего магнитного поля. Однако, хотя в ферромагнетике и образуются самопроизвольно намагниченные области, но направления магнитных моментов отдельных доменов получаются самыми различными, как это вытекает из закона о минимуме свободной энергии системы. Магнитный поток такого тела во внешнем пространстве будет равен нулю. Возможные размеры доменов для некоторых материалов составляют около $0,001\text{--}10\text{ мкм}^3$ при толщине пограничных слоев между ними в несколько десятков — сотен атомных расстояний. У особо чистых материалов размеры доменов могут быть и больше. Существование доменов удалось показать экспериментально. При очень медленном перемагничивании ферромагнитного образца в телефоне, соединенном через усилитель с катушкой, охватывающей образец, можно различать отдельные щелчки, связанные непосредственно со скачкообразными изменениями индукции. На полированной поверхности намагничиваемого образца ферромагнетика можно обнаружить появление типичных узоров, образующихся с помощью осаждения тончайшего ферромагнитного порошка на границах от-

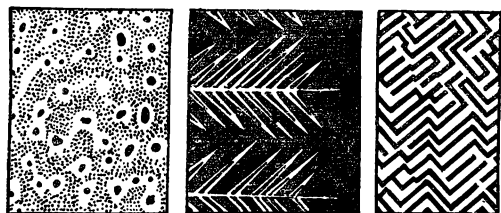


Рис. 9-1. Очертания доменов различных ферромагнетиков (фигуры Акулова)

дельных доменов; эти узоры получили название *фигур Акулова* (рис. 9-1).

Монокристаллы ферромагнитных веществ характеризуются магнитной ани-

зотропией, выражающейся в различной легкости намагничивания вдоль разных осей. На рис. 9-2 показаны направления легкого, среднего и трудного намагничивания в монокристаллах трех основных ферромагнитных элементов: железа, никеля, кобальта. Из рис. 9-2 видно, что направлением легкого намагничивания для ячейки монокристалла железа будет ребро куба, а наиболее трудного — диагональ; для ячейки никеля направление вдоль ребра куба будет соответствовать, наоборот, направлению трудного намагничивания. В тех случаях, когда анизотропия в поликристаллических магнетиках выражена достаточно резко, принято говорить, что ферромагнетик обладает *магнитной текстурой*. Получение заданной магнитной текстуры имеет большое значение и используется в технике для создания в определенном направлении повышенных магнитных характеристик материала.

Процесс намагничивания ферромагнитного материала под влиянием внешнего магнитного поля сводится: 1) к росту тех доменов, магнитные моменты которых составляют наименьший угол с направлением поля, и к уменьшению размеров других доменов (процесс смещения границ доменов); 2) к повороту магнитных моментов в направлении внешнего поля (процесс ориентации). Магнитное насыщение достигается тогда, когда рост доменов прекратится и магнитные моменты всех спонтанно намагниченных микрокристаллических участков окажутся ориентированными в направлении поля. Схема ориентации спинов в доменах приведена на рис. 9-3.

При намагничивании ферромагнитных монокристаллов наблюдается изменение их линейных размеров; это явление носит название *магнитострикции*. Магнитострикция монокристалла железа раз-

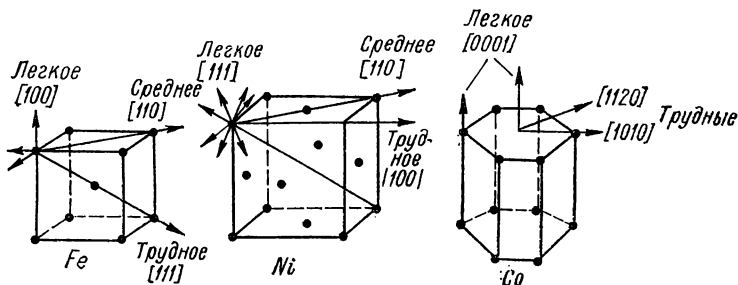


Рис. 9-2. Направления легкого, среднего и трудного намагничивания в монокристаллах железа, никеля, кобальта

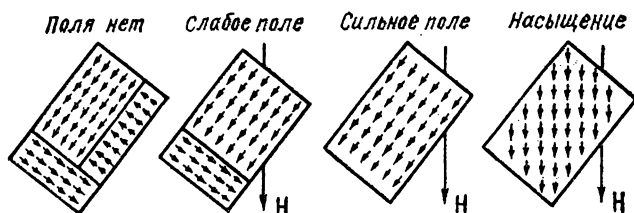


Рис. 9-3. Схема ориентации спинов в доменах при намагничивании ферромагнетика

лична для разных направлений в кристалле. Монокристалл железа, намагниченный в направлении ребра куба, удлинится в направлении диагонали, т. е. сжимается в направлении намагничивания. Магнитострикция наблюдается и у поликристаллических материалов. Из трех основных ферромагнитных элементов (Fe, Ni, Co) наибольшей магнитострикцией обладает никель (рис. 9-4). Знак магнитострикционной деформации у различных материалов может быть как положительным (растяжение в направлении поля), так и отрицательным; изменение знака может наблюдаться также у одного и того же материала (например, железа) при изменении напряженности магнитного поля.

Протекание процессов намагничивания ферромагнитного ма-

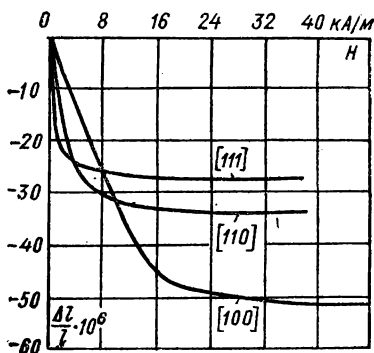


Рис. 9-4

Рис. 9-4. Кривые магнитострикционной деформации никеля по трем направлениям в кристалле

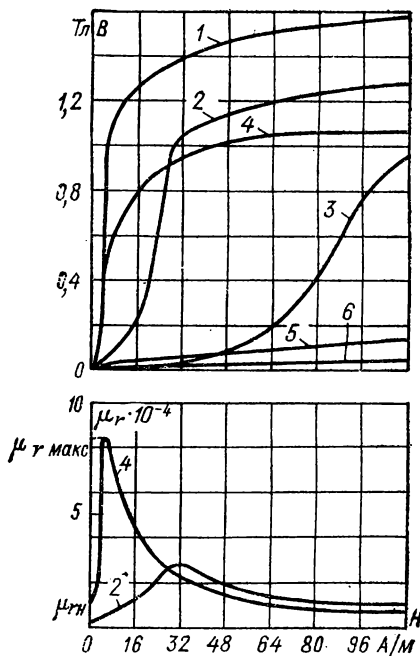


Рис. 9-5

Рис. 9-5. Кривые зависимости магнитной индукции (кривые намагничивания) и относительной магнитной проницаемости μ_r от напряженности внешнего магнитного поля

1 — железо особо чистое; 2 — железо чистое (99,98 % Fe); 3 — железо технически чистое (99,92 % Fe); 4 — пермаллой (78 % Ni); 5 — никель; 6 — сплав железо-никель (26 % Ni)

териала практически характеризуют кривыми намагничивания $B(H)$, имеющими сходный характер для всех ферромагнетиков (рис. 9-5). Относительная магнитная проницаемость определяется по основной кривой намагничивания как отношение индукции B к напряженности магнитного поля H в данной точке кривой намагничивания с учетом магнитной постоянной $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м:

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H}. \quad (9-1)$$

В дальнейшем (как и для диэлектрической проницаемости) для краткости изложения будем просто писать — магнитная проницаемость.

Магнитную проницаемость μ_{rn} при $H \approx 0$ называют *начальной проницаемостью*, определяя ее при очень слабых полях, около 0,1 А/м. Наибольшее значение магнитной проницаемости носит наименование *максимальной проницаемости* и обозначается $\mu_{r \text{ макс.}}$.

При сильных полях в области насыщения магнитная проницаемость μ_r стремится к единице.

Магнитную проницаемость, определяемую производной от магнитной индукции по напряженности магнитного поля в данной точке основной кривой намагничивания, деленной на магнитную постоянную, называют *дифференциальной магнитной проницаемостью*.

Характеристикой ферромагнетиков в переменных магнитных полях является *динамическая магнитная проницаемость* $\mu_r \sim$, представляющая собой отношение наибольшего значения индукции к наибольшему значению напряженности магнитного поля.

С увеличением частоты переменного поля динамическая магнитная проницаемость уменьшается из-за инерционности магнитных процессов (рис. 9-6).

Магнитная проницаемость ферромагнитных материалов зависит от температуры, как показано на рис. 9-7, переходя через максимум при температурах, близких к температуре (точке) Кюри. Для чистого железа точка Кюри составляет 768 °С, для никеля 358 °С, для кобальта 1131 °С. При температурах выше точки Кюри области спонтанного намагничивания нарушаются тепловым движением и материал перестает быть магнитным. Для характеристики изменения магнитной проницаемости при изменении температуры пользуются *температурным коэффициентом магнитной проницаемости* (K^{-1}):

$$TK \mu_r = \alpha_{\mu_r} = \frac{1}{\mu_r t} \frac{d\mu_r}{dt}, \quad (9-2)$$

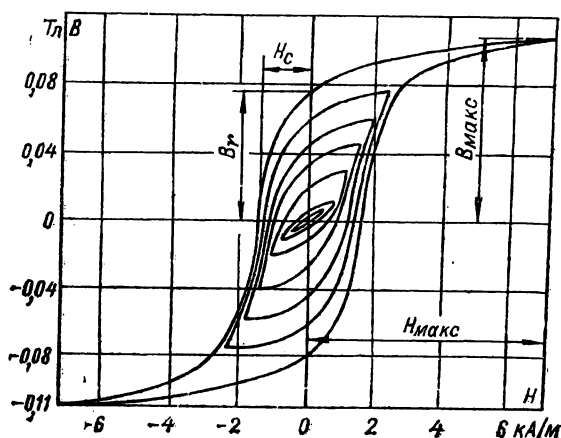
определяемым так же, как и температурный коэффициент других характеристик (см., например, рис. 1-3).

Если медленно производить намагничивание ферромагнетика во внешнем магнитном поле, а затем, начиная с какой-либо точки основной кривой намагничивания, начать уменьшать напряженность поля, то индукция будет также уменьшаться, но не по основной

кривой, а с отставанием, вследствие явления гистерезиса. При увеличении поля противоположного направления образец может быть размагничен, перемагничен и при новой перемене направления магнитного поля индукция снова может вернуться в исходную точку, характеризовавшую намагничивание образца, т. е. будет описана кривая, представляющая собой петлю гистерезисного цикла перемагничивания. В зависимости от различных значений напряженности внешнего магнитного поля можно построить семейство петель гистерезиса, как это показано на рис. 9-8. Выберем из этих циклов предельный цикл, при котором достигается намагничивание материала до насыщения $B_{\text{макс}}$. Значение B при $H = 0$ в процессе размагничивания образца, намагниченного до насыщения, называется *остаточной индукцией* B_r . Для того чтобы уменьшить индукцию от значения B_r до нуля, необходимо приложить обратно направленную напряженность поля H_c , называемую *задерживающей* (коэрцитивной) силой.

Материалы с малым значением H_c и большой магнитной проницаемостью называются *магнитомягкими* материалами. Материалы с большой коэрцитивной силой и сравнительно малой проницаемостью называются *магнитотвердыми* материалами.

Заметное влияние на магнитные свойства ферромагнетиков оказывают упругие изменения их размеров. При отрицательной магнито-



стрикции в данном материале при действии внешних растягивающих напряжений наблюдается уменьшение проницаемости. Так, для никеля под действием растягивающего

Рис. 9-8. Гистерезисные петли при различных предельных значениях напряженности внешнего магнитного поля

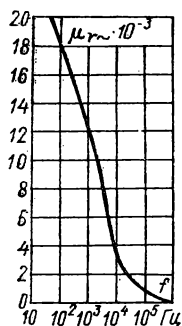


Рис. 9-6

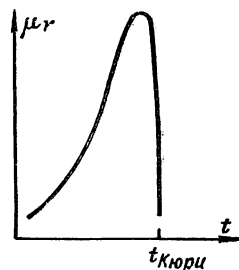


Рис. 9-7

Рис. 9-6. Зависимость динамической магнитной проницаемости пермаллоя от частоты в слабом поле ($H = 0,8$ А/м)

Рис. 9-7. Типичная зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов от температуры

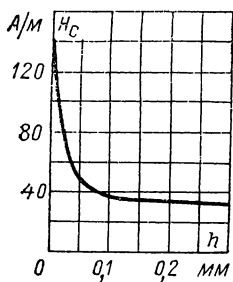


Рис. 9-9. Зависимость коэрцитивной силы трансформаторной стали от толщины листа

напряжения магнитную проницаемость можно довести до очень низкого значения. При положительной магнитострикции под действием растягивающих напряжений проницаемость возрастает. Внутренние напряжения в кристаллической решетке ферромагнетика препятствуют при намагничивании росту доменов и ориентации их магнитных моментов в направлении

поля. С увеличением внутренних напряжений магнитная проницаемость уменьшается, а коэрцитивная сила возрастает. Внутренние напряжения возникают при холодной деформации в результате прокатки,ковки, протяжки, изгибания и т. п. Отдельные кристаллы дробятся, вытягиваются, вследствие чего возникает сложная система внутренних напряжений. В качестве примера на рис. 9-9 приведена зависимость коэрцитивной силы трансформаторной стали от толщины листа при неизменном составе стали и температуре 20 °С.

