

Министерство образования и науки РФ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
Институт инноватики

Утверждаю
Зав.кафедрой
«Управление инновациями»

_____ А.Ф. Уваров

" ____ " _____ 2011г.

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

«Современные проблемы науки и производства в области электронной техники»

Подготовлена в рамках проекта:

«Апробация программы опережающей профессиональной подготовки (уровень - магистратура) и учебно-методического комплекса, ориентированных на инвестиционные проекты ГК «Роснано» по разработке и производству мультимедийных многопроцессорных систем на кристалле»

Заказчик: Фонд инфраструктурных и образовательных программ ОАО «Роснано»)

Факультет инновационных технологий

Кафедра «Управление инновациями»

Министерство образования и науки РФ
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
ИНСТИТУТ ИННОВАТИКИ
ФАКУЛЬТЕТ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
Кафедра «Управление инновациями»

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАУКИ И ПРОИЗВОДСТВА В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

разработчик доцент, к.ф.м.н. Дробот П.Н.

Томск 2011

Содержание

1. Современные проблемы получения и производства материалов

полупроводниковой электроники.....	4
1.1. Кремний – основной материал современной электроники.	4
1.2. Традиционная технология получения поликристаллического кремния	5
1.3. Производство поликристаллического кремния в Российской Федерации.	6
1.4. Производство поликристаллического кремния по технологии восстановления в плазме СВЧ разряда	8
1.5. Получение монокристаллического кремния.....	11
1.6. После кремния будет кремний. Но все таки... Молибденит.....	17
1.7 Графен.....	20
1.8. В направлении к графеновой электронике.....	24
2. Современные проблемы интегральной микроэлектроники	28
2.1. Гордон Мур: от компании Шокли до компании Intel	28
2.2. Проблемы на пути перехода от микро– к наноэлектронике	32
2.3. Новые подходы к созданию электроники наноразмерных элементов и наноструктур.....	36
3. Современные проблемы функциональной электроники.....	42
3.1 Функциональная электроника – электроника четвертого поколения – альтернатива интегральной микро– и наноэлектронике.	42
3.2. Динамические неоднородности и токовые неустойчивости – основа функциональной электроники.....	43
3.3. Единая модель прибора функциональной электроники	45
3.4. Винтовая неустойчивость тока в полупроводниках.....	48
3.5. Магниточувствительный элемент с частотным выходом.....	52
3.6. Термочувствительный элемент с частотным выходом.....	55
3.7. Пороговый термочувствительный элемент.....	57
3.8. Генератор высокочастотных колебаний.....	57
4. Графеновая электроника – электроника будущего.....	58
4.1. Первые транзисторы на графене.	58
4.2. Создание графеновой транзисторной технологии GNRFET	59
4.3. Высокоскоростные графеновые транзисторы.....	62
Литература	65

1. Современные проблемы получения и производства материалов полупроводниковой электроники.

1.1. Кремний – основной материал современной электроники.

В настоящее время кремний является наиболее популярным материалом полупроводниковой электроники. Это обстоятельство обусловлено рядом факторов:

1) Поверхность кремния легко окисляется. В атмосфере воздуха, даже при комнатной температуре, самопроизвольное окисление поверхности кремния протекает очень эффективно и окисная пленка быстро приобретает значительную толщину. При этом химический состав пленки неконтролируется и описывается формулой SiO_x , где параметр x может иметь разные значения от 1 до 3. Толщина пленки в целом тоже неконтролируется и может иметь разные значения по поверхности пластины, то есть слой окисла является существенно неоднородным.

Поэтому в полупроводниковом производстве широко применяют искусственное выращивание окисла SiO_2 с контролируемыми свойствами, который, в силу высоких диэлектрических свойств, используется для диэлектрической изоляции отдельных слоев микросхем и для маскирования в процессах фотолитографии при производстве микросхем.

2) Свойствами кремния легко управлять с помощью легирования его примесными атомами.

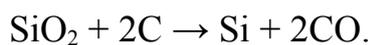
3) Кремний имеет достаточно высокую механическую прочность и теплопроводность.

4) Кремний широко распространен в природе в виде соединений, хорошо обрабатывается и имеет невысокую стоимость.

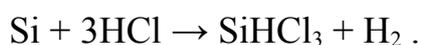
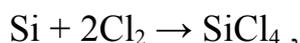
Монокристаллический кремний получают из поликристаллического кремния, исходным сырьем для которого, в свою очередь, является кварц SiO_2 (в свободном состоянии кремний в природе не встречается).

1.2. Традиционная технология получения поликристаллического кремния

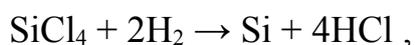
Технология получения поликристаллического кремния включает в себя следующие основные операции. Восстановление SiO_2 углеродом путем нагрева кварцевого песка и кокса до $1500 - 1750^\circ \text{C}$. В результате получается технический кремний, существенно загрязненный различными примесными атомами:



Степень загрязнения технического кремния примесями (Fe, Al, B, P и другие) составляет 1–2 %. Использовать такой кремний для получения каких-либо полупроводниковых приборов нельзя, требуется его очистка. Очистка от примесей кремния, находящегося в твердой фазе, является очень сложной задачей. Поэтому данную операцию проводят в два этапа. На первом этапе кремний переводят в какое-нибудь газообразное соединение и производят его очистку. В качестве газообразных соединений кремния используются SiCl_4 , SiHCl_3 (трихлорсилан), SiH , SiI и другие. Примеры реакций:



Вторым этапом является восстановление кремния из газообразного соединения и получение чистого кремния с содержанием примесных атомов на уровне $10^{-7} - 10^{-6} \%$. Примеры реакций:



Производство поликремния, и особенно трихлорсилана, очень грязное с экологической точки зрения. Использование в качестве промежуточного сырья трихлорсилана связано со значительными экологическими рисками производства. Класс опасности трихлорсилана согласно классификации ООН – 4.3. В связи с этим существуют определенные ограничения по расположению таких предприятий и удаленности их от населенных пунктов.

Водородное восстановление SiHCl_3 является очень энергоемким и малоэффективным процессом, поэтому себестоимость поликремния, изготовленного по традиционной технологии, высока, прежде всего, по причине потребления очень большого количества электроэнергии, а использование в качестве сырья SiCl_4 еще сильнее снижает технико-экономические показатели. Процесс осуществляют в агрессивной среде (проток газообразного хлорсилана в смеси с водородом) и при высокой температуре (около $1100\text{ }^\circ\text{C}$). Это служит причиной загрязнения поликристаллического кремния примесями, переходящими из стенок оборудования.

В то же время, химическая чистота является одним из главных требований, предъявляемых к этому полупроводниковому материалу.

1.3. Производство поликристаллического кремния в Российской Федерации.

В СССР производство кремния было сосредоточено на Украине, так что после развала СССР промышленного производства кремния в России не оказалось. Хотя потенциальные возможности в России имелись, например алюминиевые заводы в Братске и в Иркутске, работающие на электроэнергии Ангарской ГЭС, кроме основной продукции, алюминия, производят металлургический кремний, но производств трихлорсилана не имелось. Поэтому неэффективная «экономика» выглядела следующим образом. Годовой объём производства металлургического кремния составлял 70000 тонн и практически весь этот кремний экспортировался по цене всего приблизительно 2 доллара за килограмм. Иностранные предприятия перерабатывают этот кремний с помощью хлорсилановой технологии в поликристаллический кремний, который реализуют по цене 50-100 долларов за килограмм, то есть увеличенной почти в 20 раз. Цена монокристаллического кремния, полученного из поликремния, уже 200 – 400 долларов за килограмм. Так что продавать металлургический кремний нам не выгодно, разница в цене между полупроводниковым и металлургическим кремнием почти три порядка.

На территории России в период с 2003 по 2008 года не существовало промышленного производства поликристаллического кремния для солнечной энергетики.

Волгоградский институт «Гипросинтез» является ведущим институтом в России в области проектирования производств трихлорсилана. Все производства органохлорсиланов на территории бывшего СССР и производства трихлорсилана в г. Новочебоксарск и г. Усолье-Сибирское, спроектированы институтом «Гипросинтез».

По проекту института «Гипросинтез» в городе Усолье-Сибирское Иркутской области ведется реконструкция производства трихлорсилана. В результате реконструкции выпуск трихлорсилана вырастет вдвое.

Одно из крупнейших китайских производств трихлорсилана (18000 тонн в год) в составе завода поликремния в г. Лэшань построено по проекту, разработанному в Волгограде институтом «Гипросинтез».

На момент начала 2009 года в РФ реально действует 2 предприятия по выпуску поликремния:

- 1) «Горно-химический комбинат» (ГХК, г. Железногорск, Красноярский край) – промышленное производство (200 тонн в год) запущено в сентябре 2008 г. Планируемая мощность завода - 2000 тонн к 2011-12 г.г.
- 2) Нитол Солар (Усолье-Сибирское, Иркутская область) – в январе 2008 г. запущена пилотная линия по производству поликремния мощностью 200 тонн. Проектная мощность (к 2010 г.) – 3700 тонн.

На стадии проекта находятся целый ряд возможных производителей поликристаллического кремния:

- 1) «Русский кремний» (г. Абакан, Хакассия, компания БАЗЭЛ) – планируемая мощность завода - 3000 тонн к 2010 г.
- 2) ОАО «Химпром» (Новочебоксарск, Чувашия) — планируемая мощность производства поликремния для солнечной энергетики — 5000т к 2011 г.
- 3) «Солнечная Энергия» (ОАО «Силан», г. Данков, Липецкой обл.) – Проект включает запуск (в 1-2-м квартале 2009 г.) завода по производству поликремния

на базе мощностей ОАО «Силан» (Данковский химический комбинат, Липецкая обл.). Планируемая мощность производства - 1000т поликремния с перспективой увеличения до 2500т.

4) Балтийская Кремниевая Долина» (г. Сосновый Бор, Ленинградской обл.) – проект производства поликремния по технологии, использующей облучение в ядерных реакторах. Планируемая мощность – 5000т поликремния к 2012 г.

5) ОАО «Химпром» (Волгоград) – планируемая мощность производства поликремния — 2500т к 2011 г.

6) Кемеровский «Химпром» (компания Сибконкорд) – планируемая мощность производства поликремния — 3000т к 2010 г.

7) Томский проект– создание производства поликремния в рамках Томской особой экономической зоны.

В настоящее время, в связи с ажиотажным спросом на поликремний, все проекты представляются актуальными и перспективными.

1.4. 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.

