

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой  
«Управление инновациями»

\_\_\_\_\_/А.Ф.Уваров  
(подпись) (ФИО)  
" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2013 г.

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ  
К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ И ПО ОРГАНИЗАЦИИ  
САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ СТУДЕНТА  
по дисциплине

**Актуальные проблемы нанoeлектроники**

Составлена кафедрой

«Управление инновациями»

Для студентов, обучающихся  
по направлению магистерской подготовки 222000.68 «Инноватика»  
Профиль «Управление инновациями в электронной технике»

Форма обучения очная

Составитель  
Доцент, к.ф.-м.н.,

\_\_\_\_\_/П.Н. Дробот

Томск 2013 г.

## Оглавление

<b>Введение .....</b>	<b>4</b>
<b>Практическое занятие № 1 по разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов нанoeлектроники. ....</b>	<b>6</b>
1.1. Технологии рентгеновской микроскопии. ....	6
1.2. Свойства индивидуальных наночастиц. ....	7
<b>Практическое занятие № 2 по разделу 1 Введение. Актуальные проблемы получения и производства материалов нанoeлектроники. ....</b>	<b>10</b>
2.1. Новейшие материалы нанoeлектроники: технологии получения и применение. ....	10
2.2. В направлении к графеновой электронике. ....	17
2.3. Высокоскоростные графеновые транзисторы ....	21
2.4. Эффективные транзисторы на основе графеновых полос. ....	23
<b>Практическое занятие № 3 и №4 по разделу №2 Актуальные проблемы нанoeлектроники. ....</b>	<b>25</b>
3.1. Проблемы на пути перехода от микро— к нанoeлектронике ....	25
4.1. Новые подходы к созданию электроники наноразмерных элементов и наноструктур .....	29
<b>Практическое занятие № 5 по разделу №3 Актуальные проблемы создания твердотельных наноструктур и их применение. ....</b>	<b>34</b>
5.1. Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика. ....	34
5.2. Нанокomпьютеры. ....	36
<b>Практическое занятие № 6 по разделу №3 Актуальные проблемы создания твердотельных наноструктур и их применение. ....</b>	<b>37</b>
6.1. Проблема малого отношения токов открытого и закрытого состояний в полевых транзисторах на основе графена. ....	37
6.2. Туннельные полевые транзисторы на основе графена ....	39
<b>Самостоятельная работа студента. Вопросы теоретической части курса, отводимые на самостоятельную проработку .....</b>	<b>40</b>
1. к Разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов нанoeлектроники. ....	41
1.1. Углеродные молекулы. Природа углеродной связи. ....	41
1.2. Углеродные кластеры. Малые углеродные кластеры. Фуллерен C <sub>60</sub> . Неуглеродные шарообразные молекулы. ....	43

1.3. Углеродные нанотрубки. Методы получения. Применение углеродных нанотрубок .....	44
2. к Разделу 2 Актуальные проблемы нанoeлектроники. ....	46
2.1. Резонансное туннелирование. Приборы на резонансном туннелировании.....	46
2.2 Эффект Кондо. ....	47
2.3. Спинтронные приборы.....	48
3. к Разделу 3 Актуальные проблемы создания твердотельных наноструктур и их применение.....	51
3.1.Трехмерная графеновая электроника. ....	51
3.2. Самосборка при эпитаксии. Осаждение пленок Лэнгмюра-Блоджетт.....	54
<b>Самостоятельная работа студента. Темы рефератов.....</b>	<b>56</b>
1.1. к Разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов нанoeлектроники.....	56
1.2. к Разделу 2 Актуальные проблемы нанoeлектроники. ....	56
1.3. к Разделу 3 Актуальные проблемы создания твердотельных наноструктур и их применение.....	57
<b>Контрольные вопросы по курсу .....</b>	<b>57</b>
<b>Библиографический список .....</b>	<b>59</b>

## Введение

Дисциплина «Актуальные проблемы нанoeлектроники» М1.В.ДВ.2.2 относится к вариативной части М1.В общенаучного цикла М1 дисциплин ФГОС по направлению 222000.68 «Инноватика». Дисциплина имеет важное, профессионально ориентирующее значение в специальной подготовке магистрантов по направлению «Инноватика».

Цель данного пособия состоит в выработке практических навыков применения в профессиональной деятельности будущего магистра знаний актуальных проблем нанoeлектроники.

Предлагаемые практические занятия позволят глубже освоить практические вопросы современной электроники и научиться применять полученные знания на практике в профессиональной деятельности для оценки инновационных разработок, в первую очередь в сферах полупроводниковой электроники и нанoeлектроники и электронной техники по следующим критериям: высота технического и изобретательского уровня и другие характерные ключевые аспекты инновационной разработки.

Изучение дисциплины «Актуальные проблемы нанoeлектроники» магистрантами направления 222000 «Инноватика» в ТУСУР предусматривает лекции в объеме 9 часов и практические занятия в объеме 17 часов. Основным видом занятий – это практические занятия, они формируют предусмотренные рабочей программой компетенции на основе освоения дидактических единиц (разделов программы).

Практические занятия проводятся в виде семинаров, на которых выступают 2-3 студента с докладом ~30 минут по темам практических занятий, и рефератов, предусмотренных преподавателем. В оставшееся время проводится обсуждение актуальных проблем электроники, поставленных в студенческих докладах.

Основную роль при подготовке к практическим занятиям играет самостоятельная работа студентов, которая проводится под контролем преподава-

теля. Преподаватель формирует разделы и темы теоретической части курса для самостоятельного изучения, составляет перечень основных проблем, которые должны быть отражены в докладе на практическом занятии, рекомендует необходимую литературу.

Методическое пособие призвано обеспечить качественное проведение практических и семинарских занятий, а также самостоятельной работы при освоении дисциплины «Актуальные проблемы нанoeлектроники» при подготовке в ТУСУР магистров по направлению 222000 «Инноватика».

Для подготовки к практическим занятиям прочитайте и изучите самостоятельно приведенные ниже и доступные по библиографическим ссылкам в конце пособия материалы практических занятий полностью. Найдите в интернет подобные материалы. Проведите анализ и обобщение. Отработайте ответы на поставленные вопросы. Подготовьте презентацию, иллюстрированную картинками с сайтов, подготовьте доклад и выступите на практическом занятии с защитой Вашей точки зрения на поставленную проблему.

Рекомендации по самостоятельной работе даны в середине пособия в соответствующем разделе.

## **Практическое занятие № 1 по разделу 1    Актуальные проблемы получения и производства материалов нанoeлектроники.**

### ***1.1. Технологии рентгеновской микроскопии.***

Новая технология построения рентгеновского микроскопа позволяет получить подробные трехмерные изображения объектов нанoeуровня. Эта технология, разработанная международной командой ученых, позволяет рассмотреть объекты, имеющие размеры около 100 нанометров, такие как отверстия для клеток костного мозга и соединяющие их каналы. Эта технология, описанная в выпуске журнала Nature от 23 сентября, совмещает «под своей крышей» несколько различных методов и технологий, мощный источник рентгеновского излучения посылает луч сквозь исследуемый образец на высокочувствительный фоточувствительный датчик. Мощность излучения настолько высока, что позволяет обходиться без всяких фокусирующих устройств.

Проходя через материал образца, рентгеновские лучи рассеиваются с силой, пропорциональной плотности материала, датчик измеряет мощность падающих рентгеновских лучей и передает данные в компьютер. Полученные данные обрабатываются сложнейшими алгоритмами, которые на основе нескольких двухмерных образов создают трехмерное изображение исследуемого объекта. Большое количество сделанных двумерных снимков, подверженных дальнейшей обработке, позволяют получить беспрецедентную точность результирующего изображения, новая технология позволяет увидеть такие крошечные изменения плотности материала, которые были просто невидимы для рентгеновских установок предыдущих поколений.

Литература:

1. Новая технология рентгеновского микроскопа позволяет получить трехмерные изображения объектов на нанoeуровне [Электронный ресурс] DailyTechInfo      URL: <http://www.dailytechinfo.org/news/1687-novaya-technologiya-rentgenovskogo-mikroskopa-pozvolyaet-poluchit-trexmernye-izobrazheniya-obektov-na-nanourovne.html> (дата обращения 22.08.2013)

## **1.2. Свойства индивидуальных наночастиц.**

### **1.2.1. Металлические нанокластеры.**

Кластерами называются нанообъекты, состоящие из сравнительно небольшого числа атомов или молекул, от единиц до сотен тысяч. Кластеры имеют наноразмеры по трем направлениям. Обычно кластеры делят на газовые и твердотельные, имея в виду источник их получения. Чтобы получить газовые кластеры, надо резко охладить газ, желательно при высоком давлении. Для получения твердотельных кластеров поверхность твердого тела облучают лазерным лучом или пучком заряженных частиц (электронов, ионов) с большой кинетической энергией. С поверхности материала при этом вылетает некоторое количество макроскопических капель, отдельные частицы и кластеры разных размеров. Затем кластеры направляют в специальный прибор – масс-спектрометр, позволяющий определить их распределение по массам, то есть по числу частиц в кластере. Чаще всего в потоке кластеров встречаются кластеры, состоящие из определенного числа частиц, что означает, что эти кластеры наиболее устойчивы, стабильны. Эти числа называются магическими.

Когда частица металла уменьшается в размерах до нескольких сотен атомов, плотность состояний (количество энергетических уровней в заданном интервале энергий) в зоне проводимости радикально меняется. Непрерывная плотность состояний в зоне заменяется набором дискретных уровней. Данный эффект получил название квантового размерного эффекта – при уменьшении размера наночастиц энергия между энергетическими переходами, а значит и энергия квантов излучения увеличивается. Кластеры разных размеров имеют разную электронную структуру и, соответственно, разные расстояния между уровнями.

Многочисленные экспериментальные результаты свидетельствуют о зависимости реакционной способности наночастиц от количества атомов в них. Реакционная способность - характеристика химической активности веществ, учитывающая как разнообразие реакций, возможных для данного вещества, так и их скорость.

В кластере магнитный момент каждого атома взаимодействует с моментами других атомов, что может выстроить все моменты в одном направлении по отношению к какой либо оси симметрии кластера. Такой кластер обладает суммарным магнитным моментом неравным нулю. Однако атомы в кластере колеблются, причем энергия колебаний увеличивается с ростом температуры. Эти колебания вызывают некоторое разупорядочивание магнитных моментов отдельных атомов кластера, так что его полный магнитный момент становится меньше, чем он был бы в случае строго параллельного положения всех атомов. Магнитный момент отдельного кластера взаимодействует с приложенным постоянным магнитным полем таким образом, что его расположение по полю становится более вероятным, чем против поля. Полный магнитный момент обратно пропорционален температуре. Этот эффект называют суперпарамагнетизмом. Когда энергия взаимодействия магнитного момента кластера с приложенным магнитным полем больше энергии колебаний, усреднения из-за осцилляции не происходит, зато происходит усреднение из-за вращения кластера как целого. Такая ситуация называется магнетизмом замороженных моментов.

### 1.2.2. Полупроводниковые наночастицы.

Оптические спектры поглощения существенно сдвигаются в коротковолновую область (голубой цвет спектра) при уменьшении размеров частиц. Это объясняется локализацией связанных электрон-дырочных пар (экситонов), образующихся под действием фотона с энергией больше ширины запрещенной зоны для данного вещества. Возможны две ситуации, называемые режимами слабой и сильной локализации. В режиме слабой локали-



зации радиус наночастицы больше радиуса экситона, но область перемещения экситона ограничена, что приводит к смещению спектра поглощения в голубую сторону. Когда радиус частицы меньше радиуса орбиты электрон дырочной пары, движение электрона и дырки становятся независимыми и экситон перестает существовать. Электрон и дырка имеют собственные наборы энергетических уровней. Это также приводит к голубому смещению и к возникновению нового набора линий поглощения. Таким образом, при уменьшении размеров наночастицы наименьшая энергия поглощения, называемая границей поглощения, сдвигается в сторону больших энергий, щель увеличивается, увеличивается и интенсивность поглощения.

При облучении лучом лазера с модулируемой добротностью наблюдалась фрагментация наночастиц. Фрагментация зависит от размера кластера, интенсивности светового пучка и длины волны. Зависимость сечения фотофрагментации (меры вероятности развала кластера) под действием излучения лазера от размера фрагментов наночастиц показала, что диссоциация частиц одних размеров более вероятна, чем других. Многократная ионизация кластера вызывает его нестабильность, что приводит к очень быстрой высокоэнергичной диссоциации, или взрыву. Скорость разлета фрагментов в этом процессе очень высока. Такое явление называется кулоновским взрывом. Многократная ионизация кластера вызывает быстрое перераспределение зарядов на его атомах, делающее каждый атом более положительно заряженным. Если энергия электростатического отталкивания между атомами становится больше энергии связи, атомы быстро разлетаются друг от друга с большими скоростями. Минимальное количество атомов  $N$ , необходимое для стабильности кластера с зарядом  $Q$ , зависит от типа атомов и природы связи между атомами кластера.

## Практическое занятие № 2 по разделу 1 Введение. Актуальные проблемы получения и производства материалов нанoeлектроники.

### 2.1. Новейшие материалы нанoeлектроники: технологии получения и применение.

Когда академика РАН К.Валиева спросили о том, что будет в развитии электроники после кремния, он ответил: «Кремний – это фундамент микроэлектроники. Я думаю, что кремний будет всегда, по крайней мере, до тех пор, пока совершенно новое не превратит кремниевые СБИС (сверхбольшие интегральные схемы) в изделия «каменного века» [3].

Среди современных, альтернативных кремнию, материалов полупроводниковой электроники, можно особо выделить **молибденит** – дисульфид молибдена  $\text{MoS}_2$ , английское название: Molybdenite. В природе встречается в виде минерала. В полупроводниковой электронике, в ранней радиотехнике природные кристаллы молибденита, наряду с кристаллами галенита, сульфида свинца  $\text{PbS}$ , использовались в кристаллических детекторах в радиоприемных устройствах.



Рис.1.4. Природный кристалл молибденита.

Древние греки минерал сульфида свинца (галенит), называли «молибдена». Молибденит очень похож на галенит. В результате два разных минерала не различали, принимая за один и тот же, не только древние греки, но и химики 18 века. Поэтому, когда в 1778 году шведский химик Карл Вильгельм Шееле обнаружил в минерале «молибдена» новый элемент, он ошибочно назвал его «молибдос» (Mo), что в переводе означает свинец. Хотя на самом деле это не был свинец (Pb). Впоследствии в названии минерала сульфида свинца перешли с греческого («молибдена») на латынь («галена»), а за минералом состава MoS закрепилось название молибденит.

Кристаллическая сингония молибденита гексагональная, в его химическом составе возможны рений Re и селен Se, поэтому молибденит служит рудной основой для добычи этих элементов. По гексагональной форме и низкой твёрдости молибденит можно спутать с графитом. Различают их так: при растирании черты молибденита она приобретает зеленоватый цвет, а черта графита остаётся серой. У галенита кубическая форма кристалла, а удельный вес и твёрдость выше, чем у молибденита.

В 2011 году ученые из Швейцарии, из Федеральной политехнической школы города Лозанны (Ecole Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL)) объявили, что в их Лаборатории нанoeлектроники и наноструктур создана интегральная электронная схема, в которой, вместо обычного для современной электроники кремния, применен дисульфид молибдена. Молибденит имеет ширину запрещенной зоны, характерную для полупроводников, 1,8 эВ [4]. Это полупроводник, идеально подходящий для изготовления транзисторов: по некоторым своим характеристикам он потенциально превосходит кремний, а по нескольким параметрам – даже такую «экзотику», как графен.