Для восстановления первоначальных магнитных свойств магнитомягкие материалы подвергают *отжигу*, который снимает внутренние напряжения и вызывает рекристаллизацию зерен. Магнитные свойства зависят от размера зерна. Поверхностные слои зерен вследствие искажения строения кристаллов характеризуются повышенной коэрцитивной силой. При мелкозернистом строении суммарная поверхность зерен в единице объема больше, чем при крупнозернистом материале, поэтому в материале, состоящем из мелких зерен, влияние поверхностных искажений слоев сказывается сильнее и у него коэрцитивная сила больше. Внутренние напряжения нередко связаны с наличием в материале различных загрязнений, например кислорода в чистом железе, примесей или присадок кобальта, хрома, вольфрама. Используя примеси, усложняющие кристаллическую решетку, вводя технологическую операцию закалки, а иногда добиваясь ориентации структуры доменов в магнитном поле, получают магнитотвердые материалы. При перемагничивании ферромагнетиков в переменных магнитных полях всегда наблюдаются тепловые потери энергии. Они обусловлены *потерями на гистерезис и динамическими потерями*. Динамические потери вызываются *вихревыми токами*, индуцированными в массе магнитного материала, а отчасти и так называемым *магнитным последствием*, или *магнитной вязкостью*. Потери на вихревые токи зависят от электрического сопротивления ферромагнетика. Чем выше удельное сопротивление ферромагнетика, тем меньше потери на вихревые токи. Магнитное последствие особенно заметно проявляется в магнитомягких материалах в области слабых полей.

Потери на гистерезис для каждого материала могут быть определены по площади статической петли гистерезиса с учетом масштабов по осям и частоты тока. Для вычисления потерь на ги-

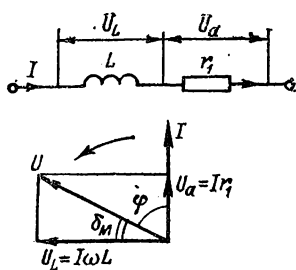


Рис. 9-10

Рис. 9-10. Эквивалентная схема и векторная диаграмма катушки индуктивности с магнитным сердечником

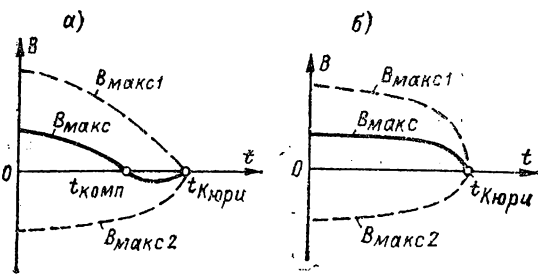


Рис. 9-11

Рис. 9-11. Примеры построения результирующих температурных зависимостей индукции для ферромагнетика, имеющего точку компенсации (а) и не имеющего точки компенсации (б)

стерезис за один цикл в единице объема вещества была предложена эмпирическая формула

$$W_{H1} = \eta B_{\max}^n, \quad (9-3)$$

где η — коэффициент, зависящий от материала; B_{\max} — максимальная индукция, достигаемая в течение цикла; n — показатель степени, равный 1,6—2.

Мощность, расходуемая на гистерезис, может быть представлена в виде

$$P_H = \eta B_{\max}^n f V, \quad (9-4)$$

где f — частота тока; V — объем ферромагнетика.

Мощность, расходуемую на вихревые токи, можно вычислить по формуле

$$P_f = \xi B_{\max}^2 f^2 V, \quad (9-5)$$

где ξ — коэффициент, зависящий от типа ферромагнетика (в частности, от его удельного сопротивления) и его формы; остальные величины те же, что и в формуле (9-4).

Поскольку P_f зависит от второй степени частоты, а P_H — от первой степени, при высоких частотах приходится учитывать в первую очередь величину P_f , т. е. потери на вихревые токи. Потери, связанные с магнитным последствием, приходится учитывать при использовании ферромагнетиков в импульсных режимах.

В цепях переменного тока рассеяние мощности в катушках индуктивности иногда оценивают тангенсом угла магнитных потерь. Торoidalную катушку индуктивности с сердечником из магнитного материала, собственной емкостью и сопротивлением обмотки которой можно пренебречь, представим в виде схемы, состоящей из последовательно соединенных индуктивности L и сопротивления r_l , эквивалентного всем видам потерь мощности в магнетике (рис. 9-10); для этого случая из векторной диаграммы получим

$$\operatorname{tg} \delta_M = \frac{r_l}{\omega L}. \quad (9-6)$$

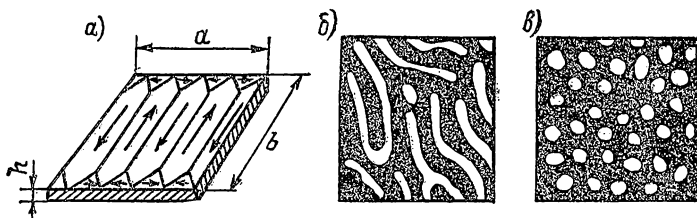


Рис. 9-12. Доменные структуры в тонких образцах магнетиков

Для некоторых кристаллических веществ минимуму потенциальной энергии системы отвечает антипараллельное расположение спинов с некоторым преобладанием одного направления над другим. Эти вещества называют *ферримagnetиками*. Они имеют доменную структуру, точку Кюри; к ним применимы все характеристики, введенные для ферромагнитных веществ. Ферримagnetиками являются сложные оксидные материалы, получившие в практике название ферритов. Ферримagnetики отличаются от ферромагнетиков меньшей индукцией насыщения, имеют более сложную температурную зависимость (рис. 9-11) и повышенное, а для некоторых материалов и очень высокое, значение удельного сопротивления. Первые два отличия упрощенно могут быть объяснены наличием в структуре сложного материала двух подрешеток, создающих встречные нескомпенсированные магнитные потоки, а третье отличие — тем, что эти материалы не относятся к металлам.

Допустим, что соотношения между ординатами кривых $B_{\text{макс } 1}$ и $B_{\text{макс } 2}$ при различных температурах для какого-то феррита такие, как это показано на рис. 9-11, а. Тогда при некоторой температуре ниже точки Кюри получится компенсация, и результирующая индукция насыщения $B_{\text{макс}}$ образца станет равной нулю. Эту точку называют точкой компенсации $t_{\text{комп}}$. За точкой компенсации индукция в образце ферримagnetика меняет знак и затем становится равной напряженности внешнего поля (которое мало и в масштабе чертежа близко к нулю) в точке Кюри. У различных ферримagnetиков точка компенсации может быть, а может и отсутствовать, как это видно, например, из рис. 9-11, б.

Тонкие магнитные пленки и цилиндрические домены. Особенностью тонких магнитных пленок является то, что при малой толщине их (много меньшей линейных размеров a , b) направление легкого намагничивания оказывается расположенным в плоскости пленки. Образуются плоские домены, показанные на рис. 9-12, а. Для очень тонких пленок характерна однодоменная структура, для пленок толщиной свыше 10^{-3} — 10^{-2} мм (у различных веществ)—многодоменная, состоящая из длинных узких доменов (шириной от долей микрон до нескольких микрон), намагниченных в противоположных направлениях. Под воздействием внешнего поля вся система полос может перемещаться и поворачиваться, и ее используют как управляемую дифракционную решетку для света и ближайшего диапазона волн электромагнитного спектра.

В пластинках некоторых ферритов толщиной около 50 мкм, вырезанных в направлении, перпендикулярном к оси легкого намагничивания, наблюдается так называемая лабиринтная структура доменов (при $H \approx 0$) с противоположными направлениями намагниченности, нормальными к плоскости рис. 9-12, б (светлые и темные места). Если пластину поместить во внешнее неизменное по направлению магнитное поле, перпендикулярное к ее поверхности, и увеличивать напряженность поля, то лабиринтная структура разрывается и образуются цилиндрические домены (рис. 9-12, в), диаметр которых при дальнейшем усилении поля уменьшается, пока не будет достигнуто однородное однодоменное намагничивание всей пластинки. Цилиндрические домены, существующие при определенных значениях напряженности магнитного поля, управляемые полем (возможно смещение по двум координатам), представляют большой интерес при создании устройств вычислительной техники. Их можно использовать для создания как запоминающих, так и логических элементов. В двоичной системе «1» может соответствовать наличие домена в определенной точке устройства, а «0» — его отсутствие. Магнитные элементы с цилиндрическими доменами позволяют осуществлять многофункциональные операции без нарушения однородности материала-носителя.

9-2. МАГНИТОМЯГКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Магнитомягкие материалы, обладая высокой магнитной проницаемостью, небольшой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис, используются в качестве сердечников трансформаторов, электромагнитов, в измерительных приборах и в других случаях, где необходимо при наименьшей затрате энергии достигнуть наибольшей индукции. Для уменьшения потерь на вихревые токи в трансформаторах используют магнитомягкие материалы с повышенным удельным электрическим сопротивлением, обычно применяются магнитопроводы, собранные из отдельных изолированных друг от друга тонких листов.

Железо (низкоуглеродистая сталь). Технически чистое железо обычно содержит небольшое количество примесей углерода, серы, марганца, кремния и других элементов, ухудшающих его магнитные свойства. Благодаря сравнительно низкому удельному электрическому сопротивлению технически чистое железо используется довольно редко, в основном для магнитопроводов постоянного магнитного потока. Обычно технически чистое железо изготавливается рафинированием чугуна в мартеновских печах или конверторах и имеет суммарное содержание примесей до 0,08—0,1 %. За рубежом такой материал известен под названием «армко-железо».

Низкоуглеродистая электротехническая листовая сталь — это одна из разновидностей технически чистого железа, выпускается в виде листов толщиной 0,2—4 мм, содержит не свыше 0,04 % углерода и не свыше 0,6 % других примесей. Максимальное значение магнитной проницаемости для различных марок — не менее 3500—4500, коэрцитивная сила — соответственно не более 100—65 А/м.

Таблица 9-1

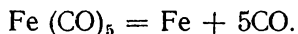
**Состав и магнитные свойства железа,
подвергнутого различным видам обработки**

Материал	Содержание примесей, %		Магнитные свойства		
	угле- род	ки- сло- род	Магнитная проницае- мость		Коеффи- циентная сила H_c , А/м
			началь- ная $\mu_{гн}$	максималь- ная μ_r макс	
Технически чистое железо . . .	0,020	0,060	250	7 000	64,0
Электролитическое железо . . .	0,020	0,010	600	15 000	28,0
Карбонильное железо	0,005	0,005	3 300	21 000	6,4
Переплавленное в вакууме элек- тролитическое железо	0,010	—	—	61 000	7,2
Железо, обработанное в водороде	0,005	0,003	6 000	200 000	3,2
Железо, обработанное в водороде особо тщательно	—	—	20 000	340 000	2,4
Монокристалл чистейшего желе- за, отожженный в водороде осо- бо тщательно	—	—	—	1 430 000	0,8

Особо чистое железо, содержащее весьма малое количество примесей (менее 0,05 %), может быть получено двумя сложными путями, в результате которых имеем:

1. *Электролитическое железо* изготавливают электролизом раствора сернокислого или хлористого железа, причем анодом служит чистое железо, катодом — пластина мягкой стали. Осажденное на катоде железо (толщина слоя 4—6 мм) после тщательной промывки снимают и измельчают в порошок в шаровых мельницах, после чего производят вакуумный отжиг и переплавку в вакууме.

2. *Карбонильное железо* получают термическим разложением пентакарбонила железа согласно уравнению



Пентакарбонил железа представляет собой жидкость, получаемую воздействием оксида углерода на железо при температуре около 200 °С и давлении около 15 МПа. Карбонильное железо имеет вид тонкого порошка, что делает его весьма удобным для изготовления прессованных высококачественных магнитных сердечников (см. § 9-3).

Свойства железа зависят не только от содержания примесей, но и от структуры материала, размера зерен, механических напряжений (см. рис. 9-5). Из табл. 9-1 видно, что магнитные свойства даже лучших промышленных разновидностей железа еще далеки от того, чего можно добиться, используя современные технологические методы получения чистых и однородных по структуре кристаллов.

Кремнистая электротехническая сталь является основным магнитомягким материалом массового потребления. Введением в состав этой стали кремния достигается повышение удельного сопротивления, что вызывает снижение потерь на вихревые токи. Кроме того, наличие в стали кремния способствует выделению углерода в виде

**Плотность и удельное сопротивление электротехнической стали
в зависимости от содержания кремния**

Степень легирования стали кремнием	Вторая цифра марки	Плотность, Мг/м^3	Удельное электрическое сопротивление, $\text{мКОм} \cdot \text{м}$	Степень легирования стали кремнием	Вторая цифра марки	Плотность, Мг/м^3	Удельное электрическое сопротивление, $\text{мКОм} \cdot \text{м}$
Нелегированная	0	7,85	0,14	Среднелегированная	3	7,75	0,40
Слаболегированная	1	7,82	0,17	Повышеннолегированная	4	7,65	0,50
Нижесреднелегированная	2	7,80	0,25	Высоколегированная	5	7,55	0,60

графита, а также почти полному раскислению стали. Это приводит к увеличению $\mu_{\text{гв}}$, уменьшению H_c и к снижению потерь на гистерезис.

Сталь, содержащая до 4 % кремния, обладает достаточно удовлетворительными механическими свойствами, а при наличии выше 5 % кремния она становится очень хрупкой. Путем специализированной прокатки и особой термической обработки можно изготовить текстурованную сталь крупнокристаллического строения, причем кристаллы окажутся ориентированными осями наиболее легкого намагничивания параллельно направлению прокатки. Магнитные свойства такой стали в направлении прокатки значительно выше, чем стали, не подвергавшейся подобной обработке.