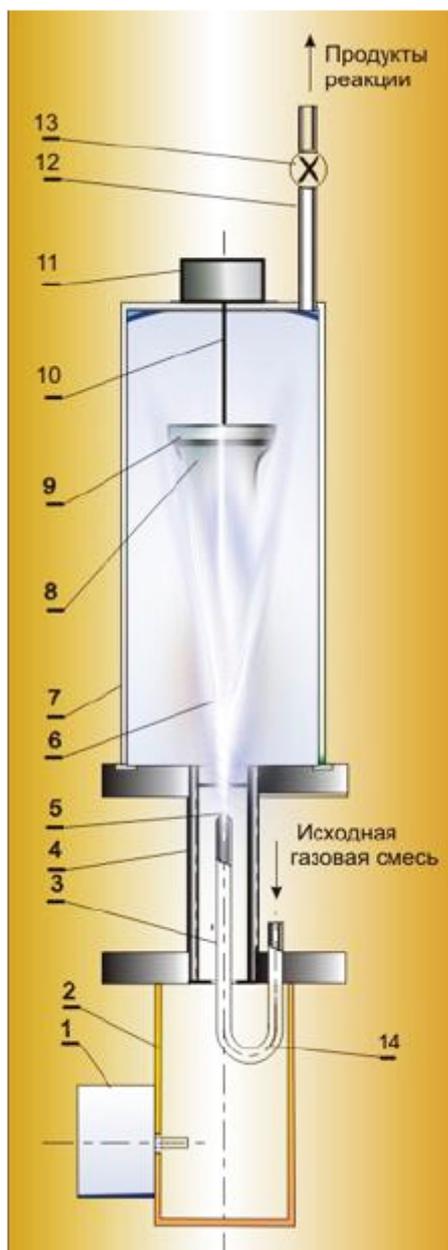


Рис.1.1. Схема микроволнового реактора для получения поликремния в виде монолитного куска.

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.

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.

Ключевую роль в предлагаемом 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%)

тетрахлорида кремния или других кремнийсодержащих газообразных соединений (например, фторидов) в качестве сырья для получения поликристаллического кремния;

- 5) более полная переработка исходного 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;

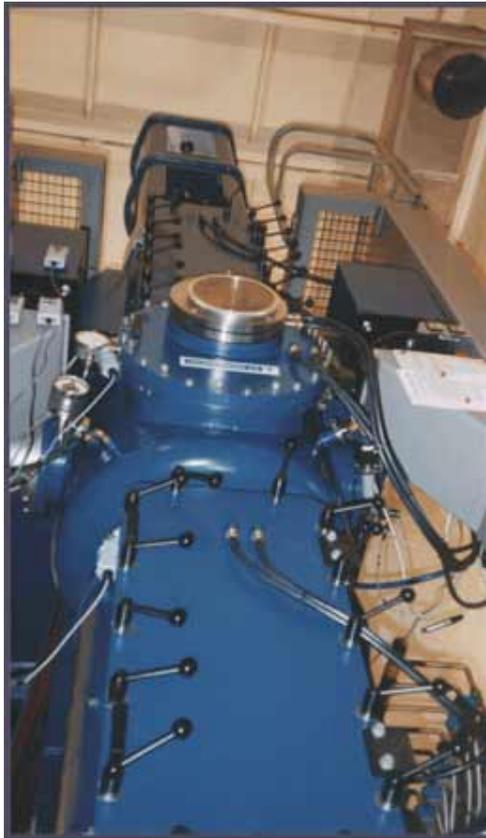
1.5. Получение монокристаллического кремния.

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).

Как тут не вспомнить труды М.В. Ломоносова, который в своих собственных теоретических исследованиях в области географии показывает

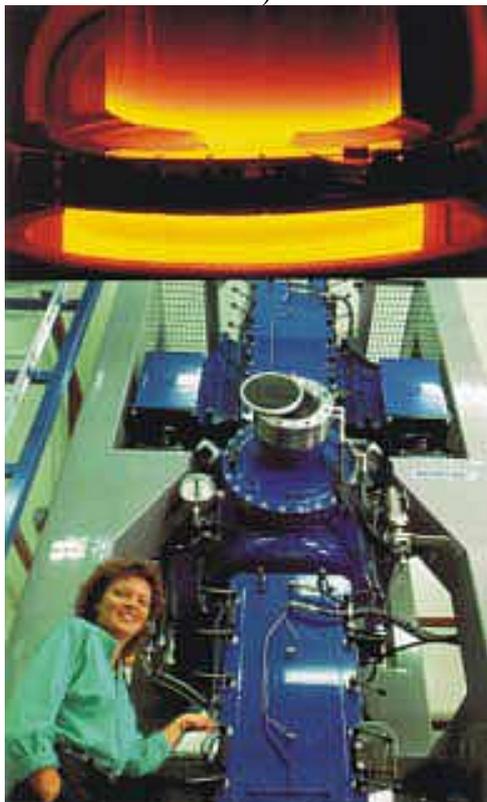
практическую пользу освоения Северного морского пути в своей знаменитой фразе:



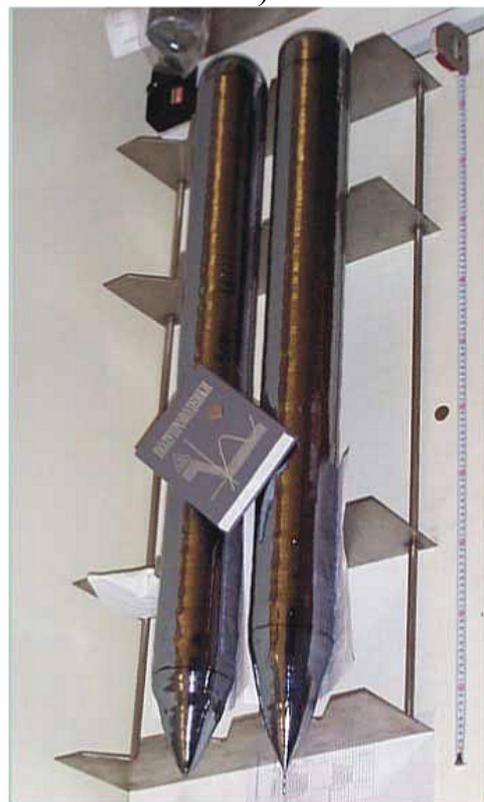
а)



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.

«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 в 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 бездислокационные и обладают превосходными электрофизическими параметрами: удельное электрическое сопротивление до 5000 Ом·см, холловская подвижность электронов до 1400 см²/В·с, время жизни носителей заряда до 2 миллисекунд, концентрация

легирующих примесей менее 10^{12} см^{-3} , концентрация углерода и кислорода менее 10^{16} 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 $\leq 1 \text{ ppm}$, кислорода $\leq 2 \text{ ppm}$.

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 – $1400 \text{ см}^2/\text{В сек}$.

Удельное сопротивление – до $5 \text{ КОм} \cdot \text{см}$

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	$3,3 \cdot 10^{-9}$	Кислород	$1,6 \cdot 10^{16}$
Железо, ⁵⁹ Fe	$3,2 \cdot 10^{-8}$	Углерод	$6 \cdot 10^{15}$
Кобальт, ⁶⁰ Co	$2,3 \cdot 10^{-10}$		
Цинк, ⁶⁵ Zn	$1,2 \cdot 10^{-9}$		
Мышьяк, ⁷⁶ As	$0,7 \cdot 10^{-9}$		
Сурьма, ¹²² Sb	$3 \cdot 10^{-10}$		
Золото, ¹⁹⁸ Au	$3,3 \cdot 10^{-11}$		



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

Рис.1.3. Формуляр. Слитки кремния высокого качества

1.6. После кремния будет кремний. Но все таки...Молибденит

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 сульфида свинца (галенит), называли «молибдена». Молибденит очень похож на галенит. В результате два разных минерала не различали, принимая за один и тот же, не только древние греки, но и химики 18

века. Поэтому, когда в 1778 году шведский химик Карл Вильгельм Шееле обнаружил в минерале «молибдена» новый элемент, он ошибочно назвал его «молибдос» (Mo), что в переводе означает свинец. Хотя на самом деле это не был свинец (Pb). Впоследствии в названии минерала сульфида свинца перешли с греческого («молибдена») на латынь («галена»), а за минералом состава MoS закрепилось название молибденит.

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

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

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

Важным достоинством дисульфида молибдена по сравнению с кремнием является его двумерная структура, тогда как кремний образует объемные кристаллы. Двумерная структура позволяет легко формировать тонкие пленки

толщиной $6,5 \text{ \AA}$ ($0,65 \text{ нм}$), 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 наноэлектроники и наноструктур о том, что молибденитовая электроника способна преодолеть физические ограничения, наложенные на кремниевую в отношении таких характеристик, как миниатюризация, электропотребление и механическая гибкость.

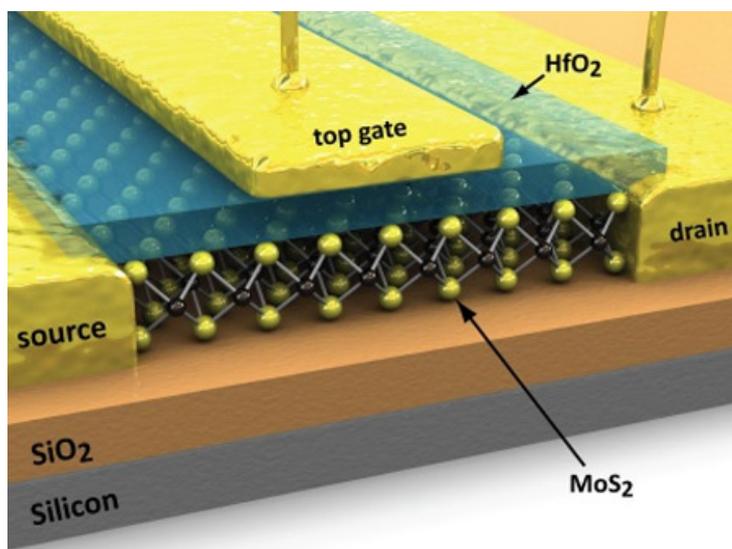


Рис.1.5. Молибденитовый полевой транзистор: «source» – «исток», «drain» – «сток», «top gate» – «затвор», HfO_2 – диэлектрик оксид гафния.

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. 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.

1.7 Графен

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

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

В лабораторных условиях графен можно получить простым способом. Высокоориентированный пиролитический графит (ВОПГ) – это стандартно используемый материал для сканирующей туннельной микроскопии (СТМ), где образец со свежей поверхностью обычно готовится путём отслаивания верхнего слоя графита с помощью липкой ленты [7]. А.Гейм говорит «Мы годами использовали эту технику, но никогда внимательно не смотрели на то, что же мы выбрасываем вместе с лентой» [7]. Когда остатки графита на скотче были рассмотрены в микроскоп, то были обнаружены фрагменты очень малой толщины (рис.1.6), некоторые из чешуек были толщиной всего в несколько нанометров [7].

