

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

**Ю.А. Гатчин, В.Л. Ткалич,
А.С. Виволанцев, Е.А. Дудников**

ВВЕДЕНИЕ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКУ

Учебное пособие



**Санкт-Петербург
2010**

УДК 621.3+538.9

Гатчин Ю.А., Ткалич В.Л., Виволанцев А.С., Дудников Е.А.
«Введение в Микроэлектронику». Учебное пособие. СПб: СПбГУ
ИТМО, 2010. 114с.

В учебном пособии рассмотрены физические основы микроэлектроники, интегральные схемы и их технологии производства.

Учебное пособие соответствует утвержденным учебным программам по направлениям 210202 — «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств» для специалистов и 210200.05 — «Информационные технологии проектирования электронных средств» для магистров техники и технологии, а также 200100 и 200101 — «Приборостроение» для бакалавров и дипломированных специалистов.

Предназначено для студентов и магистров факультетов КТиУ и ТМиТ, изучающих дисциплины «Физические основы микроэлектроники».

Рекомендовано к печати по решению Совета факультета КТиУ СПбГУ ИТМО от 13.04.10 (протокол №9) и решению Совета факультета ТМиТ СПбГУ ИТМО от 13.04.10 (протокол №7)

В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена Программа развития государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики» на 2009–2018 годы.



©Санкт-Петербургский государственный
университет информационных технологий,
механики и оптики, 2010
©Гатчин Ю.А., Ткалич В.Л., Виволанцев А.С.,
Дудников Е.А. , 2010

Оглавление

Введение.....	5
Глава 1. Предпосылки появления микроэлектроники и особенности функционального диагностического контроля БИС.....	9
Глава 2. Основные направления развития электроники.....	12
Глава 3. История развития микроэлектроники Эволюция интегральных схем (ИС)	16
Глава 4. Теоретический предел микроминиатюризации - физические ограничения в твердотельной МЭ.....	23
Глава 5. Проблемы диагностического контроля ис.....	32
Глава 6. Природа и механизмы развития отказов.....	40
Глава 7. Тестирование бис ЗУ. Предвестники отказов.....	55
Глава 8. Материалы ИС.....	62
Глава 9. Технологические процессы производства бис.....	68
9.1. Технологии получения тонких пленок.....	68
9.1.1. Термическое вакуумное напыление.....	68
9.1.2.Ионное(катодное) распыление.....	69
9.1.3.Эпитаксия из газовой фазы.....	72
9.1.4.Жидкостная эпитаксия.....	73
9.1.5.Молекулярно-лучевая эпитаксия.....	73
9.1.6.Применение ионных пучков для выращивания тонких аморфных пленок.....	74
9.1.7. Золь-гель технологии и их применение для выращивания тонких пленок.....	75
9.1.7.1. Коллоидное состояние вещества. Дисперсные системы...75	
9.1.7.2. Физический и химический гель. Их получение.....76	
9.1.7.3. Мицеллярная теория строения коллоидных растворов.....76	
9.1.7.4. Физическая теория устойчивости коллоидных систем.....76	
9.1.7.5. Методы получения зольей.....77	
9.1.7.6. Превращение золья в гель.....77	
9.2. Литографические методы создания и переноса изображения.77	
9.2.1.Понятие литографии.....78	
9.2.2.Фотолитография.....78	
9.2.3.Рентгеновская литография.....78	
9.2.4.Электронная литография.....78	

9.2.5.Сканирующая электронная литография.....	78
9.2.6.Процессы травления в микротехнологии.....	78
9.3. Методы модификации поверхностных и объемных структур...	79
9.3.1.Диффузия в поверхностных структурах.....	79
9.3.2.Лазерное легирование.....	79
9.3.3.Ионное легирование или ионная имплантация.....	80
9.3.3.1. Схема ионного легирования.....	80
9.3.3.2.Теория ионного легирования Линдхардта — Шарфа — Шитта.....	80
9.3.4.Термический отжиг.....	81
9.3.4.1. Лазерный отжиг.....	81
9.3.4.2.Электронно-лучевой отжиг.....	81
9.3.5.Ионно-лучевое и лазерное перемешивание.....	82
9.4. Методы контроля и метрологии в микроэлектронике.....	82
9.4.1.Просвечивающая электронная микроскопия.....	82
9.4.2.Растровая электронная микроскопия.....	83
9.4.2.1. Физические и технические основы работы растровых электронных микроскопов.....	83
9.4.2.2. Контраст в РЭМ и его разновидности.....	84
9.4.2.3. Магнитный контраст в РЭМ.....	84
9.4.3.Оже-спектроскопия.....	85
9.4.4.Рентгеноспектральный микроанализ.....	85
9.4.5.Рентгеноструктурный анализ.....	86
9.4.6.Спектроскопия обратного рассеяния резерфорда.....	87
9.4.7.Ионный микроанализ и ионная масс-спектрометрия.....	88
9.4.8.Туннельная и атомно-силовая микроскопия.....	89
9.4.8.1. Автоионный микроскоп.....	89
9.4.8.2. Сканирующий туннельный микроскоп.....	91
9.4.8.3. Атомно-силовой микроскоп.....	92
9.4.9.Микроскопия ближнего поля.....	92
9.4.10.Физические основы эллипсометрии.....	93
9.4.11.Конфокальная микроскопия.....	94
Глава 10. Большие и сверхбольшие интегральные схемы...	95
Глава 11. Переход от микротехнологии к нанотехнологии..	103
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	107

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 210202 «Проектирование и технология электронных средств», а также для магистров техники и технологии по направлению 210200.05 «Информационные технологии проектирования электронных средств», 200100 и 200101 «Приборостроение».

Учебное пособие может быть использовано в целом ряде дисциплин этих направлений, например «Физические основы микроэлектроники», «Введение в специальность», «Материаловедение и материалы электронных средств», «Электроэлементы и передача данных в компьютерных системах», «Физические основы получения информации» и т.д.

Для осмысленной работы в области электроники и микроэлектроники необходимо изучать процессы, происходящие при взаимодействии электронов и других заряженных и нейтральных частиц с веществом, находящемся в любом из известных агрегатных состояний; основы физики твердого тела и физической химии; кристаллографию; науку с материалами в целом и материаловедение в частности; физику элементарных частиц и физику плазмы; физику газового разряда и ионных газов; электрохимию; коллоидную химию: химию ультрадисперсных частиц и многое другое и уметь применять эти знания на практике для создания реально существующих и реально действующих приборов. Электроника ее разделы, такие как микро- и наноэлектроника, занимаются проблемой, *что надо- сделать*, т.е. приборными, аппаратными и системными вопросами. Основное поле деятельности — это создание так называемой элементной базы.

Фундамент современной микроэлектроники составляет планарная технология. Несущей конструкцией всей микросхемы является подложка. На эту подложку в различных комбинациях и в требуемом количестве наносятся полупроводниковые, проводящие и изолирующие слои, в которых создаются требуемые конфигурации и тополо-

гические рисунки. Толщина этих слоев колеблется в зависимости от технологических требований от 0,05 до 1..2 мкм.

Создание высокоточного прецизионного топологического рисунка в тонких, субмикронных (по толщине) слоях сейчас является наиболее сложной задачей микро- и нанотехнологии. Микротехнология имеет дело с элементами микросхем, размер которых превышает 1 мкм; субмикронная технология — 0,1... 1,0 мкм; нанотехнология — менее 0,1 мкм.

Если бы темпы микроминиатюризации сохранились до 2010 г., то транзистор уменьшился бы до размеров вируса, его рабочая частота сравнялась бы с частотой колебаний атомов в решетке кристалла, число транзисторов в одной интегральной схеме (ИС) достигло бы триллиона, а рекордные размеры литографического рисунка достигли бы величины, в 10 раз меньшей размеров атома. В реальной жизни такие чудеса пока не достигнуты, но поскольку рубеж 0,1 мкм в промышленности практически преодолен, это дает определенное право говорить о свершившемся переходе от микротехнологии к нанотехнологии (от *gr.* нанос — карлик), которая оперирует размерами порядка нанометра ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10 \text{ \AA}$).

Считается, что нанотехнология позволит создавать практически любые изделия — от вычислительных машин сверхвысокой производительности до искусственных органов человека, причем, чем дальше ученые от практической деятельности в области нанотехнологии, тем смелее и масштабнее генерируемые ими прогнозы. Это касается и вторжения в сферу биологии, биофизики и биотехнологии, особенно в области конвергенции органических и неорганических соединений.

В настоящее время самым прецизионным и точным инструментом обработки и контроля микросхем является пучок заряженных частиц — электронов или ионов. Законы, по которым подобные пучки взаимодействуют с твердым телом, лежат в основе той области нанотехнологии, которая связана с получением поверхностных и объемных конфигураций в процессе производства ИС и методами контроля и метрологии. Создание интегральных наноэлектронных квантовых схем является, по существу, конечной целью наноэлектроники. Мечтой технологов является реальная совокупность способов и приемов создания функцио-

нальных элементов нанометровых размеров на поверхности подложек, в том числе элементов из отдельных молекул и атомов, с возможностью одновременной их визуализации и контроля.

Традиционный метод, включающий в себя создание масок на поверхности полупроводниковой пластины с последующим применением микролитографии все более высокого разрешения, в том числе рентгено-, электролитографии и ионной литографии, а также синхротронного излучения, приведет, по всей видимости, к созданию проводящих дорожек с нанометровыми поперечными размерами. Однако создание элементов на основе отдельных молекул и атомов традиционным путем невозможно, хотя совершенно необходимо.

Успехи современного материаловедения и метрологии, особенно после изобретения сканирующего туннельного микроскопа и развития методов туннельно-зондового массопереноса, также продвинули исследования в области микротехнологии в нанометровый диапазон. По технико-экономическим показателям и по оценкам американских специалистов, международный рынок нанотехнологии в 2010—2015 гг. достигнет ежегодного уровня порядка 1 трлн долл. при приоритете материаловедческой компоненты. Согласно результатам, полученным по закону Мура, к 2010 г. микроэлектронные устройства должны иметь размеры порядка 10 нм, а к 2035 г. — порядка атома. В 1965 г. один из соучредителей фирмы Intel, а ныне почетный председатель совета директоров этой компании Пэрдон Мур подметил эмпирическую закономерность, названную законом: число транзисторов в микросхеме данного типа удваивается каждые два года. Согласно другой формулировке увеличение скорости обработки данных в 2 раза происходит каждые два года. Гордон Мур также предсказал, что к 2006 г. фирма Intel будет производить чипы с 1 млрд транзисторов.

Данное учебное пособие включает в себя историю развития микроэлектроники, предпосылки ее появления и основные направления развития. Рассмотрены теоретические пределы миниатюризации, проблемы диагностического контроля ИС, предвестники отказов, природа и механизмы их развития. Приведены виды материалов используемых в микроэлектронике, основные технологии получения тонких

пленок, методы создания и переноса изображения, а также методы модификации структур, контроля и метрологии в микроэлектронике.

Дана общая характеристика СБИС и БИС, рассмотрены проблемы повышения степени интеграции. Уделено внимание проблеме перехода от микротехнологии к нанотехнологии.

Глава 1

ПРЕДПОСЫЛКИ ПОЯВЛЕНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ БИС

Микроэлектроника - это комплексная область знаний, объектом изучения и разработки которой являются функционально сложные ИС, их структура, технология, диагностика, надежность и эксплуатация. Микроэлектронные устройства целенаправленно воздействуют на электромагнитные процессы в твердом теле, что позволяет с высокой скоростью обрабатывать и длительно хранить информацию в достаточно малых объемах твердого тела.

Микроэлектроника формировалась на основе комплексного научного поиска и достижений инженерной практики соответственно требованиям научно-технического прогресса. Понятия и методы МЭ, возникшие и развивающиеся более 30 лет, широко используются в информатике, вычислительной технике, автоматике, физике твердого тела. Микроэлектроника стремительно прогрессирует в своем развитии и практическом использовании результатов и из узкоспециального направления превратилась в общефизическое.

Находясь как бы в пограничной области физики твердого тела, химии, электродинамики, радиофизики она приобрела свой обширный теоретический фундамент.

Как научное направление с определенным техническим объемом. МЭ основана на идеях функциональной интеграции микроприборов на кристалле, планарной технологии интегрированных на шайбе кристаллов, групповой обработки материала шайбы и функционального контроля БИС ЗУ.

Функциональный контроль основан на синтезе идей, отражающих взаимосвязь физико-химических и электромагнитных процессов, происходящих в микроприборах, и функциональном (целенаправленном) преобразовании информационных сигналов. Вследствие комплексного подхода функциональный контроль объединяет ряд научных направлений, создает технологические средства инженерной реализации, диагностики БИС и позволяет определить их надежность. Для понимания предпосылок появления функционального диагностического контроля БИС и его отличитель-

ных особенностей необходимо проследить переход от дискретной электроники (ДЭ) к микроэлектронике (МЭ), а также установить различие объектов контроля и диагностики.

До середины 1950-х гг. основным направлением развития электронной техники (ЭТ) была специализация ее элементной базы, включающая усовершенствование конструкции, миниатюризацию и улучшение параметров дискретных, электронных компонентов (активных и пассивных) электронной аппаратуры (ЭА). К ним относятся вакуумные приборы (лампы), сопротивления, конденсаторы, катушки индуктивности, панели, разъемы и др. Каждый из электронных компонентов (ЭК) изготовлялся самостоятельно и не был конструктивно и тем более функционально связан с другим. Отсюда и название - дискретные элементы ЭА.

Указанный метод конструирования и производства ЭА имеет свои достоинства. **К ним прежде всего относятся:**

- возможность индивидуального контроля каждого ЭК;
- несложная процедура измерений и оценки годности ЭК с использованием элементарной контрольно-измерительной аппаратуры (КИА);
- удобная настройка, позволяющая достичь требуемых электрических характеристик электронных блоков и в целом ЭА;
- простота обнаружения и локализации дефектов как при настройке электронных блоков, так и в случае отказа ЭА в процессе эксплуатации;
- ремонтпригодность ЭА (доступность любого ЭК, возможность его замены в ЭА)

Все это способствует снижению брака готовой продукции и техническому контролю электронных компонентов и самой аппаратуры.

В начале 1950-х гг. появились первые ЭВМ общего назначения. В них также использовались вакуумные лампы для создания узлов, предназначенных для вычислений, управления, обработки и хранения информации. Эти ЭВМ были громоздки, неподвижны, выделяли большое количество тепловой энергии, что вызывало необходимость принудительного охлаждения. Они занимали большие залы и требовали постоянного обслуживания. Надежность эксплуатации ЭВМ была низкая, а стоимость производства - высокая. Для хранения программ управления и вычислений емкость запоми-

нающих устройств (ЗУ) непрерывно увеличивалась. Ускоренное же развитие науки, аэрокосмической и военной техники привело к возникновению серьезных проблем не только в изучении и управлении быстро протекающими процессами, но и в обработке информации больших объемов в короткие промежутки времени.

Технические результаты исследований в области физики к химии твердого тела, а также получения химически чистых полупроводников и ферромагнетиков, синтеза тонких слоев металлов и диэлектриков получили конкретное практическое применение. В конце 1950-х п. начали применять твердотельные ЭК - транзисторы (Тр) и диоды (Д) - дискретные навесные элементы, что позволило заметно снизить габариты, а также энергопотребление ЭВМ и, следовательно, уменьшить тепловыделение и повысить надежность. Дискретные активные (Д, Тр), а также массивные (R, C, L) элементы продолжали совершенствоваться: уменьшались их размеры и энергопотребление, улучшался контроль, возрастала безотказность ЭК. Это позволило изменить и размеры функционально завершенных устройств - микромодулей, получивших вид этажерочной или плоской конструкции, в которой дискретные элементы соединяются посредством пайки или сварки. Испытатели сосредоточили свое внимание на контроле сигналов и обеспечении надежности. Так, расширение функциональной сложности ЭА требовало применения большого числа ЭК и, следовательно, увеличения паек, что снижало надежность. Контрольно-измерительная аппаратура не была автоматизирована, и поэтому контроль каждого ЭК для ЭА занимал много времени, что, в свою очередь, влияло на стоимость аппаратуры.

Быстро развивающиеся ветвью направления техники хранения и высокоскоростной обработки информации требовали обеспечения высокой надежности и длительной безотказной работы ЭА, эксплуатируемой в условиях различных внешних воздействий. При этом диапазон изменений воздействующих факторов весьма широк (он может включать и условия эксплуатации). Возникла необходимость создания РЭА, соответствующей требованиям технического прогресса.

К ним относятся:

- повышение функциональной сложности аппаратуры для решения задач управления процессами;
- увеличение быстродействия при вычислениях и управлении процессами;
- снижение массогабаритных характеристик аппаратуры;
- уменьшение энергопотребления в процессе функционирования;
- возрастание надежности;
- понижение стоимости аппаратуры.

Новые характеристики ЭА могли быть реализованы только при существенной миниатюризации компонентов ЭА и исключении применения пайки. Производство малогабаритной ЭА, основанной на дискретных элементах, встретило принципиальные, непреодолимые технологические препятствия.

Следующий недостаток связан со сборочными операциями ЭА из дискретных элементов. Этот трудоемкий процесс не поддавался автоматизации, и стоимость ЭА оставалась высокой.

К недостаткам относится и множество внешних контактов на плате, т.е. незначительное число функций на один контакт.

К ограничивающим факторам такого принципа конструирования относится также большая протяженность коммутирующих цепей схемы, снижающая быстродействие и помехозащищенность ЭА. Таким образом, дальнейшее совершенствование ЭА на дискретной элементной базе ограничивалось технологическими методами изготовления и контроля ЭК, а не причинами физического характера.

Рассмотренные ограничения принципа конструирования ЭА на дискретных элементах обнаружили при создании малогабаритных высоконадежных бортовых ЭВМ, быстродействие которых соизмеримо со скоростью протекания процессов в данных приборах (работающих в реальном масштабе времени). Это подтвердило необходимость совершенствования ЭА и повышения ее надежности как центральную проблему электронной техники. Была определена цель - микроминиатюризация в результате функциональной интеграции компонентов электронных схем на твердотельной основе, т.е. создание интегральных схем (ИС) путем интеграции ЭК. Для

технического воплощения идеи микроминиатюризации ЭА на основе функциональной интеграции пассивных и активных ЭК требовались новые материалы и аппаратура, иные технологические принципы их реализации и контроля. Все однотипные компоненты ИС следует изготавливать одновременно в едином технологическом цикле, используя групповой метод обработки материалов, осуществляя контроль автоматически, на функциональном принципе. Это направление РЭ получило название микроэлектроники. Таким образом, основу микроэлектроники составляют

следующие принципы:

- ЭА создается на базе ИС с конструктивной и функциональной интеграцией микроприборов - ЭК;
- физические процессы в микроприборах протекают в микрообъемах, в тонких слоистых структурах;
- одновременное изготовление однотипных элементов конструкции микроприборов ИС с использованием планарной технологии и групповой обработки материала;
- функциональный контроль ИС и тестовых схем.

Появлению первых микроэлектронных устройств - ИС предшествовали фундаментальные исследования и технические разработки в области физики твердого тела, химии и радиоэлектроники.

Глава 2

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОНИКИ

Электроника – это наука, изучающая явления взаимодействия электронов и других заряженных частиц с электрическими, магнитными и электромагнитными полями, что является физической основой работы электронных приборов и устройств (вакуумных, газозарядных, полупроводниковых и других), используемых для передачи, обработки и хранения информации.

Охватывая широкий круг научно-технических и производственных проблем, электроника опирается на достижения в различных областях знаний. При этом, с одной стороны, электроника ставит перед другими науками и производством новые задачи, стимулируя их дальнейшее развитие, и с другой – снабжает их качественно новыми техническими средствами и методами исследований.

Основными направлениями развития электроники являются: вакуумная, твердотельная и квантовая электроника.

Вакуумная электроника – это раздел электроники, включающий исследования взаимодействия потоков свободных электронов с электрическими и магнитными полями в вакууме, а также методы создания электронных приборов и устройств, в которых это взаимодействие используется. К важнейшим направлениям исследования в области вакуумной электроники относятся: электронная эмиссия (в частности, термо- и фотоэлектронная эмиссия); формирование потока электронов и / или ионов и управления этими потоками; формирование электромагнитных полей с помощью устройств ввода и вывода энергии; физика и техника высокого вакуума и др.

Основные направления развития вакуумной электроники связаны с созданием электровакуумных приборов следующих видов: электронных ламп (диодов, триодов, тетродов и т.д.); электровакуумных приборов сверхвысокой частоты (например, магнетронов, клистронов, ламп бегущей и обратной волны);

электроннолучевых и фотоэлектронных приборов (например, кинескопов, видеоконов, электронно-оптических преобразователей, фотоэлектронных умножителей); газоразрядных приборов (например, тиратронов, газозарядных индикаторов).

Твердотельная электроника решает задачи, связанные с изучением свойств твердотельных материалов (полупроводниковых, диэлектрических, магнитных и др.), влиянием на эти свойства примесей и особенностей структуры материала; изучением свойств поверхностей и границ раздела между слоями различных материалов; созданием в кристалле различными методами областей с различными типами проводимости; созданием гетеропереходов и монокристаллических структур; созданием функциональных устройств микронных и субмикронных размеров, а также способов измерения их параметров.

Основными направлениями твердотельной электроники являются: полупроводниковая электроника, связанная с разработкой различных видов полупроводниковых приборов, и микроэлектроника, связанная с разработкой интегральных схем.

Квантовая электроника охватывает широкий круг вопросов, связанных с разработкой методов и средств усиления и генерации электромагнитных колебаний на основе эффекта вынужденного излучения атомов и молекул. Основные направления квантовой электроники: создание оптических квантовых генераторов (лазеров), квантовых усилителей, молекулярных генераторов и др.

Особенности приборов квантовой электроники следующие: высокая стабильность частоты колебаний, низкий уровень собственных шумов, большая мощность в импульсе излучения - которые позволяют использовать их для создания высокоточных дальномеров, квантовых стандартов частоты, квантовых гироскопов, систем оптической многоканальной связи, дальней космической связи, медицинской аппаратуры, лазерной звукозаписи и воспроизведения и др. Созданы даже миниатюрные лазерные указки для минимального сопровождения.

