

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
Кафедра технологии приборостроения

621.38(07)
К885

НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Методические указания

Челябинск
Издательский центр ЮУрГУ
2015

УДК 621.38-022.53(075.8)
К885

*Одобрено
учебно-методической комиссией физического факультета*

Рецензент В.А. Бухарин

К885 **Наноэлектроника:** методические указания / составитель
А.М. Кувшинов. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. –
33 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам, обучающимся по направлению 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» в изучении дисциплины «Наноэлектроника». В методических указаниях отражены состав и объем дисциплины, темы лекций, практических занятий и лабораторных работы, краткое содержание дисциплины; вопросы к экзамену; ссылки на литературу.

Методические указания также могут использоваться студентами родственных специальностей для изучения схожих дисциплин

УДК 621.38-022.53(075.8)

© Издательский центр ЮУрГУ, 2015

СВЕДЕНИЯ О КУРСЕ

В соответствии с учебным планом направления 210100.62 «Электроника и наноэлектроника» и рабочей программой дисциплины, курс наноэлектроники изучается в объеме, представленном в табл. 1

Таблица 1

Вид учебной работы	Всего часов	Распределение по семестрам в часах	
		Номер семестра	
		5	6
Общая трудоёмкость дисциплины	180	72	108
<i>Аудиторные занятия</i>	108	54	54
Лекции (Л)	72	36	36
Практические занятия, семинары и (или) другие виды аудиторных занятий (ПЗ)	18	9	9
Лабораторные работы (ЛР)	18	9	9
<i>Самостоятельная работа (СРС)</i>	65	16	49
Подготовка к контрольным работам	30	16	14
Подготовка к практическим занятиям	35	0	35
<i>Контроль самостоятельной работы студента (КСР)</i>	7	5	2
Контрольные работы	3,5	2	1,5
Доклады на практических занятиях	3,5	0	3,5
Вид итогового контроля (зачет, экзамен)		зачет	экзамен

В табл. 2 приводится содержание курса.

Таблица 2

№ раздела	Наименование разделов дисциплины	Объем аудиторных занятий по видам в часах			
		Всего	Л	ПЗ	ЛР
1	Вводный раздел	2	2	0	0
2	Конструкции элементов полупроводниковых ИМС	12	8	2	2
3	Конструкции элементов гибридных ИМС	11	6	2	3
4	Базовые технологии производства ИМС	11	7	0	4
5	Физико-технологические основы производства ИМС	18	13	5	0
6	Направления развития наноэлектроники	2	2	0	0
7	Зондовые методы исследования наноструктур	5	5	0	0
8	Развитие существующих технологических подходов	20	6	5	9

Окончание табл.2

№ раздела	Наименование разделов дисциплины	Объем аудиторных занятий по видам в часах			
		Всего	Л	ПЗ	ЛР
9	Квантвразмерные полупроводниковые структуры	4	4	0	0
10	Углеродные наноструктуры в нанoeлектронике	6	4	2	0
11	Одноэлектроника	4	4	0	0
12	Устройства функциональной электроники	13	11	2	0

В табл. 3–5 приведены темы лекций (табл. 3), практических занятий (табл. 4) и лабораторных работ (табл. 5).

Таблица 3

№ лекции	№ раздела	Наименование или краткое содержание лекционного занятия	Кол-во часов
1	1	Основные понятия об электронике как науке и технологической области	2
2	2	Конструкция биполярных интегральных транзисторов	2
3	2	Конструкции интегральных диодов и стабилитронов	1
4	2	Конструкции резисторов и конденсаторов в полупроводниковых ИМС	2
5	2	Взаимодействие на границе Si-Al, SiO ₂ -Al. Проводники и контактные площадки в полупроводниковых ИМС.	1
6	2	Конструкция интегральных МДП-транзисторов	2
7	3	Подложки гибридных ИМС	1
8	3	Пленочные резисторы	2
9	3	Пленочные конденсаторы	2
10	3	Проводники и контактные площадки в гибридных ИМС	1
11	4	Монокристаллический Si в интегральной технологии	1
12	4	Планарно-эпитаксиальная технология изготовления биполярных транзисторов	2
13	4	Технология изготовления МДП-приборов	2
14	4	Технология изготовления гибридных ИМС	2
15	5	Строение и свойства тонких пленок	2
16	5	Применяемые методы нанесения тонких пленок	2
17	5	Фотолитография в технологии ИМС	2
18	5	Точечные дефекты в полупроводниках	2
19	5	Физические основы и технология диффузии примесей	4
20	5	Проблемы чистоты поверхностей и помещений	1

Окончание табл.3

№ лекции	№ раздела	Наименование или краткое содержание лекционного занятия	Кол-во часов
21	6	Обзор перспективных направлений развития микро- и нанoeлектроники	2
22	7	Сканирующая туннельная микроскопия	2
23	7	Атомно-силовая микроскопия	2
24	7	Ближнепольная оптическая микроскопия	1
25	8	Перспективные методы нанесения тонких пленок	2
26	8	Рентгеновская и электронно-лучевая литография	2
27	8	Легирование Si ионной имплантацией	2
28	9	Гетероструктуры и их применение	2
29	9	Квантовые точки, проволоки, ямы.	2
30	10	Строение и свойства углеродных наноструктур	2
31	10	Приборы на углеродных нанотрубках	2
32	11	Физические основы одноэлектроники	2
33	11	Одноэлектронные приборы	2
34	12	Запоминающие устройства на МДП-структурах	2
35	12	Устройства оптоэлектроники	4
36	12	Устройства акустоэлектроники	2
37	12	Наносенсорика	3

