

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 электроники

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

Введение	4
Практическое занятие № 1 по разделу 1 Введение. Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.	6
1.1. Производство поликристаллического кремния по технологии восстановления в плазме СВЧ разряда	6
1.2. Получение монокристаллического кремния.....	9
Практическое занятие № 2 по разделу 1 Введение. Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.	13
2.1. Новейшие материалы полупроводниковой электроники молибденит и графен: технологии получения и применение.	13
2.2. В направлении к графеновой электронике.....	20
Практическое занятие № 3 и №4 по разделу №2 Актуальные проблемы интегральной микроэлектроники.....	24
3.1. Проблемы на пути перехода от микро– к нанoeлектронике	24
4.1. Новые подходы к созданию электроники наноразмерных элементов и наноструктур	28
Практическое занятие № 5 по разделу №3 Актуальные проблемы функциональной электроники.....	33
5.1. Единая модель прибора функциональной электроники	33
5.2. Винтовая неустойчивость тока в полупроводниках	35
Практическое занятие № 6 по разделу №3 Актуальные проблемы функциональной электроники.....	38
6.1. Фундаментальный и практический интерес к исследованиям ВН	38
6.2. Магниточувствительный элемент с частотным выходом	40
6.3. Термочувствительный элемент с частотным выходом.....	42
Практические занятия № 7 и 8 по Разделу 4 Графеновая электроника – электроника будущего.	44
7.1. Высокоскоростные графеновые транзисторы	44
7.2. Эффективные транзисторы на основе графеновых полос.....	46
8.1. Проблема малого отношения токов открытого и закрытого состояний в полевых транзисторах на основе графена.	47
Самостоятельная работа студента. Вопросы теоретической части курса, отводимые на самостоятельную проработку	49
1. к Разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.	49
1.1. Кремний «солнечного качества»: производство в России. Фотоэлектрических преобразователи.....	49
1.2. Органическая электроника - современные тенденции и перспективы.	50
2. к Разделу 2 Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.	50

2.1. Энергонезависимая резистивная память (Resistive RAM, RRAM)- терабайты объема и высокое быстродействие.	50
2.2. Новая технология микроскопии для контроля производства трехмерных полупроводниковых чипов TSOM (Through-Focus Scanning Optical Microscopy).....	50
3. к Разделу 3 Актуальные проблемы функциональной электроники..	51
3.1. Приборы на эффекте Ганна. Диэлектрическая электроника. Хемотроника. Молекулярная электроника и биоэлектроника.....	51
4. к Разделу 4 Графеновая электроника – электроника будущего.....	51
4.1. Трехмерная графеновая электроника.	51
4.2. Германан - новый материал полупроводниковой электроники: получение и перспективные приборы.	53
Самостоятельная работа студента. Темы рефератов.....	55
1.1. к Разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.	55
1.2. к Разделу 2 Актуальные проблемы интегральной микроэлектроники..	55
1.3. к Разделу 3 Актуальные проблемы функциональной электроники.	56
1.4 к Разделу 4 Графеновая электроника – электроника будущего.....	56
Контрольные вопросы по курсу.....	56
Библиографический список.....	58

Введение

Дисциплина «Актуальные проблемы электроники» М1.В.ДВ.2.1 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 электроники.

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 электронной техники по следующим критериям: высота технического и изобретательского уровня и другие характерные ключевые аспекты инновационной разработки.

Изучение дисциплины «Актуальные проблемы электроники» магистрантами направления 222000 «Инноватика» в ТУСУР предусматривает лекции в объеме 9 часов и практические занятия в объеме 17 часов. Практические занятия – основной вид занятий, формирующий предусмотренные рабочей программой компетенции на основе освоения предусмотренных дидактических единиц.

Практические занятия проводятся в виде семинаров, на которых выступают 2-3 студента с докладом 25-30 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 мы 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 электроники» 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 Введение. Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.

1.1. Производство поликристаллического кремния по технологии восстановления в плазме СВЧ разряда

В связи с изложенными выше недостатками традиционного способа получения поликремния, весьма актуальной представляется задача разработки нового, высокоэффективного, энергосберегающего и улучшающего экологию метода производства поликристаллического кремния высокой чистоты. Для этого предлагается получение поликристаллического кремния из газовой фазы кремнийсодержащих веществ вместо традиционного высокотемпературного водородного восстановления проводить в плазме СВЧ разряда. Эта технология разработана в Институте Общей Физики Российской Академии наук (ИОФ РАН). Особенностью технологии является то, что плазмохимическая реакция протекает в объеме камеры, без контакта с ее стенками, при низкой газовой температуре.

Вместо одной большой реакционной камеры предлагается использовать группу из небольших реакторов с общими системами газоснабжения, эвакуации и утилизации газов и с общим компьютеризированным управлением и питанием.

При этом, в одном реакторе с магнетроном мощностью около 1 кВт будет выращиваться один поликристалл кремния. Это позволит более рационально расходовать энергию. Следует иметь в виду, что в связи с наличием в реакторе водорода и хлорсиланов, такой подход дает преимущества также и с точки зрения техники безопасности.



Рис.1.1. Схема микроволнового реактора для получения поликремния в виде монолитного куска.

1 –магнетрон; 2-волновой резонатор 3-центральный электрод микроволнового тракта в виде металлической трубки; 4-внешний коаксиальный электрод микроволнового тракта; 5- острие центрального электрода; 6-факел микроволнового разряда; 7-кварцевый реактор, защищенный металлической сеткой; 8-наращиваемый поликристалл; 9-подложка (затравка); 10-нить; 11-механизм подъема; 12-отводная трубка; 13-вентиль; 14-петля связи резонатора с коаксиальным микроволновым трактом.

Ключевую роль в мом процессе играет микроволновый плазматрон, который работает на базе магнетрона и системы его электропитания от бытовой СВЧ печи. Это обстоятельство позволяет сделать его чрезвычайно дешевым. В реакторе с указанным плазматроном создается устойчивый факел СВЧ разряда при давлении газовой смеси около атмосферного, что позволяет достичь очень большой производительности процесса. Разряд реализуется в протоке практически любых газов: кислород, аргон, воздух, азот, водород, фреон, метан, а также их различные комбинации. Путем подбора технологических режимов размер факела достигает 1–1,5 куб. дециметров (при давлении газа 1 атмосфера, мощности магнетрона 1 кВт и длине волны 12 см.). Все это выгодно отличает такой плазматрон от устройств для получения плазмы с близкой мощностью, например, в ВЧ разрядах, которые работают при давлении, не превышающем нескольких мм.рт.ст. Аналогичные СВЧ плазматроны, работающие на более короткой длине волны излучения, стоят в 100 – 1000 раз дороже. Основные идеи и конструкция плазматрона запатентованы.

Данная технология имеет целый ряд преимуществ по-сравнению с традиционной технологией производства поликристаллического кремния.

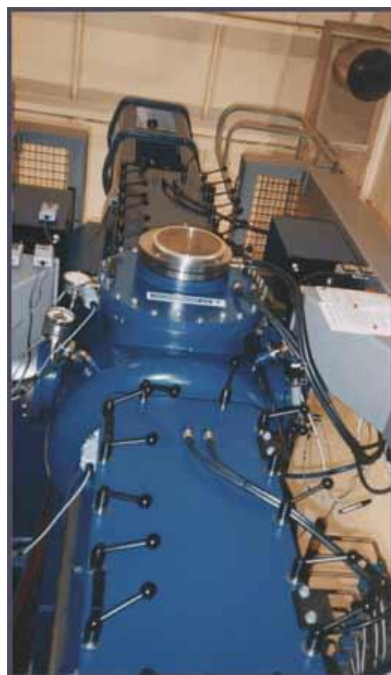
- 1) снижение энергоемкости процесса восстановления (более, чем на порядок);
- 2) повышение чистоты получаемого кремния – из-за возможности проведения реакции в объеме камеры, без контакта с ее стенками, при низкой газовой температуре;
- 3) высокая скорость протекания реакции, т.е. высокая производительность;
- 4) расширение сырьевой базы за счет появления возможности – в перспективе – эффективного использования (со степенью превращения близкой к 100%) тетраоксида кремния или других кремнийсодержащих газообразных соединений (например, фторидов) в качестве сырья для получения поликристаллического кремния;

- 5) более полная переработка го сырья в первичной реакции может послужить улучшению экологической обстановки на предприятии;
- 6) значительное, например, в несколько раз, снижение расхода водорода;
- 7) низкая газовая температура проведения процесса и осуществление реакции в объеме, без контакта со стенками камеры, позволят существенно расширить круг используемых при изготовлении реактора конструкционных материалов и применять неохлаждаемые водой реакторы из, например, кварца или даже частично из фторопласта;

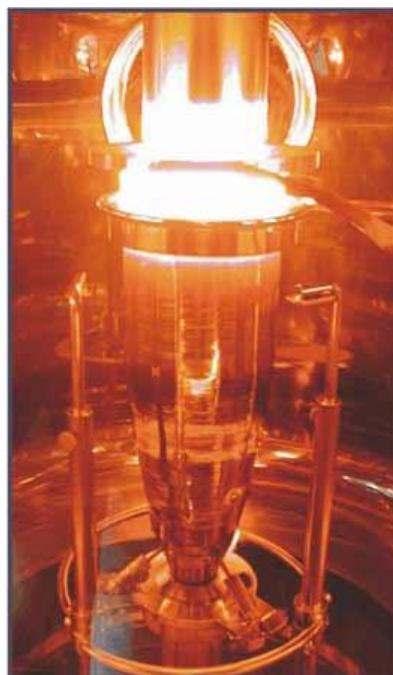
1.2. Получение монокристаллического кремния.