Глава 3

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ ЭВОЛЮЦИЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ (ИС)

Электроника прошла несколько этапов развития, за время которых сменилось несколько поколений элементной базы: дискретная электроника электровакуумных приборов, дискретная электроника полупроводниковых приборов, интегральная электроника микросхем (микроэлектроника), интегральная электроника функциональных микроэлектронных устройств (функциональная микроэлектроника).

Элементная база электроники развивается непрерывно возрастающими темпами. Каждое поколение, появившись в определенный момент времени, продолжает совершенствоваться в наиболее оправданных направлениях. Развитие изделий электроники от поколения к поколению идет в направлении их функционального усложнения, повышения надежности и срока службы, уменьшения габаритных размеров, массы, стоимости и потребляемой энергии, упрощения технологии и улучшения параметров электронной аппаратуры.

Становление микроэлектроники как самостоятельной науки стало возможным благодаря использованию богатого опыта и базы промышленности, выпускающей дискретные полупроводниковые приборы. Однако по мере развития полупроводниковой электроники выяснились серьезные ограничения применения электронных явлений и систем на их основе. Поэтому микроэлектроника продолжает продвигаться быстрыми темпами как в направлении совершенствования полупроводниковой интегральной технологии, так и в направлении использования новых физических явлений.

Изделия микроэлектроники: интегральные микросхемы различной степеней интеграции, микросборки, микропроцессоры, мини- и микро-ЭВМ – позволили осуществить проектирование и промышленное производство функционально сложной радио- и

вычислительной аппаратуры, отличающейся от аппаратуры предыдущих поколений лучшими параметрами, более высокими надежностью и сроком службы, меньшими потребляемой энергией и стоимостью. Аппаратура на базе изделий микроэлектроники находит широкое применение во всех сферах деятельности человека. Созданию систем автоматического проектирования, промышленных роботов, автоматизированных и автоматических производственных линий, средств связи и многому другому способствует микроэлектроника.

Первый этап

К первому этапу относится изобретение в 1809 году русским инженером Ладыгиным лампы накаливания.

Открытие в 1874 году немецким ученым Брауном выпрямительного эффекта в контакте металл–полупроводник. Использование этого эффекта русским изобретателем Поповым для детектирования радиосигнала позволило создать ему первый радиоприемник. Датой изобретения радио принято считать 7 мая 1895 г. когда Попов выступил с докладом и демонстрацией на заседании физического отделения русского физико–химического общества в Петербурге. В разных странах велись разработки и исследования различных типов простых и надежных обнаружителей высокочастотных колебаний – детекторов.

Второй этап

Второй этап развития электроники начался с 1904 г. когда английский ученый Флеминг сконструировал электровакуумный диод. За ним последовало изобретение первой усилительной лампы – триода в 1907 году.

1913 – 1919 годы – период резкого развития электронной техники. В 1913 г. немецкий инженер Мейснер разработал схему лампового регенеративного приемника и с помощью триода получил незатухающие гармонические колебания.

В России первые радиолампы были изготовлены в 1914 году в Санкт–Петербурге консультантом русского общества бес-

проволочного телеграфирования Николаем Дмитриевичем Папалекси, будущим академиком АН СССР.

Третий этап

Третий период развития электроники – это период создания и внедрения дискретных полупроводниковых приборов, начавшийся с изобретения точечного транзистора. В 1946 году при лаборатории "Белл Телефон" была создана группа во главе с Уильямом Шокли, проводившая исследования свойств полупроводников на Кремнии и Германии. Группа проводила как теоретические, так и экспериментальные исследования физических процессов на границе раздела двух полупроводников с различными типами электрической проводимости. В итоге были изобретены: трехэлектродные полупроводниковые приборы – транзисторы. В зависимости от количества носителей заряда транзисторы были разделены на:

- униполярные (полевые), где использовались однополярные носители.
- биполярные, где использовались разнополярные носители (электроны и дырки).

Изобретение транзисторов явилось знаменательной вехой в истории развития электроники и поэтому его авторы Джон Бардин, Уолтер Браттейн и Уильям Шокли были удостоены нобелевской премии по физике за 1956 г.

Появление микроэлектроники

С появлением биполярных полевых транзисторов начали воплощаться идеи разработки малогабаритных ЭВМ. На их основе стали создавать бортовые электронные системы для авиационной и космической техники. Так как эти устройства содержали тысячи отдельных электрорадиоэлементов и постоянно требовалось все большее и большее их увеличение, появились и технические трудности. С увеличением числа элементов электронных систем практически не удавалось обеспечить их работоспособность сразу же после сборки, и обеспечить, в дальнейшем, надежность функционирования систем. Проблема качества монтажно-сборочных работ

стало основной проблемой изготовителей при обеспечении работоспособности и надежности радиоэлектронных устройств. Решение проблемы межсоединений и явилось предпосылкой к появлению микроэлектроники. Пробразом будущих микросхем послужила печатная плата, в которой все одиночные проводники объединены в единое целое и изготавливаются одновременно групповым методом путем травли медной фольги с плоскостью фольгированного диэлектрика. Единственным видом интеграции в этом случае являются проводники. Применение печатных плат хотя и не решает проблемы миниатюризации, однако решает проблему повышения надежности межсоединений. Технология изготовления печатных плат не дает возможности изготовить одновременно другие пассивные элементы кроме проводников. Именно поэтому печатные платы не превратились в интегральные микросхемы в современном понимании. Первыми были разработаны в конце 40х годов толстопленочные гибридные схемы, в основу их изготовления была положена уже отработанная технология изготовления керамических конденсаторов, использующая метод нанесения на керамическую подложку через трафареты паст, содержащих порошок серебра и стекла.

Тонкопленочная технология производства интегральных микросхем включает в себя нанесение в вакууме на гладкую поверхность диэлектрических подложек тонких пленок различных материалов (проводящих, диэлектрических, резистивных).

Четвертый этап

В 1960 году Роберт Нойс из фирмы Fairchild предложил и запатентовал идею монолитной интегральной схемы и, применив планарную технологию изготовил первые кремниевые монолитные интегральные схемы.

Семейство монолитных транзисторно-транзисторных логических элементов с четырьмя и более биполярными транзисторами на одном кристалле кремния было выпущено фирмой Fairchild уже в феврале 1960 года и получило название "микробиология". Планарная технология Хорни и монолитная технология Нойса заложили в

1960 году фундамент развития интегральных микросхем, сначала на биполярных транзисторах, а затем 1965–85 гг. на полевых транзисторах и комбинациях тех и других.

Два директивных решения принятых в 1961–1962 гг. повлияли на развитие производства кремниевых транзисторов и ИС.

- Решение фирмы IBM (Нью-Йорк) по разработке для перспективной ЭВМ не ферромагнитных запоминающих устройств, а электронных ЗУ (запоминающих устройств) на базе n-канальных полевых транзисторов (металл-окисел-полупроводник – МОП). Результатом успешного выполнения этого плана был выпуск в 1973 г. универсальной ЭВМ с МОП ЗУ – IBM- 370/158.
- Директивные решения фирмы Fairchild предусматривающие расширение работ в полупроводниковой научно-исследовательской лаборатории по исследованию кремниевых приборов и материалов для них.

Тем временем в июле 1968 г. Гордон Мур и Роберт Нойс уходят из отделения полупроводников фирмы Fairchild и 28 июня 1968 года организуют крохотную фирму Intel из двенадцати человек, которые арендуют комнатку в Калифорнийском городе Маунтин Вью. Задача, которую поставили перед собой Мур, Нойс и примкнувший к ним специалист по химической технологии – Эндрю Гроув, использовать огромный потенциал интеграции большого числа электронных компонентов на одном полупроводниковом кристалле для создания новых видов электронных приборов.

В 1997 году Эндрю Гроув стал "человеком года", а возглавляемая им компания Intel, ставшая одной из ведущих в силиконовой долине в Калифорнии, стала производить микропроцессоры для 90% всех персональных компьютеров планеты.

Появление интегральных микросхем сыграла решающую роль в развитие электроники положив начало новому этапу микроэлектроники. Микроэлектронику четвертого периода называют схематической, потому что в составе основных базовых элементов можно выделить элементы эквивалентные дискретным электро-радиоэлементам и каждой интегральной микросхеме соответствует определенная принципиальная электрическая схема, как и для электронных узлов аппаратуры предыдущих поколений.

Интегральные микросхемы стали называться микроэлектронные устройства, рассматриваемые как единое изделие, имеющее высокую плотность расположения элементов эквивалентных элементам обычной схемы. Усложнение, выполняемых микросхемами функций, достигается повышением степени интеграции.

Настоящее электроники

В настоящее время микроэлектроника переходит на качественно новый уровень – наноэлектронику.

Наноэлектроника в первую очередь базируется на результатах фундаментальных исследований атомных процессов в полупроводниковых структурах пониженной размерности. Квантовые точки, или нульмерные системы, представляют собой предельный случай систем с пониженной размерностью, которые состоят из массива атомных кластеров или островков нанометровых размеров в полупроводниковой матрице, проявляющих самоорганизацию в эпитаксиальных гетероструктурах.

Одним из возможных работ связанных с наноэлектроникой является работы по созданию материалов и элементов ИК-техники. Они востребованы предприятиями отрасли и являются основой для создания в ближайшем будущем систем «искусственного» (технического) зрения с расширенным, по сравнению с биологическим зрением, спектральным диапазоном в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. Системы технического зрения и фотонные компоненты на наноструктурах, способные получать и обраба-

тывать огромные массивы информации, станут основой принципиально новых телекоммуникационных устройств, систем экологического и космического мониторинга, тепловидения, нанодиагностики, робототехники, высокоточного оружия, средств борьбы с терроризмом и т.д. Применение полупроводниковых наноструктур значительно уменьшит габариты устройств наблюдения и регистрации, уменьшит энергопотребление, улучшит стоимостные характеристики и позволит использовать преимущества массового производства в микро- и наноэлектронике ближайшего будущего.

Глава 4

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ПРЕДЕЛ МИКРОМИНИАТЮРИЗАЦИИ - ФИЗИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ В ТВЕРДОТЕЛЬНОЙ МЭ

Следует отметить, что существенный процесс в создании совершенных кристаллов - подложек небольших размеров, миниатюризации приборов и коммутирующих шин - обеспечивает высокую плотность и позволяет повысить степень интеграции ИС. Размещение схем в приповерхностной области кристалла потребовало создания планарной технологии, которая химически модифицирует этот слой в результате введения примеси через маску, последовательно наращивает слой проводящих и изолирующих веществ. Разработчики и исследователи стремятся выяснить предельные возможности этой технологии, включая функциональную диагностику, а также физические ограничения этого принципа конструирования, определить методы их совершенствования в целях дальнейшей микроминиатюризации ИС. Так, за период 1970 - 1985 гг. в МОП - структурах БИС длина канала уменьшилась с 10 до 1 - 2 мкм, а толщина подзатворного слоя SiO_2 снизилась со 100 до 40 им. Исследование явлений микрофизического аспекта структуры БИС, микроприборов открывает пути развития функциональной диагностики.

В табл 4.1. приведены данные о достигнутом, показаны возможности дальнейшей миниатюризации.

Микроминиатюризация элементов БИС и увеличение степени интеграции ЭК имеют физические ограничения, определяемые фундаментальными закономерностями процессов, основных для работы микроприборов, а также технологические, обусловленные разрешающей способностью технологического и контрольно-диагностического оборудования. Кроме того, с уменьшением размеров элементов возрастает разброс выходных параметров схем и снижается выход годных ИС, поскольку линейные размеры элементов, а также дефекты кристаллической структуры и допуски на топологию становятся соизмеримыми.

Таблица 4.1. Технологический процесс КМОП и МОП

Параметры	Значения	
	предельные	допустимые
Напряжение питания, В	0,4	5
Минимальная ширина проводников, мкм	0,25	2
Рабочая частота, Мгц	100	2
Потребляемая мощность на один вентиль, Вт/вент	10^8	$2 \cdot 10^{-4}$
Размер кристалла, мм	2500	20
Степень интеграции, вент/кристалл	10^8	$5 \cdot 10^3$

Микроминиатюризация элементов БИС и увеличение степени интеграции ЭК имеют физические ограничения, определяемые фундаментальными закономерностями процессов, основных для работы микроприборов, а также технологические, обусловленные разрешающей способностью технологического и контрольно-диагностического оборудования. Кроме того, с уменьшением размеров элементов возрастает разброс выходных параметров схем и снижается выход годных ИС, поскольку линейные размеры элементов, а также дефекты кристаллической структуры и допуски на топологию становятся соизмеримыми.

Рассмотрим пути расширения функциональной сложности БИС и их диагностики.

Функциональная насыщенность может быть достигнута двумя направлениями конструирования: увеличением площади кристаллов ИС или миниатюризацией микроприборов.

Проанализируем предельные возможности этих направлений. Функциональная сложность ИС возрастает с повышением степени интеграции вследствие увеличения размеров кристаллов. Это позволяет достичь большого числа сосредоточенных на кристалле функций, отнесенных к одному контакту ИС, что также отвечает требованию уменьшения числа их внешних выводов. Как известно, возрастающая сложность ИС существенно усложняет и без того трудоемкий процесс сборки узлов РЭА. При интеграции на больших

кристаллах он заметно упрощается и исключает создание индивидуальных межсоединений. В результате увеличивается функциональная производительность БИС, характеризуемая произведением числа эквивалентных вентилях на максимальную скорость их переключения. Кроме того, можно достичь интеграции на целой пластине (ИЦП), разместив на ней многопроцессорные компьютеры и расширенную многофункциональную память. Ведутся разработки устройств на пластинах размером 15x15, 30x30 и 50x50 мм.

Однако это направление конструирования в микроэлектронике встречает ограничения.

Технологические ограничения связаны с необходимостью исключения из процесса литографии шаблона, что обусловлено большой поверхностью кристалла. Возникают сложности выполнения межсоединений, занимающих более 60% площади поверхности кристалла.

Экономические ограничения вызваны существенным снижением годных кристаллов больших размеров из-за наличия множества случайно распределенных микродефектов структуры в приповерхностном слое, микротрещин, а также высоконапряженных областей кристалла. Кроме того, существуют ограничения достоверности диагностического контроля и отказоустойчивости. Высокая степень интеграции сопровождается мощным тепловыделением и соответственно разогревом кристалла, появлением термомеханических напряжений. Это вызывает миграцию ионов металлизации и примеси полупроводника, возрастание концентрации собственных носителей заряда. В результате возникают дефекты в межсоединениях. В процессе эксплуатации ИС сигнал искажается из-за накопления его задержек в межсоединениях, емкостного взаимодействия соседних шин, а также вследствие индуктивности выводов, вызывающей помехи между узлами ИС. Периодическое изменение контактов и локальные изменения концентрации носителей приводят к перемежающимся сбоям и термическому отказу. При закреплении больших кристаллов на несущей подложке корпуса также возникают существенные термомеханические напряжения: остаточные технологические и вызванные изменениями температуры окружающей среды. Это приводит к сбоям и отказам БИС.

Рассмотрим путь непосредственной миниатюризации микроприборов и влияние ее на достоверность контроля БИС. Пре-

дельные ограничения размеров микроприборов определяются технологическими возможностями, а также физическими процессами в микроприборах БИС, в том числе размерными эффектами.

Технологический предел миниатюризации определяется не только ограниченными возможностями применения технологического оборудования и технологическими процессами создания структур, но и возрастанием флуктуации геометрических размеров элементов ИС и, соответственно, их динамических параметров при уменьшении размеров микроприборов. В настоящее время технологический предел миниатюризации обусловлен возможностями литографии (табл. 4.2.). Современные методы технологии позволяют создавать слои толщиной 1 - 10 нм и элементы с линейными размерами 0,5 - 1,0 мкм.

В литографии применяются оптические, электронно-лучевые, ионно-лучевые и рентгеновские методы. Оптическая литография дает разрешение 1,0 мкм, электронно-лучевые 0,20 мкм с точностью 1 0,03 мкм, ионно-лучевая - 0,1 мкм, рентгеновский метод позволяет получить элементы размером 0,5 мкм. Ограничения литографии определяются известным соотношением $\Delta r \Delta x > h$, что дает размытость края линий для протонов 0,5 мкм, а для электронного пучка - 10 нм.

Если и в дальнейшем уменьшать размеры микроприборов БИС, можно достичь соизмеримости геометрических размеров с характеристическими параметрами - дебройлевской длиной волны электрона, средней длиной свободного пробега электрона, длиной когерентности, что вызовет квантово-механические размерные эффекты. Как известно, в двумерных нанометровых приборах кристаллических ИС с резкой границей раздела слоев размерные эффекты проявляются интенсивно. Физическими процессам, определяющими ограничения минимально допустимых размеров МОП-транзисторов при данном питающем напряжении U , являются пробой подзатворного слоя окиси кремния и слоя между стоком и подложкой, «краевой» пробой стока, а также флуктуации концентрации легирующей примеси.

Таблица 4.2. Методы литографии

Методы	конец 1980-х гг.	конец 1990-х гг.
Фотолитография	1,5(1,0) / 0,5	0,75/0,1
Ультрафиолетовая	0,5 / 0,25	0,25/0,1
Рентгенолитография	0,1(0,5) / 0,1	0,01 / 0,005
Электронно-лучевая	0,1(0,2)/0.1(0,03)	0,0005 / 0,03
Ионно-лучевая	0,1(0,1)/0,1	0,001 / 0,005

Примечание. В числителе — разрешение, в знаменателе — совмещение, мкм.

Для биполярного изопланарного транзистора при данном питающем напряжении U на коллекторе минимальная толщина базы ограничивается пробоем коллекторного перехода, эффектом смыкания в базе, а также флуктуациями концентрации легирующей примеси.

Размерные эффекты в МЭ связаны с «физической» длиной, влияющей на физические процессы, основные в работе микроприборов. При этом для нормального функционирования последних необходимо, чтобы конструктивные размеры элементов соответствовали значениям «физических» размеров.

Квантовые ограничения определяются соотношением Гейзенберга:

$$\Delta E \Delta t \geq h, \text{ где } h = 1.0510^{34} \text{ Дж} \cdot \text{с};$$

ΔE - энергия.

Рассеиваемая мощность за время Δt переключения прибора $\Delta E / \Delta t > h(\Delta t)^2$ определяет минимальную мощность $N_1 = \Delta E \cdot \Delta t$, рассеиваемую единичным переключением за время Δt . Следовательно, за одно переключение при $\Delta t = 1 \text{ нс} = 10^{-9} \text{ с}$ должно расходоваться $\Delta E = 10^{-25} \text{ Дж}$. Фактически достигнуто $\Delta E = 2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$, а в МОП-транзисторах — 10^{-13} Дж .

Ограничения на толщину d подзатворного диэлектрика связаны с затуханием волновой функции $\psi(x)|_{d>0}$ электрона до нулевой амплитуды $\psi(x) = 0$ на другой поверхности тонкого $x = d_0$ слоя окисла. Как известно, затухание волновой функции $\psi(x)$ при про-

хождении волны через тонкий слой изолятора d_0 определяется соотношением $W=A\exp[-2d_0(2m(E-U_0)/h)^{1/2}]$, что и выражает вероятность прохождения волны сквозь тонкий слой изолятора. Таким образом, существует вероятность прохождения электрона через слой диэлектрика путем квантомеханического туннелирования и возникновения «туннельного» тока, который в МОП-структурах наблюдается при толщине $d=10^3$ мкм (~ 1 нм). Поэтому возникают фундаментальные ограничения толщины диэлектрика под затвором и ширины обедненного слоя $d_{lim}=10^3$ мкм. В настоящее время в МОП-структурах достигнута толщина $d_0=10^{-2}-10^{-3}$ мкм. Имеется реальная возможность экспериментального достижения некоторых предельных размеров элементов микроприборов. Например, $I_{кан}=250$ нм; $h_{базы}=250$ нм. При очень малой толщине слоев и незначительных расстояниях между ними обнаруживается их взаимное влияние и возникновение новых связей между микроприборами. Так, в микроприборах с малыми размерами элементов возникают сильные электрические поля ϵ . При этом к характерным **видам нарушений** в микроприборах относятся:

- пролет электронов между электродами без столкновений;
- зависимость микроприборов от свойств прилегающих слоев микроприборов, соседних с рассматриваемыми, а также от физического состояния переходных слоев;
- эффекты электромиграции частиц в сильном поле;
- существенная роль рельефа поверхности микроприборов;
- возникновение сильных электрических полей и угроза пробоев.

Следует отметить, что в ИС ЭВМ работа микроприборов отличается резким переходом от одного состояния в другое, а рассеиваемая при этом мощность N пропорциональна квадрату напряжения. При повышении плотности интеграции БИС необходимо снижать питающее напряжение U_n (рабочее напряжение БИС). Низковольтные БИС позволяют уменьшить размеры микроприборов и увеличить плотность их интеграции на кристалле. В твердотельных БИС уровни напряжения питания остаются достаточно большими вследствие необходимости четкого различия лог «0» и лог «1». Напряжения на приборах изменяют потенциальную

энергию электронов $g_3 U_n = kT$ и, соответственно, $U_n = kT/g_3$. Нелинейные эффекты в микроприборах возникают при $U_n \gg kT/g_3$, что обеспечивает надежную работу приборов, выполнение логических операций и хранение информации.