Сталь электротехническую тонколистовую подразделяют и маркируют:

а) по структурному состоянию и виду прокатки на классы (первая цифра марки): 1 — горячекатаная изотропная, 2 — холоднокатаная изотропная, 3 — холоднокатаная анизотропная с ребровой текстурой;

б) по содержанию кремния (вторая цифра марки): 0 — с содержанием кремния до 0,4 % включительно (нелегированная), 1 — св. 0,4 до 0,8 % вкл., 2 — св. 0,8 до 1,8 % вкл., 3 — св. 1,8 до 2,8 % вкл., 4 — св. 2,8 до 3,8 % вкл., 5 — св. 3,8 до 4,8 % вкл.;

в) по основной нормируемой характеристике на группы (третья цифра в марке): 0 — удельные потери при магнитной индукции 1,7 Тл и частоте 50 Гц ($P_{1,7/50}$); 1 — при 1,5 Тл и 50 Гц ($P_{1,5/50}$); 2 — при 1,0 Тл и 400 Гц ($P_{1,0/400}$); 6 — магнитная индукция в слабых магнитных полях при напряженности поля 0,4 А/м ($B_{0,4}$); 7 — магнитная индукция в средних магнитных полях при 10 А/м (B_{10}).

Сталь маркируется четырьмя цифрами. Вместе первые три цифры означают тип стали; четвертая — порядковый номер типа стали.

Плотность и удельное электрическое сопротивление электротехнической стали зависят от степени ее легирования кремнием, как это показано в табл. 9-2.

Таблица 9-3

**Предельное значение удельных потерь и магнитной индукции
электротехнической стали класса 2**

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более		Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м, не менее				
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	1000	2500	5000	10 000	30 000
2013	0,65	3,10	7,0	1,53	1,64	1,74	1,85	2,05
	0,50	2,50	5,6	1,54	1,65	1,75	1,85	2,05
2112	0,65	3,50	8,0	1,46	1,59	1,67	1,77	2,02
	0,50	2,60	6,0	1,46	1,60	1,68	1,77	2,02
2212	0,65	2,60	6,3	1,42	1,58	1,67	1,77	2,00
	0,50	2,20	5,0	1,42	1,60	1,68	1,77	2,00
2312	0,65	2,40	5,6	1,38	1,54	1,64	1,72	1,96
	0,50	1,75	4,0	1,40	1,56	1,66	1,74	1,96
2412	0,50	1,30	3,1	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95
	0,35	1,15	2,5	1,35	1,50	1,60	1,70	1,95

Таблица 9-4

**Предельное значение удельных потерь и магнитной индукции
электротехнической стали класса 3**

Марка	Толщина, мм	Удельные потери, Вт/кг, не более			Магнитная индукция, Тл, при напряженности магнитного поля, А/м, не менее		
		$P_{1,0/50}$	$P_{1,5/50}$	$P_{1,7/50}$	100	250	2500
3411	0,50	1,10	2,45	3,20	—	—	1,75
	0,35	0,80	1,75	2,50	—	—	1,75
3414	0,50	0,70	1,50	2,20	1,60	1,70	1,88
	0,35	0,50	1,10	1,60	1,60	1,70	1,88
3415	0,35	0,46	1,03	1,50	1,61	1,71	1,90

Сталь выпускается в виде рулонов, листов и резаной ленты. Она может быть без электроизоляционного покрытия или иметь его. Толщина листов стали 0,1—1 мм. Сталь различных классов предназначается для изготовления магнитных цепей аппаратов, трансформаторов, приборов, электрических машин. Текстурированная сталь анизотропна и используется для сердечников трансформаторов, изготовляемых по способу «намотки» из рулонного материала. Применение этой стали в силовых трансформаторах позволяет уменьшить их массу и габаритные размеры на 20—25 %, а в радиотрансформаторах — на 40 %.

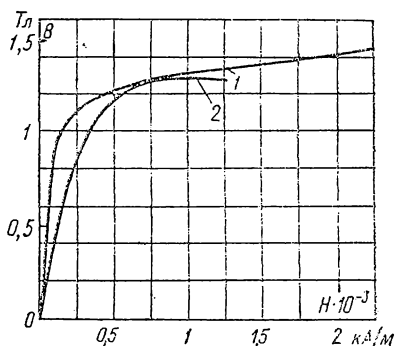
В табл. 9-3 приведены предельные значения удельных потерь и индукции для стали класса 2, а в табл. 9-4 — для стали класса 3.

Зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля для сталей 1521 и 1572 приведены на рис. 9-13.

Пермаллой. Это железоникелевые сплавы, обладающие весьма большой начальной магнитной проницаемостью в области слабых полей,

Рис. 9-13. Зависимости магнитной индукции от напряженности магнитного поля для электротехнической стали

1 — 1521 толщиной 0,35 мм; 2 — 1572 толщиной 0,1 мм



что связано с практическим отсутствием у них анизотропии и магнитострикции. Различают высоконикелевые и низконикелевые пермаллои. Высоконикелевые пермаллои содержат 70—83 % Ni, низконикелевые 40—50 % Ni.

Х а р а к т е р и с т и к и п е р м а л л о е в. Основные магнитные свойства и удельное сопротивление сплавов железо—никель зависят от содержания никеля (рис. 9-14). Наибольшим значением максимальной магнитной проницаемости обладает сплав, содержащий 78,5 % Ni. Очень легкую намагничиваемость пермаллоев в слабых полях объясняют практическим отсутствием у них анизотропии. Магнитные свойства пермаллоев чувствительны к внешним механическим напряжениям, зависят от химического состава и наличия инородных примесей в сплаве, а также очень резко меняются от режимов термообработки материала (температуры, скорости нагрева и охлаждения, состава окружающей среды и т. д.). Термическая обработка высоконикелевых пермаллоев сложнее, чем низконикелевых. Из рис. 9-14 можно видеть, что индукция насыщения высоконикелевых пермаллоев почти в два раза ниже, чем у электротехнической стали, и в полтора раза ниже, чем у низконикелевых пермаллоев. Магнитная проницаемость высоконикелевых пермаллоев в несколько раз выше, чем у низконикелевых, и намного превосходит проницаемость электротехнических сталей. Удельное сопротивление высоконикелевых пермаллоев почти в три раза меньше, чем низконикелевых, поэтому при повышенных частотах предпочтительно использовать низконикелевые пермаллои. Кроме того, и магнитная проницаемость пермаллоев сильно снижается с увеличением частоты (см. рис. 9-6), и тем резче, чем больше ее первоначальное значение. Это объясняется возникновением в материале заметных вихревых токов из-за небольшого удельного сопротивления. Стоймость пермаллоев определяется содержанием в их составе никеля.

В л и я н и е л е г и р у ю щ и х д о б а в о к. Для придания сплавам необходимых свойств в состав пермаллоев вводятся добавки. Молибден и хром повышают удельное сопротивление и начальную магнитную проницаемость пермаллоев и уменьшают чувствительность к деформациям. К сожалению, одновременно с этим снижается индукция насыщения. Медь увеличивает постоянство μ_r в узких интервалах напряженности магнитного поля, повышает температурную стабильность и удельное сопротивление, а также делает сплавы легко поддающимися механической обра-

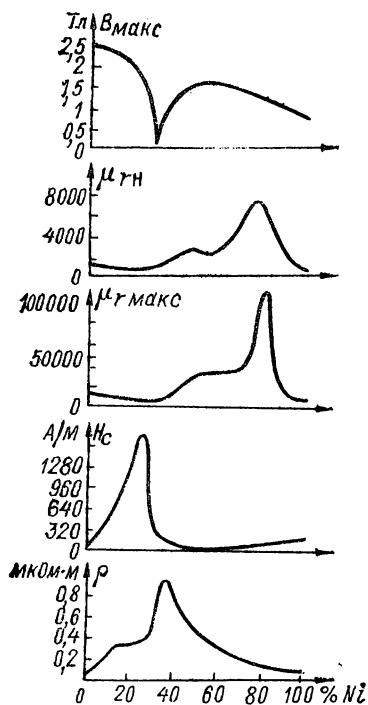


Рис. 9-14. Зависимости магнитных свойств и удельного сопротивления сплавов железо — никель от содержания никеля

ботке. Кремний и марганец в основном только увеличивают удельное сопротивление пермаллоев.

Разновидности пермаллоев. Сплавы железоникелевые с высокой магнитной проницаемостью выпускаются в СССР нескольких групп, каждая из которых содержит еще ряд марок. Сведения о некоторых из них даны в табл. 9-5. В марках пермаллоев буква Н означает никель, К — кобальт, М — марганец, Х — хром, С — кремний (силиций), Д — медь. Дополнительная буква У означает сплав с улучшенными свойствами, П — с прямоугольной петлей гистерезиса (марки П рассмотрены в § 9-3). Цифра в марке указывает процентное содержание никеля. Магнитострикционная деформация одной из марок пермаллоев приведена ниже (стр. 288).

Кроме наиболее освоенных в промышленном производстве марок пермаллоев, интерес представляет сплав, получивший название супермаллой с очень высокими магнитными свойствами в слабых полях. Сведения о его составе и свойствах для сравнения даны также в табл. 9-5.

Применение пермаллоев. Сплавы 45Н и 50Н применяются для изготовления сердечников малогабаритных силовых трансформаторов, дросселей, реле и деталей магнитных цепей, работающих при повышенных индукциях без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием. Из сплава 50НХС выполняют сердечники импульсных трансформаторов и аппаратуры связи звуковых и высоких частот в режиме без подмагничивания или с небольшим подмагничиванием. Сплавы 79НМ, 80НХС, 76НХД используют для изготовления сердечников малогабаритных трансформаторов, реле и магнитных экранов; при толщине 0,02 мм — сердечников импульсных трансформаторов, магнитных усилителей и бесконтактных реле. Тонкие ленты из пермаллоев различных марок используют в качестве материала для ячеек памяти в устройствах вычислительной техники (стр. 288).

Альсиферы — сплавы железа с кремнием и алюминием. Оптимальный состав альсифера: 9,5 % Si, 5,6 % Al, остальное Fe. Такой сплав отличается твердостью и хрупкостью, но из него могут быть изготовлены фасонные отливки. Основные свойства альсифера: $\mu_{TN} = 35\,500$, $\mu_{T\max} = 120\,000$, $H_c = 1,8$ А/м, $\rho = 0,8$ мкОм·м.

**Свойства железоникелевых сплавов (пермаллоев)
после термической обработки**

Группа	Марка	Вид продукции	Толщина или диаметр, мм	$\mu_{гн}$	μ_r макс	H_c , А/м	$B_{макс}$, Тл, не менее	ρ , мкОм·м, не менее
Нелегированные, низко- никеле- вые	45Н, 50Н	Холодно- катаные ленты	0,02— 2,50	1 700— 3 000	16 000— 35 000	32—10	1,50	0,45
		Горячека- таные листы	3—22					
		Прутки	8—10					
Легиро- ванные, низко- никеле- вые	50НХС	Холодно- катаные ленты	0,02— 1,00	1 500— 3 200	15 000— 30 000	20—8	1,00	0,90
Легиро- ванные, высоко- никеле- вые	79НМ, 80НХС 76НХД 79НМ-У	Холодно- катаные ленты	0,02— 2,50	16 000— 35 000	50 000— 220 000	5,2— 1,0	0,65	0,55
		Горячека- таные листы	3—22					
		Прутки	8—10					
Супер- маллой 79 Ni, 5 Mo, 15 Fe, 0,5 Mn	—	Листы	0,35	100 000	До 1 500 000 при $B = 0,3$ Тл	0,3	0,80	0,60

т. е. не уступают свойствам высоконикелевых пермаллоев. Магнитные экраны, корпуса приборов и другие изделия из альсифера изготавливаются методами литья с толщиной стенок не менее 2—3 мм из-за хрупкости сплава. Эта особенность ограничивает применение данного материала. Благодаря хрупкости альсифера его можно размалывать в порошок и использовать наряду с карбонильным железом для изготовления высокочастотных прессованных сердечников.

9-3. МАТЕРИАЛЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Специальные ферромагнетики. В особую подгруппу можно выделить материалы, применение которых основано на наличии у них тех или иных особенностей магнитных свойств, которые определяются структурой и составом. К таким материалам можно отнести: 1) сплавы, отличающиеся незначительным изменением магнитной проницаемости при изменении напряженности поля, 2) сплавы

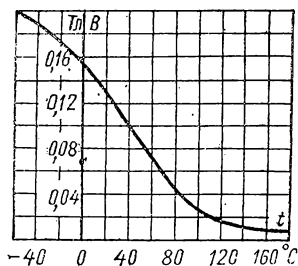


Рис. 9-15

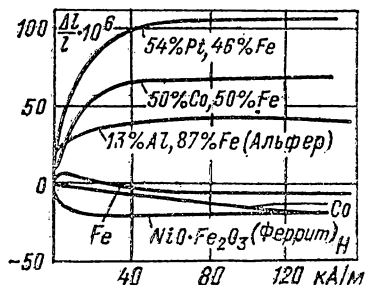


Рис. 9-16

Рис. 9-15. Температурная зависимость индукции термомагнитного сплава в магнитном поле напряженностью 8 кА/м

Рис. 9-16. Зависимость магнитострикционной деформации от напряженности магнитного поля для некоторых материалов. Содержание компонентов в сплавах указано на кривых в процентах по массе

с сильной зависимостью магнитной проницаемости от температуры, 3) сплавы с высокой магнитострикцией, 4) сплавы с особо высокой индукцией насыщения.