Директор лаборатории нанoeлектроники и наноструктур Андрас Кис рассказал о новой разработке: «Мы сделали первый прототип, он состоит всего из нескольких типовых транзисторов, но при этом способен произво-

дить бинарные логические операции, а это значит, что мы сможем сделать большие, намного более сложные, чипы» [5].

Важным достоинством дисульфида молибдена по сравнению с кремнием является его двумерная структура, тогда как кремний образует объемные кристаллы. Двумерная структура позволяет легко формировать тонкие пленки толщиной  $6,5 \text{ \AA}$  (0,65 нм), в которых подвижность электронов при комнатной температуре  $200 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$  соответствует подвижности электронов в слое кремния толщиной 2 нм [4].

Преимущества молибденита проявляются в связи с дальнейшей миниатюризацией кремниевых чипов и отдельных их элементов, таких как транзисторы. Слой кремния невозможно сделать тоньше двух нанометров – иначе он начинает окисляться, что резко снижает его электронные качества. Интегральная схема из молибденита стабильно работает даже при толщине в три атома, что потенциально позволяет делать гораздо более миниатюрные чипы. Транзисторные  $\text{MoS}_2$ -ключи могут переключаться быстрее, чем кремниевые. По механическим качествам молибденит представляется весьма привлекательным материалом для использования в гибкой электронике, из него можно создавать целые «простыни» из микрочипов, которые впоследствии будут использовать, например, для производства компьютеров, сгибаемых в трубку, или для приборов, наносимых непосредственно на человеческую кожу.

Испытания молибденитового микрочипа подтвердили прежние предположения сотрудников Лаборатории нанoeлектроники и наноструктур о том, что молибденитовая электроника способна преодолеть физические ограничения, наложенные на кремниевую в отношении таких характеристик, как миниатюризация, электропотребление и механическая гибкость.

На рис.1.5 показан полевой транзистор со сверхмалым энергопотреблением – транзисторы, произведённые из молибденита, в неактивном состоянии потребляют в 100 тысяч раз меньше энергии, чем транзисторы из традиционного кремния.

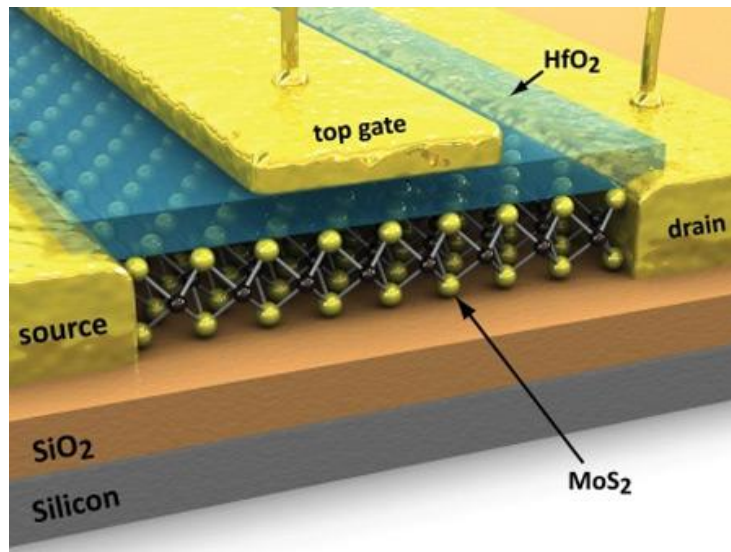


Рис.1.5. Молибденитовый полевой транзистор: «source» – «исток», «drain» – «сток», «top gate» – «затвор»,  $\text{HfO}_2$  – диэлектрик оксид гафния.

Канал транзистора из дисульфида молибдена сформирован на подложке из оксида кремния и отделен от затвора слоем материала с высокой диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  – диоксид гафния. Об использовании диоксида гафния в качестве диэлектрика вместо традиционного диоксида кремния мы поговорим в следующих главах.

**Графен.** В сентябре 2004 года редакция престижного научного журнала Science, после долгих девяти месяцев доработки, приняла к публикации статью авторов Гейма и Новоселова (Department of Physics, University of Manchester) и их соавторов из Манчестерского университета, а также тех соавторов, кто работает в России (Институт проблем технологии микроэлектроники АН СССР, Черноголовка) [6]. Наиболее существенной частью этой работы были электрические измерения по влиянию электрического поля на свойства двумерного слоя углерода, то есть слоя, толщиной в один атом, но имеющего длину и ширину. Такой атомарный слой углерода в свое время получил название графен, а результаты работы 2004 года [6] послужили основой для Нобелевской премии по физике 2010 года для Андрея Гейма совместно с Константином Новосёловым [7].

Впервые в чистом виде графен получен всего лишь около семи лет назад, поэтому подавляющее большинство публикаций о графене, как в отечественной, так и в мировой научной прессе в целом пока связано преимущественно с экспериментами и исследованиями лабораторного уровня.

В лабораторных условиях графен можно получить простым способом. Высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ) – это стандартно используемый материал для сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), где образец со свежей поверхностью обычно готовится путём отслаивания верхнего слоя графита с помощью липкой ленты [7].

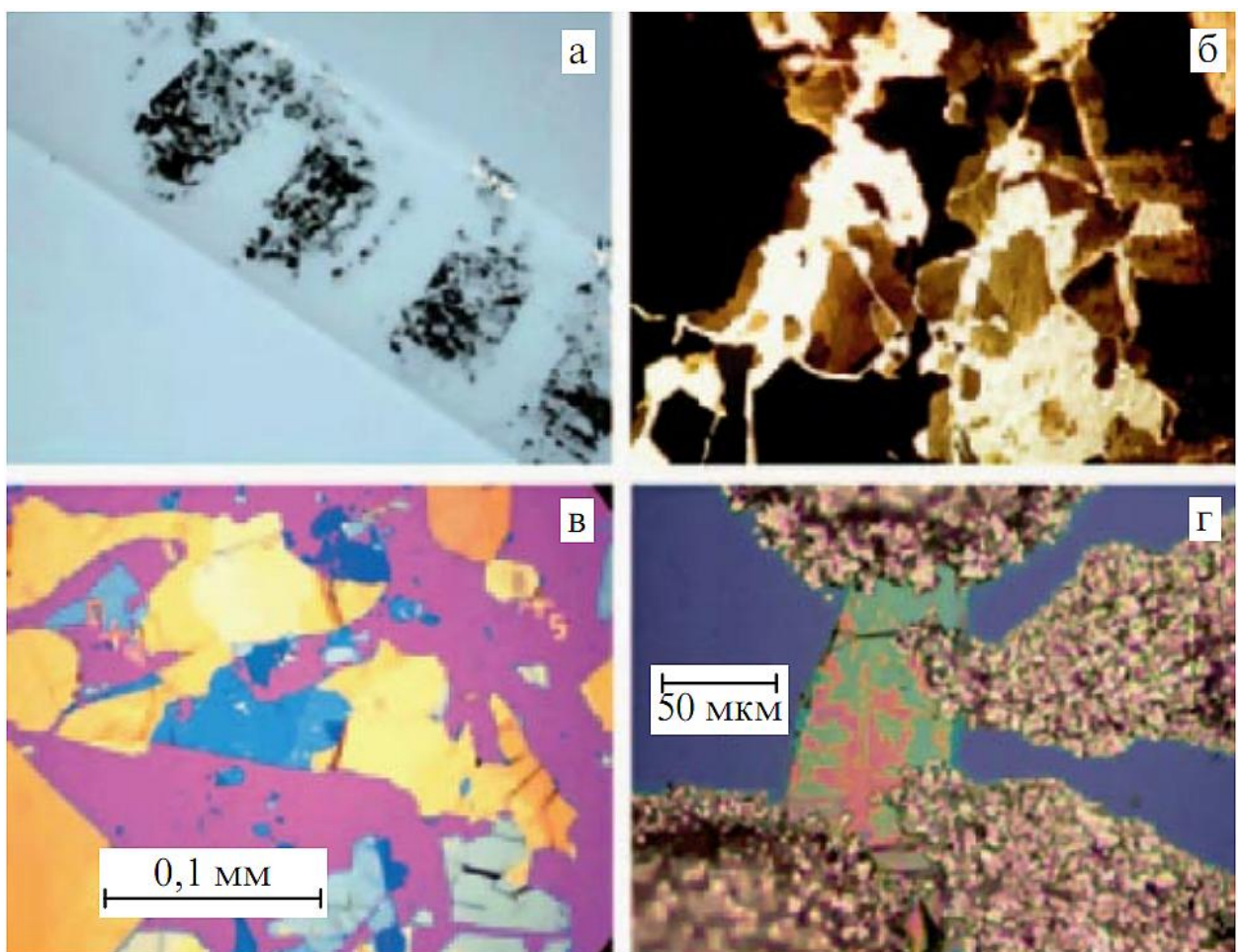


Рис.1.6. (а) Следы ВОПГ, оставшиеся на скотче. (б) Некоторые кристаллики оптически прозрачны, если взглянуть на них через оптический микроскоп или даже через увеличительное стекло. (в) На подложке из оксида кремния светопроницаемые кристаллики дают различные оттенки голубого цвета. (г) Одно из самых первых устройств, изготовленное вручную в лабораторных условиях с помощью пинцета, зубочистки и серебряной пасты для электрических контактов [7].

А.Гейм говорит «Мы годами использовали эту технику, но никогда внимательно не смотрели на то, что же мы выбрасываем вместе с лентой» [7]. Когда остатки графита на скотче были рассмотрены в микроскоп, то были обнаружены фрагменты очень малой толщины (рис.1.6), некоторые из чешуек были толщиной всего в несколько нанометров [7].

На рис.1.6г показано одно из первых лабораторных устройств. В центральной части находится кристалл графита толщиной  $\sim 20$  нм, а его поперечный размер соизмерим с диаметром человеческого волоса,  $\sim 50$  мкм. К кристаллу изготовлены четыре близко расположенных контакта с помощью серебряной пасты. В самом первом образце, сделанном вручную на стекле, ясно проявился эффект электрического поля (ЭЭП), который заключался в том, что сопротивление образца можно было изменять на несколько процентов. Это было первое существенное достижение. Если эти устройства примитивного вида, сделанные вручную из относительно больших и толстых пластинок, уже демонстрируют некоторое влияние внешнего поля, то, если использовать самые тонкие кристаллы и применить весь арсенал технологического оборудования результаты будут еще лучшими [7].

В работе 2004 г. [6] впервые был показан амбиполярный эффект электрического поля, при котором сопротивление графенового образца меняется приблизительно в 100 раз. Свойства графена можно изменить простым изменением напряжения на затворе. Графен можно перестраивать из состояния, близкого к нормальному металлу с концентрацией электронов  $\sim 10^{21} \text{ см}^{-3}$ , до металла с такой же концентрацией дырок, т.е. можно проделать весь путь, минуя «полупроводниковое» состояние с невысокой концентрацией носителей заряда [7].

За период с 2005 по 2010 год в лаборатории Гейма выполнен цикл приблизительно десятка научных работ [7], из которых установлены важные свойства графена, как материала, пригодного для современной полупроводниковой электроники. В физике полупроводников качество электронных свойств определяется подвижностью носителей заряда  $\mu$ . В работе [6] для



графена при комнатной температуре приводится значение  $\mu = 10000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$ . Такая большая подвижность носителей заряда (а для электронов это самая большая подвижность среди всех известных материалов) делает его перспективным материалом для самых разнообразных применений, как основу наноэлектроники [8], например, или замену кремния в микросхемах в будущем.

Элементарная частица вещества в общем случае называется фермион. Примеры фермионов – кварки, лептоны и дырки в полупроводнике. Из интересных для электроники фермионов можно выделить электроны, которые относятся к лептонам.

Выяснилось, что электроны в графене ведут себя как релятивистские частицы без массы, так называемые безмассовые фермионы Дирака, передвигаясь с максимально возможной для среды скоростью, что для графена приблизительно  $10^6 \text{ м/с}$ ., поэтому их движение нужно описывать не стандартным уравнением Шрёдингера, а уравнением типа уравнения Дирака. Электрическое напряжение, приложенное к подложке, на которой находится графен, создаёт носители заряда – электроны либо дырки, что зависит лишь от знака напряжения.

У графена отсутствует запрещенная зона – энергетический зазор запрещенных энергий между валентной зоной и зоной проводимости. Установлено, что графен остаётся металлическим в пределе отсутствия носителей заряда, даже тогда, когда в устройстве микронных размеров остаётся всего лишь несколько электронов. Предложено использовать графеновые устройства для регистрации туннелирования Клейна – эффекта, известного в квантовой электродинамике на протяжении многих десятилетий, но считавшегося ненаблюдаемым, пока несколько групп не продемонстрировали эффект экспериментально.

В двухслойном графене электроны приобретают новый облик, становясь теперь *массивными* дираковскими фермионами, то есть имеет конечную массу. Эти свойства раскрылись при обнаружении двух новых типов цело-



численного квантового эффекта Холла, соответствующих двум типам дираковских фермионов. Установлено, что двухслойный графен это полупроводник, причем с управляемой запрещённой зоной и что из графена можно точно вырезать нанометровые устройства [7].

## **2.2. В направлении к графеновой электронике**

Известно, что современная микросхема изготавливается на пластинке кремния, причем, чем больше таких пластинок умещается на одной пластине, вырезанной из выращенного слитка кремния, тем лучше для массовости производства микросхем, снижения их себестоимости. Поэтому требовалось и требуется получение кремниевых слитков и, соответственно, пластин из них, большого диаметра, чем больше, тем лучше. Это же относится и к другим перспективным материалам полупроводниковой электроники, например, к арсениду галлия, и само собой, к графену.

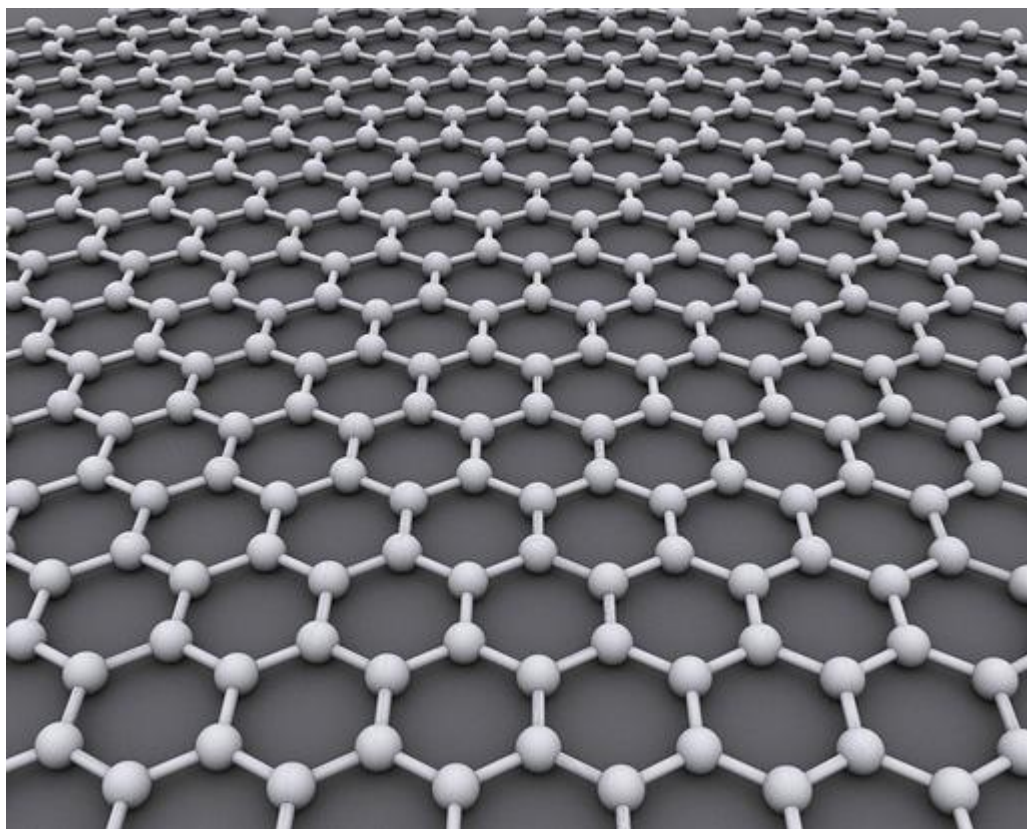


Рис.1.7. Графен представляет собой гексагональную решетку из атомов углерода толщиной в один атом.