Рассмотрим ограничения размеров транзисторов в зависимости от физических процессов функционирования. Уменьшение площади МОП-транзисторов достигается сокращением длины канала l_k и его ширины b_k . При увеличении соотношения ширины и длины микроприбора снижается плотность интеграции, но возрастает рабочая частота. Минимально допустимая l_k ограничивается перекрытием объединенных областей истока и стока, т.е. эффектом смыкания. Значение l_k не может быть меньше ~ 0.02 мкм, т.е. удвоенной толщины обедненной области стока во избежание самопроизвольного (при отсутствии внешнего U_n) смыкания двух переходов. Предельная концентрация легирующей примеси N_{np} в кристалле не должна превышать $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, чтобы исключить полевую эмиссию в переходы и сток. При существенном уменьшении размеров приборов число атомов легирующей примеси в объеме микроприборов настолько мало, что пренебречь статистической флуктуацией атомов примеси нельзя, так как они (атомы) оказывают заметное влияние на характеристики микроприборов. Во избежание туннелирования электронов толщина d подзатворного слоя SiO_2 не должна быть менее 50 Å. Практически допустимое электрическое поле в слое SiO_2 не более $3 \cdot 10^6 \text{ В/см}$. В полевых транзисторах «горячие» электроны в канале переходят на поверхность и изменяют пороговое напряжение, перемещаясь в подзатворный слой SiO_2 . Поэтому эффект «горячих» электронов лимитирует уменьшение l до 0,25 мкм. Таким образом, статистические функции обедненных областей истока и стока, длина канала и толщина слоя d_3 оказывают принципиальное влияние на минимальные размеры. Рассеиваемая микроприборами мощность в ряде случаев может стать основной причиной, ограничивающей плотность интеграции БИС. При большой плотности тока в металлической шине возникает миграция атомов металла, что локально уменьшает эффективное сечение шины и вызывает ускоренное развитие дефекта, а в результате - отказ БИС. Это обстоятельство ограничивает плотность тока в алю-

миниевых шинах до значения, существенно меньшего 10^6 A/cm^2 , накладывая соответственно ограничения на рабочую частоту и число микроприборов в данной цепи БИС.

Каждая логическая ячейка ЭК в процессе работы преобразует определенное количество энергии в тепловую, распространяемую в БИС, т.е. теплота от локального источника трансформируется в тепловой поток по всему кристаллу и нагревает его. В результате ограничивается плотность интеграции микроприборов, рассеивающих мощность тепловым потоком.

Заметим, что ограничения миниатюризации ИС, накладываемые тепловыми флуктуациями, следует рассматривать при конструировании микроприборов. При этом необходимо, чтобы рабочее напряжение существенно превышало U_n .

Кристаллы охлаждаются вследствие контактной теплопроводности. Тепловой поток ограничивается тепловым сопротивлением подложки и интерфейса. Для повышения скорости распространения информационного сигнала необходимы большие затраты мощности и, соответственно, более интенсивный разогрев БИС. Можно прогнозировать, основываясь на законах подобия, что длина канала достигнет 0,25-0,5 мкм, а плотность тока возрастает в ~ 10 раз. Дальнейшая миниатюризация потребует снижения U . Толщина диэлектрика под затвором $d > 5 \text{ нм}$, чтобы исключить туннельный эффект.

В табл. 4.3. представлены физические явления, используемые для функционирования микроприбора БИС, и характеристические (физические) длины, ограничивающие микроминиатюризацию.

Функционирование приборов БИС

Характеристики	Способ управления	Интервал изменения, мкм	Применяемые микроприборы	Физические процессы в микроприборах
Диффузионная длина неосновных носителей	Концентрация рекомбинационных центров	1-100	Биполярный транзистор, фотодиод	Инжекция и экстракция неосновных носителей
Ширина обедненной зоны рп-перехода	Изменение концентрации активных примесей	901-10	Полевой транзистор с рп-переходом	Создание энергетического барьера для носителей одного типа
Длина экранирования Дебая	То же	901-10	—	Экранирование поля
Толщина инверсионного слоя	Использование разности потенциалов на переходе	0-10	Полевой транзистор со структурой МДП, приборы с ПЗУ	Использование канала проводимости для носителей одного типа
Средняя длина пробега, энергия носителей	Изменение концентрации рассеивающих дефектов и температуры	$10^{-4} - 10^{-2}$	Баллистический транзистор	Баллистический перенос (со скоростью, большей Удр.макс)
Дебройлевская длина волны электронов	То же	901	Оптические и туннельные приборы	Квантование энергии в двумерном газе и в потенциальных ямах сверхрешеток
Расстояние тунеллирования электронов	Подбор диэлектриков и контактных пар с разной высотой энергетического барьера	$10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3}$	Туннельный транзистор, омические контакты, МОП-транзисторы с туннельной инжекцией зарядов в "плавающей" затвор	Тунеллирование электронов через контактные барьеры и тунельно-тонкие слои диэлектриков
Толщина слоя в гетеропереходах со скачком запрещенной зоны	Постепенное видоизменение состава	$10^{-5} - 10^{-4}$	Полевой транзистор на электродах с высокой подвижностью	Разделение электронов и заряженных доноров
Период кристаллической решетки	Величина постоянная	10^{-7}	Системы ПЗУ с плотностью записи 10 см (гипотеза)	Наблюдение атомной структуры и туннельных токов
Диффузионная длина носителей $\tau = 10^{-7} - 10^{-8}$ с	Отказ от структур с малым коэффициентом диффузии, подавление электропереноса, электронических и гальванических процессов, снижение рабочих температур	$10^{-2} - 10^{-2}$	Микроприборы с ограниченным сроком службы, обусловленным используемыми физическими явлениями	Деградация параметров приборов

Глава 5

ПРОБЛЕМЫ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИС

Основной тенденцией микроэлектроники последних лет является расширение функциональной сложности и повышение быстродействия БИС. Надежное функционирование РЭА требует специальных методов и средств отбраковки потенциально ненадежных компонентов БИС ЗУ. Проблема диагностического контроля осложняется, поскольку функционально на один выходной контакт БИС приходится цепь, содержащая тысячи соединенных между собой ЭК, из которых каждый не испытывают. Поэтому результат берется суммарный. Контроль и анализ функциональных операций при обращении БИС ЗУ должны достоверно характеризовать длительность их безотказной работы, что позволит создать не только высоконадежную РЭА, но и избежать ущерба, нередко исчисляемого человеческими жизнями.

В табл. 5.1. приведены затраты (абсолютные и относительные) разработчика при выявлении отказов ИС на разных стадиях жизненного цикла РЭА (бытовой, промышленной, военной и космической). Эти данные подтверждают необходимость диагностического прогнозирования надежности БИС ЗУ, на ранних стадиях формирования.

Актуальной проблемой указанного направления МЭ является разработка совершенных методов производительного пооперационного контроля, а также диагностика БИС в сложных условиях окружающей среды. В дискретной электронике каждый ЭК подвергался входному контролю на соответствие заданным параметрам или характеристикам. В МЭ такой контроль осуществить невозможно. Это также отличает МЭ от дискретной электроники и является одним из ее характерных признаков. В МЭ применяется специальные функциональный выходной контроль, отражающий назначение и схемотехнику БИС.

Таблица 5.1. Стоимость отказа на разных стадиях обнаружения/относительная стоимость, долл.

Область применения ИС	Входной контроль	Монтаж платы	Тестирование системы	Эксплуатация системы
Бытовые приборы РЭА	2	5/2,5	5/2,5	50/25
Промышленные системы РЭА	4	25 / 6,25	45 / 11,25	215 / 53,75
Военная аппаратура	7	50/7,14	120/17,14	1000 / 142,85
Космическая аппаратура	5	75/15	300 / 60	200,10/40,10

Из данных рис.5.1. следует, что нарушения в ИС составляют «50% отказов РЭА, а их структура отражает основное содержание («80%) дефектов в кристалле БИС. Поэтому обеспечение надежности РЭА обусловлено созданием высоконадежных БИС и диагностическим контролем. В связи с этим необходимо объединить различные разделы физики, химии, электроники, математики.

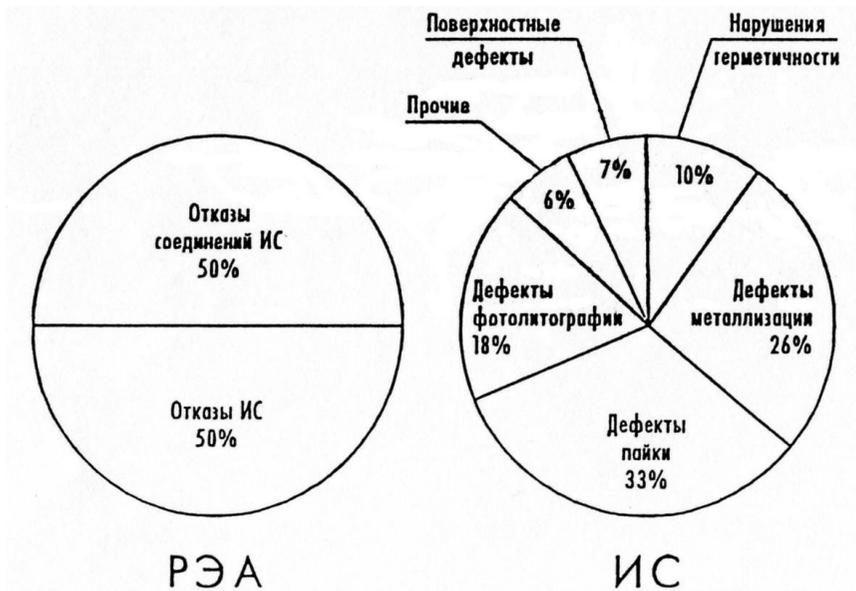


Рис.5.1. Анализ проблемы надежности РЭА

Моделируемая система БИС представляет совокупность ЭК, обладающих собственной характеристикой надежности и соответствует модели функционирования, например, «включен», «выключен», «активен» и т.д. Изменение состояния ЭК осуществляется лишь при воздействии ряда внутренних управляющих сигналов или других факторов, определяемых предписанными ситуациями функционирования. Можно выделить такие взаимодействие ЭК как системное, сопряженное, внутреннее.

Системное взаимодействие ЭК планируется функциональными взаимосвязями, определяемыми назначением данных БИС. Такая последовательность взаимодействия представляет собой совокупность состояний, отражающих функциональные взаимосвязи ЭК.

Сопряженное блочное взаимодействие отражает промежуточные состояния ЭК, через которые осуществляется их связь.

Внутреннее состояние ЭК показывает динамику самого элемента независимо от окружающих ЭК.

Одной из актуальных проблем общей теории надежности является разработка методов исследования динамики функционирования БИС и РЭА в условиях различных флуктуаций и внешних дестабилизирующих воздействий. Сложность ее решения обуславливает ряд особенностей: большое число взаимосвязанных ЭК со сложными структурными и функциональными связями; функционирование отдельных ЭК, не имеющих самостоятельного характера и зависящих от положения в схеме; случайный характер неопределенности поведения ЭК.

Вероятностные показатели надежности БИС ЗУ имеют следующие недостатки: недостоверность сведений о вероятностных показателях надежности БИС, рассчитанных по показателям надежности элементов; неточность показателей надежности, являющихся результатом усреднения элементарных значений по множеству образцов; невозможность использования результатов расчетов одних показателей для определения других вследствие неэлементарности показателей надежности.

Создание достоверных методов и средств диагностики, протезирующей надежное функционирование БИС ЗУ, является сложной проблемой, включающей классификацию и дифференциацию **механизмов отказов**:

- построение моделей функциональных связей ЭК в микросхеме;
- рассмотрение условий эксплуатации БИС ЗУ и возможных деградационных процессов в ЭК, формирование базы данных;
- создание тестовых последовательностей с учетом вероятности возникновения нарушений в работе ЭК и функциональных цепях БИС ЗУ;
- построение и обоснование моделей отказов;
- формирование списка предвестников отказов;

- анализ информационных сигналов и экспертная оценка надежности БИС ЗУ

Деградационные процессы и ЭК нецелесообразно рассматривать без учета физико-химических процессов, протекающих в элементах их конструкции и ближайшем окружении, без оценки доминирующих процессов и длительности их развития. Следовательно, необходимы физико-химические модели деградационных процессов.

Локализованное развитие деградационного процесса в каких-либо элементах ЭК не позволяет учесть их взаимное влияние ни одновременное развитие этих же процессов в соседних ЭК БИС и не учитывает различной скорости их протекания.

Для построения ЭС диагностики БИС ЗУ (нетрадиционной однокристалльной технологии в сочетании с нетрадиционной диагностикой) **необходимо**:

- получить полную качественную информацию о природе отказов и эволюции механизмов деградации в условиях внешних воздействий;
- выявить предвестники отказов и сравнить степень их влияния на надежность;
- сравнить надежность различных конструкций электронных компонентов;
- сформулировать правила достоверного прогнозирования надежности БИС ЗУ

В зависимости от функциональной сложности и назначения БИС выбираются определенная процедура диагностирования и соответствующие тесты, основанные на представлении БИС логической сетью.

Моделирование процессов в БИС посредством сетей Петри основывается на взаимодействии событий и условий, в которых они развиваются. Событие представляет собой процесс, действие, происходящее в БИС, а условие - логическое описание состояния

системы посредством лог «0» и лог «1». События в сетях Петри описываются переходами, а условия - позициями. При этом входы перехода представляют предусловия, а выходы - постусловия соответствующего события.

Для анализа БИС ЗУ перспективно построение автоматизированной системы экспертной диагностики (АСЭД) в виде локальной вычислительной системы, содержащей центральную управляющую ЭВМ, устройства функционального контроля, системы анализа и диагностики. **К основным положениям относятся:**

- модульность конструкции;
- имитация взаимодействия с внешними устройствами;
- имитация внешних воздействий, стимулирующих процессы деградации.

Контроль сверхбыстродействующих ИС - центральная проблема разработки БИС, ставшая наиболее критической частью программы МО США - VHSIC. По этой программе на целой пластине формируется система, содержащая $28T0^6$ электронных компонентов с проектными нормами 0,5 мкм и более 500 контактных выводов. Тактовая частота составляет не менее 100 МГц.

Контроль рабочих параметров таких БИС оказался сложным. На первой фазе программы VHSIC для контроля БИС можно использовать тестер GR 18 фирмы *GenRad* (эффективная частота 40 МГц; временная погрешность менее 1 не; измерительная головка содержит 288 контактных выводов). На второй фазе - тестер GR 180той же фирмы с тактовой частотой 120 МГц и временной погрешностью 750 не, число контактных выводов - то же (288).

Фирма *Mentor Graphics* (США) разработала тестер XL-100 на эффективной частоте 100 МГц с временным разрешением 100 нс.

Работающая по программе VHSIC фирма Harris считает, что будущий тестер должен проверять ИС, изготовленные по всем видам технологий, в том числе и по Ga As. Его измерительная головка должна содержать не менее 512 контактов, эффективная частота составлять 250 МГц и временная погрешность - 200 нс.

Распространение специализированных БИС выдвигает новые задачи в области контроля. Прежде всего - обеспечение высокого быстродействия тестовых систем. Для этого необходимо, чтобы тестер измерял параметр в течение долей нс, обеспечивая минимальное рассогласование фронтов в каналах и высокую степень воспроизводимости результатов измерения.

За рубежом появились сообщения о создании тестеров нового класса, так называемых верификаторов опытных образцов специализированных БИС, позволяющих осуществлять не только параметрический, но и верификационный контроль БИС на частоте 40 - 50 МГц. Так, фирма *Integrated Measurement Systems* (IMS) выпустила систему типа Logic Master XL для проверки новых быстродействующих специализированных БИС. Этот верификатор работает на частоте 100 МГц, так как выполнен на новых специализированных БИС и допускает рассогласование фронтом в каналах не более 1 нс. Минимальная дискретность сдвига импульсов составляет 100 нс. Набор вычислительных ресурсов для каждого внешнего контакта формируется с помощью программных средств. Тестер работает в диалоговом режиме, обеспечивая высокую гибкость. При функциональном контроле специализированных БИС используются тестовые последовательности, формируемые на этапе проектирования средствами моделирования САПР. Можно модифицировать тестовую последовательность и результат наблюдать на экране. Неисправности, обнаруженные при воздействии тестовой последовательности, отображаются в реальном времени и выделяются яркостью свечения.

Другой важной проблемой является генерация тестовых программ. Разрабатывается комплекс сервисного программного обеспечения тестера TISSS. Тестовые программы можно совершенствовать в результате экспертных систем (ЭС).

Детерминированные функциональные тестовые последовательности отличаются большой длительностью прохождения БИС. Применение специализированных АСК позволяет сократить длину тестовых последовательностей за счет аппаратной фиксации реакций БИС на тестовые воздействия.

На первом этапе тестирования осуществляется контроль технического состояния БИС по принципу «годен» и «негоден». Затем выясняется локализация неисправностей БИС, не прошедших первый этап контроля. С этой целью в КИА предусмотрена ЦЭВМ, обеспечивающая фиксацию отказавших БИС и их углубленное, детальное тестирование. Данный метод позволяет объединить контрольные и диагностические тесты и, следовательно, сократить время разработки программных средств тестирования. В целях увеличения достоверности и глубины тестирования осуществляется: фиксирование ошибки (сбоя) в такте ее возникновения, сокращение длины тестовых последовательностей введением специализированных (аппаратных самопроверяемых) устройств контроля; разделение во времени процессов контроля и поиска неисправности; одновременная проверка нескольких БИС с использованием в качестве эталонных реакций входных/выходных и внутренних последовательностей, снимаемых с эталонного образца.

Глава 6

ПРИРОДА И МЕХАНИЗМЫ РАЗВИТИЯ ОТКАЗОВ

Проблема надежности БИС ЗУ обостряется в связи с тенденцией их функциональной насыщенности и, соответственно, повышением степени интеграции.

Для прогнозирования надежности БИС ЗУ необходима достоверная информация о физической природе отказов. Отказы БИС ЗУ могут определяться недостатками конструирования и дефектами исходного материала, погрешностями технологического процесса (планара) и сборочных операций, нарушением условий хранения и режима эксплуатации. В связи с этим рассматривается физика отказов БИС ЗУ при возмущающих воздействиях окружающей среды и идентификации их типов. Необходимо выделить особенности испытаний па принудительный отказ и анализ их последствий. В первую очередь следует установить предвестники отказов, т.е. физические симптомы, свидетельствующие о развитии деградационных процессов, во вторую - идентифицировать эти отказы и систематизировать их, выделяя характерные признаки В условиях изменении внешних возмущающих (жестких) воздействий, а затем создать системы выявляющих тестов и фиксирующих источников.

Идентификация типов отказов БИС ЗУ - сложный процесс, поскольку на один контакт задействованы тысячи ЭК БИС, а проверка отдельных ЭК полностью исключается. Поэтому на кристалле БИС создаются специальные тестовые структуры ЭК идентичные встроенным в схему. В них и развиваются аналогичные деградационные процессы.

В течение эксплуатации БИС в предписанных условиях развиваются дефекты, образовавшиеся при их изготовлении и получающие дальнейшее развитие. К ним относятся нарушения кристаллического строения полупроводника и вносимые технологическим процессом, а также ошибками литографии; вызванные операциями корпусирования, защиты от радиоактивного излучения

и герметизацией; связанные с эксплуатацией, условиями и продолжительностью эксплуатации.

По своей природе источники отказов БИС можно разделить на три группы: технологические, конструкторские и обусловленные естественной деградацией материалов.

Термодинамические причины отказов связаны диссипацией энергии, которой сопровождается обработка и хранение информации в БИС. Поэтому можно выделить три состояния ЭК: стационарное (динамическое развитие), псевдостационарное (неустойчивое равновесие) и необратимые переходы (нерабочее состояние).

Систематизация типов отказов позволяет выделить **две характерные группы:**

- связанные с дефектами в основании кристаллы и эпитаксиальном слое, литографии, окисления, металлизации формирования контактов, пассивации;
- обусловленные сборочными операциями крепления кристалла на основании, формирования выводов кристаллооснование БИС, образования защитных слоев, а также герметизации в корпусе

Ускоренные испытания позволяют выявить потенциально ненадежные БИС, так как в течение короткого времени на них интенсивное воздействие оказывают дестабилизирующие факторы.

Искусственно созданные внешние возмущающие воздействия (стрессы) вызывают быстрое развитие деградационных процессов, что позволяет выявить и идентифицировать предвестники отказов, их симптомы. Механизмы деградационных процессов изучают на препарированных БИС современными аналитическими методами, включающими микронзондирование электронным лучом, электронную микроскопию, рентгеновский микроанализ и другие исследования электрических характеристик: вольтамперные, их спектральный состав и температурный ход, пороговое напряжение.

Рассмотрим отказы, связанные с технологией изготовления ИС и возникающие вследствие ошибок фотолитографии или из-за

колебаний параметра технологического процесса. Первые из них - это результаты погрешностей топологии и генерации изображений в процессе изготовления фотошаблонов. Они могут проявляться в виде пропущенных или лишних рисунков на фотошаблонах различных слоев.

Основные ошибки при фотолитографии:

- дефекты окисла: пропущенные области прибора, т.е. отсутствие тонкого окисла; пропущенные области толстого окисла, из-за которых возникают дефекты изоляции;
- дефекты имплантации: пропущенные или лишние (легированные не той примесью при нескольких имплантациях) области; пропущенные или лишние контактные окна;
- пропущенные или лишние соединения между различными частями прибора в металлизации, поликремнии, диффузионных слоях, а также между ними;
- ошибки совмещения

Нарушения, возникающие из-за несовершенства технологического процесса (вносимые планарной технологией):

- дефекты окисла, металлизации, контактов;
- загрязнения посторонними примесями;
- короткие замыкания или обрывы в проводящих шинах, а также между поликремнием и металлом

Доминирующим механизмом отказов ИС был пробой подзатворного окисла МОП-транзисторов. Число отказов и их временная зависимость определяются активной подзатворной площадью ИС и распределением плотности дефектов окисла (проколов). Последняя зависит от технологии выращивания пленок, качества кремниевых подложек и ряда других дефектов. Другой механизм отказов ИС из-за пробоя SiO₂ связан с электрохимическими разрядами, возникающими в результате работы с пластинами незащищенных людей или механизмов.

Совершенство технологии привело к тому, что пленки SiO₂ толщиной 500 Å являются практически бездефектными. Однако разработка СБИС с использованием окисных пленок толщиной 100 - 200Å потребовала дальнейших исследований механизма пробоя пленок SiO₂ и их надежности.

К дефектам металлизации можно отнести отслаивание металла вследствие плохой адгезии, короткие замыкания между шинами из-за «недотрава» металла или большой плотности поликремниевых бугорков (при использовании для металлизации алюминия с добавками кремния), возникающих при вжигании металлизации. Другой тип дефектов металлизации связан с обрывами или утончением шин на ступеньках окисла. Эти дефекты являются результатом операций травления шин металлизации, а также определяются сложным профилем ступенек, который не позволяет выполнить их качественное «запыление».

