

Министерство образования и науки Российской Федерации

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Приоритетный национальный проект «Образование»
Национальный исследовательский университет

И.Б. ЗАХАРОВА

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению подготовки
«Техническая физика»*

Санкт-Петербург
Издательство Политехнического университета
2010

УДК 621.389:547.022.1

ББК 32.973

3 — 382

Рецензенты:

доктор физико-математических наук, профессор Санкт-петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» *В. А. Мошников*

доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного политехнического университета *В. И. Ильин*

ISBN 978-5-7422-1845-6

Физические основы микро-и нанотехнологий: учебное пособие / И.Б.Захарова – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 204 с.

Рассмотрены физические особенности формирования микро- и наноразмерных структур, лежащих в основе современной нанoeлектроники, основные технологические методы получения таких структур и перспективы их развития. Большое внимание уделено физическим и технологическим ограничениям на предельные параметры микро- и наноструктур. Реализация технологических процессов рассмотрена на примере МОП-структур интегральных схем с малыми размерами элементов и углеродных наноструктур.

Учебное пособие предназначено для студентов вузов, обучающихся по магистерской программе «Физика нанотехнологий и наноразмерных структур» направления подготовки магистров «Техническая физика». Оно может быть также использовано студентами, обучающимися по направлениям «Электроника и нанoeлектроника», «Инфокоммуникационные технологии», в системах повышения квалификации и дополнительного образования.

Работа выполнена в рамках реализации программы развития национального исследовательского университета «Модернизация и развитие политехнического университета как университета нового типа, интегрирующего мультидисциплинарные научные исследования и надотраслевые технологии мирового уровня с целью повышения конкурентоспособности национальной экономики»

Печатается по решению редакционно-издательского совета Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

© Захарова И.Б. , 2010

© Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2010

ISBN 978-5-7422-1845-6

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений.....	5
Введение.....	6
1. Основные тенденции развития микро- и нанотехнологий в полупроводниковой электронике.....	7
1.1. Эволюция полупроводниковой электроники.....	7
1.2. Физические и схемотехнические ограничения на уменьшение размеров активных элементов и рост степени интеграции	13
1.3. Одноэлектронные устройства.....	22
2. Физические основы процессов планарной микротехнологии.....	29
2.1. Подготовка пластин и геттерирование примесей.....	29
2.2. Термическое окисление кремния.....	33
2.3. Диффузия.....	47
2.4. Ионное легирование.....	56
2.5. Эпитаксия.....	62
2.6. Фотолитография.....	76
2.7. Сухое травление.....	87
3. Технология пассивных элементов интегральных схем.....	98
3.1. Системы металлизации интегральных схем	98
3.2. Интегральные резисторы и конденсаторы.....	105
3.3. Расчет параметров интегрального резистора.....	109
3.4. Тонкопленочные резисторы и конденсаторы.....	111
4. Реализация СБИС на основе МДП-структур.....	114
4.1. Структура МДП транзистора.....	115
4.2. Технология производства интегральных схем на МОП-транзисторах.....	119
4.3. Конструктивные и технологические особенности КМДП ИС	128
4.4. Масштабирование МОП-транзисторов.....	136
4.5. МОП-транзисторы с малыми размерами элементов.....	140
5. Углеродные наноструктуры в электронике.....	159
5.1. Основные представления о нанотрубках.....	159
5.2. Электронная структура, энергетический спектр и проводимость нанотрубок.....	162
5.3. Применение углеродных наноструктур в молекулярной электронике.....	168

5.4. Нанoeлектромеханические устройства на основе углеродных нанотрубок.....	179
5.5. Графеновая электроника.....	187
Библиографический список.....	195
Приложение 1. Примеры расчетных заданий по курсу «Физические основы микро-и нанотехнологий».....	196
Приложение 2. Физические свойства германия и кремния.....	203

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

- AFM — атомный силовой микроскоп
CVD — химическое газофазное осаждение
DRAM — динамические запоминающие устройства
ITO — оксид индия – олова
LDD — структура МОП транзистора со слабо-легированным стоком
LOCOS — локальное окисление кремния
MOSFET — полевой транзистор металл-окисел-полупроводник
NRAM — энергонезависимое оперативное запоминающее устройство
PECVD — радиочастотное плазмохимическое осаждение из газовой фазы
R_c — контактное сопротивление
SED — одноэлектронные приборы
SET — одноэлектронный транзистор
STM — сканирующий туннельный микроскоп
ВУФ — вакуумный ультрафиолетовый диапазон длин волн
ИС — интегральная схема
КНИ — технология кремний-на-изоляторе
КНС — технология кремний-на-сапфире.
КМДП — комплиментарные МДП структуры
КМОП — комплиментарные МОП структуры
МЛЭ — молекулярно-лучевая эпитаксия
МДП — структура металл – диэлектрик - полупроводник
МОП — структура металл-окисел-полупроводник
СБИС — сверхбольшая интегральная схем
ТКС — температурный коэффициент сопротивления
УБИС — ультрабольшая интегральная схема
УНТ — углеродная нанотрубка
УФ — ультрафиолетовый
ФСС — фосфорно-силикатное стекло

ВВЕДЕНИЕ

Микро- и нанотехнологии, развитие которых во многом определяет прогресс науки и техники и, в частности, микро- и нанoeлектроники, базируются на основе последних достижений физики твердого тела, квантовой электроники, физической химии и технологии полупроводниковых материалов. Для их развития необходимо установление фундаментальных закономерностей, определяющих физико-химические особенности формирования микро- и наноразмерных структур, их электронные и оптические свойства. Нанотехнология обычно рассматривается как продолжение развития основных тенденций микротехнологий, а именно как совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие компоненты с размерами менее 100 нм, имеющие принципиально новые качества и позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба.

Разработанные в последние годы нанoeлектронные элементы по своей миниатюрности, быстродействию и потребляемой мощности составляют серьезную конкуренцию традиционным полупроводниковым транзисторам и интегральным микросхемам на их основе как главным элементам информационных систем. Уже сегодня техника вплотную приблизилась к теоретической возможности запоминать и передавать один бит информации с помощью одного электрона, локализация которого в пространстве может быть задана одним атомом. Ожидает практического разрешения и идея аналогичных однофотонных элементов. Широкое применение одноэлектронных и однофотонных элементов для создания информационных систем сдерживается недостаточной их изученностью, а главное, необходимостью обладать нанотехнологией, позволяющей конструировать требуемые структуры. Однако современные темпы развития электроники позволяют уверенно прогнозировать промышленное освоение нанотехнологии, а вместе с ней и нанoeлектроники уже в начале XXI века.

Данное учебное пособие предназначено для студентов, обучающихся по магистерской программе «Физика нанотехнологий и наноразмерных структур» направления подготовки магистров «Техническая физика», а также студентов старших курсов, обучающихся по направлениям «Электроника и нанoeлектроника», «Инфо-коммуникационные технологии», в системах

повышения квалификации и дополнительного образования. Для удобства работы студентов и преподавателей в приложении к пособию приведены расчетные задания по отдельным разделам курса и комплексные расчетные задания. Для более глубокого изучения интересующемуся читателю можно рекомендовать перечисленные в списке литературы монографии, обзоры и пособия, вышедшие в последние годы и переведенные на русский язык.

1. ОСНОВНЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

1.1. ЭВОЛЮЦИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

В современных информационных системах преимущественное распространение получила цифровая форма хранения и обработки информации благодаря хорошей защищенности от ошибок и помех, высоким скоростям обработки в вычислительных системах и высокой плотности передачи по каналам связи. В цифровой форме информация выражается в виде двоичного кода, задаваемого электрическим импульсом, для которого логическому состоянию "0" соответствует отсутствие электрического напряжения (или тока), а состоянию "1" - его наличие. Основным элементом для обработки информации является электронный прибор с двумя устойчивыми электрическими состояниями, соответствующими логическому 0 и 1. Первым электронным переключающим прибором был вакуумный диод, запатентованный в 1904 году англичанином Д.А. Флемингом. С тех пор развитие электроники отмечено изобретением и практическим освоением вакуумного триода (1906 год, Л. Де Форест и Р. Либен) и полупроводникового транзистора, а затем интегральных микросхем (ИС) на кремнии, положившим начало микроэлектронике. Первый транзистор был создан в 1947 г. (а в 1956 г. за его открытие Бардину, Браттейну и Шокли вручили Нобелевскую премию по физике). Первая микросхема заработала 12 сентября 1958 г. в компании Texas Instruments (за ее изобретение Нобелевскую премию по физике присудили лишь в 2000 г.). «Первооткрывателями» микросхемы считаются Джек Килби и один из основателей Intel Роберт Нойс.

На рис. 1.1 представлен ENIAC – первый цифровой ламповый компьютер Electronic Numerical Integrator and Computer, созданный в 1944 году. Это устройство содержало 18000 электронных ламп, 70000 резисторов

и потреблял мощность около 160 кВт. Главной тенденцией дальнейшего развития электроники является уменьшение размеров приборных структур, повышение степени интеграции и функциональной сложности устройств на базе постоянного совершенствования технологических процессов и развития новых физических и схемотехнических подходов. Эта тенденция выразилась в так называемом «законе» Мура, который представляет собой скорее эмпирическое правило (рис. 1.2). В 1965 году один из будущих основателей корпорации Intel Гордон Мур предсказал, что количество транзисторов в микросхемах будет примерно удваиваться каждые два года. Вычислительная мощность, измеряемая в миллионах команд в секунду, стабильно увеличивалась с повышением количества транзисторов.

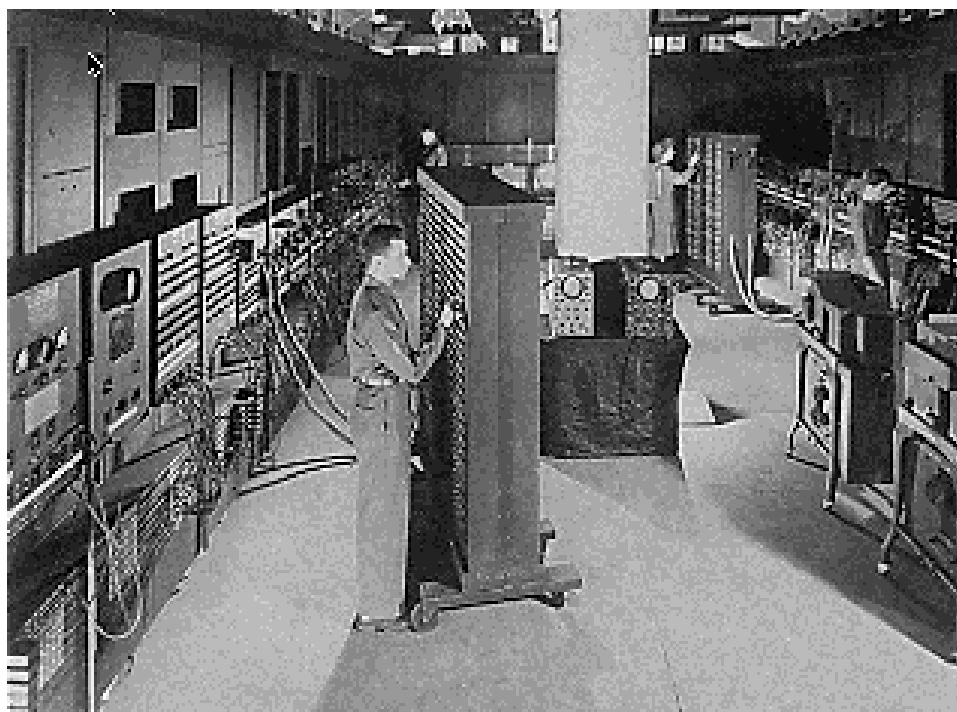


Рис. 1.1 ENIAC – первый цифровой ламповый компьютер (1944год).

Удивительно, что прогноз, сделанный на самом начальном этапе развития микроэлектроники, достаточно хорошо оправдывается на протяжении 40 лет. Значение закона Мура кроется не в постоянстве темпов роста числа элементов, а в глубинных причинах этой тенденции и ее следствиях. В своем первоначальном прогнозе Мур указал, что удвоение числа элементов в интегральных схемах будет происходить за счет трех факторов: на 50% – за счет увеличения разрешающей способности литографии; на 25% – за счет увеличения размера кристалла благодаря улучшению производственных процессов; и на остающиеся 25% – за счет

разного рода инноваций, в частности появления новых методов формирования элементов на кристалле (из которых подавляющее число составляют транзисторы). Эти три фактора являются движущими силами тенденции к увеличению числа элементов на кристалле.

Основываясь на предположении, что расходы на производство кристалла будут расти медленнее, чем число элементов, Мур указал также, что результатом роста числа элементов на кристалле станет снижение стоимости на элемент. Результирующее экспоненциальное снижение стоимости на функцию и является реальной движущей силой развития полупроводниковой индустрии и информационных технологий в целом. Темпы удвоения в законе Мура были пересмотрены однажды в прошлом, и могут измениться вновь, но пока стоимость в пересчете на функцию падает, информационная революция будет продолжаться.

В 2003 году глава технологического подразделения Intel Пэт Гелсинджер сказал: «Было время, когда Intel и ее коллеги задавались вопросом, удастся ли достичь технологического процесса в 100 нм. Мы это сделали тогда, а сегодня мы видим ясно, что нам удастся преодолеть и 10 нм рубеж. С «законом Мура» у нас всегда есть расчеты на 10-летнюю перспективу, а что мы будем делать за гранью 10 нм пока точно неизвестно. «Второй закон Мура», сформулированный в 1998 году, гласит, что стоимость фабрик по производству микросхем экспоненциально возрастает с усложнением производимых микросхем. Так, стоимость фабрики, на которой корпорация Intel производила микросхемы динамической памяти ёмкостью 1 Кбит (проектная норма 10 мкм), составляла 4 млн. долларов, стоимость же Fab32, завода по производству процессоров на базе 45-нм техпроцесса, составила 3 млрд. долларов. Основная движущая сила снижения стоимости на схему или бит памяти – повышение числа схем на квадратный миллиметр. Чтобы расходы уменьшались, стоимость обработки кремниевой подложки должна повышаться гораздо медленнее, чем плотность. Происходившее в 80-е годы быстрое (на 25% ежегодно) увеличение капитальных расходов на производственные линии привело к опасности прекращения ответного падения стоимости на схему. Однако, начиная с 1990 года, темпы повышения расходов замедлились — менее чем до 15% в год. В основном это произошло благодаря стабилизации требований к чистым производственным помещениям, повышению продуктивности оборудования и уровня утилизации отходов, а также замедлению темпов усложнения обработки. Основную долю издержек при выпуске интегральных схем составляют

капитальные расходы на создание оборудования и чистых производственных помещений. Темпы повышения этих расходов должны перекрываться темпами увеличения числа элементов на кристалл.

В 2007 году Мур заявил, что закон, очевидно, скоро перестанет действовать из-за приближения минимального размера элементов ИС к физическому пределу, определяемому атомарной природой вещества и конечной скоростью распространения электромагнитного взаимодействия. С ростом тактовой частоты допустимые габариты процессора уменьшаются быстрее, чем реальные размеры. Для 10-гигагерцевого процессора время такта составит 100 пс и за 1 такт свет в диэлектрике может пройти порядка 15-20 мм, что примерно соответствует размеру кристалла ИС. Согласно фундаментальным законам физики, за определенное время информацию нельзя передать на расстояние большее, чем за то же время проходит свет.

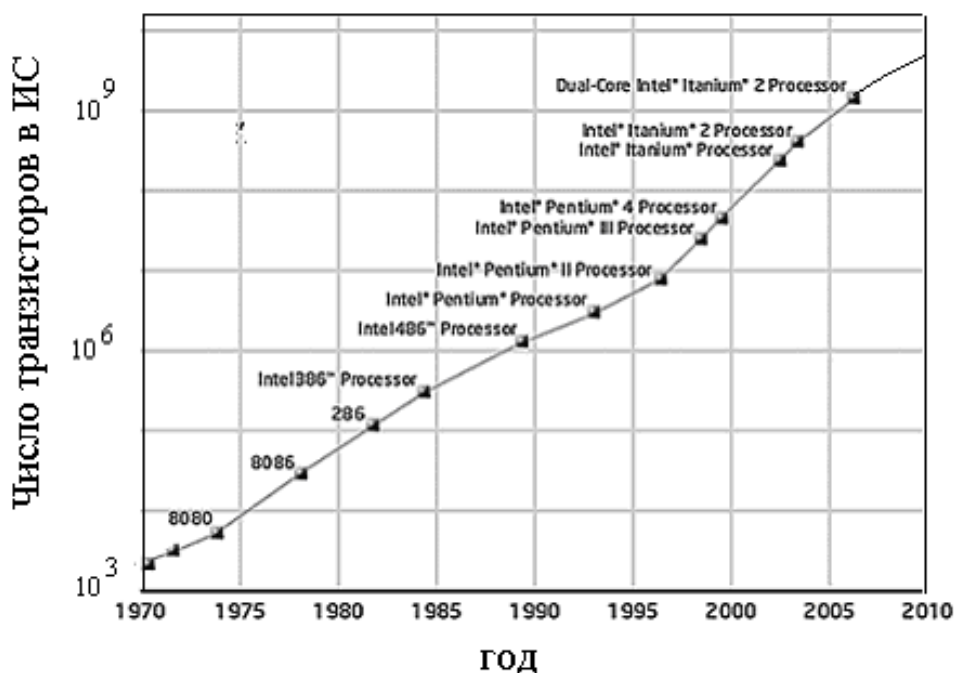


Рис.1.2. Зависимость числа активных элементов ИС от времени, иллюстрирующая эмпирический «закон» Мура

Таким образом, необходимо разрабатывать новые методы иерархической разводки, которые позволят разместить все высокочастотные части схемы на небольшой площади, и выполнять передачу информации на большие расстояния за более длинные такты. Тем не менее, ограничение по размеру —

серьезное препятствие на пути дальнейшего выполнения закона Мура в части роста размера кристалла.

Основные принципы микроэлектроники – групповой метод и планарная технология – были освоены при изготовлении транзисторов уже в конце 50 годов. Физико-технологической основой планарной технологии стало разработка процессов локального легирования методом диффузии и термического окисления кремния, а также исследования плотности поверхностных состояний на границе раздела Si – SiO₂.

Первые разработки ИС относятся к 1958 – 1960г. В 1961 – 1963г.г. ряд американских фирм начали выпускать простейшие полупроводниковые монолитные ИС. На рис. 1.3. представлена одна из первых кремниевых ИС, выпущенных в 1961 году.

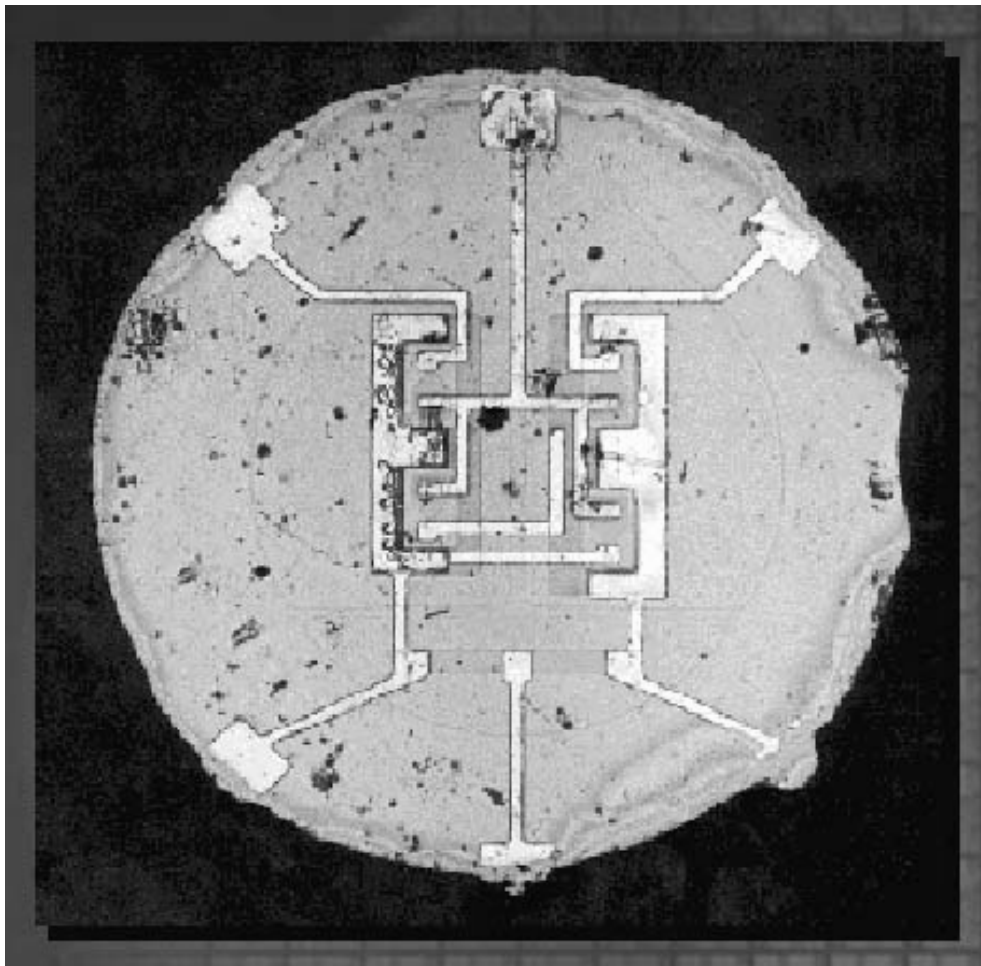


Рис.1.3. Первая планарная интегральная схема на кремнии (1961 год).

В то же время были разработаны пленочные ИС. Однако некоторые неудачи с разработками стабильных по электрическим характеристикам

пленочных активных элементов привели к преимущественной разработке гибридных ИС. Отечественные ИС были разработаны в 1962 – 1963г.г. в ЦКБ Воронежского завода полупроводниковых приборов (схемы диодно-транзисторной логики по технологии с окисной изоляцией карманов).

В историческом плане можно отметить пять этапов развития микроэлектроники. Первый этап, относящийся к первой половине 60-х годов, характеризуется степенью интеграции ИС до 100 элементов на кристалл и минимальным размером элементов порядка 10 мкм. Второй этап, относящийся ко второй половине 60-х годов и первой половине 70-х годов, характеризуется степенью интеграции ИС от 100 до 1000 элементов на кристалл и минимальным размером элементов до 2 мкм. Третий этап, начавшийся во второй половине 70-х годов, характеризуется появлением БИС со степенью интеграции более 1000 элементов на кристалл и минимальным размером элементов до 1 мкм. Четвертый этап, характеризуется разработкой сверхбольших ИС (СБИС) со степенью интеграции более 10^4 элементов/кристалл и размерами элементов 0,1 – 0,2 мкм. Пятый, современный, этап характеризуется достижением минимальных размеров элементов, близких к физическим ограничениям на предельный размер (10 нм), разработкой ультрабольших ИС (УБИС) со степенью интеграции 10^8 , отходом от классических активных элементов электроники и разработкой одноэлектронных приборов, разработкой фотонных и квантовых компьютеров, освоением новых функциональных материалов, постепенным переходом к молекулярной и биоэлектронике.

По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области все больше проявляются квантовые свойства электрона. В его поведении преобладающими становятся волновые закономерности, характерные для квантовых частиц. С одной стороны, это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов, использующих закономерности поведения электрона как классической частицы, а с другой - открывает перспективы создания новых уникальных переключающих, запоминающих и усиливающих элементов для информационных систем. Последние и являются основным объектом исследований и разработок новой области электроники - наноэлектроники, зародившейся в 90-х годах XX века.

1.2. ФИЗИЧЕСКИЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРОВ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И РОСТ СТЕПЕНИ ИНТЕГРАЦИИ

Важнейшая задача увеличения производительности и функциональной сложности ИС связана с постоянным ростом степени интеграции, что сводится к уменьшению размеров элементов конструкции ИС (рис. 1.4). Однако этой тенденции препятствуют технологические, схемотехнические и фундаментальные физические ограничения.

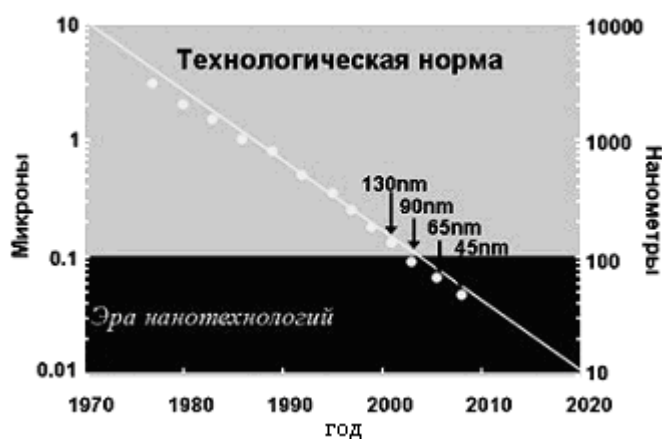


Рис. 1.4. Уменьшения предельных размеров элементов ИС с 1970 по 2010 год.

Технологические ограничения на минимальные горизонтальные и вертикальные размеры элементов ИС в настоящее время позволяют получать методом литографии элементы размером порядка 1-10 нм, толщины тонких эпитаксиальных пленок могут составлять несколько атомных слоев, а применение зондовых методов позволяют манипулировать фактически отдельными атомами. Таким образом, технологические ограничения сводятся практически к экономическим ограничениям, т.е. к стоимости, производительности и воспроизводимости техпроцессов. Разброс параметров техпроцесса, который растёт с уменьшением размеров транзистора, не должен снижать процент выхода годных кристаллов. Конкретные технологические ограничения для различных этапов производства ИС и пути их преодоления рассмотрены в разделах главы 2, посвященной базовым операциям планарной технологии.

Схемотехнические ограничения сводятся к изменениям характеристик «классического» полевого транзистора при уменьшении его размеров и невозможности масштабного уменьшения рабочего напряжения. Кроме того,

увеличение числа элементов приводит к росту числа межсоединений и, соответственно, к увеличению времени задержки распространения сигнала между элементами ИС. Для цифровых СБИС пороговое напряжение нельзя снижать неограниченно, поскольку при этом увеличивается подпороговый ток, который определяет потребление энергии СБИС в неактивном состоянии. Верхний предел порогового напряжения ограничивается четвертью от напряжения питания, которое стараются снизить для уменьшения потребляемой мощности. Однако для аналоговых схем идеальным является нулевое пороговое напряжение $V_t = 0$, что увеличивает динамический диапазон аналоговой схемы, определяемый разностью между напряжением на затворе и V_t , то есть $(V_g - V_t)$. Особыми требованиями к "аналоговым" транзисторам являются также повышенная нагрузочная способность (ток стока в режиме насыщения), линейность и малые нелинейные искажения на малом сигнале. Для дифференциальных каскадов и токового зеркала важна согласованность характеристик транзисторов. Транзистор должен иметь слабую зависимость порогового напряжения от напряжения на стоке, от длины и ширины канала, а также большую передаточную проводимость, большое выходное сопротивление, малое сопротивление областей истока и стока и большую нагрузочную способность. Емкости затвора и p - n -переходов должны быть минимальны. Подробнее эти проблемы рассмотрены в разделе 4.1.

Основными физическими проблемами микроминиатюризации МОП-транзисторов являются туннелирование носителей тока через подзатворный диэлектрик, инжекция горячих носителей в окисел, прокол между истоком и стоком, утечки в подпороговой области, уменьшение подвижности носителей в канале, увеличение последовательного сопротивления между истоком и стоком, обеспечение запаса между пороговым напряжением и напряжением питания. Фундаментальные физические ограничения на уменьшение размеров сводятся к существованию минимального рабочего напряжения, статистической неопределенности параметров малых элементов, теплофизическим характеристикам ИС, возникновению эффектов туннелирования носителей тока и электромиграции в токопроводящих шинах.

Когда размеры транзистора уменьшаются без соответствующего понижения температуры, необходимого для уменьшения тока выключения, напряжение питания, пороговое напряжение и профиль распределения легирующей примеси необходимо подбирать так, чтобы сохранять

приемлемое отношение тока включения к току выключения. На каком-то этапе туннельный и иные эффекты ограничивают длину канала настолько, что дальнейшее повышение производительности становится невозможным.

Таким образом, туннельный эффект является основным фактором, ограничивающим уменьшение транзистора. Предел толщины подзатворного диэлектрика находится примерно на уровне 1-1,5 нм; современные же транзисторы имеют топологические размеры в 3,5 нм, т.е. всего в пять-шесть атомных слоев. Результаты недавних исследований показывают, что туннелирующие токи могут вызвать повреждения, способные привести к возникновению непредвиденных ранее проблем с надежностью слишком тонкого подзатворного диэлектрика. Из этих соображений толщину подзатворного оксида приходится ограничивать значением 1,5-2 нм. Для повышения производительности без дальнейшего утончения подзатворного оксида придется разрабатывать новые структуры транзисторов или новые подзатворные диэлектрики с более высокой диэлектрической проницаемостью.

Большой практический интерес представляют ограничения, связанные с созданием новых типов транзисторов. Независимо от конкретной структуры предельное минимальное расстояние между стоком и истоком с отношением тока включения к току выключения, равным 10^3 , за счет одного только туннельного перехода оказывается равным около 5 нм. С учетом флуктуаций концентрации примесей и эффекта экранирования этот предел достигает 10 нм.

Рассмотрим на примере основного элемента цифровых ИС – МОП-транзистора – как изменялись его параметры при уменьшении его размеров. При уменьшении размеров активного элемента следует исходить из принципа постоянства напряженности электрического поля, поскольку рост напряженности выше критической приводит к возникновению горячих носителей тока, ударной ионизации, лавинному пробое, пробоем диэлектрика. Поэтому при уменьшении размеров элемента в k раз желательно с тем же коэффициентом снижать напряжения питания ИС. При фиксированном напряжении минимальный размер элемента (толщина подзатворного диэлектрика, толщина обедненного слоя, толщина базы и т.п.) определяется пробоем материала. Пробивная напряженность поля составляет 10^7 В/м. Однако предельное снижение рабочих напряжений ограничено неустраняемыми тепловыми флуктуациями.

Найдём минимально допустимое напряжение питания полупроводниковой ИС. Пусть $E_n = eU$, где U – напряжение источника питания. Поскольку носители заряда находятся в тепловом движении, вероятность того, что они наберут в процессе теплового движения энергию E_n , определяется распределением Гиббса:

$$W = A_n \exp(-E_n/kT) \quad (1.1.)$$

Положим, приближенно, что состояние с $E_n = 0$ осуществляется с вероятностью, равной 1, тогда $A_n = 1$. Пусть в ИС содержится 10^6 элементов, и каждый из них может переходить в новые состояния 10^9 раз в секунду. Потребуем теперь, чтобы в течение 10^3 секунд (20 мин) в среднем только в одном элементе при одном переключении может произойти сбой. Тогда вероятность $W = 10^{-9} \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-3} = 10^{-18}$.

Отсюда вытекает примерное требование к напряжению питания

$$U = 40 kT/e$$

При $T = 300$ К величина $kT = 0.026$ эВ, следовательно, минимальное напряжение питания составляет около 1 В. При криогенных температурах напряжение U может быть понижено. При $T = 78$ К минимальное $U = 250$ мВ, при $T = 4$ К $U = 13$ мВ. Напряжение питания также может быть понижено при применении новых схемотехнических и архитектурных решений, позволяющих повысить надежность ИС и защиту от ложных срабатываний, однако фундаментальное ограничение на минимальное напряжение питания по порядку величины остается.

Оценим минимальную толщину диэлектрической изоляции. В случае хорошего диэлектрика напряжённость поля пробоя составляет примерно 10^8 В/м. Тогда средняя толщина диэлектрика, устойчивого к пробоям при $U = 1$ В, составляет 10 нм. Заметим, что при толщине порядка 3 нм заряд будет стекать не за счет пробоя, а за счет туннельного эффекта. Однако в тонких слоях из-за особенностей структуры электрическая прочность возрастает (рис. 1.5.) Невозможность дальнейшего уменьшения толщины подзатворного диэлектрика, что необходимо для сохранения емкости при уменьшении топологических размеров транзистора, считалась одной из непреодолимых проблем. Действительно, уже при проектной норме 65 нм толщина подзатворного диэлектрика составляет 1,2 нм (5 молекулярных слоев), и дальнейшее ее уменьшение неизбежно приводит к катастрофическому росту токов утечки.

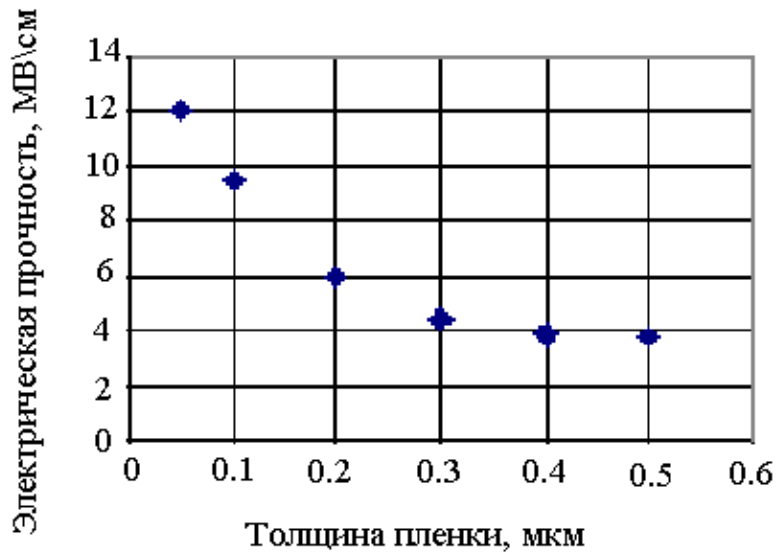


Рис.1.5. Зависимость электрической прочности пленки двуокиси кремния от ее толщины.

Инженеры фирмы Intel решили эту проблему кардинально: они отказались от традиционного материала диэлектрика – диоксида кремния – и перешли к новому компоненту с существенно большей диэлектрической константой (high-k) – оксиду гафния. Это позволило достичь требуемой емкости с приемлемой толщиной диэлектрика (рис.1.6). Это был столь существенный технологический скачок, что Гордон Мур написал: «Реализация high-k означает наиболее революционное изменение в технологии со времени изобретения МОП-транзисторов с поликремниевыми затворами в конце 60-х годов».

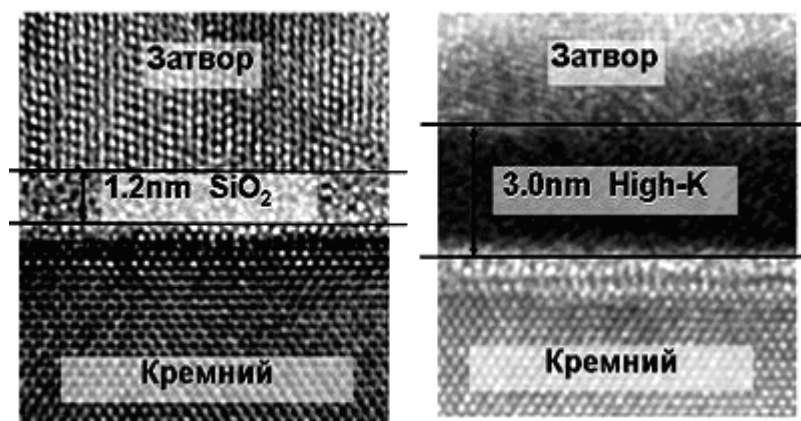


Рис. 1.6. Увеличение толщины подзатворного диэлектрика при применении оксида гафния.

При уменьшении размеров элементов необходимо пропорционально уменьшать ширину областей объемного заряда вокруг $p-n$ переходов, иначе мы приходим к ситуации полностью обедненного канала МОП-транзистора, базы биполярного транзистора и т.п. Ширина обедненного слоя (толщина $p-n$ -перехода ω определяется выражением

$$\omega = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0(\varphi + U)}{qN}}, \quad (1.2)$$

где φ – контактная разность потенциалов, равная $\approx 0,8$ В; U приложенное к переходу обратное напряжение;

$$N = N_a N_d / (N_a + N_d) \quad (1.3)$$

Анализ выражений показывает, что при уменьшении размеров ИС в k раз и напряжения питания в k раз необходимо в k раз увеличивать концентрацию легирующей примеси. Однако предельное увеличение концентрации ограничено уровнем вырождения полупроводника, кроме того, это уменьшает подвижность носителей и ухудшает свойства $p-n$ перехода, такие как токи утечки и пробивное напряжение.

Пределы уменьшения толщин полупроводниковых слоев биполярной транзисторной структуры определяются уровнем их легирования. Повышение концентрации примеси в базе снижает эффективность инжекции эмиттера и, следовательно, коэффициент усиления по току. При уровне легирования базы $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и использовании поликремниевого эмиттера экспериментально получены значения коэффициента усиления биполярных транзисторов по току свыше 50. Легирование базы до концентрации 10^{19} см^{-3} и более приводит к появлению туннельного механизма переноса носителей между базой и эмиттером. Поэтому, предельную концентрацию в базе можно оценивать как $4 \cdot 10^{18} - 6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Концентрацию примеси в коллекторе можно принять равной концентрации в базе.

Для такой структуры ширина области пространственного заряда эмиттерного и коллекторного переходов равна, соответственно, 15 нм и 30 нм. В предельно тонкой структуре ширина области электро-нейтральной базы должна быть не менее длины релаксации импульса, которая при такой концентрации составляет около 20 нм. В более тонких структурах

нарушаются условия использования уравнений, описывающих работу биполярного транзистора. При ширине электро-нейтральной базы 20 нм ее слои сопротивление составляет 5 кОм/квадрат. Пользуясь принципом пропорциональной миниатюризации, можно оценить минимальный размер эмиттера в 0.1 мкм. Величина 0.1 мкм соответствует отношению размера эмиттера к суммарной ширине эмиттерного перехода и электро-нейтральной базы, равному 3. При таком отношении торцевая инжекция эмиттера еще будет преобладать над инжекцией неосновных носителей в периферийную область базы, сохраняются условия применимости формул, описывающих работу прибора.

Предельные плотности тока в различных областях транзисторной структуры могут быть ограничены насыщением дрейфовой скорости носителей в коллекторе, высоким уровнем инжекции в базе и контактным сопротивлением металла к эмиттеру. Оценка предельной плотности тока в коллекторе дает величину $8 \cdot 10^6$ А/см². Оценки показывают, что в предельных биполярных транзисторах ограничения плотности тока определяются не полупроводниковой структурой приборов, а логическим перепадом схемы и совершенством технологии создания металлизированных контактов.

Основное ограничение на плотность тока в эмиттерном контакте и проводниках накладывает явление электромиграции, определяющее надежность изделий. Плотность тока в алюминиевом проводнике при комнатной температуре не должна превышать 10^5 А/см². Использование многослойных и многокомпонентных материалов для создания металлизации позволяет повысить предельную плотность тока до $3 \div 5 \cdot 10^5$ А/см², а дополнительное снижение рабочей температуры до 10^6 А/см². Критическая плотность тока в медных проводниках в несколько раз выше, что обуславливает перспективность применения медной металлизации в УБИС.

Одно из наиболее фундаментальных ограничений - это плотность рассеиваемой мощности. Экспериментально показано, что в кремниевых микросхемах может быть обеспечено отведение тепла от кристалла при средней плотности мощности 750 Вт/см². Эта величина во много раз превышает современные потребности. В перспективе и такая столь высокая плотность мощности может быть повышена. Более серьезную проблему вызывает локальное повышение температуры из-за больших плотностей мощности в отдельных транзисторах.

До тех пор, пока быстродействие ИС определяется задержками логических элементов, уменьшение топологических размеров

конструктивных элементов увеличивает быстродействие схемы. С уменьшением размеров транзисторов уменьшаются их выходные токи и, следовательно, их нагрузочная способность. Для оценки предельной нагрузочной способности логических элементов необходимо рассмотреть активные приборы совместно с системой металлизации в условиях ограничения плотности тока.

Для снижения перекрестных помех проводники в быстродействующих ИС выполняют в виде экранированных или микрополосковых линий. Принцип пропорциональной миниатюризации требует с уменьшением ширины и толщины проводников уменьшать и толщины изолирующих слоев. При использовании в качестве диэлектрика двуокиси кремния предельная погонная емкость проводников любой ширины составляет 2 пФ/см. Оценку параметров БИС с предельными параметрами проведем на основе регулярного массива из N логических элементов. Сделаем для этого дополнительные предположения. Пусть логические элементы построены на биполярных транзисторах и имеют резистивные нагрузки; отношение числа выводов элементарной схемы к суммарному числу объединений по входам и выходам равно $m/(F_i + F_0) = 2$, а предельная плотность тока в эмиттере $j_{\text{Э}} = 2 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$; разводка логических связей выполнена в двух уровнях, которые полностью заняты проводниками.

Если ширина проводника первого уровня, зазоры между проводниками и размер эмиттера равны минимальному литографическому размеру – a , ширина проводников и зазор между проводниками во втором уровне разводки равны $2a$, то общая длина проводников второго уровня вдвое меньше, чем первого. В схемах с резистивными нагрузками на перезарядку емкости разводки отводится не более половины логического тока, т.е. $0.5 I_{\text{Э}} = 0.5 j_{\text{Э}} a^2$. Средняя длина проводника

$$\ell_{\text{CP}} = \frac{4}{3} a \frac{m}{F_i + F_0} \sqrt[4]{N} \quad (1.4)$$

где $\ell_{\text{CP}} = \frac{8}{3} a \sqrt[4]{N}$, т.к. $\frac{m}{F_i + F_0} = 2$ по условию расчета

Емкость проводника $\overline{C_{\text{np}}} = \frac{8}{3} C_n a \sqrt[4]{N} \quad (1.5)$

Время задержки логического элемента, определяемое только емкостью проводников, оценим по формуле

$$t_{3\partial} = \frac{C_{np} \Delta U_n}{0.5 \cdot I_{\partial}} = \frac{16 \cdot \overline{C_n} \cdot \sqrt[4]{N}}{3 \cdot j_{\partial} \cdot a} \quad (1.6)$$

При $a = 1$ мкм, $\Delta U_n = 0.2$ В и $N = 10^4$ задержка логического элемента возрастет на 12 пс за счет влияния емкости разводки. Для БИС, имеющей 10^5 вентилях, задержка возрастет на 36 пс.

Кроме задержки логических элементов, скорость распространения сигналов в схеме зависит и от задержки сигнала в распределенных RC линиях связи. Считаем, что металлические дорожки имеют толщину, равную половине ширины. Для минимального размера - a сечение проводника равно $0.5a^2$. Среднее время задержки сигнала в проводнике, определяемое его распределенными RC параметрами, оценим по формуле

$$t_{RC} = \frac{1}{2} R_{nm} C = \frac{16}{9} C \rho \left(\frac{m}{Fi + F_0} \right)^2 N \quad (1.7)$$

где ρ - удельное сопротивление металла (для алюминиевых тонких проводников $\rho = 4 \cdot 10^{-6}$ Ом·см). В схеме с $N = 10^4$ задержка алюминиевого проводника составляет менее 1 пс, а для БИС, имеющей 10^5 вентилях - 6.4 пс.

Оценим среднюю плотность мощность в рассмотренном массиве логических элементов. Площадь одного логического элемента, определяемая площадью проводников, равна

$$S_{o\partial} = \frac{16}{9} \left(\frac{m}{Fi + F_0} \right)^2 \sqrt{N} a^2 \quad (1.8)$$

Мощность элемента

$$P_{л\partial} = U j_{\partial} a^2, \quad (1.9)$$

где U - напряжение питания схемы.

Средняя плотность мощности в схеме

$$\frac{P_{o\partial}}{S_{o\partial}} = \frac{U_n j_{\partial}}{\frac{16}{9} \left(\frac{m}{Fi + F_0} \right)^2 \sqrt{N}} \quad (1.10)$$

При $U_n = 2$ В и числе вентилях в схеме $N = 10^4$ средняя плотность рассеиваемой мощности не превышает 500 Вт/см², что меньше предельных значений (750 Вт/см²). Увеличение степени интеграции приводит к снижению плотности мощности. Для сложных логических схем ограничение на среднюю плотность мощности не является критическим.

Рассмотренные закономерности конструирования логических ИС показывают, что увеличение степени интеграции приводит к возрастанию влияния проводящих соединений на динамические параметры схемы в целом. Рост числа вентилях препятствует уменьшению размеров полупроводниковых приборов при единой системе топологических ограничений. Оценка минимальных размеров полупроводниковых приборов в сложившейся ситуации зависит от величины допустимых задержек в схеме. Совершенствование системы металлизации путем уменьшения ширины проводников и увеличения числа уровней разводки позволит дополнительно уменьшить токи и размеры логических элементов.

1.3.ОДНОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

Одноэлектронные устройства представляют собой многообещающую перспективу развития интегральных микросхем будущего, так как они обеспечивают ультранизкие потребляемую мощность и рабочие напряжения новых электронных функциональных схем.

С позиций квантовой механики электрон может быть представлен волной, описываемой соответствующей волновой функцией. Распространение этой волны в наноразмерных твердотельных структурах контролируется эффектами, связанными с квантовым ограничением, интерференцией и возможностью туннелирования через потенциальные барьеры. Волна, соответствующая свободному электрону в твердом теле, может беспрепятственно распространяться в любом направлении. Ситуация кардинально меняется, когда электрон попадает в твердотельную структуру, размер которой L , по крайней мере в одном направлении, ограничен и по своей величине сравним с длиной электронной волны. На рис. 1.7 такая ситуация проиллюстрирована на примере квантового шнура, у которого ограничены размеры сечения a и b . В этих направлениях возможно распространение только волн с длиной, кратной геометрическим размерам структуры. Разрешенные значения волнового вектора для одного направления задаются соотношением

$$k = 2\pi/\lambda_n = n\pi/L, \quad (n = 1, 2, 3, \dots), \quad (1.11)$$

где L в соответствии с рис. 1.7 может принимать значения, равные a или b . Для соответствующих им электронов это означает, что они могут иметь только определенные фиксированные значения энергии, то есть имеет место дополнительное квантование энергетических уровней. Это явление получило

название квантового ограничения. Вдоль же шнура могут двигаться электроны с любой энергией.

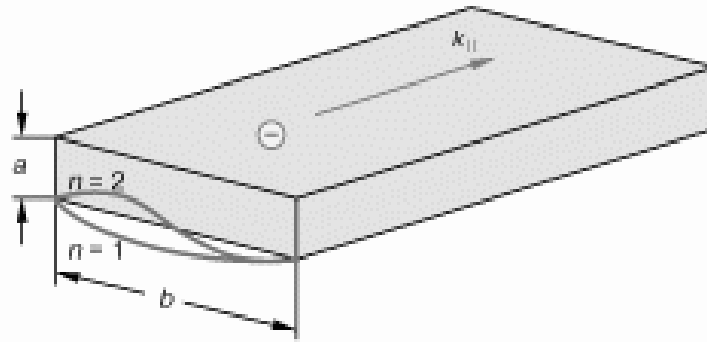


Рис.1.7. Возможности для движения электронов в квантовоограниченной наноразмерной структуре

Запирание электрона с эффективной массой m^* , по крайней мере в одном из направлений, в соответствии с принципом неопределенности приводит к увеличению его импульса на величину \hbar/L . Соответственно увеличивается и кинетическая энергия электрона на величину

$$\Delta E = \hbar^2 k^2 / 2m^* = (\hbar^2 / 2m^*) (\pi^2 / L^2). \quad (1.12)$$

Таким образом, квантовое ограничение сопровождается как увеличением минимальной энергии запертого электрона, так и дополнительным квантованием энергетических уровней, соответствующих его возбужденному состоянию. Это приводит к тому, что электронные свойства наноразмерных структур отличаются от известных объемных свойств материала, из которого они сделаны. Взаимодействие электронных волн в наноразмерных структурах как между собой, так и с неоднородностями в них может сопровождаться интерференцией, аналогичной той, которая наблюдается для световых волн.

Отличительная особенность такой интерференции состоит в том, что благодаря наличию у электронов заряда имеется возможность управлять ими с помощью локального электростатического или электромагнитного поля и таким образом влиять на распространение электронных волн. Квантовое ограничение, проявляясь в наноразмерных структурах, накладывает специфический отпечаток и на туннелирование. Так, квантование энергетических состояний электронов в очень тонких, периодически расположенных потенциальных ямах приводит к тому, что туннелирование через них приобретает резонансный характер, то есть туннельно просочиться через такую структуру могут лишь электроны с определенной энергией.

Другим специфическим проявлением квантового ограничения является одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады. Чтобы объяснить этот термин, рассмотрим иллюстрируемый рис. 1.8 пример прохождения электроном структуры металл-диэлектрик-металл. В качестве наглядной иллюстрации параллельно проводится аналогия с каплей, отрывающейся от края трубки. Первоначально граница раздела между металлом и диэлектриком электрически нейтральна. При приложении к металлическим областям потенциала на этой границе начинает накапливаться заряд. Это продолжается до тех пор, пока его величина не окажется достаточной для отрыва и туннелирования через диэлектрик одного электрона. После акта туннелирования система возвращается в первоначальное состояние. При сохранении внешнего приложенного напряжения все повторяется вновь. Таким образом, перенос заряда в такой структуре осуществляется порциями, равными заряду одного электрона. Процесс же накопления заряда и отрыва электрона от границы металла с диэлектриком определяется балансом сил кулоновского взаимодействия этого электрона с другими подвижными и неподвижными зарядами в металле.

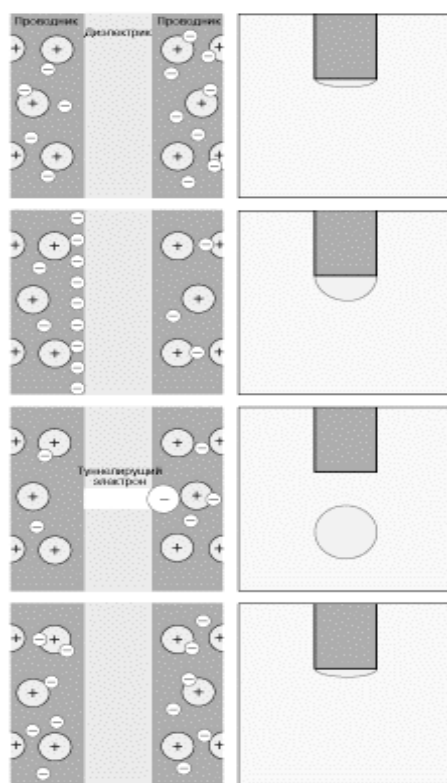


Рис. 1.8. Одноэлектронное туннелирование в условиях кулоновской блокады

Рассмотренные квантовые явления уже используются в разработанных к настоящему времени наноэлектронных элементах для информационных систем. Однако следует подчеркнуть, что ими не исчерпываются все возможности приборного применения квантового поведения электрона.

В транзисторах на квантовых эффектах волновая природа электронов и соответствующие явления становятся основополагающими в их работе. Это достигается в полупроводниковых структурах с размерами, уменьшенными до 10 нм и ниже. Одними из первых появились элементы на резонансном туннелировании. Явление резонансного туннелирования было впервые описано в 1958 году японским исследователем Л. Исаки и детально исследовалось им до 1974 года. Однако всестороннее теоретическое обоснование и экспериментальные транзисторы на резонансном туннелировании появились лишь в начале 90-х годов. Транзисторы на резонансном туннелировании представляют собой двухбарьерный диод на квантовых ямах, у которого потенциал ям и соответствующие резонансные условия контролируются третьим электродом. Эти транзисторы имеют частоты переключения порядка 10^{12} Гц, что в 10 - 20 раз выше, чем у лучших кремниевых транзисторов современных интегральных микросхем. Есть предложения по созданию на таких транзисторах ячеек статической памяти и других элементов для вычислительных систем.

В 1986 году К.К. Лихаревым и Д.В. Авериним, изучавшими одноэлектронное туннелирование, был предложен, а позже и опробован одноэлектронный транзистор на эффекте кулоновской блокады. В его конструкции, состоящей из двух последовательно включенных туннельных переходов (рис.1.9), туннелирование индивидуальных электронов контролируется кулоновской блокадой, управляемой потенциалом, приложенным к активной области транзистора, расположенной в его середине между двумя прослойками тонкого диэлектрика. Количество электронов в этой области прибора должно быть не более 10, а желательно и меньше. Это может быть достигнуто в квантовых структурах с размером порядка 1-10 нм. Такие устройства имеют одну или несколько сверхмалых областей проводимости (островков), имеющих весьма низкую ёмкость (рис. 1.9). Из-за большой результирующей зарядной энергии этой области электрический заряд в ней становится квантованным, а значит, создав определённые условия, можно воспрепятствовать туннелированию электронов в область и из неё. Если частица велика, то туннельный ток идет

при любом напряжении. Если частица мала, то становится важным тот факт, что ток переносится отдельными электронами.

Одноэлектронный транзистор содержит только одну область проводимости, соединённую с истоковым и стоковым электродами туннельными барьерами и имеющую ёмкостную связь с электродом затвора. Периодически изменяя напряжение на затворе такого транзистора, за счёт повторяющегося эффекта кулоновской блокады возможно осуществить модуляцию тока, протекающего через область исток-сток.

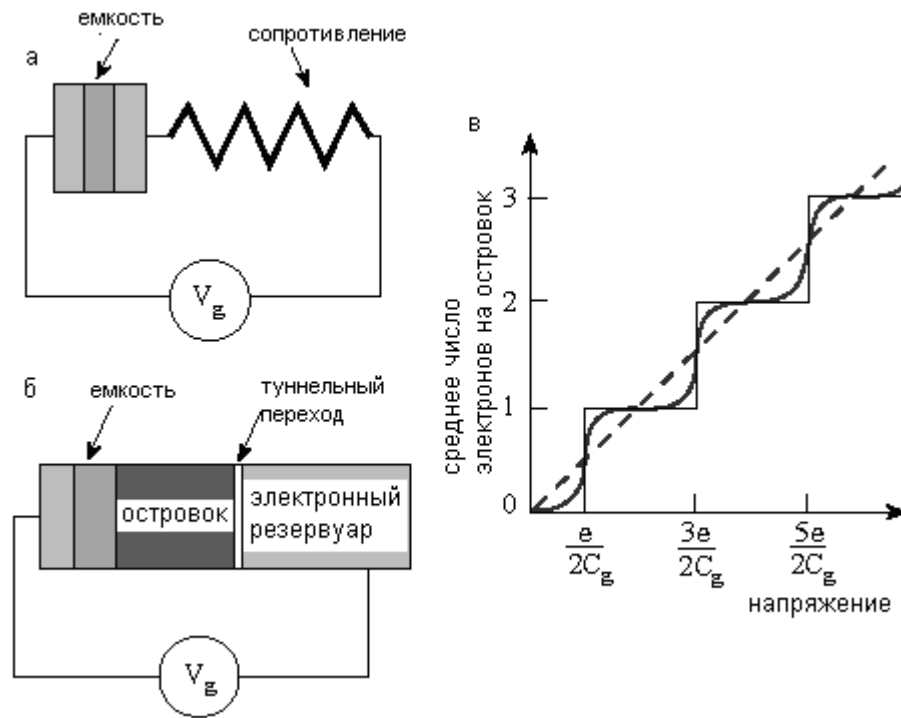


Рис. 1.9. Эквивалентная схемы для классического конденсатора (а) и конденсатора сверхмалой емкости с туннельным переходом (б); (в) зависимость заряда на конденсаторе от напряжения в классическом случае (пунктирная прямая) и в случае реализации эффекта Кулоновской блокады (ступенчатая кривая)

Если островок (ёмкость которого C порядка радиуса r) находится в диэлектрической среде между двумя металлическими контактами, то для переноса одного электрона требуется энергия $W_e = e^2/2C$. В этом случае пороговое поле для переноса одного электрона (и появления тока) будет $V_e = e/2C$, для двух электронов $V_{2e} = e/C$, для трех электронов $V_{3e} = 3e/2C$. Вольт-амперная характеристика будет иметь следующий вид: зона молчания при $V < V_e$ и ступеньки тока при $V \sim V_e$, при $V \sim V_{2e}$ и т. д. (рис. 1.10). Такие эффекты будут наблюдаться при достаточно низких температурах $T_c \ll W_e$,

т. е. для наблюдения кулоновской блокады при комнатной температуре необходимо, чтобы размеры частиц были порядка 1 нм. На нанокластере электроны локализируются и существуют конечное время, достаточное для того, чтобы можно было контролировать их перенос по такой системе третьим электродом.

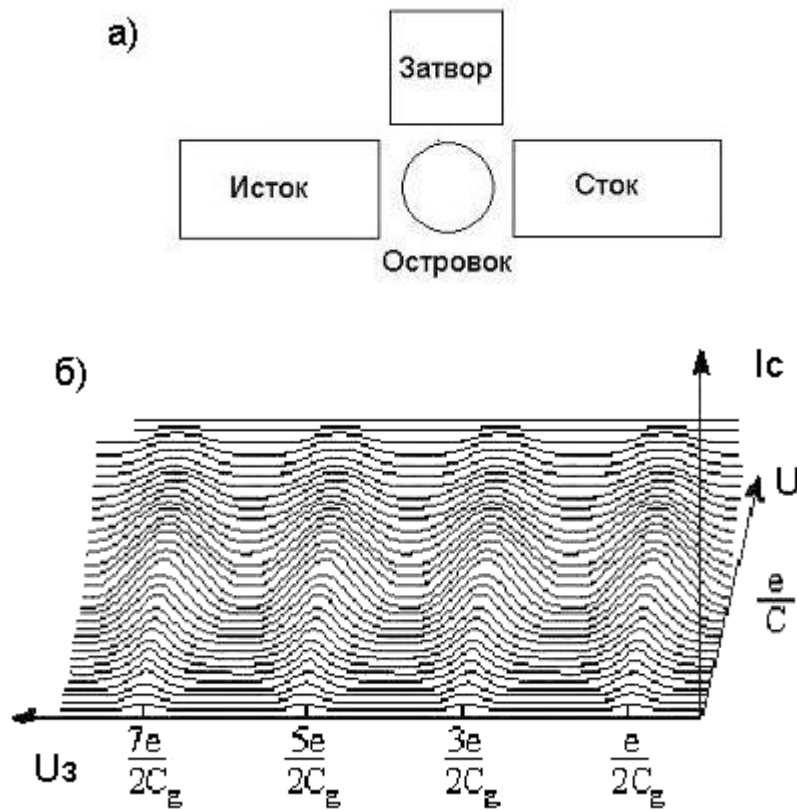


Рис. 1.10. Принципиальная структура (а) и ВАХ одноэлектронного транзистора (б)

Нанокластер — это искусственная молекула, которая настолько мала, что попавший на нее электрон оказывается заперт электрическим полем, энергия которого превышает энергию тепловых движений электрона ($E_c = e^2/C > kT$), а вероятность туннелирования зависит от величины внешнего поля (рис. 1.11).

При подаче напряжения на затвор незаполненные разрешенные энергетические уровни $N + 1$ электрона на изолированном островке смещаются и становится возможным туннельный механизм токопротекания. Таким образом, на основе одноэлектронных приборов возможна реализация принципиально новых логических схем, рассчитанных на управление отдельно взятыми электронами.