Источник фото:

[[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2010/graphen\\_photo.jpg](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/graphen_photo.jpg)].

Изготовление графеновых пластин, на базе которых становится возможным массовое производство графеновых полупроводниковых изделий, связано с определёнными сложностями, прежде всего, с его уникальной одноатомной толщиной. Методы создания пластинок небольшой площади, достаточные для лабораторных опытов, совсем не подходят для промышленных масштабов: одно дело, фигурально выражаясь, послойно отдирать скотчем крохотные пластинки хаотично напластованного графена от графита, и совсем другое дело – получать пластины диаметром в десятки и сотни миллиметров с чётко ориентированными слоями графена.

Массовое производство интересует поточный и, по возможности, недорогой метод получения исходного материала высокой чистоты. К настоящему времени известно несколько методов получения графеновых пластин, в определенной мере удовлетворяющих потребностям электронной промышленности.

- 1) Классический метод химического осаждения углерода из распылённого газообразного состояния. Разработан в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology) под руководством профессора Джинг Конга (Jing Kong). Ипользуется оборудование, схожее с применяемым в обычном полупроводниковом производстве [9]. Метод недорог и вполне пригоден для коммерческого внедрения, возможно, что для специфических приложений – например, для производства чипов, установку придётся доработать для повышения качества и однородности получаемых на выходе листов графена. Тем не менее, уже в нынешнем виде установка вполне годится для получения графена для таких приложений как электроды солнечных батарей [10] .
- 2) Химическое осаждение из газовой фазы в парах метана и водорода на медную фольгу. Разработан коллективом ученых из Техасского университета в Остине (The University of Texas at Austin) и из компании Texas Instruments [12].

Успешно получены графеновые плёнки, перенесённые на обычную кремниевую пластину с верхним слоем диоксида кремния. Именно синтез графена на кремниевых подложках методами, совместимыми с традиционными технологическими процессами полупроводниковой индустрии считается основой будущего нанoeлектроники. Выращены графеновые пластины площадью 10 x 10 мм на медной фольге, однако, размер графеновых пластин теоретически ограничен лишь возможностями использовавшегося оборудования, а именно обжиговой печи.

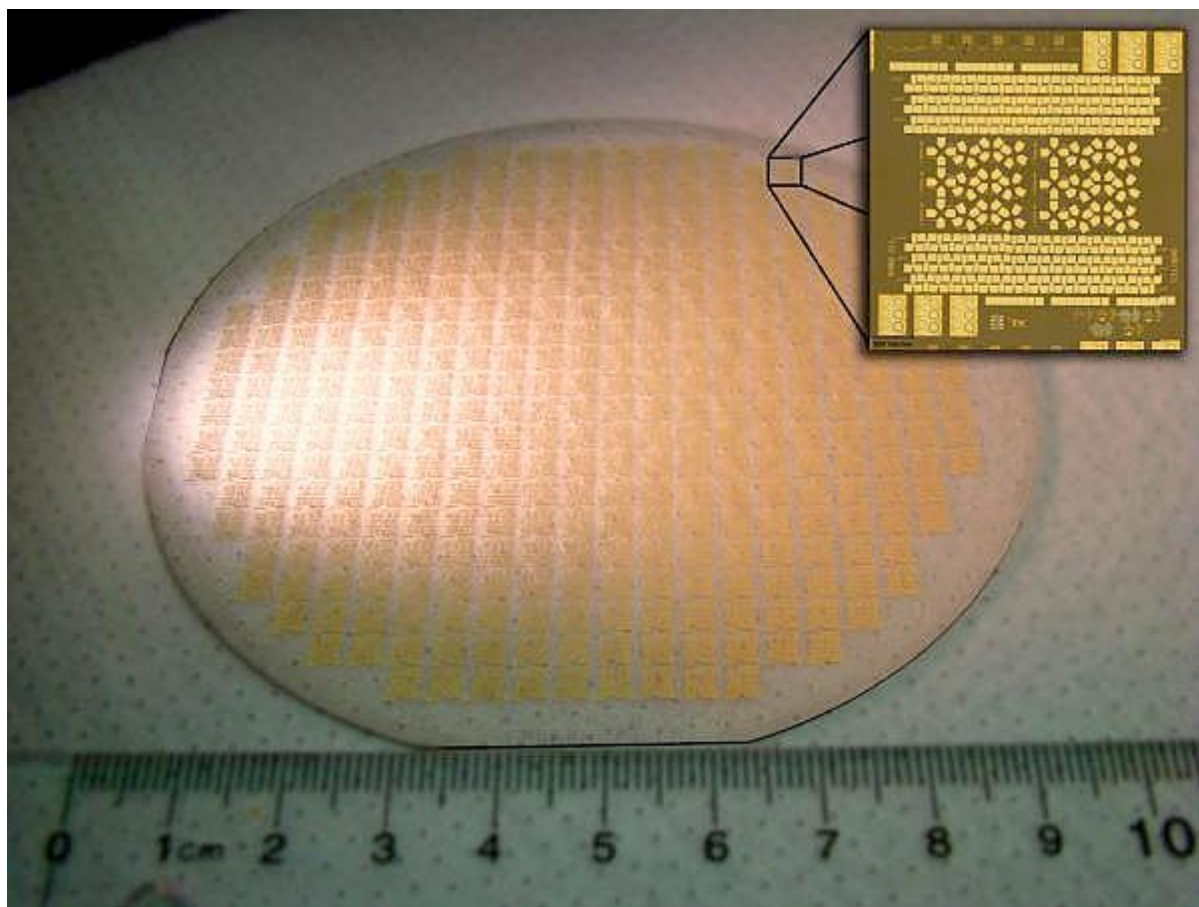


Рис.1.8. 100 мм пластина графена, содержащая приблизительно 75 000 устройств и тестовых структур. На вставке – оптическое изображение одного чипа. Каждый маленький квадрат на чипе составляет всего 100 мкм - толщина человеческого волоса. Устройства были изготовлены на Penn State Nanofab, учреждение Научно-исследовательского института материалов. (Фото: Джошуа Робинсон) [12].

Полученные в результате экспериментов образцы площадью 1 квадратный сантиметр почти полностью покрыты слоем мономолекулярного гра-

фена; лишь малая площадь – менее 5%, покрыта двухслойными и трёхслойными «напластованиями». На основе полученных графеновых пластин были созданы 2-затворные полевые транзисторы с находящимся сверху затвором, электрически изолированным от графена тончайшим слоем окиси алюминия. Определение подвижности носителей полученных таким образом транзисторов показало результаты, значительно более высокие нежели у традиционных кремниевых полупроводников – более  $4050 \text{ см}^2/\text{Вс}$ .

3) Процесс кремниевой сублимации карбида кремния. Разработан в Электрооптического Центре (Electro-Optics Center, EOC) при кафедре материаловедения Пенсильванского университета (Pennsylvania State University).

Впервые изготовлена графеновая пластина диаметром 100 мм (4 дюйма). При термической обработке пластины карбида кремния в высокотемпературной печи, после полного удаления кремния, на поверхности остаётся слой плёнки из углерода толщиной в один-два атома, что, по сути, и является пластиной самого настоящего графена [12].

Достижения учёных из EOC можно назвать серьёзной вехой на пути развития графеновой электроники в направлении массового производства. Даже 4-дюймовые графеновые пластины могут со временем стать основой для производства различных электронных компонентов. Так, исследователи из EOC уже в самое ближайшее время планируют начать исследования высокочастотных полевых транзисторов, производимых на 100-мм графеновых пластинах таким "полупромышленным" способом.

Благодаря тому, что электроны могут двигаться в графене с очень высокой скоростью (значительно большей чем в кремнии), графеновая электроника изначально сулит появление терагерцовых процессоров, скорость которых теоретически сможет превышать современные кремниевые полупроводники на пару порядков. Однако технологам придется еще поработать над чистотой и однородностью получаемых графеновых пластин, поскольку именно от этого в первую очередь зависит возможность достижения предельных тактовых частот получаемых полупроводников.

- 4) Метод синтеза графена на кремнии. Находится в разработке в Электрооптического Центра (Electro-Optics Center, EOC) при кафедре материаловедения Пенсильванского университета (Pennsylvania State University).

В случае успеха это позволит производить пластины диаметром 200 мм и более, а, значит, плавно интегрировать процессы производства графеновых полупроводников в уже существующую инфраструктуру полупроводниковой индустрии.

### **2.3. Высокоскоростные графеновые транзисторы**

В работе [52] усовершенствовали технологию создания полевых транзисторов на основе графена в планарной конфигурации и исследовали зависимость основных характеристик таких устройств при различной ширине затвора. Проведя измерения выходных характеристик устройства с шириной затвора 360 нм (зависимости тока стока от напряжения сток-исток  $V_{DS}$ , крутизны характеристики прямой передачи от  $V_{TG}$  и S-параметров от частоты), была построена зависимость коэффициента усиления по току для полевого транзистора, при этом критическая частота составила всего 4 ГГц. В подтверждение правильности полученных результатов учёные построили зависимость критической частоты от крутизны характеристики прямой передачи, которая оказалась линейной. Это характерно для полевых транзисторов. Измерения, проведённые на полевых графеновых транзисторах с различной шириной затвора, показали, что для ширины затвора  $L_G = 150$  нм критическая частота составляет 26 ГГц, а сама зависимость  $f_T$  от ширины затвора представляет собой квадратичную гиперболу.

Учёные считают, что полученные результаты – не предел для электроники, основанной на графеновых транзисторах, и при соблюдении некоторых технических тонкостей (например, сохранении высокой подвижности носителей заряда при производстве таких транзисторов) можно достичь терагерцовых частот.

При этом из графена можно собирать микрочипы по обычной, отработанной годами планарной технологии, ныне применяемой при создании микросхем на основе кремния. А благодаря двумерной структуре графена, управляющий ток может быть легко увеличен за счёт изменения ширины проводящего канала [52]. В заключение отметим результаты работы [53], в которой испытан скоростной графеновый транзистор с рекордно высоким для транзисторов на базе графена быстродействием и расширенным диапазоном рабочих температур.

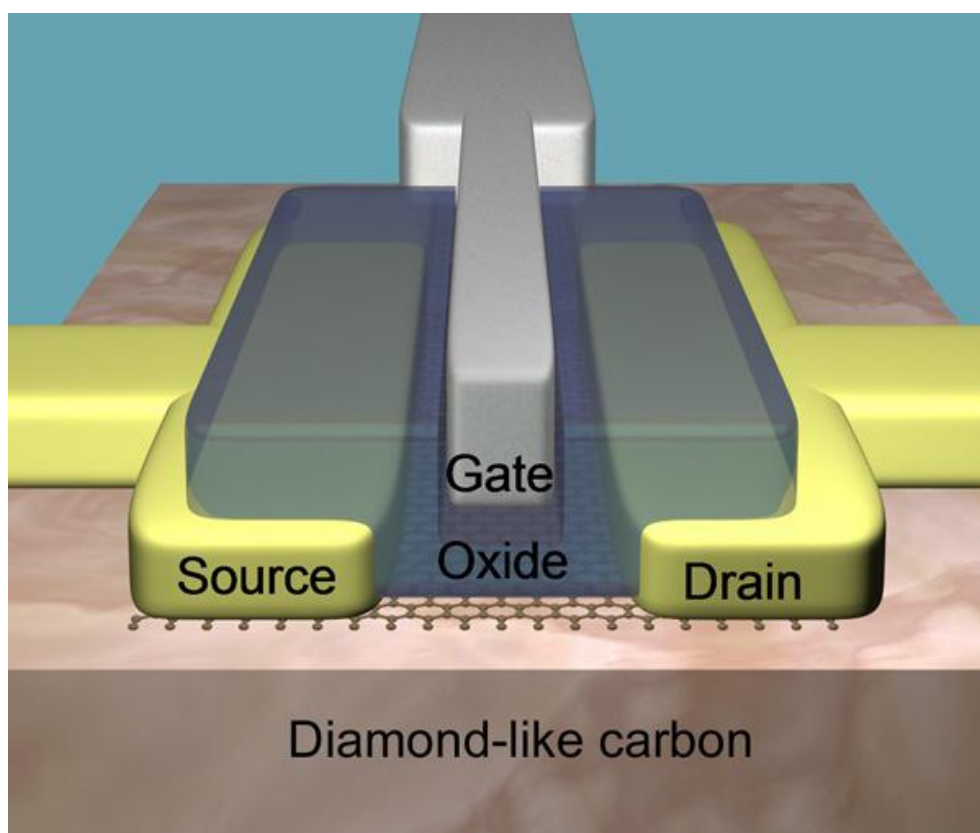


Рис.1.9. Принципиальная схема графенового транзистора на алмазоподобной подложке (фото: P Avouris) [53].

Благодаря хорошей подвижности носителей заряда графен заслужил репутацию перспективного материала для электроники. Однако когда графеновый лист размещают на диэлектрической подложке (обычно – на диоксиде кремния), подложка влияет на поведение одноатомного листа углерода, создаёт эффект рассеивания носителей заряда. Учёные из исследовательского центра Уотсона (IBM Thomas J. Watson Research Center) решили эту пробле-

му. При помощи химического осаждения из пара они сначала создали на медной плёнке лист графена, а затем перенесли его на подложку из алмазоподобного углерода, в свою очередь расположенную на традиционной для электроники кремниевой пластине – рис.1.9.

На этой базе исследователи построили полевой транзистор с затвором длиной всего 40 нанометров (рис.1.9.). На испытаниях прибор показал очень высокую частоту среза – 155 гигагерц.

Кроме того, авторы прибора проверили его функционирование при криогенных температурах и выяснилось, что новый графеновый транзистор хорошо себя чувствует вплоть до температуры в 4,3 кельвина.

При этом отмечается, что качество использованного графена было не самым высоким, так что достигнутые показатели не предел для новой технологии.