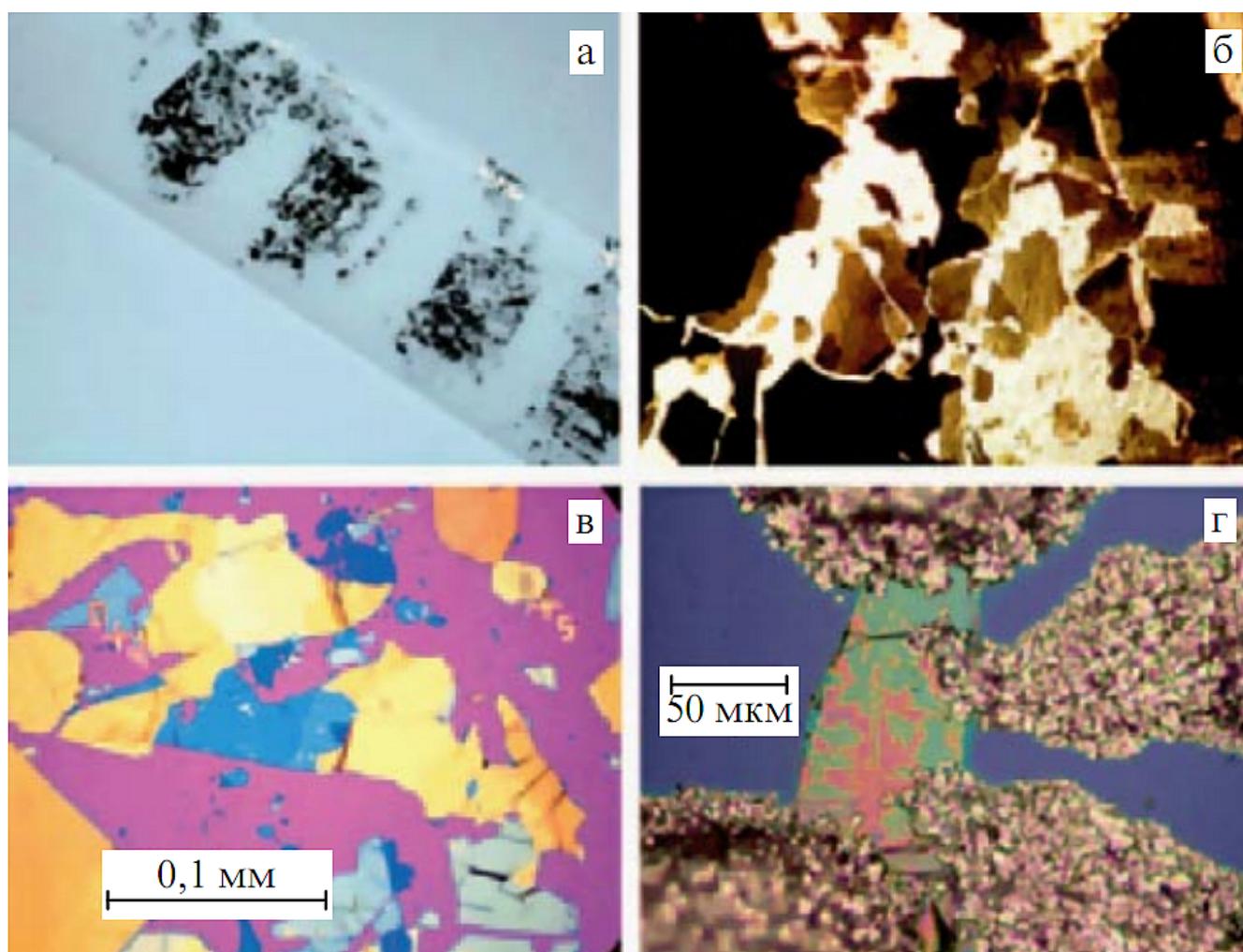


Рис.1.6. (а) Следы ВОПГ, оставшиеся на скотче. (б) Некоторые кристаллики оптически прозрачны, если взглянуть на них через оптический микроскоп или даже через увеличительное стекло. (в) На подложке из оксида кремния светопроницаемые кристаллики дают различные оттенки голубого цвета. (г) Одно из самых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

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

1.8. 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.

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.

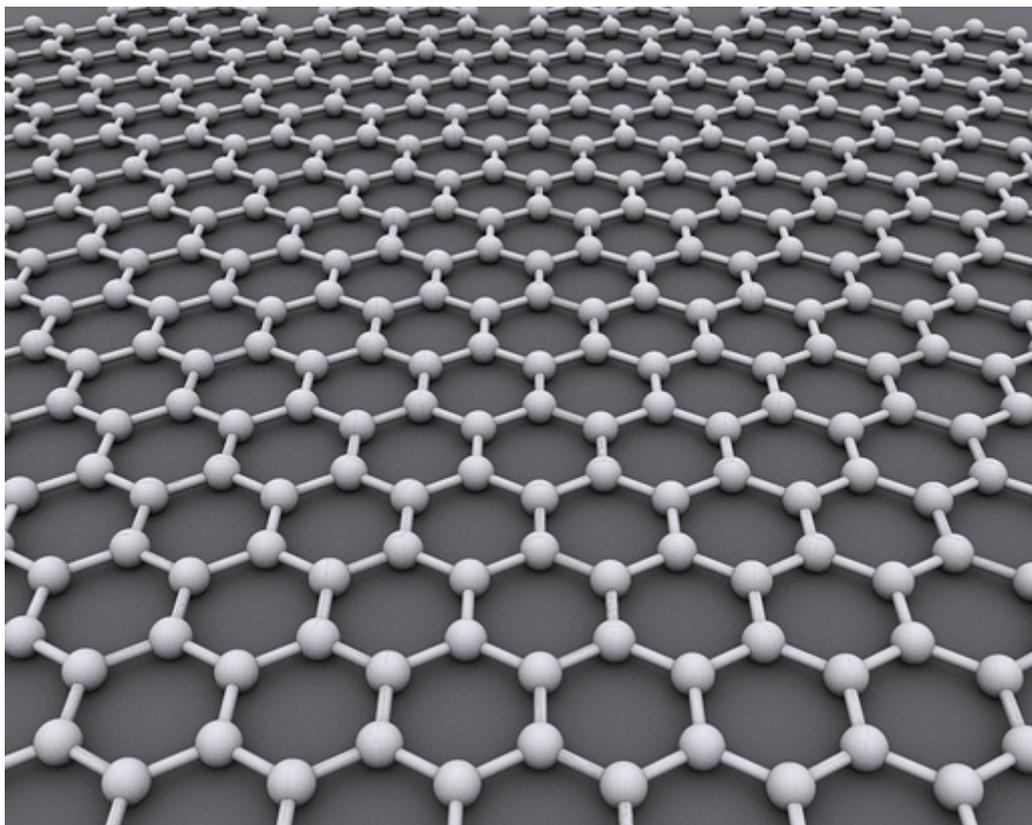


Рис.1.7. Графен представляет собой гексагональную решетку из атомов углерода толщиной в один атом.

Источник фото:

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

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 расплывленного газообразного состояния. Разработан в Массачусетском технологическом институте (Massachusetts Institute of Technology) под руководством профессора Джинг Конга (Jing Kong). Используется оборудование, схожее с применяемым в обычном полупроводниковом производстве [9]. Метод недорог и вполне пригоден для коммерческого внедрения, возможно, что для специфических приложений – например, для производства чипов, установку придётся доработать для повышения

качества и однородности получаемых на выходе листов графена. Тем не менее, уже в нынешнем виде установка вполне годится для получения графена для таких приложений как электроды солнечных батарей [10].

- 2) Химическое осаждение из газовой фазы в парах метана и водорода на медную фольгу. Разработан коллективом ученых из Техасского университета в Остине (The University of Texas at Austin) и из компании Texas Instruments [12].

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

Полученные в результате экспериментов образцы площадью 1 квадратный сантиметр почти полностью покрыты слоем мономолекулярного графена; лишь малая площадь – менее 5%, покрыта двухслойными и трёхслойными «напластованиями». На основе полученных графеновых пластин были созданы 2-затворные полевые транзисторы с находящимся сверху затвором, электрически изолированным от графена тончайшим слоем окиси алюминия. Определение подвижности носителей полученных таким образом транзисторов показало результаты, значительно более высокие нежели у традиционных кремниевых полупроводников – более 4050 см²/Вс.

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

Впервые изготовлена графеновая пластина диаметром 100 мм (4 дюйма). При термической обработке пластины карбида кремния в высокотемпературной

печи, после полного удаления кремния, на поверхности остаётся слой плёнки из углерода толщиной в один-два атома, что, по сути, и является пластиной самого настоящего графена [12].

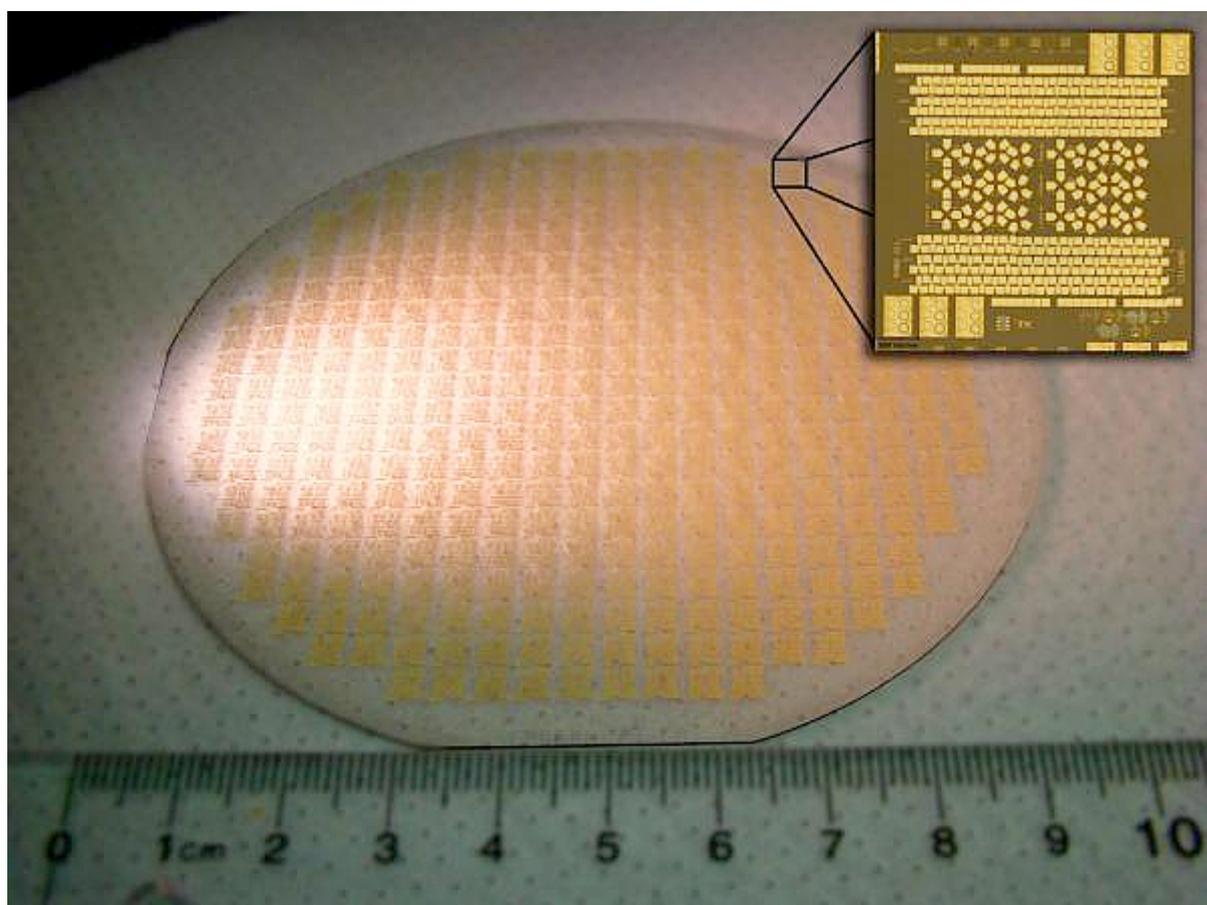


Рис.1.8. 100 мм пластина графена, содержащая приблизительно 75 000 устройств и тестовых структур. На вставке – оптическое изображение одного чипа. Каждый маленький квадрат на чипе составляет всего 100 мкм - толщина человеческого волоса. Устройства были изготовлены на Penn State Nanofab, учреждение Научно-исследовательского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

Достижения учёных из ЕОС 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 ЕОС 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 Электрооптическом Центре (Electro-Optics Center, EOC) при кафедре материаловедения Пенсильванского университета (Pennsylvania State University).