Из полученного описанными выше способами поликристаллического кремния можно вырастить кремний монокристаллический. При этом следует учитывать тот факт, что кремний при переходе из расплавленного состояния в кристаллическое увеличивает свой объем примерно на 10 %. Если проводить этот процесс в тигле, то воздействие стенок тигля на растущий кристалл вызовет образование в последнем большого количества дислокаций. Поэтому используют методы выращивания, исключая воздействие стенок тигля на кристалл, приводящее к насыщению кристалла кислородом и углеродом.

Наиболее предпочтительным является метод бестигельной зонной плавки, при котором переплавка кремния и выращивание монокристалла из зоны расплава происходит в инертном газе или в вакууме. В качестве примера приведем фотографии установки и процесса бестигельной зонной плавки (БЗП) Института физики полупроводников Сибирского отделения РАН (рис.1.2).



а)



б)



в)



г)

Рис.1.2. а, в – установка БЗП; б, в – вид в смотровом окне реактора БЗП: поликристалл Si, зона расплава белого цвета и растущий кристалл правильной цилиндрической формы; г – готовые кристаллы высокочистого кремния с превосходными параметрами.


Как тут не вспомнить труды М.В. Ломоносова, который в своих собственных теоретических исследованиях в области географии показывает практическую пользу освоения Северного морского пути в своей знаменитой фразе: «Российское могущество прирастать будет Сибирью и Северным океаном и достигнет до главных поселений европейских в Азии и в Америке».

Сибирь имеет редкостный потенциал воссоздания и скорого прогресса в производстве полупроводникового кремния. Это определено существованием крупного производства металлургического кремния на Братском и Иркутском (г. Шелехов) заводах по производству алюминия, уникальными сырьевыми запасами кварцитов высокой чистоты, наличием химического производства – Горно-химического комбината (ГХК) в г. Железногорске Красноярского края, высоким образовательным, научным и техническим потенциалом [2]. При этом произойдет уход от сырьевых поставок кварцитов за рубеж (цена – несколько центов за килограмм) и технического кремния (около 2-х долларов за килограмм) к производству и поставке кремния полупроводникового качества (200 – 400 долларов за килограмм) [2].

Состояние промышленности, производящей исходное сырье и полупроводниковый кремний, значительно определяет уровень развития высоких технологий, систем связи и, в целом, национальную безопасность. Только некоторые страны (Германия, Япония, США) имеют в своем распоряжении замкнутый цикл технологий производства высокочистого полупроводникового кремния. Потеря позиций СССР производстве и исследовании полупроводникового кремния, в связи с оставшимися на Украине кремниевыми производствами, для России означало безнадежное отставание в таких областях, как производство биочипов, микромеханика и сенсорика, солнечная энергетика. Семь ведущих институтов СО РАН соединили свои усилия в объединенном проекте под названием «Кремний» [2].


В результате выполнения проекта освоено выращивание монокристаллов кремния методом бестигельной зонной плавки с диаметром до 150

мм длиной до 1 метра (рис.1.2, г). Полученные кристаллы
ционные и обладают превосходными электрофизическими параметрами:
удельное электрическое сопротивление до 5000 Ом·см, холловская подвиж-
ность электронов до 1400 см²/В·с, время жизни носителей заряда до 2 милли-
секунд, концентрация легирующих примесей менее 10¹² см⁻³, концентрация
углерода и кислорода менее 10¹⁶ см⁻³ (рис.1.3).



СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ
НАУК

ИНСТИТУТ
ФИЗИКИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ



СЛИТКИ КРЕМНИЯ ВЫСОКОГО КАЧЕСТВА

Метод получения – бестигельная зонная плавка.

Оборудование для роста монокристаллов – установка Fz-20, фирмы Haldor Topsøe, (Дания).

Среда выращивания – аргон ОСЧ, содержание влаги ≤ 1ppm, кислорода ≤ 2ppm.

Размеры слитков – длина до 1,5 метров, диаметр до 125 мм.

Кристаллографическая ориентация – [11], [100].

Тип проводимости – n-тип.

Структурное совершенство – бездислокационный материал.


Холловская подвижность электронов – 1400 см²/В сек.

Удельное сопротивление – до 5 kΩ · см

Время жизни неосновных носителей тока – до 2 мсек.

Чистота монокристаллов

нейтронно-активационный анализ		ИК-спектроскопия	
элемент	содержание (отн. ед., г/г)	элемент	содержание ат/см ³
Хром, ⁵¹ Cr	3,3 · 10 ⁻⁹	Кислород	1,6 · 10 ¹⁶
Железо, ⁵⁶ Fe	3,2 · 10 ⁻⁸	Углерод	6 · 10 ¹⁵
Кобальт, ⁶⁰ Co	2,3 · 10 ⁻¹⁰		
Цинк, ⁶⁵ Zn	1,2 · 10 ⁻⁹		
Мышьяк, ⁷⁶ As	0,7 · 10 ⁻⁹		
Сурьма, ¹²² Sb	3 · 10 ⁻¹⁰		
Золото, ¹⁹⁶ Au	3,3 · 10 ⁻¹¹		



ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВ СО РАН
630090, Новосибирск, 90, пр. Лаврентьева, 13, тел. 8 (3832) 93 34 74, факс 33 27 71

Рис.1.3. Формуляр. Слитки кремния высокого качества

Практическое занятие № 2 по разделу 1 Введение. Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.

2.1. Новейшие материалы полупроводниковой электроники молибденит и графен: 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 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 PbS , использовались в кристаллических детекторах в радиоприемных устройствах.



Рис.1.4. Природный кристалл молибденита.

Древние греки минерал фиды 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 черта 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 наноэлектроники 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 наноэлектроники и наноструктур Андрас Кис рассказал о новой разработке: «Мы сделали первый прототип, он состоит всего из нескольких типовых транзисторов, но при этом способен производить бинарные логические операции, а это значит, что мы сможем сделать большие, намного более сложные, чипы» [5].

Важным достоинством сульфида молибдена по сравнению с кремнием является его двумерная структура, тогда как кремний образует объемные кристаллы. Двумерная структура позволяет легко формировать тонкие пленки толщиной $6,5 \text{ \AA}$ ($0,65 \text{ нм}$), 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 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.

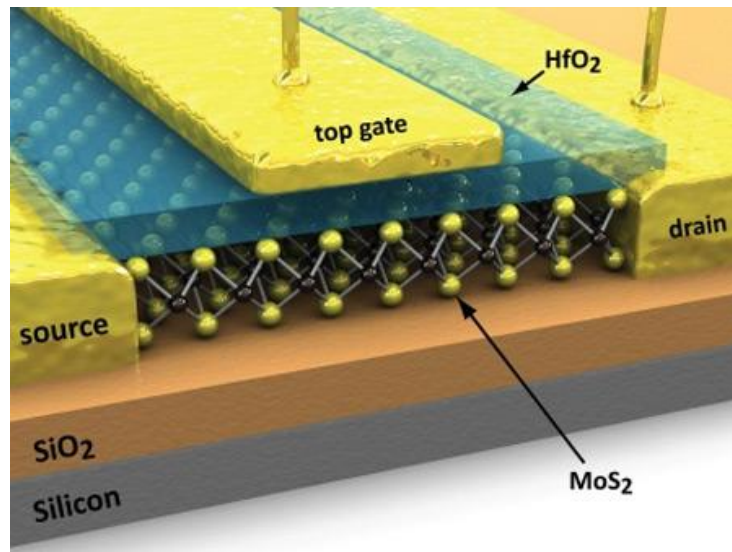


Рис.1.5. Молибденитовый полевой транзистор: «source» – «исток», «drain» – «сток», «top gate» – «затвор», HfO_2 – диэлектрик оксид гафния.

Канал транзистора из дисульфида молибдена сформирован на подложке из оксида кремния и отделен от затвора слоем материала с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ – 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 чественной, так и в мировой научной прессе в целом пока связано ственно 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].