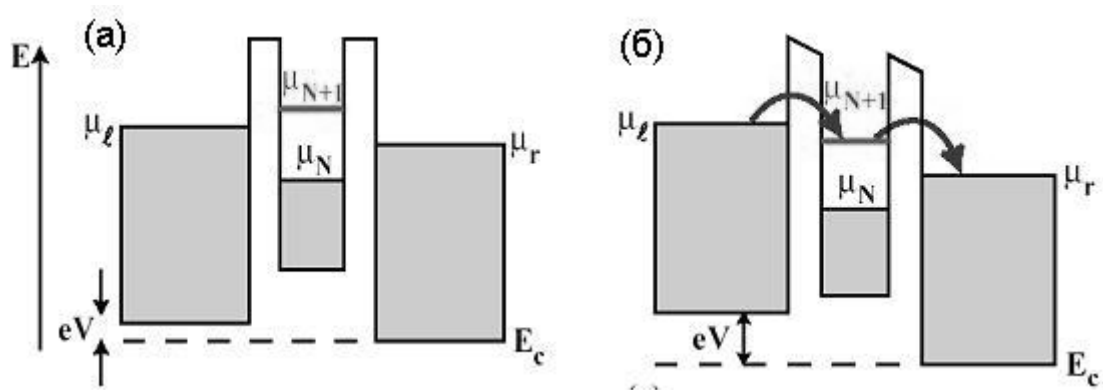


Рис. 1.11. Зонная диаграмма одноэлектронного транзистора (а) и ее изменения при подаче напряжения смещения (б)

Для реализации таких структур можно использовать, например, металлы, полупроводники семейства A^3B^5 и кремний, однако при этом необходимо создавать чрезвычайно маленькие области проводимости с ёмкостью порядка аттофард (10^{-18} Ф), где эффект кулоновской блокады проявляется при комнатной температуре (рис. 1.12). Интеграция областей столь малых размеров значительно затруднена, контроль их топологии и размеров весьма проблематичен. Поэтому весьма перспективными являются приборные реализации одноэлектронных транзисторов, где в качестве затвора используются молекулярные элементы или углеродные наноструктуры (фуллерены, нанотрубки).

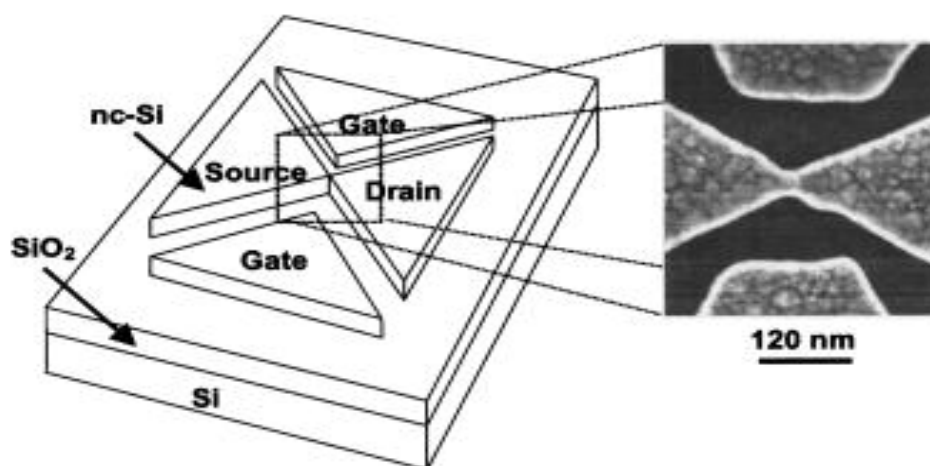


Рис. 1.12. Тонкопленочный SET на основе нанокристаллитов кремния, внедренных в матрицу аморфного кремния. (Tan et al., J. Appl. Phys., 2003)

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЛАНАРНОЙ МИКРОТЕХНОЛОГИИ

2.1. ПОДГОТОВКА ПЛАСТИН И ГЕТТЕРИРОВАНИЕ ПРИМЕСЕЙ.

После выращивания слитка монокристаллического кремния проводят визуальный осмотр и отбраковывают части слитка, имеющие неправильную форму, меньший диаметр, плоскости двойникования. Такие крупные дефекты кристаллической структуры, как двойники, обычно заметны невооруженным взглядом. Части кристалла, содержащие дефекты, также как и части кристалла, имеющие неправильную форму или меньший заданного диаметр, отрезают от слитка. Общие потери кремния на этом этапе могут составить до 50%.

Для выявления и подсчета плотности дислокаций в хвостовой части слитка проводят селективное травление. Используют травитель Сиртла, состоящий из 49% HF и 5 М хромовой кислоты, смешанной в пропорции 1:1. Для выявления микротрещин используют ультразвуковой метод. При этом контролируются постоянство прижима электродов-зондов и температура монокристалла. Измерение времени жизни неосновных носителей используют для определения концентрации примесей тяжелых элементов. Обычная оценка параметров и качества кремниевых кристаллов состоит в измерении удельного сопротивления кристаллов. Удельное сопротивление измеряют на срезе кристалла четырехзондовым методом. Ток I (мА) пропускают между внешними зондами и измеряют падение напряжения V (мВ) между внутренними зондами. Измеренную таким образом величину сопротивления (V/I) переводят в удельное сопротивление. Значения удельного сопротивления кристаллов кремния зависят от метода выращивания и легирующего материала. Затем проводится анализ концентрации кислорода, углерода и примесей тяжелых металлов.

Повышение выхода годных и рабочих параметров полупроводниковых приборов при одновременном увеличении площади кристаллов и уменьшении размеров отдельных элементов требовали поиска возможности повышения качества кремния. Тот кремний, который сегодня используется при производстве СБИС, был получен в результате многолетних исследований в области контроля роста кристаллов. В настоящее время продолжается совершенствование способов контролируемого введения других элементов, например кислорода, а также удаления примесей. Поэтому

проблема защиты от загрязнений на этапе обработки пластин теперь столь же важна, как и на этапе получения исходных материалов.

Для борьбы с примесями используется герметизация процессов, уменьшение температуры обработки, более широкое применение эпитаксиального кремния и многие другие средства. Среди них все большее значение приобретает геттерирование дефектов. Геттерирование на дислокациях и механических напряжениях, искусственно создаваемых на тыльной стороне пластины кремния, было известно еще в 50-е годы. Подвижные дефекты притягиваются к дислокациям кристаллической решетки за счет взаимодействия Коттрела. Дефекты кристаллической структуры на обратной стороне пластины притягивают к себе и связывают точечные дефекты, становящиеся подвижными при повышенных температурах. Таким образом, в процессе обработки на лицевой стороне пластины, где располагаются приборы, в меньшей степени образуются дефекты структуры. Поскольку некоторые точечные дефекты могут становиться зародышами новых дефектов, геттерирование на дефектах обратной стороны пластины должно проводиться перед первым окислением.

Нарушение кристаллической структуры обратной стороны пластины обычно достигается при помощи пескоструйной обработки или шлифовки, при этом был достигнут определенный успех в обеспечении контроля и воспроизводимости процесса. Однако оба способа дают дефекты, которые легко поддаются отжигу и освобождают примеси; кроме того, они сами вносят загрязнения. Для создания «чистых» дефектов обратной стороны можно воспользоваться ионной имплантацией, но и в этом случае дефекты не обладают тепловой стабильностью; к тому же этот метод дорогостоящий. Образование дефектов при помощи лазера легко контролируется и не вносит загрязнений. При определенной плотности потока излучения создаваемые лазером дефекты оказываются более устойчивыми при дальнейшей обработке, чем дефекты структуры пластины, полученные другими способами. Они удерживали примеси даже после восьми тепловых циклов серийного технологического процесса, в то время как лучшие из нелазерных дефектов становились неэффективными уже после трех таких циклов. Хотя для введения геттерирующих дефектов в кристалл кремния использовались различные лазеры, самым удачным оказался лазер на АИГ: Nd с непрерывной накачкой, генерирующий импульсы при модуляции добротности с высокой частотой повторения. Он обеспечивает локальный характер дефектов и необходимую скорость обработки поверхности. На практике луч лазера

сканирует по поверхности, оставляя дорожки из пересекающихся пятен. Импульсы лазера с энергией 0,6 мДж и длительностью 100 нс, фокусируются до размера пятна 60 мкм, в результате образуется дорожка шириной 70 мкм и глубиной 3 мкм. Расстояние между дорожками составляет 0,5 мм, поэтому при частоте повторения 10 кГц лазер обрабатывает пластину диаметром 100 мм менее чем за 30 с. Возникающие в результате такой обработки дефекты состоят из дислокаций двух типов. На периферии лазерного пятна наблюдается высокая концентрация скользящих дислокаций. Они аналогичны дислокациям, возникающим при обычных способах нарушения кристаллической структуры обратной стороны пластины; эти дислокации отжигаются. Однако под поверхностью каждого лазерного пятна образуются микротрещины и связанные с ними ряды закрепленных дислокаций. При тепловой обработке микротрещина отжигается, но закрепленные дислокации оказываются стабильными. Порог образования микротрещин на кремнии с ориентацией (111) составляет приблизительно 15 Дж/см^2 при длительности импульса 100 нс. Мерой концентрации дефектов в кремнии является время жизни неосновных носителей. Результаты измерения этого параметра для различных способов геттерирования в (100)-кремнии представлены в табл. 2.1

Таблица 2.1.

Среднее время жизни неосновных носителей
для различных методов геттерирования

Метод геттерирования	Абразивный	Имплантация ионов Ar ⁺	Ar лазер	Лазер АИГ:Nd
Среднее время жизни неосновных носителей, мкс	1	15	2	21
Отношение среднего времени жизни для геттерированных и контрольных образцов	1,8	16	3	35

Хорошие результаты показывает также метод внутреннего геттерирования. Он основан на способе обработки кремниевых подложек, включающем их многократную циклическую термообработку при высоких (до 1470 К) и пониженных (до 870-900 К) температурах в инертной или окислительной атмосферах. При такой обработке, во-первых, очищается от примесей из-за диффузии к поверхности приповерхностный приборный слой подложки, а во-вторых, в объеме образуется область с повышенной концентрацией дефектов, которая является геттером для примесей и дефектов на всех технологических операциях.

Эта область с нарушениями, называемая "внутренним геттером", возникает вследствие преципитации кислорода и частично углерода с образованием частиц второй фазы (SiO_x и SiC), которые при высоких температурах способны генерировать дислокационные петли, являющиеся стоком для примесей и неравномерных собственных точек дефектов.

Недостаток способа "внутреннего геттерирования" в том, что для формирования структурного нарушенного (геттерирующего) слоя в объеме кристаллов требуется проведение длительных (более 10 ч) термообработок, что сопряжено с большими энергозатратами. Другой недостаток этого способа - низкая воспроизводимость геттерирующих свойств, которые определяются концентрацией и пространственным распределением примесей и дефектов, накапливающихся в кристаллах при выращивании слитков и изготовлении подложек. Неравномерность распределения ростовых дефектов и примесей по слитку приводит к различиям в структуре геттерирующих слоев на пластинах или приборных композициях однотипных партий, т.е. снижению воспроизводимости при групповой технологии изготовления приборов.

Одним из перспективных считается технология геттерирования с помощью слоев пористого кремния, формируемого анодной обработкой на нерабочей стороне кремниевых подложек. Пористый кремний обладает развитой поверхностью и поэтому является емким стоком для фоновых примесей и собственных точечных дефектов. Анодный процесс формирования пористого кремния (чаще всего в водных или спиртовых растворах фтористоводородной кислоты) достаточно хорошо контролируем, может проводиться на материалах с различным типом и величиной проводимости, т.е. позволяет варьировать геттерирующие свойства. Основным недостатком способа в том, что необходимый для активации

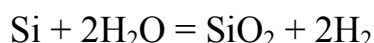
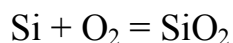
процесса геттерирования отжиг в инертной среде, проводимый при температурах до 1270-1300 К, сопровождается спеканием пористого кремния, т.е. частичным захлопыванием сквозных пор, а это приводит к снижению эффективности геттерирования примесей и дефектов. Другими словами, при использовании этого способа в подложках сохраняется достаточно высокая концентрация нежелательных примесей и дефектов, негативно влияющих на характеристики приборов.

2.2. ТЕРМИЧЕСКОЕ ОКИСЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

Термическое окисление кремния – физико-химический процесс, применение которого необходимо в ходе технологического цикла изготовления интегральных схем на основе кремния. Для создания надежных ИС необходимо формировать высококачественный окисел контролируемым и воспроизводимым способом, что требует понимания закономерностей процесса окисления.

В технологии ИС двуокись кремния SiO_2 используется для многих целей. Она служит в качестве маски при ионной имплантации и диффузии легирующей примеси в кремний, применяется для изоляции элементов ИС друг от друга, для пассивирования поверхности структур, является одним из компонентов структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структур). Из различных методов формирования окисных слоев (осаждение из газовой фазы, плазмохимическое окисление, анодирование в растворах электролитов, термическое окисление) методу термического окисления отдается предпочтение тогда, когда на границе раздела кремний-окисел (Si-SiO_2) необходимо обеспечить низкую плотность локальных поверхностных состояний для электронов.

Химические реакции, описывающие процесс термического окисления кремния в кислороде или парах воды, можно записать в виде



В процессе окисления граница раздела Si-SiO_2 передвигается вглубь от исходной (неокисленной) поверхности кремниевой подложки. Внешняя поверхность пленки SiO_2 также не совпадает с первоначальной поверхностью кремния, т.к. пленка окисла занимает больший объем, чем слой вступившего

в реакцию окисления кремния. Окисление протекает за счет диффузии окисляющих элементов через окисел к границе раздела фаз Si-SiO₂, где и происходит реакция окисления.

Для малых времен окисления толщина окисла определяется постоянной скорости поверхностной реакции K и прямо пропорциональна времени окисления. Для больших времен окисления скорость роста зависит от постоянной диффузии D , а толщина окисла пропорциональна корню квадратному из времени процесса. На скорость окисления влияют также ориентация подложки, присутствие паров воды, наличие натрия, хлора и концентрация легирующей примеси в кремнии. На рис. 2.1 приведена зависимость толщины пленки SiO₂ от времени окисления во влажном кислороде при парциальном давлении паров воды $85 \cdot 10^3$ Па.

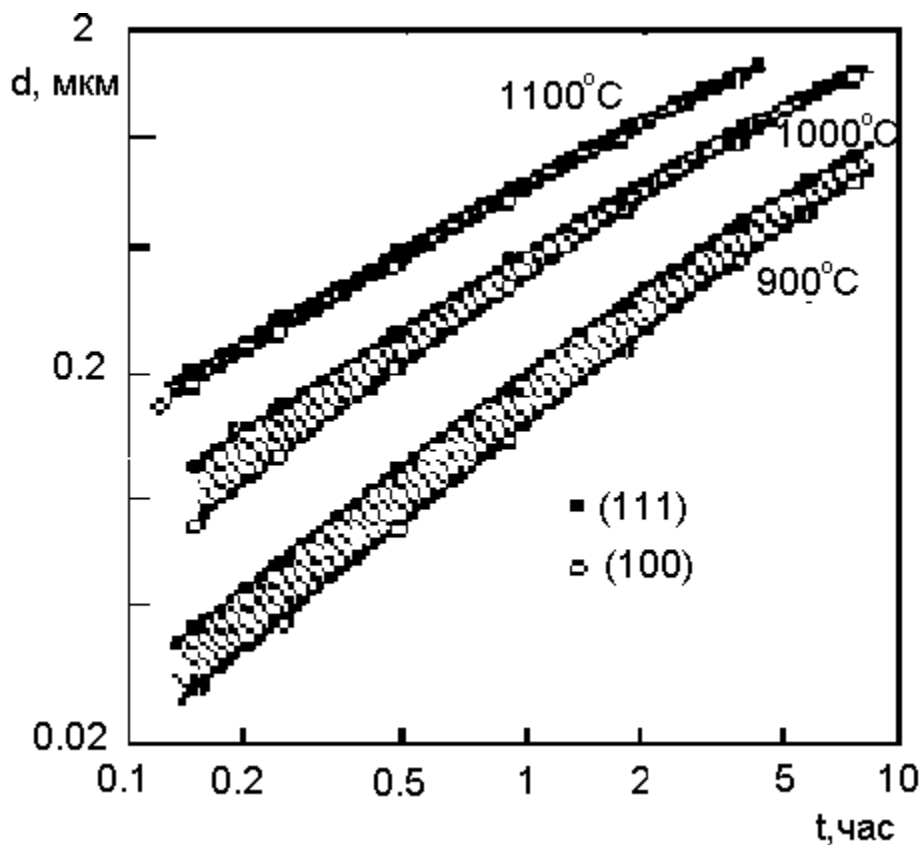


Рис.2.1. Зависимость толщины пленки SiO₂ от времени окисления во влажном кислороде при парциальном давлении паров воды $85 \cdot 10^3$ Па.

Для теоретического обоснования было предложено множество моделей, основанных на объемной диффузии заряженных или нейтральных частиц, а также эффектах туннелирования электронов, кинетике адсорбции,

образования пространственного заряда, изменении граничных концентраций диффундирующих частиц в зависимости от толщины пленки и многих других. К сожалению, ни один из указанных механизмов не способен полностью объяснить обширный класс имеющихся к настоящему времени экспериментальных данных. Что касается получения пленок двуоксида кремния, то кинетику ее роста в достаточно широком диапазоне толщин SiO_2 от 50 до 2000 нм можно объяснить, исходя из достаточно простой модели Дила-Гроува (см. рис. 2.2).

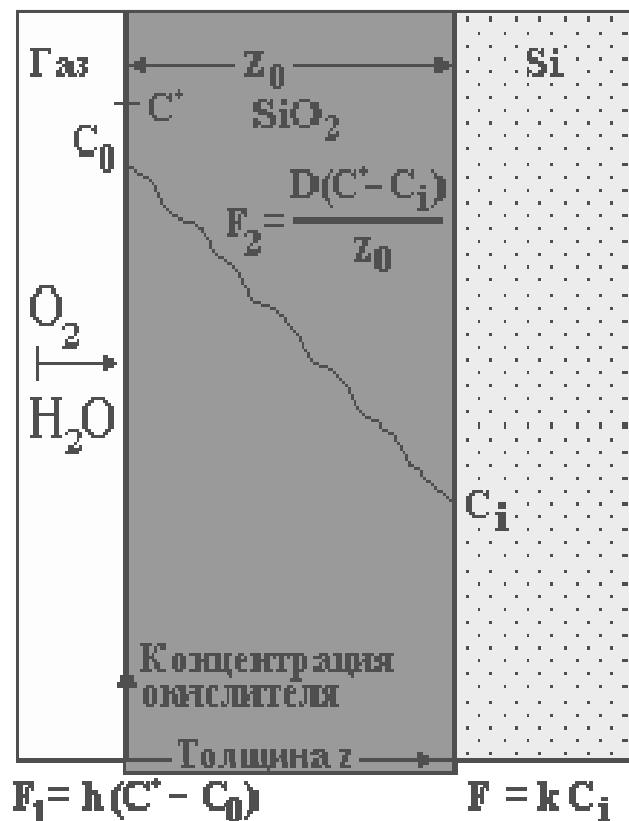


Рис. 2.2. Рост окисла согласно модели Дила-Гроува

Молекулы окислителя диффундируют через сформированные слои окисла и вступают в реакцию с кремнием на его границе. Согласно закону Генри, равновесная концентрация твердой фазы прямо пропорциональна парциальному давлению газа P :

$$C^* = HP, \quad \text{где}$$

C^* - максимальная концентрация окислителя в газе для данного значения давления P , H - постоянный коэффициент Генри.

В неравновесном случае концентрация окислителя на поверхности твердого тела меньше, чем C^* . Поток F_1 определяется разностью между максимальной и реальной поверхностной концентрацией окислителя:

$$F_1 = h(C^* - C_0), \quad \text{где}$$

C_0 - поверхностная концентрация окислителя, h - коэффициент переноса. Значение концентрации окислителя C_0 зависит от температуры, скорости газового потока и растворимости окислителя в SiO_2 . Для того чтобы определить скорость роста окисла, рассмотрим потоки окислителя в объеме окисла F_2 и на его границе с кремнием F_3 . Согласно закону Фика, поток через объем окисла определяется градиентом концентрации окислителя:

$$F_2 = -D(dC/dz) = D(C_0 - C_i)/z_0, \quad (2.1)$$

где C_i - концентрация окислителя в молекулах на кубический сантиметр при $z = z_0$, D - коэффициент диффузии при данной температуре, z_0 - толщина окисла. Величина потока F_3 на границе окисла с полупроводником зависит от постоянной K скорости поверхностной реакции и определяется как:

$$F_3 = kC_i \quad (2.2)$$

При стационарных условиях эти потоки равны, так что $F_3 = F_2 = F_1 = F$. Следовательно, приравняв соотношения (2.1) и (2.2), можно выразить величины C_i и C_0 через C^* :

$$\begin{aligned} C_i &= C^* / \left(1 + \frac{K}{h} + \frac{Kz_0}{D}\right) \\ C_0 &= \left(1 + \frac{Kz_0}{D}\right) C_i \end{aligned} \quad (2.3)$$

Для того чтобы определить скорость роста окисла, представим поток F_3 как изменение числа молекул в слое dz_0 за время dt . Тогда уравнение потока на границе $\text{SiO}_2 - \text{Si}$ будет иметь следующий вид:

$$N_i \frac{dz_0}{dt} = F_3 = \frac{KC^*}{1 + \frac{K}{h} + \frac{Kz_0}{D}} \quad (2.4)$$

Скорость роста окисла определяется потоком F_3 и количеством молекул окислителя N_i , входящих в единичный объем окисла. Поскольку концентрация молекул SiO_2 в окисле равна $2.2 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$, то для получения двуокиси кремния требуется такая же концентрация молекул кислорода или в два раза большая концентрация молекул воды. Соотношение между величинами z_0 и t определяется интегралом вида

$$N_i \int_{z_i}^{z_0} \left(1 + \frac{K}{h} + \frac{Kz_0}{D}\right) dz = KC^* \int_0^t dt \quad (2.5)$$

В результате интегрирования получаем

$$z_0^2 + Az_0 = B(t + \tau) \quad (2.6)$$

$$A \equiv 2D \left(\frac{1}{K} + \frac{1}{h} \right) \approx \frac{2D}{K}$$

(т.к. обычно $h \gg D$), $B \equiv (2DC^*) / N_i$,

$$\tau \equiv (z_i^2 + Az_i) / B,$$

z_i - начальное значение толщины окисла при $t=0$.

Решая уравнение (2.6) для значения толщины окисла z_0 , получаем

$$z_0 = \frac{A}{2} \left[\left(1 + \frac{t + \tau}{A^2 / AB} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2.7)$$

Уравнение (2.7) упрощается и приводится к виду

$$z_0 \approx \frac{B}{A} (t + \tau) \approx \frac{KC^*}{N_i} (t + \tau), \quad t \gg A^2 / 4B \quad (2.8)$$

$$z_0 \approx (Bt)^{1/2} \approx \left(\frac{2DC}{N_i} t \right)^{1/2}, \quad t \gg \frac{A^2}{4B}. \quad (2.9)$$

Простая модель Дила и Гроува отлично описывает экспериментальные данные, за исключением пленок двуокиси кремния толщиной менее 50 нм.

Здесь наблюдаются аномально высокие скорости роста. Совпадение теоретической модели с экспериментом подтверждает правильность использования закона Генри, то есть диффундирующие через окисел частицы представляют собой молекулы - на границе раздела фаз газ-окисел отсутствует.

Существует усовершенствованная модель Дила-Гроува, где объясняются процессы окисления тонких пленок. Физической основой ее является то, что, несмотря на диффундирование реагентов в молекулярном виде, процесс окисления происходит за счет реакции с атомарным кислородом, присутствующем в небольшом количестве. Рассматриваются и другие модели, Модель Дила и Гроува можно считать применимой для температурного диапазона 700-1300°C, парциальных давлений кислорода $(0,2-2) \cdot 10^5$ Па и толщины окисных пленок 50-2000 нм. Уравнение (2.6) представляет собой смешанное линейно-параболическое соотношение. При большом времени окисления ($t \gg A^2/B$) получаем параболический закон

$$z_o^2 = Bt, \quad (2.10)$$

где B – параболическая константа скорости окисления. При очень коротком времени окисления, когда $(t + \tau) \ll A^2/B$, имеем:

$$z_o = \frac{B}{A}(t + \tau) \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) представляет собой линейный закон, где $\frac{B}{A}$ - линейная константа скорости окисления.

Нетрудно показать, что если кремниевую пластину подвергнуть ряду последовательных операций термического окисления по закону (2.10), то для достаточно больших толщин результирующая толщина окисла z_o будет определяться выражением:

$$z_o^2 = d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots, \quad (2.12)$$

где $d_1, d_2, d_3 \dots$ - значения толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине.

Окисление в сухом и влажном кислороде. Зависимость скорости окисления от технологических параметров.

Схематично вид установки для термического окисления показан на рис. 2.3. Для проведения процесса термического окисления кремниевые пластины устанавливают вертикально в кварцевую лодочку, которую затем помещают в кварцевую трубу, находящуюся внутри трубчатой печи. Через трубу пропускают инертный газ-носитель с добавкой окисляющего реагента – кислорода или паров воды – и нагревают пластины кремния до необходимой температуры (обычно 900-1200°C).

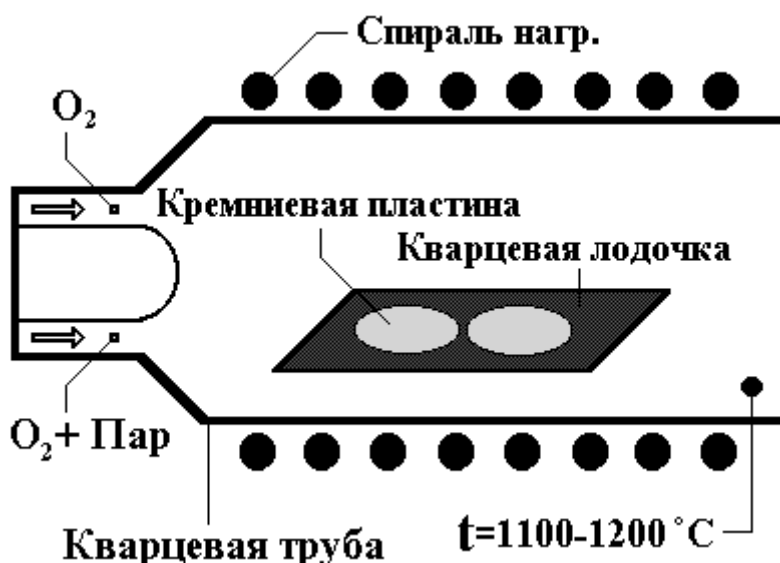


Рис. 2.3. Схема технологической установки окисления

Скорость окисления во «влажном» кислороде (с добавлением паров H_2O) существенно выше, чем в «сухом». Для получения влажного кислорода применяется барботажный метод. Газ-носитель (обычно это инертный газ аргон) пропускают через водяной барботер, вода в котором нагрета до $T = 95^\circ\text{C}$. Такая температура соответствует давлению водяных паров $\sim 85 \cdot 10^3 \text{ Па}$. Сухой и очищенный от примесей кислород пропускают через водяную баню, где он насыщается горячими водяными парами, и затем подают его в рабочую камеру. Содержание влаги в потоке кислорода определяется температурой водяной бани и скоростью потока кислорода. Так как скорость образования оксидного слоя в парах воды значительно выше, чем в сухом кислороде, то скорость процесса окисления кремния зависит от содержания влаги в потоке кислорода. Основным достоинством данного метода является то, что он позволяет

легко изменять концентрацию паров воды в потоке кислорода и варьировать скорость окисления от значения, соответствующего 100%-ному содержанию кислорода, до значения, соответствующего 100%-ному содержанию паров воды.

Получение влажного кислорода может также проводиться пироженным способом, при котором образование паров воды проводится при сжигании H_2 в атмосфере кислорода. Пироженный метод гарантирует получение паров воды высокой чистоты.

Сравнение модели, предложенной Дилом и Гроувом, с экспериментальными данными показывает хорошее совпадение для окисления как во влажном так и в сухом кислороде. Указанная модель не применима для описания начальной стадии окисления (для $t \ll \tau$). Для сухого окисления Si подложки p-типа ориентацией (111) при температурах $T = 800-1200^\circ C$ значения A , B , B/A , τ показаны в табл.2.2

Таблица 2.2.

Значения констант линейного и параболического роста для сухого O_2

$T, ^\circ C$	A , мкм	B , мкм ² /час	B/A , мкм/час	τ , час
1200	0,040	0,045	1,12	0,027
1100	0,090	0,027	0,30	0,076
100	0,165	0,0017	0,071	0,37
920	0,235	0,0049	0,021	1,4
800	0,370	0,0011	0,003	9,0

Для окисления во влажном кислороде при нормальном давлении водяных паров ($85 \cdot 10^3$ Па) значения соответствующих параметров приведены в табл.2.3.

Если необходимо иметь низкие скорости процесса окисления, то вместо кислорода можно использовать поток аргона или азота (температура водяной бани должна быть комнатной). Энергия активации реакции окисления во влажном кислороде уменьшается с увеличением концентрации паров воды. Энергии активаций лежат в диапазоне от 1,3 эВ, что соответствует процессу окисления в сухом

кислороде, до 0,8 эВ, что соответствует процессу окисления в атмосфере водяного пара.

Таблица 2.3.

Значения констант линейного и параболического роста для окисления во влажном кислороде ($85 \cdot 10^3$ Па)

$T, ^\circ\text{C}$	$A,$ мкм	$B,$ мкм ² /ч	$B/A,$ мкм/ч	$\tau, \text{ч}$
1200	0,050	0,720	14,40	0
1100	0,110	0,510	4,64	0
100	0,226	0,267	1,27	0
920	0,500	0,203	0,406	0

В производстве полупроводниковых приборов и интегральных микросхем широкое применение нашли двух- и трехступенчатый способы термического окисления кремния. Эти способы основаны на последовательном использовании в качестве окислителей сухого кислорода, влажного кислорода или водяного пара и снова сухого кислорода.

Такой технологический процесс образования защитной диэлектрической пленки оксида кремния вызван тем, что оксид, выращенный в атмосфере сухого кислорода, имеет более совершенную структуру пленки, но малую скорость ее роста, а выращенный в атмосфере влажного кислорода и паров воды имеет менее совершенную структуру, но более высокую скорость роста. Поэтому первая стадия многоступенчатого способа окисления направлена на получение тонкой пленки оксида кремния с совершенной структурой (окисление в сухом кислороде), вторая стадия (во влажном кислороде) — применяется для убыстрения процесса окисления и наращивания достаточной по толщине пленки оксида, а третья стадия (в сухом кислороде) — вновь для получения совершенной структуры оксида на поверхности кремния.

Предельная толщина термически выращенной пленки не превышает $1 \div 1,5$ мкм. Для практических целей планарной технологии толщина оксидных защитных пленок должна составлять $0,2 \div 0,8$ мкм. Это продиктовано тем, что при использовании пленок толщиной более 0,8

мкм клин травления при проведении процесса фотолитографии возрастает и ограничивает возможность получения микроизображения требуемого размера. При использовании пленок толщиной менее 0,2 мкм увеличивается вероятность появления в ней сквозных отверстий и пор, которые при диффузии приводят к локальному проникновению диффузанта в подложку.

Повышение давления окислителя приводит к увеличению скорости роста окисла за счет увеличения параболической константы скорости V с ростом концентрации окислителя в окисле C^* . Преимуществом окисления при повышенном давлении окислителя является возможность понижения температуры окисления при сохранении приемлемого времени технологического процесса. При этом уменьшается перераспределение предварительно введенной примеси, продольная диффузия, что имеет особое значение при малых размерах формулируемых элементов ИС.

Как пирогенные, так и барботажные системы могут обеспечить проведение процессов окисления во влажном кислороде при давлении водяных паров до $2 \cdot 10^6$ Па. На рис.2.4 показана зависимость параболической константы скорости роста окисла V от температуры при различных давлениях водяного пара. Константа скорости пропорциональна давлению, и при температуре ниже 900°C энергия активации имеет другое значение.

Основные легирующие элементы III и V групп, когда они присутствуют в кремнии с высокой концентрацией, могут влиять на скорость процесса окисления. На границе раздела растущего SiO_2 и Si происходит перераспределение этих легирующих примесей. Если легирующая примесь сегрегируется в окисле кремния и остается там (как в случае легирования бором), химические связи в окисле ослабляются, что приводит к увеличению коэффициента диффузии через окисел. В результате скорость окисления увеличивается. В случае легирования фосфором концентрационная зависимость наблюдается только при низких температурах, где важную роль играет реакция на поверхности. Такая зависимость является результатом сегрегации фосфора в кремнии.

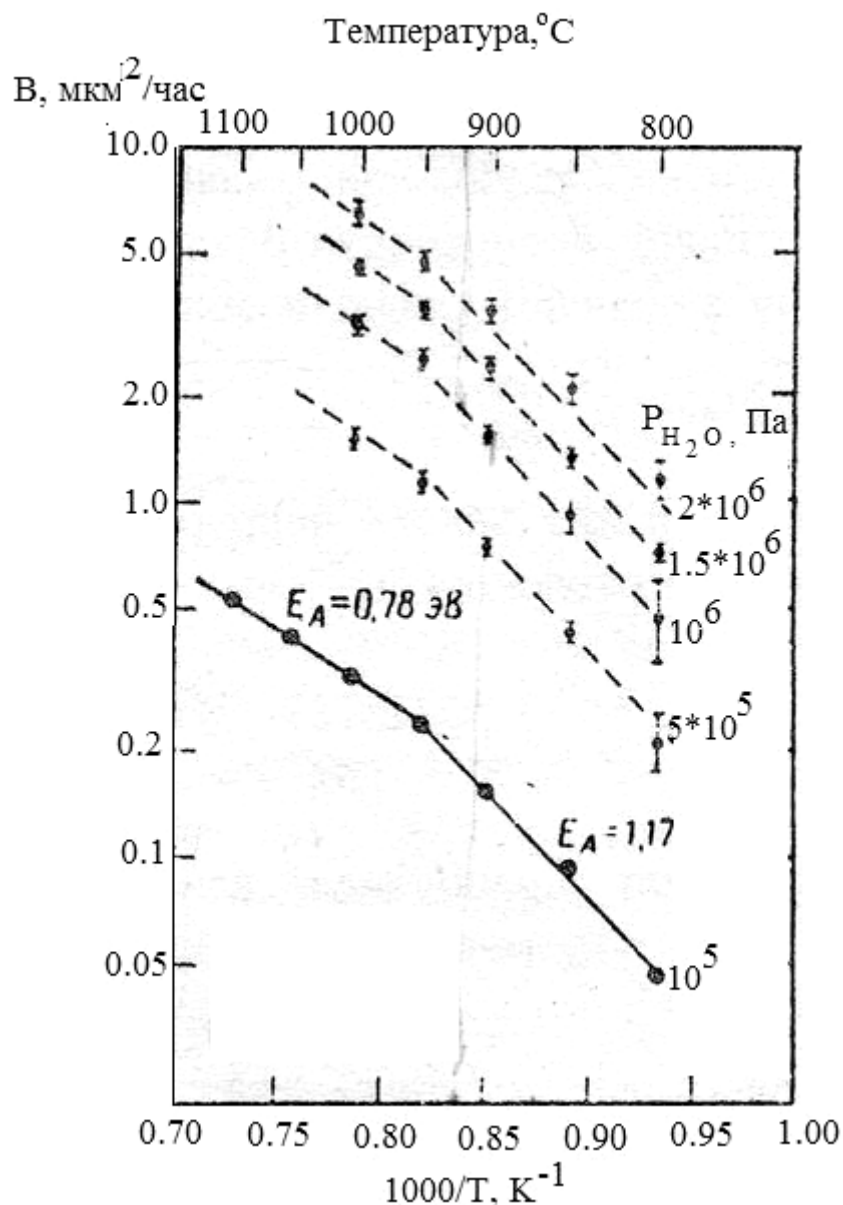


Рис.2.4. Зависимость параболической константы скорости роста окисла V от температуры при различных давлениях водяного пара.

На рис.2.5 показана зависимость констант скорости окисления в сухом кислороде от уровня легирования фосфором. Константа V слабо зависит от концентрации легирующей примеси в подложке, поскольку отражает протекание реакции в диффузионной области. Существенное увеличение линейной константы V/A происходит при высоком уровне легирования фосфором ($>1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$), так как лимитирующей стадией процесса окисления.

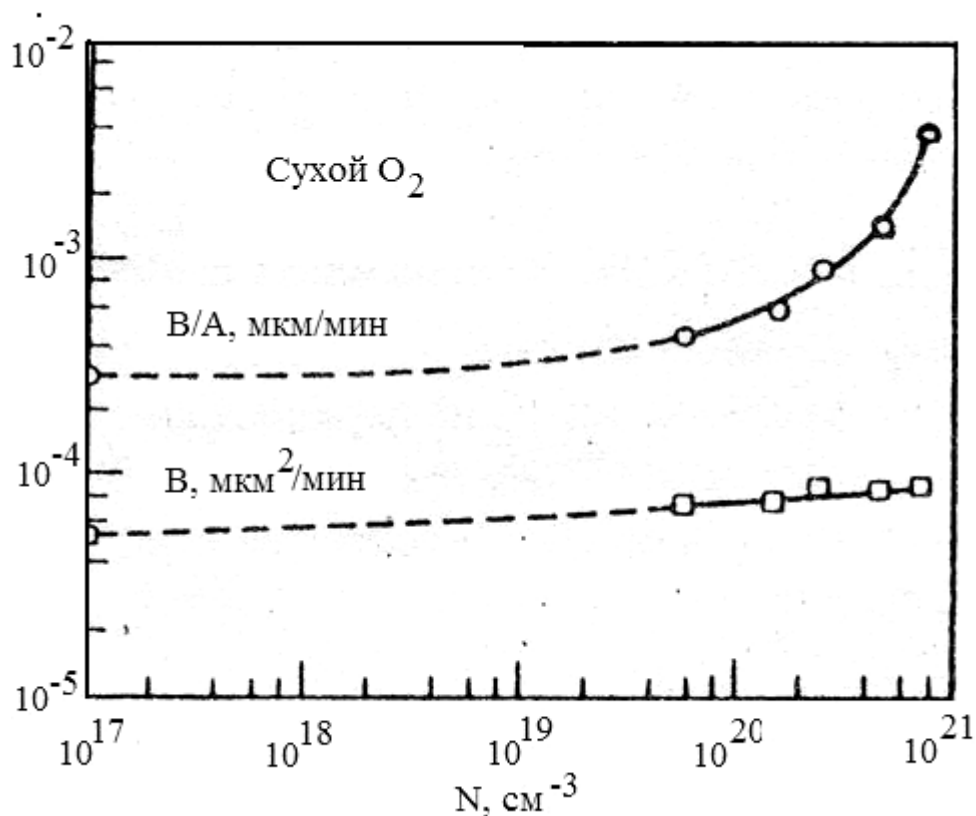


Рис.2.5. Зависимость констант скорости окисления Si в сухом кислороде от уровня легирования фосфором.

Кристаллографическая ориентация кремния определяет ориентационную зависимость скорости окисления, что проявляется в зависимости линейной константы скорости роста. При этом параболическая константа V не зависит от ориентации, так как определяется диффузионной стадией реакции. Из эксперимента константы скорости роста для Si с ориентацией поверхности по плоскости (111) в 1,68 раз выше, чем по плоскости (100).

В последние годы большой интерес уделяется разработке технологических процессов роста тонких окислов, кинетика которых не описывается зависимостью Дила-Гроува. Это обусловлено необходимостью создания элементов СБИС и УБИС с высокой степенью интеграции и, соответственно, малым размером элементов. Для контролируемого и воспроизводимого получения тонких и сверхтонких пленок необходимо обеспечить медленный рост. Для этого необходимо уменьшение температур окисления и давления окислителя. Выращивание сверхтонких пленок требует особого контроля степени чистоты используемых газов и очистки поверхности. По мере повышения степени интеграции ИС становится

необходимым получение пленок подзатворного диэлектрика с хорошо контролируруемыми параметрами толщиной 5-50 нм. В ряде случаев необходимо иметь качественные пленки SiO₂ толщиной 5 - 100 нм под маскирующими слоями нитрида кремния для предотвращения появления дефектов в кремниевой подложке, обусловленных наличием механических напряжений.

Обычно для получения воспроизводимых по свойствам пленок в реакторах атмосферного давления подбирают соответствующие температурно-временные условия (рис.2.6).

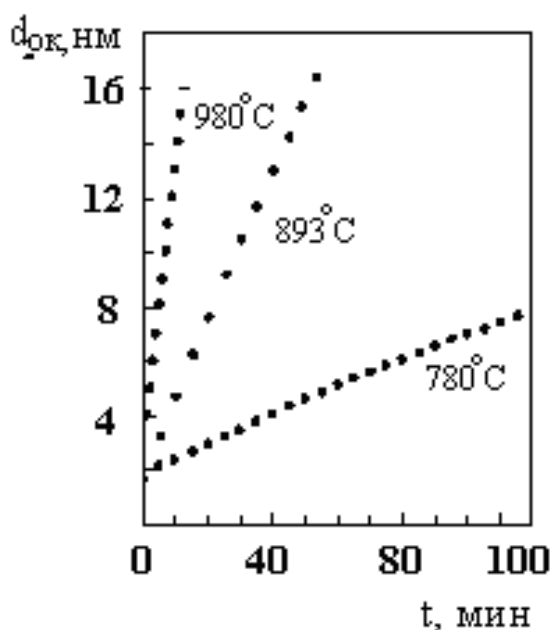


Рис. 2.6. Зависимость толщины окисла от времени окисления для малых толщин окисла

Значительным достижением в совершенствовании технологии окисления кремния явилось добавление в окислительную среду в процессе окисления хлорсодержащих компонентов. Это привело к улучшению стабильности порогового напряжения полевых МДП транзисторов, увеличению напряжения пробоя диэлектриков и повышению скорости окисления кремния. Главная роль хлора в пленках двуокиси кремния (обычно с концентрацией хлора 10^{16} - 10^{20} см⁻³) заключается в превращении случайно проникших в SiO₂ примесных ионов Na или K в электрически неактивные. Однако необходимо учитывать, что для пассивирования ионов натрия хлором, вводимым в пленку в процессе окисления, требуются достаточно высокие температуры окисления. Плотность окисла и концентрация дефектов

в кремнии также определяются температурой. Часто применяется двухстадийный процесс сухого окисления кремния, состоящий из окисления с добавлением HCl при средних температурах (около 1000°C), с последующей термообработкой в атмосфере O₂, N₂ и HCl при температуре 1150°C.

Для получения высокооднородных тонких пленок SiO₂ с воспроизводимыми свойствами используют также реакторы пониженного давления (РПД реакторы). Окисление, проводимое в РПД, позволяет синтезировать тонкие слои SiO₂ с точностью до нескольких ангстрем. Температура окисления $T = 900 - 1000$ °C, давление $P = 30 - 300$ Па. Окислы гомогенны, аналогичны окислам, полученным в реакторах атмосферного давления, напряженность электрического пробоя пленок $E = 10 - 13$ МВ/см. Толщина синтезируемых в РПД пленок составляет 2 - 14 нм. Кроме того разрабатываются процессы нетермического окисления в низкотемпературной газоразрядной плазме кислорода. Сверхтонкие пленки (толщиной < 5 нм) формируют после обработки в горячей азотной кислоте путем кипячения в воде или выдержки на воздухе при комнатной температуре.

Основными контролируемыми параметрами пленок являются: коэффициент преломления, химический состав пленки, пористость, плотность, скорость травления, напряженность поля пробоя. Значения некоторых типичных характеристик термических пленок SiO₂ приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4.

Характеристики пленок термически окисленного кремния

Параметр	Значение параметра
Плотность, г/см ³	2,2
Показатель преломления	1,46
Диэлектрическая постоянная	3,82
Ширина запрещенной зоны, эВ	8,9
Удельное сопротивление постоянному току при T = 25 °C, Ом·см	10 ¹⁴ -10 ¹⁶
Коэффициент теплового расширения, C ⁻¹	5·10 ⁻⁷

2.3. ДИФФУЗИЯ

Диффузия в кристаллах - это процесс последовательного перемещения атомов примеси в кристаллической решетке, обусловленной тепловым движением при наличии градиента концентрации собственных или примесных атомов. В зависимости от механизма перемещения атомов на диффузию оказывают влияние дефекты кристалла. Изготовление транзисторов и интегральных схем основано на введении в кремний (элемент IV группы периодической системы) элементов III и V групп с целью создания областей *p*- и *n*- типа проводимости. Процесс легирования осуществляется методами термической диффузии и ионной имплантации. Для изготовления *p-n* перехода используется диффузия примесных атомов, которые вводятся в кристаллическую решетку вещества для изменения его электрофизических свойств. Для рассмотрения процесса диффузии используется феноменологический или микроскопический подходы.

Методом диффузии обычно проводятся формирование базовых и эмиттерных областей и резисторов в биполярной технологии, создание областей истока и стока в МОП технологии, легирование поликристаллического кремния. Технологически процессы диффузии проводятся различными способами: диффузия из химического источника в парообразной форме при высоких температурах; диффузия из легированных окислов; диффузия из ионно-имплантированных слоев с последующим отжигом (проводится для активирования имплантации атомов и уменьшения числа дефектов); двухстадийная диффузия.

Изучение диффузии ведется в направлении создания на основе экспериментальных данных точных моделей, способных предсказывать протекание процесса диффузии путем теоретического анализа. Конечная цель этого анализа - определение электрических характеристик полупроводниковых приборов на основе параметров технологического процесса расчетным путем. Диффузионные модели развивались с позиций двух основных приближений:

- 1) теории сплошных сред с использованием уравнений диффузии Фика. Модель, исходя из диффузионного уравнения Фика и соответственно коэффициента диффузии, определяется экспериментально путем измерения поверхностной концентрации.

- 2) атомистической теории, которая принимает во внимание взаимодействие между точечными дефектами (вакансиями и междоузлиями) с одной стороны и примесными атомами с другой.

К основным механизмам диффузии относят: вакансионный, прямое перемещение по междоузлиям, эстафетный (непрямое перемещение по междоузлиям), краудинный, диссоциативный.

Анализ экспериментальных данных показывает, что бор и фосфор в кремнии диффундируют по вакансионному механизму, элементы 1 и 7 группы - по междоузельному (рис. 2.7). Вакансионный - это такой механизм, когда мигрирующий атом (примесный или собственный) мигрирует на место вакансии, освобождая свое место в узле кристаллической решетки. Междоузельный механизм сопровождается переходом мигрирующего атома (как правило, примесного) из одного положения в другое, без его локализации в узлах кристаллической решетки.

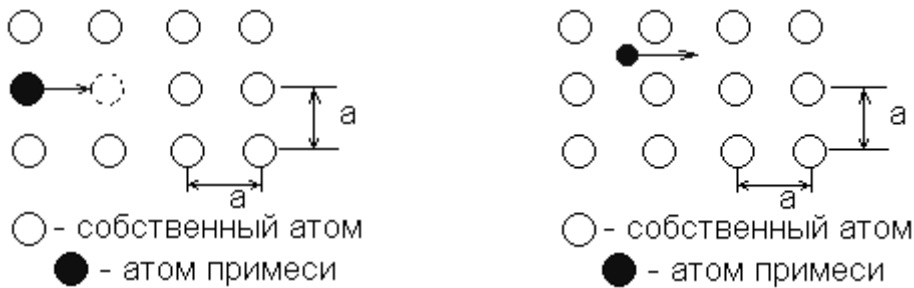


Рис.2.7. Вакансионный и междоузельный механизмы диффузии.

Феноменологическая теория диффузии.

При перемещении примеси в твердом теле из области с высокой концентрацией $N(x)$ в область с низкой концентрацией диффузионный поток примеси через единицу поверхности $J(x)$ прямо пропорционален градиенту концентрации примеси (первый закон Фика):

$$J(x) = -D \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (2.13)$$

где D - коэффициент диффузии. Из закона непрерывности следует, что изменение $N(x)$ во времени равно отрицательному приращению потока J :

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial t} = - \frac{\partial J(x,t)}{\partial x}. \quad (2.14)$$

Если D не зависит от x (это справедливо для не слишком больших концентраций примеси), то подставляя выражение для потока (2.13) в (2.14), получаем:

$$\frac{\partial N(x,t)}{\partial x} = D \frac{\partial^2 N(x,t)}{\partial x^2}. \quad (2.15)$$

Данная формула является математическим выражением второго закона Фика для нестационарной диффузии.

Практически при создании полупроводниковых ИС представляют интерес два случая диффузии: из бесконечного (неограниченного) и конечного (ограниченного) источника примеси.

Диффузия из бесконечного источника

Случай диффузии из бесконечного источника реализуется, когда количество примеси, уходящей из приповерхностного слоя полупроводника в его объем, равно количеству примеси, поступающей в приповерхностный слой из источника легирующей примеси.

Начальные и граничные условия в этом случае записываются так:

$$\begin{aligned} N(x,0) &= 0 \text{ при } x > 0, t = 0; \\ N(0,t) &= N_s \text{ при } x = 0, t \geq 0; \\ N(\infty,t) &= 0 \text{ при } x \Rightarrow \infty, t \geq 0, \end{aligned}$$

где $x = 0$ – координата поверхности, через которую происходит диффузия;

t – время диффузии; N_s – поверхностная концентрация примеси, поддерживаемая постоянной в процессе диффузии. При этих условиях решение уравнения (2.15) имеет вид:

$$N(x,t) = N_s \operatorname{erfc} \left[\frac{x}{2} (Dt)^{-1/2} \right], \quad (2.16)$$

где $\operatorname{erfc}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-y^2) dy$ – дополнение к функции ошибок.

Значение функции $\operatorname{erfc}(z)$ приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5.

Значения функции $erfc(z)$

z	$erfc(z)$	z	$erfc(z)$
0 .0	1.00000	2.6	2.36×10^{-4}
0 .1	0.88754	2.7	1.343×10^{-4}
0 .2	0.77730	2.8	7.5×10^{-5}
0 .3	0.67135	2.9	4.11×10^{-5}
0 .4	0.57161	3.0	2.21×10^{-5}
0 .5	0.47950	3.1	1.16×10^{-5}
0 .6	0.39614	3.2	6.02×10^{-6}
0 .7	0.32220	3.3	3.05×10^{-6}
0 .8	0.25790	3.4	1.52×10^{-6}
0 .9	0.20309	3.5	7.43×10^{-7}
1 .0	0.15730	3.6	3.55×10^{-7}
1 .1	0.11979	3.7	1.67×10^{-7}
1 .2	0.08969	3.8	7.68×10^{-8}
1 .3	0.06599	3.9	3.48×10^{-8}
1 .4	0.04771	4.0	1.54×10^{-8}
1	0.03389	4.1	6.7×10^{-9}

.5			
1	0.02365	4.2	2.86×10^{-9}
.6			
1	0.01621	4.3	1.19×10^{-9}
.7			
1	0.01091	4.4	4.89×10^{-10}
.8			
1	0.00721	4.5	1.96×10^{-10}
.9			
2	4.678×10^{-3}	4.6	7.74×10^{-11}
.0			
2	2.971×10^{-3}	4.7	2.99×10^{-11}
.1			
2	1.863×10^{-3}	4.8	1.13×10^{-11}
.2			
2	1.143×10^{-3}	4.9	4.21×10^{-12}
.3			
2	6.89×10^{-4}	5.0	1.53×10^{-12}
.4			
2	4.07×10^{-4}	—	—
.5			

На рис. 2.8 показан вид функции $N(x)$ для $t_1, t_2 > t_1, t_3 > t_2$. Значение x , при котором концентрация диффундирующей примеси равна концентрации примеси противоположного типа проводимости, содержащейся в подложке, называется глубиной p - n - перехода x_j . Для этой точки $N(x_j) = N_a(x)$ или $N(x_j) = N_d(x)$.



Рис. 2.8. Зависимость концентрации легирующей примеси от расстояния от поверхности в случае легирования из бесконечного источника.

Случай диффузии из неограниченного источника на практике чаще всего реализуется при диффузии из газового источника или примесно-силикатных стекол. При этом поверхностная концентрация обычно поддерживается на максимальном уровне, равном предельной растворимости соответствующей примеси в кремнии при температуре диффузии. Предельная растворимость примесей бора и фосфора в кремнии при различных температурах приведена в табл. 2.6, а максимальная в табл. 2.7

Таблица 2.6.

Предельная растворимость примесей в Si

T, K	1173	1273	1373	1473	1573
$N_{\text{пред}}(\text{бор}), \text{см}^{-3}$	$1 \cdot 10^{20}$	$1,5 \cdot 10^{20}$	$2 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{20}$	$4 \cdot 10^{20}$
$N_{\text{пред}}(\text{фосфор}), \text{см}^{-3}$	$7 \cdot 10^{20}$	$1 \cdot 10^{21}$	$1,2 \cdot 10^{21}$	$1,2 \cdot 10^{21}$	$1 \cdot 10^{21}$

Таблица 2.7.

Элемент	Максимальная растворимость, см ⁻³	Температура максимальной растворимости, °С
Алюминий	2·10 ¹⁹	1150
Бор	4·10 ²⁰	1200
Висмут	8·10 ¹⁷	1300
Галлий	4·10 ¹⁹	1250
Индий	10 ¹⁹	1300
Мышьяк	2·10 ²¹	1150
Сурьма	8·10 ¹⁹	1300
Фосфор	1,3·10 ²¹	1150

Диффузия из ограниченного источника

При диффузии из конечного (ограниченного) источника предполагается, что в начальный момент времени диффундирующие атомы примеси (Q – количество атомов на единицу поверхности) находятся в бесконечно тонком приповерхностном слое, и количество их не меняется во время всего процесса диффузии. В таком случае говорят, что на поверхности имеется существенно планарный источник легирующей примеси. Эта ситуация реализуется, если в тонкий приповерхностный слой введено некоторое количество примеси методом ионной имплантации или диффузией из неограниченного источника.

Тогда начальные условия $N(x, 0) = 0$,

граничные условия $\int_0^{\infty} N(x, t) dx = Q, \quad \left. \frac{dN(x, t)}{dx} \right|_{x=0} = 0$

и решение уравнения (2.15) принимает вид распределения Гаусса:

$$N(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right) \quad (2.17)$$

Поверхностная концентрация примеси при этом равна

$$N_s = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \quad (2.18)$$

и уменьшается в процессе диффузии (рис 2.9).

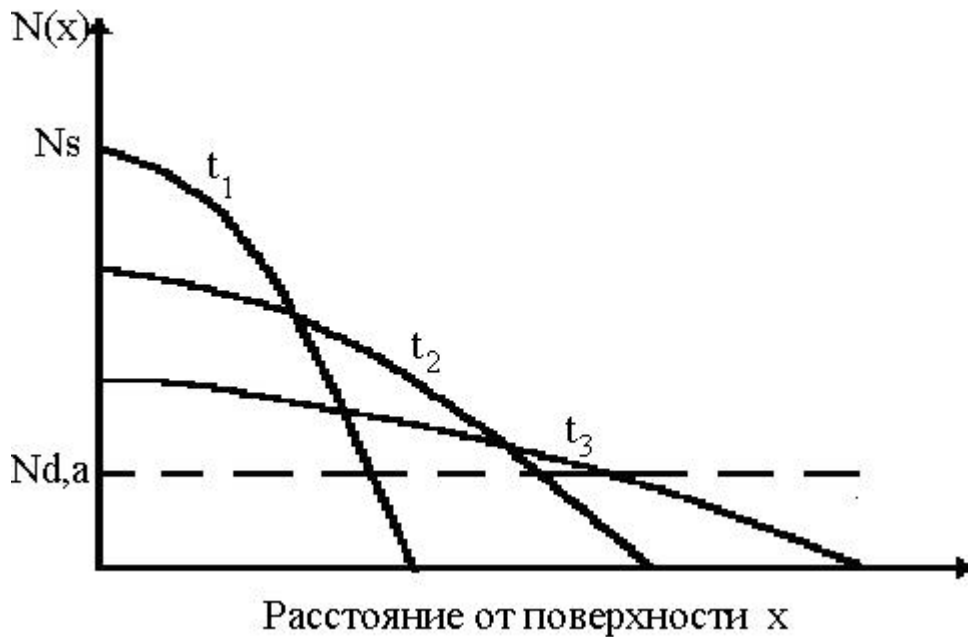


Рис.2.9. Зависимость концентрации легирующей примеси от расстояния от поверхности в случае легирования из ограниченного источника.

Двухстадийная диффузия.

Двухстадийная диффузия часто используется, например, для получения базовых областей биполярных транзисторов. Первая стадия – загонка примеси состоит в проведении процесса диффузии из бесконечного источника при низкой температуре в течение короткого времени. Загонка определенного количества примеси в приповерхностный слой может осуществляться также методом ионной имплантации. На второй стадии поступление примеси из внешнего источника прекращается и введенную ранее примесь перераспределяют путем проведения процесса в окислительной атмосфере.

Если загонка примеси осуществлена методом ионной имплантации, то величина Q равна дозе введенной примеси Φ [ион/см²]. Если загонка примеси осуществлена диффузией из неограниченного источника, то величину Q можно найти, пользуясь первым диффузионным законом Фика (2.13).

Поток диффундирующих атомов через единицу поверхности на стадии загонки равен

$$J(t) = -D_1 \frac{dN}{dx} \Big|_{x=0} = N_{s1} \sqrt{\frac{D_1}{\pi t}}, \quad (2.19)$$

где D_1 = коэффициент диффузии атомов примеси на стадии загонки (зависит от температуры процесса загонки); N_{s_1} - поверхностная концентрация атомов примеси на стадии загонки. Поскольку

$$Q = \int_0^{t_1} J(t) dt = 2N_{s_1} \sqrt{D_1 t_1 / \pi}, \quad (2.20)$$

где t_1 - длительность загонки, то закон распределения атомов легирующей примеси после двухстадийного диффузионного процесса имеет вид

$$N(x, t) = (2 N_{s_1} / \pi) \sqrt{\frac{D_1 t_1}{D_2 t_2}} \exp\left(-\frac{x^2}{4 D_2 t_2}\right), \quad (2.21)$$

где t_2 - продолжительность второй стадии - разгонки. Полученное выражение хорошо описывает примесный профиль, если толщина диффузионного слоя после разгонки намного превышает соответствующую толщину после стадии загонки, т.е. для больших значений длительности разгонки t_2 .

Температурная зависимость коэффициента диффузии.

Экспериментальные данные по температурной зависимости коэффициента диффузии для ряда легирующих примесей в Si в широком температурном диапазоне могут быть выражены формулой

$$D = D_0 \exp(-E_a / k_0 T), \quad (2.22)$$

где D_0 - частотный фактор; E_a - энергия активации; k_0 - постоянная Больцмана; T - температура, К. В случае диффузии примесных атомов по вакансиям энергия активации лежит в интервале 3-5 эВ. Это справедливо для большинства примесей замещения в Si, таких как фосфор, бор, мышьяк, сурьма. При перемещении примесных атомов по междоузлиям энергия активации составляет 0,6-1,2 эВ. Таким образом, если измерять температурную зависимость D , можно определить механизм диффузии.

Таблица 2.8.

Коэффициенты диффузии и энергии активации

для некоторых примесей в кремнии.

Акцепторы			Доноры		
Элемент	$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	$E_a, \text{эВ}$	Элемент	$D_0, \text{см}^2/\text{с}$	$E_a, \text{эВ}$
Бор	5,1	3,7	Фосфор	3,85	3,66
Алюминий	1,385	3,39	Мышьяк	24	4,08
Индий	0,785	3,63	Сурьма	12,9	3,98
Галлий	0,374	3,41	Висмут	1,08	3,85

На рис. 2.10 показано формирование областей базы и эмиттера биполярного транзистора, полученного диффузионными методами (базовая область – двухстадийной диффузией, эмиттерная область – диффузией из бесконечного источника) и указаны возможные значения глубин слоев с разным типом проводимости.

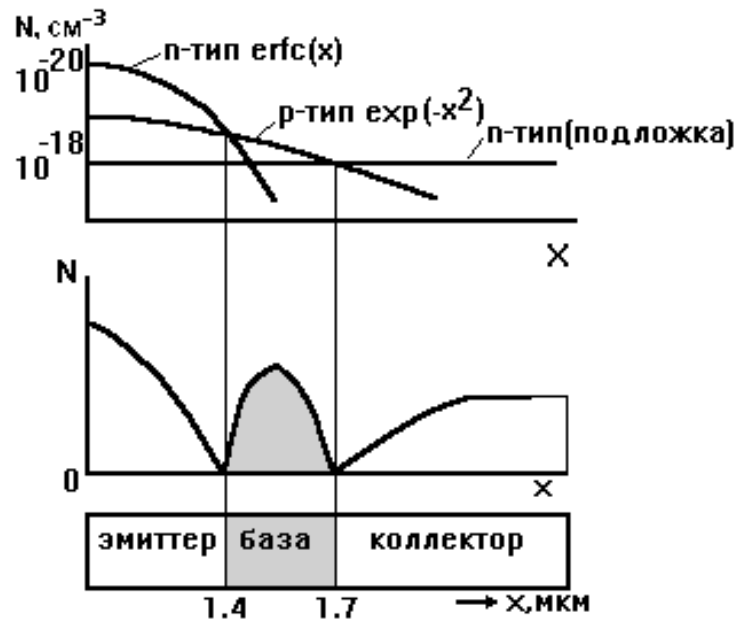


Рис. 2.10. Распределение концентрации примеси по глубине при формировании структуры биполярного транзистора.