Попадание частиц пыли в пленку фоторезистора может привести к локальным растратам шин металлизации или их сужению, что, в свою очередь, вызовет отказы из-за выгорания шин в месте сужения. Появление мелко залегающих (менее 1 мкм) р-п-переходов определило специфический тип отказов (рис.6.1.), связанных с их проплавлением. Проколы р-п-переходов обусловлены вакансионными пустотами, образующимися при диффузии кремния в алюминий и заполняющимися алюминием, что вызывает их короткое замыкание.

При создании многоуровневых систем металлизации возникает дефектность, связанная с внутренними механическими напряжениями в пленках. Ее результатом становится отслаивание металлизации или разрывы ее в областях с максимальными значениями внутренних напряжений. Опасность этого вида отказов заключается в большой длительности процесса разрушения.

Одним из наиболее встречающихся отказов ИС является коррозия металлизации (рис.6.2.). Ее вероятным механизмом можно считать образование ортофосфорной кислоты на поверхности ИС вследствие взаимодействия влаги со слоем фосфорно-

силикатного стекла, используемого в качестве межслойного диэлектрика, которая реагирует с алюминиевыми шинами.

Другой механизм связан с электрохимическими реакциями, протекающими в условиях влажности, повышенных температур, электрического поля и наличия примесей, таких, как хлор и натрий. В результате электрохимических реакций возникают сложные растворимые комплексы, которые могут диффундировать к катоду, где, как правило, осаждаются в форме дендридов, растущих по направлению к аноду и вызывающих короткие замыкания между металлическими проводниками на поверхности кристалла.

Одним из основных механизмов отказов СБИС, связанных с металлизацией, является электромиграция.

При изготовлении СБИС неизбежно попадание на поверхность кремниевых пластин частиц, содержащихся в рабочих газах и жидкостях. Эти частицы вызывают дефекты литографии, оставляют металлические примеси на поверхности пластин, влияют на качество пленок. Литографические дефекты - это проколы в пленке резиста и искажения топологического рисунка. Частицы металла, оставленные на поверхности пластин хемосорбируются или становятся примесями замещения и кристаллической решетке. Хемосорбированные примеси являются причиной ухудшения C-V- характеристик, возрастания токов утечки. Хемосорбция интенсивнее при травлении и процессах очистки кремниевых пластин, когда применяемые кислоты создают химически активную поверхность полупроводника. Хемосорбированные металлические примеси проникают в кремниевые пластины при последующих высокотемпературных обработках, нарушают кристаллическую решетку полупроводника, вызывая появление энергетических уровней в запрещенной зоне. Эти участки затем действуют как центры генерации-рекомбинации и вызывают усиление токов утечки p-n-перехода и сокращение жизни неосновных носителей. •

Загрязнение окисла подвижными ионами щелочных металлов представляет серьезную проблему для МОП ИС. Совершенствование технологических процессов позволило частично решить эту проблему. Но флуктуация технологических режимов и исполь-

зование новых материалов по-прежнему приводят к загрязнению пластин примесями. Так, отказы из-за загрязнения ионами щелочных металлов, как правило, связаны с захватом подвижных ионов в ловушки окисла, что вызывает изменение порогового напряжения МОП-транзисторов.

Отказы, связанные с короткими замыканиями (КЗ) или обрывами в проводящих шинах, в основном возникают из-за попадания на кремниевые пластины частиц из технологических сред. Отказы, обусловленные КЗ между проводящими слоями (поликремнием и металлом или двумя уровнями металлов), как правило, связаны с недостаточной отработанностью технологического процесса осаждения межслойного диэлектрика, что проявляется в значительной его дефектности (большом числе сквозных пор) или в плохом облепании проводящих ниш (рис.6.3). К дефектам контактов относятся высокое сопротивление контактных областей (вплоть до полного отсутствия контакта) и плохое облепание рельефа контактного окна металлом.

Типичным дефектом при использовании металлизации на основе Al(Si) является высокое сопротивление контактов Al-n⁺, что связано с преципитацией кремния в контактных окнах и образованием выпрямляющего контакта к кремнию n⁺-типа, так как выделяющиеся кремниевые преципитаты содержат Al, являющийся примесью p-типа.

Рассмотрим отказы, связанные с конструкцией. Они преимущественно обусловлены ошибками, непреднамеренно вносимыми на стадии проектирования БИС.



Рис.6.1. "Прокол" рп-перехода

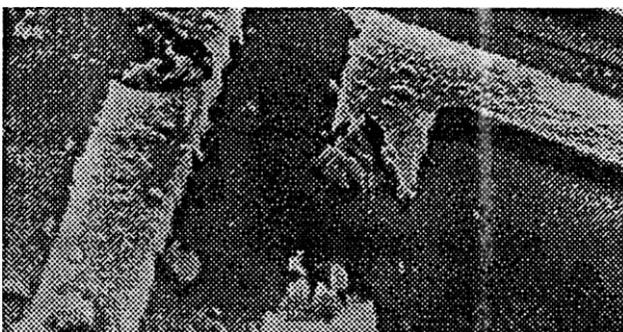


Рис.6.2. Дефект металлизации - коррозия



Рис.6.3. Плохое прилегание проводящих шин

Дефекты конструирования БИС:

- отклонение напряжения (снижение) из-за неправильного выбора ширины проводников;
- установление топологических размеров или значения критического заряда, недостаточных в условиях воздействия α -частиц;
- выбор топологических размеров, не допускающих смыкания объединенных областей рп-переходов транзисторов;
- отказы, связанные с инжекцией горячих электронов в окисел, а также с тиристорным эффектом

Суммируя опубликованные и экспериментально полученные данные можно классифицировать дефекты БИС ЗУ, возникающие на разных стадиях технологии изготовления.

Дефекты подложки и эпитаксиального слоя:

- микротрещины по периметру кристалла, образуемые в процессе скрайбирования и разделения шайбы на кристаллы;
- микротрещины в контактных площадках кристалла, возникающие при термокомпрессионной сварке вследствие избыточных механических напряжений

Эти трещины распределяются по кристаллу при нагревании, так как коэффициенты теплового расширения кристалла и материалов корпуса и компаундов различны. Микротрещины вызывают токи утечки по низкоомным цепям, деградацию рп-переходов, обрыв цепи проводящих шин, а вследствие миграции ионов металла в зоне микротрещины - образование КЗ.

Дефекты литографии:

- наличие проколов фоторезиста, а также посторонних частиц на поверхности, что создает соответствующий прокол в слое окисла и может принести к КЗ в процессе эксплуатации БИС при повышенных температурах;

- плохая адгезия фоторезиста к окислу, вызывающая подтравливание и, соответственно, нарушение размеров и формы конструкции ЭК;
- несовмещение шаблонов, приводящее к нарушениям в образовании электрических контактов, сквозных отверстий и, как правило обрыву цепи или изменению ВАХ в ЭК

Дефекты возникающие вследствие диффузионных технологических процессов:

- ускоренная диффузия из-за наличия дислокаций и образования диффузионных токов в кристалле, следствием чего являются локализованные токи утечки в диффузионных шинах и термическая деградация рп-переходов;
- расширение диффузионных областей вследствие подтравливания окисла и снижение пробивного напряжения рп-перехода;
- наличие диффундирующих металлических примесей, проникающих в кремний и образующих преципитаты, которые изменяют параметры ЭК;
- дефекты упаковки при ионной имплантации, вызывающие дополнительные токи утечки в рп-переходах;
- трещины в слое окисла вследствие термомеханических напряжений в областях с тонким окислом, являющиеся причиной КЗ металлизации с активными областями ЭК из-за проникновения через них атомов алюминия;
- окисел малой толщины, вызывающий пробой затвора МОП-ПТ;
- образование в окисле и в ловушках на границе раздела Si-SiO₂ фиксированных зарядов, изменяющих характеристики БП- и МОП-ПТ

Дефекты металлизации:

- изменение формы и размеров коммутационной системы (КС) контактных площадок (КП). возникающие вследствие дефектов шаблона, перетрава или недотравливания;
- трещины в металлизации, возникающие из-за поверхностных примесей, дефектов фоторезиста и травления и приводящие к обрыву цепи;
- толстый слой металлизации, способствующий значительно увеличению внутренних напряжений;
- реакция между Al и Si, проникающим в алюминиевые шины вследствие разогрева при работе БИС;
- наличие остаточного окисла в области КП, ухудшающей омический контакт;
- электромиграция ионов металла, вызывающая обрыв цепи и короткое замыкание.
- При диффузии Al в подзатворный слой окисла исключается полевой эффект в ПТ

Дефекты защитных слоев (пассивации):

- микротрещины в слое пассивации, обусловленные термо-механическими напряжениями из-за различия коэффициентов теплового расширения слоя пассивации и окисла металла и открывающие доступ ионов щелочных металлов к границе раздела слоев;
- диполи примеси в пассивирующем слое, вызывающие временный дрейф характеристик МОП-приборов

Дефекты во внешней коммутации и электропроводящих выводах:

- разварка выводов (кристалл-выводов) при повышенной гибкости или нарушениях в их расположении, что может сопровождаться КЗ;

- снижение прочности соединения термокомпрессионной разварки;
- растрескивание кристалла в зоне контакта при сварке;
- миграция ионов кремния в монтажные проводники, увеличивающая их электрическое сопротивление и хрупкость (в присутствии кремния интенсивнее образуются интерметаллические соединения между выводом и контактной площадкой и повышаются внутренние механические напряжения);
- ускорение процессов образования интерметаллических соединений в термокомпрессионном соединении Au-Al («пурпурная чума») в присутствии кремния

Дефекты, возникающие при сборке и герметизации:

- дезориентация положения выводов кристалла с отверстиями в корпусе;
- слабый контакт кристалл-кристаллодержатель;
- нарушение целостности выводов при повышении температуры вследствие недостаточной адгезии кристалла, а также возникновение КЗ в результате вибрации;
- плохая герметизация корпуса, из-за которой попадающая в него влага конденсируется и осаждается на кристалле, вызывая коррозию, а ионы, проникающие в Na, K, Li, способствуют образованию проводящих дорожек и поверхностному распределению зарядов;
- различие коэффициентов теплового расширения выводов и корпуса, вызывающее разрыв проводников

Не все кристаллы, прошедшие выходной контроль, бездефектны. Если некоторый механизм отказа зависит от времени, т.е. вызывает старение, возникающее после эксплуатации кристаллов в течение некоторого времени, выявить его на стадии выходного контроля невозможно. Могут быть также внутренние не обнаружи-

ваемые дефекты, оставшиеся не выявленными из-за недостаточно совершенных методов испытаний.

Отказы, связанные с микроприборами:

- разброс пороговых напряжений транзисторов (проблемы синхронизации и рабочих характеристик ЭК;
- утечки стоковых рп-переходов (потери зарядов в узлах ЭК, работающих в динамическом режиме);
- «мягкое» включение (предпороговая проводимость);
- смыкание объединенных областей истока и стока;
- утечка в подложке;
- инжекция «горячих» электронов;
- «мягкие» отказы (потеря заряда под действием α -частиц)

Отказы в БИС могут проявляться внезапно или постепенно. Следует отметить, что внезапные отказы возникают из-за дефектов окисла, металлизации, разварки кристалл-выводы, присоединения кристалла к кристаллодержателю, а также пробоя подзатворного окисла.

Постепенные отказы возникают из-за наличия фиксированных зарядов или нестабильности ионного заряда в SiO_2 , ионной поверхностной проводимости, металлических примесей, дефектов упаковки кристалла и слоя пассивации.

Классификация типов отказов в соответствии с частотой их проявления - сложная проблема, так как, зависит от условий изготовления и эксплуатации, применяемого технологического оборудования, функциональной сложности БИС.

На рис.6.4. показана кривая интенсивности отказов, а также преобладающие их причины для каждой области.

Отказы, приходящиеся на начальный участок I, как правило, называют ранними. Участок II, где их интенсивность практически постоянна, называется областью случайных отказов. Как только начинается выход изделий из строя из-за полного использования ресурсов, интенсивность отказов возрастает. Область III называется областью износа. Отказы износа связаны с интенсификацией меха-

низмов физического и физико-химического старения материалов, изменения их свойств. Для оценки вероятности развития деградиционных механизмов в ЭК БИС необходимо определить их энергетическую или термическую характеристику активации.



Рис.6.4. Интенсивность отказов ИС

Главной причиной ранних отказов считались функциональные нарушения, обусловленные дефектами подзатворной изоляции.

К механизмам образования дефектов относятся также загрязнения пылевого характера, приводящие к ранним отказам из-за внедрения частиц пыли непосредственно в слои кристалла или маскирующих дефектов, вызывающих разрывы токопроводящих дорожек или их закорачивание. Еще одной причиной ранних отказов являются ионные загрязнения, появляющиеся в процессе технологических операций или при проникновении в пассивирующие слои. Отказы возникают и вследствие сдвига пороговых напряжений, образования поверхностных токов утечки при инверсии поля у поверхности. Одной из методик отбраковки, позволяющей эффективно определять интенсивность отказов, является термотренировка.

Другим вариантом прямой отбраковки приборов служит измерение электрических параметров структур, выход значений

которых за те или иные пределы свидетельствует о высокой вероятности отказов. Для полной характеристики СБИС и обеспечения ее надежности необходимо знать физические процессы и механизмы отказов ЭК. Отметим те из них, которые связаны с технологией и конструкцией:

МЕХАНИЗМ ОТКАЗА	ТИП ОТКАЗА
загрязнение	износосовый/ранний
нарушение контакта	>>
электромиграция	износосовый
микротрещины	случайный
коррозия	износосовый
дефекты окисла (короткие замыкания), ранний/случайный пластин, соединении	
α - частицы	ранний
инжекция «горячих» электронов	износосовый

Рассмотрим **отказы**, обусловленные технологией сборки и корпусирования:

- нарушение термокомпрессионного соединения - отрыв шарика от контактной площадки кристалла (рис.7.1.,7.2.);
- обрыв проволочного соединения (рис.7.3.);
- замыкание проволочного соединения на соседнюю траверсу (рис.7.4.);
- отрыв кристалла от основания кристаллодержателя.

Увеличение размеров кристаллов СБИС способствует возникновению температурных градиентов, что вызывает значительные термомеханические напряжения (вплоть до растрескивания кристаллов).

Уменьшение размеров ЭК приводит к возрастанию температуры кристалла вследствие увеличения плотности рассеиваемой мощности, что, естественно, повышает интенсивность отказов из-за электромиграции, пробоя тонкого окисла и т.п. В результате необходим равномерный отвод тепла от кристаллов больших размеров. По мере уменьшения размеров ЭК явления, почти не влияющие на надежность приборов (инжекция «горячих» электронов, электромиграция, деградация тонкого окисла, бомбардировка α - частицами), становятся более существенными. Традиционная проверка соответствия системы ЭК БИС спецификации по надежности предполагает использование данных ускоренного цикла испытаний на долговечность согласно выборке из партии пластин, после чего оформляется заключение о надежности БИС в оставшейся части партии. Однако для БИС повышенной функциональной сложности число ЭК, подвергаемых испытаниям под нагрузкой без единого отказа, может превысить число компонентов, требуемых для предполагаемого применения. Таким образом, ускоренные испытания на надежность неприемлемы. И центральной проблемой является обеспечение надежности микросхемы на уровне кристалла, для чего необходимо моделировать возможные механизмы деградации параметров так, чтобы конструкторы могли в процессе проектирования учитывать ограничения, относящиеся к надежности функционирования.

Глава 7

ТЕСТИРОВАНИЕ БИС ЗУ. ПРЕДВЕСТНИКИ ОТКАЗОВ



Рис.7.1. Отрыв шарика от контактной площадки кристалла

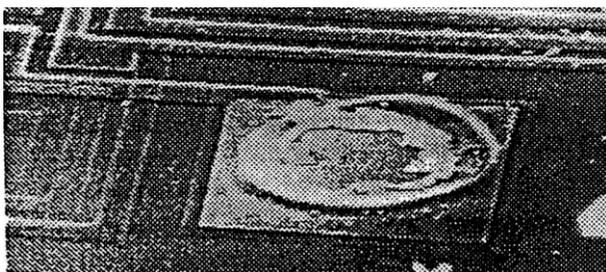


Рис.7.2. Обрыв термокомпрессионного соединения на площадке кристалла

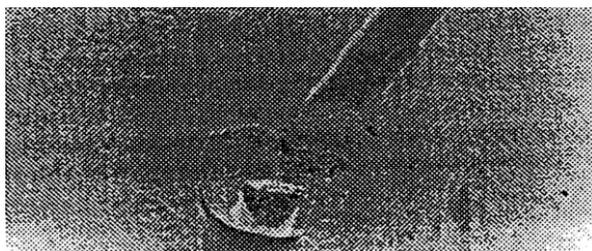


Рис.7.3. Обрыв проволочного соединения

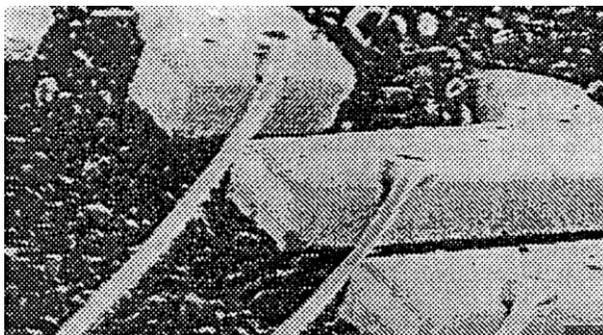


Рис.7.4. Замыкание в проволочном соединении на соседнюю тра-
версу

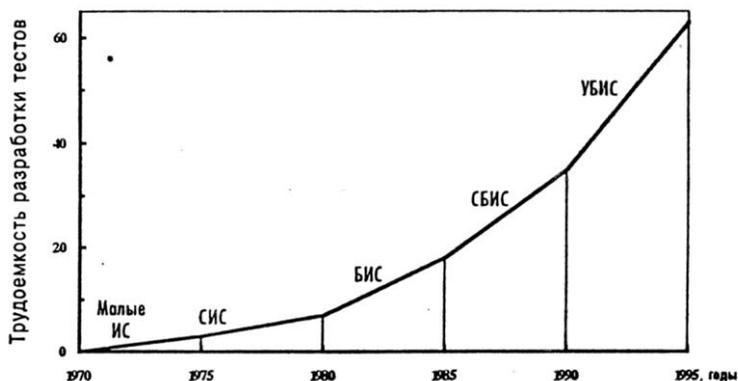


Рис.7.5. Изменение трудоемкости тестирования с увеличением
функциональной сложности ИС

Для обеспечения высокой надежности БИС ЗУ необходима обоснованная информация о предвестниках отказов, данных, свидетельствующих о развивающихся деструктивных процессах в потенциально ненадежных схемах. При этом предполагается, что все деградационные процессы, протекающие в БИС ЗУ, являются информативными, т.е. обнаруживаются вследствие генерации предвестников отказов при диагностировании.

Важно определить способы выявления информации о состоянии диагностируемых БИС ЗУ определенного типа при дестабилизирующих воздействиях и ее дешифрации.

В процессе эксплуатации БИС ЗУ изменение состояния ЭК рассматривается как кинетический процесс, зависящий от свойств кристалла, структуры ЭК, микроприбора и внешних дестабилизирующих воздействиях окружающей среды, в том числе управляющих обрабатываемых сигналов, вызывающих многообразие физических и химических процессов.

Временные изменения некоторых параметров ЭК носят экспоненциальный характер и описываются одинаковыми зависимостями вида

$$A_i = A_{0i} \exp(-t / \tau_0),$$

где A_{0i} - нормирующий множитель, нулевое значение параметра; τ_0 - постоянная времени, отражающая динамику рассматриваемого процесса; t - текущее время.

Аномальные изменения параметров A_i и A_{0i} , τ_0 отражают нарушения в естественном развитии процессов, вызванном воздействием дестабилизирующих факторов и влияют на выходные сигналы. Несогласованность динамических характеристик ЭК и БИС ЗУ и допусков на их изменения может принести к перемежающимся отказам, т.е. сбоям. Поскольку причины, вызывающие сбои и отказы, достаточно устойчивы, их можно выявить посредством соответствующих диагностических тестов «воздействие-реакция», а затем отбраковать ненадежные БИС ЗУ.

Однако достоверные статистические данные о физике отказов и сбоев в РЭА, а также глубокие исследования их причин отсутствуют. Поэтому возможность выявления реальных предвестников сигнатур (указателей) отказов и их практическое использование для прогнозирования надежности практически исключаются. Сигнатуры должны своевременно информировать о начале деградиационного процесса. Характерной особенностью сигнатур является выраженная индивидуальность реакции на внешние воздействия - запись, считывание, «щекотку», вариации формы импульсов и др. Совокупность развивающихся процессов, нарушающих функционирова-

ние ЭК БИС, включает основной (доминирующий) предвестник, приводящий к наиболее вероятному отказу. Поэтому при заданных условиях внешних дестабилизирующих факторов следует учитывать градацию интенсивности развивающихся нарушениях. При построении базы данных необходимо для каждой конкретной БИС ЗУ определять и ранжировать доминирующий вид отказа и характерный для него предвестник-сигнатуру, свидетельствующий о развивающихся в ЭК деструктивных процессах. Набор данных анализируется, что позволяет произвести их экспертную оценку и сформулировать заключение о надежности.

Для принятия соответствующего решения необходимо высокое разрешение в сигнатурах, достаточное для однозначного результата. Следовательно, необходима детальная информация о дестабилизирующих процессах, их внешних проявлениях и возможных коррекциях.

Общепринятые методы испытания БИС не генерируют в этих условиях информативные сигнатуры. Управление испытаниями БИС и физический характер должны соответствовать условиям достижения оптимальных режимов дестабилизирующих факторов, обеспечивающих возникновение и выявление отказов и подходящих условий генерации сигнатур. Поэтому необходимо проанализировать наиболее вероятные состояния нагрузки ЭК, рассматривая их в сочетании с физическими особенностями работы и сопутствующими химическими процессами, определить преобладающие деградационные процессы и их результат - преимущественные виды отказов. Кроме того, следует проанализировать эволюционные особенности явлений сбоя или отказов на всех макро- и микроуровнях структуры БИС ЗУ. Эволюционность деградационных процессов в БИС ЗУ наряду с их нелинейным характером обуславливает многообразие путей развития отказа. Поэтому сложность изучения механизмов отказов ЭК и их предвестников связана с одновременной нелинейностью и эволюционностью явлений.