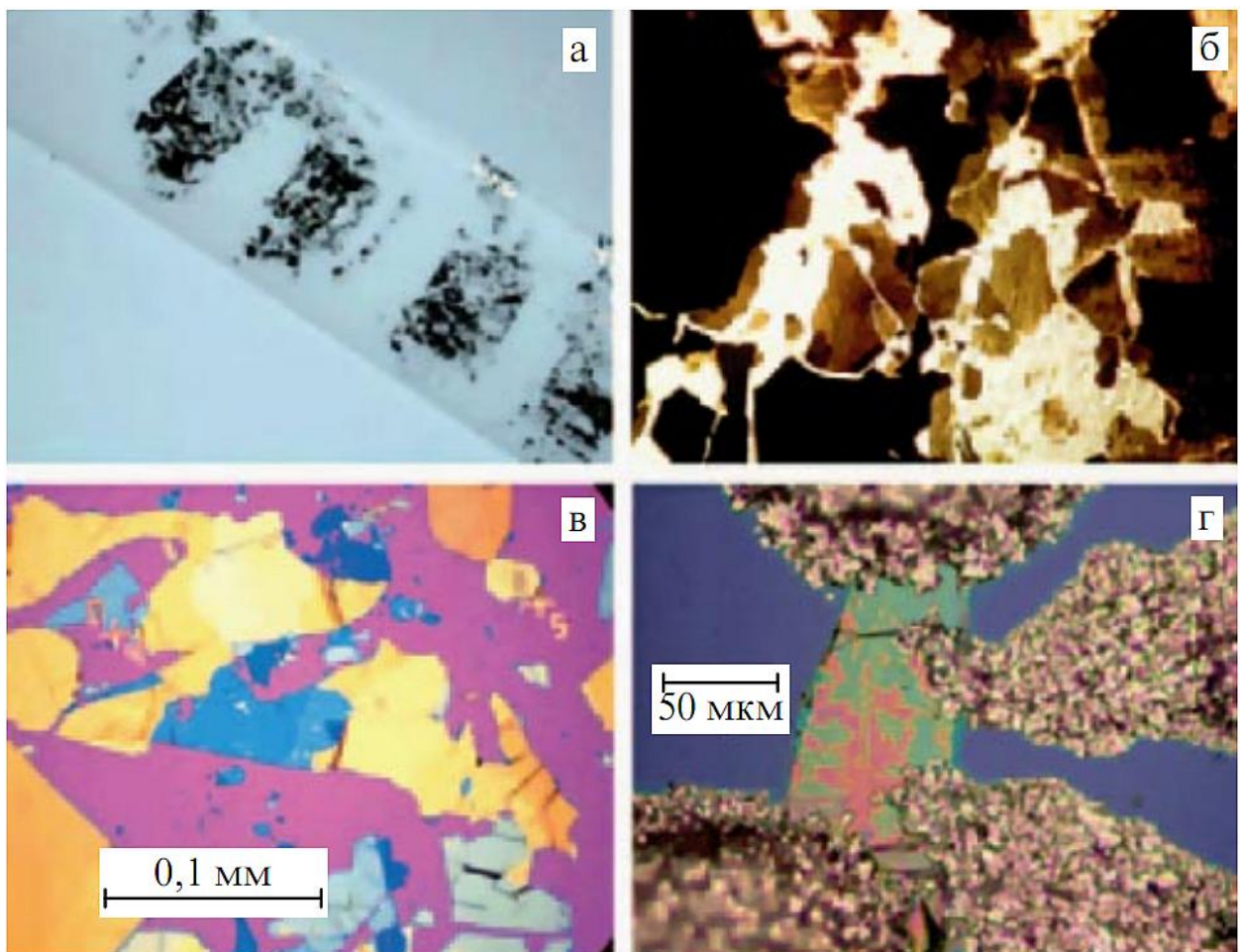


Рис.1.6. (а) Следы ВОПГ, оставшиеся на скотче. (б) Некоторые кристаллики оптически прозрачны, если взглянуть на них через оптический микроскоп или даже через увеличительное стекло. (в) На подложке из оксида кремния светопроницаемые кристаллики дают различные оттенки голубого цвета. (г) Одно из самых 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 когда 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 ~ 20 нм, а его поперечный размер соизмерим с диаметром человеческого волоса, ~ 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 $\sim 10^{21}$ 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 μ . В работе [6] для

графена при комнатной температуре приводится значение $\mu = 10000$ см²/В·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 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 ла, соответствующих двум типам раковских 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.

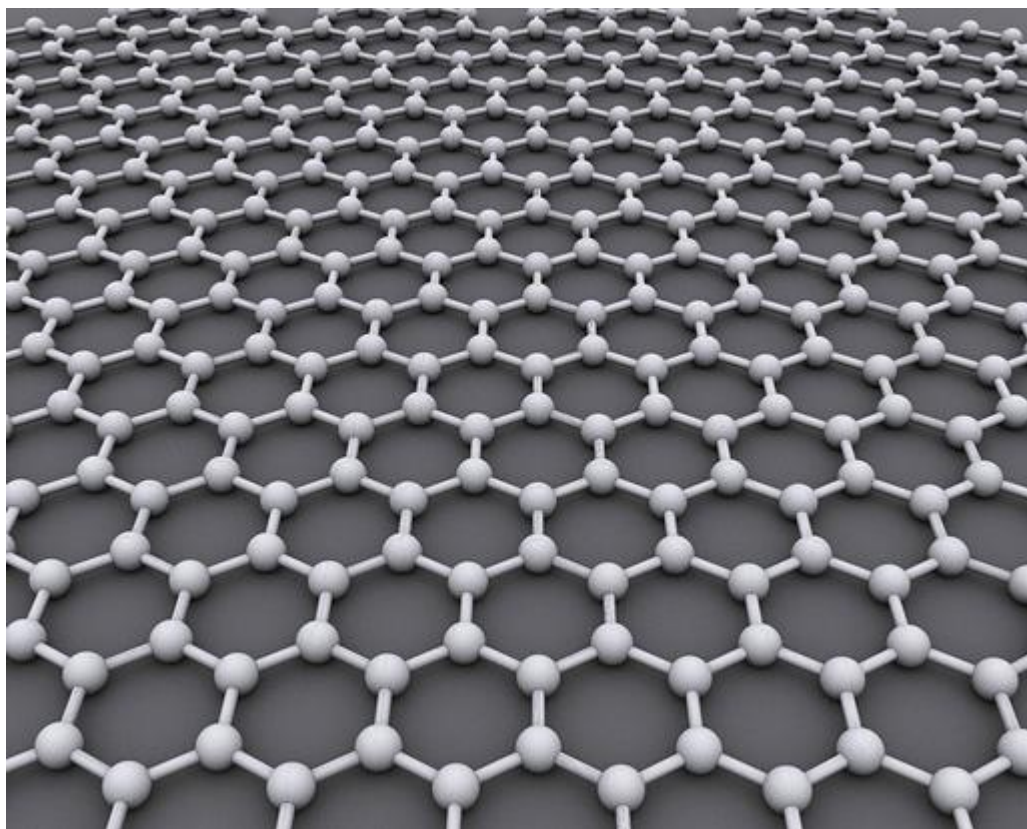


Рис.1.7. Графен представляет собой гексагональную решетку из атомов углерода толщиной в один атом.

Источник фото:

[http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2010/graphen_photo.jpg].

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 вые плёнки, перенесённые на новую кремниевую пластину с верхним слоем диоксида кремния. Именно синтез графена на кремниевых подложках методами, совместимыми с традиционными технологическими процессами полупроводниковой индустрии считается основой будущего наноэлектроники. 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.

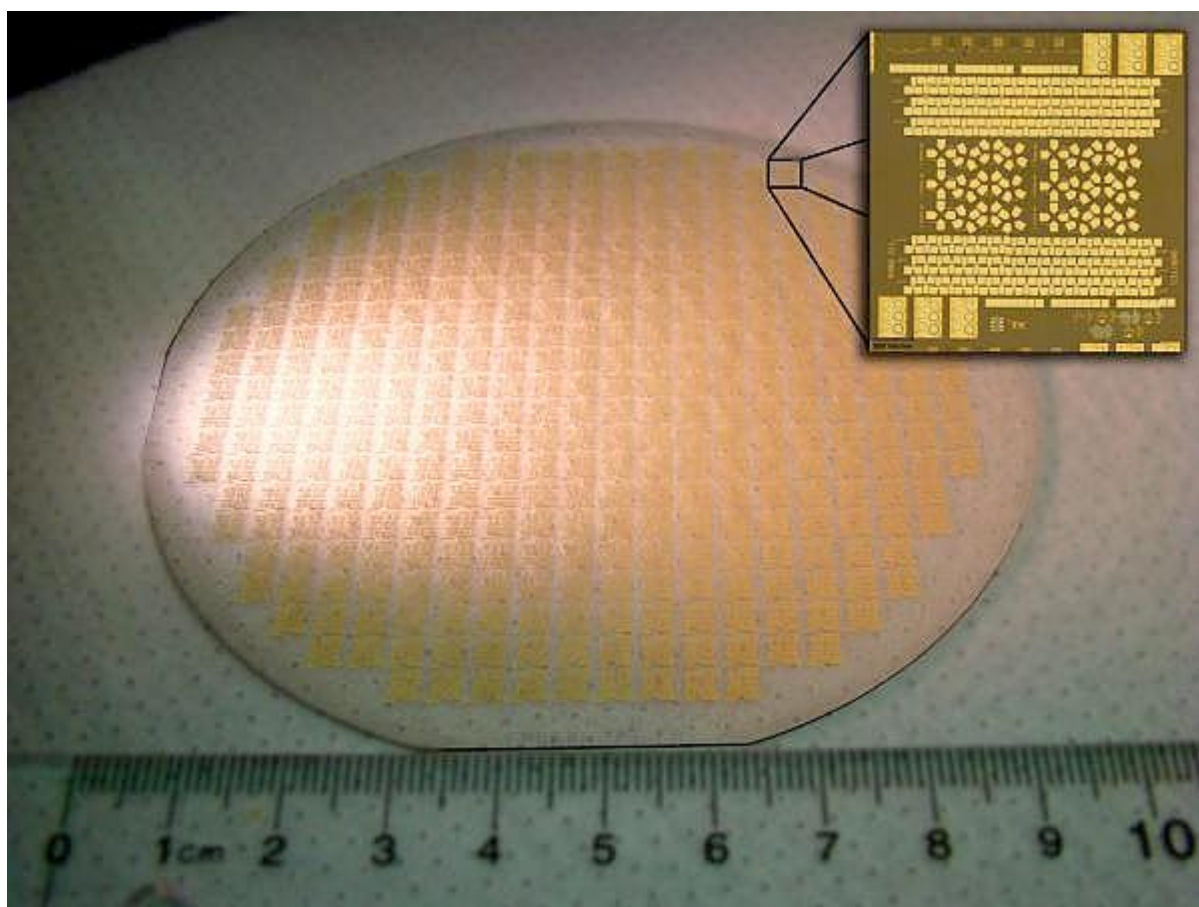


Рис.1.8. 100 мм пластина графена, содержащая приблизительно 75 000 устройств и тестовых структур. На вставке – оптическое изображение одного чипа. Каждый маленький квадрат на чипе составляет всего 100 мкм - толщина человеческого волоса. Устройства были изготовлены на Penn State Nanofab, учреждение Научно-исследовательского 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 слойными «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 Центра (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 синтезирования 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.