## **2.4. Эффективные транзисторы на основе графеновых полос.**

Изучите следующие первоисточники:

1. Zhihong Chen, Yu-Ming Lin, Michael J. Rooks, Phaedon Avouris Graphene Nano-Ribbon Electronics / Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures, Vol. 40/2, pp 228-232 (2007) [Электронный ресурс] URL: <http://arxiv.org/pdf/cond-mat/0701599> (дата обращения 23.08.2013)

2. Графеновые наноленты / [Электронный ресурс] Словари и энциклопедии на Академике URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/584762> (дата обращения 23.08.2013)

3. Кривецкий В. Графен разбит на лоскуты [Электронный ресурс] «Газета.Ру». Наука→Технологии URL: [http://www.gazeta.ru/science/2008/02/06\\_a\\_2626309.shtml](http://www.gazeta.ru/science/2008/02/06_a_2626309.shtml) (дата обращения 23.08.2013)

Теоретические выкладки показывают, что, нарезав графеновый лист в длинные тонкие полосы, можно значительно повысить соотношение проводимости закрытого и открытого состояния транзисторов. Дай (Hongjie Dai) обратился к привычным методам мокрой химии, и удача улыбнулась ему. В качестве исходного материала в своей методике он использовал хлопья гра-



фита, которые, как мы уже упоминали, состоят из сложенных в пачку графеновых листов. Затем он подверг их химическому воздействию серной и азотной кислот. В ходе этого процесса происходит внедрение (специалисты употребляют термин «интеркаляция») молекул кислотных остатков в межслоевое пространство. Такая возможность внедрения посторонних молекул и атомов в структуру графита обусловлена довольно большим и, кроме того, варьируемым расстоянием между слоями в кристаллической структуре этого углеродного материала. Она используется, в частности, в производстве аккумуляторов для автономных электронных устройств. В дальнейшем Дай подверг интеркалат (продукт интеркаляции) быстрому нагреванию до очень высоких температур (500—700°C), в ходе которого происходит стремительное испарение кислотных молекул, разрывающее хлопья графита на отдельные листы графена и расширяющее графит в сотни раз. Стоит отметить, что данная технология не нова, и терморасширенный таким образом графит широко используется в производстве огнеупорных красок и уплотнительных материалов. Дай далее приготовил взвесь из разодранного на куски графита и подверг её воздействию ультразвука. Эти звуковые волны окончательно разъединяют графеновые листы, однако, как оказалось, на выходе получились не отдельные хлопья графена, но узкие и очень длинные графеновые полосы. Эти полосы различаются между собой по размерам и ширине, однако их края очень гладки, что означает возможность получения подходящих и воспроизводимых свойств построенных на базе этих лент транзисторов.

Созданные Даем на основе этих полос транзисторы продемонстрировали необычайно высокое соотношение проводимости между открытым и закрытым состоянием — более чем 100000/1 — весьма привлекательное для микроэлектронной промышленности. Прежние достижения с использованием графена не превышали 30/1.



## **Практическое занятие № 3 и №4 по разделу №2 Актуальные проблемы нанoeлектроники.**

### **3.1. Проблемы на пути перехода от микро– к нанoeлектронике**

В производстве микропроцессоров переход к технологии 90 нм – это переход к нанотехнологиям. За истекшие 44 года скептики сотни раз предсказывали закону Мура скорую «кончину», однако ученые и инженеры своими открытиями и неустанным трудом снова и снова подтверждали провидческий дар и безупречность выводов одного из основателей корпорации Intel. Закон Мура продолжает действовать и в полном соответствии с ним Intel продолжает вводить новые технологические процессы каждые два года.

В 2005 году началось производство чипов по технологии 65 нанометров, в 2007-м был осуществлен переход на 45-нанометровый процесс, 2009 г. – внедрение 32-нанометрового, а в 2011 году - 22 нм.

При уменьшении топологических размеров элементов интегральной электроники возникают следующие основные проблемы [14, 15]:

#### **1) Проблема с проводящими фрагментами интегральных приборов.**

Традиционно использующийся алюминий при малой толщине полупроводника или металла термодинамически несовместим с используемым диэлектриком, двуокисью кремния. Необходима замена алюминия на материал с более высокой проводимостью.

#### **2) Проблема подзатворного диэлектрика полевых транзисторов.**

Как известно, полевой транзистор состоит из полупроводникового канала, образованного областями (электродами) стока и истока, и управляющего электрода – затвора, отделенного от канала подзатворным диэлектриком (см., например, рис.1.5). В приборах наноразмера необходимо применять материал с большим значением диэлектрической постоянной, чем у диоксида кремния. Действительно, уже при 65 нм технологии толщина подзатворного диэлектрика составляет 1,2 нм (всего лишь 5 атомных слоев кремния) и даль-

нейшее ее уменьшение неизбежно приводит к катастрофическому росту токов утечки. Чтобы с одной стороны избежать этой утечки, а с другой стороны сохранить емкость материала, ведь именно электрическая емкость определяет скорость переключения транзистора, необходимо перейти на какой-то другой материал, который с одной стороны чуть-чуть потоньше, но при этом имеет схожую емкость.

### 3) **Проблема диэлектрика–изолятора в металлической разводке проводящих фрагментов.**

Изолятор должен иметь меньшее значение диэлектрической постоянной.

Рассмотрим по-порядку все вышеуказанные проблемы перехода к наноэлектронике.

Проблема новых высокопроводящих слоев. Для формирования проводящих слоев, пригодных в технологии приборов высокого уровня интеграции применялись различные варианты метода химического осаждения из газовой фазы с использованием летучих металлоорганических соединений: импульсный MOCVD (metalorganic chemical vapour deposition), CVD (chemical vapour deposition) с ультрафиолетовой (УФ) стимуляцией и атомное послойное нанесение ALD (atomic layer deposition).

Были получены как металлические пленки и покрытия Ir, Ru, Cu, Au, так и наночастицы Au, Cu. В качестве исходных соединений для осаждения металлических слоев рутения, иридия и меди были использованы летучие комплексы металлов с бета-дикетонатными производными, для осаждения пленок и наночастиц золота – карбоксилаты и салицилальдиминаты диметил-золота. Для исходных прекурсоров были разработаны методы синтеза с высоким выходом конечных продуктов, исследованы термические свойства и определены режимы осаждения [14].

По проблеме №2, подзатворный диэлектрик, таким новым подходящим материалом оказался оксид гафния и исследования были направлены на создание тонких слоев диэлектрика на основе  $\text{HfO}_2$ , например, можно привести работы лабораторий Института неорганической химии им. А.В. Нико-

лаева СО РАН, г.Новосибирск [14] и лабораторий Intel [15]. Выбор этого вещества определяется его характеристиками – высокая диэлектрическая константа ( $\sim 25$ ), большая ширина запрещенной зоны ( $\sim 5,6$  эВ). Слои приготавливались осаждением из газовой фазы с использованием в качестве исходных веществ дипивалоилметаната гафния,  $C(CH_3)_3COCHCO(CH_3)_3$ , и дициклопентадиэнил гафний бисдиэтиламина,  $(C_5H_5)_2Hf(N(C_2H_5)_2)_2$  [14]. Важными проблемами, которые нужно было решить, являлись стабильность композиции  $HfO_2/Si$  и достаточно высокие пробивные напряжения образующихся слоев диэлектрика.

Для решения первого вопроса был проведен термодинамический анализ системы  $Hf-Si-O$ . Анализ построенной по результатам расчетов фазовой диаграммы системы позволяет заключить, что стабильными композициями в данной системе являются  $Si/HfO_2$ -у или  $Si/HfSiO_4/HfO_2$ -у. Последняя структура должна образовываться при повышенном давлении кислорода или при наличии пленки оксида кремния на исходной кремниевой подложке. Т.о. термодинамический анализ свидетельствует о совместимости оксида гафния с кремнием [14].

Технологи отказались от традиционного материала диэлектрика – диоксида кремния – и перешли к новому компоненту с существенно большей диэлектрической проницаемостью (high-k) – оксиду гафния. Это позволило достичь требуемой емкости при приемлемых толщинах диэлектрика.

Емкость плоского конденсатора определяется выражением  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ ,

где  $S$  – площадь обкладки конденсатора,  $d$  – толщина диэлектрика,  $\varepsilon$  – диэлектрическая постоянная (символ "k" (фактически, греческая буква «каппа»), отсюда термин high-k). При переходе к подзатворному диэлектрику из оксида гафния толщина диэлектрика увеличивается в 2,5 раза, следовательно емкость уменьшается относительно традиционного случая с  $SiO_2$  тоже в 2,5 раза и это ухудшает свойства транзистора.

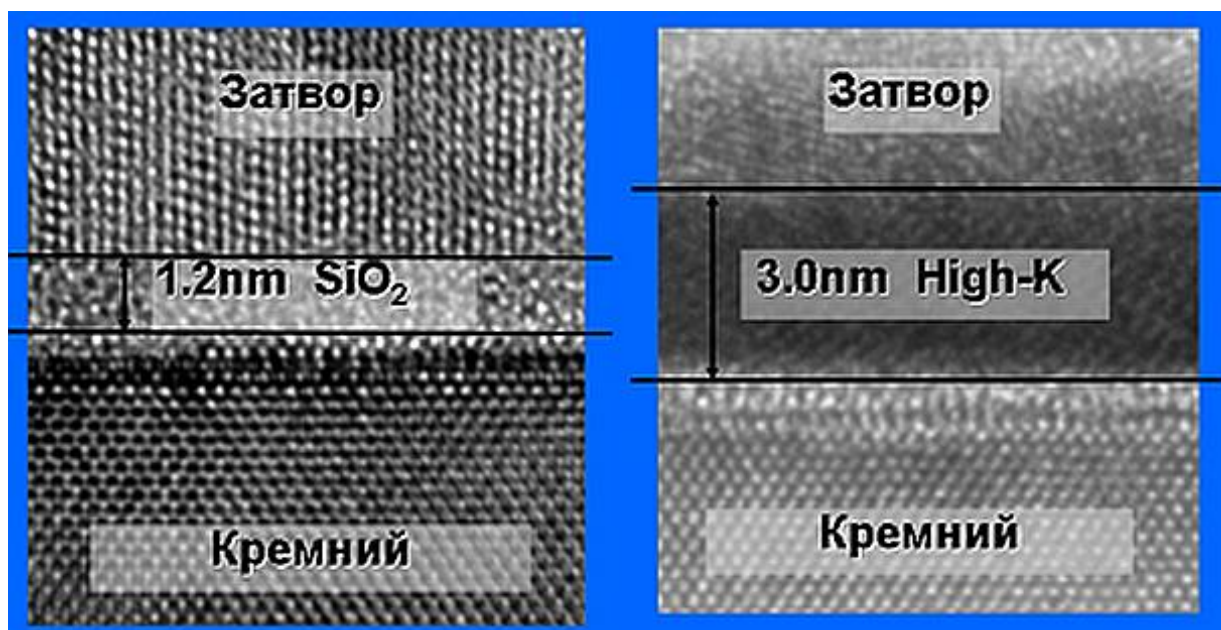


Рис.2.3. Структура полевого транзистора с разным подзатворным диэлектриком: диоксид кремния  $\text{SiO}_2$  (слева) и оксид гафния  $\text{HfO}_2$  (справа).

Но диэлектрическая постоянная  $\text{HfO}_2$   $\epsilon=20$  и гораздо больше, чем у  $\text{SiO}_2$ ,  $\epsilon=4$ , так что в целом емкость новой структуры возрастает в 2 раза, токи утечки снижаются и получается эффект улучшения. Это был столь существенный технологический скачок, что Гордон Мур написал: «Реализация high-k... означает наиболее революционное изменение в технологии со времени изобретения MOS-транзисторов с поликремниевыми затворами в конце 60-х годов».

Проблема №3, диэлектрик–изолятор в металлической разводке. В качестве нового диэлектрика рассматривались карбонитриды бора и кремния. По литературным данным эти материалы обладают при некоторых составах достаточно низкими значениями диэлектрической постоянной для применения в технологии интегральных схем. Показано, что в пленочном состоянии возможно образование материалов со значительным изменением соотношения составляющих элементов. [14]. При работе в указанных интервалах условий оказалось возможным синтезировать слои с широкой вариацией

свойств. В частности можно получать материал с низкими, по сравнению с  $\text{SiO}_2$  значениями диэлектрической постоянной ( $\epsilon=3,0$ ) [14].

Выбранные новые вещества, разработанные методы и выбранные режимы проведения процессов синтеза слоев и структур будут полезны для продления действия закона Мура, для дальнейшей миниатюризации кремниевых приборов. Ожидается, что этот процесс будет продолжаться еще приблизительно 10 – 15 лет. Можно ожидать, что дальнейшее увеличение плотности размещения элементов и рост производительности интегральных схем не прекратится и после достижения физического предела кремниевой электроники. В настоящее время уже создаются заделы будущих устройств и технологий. Перспективными в этом отношении являются различные объекты: углеродные (а возможно и другие) нанотрубки, супрамолекулярные соединения.

Вероятней всего, что приборы следующих поколений будут гибридами, построенными из фрагментов, применяемых в нынешней полупроводниковой электронике, и новых элементов. Очевидно, что преобладающим подходом будет создание устройств путем синтеза из атомов и молекул (down up way). В этом подходе важную роль будут играть различные варианты процессов химического осаждения из газовой фазы (CVD).

#### ***4.1. Новые подходы к созданию электроники наноразмерных элементов и наноструктур***

Вплоть до, приблизительно, 2020 года транзисторы в интегральных наносхемах будут создаваться по современной схеме работы – с двумя электродами и затвором между ними. Ясно, что определенным пределом этой тенденции было бы достижение атомного размера элементов электроники, когда уменьшать их дальше будет невозможно. Следовательно, уже сейчас необходимо искать новые подходы.

Одним из таких новых подходов является организация передачи сигнала с использованием спиновых волн. По мере приближения характерного размера твердотельной структуры электронного прибора к нанометровой области, соизмеримой с размерами атомов, проявляются квантовые свойства электронов. Если в микроэлектронных приборах поведение электрона определялось поведением элементарной частицы, имеющей массу и заряд, то в нанoeлектронных приборах поведение электрона определяется его волновыми свойствами.

В нанoelemente используются уже не электроны, как частицы, переносящие электрический заряд, а их волновые функции. Процессы дрейфа и диффузии, характерные для микроэлектронных элементов, и вовсе отсутствуют в нанoeлектронных элементах. В основе нанoelementов лежат полевые связи, сформированные потенциальные барьеры. «Вход» и «выход» элемента локализованы не в пространстве, а во времени. В нанoeлектронных структурах определение «входа» или «выхода» возможно только в определенные промежутки времени, когда существует определенный порог внешних воздействий, соответствующий «входу» или «выходу». Этот промежуток времени получил название рефракторного периода и с его помощью обеспечивается распространение сигнала в определенном направлении. Переход от одного устойчивого состояния наноструктуры в другое происходит через возбужденные неустойчивые состояния.

Вторая чисто теоретическая идея заключается в многократном использовании электронов. В современных архитектурах электроны перемещаются от истока к стоку, а затем теряются. При утилизации электрон просто переносится в другое место, но можно производить множество операций, не теряя электронов [15].

Третья альтернатива – углеродные нанотрубки и кремниевые нанопровода, в которых можно достичь более высокой скорости электронов. Транзисторы, изготовленные из таких материалов, имеют сопоставимые с современными, размеры. Диаметр углеродных нанотрубок составляет 1-2 нм,

но в экспериментальных транзисторах исток и сток расположены по их длине. Это позволяет повысить быстродействие и уменьшить потребляемую энергию, однако размер сильно не сократится. Углеродные нанотрубки, могут найти применение в технологии КМОП (комплементарные металлооксидные полупроводники) не столько для ускорения темпов миниатюризации, сколько для повышения производительности устройств или, возможно, упрощения их изготовления. Даже если для цифровой логики будет изобретено принципиально иное средство перемещения электронов, возможности его масштабирования для повышения плотности и производительности не зайдут много дальше пределов, достижимых технологией КМОП, главным образом, из-за ограничений, налагаемых требованием отвода тепла [15].