2.4. ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ.

Технология ионной имплантации позволяет с высокой точностью управлять количеством легирующей примеси, характеризуется универсальностью и гибкостью процесса, возможностью легирования через слой SiO_2 , низкими температурами, что позволяет получать мелкие p - n -переходы. При ионной имплантации заряженные частицы ионного пучка внедряются в твердое тело, изменяя его свойства. При внедрении в решетку твердого тела ионы теряют свою энергию, как вследствие неупругих, так и упругих столкновений. Неупругими столкновениями считаются такие, в результате которых часть энергии иона теряется на возбуждение или ионизацию атома мишени (взаимодействие с электронами решетки). Энергия при упругих столкновениях передается ядрам атомов мишени. Кроме того, вклад в энергетические потери дает обмен зарядами между ионом и атомом мишени.

Если энергия, преданная атому при упругом столкновении, превышает энергию связи атомов в твердом теле, то атом покидает узел. В результате образуется дефект по Френкелю – пара вакансия+междоузельный атом. Атомы, находящиеся в поверхностном слое, получив энергию иона, могут отрываться от кристалла – происходит процесс распыления и образуется вакансия – дефект Шоттки. Энергия первично смещенного атома, называемого атомом отдачи, сравнительно велика, поэтому на пути своего движения атом отдачи образует целый ряд каскад смещений, вследствие чего в кристалле возникают отдельные разупорядоченные зоны размером 3-10 нм. По мере имплантации ионов идет накопление радиационных дефектов. Когда плотность ионов, внедренных на единице поверхности, превосходит критическую величину, называемую дозой аморфизации, образуется сплошной аморфный слой.

Внедренный ион может попасть в вакантный узел, став донором или акцептором, но вероятность замещения узлов мала. Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях, где они не являются электрически активными. Для перевода их в узлы и восстановления кристаллической структуры полупроводника производят отжиг. В процессе отжига происходит распад и аннигиляция радиационных дефектов, а внедренные примеси занимают вакантные узлы, в результате чего образуется слой p - или n - типа проводимости.

Распределение внедренных ионов

В упрощенной классической модели ЛШШ (Линхарда-Шарфа-Шиотта) для изотропной или аморфной полубесконечной мишени принимается, что рассеяние ионов в мишени носит случайный характер, а распределение их пробегов описывается функцией Гаусса.

Полный пробег иона с начальной энергией E_0 описывается формулой

$$R = \int_0^{E_0} \frac{dE}{S_n + S_e}, \quad (2.23)$$

где S_n – поперечное сечение ядерного торможения (ядерная тормозная способность);

S_e – поперечное сечение электронного торможения (электронная тормозная способность).

С достаточно хорошим приближением сечение ядерного торможения описывается выражением

$$S_n = 0,278 \frac{Z_1 Z_2}{\sqrt{Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3}}} \cdot \frac{M_1}{M_1 + M_2} \cdot N = \frac{1}{2k}, \quad (2.24)$$

где Z – заряд ядра;

M – атомная масса, индексы 1 и 2 относятся соответственно к иону и атому мишени;

N – собственная концентрация атомов вещества;

k – коэффициент ядерной замедляющей способности. Как видно из формулы (2.24), замедляющая способность вещества не зависит от энергии. Поперечное сечение электронного торможения в соответствии с моделью ЛШШ

$$S_e = 3,28 \cdot 10^{-3} \frac{Z_1 + Z_2}{\sqrt{M_1}} \cdot N \sqrt{E} = k1 \sqrt{E}, \quad (2.25)$$

где $k1$ – коэффициент электронной замедляющей способности.

При вычислении длины пробега иона принято предполагать, что потери энергии на ядерные и электронные взаимодействия не связаны друг с другом. Тогда выражение (2.23) может быть проинтегрировано, в результате чего получаем:

$$R = 2 \frac{\sqrt{E}}{k1} - \frac{1}{k \cdot k1^2} \ln(1 + 2k \cdot k1 \sqrt{E}) \quad (2.26)$$

Траектория внедряемого атома до полной остановки представляет собой ломаную линию. Полное расстояние, на которое он проникает в кристалл, называется полным пробегом. Полный пробег R характеризуется

продольным распределением ΔR . С точки зрения практического использования важное значение имеет не полный пробег, а проекция пробега (проективный пробег) R_p , т. е. пробег в направлении первоначальной траектории движения иона. Проекция пробега R_p характеризуется продольным распределением ΔR_p и поперечным распределением ΔR_T относительно полного пробега. Между полным пробегом R и проекцией пробега R_p существует приближенное соотношение:

$$R_p = \frac{R}{1 + \frac{1}{3\mu}}, \quad (2.27)$$

где $\mu = M_1/M_2$.

Среднее квадратическое отклонение пробега (дисперсия)

$$\frac{\Delta R_p^2}{R_p^2} \approx \frac{\Delta R^2}{R^2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2}. \quad (2.28)$$

Интервал $R_p \pm 3\Delta R_p$ включает 99,7% внедренных ионов. Необходимые для расчета сведения по проективному пробегу и его дисперсии в зависимости от энергии ионов для некоторых элементов в кремнии приведены в таблице 2.9.

Доза облучения D (мкКл/см²)

$$D = enQ = jt, \quad (2.29)$$

где e – единичный заряд, $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл;

n – кратность заряда иона;

Q – поверхностная плотность внедренных ионов, $1/\text{см}^2$;

j – плотность ионного тока в мкА/см²;

t – длительность облучения, с.

На практике распространено измерение плотности ионного тока.

Распределение концентрации примеси в полупроводнике с исходной концентрацией C_B

$$C_x = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right] \pm C_B. \quad (2.30)$$

Глубина залегания металлургического p - n перехода при условии полной активации примеси определяется инверсией типа проводимости, т.е. равенством $C_x = 0$

$$x_j = R_p \pm \Delta R_p \sqrt{2 \ln \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \Delta R_p C_B}}. \quad (2.31)$$

При извлечении корня следует учитывать оба знака. Поскольку максимум распределения залегает в объеме полупроводника, то возможно одновременное образование двух *p-n* переходов, разделенных базовым слоем.

Таблица 2.9.

Средний проективный пробег и дисперсия проективного пробега легирующих элементов в кремнии, нм

Элемент		Энергия ионов E , кэВ									
		20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
B	R_p	78,4	161	243,8	323,8	397,7	468,8	537,4	603	665,4	725,3
	ΔR_p	32,1	53,8	70,8	83,9	93,9	102,5	109,8	116	121,3	125,9
P	R_p	26	49	73,2	98	123,3	149,1	175,2	201,4	227,7	253,8
	ΔR_p	9,4	16,4	23,1	29,5	35,4	41,1	46,6	51,8	56,6	61
As	R_p	15,9	27,1	37,7	48,1	58,4	68,6	78,9	89,1	99,5	110,1
	ΔR_p	3,7	6,2	8,4	10,5	12,5	14,5	16,3	18,2	20	21,9
Sb	R_p	14	22,9	30,8	38,4	45,7	52,8	59,9	66,9	73,9	80,9
	ΔR_p	2,4	3,8	5,1	6,3	7,4	8,4	9,5	10,5	11,5	12,5

Согласно теории ЛШШ, описанием профиля внедренной примеси, является симметричная гауссиана. Однако уже ранние экспериментальные исследования показали, что данное описание существенно не адекватно экспериментально снятым профилям для большинства ионов, как в кремнии, так и в других полупроводниках. Было найдено, что профили большинства внедренных ионов асимметричны в аморфных и кристаллических мишенях, причем асимметрию можно отразить введением третьего центрального момента распределения σ_2 к двум прежним σ_1 , R_p (рисунок 2.11 а, б).

Большинство экспериментальных данных по распределениям ионов фосфора, мышьяка, сурьмы хорошо аппроксимируется теоретическими расчетами с использованием третьего центрального момента в распределении типа «сдвоенная гауссиана» – гауссианы с различными дисперсиями на левом и правом плечах распределения (рисунок 2.11, б).

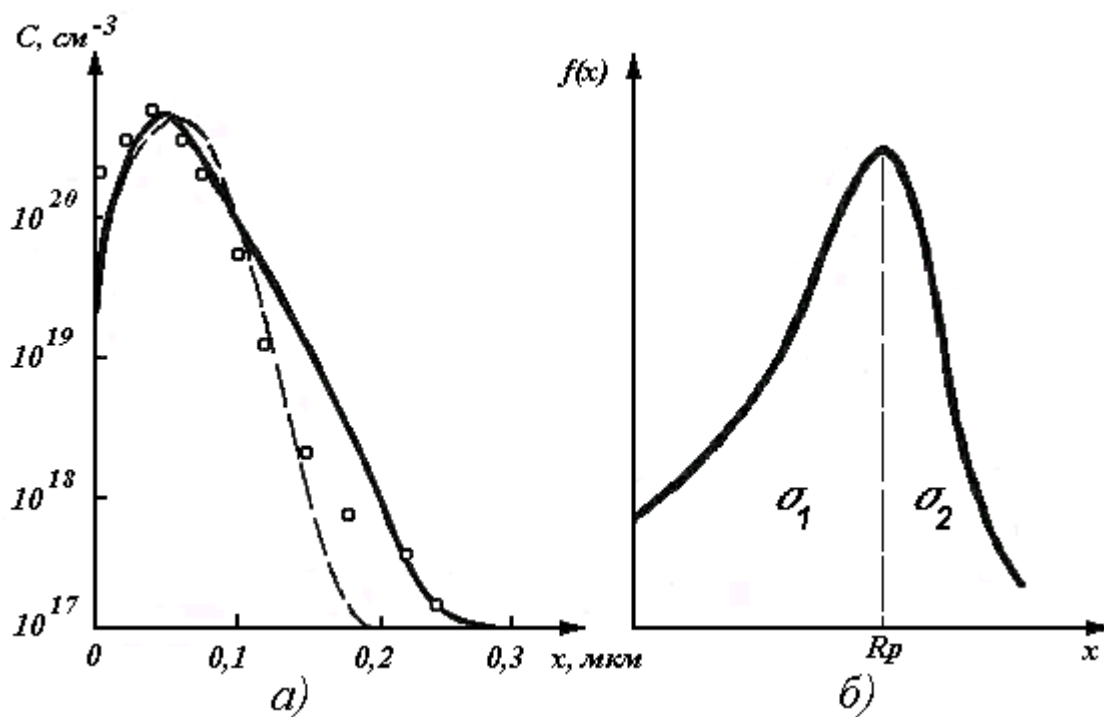


Рис.2.11 Модели ионного легирования мышьяком с энергией 150 кэВ, дозой $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ через SiO_2 толщиной 50 нм (а); распределение типа «сдвоенная гауссиана» (б); о - эксперимент; — распределение PEARSON; - - - - распределение Гаусса

Если после процесса ионной имплантации проводят отжиг радиационных дефектов или иную высокотемпературную операцию (например, окисление, разгонку), то гауссово распределение «размывается» из-за диффузии внедренной примеси. Если предположить, что коэффициент диффузии является постоянным (не зависит от концентрации дефектов), то решение диффузионного уравнения в этом случае также описывается функцией Гаусса

$$N(x, t) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\Delta R_p^2 + 2Dt}} \exp \left[-\frac{(x - R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2Dt)} \right] \quad (2.32)$$

Маскирование при ионном легировании

Маскирующие покрытия применяют при имплантации ионов только на определенных участках поверхности пластины кремния. При имплантации ионов сравнительно низких энергий (меньше 100 кэВ) в качестве маскирующих материалов выбирают SiO_2 , Si_3N_4 , фоторезист. Относительная (по сравнению с кремнием) тормозная способность этих материалов (ξ) при

имплантации бора и фосфора составляет соответственно 1,25; 1,62; 0,75. При высоких энергиях ионов в качестве маскирующих покрытий можно использовать тонкие пленки тяжелых металлов – Au, Pt, W, Ti. Относительная тормозная способность этих материалов при имплантации ионов бора и фосфора с энергией 1000 кэВ лежит в пределах от 2 до 4. Толщина маскирующего покрытия выбирается таким образом, чтобы концентрация имплантированной примеси в закрытом маской кремнии не превышала 0,1% максимальной концентрации. При данной энергии ионов эта толщина составляет

$$d_m = (R_p + 3,7 \Delta R_p) / \xi \quad (2.33)$$

Боковым отклонением имплантируемых ионов обычно пренебрегают, поскольку оно значительно меньше их пробегов. Однако для СБИС с субмикронными размерами элементов боковое отклонение становится очень важным, поскольку двумерные эффекты вблизи края маски сильно влияют на выходные характеристики приборов. Как и разброс пробегов, боковое отклонение является результатом рассеяния ионов, и поэтому оба эти эффекта одинаковы по порядку величины. Существенной становится и геометрия края маски, которая вносит свой вклад в распределение примеси.

Задача теоретического описания одномерного распределения примеси после имплантации решена, получены экспериментальные подтверждения адекватности этого описания. Для двумерного распределения концентрации имплантируемой примеси надежные экспериментальные методы отсутствуют. Самый простой метод описания двумерного распределения примеси заключается в использовании гауссовой формы профиля распределения. Рассмотрим имплантацию примеси через окно в маске шириной $2a$. Геометрия окна и система координат для моделирования показаны на рисунке 2.12. Считаем, что маска имеет вертикальный край и абсолютно непрозрачна для падающих ионов. В силу симметрии будем строить модель только для половины окна в сторону положительной координаты x . Длину маски примем бесконечной, поэтому распределение примеси будем считать двумерным в координатах x - y .

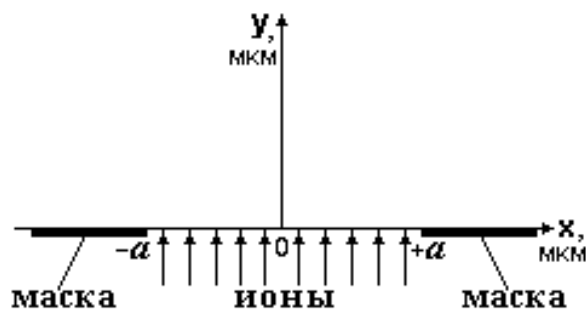


Рис. 2.12. Геометрия окна и система координат для моделирования

Распределение примеси в случае гауссовой формы профиля распределение концентрации ионов описывается выражением

$$C(x, y) = \frac{N}{\sqrt{2\pi} \cdot Rp} \exp\left(-\frac{(y - Rp)^2}{2\Delta Rp^2}\right) \cdot \left(\operatorname{erf} \frac{x + a}{\sqrt{2} \cdot \Delta Rx} - \operatorname{erf} \frac{x - a}{\sqrt{2} \cdot \Delta Rx}\right), \quad (2.34)$$

где y – координата в глубь образца в направлении падения ионного пучка, нм; x – координата в направлении поверхности образца.

В случае когда край маски имеет произвольную форму, расчет двумерного распределения примеси можно производить по формуле

$$C(x, y) = \frac{N}{2\pi \cdot \Delta Rp \cdot \Delta Rx} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(y - \xi)^2}{2\Delta Rp^2} - \frac{(y - d(\xi) - Rp)^2}{2\Delta Rx}\right) \right] \cdot d\xi, \quad (2.35)$$

где $d(\xi)$ – толщина маски.

2.5. ЭПИТАКСИЯ

Эпитаксия - процесс выращивания тонких монокристаллических слоев на монокристаллических подложках, наследующих кристаллическую структуру подложку. Существует 2 вида эпитаксии: - гомоэпитаксия (автоэпитаксия) и гетероэпитаксия. Процесс называют гомоэпитаксиальным, если материал слоя и подложки идентичен, например, кремний выращивают на кремнии. Процесс называют гетероэпитаксиальным, если материал слоя и подложки отличается (например, твердый раствор $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}$ выращивается на GaAs или Si на сапфире Al_2O_3).

Эпитаксиальное наращивание широко применяется в технологии производства ИС, поскольку в выращиваемом тонком эпитаксиальном слое

концентрацию примесей и их распределение можно варьировать в широком диапазоне; возможно также получение слаболегированного эпитаксиального слоя с противоположным типом проводимости по отношению к подложке, что невозможно сделать методами легирования. При этом получаемый эпитаксиальный слой содержит меньше дефектов, связанных с примесью кислорода и углерода по сравнению с подложкой, и, кроме того, эпитаксиальный слой может быть локально нанесен на определенном участке поверхности подложки.

Причиной появления эпитаксиальной технологии послужила необходимость совершенствования процесса изготовления биполярных транзисторов. Эти приборы обычно формируются в объеме полупроводниковой подложки с большим удельным сопротивлением ρ , определяющим высокое напряжение пробоя база - коллектор $U_{бк}$. С другой стороны, высокие значения ρ приводят к увеличению рассеиваемой в полупроводниковой подложке мощности и уменьшению коэффициента усиления транзистора на высоких частотах. С целью разрешения этого противоречия была разработана технология получения высокоомных полупроводниковых слоев на низкоомной подложке. Однако в последнее время эпитаксиальные технологии широко применяются и в МОП-технологии, способствуя улучшению параметров ИС.

При соответствующих условиях осаждения атомы кремния, двигаясь по нагретой поверхности, занимают положения, соответствующие кристаллической структуре подложки. Иными словами эпитаксиальное наращивание состоит в образовании центров кристаллизации и последовательном формировании двумерной решетки из островков, растущих вдоль поверхности. Процесс эпитаксиального наращивания на поверхности пластины (рис. 2.13) происходит в следующей последовательности:

- массопередача вступающих в реакцию молекул посредством диффузии из турбулентного потока через граничный слой к поверхности кремния;
- адсорбция молекул поверхностью;
- процесс реакции на поверхности;
- десорбция продуктов реакции;
- массопередача молекул продуктов реакции посредством диффузии через граничный слой к основному потоку газа;
- упорядочение адсорбированных атомов кремния в решетке.

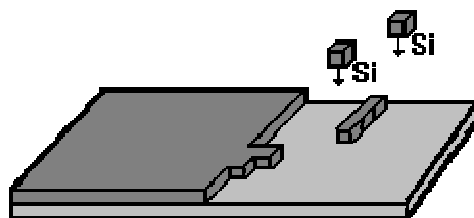


Рис. 2.13. Механизм формирования эпитаксиального слоя кремния на подложке.

Результирующая скорость роста пленки определяется самым медленным процессом в приведенной выше последовательности. Энергия активации процесса равна приблизительно 5 эВ и соответствует энергии активации самодиффузии кремния. Попытка увеличения скорости роста пленки выше оптимального значения, зависящего от температуры, приводит к росту поликристаллической пленки (уменьшается время поверхностной миграции и происходит встраивание кремния в произвольные, а не только кристаллографически благоприятные места).

Выделяют прямые и непрямые механизмы эпитаксиального роста. Непрямое наращивание происходит, когда атомы кремния образуются за счет разложения кремниевых соединений на поверхности нагретой подложки (газофазная эпитаксия). Прямое наращивание происходит, когда атомы кремния непосредственно попадают на поверхность подложки и осаждаются на ней, как это имеет место при молекулярно-лучевой эпитаксии.

Эпитаксиальное выращивание кремния из парогазовой фазы обычно проводят в кварцевом реакторе. Для выращивания эпитаксиального кремния используется один из четырех кремнесодержащих реагентов (тетрахлорид кремния - SiCl_4 , трихлорсилан - SiHCl_3 , дихлорсилан - SiH_2Cl_2 и силан - SiH_4) и водород. Используют химические реакции типа восстановления SiCl_4 или пиролиза (термического разложения).

Пьедестал (подложкодержатель) служит для установки подложек и их нагрева во время процесса. Выращивание кремния проводится в потоке парогазовой смеси при высоких температурах (см. рис. 2.14).

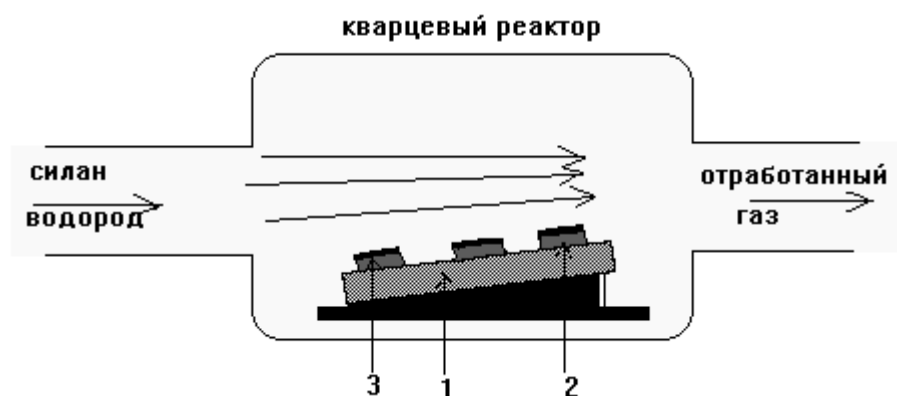


Рис. 2.14. Схема реактора для эпитаксии из парогазовой смеси.
1- держатель; 2- кремниевая пластина; 3- пленка.

Газ разлагается на поверхности пластины и на нее осаждаются атомы кремния. Разложение кремнесодержащих компонент происходит пиролизически, т.е. только за счет тепла. Скорость роста пленки пропорциональна парциальному давлению силана. Формирование эпитаксиальных пленок осуществляется при ламинарном течении газа по трубе, т. е. когда число Рейнольдса меньше $Re_{крит} = 2000$. Число Рейнольдса - безразмерный параметр, описывающий характер течения газа в реакторе:

$$Re = \frac{D_r \rho v}{\mu},$$

Где ρ - плотность газа, μ - вязкость, D_r - диаметр реакторной трубы, v - скорость течения газа.

Если D_r составляет несколько сантиметров, v - несколько десятков сантиметров в секунду, то $Re < 2000$, что обуславливает ламинарное течение газа в реакторе. В этом случае около стенок реактора формируется пограничный слой с уменьшенной скоростью течения газа. Толщина слоя

$$y = \left(\frac{D_r x}{Re} \right)^{1/2},$$

где x - расстояние вдоль оси реактора.

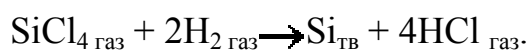
По мере продвижения слоя вдоль реактора его толщина увеличивается вплоть до полного смыкания. Причина полного смыкания пограничного слоя не всегда небольшая длина реактора. Через пограничный слой исходные реагенты переносятся из газового потока к поверхности, а продукты реакции

диффундируют от поверхности подложки и удаляются основным потоком газа. При конструировании реактора в первую очередь должно быть учтено влияние величины u на процессы массопереноса.

Поскольку величина u , определяющая поток реагентов к поверхности, обратно пропорциональна скорости потока газа, то для достижения однородности скорости роста эпитаксиальной пленки по длине реактора при заданной температуре необходимо подбирать оптимальное значение толщины пограничного слоя, согласованное с изменением температуры и концентрации реагентов. Этого можно достичь, например, путем изменения потока газа в реакторе (т.е. числа Re). Изменяя число Рейнольдса, можно варьировать скорости потока газов и скорость роста пленки одновременно. Например, для трубы диаметром $D = 20$ см обычная скорость течения газа составляет $v = 50$ см/с, а значение $y = (D \cdot x / Re)^{1/2}$ меньше, чем половина диаметра трубы (x - расстояние вдоль оси реактора).

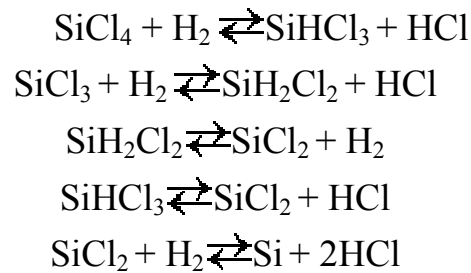
Для получения монокристаллической пленки необходимо нагреть пластину так, чтобы осаждающиеся атомы кремния могли перемещаться в положения, в которых бы они образовывали с подложкой ковалентные связи. При этом атомы должны успеть продолжить монокристаллическую решетку до того, как они будут накрыты следующими слоями осаждающихся атомов. Это происходит при температурах процесса от 900°C до 1250°C . Обычно скорость роста эпитаксиальной пленки составляет величину порядка нескольких микрон в минуту.

Рассмотрим химические процессы, протекающие в реакторе на примере восстановления тетрахлорида кремния. Суммарная реакция может быть классифицирована как водородное восстановление Si из SiCl_4 :



Рассмотрим ряд промежуточных реакций. Сначала определим константы равновесия каждой возможной реакции в системе Si-Cl-H, а также парциального давления каждого газа в интересующем нас диапазоне. При расчете констант равновесия получено четырнадцать различных соединений, существующих в равновесии с твердым кремнием. На практике многими из них можно пренебречь, так как их парциальное давление $< 0,1$ Па. Эпитаксиальный процесс не всегда описывается равновесной реакцией, поэтому расчет равновесной термодинамики указывает лишь на наиболее вероятные реакции. Для определения соединений, реально присутствующих в реакторе, проводили измерения с использованием ИК-спектроскопии, масс-

спектроскопии и рамановской спектроскопии. Реакции, протекающие в реакторе:



Все указанные реакции обратимые, и, следовательно, при соответствующих условиях скорость роста может стать отрицательной, т.е. начнется процесс травления. Наиболее важный вопрос - вопрос о зависимости скорости роста от температуры. При высоких и низких температурах скорость роста имеет отрицательные значения (рис. 2.15)

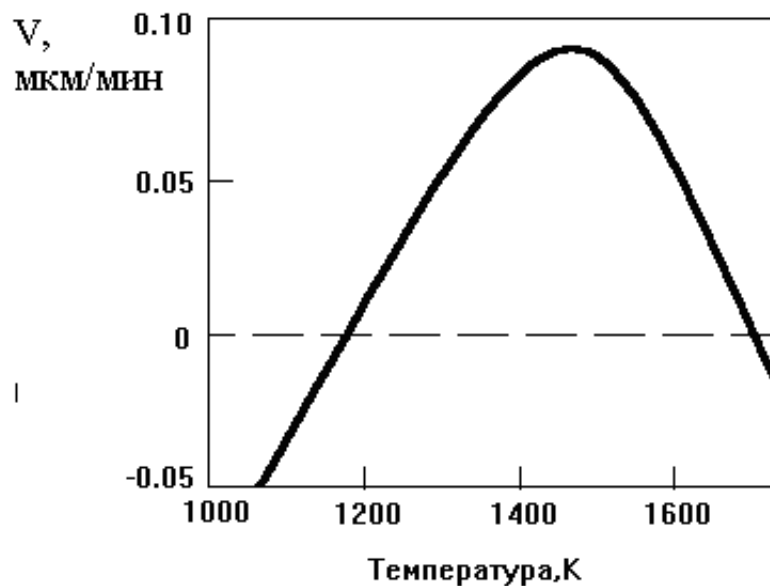


Рис. 2.15. Зависимость скорости роста от температуры при осаждении кремния химическим осаждением из парогазовой фазы.

Характерные параметры эпитаксиального роста кремния для различных химических реакций представлены в таблице 2.10.

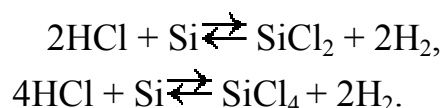
Таблица 2.10.

Характеристики эпитаксиального роста кремния в атмосфере водорода для различных источников кремния.

Источники кремния	Диапазон скорости роста, мкм/мин	Диапазон температур, °С	Требуемый уровень концентрации окислителя, 10 ⁻⁴ %
SiH ₄	0.4 - 1.5	1150 - 1250	5 - 10
SiHCl ₃	0.4 - 2.0	1100 - 1200	5 - 10
SiH ₂ Cl ₂	0.4 - 3.0	1050 - 1150	<5
SiCl ₄	0.2 - 0.3	950 - 1050	<2

Силан (SiH₄) - обычно выбирают, когда нужно уменьшить автолегирование бором и его диффузию из подложки. При высоких температурах силан склонен к газофазному разложению, что ведет к ухудшению качества слоев и быстрому загрязнению стенок камеры. Дихлорсилан (SiH₂Cl₂) - позволяет получить высокие скорости роста при относительно низкой температуре. Трихлорсилан (SiHCl₃) - применяется для получения поликристаллического кремния. Поскольку он не дает каких-либо существенных преимуществ перед тетрахлоридом кремния, то редко используется для эпитаксии из ПГС. Тетрахлорид кремния (SiCl₄) - наименее химически активное и наиболее широко используемое соединение. Благодаря высокой температуре роста процесс не чувствителен к высокому содержанию окислителей в газе носителе вследствие чего уменьшается количество вызываемых ими дефектов.

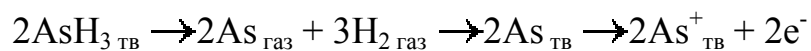
В дополнение к химической отмывке подложек непосредственно перед нанесением эпитаксиального слоя в реакторе обычно проводят газофазное травление для снятия естественного окисла и приповерхностного нарушенного слоя. Газофазное травление проводится безводным HCl при температуре 1200 градусов Цельсия, при этом идут реакции:



НСI вводится в основной поток водорода с концентрацией 2-3 процента. Скорость травления - несколько десятых микрона в минуту, а толщина стравливаемого кремния для подложек без скрытого слоя достигает 5 мкм. Когда требуется сохранить низкое значение поверхностного сопротивления скрытых слоев, толщина стравливаемого кремния составляет 0,1 - 0,3 мкм. В результате травления поверхность подложки становится достаточно чистой, свободной от естественного окисла. Для травления подложек были предложены и другие газы: HBr или SF₆. Однако этот процесс не может заменить преэпитаксиальной химической отмывки. Вместо травления в газовой фазе допускается проведение высокотемпературного отжига подложек в атмосфере водорода (в течение 10 мин при 1200 °С).

Для легирования обычно используют гидриды примесных элементов. В среде водорода указанные гидриды относительно устойчивы, что согласуется с термодинамическими расчетами. Химические свойства легирующих соединений удобно рассмотреть на примере арсина как наиболее типичного представителя газообразных легирующих соединений.

На поверхности кремния при осаждении происходят следующие процессы: адсорбция арсина на поверхности; диссоциация молекулы; встраивание мышьяка в растущий слой.



Скорость роста влияет на количество встраиваемой в эпитаксиальный слой примеси. При низких скоростях роста между твердой и газообразной фазами устанавливается равновесие, недостижимое при высоких скоростях роста.

В процессах роста в ректоре возможно также явление автолегирования, при котором кроме намеренно вводимой примеси в слой входят и неконтролируемые примеси из подложки. Механизм автолегирования следующий: примеси внедряются в растущий эпитаксиальный слой за счет твердотельной диффузии через границу слой-подложка, а также за счет испарения и переноса через газовую фазу. Автолегирование проявляется как увеличение ширины переходной области между слоем и подложкой.

Форма профиля легирования вблизи границы раздела определяется в основном твердотельной диффузией из подложки и описывается дополнительной функцией ошибок, если $v > 2(D/t)^{1/2}$, где v - скорость роста, D - коэффициент диффузии примеси в кремнии, t - время нанесения. Размер хвоста на профиле легирования зависит от вида легирующей примеси и

параметров процесса: температуры и скорости роста. Автолегирование ограничивает минимальную толщину слоев, которая может быть получена управляемым легированием при его минимальном уровне.

Молекулярно-лучевая эпитаксия

МЛЭ заключается в осаждении испаренных элементарных компонентов на подогретую монокристаллическую подложку. Этот процесс иллюстрируется на рис. 2.16, на котором приведены основные элементы установки для получения соединения (GaAs). Основой установки является вакуумная система. Так как в процессе МЛЭ требуется поддерживать высокий вакуум, установки снабжаются вакуумными шлюзами для смены образцов, что обеспечивает высокую пропускную способность при смене пластин и исключает возможность проникновения атмосферного воздуха. Для десорбции атмосферных газов со стенок системы требуется длительный отжиг в вакууме. Для обеспечения высокого качества и чистоты растущего слоя необходимо давление менее 10^{-9} торр. Этого добиваются, используя безмасляные средства откачки (например, титановый геттерный насос). В методе МЛЭ обычно можно проводить всесторонний анализ параметров пленки непосредственно во время процесса выращивания пленки. Большинство промышленных установок МЛЭ содержит оборудование для анализа дифракции отраженных электронов, масс-спектрометр, оже-спектрометр с возможностью исследования оже-спектров распыленных ионов.

Постоянная интенсивность потока атомов обеспечивается строгим контролем температуры. Для контроля температуры применяются термопары, ИК-датчики и оптический пирометр. Для легирующих элементов обычно применяются источники с резистивным нагревом. Управление потоками атомов легирующей примеси осуществляется с помощью заслонок. Это позволяет достичь хорошей воспроизводимости процесса и высокой однородности скорости роста и уровня легирования. Каждый нагреватель содержит тигель, являющийся источником одного из составных элементов пленки. Температура нагревателей подбирается таким образом, чтобы давление паров испаряемых материалов было достаточным для формирования соответствующих молекулярных пучков.

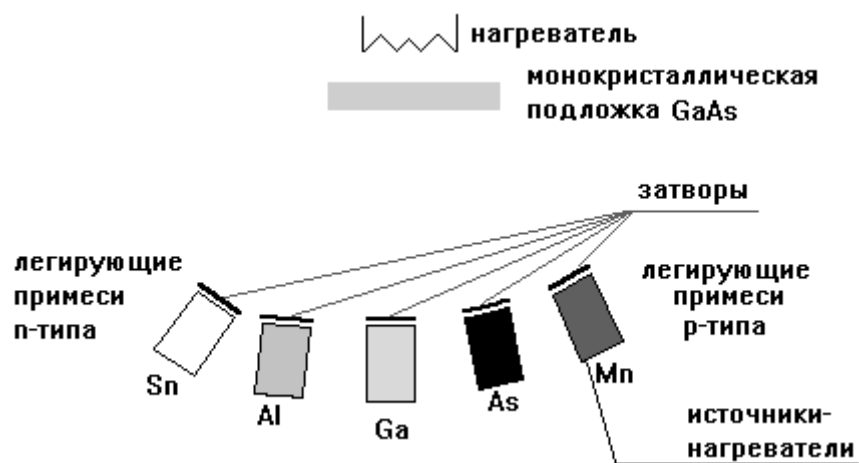


Рис. 2.16. Основные элементы подкалпачного оборудования установки для получения соединения $Al_xGa_{1-x}As$.

Испаряемое вещество с относительно высокой скоростью переносится на подложку в условиях вакуума. Нагреватели располагаются так, чтобы максимумы распределений интенсивности пучков пересекались на подложке. Подбором температуры нагревателей и подложки можно получать пленки со сложным химическим составом. Дополнительное управление процессом наращивания осуществляется с помощью заслонок, расположенных между нагревателем и подложкой. Использование этих заслонок позволяет резко прерывать или возобновлять попадание любого из молекулярных пучков на подложку.

Аналогичным образом осуществляется МЛЭ кремния (рис. 2.17). Испарение кремния обычно осуществляется за счет нагрева электронным лучом, т. к. температура плавления кремня относительно высока. Обычно МЛЭ проводят в сверхвысоком вакууме при давлении 10^{-6} - 10^{-8} Па. Температурный диапазон составляет 400 - 800 °С. Технически возможно применение и более высоких температур, но это приводит к увеличению автолегирования и диффузии примеси из подложки.

Одной из отличительных особенностей МЛЭ является низкая скорость роста пленки: приблизительно 1 монослой/с или 1 мкм/час, что позволяет легко модулировать молекулярные пучки, попадающие на подложку, если время управления движением заслонки менее 1 секунды.

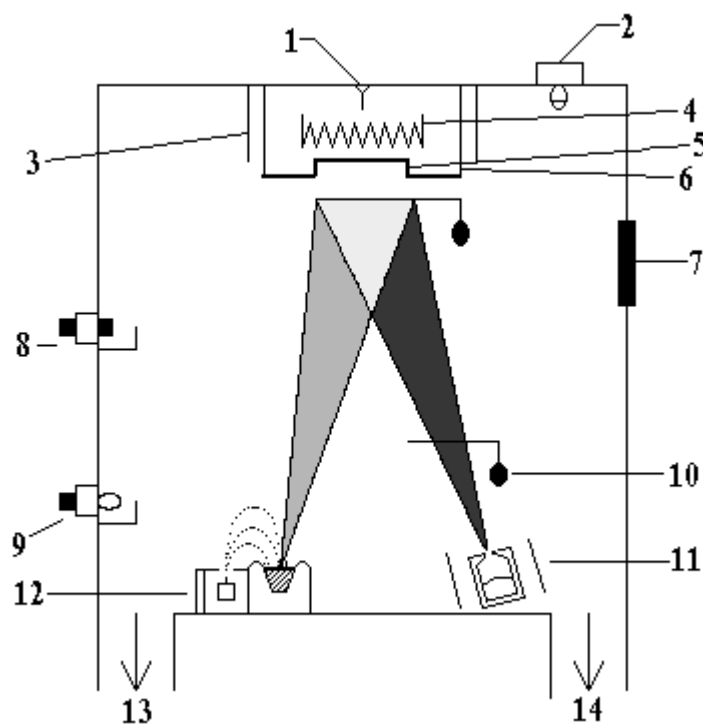


Рис. 2.17. Схема установки для МЛЭ

1-термопара; 2-кварцевый кристалл-измеритель толщины; 3-тепловой экран; 4-нагреватель; 5-подложка; 6-держатель; 7-окно для визуального наблюдения; 8-масс-спектрометр; 9-инициальный вакуумметр; 10-механический затвор; 11-источник сурьмы; 12-электронная пушка и источник кремния; 13-титановый геттерный насос; 14-турбокомпрессионный насос.

Предэпитаксиальная обработка подложки при использовании метода МЛЭ осуществляется двумя способами:

1. Высокотемпературный отжиг при температуре 1000 - 1250 °С длительностью до 10 минут. При этом за счет испарения или диффузии внутрь подложки удаляется естественный окисел и адсорбированные примеси.

2. Очистка поверхности с помощью пучка низкоэнергетичных ионов инертного газа. Этот способ дает лучшие результаты. Для устранения радиационных дефектов проводится кратковременный отжиг при температуре 800 - 900 °С.

Легирование при МЛЭ имеет несколько особенностей. По сравнению с эпитаксией из газовой фазы расширен выбор легирующих соединений, возможно управление профилем легирования. Легирующая примесь может быть как *p*-, так и *n*-типа.

Возможны два способа легирования. В первом случае после испарения примесные атомы достигают поверхности и встраиваются в кристаллическую решетку. Наиболее часто применяемые примеси (As, H, В) испаряются или слишком быстро или слишком медленно для эффективного управления. В результате чаще прибегают к употреблению Sb, Ga или Al.

В другом способе легирования используется ионная имплантация. В этом случае применяются слаботочные (1 мкА) ионные пучки с малой энергией. Низкая энергия этого процесса позволяет внедрять примесь на небольшую глубину под поверхность растущего слоя, где она встраивается в кристаллическую решетку. Этот способ позволяет использовать такие примеси как В, Р и As.

Как правило, плотность кристаллических дефектов в эпитаксиальном слое выше, чем в подложке. В то же время качество структуры слоя зависит от качества подложки и параметров эпитаксиального процесса. Дефекты, прорастающие с подложки, могут быть связаны со свойствами материала подложки и с обработкой поверхности пластин. Выделяют следующие типы дефектов (см. рис. 2.18): линейная дислокация, проросшая в эпитаксиальный слой (1); дефекты, зарождающиеся на примесных преципитатах, расположенных на поверхности подложки (2); примесные преципитаты, возникшие во время роста эпитаксиального слоя (3); бугорки на поверхности, возникающие из-за неудовлетворительных условий процесса или плохого исходного состояния поверхности (4); дефекты упаковки, проросшие в эпитаксиальный слой (5).

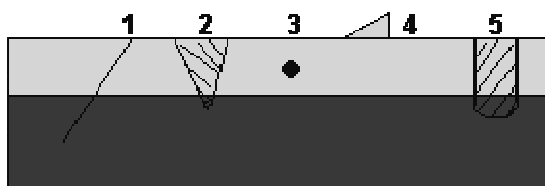


Рис.2.18. Виды дефектов в эпитаксиальном слое

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии перспективен для твердотельной электроники создания СВЧ-приборов и оптических твердотельных приборов и схем, в которых существенную роль играют слоистые структуры субмикронных размеров. При этом особое значение придается возможности выращивания слоев с различным химическим составом. МЛЭ чаще всего применяется для изготовления пленок и слоистых структур при создании приборов на (GaAs) и ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$). К таким приборам относятся

лавиннопролетные диоды, переключающие СВЧ-диоды, полевые транзисторы с барьером Шоттки, интегральные оптические структуры.

Гетероэпитаксия. Технология "Кремний на изоляторе"

Монолитные кремниевые слои имеют такие недостатки, как паразитные электрические цепи, возникающие вследствие большой емкости изолирующего перехода, причем с уменьшением размеров приборов трудности, возникающие при решении этой проблемы, возрастают.

Один из способов решения - формирование отдельных активных элементов на небольших островках кремния на изолирующей подложке. С целью дальнейшего совершенствования методов производства СБИС для получения быстродействующих приборов была предложена новая технология - кремний на изоляторе (КНИ). Ее идея состояла в том, что в случае синтезирования монокристаллического кремния на диэлектрической подложке исчезает необходимость в создании изолирующих *p-n* переходов между элементами ИС, замедляющих работу приборов. Как разновидность метода КНИ используется технология кремний на сапфире (КНС). В КНС технологии в качестве подложки используется сапфир - Al_2O_3 . На него эпитаксиальным способом наносят слои полупроводников, например, кремния или арсенида галлия. Процесс является гетероэпитаксиальным, так как материал слоя и подложки отличаются. В качестве кремнийсодержащего соединения наиболее часто выбирают силан, газом-носителем служит водород. При нагревании происходит пиролиз силана:



При этом температура роста составляет от 1000 до 1050°C, скорость роста до 0.5 мкм/мин, толщина слоя не превышает 1 мкм, уровень легирования находится в диапазоне 10^{14} - 10^{16} см⁻³.

Поскольку материалы подложки и полупроводника имеют значительное рассогласование решеток, и автолегирование Al из подложки играет значительную роль, то эпитаксиальный слой кремния обладает высокой плотностью дефектов. Эти дефекты обуславливают значительные токи утечки *p-n* переходов, малое время жизни и низкую подвижность носителей. Поэтому КНС технологии можно использовать только при производстве приборов, работающих на основных носителях, например, КМОП схем. Для уменьшения автолегирования Al из подложки полупроводники наносят

молекулярно-лучевым способом, имеющим более низкие температуры процесса.

В КНИ технологии в качестве диэлектрической подложки используется слой SiO_2 . Он может быть сформирован во внутренних частях монокристалла кремния путем его ионного легирования кислородом на определенную глубину с большой дозой и последующим отжигом в инертной атмосфере.

Используется и другой вариант. В технологическом цикле осуществляют процесс рекристаллизации аморфного кремния, осажденного на двуокись кремния (рис. 2.19).

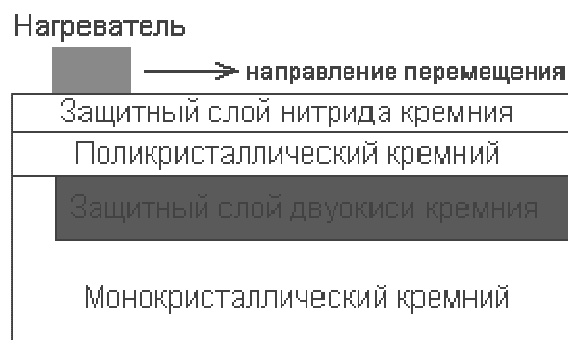


Рис.2.19. Схема процесса рекристаллизации поликристаллического кремния для формирования КНИ структур.

Рекристаллизация производится за счет локального нагрева участка поверхности сканирующим лучом лазера или электронным пучком до температуры плавления. Слой монокристаллического кремния, граничащий поликристаллом или аморфным слоем Si, играет роль затравки, а нитрид кремния используется для уменьшения загрязнений. Отметим, что кремний, полученный по КНД технологии, имеет меньшую плотность дефектов, чем КНС кремний. Развитие КНД технологии может послужить толчком в создании ИС нового поколения – трехмерных.

2.6. ФОТОЛИТОГРАФИЯ

Фотолитография представляет собой наиболее распространенный, метод создания топологического рисунка ИС в микроэлектронике. Многие характерные черты микроэлектроники сегодня являются следствием физических принципов и технических возможностей именно этого вида микротехники. Суть ее состоит в переносе изображения на рабочую поверхность подложки (полупроводниковой пластины) при помощи нанесенной на нее пленки фоточувствительного материала, называемого фоторезистом (ФР).

Существуют три основных метода фотолитографии:

- 1) теневой, или контактный,
- 2) проекционный,
- 3) лучевого сканирования.

Первые два предполагают существование фотошаблона (ФС), изображение которого либо в масштабе 1:1, либо с уменьшением (в методе проекционной фотолитографии) переносится в фоточувствительный слой - фоторезист. На рис. 2.20 изображена обобщенная принципиальная схема процесса формирования микроизображения в фотолитографии, основные компоненты которого фотошаблон, оптическая система и фоторезист, в котором формируется изображение. В методе теневой фотолитографии проекционная оптическая система отсутствует, а зазор δ между фоторезистом на объекте и фотошаблоном равен 0. В случае лучевого сканирования отсутствует фотошаблон, а луч (или же держатель образца) способен прецизионно перемещаться.



Рис.2.20. Принципиальная схема процесса фотолитографии

Шаблоны изготавливаются нанесением на прозрачную в УФ области пластину металлической пленки (например, хрома) в качестве затеняющего

покрытия. Их недостаток – трудность совмещения с ранее нанесенным рисунком. Любой дефект фотошаблона наследуется всеми отпечатками, выполненными при помощи прямого оптического переноса изображения. В процессе работы – в зависимости от вида операции с фотошаблонами и прочности затеняющей пленки – количество дефектов растет, суммируясь с существовавшими ранее. Это приводит к ограниченному сроку службы фотошаблона в связи с соответствующим падением выхода годных ИС. Образование дефектов ФШ в контактной фотолитографии находится в пропорциональной зависимости от контактного усилия, однако увеличение усилия является основным средством уменьшения контактного зазора δ , что увеличивает разрешающую способность ФЛ.

Рельеф образуется в результате того, что под действием актиничного излучения, падающего на определенные участки слоя, последний изменяет первоначальные свойства. Появляется дифференцированная растворимость слоя: например, освещенные участки перестают растворяться в растворителе, удаляющем участки слоя, не подвергшиеся освещению.

По способу образования рельефа фоторезисты делятся на два класса: негативные и позитивные. Различия в поведении фоторезистов обоих классов показаны на рис.2.21.

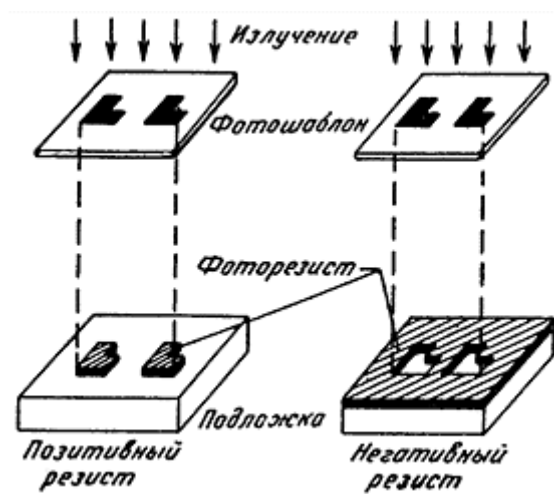


Рис. 2.21. Образование рисунка при экспонировании позитивного и негативного фоторезистов

Негативные фоторезисты под действием актиничного излучения образуют защитные участки рельефа. В результате фотополимеризации, задубливания или иного процесса освещенные участки перестают растворяться и остаются на поверхности подложки. При этом рельеф

представляет негативное изображение элементов фотошаблона: под непрозрачными участками фотошаблона фоторезист после обработки в растворителях удаляется, под прозрачными остаются участки, защищающие в дальнейшем от травления.

Позитивные фоторезисты, напротив, передают один к одному рисунок фотошаблона, т. е. рельеф повторяет конфигурации непрозрачных элементов шаблона. Поглощаемое излучение так изменяет свойства позитивного фоторезиста, что при обработке в соответствующих растворах экспонированные участки слоя разрушаются (вымываются). В основе создания топологии лежит использование фотохимических реакций, преимущественно фотоприсоединения и фоторазложения. Актиничное излучение создает в слое активные центры; ими могут быть молекулы, которые, поглотив энергию фотонов, претерпевают энергетические превращения, активизируются.

Фотохимическая активация может быть прямой и сенсibilизированной. В первом случае поглотившие излучение молекулы непосредственно вступают в реакцию, например, диссоциируют на атомы или объединяются с другими молекулами. Во втором случае поглотившие излучение молекулы в реакции не участвуют, но передают свою энергию другим молекулам, в обычном состоянии к реакции не способным. Когда молекула поглощает свет, она выходит из состояния термодинамического равновесия с окружающей средой и поэтому должна терять энергию в одном из трех следующих видов: а) флуоресценции или фосфоресценции, когда вся энергия или часть ее испускается в виде лучистой энергии через малый промежуток времени; б) химической энергии, т.е. путем превращения исходных веществ в новые соединения, и в) тепловой энергии, выражающейся в повышении температуры реакционной системы или в потере энергии в окружающую среду.

Фоторезисты должны обладать одновременно высокой фоточувствительностью в области длин волн излучения, применяемого для засветки и высокой химической стойкостью к реактивам, используемым при травлении маскирующего слоя. Обычно они представляют собой смесь, состоящую из светочувствительного продукта с резистной (стойкой к химическому травлению) смолой и растворителя. Кроме того, могут быть добавлены сенсibilизаторы, смещающие чувствительность в более длинноволновую область спектра, и усиливающие контраст компоненты. Принципиально важно, что природа чувствительности фоторезистов

отличается от принятых в фотографии фоточувствительных эмульсий отсутствием зернистости. Фоточувствительный продукт имеет чувствительность молекулярного уровня, не связанную с теми или иными включениями. Фоточувствительность ФР определяется критической химической связью минимального значения, разрываемой поглощаемым квантом света.

Для дополнительного повышения химической стойкости сохранившихся участков их подвергают задубливанию, обычно – термическому, а также инфракрасным или ультрафиолетовым излучением. Нанесению фоторезиста предшествует обработка подложки, улучшающая сцепление слоя резиста с подложкой (или ухудшающая смачивание подложки травителем). Для этого могут быть использованы простая очистка (обезжиривание) поверхности; физико-химическая обработка, изменяющая свойства поверхности; нанесение связующего подслоя.

Для нанесения слоев на подложку можно использовать методы центрифугирования, пульверизации, купания в растворе, полива и т.д. Центрифугирование находит широкое применение в полупроводниковой технологии, так как при сравнительно несложном оборудовании позволяет выдержать колебания толщины слоя в пределах $\pm 10\%$. Нанесенные на центрифуге слои зачастую содержат характерные дефекты в виде "комет". Эти дефекты возникают, если на поверхности подложки остались посторонние частицы - пыль, грязь и т.д., или сама подложка неоднородна: в пленке окисла встречаются микровключения (например, участки с кристобалитной структурой). В любом случае на таких местах вязкая масса фоторезиста задерживается и под действием центробежных сил возникают направленные от центра локальные утоньшения или даже разрывы слоя.

Более тонкой обработкой, которая устраняет имеющиеся в резистах типа поливинилциннамата субполимерные образования размером порядка 0,5 мкм, является скоростное центрифугирование. Скорость вращения центрифуги при этом 20 000 об/мин, а время, необходимое для эффективного удаления субполимерных включений, достигает нескольких десятков часов. В процессе эксплуатации вязкость фоторезистов возрастает, в результате чего растет толщина покрытия и может ухудшиться смачивание. Для контроля вязкости пригодны стандартные вискозиметры.

Наиболее известным негативным фоторезистом является поливинилциннамат. Это сложный эфир поливинилового спирта и коричневой (цинномоильной) кислоты. Цинномоильная группа светочувствительна в

диапазоне $\lambda = 300-400$ нм. Распадаясь под действием света, такие группы сшиваются затем цепочки поливинилового спирта, образуя гораздо более химически стойкую полимерную сетку. Другим типичным примером, получившим широкое распространение, является применение нафтохинондиазидов (НХД) для позитивного фоторезиста. Например, при воздействии света на НХД, соединение достаточно химически стойкое и гидрофобное, в результате фотолиза образуется инденкарбоновая кислота, легко удаляемая в водный раствор. Область спектральной чувствительности здесь оказывается в диапазоне 270-360 нм. Это две типичные фотохимические реакции, лежащие в основе работы ФР.

Наиболее химически стойким (а также и электрически стойким – это важно, если применяются электрохимические процессы: гальваника, анодирование) оказывается негативные ФР. Это понятно, так как полимерные цепочки здесь могут включать в себя тысячи атомов. Но наиболее высокая разрешающая способность достигается при помощи позитивных ФР.

В теневой фотолитографии оптическая система относительно проста. Предельную ее разрешающую способность определяет зазор между шаблоном и объектом δ . Этот зазор не может быть меньше толщины слоя ФР h . Но обычно он существенно больше, что связано с необходимостью увеличения выхода годных. На рис. 2.23 приведена картину освещенности ФР при учете дифракции через щель размером w .

Вид функции $I(x)$ определяется числом Френеля:

$$v = w^2 / \lambda \delta . \quad (2.36)$$

Если, как принято, считать $v = 2$ минимальной величиной для приемлемого воспроизведения щели, минимальный воспроизводимый размер составит

$$w_{\min} = \sqrt{2\delta\lambda} . \quad (2.37)$$

Если аппроксимировать освещенность у края элемента экспонентой

$$\frac{I(\xi)}{I_0} = \frac{I_k}{I_0 \exp(m\xi)} , \quad (2.38)$$

где $\xi = x\sqrt{2/\delta\lambda}$ - приведенная координата, а m - краевой градиент, в общем виде искажение размера на краю геометрической тени Δ_x составит (рис.2.24):

$$\Delta_x = \frac{2}{m} \sqrt{\frac{\delta\lambda}{2}} \ln \frac{H_K}{H_T}. \quad (2.39)$$

Здесь H_K и H_T - экспозиции на краю и пороговая, необходимая для полного проявления ФР, соответственно.

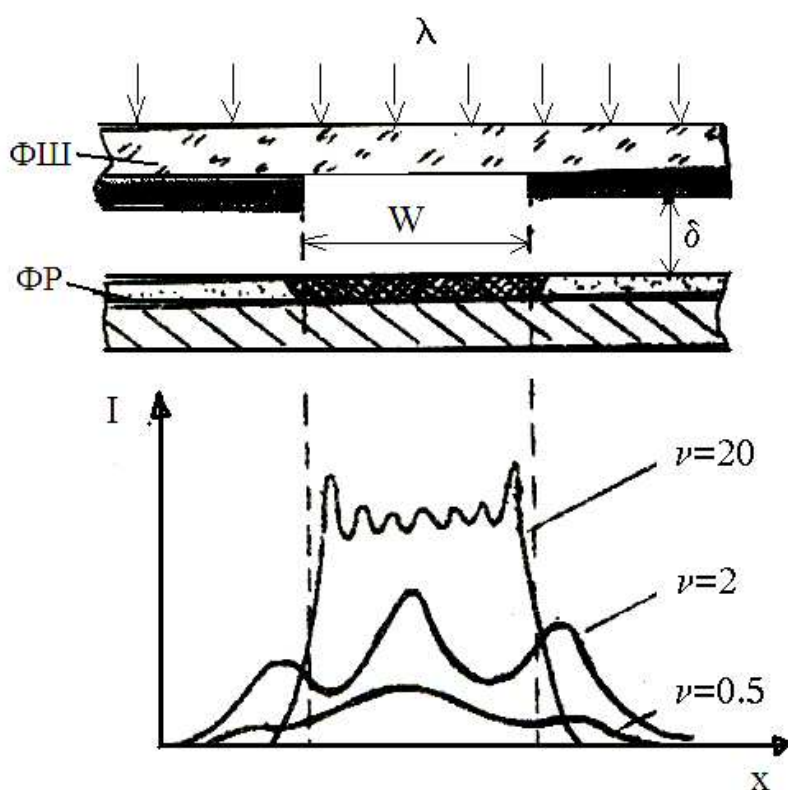


Рис.2.23. Вид функции распределения интенсивности засветки фоторезиста при экспонировании щели шириной W методом теневой печати с зазором

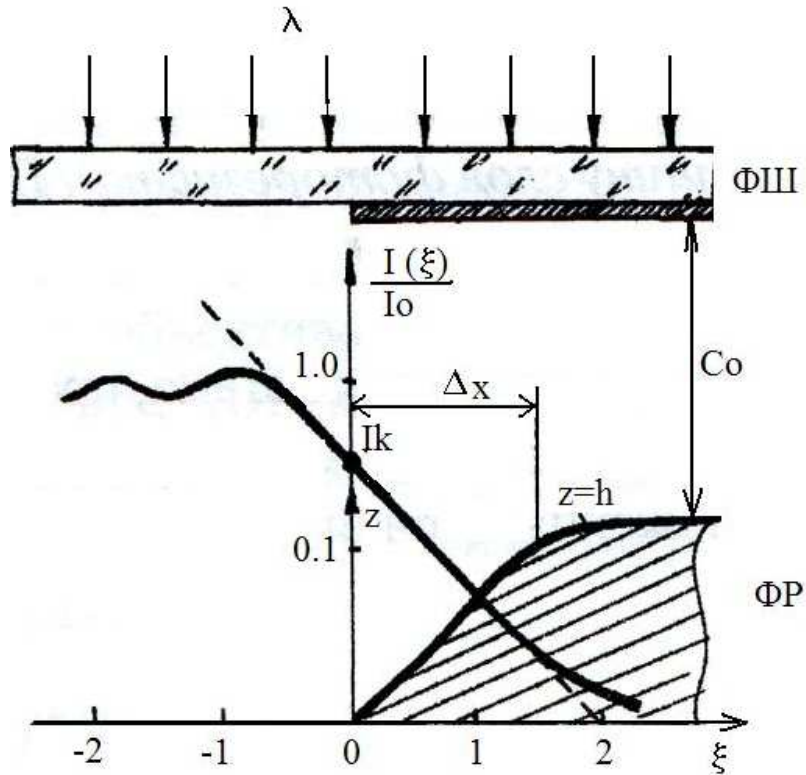


Рис.2.24. Распределение интенсивности света вблизи края фоторезиста

Экспозицию можно определить как

$$H(\xi, z, t) = \int_0^{\tau_s} I(\xi, z, t) dt, \quad (2.40)$$

где τ_s - время экспозиции.

На рис.2.25 приводится зависимость практически реализованной разрешающей способности R при контактной печати от величины зазора δ при освещении ртутной лампой.

При проекционной печати решающую роль играет оптическая система, предельную разрешающую способность которой можно определить через критерий Релея. Согласно ему, две предельно близко расположенные точки можно различить на расстоянии

$$2a_{\min} = 0,61\lambda / NA, \quad (2.41)$$

где NA - числовая апертура. Это – дифракционный предел оптического (волнового) разрешения.