Практическое занятие № 3 и №4 по разделу №2 Актуальные проблемы интегральной микроэлектроники..

3.1. Проблемы на пути перехода от микро– к наноэлектронике

В соответствии с рис. 2.2. 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 настанет черед 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 дальнейшее 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 потолще, 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 HfO_2 , например, можно привести работы лабораторий Института неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН, г.Новосибирск [14] и лабораторий Intel [15]. Выбор этого вещества определяется его характеристиками – высокая диэлектрическая константа (~ 25), большая ширина запрещенной зоны ($\sim 5,6$ эВ). Слои готовились осаждением из газовой фазы с использованием в качестве исходных веществ диваловалоилметаната гафния, $\text{C}(\text{CH}_3)_3\text{COCHCO}(\text{CH}_3)_3$, и дициклопентадиэтил гафний бисдиэтиламина, $(\text{C}_5\text{H}_5)_2\text{Hf}(\text{N}(\text{C}_2\text{H}_5)_2)_2$ [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 $\text{Si/HfSiO}_4/\text{HfO}_2$ -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.

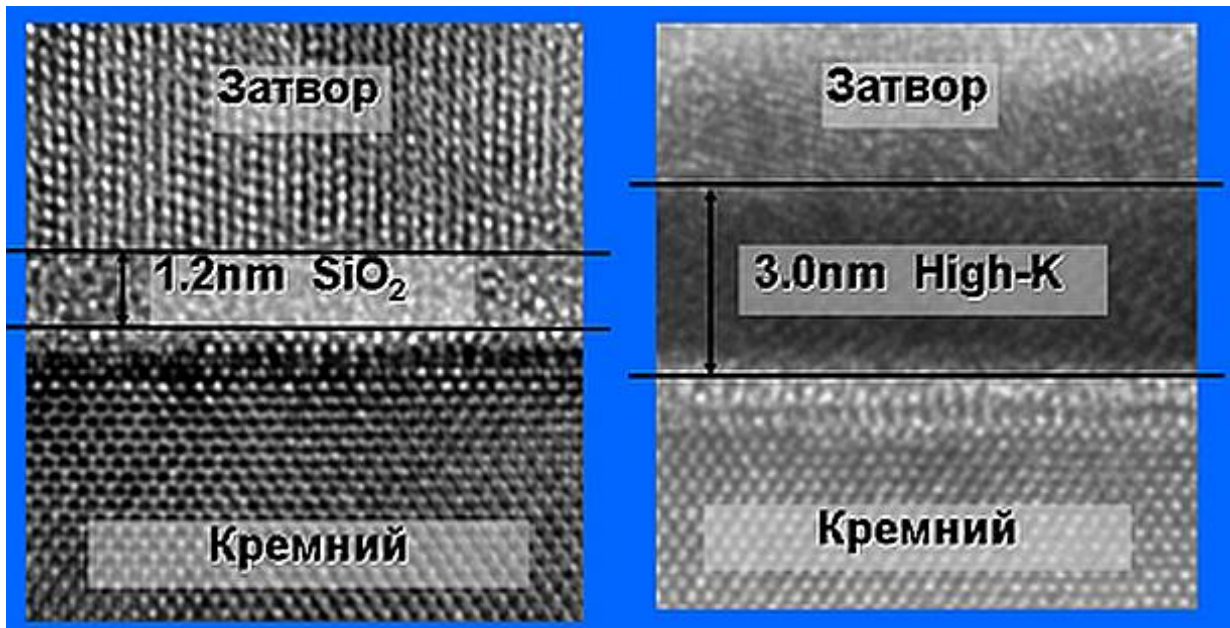


Рис.2.3. Структура полевого транзистора с разным подзатворным диэлектриком: диоксид кремния SiO_2 (слева) и оксид гафния HfO_2 (справа).

Емкость плоского конденсатора определяется выражением $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$,

где S – площадь обкладки конденсатора, d – толщина диэлектрика, ϵ – 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. Но диэлектрическая постоянная HfO_2 $\epsilon=20$ и гораздо больше, чем у 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 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 новых 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 не производит 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 металл-оксидные 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) и Matrix Semiconductor (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 многослойного 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).

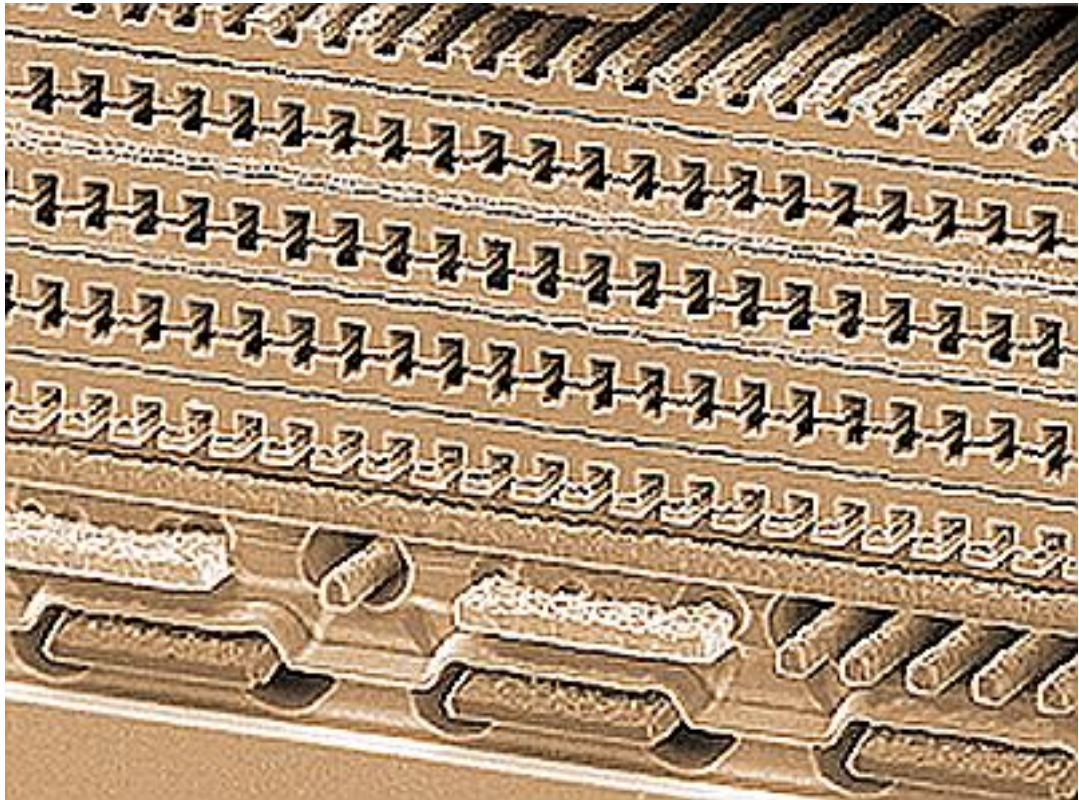


Рис.2.4. Кристалл Matrix 3-D Memory содержит четыре слоя транзисторов

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.

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.

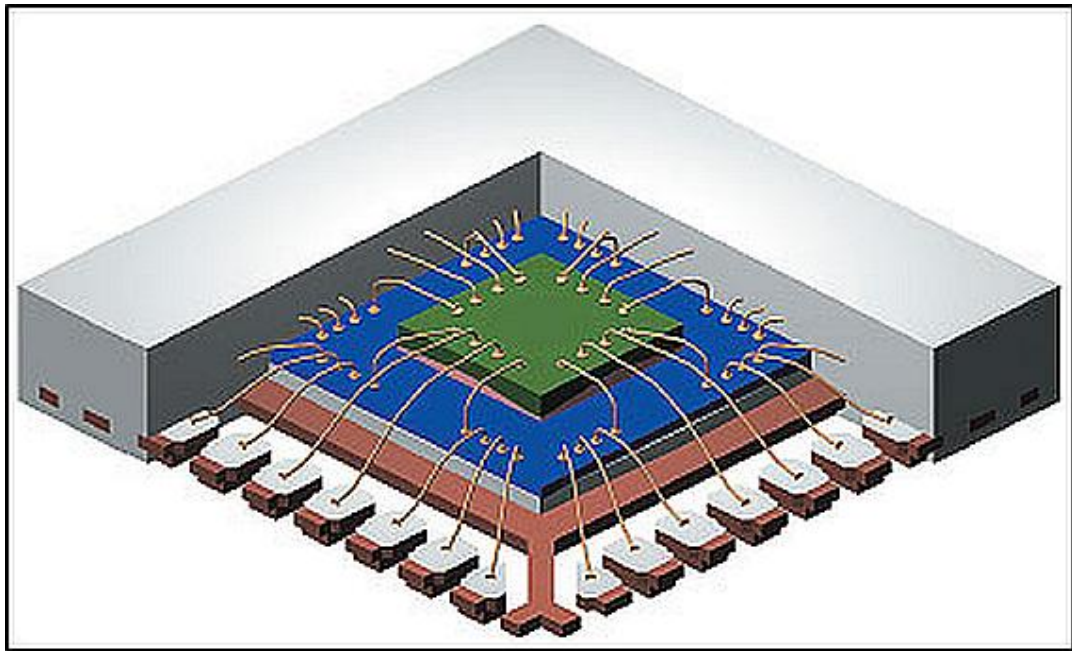


Рис.2.5. Сборка многослойной трехмерной микросхемы.

Практическое занятие № 5 по разделу №3 Актуальные проблемы функциональной электроники.

5.1. Единая модель прибора функциональной электроники

Анализируя устройства функциональной электроники, можно выделить некоторые элементы, характерные для всех конструкций.