Таблица 4

№ занятия	№ раздела	Наименование или краткое содержание практического занятия, семинара	Кол-во часов
1	2	Расчет элементов, выбор и проблемы совместимости материалов в полупроводниковых ИМС	2
2	3	Расчет элементов, выбор и проблемы совместимости материалов в гибридных ИМС	2
3	5	Проблемы разработки топологии, выбор технологий изготовления ИМС	3
4	5	Задачи на диффузию примесей в полупроводник	2
5	8	Перспективные методы и оборудование для нанесения тонких пленок	2
6	8	Оборудование для рентгеновской и электронно-лучевой литографии, ионной имплантации примесей	3
7	10	Методы получения углеродных нанотрубок. Приборы на углеродных нанотрубках	2
8	12	Наносенсоры	2

Таблица 5

№ занятия	№ раздела	Наименование или краткое содержание лабораторной работы	Кол-во часов
1	2	Изучение конструкции полупроводниковых микросхем	2
2	3	Изучение конструкции гибридных микросхем	3
3	4	Изучение методов нанесения тонких пленок	4
4	8	Изучение методов изготовления шаблонов	4
5	8	Изучение технологии двойной литографии	5

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ КУРСА

1. Вводный раздел

Курс нанoeлектроники, изучаемый студентами направления «Электроника и нанoeлектроника», охватывает широкий круг вопросов в быстро развивающейся научной и практической сфере электронных технологий. В рамках одного издания невозможно последовательно изложить все аспекты этой сферы.

Цель данных методических указаний – сориентировать студентов в существующих и перспективных технологиях, и указать на литературу для детального изучения их физико-технологических основ.

Курс состоит из двух частей. В первой части (разделы 1–5) изложены базовые микрoeлектронные технологии. Во второй части (разделы 6–12) обсуждаются перспективы развития нанoeлектронных технологий. Такое изложение соответствует логике развития технологий в области электроники. Даже при применении принципиально иных материалов, перспективные конструкции нанoeлектронных приборов предполагают изготовление в традиционных для микрoeлектроники технологических процессах – литографии, нанесении тонких пленок и др. Поэтому понимание устройства и принципов работы нанoeлектронных устройств требует знания устройства, принципов работы и технологии изготовления традиционных микрoeлектронных устройств.

Электроника (от греч. Ηλεκτρόνιο — электрон) — наука, занимающаяся изучением взаимодействия электронов с электромагнитными полями и разработкой методов создания электронных приборов, устройств или элементов, используемых, в основном, для передачи, обработки и хранения информации.

Развитие научных представлений и технологий изготовления электронных устройств привело к появлению *микрoeлектроники* – области науки и техники, продуктом которой являются микроминиатюрные устройства, выполняющие достаточно сложные и разнообразные функции по преобразованию электрических сигналов.

Задачи, решаемые сейчас при помощи микрoeлектронных устройств, исторически возникли до их появления и решались при помощи различных

электрических схем. Были разработаны электрические схемы, включающие небольшое разнообразие типовых элементов и схем, при помощи которых можно было решать самые разнообразные задачи по преобразованию сигналов, особенно в цифровых устройствах. Основным направлением развития микроэлектроники стала реализация элементов электрических схем в микро- и наноразмерных масштабах.

Интегральная технология. Является основой создания микромасштабных устройств. Суть ее заключается в том, что все элементы электрических схем выполнены на едином физическом носителе, а все однотипные элементы выполняются в едином технологическом процессе.

Микроэлектронные устройства выпускаются в виде *интегральных микросхем (ИМС)* – изделий для преобразования сигналов, произведенных в едином технологическом цикле.

По конструктивно-технологическому исполнению различают следующие виды ИМС:

- полупроводниковые (биполярные, МОП);
- гибридные (пленочные) (тонкопленочные, толстопленочные).

Принципы массового производства:

- групповое изготовление: в технологическом оборудовании закрепляются пластины с заготовками десятков микросхем, которые затем разъединяются;
- взаимозаменяемость и подгонка: из одинаковых заготовок структур выполняются разные элементы, что позволяет уменьшить число технологических операций и выпускать серии микросхем различного назначения.

Применение этих принципов обеспечивает *планарная технология*: все ЭРЭ располагаются на одной стороне подложки, в один слой. Это позволяет иметь одновременный доступ к большому числу элементов, располагать на поверхности контактные площадки и выводы, получать диэлектрические слои окислением Si.

2. Конструкции элементов полупроводниковых ИМС

Структура и топология элементов полупроводниковых ИМС описаны в [1, 2, 3].

Полупроводниковые микросхемы выполняются на кристалле полупроводника. Основным полупроводником является Si.