К первым относится сплав, получивший название *перминвара*. Обычно он содержит 29,4 % Fe, 45 % Ni, 25 % Co и 0,6 % Mn. Сплав подвергают отжигу при 1000 °С, после чего выдерживают при 400—500 °С и медленно охлаждают. Перминвар имеет небольшую коэрцитивную силу, начальная магнитная проницаемость перминвара равна 300 и сохраняет постоянное значение в интервале напряженности поля до 250 А/м при индукции 0,1 Тл. Перминвар недостаточно стабилен в магнитном отношении, чувствителен к влиянию температуры и механическим напряжениям. Более удовлетворительной стабильностью магнитной проницаемости отличается сплав, именуемый *изопермом*, в состав которого входят железо, никель и алюминий или медь. Изоперм имеет магнитную проницаемость 30—80, которая мало изменяется в поле напряженностью до нескольких сот ампер на метр.

Ко вторым относятся термомагнитные сплавы на основе Ni—Cu, Fe—Ni или Fe—Ni—Cr. Указанные сплавы применяются для компенсации в установках температурной погрешности, вызываемой изменением индукции постоянных магнитов или изменением сопротивления проводов в магнитоэлектрических приборах по сравнению с тем значением, при котором производилась градуировка. Для получения ярко выраженной температурной зависимости магнитной проницаемости используется свойство ферромагнетиков снижать индукцию с ростом температуры вблизи точки Кюри. Для этих ферромагнетиков точка Кюри лежит между 0 и 100 °С в зависимости от добавок легирующих элементов. Сплав Ni—Cu при содержании 30 % Cu может компенсировать температурные погрешности для пределов температуры от —20 до +80 °С (рис. 9-15); а при 40 % Cu — от —50 до +10 °С. Наибольшее техническое применение получили сплавы Fe—Ni—Co (компенсаторы). Достоинствами их являются:

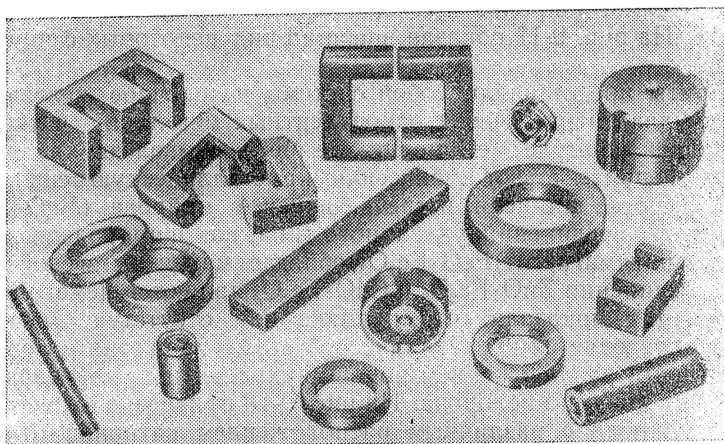


Рис. 9-17. Детали из ферритов

полная обратимость свойств в диапазоне изменения температуры от -70 до $+70^{\circ}\text{C}$, высокая воспроизводимость характеристик образцов и хорошая механическая обрабатываемость.

К третьим относятся *сплавы с высокой магнитострикцией* (системы Fe—Pt, Fe—Co, Fe—Al). Изменения линейного размера $\Delta l/l$ образцов материалов при продольной магнитострикции, как видно из рис. 9-16, положительны и лежат в пределах $(40-120) \cdot 10^{-6}$. В качестве магнитострикционных материалов применяются также чистый никель (см. рис. 9-4), обладающий большой отрицательной магнитострикцией, никель-кобальтовые сплавы, некоторые марки пермаллоев и различные ферриты (стр. 288). Явление магнитострикции используется в генераторах звуковых и ультразвуковых колебаний. Магнитострикционные вибраторы применяются в технологических установках по обработке ультразвуком хрупких и твердых материалов, в дефектоскопах, а также в устройствах преобразования механических колебаний в электрические и т. п.

К четвертым относятся *железкокобальтовые сплавы*, обладающие особо высокой индукцией насыщения, до 2,4 Тл, т. е. большей, чем у всех известных ферромагнетиков; удельное электрическое сопротивление таких сплавов невелико. Сплавы, содержащие 50—70 % Co, называются *пермендюрками*. Пермендюры могут применяться вследствие их высокой стоимости только в специализированной аппаратуре, в частности в динамических репродукторах, осциллографах, телефонных мембранах и т. д.

Ферриты. Общие сведения. Ферриты представляют собой магнитную керамику с незначительной электронной электропроводностью. Общие представления о явлении ферромагнетизма были даны в § 9-1. Большое удельное сопротивление, превышающее ρ железа в 10^6-10^{11} раз, а следовательно, и относительно небольшие потери энергии в области повышенных и высоких частот наряду с достаточно высокими магнитными свойствами обеспечивают

ферритам самое широкое применение при повышенных и высоких частотах. На рис. 9-17 показан внешний вид некоторых ферритовых деталей.

Ферриты представляют собой системы из оксидов железа и оксидов двухвалентных, реже одновалентных металлов, соответствующих общей формуле $MeO \cdot Fe_2O_3$, где Me — символ двухвалентного металла. Ферриты имеют кубическую кристаллическую решетку, подобную решетке шпинели, встречающейся в природе ($MgO \cdot Al_2O_3$). Большинство соединений указанного типа, как и природный магнитный железняк (магнетит) $FeO \cdot Fe_2O_3$, обладает магнитными свойствами, однако соединения $ZnO \cdot Fe_2O_3$ и $CdO \cdot Fe_2O_3$ являются немагнитными. Исследования показали, что наличие или отсутствие магнитных свойств определяется кристаллической структурой этих материалов, и в частности расположением ионов двухвалентных металлов и железа между ионами кислорода. На рис. 9-18 приведена элементарная ячейка шпинели с различным расположением катионов. Шпинель обычной структуры, когда в центре кислородных тетраэдров расположены ионы Zn^{2+} или Cd^{2+} , не имеет магнитных свойств. При структуре так называемой *обращенной шпинели*, когда в центре кислородных тетраэдров расположены ионы Fe^{3+} , материал обладает магнитными свойствами.

Ферриты, обладающие наиболее интересными магнитными свойствами и нашедшие техническое применение, представляют собой, как правило, твердые растворы нескольких простейших соединений, в том числе и немагнитных. Так, например, общая формула широко распространенных никель-цинковых ферритов имеет следующий вид:



где коэффициенты m , n , p определяют количественные соотношения между компонентами.

Процентный состав компонентов играет существенную роль в получении тех или иных магнитных свойств материала. Как видно из рис. 9-19, высокие значения μ_r достигаются на довольно узком участке тройной диаграммы. Применяющиеся в технике ферриты называют *оксиферами*, желая подчеркнуть, что они представляют собой сложные оксидные ферритмагнетики, что, конечно, более правильно, однако первое название получило большее распространение. За рубежом для некоторых типов ферритов употребляется название «феррокскуп», подчеркивающее кубическое строение решетки этим материалов.

Технология изготовления ферритов оказывает весьма существенное влияние на свойства готовых изделий. Технологический процесс производства ферритовых изделий вкратце сводится к тому, что предварительно получают ферритовый порошок, состоящий из тонко измельченных, тщательно перемешанных и предварительно обожженных оксидов соответствующих металлов. В него добавляют пластификатор — обычно раствор поливинилового спирта, и из полученной массы прессуют под большим давлением изделия требуемой формы. Изделия подвергают обжигу при температуре 1100—

1400 °С. При этом происходит спекание и образование твердых растворов ферритов. Обжиг должен производиться обязательно в окислительной среде (обычно в воздухе). Присутствие даже в небольшом количестве водорода в рабочем пространстве печи может вызвать частичное восстановление оксидов, что приведет к резкому увеличению магнитных потерь. Усадка ферритов при обжиге может достигать 20 %. Ферриты — твердые и хрупкие материалы, не позволяющие производить обработку резанием и допускающие только шлифовку и полировку.

Магнитомягкие ферриты. Как видно из рис. 9-20, феррит с высокой магнитной проницаемостью имеет максимальную индукцию свыше 0,3 Тл и малую коэрцитивную силу, около 16 А/м. Ферриты с большим значением μ_r обладают и большим значением потерь, быстро растущих с увеличением частоты. Как видно из рис. 9-21, магнитная проницаемость никель-цинковых ферритов повышается с ростом температуры до точки Кюри, а затем резко падает. При этом чем выше значение начальной проницаемости, тем ниже будет точка Кюри в пределах этой разновидности ферритов (ср. ферриты 4000НМ и 3000НМ или 2000НН и 400НН). Основные физические характеристики ферритов следующие: плотность 4—5 Мг/м³, удельная теплоемкость около 0,7 кДж/(кг·К), коэффициент теплопроводности примерно 5 Вт/(м·К), температурный коэффициент линейного расширения около 10⁻⁵ К⁻¹, удельное сопротивление 10⁻³—10⁸ Ом·м.

Ферриты имеют относительно большую диэлектрическую проницаемость, зависящую от частоты и состава ферритов. С повышением частоты диэлектрическая проницаемость ферритов падает. Тангенс угла потерь ферритов — от 0,005 до 0,1. В ферритах наблюдается явление магнитострикции.

У различных ферритов этот эффект проявляется по-разному. Ферриты с низкой температурой

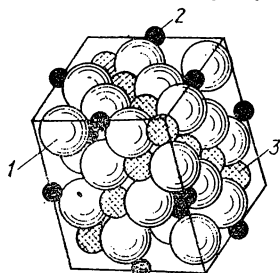


Рис. 9-18

Рис. 9-18. Элементарная ячейка шпинели

1 — ионы кислорода; 2 — катионы в тетраэдрических положениях; 3 — катионы в октаэдрических положениях

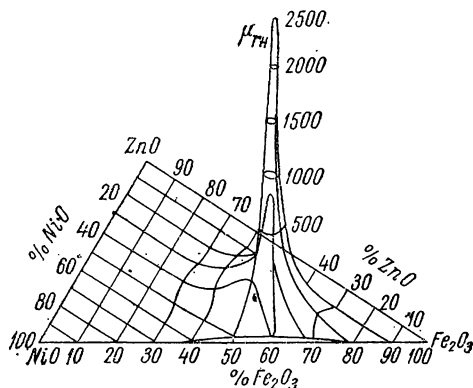


Рис. 9-19

Рис. 9-19. Зависимость начальной магнитной проницаемости в системе NiO—ZnO—Fe₂O₃ от состава (температура обжига 1380 °С)

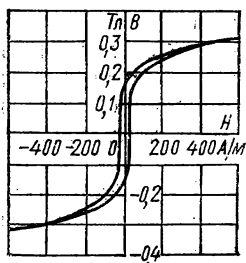


Рис. 9-20

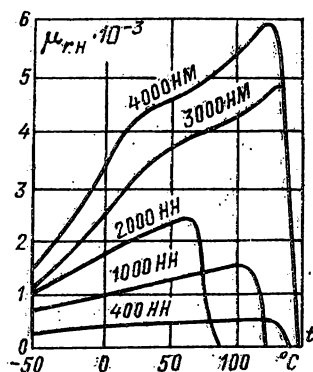


Рис. 9-21

Рис. 9-20. Гистерезисная петля никель-цинкового феррита с высокой магнитной проницаемостью

Рис. 9-21. Зависимости начальной магнитной проницаемости от температуры для марганец-цинковых и никель-цинковых ферритов различных марок

Кюри обладают меньшим магнитоупругим эффектом. В настоящее время применяются следующие группы смешанных ферритов: марганец-цинковые, никель-цинковые и литий-цинковые. Ориентировочный частотный диапазон применения ферритов различного состава в зависимости от их свойств (магнитной проницаемости и потерь) виден из рис. 9-22. Наиболее распространенная маркировка магнитоматериалов ферритов отражает следующее. Первое число означает величину μ_{rH} , затем идут буквы, обозначающие частотный диапазон применения, ограничиваемый сверху значением $f_{гр}$. Под *границей частоты* понимают частоту, при которой начинается быстрый рост тангенса угла потерь феррита. Ферриты для звуковых, ультразвуковых и низких радиочастот для краткости обозначают буквой Н (низкочастотные). Граничная частота их для разных марок изменяется от 0,1 до 50 МГц. В маркировке высокочастотных ферритов имеются буквы ВЧ, граничная частота

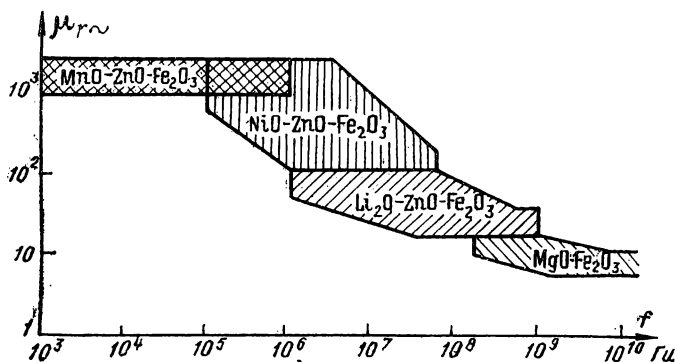


Рис. 9-22. Ориентировочная схема использования ферритов при различных частотах

Свойства некоторых ферритов

Марка	$\mu_{гн}$	$\frac{\lg \delta}{\mu_{гн}} \cdot 10^6$ (при f , МГц)	$\mu_{г макс}$	H_c , А/м	B_r , Тл	$f_{гп}$, МГц	$^{\circ}C$, Точка Кюри не ниже	ρ , Ом·м	Плотность, Мг/м ³
2000НМ	15 000	25 (0 01)	35 000	0,24	0,11	0,1	110	0,001	—
6000НМ	4 800—8 000	40 (0,02)	10 000	8	0,11	0,5	130	0,1	5,0
1000НМ	800—1 200	15 (0,1)	1 800	28	0,11	5	200	0,5	4,5
1000НМ	800—1 200	85 (0,1)	3 000	24	0,10	3	110	10	4,9
600НН	500—800	25 (0,1)	1 500	40	0,12	5	110	100	4,8
2000НМ1	1 700—2 500	15 (0,1)	3 500	25	0,12	1,5	200	5	5,0
700НМ1	550—850	8 (3)	1 800	25	0,05	8	200	4	4,8
100ВЧ	80—120	135 (18)	280	300	0,15	80	400	10 ⁵	4,8
20ВЧ2	16—24	280 (30)	45	1000	0,1	300	450	10 ⁶	4,7
300НН	280—350	170 (4)	600	80	0,13	20	120	10 ⁶	4,8
9ВЧ	9—13	850 (150)	30	1500	0,06	600	500	10 ⁷	4,4
200ВЧ	180—220	90 (10)	360	70	0,11	—	360	10 ³	4,7
50ВЧ3	45—65	120 (30)	200	100	0,14	—	480	10 ⁴	4,6

их — от 50 до 600 МГц. Далее в маркировке магнитомягких ферритов следуют буквы, обозначающие состав материала: М — марганец-цинковый, Н — никель-цинковый и т. п. В маркировку СВЧ-ферритов введены цифровые индексы разновидностей этих материалов. Как видно из табл. 9-6, свойства ферритов разных марок весьма разнообразны, особенно если учесть, что здесь приведено менее одной трети выпускаемой номенклатуры этих материалов. Ферриты с невысокой точкой Кюри в последнее время стали использоваться как термоманитные материалы.