Во всех приборах и изделиях функциональной электроники используются динамически неоднородности различного вида и различной физической природы. Это первый элемент в предложенной модели прибора функциональной электроники. Так, в акустоэлектронных устройствах используются динамические неоднородности в виде поверхностной акустической волны (ПАВ); в полупроводниковых приборах с зарядовой связью – зарядовые пакеты электронов или дырок; в приборах магнитоэлектроники – магнитостатические волны (МСВ) и т. д.

Все виды динамических неоднородностей генерируют, обрабатывают или хранят информацию в континуальных средах, как правило, в твердом те-

ле. Континуальная среда является *вторым* элементом модели. Вообще говоря, она может иметь любое агрегатное состояние. Наши интересы в области микроэлектроники сосредоточены в использовании твердого тела. По своим физико-химическим свойствам среда должна быть достаточно однородной на всем тракте распространения информационного сигнала. Статические неоднородности, имеющиеся на поверхности или внутри континуальной среды, служат только для управления динамическими неоднородностями и не используются для обработки и хранения информации. Динамические неоднородности, обрабатывая информационный сигнал в континуальных средах, не меняют их физико-химических свойств в условиях термодинамического равновесия.

Третьим элементом модели является генератор динамических неоднородностей, предназначенный для их ввода в канал распространения, расположенный в континуальной среде. Динамическая неоднородность может быть введена в информационный канал в континуальной среде и из-за ее пределов или сгенерирована в этом канале.

Устройство управления динамическими неоднородностями в тракте переноса информационного сигнала или в области его хранения является *четвертым* элементом в модели прибора.

Вывод или считывание информации осуществляется с помощью детектора. Это устройство позволяет преобразовать информационный массив, созданный динамическими неоднородностями, в массив двоичной информации. В этом случае можно использовать хорошо развитые устройства и методы цифровой обработки информации. Детектор является *пятым* элементом типовой модели.

Предложенная модель прибора функциональной электроники позволяет развить системный подход к анализу известных конструктивных решений – прототипов приборов, раскрыть физическую сущность явлений, лежащих в основе работы приборов, оптимизировать известные конструкции по технико-экономическим параметрам, а также разработать *прогнотип* – новое,

ранее неизвестное конструктивное решение с заданными мическими показателями.

Рассказать о всех видах динамических неоднородностей в ограниченных рамках затруднительно, но можно остановиться на одном, уникальном и многообещающем виде и на его примере показать ту многофункциональность и множество практических применений, присущие таким физическим явлениям, которые составляют основу функциональной полупроводниковой электроники.

5.2. Винтовая неустойчивость тока в полупроводниках

Винтовая неустойчивость была экспериментально обнаружена независимо и почти одновременно в полупроводниковом германии Ю.Л.Ивановым и С.М.Рывкиным и в газовом разряде Б.Ленертом в условиях, когда параллельно протекающему току приложено магнитное поле. Результаты этих открытий были опубликованы в 1958 году [17, 18].

В работе [19] было показано, что явление, обнаруженное в работе [18], обусловлено неустойчивостью плазмы относительно винтовых волн плотности, позже названной токово-конвективной неустойчивостью [20, 21]. Затем в работе [22] действительно был зафиксирован на фотографии вращающийся светящийся винт газового разряда при магнитном поле выше определенного порогового значения, а авторы работы [23] дали физическую интерпретацию механизма неустойчивости.

По аналогии с работой [19] результаты Ю.Л.Иванова и С.М.Рывкина [17] были объяснены М.Гликсманом [24], а экспериментальное доказательство винтовой волны плотности полупроводниковой плазмы было представлено в работе [25]. В работах зарубежных авторов название токово-конвективная неустойчивость не использовалось, а чаще использовался термин винтовая (screw , helical) неустойчивость [23,

24], который прочно закрепился в литературе. С 1991 года статья под таким названием появилась в энциклопедическом словаре [26]. Р.Ларраби и М.Стил попытались экспериментально выяснить физический механизм колебаний Иванова-Рывкина и впервые дали определение «осциллятор» прибору, состоящему из помещенного в продольное магнитное поле полупроводникового образца и сопротивления нагрузки, включенных последовательно с источником электрического питания [27]. Р.Ларраби провел важные экспериментальные исследования о влиянии на условия возбуждения осциллятора качества обработки поверхности образцов, их размеров, времени жизни носителей заряда и некоторых других параметров [28].

Открытия - Ю.Л.Ивановым и С.М.Рывкиным винтовой неустойчивости (ВН) в германии [17] и Дж.Б. Ганном [29] – микроволнового излучения в арсениде галлия – были основными стимулами к исследованию плазменных эффектов в полупроводниках.

С момента открытия интерес к исследованию винтовой неустойчивости в полупроводниках быстро возрастал, появилось большое количество экспериментальных и теоретических работ, опубликован ряд обзорных статей и монографий [30–35]. Столь значительный интерес обусловлен тремя основными причинами.

Во-первых, возможностью использования винтовой неустойчивости для разработки новых полупроводниковых приборов - усилителей, генераторов, чувствительных элементов с частотным выходом для различных физических величин [36–40].

Во-вторых, необходимостью получения достоверных границ физических величин, в которых возможна оптимальная работа приборов, использующих винтовую неустойчивость.

В третьих, возможностью моделирования с помощью проводников процессов, происходящих в газовой плазме. Параметры плазмы в полупроводниках могут точно задаваться и измеряться, а в газовой плазме подобная точность пока недостижима [34].

Значительный объем работ по винтовой неустойчивости в полупроводниках, опубликованных к настоящему времени, в основной своей доле посвящен закономерностям развития ВН в германиевых образцах. Кремний, являющийся базовым материалом современной электроники, выгодно отличается от германия в практическом плане. Параметры поверхности кремния более стабильны во времени за счет естественного наращивания окисла SiO_x ($x=1,2$), кроме того, разработаны надежные методы искусственной защиты поверхности кремниевых структур. Именно благодаря нестабильности свойств поверхности германия, приборы на основе ВН в германии имели нестабильные во времени параметры [36–38]. Благодаря более широкой запрещенной зоне рабочая температура кремниевых диодов выше, чем германиевых. Определенные практические выгоды, ожидающиеся от кремниевых приборов с винтовой неустойчивостью, делают актуальными исследования винтовой неустойчивости в кремнии.

Немногочисленные публикации таких исследований имелись до начала 90-х годов. Исследования проводились на длинных образцах, что является традиционным для подавляющего большинства исследований по винтовой неустойчивости. Плазма создавалась инжекцией неравновесных носителей заряда из контактов, расположенных на противоположных торцах образца. Расстояние между контактами составляло (10–14) мм и большинство исследований выполнено при температуре 77К [41, 42, 43]. Исключением являются работы [44, 45], в которых винтовая неустойчивость была впервые обнаружена и исследована при комнат-

ной температуре в кремниевых разцах в форме толстых пластин с расстоянием между контактами 14 мм.

Для практического применения винтовой неустойчивости в кремнии необходимы исследования условий ее возбуждения, основных закономерностей и влияния на них внешних факторов в образцах, имеющих минимальные размеры. Однако из теоретических и экспериментальных исследований, выполненных для германия, следует, что чем меньше расстояние между инжектирующими контактами, тем труднее возбудить винтовую неустойчивость.

Практическое занятие № 6 по разделу №3 Актуальные проблемы функциональной электроники.

6.1. Фундаментальный и практический интерес к исследованиям ВН

В настоящее время интерес к исследованиям ВН обусловлен двумя обстоятельствами. С фундаментальной точки зрения эти исследования дают экспериментальные знания для развития теории в надпороговой области возбуждения ВН, где эта теория развита еще недостаточно хорошо. С практической – это возможность создания на основе осцилляторного эффекта новых приборов, например генераторов ВЧ диапазона и чувствительных элементов (ЧЭ) с частотным выходом различного назначения.

Интерес к ЧЭ с частотным выходом обусловлен их главными преимуществами перед обычными аналоговыми ЧЭ: высокая помехозащищенность при передаче информационного сигнала по проводным линиям (например, в компьютерных сетях) и простота преобразования информационного сигнала в цифровой код и сопряжения ЧЭ с компьютером. Интерес к этой тематике как отдельных исследователей и разработчиков, так и крупных фирм – производителей электронных компонентов привел к созданию международной

ассоциации International Frequency Sensor Association (IFSA). WEB-сайт этой организации находится по адресу www.sensorsportal.com.