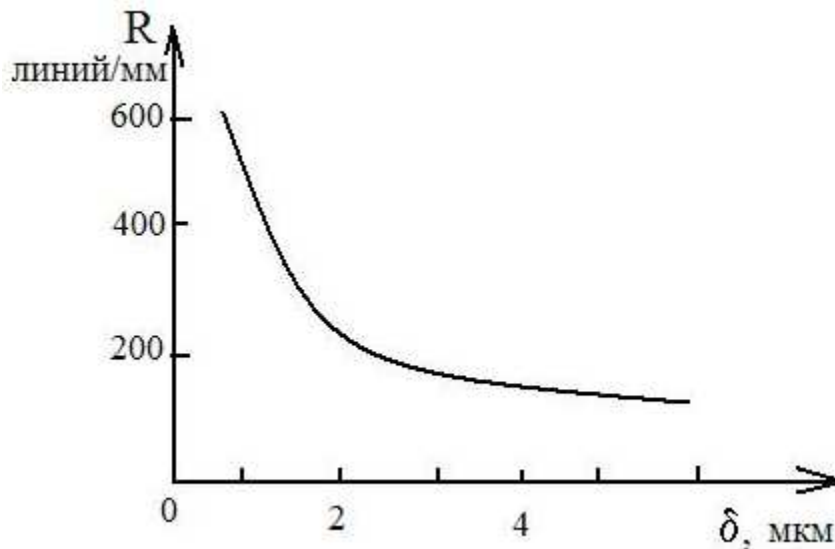


Рис.2.25. Зависимость разрешающей способности R при контактной печати от величины зазора δ

Критерий Релея строится на дифракционной картине от двух светящихся точек, размещенных таким образом, чтобы центр одного кружка Эйри совпал с первым минимумом другого. При этом на оси, пересекающей два центра, минимум интенсивности B' окажется ниже максимума на 22,5%. Ясно, что этот критерий условен. Для практической реализации разрешения на уровне a_{min} , задаваемом (2.41), при передаче изображения фоточувствительная среда должна обладать высокой контрастностью, чтобы зарегистрировать столь малый перепад интенсивностей. С другой стороны, современные средства фотоэлектрической регистрации могли бы разрешить две точки с существенно меньшим перепадом интенсивностей – был бы достаточен абсолютный уровень перепада сигналов $\delta B'_{min}(a)$, который плавно стремится к нулю при дальнейшем уменьшении $a < a_{min}$. Так что критерий Релея есть один из способов количественной привязки к физической картине светового поля, фиксирующий картину дифракции для двух близкорасположенных точек. Если считать возможной реализацию разрешения на уровне, задаваемом критерием Релея, мы получим следующую разрешающую способность оптической системы

$$R = 1/2a = 1,64NA/\lambda .$$

Источником искажений при переносе изображения в случае контактной фотолитографии являются интерференционные явления, возникающие в результате взаимодействия световых потоков, отражающихся

от границ раздела системы «фотошаблон-зазор-фоторезист-подложка». При учете только лишь отражения на границе с образцом возникает стоячая волна в фоторезисте, создающая ступенчатый профиль проявления. Эти искажения исключаются правильным выбором экспозиции и геометрии опыта либо регулировкой прозрачности шаблона.

В ряде случаев увеличение разрешающей способности оптической литографии приводит к необходимости искусственного нарушения пространственной когерентности экспонирующего пучка – применением, например, рассеивающих сред, протяженных или сдвоенных источников.

При проекционном экспонировании появляется, однако, возможность существенного улучшения разрешения при применении не амплитудных, а фазо-контрастных фотошаблонов, в которых вместо затеняющих слоев применяется слой, сдвигающий фазу проходящего света. Тогда предпочтение отдается уже источникам когерентного излучения.

Однако принципиальные физические ограничения максимальной разрешающей способности фотолитографии связаны с длиной волны света, применяемого при экспозиции. Поэтому перспективы дальнейшего развития литографии оптического диапазона связаны с уменьшением длины волны света, т.е. к переходу в вакуумно-ультрафиолетовый (ВУФ) диапазон.

Литография в ВУФ-диапазоне

К вакуумному ультрафиолетовому диапазону (ВУФ) относят диапазон длин волн $\lambda=10\div 200$ нм; с коротковолновой стороны он граничит с мягким рентгеном, и граница $\lambda_k^* \sim 10$ нм здесь не слишком строго обозначена. Длинноволновая граница $\lambda_d^* \sim 200$ нм ВУФ связана с сильным поглощением излучения атмосферой, по причине которого оптический путь должен вакуумироваться. Поглощение воздухом есть следствие ионизации газов, граница которой с длинноволновой стороны задается кислородом и кислородосодержащими газами, а нижняя – водородом, затем гелием, азотом. Заполнение оптического пространства последними сдвигает эту границу в коротковолновую сторону, делая диапазон $\lambda \sim 200-100$ нм относительно легкодоступным.

Выбор оптических материалов, прозрачных в ВУФ сильно ограничен, а материалов, прозрачных при $\lambda \leq 100$ нм, не существует вовсе, что и делает для традиционной оптики практически интересной только эту, довольно узкую полосу электромагнитных волн: 100-200 нм. Для рассматриваемой части ВУФ-диапазона энергия кванта $h\nu$ составляет от 6,2 до 12,4 эВ.

К материалам, имеющим ширину запрещенной зоны E_g в этом диапазоне, относятся лишь несколько диэлектриков. Среди них фториды LiF (11,8 эВ), MgF₂ (10,8 эВ), CaF₂ (10,1 эВ), SrF₂ (9,7 эВ), BaF₂ (9,2 эВ); оксиды Al₂O₃ (8,7 эВ), кварц кристаллический SiO₂ (8,55 эВ), BeO (8,1 эВ), при этом только LiF и MgF₂ перекрывают почти весь диапазон. Коротковолновая граница прозрачности (при длине оптического пути $L = 10$ мм) составляет 105 нм и 114 нм для LiF и MgF₂, соответственно.

Для засветки в ВУФ диапазоне различные эксимерные лазеры, среди которых наиболее эффективны в выделенном нами поддиапазоне лазеры ArF, излучающие на длине волны 193 нм (известны также лазеры на NeF, 175 нм, и др.). Именно создание эксимерных лазеров, обладающих гигантской выходной мощностью (например, эксимерный лазер на KrF с длиной волны 248 нм, развивает энергию 10-1000 мДж в импульсе длительностью 5 – 20 нс, при частотах повторения до $f=1000$ Гц) стало существенным фактором развития ВУФ микролитографии.

Поскольку практически не существует материалов, при которых энергия фотона в ВУФ-диапазоне не превышала бы необходимой энергии разрушения химической связи, работа в ВУФ-диапазоне нивелирует разницу в фотохимической прочности органических и неорганических материалов.

В субмикронной литографии легко может возникнуть противоречие, связанное с тем, что рельеф микроэлектронной структуры оказывается глубже минимального размера элемента, который необходимо получить при фотолитографии. Это создает трудноразрешимые проблемы с глубиной резкости, постоянством зазора и т.д. Вместе с тем, при изотропном проявлении толщина слоя резиста h не должна быть больше минимальной разрешаемой полосы ($h < a_{\min}$). Чтобы преодолеть это противоречие, на практике пользуются многослойными резистами различных составов. На рис. 2.26 приведен пример трехслойного резиста для ВУФ микролитографического процесса.

Первый слой здесь представляет собой планаризатор - органический материал, наносимый относительно толстым слоем и сохраняющий планарность поверхности, несмотря на рельеф сформированной ИС. Второй слой состоит из тонкого покрытия, стойкого к ионно-плазменному травлению. И лишь третий, тонкий верхний слой является собственно фоточувствительным резистом.

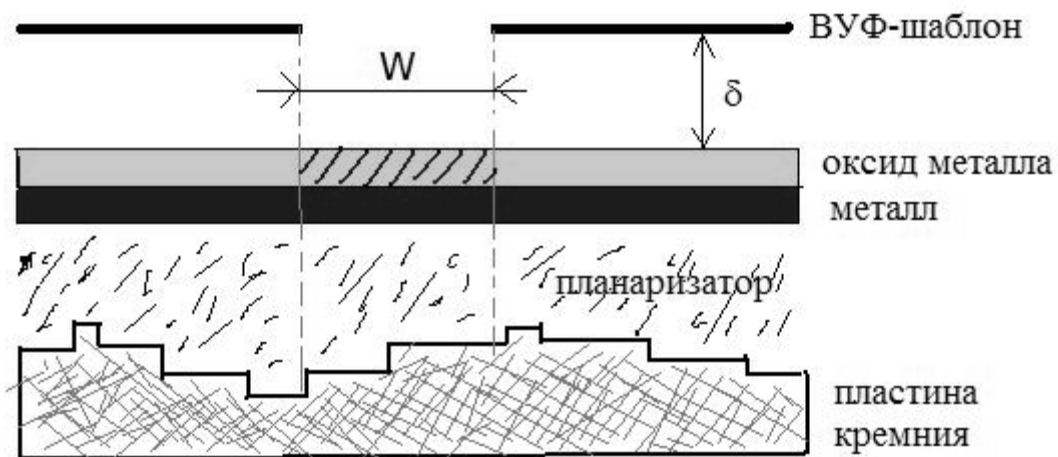


Рис.2.26. ВУФ-литография с применением трехслойного резиста.

Интересную идею предлагают инженеры из Беркли: для того, чтобы сфокусировать пучок УФ-излучения, применяемый при фотолитографическом способе производства микросхем, до сверхмалых площадей (около 80 нм в поперечнике), они намерены использовать плазмонные металлические линзы (рис. 2.27). Плазмон - квазичастица, квант плазменных колебаний, возникает при описании электромагнитных свойств металлов, рассматриваемых как совокупность образованной ионами металла трёхмерной кристаллической решётки и заполняющего эту решётку электронной плазмы. При определённых условиях такая электронная плазма взаимодействует с падающим на металл световым (электромагнитным) потоком подобно линзе – оказывая влияние на форму пучка.

Плазмонная фокусировка оказывается куда более точной, чем при использовании вещественных линз. Размер итогового пучка зависит от точности фокусировки, а скорректировать «форму» плазмонной линзы электронными средствами управления значительно проще, чем с той же точностью отшлифовать линзу из стекла или иного материала.

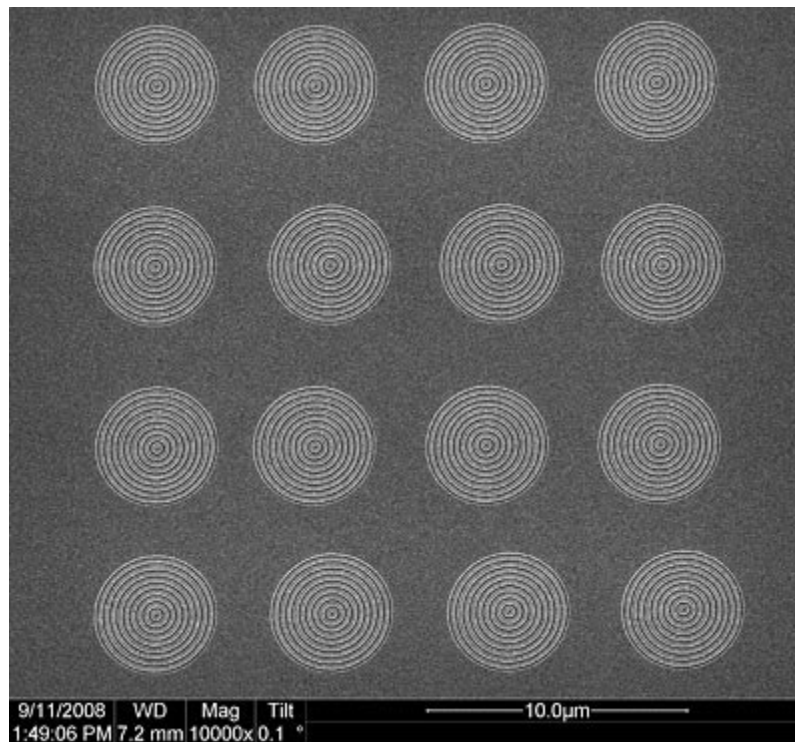


Рис. 2.27. Фрагмент серебряной плазмонной линзы. Активные участки диаметром 4 мкм из concentрических колец фокусируют падающий свет в пучок диаметром менее 100 нм (фото с сайта www.berkeley.edu)

В лаборатории были получены пучки, при помощи которых на поверхности образца изображались структуры с характерной толщиной линий 80 нм. Уже в ближайшем будущем при помощи плазмонной нанолитографии приложении к устройствам хранения данных может обеспечить плотность записи, на 1-2 порядка превосходящую доступную на рынке в настоящее время. Сегодняшний предел разрешения, достигаемый посредством традиционной фотолитографии, составляет 32 нм. Новая методика, по заверениям разработчиков, способна за короткое время пройти путь до 5-10 нм.

2.7. СУХОЕ ТРАВЛЕНИЕ

Рисунки на резисте, формируемые методами литографии, еще не являются элементами готового прибора. Для формирования топологии схемы необходимо перевести рисунки резиста в соответствующие слои полупроводниковой структуры. Один из методов такого перевода заключается в селективном удалении немаскированных резистом участков. Этот процесс называют травлением. Применяемое ранее жидкостное травление не подходит для создания элементов СБИС и УБИС

субмикронных размеров, т.к. за исключением специальных случаев, является изотропным. Методы так называемого сухого (плазменного, плазмохимического, ионного, ионно-химического) травления хорошо подходят для технологического процесса изготовления СБИС, так как они характеризуются потенциальной способностью высокоточного перевода рисунков резиста. В основном для сухих методов травления используется плазма инертных или химически активных газов в виде газовых разрядов при низком давлении или ионные пучки. Плазменное травление может проявлять высокую анизотропию травления – т.е. значительное превышение скорости вертикального травления над скоростью бокового травления. Анизотропия является важным фактором, обуславливающим высокое разрешение при переносе рисунка.

Разрешение, достигаемое в результате процесса травления, является критерием качества переноса рисунка и определяется двумя параметрами. Первый из них — смещение, равное разности горизонтальных размеров рисунка травления d_f и рисунка маски d_m (рис. 2.28). Допуск является мерой статического распределения величин смещения, которая характеризует однородность травления в горизонтальной плоскости.

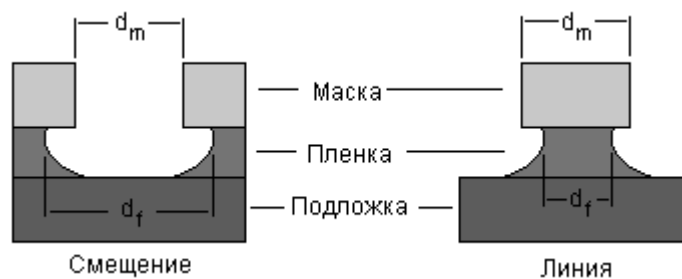


Рис. 2.28. Боковой подтрав пленки под маску на границе маска-пленка.

Процесс травления с нулевым смещением обеспечивает формирование вертикального профиля края элемента, совпадающего с краем маски (рис. 2.29). В этом случае травления в горизонтальном направлении не происходит и рисунок переносится с идеальной точностью, что соответствует ситуации идеально анизотропного травления. Когда скорость травления не зависит от направления, к концу процесса формируется профиль края, имеющий контур четверти окружности (рис. 2.29). В этом случае, т.е. при изотропном

травлении, смещение равно удвоенной толщине пленки, подвергавшейся травлению.

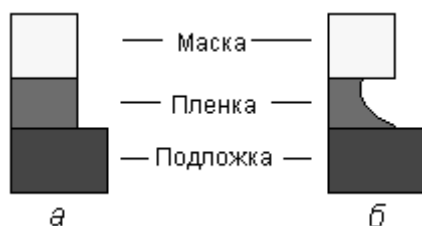


Рис. 2.29. Идеальные профили травления для: а) - полностью анизотропного ($A_f=1$) и б) - изотропного ($A_f=0$) травления при отсутствии подтравки маски.

Любой профиль края элемента, который соответствует ситуации, промежуточной между теми, что показаны на рис. 2.29, образуется вследствие анизотропии скорости травления. Степень анизотропии можно определить как $A_f=1-v_l/v_v$, где v_l и v_v - горизонтальная и вертикальная скорости травления соответственно.

На практике при использовании методов сухого травления подложка и маска также подвергаются воздействию травителя. Чаще всего материалы, контактирующие с травителем, характеризуются конечными значениями скорости травления. Следовательно, важным параметром переноса изображений в технологии СБИС является селективность (избирательность) травления, определяемая как отношение скоростей травления различных материалов. Селективность по отношению к материалу резиста необходимо учитывать при контроле размеров формируемых элементов. Селективность травления данного слоя по отношению к материалу подложки (кремниевой пластины или другого нижележащего слоя) определяет качество и процент выхода годных приборов.

Методы сухого травления.

Плазменное травление может осуществляться различными методами. При использовании методов ионного травления процесс травления происходит исключительно по механизму физического распыления. Реактивные методы (с использованием химически-активных газов), включающие собственно плазменное травление, реактивное электронно-лучевое травление и реактивное ионно-плазменное травление, основаны на различной степени сочетаний химических реакций, в ходе которых образуются летучие или квазилетучие соединения, и физических взаимодействий, таких, как ионная бомбардировка.

В методе ионно-лучевого травления источником ионов обычно является газовый разряд на постоянном или переменном токе, ограничиваемый магнитным полем, причем область разряда физически отделена от травливаемой подложки системой сеток (электродов), на которые подаются потенциалы смещения, обеспечивающие экстрагирование ионного пучка (обычно ионов Ag^+) из разряда. Для обеспечения используемых на практике плотностей тока лучка ($<1 \text{ mA/cm}^2$) требуется прикладывать напряжение (сообщать ионам энергию) свыше 500 В.

Обычно пучок хорошо коллимирован, поэтому угол его падения на поверхность подложки можно регулировать наклоном подложкодержателя. Для нейтрализации ионного пучка на его пути размещается разогреваемая нить накала, инжектирующая в пучок электроны низких энергий. Хотя методы ионно-лучевого травления ионами инертного газа обеспечивают в потенциале высокое разрешение, они не получили широкого применения в технологии СБИС. Основной причиной этого является неудовлетворительная селективность процессов, основанных на чисто физическом распылении.

Термин "плазменное травление" часто применяется для обозначения чисто химических гетерогенных реакций, в которых плазма служит источником реакционно-способных электрически нейтральных компонент (свободных радикалов), вступающих во взаимодействие с атомами поверхности твердого тела, в результате чего образуются летучие продукты реакций. Процессы плазменного травления в технологии СБИС применяются например, для снятия органического фоторезиста в кислородной плазме в объемном реакторе. Однако физические эффекты, такие, как ионная бомбардировка, часто играют важную роль в плазменном травлении, также как и в реактивном ионном травлении. Поэтому следует быть осторожным при определении "механизма" конкретного процесса травления, основанного на терминологии, используемой для описания этого процесса.

Для сухого травления кремния, его соединений и некоторых металлов применяют молекулярные газы, содержащие один или более атомов галогенов в своих молекулах. Выбор таких газов объясняется тем, что образуемые ими в плазме элементы реагируют с материалами, подвергаемыми травлению, образуя летучие соединения при относительно низких температурах. Состав рабочего газа - доминирующий фактор, определяющий скорость травления и селективность при плазменном и реактивном ионном травлении. В таблице 2.11 представлены обычно

используемые для травления газы и материалы, подвергаемые травлению в соответствующих газовых разрядах.

Таблица 2.11.

Галоген-содержащие газы, используемые для сухого травления в планарной кремниевой технологии.

Материал	Газы
Si	CF ₄ , CF ₄ +O ₂ , SF ₆ , SF ₆ +O ₂ , NF ₃ , Cl ₂ , CCl ₄ , CCl ₃ F, CCl ₂ F ₂ , CClF ₂
SiO ₂ , Si ₃ N ₄	CF ₄ , CF ₄ +H ₂ , C ₂ F ₆ , C ₃ F ₈ , CHF ₃
Al, Al-Si, Al-Cu	CCl ₄ , CCl ₄ +Cl ₂ , SiCl ₄ , BCl ₃ , BCl ₃ +Cl ₂

Для процессов травления в технологии СБИС применяются почти исключительно галогенсодержащие газы, за исключением процессов, связанных с удалением фоторезиста и переносом рисунков в органические слои, когда используют плазму O₂. Выбор этих газов отражает тот факт, что образование применяемыми для изготовления СБИС материалами летучих и квазилетучих соединений с галогенами термодинамическими и кинетически возможно при температурах, близких к комнатной. Преимущественное присутствие в таблице галогенуглеродных газов объясняется тем, что эти газы наиболее удобны и безопасны в работе.

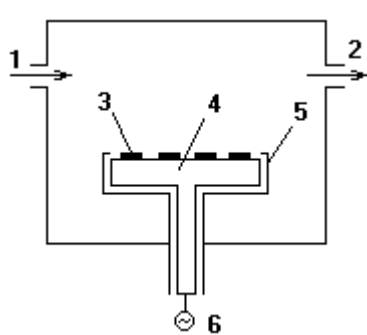
Для травления с высоким разрешением используются реакторы с электродами в виде параллельных пластин, между которыми прикладывается ВЧ напряжение. Такие системы имеют ряд отличительных характеристик. Во-первых, электроды почти симметричны (отношение площадей запитываемой и заземленной поверхностей значительно ближе к единице, чем в системах ионно-плазменного и реактивного ионного травления), уровень удержания плазмы относительно высок, поскольку электроды расположены близко друг к другу и имеют размеры, соизмеримые с диаметром внутренней полости реактора.

Удержание плазмы обеспечивает повышение ее потенциала. Другими отличительными характеристиками являются размещение подвергаемых травлению подложек на заземленном электроде и относительно высокое рабочее давление (от 13,3 до 1330 Па). Поскольку подложки либо заземлены, либо находятся под плавающим потенциалом, энергия падающих на них ионов может быть равна потенциалу плазмы или немного превышать его и при определенных условиях может достигнуть нескольких сотен вольт,

несмотря на высокое рабочее давление. При высоком потенциале плазмы поверхностные реакции, определяющие процесс травления, сильно зависят от эффекта ионной бомбардировки. В этом случае плазмохимическое травление в диодной системе мало отличается по механизму от реактивного ионного травления.

Обычно для осуществления плазменного травления требуется лишь механический насос. Широко применяются двухкамерные роторные насосы с масляными ловушками, обеспечивающие скорость откачки до 1500 л/мин. Поскольку даже при использовании относительно инертных рабочих газов в процессе разряда могут образовываться химически агрессивные и токсичные газы (CO , COF_2 , COCl_2 , F_2 и Cl_2), необходимо предусматривать меры безопасности при вентилировании насоса, замене в нем масла и повседневном техническом обслуживании. Подача высокочастотного напряжения осуществляется посредством цепей с регулируемым импедансом при частоте 13,56 МГц (эта стандартная частота используется в промышленных, научных и медицинских установках в США). Однако проведенные исследования влияния частоты на характеристики процесса травления показали важность этого параметра, определяющего энергию ионов, что привело к целесообразности отклонения от стандартной частоты. Цепи регулировки применяются для согласования импеданса плазмы с выходным импедансом высокочастотного генератора, что обеспечивает эффективную передачу энергии.

Реактивное ионное травление основано на бомбардировке поверхности образующимися в процессе разряда высокоэнергетическими (с энергией > 500 эВ) ионами химически активного газа, что приводит не только к физическому распылению материала, но и к протеканию ионно-возбуждаемых и ионно-ускоряемых гетерогенных химических реакций. Процесс проводят в высокочастотной диодной системе, схема которой представлена на рис. 2.30. Материал, подвергаемый травлению, закрепляется на запитываемом электроде и бомбардируется притягиваемыми из плазмы ионами. При этом запитываемый электрод является катодом, а все остальные внутренние заземленные части реактора - анодом; площадь катода намного меньше площади анода, и плазма занимает весь объем камеры. Заземленный экран предотвращает распыление защищаемых им участков поверхности запитываемого электрода.



- 1 - Рабочий газ
- 2 - К насосу
- 3 - Подложка
- 4 - Катод
- 5 - Заземленный экран
- 6 - Источник ВЧ-напряжения

Рис. 2.30. Высокочастотная диодная система для реактивного ионного травления.

Если отношение поверхности катода к заземленной поверхности достаточно мало, то наибольшее падение напряжения осуществляется на ионной оболочке катода. Направление вектора электрического поля в районе ионной оболочки перпендикулярно поверхности катода, поэтому при типичных рабочих давлениях (1,33-13,3 Па) ионы падают на поверхность под прямым углом, и, следовательно, степень анизотропии травления высока.

Таким образом, отличительными особенностями метода являются асимметричные электроды (отношение площади катода к площади заземленной поверхности $\ll 1$); размещение подложек на запитываемом (высокочастотном) электроде; относительно низкие рабочие давления (0,133-13,3 Па). Каждая из перечисленных особенностей метода обуславливает довольно высокую энергию ионов, бомбардирующих поверхность подложки в процессе травления. Низкие рабочие давления, используемые при реактивном ионном травлении, приводят к необходимости применения более сложных насосных систем и низких скоростей подачи рабочего газа (~10-100 см³/мин при стандартных температуре и давлении). В остальном системы реактивного ионного травления сходны с реакторами для плазменного травления с параллельным расположением электродов.

Влияние технологических параметров на процессы сухого травления

Влияние энергии и угла падения ионов на интенсивность распыления, определяемую числом атомов поверхности, выбиваемых с нее одним падающим ионом, представляет интерес, так как распыление и сопутствующие ему эффекты происходят при травлении в реактивной плазме, которую наиболее часто применяют в технологии СБИС. Энергия ионов должна превышать пороговую величину порядка 20 эВ, при которой начинается распыление, и должна быть намного выше указанной величины

(несколько сотен электрон-вольт) для достижения практически приемлемых скоростей ионно-плазменного травления.

Интенсивность распыления большинства материалов монотонно возрастает по мере повышения энергии ионов в интервале энергий ионов, соответствующем сухому травлению (до 2 кэВ), но при энергии свыше ~ 300 эВ скорость этого возрастания уменьшается. Интенсивность распыления зависит от угла, под которым ионы соударяются с поверхностью. Ионы, падающие на поверхность под наклонным углом, характеризуются более высокой по сравнению со случаем нормального падения вероятностью эмиттирования атома, вектор скорости которого направлен от поверхности подложки. Ионы, образующиеся в процессе разряда, соударяются с поверхностью подложки как при плазменном, так и при реактивном ионном травлении. Распыление способствует увеличению скорости травления, но при обычных рабочих параметрах процесса это увеличение незначительно.

Существенно большую важность имеет эффект, оказываемый атомными соударениями на протекающие на поверхности химические реакции. В настоящее время эти стимулируемые ионами реакции являются предметом интенсивного изучения. Растущее число экспериментальных фактов свидетельствует о том, что стимулируемые ионами реакции между электрически нейтральными травящими частицами, образованными в разряде, и поверхностью твердого тела играют доминирующую роль во многих процессах сухого травления, которые применяются в технологии СБИС.

Для реактивного травления часто применяют многокомпонентные смеси, представляющие собой главную компоненту с одной или более добавками, которые вводятся для обеспечения наряду с требуемой скоростью травления других заданных характеристик: селективности, однородности, профиля края. Примером влияния таких добавок на скорость травления служит плазменное травление Si в SiO₂ в смесях, содержащих CF₄. Скорость травления Si в SiO₂ в плазме CF₄ относительно низкая. При добавлении в рабочий газ кислорода скорость травления как Si, так и SiO₂ резко возрастает. Максимальная скорость травления достигается для Si при добавлении 12% O₂, для SiO₂ при добавлении 20% O₂. При повышении концентрации O₂ скорость травления понижается, причем для Si в большей степени, чем для SiO₂.

Давление газа, плотность мощности и частота прикладываемого электрического поля - независимые параметры, но на практике

индивидуальное влияние каждого из них на процесс травления иногда трудно объяснить или предсказать. Однако являются очевидными несколько общих тенденций. Понижение давления и (или) частоты и повышение плотности мощности приводят к увеличению средней энергии электронов и энергии падающих на подвергаемую травлению поверхность ионов. Повышение плотности мощности вызывает также повышение плотности радикалов и ионов в плазме. Таким образом, в процессах ионно-стимулируемого травления путем уменьшения давления и частоты или увеличения мощности можно повысить степень анизотропии скорости травления.

Как правило, с увеличением мощности скорость травления монотонно возрастает. Почти вся прикладываемая мощность в конечном счете рассеивается в виде тепла, поэтому при очень большой плотности мощности электрического поля необходимо предусматривать охлаждение подложек во избежание нежелательных последствий нагрева, таких, как плавление и подгорание фоторезиста или потеря селективности травления. В последние годы исследователи проявляют большой интерес к сверхскоростному травлению в реакторах, рассчитанных на индивидуальную обработку пластин. Такие системы работают при относительно высоком давлении и очень большой плотности мощности (несколько Вт/см²).

При обычных условиях протекания процесса скорость потока рабочего газа оказывает незначительное воздействие на скорость травления. Это влияние проявляется при экстремальных условиях, когда либо скорость потока настолько мала, что скорость травления лимитируется доставкой травителя к подложке, либо скорость травления столь велика, что унос газовым потоком становится доминирующим механизмом потерь активных компонент. Возможность реализации последней ситуации зависит от скорости откачки, вязкости рабочего газа и вида материалов, находящихся внутри реактора.

Если время жизни активных компонент мало (вследствие проявления других механизмов потерь), влиянием скорости газового потока можно пренебречь. Такая ситуация типична, когда в роли активной компоненты выступает атомарный Cl. Влияние скорости потока на скорость травления может проявиться при использовании травящих компонент с более длительным временем жизни, например атомов фтора. Продолжительность пребывания травящих компонент в плазме обратно пропорционально зависит от скорости потока.

При реактивном травлении иногда наблюдается уменьшение скорости травления при увеличении суммарной площади поверхности, подвергаемой травлению. Это явление известно как загрузочный эффект, происходящий в тех случаях, когда активные компоненты быстро вступают в реакцию с подвергаемым травлению материалом, но обладают длительным временем жизни в отсутствие этого материала. В этом случае доминирующим механизмом потерь активных компонент является само травление, поэтому, чем больше площадь подвергаемой травлению поверхности, тем выше скорость потерь. Скорость образования активных компонент определяется рабочими характеристиками процесса (давлением, мощностью, частотой и т. д.) и почти не зависит от количества подвергаемого травлению материала в реакторе. Таким образом, средняя концентрация активных компонент, равная разности скоростей образования и потерь, уменьшается с увеличением площади поверхности, подвергаемой травлению.

Механизмы анизотропии реактивного ионного травления

Когда травление осуществляется в ходе ионно-стимулируемых реакций, как правило, наблюдается анизотропия скорости травления. Это связано с тем, что ионы падают на пластину перпендикулярно ее поверхности. Нормальное падение ионов происходит при реактивном травлении, если вертикальные размеры элементов топографии поверхности подвергаемой травлению пластины намного меньше толщины типичных ионных оболочек. Следовательно, на поверхность дна вытравливаемого элемента падает значительно больший поток ионов высокой энергии, чем на боковые стенки (рис.2.31).

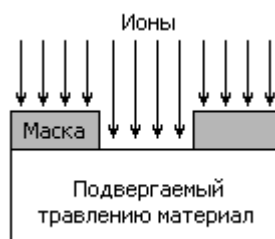


Рис. 2.31. Анизотропия травления при облучении ионным пучком, направленным перпендикулярно поверхности пластины.

Если реакция травления ионно-возбуждаемая, то боковое травление отсутствует, но в условиях ионно-ускоряемых реакций происходит некоторый боковой подтрав под маску, причем величина подтравки определяется скоростью протекания реакции.

Для минимизации бокового травления в условиях ионно-ускоряемых реакций целесообразно вводить в рабочий газ добавки, обеспечивающие рекомбинацию активных компонент. Функция таких добавок заключается либо в связывании активных веществ на поверхности с образованием летучих соединений, либо в предотвращении образования пассивирующей пленки. Детали механизмов, ответственных за протекание этих процессов, до конца не выяснены. Однако предполагается, что ионная бомбардировка не только способствует повышению скорости реакции между травителем и подложкой, но также стимулирует десорбцию рекомбинационных компонент, понижая таким образом их концентрацию на облучаемых поверхностях.

Таким образом, подбирая оптимальный состав рабочего газа, можно обеспечить такие условия протекания процесса, при которых скорость травления будет превышать скорость рекомбинации на облучаемых ионами поверхностях, и в то же время на боковых стенках, где облучение ионами минимально, будет реализовываться обратная ситуация (скорость рекомбинации выше скорости травления). Следовательно, степенью анизотропии травления можно управлять, регулируя состав рабочего газа.

На профиль края вытравливаемого элемента могут влиять также и другие факторы. Образование граней, возникновение канавок и повторное осаждение - три явления, проистекающие из физического распыления. Степень их проявления зависит от интенсивности распыления и ионного потока, поэтому часто их можно полностью подавить. Эти эффекты чаще проявляются при реактивном ионном травлении, нежели при плазменном травлении, вследствие более высокой энергии ионов первого процесса.

Скорость ионно-плазменного травления зависит от угла падения ионов на поверхность материала, подвергаемого травлению, и для большинства материалов максимальна, когда этот угол отличен от 90° . Образующаяся грань наклонена по отношению к падающим ионам на угол, соответствующий максимальной скорости травления. Эта грань не оказывает влияния на профиль края вытравливаемого элемента до тех пор, пока не пересечет поверхность подложки. Образование канавок происходит главным образом в результате падения мощного потока ионов на основание ступеньки вследствие их отражения от боковой стенки ступеньки. Скорость травления, обуславливаемая как физическим распылением, так и ионно-стимулируемыми реакциями, повышается в местах расположения канавок,

так как эти участки подвергаются воздействию более мощных ионных потоков.

Распыленный материал, не вошедший в состав летучих соединений, конденсируется на любой близлежащей поверхности. Распыленный материал распределяется в пространстве приблизительно по косинусоидальному закону, и поэтому значительная его часть может повторно осаждаться на стенках близлежащих элементов маски, что приводит к изменению профиля краев и размеров вытравливаемых элементов. Повторное осаждение обычно не наблюдается при плазменном травлении, поскольку в этом процессе его можно избежать, подбирая состав рабочего газа, параметры плазмы и маскирующие материалы так, чтобы происходило образование только летучих продуктов реакций.

3. ТЕХНОЛОГИЯ ПАССИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

3.1. СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Процесс металлизации заключается в реализации межкомпонентных соединений и создании контактов с низким сопротивлением к областям *p*- и *n*- типа и слоям поликристаллического кремния. При проведении процессов металлизации необходимо обеспечить следующие требования:

- хорошая адгезия металла на осаждаемой поверхности,
- низкое удельное и контактное сопротивление,
- отсутствие электромиграции,
- высокая коррозионная стойкость,
- стабильность на последующих стадиях процесса,
- простота изготовления.

В кремниевых МОП и биполярных СБИС для металлизации часто используют алюминий и его сплавы. Это обусловлено его низким удельным сопротивлением при комнатной температуре (2.7 мкОм·см), хорошей адгезией к кремнию и таким диэлектрикам как SiO₂ и Si₃N₄, а также низкой стоимостью. Проблемы коррозии и электромиграции решаются подбором характеристик осаждаемых материалов и разработкой методов изготовления и герметизации СБИС. Для металлизации используются также золото и многокомпонентные соединения, такие как Ti-Pt, Ti-Pd-Au, Ti-Pt-Au. Для контакта с электродом затвора или подзатворным диэлектриком обычно используют тугоплавкие металлы и их силициды.

Сопротивление контакта металла и полупроводника R_c при слабом уровне легирования полупроводника не зависит от уровня его легирования N_d и задается выражением:

$$R_c = (k/(q \cdot A \cdot T)) \cdot \exp(q \cdot f / (k \cdot T)), \quad \text{где}$$

A - постоянная Ричардсона, k - постоянная Больцмана, f - высота потенциального барьера на границе металл-полупроводник.

При высоком уровне легирования полупроводника $N_d > 10^{19} \text{ см}^{-3}$ механизм токопрохождения меняется с термической активации через барьер Шоттки на туннелирование через него. В этом случае R_c быстро уменьшается с ростом концентрации примеси по закону:

$$R_c \sim \exp(C \cdot f / N_d^{1/2}),$$

где $C = 4p \cdot (e \cdot m)^{1/2} / h$ - константа.

При изготовлении полупроводниковых приборов и ИС для получения омических контактов к кремнию, меж соединений и контактных площадок, а также электродов затвора МОП структур широкое распространение получили пленки алюминия, что обусловлено следующими достоинствами этого металла:

- низкой стоимостью Al и возможностью использования для всех процессов металлизации одного металла, что значительно упрощает и удешевляет технологию и предотвращает возникновение гальванических эффектов;
- высокой электропроводностью пленок Al, близкой к электропроводности объемного материала;
- легкостью испарения Al в вакууме из вольфрамовых тиглей и электронно-лучевых испарителей;
- высокой адгезией Al к кремнию и его окислам;
- низкоомностью контакта Al с кремнием p - и n -типов проводимости;
- заметной растворимостью кремния в Al с образованием твердого раствора, почти не уменьшающего электропроводности;
- отсутствием в системе Al—Si химических соединений;
- химической стойкостью Al в окислительной среде и радиационной стойкостью;

- легкостью проведения фотолитографических операций для получения конфигурации проводящих дорожек с использованием травителей, не реагирующих с кремнием и двуокисью кремния;
- хорошей пластичностью Al и устойчивостью к циклическим изменениям температуры.

Величина зерен осаждаемых пленок Al существенно зависит от скорости испарения и температуры подложек. Чем больше величина зерна и чем более совершенна кристаллическая структура пленки, тем меньше ее удельное сопротивление, меньше сказывается эффект электромиграции и как следствие токоведущие дорожки, и омические контакты имеют больший срок службы. Ориентированный рост пленок Al на не окисленных поверхностях кремния в плоскости (111) наблюдается при скоростях осаждения около $3 \cdot 10^{-2}$ мкм·с⁻¹ и температуре подложки 200—250°C.

Для получения столь больших скоростей осаждения пленок чаще всего используются электронно-лучевые испарители. При этом степень совершенства кристаллической структуры пленок может неконтролируемо изменяться вследствие дополнительного радиационного нагрева подложек, величина которого зависит как от мощности испарителя, так и от материала подложки и толщины осаждаемой пленки. Неконтролируемые изменения в структуре пленки возникают также из-за наличия заряженных частиц в молекулярном пучке испаряемых паров Al. Концентрация заряженных частиц тем выше, чем больше ток эмиссии катода и больше скорость испарения.

Одним из существенных недостатков пленок чистого Al является перенос вещества в результате электромиграции, т.е. дрейфа ионов материала вдоль проводника в направлении движения электронов (эффект электронного ветра), возникающего при превышении некоторой критической плотности тока. Скорость перемещения ионов является функцией температуры и увеличивается с ростом последней. Помимо электромиграции, возможна диффузия атомов металла в результате разности температур на концах проводника. Электромиграция Al при плотностях тока, меньших, чем для других металлов, приводит к появлению пустот в пленке (эффект Киркендалла).

Поскольку электромиграция является активационным процессом, она существенно зависит от состояния поверхности границ зерен. Уменьшение протяженности границ за счет увеличения размеров зерна и подбор материала защитного покрытия могут существенно увеличить энергию

активации и как следствие время наработки на отказ. Значительного увеличения времени наработки на отказ можно достичь за счет добавки к алюминию примесей меди, магния, хрома, а также окиси алюминия.

После нанесения пленки Al и получения требуемой конфигурации токоведущих дорожек производят сплавление Al в кремний при температуре 500—550°C для получения низкоомного контакта. При этом происходит частичное растворение кремния в алюминиевом слое с образованием проколов, заполняемых Al. Для предотвращения этого необходимо при испарении Al вводить в него около 2 масс. % кремния. Добавка кремния в контактные площадки из Al уменьшает миграцию кремния из неглубоко залегающего эмиттерного слоя (около 1 мкм), что существенно увеличивает быстродействие ИС на биполярных транзисторах и предотвращает закорачивание неглубоко залегающих *p-n* переходов.

Для предотвращения миграции кремния в пленку Al в качестве промежуточного барьерного слоя может быть использована пленка титана. Применение омических контактов с подслоем титана в ИС позволило в 20 раз увеличить время наработки на отказ. Помимо титана, может использоваться подслоем платины или палладия с образованием при отжиге силицида платины или силицида палладия.

Наряду с ранее перечисленными достоинствами металлизация Al обладает рядом недостатков, важнейшими из которых являются следующие:

- малая величина энергии активации самодиффузии атомов Al, вызывающая электромиграцию при плотностях тока примерно 10^6 А/см² и повышенных температурах, в результате чего появляются обрывы шин металлизации в процессе эксплуатации ИС;

- возможность короткого замыкания через диэлектрик в многоуровневых системах металлизации вследствие образования острых выступов на пленке в результате электромиграции и рекристаллизации Al;

- опасность гальванической коррозии Al при одновременном использовании других металлов; большая скорость диффузии Al по границам зерен, не допускающая использования приборов с металлизацией Al при температурах более 500°C;

- интенсивное химическое взаимодействие Al с двуокисью кремния при температуре около 500°C;

- низкая точка плавления в эвтектике систем алюминий — кремний около 577°C;

- большое различие (в 6 раз) коэффициентов термического расширения Al и Si;
- мягкость Al и, следовательно, невысокая механическая прочность пленок;
- невозможность присоединения выводов с помощью пайки;
- высокое пороговое напряжение в МОП структурах в связи с большой работой выхода.

Из-за перечисленных недостатков алюминиевая металлизация в настоящее время практически не применяется в ИС с мелкими эмиттерными переходами, а также в МДП ИС для создания затворных электродов. Для этой цели применяют однослойные и многослойные системы из различных металлов (в том числе Al для получение верхнего слоя). Наиболее подходящими материалами являются вольфрам и молибден. В частности, вольфрам имеет практически одинаковый с кремнием температурный коэффициент сопротивления (ТКС), хороший омический контакт к кремнию *p*- и *n*- типов проводимости, малое (в 2,5 раза) отличие от алюминия по электропроводности, самое высокое из всех металлов значение энергии активации при самодиффузии, высокую температуру плавления эвтектики с кремнием, химическую инертность на воздухе и в водном растворе плавиковой кислоты, а также высокую твердость, что исключает возможность появления царапин на пленке.

Благодаря высокой температурной стойкости W его можно использовать для многоуровневой металлизации, чередуя слои двуокиси кремния с W. При термообработке на поверхности пленки не образуются холмики и нет опасности короткого замыкания между токоведущими дорожками в многослойной металлизации. Кроме того, пленки W (также как и пленки Mo) являются металлургическим барьером, препятствующим образованию твердого раствора кремния и алюминия.

Недостатком металлизации на основе W является трудность получения пленок (для чего обычно используется пиролиз гексофторида вольфрама) и их травления (в щелочном растворе ферроцианида). Оба эти процесса сложны и проводятся с использованием токсичных веществ. Кроме того, непосредственно к вольфраму невозможно подсоединить внешние выводы, поэтому поверх него на контактные площадки и наносят какой-либо другой металл (Pt, Ni, Au, Si, Al и др.).

При изготовлении ИС СВЧ диапазона, ИС специального назначения, а также в гибридной технологии применяют металлизацию, состоящую из

нескольких слоев тонких металлов. При этом обычно первый (нижний) слой металла должен обладать высокой адгезией как к кремнию, так и к двуокиси кремния и одновременно иметь малые значения коэффициентов растворимости и диффузии в этих материалах. Этим требованиям удовлетворяют такие металлы, как хром, титан, молибден, а также силицид платины. При двухслойной металлизации второй (верхний) слой металла должен иметь высокую электропроводность и обеспечивать приварку к нему проволочных выводов. Однако в некоторых системах (таких, как Cr-Au, Ti-Au или Cr-Cu) контакты при термообработке теряют механическую прочность в результате образования на их границе интерметаллических соединений. Кроме того, верхний металл диффундирует через нижележащий слой в кремний, что снижает механическую прочность соединения и изменяет контактное сопротивление. Для устранения этого явления обычно используют третий слой металла, который является барьером, препятствующим взаимодействию верхнего слоя металлизации с кремнием. Так, например, в тройной системе Ti-Pt-Au, которая применяется при изготовлении балочных выводов, слой Pt толщиной около 50 нм служит барьером против диффузии Al в Si. Помимо этого для балочных выводов в МДП ИС применяются системы Cr-Ag-Au, Cr-Ag-Pt, Pd-Ag-Au, в которых роль барьера выполняет пленка серебра.

Увеличение плотности размещения элементов на кристалле потребовало применения многоуровневой металлизации. На рис.2.32 показана последовательность изготовления двухуровневой металлизации в системе Al-Al₂O₃-Al, которая применяется в приборах с зарядовой связью.

При уменьшении размеров ИС начинают играть большую роль следующие проблемы металлизации:

- достижение равномерного распределения толщины металлического покрытия на поверхности рельефной подложки;
- осаждение пленок на основе сплавов металлов заданного состава;
- снижение сопротивления контакта;
- эффект электромиграции
- эффект прокола мелкого p-n перехода
- проблемы создания металлизации с адгезионно-барьерными подслоями

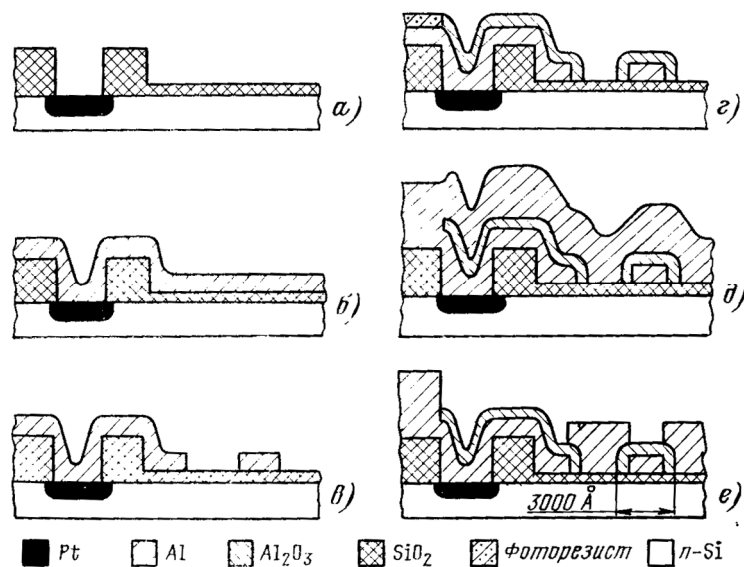


Рис.3.1. Последовательность операций изготовления двухуровневой Al металлизации

Для обеспечения равномерности покрытия ступенек повышают температуру подложки до 300°C , а также оптимизируют ориентацию подложек относительно источника. Последнее очень важно при использовании точечных источников, применяемых при электронно-лучевом или индукционном нагреве расплава. Пленки сплавов получают как осаждением из разных источников (при этом требуется высокая точность управления), так и из сплава. В последнем случае содержание пленки и сплава примерно идентичны. Для уменьшения внедрения в растущую пленку загрязняющих частиц устраняют турбулентные потоки газов при откачке и напуске газов в камеру. В системах стремятся свести к минимуму осаждение пленок на вращающихся деталях конструкции. Для уменьшения содержания паров масла в пленке, проникающими из механического и диффузионного насосов, используют криогенные ловушки и турбомолекулярные насосы. Для устранения процессов подтравливания металлов используют анизотропное травление (плазменное или реактивное ионное). При использовании сплавов нетрадиционного состава применяют "взрывную" металлизацию.

3.2. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ РЕЗИСТОРЫ И КОНДЕНСАТОРЫ

Наиболее широкое распространение в полупроводниковых ИС нашли диффузионные резисторы, которые изготавливают на диффузионных слоях базовой или эмиттерной области транзисторной структуры непосредственно в процессе формирования транзистора. В ИС используют также резисторы, получаемые ионным легированием, пинч-резисторы и пленочные резисторы на основе поликристаллического кремния. Сечение и топология типичного диффузионного резистора показаны на рисунке 3.2. На рис.3.2,а приведен фрагмент структуры микросхемы, представляющей *n-p-n*-транзистор и включённый в коллекторную цепь резистор, а на рис. 3.2,б – топология этого же участка.

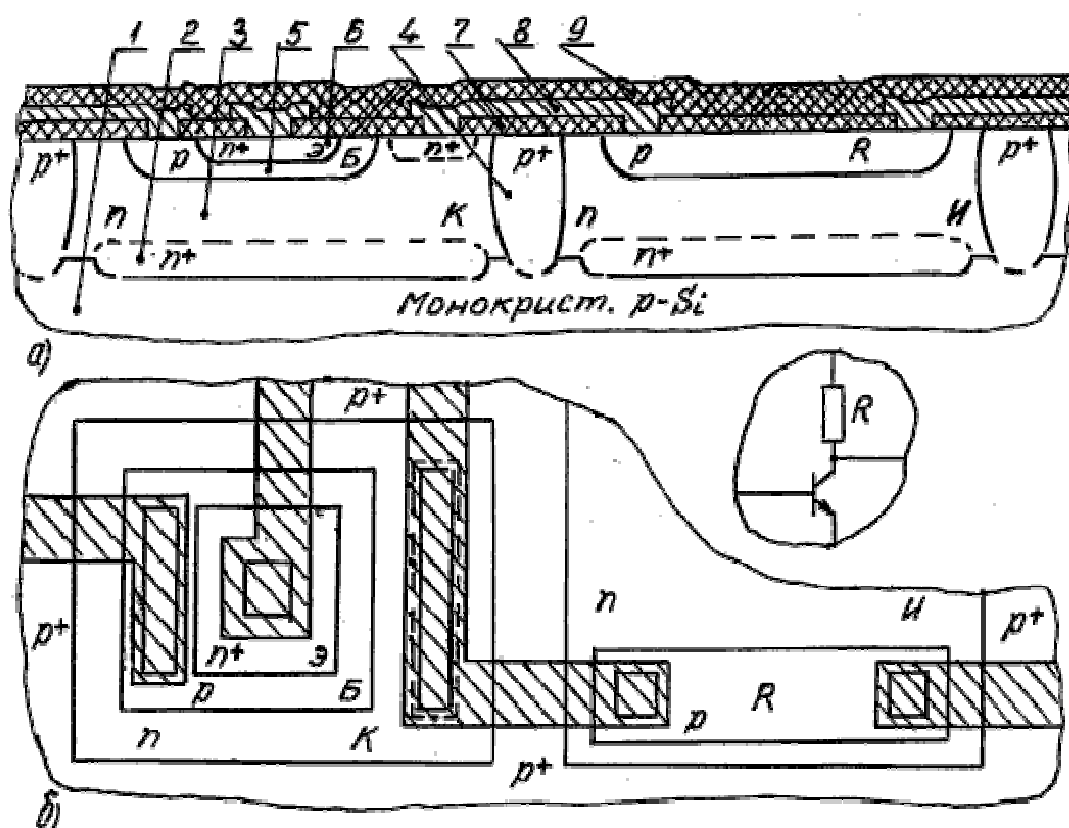


Рис.3.2. Фрагмент интегральной микросхемы с интегральным резистором: а – структура; б – топология. 1 – исходная монокристаллическая пластина – подложка; 2 – открытый слой; 3-эпитаксиальный слой (он же коллекторный); 4 – разделительный слой; 5 – базовый слой; 6 – эмиттерный слой; 7 – изолирующий слой с контактными окнами; 8 – слой металлизации; 9 – защитный слой (обычно SiO₂).

Диффузионный резистор чаще всего формируют на базовом слое такой транзисторной структуры. Выбор этого слоя представляет собой компромиссное решение между большими геометрическими размерами, необходимыми при использовании сильнолегированного эмиттерного слоя, и высоким температурным коэффициентом сопротивления резистора (ТКС), который получался бы при использовании слаболегированного коллекторного слоя. Эмиттерный слой можно применять при формировании низкоомных термостабильных резисторов.

Сопротивление слоя материала длиной L , шириной W , толщиной d и удельным сопротивлением ρ определяется известным выражением

$$R = \rho L / Wd \quad (3.1.)$$

При $L = W$ (то есть если образец является слоем, ограниченным по площади сторонами квадрата) получаем выражение для поверхностного сопротивления (в омах на квадрат)

$$R_s = \rho / d \text{ [Ом/квadrat]} \quad (3.2)$$

В случае диффузионного резистора толщина резистора d равна глубине p - n -перехода x_j . Параметры ρ и x_j определяются диффузионными профилями транзисторной структуры. Вычисление ρ представляет сложную и трудоемкую задачу, что обуславливается неоднородностью распределения концентрации примесных атомов по глубине и концентрационной зависимостью подвижности основных носителей заряда. в общем случае

$$\bar{\rho} = -\frac{1}{q\bar{\mu}_p\bar{N}_a}, \quad (3.3)$$

$$\bar{\mu}_p\bar{N}_a = \frac{1}{x_j} \int_0^{x_j} \mu_p(x)N_a(x)dx, \quad (3.4)$$

где $\bar{\mu}_p, \bar{N}_a$ - усредненные подвижность дырок и концентрация акцепторной примеси в резистивном слое. При расчетах диффузионных

резисторов можно пользоваться номограммами, представленными на рис. 3.3, 3.4, 3.5.

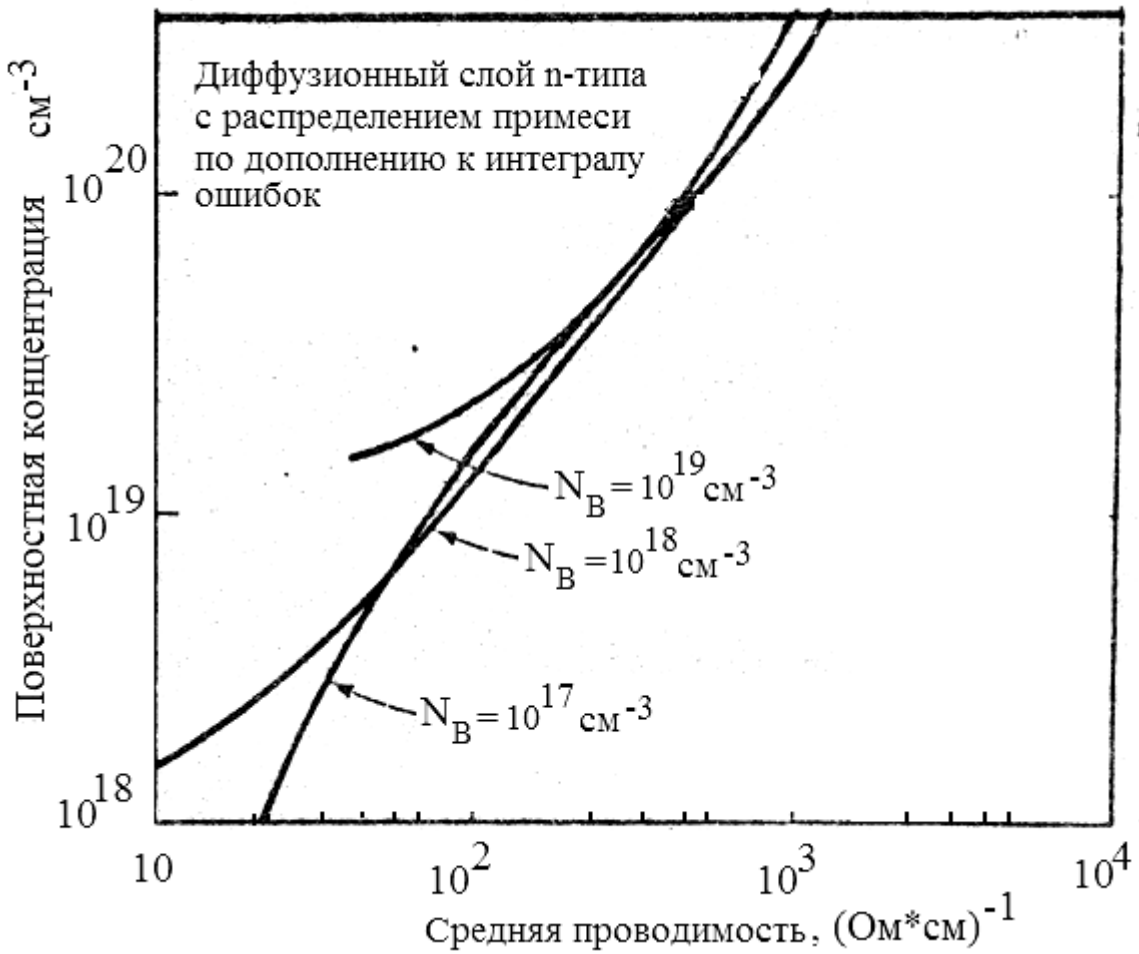


Рис.3.3. Зависимость между средней проводимостью и поверхностной концентрацией диффузионных слоев в Si.

Графики позволяют определить среднюю проводимость диффузионных слоев и, соответственно, поверхностное сопротивление в зависимости от поверхностной концентрации легирующей примеси для случаев диффузии из ограниченного и неограниченного источников. Слои, получаемые при базовой диффузии (то есть в процессе формирования базы транзистора), имеют поверхностное сопротивление порядка 200 Ом/квadrat, а эмиттерный диффузионный n^+ -слой всего порядка 2 Ом/квadrat.

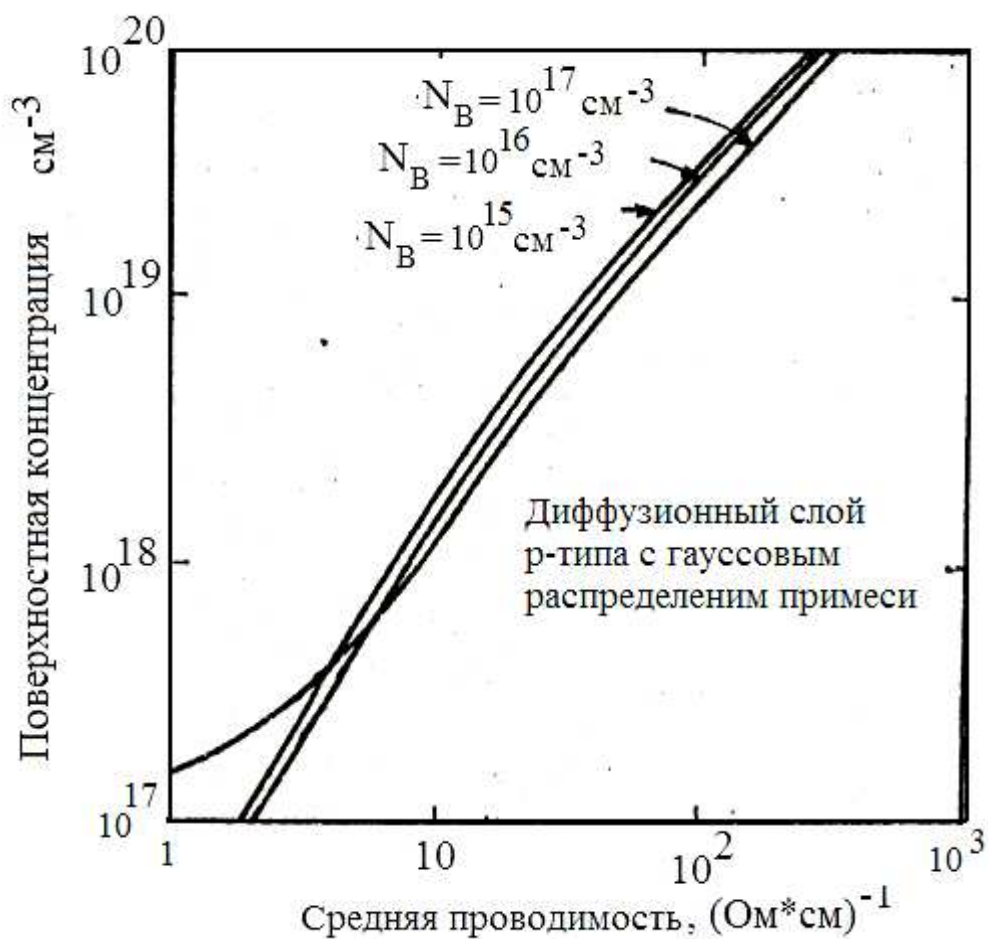


Рис. 3.4. Зависимость между средней проводимостью и поверхностной концентрацией диффузионных слоев в Si.

Ионное легирование дает возможность вводить очень малые дозы ионов ($\Phi < 10^{14}$ ион/см²) и получать очень большие значения поверхностного сопротивления (> 1000 Ом/квadrat). Слои с таким высоким поверхностным сопротивлением служат для создания резисторов больших номиналов. На рис.13 приведена зависимость поверхностного сопротивления ионно-легированного слоя в кремнии от дозы имплантации при исходной концентрации примеси в подложке $1 \cdot 10^{15}$ см⁻³.