В основе работы полупроводниковых микросхем лежат два основных принципа:

- возможность управления электропроводностью области кристалла полупроводника за счет введения в эту область легирующей примеси в определенной концентрации;
- управляющие свойства энергетических переходов, позволяющие создавать на кристалле полупроводниковые приборы.

В качестве энергетических переходов используются р-п переходы, структуры типа «металл-диэлектрик-полупроводник» (МДП, также называются МОП – «металл-диэлектрик-полупроводник», если диэлектрик – SiO_2).

Элементы схем реализуются за счет создания в кристалле областей с различным типом и величиной электропроводности:

- области полупроводника, легированные примесями р- и п-типа с различной концентрацией; используются для создания полупроводниковых приборов, резисторов, обкладок конденсаторов, изоляции;
- металлические проводники; используются для соединения элементов, обкладок конденсаторов;
- диэлектрические области; используются для изоляции элементов схем друг от друга и в качестве диэлектрика конденсаторов.

Выбор полупроводника и сопутствующих материалов обусловлен сочетанием их физических свойств, прежде всего структурных параметров. Типично: полупроводник Si, проводка Al, диэлектрические слои SiO_2 .

Применение интегральной технологии и принципов массового производства. Основными элементами полупроводниковых микросхем являются п-р-п транзисторы и МОП-транзисторы. Диоды, стабилитроны и пассивные элементы изготавливаются из областей, которые входят в конструкцию основных элементов, чтобы можно было изготавливать их в едином технологическом цикле.

Требования к интегральным транзисторам:

- малое время переключения;
- низкое энергопотребление;
- малые токи утечки и высокое напряжение пробоя;
- отсутствие паразитных р-п переходов и коротких замыканий;

Структура и топология интегральных транзисторов разрабатываются так, чтобы максимально выполнить эти требования

Биполярные транзисторы. Базовая структура п-р-п транзистора включает эпитаксиальный коллекторный п-слой (типичная концентрация примеси 10^{16} см^{-3}), базовый р-слой (10^{18} – 10^{19} см^{-3}), высоколегированный скрытый слой и контактные области эмиттера и коллектора (10^{20} – 10^{21} см^{-3}). Транзистор располагается на подложке р-типа (10^{15} см^{-3}), коммутируется к другим элементам схемы разводкой из Al, изоляция по поверхности – из SiO_2 . Низколегированные слои обеспечивают высокое напряжение пробоя и малые токи утечки. Скрытый слой создает низкоомный путь для электронов от эмиттера к коллектору. Сильное легирование контактных областей необходимо, чтобы предотвратить возникновение паразитных р-п переходов при растворении (до 10^{18} см^{-3}) Al, являющегося р-примесью в Si.

Транзисторы р-п-р обладают заведомо худшими характеристиками, и потому изготавливаются на основе слоев п-р-п транзистора: базовые р-области используются в качестве эмиттера и коллектора, контактный p^+ -слой, эпитаксиальный п-слой и скрытый p^+ -слой – в качестве базы.

МОП-транзисторы и комплементарные МОП-структуры. Структура МОП-транзистора включает участок низколегированной (10^{13} – 10^{15} см⁻³) подложки под формирование канала, высоколегированные (10^{20} – 10^{21} см⁻³) области стока и истока, тонкий слой подзатворного диэлектрика. Подложка и сток/исток имеют противоположные типы проводимости. Подложка обеспечивает высокое напряжение пробоя и малые токи утечки, а также низкие паразитные емкости, что снижает время переключения. Подзатворный диэлектрик обеспечивает изоляцию канала от затвора и усиливает электрическое поле затвора. Часто используется SiO₂ из-за хорошей технологичности, однако лучших параметров позволяют добиться диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью (для SiO₂ $\epsilon = 3,9$), такие как Si₃N₄ ($\epsilon = 6,3$ – $7,1$), ZrO₂ ($\epsilon = 25$). Конструкция МОП-транзисторов проще и технологичнее, чем биполярных, однако долгое время не удавалось добиться достаточно низких пороговых напряжений. Разводка и изоляция выполняются аналогично биполярным транзисторам.

Комплементарные МОП-структуры (КМОП-структуры) представляют собой пару из р-канального и n-канального МОП транзисторов. Чтобы разместить их на одной подложке, для одного из транзисторов выполняется «карман», легируемый с примесью типом проводимости, противоположным подложке. КМОП-структуры являются основой логических элементов для современных цифровых ИМС.

Диоды. Различают биполярные диоды и диоды Шоттки. Биполярные диоды выполняются из двух областей биполярного транзистора либо в виде транзистора, у которого один из р-n переходов замкнут разводкой.

Диод Шоттки образуется в месте контакта металла к эпитаксиальному n-слою. Второй (невыпрямляющий) контакт выполняется к n⁺-области. Параметры диодов Шоттки лучше, чем у биполярных, но должны использоваться металлы с подходящей электронной структурой и хорошей воспроизводимостью контакта (Ti, W, сплавы Ni – Pt).