Цифровые заказные интегральные схемы взаимодействуют с окружающей средой пассивно (при хранении РЭА) и активно (в состоянии функционирования). Это взаимодействие заключается в

потреблении и превращении энергии различных видов. Патология возникает на атомарно-молекулярном уровне вследствие физико-химических превращений.

Основу ЦЗИС составляют:

- градиент концентрации атомов и ионов;
- метастабильное состояние всех ЭК;
- постоянный приток энергии, а также необходимые для функционирования ЭК;
- накопление и перенос зарядов

Таким образом, появляется новая область в МЭ - патология интегральных схем. Современные знания в этой области позволяют сделать некоторые обобщения, сформулировать и построить наиболее вероятные модели деградации свойств ИС и определить информационные сигнатуры возможного развития отказов. Важно выделить наиболее достоверные информативные реакции ИС на внешние возмущения ЭК и схемы в целом и учесть коэффициент эффективности предвестника отказа-сигнатуры. Например, токовый шум, возникающий в дефектном контакте БИС ЗУ, свидетельствует о возникших нарушениях в зоне контакта и является, таким образом, симптомом развивающегося отказа. Тепловому пробую, как правило, предшествуют такие симптомы возможного отказа, как возрастание сопротивления, возникновение в цепях шумов и токов утечки. В области дефектных электрических контактов развивающиеся процессы интенсивного тепловыделения вызывают и приварку и электрическую коррозию. Такие процессы можно обнаружить по токовым шумам. Возрастание тока утечки в цепи свидетельствует о наличии термомеханических напряжений (ТМН), способствующих образованию микротрещин. Токовый шум является достоверной сигнатурой отказа и его физическая природа определяется рядом деградационных эффектов, в том числе тоннелированием электронов, автоэлектронной эмиссией и другими процессами, которые активируются термомеханическими эффектами.

В температурных полях размножаются микротрещины, которые ускоряют коррозионные процессы в зоне электрических контактов. Так, А1 шины при 106 термоциклов с перепадом 45 - 200°C обнаруживают изменение $\Delta R/R \sim 40\%$, несмотря на то, что усталостные микротрещины не обнаруживаются. Если при тепловых испытаниях тестовых резистивных элементов (металлических объектов) сопротивление $R_{\text{эксп}}$ отклоняется от теоретического $R_{\text{теор}} = R_0 (1 + \alpha t)$ в слоях металла появляются микротрещины или ТМН. Это и есть предвестники отказов.

Физическая идентификация сигнатур отказов связана также с возможностью образования ложных, не предусмотренных на стадии проектирования ИС электронных компонент. Важен переход от выходных информационных сигналов к дефектам, возникающим и развивающимся в ИС и определение посредством экспертных знаний дальнейшего поведения микросхемы. На этой стадии важна достоверность предсказания развития деградиационных процессов. Следует различать его природу и характер. Кристалл может получать энергию как от внешнего источника в результате общего воздействия на микросхему, так и вследствие локального воздействия и локальной ее аккумуляции - инкубационный период развития деградиационного процесса. При построении базы знаний необходимы энергетический анализ развивающихся дефектов и выделение первичных, основополагающих процессов и вторичных, являющихся следствием первых.

Расшифровка сигнатур отказов - неотъемлемая часть процедуры испытаний БИС с конкретизацией их структуры и состава ЭК-объектов анализа. Для этого на кристалле формируются структуры диагностического тестирования (СДТ). Испытания ЦЗИС осуществляются при действии дестабилизирующих факторов. СДТ предназначены для распознавания дефектов кристаллов и литографии, герметизации и коммутации, определения параметров ЭК, основополагающих для экспертной оценки качества ИС.

Процедура диагностирования ИС представляет собой обращение к ИС посредством упорядоченной последовательности

тестов, направленных на диагностирования конкретных функциональных элементов.

Каждый тест предназначен для определенной функции ИС. Порядок следования тестов должен наиболее полно характеризовать состояние элементов и их взаимосвязь в ИС. Трудоемкость построения тестов диагностирования ИС определяется ее размерностью, представляемой моделью - логической сетью (одномерной, двухмерной и трехмерной).

В зависимости от функциональной сложности ИС, ее принципиальной схемы создается соответствующая тестовая последовательность. При этом стоимость разработки тестов существенно возрастает с увеличением функциональной сложности ИС (рис.7.5.).

Системы управления надежным функционированием БИС ЗУ и выявления потенциально ненадежных элементов необходимо создавать последовательно на стадиях проектирования, производства и испытания ИС.

Глава 8

МАТЕРИАЛЫ ИС



Полупроводниковые материалы, полупроводники, применяемые для изготовления электронных приборов и устройств. В полупроводниковой электронике используют главным образом кристаллические П. м. Большинство из них имеет кристаллическую структуру с тетраэдрической координацией атомов, характерной для структуры алмаза.

Значительную роль в развитии полупроводниковой техники сыграл селен: селеновые выпрямители долгое время оставались основными полупроводниковыми приборами, получившими массовое применение.

В начале 70-х гг. 20 в. наиболее распространённые П. м. — кремний и германий. Обычно их изготавливают в виде массивных монокристаллов, легированных различными примесями. Легированные монокристаллы Si с удельным сопротивлением 10³—10⁴

омхсм получают преимущественно методом вытягивания из расплава (по Чохральскому), а легированные монокристаллы Ge с удельным сопротивлением 0,1—45 омхсм получают, кроме того, зонной плавкой. Как правило, примесные атомы V группы периодической системы (P, As и Sb) сообщают кремнию и германию электронную проводимость, а примесные атомы III группы (B, Al, Ga, In) — дырочную. Si и Ge обычно используют для изготовления полупроводниковых диодов, транзисторов, интегральных микросхем и т.д.

Большую группу П. м. составляют химические соединения типа AIII BV (элементов III группы с элементами V группы) — арсениды, фосфиды, антимониды, нитриды (GaAs, InAs, GaP, InP, InSb, AlN, BN и др.). Их получают различными методами изготовления монокристаллов как из жидкой, так и из газовой фазы. Синтез и выращивание монокристаллов обычно производят в замкнутых сосудах из высокотемпературных химически инертных материалов, обладающих высокой прочностью, поскольку давление насыщенного пара над расплавом таких элементов, как P и As, сравнительно велико. Примеси элементов II группы придают этим П. м., как правило, дырочную проводимость, а элементов IV группы — электронную. П. м. этой группы используют в основном в полупроводниковых лазерах, светоизлучающих диодах, Ганна диодах, фотоэлектронных умножителях, в качестве плёночных детекторов излучения в рентгеновской, видимой и инфракрасной областях спектра электромагнитных волн.

Таблица некоторых физических свойств важнейших полупроводниковых материалов

Элемент, тип соедине- ния	Наименование материала	Ширина запрещенной зоны, $e\phi$		Подвижность носителей заряда, 300 К, $см^2/(e \times сек)$		Кристал- лическая структура	Постоян- ная решётки, Å	Темпера- тура плавле- ния, °С	Упругость пара при темпера- туре плавле- ния, $атм$
		при 300 К	при 0 К	элек- троны	дырки				
Элемент	C (алмаз)	5,47	5,51	1800	1600	алмаз	3,56679	4027	10^{-9}
	Ge	0,803	0,89	3900	1900	типа алмаза	5,65748	937	
	Si	1,12	1,16	1500	600	»	5,43086	1420	10^{-6}
	α -Sn		-0,08			»	6,4892		
IV—IV	α -SiC	3	3,1	400	50	типа сфалерита	4,358	3100	
III—V	AlSb	1,63	1,75	200	420	типа сфалерита	6,1355	1050	<0,02
	BP	6				»	4,538	>1300	>24
	GaN	3,5				типа вюртцита	3,186 (по оси a) 5,176 (по оси c)	>1700	>200
	GaSb	0,67	0,80	4000	1400	типа сфалерита	6,0955	706	$<4 \times 10^{-4}$
	GaAs	1,43	1,52	8500	400	то же	5,6534	1239	1
	GaP	2,24	2,40	110	75	»	5,4505	1467	35
	InSb	0,16	0,26	78000	750	»	6,4788	525	$<4 \times 10^{-5}$
	InAs	0,33	0,46	33000	460	»	6,0585	943	0,33
	InP	1,29	1,34	4600	150	»	5,8688	1060	25
II—VI	CdS	2,42	2,56	300	50	типа вюртцита	4,16 (по оси a) 6,756 (по оси c)	1750	
	CdSe	1,7	1,85	800		типа сфалерита	6,05	1258	
	ZnO	3,2		200		кубич.	4,58	1975	
	ZnS	3,6	3,7	165		типа вюртцита	3,82 (по оси a) 6,26 (по оси c)	1700	
IV—VI	PbS	0,41	0,34	600	700	кубич.	5,935	1103	
	PbTe	0,32	0,24	6000	4000	то же	6,460	917	

П. м. типа AIIIVI из которых наиболее широко применяют соединения ZnO, ZnS, CdS, CdSe, ZnSe, HgSe, CdTe, ZnTe, HgTe, получают преимущественно с помощью химических реакций в газовой фазе или сплавлением компонентов. Удельное сопротивление и тип проводимости этих П. м. определяются не столько легирующими примесями, сколько характерными для них структурными де-

фектами, связанными с отклонением их состава от стехиометрического. Использование П. м. этого типа связано главным образом с их оптическими свойствами и фоточувствительностью. Поэтому их применяют в фоторезисторах, фотоэлементах, электроннолучевых приборах и приборах ночного видения, модуляторах оптического излучения и т.д.

К П. м. относят также некоторые аморфные стеклообразные халькогенидные системы, например сплавы P, As, Sb, Bi с Ge, S, Se, Te, и оксидные системы, например $V_2O_5 - P_2O_5 - R_xO_y$, где R — металлы I — IV групп, x — число атомов металла и y — число атомов кислорода в окисле. Их используют главным образом в качестве оптических покрытий в приборостроении.

П. м. в широких пределах изменяют свои свойства с изменением температуры, а также под влиянием электрических и магнитных полей, механических напряжений, облучения и др. воздействий. Этим пользуются для создания различного рода *датчиков*.

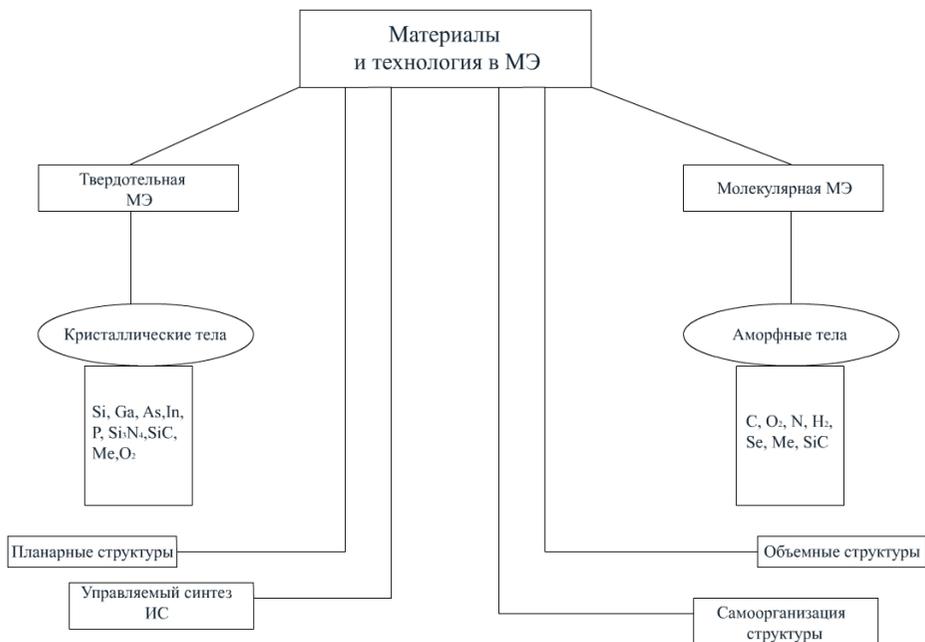
П. м. характеризуются следующими основными параметрами: удельным сопротивлением, типом проводимости, шириной запрещенной зоны, концентрацией носителей заряда и их подвижностью, эффективной массой и временем жизни. Ряд характеристик П. м., например ширина запрещенной зоны и эффективная масса носителей, относительно слабо зависят от концентрации химических примесей и степени совершенства кристаллической решётки. Но многие параметры практически полностью определяются концентрацией и природой химических примесей и структурных дефектов. Некоторые физические свойства важнейших П. м. приведены в таблице.

В электронных приборах П. м. используют как в виде объёмных монокристаллов, так и в виде тонких моно- и поликристаллических слоев (толщиной от долей мкм до нескольких сотен мкм), нанесённых на различные, например изолирующие или полупроводниковые, подложки. В таких устройствах П. м. должны обладать определёнными электрофизическими свойствами, стабильными во времени и устойчивыми к воздействиям среды во время эксплуатации. Большое значение имеют однородность свойств П.

м. в пределах монокристалла или слоя, а также степень совершенства их кристаллической структуры (плотность дислокаций, концентрация точечных дефектов и др.).

В связи с высокими требованиями к чистоте и совершенству структуры П. м. технология их производства весьма сложна и требует высокой стабильности технологических режимов (постоянства температуры, расхода газовой смеси, продолжительности процесса и т.д.) и соблюдения специальных условий, в частности т. н. полупроводниковой чистоты аппаратуры и помещений (не более 4 пылинок размером свыше 0,5 мкм в 1 л воздуха). Продолжительность процесса выращивания монокристаллов в зависимости от их размеров и вида П. м. составляет от нескольких десятков мин до нескольких суток. При обработке П. м. в промышленных условиях используют процессы резания П. м. алмазным инструментом, шлифовки и полировки их поверхности абразивами, термической обработки, травления щелочами и кислотами.

Контроль качества П. м. весьма сложен и разнообразен и выполняется с помощью специализированной аппаратуры. Основные контролируемые параметры П. м.: химический состав, тип проводимости, удельное сопротивление, время жизни носителей, их подвижность и уровень легирования. Для анализа состава П. м. обычно пользуются оптическими, спектральными, массспектроскопическими и активационными методами. Электрофизические характеристики измеряют т. н. зондовыми методами или используют эффект Холла. Совершенство структуры монокристаллов исследуют методами рентгеноструктурного анализа и оптической микроскопии. Толщину слоев измеряют либо бесконтактными оптическими методами, либо методами сошлифовки слоя.



Глава 9

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРОИЗВОДСТВА БИС

9.1 ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК.

1. Термическое вакуумное напыление.

Получение тонких пленок является одной из основных задач технологии изготовления микросхем, а метод термического вакуумного напыления (ТВН) — один из самых распространенных. Он известен с 1857 г. благодаря экспериментам М.Фарадея с взрывающимися проволочками и состоит из следующих основных этапов: нагрев в вакууме наносимого вещества до температуры испарения, транспортирования парогазового облака через вакуум от испарителя до подложки и конденсации пара на поверхности подложки.

Существуют различные режимы роста тонких пленок:

- Островковый режим, или режим Фольмера-Вебера, реализуется в случае, когда атомы осаждаемого вещества связаны между собой сильнее, чем с подложкой. В островковом режиме маленькие зародыши образуются прямо на поверхности подложки и затем растут, превращаясь в большие островки конденсированной фазы. Затем, сливаясь, они образуют островки все большего размера и после стадии заполнения каналов образуют сплошную пленку
- Послойный режим, или режим Франка- Ван-дер-Мерве, реализуются в противоположном случае, когда атомы осаждаемого вещества связаны с подложкой более strongly, чем друг с другом. Моноатомные слои заполняются в этом

режиме по очереди, т.е. двухмерные зародыши(толщиной в 1 атом) следующего слоя образуется в верхней части зародышей предыдущего слоя после его заполнения

- В промежуточном режиме, или режиме Странского — Крастанова, сначала реализуется послойный рост, затем, после заполнения одного-двух слоев начинается островковый режим роста [14]

Недостатки метода ТВН:

- большой расход материала — конденсат осаждается не только на подложке, но и по всему объему камеры, что приводит еще и к необходимости регулярно чистить ее и дополнительно обезгаживать;
- невысокое качество получаемых пленок, наличие загрязнений и примесей, структурных неоднородностей ;
- неравномерность получаемых пленок по толщине;
- невозможность распыления тугоплавких материалов, сплавов;
- невозможность распыления химических соединений;
- низкая адгезия получаемых пленок

2. Ионное(катодное) распыление

Энергия атомов, доставляемых к подложке при методе ТВН незначительны, что приводит к плохой адгезии. Улучшить адгезию можно путем увеличения энергии атомов, приходящих к подложке. Самый перспективный путь — перевод нейтральных атомов в ионизированное состояние и использование энергии электрического поля, а не градиента концентрации. Таким методом является ионное(катодное) распыление. В основе этого метода лежит электрический газовый разряд — совокупность явлений, происходящих в газе или парах ртути при прохождении через них электрического тока.

К преимуществам метода следует отнести небольшой расход материала, т. к. распыляемый материал катода осаждается

только на подложке, а не во всем объеме камеры, как при методе ТВН. [14]

Недостатки метода:

- невозможность прямого нанесения диэлектрических пленок, т. к. расплавленный катод должен быть проводящим. Это ограничение устраняется при использовании реактивного ионного распыления, которого заключается в добавлении к инертному рабочему газу небольшого количества активного газа, образующего химические соединения с атомами распыленного материала катода;
- наличие загрязнений из-за невысокого вакуума и контакта рабочей среды с подложкой;
- эрозия и разрушение катода вследствие его распыления.
- Ионно-плазменное распыление

Для уменьшения загрязнений необходимо уменьшать давления рабочего газа в камере, но при этом будет уменьшаться число ионизирующих столкновений электронов с атомами и уменьшаться плотность ионов в разряде. Это можно компенсировать введением дополнительного источника электронов и превышения разряда в несамостоятельный. Наиболее простой способ применения источника термоэлектронной эмиссии, при этом разряд обеспечивается даже в высоком вакууме. Если к рабочему инертному газу добавить кислород и бомбардировать поверхность металлической пленки, находящейся под положительным потенциалом, то отрицательные ионы кислорода будут окислять металлическую пленку. Этот процесс называется *анодированием*. С его помощью получают самые высококачественные пленки металлических окислов. По мере роста окисной пленки ток в цепи анода уменьшается, что вызывает необходимость повышения питающего напряжения, и процесс анодирования протекает при более высокой напряженности поля в окисной пленке, что повышает ее электрическую прочность.

Существенным достоинством ионного напыления является возможность получения пленок стехиометрического состава из сплавов и сложных химических соединений, а также высокая адгезия пленок к подложкам. Недостатком считаются относительно низкие скорости нанесения пленок, находящиеся в интервале 5... 300 нм/мин. Если в установке используется не высококлассное вакуумное оборудование, а, в частности, откачные системы на силиконовом масле, то пары масла, попадая в рабочую камеру, под воздействием плазмы и высокочастотного поля образуют радикалы. Эти радикалы, оседая на поверхность подложки, очень сильно ее загрязняют. Это приводит к необходимости использования так называемой безмасляной откачки. Стремление интенсифицировать процесс получения пленок; сохранить стехиометрический состав исходных материалов, осажденных в виде пленок; повысить чистоту пленок и адгезию их к подложкам привело к применению в субмикронной технологии импульсных плазменных ускорителей (ИПУ). В ИПУ плазма создается в парах распыляемого материала, испаряемого и ионизируемого любым способом, например в дуговом разряде. Испарение материала происходит, как взрыв в вакууме. При длительности импульса порядка долей секунды материал поверхности распыляемого вещества в месте образования дуги превращается в пар высокой плотности с температурой порядка 10^5 К. Такое испарение является уникальным по скорости и энергии частиц и поэтому представляет особый интерес для получения пленок с высокой адгезией при большой производительности процесса. [14]

Преимущества метода ионно-плазменного распыления:

- большая площадь распыляемой пластины материала — мишени, выполняющей функции источника атомов осаждаемого вещества, позволяет получить равномерные по толщине пленки на подложках больших размеров, что обеспечивает эффективную реализацию группового метода обработки;
- мишень представляет собой длительно не заменяемый источник материала (при толщине пластины 3 мм смена производится один раз в месяц при двухсменной работе), что облегчает автоматизацию, повышает однородность процесса;
- обеспечивается высокая адгезия пленки к подложке благодаря большой энергии конденсирующихся атомов;

- получение пленок из тугоплавких металлов протекает без перегрева вакуумной камеры;
- возможно получение окисных, нитридных и других пленок, в том числе легированных, в результате химических реакций атомов распыляемого металла с вводимыми в камеру газами;
- возможность проведения окисления плазменным анодированием;
- возможность получения органических пленок;
- потери материала минимизированы, так как весь процесс происходит в геометрическом промежутке мишень—подложка, исключая объем камеры, как это имеет место при методе ТВН

3. Эпитаксия из газовой фазы

Ориентированной кристаллизацией, или эпитаксией (упорядочением), называется процесс роста слоев, решетка которых определенным образом ориентирована относительно исходного кристалла-подложки. Материал подложки в процессе выращивания играет роль затравочного кристалла, на котором и происходит рост уже соответствующим образом ориентированной пленки, причем ее рост осуществляется при температурах, меньших температуры плавления. Этого добиваются путем осаждения требуемого материала из парогазовой смеси. Если материалы подложки и растущего слоя идентичны, то процесс называется *автоэпитаксиальным, или гомоэпитаксиальным*] если материалы слоя и подложки различаются, то процесс называется *гетероэпитаксиальным* (но и в этом случае кристаллическая структура слоя и подложки должны быть сходными). Однако подложка и выращиваемый слой могут иметь различные типы проводимости, т.е. служить основой для создания *pn*—структур.