Ферриты с ППГ. Для запоминающих устройств вычислительной техники особенный интерес представляют ферриты, обладающие прямоугольной формой петли гистерезиса. К материалам и изделиям этого типа предъявляются специфические требования, и для их характеристики используются дополнительные параметры. Основным из таких параметров является коэффициент *прямоугольности* петли гистерезиса $K_{п}$, представляющий собой отношение остаточной индукции B_r к максимальной индукции $B_{макс}$:

$$K_{п} = B_r / B_{макс}. \quad (9-7)$$

Для определенности $B_{макс}$ измеряют при $H_{макс} = 5H_c$. Желательно, чтобы $K_{п}$ был возможно ближе к единице. Для обеспечения быстрого перемагничивания сердечников они должны иметь небольшой коэффициент переключения S_q . Коэффициент S_q численно равен количеству электричества, приходящемуся на единицу толщины

Таблица 9-7

Свойства сердечников и материалов с ППГ

Материал или сердечник	H_c , А/м	B_r , Тл	K_p не менее	S_g мкКл/м	Точка Кюри, °С
Ферриты различных марок *	10—1200	0,15—0,25	0,9	25—55	110—630
Микронные сердечники из пермаллоев ** (толщина ленты от 2 до 10 мкм)	8—50	0,6—1,5	0,85—0,90	25—100	300—630

* Имеется свыше 25 марок

** Сплавы 50НП, 65Н, 79НМ, 34НКПМ

Таблица 9-8

Магнитострикционная деформация некоторых материалов

Материал	Состав	$\frac{\Delta l}{l} \cdot 10^6$
Феррит железа (магнетит)	$FeO \cdot Fe_2O_3$	+40
Пермаллой	45 Ni·55 Fe	+27
Марганцевый феррит	$MnO \cdot Fe_2O_3$	—2
Никель-цинковый феррит	$Ni_{0,35}^{2+}Zn^{2+}Fe_3^{3+}O_4$	—5
Литиевый феррит	$Li^{+}Fe_{0,35}^{3+}Fe_3^{3+}O_4$	—8
Кобальтовый феррит	$Co^{2+}Fe_3^{3+}O_4$	Примерно —200

сердечника, необходимому для перемагничивания его из состояния остаточной индукции в состояние максимальной индукции, противоположной по знаку. Кроме того, материалы с ППГ должны обеспечивать малое время перемагничивания, возможно большую температурную стабильность магнитных характеристик, а следовательно, иметь высокую точку Кюри и некоторые другие свойства.

Ферриты с ППГ получили наибольшее распространение по сравнению с металлическими тонкими лентами (см. стр. 280), что объясняется существенно более простой технологией изготовления сердечников и экономическими соображениями.

Свойства ферритовых сердечников приведены в табл. 9-7. Для сравнения в табл. 9-7 приведены магнитострикционные свойства пермаллоев в тонких слоях. При использовании ферритов следует учитывать изменение их свойств с температурой: так, при изменении температуры от -20 до $+60$ °С у ферритов различных марок коэрцитивная сила изменяется в 1,5—2 раза, остаточная индукция — на 15—30 %. Из ферритов методом прессовки в пресс-формах могут быть изготовлены изделия сложной конфигурации с большим числом отверстий, в виде пластин, колец, стержней и т. д.

Магнитострикционные ферриты используются как магнитострикционные материалы в области повышенных и высоких частот. В табл. 9-8 приведены значения магнитострикци-

онной деформации некоторых ферритов. Значения $\Delta I/I$ в табл. 9-8 соответствуют магнитному насыщению образцов. Для сравнения приведены данные для пермаллоя.

Ферриты для СВЧ. Совершенно особую роль играют специальные марки ферритов для СВЧ. В этой области частот в первую очередь используются возможности управления электрическими и магнитными параметрами ферритов. На СВЧ применяются никелевые ферриты, магниевые ферриты, магниевые ферроамоникаты, никелевые и магниевые феррохромиты, а также иттриевые ферриты — гранаты. Число марок СВЧ-ферритов превышает 60.

Магнитодиэлектрики представляют собой одну из разновидностей магнитных материалов, предназначенных для использования при повышенных и высоких частотах, так как они характеризуются большим удельным электрическим сопротивлением, а следовательно, и малым тангенсом угла магнитных потерь. Магнитодиэлектрики получают способом прессовки порошкообразного ферромагнетика с изолирующей зерна друг от друга органической или неорганической связкой. В качестве основы применяют карбонильное железо, размолотый альсифер и др. Изолирующей связкой служат фенолформальдегидные смолы, полистирол, стекло и т. п. От основы требуется наличие высоких магнитных свойств, от связки — способность образовывать между зернами сплошную, без разрыва электроизоляционную пленку. Такая пленка должна быть по возможности одинаковой толщины и должна прочно связывать зерна между собой. Магнитодиэлектрики характеризуют эффективной магнитной проницаемостью, которая всегда меньше μ , ферромагнетика, составляющего основу данного магнитодиэлектрика. Это объясняется двумя причинами: наличием неферромагнитной связки и тем, что магнитную проницаемость магнитодиэлектриков часто приходится измерять у готовых сердечников, а не у тороидов.

Сердечники на основе карбонильного железа отличаются достаточно высокой стабильностью, малыми потерями, положительным температурным коэффициентом магнитной проницаемости и могут быть использованы в широком диапазоне частот.

Особенностью сердечников из альсифера является наличие у них отрицательного температурного коэффициента магнитной проницаемости. Это позволяет создавать магнитодиэлектрики из смеси карбонильного железа и альсифера с необходимым уровнем и знаком температурного коэффициента магнитной проницаемости.

Магнитная проницаемость магнитодиэлектриков практически неуправляема внешним магнитным полем. В связи с широким выпуском ферритов различных марок, обладающих преимуществами по сравнению с магнитодиэлектриками, последние сохранили ограниченные области применения.

Конструкционные чугуны и стали. Эти материалы, применяемые в электромашиностроении, аппаратостроении, приборостроении, должны отличаться высокими механическими свойствами и достаточно широкими технологическими возможностями. В отношении магнитных свойств их можно разделить на материалы *магнитные*

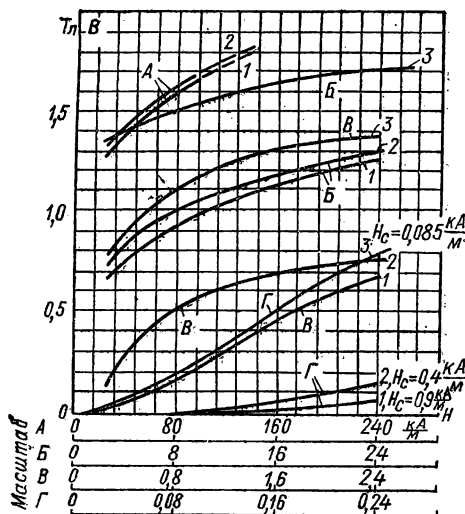


Рис. 9-23

Рис. 9-23. Магнитные свойства серого и ковкого чугуна

1 — серый чугун, литей, 3,2 % С, 3,27 % Si, 0,56 % Mn, 1,05 % P; 2 — серый чугун, отожженный, того же состава; 3 — специальный ковкий чугун, 2,15 % С (свободный), 1,2 % Si, 0,3 % Mn

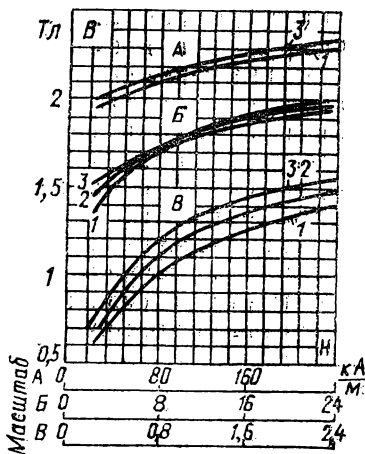


Рис. 9-24

Рис. 9-24. Магнитные свойства поковок из углеродистой и хромоникелевой стали и стального литья для корпусов электрических машин

1 — поковка ротора турбогенератора, хромоникелевая сталь улучшенная; 2 — поковка полюса крупных машин, углеродистая сталь отожженная; 3 — литой корпус машины постоянного тока, углеродистая сталь (0,2 % С, отожженная)

и материалы *немагнитные*. К первым могут быть отнесены серый чугун, углеродистые и легированные стали, ко вторым — немагнитные стали и немагнитный чугун.

Серый чугун. Содержит 3,2—3,5 % углерода, кремний, марганец, фосфор, серу. Предел прочности при изгибе серого чугуна составляет 200—450 МПа. Кривые намагничивания серого чугуна и ковкого чугуна, являющегося разновидностью серого, показаны на рис. 9-23. Серый чугун применяется для отливок корпусов электрических машин, крепежных деталей, плит и пр. Чугунные отливки, особенно больших размеров, не требуют дальнейшей термической обработки, однако в некоторых случаях отжиг изделия является полезным. Валы, вращающиеся детали быстрого вращения электрических машин, станины машин, подверженных вибрации и толчкам, не могут изготавливаться из чугуна. Для указанных изделий необходима сталь, достаточно хорошо удовлетворяющая повышенным требованиям в отношении механической прочности.

Углеродистая сталь. Для отливок обычно используют углеродистую сталь с содержанием от 0,08 до 0,2 % углерода, подвергая изготовленные из нее изделия медленному отжигу при 850—900 °С. Для особо ответственных и специальных электрических

машин, а также для машин с облегченной конструкцией требуется сталь с повышенными механическими свойствами — легированная никелем, ванадием, хромом, молибденом. Изделия из легированной стали после закалки для снятия напряжений должны подвергаться отпуску при 650—700 °С. Предел прочности при изгибе у легированных сталей от 500 до 950 МПа. Кривые намагничивания таких сталей приведены на рис. 9-24.

Немагнитный чугун. Употребляется в тех случаях, когда наличие магнитных свойств в конструкционном материале может повредить работе прибора или аппарата. Широко применяемым типом немагнитного материала является чугун, содержащий в своем составе никель и марганец, которые обеспечивают *аустенитную* структуру. Примерный состав такого чугуна: 2,6—3,0 % С; 2,5 % Si; 5,6 % Mn; 9—12 % Ni; остальное Fe. Магнитная проницаемость немагнитного чугуна указанного состава $\mu_r = 1,03$; удельное сопротивление $\rho = 1,4$ мкОм·м. Предел прочности при изгибе 250—350 МПа. Немагнитные чугуны легко обрабатываются резцом. При нагреве до 400 °С они сохраняют свои парамагнитные свойства. Большое электрическое сопротивление немагнитного чугуна дает ему преимущество перед цветными сплавами в отношении снижения потерь на вихревые токи. Немагнитный чугун используют при изготовлении крышек, кожухов, втулок масляных выключателей, обойм силовых трансформаторов, кожухов сварочных трансформаторов и т. д.

Немагнитная сталь. Изготавливают путем введения в состав стали никеля и марганца, способствующих понижению температуры перехода γ -железа в α -железо до 20 °С и ниже. В виде примера немагнитной стали можно указать никелевую сталь, имеющую состав: 0,25—0,35 % С, 22—25 % Ni, 2—3 % Cr, остальное Fe. Предел прочности при изгибе для такой стали 700—800 МПа, магнитная проницаемость $\mu_r = 1,05 \div 1,2$. Немагнитная сталь ввиду ее высоких механических свойств может применяться для изготовления деталей, которые ранее выполнялись из сплавов меди и алюминиевых сплавов и не обладали достаточно высокими механическими свойствами.

9-4. МАГНИТОТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Общие сведения. По составу, состоянию и способу получения магнитотвердые материалы подразделяют на: 1) легированные мартенситные стали, 2) литые магнитотвердые сплавы, 3) магниты из порошков, 4) магнитотвердые ферриты, 5) пластически деформируемые сплавы и магнитные ленты.

Характеристиками материалов для постоянных магнитов служат коэрцитивная сила, остаточная индукция и максимальная энергия, отдаваемая магнитом во внешнее пространство. Магнитная проницаемость материалов для постоянных магнитов ниже, чем магнитомягких материалов, причем чем выше коэрцитивная сила, тем меньше магнитная проницаемость.