Резисторы. Сопротивление резисторов определяется их геометрическими размерами (длина l , ширина b , площадь поперечного сечения S) и удельным сопротивлением материала (ρ_v объемное, ρ_s поверхностное):

$$R = \rho_v \frac{l}{S} = \rho_s K_\phi,$$

где $K_\phi = \frac{l}{b}$ – коэффициент формы.

Различают диффузионные, пинч- и ионно-легированные резисторы.

Диффузионные резисторы изготавливаются на основе базовой р-области, обладают хорошей воспроизводимостью номиналов, но низким сопротивлением ($\rho_s \sim 100$ Ом/□).

Пинч-резисторы изготавливаются на основе донной части базовой р-области, расположенной под эмиттерной областью, где концентрация дырок низка. Резистор должен быть включен так, чтобы р-n переход был

обратносмещенным и выполнял функции изоляции. Имеют $\rho_S = 2-5 \text{ кОм}/\square$, но низкую воспроизводимость номиналов.

Ионно-легированные резисторы конструктивно аналогичны диффузионным, но могут иметь $\rho_S = 0,5-20 \text{ кОм}/\square$ за счет малой толщины. Обладают хорошей воспроизводимостью номиналов, но требуют дополнительной операции ионного легирования.

Коэффициент формы может принимать значения $0,25-10^4$, резисторы выполняют в форме прямоугольников, при больших K_ϕ – меандра.

Конденсаторы. Емкость плоского конденсатора определяется как

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где S – площадь перекрытия обкладок,

d – расстояние между обкладками,

ε – диэлектрическая проницаемость диэлектрика.

Различают диффузионные и МДП-конденсаторы.

Диффузионный конденсатор использует в качестве диэлектрика область контакта р- и n^+ -областей, являющихся обкладками. Изготавливаются в едином техпроцессе с транзисторами. Недостаток – низкая емкость, т.к. перекрытие обкладок ограничено толщиной р- и n^+ -областей.

МДП-конденсатор располагается на поверхности пластины, использует наносимый на поверхность диэлектрик, а в качестве обкладок – слой металлизации и n^+ -слой. Емкость может быть значительно выше, чем у диффузионных конденсаторов. МДП-конденсаторы можно изготовить в едином техпроцессе с МОП-транзисторами, используя для них подзатворный диэлектрик.

Пути повышения емкости конденсаторов – использование диэлектриков с высокой проницаемостью и уменьшение толщины диэлектрика, ограниченное пробоем и туннелированием электронов через диэлектрик.

Проводники и контактные площадки. В основном выполняются из Al, в один слой. Должны иметь хорошую проводимость, теплопроводность и хорошую адгезию к Si и материалам внешних выводов. Контакты Si и внешних выводов к материалу проводников должны быть невыпрямляющими. Направлениями развития являются повышение плотности упаковки элементов за счет создания многоуровневой разводки (слои разделены диэлектриком) и многослойных проводников, обладающих лучшими характеристиками за счет специализации слоев по функциям (контактный, адгезионный, проводящий и др.).

3. Конструкции элементов гибридных ИМС

Конструкции и топологические решения подробно описаны в [1, 4]

В гибридных ИМС используются полупроводниковые активные элементы и пленочные пассивные элементы. Пленки делят на тонкие (толщиной $< 1 \text{ мкм}$) и толстые (толщиной $1-100 \text{ мкм}$). В качестве конструктивной основы

используются подложки из стекол, ситаллов, керамики. В пленочной технологии, как и в полупроводниковой, важно добиться хорошей адгезии пленок к подложке и соответствия друг другу физических свойств используемых материалов. Гибридные микросхемы обладают гораздо большими размерами элементов, чем полупроводниковые – как правило, > 100 мкм, однако, применение специальных материалов дает более высокие электрические параметры, точность и стабильность пассивных элементов.

Подложки. Выполняют функции электрической изоляции элементов, теплоотвода, являются физическим носителем ИМС.

Требования к подложкам заключаются в выполнении их функций (низкая электропроводность, высокая электрическая прочность, высокая теплопроводность) и возможности нанесения на них пленок. Последнее выражается в удачном сочетании физико-механических свойств подложки и пленки (хорошая адгезия, близкие величины температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР), малая шероховатость) и устойчивости к воздействиям при изготовлении ИМС (термическим, химическим). В зависимости от конкретных требований, в качестве подложек применяются следующие материалы: боросиликатные стекла, ситаллы, поликор, бериллиевая керамика, Al + слой диэлектрика, эмалированная сталь.

Резисторы. Изготавливаются из пленок резистивных материалов, аналогично резисторам в полупроводниковых ИМС выполняются в виде полосок или меандров и имеют $K_{\phi} = 0,25 - 10^4$.

Могут иметь подгоночные секции, позволяющие достигать лучшей точности (5–10 %).

Материалы резисторов:

- металлы: хром, тантал;
- сплавы: РС-3001, РС-3710 (37,9 % Cr, 9,4 % Ni, 52,7 % Si); МЛТ-3М (43,6 % Si, 17,6 % Cr, 14,1 % Fe, 24,7 % W). $\rho_S = 0,05 - 50$ кОм/□;
- керметы – металл + диэлектрик, например (50–90 % Cr, 10–50 % SiO). $\rho_S = 0,1 - 10$ кОм/□, высокая стабильность, но худшая воспроизводимость по сравнению с металлическими сплавами.