Для легирования, как упоминалось ранее, используются гидриды примесных элементов, которые устойчивы в водородной среде, что и заставляет использовать этот малопривлекательный газ. Скорость роста пограничного слоя влияет на количество встраиваемой в эпитаксиальный слой примеси. При низких скоростях роста между твердой и газообразной фазами устанавливается равновесие, которого невозможно достичь при высоких скоростях роста.

К сожалению, кроме специально вводимой из газовой фазы примеси в эпитаксиальный слой внедряются и неконтролируемые примеси из подложки за счет твердотельной диффузии через гра-

ницу слой — подложка, а также за счет испарения и переноса через газовую фазу — это явление получило название *автолегирования*. [14]

4. Жидкостная эпитаксия

Поскольку для получения сложных структур метод газовой эпитаксии не вполне пригоден, для этих целей применяют жидкостную эпитаксию, которая по сути является тем же самым методом Чохральского. Подложка находится в термодинамическом равновесии с раствором (расплавом), и процесс наращивания происходит вследствие перенасыщения при уменьшении температуры. Затравка изготовленная из монокристалла, помещается в тигель с расплавом. Специальный механизм обеспечивает прецизионное перемещение затравки по нормали к зеркалу расплава. Охлаждающая жидкость (вода) поступает в холодильник и обеспечивает требуемую температуру затравки. При соприкосновении затравки с зеркалом расплава за счет сил поверхностного натяжения образуется мениск, который не дает оторваться жидкости от поверхности затравки при движении вверх, которое надо осуществлять очень медленно и осторожно. Тогда за счет охлаждения границы затравка—расплав на поверхности затравки инициируется процесс кристаллизации жидкости. Нагрев всей системы осуществляют обычно индукционным методом в печи, которая служит также для снятия возникающих напряжений в эпитаксиальной пленке, поскольку затравка проходит через печь и отжигается.

5. Молекулярно-лучевая эпитаксия

При газофазной и жидкостной эпитаксии выращиваемая пленка все время находится в контакте со средой-носителем, поэтому возможно неконтролируемое загрязнение пленки. Идеальной средой с этой точки зрения является высокий вакуум. Поэтому для выращивания особо чистых пленок применяется метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), использующий конденсацию молекулярных пучков в сверхвысоком вакууме. В методе МЛЭ испаряемое вещество движется к подложке в режиме свободного молекулярного потока. [14]

Преимущества метода молекулярно-лучевой эпитаксии:

- низкие скорости роста (примерно 1 мкм/ч) позволяют изменять состав и концентрацию легирующих примесей в пределах одного монослоя и с прецизионной точностью контролировать толщину слоев;
- довольно низкие, по сравнению с другими методами выращивания, температуры роста (например, 550...650°C для GaAs), что позволяет минимизировать взаимную диффузию примесей и компонентов соединений между слоями;
- результатом процесса является совершенная морфология поверхности выращенных слоев, которая дает возможность получения сверхрешетки и гетероструктуры с резкими границами;
- высокая однородность толщины слоя по площади образца (обычно разброс составляет около 1 % на площади диаметром 5 см), которая достигается вращением подложки в процессе роста;
- возможность управления атомными и молекулярными потоками в процессе роста посредством переключения заслонок, которая позволяет добиться резких профилей распределения компонентов состава и легирующих примесей;
- высокая воспроизводимость режимов, которая обеспечивается возможностью управления процессом роста *in situ* и использования эффузионных ячеек большой емкости;
- совместимость с другими процессами полупроводниковой технологии, такими как ионно-лучевое травление, ионная имплантация, распыление и травление в газовом разряде, электронная и рентгеновская литография;
- возможность использования различных диагностических методик для исследования химических и структурных свойств эпитаксиальных пленок

6. Применение ионных пучков для выращивания тонких аморфных пленок

Одним из способов формирования аморфных структур является применение ионных пучков с энергией порядка 100 эВ и более. Такие ионы могут создавать любые структурные связи, пробирая химические барьеры.

Аморфное вещество любого состава может быть получено из ускоренных ионных пучков, если возникающая структура достаточно устойчива при температуре подложки. Необходимо также предотвратить последующую за процессом осаждения медленную перестройку образовавшейся структуры, зафиксировать аморфное состояние. АПУ— это не одно вещество, а целое множество структур на основе углерода. Благодаря своей аморфной структуре АПУ позволяет формировать однородные, гладкие и беспористые пленки толщиной от 10 нм. Синтез истинно алмазных пленок требует относительно высоких температур (выше 800 °С) и предъявляет специальные требования к подложкам, в то время как синтез алмазоподобных пленок (АПП) производится при комнатной температуре и практически на любую поверхность. Развитием технологии АПП является технология алмазоподобных нанокompозитов (АПН), или diamond — like nanocomposites (DLN). АПН пленки можно наносить на самые различные материалы — от металлов до пластмасс и биополимеров. Они могут защищать интегральные микросхемы от воздействия плазмы, температуры, заряженных частиц; осуществлять механическую и химическую защиту солнечных батарей, аккумуляторов, различных датчиков, телевизионной техники, жестких магнитных дисков и т.д.

7. Золь-гель-технологии и их применение для выращивания тонких пленок

7.1. Коллоидное состояние вещества. Дисперсные системы.

Золь-гель-технологии являются неким синтезом последних достижений нанотехнологии и коллоидной химии. Их суть заключается в получении в активной среде (растворе или расплаве, содержащем растворитель и некую связующую субстанцию) крайне мелкодисперсной (до единиц нанометров размером) взвеси наносимого материала, нанесении этой взвеси на поверхность подложки и удалении растворителя и связующей субстанции. В результате на поверхности подложки остается тонкая пленка наносимого вещества, имеющая совершенно необычную структуру и обладающая особыми свойствами.

7.2. Физический и химический гель. Их получение

Золь-гель технология подразделяется на две группы принципиально разных способов: получение химического геля (гидролиз и поликонденсация алкооксидов) и физического геля (гелирование неорганических зольей). Технология физического геля заключается в приготовлении гомогенного водного раствора солей металлов или неметаллов, из которого методом гидролиза получают аква-, гидроксо- и оксо-комплексы. Эти комплексы переводят затем в гомогенный коллоидный золь, из которого получают некристаллический гель и аналогично ксерогель.

Получение химического геля. Состав алкоксидов выражается общей формулой $M(OR)_Z$, где M — Si, Al, Ti, Sn, Zr и т.д.; R — алкильная группа (например, CH_3 , C_2H_5 , C_3H_7); Z — степень окисления элемента M. Алкоксиды многих элементов — жидкости при комнатной температуре, например широко используемый в полупроводниковой технологии тетраэтоксисилан.

7.3. Мицеллярная теория строения коллоидных растворов

Для понимания природы образования геля обратимся к общепринятой мицеллярной теории строения коллоидных растворов, в соответствии с которой золь состоит из двух частей: мицелл и интермицеллярной жидкости. *Мицеллой* называется структурная коллоидная единица, представляющая собой частицу дисперсной фазы, окруженную двойным электрическим слоем. *Интермицеллярной* (т.е. межмицеллярной) *жидкостью* называется дисперсионная среда, разделяющая мицеллы и являющаяся раствором электролитов, неэлектролитов, поверхностно-активных веществ и прочих компонентов. [14]

7.4. Физическая теория устойчивости коллоидных систем

Физическая теория устойчивости коллоидных систем была разработана Б.В.Дерягиным и Л.Д.Ландау (1937 г.) и Э.Фервеем и Я.Овербеком (1941 г.) и называется ДЛФО (по первым буквам их фамилий). Согласно этой теории между любыми частицами при их сближении возникает так называемое расклинивающее давление разделяющей жидкой прослойки.

7.5. Методы получения золей

При получении золей могут быть использованы различные типы химических реакций (восстановления, окисления, двойного обмена, гидролиза); методы физической конденсации (путем замены растворителя или при пропускании паров какого-либо вещества в жидкости), а также электрические методы (метод Бранд-та — распыление металлов в вольтовой дуге под водой или в органической жидкости; метод Сведберга — распыление в высокочастотном разряде).

Эффективный способ получения золей из молекулярных пучков был разработан С.З. Рогинским и А. И. Шальниковым. Сущность метода заключается в совместном испарении в вакууме диспергируемого вещества и растворителя. Смешанные пары конденсируются и замораживаются, после чего смесь размораживают и собирают в специальную емкость. Этим способом были получены труднодоступные золи многих веществ. Метод обеспечивает высокую чистоту получаемых золей. [14]

7.6. Превращение золя в гель

Как отмечалось ранее, при образовании геля первичные частицы формируют пространственную сетку, в которой иммобилизована жидкая фаза. Другими словами, гель представляет собой многофазную систему (как минимум, двухфазную), построенную из частиц очень малых размеров. Такая система имеет большую поверхность раздела фаз, избыток энергии Гиббса, вследствие чего она термодинамически неустойчива. Склонность гелей к упорядочению проявляется уже в процессе их старения. [14]

9.2 ЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ И ПЕРЕНОСА ИЗОБРАЖЕНИЯ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛИТОГРАФИЧЕСКИХ МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ И ПЕРЕНОСА ИЗОБРАЖЕНИЯ

1. ПОНЯТИЕ ЛИТОГРАФИИ

Процесс создания или переноса геометрического рисунка (топологии) на поверхность подложки называется *литографией* (от *гр.* lithos — камень).

2. ФОТОЛИТОГРАФИЯ.

Литография,использующая в качестве активного излучения электромагнитные волны видимой, ультрафиолетовой и дальней ультрафиолетовой области, называется фотолитография.

3. РЕНТГЕНОВСКАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Основу рентгеновской литографии составляют принципы контактной и бесконтактной печати, так как до последнего времени считалось невозможным создание рентгеновских оптических систем вследствие отсутствия материалов, в которых рентгеновские лучи испытывали бы преломление или отражение.

4. ЭЛЕКТРОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Проекционная электронолитография (ЭЛГ) основана на экспонировании изображения электроношаблона больших размеров и является аналогом фото- и рентгенолитографии. Используется широкий расфокусированный пучок электронов с диаметром, большим диаметра подложки, и П-образным распределением плотности тока по сечению пучка.

5. СКАНИРУЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ЛИТОГРАФИЯ

Для непосредственного создания рисунка на шаблоне или подложке используются сканирующие системы, управляемые ЭВМ, которая задает программу перемещения остросфокусированного пучка электронов по поверхности подложки, управляет электронно-оптической системой формирования и настройки луча и обеспечивает прецизионное совмещение фрагментов изображения сечения пучка. [14]

6. ПРОЦЕССЫ ТРАВЛЕНИЯ В МИКРОТЕХНОЛОГИИ

Создание резистного изображения на подложке не является самоцелью (за исключением вскрытия окон под диффузию, ионного легирования или окисления) — необходимо перенести изоб-

ражение на находящуюся под резистом пленку или подложку. Применение химического травления вследствие изотропного характера для субмикронной технологии исключено. Необходимы прецизионные анизотропные методы удаления материала. Основным методом становится сухое травление, которое подразделяется на ионно-плазменное, ионно-лучевое травление (фрезерование), и реактивные методы, основанные на применении химических реакций, протекающих в плазменной среде. Часто под плазменным травлением подразумевают чисто химические реакции с применением плазмы в качестве катализатора. [14]

9.3 МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И ОБЪЕМНЫХ СТРУКТУР

1. ДИФфуЗИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУРАХ

В основе большинства элементов микроэлектронной полупроводниковой техники лежит рп-переход, что приводит к необходимости создания в материале подложки области с различными типами проводимости. Это можно делать сразу же при выращивании поверхностной пленки путем ее легирования соответствующими примесями, но технологически более выгодно изменять существующий тип проводимости путем контролируемого и управляемого введения соответствующих примесей в нужные области. Самым простым способом является термическая диффузия примесей (ТДП), впервые примененная В.Пфанном в 1952 г. Эмпирическая теория приписывает диффузии (переносу атомов вещества, обусловленному их хаотическим тепловым движением в направлении уменьшения концентрации) три возможных механизма ее осуществления: взаимный обмен местами из одного равновесного положения в другое; движение по вакансиям; движение по межузлиям. [14]

2. ЛАЗЕРНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ

Под лазерным легированием понимают любое введение примеси, происходящее под воздействием лазерного излучения. Привлекательность технологических приемов легирования с использованием лазерного излучения обусловлена принципиальной возможностью осуществления быстрого нагрева выбранного ло-

кального участка образца и относительной простотой регулировкой температуры. Одновременная реализация этих возможностей сопровождается многочисленными трудностями, что приводит к многообразию реализуемых технических решений. [14]

3. ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ ИЛИ ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ

3.1. Схема ионного легирования

Процесс термической диффузии протекает под действием градиента концентрации, что неэффективно и нетехнологично, поэтому в начале 1960-х гг. были предприняты попытки использования для эффективного введения примесей энергии электрического поля. Процесс внедрения в подложку ионизированных атомов с энергией, достаточной для проникновения их в приповерхностные области подложки, получил название ионного легирования (ИЛ), ионного внедрения, или ионной имплантации.

При ионном внедрении энергия, необходимая для проникновения примеси в глубь кристалла, сообщается электрическим полем напряжением сотни киловольт и даже единицы мегавольт. Легирующую примесь предварительно ионизируют, а температуру подложки поддерживают на уровне комнатной; содержание внедренных атомов примеси определяется не физическими свойствами подложки (как при диффузии), а условиями внедрения ионов.

Основным преимуществом технологии ионной имплантации является возможность точного управления количеством внедренных атомов примеси. [14]

3.2 Теория ионного легирования Линдхардта — Шарфа — Шиотта

Для расчета параметров процесса разработано несколько моделей, наиболее точной из которых является модель Линдхардта— Шарфа —Шиотта (ЛШШ). В ее основу положены **следующие физические допущения и предположения.**

- Вещество, с которым взаимодействует ускоренный ион, является однородным и изотропным, а атомы в нем расположены хаотично (т.е. мишень аморфная).

- Упругие и неупругие взаимодействия происходят независимо друг от друга, а потери рассматриваются на основе статистической модели атома Томаса — Ферми.
- Упругие взаимодействия можно рассматривать как парные, не учитывая изменения состояния внешних электронов в твердом теле и зарядовое состояние иона.
- Потери в каждом акте взаимодействия намного меньше, чем энергия иона (это позволяет использовать статистический подход к рассмотрению пробегов и упрощает вычисления).

4. ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ

4.1. Лазерный отжиг

При обычных концентрациях легирующих примесей в полупроводнике и применении метода ИЛ возникающие под действием ионного потока дефекты и нарушения структуры могут вызвать (и вызывают) переход имплантированного слоя в аморфное состояние, а многие ионы примеси попадают не в вакансии решетки и вследствие этого не вносят вклада в электропроводность. Эти повреждения частично или полностью устраняются обыкновенным термическим отжигом, т.е. нагревом всей полупроводниковой подложки в регулируемой атмосфере в печи.

Процесс термического отжига характеризуется релаксацией структуры. Многие недостатки термического отжига позволяет устранить лазерный отжиг, позволяющий локально обрабатывать только участки с имплантированным слоем. [14]

4.2. Электронно-лучевой отжиг

С точки зрения разрешающей способности и возможностей управления и автоматизации электронные и ионные пучки имеют преимущества по сравнению с лазерными пучками, но требуют высокого вакуума. Возможность проведения лазерного отжига вне вакуумной среды ставит его на первое место.

Тем не менее электронный луч имеет неоспоримое преимущество с точки зрения мощности энергозатрат и с точки зрения удобства управления и автоматизации процесса.

5. ИОННО-ЛУЧЕВОЕ И ЛАЗЕРНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ

Одними из новых технологических методов изменения структуры исходного материала, находящими все большее применение, являются методы ионно-лучевого (ИЛП) и лазерного перемешивания (ЛП), использующие с целью модификации структуры в многокомпонентных тонкопленочных образцах и в ионно-легированных структурах высокоэнергетические тяжелые ионы и излучение импульсного лазера. Эти технологические методы приводят к самым разнообразным изменениям в веществе, которых невозможно достичь с помощью обычных равновесных технологических процессов. [14]

9.4 МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ И МЕТРОЛОГИИ В МИКРО-ЭЛЕКТРОНИКИ

1. ПРОСВЕЧИВАЮЩАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

Просвечивающая электронная микроскопия является одним из самых высокоразрешающих методов исследования поверхности и морфологии, в том числе и СБИС, обеспечивающим разрешение порядка 0,2 нм. Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ) является аналогом сложного оптического микроскопа.

В просвечивающем электронном микроскопе однородный моноэнергетический пучок электронов проходит через систему конденсорных линз, с помощью которых осуществляются регулировка и контроль размера и угла расхождения пучка. Затем пучок попадает на исследуемый образец и проходит сквозь него, поэтому толщина образца должна быть настолько мала, чтобы практически все электроны прошли через него. Существует эмпирическое правило, согласно которому толщина образца не должна превышать более чем в 10 раз величину разрешающей способности. Для получения сверхвысокого разрешения это правило уже не действует.

Вследствие этого образец готовят в виде фольги или тонкой пленки, называемой репликой. С обратной стороны образца система объективных линз создает и формирует изображе-

ние плоскости образца, передающее структурные и морфологические особенности реплики. За объективом расположена проекционная система, которая отображает на флуоресцентном экране, фотопластинке или современном устройстве отображения информации и перевода его в цифровую форму (типа матрицы ПЗС) увеличенное изображение образца. Энергия применяемых электронных пучков находится в диапазоне 60-500 кэВ, хотя имеются уникальные приборы, использующие энергии свыше 1 МэВ (это позволяет использовать более толстые образцы).

2. РАСТРОВАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

2.1. Физические и технические основы работы растровых электронных микроскопов

Метрологическим и технологическим инструментом (зондом), имеющим самые минимальные размеры, является остросфокусированный и максимально сжатый пучок заряженных частиц — электронов или ионов. Применение электронов наиболее предпочтительно. Поскольку масса электронов мала, их применение не вызывает в исследуемом объекте физико-химических или структурных изменений, т.е. применение электронных зондов в качестве исследовательского инструмента является неразрушающим методом контроля, естественно, при определенных параметрах энергии и тока пучка.

В случае режима растрового сканирования электронный луч отклоняется с помощью отклоняющих систем (ОС) так, что сфокусированное на поверхности объекта пятно описывает на образце ряд параллельных линий, отстоящих друг от друга на ширину, равную диаметру пятна. Длина линий, размеры пятна, скорость развертки и число линий могут меняться в широких пределах. Для измерения интенсивности излучений, инициируемых электронным зондом в твердом теле, применяются детекторы с широким углом захвата.

Интенсивность свечения видеоконтрольного устройства (ВКУ) на основе синхронной электронно-лучевой трубки модулируется сигналом с детектора, формируя видимое изображение объекта.

2.2. Контраст в РЭМ и его разновидности

Определим изменения в сигнале как контраст

$$C = \Delta S / S_{\text{УСР}},$$

где ΔS — изменение сигнала между двумя любыми точками на изображении; $S_{\text{УСР}}$ — усредненный сигнал.

Если в двух точках сигналы различны по величине, то существует контрастность изображения между этими двумя точками и мерой контраста является величина $C = (S_1 - S_2) / S_{\text{УСР}} = \Delta S / S_{\text{УСР}}$.

Существует два различных метода формирования контраста. В общем случае сигнал между двумя точками на изображении будет различным из-за физического различия во взаимодействии электронов зонда с образцом или в последующем поведении результатов взаимодействия (после того, как электроны покинут образец).

2.3. Магнитный контраст в РЭМ

Магнитный контраст возникает за счет того, что магнитное поле, присущее некоторым материалам, может воздействовать на сам процесс взаимодействия первичного электронного пучка с этими материалами или на результат этого взаимодействия. В РЭМ эти магнитные эффекты могут быть использованы для создания контраста изображения областей с различным направлением намагниченности (магнитных доменов). В настоящее время известны два механизма формирования изображения:

- магнитный контраст I рода, возникающий вследствие взаимодействия эмиттированных образцом низкоэнергетических вторичных электронов с внешними полями рассеяния над поверхностью образца;

- магнитный контраст II рода, являющийся результатом взаимодействия высокоэнергетических электронов зонда с внутренним полем образца.

3. ОЖЕ-СПЕКТРОСКОПИЯ

При реализации этого процесса внешнее излучение (первичный или вторичный электрон, ион, рентгеновское излучение) создает на внутренней оболочке атома вакансию, которая затем заполняется либо электроном с соседней оболочки, либо валентным электроном. Механизм оже-перехода характеризуется заполнением дырки одним электроном и эмиссией второго электрона (оже-электрона). (В случае рентгеновской флуоресценции вместо второго электрона испускается квант рентгеновского излучения.) При этом энергия оже-электрона фиксирована для каждого электронного уровня каждого атома, поэтому, регистрируя пик оже-электронов данного элемента, можно получить распределение этого элемента по поверхности образца.

Существует несколько подвидов оже-спектроскопии в зависимости от применяемого средства возбуждения атома мишени. Если это электромагнитное излучение, то соответственно РФЭС (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия) и УФЭС (ультрафиолетовая фотоэлектронная спектроскопия); если электроны, то ЭОС (электронная оже-спектроскопия); если ионы, то ИОС (ионная оже-спектроскопия). [14]

4. РЕНТГЕНОСПЕКТРАЛЬНЫЙ МИКРОАНАЛИЗ

Под *рентгеноспектральным микроанализом* (РСМА) понимают определение элементного состава микрообъемов по возбуждаемому в них характеристическому рентгеновскому излучению. Рентгеноспектральный микроанализ основан на тех же принципах, что и эмиссионный рентгеноспектральный анализ. Для анализа характеристического спектра в рентгеноспектральном микроанализаторе применяют два типа спектрометров (бескристальный либо с кристаллом-анализатором). Особенность

РСМА заключается в том, что возбуждение первичного излучения осуществляется в сравнительно малых объемах образца очень узким электронным зондом.

Поэтому базой для рентгеноспектрального микроанализа служит электронно-оптическая система растрового электронного микроскопа.