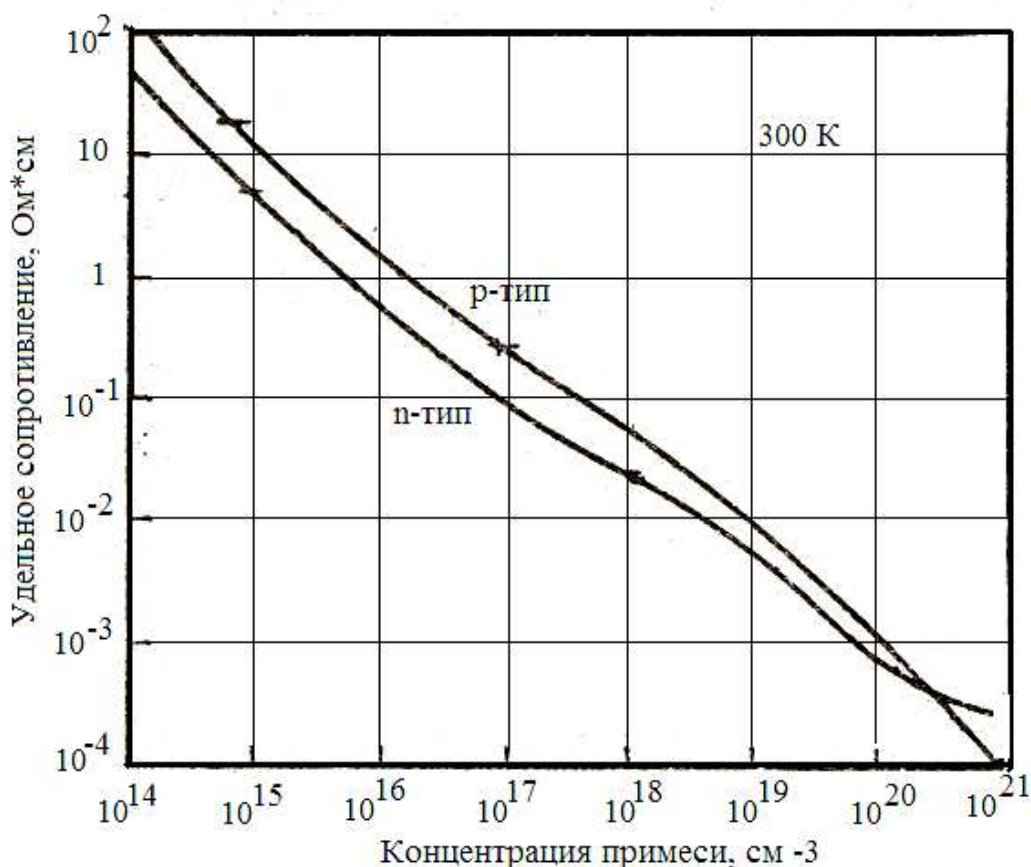


Рис.3.5. Зависимость удельного сопротивления кремния от концентрации примесей

3.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ИНТЕГРАЛЬНОГО РЕЗИСТОРА

Исходными данными для определения геометрических размеров резистора являются: номинальное значение сопротивления, заданное в принципиальной электрической схеме; поверхностное сопротивление материала диффузионного или ионно-легированного слоя; температурный коэффициент сопротивления; средняя мощность, рассеиваемая резистором. Номинальное значение сопротивления может быть выражено через поверхностное сопротивление (3.2):

$$R = R_s n, \quad (3.5)$$

где $n = L/W$ - полное число квадратов в резисторе длиной L . Минимальная ширина резистора W определяется разрешающей способностью фотолитографии (1-4 мкм) и шириной, определяемой, исходя из предельно допустимой рассеиваемой мощности.

Минимальная ширина W определяется выражением

$$W = \sqrt{\frac{PR_s}{P_o R}} = \sqrt{\frac{P}{P_o n}}, \quad (3.6)$$

где P – рассеиваемая мощность; P_o – предельно допустимая удельная рассеиваемая мощность (для кремния ≈ 50 мВт/мм²).

Высокоомные резисторы обычно выполняют в форме меандра. Суммарная длина резистора L определяется выражением

$$L = (R / R_s)W.$$

Если расстояние между диффузионными областями выбрано равным ширине резистора W , то площадь, занимаемая резистором приближенно определяется как $A = 2WL$.

Каждый интегральный резистор имеет значительную распределенную паразитную емкость C , оказывающую значительное влияние на схемные характеристики резистора. Паразитная емкость представляет собой емкость p - n -перехода между p -областью и эпитаксиальным слоем (подложкой) n -типа и может существенно ограничить возможность использования высокоомных резисторов на высоких частотах. Эквивалентная схема получающейся распределенной RC -структуры показана на рис.3.6. Линия передачи с распределенными RC -параметрами может быть приближенно представлена в виде схемы с сосредоточенными параметрами, где суммарная паразитная емкость изображена в виде двух конденсаторов половинной емкости на концах резистора.

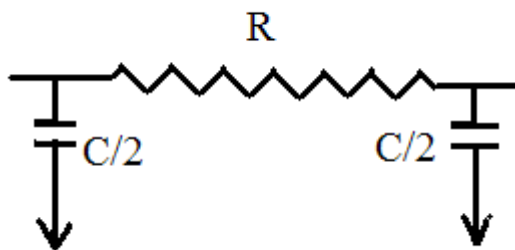


Рис. 3.6. Эквивалентная схема диффузионного резистора

Эта упрощенная эквивалентная схема представляет собой RC -фильтр нижних частот с постоянной времени $\tau = RC/2$. Время нарастания сигнала

от 10 до 90% амплитуды равно $2,2\tau$, а ширина полосы по уровню 3 дБ определяется как $f = \frac{1}{2\pi\tau}$.

Суммарная паразитная емкость $C = C_{y\partial}LW$, где $C_{y\partial}$ - удельная емкость p - n -перехода. Ширина обедненного слоя (толщина p - n -перехода ω) определяется выражением

$$\omega = \sqrt{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0(\varphi + U)}{qN}}, \quad (3.7)$$

где φ – контактная разность потенциалов, равная $\approx 0,8$ В; U приложенное к переходу обратное напряжение;

$$N = N_a N_d / (N_a + N_d) \quad (3.8)$$

- для случая резкого p - n -перехода. Соответствующее выражение для емкости p - n -перехода имеет вид:

$$C_{y\partial} = \frac{\varepsilon_0\varepsilon}{\omega} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0\varepsilon qN}{2(\varphi + U)}}. \quad (3.9)$$

Почти во всех диффузионных p - n -переходах концентрация примеси со стороны диффузионного слоя намного больше, чем со стороны подложки, то есть такие переходы являются ассиметричными и обедненный слой почти полностью лежит в слабелегированной части перехода. Тогда $N \approx N_d$ для p^+ - n -перехода, $N \approx N_a$ для n^+ - p -перехода.

3.4. ТОНКОПЛЕНОЧНЫЕ РЕЗИСТОРЫ И КОНДЕНСАТОРЫ

Если ранее недавно тонкопленочные резисторы использовались главным образом при изготовлении гибридных ИС, то за последние годы они все шире начинают применяться в производстве монокристаллических ИС по совмещенной технологии. Замена диффузионных резисторов на тонкопленочные дает целый ряд преимуществ: низкий температурный коэффициент сопротивления, низкую паразитную емкость, более высокую радиационную стойкость, более высокую точность номинала и др.

Материалы, используемые при изготовлении резистивных пленок, должны обеспечивать возможность получения широкого диапазона

стабильных во времени резисторов с низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), обладать хорошей адгезией, высокой коррозионной стойкостью и устойчивостью к длительному воздействию повышенных температур. При осаждении материала на подложке должны образовываться тонкие, четкие линии сложной конфигурации с хорошей повторяемостью рисунка от образца к образцу.

Резистивные пленки чаще всего имеют мелкозернистую дисперсную структуру. Наличие дисперсности в структуре пленок позволяет в первом приближении рассматривать их электросопротивление как суммарное сопротивление отдельных гранул и барьеров между ними, при котором характер общего сопротивления определяет величину и знак ТКС. Так, например, если преобладающим является сопротивление самих зерен, то проводимость пленки имеет металлический характер и ТКС будет положительным. С другой стороны, если сопротивление обусловлено прохождением электронов через промежутки между зернами (что обычно имеет место при малых толщинах пленки), то проводимость будет иметь полупроводниковый характер и ТКС соответственно будет отрицательным.

В производстве монолитных ИС используются главным образом высокоомные резисторы. Для того чтобы резисторы имели минимально возможные габариты, они должны изготавливаться с тем же разрешением и допуском, что и другие элементы ИС. Это исключает применение для получения требуемой конфигурации резисторов свободных металлических масок и позволяет осуществлять ее только с помощью фотолитографии.

При изготовлении микро мощных монолитных ИС по совмещенной технологии возникает необходимость разместить на сравнительно небольшой площади кристалла высокоомные резисторы, имеющие сопротивление до нескольких мегаом, что может быть достигнуто только в том случае, если материал резистора будет обладать R_s 10—20 кОм/квдрат. Процесс изготовления резисторов должен быть совмещен с основным технологическим процессом изготовления всей кремниевой ИС по планарной или эпитаксиально-планарной технологии. Так, например резистивные пленки не должны быть чувствительны к присутствию на кремниевой пластинке нитрида кремния, фосфора, боросиликатного стекла и других материалов, используемых в производстве монолитных ИС. Они должны выдерживать сравнительно высокую температуру (500-550°C), которая имеет место в процессе герметизации ИС, и в некоторых случаях не должны изменять свои свойства под воздействием окислительной среды. В

монолитных ИС для изготовления резисторов используются в основном нихром и тантал.

При изготовлении гибридных ИС используется значительно более широкая номенклатура материалов для тонкопленочных резисторов. В качестве низкоомных пленок с R_s от 10 до 300 Ом/квadrat используются пленки хрома, нихрома и тантала. Получение пленок хрома с воспроизводимыми электрофизическими свойствами затруднено его способностью образовывать соединения (особенно окисные) при взаимодействии с остаточными газами в процессе испарения и осаждения. Значительно более стабильными характеристиками обладают резисторы основе хромоникелевого сплава (20% Cr и 80% Ni). Пленки тантала благодаря наличию различных его структурных модификаций имеют очень широкий диапазон поверхностных сопротивлений (от несколько Ом/квadrat для α -тантала до нескольких МОм/квadrat для тантала с малой плотностью). В качестве высокостабильного резистивного материала применяется также нитрид тантала,

Значительное расширение номиналов резисторов достигается путем применения металлокерамических пленок и пленок силицидов некоторых металлов. В этих системах в качестве металла чаще всего используется хром, а в качестве диэлектрика — окислы, бориды, нитриды и силициды переходных металлов, а также окислы некоторых металлоидов. Пленки из дисилицида хрома, так же как и пленки из сплава кремния, хрома и никеля, имеют R_s до 5 кОм/квadrat; у пленок на основе системы хром — моноокись кремния R_s в зависимости от содержания хрома может изменяться от единиц до сотен Ом/квadrat.

Тонкопленочные конденсаторы, несмотря на кажущуюся простоту трехслойной структуры, являются наиболее сложными и трудоемкими по сравнению с другими пленочными пассивными элементами.

В отличие от резисторов, контактных площадок и коммутации, при изготовлении которых достаточно произвести осаждение одного или двух слоев (подслоя и слоя), изготовление тонкопленочных конденсаторов требует по меньшей мере осаждения трех слоев: нижней обкладки, пленки диэлектрика и верхней обкладки (применение большего числа обкладок затрудняет процесс изготовления конденсаторов и удорожает их стоимость).

Материал, используемый для изготовления диэлектрических пленок, должен иметь хорошую адгезию с металлом, используемым для обкладок конденсатора, быть плотным и не подвергаться механическому разрушению

при воздействии температурных циклов, обладать высоким пробивным напряжением и малыми диэлектрическими потерями, иметь высокую диэлектрическую проницаемость, не разлагаться в процессе испарения и осаждения и обладать минимальной гигроскопичностью.

Самыми распространенными материалами, применяемыми в качестве диэлектрика в пленочных конденсаторах, являются моноокись кремния (SiO) и моноокись германия (GeO). В последние годы для этой цели стали применяться алюмосиликатные, боросиликатные и антимонидогерманиевые стекла.

Наиболее перспективными диэлектриками являются композиционные стеклообразные соединения, поскольку у них имеется возможность изменять в широких пределах электрофизические, физико-химические и термодинамические свойства путем подбора состава стекла и реализации особенностей агрегатного состояния стеклообразных систем в тонкопленочных структурах металл — диэлектрик — металл.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ СБИС НА ОСНОВЕ МДП-СТРУКТУР

Полевые транзисторы со структурой металл-диэлектрик-полупроводник относятся к числу униполярных полупроводниковых приборов, работающих на основе эффекта поля. Их называют МДП-транзисторами, в зарубежной литературе — MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, т.е. полевой транзистор металл-окисел-полупроводник), MOS (metal-oxide-semiconductor transistor, т.е. транзистор металл-окисел-полупроводник). Отличительными свойствами МДП транзисторов являются малый уровень шумов и высокая температурная стабильность параметров, высокое выходное сопротивление (несколько МОм), симметричная структура прибора, простая топология. Это обуславливает широкое использование МДП транзисторов в различных видах аналоговых и цифровых интегральных схем.

МДП-транзистор в значительной мере обязан своим появлением на свет успехам планарной технологии, в первую очередь прогрессу в технологической обработке поверхности полупроводников и реализации границы раздела полупроводник-диэлектрик с малой плотностью поверхностных состояний. В зависимости от величины порогового напряжения, различают транзисторы с индуцированным и встроенным каналом, или, как еще их называют, транзисторы обогащенного и обедненного типа. Если при напряжении на затворе, равном нулю,

инверсионный канал в транзисторе существует, это МДП-транзистор со встроенным каналом, или обедненного типа. Если для формирования инверсионного канала между областями истока и стока к затвору транзистора необходимо приложить напряжение, то это МДП-транзистор с индуцированным каналом, или обогащенного типа.

Поскольку в качестве диэлектрика в МДП-транзисторах в основном используются термически выращенная двуокись кремния, часто используется название МОП транзистор. Так как затвор в МДП-транзисторе отделен от канала диэлектриком, то МДП-транзистором называют также полевой транзистор с изолированным затвором.

4.1. СТРУКТУРА МДП ТРАНЗИСТОРА

МДП транзистор состоит из истока, стока, затвора и подзатворного диэлектрика. Исток и сток - сильно легированные области противоположного подложке типа проводимости. Затвор - проводящая площадка, лежащая над областью инверсионного канала. Подзатворный диэлектрик - диэлектрический слой, отделяющий электрод затвора от области инверсионного канала. Чтобы оказывать малое сопротивление току стока, области истока и стока обычно сильно легируют и обозначают значком n^+ для n канальных транзисторов или значком p^+ для p канальных транзисторов. На схемах исток МДП-транзистора обычно обозначают латинскими буквами S, сток - D, затвор - G и подложку буквами SB, первыми буквами от их английских наименований (Source, Drain, Gate, Substrate). Основная структура полевого транзистора металл-окисел-полупроводник (МОП-транзистора) показана на рис.4.1 на примере n -канального транзистора.

Этот четырехполюсный прибор состоит из полупроводниковой подложки p -типа, в которой сформированы (например, с помощью ионной имплантации) две высоколегированные области - сток и исток. Металлический электрод, отделенный от подложки слоем окисла, называется затвором. В последнее время в качестве затвора используются высоколегированный поликремний, а также некоторые комбинации поликремния и силицидов.

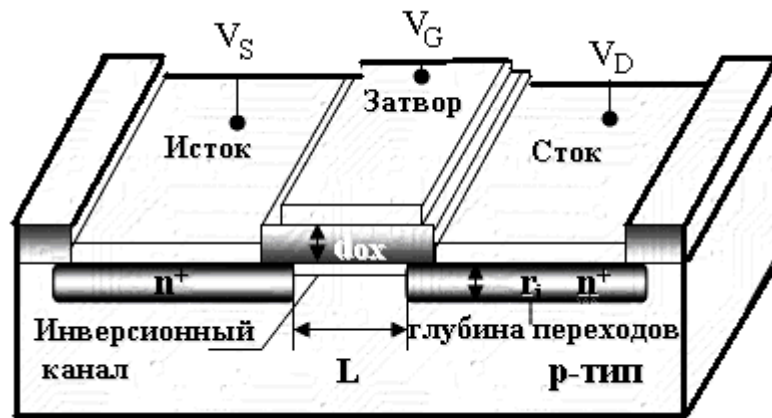


Рис. 4.1. Структура полевого транзистора с изолированным затвором (МДП-транзистора)

Основными геометрическими параметрами структуры являются: - длина канала L - расстояние между металлургическими границами n^+ - p -переходов стока и истока; - ширина канала Z ; толщина слоя изолятора d ; глубина переходов r_j ; уровень легирования подложки N_A . В кремниевых интегральных схемах отдельный МОП-транзистор окружен в целях изоляции областью с толстым слоем окисла, который называется пассивирующим или полевым (в отличие от тонкого слоя подзатворного окисла).

Рассматривая работу прибора, мы будем все напряжения отсчитывать от потенциала истока, т. е. считать его заземленным. Когда напряжение на затворе отсутствует, электрическая цепь исток - сток представляет собой два n^+ - p -перехода, включенных навстречу друг другу. При этом в ней может протекать очень малый ток, равный току утечки обратно-смещенного перехода. Если же к затвору приложено достаточно большое положительное напряжение, у границы с диэлектриком образуется инверсионный слой или канал, соединяющий n^+ -области стока и истока. Затворное напряжение, которое необходимо для индуцирования проводящего канала у поверхности полупроводника называется пороговым. Проводимость этого инверсионного канала модулируется при изменении напряжения на затворе. Тыловой контакт к подложке может находиться либо под тем же опорным потенциалом, что и исток, либо под напряжением, соответствующим обратному смещению n^+ - p -перехода исток-подложка. Напряжение обратного смещения подложки также влияет на проводимость инверсионного канала.

Отметим, что для нормально закрытого прибора, чтобы получить заметный ток стока, нужно приложить к затвору достаточно большое

смещение ("+"для *n*-канального, "-"для *p*-канального), превышающее пороговое напряжение. В нормально открытых приборах значительные токи могут протекать уже при $V_G=0$, а смещение затвора увеличивает или уменьшает их величину. В таблице 4.1. приведены символьные обозначения, передаточные характеристики четырех основных типов МОП-транзисторов.

Напряжение затвора, при котором через канал начинает протекать ток стока, называется пороговым напряжением. Пороговое напряжение U_T имеет две составляющие:

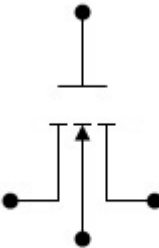
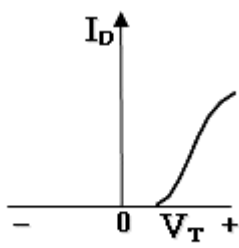
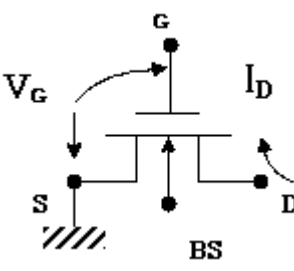
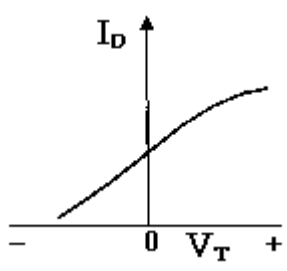
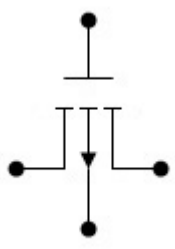
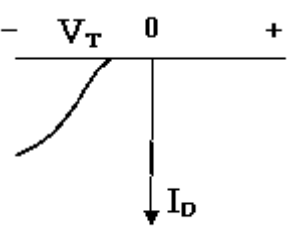
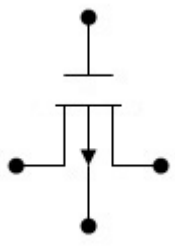
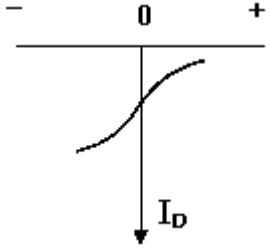
$$U_T = U_{cnp} + U_{изг} \quad (4.1.)$$

где U_{cnp} -напряжение спрямления энергетических зон; $U_{изг}$ -напряжение изгиба энергетических зон. Первая из этих составляющих компенсирует начальный изгиб зон на границе раздела между полупроводником и диэлектриком, вторая - обеспечивает изгиб зон для создания инверсионного проводящего канала. Напряжение спрямления энергетических зон (называемое также напряжением плоских зон) зависит от заряда поверхностных состояний, встроенного и подвижного заряда в окисле, контактного потенциала затвор-кремний. Из-за загрязнения подзатворного окисла положительными ионами и присутствия донорных поверхностных состояний на границе раздела окисел-кремний пороговое напряжение *n*-канальных МОП-транзисторов зачастую оказывается очень малым (< 1 В). В некоторых случаях пороговое напряжение - *n* -МОП транзистора может иметь даже небольшую отрицательную величину, что свидетельствует о существовании инверсионного *n* -слоя даже в отсутствие напряжения на затворе. В *p*-канальных МОП-приборах те же эффекты приводят к тому, что пороговое напряжение оказывается довольно большим (~ -5 В). При помощи ионной имплантации можно регулировать пороговое напряжение, вводя очень малую дозу ионов низкой энергии (10^{11} - 10^{12} см⁻², 30 кэВ) через подзатворный диэлектрик в область канала и изменяя при этом концентрацию примеси у поверхности кремния.

С помощью имплантации ионов бора можно сдвинуть пороговое напряжение в положительную сторону как для *n* -канальных, так и для *p*-канальных МОП-приборов. В результате имплантации на поверхности кремния формируется тонкий слой отрицательно заряженных акцепторных ионов.

Таблица 4.1.

Символьные обозначения и передаточные характеристики
 четырех основных типов МОП-транзисторов

Тип	Электрический символ	Передаточные характеристики
<p><i>n</i>-канал Нормально закрытый (обогащенного типа)</p>		
<p><i>n</i>-канал Нормально открытый (обедненного типа)</p>		
<p><i>p</i>-канал Нормально закрытый (обогащенного типа)</p>		
<p><i>p</i>-канал Нормально открытый (обедненного типа)</p>		

Появление этого заряда приводит к сдвигу порогового напряжения на величину

$$\Delta U_T = \frac{\Delta Q}{c_{ок}}, \quad (4.2)$$

где $\Delta Q = q\Phi$ - удельный заряд, создаваемый имплантированными ионами; $c_{ок} = \epsilon_o \epsilon / d_o$ - удельная емкость затвора МОП-транзистора; d_o - толщина подзатворного окисла.

4.2. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ НА МОП-ТРАНЗИСТОРАХ

С технологической точки зрения изготовление МОП – транзисторов значительно проще биполярных транзисторов. Это можно видеть из сравнительного анализа данных таблицы 4.2.

Таблица 4.2.

Сравнение ключевых процессов и условий технологии производства биполярных и МОП – интегральных схем.

Биполярная технология	МОП - технология
4-7 процессов легирования (имплантация и/или диффузия)	1-3 процесса легирования (имплантация, диффузия)
Необходимость полной изоляции элементов (изолированных островков)	К изоляции предъявляются менее жёсткие требования
Эпитаксиальный процесс является одной из основных операций	Эпитаксиальный процесс не обязателен
Используется от 6 до 10 фотолитографий	Используется 4 - 6 фотолитографий
Более 100 технологических операций	Около 30 технологических операций
10 процессов с температурой около (или выше) 1000 С	2 процесса с температурой около (или выше) 1000 С
Коэффициент передачи транзистора зависит от режимов легирования и термообработки	Коэффициент передачи транзистора существенно не зависит от режимов легирования

Простейшая технология производства *n*-канального прибора с алюминиевым затвором по диффузионной технологии включает следующие стадии:

1. Исходный материал - кремний *p*-типа.
2. Термическое окисление: окисел толщиной ~ 1 мкм.
3. Первая фотолитография: вскрытие окон в окисле для диффузии истока и стока.
4. Диффузия фосфора для получения областей истока и стока.
5. Вторая фотолитография: удаление толстого окисла над областью канала.
6. Термическое окисление: выращивание тонкого подзатворного окисла толщиной $\sim 80-100$ нм.
7. Третья операция фотолитографии: вскрытие контактных окон.
8. Металлизация: напыление тонкой пленки алюминия.
9. Четвертая фотолитография: формирование рисунка электрода затвора и контактной металлизации истока и стока.
10. Вжигание металлизации.
11. Нанесение металлизации на тыльную сторону пластины.

Если в качестве проектной нормы для всех зазоров и промежутков принять величину d_{\min} (минимально допустимое значение, определяемое уровнем развития фотолитографии), то габаритные размеры транзистора будут примерно определяться как $7,5 d_{\min} \times 3 d_{\min}$. Для МОП транзисторов может быть получена значительно более высокая плотность упаковки, чем для биполярных транзисторов. В настоящее время используется в основном технология изготовления МОП транзисторов и поликремниевыми затворами, при этом для уменьшения паразитных емкостей области истока и стока создаются ионной имплантацией. Основные этапы такого технологического процесса представлены на рис. 4.2 (а, б, в).

Исходный материал - подложки слаболегированного (порядка 10^{15} см^{-3}) кремния *p* - типа с ориентацией поверхности вдоль (001) плоскости. Выбор подложек с ориентацией (001) обусловлен значительно меньшей (на порядок) плотностью поверхностных состояний по сравнению с ориентацией (111).

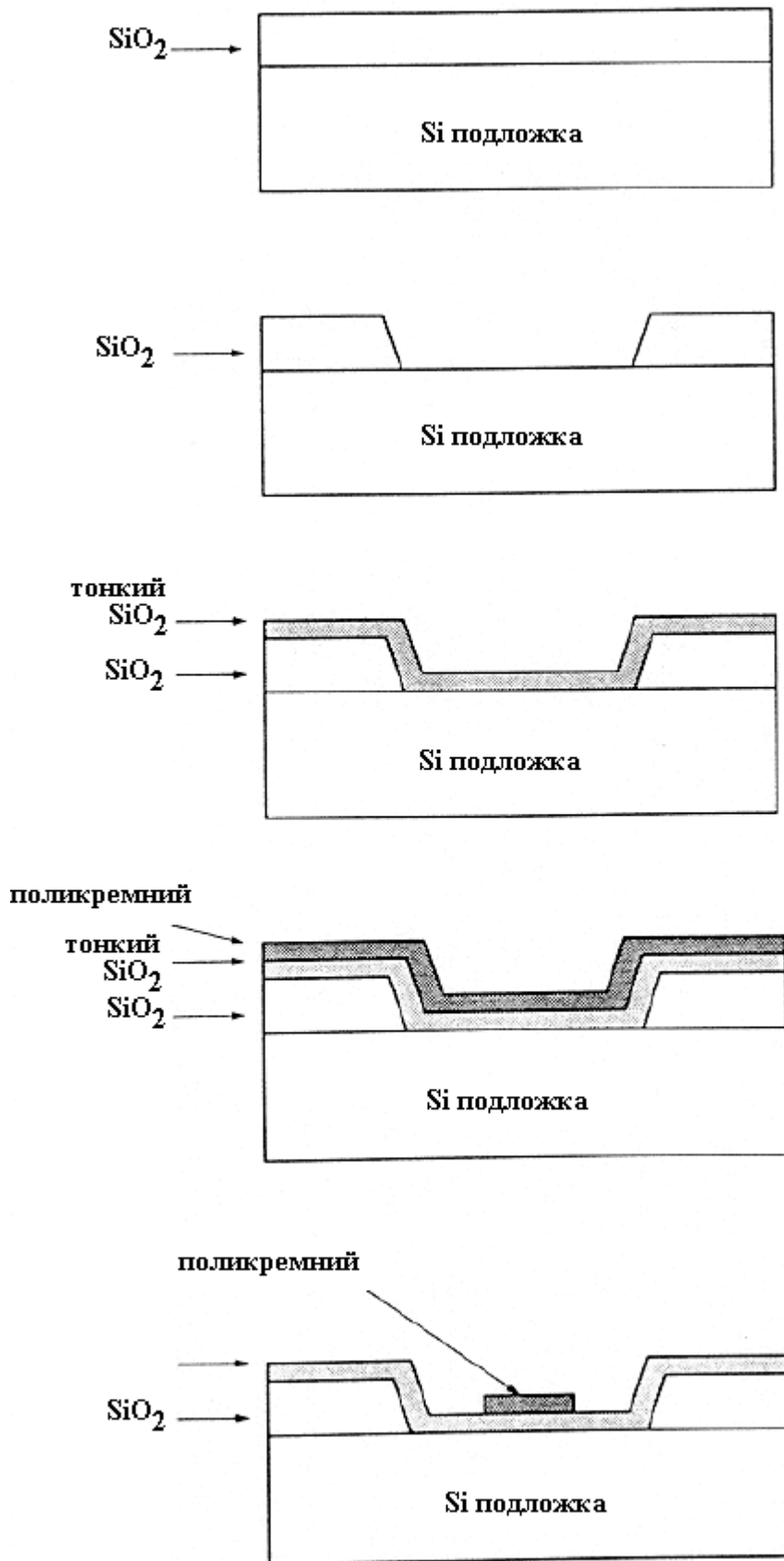


Рис.4.2.(а) Технологический процесс создания МОП-транзистора с поликремниевым затвором. Формирование затвора.

При выборе уровня легирования подложки принимают во внимание следующие обстоятельства. Чем слабее легирована подложка, тем менее чувствительно пороговое напряжение транзистора к смещению на подложке и тем меньшая емкость возникает между областями истока, стока и подложкой. Однако если подложка легирована слишком слабо, обедненные области истока и стока могут соприкоснуться, приводя к проколам транзисторов. В дополнение, слаболегированные подложки имеют высокую концентрацию неосновных носителей заряда, что увеличивает токи утечки p - n переходов при их обратном смещении. Эту проблему можно решить двумя способами. Один из них заключается в выращивании слаболегированных эпитаксиальных слоев p – типа на сильнолегированных подложках p - типа ($\sim 10^{19}$ см⁻³). Сильнолегированные подложки имеют низкую концентрацию неосновных носителей заряда (электронов), поэтому диффузионный ток в обратно смещенных переходах подавляется, несмотря на большую диффузионную длину неосновных носителей в эпитаксиальном слое.

Второй подход к решению проблемы основан на использовании эффекта внутреннего гетерирования. Под транзисторами формируют преципитаты SiO₂, которые снижают время жизни неосновных носителей заряда.

Подлегирование области канала обычно проводится для регулировки величины порогового напряжения МОП ПТ. Для получения транзисторов, работающих в режиме обеднения, имплантируют ионы фосфора (n -канал), для режима обогащения - ионы бора (p - канал). Имплантацию проводят через тонкий слой окисла. Дозу и энергию имплантации выбирают, исходя из требуемой величины порогового напряжения с учетом толщины окисла. В связи с тенденцией уменьшения длины канала в технологии СБИС применяют более глубокую имплантацию ионов с большей дозой (или двухстадийную имплантацию с различными дозами и энергиями): это позволяет избежать перекрытия обедненных истоков - стоковых областей. Вместе с тем увеличение концентрации примеси в области канала приводит и к нежелательным последствиям, т. к. сопровождается уменьшением подвижности носителей заряда.

Формирование затвора (рис. 4.2.а) производят путем осаждения поликристаллического кремния (поли-Si) в соответствующую область транзистора, при этом при осаждении поли-Si легируют фосфором до высокой концентрации носителей.

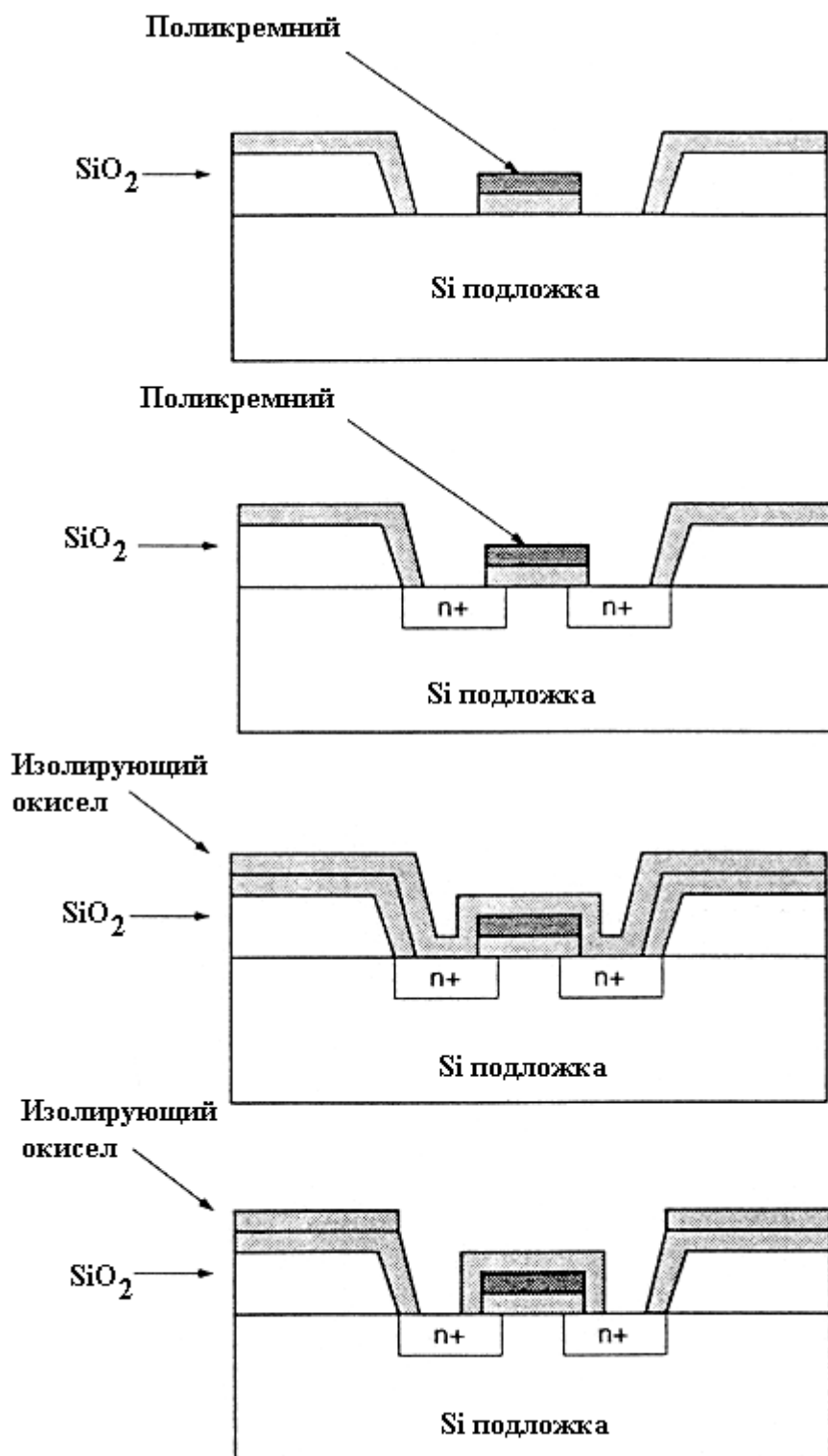


Рис.4.2.(б) Технологический процесс создания МОП-транзистора с поликремниевым затвором. Формирование областей истока и стока.

Выбор поликремния обусловлен его способностью хорошо выдерживать высокотемпературную термообработку, а также одинаковой величиной

работы выхода, что упрощает регулировку пороговых напряжений МОП транзисторов. Вместе с тем сопротивление поликремния достаточно велико, что может приводить к значительной задержке сигнала, проходящего по таким шинам, особенно при большой их длине (например, общая шина для большого количества МОП – транзисторов). Поэтому в последнее время формируют многослойные затворы с применением слоёв силицидов тугоплавких металлов. Многослойный полицидный затвор имеет низкое слоевое сопротивление при сохранении электронных свойств границы раздела поли Si – SiO₂. Области истока и стока формируют высокодозной имплантацией ионов As в условиях их самосовмещения с каналом; при этом слои LOCOS – изоляции и затвора играют роль маскирующего покрытия, которое обеспечивает локальность легирования.

Для формирование областей истока и стока (рис. 4.2.б) более других подходит мышьяк, который позволяет получать мелкие *p-n*-переходы с минимальной диффузией в горизонтальном направлении. Доза имплантируемой примеси обычно достаточно высока и лежит в диапазоне 10¹⁵- 10¹⁶ см⁻², что обеспечивает формирование низкоомных областей истока и стока. Энергия имплантируемых ионов должна быть достаточно высокой, чтобы они смогли проникнуть через пленку подзатворного окисла, но в то же время достаточно низкой для предотвращения их проникновения через пленку поликремния и области локального окисления. Формируемые таким образом области истока и стока самосовмещаются с затвором. Такое самосовмещение способствует минимизации перекрытия затвора с областями истока и стока, из которых примесь диффундирует в поперечном направлении. Тем самым обеспечивается снижение емкостей связи.

После легирования областей истока и стока проводят отжиг имплантационных дефектов, для которого используют окисляющую среду. При этом, наряду с отжигом дефектов и электрической активацией примеси, происходит рост термического окисла, в том числе на поверхности и боковых стенках поликремневого затвора. Слой окисла служит для электрической изоляции исток-стоковых областей от затвора, а также для защиты областей истока и стока от проникновения фосфора из осаждаемого на последующих стадиях фосфорно - силикатного стекла (ФСС). Слой ФСС получают осаждением окисла из парогазовой смеси (методом CVD или LPCVD) с одновременным легированием фосфором до концентрации 6-8 ат %. При таких концентрациях фосфора окисел приобретает свойство размягчаться вплоть до оплавления при его нагреве до температуры 1000-1100 °С (при

меньшей концентрации процесс растекания затруднен, а концентрация фосфора выше 8 ат % может вызвать коррозию алюминиевой металлизации кислотными продуктами реакции фосфора с атмосферной влагой).

В интегральных схемах фосфорно-силикатное стекло выполняет несколько функций. Фосфор в таком стекле защищает лежащую под ним структуру прибора от подвижных ионов (Na^+) и, кроме того, он делает стекло вязким, облегчая его оплавление при повышенной температуре (этот высокотемпературный процесс может быть также использован для дополнительного активирования и разгонки примеси, имплантированной в области истока и стока). Оплавление фосфорно силикатного стекла сглаживает рельеф, что улучшает воспроизведение ступенчатого рельефа при его покрытии металлической плёнкой и способствует облегчению формирования топологического рисунка слоя металлизации. Наконец, слой ФСС изолирует металлический слой от поликремниевых шин. Для создания контакта между ними в слое ФСС вскрывают окна, после чего для сглаживания крутых боковых стенок окон проводят повторное оплавление ФСС: такие структуры пригодны для нанесения металлизации.

Металлизация (рис. 4.2.в). На последнем этапе проводят осаждение металлического слоя для изготовления контактов к областям истока, стока и затвора, а также межэлементных проводящих соединений внутри интегральных схем. При этом контакт к слою поликристаллического кремния обычно выполняют вне активных областей транзистора. Это связано с тем, что за счёт быстрой диффузии алюминия через слой поликристаллического кремния (диффузия по границам зёрен, усиленная электрическим полем в области контакта) атомы алюминия могут достигать слоя подзатворного диэлектрика и приводить к частичному раскислению SiO_2 . Слой подзатворного диэлектрика делают обычно тонким, поэтому даже небольшое его повреждение приводит к существенному изменению характеристик МОП – полевых транзисторов, вплоть до их полного повреждения.

Перевод МОП ИС на поликремниевый затвор существенно улучшил все эксплуатационные показатели ИС. Это связано с несколькими факторами. Во-первых, было снижено напряжение питания микросхем за счёт устранения контактной разности потенциалов φ_k между алюминием и кремнием ($\varphi_k = 0,8 \text{ В}$) в то время как для Si-Si^* $\varphi_k = 0$.

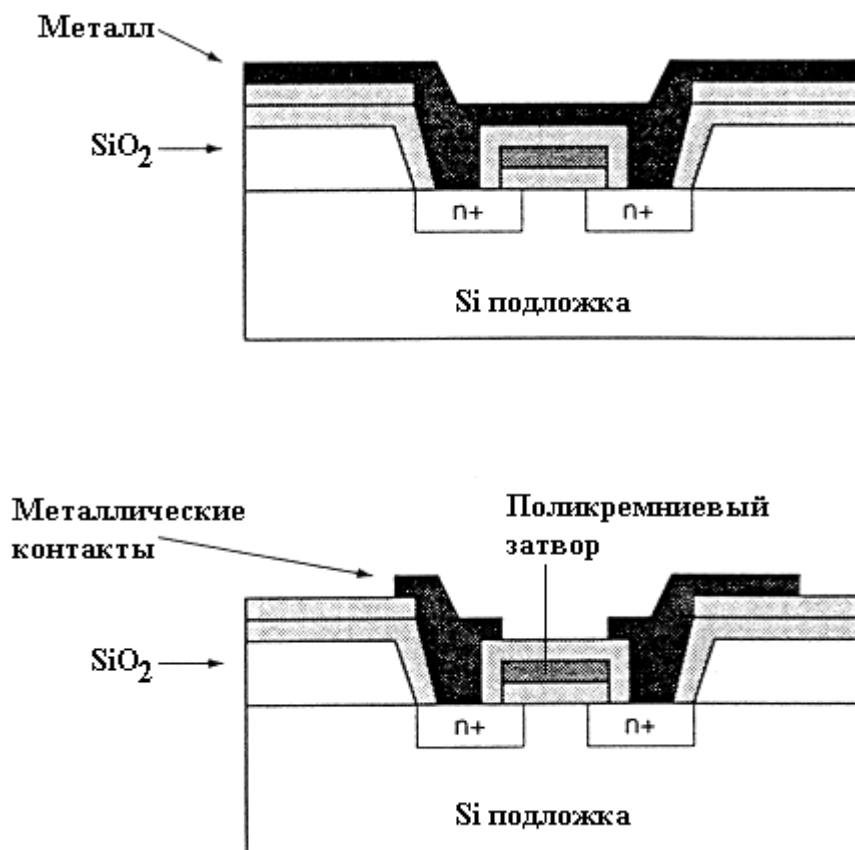


Рис.4.2.(в) Технологический процесс создания МОП-транзистора с поликремниевым затвором. Формирование металлических контактов

Во-вторых, применение в качестве материала затвора Si^* вместо Al позволило использовать новое конструктивно-технологическое решение: технологию самосовмещённого затвора. Это привело к существенному уменьшению длины канала и затвора. Переход от р-канальных МОП ИС к *n*-канальным существенно улучшает их рабочие характеристики. Это связано, с одной стороны, с тем, что подвижность электронов почти в три раза выше, чем подвижность дырок ($\mu_n = 1450 \text{ см}^2/\text{Вс}$; $\mu_p = 500 \text{ см}^2/\text{Вс}$). При прочих равных условиях только за счёт разности в подвижностях быстродействие ИС возрастает в два – три раза.

При переходе к высокой степени интеграции СБИС особую роль приобретает изоляция отдельных активных транзисторов для подавления паразитных электрических связей. На рисунке 4.3 показаны два смежных *n*-канальных МОП транзистора. Направление проводимости активных транзисторов перпендикулярно поликремневному затвору. Однако под затвором между соседними транзисторами могут возникать паразитные транзисторы, как это показано на рисунке 4.3.

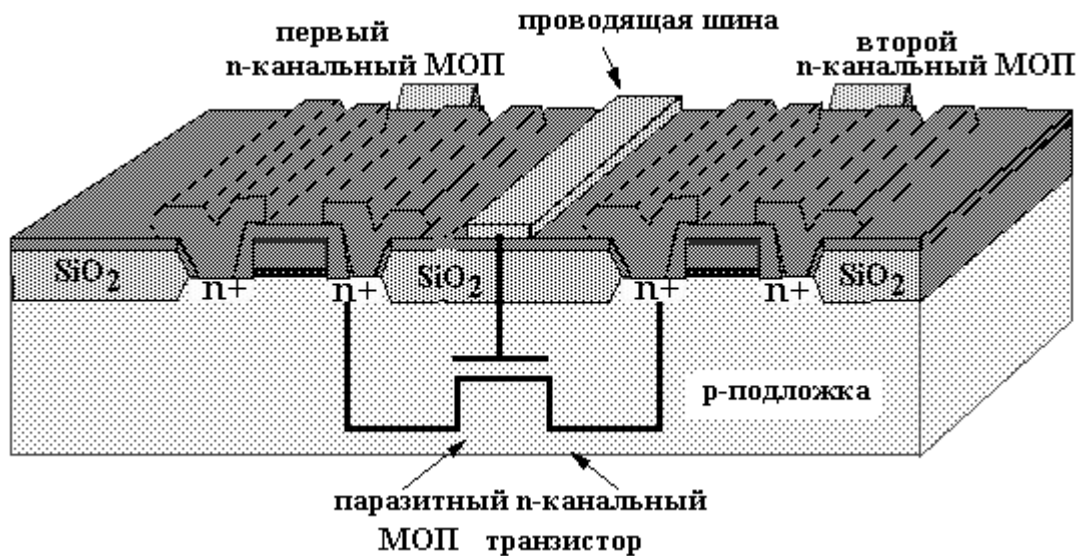


Рис.4.3. Формирование паразитного *n*-канального полевого транзистора с толстым окислом между соседними МОП-транзисторами в ИС

Для того, чтобы устранить возможность появления проводимости между соседними транзисторами, пороговое напряжение паразитных транзисторов должно быть очень высоким. Это достигается путем формирования толстого заглубленного слоя окисла между активными транзисторами. При формировании МОП структур используют LOCOS – изоляцию, основанную на локальном окислении предварительно протравленных участков кремния. Процесс локального окисления аналогичен процессу, используемому для изоляции биполярных транзисторов, за исключением того, что при изоляции МОП локальный окисел не должен пронизывать всю толщину эпитаксиального слоя. Наряду с хорошими изолирующими свойствами, достоинством LOCOS-метода является преимущественное заглубление окисла в подложку, так что поверхность остается почти плоской (это важно при проведении процессов фотолитографии). В дополнение, для более эффективной изоляции методом LOCOS можно формировать области p^+ , ограничивающие распространение инверсного канала (охранные кольца). Доза имплантации при легировании ограничительных областей обычно составляет 10^{13} см^{-2} ; энергия имплантации выбирается достаточной для глубокого проникновения примеси с учетом частичного окисления слоя.

4.3. КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КМДП ИС

КМДП – комплиментарные полевые транзисторы (“complementary” – дополняющий). КМДП структуры ИС являются основным элементом микромощной электроники, так как КМДП ИС – самые экономичные по расходу электроэнергии и по тепловыделению в процессе работы, имеют большую помехоустойчивость и высокую нагрузочную способность по выходу. Поэтому КМДП ИС завоёвывают ведущее положение в схемах оперативной памяти и в конструкциях процессоров как персональных компьютеров, так и больших ЭВМ. Основным элементом таких ИС является КМДП (чаще всего КМОП) инвертор, который образован двумя полевыми транзисторами: один с p -каналом, другой с n -каналом (рис.4.4).

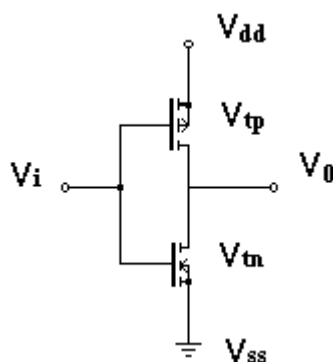


Рис.4.4. Принципиальная схема КМОП-инвертора.

Технология комплементарных МОП-структур заключается в формировании n - и p -канальных транзисторов на одном кристалле. Основным преимуществом КМОП-схем является малая потребляемая мощность, так как и в состоянии логического «0», и в состоянии логической «1» один из транзисторов КМОП-пары оказывается запертым, и заметный ток будет протекать только в моменты переключения. Другим важным преимуществом таких схем является большая разница уровней сигнала логического «0» и «1», что повышает помехоустойчивость схемы. К их недостаткам следует отнести несколько меньшую степень интеграции и большее время переключения, т. к. на каждый функциональный элемент приходится дополнительная площадь. Используются КМОП СБИС в основном в качестве цифровых логических элементов.

На рис. 4.5. представлена структура и топология КМОП-инвертора. В подложке n -типа формируют p -канальный транзистор, а n -канальный

транзистор формируют в области p -типа, которую создают в той же подложке и часто называют p -карманом. Затворы n - и p -канального транзисторов соединены между собой и являются входом инвертора. Соединенные стоки обоих приборов являются выходом инвертора. Изготовление инвертора начинается с создания глубокого p -кармана путем диффузии бора при низкой поверхностной концентрации. Затем с помощью диффузии фосфора создаются n^+ -области истока и стока. p -МОП-транзистор изготавливается по обычной технологии. Транзисторы имеют пороговые напряжения $V_{Tn} > 0$ и $V_{Tp} < 0$.

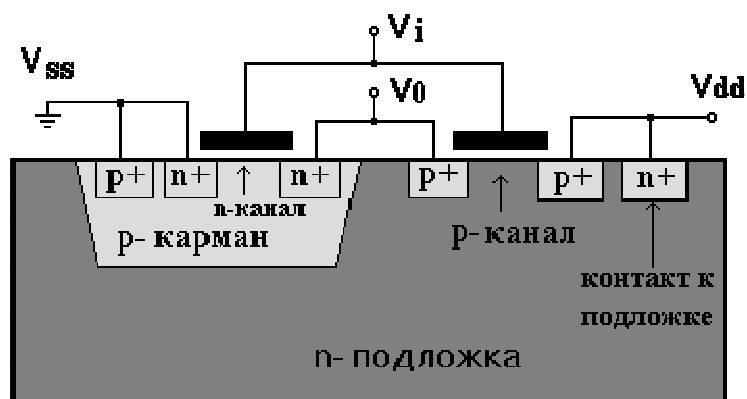


Рис.4.5. Структура КМОП-инвертора и приложенные напряжения.

При отсутствии напряжения на входе $V_i = 0$ n -канальный транзистор закрыт ($V_i \ll V_{Tn}$), а p -канальный транзистор открыт, т. к. его затвор находится под более отрицательным потенциалом, чем сток и подложка. Следовательно, при $V_i = 0$ напряжение на выходе инвертора V_0 равно напряжению питания $V_0 = V_{dd}$. Увеличивая напряжение на входе инвертора, мы закрываем p -канальный транзистор ($V_i - V_{dd} > -|V_{Tp}|$) и открываем n -канальный. Таким образом при $V_i > (V_{dd} - |V_{Tp}|)$ напряжения на выходе инвертора и общей шине V_{ss} будут равны друг другу, что соответствует логическому нулю. Важно, что в любом логическом состоянии один из транзисторов всегда закрыт и ток через инвертор не протекает, а, следовательно, потребляемая им мощность крайне незначительна.

В данной структуре минимальное расстояние между n и p -канальными МОП-транзисторами складывается из расстояния между границей стоковой области p -канального транзистора и n -кармана (l_1) и расстоянием между n -

карманом и стоком n -канального транзистора (l_2). Величина l_1 должна быть больше, чем ширина области пространственного заряда (ОПЗ) ω_1 вокруг стоковой p^+ -области при низком выходном уровне (p -канальный транзистор закрыт, n -канальный транзистор открыт), а l_2 больше ширины ОПЗ ω_2 вокруг стоковой- n^+ -области при высоком выходном уровне (p -канальный транзистор открыт, n -канальный транзистор закрыт) при максимальном напряжении питания.

Длина канала сильно влияет на быстродействие, при прочих равных условиях время задержки логического элемента прямо пропорционально квадрату длины канала. Это можно объяснить тем, что сопротивление канала прямо пропорционально его длине, емкость затвор-подложка также прямо пропорциональна длине канала. Соответственно постоянная времени, равная произведению сопротивления канала и емкости, прямо пропорциональна квадрату длины канала. Поэтому для повышения быстродействия МОП ИС длину канала стараются уменьшать. Минимальная длина канала ограничивается технологическими возможностями при производстве микросхем. Ширина канала (для внутренних элементов микросхемы) слабо влияет на быстродействие, т.к. сопротивление канала ей обратно пропорционально, а емкость прямо пропорциональна. Произведение их в первом приближении не зависит от ширины канала. Однако ширина канала определяет выходной ток (он ей прямо пропорционален), поэтому для каскадов, работающих на внешние выводы микросхемы, приходится делать ширину канала большой, чтобы обеспечить нужный выходной ток и необходимую скорость пережаряда емкости нагрузки (она во много раз больше паразитных емкостей внутренних цепей микросхемы).

На практике ширина канала всегда больше длины канала, а для транзисторов выходных каскадов микросхем - во много раз больше длины, может достигать 1 мм и более. Длина канала в "медленных" КМОП ранних типов была равна 5-10 мкм, а длина канала МОП-транзисторов самых быстрых современных микропроцессоров и микросхем памяти достигла 32 нм.

Большая напряженность электрического поля в канале вызывает дрейф атомов примесей в полупроводнике. Это приводит к деградации параметров МОП транзистора, а потом и полному его отказу. Чтобы скорость деградации параметров была достаточно мала, требуется, чтобы на 1 мкм длины канала приходилось не более 10 вольт. В связи с этим приходится снижать напряжение питания у сверхбыстродействующих микросхем, именно этим

объясняется то, что у современных микропроцессоров напряжение питания ядра процессора около 1 вольта.

Технологические этапы создания КМОП инвертора с двойным диэлектриком укрупнено представлены на рис. 4.6 (а, б, в). Карман может быть выполнен методом диффузии из ограниченного источника. Затем проводятся операции нанесения подзатворного диэлектрика и фотолитографии по нему; локальное окисление областей, не закрытых маской Si_3N_4 нанесения изолирующего окисла, осаждения поликремния из газовой фазы и фотолитография по поликремнию; затем ионная имплантация донорных и акцепторных примесей, осаждение пассивирующего и планаризирующего покрытия, создание металлизации.

Получаемый в подложке *n*-типа (*p*-типа) проводимости путем компенсирующего легирования карман соответственно *p*-типа (*n*-типа) являлся ведущим конструктивным приемом получения КМОП-структур на начальном этапе их осуществления. Однако карман, изолированный обратнo-смещенным *p-n* переходом обладает рядом недостатков. Главным из них является «эффект защелкивания».

На рис. 4.5. видно, что в предложенной КМОП- структуре присутствует $p^+ - n - p - n^+$ структура, которая образуя паразитный тиристор, включенный между выводами земли и питания. При протекании прямого тока через любой из диодов (а этот ток идет если напряжение на входе или выходе станет выше напряжения питания или ниже напряжения земли) этот тиристор может включиться, причем для включения достаточно короткого (микросекунда или менее) импульса тока. Данный эффект называется защелкиванием КМОП микросхемы. Тиристор, включившись, остается включенным независимо от прекращения тока, вызвавшего включение. Это приводит к короткому замыканию между землей и питанием через малое сопротивление включенного тиристора (после чего либо срабатывает защита источника питания, либо сгорает микросхема КМОП, или подводящие к ней питание проводники, или источник питания. Единственный способ выключить тиристор - это снять питание.

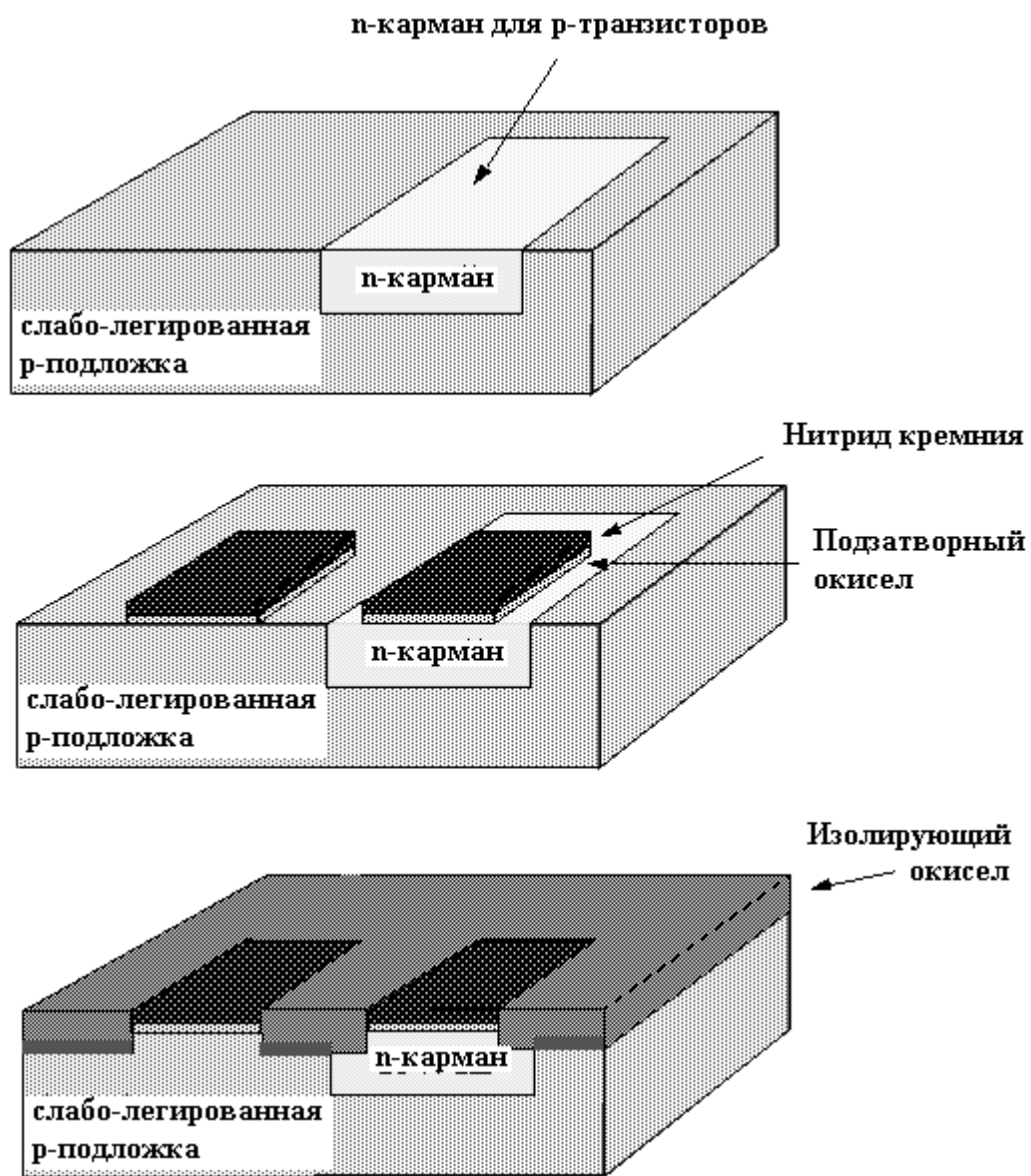


Рис.4.6.(а). Технологические этапы создания КМОП-инвертора.
Формирование кармана и подзатворного диэлектрика.