Следующий новый подход – производить чипы больших, чем существующие, размеров, наращивая их площадь или строя трехмерные многослойные микросхемы. Технология трехмерной сборки кристаллов (system in package) или 3D сборка является одним из наиболее перспективных методов, позволяющих снижать размеры микросхем за счет повышения плотности упаковки, увеличивать пропускную способность соединений внутри кристалла и уменьшать его энергопотребление.

Трехмерная технология производства позволяет наращивать количество транзисторов на кристалле со скоростью, соответствующей закону Мура, причем позволяет снизить цены в расчете на фиксированное устройство. Вертикальное размещение элементов дает радикальное увеличение плотности и вполне реально способствует многократному сокращению затрат на производство микросхем по сравнению с традиционными микросхемами при той же технологии производства.

Компании Taiwan Semiconductor Manufacturing Corporation (TSMC, [www.tsmc.com](http://www.tsmc.com)) и Matrix Semiconductor ([www.matrixsemi.com](http://www.matrixsemi.com)) в 2001 году первыми представили трехмерную микросхему – это была трехмерная микросхема памяти «Matrix 3-D Memory» – постоянное запоминающее устройство (ПЗУ) с однократной записью. Она изготавливалась по технологии много-

слоистого размещения транзисторов и содержала четыре транзисторных слоя. Впоследствии оказалось, что для массового производства таких устройств нужно преодолеть ряд технологических проблем, которые были преодолены только к 2004 году. Поэтому потенциальный рынок для них относительно узок, но себестоимость вдвое меньше, чем у флэш-памяти. Основные потребители – заказчики, желающие выпускать кристаллы с записями аудио, видео и другими неизменяемыми файлами. Например, производители плееров для детей с записями мультфильмов или производители игровых приставок. Новые микросхемы энергонезависимой памяти совместимы по контактам с кристаллами флэш-памяти с организацией NAND. Благодаря этому карты на основе Matrix 3-D Memory можно устанавливать в разъемы для флэш-носителей разнообразных цифровых устройств (включая фотокамеры, плееры, карманные игровые консоли, персональные электронные секретари, мобильные телефоны и т. д.), применяя их в качестве недорогой альтернативы для однократной записи информации. В начале мая 2005 года Matrix Semiconductor анонсировала новый кристалл трехмерной памяти (имеющей четыре уровня транзисторов) емкостью 1 Гб и размером всего 31 кв. мм (рис.2.4).

В результате применения технологии System-in-Package (SiP) появляется возможность совмещения в одном корпусе произведенных по различным технологиям цифровых и аналоговых схем, памяти и микроэлектромеханических систем. 3D сборка SiP позволяет повысить надежность и продолжить снижение себестоимости микроэлектронных изделий.

В 2008 году мировой рынок 3D сборки составил 1,3 млрд. долларов, а к 2012 году ожидается пятикратный рост объема микроэлектронных изделий, изготовленных с применением технологии 3D сборки, после чего эта технология получит массовое использование. Согласно прогнозам в 2015 году его объем составит 42 млрд. долларов.



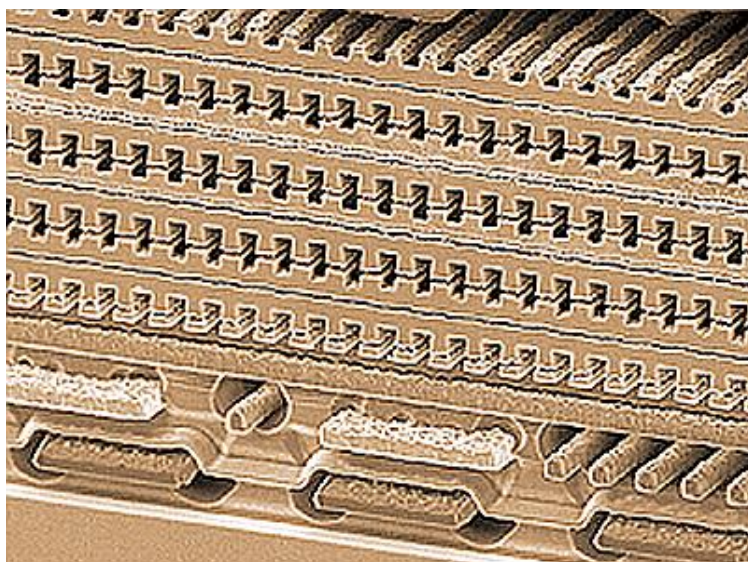


Рис.2.4. Кристалл Matrix 3-D Memory содержит четыре слоя транзисторов

System-in-Package (SiP) - “Система в корпусе” является очередным этапом в повышении степени интеграции стандартных модулей электронных устройств. По-существу, в них используется старая идея гибридных микросхем, однако новые технологии принципиально изменяют методы изготовления таких приборов. Использование “Системы в корпусе” может дать многие преимущества по расширению функциональности и снижению объема, а также дать возможность сократить цикл проектирования в целом.

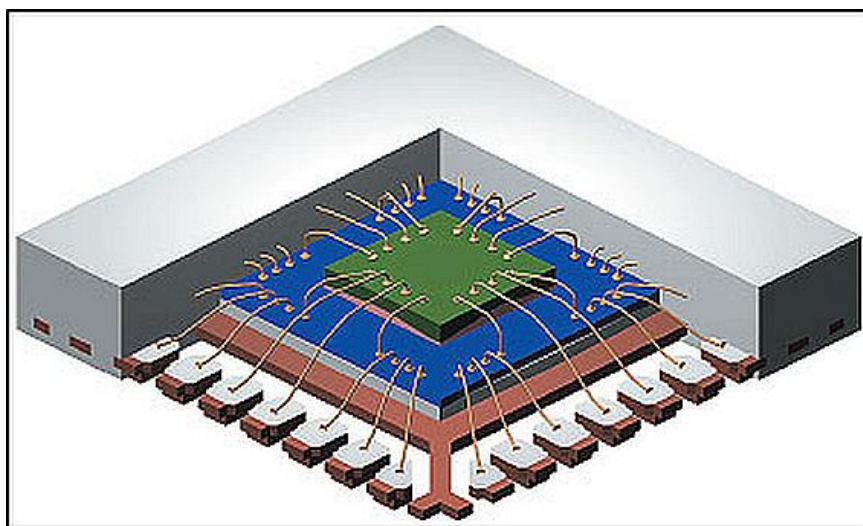


Рис.2.5. Сборка многослойной трехмерной микросхемы.

## **Практическое занятие № 5 по раз- делу №3 Актуальные проблемы создания твердотельных наноструктур и их применение.**

### ***5.1. Квантово-точечные клеточные автоматы и беспроводная электронная логика.***

Потребности в разработке логических устройств для нанокomпьютеров с очень высокой плотностью логических элементов и с максимально возможным низким потреблением энергии на одно переключение привели к предложениям использовать в логических элементах проводящие островки очень малого размера – квантовые точки. В таких приборах для реализации вычислений логических булевых функций используют массивы связанных взаимодействующих квантовых точек. Эти новые приборы называют квантово-точечными клеточными автоматами.

Преимущества логических устройств на основе квантово-точечных клеточных автоматов состоят в том, что по сравнению с аналогичными устройствами на основе полевых транзисторов требуется значительно меньший объем активной области. Например, полный сумматор на основе клеточных автоматов с размером точки 20 нм можно расположить на площади около  $1 \text{ мкм}^2$ , в то время как такую же площадь занимает всего лишь один полевой транзистор. Для построения такого же сумматора на основе полевых транзисторов требуется примерно 40 транзисторов. Если еще учесть области коммутации транзисторов между собой, а они, как известно, занимают объем, сравнимый или даже превосходящий объем, занятый активными приборами, то преимущества использования клеточных автоматов становятся очевидными.

Основу прибора составляет ячейка, состоящая из пяти квантовых точек: четыре точки расположены в углах квадрата, а одна – в его центре. При помощи внешнего напряжения через дополнительный электрод в ячейку вводятся два избыточных электрона и ячейка приобретает элек-

трический заряд. Квантовые точки в ячейке располагаются таким образом, что возможно туннелирование только через центральную точку. Из-за электростатического отталкивания между избыточными электронами вся система будет иметь минимальную энергию только в том случае, если электроны расположатся как можно дальше друг от друга, т. е. в углах квадрата, соединенных диагональю. Поскольку таких возможных положений всего два, то система имеет всего два устойчивых состояния (две поляризации), и, следовательно, одно из этих состояний можно считать логической единицей («1»), а второе — логическим нулем («0»). При переходе системы из одного устойчивого состояния в другое меняются поляризация системы и распределение электрических полей вокруг ячейки. С помощью дополнительных электродов, связанных с ячейкой емкостной связью, можно навязать ячейке необходимое состояние и перевести ее в состояние «1» или «0». Если рядом с первой ячейкой расположить вторую (в которой также находится два дополнительных электрона), то электростатическое поле первой ячейки заставит электроны располагаться так, чтобы обеспечить минимум электростатической энергии всей системы (Рис. 6.4.). Составляя комбинации из расположенных разным образом ячеек, можно реализовать разнообразные логические функции и выполнить необходимые логические преобразования и вычисления. На Рис. 6.5. представлен пример комбинации ячеек, при которой состояние на выходе определяется большинством состояний на входе. Предложены разнообразные комбинации ячеек для реализации логических операций. На основе таких элементов возможно создание нанокomпьютера. Важно отметить, что взаимное расположение ячеек обеспечивает передачу логического сигнала без перемещения зарядов вдоль цепочки — в бестоковом режиме, только за счет передачи вдоль цепочки состояния поляризации.

## **5.2. Нанокomпьютеры.**

Рассмотрим одно из направлений разработки нанокomпьютеров, основанное на теории квантовых вычислений с помощью квантовомеханических логических операций. Устройства, построенные на таком типе вычислений, называются квантовыми компьютерами.

Квантовый компьютер – вычислительное устройство, использующее при работе квантовомеханические эффекты и выполняющее квантовые алгоритмы. Квантовые компьютеры работают на основе квантовой логики.

Идея квантовых вычислений впервые была высказана выдающимся советским и российским математиком Ю.И. Маниным в 1980 году и опубликована в книге Манин Ю.И. Вычислимое и невычислимое. М.: Советское радио, 1980.– 128 с., но активно эта проблема стала обсуждаться после появления в 1982 году статьи американского физика-теоретика Р. Фейнмана. В этих работах было предложено использовать для вычислений операции с состояниями квантовой системы. Каждое состояние квантовой системы, в отличие от классической, может находиться в состоянии суперпозиции. В терминах классического компьютера квантовый бит (кубит) в соответствии с законами квантовой механики может находиться одновременно в двух равновероятных состояниях «0» и «1». Тогда два кубита могут быть уже в четырёх смешанных состояниях – 00, 01, 10 и 11, представляя четыре числа сразу. Видно, что увеличение растёт по степенному закону: на  $m$  кубитах можно выполнять одновременно вычисление над  $2^m$  числами параллельно. Это значит, что, используя всего несколько сотен кубитов, можно представить одновременно больше чисел, чем имеется атомов во Вселенной. Данный факт также позволяет предполагать такое же увеличение скорости вычислений квантового компьютера по сравнению с классическим. Это предположение основано на том, что при квантовых вычислениях элементарным шагом является отдельная операция над  $m$ -

кубитной суперпозицией – принцип квантового параллелизма. Иначе говоря, когда в классическом компьютере вычисляется единственное выходное значение для одного входного состояния, в квантовом компьютере вычисляются выходные значения для всех входных состояний. Иначе говоря, квантовый компьютер может за короткое время решать задачи, с которыми современные компьютеры не могли бы справиться в течение сотен лет. Конечно, на пути практической реализации квантовых компьютеров стоит огромное количество сложнейших теоретических и практических задач. На сегодняшний день предложены варианты конструкции квантовых компьютеров на основе квантовых точек и сверхпроводящих переходов. Более того, есть заявления коммерческих организаций о создании реальных процессоров на базе кубитов, например, компьютер «Ogion». Он основан на микросхеме, содержащей 16 «кубитов» (Рис. 6.6.). Однако здесь необходимо оговориться, что в квантовых компьютерах существуют проблемы, связанные с неоднозначностью интерпретации информации, поэтому заявления о создании квантовых компьютерах ставятся в научном сообществе под сомнение. Каждый такой кубит состоит из частиц ниобия, окруженных соленоидами. По сути, «Ogion» представляет собой аналоговый компьютер, решающий задачи методом физического моделирования. Такой компьютер лучше всего подходит для расчета сложных и занимающих много машинного времени моделей – финансовых, химических или фармацевтических.

**Практическое занятие № 6 по разделу №3 Актуальные проблемы создания твердотельных наноструктур и их применение.**

### ***6.1. Проблема малого отношения токов открытого и закрытого состояний в полевых транзисторах на основе графена.***

Изучите первоисточники:

1. Лозовик Ю.Е., Меркулова С.П., Соколик А.А. Морозов С.В. Новоселов К.С., Гейм А.К. Коллективные электронные явления в графене. Научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук (27 февра-

ля 2008 г.) [Электронный ресурс] Успехи физических наук URL: [http://ufn.ru/ufn08/ufn08\\_7/Russian/conf087.pdf](http://ufn.ru/ufn08/ufn08_7/Russian/conf087.pdf) (дата обращения 22.08.2013)

Графен, представляющий собой двумерный лист атомов углерода в узлах гексагональной кристаллической решетки, обладает множеством уникальных механических и электронных свойств (в том числе высокой подвижностью свободных носителей заряда, а также высокой механической прочностью), у него есть существенный недостаток. Этот недостаток заключается в том, что у «чистого» графена нет разрыва между валентной зоной и зоной проводимости в электронной структуре. Тем не менее, ширина этой «запрещенной зоны» имеет большое значение для электроники, поскольку позволяет материалам «включать» и «выключать» поток носителей зарядов.

Графеновые транзисторы могут переключаться между закрытым и открытым состоянием с невообразимой скоростью, разница в проводимости таких устройств в выключенном и включенном состоянии не слишком высока. Это значит, что в отличие от кремниевых транзисторов, не проводящих ток в запертом состоянии, графеновые все равно будут довольно хорошо проводить электричество. В таком случае микропроцессор, содержащий миллиарды графеновых транзисторов, будет отличаться колоссальными потерями энергии и будет попросту непригодным для практического применения.

На сегодняшний день разработана целая группа методик введения запрещенной зоны в графен для использования этого материала в реальных устройствах. Один из таких способов заключается в создании очень узких графеновых лент. Причем, ширина запрещенной зоны будет в значительной степени зависеть от ширины наноленты.

Из нанoeлектронных приложений графена сейчас наиболее активно рассматривается создание полевых транзисторов, в которых используются

такие свойства графена, как высокая подвижность носителей и легкость обработки и присоединения электродов. Созданы простейшие образцы полевых транзисторов на основе графена и исследованы их характеристики.

К сожалению, из-за существования минимальной удельной проводимости графена такие транзисторы имеют большие токи утечки, поэтому уникальна зональная структура графена является помехой при создании традиционных электронных устройств. Для улучшения характеристик транзистора необходимо наличие щели в спектре, которая может появиться, например, при химической модификации графена или в результате взаимодействия с подложкой. Менее привычными прототипами возможных будущих электронных устройств являются одноэлектронные транзисторы на основе квантовых точек, в работе которых используется явление кулоновской блокады. Особенности зонной структуры графена приводят к тому, что в графеновых квантовых точках расстояние между энергетическими уровнями, образующимися в результате пространственного конфайнмента, намного больше, чем в аналогичных устройствах на основе других материалов. Это позволяет одноэлектронным транзисторам работать при комнатной температуре.