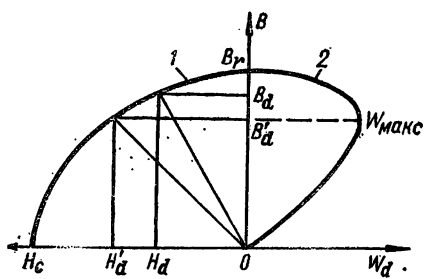


Рис. 9-25. Кривые размагничивания (1) и магнитной энергии в воздушном зазоре (2)

Магнитный поток, а следовательно, и магнитная энергия магнита в замкнутом состоянии (в виде кольцевого сердечника) находятся внутри его. При наличии воздушного зазора между полюсами часть энергии оказывается связанной с полем вне объема материала магнита. Величина ее зависит от длины зазора. Причем индукция B_d в промежутке будет меньше остаточной индукции B_r , вследствие размагничивающего действия полюсов магнита.

Удельная магнитная энергия, заключенная в воздушном зазоре:

$$W_d = \frac{B_d H_d}{2}, \quad (9-8)$$

где H_d — напряженность поля, соответствующая индукции B_d , А/м (см. рис. 9-25).

Чем меньше длина магнита и чем относительно больше зазор, тем больше размагничивающее поле полюсов и тем меньше B_d .

При замкнутом магните $B_d = B_r$; причем энергия равна нулю, так как $H_d = 0$. Если зазор между полюсами очень велик, то энергия при этих условиях также стремится к нулю, так как $B_d = 0$, $H_d = H_c$.

При некоторых значениях B'_d и H'_d энергия достигает максимального значения:

$$W_{\max} = \frac{B'_d H'_d}{2}, \quad (9-9)$$

которое определяет наилучшее использование магнита и тем самым является наиболее важной характеристикой качества материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов. Нередко для характеристики таких материалов пользуются произведением $B_d H_d$, опуская множитель 1/2, или коэффициентом выпуклости кривой размагничивания материала

$$\gamma = \frac{(BH)_{\max}}{2B_r H_c}. \quad (9-10)$$

Постоянные магниты имеют самое широкое применение. Они разнообразны по конструкции, по габаритам.

Легированные мартенситные стали. Эти стали являются наиболее простым и доступным материалом для изготовления постоянных магнитов. Они легируются добавками вольфрама, хрома, молибдена, кобальта. Значение W_{\max} для мартенситных сталей составляет 1—4 кДж/м³. Магнитные свойства таких сталей, указанные в табл. 9-9, гарантируются для мартенситных сталей после осуществления термообработки, специфичной для каждой марки стали,

**Состав и свойства мартенситных сталей
для постоянных магнитов**

Марка стали	Химический состав, % (остальное железо)					Магнитные свойства не менее	
	C	Cr	W	Co	Mo	B_r Тл	H_c к А/м
EX	0,95—1,10	1,30—1,60	—	—	—	0,90	4,6
EX3	0,90—1,10	2,80—3,60	—	—	—	0,95	4,8
E7B6	0,68—0,78	0,30—0,50	5,20— 6,20	—	—	1,00	5,0
EX5K5	0,90—1,05	5,50—6,50	—	5,50— 6,50	—	0,85	8,0
EX9K15M	0,90—1,05	8,0—10,0	—	13,5— 16,5	1,20— 1,70	0,80	13,6

и пятичасовой структурной стабилизации в кипящей воде. Мартенситные стали начали применять для производства постоянных магнитов раньше всех других материалов. В настоящее время они имеют ограниченное применение ввиду их невысоких магнитных свойств, но полностью от них не отказываются, так как они дешевы и допускают механическую обработку на металлорежущих станках.

Литые магнитотвердые сплавы. Большую магнитную энергию имеют тройные сплавы Al—Ni—Fe, которые раньше называли сплавами *альни*.

При добавлении кобальта, меди, кремния, ниобия или титана в эти сплавы повышаются их магнитные свойства, облегчается технология изготовления, обеспечивается повторяемость параметров и получение улучшенных механических характеристик.

Сплав альни с добавкой кремния называли *альниси*, а сплав альни с кобальтом — *альнико*; сплав альнико с содержанием кобальта 24 % — *магнико*. Каждый из этих сплавов теперь имеет марку, состоящую из букв и цифр, однако в заводских чертежах иногда можно встретить и прежние названия сплавов. Магнитные свойства магнитотвердых материалов зависят от кристаллографической и магнитной текстур. У всех магнитотвердых материалов наилучшие магнитные свойства достигаются при значительном искажении решетки.

Резко улучшенные магнитные свойства сплавов обуславливаются не только составом, но и специальной обработкой — охлаждением магнитов после отливки в сильном магнитном поле.

Если отлитый магнит анизотропен, то наилучшие свойства у него обнаруживаются в том направлении, в котором при охлаждении на него действовало магнитное поле.

Недостатком сплавов типа альни, альнико и магнико является трудность изготовления из них изделий точных размеров вследствие хрупкости и твердости сплавов, допускающих обработку только путем шлифовки. Современная маркировка сплавов системы Al—Ni—Fe

Таблица 9-10

Магнитные свойства сплавов для постоянных магнитов

Марка	$W_{\text{макс}}$, кДж/м ³ , не менее	H_c , кА/м, не менее	B_r , Тл, не менее	Тип кристаллической структуры
ЮНД4	3,6	40	0,50	Равноосная
ЮНД8	5,1	44	0,60	
ЮНТС	4,0	58	0,43	
ЮНДК15	6,0	48	0,75	
ЮНДК18	9,7	55	0,90	
ЮНДК18С	14,0	44	1,10	
ЮН13ДК24С	18,0	36	1,30	
ЮН13ДК24	18,0	40	1,25	
ЮН14ДК24	18,0	48	1,20	
ЮН15ДК24	18,0	52	1,15	
ЮН14ДК24Т2	15,0	60	1,10	
ЮН13ДК25А	28,0	44	1,40	Столбчатая
ЮН14ДК25А	28,0	52	1,35	
ЮН13ДК25БА	28,0	48	1,40	
ЮН14ДК25БА	28,0	58	1,30	
ЮН15ДК25БА	28,0	62	1,25	
ЮНДК31Т3БА	32,0	92	1,15	
ЮНДК34Т5	14,0	92	0,75	Равноосная
ЮНДК35Т5Б	16,0	96	0,75	
ЮНДК35Т5	18,0	110	0,75	
ЮНДК35Т5БА	36,0	110	1,02	Столбчатая Монокристалличе- ская
ЮНДК35Т5АА	40,0	115	1,05	
ЮНДК38Т7	18,0	135	0,75	Равноосная » Монокристалличе- ская
ЮНДК40Т8	18,0	145	0,70	
ЮНДК40Т8АА	32,0	145	0,90	

распространяется на составы, магнитные свойства которых приведены в табл. 9-10.

Кривые размагничивания и магнитной энергии в воздушном зазоре нескольких сплавов приведены на рис. 9-26. Бескобальтовые сплавы (ЮНД) наиболее дешевые. Сплавы, содержащие кобальт (ЮНДК15 и ЮНДК18), применяют в тех случаях, когда требуются повышенные магнитные свойства и нужен изотропный магнитный материал. Сплавы с 24 % кобальта, обладающие высокими магнитными свойствами в направлении магнитной текстуры, используют при направленном магнитном потоке. Сплавы с направленной кристаллизацией, например ЮН13ДК25БА, ЮНДК35Т5БА, обладают наибольшим запасом магнитной энергии, а потому из них могут быть изготовлены малогабаритные магниты. При большом воздушном зазоре предпочтение следует отдавать сплавам с наибольшей коэрцитивной силой, например сплавам, содержащим титан, — ЮНДК40Т8 и др. Монокристаллические сплавы обладают высокой коэрцитивной силой, большой запасенной энергией (у сплава

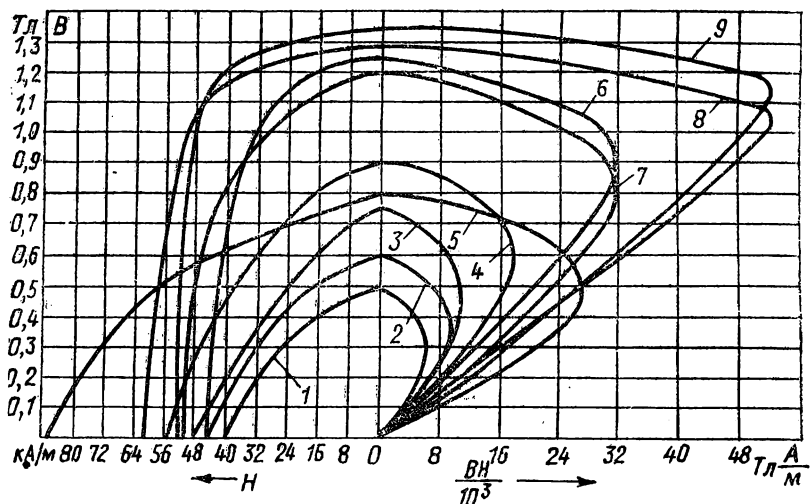


Рис. 9-26. Кривые размагничивания и магнитной энергии в воздушном зазоре сплавов

1 — ЮНД4; 2 — ЮНД8; 3 — ЮНДК15; 4 — ЮНДК18; 5 — ЮНДК34Т5; 6 — ЮН13ДК24; 7 — ЮНДК24Б; 8 — ЮН15ДК25БА; 9 — ЮН14ДК25А

В марках сплавов приняты следующие обозначения: Ю — алюминий, Н — никель, Д — медь, К — кобальт, Т — титан, Б — ниобий, С — кремний, А — столбчатая кристаллическая текстура. Магнитная текстура не обозначается, но подразумевается всегда при содержании кобальта в сплаве свыше 15 %. Цифра в маркировке подчеркивает содержание того металла, буква которого стоит перед этой цифрой: например, у первых двух сплавов на рис. и в табл. 9-10 — это процентное содержание меди. Символами АА обозначается монокристаллическая структура

ЮНДК35Т5АА она самая большая), повышенной механической прочностью, но достаточно дорогие.

Магниты из порошков. Невозможность получить особенно мелкие изделия со строго выдержанными размерами из литых железно-никельалюминиевых сплавов обусловила использование методов порошковой металлургии для производства постоянных магнитов. При этом следует различать *металлокерамические* магниты и магниты из зерен порошка, скрепленных тем или иным связующим веществом (*металлопластические магниты*).

Изготовление металлокерамических магнитов сводится к пресованию порошка, состоящего из измельченных тонкодисперсных магнитотвердых сплавов, и к дальнейшему спеканию при высоких температурах по аналогии с процессами обжига керамики. Мелкие детали при такой технологии получаются достаточно точных размеров и не требуют дальнейшей обработки.

Изготовление металлопластических магнитов аналогично пресовке из пластмасс (см. § 6-13), только в порошке содержится наполнитель в виде зерен измельченного магнитотвердого сплава. Из-за жесткого наполнителя необходимы более высокие удельные давления на материал, достигающие до 500 МПа. Металлопорошковые магниты экономически выгодны при массовом автоматизированном производстве, сложной конфигурации и небольших размерах

Таблица 9-11

Магнитные свойства магнитов из феррита бария и феррита кобальта

Марка	$W_{\text{макс}},$ кДж/м ³	$H_c,$ кА/м	$B_r,$ Тл
1БИ	3,2	128	0,19
1БИС	3,6	128	0,21
2,4БА	9,6	224	0,33
3,1БА	12,4	168	0,38
3БА2	10,4	240	0,35
1,5КА	5,6	128	0,24
2КА	7,2	128	0,28

магнитами ниже на 10—15 %, остаточная индукция — на 35—50 %, а запасенная магнитная энергия — на 40—60 %. Понижение магнитных свойств объясняется большим содержанием (до 30 %) немагнитного связующего вещества. Металлопластические магниты обладают высоким электрическим сопротивлением, что позволяет применять их в аппаратуре с наличием переменного магнитного поля повышенной частоты. У выпускаемых промышленностью металлокерамических магнитов одиннадцати марок (ММК1—ММК11) магнитные свойства весьма различны. Так, коэрцитивная сила может быть 24—128 кА/м, остаточная индукция 0,48—1,1 Тл, а запасенная магнитная энергия 3—16 кДж/м³. Как видно по коэрцитивной силе и по магнитной энергии — различие более 5 раз.

Магнитотвердые ферриты. *Бариевый феррит* $\text{BaO} \cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ (ферроксдюр) наиболее известен из магнитотвердых ферритов. В отличие от магнитомягких ферритов он имеет не кубическую, а гексагональную кристаллическую решетку с одноосной анизотропией. Промышленность выпускает два вида бариевых магнитов: марок БИ (бариевые изотропные) и марок БА (бариевые анизотропные). Технология производства БИ подобна технологии магнитомягких ферритов, а в технологическом процессе производства БА операция прессовки ведется в ориентирующем магнитном поле напряженностью 650—800 кА/м.

Как видно из этой табл. 9-11, магниты из феррита бария имеют коэрцитивную силу до 240 кА/м, что превосходит коэрцитивную силу магнитов системы альни (145 кА/м), однако по остаточной индукции 0,38 Тл и запасенной магнитной энергии 12,4 кДж/м³ они уступают этим сплавам (1,4 Тл и 40 кДж/м³).