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

2. Современные проблемы интегральной микроэлектроники

2.1. Гордон Мур: от компании Шокли до компании Intel

Уильям Шокли, американский физик, автор и вдохновитель идеи твердотельного усилителя, после своего триумфального изобретения плоскостного транзистора взамен точечного, изобретенного Бардиным и Браттейном, заключил соглашение с американским инвестором Арнольдом Орвиллом Бекманом, который в 1955 г. выделил Шокли финансирование для создания первого предприятия для производства кремниевых полупроводниковых приборов в Кремниевой долине. Предприятие Шокли имело амбициозное название Shockley Semiconductor Laboratory. Шокли арендовал здание в городке Маунтин-Вью (Mountain View) в Калифорнии и начал набирать, по его словам,

«самую творческую команду в мире для разработки и производства транзисторов». Он привлек чрезвычайно способных инженеров и ученых, включая Гордона Мура (Gordon Moore) и Роберта Нойса (Robert Noyce), которые разрабатывали технологии, связанные с кремнием и диффузией. В декабре 1956 г. Шокли получил Нобелевскую премию по физике за изобретение транзистора, разделив ее с Бардиным и Браттейном, но его сотрудники стали разочаровываться в нем из-за его тяжелого, высокомерного, стиля руководства. Они также чувствовали, что компания должна преследовать более близкие цели производства кремниевых транзисторов, а не отдаленную задачу создания p-n-p-n-диода с четырьмя слоями, который Шокли задумал еще в Bell Labs для переключателей в телефонных системах.

После неудачной просьбы к Бекману о приглашении нового профессионального менеджера, восемь служащих Шокли, – Гордон Мур, Роберт Нойс, Джулиус Блэнк (Julius Blank), Виктор Гринич (Victor Grinich), Жан Эрни (Jean Hoerni), Юджин Кляйнер (Eugene Kleiner), Джей Ласт (Jay Last) и Шелдон Робертс (Sheldon Roberts), – покинули компанию Шокли в сентябре 1957 г., вследствие этого их окрестили «вероломной восьмеркой». «Восьмерка» при финансовой поддержке известной компании Fairchild Camera and Instrument организовала компанию Fairchild Semiconductor Corporation там же, в Калифорнии, в Пало Альто. Компанию назвали в честь инвестора, предоставившего венчурное финансирование размером в 1,5 млн. долларов взамен на право выкупить Fairchild Semiconductor в течение 8-и лет. Fairchild Camera and Instrument воспользовалась этим правом уже в 1958 г.

Гордон Е. Мур по праву считается одним из отцов-основателей Кремниевой Долины. Членство в «вероломной восьмерке», открывшей Fairchild Semiconductor, ставит его во главе генеалогического дерева Кремниевой долины. Соучредитель, вместе с Робертом Нойсом, корпорации Intel в 1968 году и в настоящее время почетный председатель, Мур, пожалуй, наиболее известен во всем мире высоких технологий своим прогнозом 1965 года о плотности

размещения транзисторов на пластине кремниевой микросхемы, что в настоящее время повсеместно известно как «закон Мура».

19 апреля 1965 г. вышла статья Гордона Мура «Объединение большого количества компонентов в интегральных схемах» [13]. В ней будущий сооснователь корпорации Intel (1968 г.), работавший в то время директором отдела разработок компании Fairchild Semiconductors, дал прогноз развития микроэлектроники на ближайшие десять лет на основании анализа шестилетнего развития микроэлектроники, предсказав, что количество элементов на кристаллах электронных микросхем будет и далее удваиваться каждый год.

Через 10 лет, выступая в 1975 году на конференции International Electron Devices Meeting, Мур отметил, что за прошедшее десятилетие количество элементов на кристаллах действительно удваивалось каждый год, однако в будущем, когда сложность чипов возрастет, удвоение числа транзисторов (и соответствующее уменьшение их размеров) в микросхемах будет происходить несколько медленнее – каждые два года. Это новое предсказание также сбылось, и закон Мура продолжает в этом виде (удвоение за два года) действовать поныне (то есть в течение почти 30 лет!), в последнее время немного ускорившись до удвоения за 18 месяцев, что можно наглядно проследить на примере деятельности корпорации Intel, создающей все более и более мощные микропроцессоры для персональных компьютеров (рис.2.1). В своем выступлении на осеннем Форуме Intel для разработчиков(IDF) 2005 года Паоло Джарджини, директор по технологической стратегии корпорации Intel, подтвердил, что закон Мура продолжает действовать, что в полном соответствии с ним Intel продолжает вводить новые технологические процессы каждые два года.

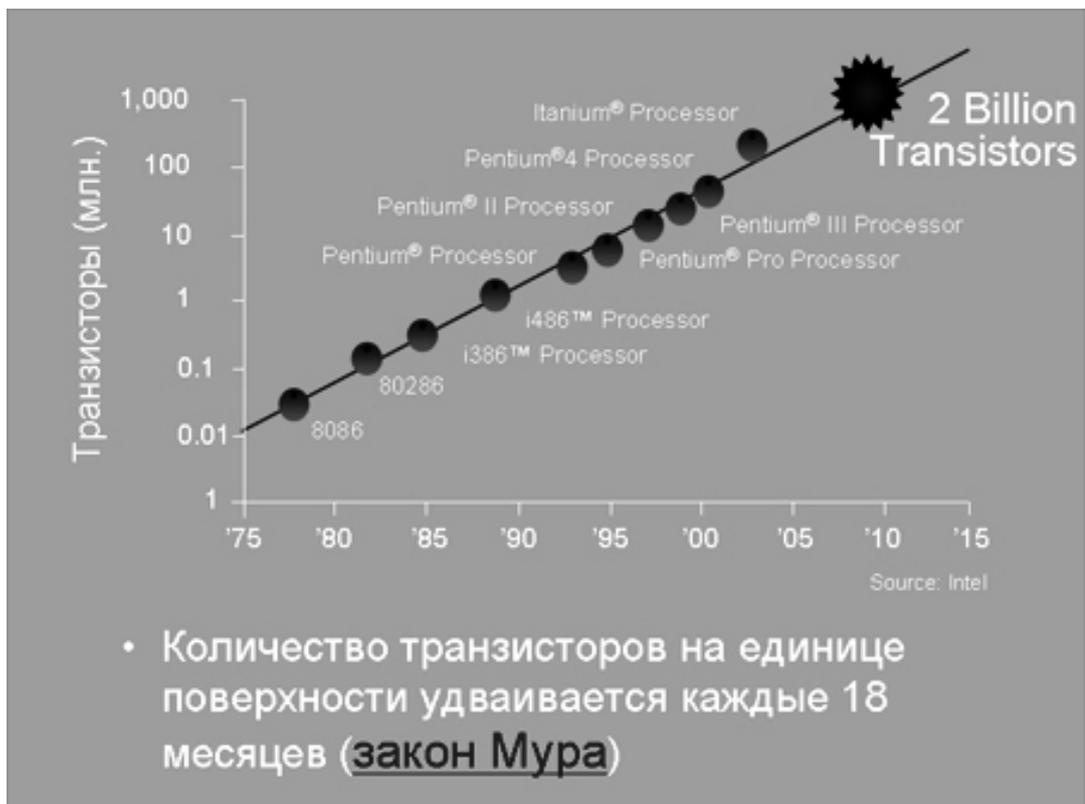


Рис.2.1. Закон Мура – рост числа транзисторов в микрочипе во времени.

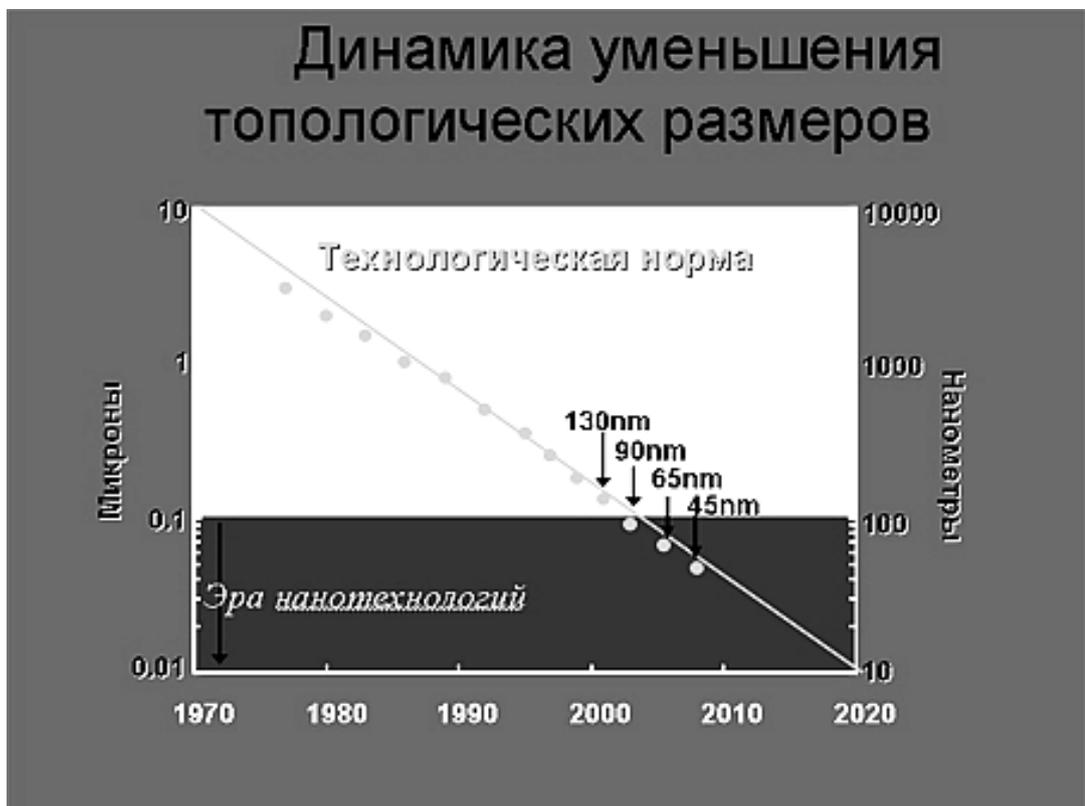


Рис.2.2. Динамика уменьшения размеров элементов микросхемы. Переход от микро– к нанотехнологиям.

Успешная деятельность здесь обеспечена ежегодными многомиллиардными вложениями Intel в исследования и разработки, постоянную модернизацию и расширение своих производственных мощностей.