Конденсаторы. Состоят из двух проводящих слоев, разделенных слоем диэлектрика, что аналогично МДП-конденсатору в полупроводниковых ИМС.

Требования к конденсаторам – минимальные габаритные размеры, воспроизводимость характеристик при производстве, совместимость технологии изготовления с технологией изготовления других элементов.

Основным элементом является диэлектрик, обкладки подбираются исходя из совместимости с ним, в основном применяются Al и Au.

Диэлектрики:

- оксиды: SiO, GeO, Al₂O₃, Ta₂O₅, TiO₂;
- титанаты: BaTiO₃, CaTiO₃;
- сложные стекла: (I₂O₃, B₂O₃, SiO₂, Al₂O₃, CaO), (BaO, Ta₂O₅, Bi₂O₃, I₂O₃, GeO₂).

Типичная толщина диэлектрика 100–300 нм, удельная емкость 50–500 пФ/мм².

Могут иметь подгоночные секции, позволяющие достигать лучшей точности (< 5 %).

Проводники и контактные площадки. Аналогичны проводникам и контактными площадкам полупроводниковых ИМС. В сочетании с материалами подложек типична двухслойная конструкция: адгезионный подслоя (Cr, Ni–Cr, Ti, 50–100 нм) и проводящий слой (Au, Cu, Al, 300–500 нм).

4. Базовые технологии производства ИМС

Монокристаллический Si в электронной технологии. Основной полупроводник. Причины широкого применения – подходящая ширина запрещенной зоны, технологичность, высокие и стабильные диэлектрические свойства SiO₂, большие природные запасы. Основные физические свойства Si приведены в табл. 6.

Таблица 6

Наименование физического свойства	Значение
Концентрация атомов при 298 К, см ⁻³	4,99·10 ²²
Плотность при 298 К, г/см ³	2,329
Температура плавления, °С	1417
ТКЛР, К ⁻¹	4,2·10 ⁻⁶
Диэлектрическая проницаемость	11,7
Ширина запрещенной зоны при 300 К, эВ	1,11
Эффективная масса электронов, отн.ед.	0,33
Подвижность электронов при 300 К, см ² /(В·с)	1400
Эффективная масса дырок, отн.ед.	0,55
Подвижность дырок при 300 К, см ² /(В·с)	500
Концентрация собственных носителей заряда при 300 К, см ⁻³	1,5·10 ¹⁰

В производстве используется в виде круглых пластин диаметром до 300 мм, толщиной 0,2–1,0 мм. Пластины должны иметь высокий класс чистоты поверхности, с шероховатостью на порядок ниже минимального размера элемента. Пластины получают резкой монокристалла Si цилиндрической формы. После завершения изготовления кремниевой части ИМС пластина разрезается на платы отдельных ИМС.

В качестве примесей используются в основном элементы III (р) и V (n) групп: Al, В, Sb, As, Р, Au. Типичные концентрации примесей превосходят концентрацию собственных носителей заряда при T~300 К, по крайней мере, на 3 порядка, поэтому можно считать, что проводимость любой легированной области определяется концентрацией примеси. Свойства Si подробно обсуждаются в [1, 5, 6].

Основные процессы при изготовлении ИМС. Изготовление области, легированной до заданной концентрации включает 3 основных процесса:

- окисление поверхности Si для защиты не легируемой части;

- фотолитография со вскрытием окон в SiO_2 под легирование;
- легирование диффузией примеси или ионной имплантацией.

Формирование пленок на поверхности включает нанесение сплошной пленки и фотолитографию для формирования рисунка.

Кроме того, техпроцессы могут включать эпитаксиальное наращивание слоя, подготовительные и завершающие операции.

Планарно-эпитаксиальная технология изготовления ИМС на биполярных транзисторах. Области изготавливаются в порядке уменьшения глубины (см. конструкцию n-p-n транзистора). Последовательность операций:

1. Подготовительные операции (очистка, шлифовка, полировка поверхности, стравливание слоя с нарушенной структурой).
2. Изготовление скрытого n^+ -слоя.
3. Травление SiO_2 , эпитаксиальное наращивание коллекторного n-слоя.
4. Изготовление изолирующих p-областей.
5. Изготовление базовой p-области.
6. Изготовление контактных эмиттерных/коллекторных n^+ -областей, нижних обкладок МДП-конденсаторов.
7. Окисление поверхности.
8. Изготовление разводки, контактных площадок, верхних обкладок МДП-конденсаторов из пленки Al на поверхности SiO_2 .
9. Нанесение защитной диэлектрической пленки, фотолитография под контакты к выводам ИМС.
10. Завершающие операции: установка в корпус, герметизация, контроль, маркировка, упаковка.