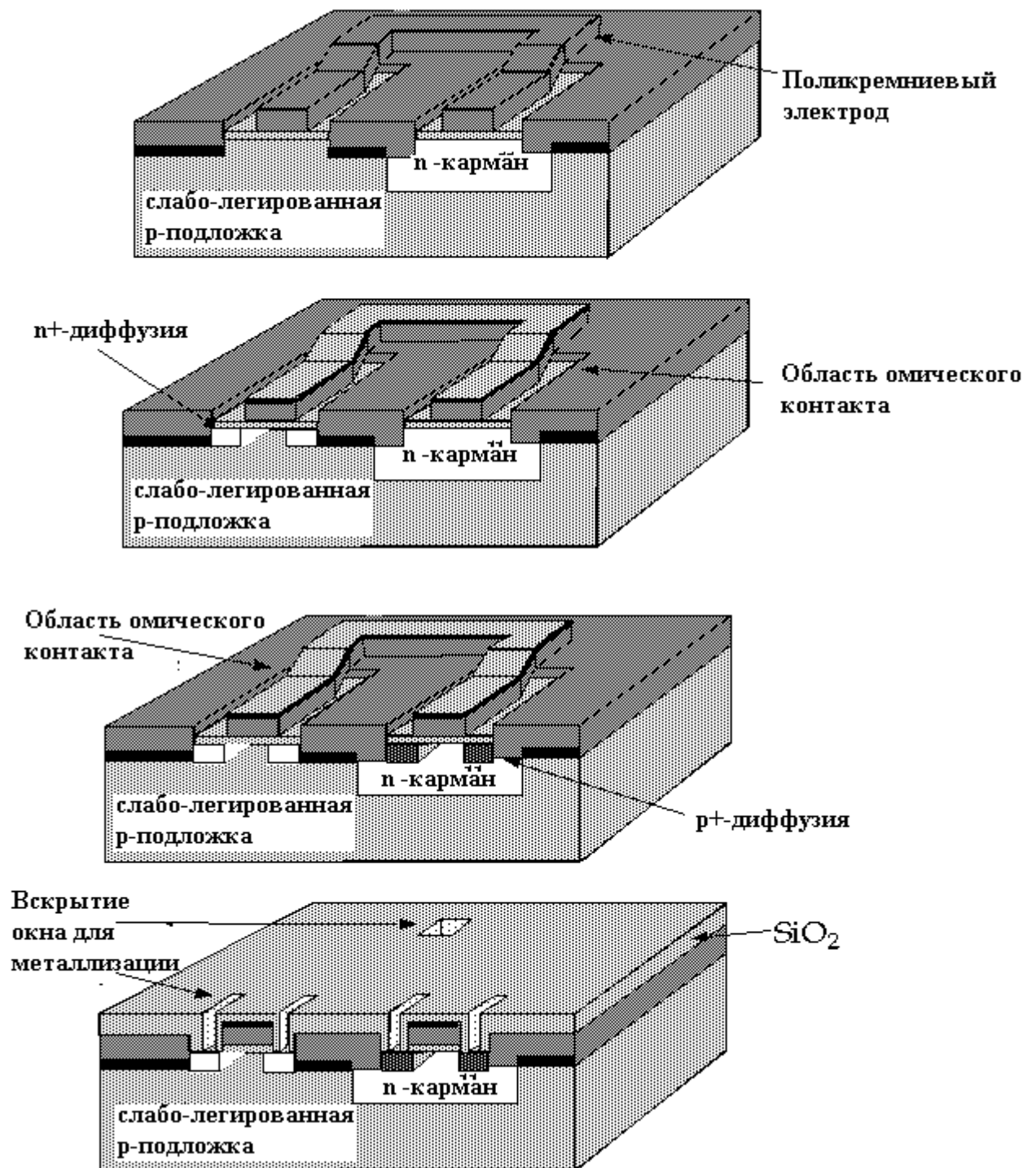


Рис.4.6(б). Технологические этапы создания КМОП-инвертора. Формирование поликремниевых затворов и областей истока и стока.

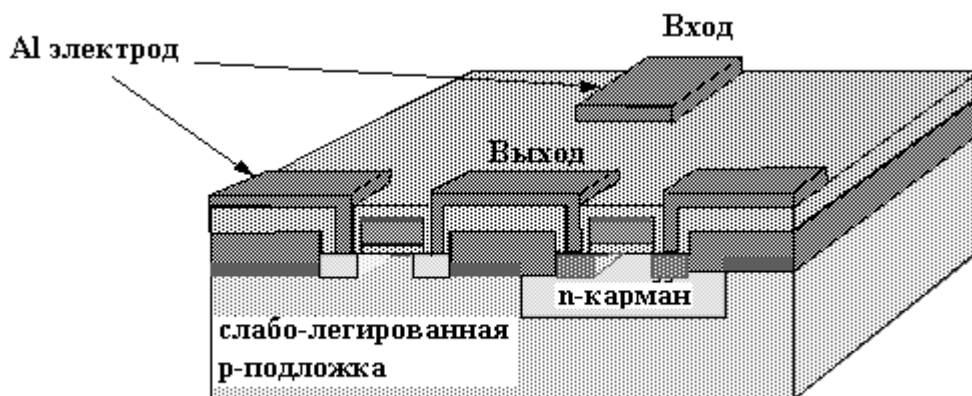


Рис.4.6(в). Технологические этапы создания КМОП-инвертора.
Формирование металлизации.

У КМОП микросхем ранних выпусков защелкивание могло наступить при токах входа или выхода около 10 мА. Этот ток может быть вызван разными причинами - подачей напряжения ниже уровня земли или выше уровня питания с внешних схем, работой разных частей КМОП устройства от разных источников питания (что может привести к разнице напряжений питания порядка 2 вольт, что вполне достаточно для протекания начительных токов), наличием в схеме релаксационного генератора, емкость в составе которого при переключении подает на вход элемента напряжение выше питания или ниже земли. Для того, чтобы избежать защелкивания, надо чтобы токи входных или выходных диодов КМОП микросхемы даже на краткое время не превышали 1-2 мА (это дает необходимый запас), в частности, в релаксационных генераторах последовательно с емкостью включают резистор соответствующего номинала. Эти токи могут возникать из-за воздействия импульсной радиации (радиационное защелкивание) или из-за резких скачков напряжений на выводах ИС (электрически стимулированное защелкивание). Как правило, анализ отказов ИС из-за эффектов защелкивания производится в отдельности для каждого из возможных механизмов защелкивания. Вместе с тем в реальных условиях эксплуатации возможно совместное воздействие импульсного ионизирующего излучения и сигналов электрических помех. Источник питания КМОП должен иметь быстродействующую защиту, обеспечивающую полное его выключение при перегрузке. Эффект защелкивания полностью исключается при создании структур на

изолирующей подложке (структур «кремний-на-сапфире» (КНС) или «кремний-на-диэлектрике» (КНД)).

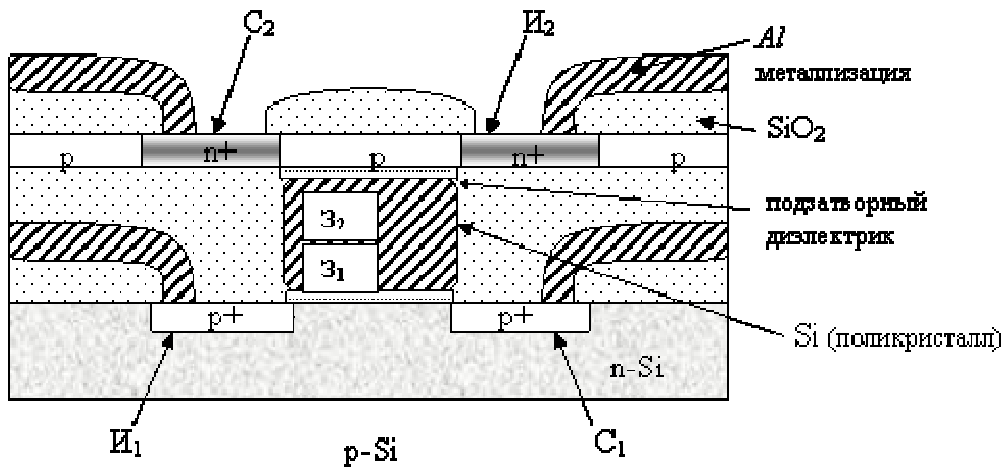


Рис.4.7. Структура КМОП-инвертора с трехмерной интеграцией

Создание КМОП-структур с трехмерной интеграцией (см. рис. 4.7.) не только полностью исключает эффект защелкивания, но и значительно повышает плотность упаковки и, следовательно, степень интеграции КМОП ИС. При этом p -канальные и n -канальные транзисторы создаются в разных уровнях - в объемном монокристалле n -типа (1-й уровень) и в гетероэпитаксиальной пленке кремния p -типа, полученной на изолирующем слое (2-й уровень). Логические элементы И-НЕ и ИЛИ-НЕ на КМОП инверторах создаются путем последовательного или параллельного соединения входов инверторов (рис.4.8.)

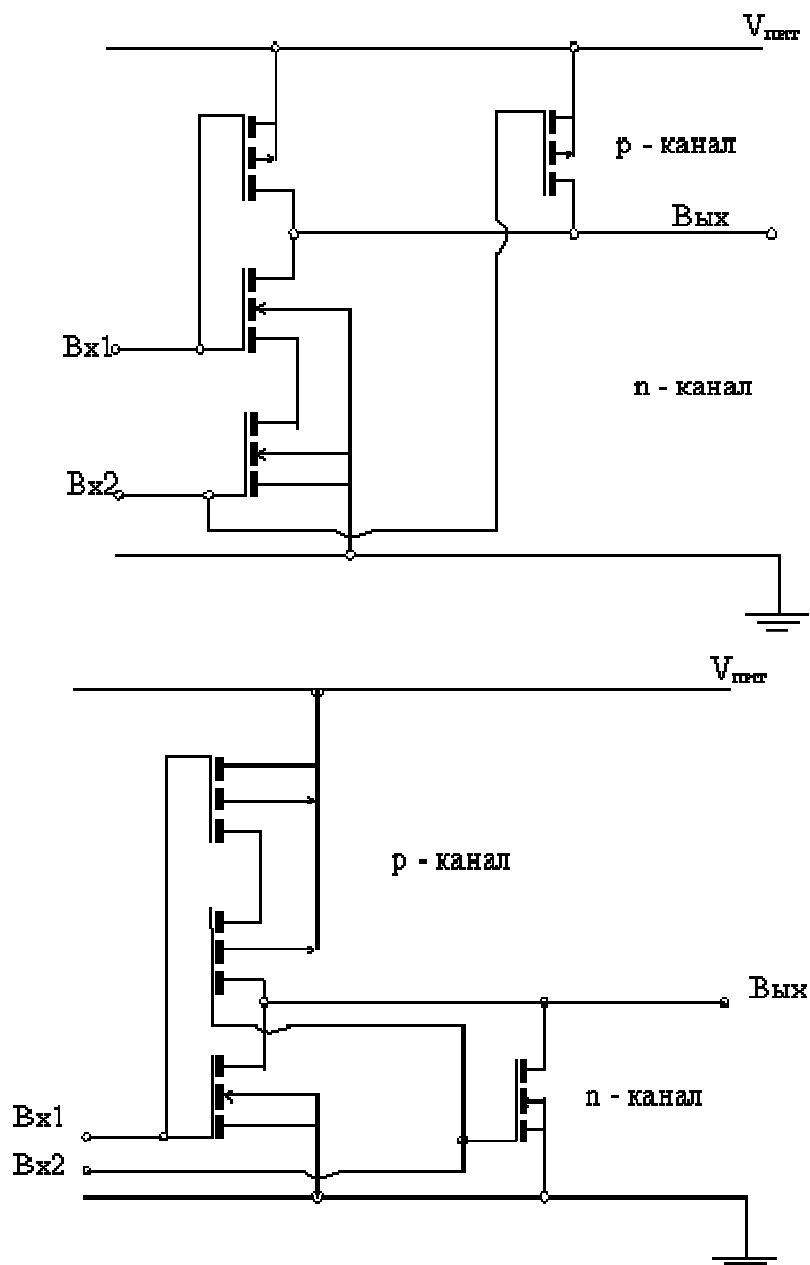


Рис.4.8.Принципиальная схема логического элемента И-НЕ (вверху) и ИЛИ-НЕ (внизу) на КМОП-инверторах.

4.4. МАСШТАБИРОВАНИЕ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ.

Первые МОП БИС были изготовлены на n-канальных МОП-транзисторах с использованием LOCOS –технологии. Дальнейшие поиски методов уменьшения длины канала привели к созданию МОП-транзисторов с затворной композицией в форме V-образной канавки и с двойной диффузией областей истока и стока транзисторов. На основе таких МОП-транзисторов были разработаны и производятся до настоящего времени МОП СБИС.

При конструировании МОП ИС фирмой Intel был предложен метод масштабирования размеров областей МОП-транзисторов исходя из принципа постоянства напряженности электрического поля. В качестве основного размера, с которого начинается масштабирование, была выбрана длина канала L . Если уменьшить длину канала в k раз, где k - коэффициент масштабирования, то новая длина канала будет L/k . Тогда, согласно правилу масштабирования, все геометрические размеры областей транзистора должны быть уменьшены также в k раз, а именно:

- ширина канала w будет w/k ,
- толщина подзатворного диоксида кремния d_o станет d_o/k ,
- глубина легирования областей стоков и истоков x_j соответственно - x_j/k ,
- концентрация примеси $N_{a,d}$ в кремниевой подложке увеличится в k раз – kN , поскольку размеры областей объемного заряда вокруг истока и стока тоже должны уменьшиться в k раз (см. формулу 3.7)

- площадь канала транзистора уменьшится в $1/k^2$ раз.

В результате приведённых изменений размеров происходит изменение эксплуатационных характеристик МОП-транзистора:

- число транзисторов на кристалле увеличится в k^2 раз,
- пробивное напряжение диэлектрика затвора уменьшится в k раз,
- ток стока уменьшится в k раз,
- ёмкость затвора и стока уменьшится в k раз,
- время переключения τ уменьшится в k раз, поскольку сопротивление канала останется постоянным,
- потребляемая мощность P уменьшится в k^2 раз,
- работа переключения $P \cdot \tau$ уменьшится в k^3 раз,
- мощность на кристалл останется постоянной.

Таким образом, при масштабировании МОП-структур степень интеграции растёт, и одновременно их эксплуатационные характеристики существенно улучшаются. Показанный выше метод масштабирования использовался на ранних этапах создания МОП ИС. Традиционная структура МОП-транзистора обеспечила снижение длины затвора от 10 мкм в 70-х годах до 0,1 мкм путём простого масштабирования. Однако переход проектных норм через границу 130 нм в рамках традиционной конструкции наталкивается на физические ограничения. В полном объёме этот метод не может быть применён, т.к. начинают действовать различные ограничения, связанные с уменьшением тех или иных размеров.

Основными проблемами микроминиатюризации МОП-транзисторов в микропроцессорах являются туннелирование через затвор, инжекция горячих носителей в окисел, прокол между истоком и стоком, утечки в подпороговой области, уменьшение подвижности носителей в канале, увеличение последовательного сопротивления между истоком и стоком, обеспечение запаса между пороговым напряжением и напряжением питания и др. Для преодоления перечисленных выше и других ограничений, связанных с уменьшением размеров МОП-транзисторов, фирмами – разработчиками МОП ИС проводились интенсивные исследования по совершенствованию технологических процессов, поиску новых материалов и конструкторских решений. Любые положительные результаты, позволяющие преодолеть то или иное ограничение, немедленно применялись для модернизации микросхем и внедрялись в производство. Этого требовала жёсткая конкуренция на рынке микроэлектронных изделий. Под понятием масштабирование в настоящее время понимают соблюдение некоторых проектных топологических размеров (проектных норм), которые регулярно чередуются на поверхности полупроводникового кристалла СБИС.

Для некоторой идентификации разрабатываемых и выпускаемых различными фирмами МОП БИС в 1997 г. Ассоциацией предприятий полупроводниковой промышленности США была предложена национальная технологическая программа развития полупроводниковой микропроцессорной техники (NTRS). В табл. 4.3 приведены рекомендуемые Ассоциацией проектные нормы и соответствующие этим нормам минимальные размеры областей транзисторов и некоторые эксплуатационные характеристики.

С уменьшением геометрических размеров транзисторов снижается площадь кристалла, уменьшаются паразитные ёмкости, улучшается быстродействие и снижается энергопотребление СБИС. За последние 30 лет длина затвора МОП-транзистора уменьшилась в 200 раз (с 10 мкм в начале 70-х годов до 30- 60 нм в наши дни). Технология с минимальными горизонтальными размерами элементов 0,13 мкм позволила реализовать массовое производство микропроцессоров Intel Pentium 4 с тактовой частотой более 2,5 ГГц на МОП-транзисторах с длиной канала 60 нм и толщиной подзатворного окисла 1,5 нм. В соответствии с прогнозами Ассоциации предприятий полупроводниковой индустрии NTRS (2005года), минимальные размеры элементов будут продолжать быстро уменьшаться и в 2012 году станут менее 30 нм.

Масштабирование МОП-транзисторов согласно NTRS

Проектные нормы, нм	250	180	130	100	70
Толщина окисла, нм	4–5	3–4	2–3	1,5–2	<1,5
Глубина <i>p-n</i> - переходов, нм	50–100	36–72	26–52	20–40	15–30
Напряжение питания, В	1,8–2,5	1,5–1,8	1,2–1,5	0,9–1,2	0,6–0,9
Ток утечки, нА/мкм	1	1	3	3	10
Нагруз. способн., мА/мкм	600/280	600/280	600/280	600/280	600/280
Мощность/кристалл, Вт	70	93	121	120	114

Каждый технологический шаг в направлении уменьшения размеров элементов сопряжён с ростом проблем конструирования и производства, которые приходится решать для обеспечения теоретически прогнозируемых характеристик транзистора. Любое улучшение одних параметров приводит к ухудшению других, причём с уменьшением размеров взаимное влияние параметров становится всё более сильным.

С ростом степени интеграции СБИС и систем на кристалле увеличивается доля чипов, содержащих аналоговые блоки, которые обеспечивают взаимодействие с окружающим миром, необходимое для крупных и функционально законченных систем. К транзисторам для аналоговых и цифровых применений предъявляются противоречивые требования. Для цифровых СБИС пороговое напряжение нельзя снижать неограниченно, поскольку при этом увеличивается подпороговый ток, который определяет потребление энергии СБИС в неактивном состоянии. Верхний предел порогового напряжения ограничивается четвертью от напряжения питания, которое стараются снизить для уменьшения потребляемой мощности. Однако для аналоговых схем идеальным является нулевое пороговое напряжение $V_T = 0$, что увеличивает динамический диапазон аналоговой схемы, определяемый разностью между напряжением

на затворе и пороговым напряжением, то есть ($V_{gs} - V_T$). Особыми требованиями к "аналоговым" транзисторам являются также повышенная нагрузочная способность (ток стока в режиме насыщения), линейность и малые нелинейные искажения на малом сигнале. Для дифференциальных каскадов и токового зеркала важна согласованность характеристик транзисторов. Транзистор должен иметь слабую зависимость порогового напряжения от напряжения на стоке, от длины и ширины канала, а также большую передаточную проводимость, большое выходное сопротивление, малое сопротивление областей истока и стока и большую нагрузочную способность. Разброс параметров техпроцесса, который растёт с уменьшением размеров транзистора, не должен снижать процент выхода годных кристаллов.

4.5. МОП-ТРАНЗИСТОРЫ С МАЛЫМИ РАЗМЕРАМИ ЭЛЕМЕНТОВ.

LDD – МОП транзистор

Наиболее распространённой конструкцией МОП-транзистора, используемой более 10 лет в полупроводниковой промышленности, является LDD (Lightly Doped Drain) структура (рис. 4.9. (а, б)). Её особенностью является наличие мелких слаболегированных областей, которые удлиняют области истока и стока в сторону канала. Концентрацию легирующей примеси в этих областях (фосфор и бор) и режим её разгонки выбирают таким образом, чтобы получить плавный p - n -переход. Обычно концентрация примеси составляет от $4 \cdot 10^{18}$ до $8 \cdot 10^{18}$ см^{-3} , в то время как в n^+ областях она достигает $5 \cdot 10^{19} - 1 \cdot 10^{20}$ см^{-3} . Полученное таким способом снижение напряжённости электрического поля в канале на границе со стоком уменьшает энергию горячих электронов, которые вызывают долговременную деградацию параметров транзистора. Слаболегированные LDD-области также повышают напряжение прокола, инжекционного и лавинного пробоя транзистора, уменьшают DIBL-эффект и эффект модуляции длины канала.

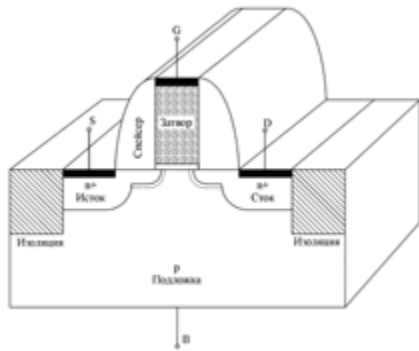


Рисунок 4.9.а. Типовая структура LDD МОП-транзистора.



Рисунок 4.9.б. Внешний вид топологии субмикронного МОП-транзистора

Глубина LDD-областей истока и стока составляет 50–100 нм для транзисторов с длиной канала 0,25 мкм. Уменьшение глубины *p-n*-переходов до 10 нм при длине канала 50 нм (рис. 4.10) приводит к увеличению сопротивления слоёв истока и стока до 10 кОм/квадрат, что ограничивает нагрузочную способность транзистора.

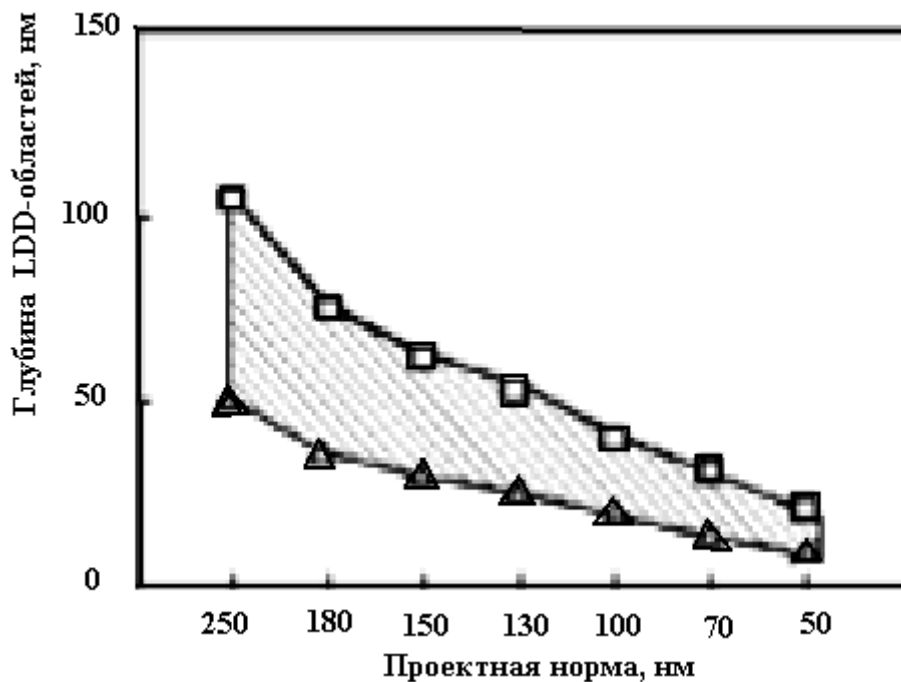


Рисунок 4.10. Уменьшение глубины залегания *p-n*-переходов LDD-областей истока и стока с развитием технологии

Перекрытие LDD-областей затвором должно быть не менее 15–20 нм, чтобы предотвратить снижение нагрузочной способности транзистора. Толщина поликремниевого затвора составляет порядка 300 нм.

Для снижения емкостей транзистора выбирают слаболегированную подложку, а для обеспечения необходимого порогового напряжения и снижения напряжения прокола применяют легирование канала примесью того же типа, что и в подложке. Легирование выполняют примерно на глубину области пространственного заряда под затвором. Контакты к областям истока, стока и к поликремниевому затвору выполняют с промежуточным формированием слоя силицидов TiSi_2 или CoSi_2 толщиной порядка 40 нм, что обеспечивает удельное сопротивление около 5 Ом на квадрат. Изоляция между поликремниевым затвором и контактами к истоку и стоку выполняется в виде спейсера (разграничителя) (рис. 4.9.а) из Si_3N_4 .

Концентрация примеси в канале составляет обычно $5 \cdot 10^{17} - 1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, увеличение концентрации примеси свыше этого значения, необходимое для транзисторов с длиной канала менее 100 нм, ведёт к появлению туннелирования электронов через p - n -переходы истока и стока из-за уменьшения эффективной толщины барьера.

Толщина окисла для транзисторов с длиной канала 0,1 мкм составляет 3–4 нм. Между толщиной окисла d_{ox} и длиной канала L МОП-транзисторов, изготавливаемых фирмой Intel в течение последних 20 лет, существует эмпирическая зависимость $L = 45 \cdot d_{ox}$.

В КМОП технологии для оптимизации параметров и уменьшения размеров инвертора используют подложку с собственным типом проводимости, а для формирования карманов разного типа проводимости (рис. 4.11) используют фосфор и бор. Изоляцию между карманами выполняют обычно мелкими канавками, стенки которых окисляют, а внутренность заполняют поликремнием. Эта технология изоляции стала доминирующей в транзисторах, выполненных по 0,25-микронной технологии и пришла на смену изоляции локальным окислением кремния (LOCOS), которая занимала гораздо большую площадь.

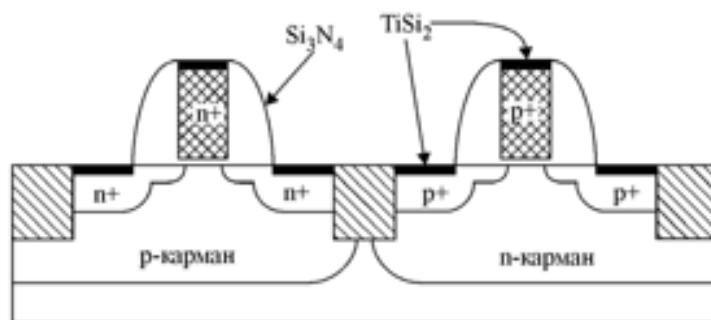


Рисунок 4.11. Комплиментарная пара транзисторов, использованная в 0,25-мкм техпроцессе при производстве микропроцессоров Intel® Celeron и Pentium® II

При дальнейшей минитюаризации такой структуры следует учитывать ограничения, приведенные в таблице 4.4.

Таблица 4.4.

Ограничения дальнейшей миниатюризации LDD-МОП

Характеристики	Предел	Причина ограничения
Толщина окисла	2,3 нм	Туннелирование через окисел
Легирование канала	$V_T = 0,25$ В	Подпороговый ток
Мелкие области истока и стока	15 нм	Сопротивление областей истока и стока
Длина канала	60 нм	Подпороговый ток
Длина затвора	100 нм	Подпороговый ток

Эффект короткого канала

Уменьшение порогового напряжения при снижении длины канала является индикатором появления короткоканальных эффектов при разработке новых технологий и одновременно существенным препятствием на пути сокращения размеров транзисторных структур. Рассмотрим традиционный кремниевый МДП транзистор с изоляцией областей стока и истока с помощью обратно смещённых *p-n* переходов (рис. 4.12).

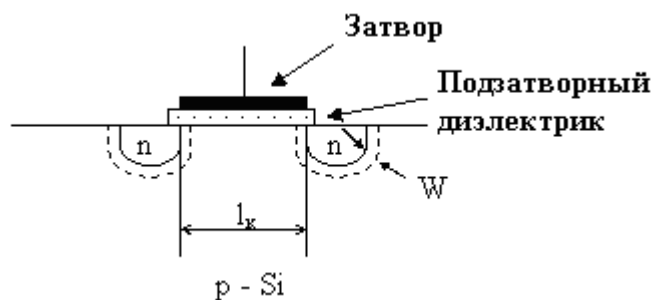


Рис.4.12. Изоляция истока и стока с помощью обратных смещенных p - n переходов. W – ширина области объемного заряда, l_k – длина канала

Обедненный слой служит для изоляции областей истока и стока от подложки. Длина канала должна быть больше толщины обеднённых изолирующих слоёв $l_k > 2W$ (иначе происходит смыкание слоёв). Так как к обедненному слою приложена большая часть напряжения питания, учитывая значения напряженности пробоя $E_{\text{пробоя}} \cong 10^8$ В/м, получаем, что для такой традиционной конструкции длина канала МДПТ не может быть много меньше 1 мкм. При меньшей длине канала смыкаются обедненные слои, которые обеспечивают изоляцию областей стока и истока от основной массы кремния. Смыкание обедненных слоёв нарушает условие, при которых был проведен расчет транзистора, т.е. условие обеспечивающее инверсию типа проводимости в области канала. На рис. 4.13. приведены энергетические диаграммы для длинного ($L > 2W$) и короткого ($L < 2W$) каналов. Видно, что уменьшение эффективной высоты потенциального барьера ведет к росту подпорогового тока через закрытый МОП-транзистор.

Проникновение области обеднения стока в канал является основной причиной появления короткоканальных эффектов. Однако их нельзя устранить путём простого повышения концентрации легирующей примеси в подложке, уменьшая W , поскольку при этом растёт подпороговый ток и уменьшается подвижность носителей в канале, вызывающая деградацию нагрузочной способности транзистора.

Наиболее распространённым решением этой проблемы является реализация так называемого обратного эффекта короткого канала, когда с уменьшением длины канала пороговое напряжение возрастает.

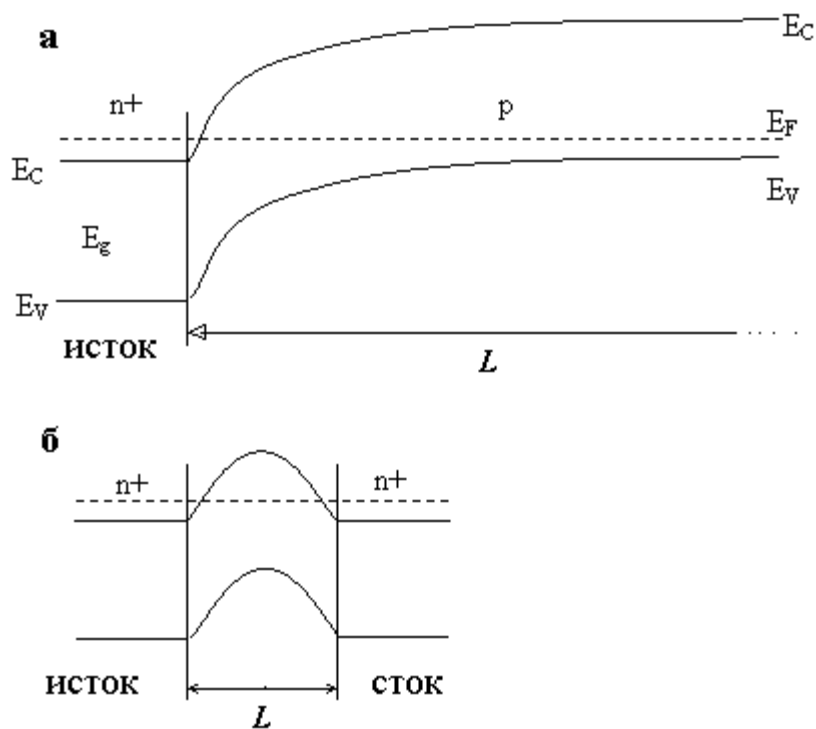


Рис.4.13. Энергетическая диаграмма для областей исток-канал-сток в случае длинного (а) и короткого (б) каналов.

Этого можно достичь применением ореола (halo) вокруг областей истока и стока (рис. 4.14). Ореол создаётся ионным легированием примеси того же типа проводимости, что и карман (бор или индий для n -канального транзистора и мышьяк для p -канального). Индий, по сравнению с бором, снижает крутизну падения порогового напряжения, в зависимости от длины канала, и уменьшает разброс наклона подпороговой характеристики. Ионное легирование может выполняться вертикально, но чаще под углом, для чего кремниевую пластину наклоняют на угол от $20\text{--}30^\circ$ до 90° по отношению к ионному пучку, чтобы направить его под затвор. Ореол делают обычно на том же этапе литографии, что и мелкие слаболегированные области истока и стока. Энергию имплантации выбирают достаточно большую, чтобы увеличить глубину залегания ореола. После формирования спейсера, во время отжига областей истока и стока, имплантант диффундирует за LDD-области, обеспечивая показанный на рис. 4.14 профиль распределения примеси.

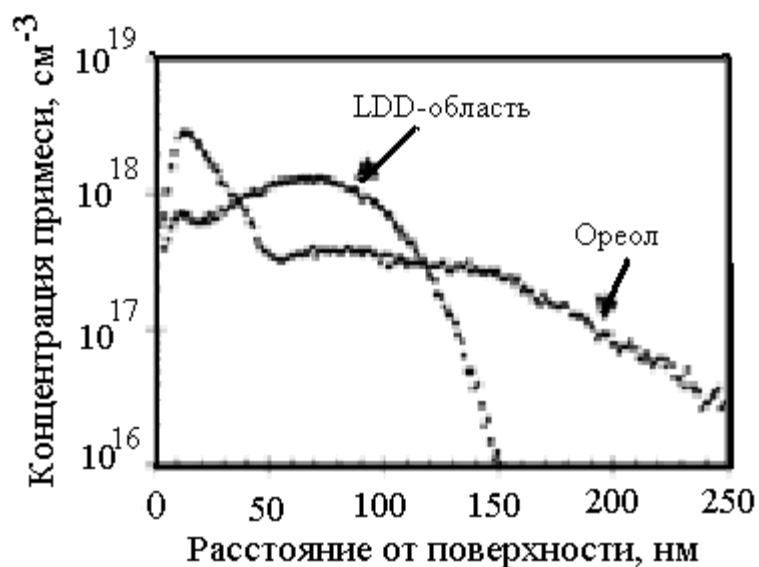


Рисунок 4.14. Профиль примеси в области ореола и слаболегированной (LDD) области истока или стока для 0,25-мкм технологии

Принцип действия ореола основан на том, что пороговое напряжение МОП-транзистора зависит от средней концентрации примеси под затвором, а не от её горизонтального распределения. Поэтому введение ореола увеличивает пороговое напряжение, однако практически не влияет на среднюю подвижность носителей в канале.

Для борьбы с эффектами короткого канала используется изменение профиля легирующей примеси не только в горизонтальном, но и в вертикальном направлении. В вертикальном направлении создают неоднородное (ретроградное) распределение примеси, экстремально мелкие области истока и стока, применяют новые материалы с большей, чем у окиси кремния, диэлектрической проницаемостью. Крутое ретроградное распределение примеси (Super Steep Retrograde Well, SSRW) создаётся путём медленной диффузии мышьяка или сурьмы для *p*-канальных приборов и индия для *n*-канальных. Благодаря возможности устанавливать поверхностную концентрацию легирующей примеси независимо от объёмной, появляется дополнительная степень свободы для независимой регулировки порогового напряжения и концентрации примеси в подложке, влияющей на величину области пространственного заряда и, соответственно, короанальные эффекты. Правильное применение идеи SSRW позволяет ослабить влияние короткоканальных эффектов и увеличить поверхностную подвижность носителей, однако при этом несколько увеличивается подпороговый ток. Разновидностью крутого ретроградного распределения

примеси является дельта-легирование подложки, имеющее аналогичные свойства.

Одним из путей увеличения передаточной проводимости и нагрузочной способности МОП-транзистора является уменьшение толщины подзатворного окисла. Толщина окисла ограничивается появлением паразитного туннельного тока, который увеличивает энергопотребление микросхемы, и нестабильностью напряжения пробоя окисла, снижающей надёжность. Экспериментально показана возможность уменьшения толщины подзатворного диэлектрика до 1,5 нм. В эксперименте длина канала составляла около 0,1 мкм, при этом нагрузочная способность транзистора была равна 1 мА/мкм, передаточная проводимость — 1000 мСим/мм при комнатной температуре.

Рост туннельного тока через окисел является не единственной преградой на пути уменьшения его толщины. В экспериментах с приборами, имеющими толщину затвора 1,2–2,8 нм, было показано, что с ростом туннельного тока увеличивается статистический разброс порогового напряжения. Это объясняется тем, что пороговое напряжение начинает зависеть от падения напряжения на омическом сопротивлении затвора; падение напряжения вызывается прохождением туннельного тока. При этом в разброс порогового напряжения вносится компонента, связанная с разбросом сопротивления затвора.

Ещё одной причиной, мешающей дальнейшему уменьшению размеров транзисторов, является квантово-механическая природа инверсионного слоя, которая не позволяет электронам располагаться непосредственно у поверхности кремния. Максимум пространственного распределения электронов находится на расстоянии около 1 нм от поверхности. Это увеличивает эффективную толщину окисла примерно на 0,3 нм. Кроме того, вследствие ограниченной концентрации примеси в поликремниевом затворе в нём наступает режим обеднения, из-за которого увеличивается эффективная толщина подзатворного слоя диэлектрика. Общее увеличение эффективной толщины составляет около 0,7 нм, что уменьшает ток стока и нагрузочную способность транзистора.

В экспериментах с приборами, имеющими толщину окисла 1,3–1,5 нм, было обнаружено, что туннельный ток через подзатворный диэлектрик может быть существенно уменьшен путём повышения однородности плёнки окисла. Для получения однородной плёнки использовано селективное эпитаксиальное наращивание нелегированного кремния для получения

канала МОП-транзистора, поскольку плёнка окисла на эпитаксиально выращенном кремнии получается более однородной.

Для получения канала сначала была выполнена ионная имплантация бора в область канала для *n*-канального транзистора и фосфора для *p*-канального. Затем из газовой фазы был выращен эпитаксиальный слой нелегированного кремния толщиной от 5 до 20 нм. Благодаря предварительному легированию кремния был получен практически идеальный ретроградный профиль примеси в эпитаксиальном слое. После этого была получена тонкая (1,5 нм) плёнка окисла путём окисления эпитаксиального слоя в сухом кислороде. Затвор был выполнен не из поликремния, как обычно, а из TiN. Зернистость TiN примерно в три раза меньше, чем у поликремния, что улучшило однородность диэлектрика под затвором.

Ключевым моментом техпроцесса для длин канала менее 100 нм является получение мелких (менее 20 нм) *p-n*-переходов. Однако они дают неприемлемо высокое сопротивление областей истока и стока. Для его снижения обычно используют промежуточный слой из TiSi₂ или CoSi₂. Оригинальное решение этой проблемы показано на рис. 4.15. После формирования слоя подзатворного окисла толщиной 4,6 нм формируется поликремниевый затвор с помощью электронно-лучевой литографии. Между затвором и областями локального окисления оставляется пространство 0,35 мкм для формирования областей истока и стока. Боковые стенки поликремниевого затвора защищаются тонким (10–20 нм) слоем Si₃N₄ для отделения затвора от контактов к истоку и стоку. После этого выполняется селективное эпитаксиальное наращивание слоя SiGe толщиной 50 нм, легированного фосфором. Далее формируют второй защитный слой на боковых стенках поликремниевого затвора, который является маской для последующей имплантации областей истока и стока. При последующей диффузии фосфора из нанесённого ранее слоя SiGe формируются мелкие слабелегированные области истока и стока. Контакты к истоку, стоку и затвору выполняют селективным наращиванием вольфрама. Полученная таким образом структура показана на рис. 4.15. и 4.16. Часть эпитаксиального слоя, находящаяся поверх мелких областей истока и стока, понижает их омическое сопротивление.

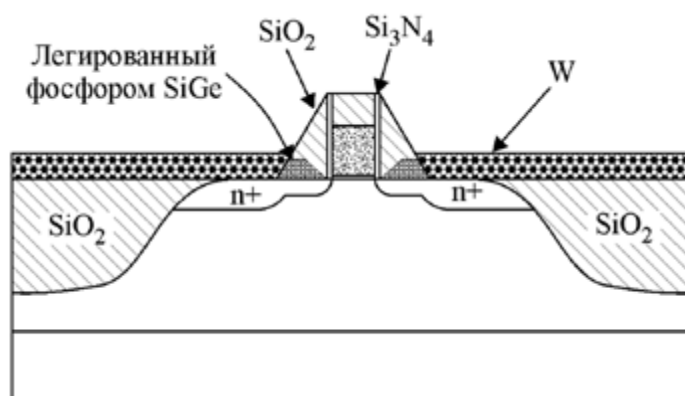


Рисунок 4.14. МОП-структура, в которой мелкие области истока и стока получены диффузией из легированного фосфором SiGe

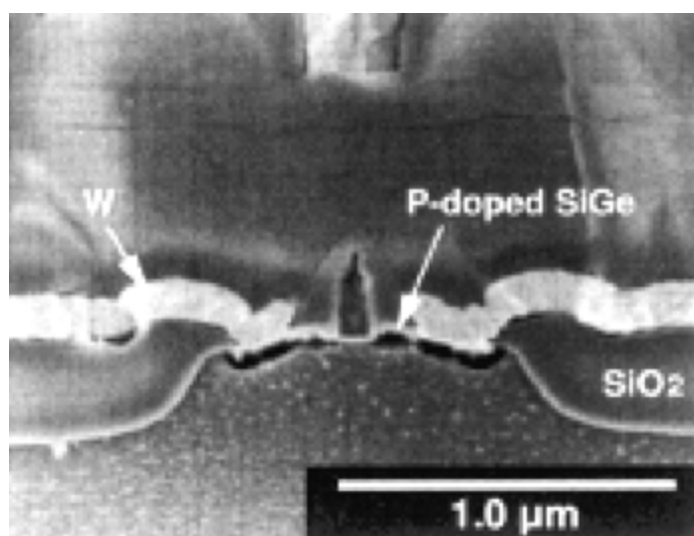


Рис. 4.16. РЭМ МОП-транзистора, структура которого показана на рис.4.15.

МОП-транзисторы, изготовленные по технологии "кремний на изоляторе"

МОП-транзисторы, изготовленные по технологии "кремний на изоляторе" (КНИ), являются весьма перспективными для создания микромощных и высокоскоростных СБИС с напряжением питания до 1,2 В и менее, поскольку наличие толстого окисла вместо кремния под областями истока и стока существенно уменьшает величину ёмкости на подложку. Вторым преимуществом является простой процесс изоляции компонентов и высокая плотность интеграции благодаря отсутствию изолирующих карманов. КНИ-структуры отличаются высокой радиационной стойкостью и повышенной надёжностью при высоких температурах. Короткоканальные эффекты в КНИ-приборах могут быть подавлены простым уменьшением толщины кремниевого слоя. Наклон подпороговой характеристики у КНИ-транзисторов получается практически идеальным. Транзисторы высокого

качества получают на плёнках кремния толщиной 8 нм. Структура транзистора, выполненного по технологии КНИ, показана на рис. 4.17.

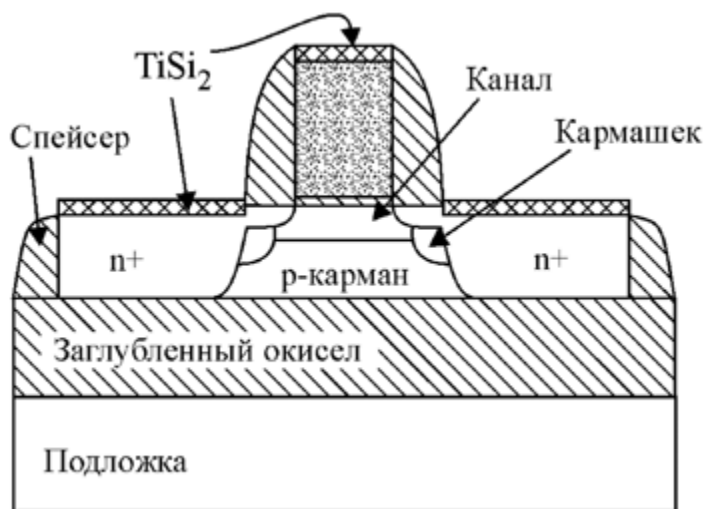


Рис. 4.17. КНИ МОП структура с длиной канала 0,28 мкм и шириной 9,1 мкм

Однако перспективность КНИ-структур не является бесспорной. Основная проблема состоит в том, что КНИ-транзисторы имеют увеличенный подпороговый ток вследствие эффекта плавающей подложки, который устанавливает предел понижению потребляемой мощности в выключенном состоянии транзисторного ключа. Попытка понизить этот ток приводит к увеличению порогового напряжения, которое не позволяет уменьшить напряжение питания для уменьшения потребляемой мощности. Кроме того, малая собственная ёмкость КНИ-транзистора перестаёт быть его преимуществом при дальнейшем сокращении размеров, поскольку уже в современных СБИС задержка в межсоединениях превышает задержку в вентилях.

Пример такого транзистора со структурой КНИ показан на рис. 4.17. Толщина слоя заглубленного окисла составляет 390 нм, толщина слоя кремния на окисле равна 190 нм. Подзатворный окисел имеет толщину 4,7 нм, ширина канала равна 9,1 мкм, толщина поликремниевого затвора — 300 нм. Легирование канала выполняется таким образом, чтобы получить нужное пороговое напряжение. Кармашки, легированные бором для n -канальных транзисторов и фосфором — для p -канальных, необходимы для предохранения от смыкания истока и стока и подавления эффекта снижения порогового напряжения с уменьшением длины канала.

На области истока, стока и затвора осаждён слой силицида $TiSi_2$ толщиной 50 нм для уменьшения сопротивления контактов. Контакты к областям транзистора выполнены вольфрамом, а разводка электрических

цепей между транзисторами — алюминием. Изоляция между транзисторами на кристалле выполняется разграничительной прослойкой (спейсером) из окисла кремния.

Одной из проблем изготовления транзисторов на тонких плёнках кремния является высокое последовательное сопротивление областей истока и стока. Для его уменьшения используют самосовмещённый силицидный процесс, использующий силицид титана или кобальта. Однако, если толщина используемой плёнки кремния менее 20 нм, то такой тонкий слой может быть полностью поглощён формирующимся слоем силицида и тогда площадь контакта между кремнием и силицидом резко уменьшается, что приводит к возрастанию сопротивления контакта. Очень малое поглощение кремния происходит при выполнении контакта из вольфрама, однако при контакте к сильнолегированному кремнию *p*-типа проводимости вольфрам образует контакты с очень плохой стабильностью характеристик. Для решения проблемы контактов может потребоваться эпитаксиальное наращивание плёнки кремния сверху областей истока и стока или, наоборот, травливание той области кремния, где должен быть сформирован канал транзистора.

Один из вариантов реализации этой идеи представлен на рис.4.18. Транзистор имеет длину канала 40 нм, изготовлен по технологии КНИ на экстремально тонком слое кремния (было изготовлено три варианта транзисторов с толщиной кремния 4, 11 и 18 нм).

Слой исходного кремния на изоляторе имел удельное сопротивление 3 Ом·см. Толщина слоя заглубленного окисла составляла 100 нм и он был выращен на подложке *n*-типа с удельным сопротивлением 0,02 Ом·см. Плёнка кремния для формирования областей истока и стока имела толщину 80 нм. В ней селективным травлением была получена область толщиной от 4 до 18 нм, в которой впоследствии был сформирован канал транзистора. Таким образом, при тонком слое кремния для области канала области истока и стока оказались достаточно толстыми, что обеспечило их низкое омическое сопротивление. Подзатворный окисел толщиной 4,7 нм был выращен в сухом кислороде.

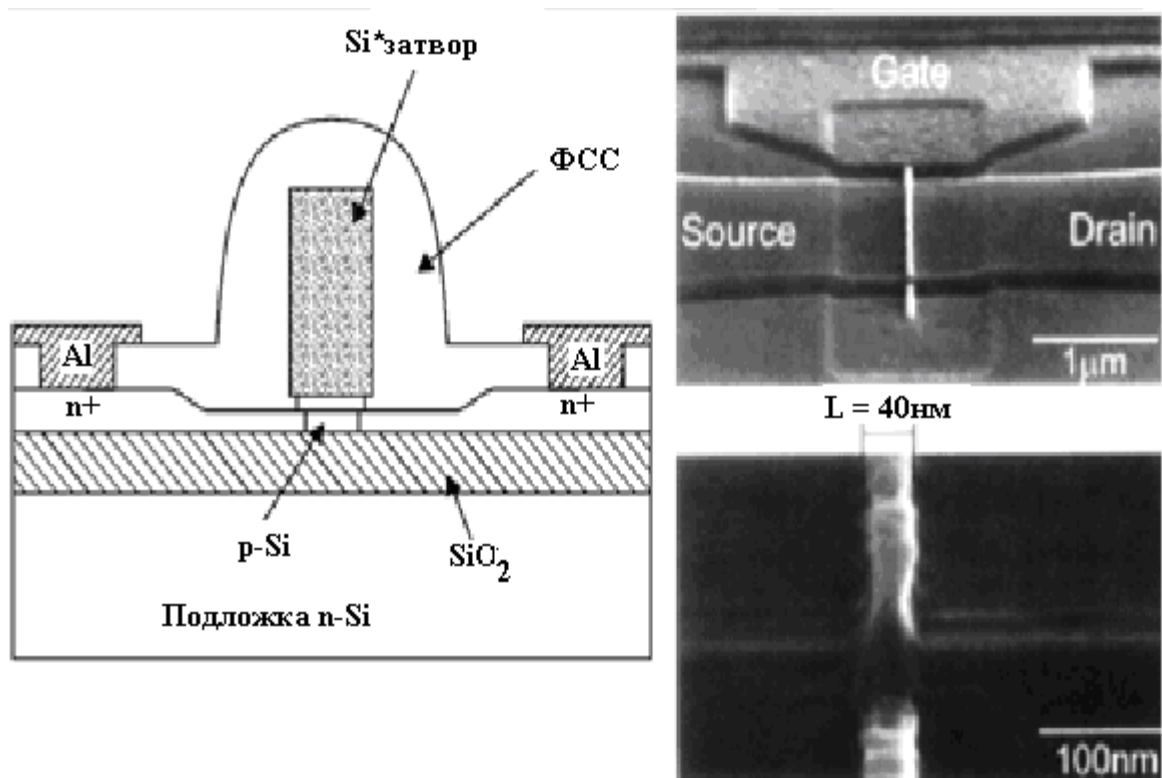


Рис. 4.18. Структура КНИ с ультратонким слоем кремния (4–18 нм) и длиной канала 40 нм (слева) и её РЭМ-изображение. Справа внизу показан затвор транзистора в увеличенном масштабе

Проблема плохой стабильности вольфрамового контакта к областям *p*-типа может быть решена путём дезактивации атомов бора в кремнии атомами водорода при водородном плазменном травлении кремния. Подготовленная таким образом поверхность кремния позволяет получить более стабильный контакт с вольфрамом. На рис. 4.19 показана фотография МОП-транзистора с длиной канала 0,18 мкм, выполненного на кремниевой плёнке толщиной 21 нм, с толщиной подзатворного окисла 3,6 нм и толщиной поликремниевого затвора 150 нм.

Слой вольфрама составил 48 нм, слой кремния под контактом — 6 нм (увеличенное изображение этой области приведено на рис. 4.20). Сопротивление полученного контакта равно 10 Ом/квадрат, что при том же поглощении кремния меньше, чем у силицида кобальта и титана. Наклон подпороговой характеристики составил 70 мВ/декаду для *n*-канального транзистора и 75 В/декаду для *p*-канального.

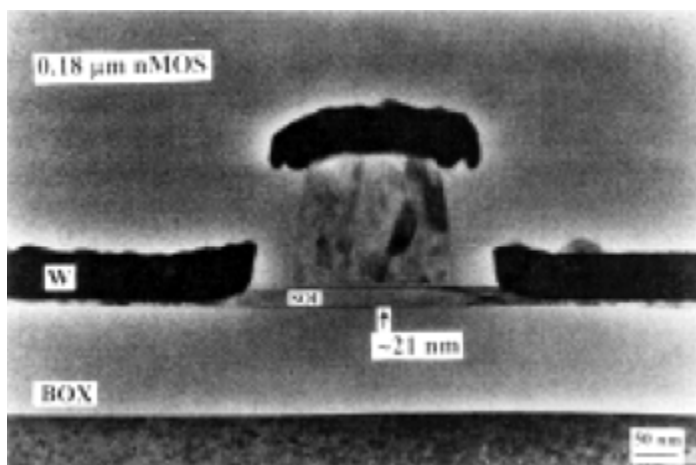


Рис.4.19. МОП-транзистор с длиной канала 0,18 мкм, выполненный на плёнке кремния толщиной 21 нм без наращивания толщины областей истока-стока

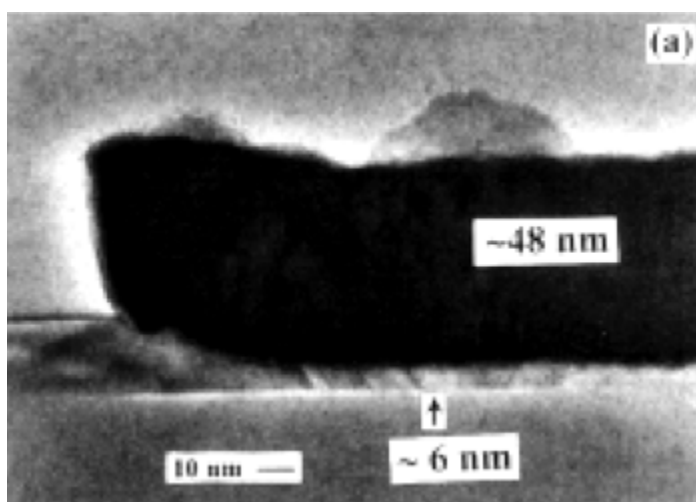
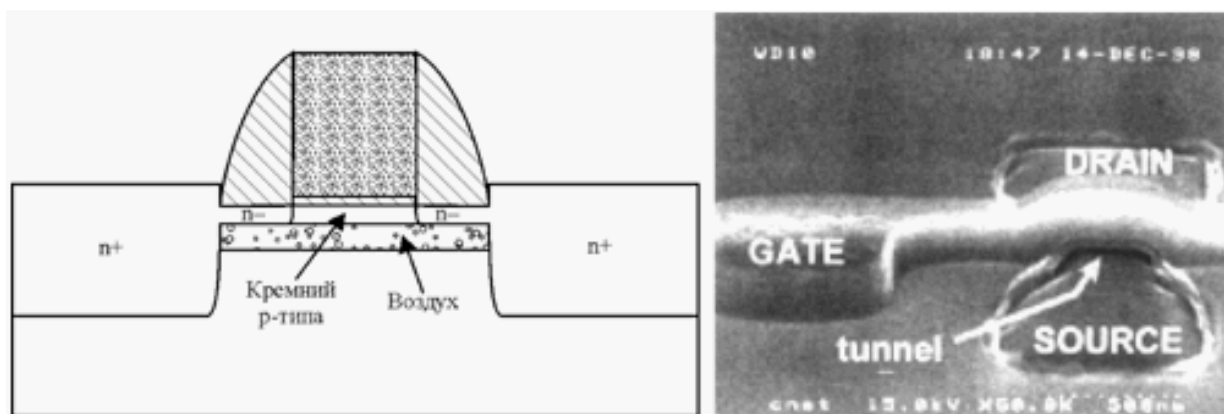


Рисунок 4.20. Вольфрамовый контакт к стоку. Толщина слоя кремния уменьшилась на 15 нм для n-канального транзистора

КНИ-структура "кремний ни на чём" (Silicon-on-Nothing, SON) объединяет положительные качества обычной структуры транзисторов на кремнии с достоинствами КНИ (рис.4.21).

Принцип изготовления такого прибора состоит в следующем. На кремниевую пластину наносят эпитаксиальный слой SiGe толщиной 10–30 нм, сверху которого наносят слой кремния толщиной 5–20 нм. Слой SiGe впоследствии будет стравлен и таким образом под слоем кремния получится пустота (воздух), которую можно заполнить окислом кремния, но можно и не заполнять ничем.



Ри. 4.21. МОП-структура "кремний ни на чём" (слева) и её РЭМ на стадии получения воздушного канала (справа). Использована стандартная подложка

После формирования слоя подзатворного окисла, поликремниевого затвора и спейсера на том месте, где должны быть области истока и стока (рис. 4.21), с помощью анизотропного плазменного травления делают канавки. Таким образом, получается доступ к ранее нанесённому слою SiGe, который теперь вытравливается полностью с помощью селективного плазменного травления. Таким способом под слоем кремния получается воздушный тоннель высотой около 20 нм. После получения воздушного туннеля его стенки пассивируют тонким слоем окисла. Изображение структуры на этом этапе техпроцесса показана на рис. 4.21, справа.

Технология "кремний ни на чём" позволяет изготавливать МОП-транзисторы с глубиной $p-n$ -переходов и толщиной канала 5 нм. Эффект модуляции длины канала и DIBL эффект в таких структурах становятся существенными только при длине канала менее 30 нм. При их изготовлении не требуется применение специального оборудования или материалов, все технологические операции являются типовыми.

МОП-структуры с двойным и с окольцовывающим затвором

Для разработки МОП-транзисторов с длиной канала менее 100 нм в соответствии с правилами масштабирования необходимо уменьшать глубину залегания $p-n$ -переходов и толщину окисла. Однако для транзисторов с длиной канала менее 100 нм ток туннелирования через затвор становится очень большим и ограничивает мощность, потребляемую СБИС в режиме покоя, а мелкие $p-n$ -переходы приводят к большому сопротивлению контактных областей. Для предотвращения смыкания областей истока и стока неизбежно применение высоколегированного ($>10^{18} \text{ см}^{-3}$) стопора. Однако стопор снижает нагрузочную способность транзистора и увеличивает утечки в подпороговой области. Поэтому большой интерес вызывают

транзисторы с двойным или окольцовывающим затвором, когда затвор с двух (или со всех) сторон охватывает область канала. Такой подход позволяет эффективно управлять энергетическим барьером между истоком и стоком и существенно ослабить большинство короткоканальных эффектов в транзисторах с проектными нормами менее 50 нм. Уменьшается также емкость *p-n*-переходов, улучшенная радиационная стойкость. Двойная плотность заряда инверсионного слоя увеличивает нагрузочную способность транзистора.

Принцип действия транзистора DELTA с двойным затвором иллюстрируется рис. 4.22. На толстом слое окисла создаётся островок кремния в форме бруска, который служит каналом транзистора. Затвор охватывает область канала с трёх сторон. Это обеспечивает большую передаточную проводимость и малые токи утечки в подпороговой области. Канал транзистора получается сильно обеднённым. Транзистор работает в режиме объёмной инверсии полупроводника. С уменьшением его толщины наблюдается увеличение наклона подпороговой характеристики, то есть уменьшение тока утечки в подпороговой области. Это объясняется уменьшением ёмкости обеднённого слоя и, следовательно, увеличением потенциала поверхностного слоя. В транзисторах с очень тонким каналом (2 нм) становится существенным эффект квантования энергии, который влияет на функцию распределения электронов в полупроводнике и параметры транзистора. Увеличивается также роль рассеяния носителей на шероховатостях границы раздела окисел-кремний, поскольку увеличивается площадь затвора.

Структура транзистора с двойным затвором в настоящее время существенно модернизирована для обеспечения лучшей технологичности и совместимости с существующими техпроцессами массового производства. Транзистор имеет толщину окисла 2,5 нм и длину канала до 10 нм, высота канала составляет 50 нм, толщина - от 10 до 120 нм. Конструкция транзистора разработана таким образом, что его топология не отличается от обычного интегрального МОП-транзистора. Однако особенностями конструкции является самосовмещённость затворов друг с другом и с областями истока и стока, затвор выполнен из SiGe, низкоомные областям истока и стока выполнены из поликремния или поли-Si_{0,85}Ge_{0,15}, легированного фосфором.

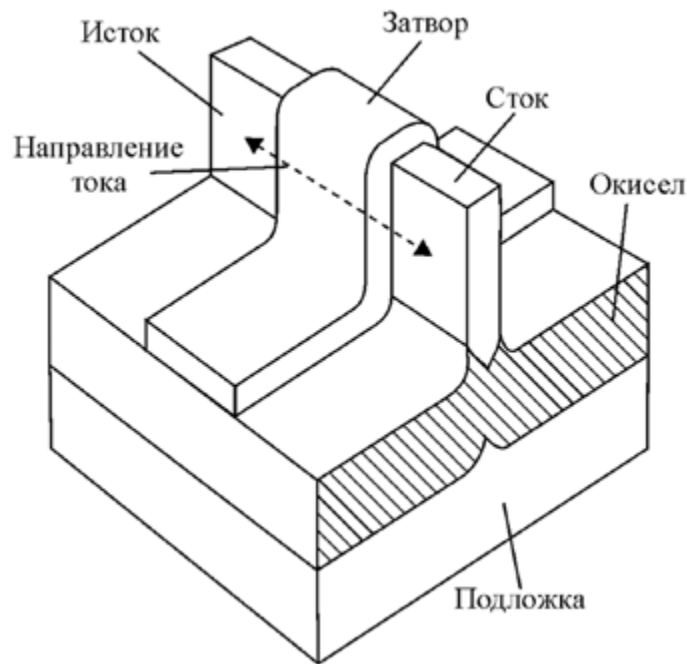


Рис.4.22. Структура МОП-транзистора с двойным затвором

В транзисторах с окольцовывающим затвором (рис. 4.23) ток канала течёт перпендикулярно поверхности кристалла, и затвор со всех сторон окружает канал (Surrounding Gate Transistor, SGT).