За время существования корпорации Intel (с 1968 года) себестоимость производства транзисторов упала до такой степени, что теперь обходится примерно во столько же, сколько стоит напечатать любой типографский знак – например, запятую. В процессе разработки микропроцессоров, содержащих один миллиард транзисторов, удалось уменьшить величину транзисторов до такой степени, что теперь на булавочной головке могут разместиться 200 млн. таких элементов.

2.2. Проблемы на пути перехода от микро– к нанoeлектронике

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 диметилзолота. 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 дипивалоилметаната гафния, $\text{C}(\text{CH}_3)_3\text{COCHCO}(\text{CH}_3)_3$, и дициклопентадиэнил 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.

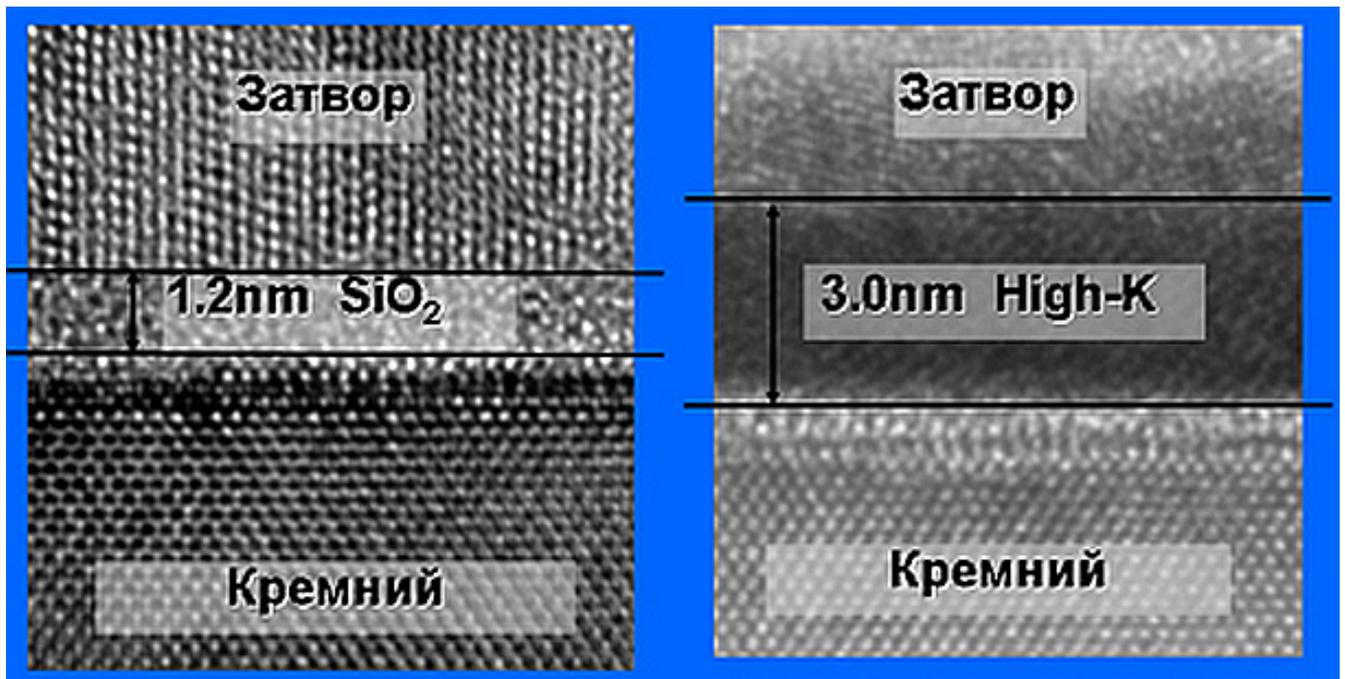


Рис.2.3. Структура полевого транзистора с разным подзатворным диэлектриком: диоксид кремния SiO_2 (слева) и оксид гафния HfO_2 (справа).

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 SiO₂ 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).

2.3. Новые подходы к созданию электроники наноразмерных элементов и наноструктур

Вплоть до, приблизительно, 2020 года транзисторы в интегральных наносхемах будут создаваться по современной схеме работы – с двумя электродами и затвором между ними. Ясно, что определенным пределом этой тенденции было бы достижение атомного размера элементов электроники, когда

уменьшать их дальше будет невозможно. Следовательно, уже сейчас необходимо искать новые подходы.

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

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

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

Третья альтернатива – углеродные нанотрубки и кремниевые нанопровода, в которых можно достичь более высокой скорости электронов. Транзисторы,

изготовленные из таких материалов, имеют сопоставимые с современными, размеры. Диаметр углеродных нанотрубок составляет 1-2 нм, но в экспериментальных транзисторах исток и сток расположены по их длине. Это позволяет повысить быстродействие и уменьшить потребляемую энергию, однако размер сильно не сократится. Углеродные нанотрубки, могут найти применение в технологии КМОП (комплементарные 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).

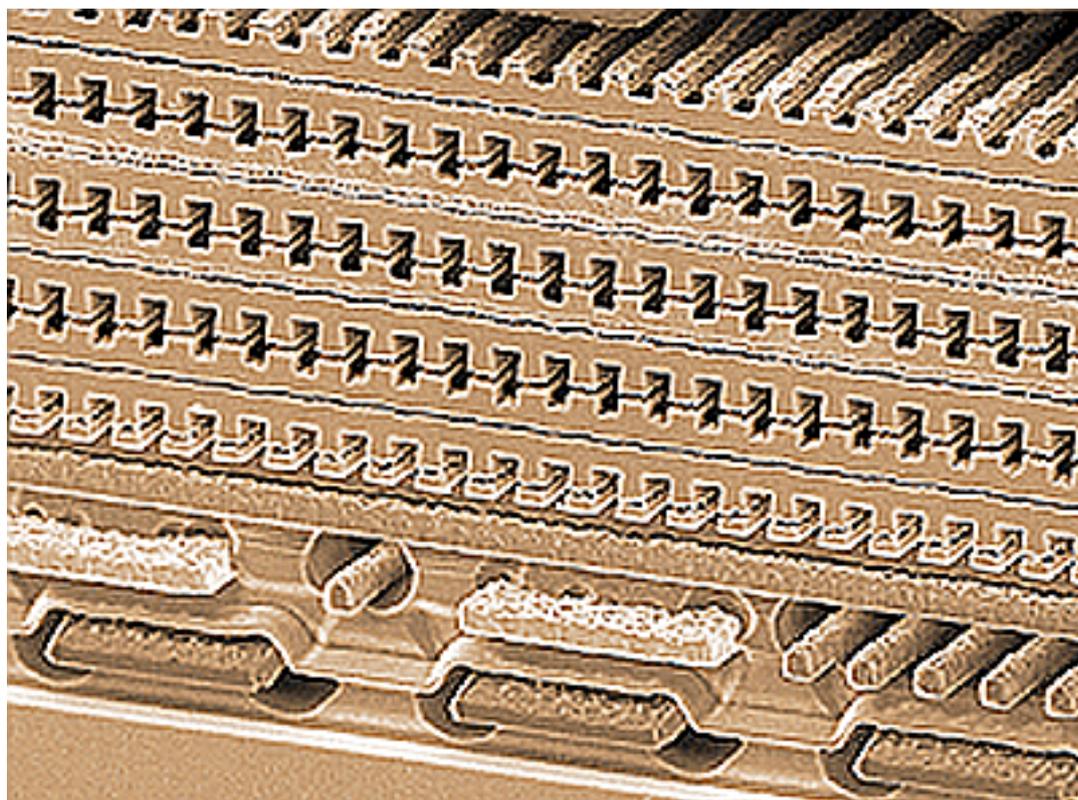


Рис.2.4. Кристалл Matrix 3-D Memory содержит четыре слоя транзисторов

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.

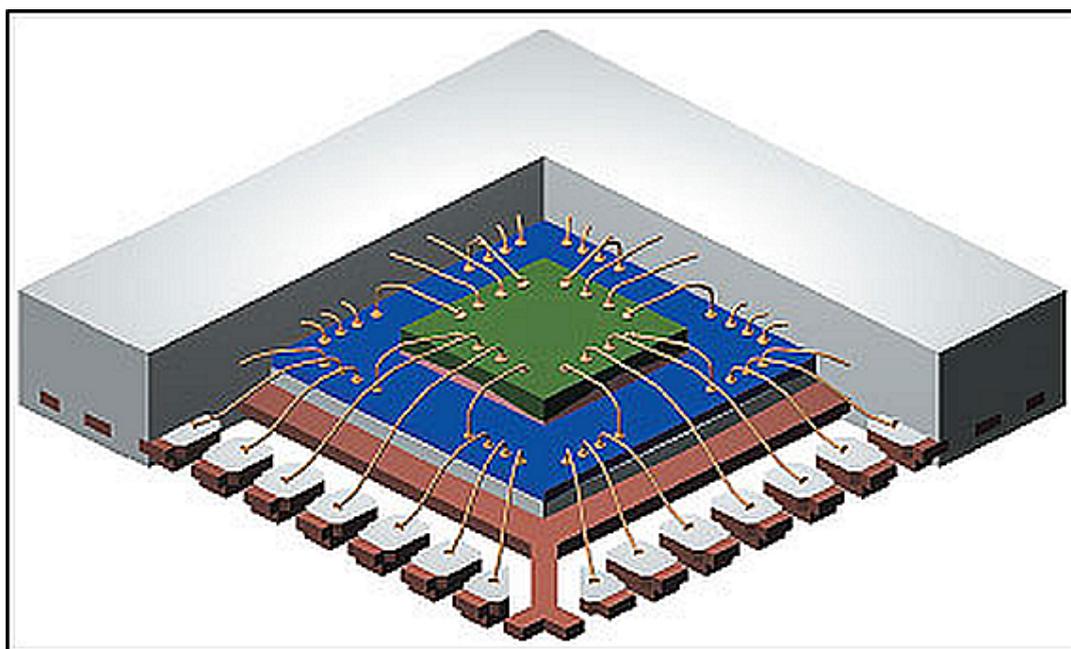


Рис.2.5. Сборка многослойной трехмерной микросхемы.

3. Современные проблемы функциональной электроники

3.1 Функциональная электроника – электроника четвертого поколения – альтернатива интегральной микро– и наноэлектронике.

До недавнего времени тенденции мирового развития электронной промышленности были тесно связаны с развитием интегральной кремниевой микроэлектроники. Отечественная электроника следовала этим курсом, иногда просто копируя зарубежные разработки, вместо того, чтобы больше внимания уделять исследованию новых физических эффектов и их широкому использованию в электронике. Сейчас мир обращается к неиспользованным возможностям функциональной электроники. Одной из причин этого является уже реально просматриваемая в ближайшей перспективе 5 – 10 лет ограниченность дальнейшего уменьшения размеров элементов интегральной электроники, не столько технологическая, сколько физическая и электронная. Значительное уменьшение элементов наносхем приводит к нарушению принципов работы базовых полупроводниковых приборов, тесно упакованных в наносхемах. Другой причиной является относительная простота технологии и преимущества приборов функциональной электроники.