Технология изготовления ИМС на МОП-транзисторах и КМОП-структурах. Последовательность операций для ИМС на n-канальных МОП-транзисторах:

1. Подготовительные операции (очистка, шлифовка, полировка поверхности, стравливание слоя с нарушенной структурой).
2. Изготовление изолирующих областей.
3. Изготовление n^+ -областей стока и истока, нижних обкладок МДП-конденсаторов.
4. Окисление поверхности.
5. Фотолитография и выращивание тонкого подзатворного диэлектрика.
6. Изготовление разводки, контактных площадок, верхних обкладок МДП-конденсаторов из пленки Al на поверхности SiO_2 .
7. Нанесение защитной диэлектрической пленки, фотолитография под контакты к выводам ИМС.
8. Завершающие операции: установка в корпус, герметизация, контроль, маркировка, упаковка.

Для ИМС на p-канальных МОП-транзисторах технология отличается типом примесей. Для КМОП-ИМС между операциями 1 и 2 добавляется операция легирования для создания «кармана», выполняющего роль подложки для одного из транзисторов.

Технология изготовления гибридных ИМС. Заключается в последовательном нанесении слоев на подложку и формировании элементов масочным методом, фотолитографией или двойной фотолитографией.

Последовательность нанесения слоев комбинированным методом масок и двойной фотолитографии:

1. Нанесение сплошных резистивной и проводящей пленок.
2. Фотолитография и селективное травление проводящего слоя.
3. Фотолитография резистивного слоя
4. Последовательное напыление через маску нижних обкладок, диэлектрика и верхних обкладок конденсаторов.
5. Нанесение защитного слоя
6. Монтаж навесных компонентов.

Технологии изготовления полупроводниковых ИМС описаны в [1, 3], гибридных ИМС – в [1, 4].

5. Физико-технологические основы производства ИМС

Строение и свойства тонких пленок [7, 8]. Под тонкой пленкой мы будем понимать объект со следующими особенностями:

- существует на подложке из другого материала, является единой и отдельной от подложки фазой
- толщина много меньше размеров в направлении поверхности подложки
- толщина сравнима или меньше характерных параметров физических процессов или структурных параметров строения пленки.

На практике можно условно считать, что тонкие пленки – это пленки толщиной < 1 мкм.

Свойства тонких пленок часто существенно отличаются от свойств объемных образцов тех же материалов. Это связано с большой ролью поверхностных атомов, имеющих ненасыщенные связи, приводящие к перестройке структуры и с самим наличием поверхности раздела фаз, изменяющим параметры физических процессов в пленке.

Различают два основных типа структуры тонких пленок:

- сплошная: пленка представляет собой «тонкий кристалл», закрывая всю поверхность подложки некоторым числом непрерывных слоев атомов;
- островковая: пленка представляет собой сеть из островков, разделенных свободными участками подложки, но участвующих в общих физических процессах.

Влияние структуры тонкой пленки покажем на примере важнейшего для электроники свойства – электропроводности. Для сплошной металлической пленки появляется дополнительный механизм рассеяния электронов – отражение от границы пленки. Если толщина пленки d сравнима с длиной свободного пробега электронов λ , это существенно уменьшает ее электропроводность σ_{mn} по сравнению с объемным образцом $\sigma_{об}$:

$$\frac{\sigma_{mn}}{\sigma_{об}} = \frac{3d}{4\lambda} \left(0,4228 + \ln \frac{\lambda}{d} \right).$$

Для островковой пленки возможна проводимость активационного типа, т.е. туннельный переход электронов с одного островка на другой, если обладают достаточной энергией в результате теплового движения или внешних воздействий. Электропроводность определяется средним размером островков a , расстоянием между ними b , прозрачностью перехода D и тепловым фактором kT :

$$\sigma = \frac{e^2 b^2}{a} D \exp\left(-\frac{e^2}{akT}\right).$$

Механизмы роста тонких пленок [8]. Все методы нанесения тонких пленок на микроскопическом уровне совмещают в себе два основных момента:

- материал пленки находится в виде отдельных атомов, ионов или молекул в некоторой среде, обеспечивающей его транспорт к подложке (жидкости, газе, парах самого материала, плазме);
- в области контакта среды и подложки существуют энергетически выгодные для частиц материала пленки положения на подложке, что приводит к его осаждению и формированию пленки.

Структура и свойства пленок зависят от условий осаждения, таких как температура подложки, энергия частиц материала, скорость роста пленки, присутствие других веществ, воздействие электромагнитных полей и др.

Выделяют три механизма роста пленок:

- островковый (Фольмера – Вебера): частицы пленки связаны между собой сильнее, чем с подложкой; первые атомы пленки сцепляются с подложкой, а последующие – с уже осажденными атомами, формируя островки, которые могут постепенно срастаться в сплошную пленку или образовывать островковую;
- послойный (Франка – Ван-дер-Мерве): частицы пленки связаны между собой слабее, чем с подложкой; атомы стремятся занять свободное место на подложке, пока не закроют ее полностью монослоем, затем растет следующий слой, т.к. для формирования островков связи слабы и т.д.;
- промежуточный (Странского – Крастанова): вырастает 1-2 монослоя, затем формируются островки.

Основные методы нанесения тонких пленок [1, 8]. Широкое применение в электронике имеют методы термического испарения в вакууме, ионного (катодного) распыления, ионно-плазменного распыления, термического окисления Si, химического осаждения из газовой фазы.