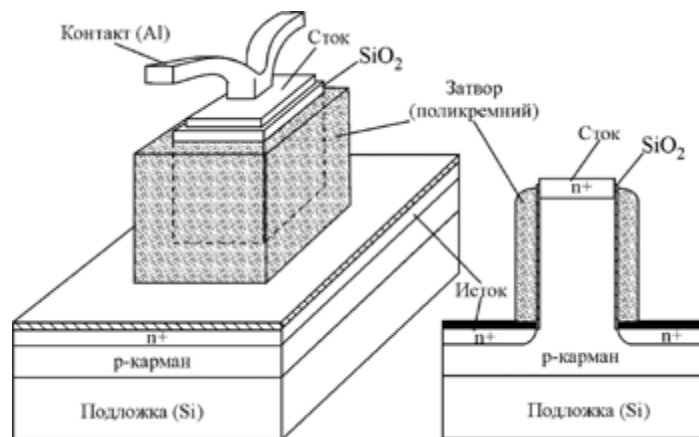


Рис.4.23. МОП-транзистор с цилиндрическим каналом. Справа показано поперечное сечение структуры

Такая структура обеспечивает минимальную ёмкость обеднённого слоя и поэтому практически весь заряд затвора уравнивается зарядом носителей в канале и тонком обеднённом слое. Поэтому такая структура имеет минимальные подпороговые токи и большую передаточную проводимость. Вертикальное расположение канала обеспечивает высокую степень интеграции. Это позволяет использовать транзисторы с окольцовывающим затвором для построения ячеек памяти статических, динамических и электрически программируемых запоминающих устройств.

Недостатками описанных конструкций являются высокое тепловое сопротивление между каналом и подложкой, которое вызывает сильный саморазогрев и, как следствие, увеличенное рассеяние носителей на фононах, а также увеличенное паразитное последовательное сопротивление областей.

Транзисторы с вертикальным каналом также предлагаются в качестве кандидатов на суб-100-нм структуры. На рис.4.24. показан транзистор с вертикальным каналом длиной менее 50 нм, изготовленный на стандартной производственной линии. Изготовление канала в вертикальном направлении снижает площадь кристалла, но позволяет делать канал длинным и избавиться таким образом от короткоканальных эффектов, в частности, уменьшить подпороговый ток, что особенно важно для ячеек памяти. Поликремний охватывает область истока, если посмотреть на транзистор сверху, поэтому области поликремния оказываются электрически соединены.

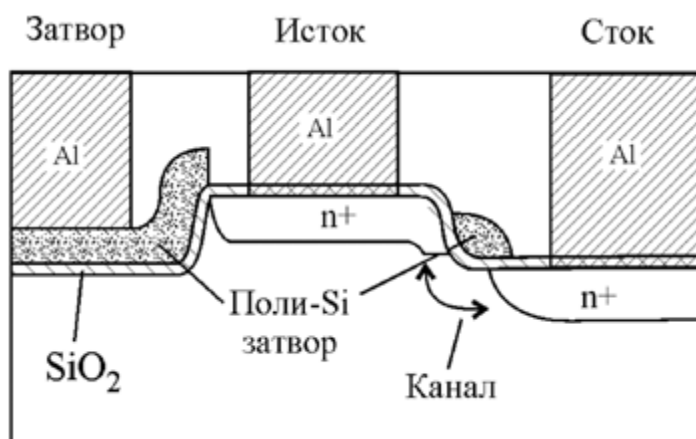


Рисунок 4.24. МОП-транзистора с вертикальным затвором. Обе части поликремниевого затвора электрически соединены в плане

Gate-All-Around (GAT) МОП-транзистор также имеет два затвора: снизу и сверху канала. Его особенностью является изготовление канала из поликремния, который рекристаллизуется оригинальным методом продольной кристаллизации, индуцированной металлом. После рекристаллизации аморфного кремния получают крупнозернистую структуру в активной области канала. Транзистор имеет характеристики, близкие к КНИ-прибору. По сравнению с транзистором, имеющим одиночный затвор, он имеет улучшенный наклон подпороговых характеристик и большую нагрузочную способность.

Для решения проблемы уменьшения подвижности в транзисторах с коротким каналом изучается применение механически напряжённого кремния, который выращивается на поверхности SiGe. Вследствие различия

в постоянных кристаллической решётки Si и SiGe кремний испытывает механическое растягивающее усилие по двум координатам. Было обнаружено, что подвижность носителей в напряжённом кремнии выше, чем в обычном и при 30% содержании Ge в SiGe подвижность электронов в напряжённом кремнии увеличивается примерно на 80%.

Для увеличения подвижности носителей в канале *p*-МОП-транзисторов в качестве материала канала используется SiGe, в котором подвижность дырок больше, чем в Si. Для улучшения качества поверхности окисла на SiGe был нанесён тонкий (4 нм) слой Si. Между Si и SiGe образуется гетеропереход, который представляет собой потенциальную яму для дырок. Концентрация дырок в ней оказывается больше, чем на границе раздела Si – SiO₂. Поэтому ток канала обеспечивается током дырок в SiGe, где их подвижность выше.

Одним из путей уменьшения потребляемой мощности ИС является снижение напряжения питания. Однако оно не может быть меньше учетверённого порогового напряжения. В то же время пороговое напряжение не может быть уменьшено ниже 0,2 В, поскольку это приводит к увеличению подпорогового тока, который определяет потребляемую мощность в пассивном режиме СБИС. Решить это противоречие позволяют МОП-транзисторы с динамически изменяющимся пороговым напряжением (DTMOS). При уменьшении напряжения на затворе (то есть когда транзистор переходит в пассивный режим работы) у таких транзисторов увеличивается пороговое напряжение и, следовательно, уменьшается подпороговый ток. При увеличении напряжения на затворе пороговое напряжение падает, что приводит к росту тока стока и увеличению нагрузочной способности транзистора.

Конструктивно DTMOS-транзисторы представляют собой обычный КНИ МОП-транзистор, у которого затвор соединён с подложкой. При этом пороговое напряжение управляется напряжением на подложке, которое автоматически уменьшается с ростом напряжения на затворе. Недостатком такого транзистора является малое напряжение питания (0,6 В), ограниченное напряжением отпираания *p-n*-переходов истока и стока.

5. УГЛЕРОДНЫЕ НАНОСТРУКТУРЫ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

5.1. ОСНОВНЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О НАНОТРУБКАХ

Первые нанотрубки были открыты в лабораториях компании NEC японским исследователем Симио Иияма (Simio Iijama) в 1991 году при изучении осадка, образующегося на катоде при распылении графита в электрической дуге. Его внимание привлекла необычная структура осадка, состоящего из микроскопических нитей и волокон. Измерения, выполненные с помощью электронного микроскопа, показали, что диаметр таких нитей не превышает нескольких нанометров, а длина составляет от одного до нескольких микрометров. Исследовательская группа Иияма обнаружила, что волокна состоят из одного или нескольких слоев, каждый из которых представляет собой гексагональную сетку графита. Во всех случаях расстояние между слоями составляло 0,34 нм, т. е. такое же, как и между слоями в кристаллическом графите, а верхние концы трубочек закрыты многослойными полусферическими крышечками — их каждый слой составлен из шестиугольников и пятиугольников, напоминающих структуру половинки молекулы фуллерена. Открытие в 1991 г. углеродных нанотрубок привело фактически к появлению новых отраслей физики твердого тела. В отличие от фуллерена, представляющего собой молекулярную форму углерода, углеродные нанотрубки сочетают в себе свойства молекул и твердого тела и могут рассматриваться как промежуточное состояние вещества.

Идеальная нанотрубка — это цилиндр, полученный при свертывании плоской гексагональной сетки графита без швов. Все атомы углерода в нанотрубках имеют тройную координацию, а значит, нанотрубки — сопряженные ароматические системы, в которых три из четырех валентных электронов каждого углерода образуют локализованные *s*-связи, а четвертый участвует в образовании делокализованной *p*-системы (как, например, в бензоле). Эти *p*-электроны слабо связаны со своими атомами, поэтому именно они могут участвовать в переносе заряда в системе.

Взаимная ориентация гексагональной сетки графита и продольной оси нанотрубки определяет очень важную структурную характеристику нанотрубки, которая получила название хиральности (рис. 6.1). Хиральность нанотрубок обозначается набором символов (m, n) , указывающих координаты шестиугольника, который в результате сворачивания плоскости должен совпасть с шестиугольником, находящимся в начале координат.

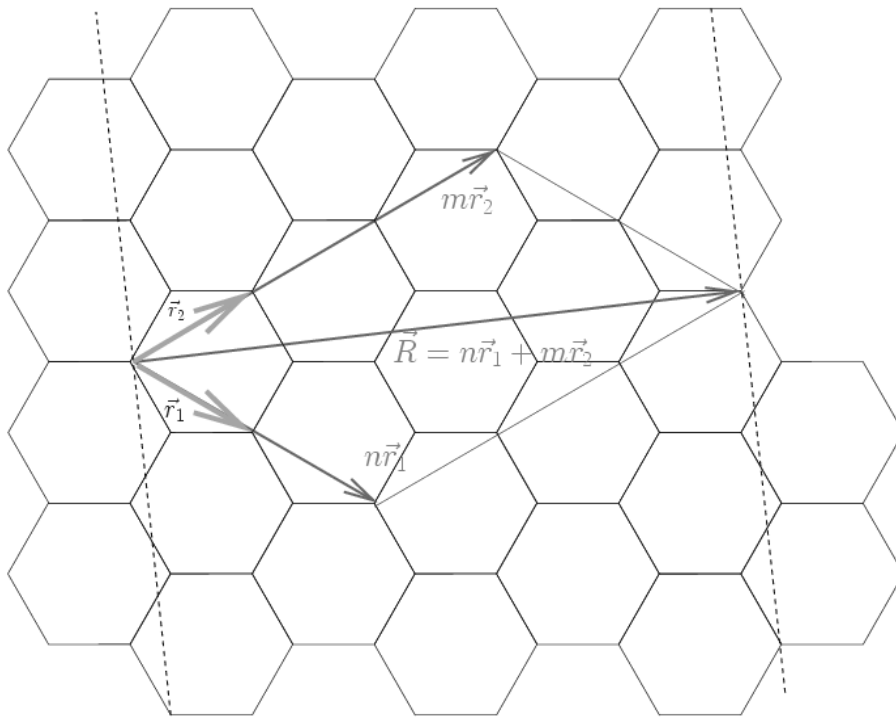


Рис. 5.1. Часть графитовой плоскости, свертывание которой в цилиндр приводит к образованию однослойной нанотрубки

Другой способ обозначения хиральности состоит в указании угла между направлением сворачивания нанотрубки и направлением, в котором соседние шестиугольники имеют общую сторону. Однако в этом случае для полного описания геометрии нанотрубки необходимо указать ее диаметр. Индексы хиральности однослойной нанотрубки (m, n) однозначным образом определяют ее диаметр D :

$$D = \sqrt{3(m^2 + n^2 + nm)}d_0 / \pi ,$$

где $d_0 = 0,142$ нм — расстояние между соседними атомами углерода в графитовой плоскости. Среди различных возможных направлений сворачивания нанотрубок выделяются те, для которых совмещение шестиугольника (m, n) с началом координат не требует искажения его структуры. Этим направлениям соответствуют, в частности, углы $\alpha = 0$ (armchair-конфигурация) и $\alpha = 30^\circ$ (zigzag-конфигурация). Указанные конфигурации отвечают хиральностям $(m, 0)$ и $(2n, n)$ соответственно. Структуры нанотрубок, отвечающие armchair- и zigzag- конфигурациям, показаны на рис. 6.2 (а, б). На рис. 5.2 (в) приведена структура нанотрубки с индексами хиральности $(10, 5)$.

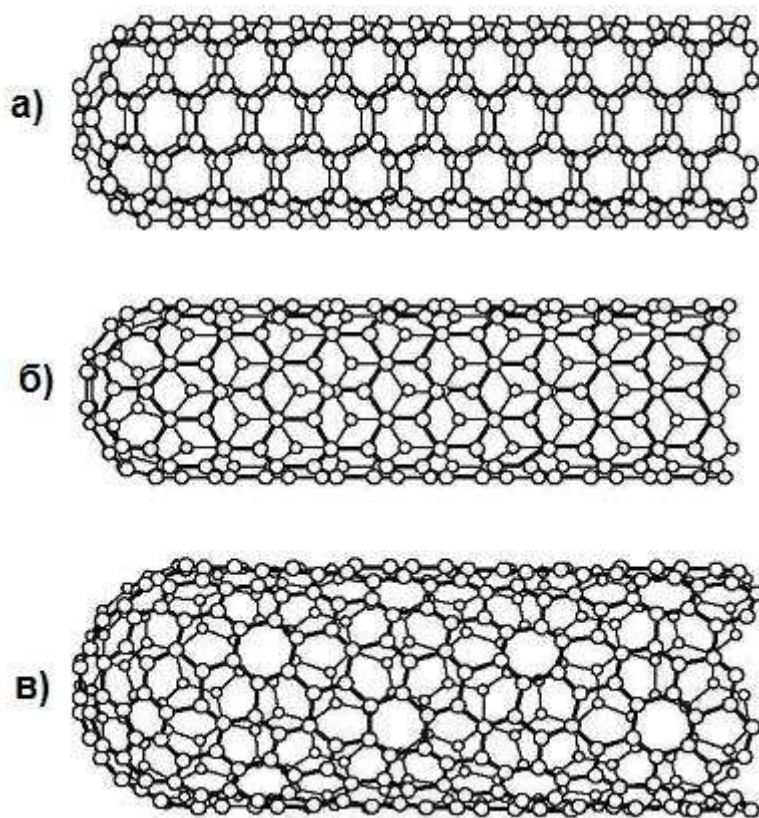


Рис. 5.2. Примеры нанотрубок различной хиральности: а) $\alpha = 0$ (armchair конфигурация), б) $\alpha = 30^\circ$ (zigzag конфигурация), в) трубка с хиральностью (10, 5)

Особое место среди однослойных нанотрубок занимают нанотрубки с хиральностью (10,10), также имеющие armchair конфигурацию ($\alpha = 60^\circ$). В нанотрубках такого типа две из С-С-связей, входящих в состав каждого шестичленного кольца, ориентированы параллельно продольной оси трубки. Как следует из расчетов, нанотрубки с подобной структурой должны обладать чисто металлической проводимостью. Кроме того, термодинамические расчеты показывают, что такие трубки обладают повышенной стабильностью и должны преобладать над трубками другой хиральности в условиях, когда преимущественно образуются однослойные нанотрубки. Справедливость этих утверждений была экспериментально подтверждена в 1996 г., когда впервые был осуществлен синтез нанотрубок с $D = 1,36$ нм, что соответствует хиральности (10, 10).

5.2. ЭЛЕКТРОННАЯ СТРУКТУРА, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ СПЕКТР И ПРОВОДИМОСТЬ НАНОТРУБОК

Электронная структура нанотрубки определяется ее геометрической структурой, т. е. хиральностью. Эта зависимость следует из результатов теоретических расчетов плотности заполненных электронных состояний для графитовых нанотрубок (рис. 5.3). Указанные состояния формируются в результате делокализации $2s$ - и $2p$ -электронов атома углерода, причем $2s$ -электроны при гибридизации заполняют области энергии ниже и выше уровня Ферми, в то время как $2p$ -электроны — область вблизи уровня Ферми. Уровень Ферми E_F разделяет занятые и вакантные состояния. При этом с изменением хиральности, а следовательно, и радиуса нанотрубки меняется также и ширина запрещенной зоны, которая, как следует из расчетов, оказывается монотонно спадающей функцией радиуса (рис. 5.4). Фактором влияния хиральности на электронные характеристики нанотрубок вместо введенных выше индексов (m, n) удобно выбрать индекс $k = m - 2n$ ($m > 2n$), однозначно определяющий электронные характеристики нанотрубки заданного радиуса.

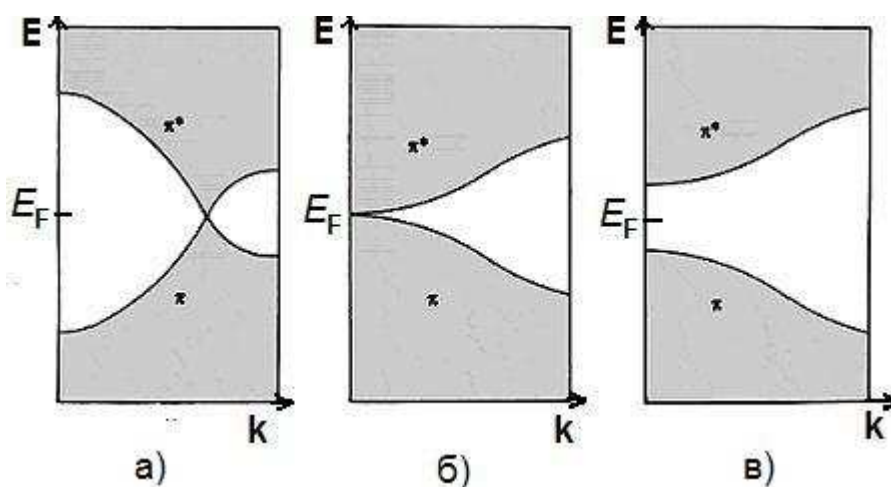


Рис. 5.3. Электронная структура УНТ: а) все трубки (n, n) металлические; б) трубки $(n, 0)$ металлические, если n кратно трем, в) полупроводниковые CNT $(n, 0)$, n не кратно 3.

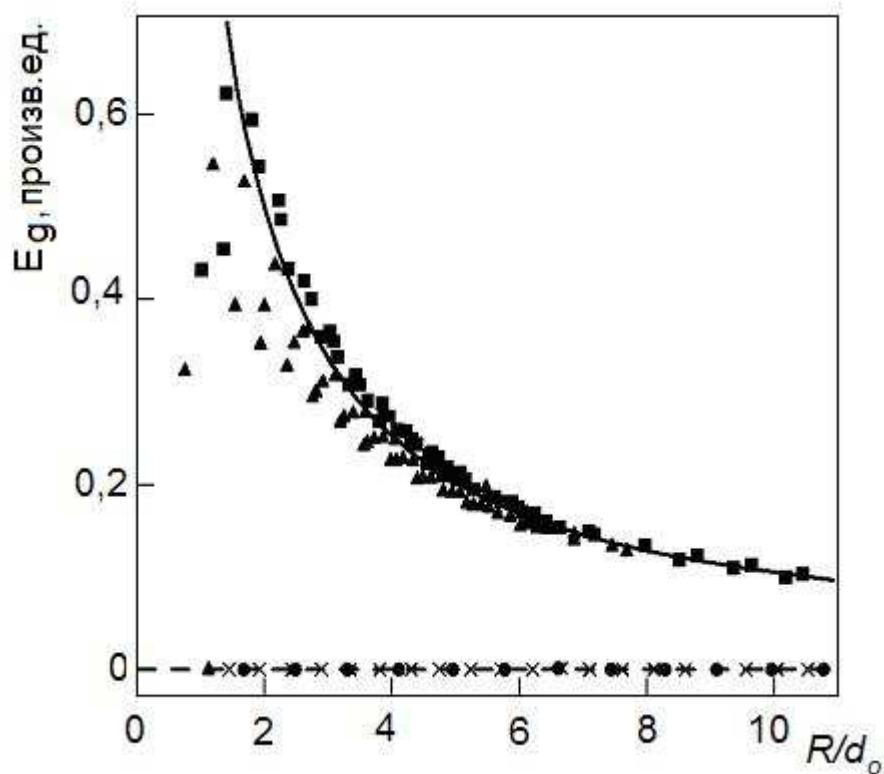


Рис. 5.4. Зависимость ширины запрещенной зоны от приведенного радиуса нанотрубки для трубок с различной хиральностью.

Трубка с $k = 0$, что соответствует углу хиральности $\alpha = \pi/6$, обладает металлической проводимостью; при $k = 3(q + 1)$ она представляет собой узкозонный полупроводник, а при $k = 3q + 1$ и $k = 3q + 2$ ($q = 0, 1, 2, \dots$) — полупроводник с умеренным значением ширины запрещенной зоны. Количественные соотношения, устанавливающие связь между индексами хиральности идеальной однослойной нанотрубки, ее радиусом и шириной запрещенной зоны, могут быть получены лишь на основании модельных расчетов с использованием сильных упрощающих предположений. Поэтому результаты расчетов, выполненных разными авторами, в деталях несколько отличаются друг от друга, однако характеризуются общими качественными тенденциями. Эти тенденции иллюстрируются на рис. 5.4, где представлены вычисленные для различных k зависимости ширины запрещенной зоны E_g длинной однослойной нанотрубки от радиуса нанотрубки R (ширина запрещенной зоны E_g выражена в единицах энергии взаимодействия двух p -электронов, принадлежащих соседним атомам углерода в графитовой решетке, которое приводит к образованию π -связи). Сплошной линией на рисунке показана зависимость $E_g = l/R_d$, установленная на основании упрощенного подхода без учета зависимости энергии взаимодействия p -электронов от радиуса нанотрубки. Обратно пропорциональная

зависимость ширины запрещенной зоны от радиуса нанотрубки, как и утверждение о металлическом характере электронной проводимости нанотрубок с $k=0$, использовались во всех модельных расчетах, предпринятых до настоящего времени. Указанная зависимость экспериментально подтверждена путем измерения вольт-амперных характеристик однослойных УНТ различного диаметра и хиральности в вакууме при $T=11$ К с помощью сканирующего электронного микроскопа. При этом подтверждена связь между структурой и электронными характеристиками УНТ.

При анализе механизмов проводимости следует различать проводимость индивидуальных нанотрубок (однослойных и многослойных) и проводимость материала, составленного из таких трубок. Поскольку УНТ представляют собой свернутую в цилиндр графитовую поверхность, можно ожидать, что характерное значение их проводимости в продольном направлении по порядку величины соответствует значению проводимости вдоль графитовой плоскости.

Однако, как следует из анализа обширного экспериментального материала, даже значения проводимости индивидуальных однослойных нанотрубок, измеренные разными группами, могут отличаться друг от друга на несколько порядков величины. Это обусловлено различиями структур однослойных нанотрубок, в частности, различиями в их хиральностях. Кроме того, большое влияние на проводимость могут оказывать дефекты поверхности нанотрубок, обусловленные возможным отклонением от идеальной гексагональной структуры и наличием присоединенных радикалов (ОН, СО и т. п.), изменяющих положение валентной зоны и зоны проводимости.

Тем самым оказывается, что отличающимися значениями проводимости характеризуются не только нанотрубки, полученные разными экспериментальными методами с использованием различных установок, но также и нанотрубки, полученные на одной и той же установке, но извлеченные с различных участков поверхности экспериментальной камеры. То же можно сказать и о температурной зависимости проводимости нанотрубок, которая обычно служит источником информации о механизме проводимости материала. Результаты разных экспериментов отличаются друг от друга не только характером, но даже знаком подобной зависимости как для однослойных, так и для многослойных нанотрубок.

В то время как проводимость индивидуальных УНТ определяется в первую очередь их геометрической структурой и наличием дефектов, проводимость материала, составленного из УНТ, в значительной степени зависит от степени контакта между соседними трубками, а также от наличия и состава примесей. Тем самым как абсолютные значения, так и характер температурной зависимости проводимости подобных материалов определяются не только методом, используемым при получении нанотрубок, но и степенью их очистки.

Измерения проводимости индивидуальной нанотрубки, выполненные с помощью атомно-силового микроскопа, показали, что проводимость прямолинейного участка однослойной нанотрубки, не испытывающей внешней нагрузки, составляет при комнатной температуре около 100 мкСм, что соответствует сопротивлению 10 кОм. По порядку величины это значение сопоставимо с величиной единичного кванта проводимости $G_0 = 2e^2/h$ (77,5 мкСм), который соответствует баллистическому механизму переноса заряда.

Открытия квантовой проводимости было впервые сделано у углеродных нанотрубок, когда измеряли зависимость их сопротивления от длины, погружая электрод с выходящими из него в ртуть (рис. 5.6).

Диаметр нанотрубок составлял от 1,4 до 50 нм, а длина от 1 до 5 мкм. Но, несмотря на такой большой разброс в размерах, сопротивление нанотрубок составляло около 12,9 кОм. Полученное значение проводимости однослойной нанотрубки указывает на баллистический механизм переноса заряда, согласно которому электроны даже при комнатной температуре преодолевают длину нанотрубки более 1 мкм без рассеяния. Если проводимость обычного провода обратно пропорциональна его длине и прямо пропорциональна поперечному сечению, то в случае нанотрубки она не зависит ни от ее длины, ни от ее толщины и идеальном случае равна кванту проводимости. При обычной температуре наблюдаемое значение плотности тока ($10^7 \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$) на два порядка превосходит достигнутую сейчас плотность тока в сверхпроводниках.

Значительно более высокое сопротивление (около 60 МОм) имеет однослойная нанотрубка с полупроводящими свойствами. При этом результаты измерений существенно зависят от точки приложения наконечника. Как следует из анализа результатов измерений, сопротивление полупроводниковых однослойных нанотрубок определяется наличием

барьеров, расположенных примерно каждые 100 нм вдоль длины нанотрубки, и связанных, по-видимому, с наличием дефектов.

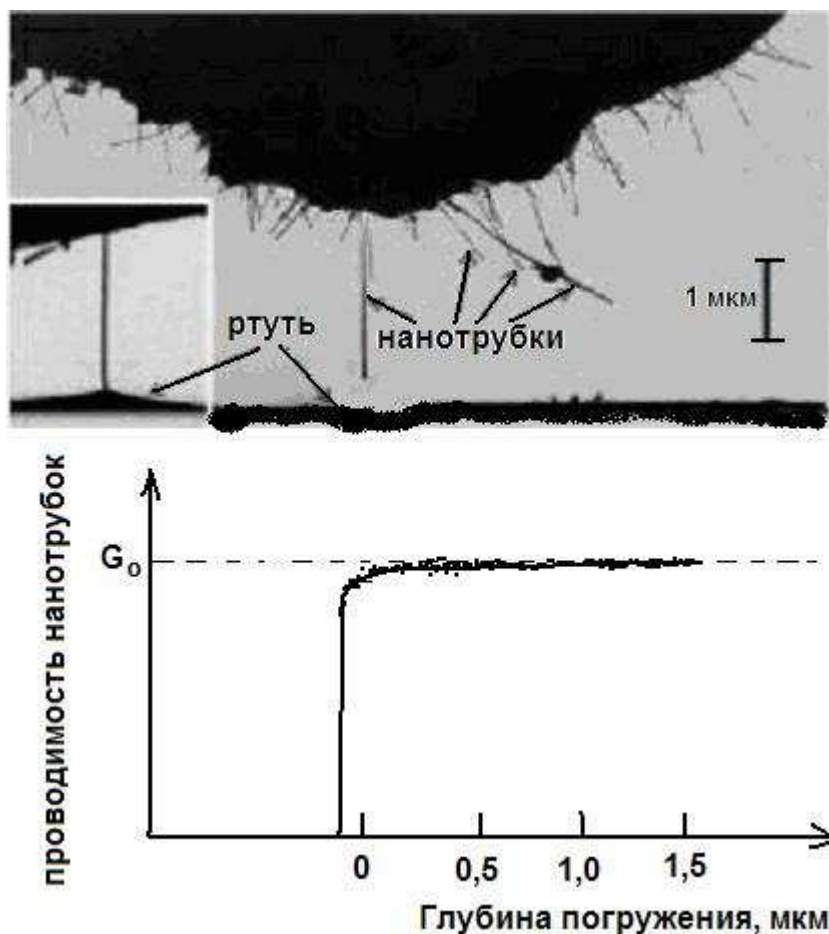


Рис. 5.6. Результаты измерения проводимости нанотрубок в зависимости от их длины

Для практических применений важна величина сопротивления контакта между нанотрубкой и токоподводами, которая весьма критическим образом зависит от материала токоподводов. Измерения вольт-амперных характеристик жгутов УНТ в контакте с Au, AuPd, Al и Co производились при $T = 4$ К и при 295 К. Согласно результатам измерений, сопротивление контактов однослойных УНТ с Au и AuPd составляет 10 кОм, контакт с Al практически не проводит ток, а контакт с Co имеет сопротивление порядка 100 кОм. Описанные результаты свидетельствуют о важной роли адгезии материалов нанотрубок и токоподводов в формировании контактного сопротивления.

Получение нанотрубок

Существует широкое многообразие условий, в которых наблюдается эффективное образование УНТ. В настоящее время наиболее распространен метод термического распыления графитовых электродов в плазме дугового разряда. Процесс синтеза осуществляется в камере, заполненной гелием под большим давлением. При горении плазмы происходит интенсивное термическое испарение анода, при этом на торцевой поверхности катода образуется осадок, в котором формируются нанотрубки углерода. Максимальное количество нанотрубок образуется тогда, когда ток плазмы минимален, и его плотность составляет около 100 A/cm^2 . В экспериментальных установках напряжение между электродами обычно составляет около 15–25 В, ток разряда — несколько десятков ампер, расстояние между концами графитовых электродов — 1–2 мм. В процессе синтеза около 90 % массы анода осаждается на катоде. Для разделения компонентов полученного осадка используется ультразвуковое диспергирование. Катодный депозит помещают в метанол и обрабатывают ультразвуком. В результате получается суспензия, которая (после добавления воды) подвергается разделению на центрифуге. Крупные частицы сажи прилипают к стенкам центрифуги, а нанотрубки остаются плавающими в суспензии. Затем нанотрубки промывают в азотной кислоте и просушивают в газообразном потоке кислорода и водорода в соотношении 1:4 при температуре 750°C в течение пяти минут. В результате такой обработки получается достаточно легкий пористый материал, состоящий из многослойных нанотрубок со средним диаметром 20 нм и длиной около 10 мкм. Наряду с дуговым разрядом для получения нанотрубок использовались процессы термического распыления поверхности графита в атмосфере инертного газа под действием лазерного облучения. Еще один эффективный подход к синтезу УНТ основан на химических процессах, происходящих при высокотемпературном взаимодействии углеводородов с металлическими катализаторами. К таковым относятся процессы термокаталитического распада углеводородов, химического осаждения паров из плазмы, содержащей углеводороды, и т. п. Среди других способов получения УНТ можно упомянуть электролитический метод, основанный на пропускании электрического тока через графитовые электроды, помещенные в жидкий электролит; метод, основанный на химическом превращении твердого полимера в материал, содержащий УНТ; твердотельный пиролиз

тугоплавких соединений углерода; прямое каталитическое превращение композитных порошков.

5.3. ПРИМЕНЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКЕ

Малые размеры, возможность при синтезе получить необходимую электропроводность, механическая прочность и химическая стабильность делают нанотрубки весьма желанным материалом для производства рабочих элементов в микроэлектронике. Рассмотрим реальные и гипотетические структуры молекулярной электроники, использующие нанотрубки.

Разработаны способы синтеза нанотрубок преимущественно заданной хиральности и, как следствие, заданной электропроводности, придуманы способы легирования нанотрубок и управления концентрацией носителей заряда *p*- или *n*-типа. Как видим, есть практически полная аналогия с тем, как это делается для обычных полупроводников — кремния, германия, арсенида и нитрида галлия, только размеры элементов полупроводниковых устройств в случае нанотрубок составляют единицы нанометров (если речь идет о диаметрах одностенных нанотрубок).

Фирмой IBM еще в 1998 г. был создан полевой транзистор на основе полупроводниковой или металлической нанотрубки, работающий при комнатной (в первом случае) и сверхнизкой (во втором) температуре (рис. 5.7). Нанотрубка лежит на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами, в качестве третьего электрода (затвора) используется кремниевый слой. В транзисторе на полупроводниковой нанотрубке электрическое поле управляет концентрацией носителей в зонах делокализованных состояний. В полупроводниковой нанотрубке при обычных условиях концентрация носителей в зонах мала и нанотрубка обладает высоким сопротивлением. При подаче на третий электрод (затвор) электрического потенциала U в области нанотрубки возникает электрическое поле и изгиб энергетических зон изменяется.

При этом концентрация дырок в валентной зоне (и соответственно электропроводность) возрастает по экспоненциальному закону со смещением края зоны относительно уровня Ферми. На экспериментальной зависимости проводимости транзистора от напряжения видно, что при потенциале затвора около -6 В концентрация дырок достигает максимального значения, сопротивление — минимального (рис. 5.8)

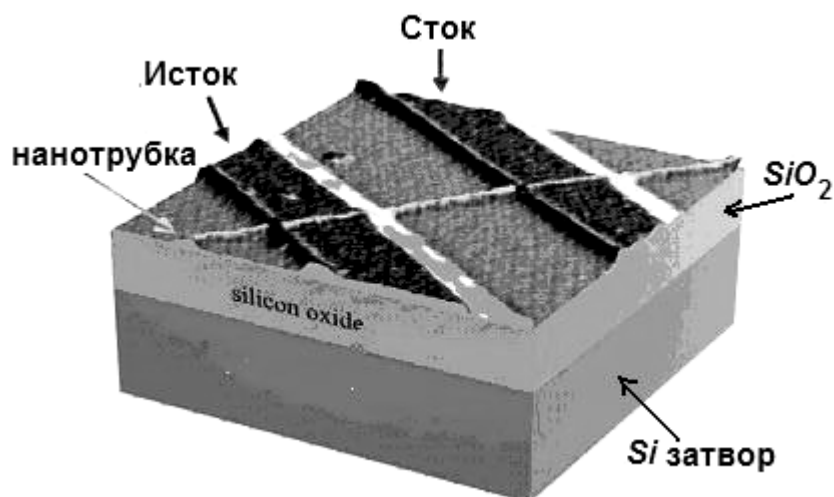


Рис. 5.7. STM-изображение первого полевого транзистора на одиночной УНТ, изготовленного фирмой IBM

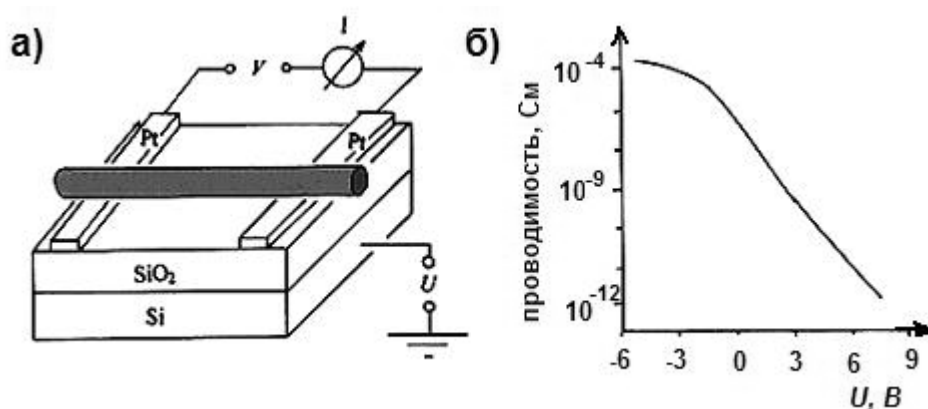


Рис. 5.8. Схема измерения ВАХ (а) и зависимость проводимости в цепи от потенциала затвора (б) для полевого транзистора на полупроводниковой УНТ, разработанный фирмой IBM.

При создании полевого транзистора на металлической нанотрубке используются эффекты туннельного переноса электронов через нанотрубку по отдельным молекулярным орбиталям. Из-за конечной длины нанотрубки ее электронный спектр, строго говоря, не непрерывен, а дискретен, с расстоянием между отдельными уровнями ~ 1 мэВ при длине нанотрубки ~ 1 мкм (рис. 5.9).

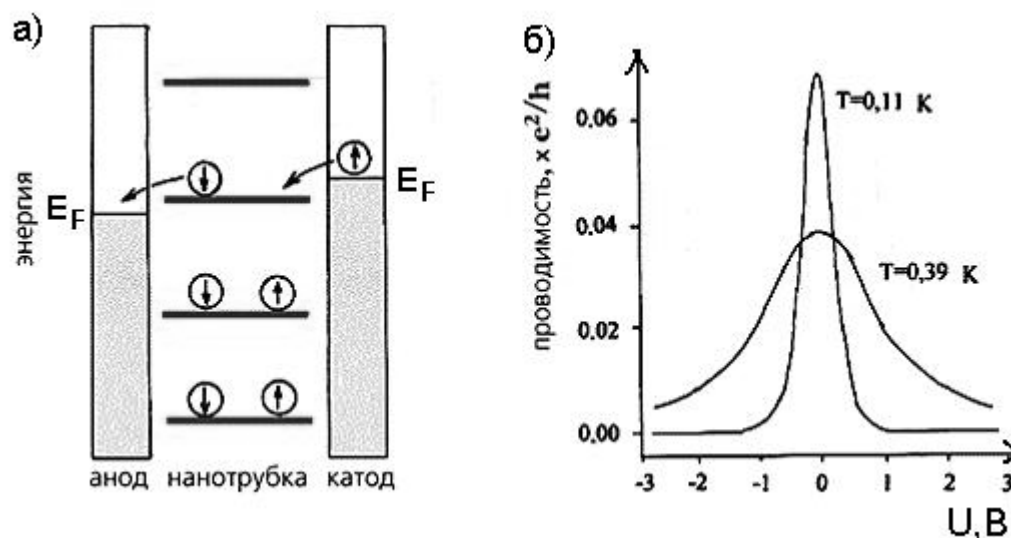


Рис. 5.9. Схема переноса электронов с участием одного дискретного уровня в полевом транзисторе на металлической нанотрубке (а) и зависимость проводимости в цепи от потенциала затвора (б)

Такой характер расщепления уровней не сказывается на электропроводности нанотрубки при комнатной температуре (0,025 эВ), но полностью определяет ее электрические свойства при температуре ниже 1 К. Проводимость металлической нанотрубки в таких условиях обусловлена тем, что электроны туннелируют с верхнего заполненного уровня катода на проводящий дискретный уровень нанотрубки, а затем с нанотрубки на нижний незаполненный уровень анода. В пределах нанотрубки туннелирование электрона происходит практически без рассеяния и без потерь энергии за счет π -электронных состояний, делокализованных на всю длину нанотрубки.

Высокая металлическая проводимость в электрической цепи возможна в случае, если также легко осуществляется перенос электронов между нанотрубкой и электродами. В эксперименте это достигается возможно более точной подгонкой уровней Ферми электродов к энергии проводящего уровня нанотрубки. Включение внешнего электрического поля при подаче электрического потенциала на третий электрод смещает электронный уровень нанотрубки, и ее сопротивление возрастает.

К сожалению, практическое использование активных элементов ИС, работающих при температурах ниже 1 К, весьма проблематично. В публикации сотрудников ИВМ утверждалась возможность использования для создания полевых транзисторов как одностенных, так и многостенных УНТ. Помимо этого варианта создания транзистора из нанотрубок между электродами из платины или золота, в 2002 г. был предложен иной вариант

полевого транзистора — из двух скрещенных нанотрубок (тоже многостенных).

Разработана и структура, воспроизводящая *p-n-p* биполярный транзистор на УНТ; структура формируется путем ионного легирования не закрытой фоторезистом части УНТ (рис. 5.10).

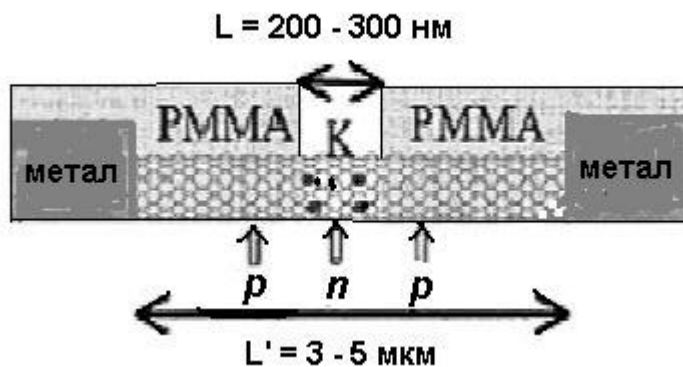


Рис. 5.10. Биполярный транзистор на УНТ, созданный методом ионного легирования

Ввиду использования стандартных методов литографии выигрыш в размерах активного элемента не очевиден, однако возможен выигрыш в быстродействии за счет изменения механизмов транспорта носителей. Как указано выше, сопротивление металлических нанотрубок имеет величину около 10 кОм. При воздействии на нанотрубку острием АСМ получено, что в результате изгиба нанотрубки на угол около 105° ее сопротивление увеличивается примерно в 100 раз, достигая значения около 1 МОм. Следовательно, изгиб нанотрубки, коренным образом изменяя ее проводимость, может служить основой выпрямляющего элемента. Нанотрубка, лежащая на непроводящей (кварцевой) подложке в контакте с двумя сверхтонкими проводами, имеет ВАХ диодного типа (рис. 5.11).

Теоретические расчеты показали, что если в идеальной однослойной нанотрубке с хиральностью $(8, 0)$ создать дефект в виде пары пятиугольник – семиугольник (рис. 5.12), то хиральность трубки в области существования дефекта становится $(7, 1)$. Нанотрубка с хиральностью $(8, 0)$ является полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,2 эВ, тогда как нанотрубка с хиральностью $(7, 1)$ является полуметаллом, для которого ширина запрещенной зоны равна нулю. Таким образом, нанотрубка с внедренным дефектом может рассматриваться как молекулярный гетеропереход металл - полупроводник и служить основой полупроводникового элемента рекордно малых размеров.

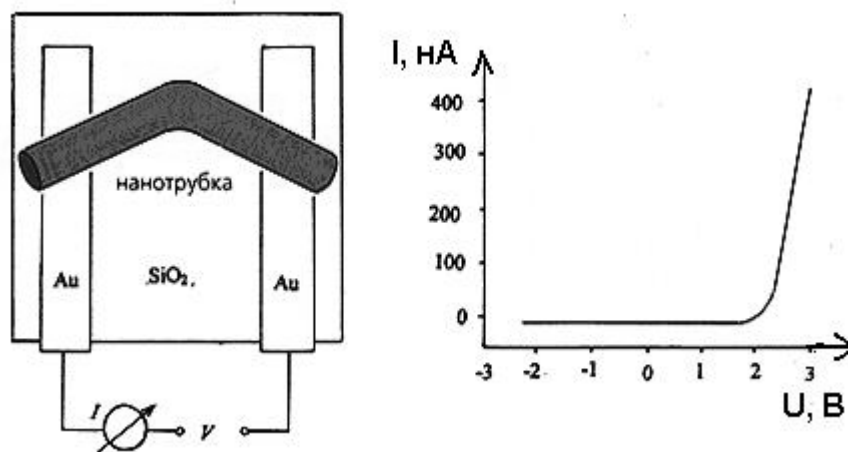


Рис. 5.11. Выпрямляющий диод на изогнутой нанотрубке и его вольт-амперная характеристика. (а); вольт-амперная характеристика для такой системы (б)

Наиболее впечатляющим достижением в этом направлении представляется изготовление такого молекулярного гетероперехода с использованием электронного пучка. Нанотрубки были извлечены из тканеподобной сажи, полученной электродуговым методом. При облучении электронным пучком просвечивающего электронного микроскопа точки пересечения двух (11, 11) трубок в течение 10 с в области пересечения появляется соединяющая трубка диаметром 0,33 нм и индексами хиральности (4, 0).

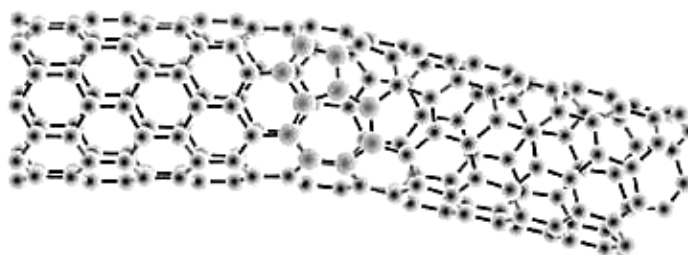


Рис. 5.12. Переход полупроводник – металл – полупроводник на основе дефекта в нанотрубке с хиральностью (8, 0)

Таким способом удалось создать в месте контакта нанотрубок однослойную нанотрубку диаметром 0,33 нм с индексами хиральности (4, 0). Эта трубка входит в состав перехода (11, 11) (4, 0) (11, 11), который представляет собой наименьший из известных на сегодня *p-n* переходов. Кроме того, в публикации Р. R. Vandaru с соавторами (Nature Materials 4, 663,

(2005)) описывались синтезированные специальным образом Y-образные одностенные углеродные нанотрубки, представляющие собой готовый полевой транзистор с затвором, истоком и стоком.

Весьма активно ведется поиск путей соединения нанотрубок друг с другом с целью конструирования УНТ-структур для различных наноустройств. Речь здесь идет не только об увеличении длины одной отдельно взятой УНТ за счет последовательного соединения нескольких УНТ, но и о создании достаточно сложных разветвленных сетей, в которых присутствуют T-образные или Y-образные контакты между УНТ (рис. 5.13). Ученые из National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (Цукуба, Япония) в 2008 г. предложили новый способ соединения УНТ путем пропускания через них электрического тока. При этом УНТ располагались между двумя электродами (иглой из W и проводом из Pd), на которые подавалось напряжение. Смещение УНТ по всем трем пространственным направлениям контролировали пьезодатчиком с точностью выше 0,5 нм, а непрерывное наблюдение за процессом формирования контактов проводили с помощью просвечивающего электронного микроскопа. Самым простым оказалось изготовить контакты «шапка-к-шапке» между одностенными УНТ одинакового диаметра (рис. 5.13). Стрелка показывает направление электрического тока.

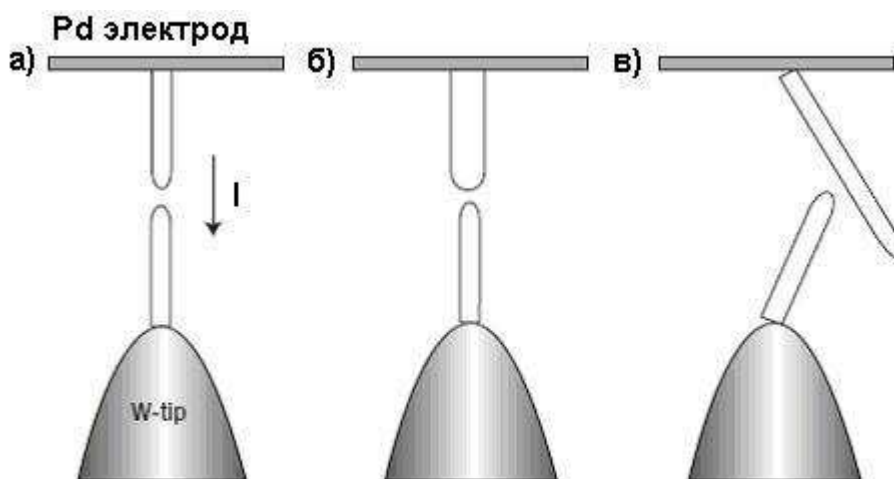


Рис. 5.13. Схематическое изображение трех типов контактов между УНТ: а) контакт «шапка-к-шапке» между УНТ одинакового диаметра; б) контакт «шапка-к-шапке» между УНТ разного диаметра; в) контакт «шапка-к-стенке»

Две УНТ сливались в одну при увеличении U и I до 1,6 В и 6 мкА, соответственно, что отвечает плотности тока $J \approx 7 \cdot 10^8$ А/см².

Детали процесса слияния остались невыясненными. Это связано с тем что оно происходит за время менее 0,5 с, недостаточное для получения изображения. Тем не менее, наличие воспроизводимых пороговых величин U и I указывает на его активационный характер. Действительно, пятиугольники из связей С-С, имеющиеся на шапках УНТ, при слиянии должны преобразовываться в шестиугольники за счет цепочки последовательных трансформаций Стоуна-Уэльса, энергия активации которых составляет несколько электронвольт. Источником этой энергии является джоулев нагрев до (600 – 1200) К и, возможно, процессы электромиграции. После формирования контакта на некотором удалении от него были обнаружены локальные дефекты (рис. 5.14), которые образовались, по-видимому, из-за миграции пятиугольников с шапок УНТ.

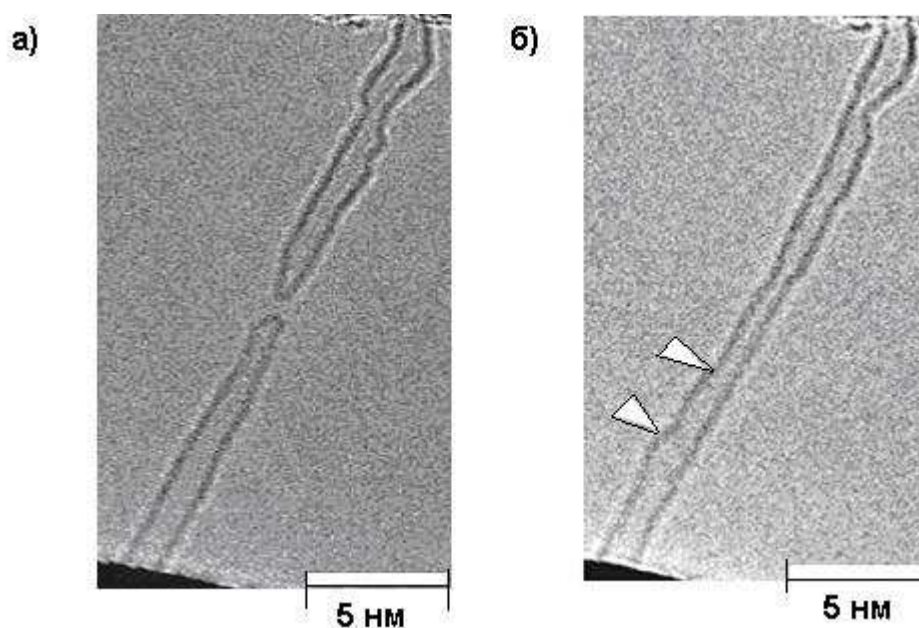


Рис. 5.14. Соединение «шапка-к-шапке» двух однослойных УНТ одинакового диаметра. Изображены исходная (а) и конечная (б) конфигурации. Стрелки указывают расположение локальных дефектов (выступов), образовавшихся в процессе формирования контакта

Для «шапка-к-шапке» соединения УНТ с различными диаметрами (например, 2 и 3,2 нм) пропускать через них ток оказалось недостаточно. Поэтому в УНТ были внедрены наночастицы W, которые, двигаясь под действием тока к области контакта, способствовали переориентации сетки связей С-С на шапках и формированию гладкой «перемычки» между УНТ,

т. е. фактически играли роль катализаторов, понижающих активационный барьер.

Сами частицы W при этом оставались в твердом (или квазитвердом) состоянии. Добиться воспроизводимых результатов при изготовлении контактов «шапка-к-стенке» не удалось: из 8 попыток только одна оказалась успешной. И все же развитая в методика существенно расширяет возможности по созданию разнообразных УНТ-структур. В 2001 г. в журнале *Science* (Henk W., 2001) опубликована работа, в которой реализован одноэлектронный транзистор на одиночной изогнутой углеродной нанотрубке, работающий при температуре 260 К. На рис. 5.15 показаны этапы его создания (а–г) и зависимость проводимости от напряжения на затворе.

Однослойная нанотрубка первоначально располагается между двумя золотыми электродами на подложке Si/SiO_2 (рис. 5.15, а). Первоначальное сопротивление нанотрубки не зависит от напряжения на затворе и составляет 50 кОм. Затем путем воздействия острием АФМ в двух разных направлениях ((а) и (б)) на нанотрубке создаются 2 изгиба, разделенные промежутком длиной 20 нм (в, г). При этом изогнутые участки играют роль изолирующих барьеров, отделяющих проводящий участок нанотрубки, и сопротивление нанотрубки увеличивается на порядок. Характеристики электронного переноса изучались при подаче напряжения смещения на верхний электрод и измерения тока на нижнем электроде. Дифференциальная проводимость dI/dU осциллирует в зависимости от напряжения затвора, в роли которого выступает кремниевая подложка.

Еще ряд эффектов, которые связаны с квантовой природой переноса заряда в молекулярных проводниках, могут быть использованы в электронных устройствах. Например, нанотрубка, которая находится при температурах около 1 К в контакте с двумя сверхпроводящими электродами, сама становится сверхпроводником. Этот эффект связан с тем, что куперовские электронные пары, образующиеся в сверхпроводящих электродах, не распадаются при прохождении через нанотрубку. При низких температурах на металлических нанотрубках наблюдали ступенчатое возрастание тока (квантование проводимости) при увеличении напряжения смещения, приложенного к нанотрубке: каждый скачок отвечает появлению очередного делокализованного уровня нанотрубки в промежутке между уровнями Ферми катода и анода.

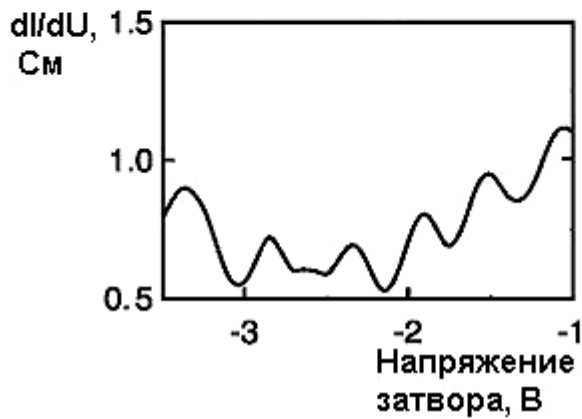
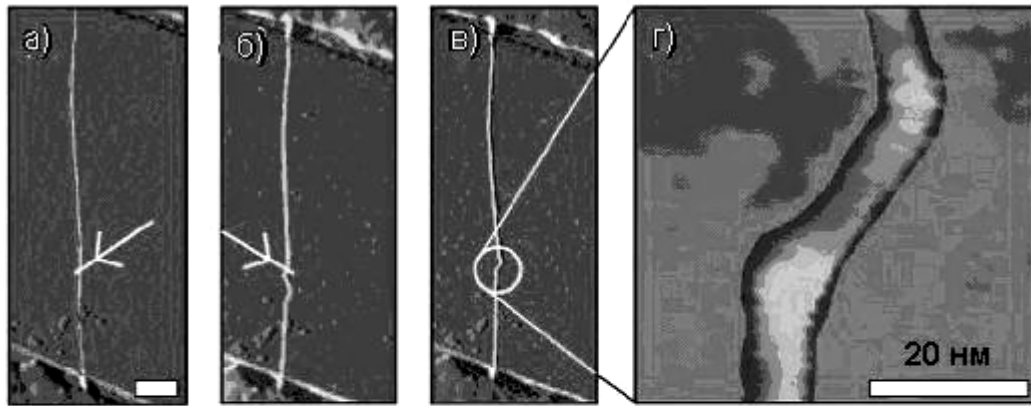


Рис. 5.15. Изображение этапов получения (а–г) и осцилляций проводимости одноэлектронного транзистора на УНТ

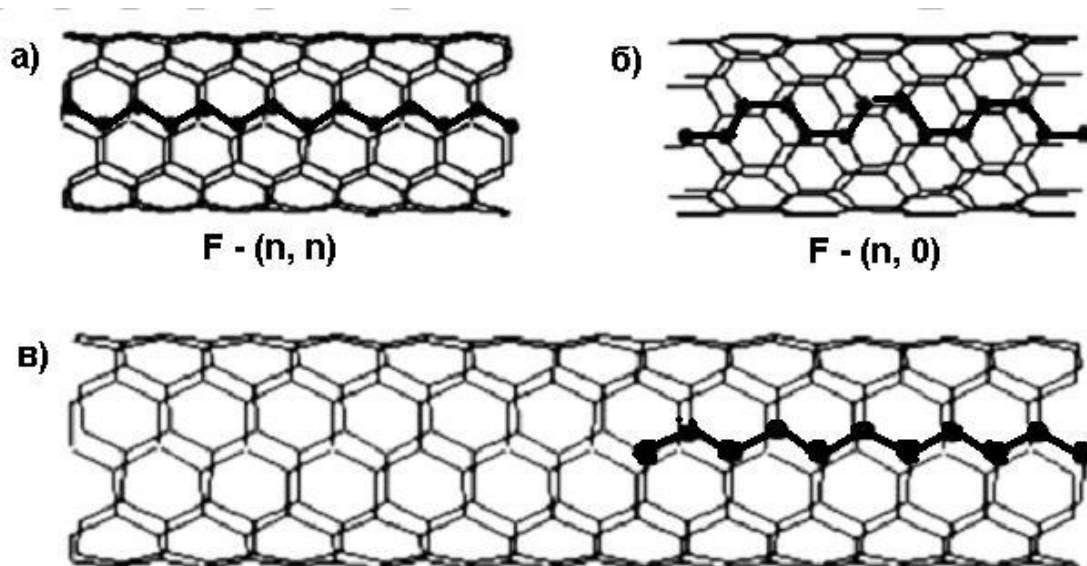
Кроме того, нанотрубки обладают ярко выраженным магнитосопротивлением: электропроводность сильно зависит от индукции магнитного поля. Если приложить внешнее поле в направлении оси нанотрубки, наблюдаются заметные осцилляции электропроводности: колебательный характер зависимости последней от потока магнитной индукции Φ через нанотрубку объясняется эффектом Аронова - Бома (зависимостью фазы электронной волны от Φ). В случае перпендикулярной ориентации поля наблюдается возрастание электропроводности, которое отражает модификацию энергетического спектра — образование уровня Ландау в точке пересечения валентной зоны и зоны проводимости, что дает рост плотности состояний на уровне Ферми.

Возможности использования нанотрубок в молекулярной электронике неизмеримо возрастают при переходе от чисто углеродных к химически модифицированным нанотрубкам. Например, благодаря наличию цилиндрической полости внутри углеродных нанотрубок удастся внедрить различные элементы, включая тяжелые металлы. Возможно добавление аддендов (например, атомов фтора) на внешнюю поверхность трубки. Кроме

углеродных сейчас умеют получать и бор-азотные нанотрубки. Во всех этих случаях должны получаться материалы с новыми и пока еще экспериментально не изученными свойствами.

Как показывают теоретические расчеты, внедрение переходных металлов в углеродные нанотрубки должно приводить к резкому возрастанию проводимости как полупроводниковых нанотрубок (за счет появления в запрещенной зоне электронных состояний металла), так и металлических (за счет повышения плотности состояний вблизи уровня Ферми). Гетеропереход может образоваться и при фторировании УНТ. Учет стерических и π -электронных взаимодействий при расчетах полной энергии фторированных нанотрубок показал, что присоединение атомов F с внешней стороны нанотрубки более выгодно, чем с внутренней. При этом атомы фтора должны присоединяться сначала к открытым концам нанотрубок, а затем выстраиваться вдоль образующей (рис. 5.16).

При добавлении фтора на внешнюю поверхность трубки меняется сетка π -связей, а значит — электрические и другие физические свойства. Как следует из расчетов, все нанотрубки F-(n, n) — полуметаллы, у которых на краю зоны Бриллюэна щель отсутствует. Так как все нанотрубки (n, n) металлические, наполовину фторированные нанотрубки будут представлять собой молекулярные гетеропереходы металл-полуметалл, независимо от их диаметра.



РРис.5.16. Различные структуры фторированных нанотрубок: а) полуметалл; б) полупроводник; в) гетеропереход металл-полуметалл

Согласно расчетам, щель запрещенной зоны у нанотрубок типа F-($n, 0$) исчезает, если $(n + 1)$ кратно трем (рис.5.17). В остальных случаях модифицированные трубки полупроводниковые. Так как в исходных, чисто углеродных нанотрубках ($n, 0$) запрещенная зона отсутствует, если n кратно трем, наполовину модифицированные нанотрубки ($n, 0$) будут, в зависимости от диаметра, образовывать гетеропереходы различных типов. Если $(n - 1)$ кратно трем ($n = 3l + 1, l = 1, 2, \dots$), это будет гетеропереход полупроводник-полупроводник, причем ширина запрещенной щели в модифицированной части трубки примерно в два раза меньше, чем в исходной (рис. 6.17). При других значениях n образуется гетеропереход металл -полупроводник, но при n , кратном трем, металлическому концу соответствует немодифицированная часть нанотрубки, а при $n = 3l + 2$ – модифицированная. Таким образом, путем химической модификации различных участков одной нанотрубки будут создаваться сложные многофункциональные электронные устройства, подобные интегральным схемам современных компьютеров.