Бариевые магниты целесообразно изготавливать в виде шайб и тонких дисков; они отличаются высокой стабильностью в отношении воздействия внешних магнитных полей и не боятся тряски и ударов. Плотность бариевого феррита 4,4—4,9 Мг/м³, примерно в 1,5—1,8 раза меньше плотности литых железоникельалюминиевых сплавов (~7,3—7,8 Мг/м³); магниты получаются легкими. Удельное сопро-

магнитов. Металлопластическая технология позволяет получать магниты с арматурой.

Металлокерамические магниты обычно имеют пористость 3—5 %, а запасенная магнитная энергия и остаточная индукция у них на 10—20 % ниже, чем у литых магнитов из соответствующего сплава, зато по механической прочности они превосходят литые магниты в три-шесть раз. Магнитные свойства металлопластических магнитов довольно низкие. Коэрцитивная сила по сравнению с литыми

тивление бариевого феррита 10^4 — 10^7 Ом·м, т. е. в миллионы раз выше удельного сопротивления литых металлических магнитотвердых сплавов. Магниты из бариевого феррита можно использовать при высоких частотах. По стоимости они почти в 10 раз дешевле магнитов из ЮНДК24.

К недостаткам бариевых магнитов следует отнести низкую механическую прочность, большую хрупкость, сильную зависимость магнитных свойств от температуры. Кроме того, они обнаруживают необратимое изменение магнитных свойств после охлаждения от комнатной до низких температур (-60°C) и нагревания до первоначальной температуры.

Кобальтовые магниты характеризуются большей температурной стабильностью по сравнению с бариевыми. Стоимость магнитов из кобальтовых ферритов выше, чем у бариевых.

Металлические и неметаллические материалы для звукозаписи. Для записи и воспроизведения звука используют магнитотвердые стали и сплавы, позволяющие изготавливать из них ленту или проволоку, биметаллические ленты из основы с нанесенным на нее сплавом-звуконосителем (если последний не обладает такими механическими свойствами, при которых из него можно изготовить ленту или проволоку), а также пластмассовые и целлюлозные ленты с нанесенными на их поверхность порошкообразными ферритами железа или кобальта или введенными в их объем в качестве магнитного наполнителя.

Магнитотвердым сплавом, позволяющим изготавливать из него ленту и проволоку, является *викаллой* (34 % Fe; 52 % Co; 14 % V), имеющий коэрцитивную силу около 36 кА/м и остаточную индукцию около 1 Тл. Магнитотвердые железоникельалюминиевые сплавы могут быть нанесены на медную ленту, а из аустенитовой нержавеющей стали изготавливают проволоку с $H_c = 32$ кА/м, $B_r = 0,7$ Тл и разрывным усилием при диаметре 0,1 мм—15 Н. Однако все эти материалы не обеспечивают установленное из практики звукозаписи оптимальное соотношение между коэрцитивной силой материала и остаточной индукцией, обуславливающее наилучшую запись в широком интервале частот, и, главное, высоких частот. Кроме того, они дороги и не позволяют простейшим способом соединять отдельные отрезки ленты или проволоки. Опыт показал, что хорошие результаты дают материалы, у которых соотношение $H_c/B_r \geq 8$ кА/(м·Тл).

Этим условиям удовлетворяют дешевые и доступные оксиды железа — магнетит Fe_3O_4 (черного цвета) и Fe_2O_3 (коричнево-желтого цвета).

В практике используют двухслойную магнитную пленку и однослойную. В простейшем случае двухслойная пленка представляет собой ацетилцеллюлозную ленту шириной 6,5 мм и толщиной 35 мкм, на которую нанесен слой лака, содержащий магнетик. Содержание магнетика в жидком лаке по объему примерно 40 %. Магнитные параметры пленки: $H_c = 6,4 \div 20$ кА/м и $B_r = 0,8 \div 0,4$ Тл соответственно.

Таблица 9-12

**Предельные теоретические значения параметров
редкоземельных магнитотвердых материалов**

Свойства	Материалы				
	YCo	CeCo ₆	SmCo ₆	(YMM *)	(CeMM *)
$W_{\text{макс}}, \text{кДж/м}^3$	112,4	75,6	90,4	90,4	79,2
$H_c, \text{кА/м}$	1032	1680	2000	1200	1440

* MM — мишметалл, представляющий собой смесь редкоземельных металлов с преобладанием одного из них.

Таким образом, может быть получено отношение коэрцитивной силы к остаточной индукции примерно до 40. Такое отношение H_c/B позволяет вести запись звука при малых скоростях, а именно:

$f_{\text{макс}}, \text{Гц}$	$v_{\text{мин}}, \text{м/с}$
3 000	0,18
6 000—8 000	0,46
9 000—12 000	0,77

Достаточно хорошее воспроизведение звука на этих лентах достигается в широкополосной аппаратуре при скорости 19,05 см/с и бытовых магнитофонах при скорости 9,53 и 4,75 см/с.

При мелком помоле магнитного порошка (размер зерен 0,1—5 мкм) шумы получаются незначительными. Разрывное усилие ленты 21—30 Н, растяжение пленки не более 1 %.

Монтаж отдельных отрезков пленки осуществляется с помощью клея. Пленка лучше всего сохраняется при температуре 15—20 °С и относительной влажности воздуха 50—60 %.

Однослойные пленки изготовляют из поливинилхлорида или другого линейного полимера с магнитным наполнителем. Однослойные пленки отличаются меньшими шумами, прочны, но легко растягиваются и могут обладать несколько ухудшенными магнитными свойствами.

Перспективные магнитотвердые материалы. Перспективными, но еще недостаточно изученными и технологически освоенными, являются магнитотвердые материалы в виде соединений или сплавов редкоземельных металлов (табл. 9-12). Как видно из табл. 9-12, эти материалы обладают очень высокими значениями коэрцитивной силы, а потому должны быть весьма стабильными в эксплуатации, не бояться тряски и ударов.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каковы требования к магнитным материалам и какие виды магнитных материалов используются в электротехнике?
2. Каково различие в строении и свойствах ферромагнетиков и ферримагнетиков?
3. Какие магнитомягкие материалы и для каких целей нашли наиболее широкое применение в технике?
4. Какие магнетики относятся к материалам специализированного назначения?
5. Какие особые требования предъявляют к магнитотвердым материалам, их виды и применение?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбачев В. В., Спицына Л. Г. Физика полупроводников и металлов. — М.: Металлургия, 1982. — 336 с.
2. Горелик С. С., Дашевский М. Я. Материаловедение полупроводников и металловедение. — М.: Металлургия, 1973. — 496 с.
3. Казарновский Д. М., Тареев Б. М. Испытание электроизоляционных материалов. — 3-е изд. — Л.: Энергия, 1980. — 214 с.
4. Майофис И. М. Химия диэлектриков. — М.: Химия, 1981. — 248 с.
5. Материаловедение и проблемы энергетики/Под ред. Г. Либовица и М. Уиттингэма: Пер. с англ. Под ред. Г. Ф. Мучника. — М.: Мир, 1982. — 576 с.
6. Ормонт Б. Ф. Введение в физическую химию и кристаллохимию полупроводников. — М.: Высшая школа, 1982. — 528 с.
7. Пасынков В. В. Материалы электронной техники. — М.: Высшая школа, 1980. — 408 с.
8. Палатник Л. С., Сорокин В. К. Материаловедение в микроэлектронике. — М.: Энергия, 1978. — 280 с.
9. Пешков И. Б. Обмоточные провода. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 342 с.
10. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы. — 2-е изд. — М.: Высшая школа, 1976. — 336 с.
11. Производство кабелей и проводов/Под ред. Н. И. Белоусова и И. Б. Пешкова. — М.: Энергоиздат, 1981. — 632 с.
12. Смит Р. Полупроводники: Пер. с англ. — М.: Мир, 1982. — 560 с.
13. Справочник по электротехническим материалам/Под ред. Ю. В. Корницкого, В. В. Пасынкова и Б. М. Тареева. — 2-е изд. — Энергия; т. 1 М., 1974, 584 с.; т. 2 М., 1974, 616 с.; т. 3 Л., 1976, 896 с.
14. Тареев Б. М. Физика диэлектрических материалов. — М.: Энергия, 1982. — 320 с.
15. Штофа Ян. Электротехнические материалы в вопросах и ответах: Пер. со словац. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 200 с.
16. Эдельман В. С. Вблизи абсолютного нуля. — М.: Наука, 1983. — 176 с.
17. Электрорадиоматериалы/Под ред. Б. М. Тареева. — М.: Высшая школа, 1978. — 336 с.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- | | |
|--|---|
| <p>Адсорбенты 95—99
 Акцепторная примесь 232—236
 Алмаз 10, 14, 26, 234, 236, 261
 Альдрей 262
 Альни 293
 Альнико 293
 Альниси 293
 Альсифер 280, 289
 Алюмель 216, 222✓
 Алюминий 87, 183, 184, 188, 193—
 197, 201—203, 207, 212, 220, 224, 225,
 280, 282, 293
 Алюмооксид 55, 84, 172
 Аминопласт 68
 Анид 116
 Антимонид индия 261—263
 Антимониды 261—263
 Аргон 22, 60, 91
 Арсениды 261—263
 Асбест 83, 140, 182
 Асбоцемент 182
 Ацетилцеллюлоза 125, 136, 297
 Ацетобутират целлюлозы 136</p> | <p>Ацетон 37, 122
 Бакелит (см. Смола фенолформальде-
 гидная)
 Бензол 21, 24, 37, 123, 127, 131
 Бериллий 174, 188, 199, 212
 Биметалл 204
 Битум 80, 84, 127, 131, 133
 Бронза 200
 Бумага 54, 57, 68, 82, 84, 96, 129,
 141—144, 152
 — ацетилованная 144
 — кабельная 68, 75, 142
 — конденсаторная 57, 142
 — микалентная 144
 — намоточная 142
 — пропиточная 142, 152
 — телефонная 142
 Вазелин 129
 Ванадий 297
 Вариконд 174
 Варистор 229, 259, 260
 Викаллой 297
 Вилит 259</p> |
|--|---|

Винил 112
 Винипласт 112, 152
 Винифлекс 113
 Висмут 14, 20, 262, 264
 Вода 37, 42, 43, 66, 74, 76, 84, 96, 163
 Водяной пар 60, 73—77
 Воздух 23, 59, 62—64, 73, 74, 84, 90, 91, 221
 Волокно 75, 82, 106, 140—147, 148, 165—167, 182
 Вольфрам 164, 188, 198, 213, 214, 218, 221, 292
 Воск 128
 Вулканизация 87, 155—160
 Галлий 14, 188, 218, 261—263
 Гелий 22, 60, 91, 93, 205, 211
 Гемиксид 264, 265
 Германий 230, 234—236, 243, 245, 247, 249, 251—255
 Гетинакс 77, 80, 83, 118, 152—154
 Гиперпроводники (см. Криопроводники)
 Глазурь 169
 Глина 95, 168—170
 Глинозем 54, 87, 172
 Глифталъ 119, 179
 Глицерин 119, 126
 Графит 14, 174, 226—228, 277
 Дакрон 146
 Дедерон 116
 Дерево 68, 141
 Диаманетики 14, 208
 Дислокация 12, 233
 Дифенил 100, 158
 Домены 21, 28, 267—269, 272, 274
 Донорная примесь 232—236
 Железо 188, 192, 198, 199, 203—205, 220—222, 268, 269, 275, 276, 279, 280, 282—297
 — армко 275
 — карбонильное 276
 — электролитическое 276
 Жидкие кристаллы 138—140
 Жидкости кремнийорганические 100
 Золото 14, 188, 215, 218
 Зонная плавка 251, 256
 Изобутилен 111
 Изоперм 282
 Ингибиторы 98
 Индий 188, 207, 218, 234, 235, 253, 255, 261—264
 Иридий 188
 Йод 230, 257
 Кадмий 188, 199, 200, 218, 264
 Кальций 27, 126
 Каменная соль (см. Соль каменная)
 Канифоль 36, 77, 99, 107, 125, 133, 225
 Каолин 164, 169
 Капрон 53, 116, 146
 Карбид кремния 230, 257—260
 Картон 53, 82, 140, 141, 144

Каучук 85, 105, 155—160
 Кварц 22, 28, 40, 43, 83, 87, 160—172
 Керамика 38, 41, 50, 53—56, 67—69, 75—78, 168—174, 283, 296
 — алюмосиликатная 38, 172
 — конденсаторная 173, 174
 — радиотехническая 172, 173
 — рутиловая 173
 — стеатитовая 172
 — титановая 173
 Кобальт 126, 188, 192, 216, 268, 272, 288, 293—295
 Компаунд 36, 52, 57, 79, 82, 83, 89, 107, 123, 129, 132—136, 142, 159
 Константан 216, 219, 220, 222
 Копаль 108, 126
 Копель 216, 222
 Кордиерит 54, 174
 Корунд 22, 27, 53, 172
 Кремний 72, 89, 122—124, 159, 160—181, 199, 202, 203, 216, 230, 234, 236, 251, 255—260, 275—278, 280, 290, 291, 293, 295
 Кремнийорганические соединения 77, 83, 96, 100, 117, 122—124, 159
 Криопроводники 211, 212
 Лавсан 120, 146
 Лак 79, 80, 82, 85, 89, 129—136, 147, 149, 152, 159, 297
 — бакелитовый 130
 — битумный 131
 — глифталевый 130, 132, 179
 — клеящий 129, 130, 178
 — кремнийорганический 43, 81, 117, 130, 132, 179, 259
 — масляно-битумный 81, 82, 131, 134, 147
 — масляно-глифталевый 131, 179
 — масляно-смоляной 83, 131
 — масляный 82, 130, 147
 — нитроцеллюлозный 130
 — покрывной 129
 — поливинилацеталевый 83, 117
 — полистирольный 117
 — полиуретановый 117
 — полиэфирный 137, 179
 — пропиточный 129, 131
 — целлюлозный 130
 — шеллачный 130, 179
 — эмалевый 113, 129
 — эпоксидный 137
 — эфирно-целлюлозный 130
 Лакобумага 83, 147
 Лакоткань 83, 84, 135, 147, 159
 Латекс 155, 159
 Латунь 200, 252
 Лед 27, 65, 94, 96, 193
 Линоксиновая трубка (см. Трубка линоксиновая)
 Литий 188, 236, 286
 Магнетики 14, 267—298