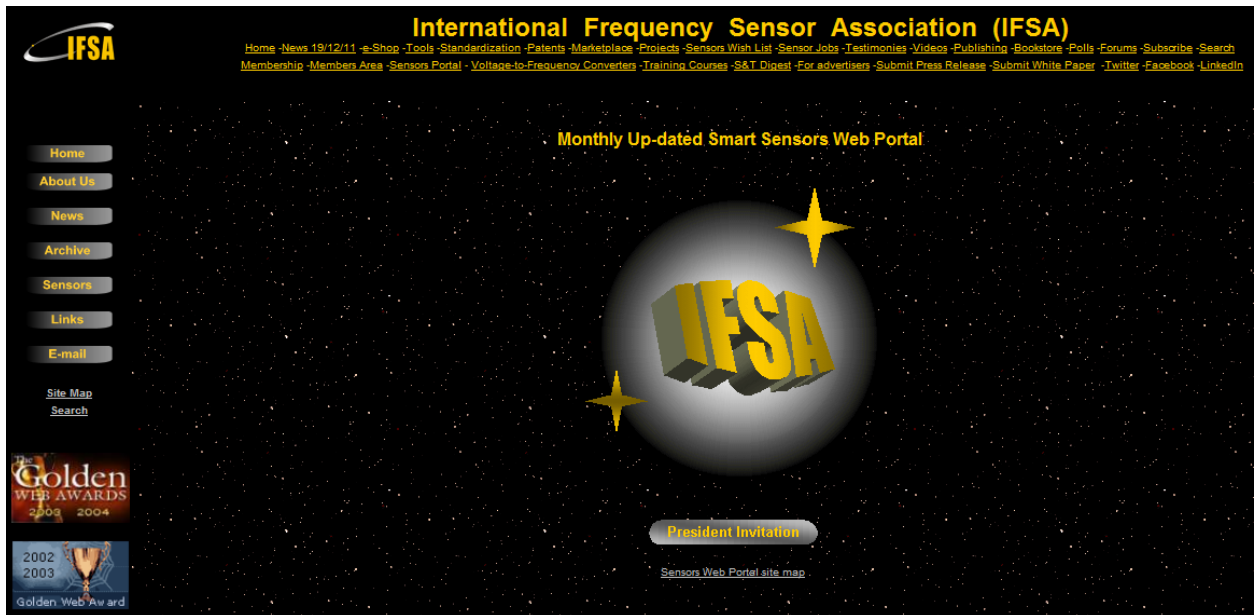


Рис.3.1. Главная страница веб-портала IFSA.

Принцип действия осцилляторного ЧЭ с частотным выходом основан на зависимости частоты осцилляторной генерации от различных внешних факторов: магнитной индукции, температуры, давления, угла между векторами \mathcal{E} и \mathbf{B} и других. Такие приборы были разработаны на основе германиевых осцилляторов [36–40], но благодаря нестабильности свойств поверхности германия, приборы на основе ВН в германии имели нестабильные во времени параметры [36–38]. Кремний выгодно отличается от германия в практическом плане. Параметры поверхности кремния более стабильны во времени за счет естественного наращивания окисла SiO_x ($x=1,2$), а благодаря более широкой запрещенной зоне рабочая температура кремниевых диодов выше, чем германиевых.

Для практического применения необходимы кремниевые структуры в форме стержней, имеющие минимальное расстояние d_z между торцевыми инжектирующими контактами. Чем меньше d_z , тем меньше магнитный зазор в системе малогабаритных постоянных магнитов, в который помещается полупроводниковая структура, тем больше значение B и тем шире температурный диапазон работы осцилляторного прибора и выше значения частоты и

амплитуды осциллирующей цепи при заданном напряжении на осциллографе.

6.2. Магниточувствительный элемент с частотным выходом

В магниточувствительном элементе (МЧЭ) с частотным выходом на основе кремниевого осциллятора [41, 42, 49] использована следующая схема включения $n^+ - \pi - p^+$ -структуры и регистрации информационного сигнала. Электрическая цепь, состоящая из $n^+ - \pi - p^+$ -структуры и сопротивления нагрузки R_n питается фиксированным напряжением U^* в виде одиночных или периодически повторяющихся с частотой $40 \div 60$ Гц прямоугольных импульсов с длительностью t_n . Колебания тока регистрируются как колебания напряжения U_n на сопротивлении нагрузки R_n , включенном последовательно с $n^+ - \pi - p^+$ -структурой. Частота колебаний тока, при $U^* = \text{constant}$ и неизменной температуре T , будет зависеть только от B и угла φ между векторами \mathcal{E} и B . Условие $\varphi = \text{constant}$ выполняется за счет соответствующей конструкции держателя $n^+ - \pi - p^+$ -структуры, а изменение T можно компенсировать с помощью подстроечного резистора в цепи $n^+ - \pi - p^+$ -структуры. Однако при работе МЧЭ совместно с компьютером влияние температуры окружающей среды и угла φ можно скомпенсировать программными средствами за счет вычислительных и логических возможностей компьютера.

Магниточувствительный элемент имеет приемлемые для практического использования характеристики: рабочая температура $T = 293$ К, $U^* = 20$ В, $t_n = 100$ мкс, $R_n = 1$ Ом, измерительный диапазон $\Delta B = 1.4 \div 2.4$ Тл, изменение амплитуды информационного сигнала $\Delta U_n = (1 \div 14)$ мВ, чувствительность МЧЭ (df/dB) ≈ 60 кГц/Тл (см. рис.3.2, кривая 1) [41].

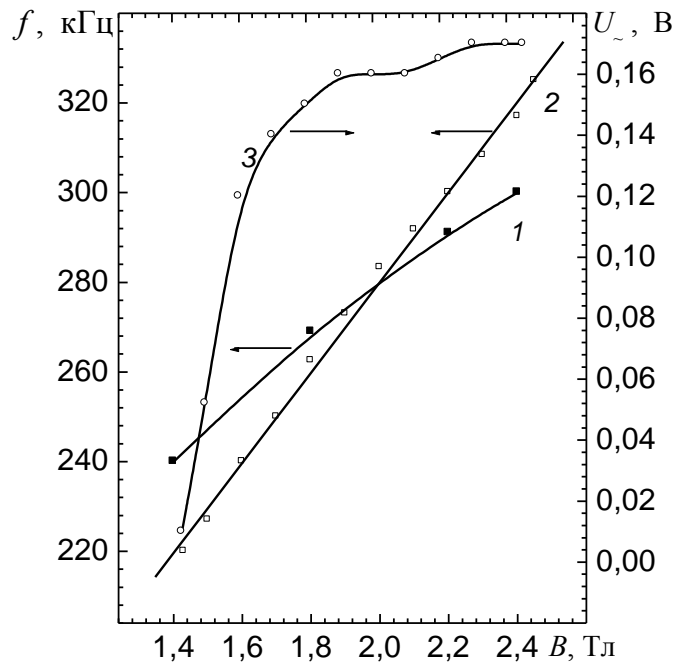


Рис.3.2. Частота (1, 2) и амплитуда (3) информационного сигнала осцилляторного МЧЭ с частотным выходом ($T = 293 \text{ K}$)

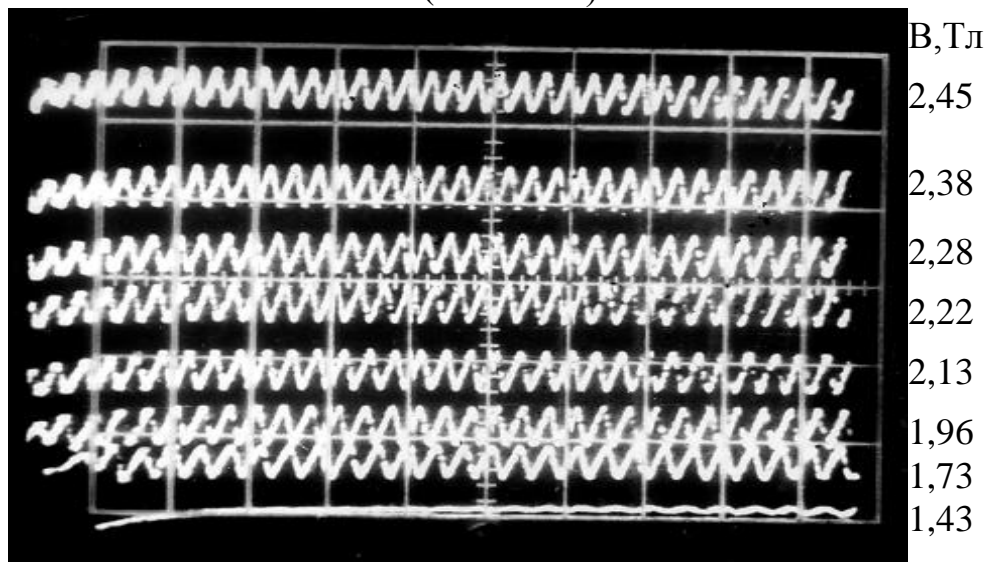


Рис.3.3. Осциллограммы сигнала осцилляторного МЧЭ с частотным выходом и соответствующие им значения магнитной индукции ($T = 293 \text{ K}$).

В результате дальнейшей работы установлено [49], что можно улучшить характеристики МЧЭ изменив определенные технологические параметры на этапе изготовления $n^+ - \pi - p^+$ -структуры, ее поперечные размеры, величины U^* и R_H . При $U^*=40$ В, $t_n = 300$ мкс, частоте повторения прямоугольных импульсов напряжения 45 Гц, $R_H=10$ Ом возросла чувствительность МЧЭ до 110 кГц/Тл, увеличились линейность характеристики (см. рис.3.2, кривая 2) и амплитуда информационного сигнала, от пороговой до 0,16 В, (см. рис.3.2, кривая 3), при этом форма колебаний тока в цепи $p^+ - \pi - n^+$ -структуры стала более гармоничной (см. рис.3.3) [42]. Осциллограммы были сфотографированы при $T = 293$ К и различных значениях индукции B , показанных рядом с соответствующей осциллограммой.

Нижняя осциллограмма ($B=1.43$ Тл) соответствует порогу возбуждения ВН и характеризуется сравнительно небольшой амплитудой $U_{\sim} = 0.01$ В.

6.3. Термочувствительный элемент с частотным выходом

Осцилляторный сенсор температуры представляет собой осциллятор, построенный с использованием малогабаритных постоянных магнитов из сплава FeNdB. Сенсор работоспособен в широком интервале температур от -196°C до $+63^\circ\text{C}$ при питании прямоугольными импульсами напряжения. В диапазоне температур от -196°C до -111°C питание от аккумуляторов $4.5 \div 9$ В. В целом частотно-температурная характеристика его нелинейная с линейными участками в начале и в конце характеристики, но ее можно линеаризовать в дискретных интервалах температуры, изменяя величину рабочего напряжения U^* (табл. 3.1) [43,44].