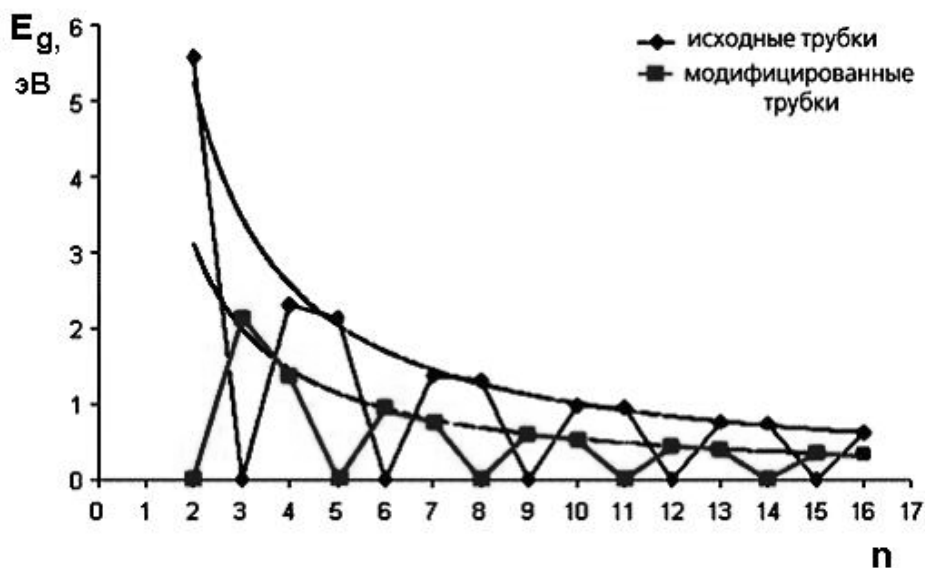


Рис. 5.17. Зависимость ширины запрещенной зоны для исходных и модифицированных фтором нанотрубок типа ($n, 0$) от параметра n .

Здесь на новом уровне реализуется идея легирования полупроводниковых материалов, породившая современную электронику.

5.4. НАНОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК

В наноэлектромеханических устройствах, являющихся наноаналогами простейших механических переключателей, используются механические свойства нанотрубок, а именно способность изгибаться под действием электрического поля.

В работе проф. Г. Амаратунга (G. Amaratunga) и его коллег из Кембриджского университета, опубликованной в журнале *Nature Nanotechnology*, описан вариант ячейки памяти наномасштаба, в котором зарядом конденсатора управляет наноэлектромеханическое устройство на основе многослойных углеродных нанотрубок. Нанотрубки расположены вертикально, их нижний конец присоединен к кремниевой пластине, покрытой слоем никеля, который играет роль катализатора в образовании нанотрубок при осаждении CVD методом. Продолжительность этого процесса определяет длину нанотрубки, а она, в свою очередь, задает такие механические параметры, как жесткость и резонансная частота. Устройство состоит из неподвижной нанотрубки и расположенной рядом колеблющейся нанотрубки. Вокруг неподвижной нанотрубки формируется цилиндрический конденсатор, который служит для хранения заряда. Незаряженный конденсатор соответствует состоянию 0, заряженный – 1, и конденсатор, таким образом, хранит один бит информации. Заряд или разряд конденсатора происходит при соприкосновении колеблющейся нанотрубки с неподвижной, при этом резонансная частота определяет в итоге скорость обмена данных, а жесткость нанотрубки определяет, какой заряд требуется для отклонения нанотрубки до соприкосновения с неподвижным элементом.

Согласно оценкам британских ученых, быстродействие в подобных наноэлектромеханических устройствах выше, а энергопотребление ниже, чем у современных ячеек DRAM-памяти на основе КМОП-транзистора. Вертикальное расположение нанотрубок позволит достичь очень плотной упаковки модулей памяти, так как при создании подобной ячейки памяти не используются процессы фотолитографии. Одно из самых перспективных разрабатываемых применений нанотрубок — это создание гибридной энергонезависимой оперативной памяти NRAM (Nonvolatile Random Access Memory). Первой данный тип памяти реализовала компания Nantero. В предложенной компанией схеме (рис. 5.18) на кремниевую подложку

наносится тонкая изолирующая пленка оксида кремния, вдоль которой размещены токопроводящие электроды шириной в 130 нм, отделенные друг от друга изолирующими слоями. Над электродами перпендикулярно к ним расположены массивы нанотрубок, которые замыкаются с обеих сторон на проводящие контакты. В обычном состоянии (состояние ВЫКЛЮЧЕНО) нанотрубки не касаются электродов и находятся над ними на высоте порядка 13 нм. Если к нижнему электроду приложить напряжение, то нанотрубка под воздействием электрического поля начнет выгибаться и коснется нижнего электрода.

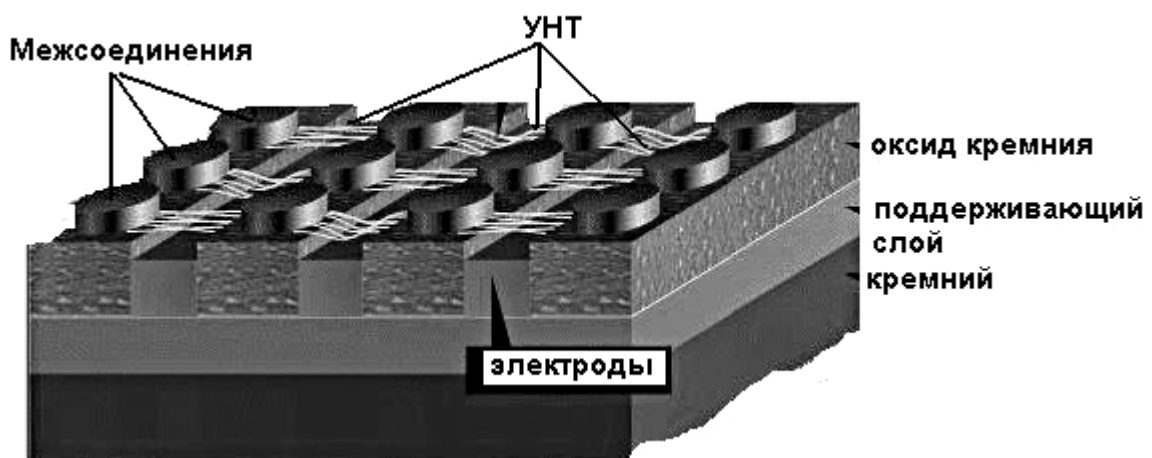


Рис.5.18. Организация массива гибридной энергонезависимой оперативной памяти NRAM на УНТ

Однако такое состояние (состояние ВКЛЮЧЕНО) оказывается устойчивым за счет баланса между возникающим механическим напряжением и Ван-дер-Ваальсовыми силами (рис. 5.19). В результате даже после исчезновения напряжения форма нанотрубки не изменится. Таким образом, меняя напряжение на электроде, можно переходить между двумя стабильными механическими состояниями нанотрубок, в одном из которых имеется контакт с электродом, а в другом — нет. Одно из этих состояний будет отвечать логическому нулю, а другое — логической единице.

В сравнении с традиционными типами, память NRAM имеет ряд преимуществ. Во-первых, несмотря на то, что это RAM-память, она является энергонезависимой. Во-вторых, по утверждениям компании Nantero, плотность записи информации в устройствах NRAM может достигать $5 \cdot 10^9$ бит/см² (на порядок больше, чем в выпускаемых ЗУ), а частота работы — до 2 ГГц. К настоящему времени компания Nantero выпустила модуль

NRAM-памяти емкостью 10 Гбит. Массовое производство модулей NRAM-памяти начнется в 2010 г.

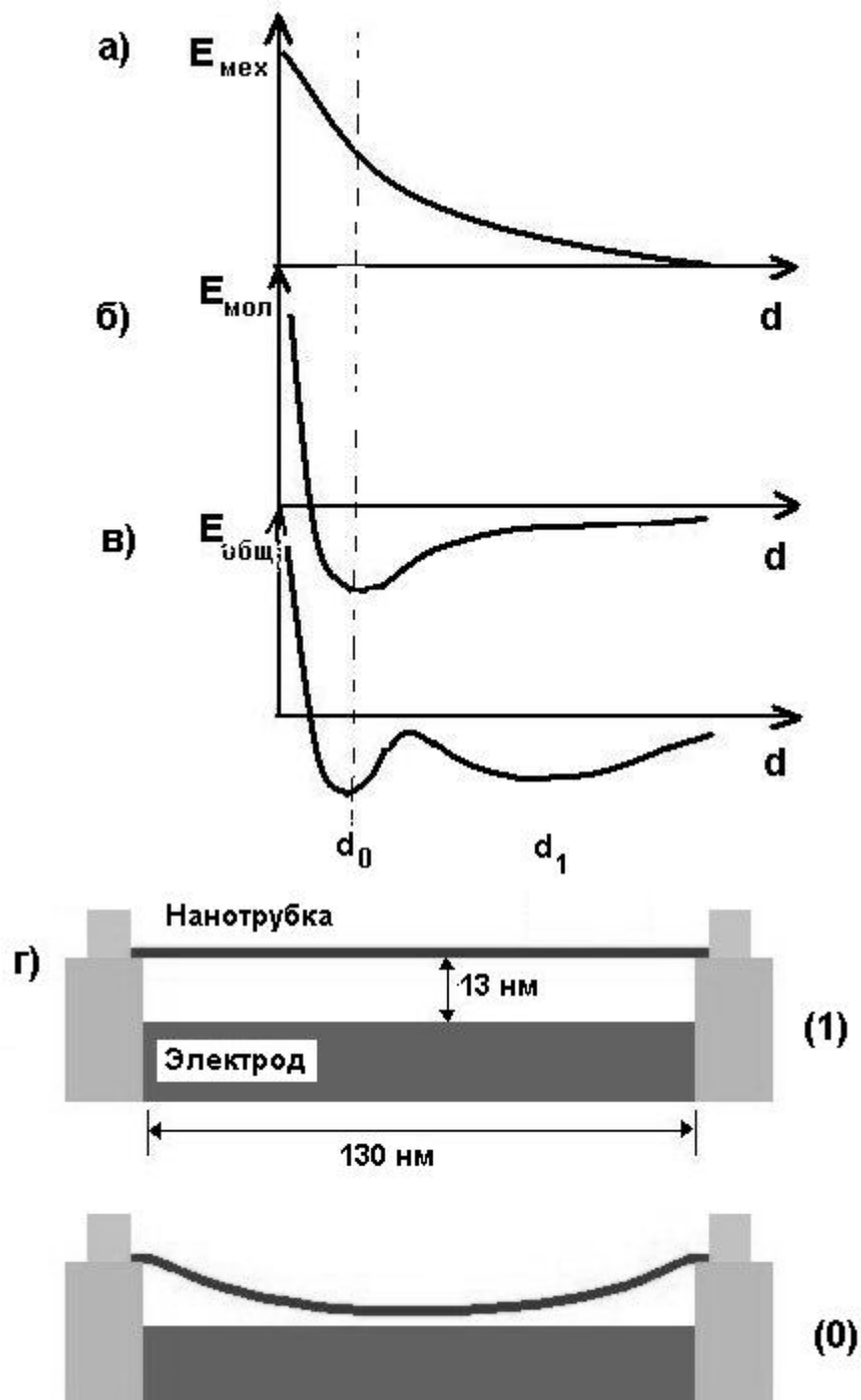


Рис. 5.19. Зависимость механической (а), ван-дер-Ваальсовой (б) и общей (в) энергии изгибающейся нанотрубки от расстояния от подложки, объясняющая наличие двух стабильных состояний системы; схематическое изображение этих состояний (г)

Предложено и пока технически нереализованное решение по созданию электромеханического запоминающего массива только на основе УНТ. Предлагается создать массив параллельных нанотрубок на подложке, а над ним с небольшим промежутком массив нанотрубок, перпендикулярный нижнему. Каждая трубка обоих массивов должна соединяться с металлическим электродом. Когда трубки не касаются друг друга, сопротивление запоминающей ячейки велико. Под действием электрического поля во включенном состоянии трубки касаются друг друга и сопротивление мало. При этом нижний массив трубок должен быть полупроводящим, а верхний — металлическим. Тогда в точке контакта образуется выпрямляющий контакт, пропускающий ток только в одном направлении. Плотность записи информации в такой структуре достигнет 10^{12} бит/см². Технологически реализовать такую структуру пока достаточно сложно. Однако в принципе можно использовать не параллельные массивы, а две хаотически пересекающиеся сетки нанотрубок со случайной сетью контактов. Такая структура будет наиболее близка к нейронным сетям и потребует новых подходов в организации архитектуры вычислительных устройств.

На основе нанотрубок в принципе возможно создание всего спектра активных и пассивных электронных устройств со сверхмалыми размерами. Однако впереди у физиков, конструкторов и технологов много нерешенных проблем. Самый труднопреодолимый и существенный недостаток УНТ — это то, что манипулирование ими затруднено из-за очень маленьких размеров элементов и осуществляется в основном методом АСМ. В отличие от полупроводниковых технологий, за углеродными нанотрубками не стоит более чем 50-летний успешный опыт технической эволюции. До сих пор исследователям не удавалось добиться одновременного регулирования размеров и пространственного положения углеродных нанотрубок, которое требуется для построения на их основе транзисторных цепей. Ниже перечислены основные причины, затрудняющие быстрое введение нанотрубок в промышленное производство:

- невозможность синтезировать нанотрубки четко определенных размеров (хиральности), характеризующиеся определенными электрическими свойствами. Обычно при синтезе образуются нанотрубки с большим разбросом параметров, что не позволяет использовать их серийно;

- производственно-технологические трудности интеграции нанотрубок в серийные микроэлектронные устройства – сложности ориентации, обеспечения определенного месторасположения;

- нагрев и значительные потери энергии в местах соединения «металл - нанотрубка» из-за высокого сопротивления соединения.

Как быстро могут быть решены эти проблемы? Рассмотрим перспективы поиска методов дешевого и массового направленного синтеза однослойных нанотрубок с заданной хиральностью.

Большинство существующих методов синтеза дает большой разброс по диаметрам нанотрубок. Свойства нанотрубок, образующихся в результате электродугового распыления графита, в существенной степени определяются наличием или отсутствием частиц катализатора в области их роста. Для синтеза однослойных УНТ в качестве катализатора используются как индивидуальные элементы (Co, Ni, Fe, Си, Mn, Li, B, Si, Cr, Zn, Pd, Ag, W, Pt, Y и Lu), так и их двойные и даже тройные смеси. В настоящее время усилия исследователей, разрабатывающих технологии получения нанотрубок, направлены на модификацию электродугового метода с целью повышения производительности процесса и снижения стоимости конечного продукта.

При лазерной абляции облучение графитовой поверхности в атмосфере буферного газа приводит к формированию в основном многослойных нанотрубок числом слоев от 4 до 24 и длиной до 300 нм. Использование мишени с содержанием катализатора порядка 1 % дает содержание однослойных нанотрубок в осадке 90 %. Наряду с нанотрубками осадок содержит наночастицы и частицы аморфного углерода. Характер распределения УНТ по диаметрам сильно зависит от длительности импульса и пиковой интенсивности лазерного облучения, при этом продемонстрирована возможность направленного синтеза УНТ с заданными структурными параметрами. В этом заключается одно из основных преимуществ лазерного метода синтеза УНТ. К недостаткам метода следует отнести его относительно невысокую производительность.

Наиболее существенные достижения в технологии получения УНТ основаны на проведении реакций термохимического разложения углеродсодержащих соединений на поверхности металлического катализатора. Этот подход, называемый методом каталитического химического осаждения в парах (Catalytic Chemical Vapor Deposition, CCVD), использовался для промышленного получения тонких углеродных волокон задолго до открытия УНТ. При осуществлении термокаталитического

разложения ацетилена над мелкодисперсными частицами железа при 700 °С на поверхности катализатора образуются протяженные углеродные нити, металлические частицы, заключенные в многослойную графитовую оболочку и многослойные нанотрубки длиной до нескольких десятком микрометров, внутренним диаметром от 10 нм и внешним диаметром до 100 нм. Геометрические параметры нанотрубок в существенной степени определяются условиями процесса (температурой, давлением и сортом буферного газа), а также степенью дисперсности и сортом катализатора. CCVD метод позволяет выращивать большое количества нанотрубок на поверхности специально приготовленной подложки (шаблона). Это открывает путь созданию крупномасштабного промышленного производства электронных полевых эмиттеров, содержащих УНТ. Выращивание большого числа одинаковых УНТ на подложке значительной площади возможно при обеспечении одинаковых условий протекания процесса на всех участках поверхности. При этом главное из условий относится к размерам частиц катализатора, а также к состоянию поверхности. В результате многочисленных исследований было установлено, что наиболее высокая степень однородности УНТ, выращиваемых методом химического осаждения, достигается при использовании пористой подложки с максимально высокой степенью однородности каналов. Оптимальной является ситуация, когда поры заполнены частицами металлического катализатора, размер которых совпадает с размерами пор. В этом случае диаметр УНТ, отрастающих от частиц катализатора, оказывается близким к размеру частиц и, соответственно, диаметру пор. Наилучшие результаты достигаются в случае применения специально приготовленного пористого кремния, структура которого способствует росту.

Для целей молекулярной электроники важна возможность управления геометрическими характеристиками образующихся нанотрубок посредством изменения параметров процесса. Эта возможность была продемонстрирована при сочетании известных методов механической обработки материала (фильтрование, обработки ультразвуком, центрифугирование) с химическими и термохимическими подходами, основанными на использовании химически активных веществ (кислот, пероксида водорода и др.), а также на нагреве материала в присутствии воздуха либо кислорода. Поскольку химическая стабильность углеродных нанотрубок, не имеющих свободных связей, значительно превышает стабильность частиц графита и металла, в результате описанных процедур содержание примесных частиц существенно

уменьшается, и при благоприятных условиях удастся получить материал, состоящий практически из чистых и однородных нанотрубок.

Направленное создание трубок заданной хиральности со свойствами или проводника, или полупроводника данным методом требует определенного выбора подложки. На пластине из аминосалила вырастают почти только полупроводники, а на подложке из ароматических соединений появляются трубки с металлическими свойствами. Этот способ получения нужных нанотрубок более эффективен, чем сортировка с помощью электрических или магнитных полей, плохо применимая в промышленных масштабах.

Другой подход в создании молекулярных устройств с заданным расположением нанотрубок — это не переносить готовые нанотрубки с помощью АСМ, а выращивать их в заданных местах подложки, в первую очередь, для формирования наносоединений между элементами обычной электроники. Группа исследователей компании Fujitsu Laboratories разработала способ выращивания групп многостенных углеродных нанотрубок с контролируемым диаметром вертикально на подложке. Планируется, что нанотрубки, получаемые таким способом, будут связывать MOSFET-транзисторы. От обычного метода создания нанотрубок (при помощи испарения лазером и дугового электрического разряда) Fujitsu отказалась, мотивируя это тем, что процесс плохо управляется — очень тяжело задавать местоположение, ориентацию нанотрубок в пространстве и их диаметр. Компания воспользовалась технологией химического плазменного осаждения, при котором метаново-водородная смесь разлагается в электрическом поле, вызывая рост нанотрубок в направлении электрического поля. Диаметр нанотрубок задается изменением количества никелевого или кобальтового катализатора в силицидном слое — на нем и выращиваются нанотрубки. Рост происходит через отверстия в материале, осажденном поверх силицида, что и позволяет проводить вертикальные соединения транзисторов. Однако метод металлического катализатора неидеален, так как в процессе создания УНТ к ним пристают частицы металла, намагничивающие их и делающие УНТ непригодными для использования в транзисторах. Чтобы удалить металл, их нужно кипятить в азотной кислоте, что приводит к разрушению до 70 % созданных нанотрубок, а значит, эффективность метода Fujitsu Laboratories не столь высока.

Фирма Intel проводит исследования на предмет использования основанных на нанотрубках проводников в межсхемных соединениях гибридных кремниевых-УНТ ИС, а также как часть системы охлаждения

кристалла. В 2004 г. Intel показала возможность ориентации нанотрубок в пучках посредством электрического поля, при этом удалось создать из углеродных нанотрубок прототип проводников, связывающих транзисторы внутри микросхем, и измерить их характеристики.

Для решения проблемы соединения нанотрубок (нанопроводов) и макропроводов (т. е. металлических шин, применяемых в микроэлектронике и формируемых методами фотолитографии) исследователи из Hewlett-Packard предполагают использовать формирование соединений с помощью случайного химического процесса с последующим отбором нужных связей. Граница контакта макро- и макропроводов «засевается» частицами золота. Экспериментально определено, что оптимальная концентрация частиц золота обеспечивает вероятность 50 % соединения «микроскопических» проводников с «макроскопическими». Случайный набор связей макропроводников с макропроводниками можно определить как кодовое слово, определяющее уникальный адрес нанопровода. В идеальном случае для адресования тысячи нанопроводов необходимо было бы сто макропроводов ($2^{10} = 1024$), однако адреса дублируются, и эффективное адресование существенно хуже. Использование большего числа макропроводов исправляет ситуацию (что вполне соответствует теории кодирования). Специалисты Hewlett-Packard считают, что увеличение числа макропроводников равно учетверенному логарифму числа нанопроводников.

Если стараться все же располагать нанотрубки упорядоченным заданным способом, например, параллельным массивом, то можно использовать способ, предложенный учеными компании IBM. Для создания нанотрубок ученые IBM используют сверхрешетку, образованную нанослоями кремния и углерода на подложке. При нагреве его до 1650 °С кремний испаряется, оставляя только слой углерода. При этом становящийся свободным монослой углерода завивается в форме трубки. Структура атомов, которая получается в результате, может служить шаблоном для образования углеродных нанотрубок, пригодных для использования в микропроцессорах. Эти структуры нужно расположить в виде сеток из параллельных линий, отходящих от транзисторов.

Фирмой NEC в 2008 г. заявлено о создании процесса, который позволяет решить вопросы, связанные с определением размеров и позиционированием, поскольку специалисты компании сумели добиться увеличения диаметра нанотрубок до стандартной величины непосредственно на микросхеме и научились регулировать их местоположение с точностью до 5 нм. По словам

представителей фирмы, используемый NEC процесс, детали которого не раскрываются, в ближайшее время способен дать ответ и на последний вопрос, связанный с пространственной ориентацией УНТ. Фирма NEC, обладающая исключительными правами на коммерциализацию технологии с использованием нанотрубок, сообщает о планах создания первого чипа на нанотрубках к 2012 г.

Как мы видим, гибридные кремниво-углеродные структуры близки к промышленному освоению. Для создания чисто молекулярных углеродных устройств необходимы другие подходы для решения проблемы заданной хиральности, ориентации нанотрубок и их соединения. Для целей молекулярной электроники весьма интересна возможность супрамолекулярного разделения УНТ на основе их хиральности. Задача размещения в заданном месте может решаться химическим путем с использованием самоорганизации систем. На нанотрубках закрепляются химические «бирки», которые самоорганизуют нанотрубки в необходимые конструкции. Данный процесс назван «избирательной функциональностью» (selective functionalization). Бирки притягивают или отталкивают концы нанопроводников и нанополупроводников, создавая функциональные цепи. Однако ряд ученых полагает, что решение такой задачи не под силу современной химии. Они считают, что достаточно для начала хотя бы дополнить существующие предельные кремниевые технологии нанотехнологиями на основе нанотрубок.

5.5. ГРАФЕНОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Присуждение в 2010 году Нобелевской премии по физике А. Гейму и К. Новоселову за исследования графена показало перспективность развития принципиально новой электроники на графеновой базе. Одним из серьезных преимуществ графена перед нанотрубками является относительная простота производства ИС на графеновой основе. Для этого не потребуются сложного оборудования, и устройства на новой основе можно будет изготавливать в больших количествах с помощью уже хорошо известной нанолитографии.

Графен — изолированный кусочек атомарной графитовой плоскости, т.е. sp^2 -углеродной гексагональной решетки представляет из себя как бы развернутую в плоскость нанотрубку (рис. 5.20). Ранее считалось, что двумерная графитовая сетка нестабильна и сворачивается в трубку. В 2004 г. была опубликована работа в журнале Science (К. S. Novoselov, А. К. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, А. А. Firsov;

Science, 306, 666 (2004)), где сообщалось о получении графена на подложке окисленного кремния. Таким образом, стабилизация двумерной плёнки достигалась благодаря наличию связи с тонким слоем диэлектрика SiO₂ по аналогии с тонкими плёнками, выращенными с помощью молекулярной эпитаксии. Впервые были измерены параметры проводимости и эффект Холла для образцов, состоящих из плёнок углерода с атомарной толщиной. Графен стабилен, очень гибок, прочен и проводит электричество. Благодаря уникальным свойствам углерода в пространственной решетке графена, последний характеризуется высокой мобильностью электронов, что делает графен очень перспективной основой устройств молекулярной электроники. Методы получения и свойства графена сейчас активно изучаются.

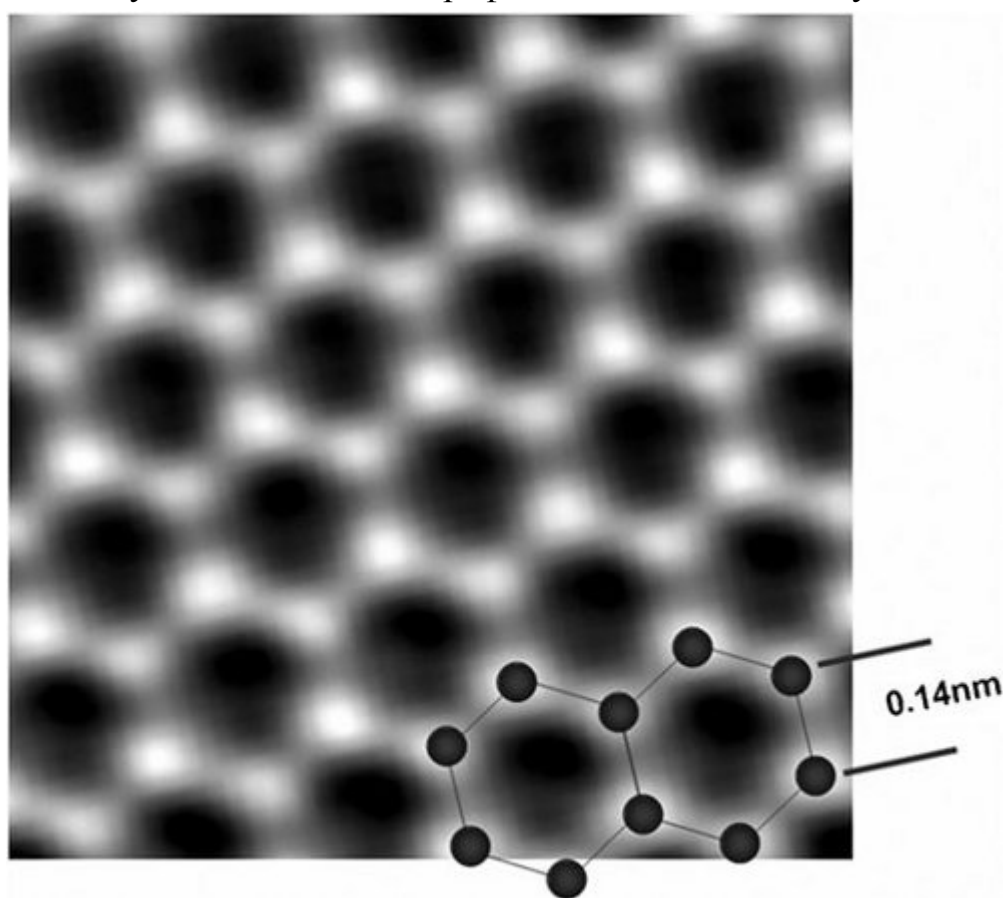


Рис. 5.20. Фрагмент *sp*²-углеродной гексагональной решетки в графитовой структуре

Макроскопические лепестки графена получают при механическом воздействии на пиролитический графит. Сначала тонкие слои графита помещают между липкими лентами и отделяют раз за разом тонкие слои графита. После отшелушивания фрагмент с тонкими плёнками графита и графена прижимают к подложке окисленного кремния. Горизонтальные

размеры плёнок составляют обычно около 10 мкм. Используя электронную литографию, можно задать форму плёнки для электрофизических измерений (холловский мост для магнитотранспортных измерений). Кусочки графена также можно приготовить из графита, используя химические методы. Для этого микрокристаллы графита подвергаются действию смеси серной и соляной кислот. Графит окисляется, и на краях образца появляются карбоксильные группы графена. Их превращают в хлориды при помощи тионилхлорида. Затем под действием октодециламина в растворе дихлорэтана они переходят в графеновые слои толщиной 0,54 нм. Этот химический метод не единственный, и, меняя органические растворители и химикаты, можно получить нанометровые слои графита.

Можно упомянуть ещё два метода: радиочастотное плазмохимическое осаждение из газовой фазы (PECVD) и рост при высоком давлении и температуре, который можно использовать для получения плёнок большой площади. Существует также несколько сообщений, посвящённых получению графена, выращенного на подложках SiC(0001). Графитовая плёнка формируется при термическом разложении поверхности подложки SiC (этот метод получения графена гораздо ближе к промышленному производству), причём качество выращенной плёнки зависит от того, C-стабилизированная или Si-стабилизированная поверхность подложки; в первом случае качество плёнок выше. Показано, что, несмотря на то, что толщина слоя графита составляет больше одного монослоя (т. е. фактически этот слой нельзя назвать графеном) в проводимости участвует только один слой в непосредственной близости от подложки, поскольку на границе SiC - C из-за разности работ выхода двух материалов образуется нескомпенсированный заряд. Свойства такой плёнки оказались эквивалентны свойствам графена. Высокая подвижность носителей заряда ($\sim 10^4 \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре — на порядок больше, чем в кремнии) наряду со сравнительно низкой стоимостью изготовления делает графен перспективным материалом для использования в нанoeлектронных устройствах нового поколения. Однако на пути к графеновой электронике предстоит решить ряд серьезных проблем, одной из которых является отсутствие в графене энергетической щели между зоной проводимости и валентной зоной (графен — бесщелевой полупроводник, рис. 5.21).

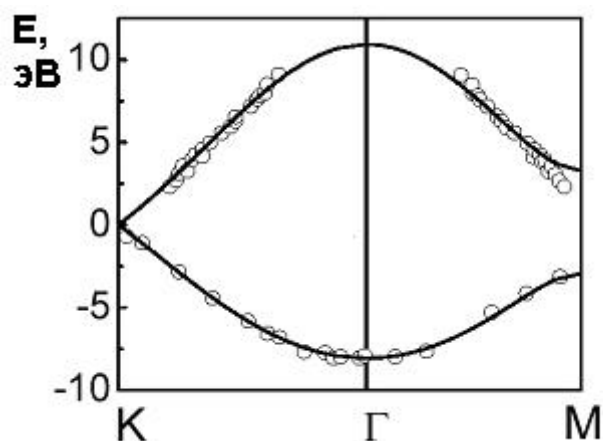


Рис. 5.21. Зонная структура графена

Голландские физики из Delft University of Technology исследовали двухслойные графеновые образцы и показали, что при наличии перпендикулярного к ним электрического поля E в электронном спектре открывается щель (рис. 5.22).

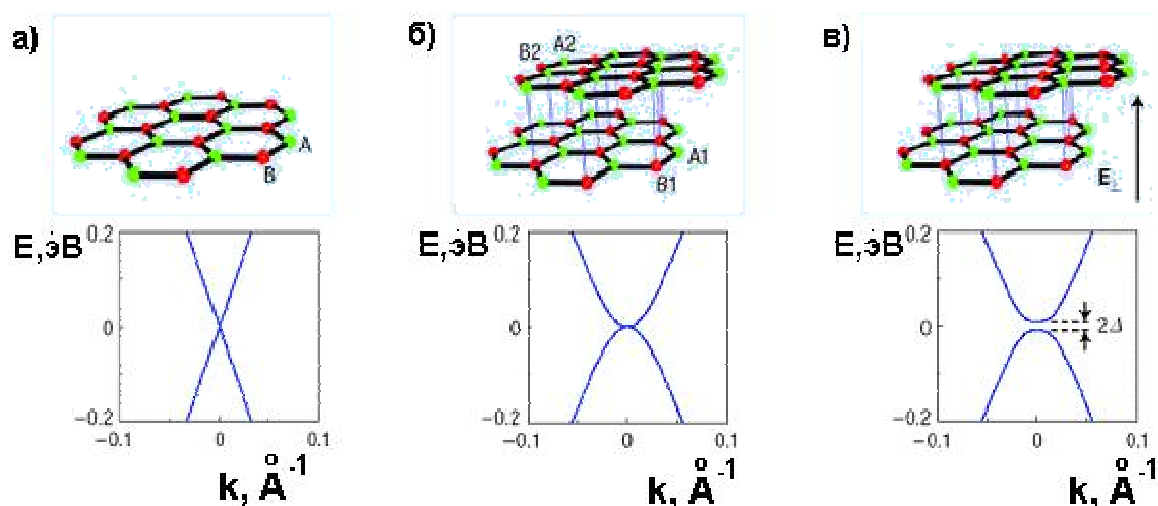


Рис. 5.22. Законы дисперсии электронов в однослойном (а) и двухслойном (б, в) образцах графена; (б) – без поля, (в) – с полем

Этот эффект обусловлен различием (при $E \neq 0$) «узельных» энергий электрона на атомах, расположенных в разных слоях. Таким образом, проводимость можно регулировать за счет изменения электрического потенциала на образце (положение уровня Ферми при этом контролируется другим электродом). Эксперименты проведены при низких температурах. Для практических целей желательно, конечно, научиться манипулировать проводимостью графена при комнатной температуре. В 2008 г. в статье Л.А. Пономаренко с соавторами (Science, 320, 356-358 (2008))

продемонстрировано функционирование при комнатной температуре одноэлектронного графенового транзистора размером всего 30 нанометров.

Манипулировать свойствами графеновых элементов можно и изменяя их форму (создавая графеновые наноленты), а также функционализируя концы углеродной сетки. В узких полосках графена, из-за размера называемых нанолентами, из-за квантово-размерных эффектов возможно образование запрещенной зоны, ширина которой обратно пропорциональна поперечному размеру ленты.

Международная команда ученых из Университета Альберты (University of Alberta) и Национальной Лаборатории Хефэй (Hefei National Laboratory) математически смоделировала создание программируемого графенового логического массива на основе квантовых точек для создания RAM-памяти и для построения логических цепей компьютеров. В графеновой нанoeлектронике для работы RAM-блока не нужно соединять отдельные ключи нанопроводниками – графеновый лист представляет собой полностью функциональное, цельное устройство.

Устройство состоит из двух основных типов Z-образных графеновых нанолент (рис.5.23), которые характеризуются либо полупроводниковыми, либо металлическими характеристиками.

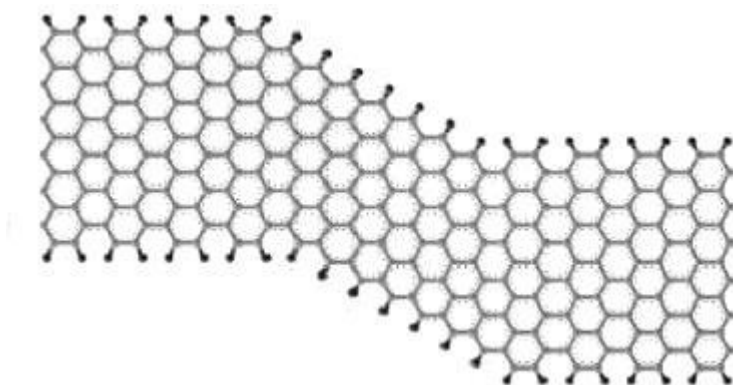


Рис. 5.23. Z-структура графеновой плоскости

Металлические или полупроводниковые свойства структуры зависят от ширины графеновой ленты, а лента-зигзаг, согласно расчетам, имеет только явно выраженные металлические свойства. При этом квантовая точка формируется при изменении энергетического состояния Z-ленты. Таким образом, при подаче внешнего напряжения на массив нанолент, разделенный между собой краевыми разделителями (они формируются на границе раздела графеновых лент разной структуры), может работать как массив

RAM-памяти, так как наличие либо отсутствие квантовой точки на местах пересечения лент будет соответствовать логическому «0» или «1».

В 2008 г. было объявлено, что химики из Стенфордского Университета (Stanford University) во главе с Хонджи Даи (Hongjie Dai) разработали полевой нанотранзистор на графеновой полоске (рис.5.25), работоспособный при комнатной температуре.

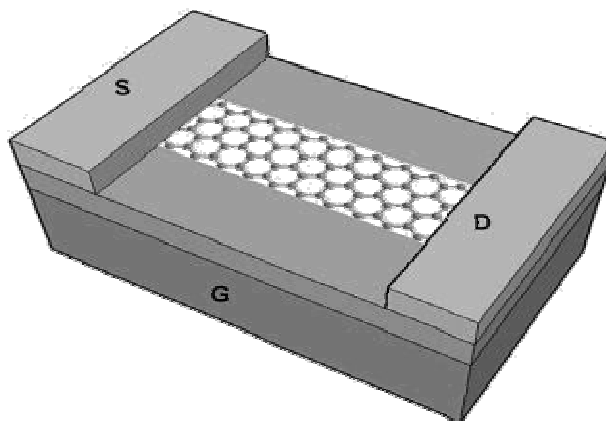


Рис. 5.25. Аналог полевого транзистора наномасштаба с каналом из графеновой ленты

Международная группа исследователей совершила ряд прорывов в области технологии получения графена. Благодаря новым шагам в этой достаточно молодой сфере знаний времена, когда быстросействующая электроника, включая чипы и сенсорные экраны, будет базироваться на графеновых нанотехнологиях, значительно приблизились. Несмотря на то, что изучением графена занимаются многие коллективы учёных по всему миру, до сих пор удавалось изготовить лишь небольшие образцы, сильно ограничивавшие понимание, измерение свойств и наблюдение за графеном. Необходимы структуры достаточного размера, чтобы можно было проводить практическое изучение – например, электрических характеристик. По сути, преодолены два препятствия, являвшиеся помехой для масштабирования технологии.

До настоящего времени размер получаемого в лабораториях графена достаточного качества в форме "хлопьев" составлял доли миллиметра, а методы не отличались удобством и подразумевали снятие слоёв с кристаллов графита с помощью клейкой плёнки. Понятно, что для практического применения и особенно изучения площадь материала должна быть несколько большей. Группе учёных, в том числе из британской Национальной

лаборатории физики (National Physical Laboratory, NPL), удалось впервые "вырастить" слои графена площадью около 50 мм² и использовать их в электронных устройствах. Образцы изготовлены эпитаксиальным способом, когда один слой кристаллов формируется на другом. Основой выступил карбид кремния. Достижение доказывает, что масштабирование графена реализуемо на практике.

Второй прорыв заключается в измерении электрических свойств графена с беспрецедентной точностью, что прокладывает путь к установлению стандартов. Для эффективности и коммерческой привлекательности таких устройств, как полупроводниковые элементы в компьютерах, производители должны иметь возможность осуществлять измерения их характеристик в соответствии с международными стандартами. Применительно к сопротивлению одним из них является квантовый эффект Холла – явление, при котором электрические свойства двумерного материала могут быть установлены только на основании фундаментальных постоянных. До сих пор эффект наблюдался лишь в небольшом количестве обычных полупроводников. Более того, измерения требуют условий с близкой к абсолютному нулю температурой и сильным магнитным полем, что могут обеспечить немногие лаборатории.

Квантовый эффект Холла проявляется, когда ток проходит через двумерный материал в перпендикулярном магнитном поле, а напряжение измеряется перпендикулярно и к току, и к полю. В пределах определённых интервалов поля отношение этого напряжения к току, известное как холловское сопротивление, зависит только от комбинации фундаментальных констант – постоянной Планка и заряда электрона. Из-за универсальности квантовый эффект Холла является базисом для стандарта сопротивления, независимого от конкретного изучаемого образца.

Достаточно крупные слои графена с продемонстрированным учёными холловским сопротивлением должны заменить традиционные полупроводники в массовом масштабе. Поскольку квантовый эффект Холла достижим при более высоких температурах, основанный на нём стандарт доступен многим лабораториям, а значит стоимость производства графеновой электроники будет ниже, а объём – больше. На впечатляющих результатах работа не останавливается – учёные надеются на финансовую поддержку со стороны ЕС для дальнейшего продвижения в точности измерений и повышении необходимой для этого температуры. Для потокового производства графеновых ИС требуются подложки порядка 10 см

в диаметре. Однако самая большая графеновая подложка, созданная на сегодняшний день, имеет диаметр всего лишь 500 мкм. Если исследователи смогут найти способ увеличения подложек, кремний в чипах будет заменен графеном. По мнению ученых, до появления первых графеновых ИС может пройти не менее 10 лет.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Королев М.А.* Технология, конструкции и методы моделирования кремниевых интегральных микросхем. Часть 1/ М.А.Королев, Т.Ю.Крупкина, М.Г.Путря, В.И.Шевяков — М. БИНОМ, 2009 —422с.
2. *Борисенко В.Е.* Нанoeлектроника / В.Е.Борисенко, А.И. Воробьева, Е.А.Уткина. —М.-БИНОМ, 2009— 223с.
3. *Щука А.А.* Функциональная электроника : Учебник для вузов/ А.А. Щука. — М. : Изд-во МИРЭА, 1998. — 674 с.
4. Научные основы нанотехнологий и новые приборы [пер. с англ.]/ ред. Р. Келсалл, И. Хемли, М. Джиогхеган. — М. : Интеллект, 2008. — 800 с.
5. *Рамбиди Н.Г.* Нанотехнологии и молекулярные компьютеры/ Н. Г. Рамбиди. — М. :Физматлит, 2007. — 256 с.
6. *Дьячков П.Н.* Углеродные нанотрубки. Строение, свойства , применения / П.Н. Дьячков. — М. : Бином, 2006. — 293 с.
7. *Пул-мл. Ч.* Нанотехнологии [пер. с англ.] / Ч. Пул-мл., Ф. Оуэнс. — М. : Техносфера, 2007. — 375 с.
8. *Денисенко В.В.* Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике./В.В.Денисенко —М. : Физматлит, 2010. — 406 с.
9. *Денисенко В.В.* Особенности субмикронных МОП-транзисторов // Chip News. 2002. № 7. С. 27–37.

Приложение 1. Примеры расчетных заданий

1. Термическое окисление кремния в производстве ИС.

1. Рассчитайте и постройте кривую зависимости толщины термического окисла от времени окисления в сухом и влажном кислороде при $T = 1200^{\circ}\text{C}$, 1000°C , 920°C . $P_{\text{H}_2\text{O}} = 85 \cdot 10^3$ Па. Сделайте выводы о применимости таких процессов на различных технологических стадиях производства ИС. Каковы пути сокращения времени окисления? Для каких целей добавляют РСІ в окислительную среду?

2. Покажите, что на формирование слоя окисла толщиной d_0 расходуется слой Si толщиной $0,45 d_0$ ($\rho_{\text{SiO}_2} = 2,27 \text{ г/см}^3$).

3. Кремниевая пластина подвергается ряду последовательных операций термического окисления. Определить результирующую толщину окисла, если d_1, d_2, \dots, d_n - толщины, которые были бы получены при проведении этих операций на неокисленной пластине.

4. Используя уравнение зависимости толщины окисла от времени окисления (в модели Дила и Гроува), определите, сколько времени потребуется для выращивания пленки SiO_2 толщиной 2 мкм при температуре 920°C , 1000°C и 1100°C и давлении паров воды $85 \cdot 10^3$ Па, $2 \cdot 10^5$ Па. Обоснуйте зависимость скорости окисления от давления водяного пара. В чем преимущества такого процесса?

5. Рассмотрите окисление кремниевой легированной подложки. Как влияет легирование на скорость окисления (для случаев легирования бором и фосфором)? Нарисуйте (качественно) диаграммы распределения примеси на границе раздела Si-SiO₂ при окислении для случаев легирования примесью В, Р, Ga. Коэффициент сегрегации примеси бора 0,1; фосфора 10; галлия 20; (Р- медленная диффузия в окисле, Ga – быстрая диффузия).

6. Напишите схему технологического процесса, которая предусматривала бы локальное формирование плоского заглубленного окисла в Si. Как можно предотвратить продольное окисление?

7. Поверхность кремниевой пластины покрыта маскирующим окислом толщиной 500 нм. В окисле вытравливается окно для базовой диффузии, затем в окне снова выращивается окисел толщиной 500 нм. В пределах первого окна вытравливается второе окно для эмиттерной диффузии, а

затем в этом окне снова выращивается окисел толщиной 500 нм. Найдите высоту ступенек на поверхности окисла и кремния.

2. Диффузия в технологии ИС.

1. Обосновать выбор диффундирующих элементов при формировании диффузионных областей.

2. Сформулировать технологические особенности этапов загонки и разгонки примесей. Дать математическое описание.

Фосфор внедряется в кремний типа КДБ-15 при температуре 1100°C , создавая область с $R_s = 40\text{ м}/\square$, глубиной залегания p-n перехода 1,5 мкм. Определить концентрацию примеси на глубине 1 мкм.

3. В кремниевую пластину вводится фосфор из газового источника при 975°C в течение 30 мин. Определите глубину перехода для кремниевой подложки p-типа с удельным сопротивлением 0,3 и 20 Ом·см.

4. В пластину кремния n-типа вводят атомы бора из BCl_3 с суммарной поверхностной концентрацией 10^{15} см^{-2} . Последующее диффузионное перераспределение проводят при 1100°C в атмосфере азота. Требуемая глубина перехода составляет 2 мкм. Как долго должно продолжаться диффузионное перераспределение? Изобразите результирующее распределение бора по глубине. Качественно опишите влияние удвоения времени диффузионного перераспределения.

5. Обсудите маскирующие свойства SiO_2 при легировании различными примесями. Рассчитайте необходимую толщину окисной маски при диффузии В и Р при температуре 1100°C в течение 1 ч.

3. Ионная имплантация в технологии ИС.

1. Получите выражение для определения толщины маскирующего покрытия при локальном ионном легировании.

2. С какой целью и как используется ступенчатое ионное легирование?

3. Пластина кремния n-типа с $\rho = 5\text{ Ом}\cdot\text{см}$ легируют ионами В с дозой 10^{12} см^{-2} при энергии 100 кэВ. Затем проводят диффузию при 1000°C в течение 2 ч. Какова толщина области p-типа сразу после ионного легирования и после проведения процесса диффузии? Чему равна пиковая концентрация бора после проведения диффузии?

4. Какова необходимая толщина маскирующего окисла при проведении ионной имплантации с параметрами пункта № 4? Определите время,

необходимое для термического выращивания такого маскирующего окисла при $T = 1000^{\circ}\text{C}$ и 1150°C в сухом и влажном кислороде.

5. Обсудите маскирующие свойства SiO_2 при легировании различными примесями. Рассчитайте необходимую толщину окисной маски при ионном легировании В и Р с энергией 150 кэВ и при диффузии этих же примесей при температуре 1200°C в течение 1 часа.

6. Ионно- легированный резистор в ИС - р-слой с поверхностным сопротивлением $3000 \text{ Ом}/\square$ и глубиной 1,0 мкм – создается путем имплантации ионов бора с последующей разгонкой при 1100°C . Подложка легирована фосфором с концентрацией $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Найдите: среднее удельное сопротивление слоя; поверхностную концентрацию бора; дозу имплантации и время разгонки; площадь, занимаемую резистором номиналом 1 мОм, если рассеиваемая мощность 1 мВт и шаг размещения линий равен ширине линий; паразитную емкость этого резистора при обратном смещении 10 В и предельную частоту (по уровню 3 дБ) для данного резистора.

4. Методы легирования в производстве ИС.

1. По графику температурной зависимости коэффициента диффузии определите энергию активации для процесса диффузии бора и фосфора в кремнии.

2. Найдите относительное изменение коэффициента диффузии с температурой $(1/D) (dD/dT)$ для диффузии бора и фосфора в Si при $T = 1100^{\circ}\text{C}$.

3. Глубина р-n перехода после загонки примерно пропорциональна $(Dt)^{1/2}$. Найдите относительное изменение глубины перехода с температурой диффузии $(1/x) (dx/dT)$ для диффузии бора и фосфора в кремнии при $T = 1100^{\circ}\text{C}$.

4. В транзисторе коэффициент усиления по току h обратно пропорционален толщине базы ω . Найдите относительное изменение h с температурой эмиттерной или базовой диффузией при 1100°C ($\omega = 0,4$ мкм, глубина перехода эмиттер-база $x_{эб} = 2,4$ мкм). Считать ω малой величиной по сравнению с $x_{эб}$, $x_{кб}$.

5. С целью формирования контактов транзистора кремниевая пластина легируется ионами фосфора дозой $\phi = 10^{16} \text{ см}^{-2}$, имеющих энергию 50 кэВ. а). Если пластина затем окисляется, надо ли учитывать эффекты,

связанные с зависимостью скорости окисления от концентрации легирующей примеси?

б). Перед окислением приводится диффузия Р за $t = 60$ мин, при $T = 1000^{\circ}\text{C}$. Будет ли в этом случае играть роль зависимость скорости окисления от концентрации легирующей примеси?

в). Рассмотрите вновь пункты а и б для случая энергии ионов 150 кэВ.

6. В пластину кремния n-типа введен вблизи поверхности бор с высокой концентрацией. Часть пластины покрывают слоем поликремния с высокой концентрацией дефектов. Затем пластина окисляется. На каких участках глубина перехода будет больше?

7. Даны следующие параметры планарно-эпитаксиального биполярного транзистора. Параметры эпитаксиального n-слоя: $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $d = 10 \text{ мкм}$. Глубина перехода базы 2,5 мкм, поверхностная концентрация базовой области $2,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

Рассчитайте технологические параметры процесса базовой диффузии. По какому закону проводится и почему?

Вычислите поверхностное сопротивление базовой области. Нарисуйте топологию резисторов сопротивлением 200 Ом и 2 кОм, выполненного базовой диффузией. Рассеиваемая мощность 0,01 мВт. Определите площадь, занимаемую такими резисторами, и паразитную емкость при обратном смещении 5 В.

5. Фотолитографические процессы

1. Изобразите оптическую схему установки фотолитографии для теневого и проекционного процессов. Объясните смысл понятия «разрешающая способность фотолитографии».

2. Какой минимальный размер элемента d_{\min} можно получить при использовании теневой схемы с зазором 1 и 10 мкм в ближней ультрафиолетовой области (Источник света - ртутная лампа). Какое влияние оказывает толщина фоторезиста?

3. Рассчитайте предельную разрешающую способность проекционной системы по полю размером 10 мм с $NA=0,5$ и $NA=1$ для контрастности фотоэмульсии 10, размытости края 0,5, уменьшении 10 для различных длин волн излучения тругной лампы и эксимерного лазера. Каковы пути повышения разрешающей способности?

4. Какие требования выдвигаются к глубине резкости изображения?

5. Обсудите выбор материала основы фотошаблона и фоторезиста для вакуумной оптической литографии на длине волны 157 нм?

6. Оцените глубину фотоабляции для материала с коэф поглощения $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$, коэф. отражения 0,3, пороговой энергией $10 \text{ мДж}\text{см}^2$ для различных эксимерных лазеров.

6. Биполярный транзистор с различными типами изоляции.

Рассмотрите планарно-эпитаксиальный биполярный транзистор с изоляцией p-n переходом. Параметры эпитаксиального слоя: $N_d = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $d = 5 \text{ мкм}$.

1. Кратко опишите порядок технологических операций, необходимых для изготовления такого транзистора и изобразите комплект необходимых фотошаблонов. Изобразите распределение концентраций донорной и акцепторной примеси вдоль линии А-А. Почему легирующей примесью р-типа в кремнии применяется только бор?

2. Определите температуры и времена проведения диффузий (база-диффузия бора в 2 стадии, эмиттер-диффузия фосфора в одну стадию), необходимых для получения следующих параметров: глубина переходв база-коллектор 2 мкм, эмиттер-база 1,5 мкм, поверхностная концентрация базы 10^{18} см^{-3} , эмиттера 10^{21} см^{-3} .

3. Изобразите планарно-эпитаксиальный биполярный транзистор с изоляцией окислом. Размеры (в мкм): база 6×4 , эмиттер 2×4 , площадь коллекторного контакта 2×4 , глубина перехода К-Б = 0,7, глубина перехода Э-Б = 0,4, толщина эпитаксиального слоя 2,0. Опишите (укрупненно) порядок технологических операций, необходимых для изготовления такого транзистора, и изобразите его топологию (вид сверху).

4. Рассчитайте вклад эпитаксиального слоя n-типа в сопротивление коллектора в области коллекторного контакта и падение напряжения на этом участке. Прокомментируйте полезность создания глубокого диффузионного коллекторного контакта.

5. Рассчитайте параметры одностадийного процесса диффузии для создания глубокого диффузионного коллекторного контакта (рассмотрите температуры диффузии 1000°C и 1200°C). Как повлияет этот процесс на глубину перехода коллектор-база?

6. Ширина однородно легированной области базы на активном его участке 0,2 мкм (исключая ОПЗ). При максимальном напряжении между Э и К к активной области базы приложено напряжение 5 В. Рассчитайте минимальный уровень легирования базовой области, необходимый для предотвращения прокола между эмиттером и коллектором.

7. Логический элемент (ЛЭ) «И-НЕ» на n-канальных МОП-транзисторах.

1. Нарисовать схему и описать работу логического элемента (n=2).
2. Нарисовать примерную топологию и сечение ЛЭ и описать (укрупненно) порядок технологических операций создания ЛЭ с поликремниевыми затворами. Проектная норма 0,25 мкм; $d_{\text{стока}}=0,2\text{мкм}$. Подложка $\rho=0,1\text{ Ом}\cdot\text{см}$. Поверхностная плотность заряда на границе раздела $\frac{Q_f}{q}=10^{11}\text{ см}^{-2}$; $d_{\text{оксила}}=40\text{ нм}$ (подзатворный); $d_{\text{оксила}}=0,6\text{ мкм}$ (изолирующий).
3. Рассчитать пороговое напряжение ключевого МОП-транзистора и паразитного МОП-транзистора.
4. Определить параметры термического окисления для выращивания тонкого подзатворного окисла толщиной 40 нм в сухом кислороде.
5. Рассчитать технологические параметры выращивания изолирующего окисла толщиной 0,6 мкм во влажном кислороде
6. Определить технологические параметры создания областей истока и стока ионным легированием мышьяком с энергией 50, 100, 200 кэВ
7. Оценить быстродействие ЛЭ и работу переключения для данной топологии;

$$U_{\text{источника питания}} = 1,5\text{ В}; \quad P_{\text{элемента}} = 0,1\text{ мВт}; \quad k_t \approx 1.$$

8. Логический элемент ИЛИ-НЕ на КМОП инверторах.

1. Нарисовать принципиальную схему и описать работу ЛЭ (n=2).
2. Разработать примерную топологию и описать (укрупненно) порядок технологических операций создания ЛЭ ионной имплантацией (ИИ) с поликремниевыми затворами. Проектная норма 0,3 мкм; $d_{\text{кармана}}=1\text{ мкм}$; $d_{\text{стока}}=0,2\text{ мкм}$.
3. Рассчитать уровни легирования подложки (n) и P-кармана (средний) для предотвращения эффекта короткого канала; определить параметры

процесса ионного легирования создания областей истока и стока методом ИИ бора.

4. Оцените $U_{\text{порог}}$ быстродействия ЛЭ (U ист. питания 1,5 В; d окисла под раствором = 40 нм; d изоляции = 0,5 мкм); $\frac{Q_{\text{ss}}}{q} = 5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$;

5. Рассчитать боковое легирование при ионной имплантации, оценить паразитную емкость перекрытия затвор-сток и затвор-исток; ее влияние на быстродействие инвертора.

9. Металлизация интегральных схем.

1. Каковы основные требования к материалам для металлизации ИС?
2. Оцените контактное сопротивление Al шин к эмиттеру ($n = 10^{21} \text{ см}^{-3}$) и коллектору ($n = 10^{15} \text{ см}^{-3}$) планарно-эпитаксиального биполярного транзистора (проектная норма 0,3 мкм). Почему надо применять подлегирование под все контактные площади?

3. Какие проблемы возникают при использовании Al металлизации к n-области транзисторной структуры. Как их преодолеть?

4. Определите минимальную ширину токоведущих шин к транзистору при $d_{\text{Al}} = 0,3 \text{ мкм}$ и $I_c = 0,1 \text{ мА}$ для предотвращения явления электромиграции. ($j_{\text{крит.}}$ для Al = $2 \cdot 10^5 \text{ А/см}^2$).

5. При двухуровневой металлизации ИС использована межслойная изоляция Si_3N_4 ; $d=0,5 \text{ мкм}$; Al шина ($W=1 \text{ мкм}$; $d=0,3 \text{ мкм}$; $l = 10 \text{ мкм}$). Какая паразитная емкость возникает при трехкратном пересечении шин? Оцените время задержки на перезарядку паразитной емкости.

6. В чем основные преимущества и недостатки медной металлизации.

7. Какие методы используются для формирования вертикальных межсоединений в 3-х мерных ИС? Рассчитайте толщину и уровень легирования n+Si в вертикальном соединении 3-х мерного КМОП – инвертора, обеспечивающего увеличение быстродействия при проектной норме 0,2 мкм.

Приложение 2. Физические свойства германия и кремния.

Параметры	Германий	Кремний
Атомный номер	32	14
Атомная масса	72,58	28,08
Постоянная решетки, нм	0,5647	0,5430
Кристаллическая структура	Гранецентрированная	Кубическая (типа алмаза)
Количество атомов в 1 см ³	$4,52 \cdot 10^{22}$	$4,99 \cdot 10^{22}$
Плотность при 298 К, г/см ³	5,32	2,331
Твердость по шкале Мооса	6,25	7,0
Ковкость	Хрупкий	Хрупкий
Диэлектрическая проницаемость ϵ	16	12
Показатель преломления света на дине волны 3...6 мкм	4,068...4,143	3,42
Работа выхода электронов, эВ	4,78	4,8
Ширина запрещенной зоны ΔE при 298 К, эВ	0,744	1,153
Температура плавления, °С	940	1415
Температура кипения, °С	2700	2600
Скрытая теплота плавления, кДж/моль	$33,7 \pm 0,8$	$45,5 \pm 0,8$
Скрытая теплота парообразования, кДж/моль (при 1173 К)	371 ± 8	440 ± 50
Теплоемкость C , Дж/(моль·К), при температуре 300 К	22,8	19
Линейный коэффициент	$6,1-6,6 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$

теплового расширения, K^{-1} в интервале температур 273...773 К	6	
Теплопроводность, Вт/(м·К) при 298 К	58,3	109
Удельное сопротивление при 298 К, Ом·см	47	$2 \cdot 10^5$
Концентрация электронов (дырок) при 300 К, $см^{-3}$	$1,95 \cdot 10^{13}$	$1,27 \cdot 10^{10}$
Подвижность электронов (дырок) при 298 К, $см^2/(В \cdot с)$	3600	1300
Коэффициент диффузии электронов при 298 К, $см^2/с$	93	30
Коэффициент диффузии дырок при 298 К, $см^2/с$	44	12
Магнитная восприимчивость	$-1,1 \cdot 10^{-7}$	$-1,3 \cdot 10^{-6}$
Энергия ионизации легирующих примесей E_1 , эВ	0,010...0,0 13	0,033...0 ,07

Захарова Ирина Борисовна

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРО- И НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Лицензия ЛР № 020593 от 07.08.97

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т.2; 953005 – учебная литература
Подписано в печать .2010. Формат 60x84/16 Печать цифровая
Усл. Печ. Л. 7,63. Уч.-изд.л. 7,63. Тираж 100. Заказ
Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором
В цифровом типографском центре Издательства Политехнического
университета:
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел. (812) 540-40-14
Тел./факс: (812) 927-57-76