Магнетит 182, 284, 288, 297
 Магний 72, 172, 188, 198, 200—202, 218, 286
 Магнито 293
 Магнитодиэлектрики 289
 Манганин 219
 Марганец 201, 219, 286, 288, 290, 291
 Масло 65, 69, 94—99, 126, 127, 128, 130, 133, 159, 166
 — кабельное 99
 — касторовое 37, 127
 — конденсаторное 51, 99
 — льняное 36, 126
 — нефтяное 94—99
 — трансформаторное 36, 37, 57, 66, 80, 94—99
 — тунговое 127
 Медь 14, 151, 154, 157, 167, 188, 192—205, 212, 216—224, 227, 264, 265, 294, 295
 Металвин 113
 Металлокерамика 295
 Микалекс 22, 43, 50, 68, 79, 83, 181
 Микалента 178, 179
 Миканиты 50, 83, 178—179
 Микафоль 178, 179
 Молибден 108, 188, 214, 215, 221, 279, 292
 Мономер 103, 104
 Муллит 54, 171, 172
 Мусковит 56, 175—181
 Мышьяк 230, 234, 252, 253, 255, 261—263
 Наполнитель 149, 156
 Нейлон 85, 116, 146
 Никель 188, 192, 195, 198, 201, 203, 216, 218—223, 268, 269, 278—282, 284—288, 291, 293—295
 Ниобий 20, 184, 188, 207, 209, 210
 Нитрид бора 174, 263
 Нитрид кремния 174
 Нитрон 147
 Нитроцеллюлоза 125, 130, 136
 Нихром 203, 220—222
 Новолак 118
 Озокерит 128
 Оксидная изоляция 183—184
 Оксифер (см. Ферриты)
 Октон 101
 Олово 188, 193, 199, 200, 207, 209, 210, 217, 224, 225
 Отвердитель 121, 122
 Палладий 188, 216
 Парамагнетики 14
 Парафин 11, 21, 26, 128
 Пермаллой 269, 278—281, 288
 Пермендюр 283
 Перминвар 282
 Пластификатор 112, 137, 148
 Пластмасса 47, 57, 68, 78, 80, 148—152

Платина 41, 188, 196, 215, 216, 222, 224, 282
 Платинородий 216
 Плексиглас (полиметилметакрилат) 53, 85, 113, 122
 Пленкокартон 137
 Полевой шпат 164, 169, 170
 Полиакрилаты 113
 Полиамидимиды 117
 Поливинилацетаты 113
 Поливинилхлорид 112, 122, 130
 Полиизобутилен 87, 111
 Полиимиды 83, 107, 117, 137, 138
 Поликарбонаты 120, 137
 Полимеризация 85, 87, 103—106, 108, 158, 159
 Полимеры 53, 87, 103—108, 111—119
 Полипропилен 111, 137
 Полистирол 21, 26, 53, 68, 77, 80, 85, 103, 104, 111, 112, 122, 137, 138, 146, 159, 289
 Полисульфоны 116, 117
 Политетрафторэтилен (см. Фторопласты)
 Политрифторхлорэтилен 115
 Полиуретан 53, 117
 Полифениленоксиды 116
 Полифенилены 116
 Полиэтилен 53, 77—79, 85, 88, 108—110, 114, 122, 137
 Полиэтилентерефталат (см. Лавсан)
 Полиэфиракрилаты 120
 Пресс-порошок 83, 148—150
 Припой 223—225
 Пропилен (см. полипропилен)
 Пряжа 82, 96, 129, 145, 146, 182
 Пьезоэлектрики 89
 Радиофарфор 40, 172
 Реактопласты 149
 Резина 57, 156—158, 160
 Рений 188
 Ртуть 14, 77, 93, 187, 188, 193, 205—207, 218, 257
 Рутил 22, 26, 27, 98, 162, 173, 264, 265
 Сажа 66, 109, 129, 157, 227
 Сверхпроводники 205—212
 Свинец 98, 126, 188, 195, 196, 207, 209, 216, 217, 224, 225, 264
 Сегнетокерамика 56, 173, 174
 Сегнетоэлектрики 21, 27—29, 45, 49, 56, 89, 173, 174
 Селен 230, 254, 257, 264
 Сера 21, 26, 91, 92, 127, 156—158, 230, 264
 Серебро 14, 41, 164, 169, 188, 193, 195, 196, 199, 215, 216
 Сиккатив 126, 130, 147, 179
 Силит 231, 260
 Ситаллы 167, 168
 Скипидар 125

- Слюда 22, 56, 68, 77, 83, 85, 87, 175—182
Слюдиниты 179, 180
Слюдопласт 180, 182
Смола 83, 85, 107—125, 141, 149, 153
— глифталевая 119
— карбамидоформальдегидная 119, 149
— крезолоформальдегидная 150
— крезольная 119
— кремнийорганическая 122, 123, 179
— меламинформальдегидная 119
— полиамидная 83, 116, 122, 137, 149
— поливиниловая 112, 149
— полиамидная 117, 138
— полифениленоксидная 116
— полиэфирная 83, 113, 119, 120
— фенолформальдегидная 28, 39, 53, 83, 85, 117—119, 122, 149—155, 289
— фторорганическая 114—115
— эпоксидная 77, 83, 85, 120—123
Совол 25, 37, 52, 100
Соединения АIII BV 230, 235, 260—263
Соль каменная 22, 27, 37, 53, 68
Спирт поливиниловый 112
— этиловый 37, 127
Сталь 202—205, 224, 275—278, 289—293
— для постоянных магнитов 292, 293
— электротехническая 131, 276—278
Стеатит 84, 85, 172
Стекло 11, 12, 20, 28, 39, 40, 42, 43, 54, 55, 67—69, 77, 78, 83, 85, 160—168, 172, 181
/Стекловолокно 165—167
Стеклолакоткань 83, 147
Стеклотекстолит 153, 155
Стеклоткань 165, 166
Стеклоэмаль 165
Стирол 103—106, 111
Стирофлекс 137, 138
Сульфиды 236, 264
Сурьма 14, 217, 224, 230, 235, 253, 254, 261—263
Тальк 156, 173
Тантал 184, 188, 207, 218
Текстолит 77, 83, 118, 130, 154, 155
Теллур 217, 230, 235, 255, 264, 265
Терилен 146
Терин 146
Термопластичные материалы 78, 106, 118, 149, 152
Термореактивные материалы 83, 106, 118, 149, 150
Терморезисторы 229, 265
Тирит 231, 259
Титан 26, 188, 201
Тиурам 157
Толуол 127, 131
Торий 174, 188
Триацетат целлюлозы 77, 137
Углерод 14, 24, 45, 89, 116, 129, 203, 226—228, 258, 275, 276, 290, 291, 293
Уголь электротехнический 226, 227
Ультрафарфор 53, 55, 172
Фарфор 22, 40, 55, 67, 85, 169—171
Фенопласт 42
Ферриты 267, 273, 282—289, 296, 297
Феррохром 220—222
Фехраль 220—222
Фибра 113, 144, 145
Флогопит 175—182
Флюсы 225, 226
Фосфиды 230, 261—263
Фосфор 199, 230, 253, 256, 261
Фреон (хладон) 92, 93
Фторопласты 53, 77, 83, 85, 87, 114, 115, 122, 137
Фторорганические жидкости 100, 101
Фторфлогопит 181, 182
Фунгициды 77
Хлор 10, 37, 77, 257
Хром 108, 188, 198, 200, 203, 220—223, 272, 290, 291, 293
Хромаль 222
Хромель 216, 222
Целлюлоза 22, 28, 53, 57, 75, 77, 81, 82, 102, 104, 125, 136, 140—144
Церезин 42, 77, 128
Цинк 14, 188, 193, 194, 199—201, 204, 207, 218, 224, 253, 264, 265, 284—286
Цикрон 54, 172—174
Цирконий 188
Чугун 289—291
Шелк 82, 102, 140, 146, 147
Шерсть 140
Шпинель 172, 284
Эбонит 39, 53, 158
Эластомер 155—160
Элегаз 91, 92
Элементоорганические материалы 39, 81, 90, 122—125
Эмаль 113, 117, 129, 165
Энант 147
Эскапон 158, 159
Этилен 22, 108
Этилцеллюлоза 125
Эфиры целлюлозы 53, 125, 130, 136, 137, 144

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие к седьмому изданию	3
Из предисловия к предыдущим изданиям	5
Основные обозначения	7
ВВЕДЕНИЕ. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СТРОЕНИИ ВЕЩЕСТВА	9
ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ДИЭЛЕКТРИКИ	16
ГЛАВА ПЕРВАЯ. ПОЛЯРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ	—
1-1. Диэлектрик в электрическом поле	—
1-2. Поляризация диэлектриков и диэлектрическая проницаемость	17
1-3. Основные виды поляризации диэлектриков	18
1-4. Классификация диэлектриков по виду поляризации	21
1-5. Диэлектрическая проницаемость газов	22
1-6. Диэлектрическая проницаемость жидких диэлектриков	23
1-7. Диэлектрическая проницаемость твердых диэлектриков	25
ГЛАВА ВТОРАЯ. ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКОВ	30
2-1. Основные понятия	—
2-2. Электропроводность газов	33
2-3. Электропроводность жидкостей	34
2-4. Электропроводность твердых тел	37
2-5. Поверхностная электропроводность твердых диэлектриков	42
ГЛАВА ТРЕТЬЯ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ	43
3-1. Основные понятия	—
3-2. Виды диэлектрических потерь в электроизоляционных материалах	48
3-3. Диэлектрические потери в газах	50
3-4. Диэлектрические потери в жидких диэлектриках	51
3-5. Диэлектрические потери в твердых диэлектриках	53
ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ. ПРОБОЙ ДИЭЛЕКТРИКОВ	58
4-1. Общая характеристика явления пробоя	—
4-2. Пробой газов	59
4-3. Пробой жидких диэлектриков	65
4-4. Пробой твердых диэлектриков	66
4-5. Тепловой и электрохимический пробой твердых диэлектриков	69
ГЛАВА ПЯТАЯ. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ДИЭЛЕКТРИКОВ	73
5-1. Влажностные свойства диэлектриков	—
5-2. Механические свойства диэлектриков	78
5-3. Тепловые свойства диэлектриков	80
5-4. Химические свойства диэлектриков и воздействие на материалы излучений высокой энергии	85
ГЛАВА ШЕСТАЯ. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	88
6-1. Классификация	—
6-2. Газообразные диэлектрики	90
6-3. Нефтяные электроизоляционные масла	94
6-4. Синтетические жидкие диэлектрики	99
6-5. Общие сведения об органических полимерах	101
6-6. Смолы	107
6-7. Растительные масла	126
6-8. Битумы	127
6-9. Воскообразные диэлектрики	128
6-10. Электроизоляционные лаки и компаунды	129
6-11. Гибкие пленки и жидкие кристаллы	136
6-12. Волокнистые материалы	140
6-13. Пластические массы	148

6-14. Слоистые пластики	152
6-15. Эластомеры	155
6-16. Стекла	160
6-17. Керамические диэлектрические материалы	168
6-18. Слюда и слюдяные материалы	175
6-19. Асбест и асбестовые материалы	182
6-20. Неорганические диэлектрические пленки	183

ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ПРОВОДНИКИ, ПОЛУПРОВОДНИКИ И МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

186

ГЛАВА СЕДЬМАЯ. ПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

—

7-1. Классификация и основные свойства проводниковых материалов	—
7-2. Материалы высокой проводимости	198
7-3. Сверхпроводники и криопроводники	205
7-4. Различные металлы	213
7-5. Различные сплавы, припои, неметаллические проводники	219

ГЛАВА ВОСЬМАЯ. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

229

8-1. Общие сведения о полупроводниках	—
8-2. Электропроводность полупроводников	231
8-3. Воздействие внешних факторов на электропроводность полупроводников	239
8-4. Элементы, обладающие свойствами полупроводников	251
8-5. Полупроводниковые химические соединения и материалы на их основе	257

ГЛАВА ДЕВЯТАЯ. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

267

9-1. Общие сведения о магнитных свойствах материалов	—
9-2. Магнитомягкие материалы	275
9-3. Материалы специализированного назначения	281
9-4. Магнитотвердые материалы	291

Список литературы	299
Алфавитный указатель	—

БОГОРОДИЦКИЙ НИКОЛАЙ ПЕТРОВИЧ
ПАСЫНКОВ ВЛАДИМИР ВАСИЛЬЕВИЧ
ТАРЕЕВ БОРИС МИХАЙЛОВИЧ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

Редактор *С. П. Левкович*
Художественный редактор *Д. Р. Стеванович*
Технический редактор *А. Г. Рябкина*
Корректор *Н. Б. Чухутина*

ИБ № 802

Сдано в набор 25.04.85. Подписано в печать 16.10.85. М-26633.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная.
Высокая печать. Усл. печ. л. 19. Усл. кр.-отт. 19,5 Уч.-изд. л. 24,4.
Тираж 60 000 экз. Заказ 122. Цена 1 р. 10 к.

Ленинградское отделение Энергоатомиздата.
191065, Ленинград, Марсово поле, 1.

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