В наиболее употребительном для практике диапазоне температур $-10 \div +63^\circ\text{C}$ сенсор обладает высокими чувствительностью 3.1 кГц/К и амплитудой информационного сигнала $0.47 \div 0.04$ В. Кремниевый осцилляторный сенсор температуры с частотным выходом имеет патентную защиту, а в 2006 г. эта разработка награждена дипломом VI Московского международного салона инноваций и инвестиций [43,44, 46–49].

Таблица 3.1. Параметры осцилляторного сенсора температуры

U^* , В	T , °С	df/dT , Гц/°С	Интервал частот, кГц
10	-196 ÷ -84	10700	1900 ÷ 700
20	-84 ÷ -20	14800	1250 ÷ 300
30	-20 ÷ 0	6200	425 ÷ 300
50	-20 ÷ 25	5500	550 ÷ 300
65	10 ÷ 62	3100	425 ÷ 200

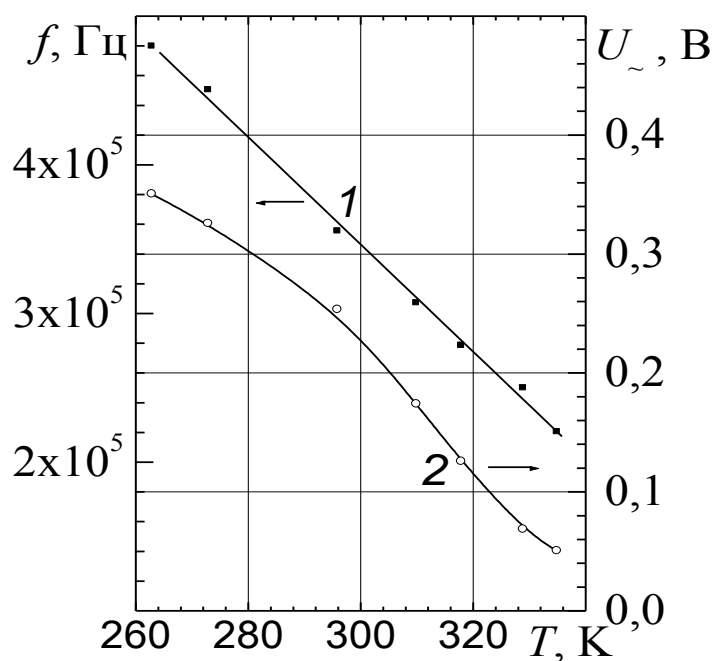


Рис.3.4 Температурная зависимость частоты при $U=65$ В частоты (1) и амплитуды (2) переменного напряжения на нагрузочном сопротивлении 10 Ом в импульсном режиме работы осциллятора

Практические занятия № 7 и 8 по Разделу 4 Графеновая электроника – электроника будущего.

7.1. 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 новый транзистор с рекордно-быстрым для транзисторов на базе графена быстродействием и расширенным диапазоном рабочих температур.

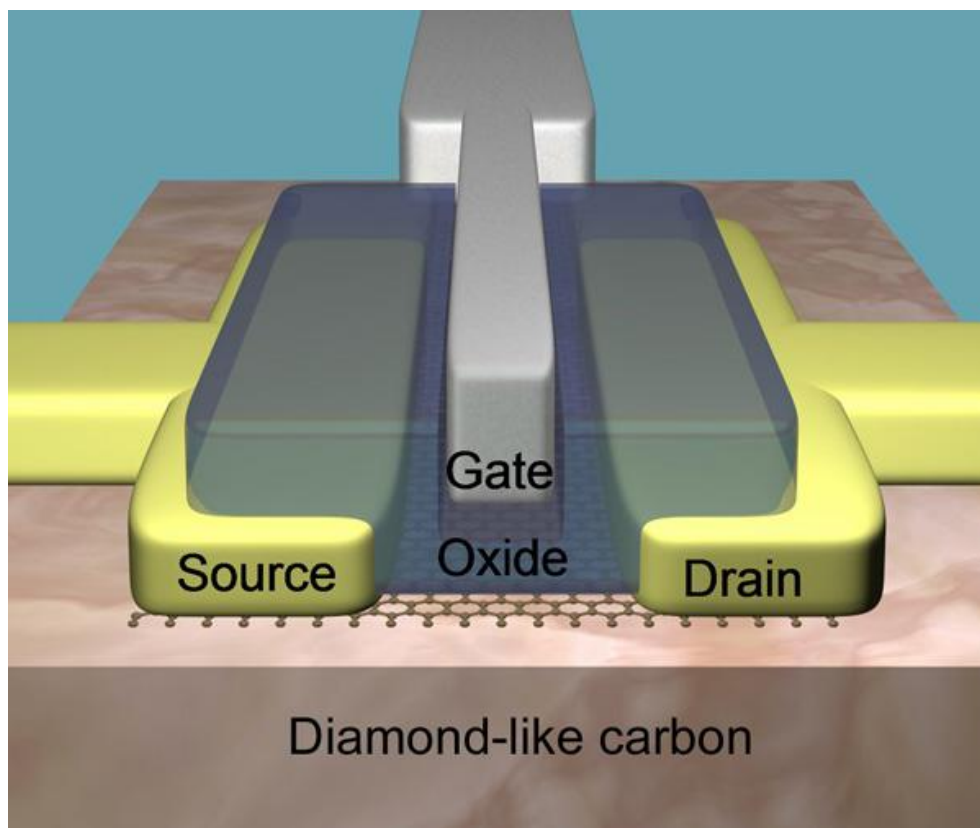


Рис.4.3. Принципиальная схема графенового транзистора на алмазоподобной подложке (фото: P Avouris) [53].

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 проблему. 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.4.3.

На этой базе исследователи построили полевой транзистор с затвором длиной всего 40 нанометров (рис.4.3.). 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.

7.2. 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 (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 графита, 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 меж-

слоевое пространство. Такая ность 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—700оС), 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.

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

2.

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 наноэлектронных 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

я зонная 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 confinement, намного больше, чем в аналогичных устройствах на основе других материалов. Это позволяет одноэлектронным транзисторам работать при комнатной температуре.

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, иллюстрированную картинками с сайтов, подготовьте доклад и выступите на практическом занятии с защитой Вашей точки зрения на поставленную проблему.

1. к Разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.

1.1. Кремний «солнечного качества»: производство в России. Фотоэлектрических преобразователи

Литература:

1. Кремний «солнечного качества»: производство в России. [Электронный ресурс] AbercadeConsulting Аналитика URL: <http://abercade.ru/research/analysis/1920.html> (дата обращения 22.08.2013)

2. Карабанов С.М., Трунин Е.Б., Приходько В.В. Способ чения кремния солнечного качества Патент РФ 17.09.2002 ный ресурс] FindPatent.RU URL: <http://www.findpatent.ru/patent/223/2237616.html> (дата обращения 22.08.2013)
3. Фотоэлектрические преобразователи [Электронный ресурс] Подольский химико-металлургический завод URL: http://www.pcmp.ru/catalogue/show_product/4/ (дата обращения 22.08.2013)

1.2. Органическая электроника - современные тенденции и перспективы.

Литература:

1. В.Ф.Разумов. Органическая электроника - современные тенденции и перспективы. [Электронный ресурс] URL: http://www.edu-cons.net/atlas_last/doc/236/18.pdf (дата обращения 22.08.2013)
2. Нисан А. Восемь тенденций, которые изменяют электронику / Технологии в электронной промышленности. – 2011. – №2 [Электронный ресурс] URL: http://www.tech-e.ru/2011_02_4.php (дата обращения 22.08.2013)

2. к Разделу 2 Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.

2.1. Энергонезависимая резистивная память (Resistive RAM, RRAM)- терабайты объема и высокое быстродействие.

Литература:

1. Технология RRAM – скорый переворот в области оперативной памяти. [Электронный ресурс] DailyTechInfo URL: <http://www.dailytechinfo.org/infotech/55-texnologiya-rram-skoryj-perevorot-v-oblasti.html> (дата обращения 22.08.2013)
2. Резистивная память компании Crossbar - терабайты объема и скорость, в 20 раз превосходящая скорость Flash-памяти [Электронный ресурс] DailyTechInfo URL: <http://www.dailytechinfo.org/electronics/5061-rezistivnaya-pamyat-kompanii-crossbar-terabayty-obema-i-skorost-v-20-raz-prevoshodyaschaya-skorost-flash-pamyati.html> (дата обращения 22.08.2013)

2.2. Новая технология микроскопии для контроля производства трехмерных полупроводниковых чипов TSOM (Through-Focus Scanning Optical Microscopy).

Литература:

1. Новая технология микроскопии облегчит разработку и обеспечит контроль производства трехмерных полупроводниковых чипов [Электронный ресурс] DailyTechInfo URL:

- <http://www.dailytechinfo.org/nanotech/4959-novaya-tehnologiya-mikroskopii-oblegchit-razrabotku-i-obespechit-kontrol-proizvodstva-trehmernih-poluprovodnikovyyh-chipov.html> (дата обращения 22.08.2013)
2. Through-Focus Scanning Optical Microscopy (TSOM) [Электронный ресурс] URL: <http://en.wikipedia.org/wiki/TSOM> (дата обращения 22.08.2013)

3. к Разделу 3 Актуальные проблемы функциональной электроники..

3.1. Приборы на эффекте Ганна. Диэлектрическая электроника. Хематроника. Молекулярная электроника и биоэлектроника.