## **6.2. Туннельные полевые транзисторы на основе графена**

Изучите научную статью:

Д.А.Свинцов, В.В.Вьюрков, В.Ф.Лукичев, А.А.Орликовский, А.Буренков, Р.Охснер. Туннельные полевые транзисторы на основе графена / ФТП. – 2013. – том 47. – выпуск 2. – с. 244 – 250. [Электронный ресурс] URL: <http://journals.ioffe.ru/ftp/2013/02/p244-250.pdf> (дата обращения 26.08.2013).

Аннотация:

Отсутствие закрытого состояния в транзисторах на основе графена является основным препятствием на пути к их использованию в цифровых схемах. Недавно было сообщено о создании туннельного транзистора на графене с низким током закрытого состояния; однако управление проводимостью канала с помощью затвора в данном приборе было неэффективным. Мы предлагаем новую конструкцию туннельного транзистора на графене, в которой ток экспоненциально зависит от напряжения на затворе, а подпороговая кру-

тизна приближается к термоэмиссионному пределу. Особенностью транзистора является наличие полупроводникового (или диэлектрического) туннельного зазора в канале. Характеристики транзистора наследуют низкий ток закрытого состояния, свойственный полупроводниковым каналам, и высокий ток открытого состояния, свойственный графену.

В первом разделе данной статьи описываются возможные конструкции приборов. Во втором разделе рассматривается распределение электрического потенциала вдоль канала транзистора. Третий раздел посвящен вычислению тока транзистора. В последнем, четвертом разделе, произведено обсуждение полученных результатов. Доказательство утверждения о предельной крутизне транзистора вынесено в Приложение.

Расскажите на семинаре о следующих проблемах:

- 1) Возможные конструкции туннельных полевых транзисторов на основе графена;
- 2) Расчет зависимости тока транзистора, включающего туннельную и термоэмиссионную компоненты, от напряжений на стоке и затворе.

### **Самостоятельная работа студента. Вопросы теоретической части курса, отводимые на самостоятельную проработку**

Полностью прочитайте и изучите самостоятельно приведенные ниже и доступные по приведенным здесь же библиографическим ссылкам материалы. Найдите в интернет подобные материалы. Проведите анализ и обобщение. Отработайте ответы на поставленные вопросы. Подготовьте презентацию, используя иллюстрации с сайтов, подготовьте доклад и выступите на практическом занятии с защитой Вашей точки зрения на поставленную проблему.

#### **Основная литература**

1. Ткалич В.Л., Макеева А.В., Оборина Е.Е. Физические основы наноэлектроники: Учебное пособие. . - СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. - 83 с.



- [Электронный ресурс] Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» URL: <http://window.edu.ru/resource/415/73415/files/itmo540.pdf> (дата обращения 23.08.2013)
2. Троян П.Е. Нанoeлектроника: Учебное пособие / Троян П. Е., Сахаров Ю. В. – 2010. 88 с.-Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники [Электронный ресурс] Научно-образовательный портал ТУСУР URL: <http://edu.tusur.ru/attachments/562-nanoelektronika/download?1329201364> (дата обращения 23.08.2013)
  3. Начала нанoeлектроники [Электронный ресурс] Методичкус URL: <http://3ys.ru/osnovy-mikroelektroniki/nachala-nanoelektroniki.html> (дата обращения 23.08.2013)
  4. Борисенко В.Е., Воробьева А.И., Данилюк А.Л., Уткина Е.А. Нанoeлектроника: теория и практика. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2-е издание, 2013. – 366 с. [Электронный ресурс] URL: <http://padabum.com/d.php?id=52078> (дата обращения 23.08.2013)

## **1. к Разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов нанoeлектроники.**

### **1.1. Углеродные молекулы. Природа углеродной связи.**

#### **1.1.1. Природа углеродной связи**

Для понимания природы углеродной связи необходимо рассмотреть электронную структуру атома углерода. В нем имеется шесть электронов, которые в невозбужденном атоме находятся на низших энергетических уровнях. Когда атом углерода связан в молекуле с другими атомами, его электронная структура выглядит так:  $(1s)^2$ ,  $(2s)$ ,  $(2p_x)$ ,  $(2p_y)$ ,  $(2p_z)$ . На нижнем уровне  $1s$  с квантовым числом  $n = 1$  находятся два электрона с противоположно направленными спинами. Распределение заряда электрона в  $s$  состоянии сферически симметрично. Эти  $1s$ - электроны не принимают участия в образовании химических связей. Остальные четыре электрона находятся на уровнях с  $n = 2$ : один на сферически симметричной  $s$ - орбитали, три на  $p_x$ ,  $p_y$  и  $p_z$  орбиталях. Распределения заряда на  $p$  орбиталях имеют сильно удлиненную в одном направле-

нии форму и их оси взаимно перпендикулярны, как показано на Рис. 2.6.

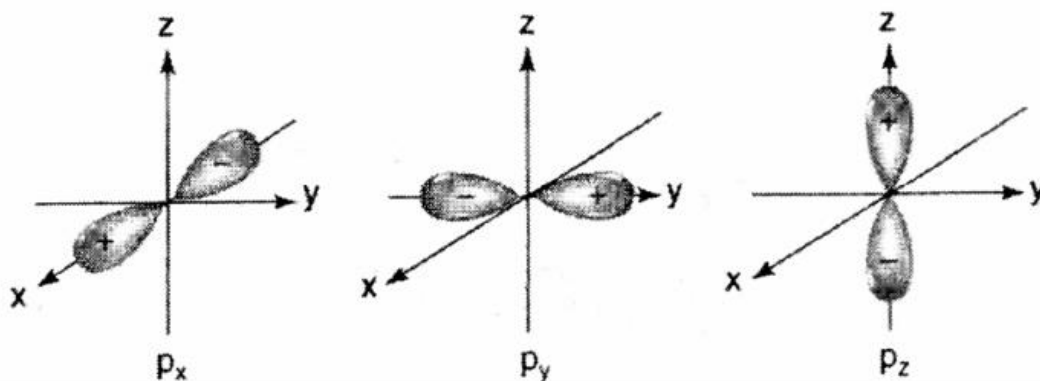


Рис. 2.6. Схемы  $p_x$ -,  $p_y$ - и  $p_z$  - орбиталей атома углерода.

Внешняя  $s$  орбиталь и три  $p$  орбитали и формируют химические связи атома углерода с другими атомами. Распределения зарядов, связанных с этими орбиталями, смешиваются, или другими словами, перекрываются с распределениями зарядов каждого связанного с углеродом атома. В сущности можно рассматривать облако электронного заряда между двумя связанными атомами как клей, сцепляющий эти атомы.

В атоме углерода разность энергий между  $2s$ - и  $2p$ - уровнями очень мала, что позволяет волновым функциям  $2s$ - состояния смешиваться с одной или несколькими волновыми функциями  $2p$  состояния. Ненормализованная волновая функция  $\Psi$  валентного состояния может быть записана в виде  $\Psi = s + \lambda p$ , где  $p$  означает смесь  $p_i$  орбиталей. При такой гибридизации направления лепестков  $p$ -орбиталей и угла между ними меняются. Твердый углерод имеет две основные формы, называемые аллотропными модификациями, алмаз и графит. Они стабильны при комнатной температуре. Алмаз состоит из атомов углерода, тетраэдрически связанных друг с другом посредством  $sp^3$ -гибридизированных связей, образующих трехмерную сетку. У каждого атома углерода четыре ближайших соседа. Графит имеет слоистую

структуру, причем каждый слой образован шестиугольниками из атомов углерода, связанных посредством  $sp^2$ -гибридизированной связи, угол между которыми составляет  $120^\circ$ . У каждого атома углерода есть три ближайших соседа в плоскости слоя. Эти гексагональные слои связаны друг с другом относительно слабыми силами Ван дер Ваальса.

## **1.2. Углеродные кластеры. Малые углеродные кластеры. Фуллерен $C_{60}$ . Неуглеродные шарообразные молекулы.**

Для получения кластеров углерода может быть использовано лазерное испарение углеродной подложки в потоке гелия.

Пучок электронейтральных кластеров фото ионизируется ультрафиолетовым лазером и анализируется масс-спектрометром. Вычисления структуры малых кластеров методом молекулярных орбиталей показывают, что такие кластеры имеют линейную или замкнутую неплоскую моноциклическую геометрию. Линейная структура с  $sp$ -гибридизацией наблюдается при нечетных значениях  $N$  ( $N$ -число атомов в кластере), циклическая при четных. Открытые структуры из 3, 11, 15, 19 и 23 атомов со стандартными углами наиболее заметны на спектре и, следовательно, более стабильны. Замкнутые структуры имеют углы между углеродными связями, отличающиеся от предсказаний обычной теории гибридизации.

Фуллерен  $C_{60}$ . Открытие молекулы, похожей на футбольный мяч и состоящей из 60 атомов углерода, явилось в некоторой степени случайным результатом исследования природы материи в межзвездном пространстве. Они были посвящены изучению поглощения света межзвездной пылью, т.е. малыми частицами вещества, находящимися в межзвездном и межгалактическом пространстве. При прохождении света удаленной звезды через космическое пространство его интенсивность уменьшается. Это явление называется оптическим поглощением и про-

исходит вследствие поглощения и рассеяния света на межзвездной пыли, находящейся на пути распространения света от звезды к Земле. Ученые изучают это поглощение, измеряя интенсивность приходящего от звезд света на разных длинах волн, то есть разных цветов. В результате проведения подобных исследований выяснилось, что в ультрафиолетовом диапазоне поглощение увеличивается при длинах волн около 220 нм (что соответствует энергии квантов 5,6 эВ). Это поглощение приписывалось рассеянию света на гипотетических малых частицах графита, находящихся в межзвездной среде.

### **1.3. Углеродные нанотрубки. Методы получения. Применение углеродных нанотрубок**

Методы получения

*- лазерное испарение*

Кварцевая труба, содержащая газообразный аргон и мишень из графита, нагревается до 1200°C. Внутри трубки, но за пределами печи находится охлаждаемый водой медный коллектор. Графитовая мишень содержит небольшие количества кобальта и никеля, выступающие в качестве каталитических зародышей образования нанотрубок. При попадании высокоинтенсивного пучка импульсного лазера на мишень графит испаряется. Поток аргон выносит атомы углерода из высокотемпературной зоны к охлаждаемому медному коллектору, на котором и происходит образование нанотрубок. Таким методом можно получить трубки диаметром 10-20 нм и длиной 100 микрон.

*- углеродная дуга*

К электродам из углерода диаметром 5 - 20 мм, разнесенным на расстояние около 1 мм, в потоке гелия при давлении 500 Торр прикладывается напряжение 20 - 25 В. Атомы углерода вылетают из положительного электрода и образуют нанотрубки на отрицательном, при этом длина положительного электрода уменьшается, а на отрицательном электроде осаждается углеродный материал. Для получения однослой-

ных нанотрубок в центральную область положительного электрода добавляют небольшие количества кобальта, никеля или железа в качестве катализаторов. Если не использовать катализаторы, получаются вложенные или многослойные нанотрубки, то есть нанотрубка внутри нанотрубки. Дуговым методом можно получить однослойные нанотрубки диаметром 1 - 5 нм и длиной порядка 1 мкм.

*- химическое осаждение*

Метод: химического осаждения из паровой фазы заключается в разложении газообразного углеводорода, например, метана ( $\text{CH}_4$ ), при температуре  $1100^\circ\text{C}$ . При разложении газа образуются свободные атомы углерода, конденсирующиеся затем на более холодной подложке, которая может содержать разнообразные катализаторы, такие как железо. Этот процесс позволяет получать продукт непрерывно и, возможно, является наиболее предпочтительным для увеличения масштабов при промышленном производстве. Механизм роста нанотрубок до сих пор неясен. Так как для роста однослойных трубок необходим металлический катализатор, механизм должен объяснять роль атомов кобальта или никеля. Одно из предложений, называемое «механизмом скутера», состоит в том, что атомы металлического катализатора присоединяются к оборванным связям на открытом конце трубки и обегая ее по краю, способствуют захвату атомов углерода из паровой фазы и их встраиванию в стенку трубки.

Литература:

1. Углеродные нанотрубки - это чудо природы. [Электронный ресурс] Nanonewsnet.ru URL: <http://www.nanonewsnet.ru/blog/nikst/uglerodnye-nanotrubki-eto-chudo-prirody> (дата обращения 23.08.2013)
2. П.Н. Дьячков. Углеродные нанотрубки / Природа, 2000. — №11 [Электронный ресурс] URL: <http://www.ufo.obninsk.ru/nts/text/nano.htm> (дата обращения 23.08.2013)

## **2. к Разделу 2 Актуальные проблемы нанoeлектроники.**

### **2.1. Резонансное туннелирование. Приборы на резонансном туннелировании.**

Туннелирование электронов в низкоразмерной структуре определяется не только характеристиками составляющих ее потенциальных барьеров, но и разрешенными энергетическими состояниями для электронов внутри самой структуры. В низкоразмерной структуре, ограниченной двумя потенциальными барьерами, имеет место резкое возрастание протекающего через нее туннельного тока при совпадении уровня Ферми в инжектирующем электроде и дискретного уровня в низкоразмерной структуре. Это явление получило название резонансное туннелирование. Оно приводит к появлению на вольтамперной характеристике участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением, что чрезвычайно привлекательно для создания твердотельных сверхвысокочастотных генераторов. Типичными структурами для наблюдения этого эффекта являются квантовые колодцы.

Квантовое ограничение приводит к квантованию энергетических уровней в колодце. В двумерной структуре – квантовой пленке толщиной  $a$  – образуется подзона с энергией, соответствующей  $E_1 = \hbar^2 \pi^2 / (2ma^2)$ . Предполагается, что в отсутствие внешнего напряжения она располагается выше уровня Ферми в отделенных барьерами электродах. Электрод, с которого осуществляется инжекция электронов, называют эмиттером, а собирающий электрод – коллектором. При приложении к структуре небольшого внешнего напряжения основное падение напряжения приходится на области барьеров, так как их электрическое сопротивление много больше сопротивления колодца. В них происходит наибольшее искривление энергетических уровней, однако электрический ток через структуру незначителен. С увеличением приложенного напряжения уровень  $E_1$  в колодце понижается, обеспечивая появление туннельного тока через эмиттерный барьер. Туннелирование

электронов из колодца в коллектор не вызывает ограничений, так как идет с высокого энергетического уровня на более низкий. Величина туннельного тока становится максимальной при совпадении уровня Ферми в эмиттере и энергетического уровня  $E_1$  в колодце. При этом электроны туннелируют в колодец, сохраняя свою энергию и импульс. Благодаря этому они там не задерживаются и быстро уходят в коллектор. Происходит резонансное прохождение электронов через колодец.