Функциональная электроника оформилась как научное направление в электронике в последней четверти XX столетия. Формированию этого направления способствовали многочисленные открытия в физике и электронике. Исследователям стало ясно, что носителями информации могут быть различного типа волны в различных средах, домены, квазичастицы, зарядовые пакеты электронов и т. п. Эти носители получили название *динамические неоднородности*. В природе их довольно много, рассмотрим, для примера, некоторые из них [16].

3.2. Динамические неоднородности и токовые неустойчивости – основа функциональной электроники

В 1963 году американский физик Дж. Б. Ганн обнаружил токовые неустойчивости в виде электрических доменов в образцах GaAs и InSb с электронной проводимостью. В 1966 году уже появились первые коммерческие *диоды Ганна*, выпущенные фирмой International Semiconductor Inc. Это открытие позволило начать освоение СВЧ-диапазона длин волн полупроводниковыми приборами.

В 1969 году исследователи фирмы Bell Laboratories обнаружили в магнитной пленке так называемые магнитные пузырьки в виде цилиндрических магнитных доменов. Пузырьки оставались стабильными при приложении внешнего статического магнитного поля. Стало очевидным, что наличие домена можно рассматривать как логическую единицу, а его отсутствие как логический ноль. Родилась новая электронная память, появилась возможность создавать логические схемы на новом принципе.

К концу прошлого века благодаря открытиям в разных областях электроники стало известно о множестве видов динамических неоднородностей различной физической природы. Это целый ряд неустойчивостей тока в полупроводниковых структурах, возникновение и развитие которых, также как и в случае эффекта Ганна, сопровождается и проявляется в возникновении колебаний тока и/или напряжения высокочастотного (ВЧ) или сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Форма и амплитуда колебаний тока зависит от самого физического эффекта – это могут быть пачки импульсов тока, похожие на искаженный прямоугольный импульс, либо их форма может быть близка к синусоидальной, гармонической.

Идея использования динамических неоднородностей в приборах по обработке и хранению информации является основополагающей, и ее развитие привело к становлению функциональной электроники. Это не схемотехническое направление в микроэлектронике, использующее в качестве носителей информации динамические неоднородности, основной тенденцией развития которой является интеграция функциональных возможностей приборов и устройств.

Функциональная электроника представляет собой область электроники, в которой изучается возникновение и взаимодействие динамических неоднородностей в континуальных средах в совокупности с физическими полями, а также создаются приборы и устройства на основе динамических неоднородностей для целей обработки, генерации и хранения информации.

В зависимости от типа используемой динамической неоднородности, континуальной среды, той или иной комбинации физических полей или явлений различают направления в функциональной электронике, например, функциональная акустоэлектроника, функциональная магнитоэлектроника, функциональная оптоэлектроника, функциональная диэлектрическая электроника, молекулярная электроника и т. п. Объединяющим их признаком является динамическая неоднородность как носитель или транслятор или хранитель информации. Например, традиционная полупроводниковая схемотехническая электроника отличается от полупроводниковой функциональной электроники носителем информационного сигнала. В приборах схемотехнической микроэлектроники – аналоговых или цифровых ИС – информация хранится или обрабатывается в ячейках в виде заряда, потенциала или тока определенного уровня на определенной статической неоднородности. Напротив, в ПЗС-матрицах, относящихся по своей физической природе к изделиям функциональной полупроводниковой электроники, информация хранится (либо обрабатывается) в виде динамической неоднородности – зарядового пакета, состоящего из электронов или дырок. Статические неоднородности, различные схемы обрaмления в этих изделиях играют вспомогательную роль.

В функциональной электронике пока не существует принципиальных ограничений, связанных с размерами статических или динамических неоднородностей. В изделиях схемотехнической электроники перенос информационного сигнала происходит по-битово по линиям межсоединений, что снижает помехоустойчивость и надежность.

В изделиях функциональной электроники перенос информации, как правило, осуществляется в континуальной среде, а не в линиях межсоединений. В приборах функциональной электроники межсоединения выполняют функции вспомогательных связей и проблема «тирании межсоединений», характерная для интегральных схем, в этом случае не является ключевой проблемой.

3.3. 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 теле. 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 техникоэкономическими 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.

3.4. 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 «осциллистор» 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 осциллистора 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 полупроводников 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 комнатной температуре в кремниевых образцах 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.

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.

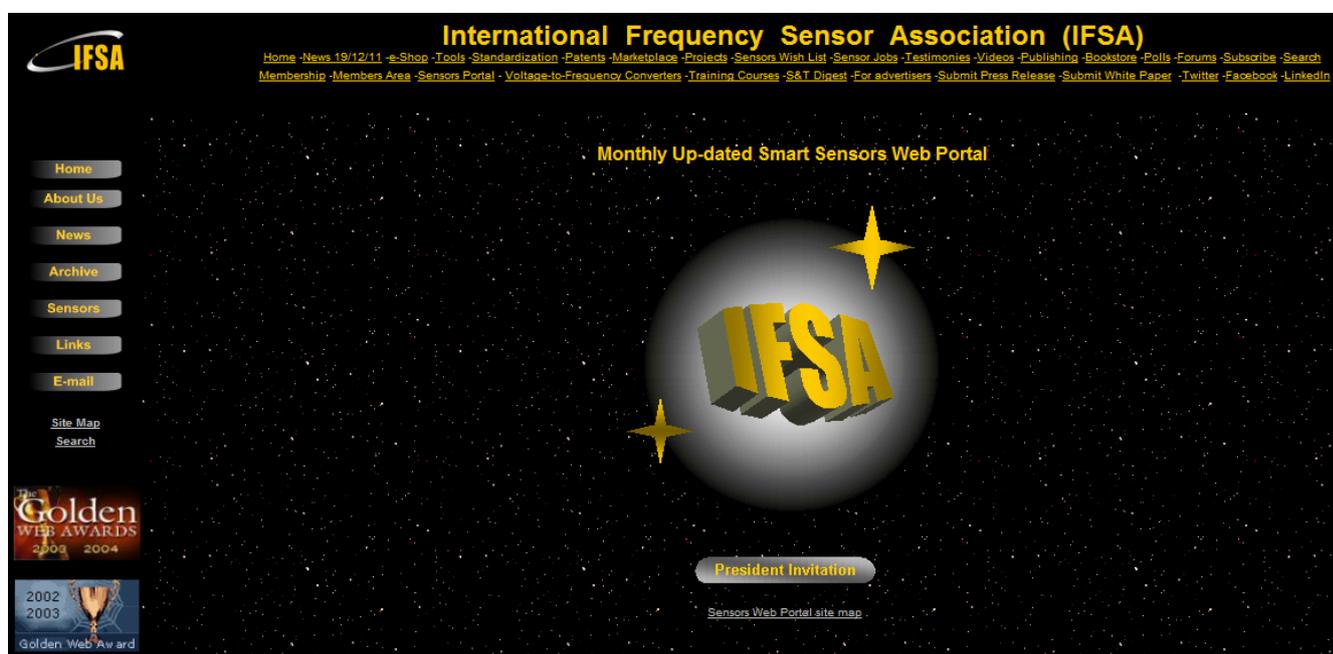


Рис.3.1. Главная страница веб-портала IFSA.

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 осцилляторных [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 осцилляторной генерации при заданном напряжении на осцилляторе.

3.5. 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 \mathbf{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.

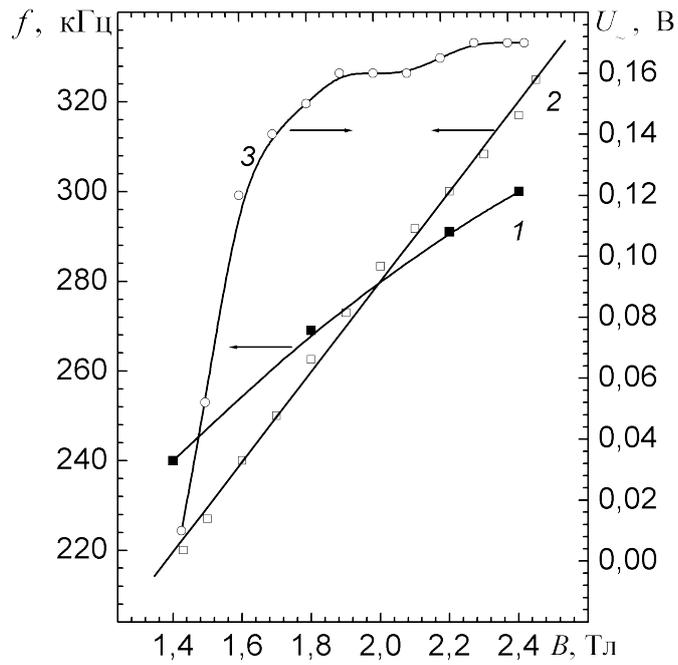


Рис.3.2. Частота (1, 2) и амплитуда (3) информационного сигнала осцилляторного МЧЭ с частотным выходом ($T = 293$ К)

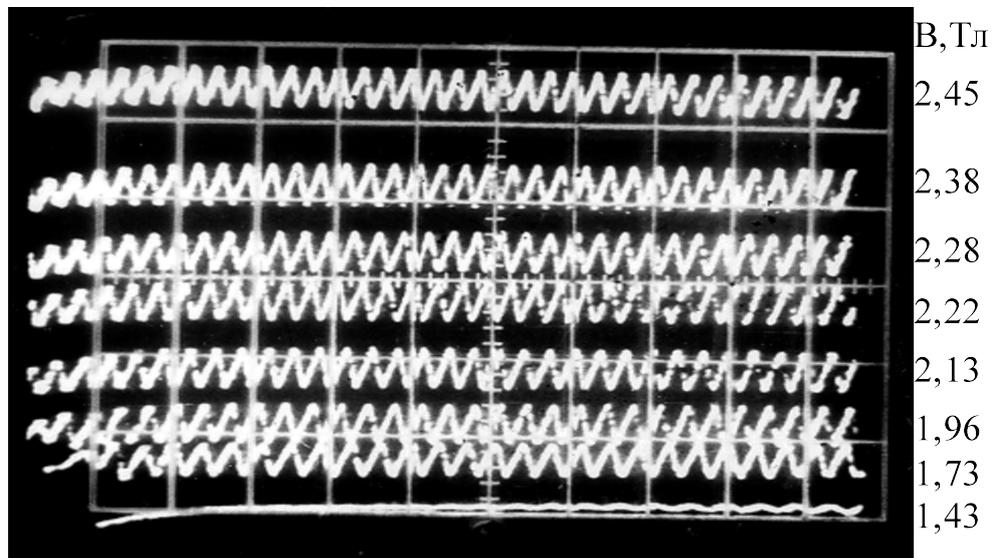


Рис.3.3. Осциллограммы сигнала осцилляторного МЧЭ с частотным выходом и соответствующие им значения магнитной индукции ($T = 293$ К).

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

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 $R_{н}$. При $U^* = 40$ В, $t_{и} = 300$ мкс, частоте повторения прямоугольных импульсов напряжения 45 Гц, $R_{н} = 10$ 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 при $B = 1.43$ Тл соответствует порогу возбуждения ВН и характеризуется сравнительно небольшой амплитудой $U_{\sim} = 0.01$ В.