Рентгеноспектральные измерения производятся либо с помощью кристалл-дифракционного спектрометра (спектрометра с дисперсией по длинам волн), либо с помощью полупроводниковых детекторов. При применении кристалл-дифракционного спектрометра часть рентгеновского излучения, генерируемого образцом, выходит из электронно-оптической камеры, падает на поверхность кристалла анализатора и дифрагирует в соответствии с законом Брэгга:

$$n\lambda = 2d \sin\vartheta,$$

где n — целое число (1, 2, 3, ...); λ , — длина волны рентгеновского излучения; d — межплоскостное расстояние в кристалле; ϑ — угол падения рентгеновского излучения на поверхность кристалла. [14]

5. РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ

Рентгеноструктурный анализ является методом исследования строения тел, использующим явление дифракции рентгеновских лучей. Это метод исследования структуры вещества по распределению в пространстве и интенсивностям рассеянного на анализируемом объекте рентгеновского излучения. Поскольку длина волны рентгеновского излучения сопоставима с размерами атома и постоянной решетки кристаллического тела, при облучении кристалла рентгеновским излучением будет наблюдаться дифракционная картина, которая зависит от длины волны используемых рентгеновских лучей и строения объекта. Для исследования атомной структуры применяют излучение с длиной волны около 1 А, т.е. порядка размеров атома.

В ходе рентгеноструктурного анализа исследуемый образец помещают на пути рентгеновских лучей и регистрируют дифракционную картину, возникающую в результате взаимодействия лучей с

веществом. На следующем этапе исследования анализируют дифракционную картину и расчетным путем устанавливают взаимное расположение частиц в пространстве, вызвавшее появление данной картины. [14]

Рентгеноструктурный анализ кристаллических веществ состоит из **двух этапов**:

- *Первый этап* — это определение размеров элементарной ячейки кристалла, числа частиц (атомов, молекул) в элементарной ячейке и симметрии расположения частиц (так называемой пространственной группы). Эти данные получают путем анализа геометрии расположения дифракционных максимумов.
- *Второй этап* — это расчет электронной плотности внутри элементарной ячейки и определение координат атомов, которые отождествляются с положением максимумов электронной плотности. Эти данные получают анализом интенсивности дифракционных максимумов.

6. СПЕКТРОСКОПИЯ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ РЕЗЕРФОРДА

Одним из самых высокочувствительных методов элементного анализа является метод обратного рассеяния Резерфорда (ОРР), который заключается в облучении поверхности образца остросфокусированным пучком ионов с энергией от 100 кэВ до 5 МэВ. В методе ОРР используется явление кулоновского рассеяния быстрых ионов ядрами исследуемого вещества на углы больше 90°. Зависимость энергии рассеянного иона от массы рассеивающего ядра обеспечивает принципиальную возможность элементного анализа мишени. Обычно в качестве зондирующего пучка используются легкие ионы — ионы водорода и гелия.

В настоящее время ОРР является широко применяемым, универсальным методом анализа приповерхностных слоев твердого тела толщиной от долей нанометра до нескольких микрометров. [14]

7. ИОННЫЙ МИКРОАНАЛИЗ И ИОННАЯ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ

Возможности получения сведений о составе внешнего атомного слоя твердого тела значительно расширились в связи с разработкой и усовершенствованием метода вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и ряда других методов. Большинство этих методов близки к тому, чтобы анализировать саму поверхность, поскольку основная информация о составе материала поступает из его приповерхностной области толщиной порядка 10 \AA , а чувствительность всех таких методов достаточна для обнаружения малых долей моноатомного слоя большинства элементов.

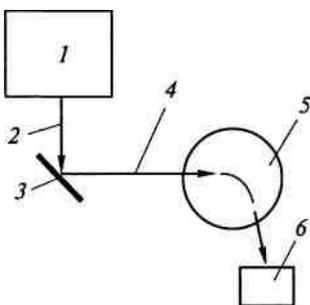


Рис. 9.4.1. Схема процесса масс-спектрометрии вторичных ионов: 1— источник ионов; 2 — первичный ионный пучок; 3 — образец; 4— поток вторичных ионов; 5 — магнитный сепаратор; 6 — масс-детектор

Взаимодействие быстрых ионов с твердым телом приводит к выбиванию атомов и молекул материала как в нейтральном, так и в заряженном состоянии. На явлении сравнительного эффективного образования заряженных частиц (вторичных ионов) и на принципе высокочувствительных масс-спектрометрических измерений основан метод ВИМС. Хотя у него, как у любого другого метода, имеются свои недостатки, только он дает широкие возможности исследования и поверхности, и объема твердого тела в одном приборе. Наиболее важными характерными особенностями метода, которые вызывают повышенный интерес к нему, являются очень низкий порог чувствительности для большинства элементов

(меньше 10 моноатомного слоя), измерение профилей концентрации малых количеств примесей с разрешением по глубине меньше 50 Å, разрешением по поверхности порядка микрометра, возможность изотопического анализа и обнаружение элементов с малыми атомными номерами (H, Li, Be и т.д.).

В методе ионной масс-спектрометрии вторичных ионов материал с поверхности исследуемого образца распыляется ионным пучком, а образующиеся при распылении ионы регистрируются и анализируются по массе. Схема этого процесса показана на рис. 9.4.1. Источник ионов 1 формирует первичный ионный пучок 2, который разворачивается в растр по поверхности исследуемого образца 3 и распыляет материал. Поток вторичных ионов распыленного вещества 4 разделяется по массе в устройстве типа магнитного сепаратора 5 и анализируется в масс-детекторе 6. Результаты анализа отображаются в виде силы тока вторичного ионного пучка в зависимости от массы иона. [14]

8. ТУННЕЛЬНАЯ И АТОМНО-СИЛОВАЯ МИКРОСКОПИЯ

8.1. Автоионный микроскоп

К сожалению, все рассмотренные ранее методы не позволяют получать топографию поверхности с точным расположением отдельных атомов или их достаточно локальных групп. Этого достичь не позволяет даже РЭМ, поскольку при высоких энергиях электронов электроны проникают слишком глубоко в твердое тело или насквозь «простреливают» тонкую фольгу, испытывая при этом многочисленные акты рассеяния. При небольших энергиях электронного пучка электроны очень чувствительны к электрическим и магнитным полям, генерируемым образцом, которые искажают траектории их движения. Тем не менее, интерес к аналитическим методам, позволяющим достичь атомарного уровня по мере развития техники и технологии, только возрастает.

Основным элементом прибора является очень острая металлическая игла, напротив кончика которой располагается люминесцентный экран. Пространство между иглой и экраном заполняется инертным газом при соответствующем давлении.

Исследуемым образцом являлась собственно сама игла. При приложении между кончиком иглы и экраном электрического поля с расположением положительного полюса на самой игле вокруг ее кончика возникало сильное электрическое поле (порядка 500 млн В/см и больше) с градиентом напряженности, увеличивающимся в направлении острия. Роль градиента напряженности поля заключается в подтягивании поляризованных частиц в направлении острия.

При появлении нейтрального атома инертного газа в зоне действия электрического поля оно сначала поляризует атом. Затем поле подтягивает атом к игле и ионизирует его, вследствие чего образуется положительно заряженный ион. Затем электрическое поле вызывает эмиссию иона с острия иглы и обеспечивает его радиальное движение в направлении экрана, как это показано на рис. 9.4.2. Между иглой и экраном поддерживается давление газа около 10^{-1} Па.

Ион ускоряется под воздействием электрического поля в направлении той точки на люминесцентном экране, которая однозначно соответствует позиции атома иглы, вблизи которого произошла ионизация. В результате на экране создается изображение иглы с увеличением, позволяющим фиксировать отдельные атомы. Охлаждение иглы до температур жидкого азота и водорода ослабляет воздействие на получаемое изображение теплового движения атомов в направлении, поперечном к траектории полета иона от иглы до экрана.

Максимальное разрешение автоионного микроскопа составляет 2,5 А, что согласно классификации Л. Полинга и У.Захарисена соответствует размерам атома. Трудности заключаются в размещении исследуемого материала на кончике иглы, причем материал должен быть стоек к воздействию мощных электрических полей, и адекватной интерпретации получаемых результатов. Воздействие сверхмощных электрических полей выдерживали только твердые материалы, такие как вольфрам, платина или иридий. Для исследования полупроводников приходилось снижать приклады-

ваемый потенциал (до (200...300) млн В/см), что мгновенно отражалось на разрешающей способности микроскопа.

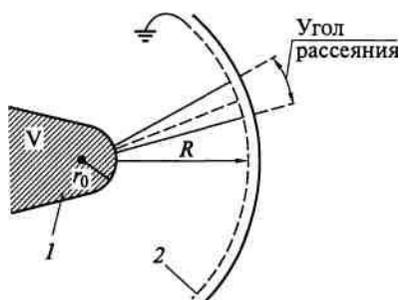


Рис. 9.4.2. Схема работы автоионного микроскопа: 1 — острие; 2 — экран.

8.2. Сканирующий туннельный микроскоп

В 1982 г. Г. Биннинг и Г. Рорер (Цюрихский филиал IBM) создали совершенно новый прибор, названный ими сканирующим туннельным микроскопом (СТМ), с помощью которого им удалось получить изображение поверхности с атомной точностью.

СТМ состоит из двух электродов, одним из которых является исследуемый образец, а другим — острая металлическая игла, кончик которой удален от исследуемой поверхности на расстояние не более 10 А. Для таких расстояний кончик иглы нельзя считать плавно закругленным, поскольку он будет в любом случае иметь свою топографию, причем некоторые из выступов размером в несколько атомов обязательно окажутся расположенными ближе к зондируемой поверхности. При подаче потенциала на иглу и исследуемую поверхность через эти локальные микровыступы потечет туннельный ток. Иногда эти микровыступы получают специально путем ионной бомбардировки поверхности иглы-эмиттера. Как показали проведенные эксперименты, эти микровыступы можно получить с помощью специальных режимов работы СТМ, вызывающих пластическую деформацию материала эмиттера под воздействием образующегося мощного электрического поля (порядка 10^8 В/см), которое

стимулирует миграцию атомов по поверхности иглы и образование микроострий.

Для получения информации можно фиксировать изменения туннельного тока при перемещении зонда в плоскости, параллельной исследуемому образцу, либо, поддерживая ток постоянным, фиксировать перемещения иглы в плоскости, перпендикулярной поверхности образца.

8.3. Атомно-силовой микроскоп

Принцип действия атомно-силового микроскопа основан на сканировании поверхности исследуемого образца зондирующей иглой, закрепленной на кронштейне малой механической жесткости (вся конструкция называется кантилевером), и регистрации отклонения кронштейна под действием межатомных или межмолекулярных сил. Передвижение острия осуществляется трехкоординатным пьезомикроманипулятором. Для фиксации столь малых колебаний кронштейна используется обычно устройство фиксации, но могут применяться и другие методы фиксации, такие как лазерный луч. Приближение поверхности образца к игле вызывает отклонение кронштейна от положения равновесия, и это отклонение преобразуется в электрический сигнал. Исследовательский зонд изготавливается из алмаза, монокристалла Al_2O_3 и закрепляется на серебряном кронштейне толщиной около 50 мкм, шириной 200 мкм и длиной 1...3 мм (пример реальной структуры). [14]

9. МИКРОСКОПИЯ БЛИЗНЕГО ПОЛЯ

Еще совсем недавно считалось, что предел возможностям оптики ставит фундаментальный рэлеевский критерий разрешения оптических приборов. Он заключается в том, что минимальный размер различимого объекта немного меньше длины волны используемого света и принципиально ограничен дифракцией излучения. Однако в последнее время появилась и вызывает все больший интерес возможность изучения и формирования оптическими методами различных структур нанометровых размеров, которые во много раз меньше длины световой волны λ . Такая возможность

возникла в связи с развитием ближнепольной оптики (БПО) — нового и чрезвычайно перспективного направления физической и прикладной оптики.

С физической точки зрения она основана на присутствии в дальней зоне излучения вполне идентифицируемых следов взаимодействия света с микрообъектом, находящимся в ближнем световом поле, которое локализовано на расстояниях, много меньших λ . В техническом смысле БПО в себе сочетает элементы обычной оптики и сканирующей зондовой микроскопии. Отличительным элементом ближнепольных приборов является оптический зонд (рис. 7.26), обычно представляющий собой заостренное оптическое волокно 1, наружная поверхность которого, за исключением вершины конуса, покрыта непрозрачным слоем металла 3 ($d \ll \lambda$, $h < \lambda$). Окружность, показанная штриховой линией, ограничивает область ближнепольного контакта.

Часть светового потока, распространяющегося по волокну, проходит через выходное сечение зонда, как сквозь диафрагму в металлическом экране, и достигает образца, расположенного в ближнем поле источника. Если расстояние z до поверхности образца и радиус r_0 диафрагмы удовлетворяют условию $r_0^2 z \ll \lambda$, то размер светового пятна на образце близок к размеру диафрагмы. При перемещении зонда вдоль образца возможна реализация разрешения, не ограниченного дифракцией, или сверхразрешения. [14]

10. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЛИПСОМЕТРИИ

Одним из наиболее прецизионных методов определения толщины пленок, прозрачных для оптического излучения, является эллипсометрия, впервые предложенная и реализованная П.Друдэ в 1887 г. Исследования П.Друдэ отражения света от поверхности с тонкой и геометрически плоской пленкой стали классическим образцом в эллипсометрии.

Под эллипсометрией подразумевают изучение изменений поляризации света вследствие отражения. В тех случаях, когда это возможно, эллипсометрия в проходящем свете удачно дополняет

эллипсометрию в отраженном свете и даже может служить основным методом исследования в случаях, когда измерения отраженного акта затруднительны (например, при слабом отражении от диэлектриков). [14]

11. КОНФОКАЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ

Конфокальный микроскоп отличается от классического оптического микроскопа тем, что в каждый момент времени регистрируется изображение одной точки объекта, а полноценное изображение строится путем сканирования (движения образца или перестройки оптической системы). Таким образом, в своеобразной форме реализуется принцип растровой электронной микроскопии, что позволяет сколь угодно долго регистрировать и обрабатывать сигнал с каждой отдельно взятой точки.

В классическом микроскопе в фотоприемное устройство попадает свет из различных точек образца. В конфокальном микроскопе для того, чтобы регистрировать свет только от одной точки, после объективной линзы располагается диафрагма малого размера таким образом, что свет, испускаемый анализируемой точкой, проходит через диафрагму и будет зарегистрирован, а свет от остальных точек в основном задерживается диафрагмой.

Еще одна особенность заключается в том, что осветитель создает не равномерную освещенность поля зрения, а фокусирует свет в анализируемую точку. Это может достигаться расположением второй фокусирующей системы за образцом, но при этом требуется, чтобы образец был прозрачным. Кроме того, объективные линзы обычно имеют высокую стоимость, поэтому использование второй фокусирующей системы для подсветки мало предпочтительно. Альтернативой является использование светоделительной пластинки, так чтобы и падающий и отраженный свет фокусировались одним объективом. Такая схема к тому же облегчает юстировку. [14]

Глава 10

БОЛЬШИЕ И СВЕРХБОЛЬШИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Тенденция к повышению степени интеграции наблюдалась с самого зарождения микроэлектроники. Сначала в каждом корпусе размещались отдельные ИЛЭ. Затем, увеличив количество выводов, стали размещать по несколько ИЛЭ в одном корпусе. Это позволило сократить общее количество корпусов в аппаратуре, но не привело к какому-либо новому этапу в развитии ИС. Качественно новый этап начался лишь после того, как простые ИС, расположенные на одном кристалле, стали объединять в сложные функциональные комплексы путем металлической разводки - так же, как в самих ИС объединяются отдельные элементы. На этом этапе появились сначала средние (СИС), а затем большие интегральные схемы (БИС) и сверхбольшие интегральные схемы (СБИС). Можно сказать, что в основе БИС лежит интеграция простых ИС.

Общая характеристика БИС. Классическим примером простых ИС являются логические вентили типа ТТЛ, КМОП, ЭСЛ и др. Промежуточное место между простыми ИС и СИС занимают ЖК-триггеры, состоящие из 8-10 логических вентилях. Собственно к СИС относятся сумматоры, счетчики, ОЗУ и ПЗУ емкостью 256-1024 бит и др. Примерами БИС могут служить схемы памяти на 4 бит и более, арифметико-логические и управляющие устройства ЭВМ, цифровые фильтры. Наибольшая степень интеграции свойственна однородным структурам - ЗУ и составляет в настоящее время десятки миллионов элементов на кристалле. ИС со степенью интеграции более 100 тыс. элементов называют сверхбольшими.

Использование БИС сопровождается резким улучшением всех основных показателей по сравнению с аналогичным функциональным комплексом, выполненным на отдельных ИС. Действительно, интеграция ИС на одном кристалле приводит к уменьшению количества корпусов, числа сборочных и монтажных операций, количества внешних - наименее надежных - соединений. Все это, как обычно, способствует уменьшению размеров, массы, стоимости и

повышению надежности. Дополнительными преимуществами от интеграции ИС являются уменьшение общего количества контактных площадок (а значит, экономия площади), сокращение длины соединений (что способствует повышению быстродействия и помехоустойчивости), а также меньший разброс параметров, поскольку все ИС расположены на одном кристалле и изготовлены в едином технологическом цикле.

Повышение степени интеграции можно обеспечить двумя путями: увеличивая плотность упаковки элементов (т. е. уменьшая их площадь, включая площадь металлической разводки) и увеличивая размеры кристалла. И тот, и другой путь связан с решением сложных технологических задач: необходимо повысить разрешающую способность литографии, стабилизировать технологические режимы, обеспечить особую гигиену производства, снизить плотность дефектов на поверхности кремния и т. п. Некоторые проблемы конструирования и контроля БИС рассматриваются в следующем разделе.

На этапе развития БИС возник также ряд схемотехнических проблем, не менее серьезных, чем технологические. Более того, обе категории проблем тесно переплелись друг с другом, т. е. вопросы «как делать» и «что делать» должны при разработке БИС решаться одновременно и комплексно.

БИС на базовых матричных кристаллах. Один из первоочередных вопросов, возникающих при разработке БИС, - это вопрос об их технической и экономически целесообразной сложности. Необходимо сочетать достаточную сложность (чтобы реализовать преимущества высокой степени интеграции) с достаточной универсальностью (чтобы обеспечить экономически оправданный объем выпуска). Практика показывает, что такого компромисса можно достигнуть, обеспечивая элементную избыточность и многофункциональность.

Действительно, если количество ИС, расположенных на кристалле, больше, чем нужно для осуществления некоторой определенной функции, то, значит, выполняя разные металлические разводки, можно с помощью одного и того же набора ИС осущест-

влять БИСы с разными функциями. Данный принцип положен в основу БИС на базовых матричных кристаллах. Базовый матричный кристалл (БМК) - это набор топологических ячеек, расположенных в виде матрицы, между элементами которой отсутствуют соединения.

Топологическая ячейка состоит из отдельных полупроводниковых элементов. Для получения БИС с заданными функциями отдельные элементы внутри ячеек и сами ячейки соединяются токоведущими дорожками. Для размещения проводников (трассировки) используют системы автоматизированного проектирования (САПР).

В конкретной БИС, изготовленной на БМК, обычно используют не все топологические ячейки, что определяется функциональными особенностями микросхемы.

Другой принцип формирования заданной структуры БИС на БМК состоит в первоначальном создании кристалла, в котором выполнены все возможные межсоединения элементов. Далее, в нужных местах межсоединений делаются разрывы путем локального удаления материала межсоединения методом лазерного разрушения.

Программируемые логические матрицы. Существенным недостатком описанных выше БИС на БМК является то, что формирование структуры БИС может быть выполнено только в рамках микроэлектронного производства в соответствии с логической структурой, определенной разработчиком. Существенно большую гибкость обеспечивают программируемые пользователем логические матрицы (ПЛМ). Это специализированные БИС, внутренняя структура которых, подобно обычным БМК, состоит из матрицы базовых логических ячеек и межсоединений, но конфигурация отдельных ячеек и связей между ними осуществляется с помощью специальной системы, расположенной на этом же кристалле.

Обычно для задания конфигурации предусмотрены специальные выводы БИС, и разработчик может устанавливать и изменять логическую функцию БИС. Для разных типов ПЛМ установленная конфигурация может либо сохраняться при отключении питания (подобно постоянным запоминающим устройствам, см.

разд. 10.8), либо требуется перезагрузка при каждом новом включении. Управление перезагрузкой может выполнять сама схема ПЛМ, считывая информацию о конфигурации из внешнего ПЗУ.

Проблемы повышения степени интеграции. Опыт разработки БИС выявил ряд общих проблем, которые ограничивают повышение степени интеграции и которые, следовательно, нужно так или иначе решать в процессе дальнейшего развития микроэлектроники.

Проблема теплоотвода. При заданных размерах элементов повышение степени интеграции может достигаться увеличением плотности компоновки, т. е. сближением элементов на кристалле. При этом неизбежно возрастает удельная мощность, рассеиваемая на единице площади. При современных конструкциях кремниевых ИС допустимая удельная мощность на кристалле без дополнительного теплоотвода не превышает 5 Вт/см². Значит, допустимая мощность для кристалла площадью 20 мм² составляет не более 1 Вт. При средней мощности 0,5 мВт, потребляемой одним ИЛЭ, на указанном кристалле удастся разместить не более 2000 логических элементов.

Естественным путем для преодоления этого ограничения является использование микрорежима транзисторов и таких схем, которым микрорежим свойствен. Например, для того чтобы на той же площади 20 мм² разместить 10000 вентиляей, нужно использовать ИЛЭ с потребляемой мощностью не более 0,1 мВт, т. е. ИЛЭ типа КМОП.

Конечно, может оказаться, что при данных размерах кристалла желательную степень интеграции нельзя осуществить ни на одном из имеющихся элементных базисов. Тогда приходится идти на увеличение площади ИС. В принципе этот путь открывает широкие возможности, но практически он тоже ограничен.

Ограничение накладывается неизбежными дислокациями на поверхности полупроводника. Любая дислокация в пределах БИС означает негодность транзистора или отдельной ИС, соответственно негодной может оказаться и БИС в целом. Поэтому увеличение

площади кристалла сопровождается увеличением процента брака и уменьшением процента выхода годных БИС.

В отдельных случаях используют искусственное охлаждение БИС или подложек, на которых они монтируются. Однако такое решение - не универсальное и экономически далеко не всегда оправдано.