## 2.2 Эффект Кондо.

Согласно классическим представлениям электрическое сопротивление металлов уменьшается с понижением температуры, потому что электроны все меньше и меньше рассеиваются тепловыми колебаниями кристаллической решетки. Между тем имеются три возможных сценария поведения сопротивления в области низких температур. Сопротивление большинства чистых металлов (например, Cu, Au, Al) уменьшается с увеличением температуры до тех пор, пока не достигнет некоторой остаточной величины. Некоторые металлы (например, Pb, Nb) при снижении температуры становятся сверхпроводящими, так как их сопротивление падает фактически до нуля при критической температуре. Однако в металлах, содержащих небольшое количество магнитных примесей, таких, как Fe, Co, Ni, сопротивление при очень низких температурах увеличивается, что называется эффектом Кондо и связано с ненулевым полным спином всех электронов в образце. Этот эффект наблюдается не только в металлах с магнитными примесями, но и в квантовых точках. Температуру, при которой сопротивление начинает снова увеличиваться, называют температурой Кондо.

Кондо-поведение квантовых точек Квантовая точка, содержащая строго определенное число электронов, может действовать как магнит-

ная примесь. Полный спин равен нулю или целому числу для четного числа электронов и половине целого числа для нечетного числа электронов. Последний случай – классический пример для наблюдения эффекта Кондо. Все электроны, кроме одного, с самой высокой энергией, могут игнорироваться, то есть это случай, эквивалентный наличию одного единственного носителя спина,  $s = 1/2$ . Квантовую точку с затворами можно электрически переключать из состояния «кондо-система» в состояние «не-кондо-система», поскольку количество электронов в ней может быть изменено с нечетного значения на четное, например, с помощью следующей структуры. Квантовая точка соединена с двумя источниками электронов туннельными каналами с пропускной способностью, управляемой смещением, прикладываемым к входному и выходному затворам. Связь точки со стоком и истоком электронов определяет расширение энергии  $\Delta E$  состояния в точке. Число электронов в точке и их уровни энергии регулируются напряжением, прикладываемым к центральному затвору.

### 2.3. Спинтронные приборы

Разработанные спинтронные приборы используют эффект гигантского магнитосопротивления и спин-зависимое туннелирование. Переключение направления намагниченности в них осуществляется посредством собственного внутреннего или внешнего магнитного поля. Считывающая головка на гигантском магнитосопротивлении. Этот прибор, называемый также спин-вентильной головкой воспроизведения, стал первым спинтронным прибором, который в промышленных масштабах стали производить в IBM начиная с 1997 г. Размеры головки, считывающей магнитные биты, которые записаны на поверхности дисков или лент в виде по-разному ориентированных магнитных областей (доменов), сведены к минимуму и составляют 10–100 нм. Там где соприкасаются головные части двух противоположно намагниченных доме-



нов, некомпенсированные, положительные полюса генерируют магнитное поле. Это поле направлено за пределы носителя информации перпендикулярно поверхности домена, которая является положительной стенкой домена. В том месте, где соприкасаются хвостовые части двух доменов, стенки содержат некомпенсированные, отрицательные полюса. Последние образуют сток для магнитных силовых линий потока, возвращающегося в носитель информации, которым является отрицательная стенка домена. Головка «чувствует» изменения направления магнитного поля на стенках домена. Энергонезависимая память на гигантском магнитосопротивлении

Элементы памяти, использующие эффект гигантского магнитосопротивления, объединяют в матрицы, для того чтобы получить совокупность элементов, функционирующих как энергонезависимая память. Элементы являются, по существу, спинвентильными структурами, которые расположены в определенной последовательности и соединены проводящими дорожками, образующими шины считывания. Шина считывания сохраняет информацию и имеет сопротивление, которое равно сумме сопротивлений ее элементов. Ток протекает через шину считывания, и усилители в конце линий обнаруживают изменения общего сопротивления. Магнитные поля, необходимые для манипулирования намагниченностью элементов, обеспечиваются дополнительными, литографически сформированными проводящими дорожками, проходящими над и под элементами. Эти дорожки пересекают шину считывания в виде двухкоординатной (ху) сеточной структуры, в каждом пересечении которой находится запоминающий элемент на гигантском магнитосопротивлении. Проводящая дорожка, проходящая параллельно шине считывания, действует как словарная шина при записи, а дорожка, пересекающая шину считывания перпендикулярно ей, действует как записывающая битовая шина. Все дорожки электрически изолированы. Когда импульсы тока проходят через словарные и битовые шины, они генерируют магнитные поля,

управляющие сопротивлением элементов на гигантском магнитосопротивлении.

Энергонезависимая память на спин-зависимом туннелировании. Запоминающее устройство с произвольным порядком выборки сформировано из двух ортогональных в плоскости массивов параллельных ферромагнитных дорожек, разделенных в пространстве тонким изолирующим слоем. Каждое пересечение дорожек действует как магнитный туннельный переход. Когда направления намагниченности двух противоположных ферромагнитных областей выравниваются внешним магнитным полем, туннельное сопротивление будет ниже, чем в том случае, когда они противоположно направлены. Для практического применения в устройствах памяти необходимо изменение сопротивления по крайней мере на величину порядка 30 %. Спин-вентильный транзистор. Спин-вентильный транзистор – это трехвыводной прибор, аналогичный транзистору с металлической базой. Базовая область транзистора содержит металлический, многослойный спиновой вентиль между двумя областями кремния n-типа проводимости, действующими как эмиттер и коллектор. В такой структуре горячий электрон проходит через спин-вентильную базу, чтобы попасть из эмиттера в коллектор. Транзистор работает следующим образом. Между эмиттером и базой устанавливается такой ток (ток эмиттера), при котором электроны инжектируются в базу перпендикулярно слоям спин-затвора. Так как инжектируемые электроны должны пройти через барьер Шоттки, они входят в базу как неравновесные, горячие электроны. Как только горячие электроны пересекут базу, они подвергаются воздействию неупругого и упругого рассеивания, которое изменяет и их энергию, и распределение их моментов. Электроны только тогда способны войти в коллектор, когда они накопили достаточную энергию для преодоления энергетического барьера со стороны коллектора. Часть собранных в коллекторе электронов и, следовательно, ток коллектора существенно

зависят от рассеивания в базе, которое является спин-зависимым. Это регулируется переключением базы из согласованного по намагниченности низкоомного состояния в антисогласованное высокоомное состояние. Важное преимущество спин-вентильного транзистора – большой относительный магнитный эффект при комнатной температуре при незначительных магнитных полях. Несмотря на низкий коэффициент усиления по току, это делает такой транзистор уникальным спинтронным прибором с большими перспективами для магнитной памяти и датчиков магнитного поля, где коэффициент усиления по току не критичен.

### **3. к Разделу 3 Актуальные проблемы создания твердотельных наноструктур и их применение.**

#### **3.1.Трехмерная графеновая электроника.**

Литература:

1. Новая трехмерная графеновая электроника. [Электронный ресурс] Россия 2045 URL: <http://2045.ru/news/29488.html> (дата обращения 22.08.2013)
2. Изготовлен «вертикальный» графеновый транзистор [Электронный ресурс] Компьюлента-Онлайн URL: [http://compulenta.computerra.ru/archive/applied\\_research/659346/](http://compulenta.computerra.ru/archive/applied_research/659346/) (дата обращения 22.08.2013)
3. L. Britnell1, R. V. Gorbachev, R. Jalil, B. D. Belle, F. Schedin, A. Mishchenko, T. Georgiou, M. I. Katsnelson, L. Eaves, S. V. Morozov, N. M. R. Peres, J. Leist, A. K. Geim, K. S. Novoselov, L. A. Ponomarenko. Field-Effect Tunneling Transistor Based on Vertical Graphene Heterostructures / Science. 24 February 2012.– Vol. 335 no. 6071 pp. 947-950 . [Электронный ресурс] Science. URL: <http://arxiv.org/pdf/1112.4999>

В исследовании, опубликованном в журнале Science, манчестерская команда под руководством Нобелевских лауреатов, профессоров Андрея Гейма и Константина Новоселова, в буквальном смысле слова открыла новое измерение в области исследований графена. Они продемонстрировали трех-

мерный графеновый транзистор, который позволит графену стать новым кремнием.

Графен является поразительным материалом, состоящим из одного слоя атомов углерода, обладающим бесчисленными уникальными свойствами в самых разных областях, начиная с электрической и химической и заканчивая оптической и механической.

Одним из множества потенциальных способов применения графена может стать использование его в качестве базового материала компьютерных чипов, вместо кремния. Такая перспектива уже успела привлечь крупных изготовителей чипов, включая IBM, Samsung, Texas Instruments и Intel. Отдельные графеновые транзисторы с очень высокими частотами (до 300 Гц) уже были продемонстрированы множеством групп по всему миру.

К сожалению, эти транзисторы не могут быть плотно упакованы в компьютерном чипе, поскольку уровень утечки тока слишком велик, даже для графена в наиболее непроводящем состоянии. Этот электрический ток приведет к расплавлению чипа в доли секунды.

Эта проблема преследует графеновые транзисторы с 2004 года, когда манчестерские исследователи сообщили об открытии графена. Несмотря на усилия мирового научного сообщества, с тех пор не было обнаружено решения данной задачи.

Ученые из Манчестерского университета предложили использовать графен не в горизонтальной, как во всех предыдущих исследованиях, а в вертикальной плоскости и создали так называемый туннельный диод.

Доктор Леонид Пономаренко, который проводил экспериментальную работу, сказал: "Мы испытали концептуально новый подход к графеновой электронике. Наши транзисторы хорошо себя показали. Я считаю, что они могут быть значительно улучшены, уменьшены в размерах до нанометровых величин и доведены до суб-ТГц частот".

«Продемонстрированные транзисторы важны, но концепт атомной слоеной сборки, пожалуй, еще важнее», - пояснил профессор Гейм. Профессор Новоселов добавил: "Туннельные транзисторы - только один пример из неисчислимого количества возможных слоеных структур и новых устройств, которые могут быть созданы подобным образом. Это открывает неисчислимые возможности, как для фундаментальной физики, так и для практического применения. Другие возможные примеры включают светодиоды, фотогальванику и так далее.

В новых экспериментах, напротив, использовался самый обычный графен, но структуру транзистора постарались сделать оригинальной. На стандартную пластину окисленного кремния исследователи нанесли сравнительно толстый слой гексагонального нитрида бора (hBN), который сыграл роль высококачественной атомарно-гладкой подложки. Поверх hBN учёные положили графен, закрытый тонкой прокладкой из гексагонального нитрида, выполняющей функции изолирующего барьера, и ещё одним монослоем атомов углерода. Последним элементом сложной конструкции, напоминающей сэндвич, стал второй толстый слой hBN.

При испытаниях устройства с такой «вертикальной» компоновкой физики прикладывали управляющее напряжение  $V_g$  между кремниевой подложкой и нижним графеновым электродом GrB, наблюдая за тем, как это повлияет на величину туннельного тока  $I$ . В результате выяснилось, что ток чётко следует за изменениями  $V_g$ , причём отношения значений туннельной проводимости  $\sigma = I/V_b$  ( $V_b$  — напряжение смещения, прикладываемое между монослоями атомов углерода), измеренной на разных  $V_g$ , доходили до  $\sim 50$ . Вольт-амперные характеристики транзисторов, снятые при температуре жидкого гелия и в комнатных условиях, практически совпадали.

По мнению авторов исследования, транзисторы нового типа весьма перспективны: они способны работать на очень высоких частотах и выгодно отличаются тем, что их поперечные размеры можно снизить до  $\sim 10$  нм. Поскольку никаких жёстких ограничений на величину отношения токов в от-

крытом и закрытом состоянии нет, в будущем, при оптимизации структуры и использовании более качественных диэлектриков (замене  $\text{SiO}_2$ ), она также должна заметно подняться.

Полная версия отчёта опубликована в журнале Science; препринт статьи можно скачать с сайта arXiv.

### **3.2. Самосборка при эпитаксии. Осаждение пленок Лэнгмюра-Блоджетт.**

#### **Саморегулирующиеся процессы**

Саморегулирование является одной из наиболее общих закономерностей в природе. Оно осуществляется различными путями, но всегда с одной общей целью – обеспечить наибольшую устойчивость системы.

#### **3.2.1. Самоупорядочение**

Самоупорядочение – это процесс адсорбции и специфического расположения молекул на твердой поверхности. Его движущей силой является хемосорбция, которая в особенности проявляется в высокоэнергетических реакциях между адсорбентом и адсорбирующей поверхностью. В отличие от сильного взаимодействия между адсорбируемой молекулой и поверхностью, взаимодействие между самими молекулами остается слабым. В органическом и неорганическом мире существует большое количество примеров самоупорядочения. Пленки мономолекулярной толщины, образовавшиеся по механизму самоупорядочения, имеют очень низкую плотность дефектов, достаточно стабильны и механически прочны. Их используют в качестве трафарета в литографических процессах. При этом нанометровое разрешение достигается с использованием сканирующих зондов в сканирующем туннельном или атомном силовом микроскопе.

Молекулярные блоки для самоупорядочения должны содержать три основные функциональные группы – группу, прикрепляющую их к поверхности, промежуточную группу и поверхностную функциональную группу. Эти группы не являются взаимозаменяемыми. Так, функ-

ции позиционирования и распознавания лучше реализуются с использованием органических групп, нежели неорганических, хотя электронные свойства последних изучены более глубоко. Комбинирование различных по составу групп постоянно рождает новые формы самоупорядочения.

### 3.2.2. Самосборка

Здесь используют самопроизвольную организацию малых молекул в большие, строго определенные, стабильные молекулярные комплексы или агрегаты и осаждение атомов или молекул на подложку с последующим самоупорядочением в полезные для разных приложений наноструктуры. Зачастую слабые обратимые взаимодействия между частями молекул позволяют получать равновесные структуры без какого-либо централизованного управления процессом. Процедура автоматически исправляет ошибки, то есть ошибочно или неправильно прикрепленные элементы могут быть заменены во время роста. Разнообразные процессы самосборки используют слабые, нековалентные связывающие взаимодействия, например, водородные связи или силы Ван-дер-Ваальса, которые позволяют реакциям идти под термодинамическим контролем с непрерывным исправлением ошибок. Типов исходных молекул обычно немного, они небольшие и легко синтезируемые, а конечный продукт получается в термодинамически равновесном состоянии. На сегодняшний день синтезированы двумерные и трехмерные организованные массивы нанокристаллов Pt, Pd, Ag, Au, Fe, Co, сплавов Fe-Pt, Au-Ag, наноструктур CdS/CdSe, CdSe/CdTe, Pt/Fe, Pd/Ni и т.д. Кроме того, для анизотропных наночастиц удалось добиться формирования ориентационно-упорядоченных массивов. Однородные по размеру наночастицы можно «собрать» в пространственно-упорядоченные структуры, представляющие собой одномерные «нити», двумерные плотно упакованные слои, трехмерные массивы или «малые» кластеры. Тип организации наночастиц и структура образующегося массива зависят от условий синтеза, диаметра частиц, природы внешнего воздействия на структуру.

Сегодня известны различные методы самосборки, позволяющие получать полезные упорядоченные структуры из микрочастиц. Для создания особых условий, при которых в конкретной системе происходит самосборка, могут быть использованы гравитационное, электрическое или магнитное поле, капиллярные силы, «игра» на смачиваемости-несмачиваемости компонентов системы и другие приемы. В настоящее время процессы самосборки начинают активно использоваться и в производстве. В частности, известная компания Intel внедряет процессы самосборки для создания компьютерных чипов нового поколения.