3.6. Термочувствительный элемент с частотным выходом

Осциллисторный сенсор температуры представляет собой осциллистор, 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÷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].

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

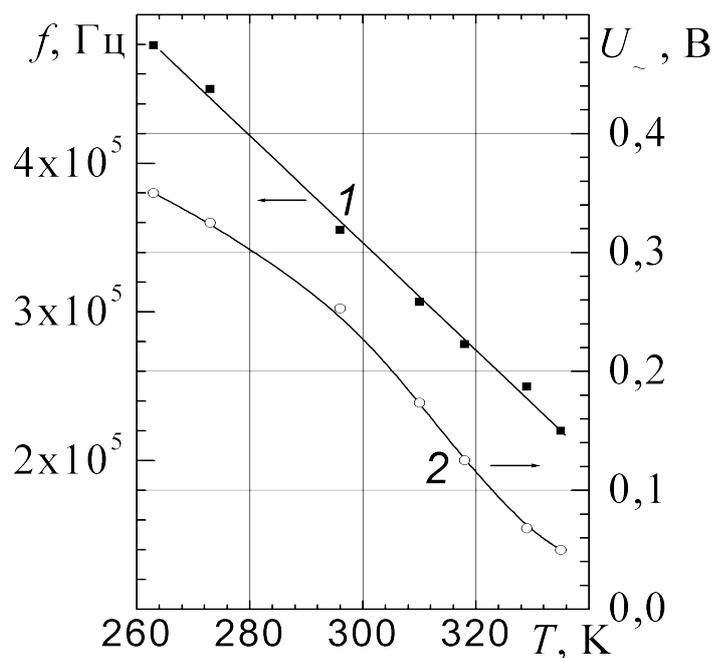


Рис.3.4 Температурная зависимость частоты при $U=65$ В частоты (1) и амплитуды (2) переменного напряжения на нагрузочном сопротивлении 10 Ом в импульсном режиме работы осциллятора

В наиболее употребительном для практики диапазоне температур $-10 \div +63^\circ\text{C}$ сенсор обладает высокими чувствительностью 3.1 кГц/К и амплитудой информационного сигнала $0.47 \div 0.04 \text{ В}$. 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].

3.7. Пороговый термочувствительный элемент

Пороговый характер возникновения ВН позволяет использовать ТЧЭ, описанный в разделе 3.6, в качестве температурного ключа порогового срабатывания. Зависимость порогового напряжения U_n^* от температуры, при котором ТЧЭ начинает генерировать электрические колебания, представляет собой кривую с минимумом в интервале $77 - 335 \text{ К}$. Если, например, зафиксировать напряжение 40 В , то при $T > 300 \text{ К}$ колебания в цепи ТЧЭ будут отсутствовать, а при $T \leq 300 \text{ К}$ возникнет генерация с частотой 200 кГц . По возникновению генерации судят о срабатывании температурного ключа. Наличие минимума на зависимости U_n^* от T при $T \sim 120 \text{ К}$ определяет возможность «двойного» срабатывания ключа в интервале температур от 77 до 172 К при $U^* < 5 \text{ В}$. Однако реальное значение температуры можно определить по значению частоты генерации, которые в несколько раз отличаются друг от друга в области температур слева и справа от минимума при $T \sim 120 \text{ К}$. Это потребует измерения частоты, что усложнит регистрирующую схему. Поэтому выгоднее использовать описанный пороговый ТЧЭ в области температур от 120 до 335 К . При питании ТЧЭ постоянным напряжением его также можно использовать как пороговый ключ в интервале температур $77 \div 180 \text{ К}$.

3.8. Генератор высокочастотных колебаний

Осцилляторный ТЧЭ, работающий при фиксированной температуре, является малогабаритным генератором переменного тока ВЧ-диапазона. Для

практической реализации такого генератора, характеристики которого будут независимы от температуры, достаточно поместить ТЧЭ, описанный в разделе 3.6, в малогабаритный термостат. При этом зависимость генерируемого переменного тока от времени близка к синусоидальной, а частоту его можно регулировать изменением напряжения питания. Например, в непрерывном режиме питания на кремниевую структуру и, включенное последовательно с ней, сопротивление нагрузки, подается постоянное напряжение $U^* = U_0 + U_R$, где U_0 – падение напряжения на $n^+ - \pi - p^+$ -структуре, $U_0 \geq U_{оп}$. При фиксированных значениях температуры в интервале $77 \div 163$ К частота и амплитуда колебаний напряжения U_{\sim} на сопротивлении нагрузки 100 Ом вначале быстро растут, а затем выходят на насыщение или имеют тенденцию к насыщению в зависимости от приложенного напряжения U^* . При $T = 77$ К повышение частоты от 1.2 до 1.6 МГц достигается за счет изменения напряжения U^* от 6 до 12 В, а при $T = 163$ К $\Delta f = 0.5 \div 0.7$ МГц при том же изменении напряжения.

В импульсном режиме работы осцилляторный генератор способен действовать в широком диапазоне температур от 77 до 335 К. Частота и амплитуда колебаний напряжения U_{\sim} на сопротивлении нагрузки 10 Ом во всем интервале рабочих температур имеют такой же характер изменения в зависимости от приложенного импульсного напряжения U^* : вначале растут, а затем выходят на насыщение или имеют тенденцию к насыщению.

4. Графеновая электроника – электроника будущего

4.1. Первые транзисторы на графене.

Так как графен впервые был получен всего несколько лет назад, то вполне естественно, что в настоящее время пока еще нет массового производства

работающих устройств на его основе, хотя список перспективных технологий довольно обширный.

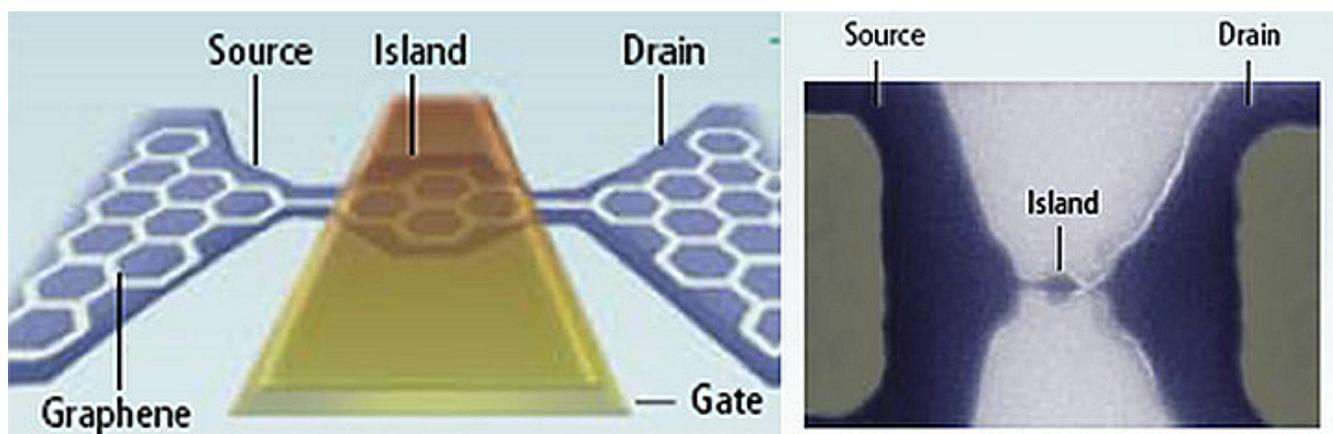


Рис.4.1 Первый графеновый полевой транзистор.

На рисунке 4.1. приведен пример возможной реализации одноэлектронного транзистора на базе графена. Слева показана схема транзистора, состоящего из графеновых истока (source) и стока (drain), соединенных островком (island) из проводящего материала или из квантовой точки, шириной около 100 нм. Справа показан тестовый транзистор, изображение которого увеличено в 40 000 раз. Островок транзистора настолько мал, что способен уместить только один электрон в один момент времени. Если к островку подходят новые электроны, то они отбрасываются электростатической силой. Любой электрон из истока квантово-механически туннелирует (есть отличная от нуля вероятность его прохождения через энергетический барьер) к островку, после чего «исчезает», просачиваясь к истоку. Напряжение, приложенное к третьему электроду – затвору (не показан на микроснимке), – управляет входом и выходом электрона с островка, таким образом регистрируя либо логический 0 (на островке нет электрона) либо 1 (электрон на островке).

4.2. Создание графеновой транзисторной технологии G NRFET

В работе [50] при комнатной температуре исследованы лабораторные образцы полевых транзисторов с каналом из полоски (ленты) графена длиной 200 нм и различной ширины, нм: 50, 30, 20, 10 и менее 10. Исток и сток транзистора имели электроды из палладия Pd. Оказалось, что свойства графена удивительным

образом меняются от чисто металлических, которые проявляются при больших значениях ширины полосы графена ω от 50 до 10 нм включительно, до полупроводниковых, когда ширина полосы графена становится менее 10 нм. При больших значениях ω графен имеет ничтожно малую ширину запрещенной зоны, а при суб-10 нм ширине полосы проявляется заметная ширина запрещенной зоны, что полезно для полевого транзистора, работающего при комнатной температуре и обладающим великолепной скоростью переключения и высокой подвижностью носителей заряда. Такое поведение графена предсказывалось теоретически в работах, выполненных в период 2006 – 2007 г.г. [50].

Таким образом, транзисторная структура имела вид, приведенный на рис.4.2,а [51].

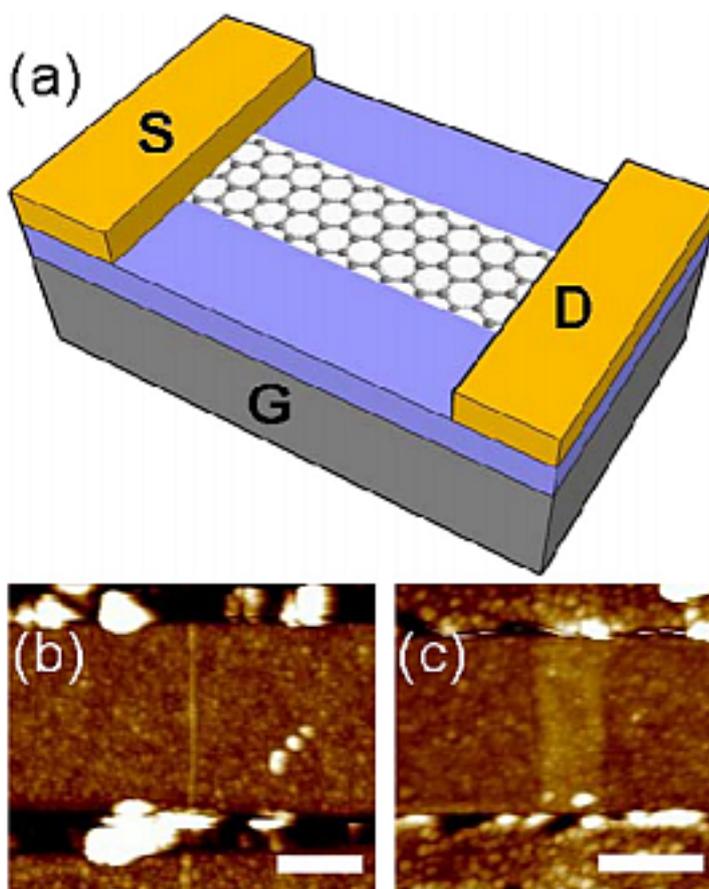


Рис.4.2. Структура и внешний вид графенового полевого транзистора. Схема GNRFETs с использованием 10 нм SiO₂ и Pd стоком-исток, p⁺⁺- Si использовался как нижний затвор. (b) AFM изображение структуры с шириной полосы графена $\omega \sim 2 \pm 0.5$ нм, длиной канала $L=236$ нм. Метка измерительной линейки (белая

прямоугольная полоска) – 100 нм. (с) AFM изображение структуры с $\omega \sim 60 \pm 5$ нм, длиной канала $L=190$ нм. Измерительная линейка – 100 нм.