Проблема межсоединений. Внутренняя структура БИС настолько сложна, что конструктор не может за разумное время спроектировать топологию (расположение) элементов и рисунок оптимальных межсоединений (с минимальной суммарной длиной и минимальным количеством пересечений). Для этого нужно сравнить тысячи вариантов, и это практически можно выполнить только при использовании систем автоматизированного проектирования.

Опыт показывает, что в большинстве БИС не удастся расположить разводку межсоединений в одной плоскости без пересечений. Поэтому для БИС характерна многослойная разводка, расположенная обычно в 2-х или 3-х плоскостях. Изоляция слоев друг от друга и необходимые соединения между разводками разных слоев представляют собой особую технологическую проблему, специфичную для БИС.

Проблема контроля параметров. Электрический контроль параметров БИС до ее помещения в корпус осуществляется с помощью измерительных зондов, прижимаемых к контактным площадкам, т. е. к будущим внешним выводам. Зонды представляют собой тонкие металлические проволочки, острие которых имеет диаметр 5-10 мкм. Зонды объединяются в зондовые головки - своего рода проволочные «щетки», в которых каждый зонд соприкасается с соответствующей контактной площадкой, имеющей размеры 100 x 100 мкм.

Количество внешних выводов у БИС значительно больше, чем у простых ИС, в силу большей сложности выполняемых функций. Оно может составлять от десятков до нескольких сотен. Если для иллюстрации принять 50 выводов и учесть, что на каждом выводе может быть два значения выходной величины («0» или «1»), то для полноценной проверки функционирования БИС (только в

статике) потребуется $2^\circ \ll 10$ измерений. При длительности каждого измерения 1 мкс контроль одной БИС займет около 25 лет.

Следовательно, помимо автоматизации контроля, нужно упростить и его методику. По необходимости измерения должны быть выборочными: количество измерений, свидетельствующих о работоспособности БИС (с определенной вероятностью), обычно лежит в пределах 200-300.

Отбор контролируемых параметров, последовательность и правила (алгоритмы) их испытания, а также разработка соответствующей аппаратуры и программ (для использования ЭВМ) представляют нередко задачу, не менее сложную, чем проектирование самой БИС.

Физические ограничения на размеры элементов. В современных БИС размеры отдельных участков доходят до 2-5 мкм и имеется тенденция к дальнейшему уменьшению размеров. На этом пути, однако, возникают некоторые принципиальные ограничения. В упрощенном виде они проиллюстрированы на рис.

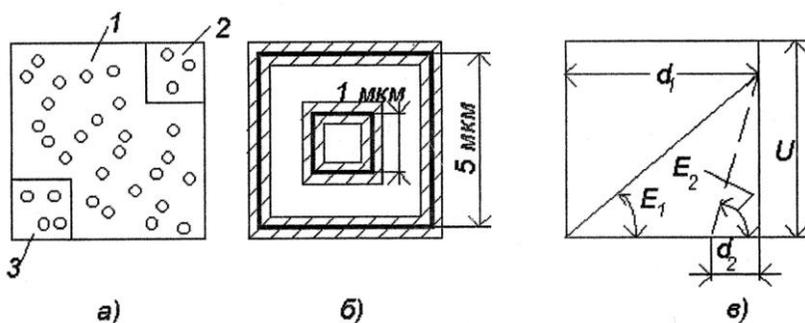


Рис.10.1 Ограничения на минимальные размеры элементов ИС: а - флюктуация распределения примеси; б - технологические допуски; в - рост напряженности поля.

- Во-первых, с уменьшением площади начинает сказываться неравномерное (статистическое) распределение примеси в

полупроводнике. Пусть квадраты на рис. 10.1, а иллюстрируют конфигурацию эмиттерного слоя. При большой площади (квадрата) количество атомов примеси в двух одинаковых квадратах будет практически одинаковым. При малой площади (квадраты 2 и 3) количество атомов может заметно различаться (три и четыре атома на рис. 10.1, а). Соответственно будут различаться концентрации примеси в эмиттерах, а значит, и коэффициент инжекции. Анализ показывает, что этот фактор становится существенным при стороне квадрата менее 1 мкм.

- Во-вторых, с уменьшением линейных размеров возрастает роль технологических допусков (рис. 10.1, б). Так, если погрешность фотолитографии составляет $\pm 0,2$ мкм, то при линейных размерах 5 мкм (большой квадрат) площади элементов будут различаться незначительно (на 20%), а при размерах 1 мкм (малый квадрат) - в 2,3 раза.
- В-третьих, с уменьшением линейных размеров возрастают напряженности электрических полей в полупроводниковых слоях (рис. 10.1, в). При одном и том же напряжении $U = 0,2$ В напряженность поля в слое толщиной 5 мкм сравнительно невелика (400 В/см), а в слое толщиной 0,2 мкм она составляет 10 В/см, т. е. превышает критическую напряженность. Соответственно полупроводниковый слой приобретает нелинейные свойства.

Можно также показать, что при линейных размерах менее 1-2 мкм определенную роль начинают играть шумовые флуктуации, влияние космического излучения и естественный радиационный фон Земли.

Учитывая, что возможности обычной фотолитографии тоже лежат в пределах 0,7-1 мкм, можно сказать, что и физические и технологические аспекты делают область размеров менее 1 мкм особой областью и позволяют говорить о «субмикронной микроэлектронике» как о самостоятельном научно-техническом и технологическом направлении.

Большие гибридные интегральные схемы (БГИС). Этот тип БИС не является альтернативой полупроводниковым БИС. Скорее его можно считать адекватным конструктивным решением при разработке современной микроэлектронной аппаратуры.

Основное различие между простой ГИС и БГИС состоит в том, что у первых типичными навесными компонентами являются бескорпусные транзисторы и диоды, тогда как у вторых - бескорпусные ИС и БИС. Кроме того, БГИС имеют более сложную структуру, чем ГИС. В частности, им часто свойственна многоуровневая металлизация, как и полупроводниковым БИС.

Чаще всего БГИС содержит только металлическую разводку и навесные бескорпусные ИС и БИС. Поэтому понятие ГИС (подразумевающее наличие пленочных пассивных элементов) часто сводится к понятию тонко- или толстопленочной коммутационной платы, главная задача которой - объединить множество ИС и БИС в единый функциональный комплекс. Такой комплекс называют микросборкой.

Коммутационная плата является микроэлектронным аналогом печатной платы, которая до последнего времени была основной конструктивной единицей радиоэлектронной аппаратуры. Что касается микросборки, то ее качественная особенность по сравнению с узлами, выполненными на печатных платах, состоит в том, что она представляет собой законченный прибор (суперкомпонент электронных схем), снабженный отдельным корпусом и характеризуемый единой технической документацией. Функциональная сложность такого электронного прибора намного выше, чем БИС и даже СБИС. Из микросборок, как «суперкомпонентов», можно на печатной плате монтировать сверхсложные узлы аппаратуры, а часто и все устройство в целом.

Глава 11

ПЕРЕХОД ОТ МИКРОТЕХНОЛОГИИ К НАНОТЕХНОЛОГИИ

Многие процессы, характерные для наномира, происходят в условиях, далеких от равновесного состояния, а объекты наномира чаще всего представляют собой открытые системы, обменивающиеся с внешней средой веществом, энергией и информацией. Вследствие этого для описания процессов и физических явлений, протекающих в наномире, приходится использовать аппарат нелинейной динамики, а для исследования объектов наномира использовать понятия и методы фрактальной физики. Поэтому для описания наномира необходимо пользоваться системами нелинейных дифференциальных уравнений, имеющих несколько решений, что приводит к необходимости заниматься и проблемами эволюции объектов наномира, поскольку эволюция эта может происходить разными путями, в зависимости от изменения (иногда чрезвычайно незначительного) начальных условий и параметров.

Уход от вакуумной электроники и переход к твердотельной технологии привели к тому, что потоки электронов, заключенные в полупроводниковый кристалл, дали начало новой ветви эволюции элементной базы. Подвижность электронов в сочетании с малыми внутрикристаллическими размерами обеспечивает скорость, а строгий порядок атомов, т.е. структура твердого тела, — организацию информационных потоков в микропространстве. Однако для этого необходимо сформировать кристалл с почти идеальным расположением атомов в решетке (так называемую матрицу — аналог вакуума в электронных лампах) и с заданным распределением примесей, образующих внутри кристалла сложную пространственную фигуру (физический, но не конструкционный аналог сеток в электронных лампах).

В связи с этим неизбежным переходом возникает ряд технических, технологических и фундаментальных проблем, требующих своего разрешения. Их неординарность обуславливается исторически сложившейся особенностью нанотехнологии, заклю-

чающейся в том, что на одном поле нанонауки оперируют два совершенно разных и мало взаимодействовавших ранее научных направления: химическое, связанное с коллоидной химией и ультрадисперсным состоянием вещества, и физическое, связанное с развитием микроэлектроники и микротехнологии и базирующееся в основном на достижениях субмикронной технологии. Каждое направление имеет свои представления о приоритетах, устоявшуюся терминологию и методики работы.

С физической точки зрения это, во-первых, проблема создания функционирующего элемента с нанометровыми размерами; во-вторых, обеспечение его коммутации с другими аналогичными элементами; в-третьих, проблема создания групповых методов обработки, позволяющих получать требуемую структуру, как минимум, сразу на всей поверхности подложки или достаточно большой ее локальной области. Существуют также проблемы перехода к многоуровневым схемам, в дальней перспективе — к объемным схемам (так называемая 3D-технология) и связанные с этим проблемы трехмерной коммутации и теплоотвода.

С химической точки зрения это гигантский комплекс проблем, связанный с получением и исследованием ультрадисперсных частиц и наночастиц, размерные эффекты в нанохимии, многофазные комплексы в пределах одной наночастицы, нанореакторы и наноконтейнеры и многое другое.

Огромное значение имеют так называемые проблемы масштабирования (это не только проблема зависимости состав—размер — свойство). В настоящее время многие наноразмерные частицы с необычными свойствами получают в миллиграммовых количествах. Синтез тех же соединений в больших, даже граммовых, количествах приводит к другим, часто трудно воспроизводимым результатам.

Особый интерес представляют «материалы с интеллектом», которые имеют способность реагировать изменением своих физических характеристик на внешнее воздействие. Их характерной особенностью является наличие двух фазовых превращений. В нанохимии также просматриваются два стратегических направления:

первое связано с изучением химических свойств и реакционной способности наночастиц как функции их размера и числа образующих их атомов; второе занимается более практическими вещами (применением нанохимии для получения и модификации отдельных наночастиц, реализацией принципов самоорганизации для построения из этих наночастиц более сложных конструкций микро- и макромира и изучением свойств получаемых микро- и макрообъектов как функции свойств образующих их наночастиц).

Нанотехнология — совокупность методов и приемов, обеспечивающих возможность контролируемым образом создавать и модифицировать объекты, включающие в себя компоненты с размерами менее 100 нм, хотя бы в одном измерении, и в результате этого получившие принципиально новые качества, позволяющие осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба; в более широком смысле — этот термин охватывает также методы диагностики, характерологии и. исследований таких объектов.

Наноматериал — материал, содержащий структурные элементы, геометрические размеры которых, хотя бы в одном измерении, не превышают 100 нм, и благодаря этому обладающий качественно новыми свойствами, в том числе заданными функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Наносистемная техника — созданные полностью или частично на основе наноматериалов и нанотехнологий функционально законченные системы и устройства, характеристики которых кардинальным образом отличаются от показателей систем и устройств аналогичного назначения, созданных по традиционным технологиям.

Наноиндустрия — вид деятельности по созданию продукции на основе нанотехнологий, наноматериалов и наносистемной техники.

Создание наноструктур базируется на новейших технологических достижениях в области конструирования на атомном уровне твердотельных поверхностных и многослойных структур с заданным электронным спектром и необходимыми электрическими, оп-

тическими, магнитными и другими свойствами. Требуемая зонная структура таких материалов обеспечивается выбором веществ, из которых изготавливаются отдельные слои структуры (зонная инженерия), поперечных размеров слоев (размерное квантование), изменением степени связи между слоями (инженерия волновых функций). Наряду с квантоворазмерными планарными структурами (двухмерный электронный газ в квантовых ямах, сверхрешетки) исследуются одно- и нульмерные квантовые объекты (квантовые нити и точки), интерес к которым связан с надеждами на открытие новых физических явлений и, как следствие, на получение новых возможностей эффективного управления электронными и световыми потоками в таких структурах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Росардо Л. Физическая энергетика и микроэлектроника. – М.: Высшая школа, 1991.
2. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем. – М.: Мир, 1991.
3. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. – М.: Мир, 1985.
4. Херман М. Полупроводниковые сверхрешетки. – М.: Мир, 1989.
5. Лихарев К.К., Семенов В.К., Зорин А.Б. Новые возможности для сверхпроводниковой электроники. «Итоги науки и техники», сер. «Сверхпроводимость». – М.: 1989.
6. Беккер Я.М., Гуревич А.С. Новый изоляционный материал и его применение в кабелях связи. – Лен. Промышленность, 1958, №5-6, с.89.
7. Буа Д., Розеншер Э. Физические границы возможного в микроэлектронике. «Физика зарубежом», сер. А. – М.: Мир, 1991.
8. Зентуит Э. Физика поверхности. – М.: Мир, 1990.
9. Беккер Я.М., Берг И.В. Изготовление миниатюрных интегральных элементов памяти с помощью излучения ОКГ/Сб. «Использование оптических квантовых генераторов в приборостроении». – ЛДНТП, 1967, с.10.
10. Семенов Ю.Г., Контроль качества. – М.: Высшая школа, 1990.
11. Ефимов И.Е., Кальман И.Г., Мартынов Е.И. Надежность твердых интегральных схем. – М: Изд-во стандартов, 1979.
12. Чирихин С.Н. Средства автоматизации приборостроения диагностических знаний в экспертных системах. – «Зарубежная радиоэлектроника», 1991, №8, с.7.
13. Беккер Я.М. Молекулярная электроника Учеб.пособие. – ЛИТМО, 1990.

14. Марголин В.И., Жарбеев В.А., Тупик В.А. Физические основы микроэлектроники из-во: Академия, 2008 – 400 с.
15. Беккер Я.М., Ткалич В.Л. Диагностика, контроль и прогнозирование надежности БИС ЗУ, СПб, СПб ГУ ИТМО, 2005 г.
16. Нанотехнологии в электронике. Под редакцией Чаплытина Ю.А. – М.: Техносфера, 2005 – 448 с.
17. Пул Ч., Оузис Ф., Нанотехнологии – М.: Техносфера, 2005. – 336 с.
18. Алексеенко А.Г. Основы микросхемотехники – М.: Физмат., 2002.
19. Булычев А.Л. Электронные приборы. – М.: Лайт Лтд., 2000. – 200 с.

Кафедра проектирования компьютерных систем

1945–1966 РЛПУ (кафедра радиолокационных приборов и устройств). Решением Советского правительства в августе 1945г. в ЛИТМО был открыт факультет электроприборостроения. Приказом по институту от 17 сентября 1945г. на этом факультете была организована кафедра радиолокационных приборов и устройств, которая стала готовить инженеров, специализирующихся в новых направлениях радиоэлектронной техники, таких как радиолокация, радиоуправление, теленаведение и др. Организатором и первым заведующим кафедрой был д.т.н., профессор С.И.Зилитинкевич (до 1951 г.). Выпускникам кафедры присваивалась квалификация инженер-радиомеханик, а с 1956г. — радиоинженер (специальность 0705).

В разные годы кафедрой заведовали доцент Б.С.Мишин, доцент И.П.Захаров, доцент А.Н.Иванов.

1966–1970 КиПРЭА (кафедра конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры). Каждый учебный план специальности 0705 коренным образом отличался от предыдущих планов радиотехнической специальности своей четко выраженной конструкторско-технологической направленностью. Оканчивающим институт по этой специальности присваивалась квалификация инженер-конструктор-технолог РЭА.

Заведовал кафедрой доцент А.Н.Иванов.

1970–1988 КиПЭВА (кафедра конструирования и производства электронной вычислительной аппаратуры). Бурное развитие электронной вычислительной техники и внедрение ее во все отрасли народного хозяйства потребовали от отечественной радиоэлектронной промышленности решения новых ответственных задач. Кафедра стала готовить инженеров по специальности 0648. Подготовка проводилась по двум направлениям — автоматизация конструирования ЭВА и технология микроэлектронных устройств ЭВА.

Заведовали кафедрой: д.т.н., проф. В.В.Новиков (до 1976 г.), затем проф. Г.А.Петухов.

1988–1997 МАП (кафедра микроэлектроники и автоматизации проектирования). Кафедра выпускала инженеров, конструкторов, технологов по микроэлектронике и автоматизации проектирования вычислительных средств (специальность 2205). Выпускники этой кафедры имеют хорошую технологическую подготовку и успешно работают как в производстве полупроводниковых интегральных микросхем, так и при их проектировании, используя современные методы автоматизации проектирования. Инженеры специальности 2205 требуются микроэлектронной промышленности и предприятиям-разработчикам вычислительных систем.

Кафедрой с 1988г. по 1992г. руководил проф. С.А.Арустамов, затем снова проф. Г.А.Петухов.

С 1997 ПКС (кафедра проектирования компьютерных систем). Кафедра выпускает инженеров по специальности 210202 «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств». Область профессиональной деятельности выпускников включает в себя проектирование, конструирование и технологию электронных средств, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, проекта и условиям эксплуатации. Кроме того, кафедра готовит специалистов по защите информации, специальность 090104 «Комплексная защита объектов информатизации». Объектами профессиональной деятельности специалиста по защите информации являются методы, средства и системы обеспечения защиты информации на объектах информатизации.

С 1996г. кафедрой заведует д.т.н., профессор Ю.А.Гатчин. За время своего существования кафедра выпустила 4364 инженеров. На кафедре защищено 65 кандидатских и семь докторских диссертаций.

На кафедре проектирования компьютерных систем осуществляется магистерская подготовка по направлению 210200.05 — «Информационные технологии проектирования электронных средств».

Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии

Кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии, в прошлом кафедра часового производства и приборов точной механики, была создана одновременно с основанием университета, который ведет свою историю от образования в 1900г. ремесленного училища цесаревича Николая. Основателем кафедры является Норберт Болеславович Завадский — первый заведующий механико-оптического отделения этого училища.

В 1920г. после революции механико-оптическое отделение было реорганизовано в техникум точной механики и оптики, который с 1925г. начал подготовку инженеров-приборостроителей. В дальнейшем техникум был преобразован и уже в 1933г. стал институтом точной механики и оптики. В течение этого времени кафедрой заведовал профессор Н.Б.Завадский.

В 1930 кафедра получила название Приборов точной механики, и ее возглавил Лаврентий Павлович Шишелов. В этот период времени на кафедре читались дисциплины «Теория часовых механизмов», «Электроизмерительные приборы» и «Механические приборы». В 1935г. из состава кафедры выделилось направление гироскопических устройств и навигационных приборов. В 1940г. на кафедре защитил кандидатскую диссертацию Захар Маркович Аксельрод, впоследствии доктор технических наук, возглавлявший кафедру во время войны.

После войны кафедра приборов точной механики выпускала специалистов по часовому производству и производству точного мерительного инструмента. На кафедре читались курсы «Приборы времени», «Теория и проектирование приборов времени», «Приборы для измерения малых промежутков времени», «Приборы для измерения скоростей и ускорений», «Тахометры», «Основы конструирования приборов точной механики».

В 1976г. кафедру возглавил профессор Борис Александрович Арефьев, известный специалист в области автоматического управления и газовых опор. В это время на кафедре производилась

подготовка специалистов по специальности «Приборы точной механики» со специализациями «Приборы времени», «Приборы для измерения длин и углов» и «Приборы контроля размеров».

С 1985 года кафедрой заведовал основатель магниторезонансного класса изображений профессор Владислав Александрович Иванов. В связи с развитием техники и потребностью в выпуске инженерных кадров по разработке и эксплуатации магнитно-резонансных томографов с 1992 года кафедра начала подготовку инженеров по специализации «Компьютерная томография» и была переименована в кафедру Измерительных технологий и компьютерной томографии.

С 2005г. кафедру возглавляет доктор технических наук, профессор Мария Яковлевна Марусина, являющаяся председателем УМК по специальности 200101 «Приборостроение» УМО ВУЗов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники. На кафедре ведутся научно-исследовательские работы по следующим направлениям: теоретико-групповые методы анализа и синтеза информационно-измерительных систем, метрологическое обеспечение нанотехнологий, микромеханические приборы и системы, томографические методы диагностики объектов (МРТ, КТ, ПЭТ), разработка и создание ЯМР-томографа. Научно-исследовательская работа кафедры получила финансовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований (сотрудниками кафедры выиграно четыре конкурсные заявки на гранты РФФИ). В 2005г. кафедра заняла III место по итогам конкурса ведущих научно-педагогических коллективов СПбГУ ИТМО.

В настоящее время кафедра проводит подготовку инженеров по направлениям:

- двухуровневая инженерная подготовка (бакалавр — 4 года и магистр — 2 года) по направлению 200100 «Приборостроение» по профилю «Приборостроение» со специализациями: «Приборостроение» (бакалавр), «Информационно-измерительные комплексы» (магистр), «Томографические методы диагностики» (магистр);

- специалист (5 лет) по специальности 200101 «Приборостроение» со специализациями: «Компьютерная томография», «Методы и средства измерения механических величин».

Кафедра имеет персональную страничку в интернете:

<http://faculty.ifmo.ru/tomograph>.

Юрий Арменакович Гатчин
Вера Леонидовна Ткалич
Андрей Сергеевич Виволанцев
Елисей Андреевич Дудников

Введение в микроэлектронику

Учебное пособие

В авторской редакции
Компьютерная верстка
Дизайн обложки

Редакционно-издательские отдел СПбГУ ИТМО

Зав. редакционно-издательским отделом

Лицензия ИД №00408 от 05.11.99

Подписано к печати

Заказ №

Тираж 100экз.

Отпечатано на ризографе

А.С. Виволанцев

Н.Ф.Гусарова