### **Самостоятельная работа студента. Темы рефератов**

#### ***1.1. к Разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов нанoeлектроники.***

1. Технология тонких пленок и многослойных структур. Введение. Механизмы эпитаксиального роста тонких пленок. Жидкофазная эпитаксия. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений. Молекулярно-лучевая эпитаксия. Установка МЛЭ.
2. Новое поколение широкозонных полупроводниковых материалов (нитрид галлия, GaN) и приборов (гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) типа AlGaN/GaN).
3. Современные электроизоляционные компаунды.
4. Основные полупроводниковые материалы и изделия.

#### ***1.2. к Разделу 2 Актуальные проблемы нанoeлектроники.***

1. Снижение потребляемой мощности интегральных микросхем при сохранении высокого быстродействия — одна из важнейших проблем микроэлектроники.
2. Тенденции развития, новые направления и прогноз развития микро- и нанoeлектроники.
3. Российская микроэлектроника 2012/2013: итоги и прогнозы.



4. Российский рынок электрони- ки 2012/2013: итоги и прогно- зы.
5. Электронная стратегия России.
6. Новый стратегический план развития полупроводниковых технологий (ITRS)

### **1.3. к Разделу 3 Актуальные проблемы создания твердотель- ных наноструктур и их применение.**

1. Графеновая антенна для высокоскоростных приемно-передающих уст- ройств для терабитных скоростей обмена информацией в беспровод- ных сетях.
2. Технологии управления свойствами графена: полупроводник, металл, диэлектрик.
3. Графен: методы получения и теплофизические свойства
4. Теория сверхпроводимости графена.
5. Новейшие достижения в графеновой электронике
6. Трехмерная графеновая электроника

### **Контрольные вопросы по курсу**

1. Опишите явление оптической дифракции, длина волны светового из- лучения и ограничение использования оптических методов микроскопии.
2. Опишите технологию оптической микроскопии TSOM. В каких сферах она применяется.
3. Принцип работы микросферического наноскопа.
4. Опишите метод распределенного освещения (structured illumination microscopy) и принципы работы микроскопа, использующего этот метод.
5. Опишите технологию электронной микроскопии и устройства микро- скопа
6. Опишите технологию рентгеновской микроскопии и устройства мик- роскопа

7. Расскажите о молибдените, его свойствах, методах получения и перспективных полупроводниковых приборах на его основе
8. Что такое графен, опишите структуру материала и его уникальные свойства.
9. Опишите известные Вам способы получения графена.
10. За что получили Нобелевскую премию Андрей Гейм и Константин Новосёлов.
11. Опишите свойства монослойного и двухслойного графена.
12. Опишите методы получения пластин графена больших размеров, пригодных для массового производства графеновых интегральных схем.
13. Что такое графин, опишите структуру материала, методы получения и его уникальные свойства.
14. Что такое карбин, опишите структуру материала, методы получения и его уникальные свойства.
15. Что такое германан, опишите структуру материала, методы получения и его уникальные свойства.
16. Кто такой Гордон Мур и какой закон носит его имя и о чем говорит этот закон? Каким способом был получен закон Мура ?
17. Что такое БИС и СБИС, технологические основания их появления ?
18. Каковы принципиальные качественные изменения, связанные со значительными уменьшениями размеров элементов ИС, нанотехнологии.
19. Назовите и опишите основные проблемы перехода от микро - к нанoeлектронике.
20. Способы преодоления проблемы нано—№1
21. Способы преодоления проблемы нано—№2
22. Способы преодоления проблемы нано—№3
23. Каковы минимально возможные размеры диодов и транзисторов?
24. Что такое high-k технология и для чего она нужна.
25. Назовите новые подходы к созданию электроники наноразмерных элементов и наноструктур.

26. Расскажите об организации передачи сигнала с использованием спиновых волн.
27. Что такое многократное использование электронов в наноструктурах
28. Что такое углеродные нанотрубки и кремниевые нанопровода
29. Принцип квантования и квантовое ограничение.
30. Квантовые ямы, нити, точки.
31. Транспорт носителей заряда вдоль потенциальных барьеров
32. Туннелирование носителей заряда
33. Спиновые эффекты.
34. Опишите первые транзисторы на графене.
35. Опишите графеновую транзисторную технологию GNR-FET
36. Опишите устройство полевого графенового транзистора
37. Расскажите о высокоскоростных графеновых транзисторах, их устройстве и конструкции.
38. Расскажите о высокоскоростных графеновых транзисторах и их технических характеристиках.
39. Расскажите о перспективах развития наноэлектроники в России
40. Традиционные методы осаждения пленок.
41. Методы, использующие сканирующие зонды.
42. Нанолитография.
43. Саморегулирующиеся процессы.
44. Лазеры с квантовыми ямами и точками.
45. Фотоприемники на квантовых ямах.

### **Библиографический список**

1. Смирнов В.И. Физико-химические основы технологии электронных средств: учебное пособие / В. И. Смирнов.— Ульяновск: УлГТУ, 2005.— 112 с.
2. А. Асеев, В. Попов. Фундаментальные проблемы материаловедения полупроводникового кремния// Наука в Сибири.—№ 2 (2238).— 14 января 2000 г.

3. А. Двуреченский, Н. Придачин. После кремния будет кремний // Наука в Сибири.— № 10 (2246) .— 10 марта 2000 г.
4. B. Radisavljevic, A. Radenovic, J. Brivio, V. Giacometti & A. Kis. Single-layer MoS<sub>2</sub> transistors // Nature Nanotechnology.— 2011 .— v. 6 .— p. 147–150.
5. MoS<sub>2</sub> Integrated Circuits [Электронный ресурс] // École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Laboratory of Nanoscale Electronics and Structures (LANES). URL: <http://lanes.epfl.ch/cms/site/lanes/lang/en/mos2ic-news> (дата обращения: 25.12.2011).
6. K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science .— 2004./p. 666-669.
7. А.К. Гейм. Случайные блуждания: непредсказуемый путь к графену. Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 2010 г. // УФН .— Т. 181 .— № 12.— с.1284–1298.
8. Zhihong Chen, Yu-Ming Lin, Michael J. Rooks, Phaedon Avouris. Graphene nano-ribbon electronics // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. — v. 40 .— p. 228–232.
9. Alfonso Reina, Xiaoting Jia, John Ho, Daniel Nezich, Hyungbin Son, Vladimir Bulovic, Mildred S. Dresselhaus and Jing Kong. Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition // Nano Letters.— 2009.— v. 9 (1), p. 30–35.
10. Hyesung Park, Jill A. Rowehl, Ki Kang Kim, Vladimir Bulovic and Jing Kong. Doped graphene electrodes for organic solar cells // Nanotechnology.— 2010.— v.21.— p. 1 – 6.
11. X.Li, W. Cai<sup>1</sup>, J. An, S. Kim, J. Nah, D. Yang, R. Piner, A. Velamakanni, I. Jung, E. Tutuc, S. K. Banerjee, L. Colombo and R. S. Ruoff. Large-Area Synthesis of High-Quality and Uniform Graphene Films on Copper Foils // Science.— 2009.— Vol. 324.—№. 5932ю—p. 1312-1314.
12. Suzanne Deffree. University produces 100-mm graphene wafers [Электронный ресурс]//Electronics Design News, February 3, 2010. URL: <http://>

www.edn.com/article/457398 University\_produces\_100\_mm\_graphene\_wafers.php  
р (дата обращения: 21.10.2011).

13. Gordon E. Moore. Cramming more Components onto Integrated Circuits. // Electronics .– 1965 .– Vol. 38.– Num. 8.

14. Ф.А. Кузнецов. Новые материалы и технологии для приборов нанoeлектроники (Учреждение Российской академии наук Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН): [Электронный ресурс] :URL: [http://edu-cons.net/atlas\\_last/publdet.php?idrazd=222&id=233](http://edu-cons.net/atlas_last/publdet.php?idrazd=222&id=233) (дата обращения 20.12.2011).

15. Закон Мура: каким путем пойдет дальнейшее развитие полупроводников: [Электронный ресурс] : URL: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2009/zakon-mura-kakim-putem-poidet-dalneishee-razvitie-poluprovodnikov> (дата обращения 20.12.2011).

16. А.А. Щука. Электроника. Учебное пособие / Под ред. проф. А. С. Сигова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005 .– 800 с.

17. Иванов Ю.Л., Рывкин С.М. Возникновение колебаний тока в образцах германия, помещенных в электрическое и продольное магнитное поле //ЖТФ.–1958.–Т.28.–Вып.4.–С.774-775.

18. Ленерт Б. Процессы диффузии в положительно заряженном цилиндре в продольном магнитном поле // Труды Второй Междунар. конф. по мирному использованию атомной энергии, Женева, 1958.– М.: Атомиздат.– 1959.– Избранные докл. иностр. ученых.–Т.1.–С. 648-651.

19. Kadomtsev B. B., Nedospasov A.V. Instability of the positive column in a magnetic field and the anomalous diffusion effect // J. Nucl. Energy.–1960.– part C : Plasma Physics .– V.1.– P. 230-235.

20. Кадомцев Б.Б. Конвекция плазмы положительного столба в магнитном поле // ЖТФ .– 1961 .– Т.31 .– Вып.11 .– С.1273-1283.

21. Кадомцев Б.Б. Коллективные явления в плазме.– М.: Наука.– 1988.–304 с.

22. Allen T.K., Paulikas G. A., Pyle R.V. Instability of a positive column in a magnetic field // Phys. Rev. Lett. – 1960. – V.5. – №9. – p. 409-411.
23. Hoh F.C., Lehnert B. Screw Instability of a Plasma Column // Phys. Rev. Lett.–1961.–V.7.–№3.–P.75-76.
24. Glicksman M. Instabilities of a Cylindrical Electron-Hole Plasma in a Magnetic Field // Phys. Rev.–1961.–V.124.–№6.–P.1655-1664.
25. Okamoto F., Koike T., Tosima S. Experimental evidence for helical instabilities in a semiconductor plasma // J. Phys. Soc. Japan. – 1962.– V.17.–№ 5. – P.804-807.
26. Электроника. Энциклопедический словарь.–М. : Советская энциклопедия. – 1991.– С. 58.
27. Larrabee R.D., Steel M.C. Oscillistor - New Type Semiconductor Oscillator // J. Appl. Phys.–1960.– v.31.– №9.– P.1519-1523.
28. Larrabee R.D. Conditions existing at the onset of oscillistor action // J. Appl. Phys.–1963.–V.34.–№4.–P.880-890.
29. Gunn J.B. Microwave oscillation of current in III-V-semiconductor.// Sol.St.Com.–1963.–V.1.– P.88-90.
30. Hartnagel H. Semiconductor plasma instabilities.–London: H. Ed. Books.– 1969.–206 p.
31. Анкер-Джонсон Б. Плазменные эффекты в полупроводниках. // Труды 9 Международной конф. по физ.полупр.–Л.:Наука, 1969.–С.859-879.
32. Glicksman M. Plasmas in Solids // Sol. St. Phys. – 1971.– V. 25.– P. 275-427.
33. Tacano M. Study of nonequilibrium semiconductor plasma instabilities // Res. Electrotechn. Lab.–1976.–№764.–p.1–82.
34. Пожела Ю.К. Плазма и токовые неустойчивости в полупроводниках.– М.: Наука.–1977.–368 с.
35. Владимиров В. В., Волков В. Ф., Мейлихов Е. З. Плазма полупроводников.– М.: Атомиздат. –1979.–256 с.

36. Викулин И.М., Люзе Л.Л., Преснов В.А. Приборы на основе винтовой неустойчивости в германии // В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение.— М.: Советское радио.— 1969.— Вып.22.— С.42-57.
37. Бондар В. М., Владимиров В. В., Доскоч В. И., Щедрин А. И. Тензодатчик на основе осцилляторного эффекта. // ПТЭ.— 1981.— №3.— С.244-246.
38. Бондар В. М., Сидоренко Э. А., Яковлев В. В. Термометр на основе осцилляторного эффекта. // ПТЭ.— 1982.— №4.— С.229-230.
39. А.С. 1004745, МКИЗ G 01 В 7/00 Преобразователь перемещения /А.И.Чередов, Л.Л.Люзе, Н.Д.Земляная, Т.В. Кандрушина (СССР).— №3286758/25-28; Опубл. 15.03.83, Бюл.№ 10.
40. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Магнитодиод в параллельном магнитном поле. // В кн.: Гальваномагнитные приборы.— М.— 1983.— с.39-43.
41. Пат.1686940 РФ, МПК G01 R33/06 Датчик магнитной индукции с частотным выходом / В.И.Гаман, П.Н.Дробот и др. //Открытия.Изобретения.—1993.—№ 45—46.
42. Gaman V.I., Drobot P.N. The magnetic sensors with frequency output // Proceedings 5<sup>th</sup> International conference on actual problems of electronic instrument engineering APEIE-2000.—V.1, Selected papers.—Novosibirsk.—2000.—P. 158-159.
43. Свид. РФ на полезную модель № 974, МПК G01 K7/00 (RU 974 U1) Датчик температуры с частотным выходом / В.И.Гаман, П.Н.Дробот //Открытия. Изобретения.—1995.—№ 10.
44. Гаман В.И., Дробот П.Н. Термочувствительный элемент с частотным выходом на основе кремниевого осциллятора. // Изв.вузов. Физика.—1995.—№ 2.—С.48—53.
45. Дробот П.Н. Пороговый термочувствительный элемент на основе винтовой неустойчивости в кремнии //Доклады 2-й Международной конференции «Датчики электрических и неэлектрических величин».— г. Барнаул.— 1995.— С.178.

46. Gaman V.I., Drobot P.N. Oscillator sensors with a frequency output based on a silicon structures //Proceedings 4th International conference on actual problems of electronic instrument engineering APEIE-98.–Novosibirsk.–1998.–V.1, Selected papers.–p. 133-135.
47. Дробот П.Н., Дробот Д.А., Тетеркина Н.Г. Кремниевый осцилляторный сенсор температуры: аналоги и преимущества // Инноватика-2010. Материалы VI всероссийской научно-практической конференции. – Томск, 2010 г.– с.119–123.
48. Дробот П.Н., Тетеркина Н.Г. Осцилляторные сенсоры температуры с частотным выходом: патентно-информационные исследования и анализ рынков // Средства и системы автоматизации: проблемы и решения: Материалы Юбилейной 20 лет компании «Элеси» международной научно практической конференции.-Томск, 2010.– с. 41 – 43.
49. Дробот П.Н., Дробот Д.А. Осцилляторные сенсоры с частотным выходом // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. Межвузовский сборник. ISSN 2223-2656. Изд. АлтГТУ.– 2011 .– с.120 – 123
50. H. Li et al. Chemically Derived, Ultrasoft Graphene Nanoribbon Semiconductors // Science .– v. 319.– № 5867 .– p. 1229-1232.
51. Xinran Wang, Yijian Ouyang, Xiaolin Li, Hailiang Wang, Jing Guo and Hongjie Dai. Room-Temperature All-Semiconducting Sub-10-nm Graphene Nanoribbon Field-Effect Transistors // Phys. Rev. Lett .– 2008 . – v.100.–Issue 20 .– p. 206803-1–4.
52. Yu-Ming Lin, Keith A. Jenkins, Alberto Valdes-Garcia, Joshua P. Small, Damon B. Farmer and Phaedon Avouris. Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies // Nano Lett., 2009 .– 9 (1) .– p. 422–426.
53. Yanqing Wu, Yu-ming Lin, Ageeth A. Bol, Keith A. Jenkins, Fengnian Xia, Damon B. Farmer, Yu Zhu & Phaedon Avouris. High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon // Nature, 2011.– v. 472.– p. 74–78.