На подложку из сильно легированного p^{++} -Si с высокой проводимостью, который служил тыловым (нижним) затвором (G), наносился слой подзатворного диэлектрика SiO_2 , толщиной 300 нм. Исток (S) и сток (D) формировались металлическим палладием Pd. Было установлено, что при комнатной температуре отношение токов включения-выключения I_{on}/I_{off} увеличивалось экспоненциально при уменьшении ширины полоски графена: $I_{on}/I_{off} \sim 1, \sim 5, \sim 100, \text{ and } >10^5$ для $\omega \sim 50$ нм, $\omega \sim 20$ нм, $\omega \sim 10$ нм, and $\omega \sim$ суб-10-нм, соответственно. Важно, что все структуры с шириной $\omega \leq 10$ нм (а их было более 30 штук) проявляли значение $I_{on}/I_{off} > 10^5$, даже если смещение сток-исток V_{ds} достигало 1 В. Это означало, что такие структуры были полупроводниковыми и имели значительную ширину запрещенной зоны.

Такие графеновые структуры по-английски называли graphene nanoribbon field-effect transistors (GNRFETs), а сами полоски графена – graphene nanoribbon (GNR) (ribbon – англ., полоска, лента). Один из методов их изучения – атомно-силовая микроскопия, или atomic force microscopy (AFM). Для структур с $\omega \sim$ суб-10-нм из емкостных измерений была сделана оценка подвижности дырок $100\text{--}200$ cm^2/Vs .

В последующей работе [51] была отработана технология создания полевых транзисторов на основе графена в планарной конфигурации, исследована зависимость основных характеристик таких устройств при различной ширине затвора. При этом ширина полоски графена, как показано в подписи к рис.4.2., менялась в широких пределах от 2 до 60 нм. Авторы измерили подвижность и длину свободного пробега носителей заряда в транзисторе с $\omega \leq 10$ нм: подвижность оказалось 200 cm^2/Vs , длина свободного пробега 10 нм.

Оказалось, что полевые транзисторы GNRFETs обладают схожими характеристиками и способны в будущем составить конкуренцию транзисторам на углеродных нанотрубках. Успешные исследования в области построения такого

рода устройств, а также понимание роли граней графеного слоя и применение high-k материалов позволят создать новое поколение полевых транзисторов с отличными характеристиками [51].

4.3. Высокоскоростные графеновые транзисторы

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

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

При этом из графена можно собирать микрочипы по обычной, отработанной годами планарной технологии, ныне применяемой при создании микросхем на основе кремния. А благодаря двумерной структуре графена,

управляющий ток может быть легко увеличен за счёт изменения ширины проводящего канала [52].

В заключение отметим результаты работы [53], в которой испытан скоростной графеновый транзистор с рекордно высоким для транзисторов на базе графена быстродействием и расширенным диапазоном рабочих температур.

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.

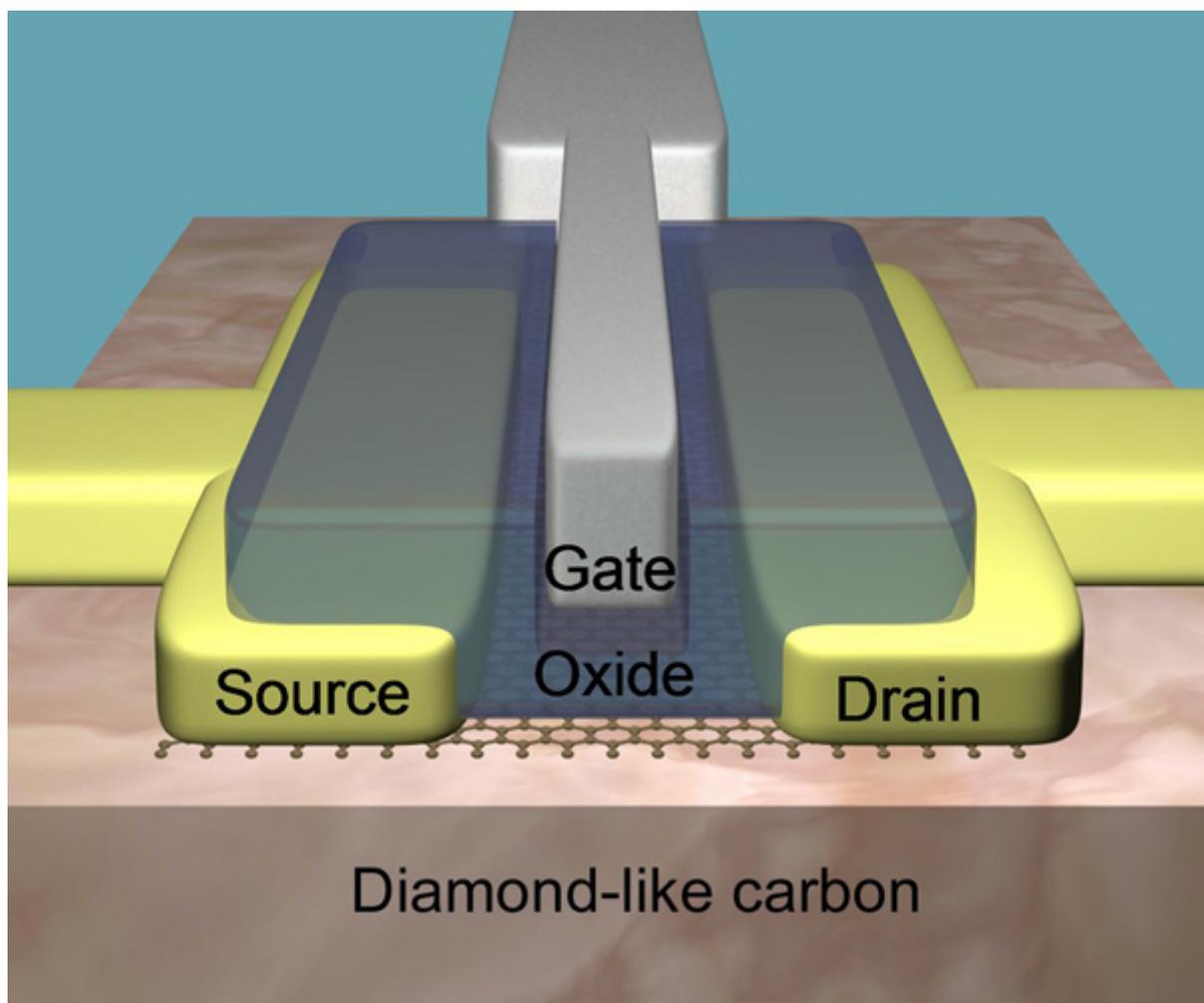


Рис.4.3. Принципиальная схема графенового транзистора на алмазоподобной подложке (фото: P Avouris) [53].

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.

Литература

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, Vladimir Bulovic, Mildred S. Dresselhaus and Jing Kong. Large Area, Few-Layer Graphene Films on Arbitrary Substrates by Chemical Vapor Deposition // Nano Letters.– 2009.– v. 9 (1), p. 30–35.

10. Hyesung Park, Jill A. Rowehl, Ki Kang Kim, Vladimir Bulovic and Jing Kong. Doped graphene electrodes for organic solar cells // Nanotechnology.– 2010.– v.21.– p. 1 – 6.
11. X. Li, W. Cai, 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.– №. 5932 ю – 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 (дата обращения: 21.10.2011).
13. Gordon E. Moore. Cramming more Components onto Integrated Circuits. // Electronics .– 1965 .– Vol. 38.– Num. 8.
14. Ф.А. Кузнецов. Новые материалы и технологии для приборов нанoeлектроники (Учреждение Российской академии наук Институт неорганической химии им. А.В. Николаева СО РАН): [Электронный ресурс] : URL: http://edu-cons.net/atlas_last/publdet.php?idrazd=222&id=233 (дата обращения 20.12.2011).
15. Закон Мура: каким путем пойдет дальнейшее развитие полупроводников: [Электронный ресурс] : URL: <http://www.nanonewsnet.ru/articles/2009/zakon-mura-kakim-putem-poidet-dalneishee-razvitie-poluprovodnikov> (дата обращения 20.12.2011).
16. А.А. Щука. Электроника. Учебное пособие / Под ред. проф. А. С. Сигова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005 .– 800 с.
17. Иванов Ю.Л., Рывкин С.М. Возникновение колебаний тока в образцах германия, помещенных в электрическое и продольное магнитное поле // ЖТФ.–1958.–Т.28.–Вып.4.–С.774-775.
18. Ленерт Б. Процессы диффузии в положительно заряженном цилиндре в продольном магнитном поле // Труды Второй Междунар. конф. по мирному

- использованию атомной энергии, Женева, 1958.– М.: Атомиздат.– 1959.–
Избранные докл. иностр. ученых.–Т.1.–С. 648-651.
19. Kadomtsev 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. Кандрюшина (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. Осцилляторные сенсоры с частотным выходом // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях. Межвузовский сборник. ISSN 2223-2656. Изд. АлтГТУ.– 2011 .– с.120 – 123
50. H. Li et al. Chemically Derived, Ultrasoft Graphene Nanoribbon Semiconductors // Science .– v. 319.– № 5867 .– p. 1229-1232.
51. Xinran Wang, Yijian Ouyang, Xiaolin Li, Hailiang Wang, Jing Guo and Hongjie Dai. Room-Temperature All-Semiconducting Sub-10-nm Graphene Nanoribbon

Field-Effect Transistors // *Phys. Rev. Lett.* .– 2008 . – v.100.–Issue 20 .– p. 206803-1–4.

52. Yu-Ming Lin, Keith A. Jenkins, Alberto Valdes-Garcia, Joshua P. Small, Damon B. Farmer and Phaedon Avouris. Operation of Graphene Transistors at Gigahertz Frequencies // *Nano Lett.*, 2009 .– 9 (1) .– p. 422–426.
53. Yanqing Wu, Yu-ming Lin, Ageeth A. Bol, Keith A. Jenkins, Fengnian Xia, Damon B. Farmer, Yu Zhu & Phaedon Avouris. High-frequency, scaled graphene transistors on diamond-like carbon // *Nature*, 2011.– v. 472.– p. 74–78.