Литература:

Троян П.Е. Функциональная электроника: Учебное пособие.-Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012.- 70 с. [Электронный ресурс] Кафедра физической электроники ТУСУР URL: http://miel.tusur.ru/images/files/Uchebno-metodicheskii_kompleks%20disciplin/Troyan/Troyan_PE_-_Функциональная_электроника.zip

4. к Разделу 4 Графеновая электроника – электроника будущего.

4.1.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/ (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 трехмерный 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 по-

ложили 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 ~ 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 ~ 10 нм. Поскольку никаких жёстких ограничений на величину отношения токов в открытом и закрытом состоянии нет, в будущем, при оптимизации структуры и использовании более качественных диэлектриков (замене SiO₂), она также должна заметно подняться.

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

4.2. Германан - новый материал полупроводниковой электроники: получение и перспективные приборы.

Литература:

1. Германий одноатомной толщины сможет в будущем заменить кремний в полупроводниках и электронике
2. Германан-новый материал для полупроводников. [Электронный ресурс] Meganauka.com URL: <http://meganauka.com/otkritiya/976-germanan-novyy-material-dlya-poluprovodnikov.html> (дата обращения 22.08.2013).
3. Германан против графена, кто выйдет победителем? [Электронный ресурс] Naucon. Новости науки URL: <http://naucon.ru/2013/04/13/germanan-protiv-grafena-kto-vyiydet-pobeditelem/> (дата обращения 22.08.2013)
4. Кремний в будущих поколениях электронных устройств заменит германан, а не графен [Электронный ресурс] МК. Российский региональный еженедельник Наука. URL: <http://www.mk.ru/science/technology/article/2013/04/11/840097-kremniy-v-buduschih-pokoleniyah-elektronnyih-ustroystv-zamenit-germanan-a-ne-grafen.html> (дата обращения 22.08.2013).

5. В борьбе за транзистор победил германий [Электронный супс] Правда.Ру URL: <http://www.pravda.ru/science/eureka/discoveries/19-04-2013/1153061-0/> (дата обращения 22.08.2013).

Германан - новый одноатомный материал на основе германия. В результате серии экспериментов группе материаловедов из Университета штата Огайо (США), которую возглавляет доктор Джошуа Голдбергер, удалось сделать значительный по размерам двумерный (то есть одноатомный в толщину) образец вещества на основе германия. Подобное уже создавалось на основе многих веществ, например, углерода – его двумерная модификация называется графан (гидрированный графен, в котором каждый атом углерода связан дополнительно с атомом водорода). Водород имеется и в похожем новом веществе на основе германия, поэтому разработчики назвали его германаном (по аналогии с графаном).

Для того, чтобы получить это вещество, исследователи применили нестандартную методику. Обычный германий состоит из многослойных кристаллов, в которых отдельные атомарные слои нестабильны, то есть они могут смещаться друг относительно друга. И для того, чтобы получить устойчивый слой из германия ученые группы Голдбергера вырастили кристаллы этого элемента с включениями из атомов кальция. Когда формирование кристаллов закончилось, кальций был растворен в воде, а на освободившиеся места ученые внедрились атомы водорода. Именно это и позволило без всяких проблем отделить от исходного кристалла одноатомные слои.

После того, как германан был получен, ученые-материаловеды изучили его физические и химические свойства. Выяснилось, что включенный в его состав водород придал материалу стабильность — германан совсем не окисляется на воздухе. Но самый большой сюрприз ожидал исследователей, когда они измерили электронную проводимость нового вещества — выяснилось, что скорость движения электронов в германане в пять раз выше, чем в чистом германии, и в десять раз — чем в кремнии!

Это, как вы понимаете, моментально сделало германий одним из самых перспективных материалов для полупроводниковой электроники будущего. Дело в том, что сейчас при тенденции миниатюризации роль скорости перемещения электрона в полупроводнике играет значительную роль — ведь при малых размерах транзистора и медленном электроне эффективность работы устройства существенно снижается. Таким образом, у германия появился шанс взять реванш у кремния и вытеснить его из современной компьютерной сферы и других высокотехнологических отраслей.

Самостоятельная работа студента. Темы рефератов

1.1. к Разделу 1 Актуальные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.

1. Современные технологические материалы для сборки и герметизации интегральных микросхем, светодиодов, силовых полупроводниковых приборов и модулей.
2. Новое поколение широкозонных полупроводниковых материалов (нитрид галлия, GaN) и приборов (гетероэпитаксиальные структуры (ГЭС) типа AlGaIn/GaN).
3. Современные электроизоляционные компаунды.
4. Основные полупроводниковые материалы и изделия.
5. Ян Чохральский и его способ выращивания крупных кристаллов металлов и полупроводников: биография ученого, его публикации, современные варианты метода Чохральского, проблемы выращивания кристаллов большого диаметра.
6. Метод Вернейля для выращивания кристаллов: биография Августа Вернейля, его публикации, современные варианты метода, проблемы выращивания кристаллов.

1.2. к Разделу 2 Актуальные проблемы интегральной микроэлектроники..

1. Обратный инжиниринг микросхем и изделий электроники и коммерческая тайна.
2. Снижение потребляемой мощности интегральных микросхем при сохранении высокого быстродействия — одна из важнейших проблем микроэлектроники.
3. Тенденции развития, новые направления и прогноз развития микроэлектроники.
4. Российская микроэлектроника 2012/2013: итоги и прогнозы.
5. Российский рынок электроники 2012/2013: итоги и прогнозы.
6. Электронная стратегия России.

7. Новый стратегический план развития полупроводниковых технологий (ITRS)

1.3. к Разделу 3 Актуальные проблемы функциональной электроники.

1. Магнетоэлектроника – направление функциональной микроэлектроники: история развития и актуальные проблемы.
2. Криоэлектроника (криогенная электроника): история развития и актуальные проблемы.
3. Использование в микроэлектронике эффектов Джозефсона: сущность эффектов, перспективы использования в электронике.
4. Акустоэлектроника – направление функциональной микроэлектроники: история развития и актуальные проблемы.
5. Органические полупроводники и перспективами использования их в микроэлектронике.
6. Интегральная оптика, обеспечивающая создание сверхпроизводительных систем передачи и обработки оптической информации.

1.4 к Разделу 4 Графеновая электроника – электроника будущего.

1. Графеновая антенна для высокоскоростных приемно-передающих устройств для терабитных скоростей обмена информацией в беспроводных 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. Почему кремний стал основным материалом современной микроэлектроники
2. Опишите технологию получения монокристаллического кремния
3. Опишите состояние и перспективы развития производства поликристаллического кремния в Российской Федерации
4. Опишите производство поликристаллического кремния по технологии восстановления в плазме СВЧ разряда
5. Опишите метод выращивания монокристаллов кремния методом Чохральского
6. Опишите метод очистки монокристаллов кремния методом бестигельной зонной плавки.
7. Расскажите о состоянии и перспективах производства кремния в России.

8. Расскажите о молибдените, его свойствах и перспективных полупроводниковых приборах на его основе
9. Что такое графен, опишите структуру материала и его уникальные свойства.
10. Опишите известные Вам способы получения графена.
11. За что получили Нобелевскую премию Андрей Гейм и Константин Новосёлов.
12. Опишите свойства монослойного и двухслойного графена.
13. Опишите методы получения пластин графена больших размеров, пригодных для массового производства графеновых интегральных схем.
14. Кто такой Гордон Мур и какой закон носит его имя и о чем говорит этот закон? Каким способом был получен закон Мура ?
15. Что такое БИС и СБИС, технологические основания их появления ?
16. Каковы принципиальные качественные изменения, связанные со значительными уменьшениями размеров элементов ИС, нанотехнологии.
17. Назовите и опишите основные проблемы перехода от микро - к нано-электронике.
18. Способы преодоления проблемы нано–№1
19. Способы преодоления проблемы нано–№2
20. Способы преодоления проблемы нано–№3
21. Каковы минимально возможные размеры диодов и транзисторов?
22. Что такое high-k технология и для чего она нужна.
23. Назовите новые подходы к созданию электроники наноразмерных элементов и наноструктур.
24. Расскажите об организации передачи сигнала с использованием спиновых волн.
25. Что такое многократное использование электронов в наноструктурах
26. Что такое углеродные нанотрубки и кремниевые нанопровода
27. Трёхмерная технология производства микросхем
28. Причины актуальности функциональной электроники
29. Что лежит в основе функциональной электроники
30. Единая модель прибора функциональной электроники
31. Винтовая неустойчивость тока в полупроводниках: история открытия, механизм, свойства.
32. Основные причины интереса к винтовой неустойчивости, какие новые приборы создаются на её основе.
33. Опишите устройство и основные характеристики осцилляторного сенсора магнитной индукции
34. Опишите устройство и основные характеристики осцилляторного сенсора температуры
35. Опишите устройство и основные характеристики осцилляторного порогового сенсора температуры
36. Опишите устройство и основные характеристики осцилляторного генератора.

37. Опишите первые транзисторы на графене.
38. Опишите графеновую транзисторную технологию GNR-FET
39. Опишите устройство полевого графенового транзистора
40. Расскажите о высокоскоростных графеновых транзисторах, их устройстве и конструкции.
41. Расскажите о высокоскоростных графеновых транзисторах и их технических характеристиках.
42. Расскажите о перспективах развития наноэлектроники в России

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 MoS₂ transistors // Nature Nanotechnology.– 2011 .– v. 6 .– p. 147–150.
5. MoS₂ 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, dimir 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. Cai¹, 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://educons.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. Никновение 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 V. 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; Оpubл. 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 5th 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. Oscillistor 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. циллисторные сенсоры с частотным выходом // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. Межвузовский сборник. ISSN 2223-2656. Изд. тГТУ.– 2011 .– с.120 – 123
50. H. Li at al. Chemically Derived, Ultrasmooth 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.