Метод термического испарения в вакууме: Напыляемое вещество разогревается до высокой температуры и испаряется. Когда поток пара встречает на своем пути подложку, отдельные атомы вещества конденсируются на ней, постепенно формируя пленку. Для создания направленного потока пара требуется создание вакуума с остаточным давлением 10^{-3} – 10^{-5} Па. Такое

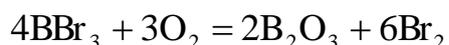
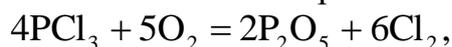
давление обеспечивает длину свободного пробега частиц пара много больше расстояния между испарителем и подложкой. При повышении давления атомы пара будут сталкиваться с атомами среды и распределяться по объему камеры. Это исторически первый и наиболее простой метод, его возможности ограничены по ресурсу испарителей, нанесению тугоплавких материалов, инерционности и точности.

Метод ионного (катодного) распыления. На распыляемую мишень-катод направляется поток ионов газа (давление 1–10 Па), ускоренных до энергий 100–5000 эВ. В камере зажигается тлеющий разряд. При бомбардировке катода ионы выбивают из него атомы, которые осаждаются на подложке. Газ может быть инертным или активным. В последнем случае на подложку осаждаются продукты реакции распыляемого вещества и газа. Металлы распыляются на постоянном токе. Для диэлектриков используется переменный ток: в один полупериод происходит распыление, а в другой с диэлектрика снимается накопленный заряд. Достоинствами метода ионного распыления являются низкая инерционность, высокий ресурс мишеней, возможность нанесения пленок сложного состава, недостатками – сложная электрическая часть и возможность загрязнения пленок.

Метод ионно-плазменного распыления. Используются три электрода – катод-мишень, анод и дополнительный термокатод. Давление рабочего газа поддерживается на уровне 10^{-2} – 10^{-1} Па. В газе возбуждается несамостоятельный разряд, поддерживаемый эмиссией электронов из термокатада. На пути от катода к аноду эти электроны ионизируют рабочий газ. Возникает дуговой разряд с током 1–10 А и напряжением ~100 В. Ионы вещества мишени выбиваются ионами газа и осаждаются на подложку отрицательным потенциалом 1–3 кВ, который вытягивает ионы из плазмы разряда. По сравнению с ионным распылением выше скорость и стабильность процесса напыления, лучше вакуум и чистота пленок, однако сложнее электрическая часть, есть проблемы охлаждения при разогреве разрядом частей установки.

Термическое окисление Si. Окисление проводится при атмосферном давлении в горизонтальных цилиндрических кварцевых реакторах при температуре 800–1200 °С. Различают нанесение пленок в сухом и во влажном кислороде. Качество пленок выше в сухом кислороде, но скорость окисления выше во влажном. Скорость зависит также от давления кислорода.

Химическое осаждение из газовой фазы фосфоросиликатного (ФСС) и боросиликатного (БСС) стекла. Основано на протекании реакций:



при температуре 800–1100 °С. Получаемые таким образом оксиды находятся в состоянии размягчения и образуют ФСС – $(\text{P}_2\text{O}_5)_x(\text{SiO}_2)_y$ и БСС – $(\text{B}_2\text{O}_3)_x(\text{SiO}_2)_y$.

ФСС и БСС используются как источники Р и В для легирования Si.

Фотолитография [1, 4]. Основной метод формирования конфигураций пленочных элементов. Материал пленки наносится на подложку сплошным слоем, поверх материала наносится *фоторезист* – защитное вещество, изменяющее свою химическую стойкость при экспонировании светом. Плата с нанесенным фоторезистом экспонируется через *фотошаблон* – трафарет из прозрачных и непрозрачных участков, повторяющий конфигурацию слоя пленки. В результате экспонирования формируется рисунок фоторезиста, имеющий химически стойкие участки над будущими элементами и химически нестойкие – над будущими пробельными местами. Полученная структура подвергается травлению, при котором пленка и фоторезист удаляются с пробельных мест.

Выделяют позитивные и негативные фоторезисты. Позитивные фоторезисты имеют низкую химическую стойкость в экспонированных областях, т.е. соответствуют позитивному фотошаблону, с непрозрачными участками над будущими элементами ИМС. Негативные фоторезисты имеют высокую химическую стойкость в экспонированных областях, т.е. соответствуют негативному фотошаблону, с непрозрачными участками над будущими пробельными местами.

Для экспонирования используются проекционные оптические системы с уменьшением и мультиплицированием рисунка фотошаблона. Возможности литографических процессов определяют минимальный размер элементов ИМС. Для выполнения рисунка на поверхности ИМС необходимо соблюдение законов геометрической оптики, т.е. отсутствие влияния волновых явлений. Оптическое разрешение составляет $\sim 0,1\lambda$, где λ – длина волны экспонирующего излучения. Используется УФ-излучение с $\lambda > 200$ нм, т.е. элементы ~ 20 нм – технологический предел. Погрешности фотолитографии – области засветки и затенения на краях элементов, возникающие из-за конечной толщины фоторезиста и фотошаблона. Возможности создания тонких слоев фоторезиста и фотошаблонов ограничены механической прочностью материалов.

Точечные дефекты в полупроводниках. Возникают при легировании кристалла полупроводника примесью. Виды дефектов: атомы замещения, междоузельные атомы, вакансии, ассоциаты. Для электроники наибольшее значение имеют атомы замещения. Точечные дефекты изменяют электронную структуру, а, следовательно, и физические свойства полупроводника. Дефект создает одно или несколько локализованных состояний в запрещенной зоне. Влияние этих состояний определяется их энергией. Мелкие уровни определяют электропроводность, т.к. переходы электронов могут осуществляться за счет теплового движения. При высокой концентрации примесные уровни расщепляются в зоны, подобно тому как образуются зоны в самом кристалле полупроводника. Примесные зоны могут пересекаться с разрешенными зонами самого полупроводника (для Si при $8 \cdot 10^{18}$ см⁻³). Глубокие уровни определяют оптические и люминесцентные свойства: кванты света излучаются при переходе с дефектного уровня и при рекомбинации электронов и дырок на нем, что позволяет создавать полупроводниковые оптоэлектронные приборы.

Равновесная концентрация носителей заряда и растворимость примесей может быть определена методом квазихимического описания: процессы генерации и рекомбинации носителей заряда и растворения примесей рассматриваются как обратимые химические реакции, для которых определяются условия равновесия. Метод подробно описан в [9]. Важным выводом является то, что температурная зависимость растворимости примеси имеет максимум при определенной температуре. Именно при такой температуре должно проводиться диффузионное легирование. Для типичных примесей в Si температура максимальной растворимости 900–1200 °С.

Диффузия примесей [9]. Является основным методом легирования полупроводников. Даже легировании ионной имплантацией при последующем отжиге происходит разгонка примеси диффузией.

Математически диффузию в пластину полупроводника можно описать законом Фика:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c(x,t)}{\partial x^2},$$

где x – глубина от поверхности пластины, t – время процесса, D – коэффициент диффузии, $c(x, t)$ – концентрация примеси.

Решение уравнения зависит от начальных и граничных условий. Начальное условие: $c(x, 0) = 0$, $x > 0$. Граничные условия образуют 3 модели.

1. Постоянный источник: за счет притока вещества извне на границе поддерживается постоянная концентрация c_s . Решение уравнения:

$$c(x,t) = c_s \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{Dt}}.$$

2. Полуограниченный источник: в начале процесса на границе концентрация c_0 , с течением времени примесь переходит из источника в пластину; концентрация на границе со стороны источника c_{s1} и пластины c_{s2} при этом разная из-за разности коэффициентов диффузии примеси в источнике (D_1) и пластине (D_2). Решение уравнения:

$$c(x,t) = \frac{c_0}{K + R} \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{D_2 t}},$$

где $K = \frac{c_{s1}}{c_{s2}}$, $R = \sqrt{\frac{D_2}{D_1}}$.

3. Поверхностный источник с отражающей границей: в начале процесса в приповерхностном слое пластины $0 < x < d$ концентрация примеси c_0 , в процессе диффузии атомы примеси распределяются по глубине и не покидают пластину. Для практики интересен случай $x \gg d$, приводящий к решению:

$$c(x,t) = \frac{c_0 d}{\sqrt{\pi D t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right).$$

В табл. 7 показаны методы легирования Si и их соответствие моделям диффузии.

В технологии ИМС области транзисторов легируются последовательно, поэтому создание р-п переходов и каждой следующей области внутри предыдущей требует легирования таким количеством примеси, чтобы нейтрализовать действие примеси из более глубокого слоя. Поскольку легирование неоднородно (см.решения уравнения), необходим подбор материалов с коэффициентами диффузии, обеспечивающими получение р-п переходов на заданной глубине и их сохранность при легировании последующих слоев.

Таблица 7

Источник примеси	Метод легирования	Модель диффузии
Парогазовая фаза	Испарение в запаянной ампуле	Постоянный источник
	В проточной системе с потоком газа-носителя	
Поверхностный источник	Из напыленного металлического слоя	Постоянный источник
	Из эпитаксиального слоя в подложку	Полуограниченный источник
	Из поверхностных окислов (БСС, ФСС), с образованием SiO ₂ и В/Р	
	Из тонкого ионно-имплантированного слоя	Поверхностный источник с отражающей границей

6. Направления развития нанoeлектроники

Традиционное направление развития микроэлектроники – повышение быстродействия и сложности ИС за счет уменьшения размеров и увеличения числа элементов, объединяемых в устройство. При этом предполагается реализация традиционных пассивных и активных элементов и последующее составление электрических схем, а элементной базой являются МОП-структуры на основе кремния.

Перспективы этого направления развития ставятся под сомнение в течение последних ~20 лет. В качестве основных проблем называют следующие:

1. Существенное влияние квантовых эффектов при малых размерах (единицы нм). Некоторые из них: неопределенность положения электронов, туннелирование электронов, квантование тока, образуемого единицами электронов.

2. Сложность создания необходимого распределения легирующих примесей в кристалле кремния. Обусловлена ограниченными возможностями литографических процессов и управления легированием

3. Размерные эффекты. При уменьшении размеров возрастают удельные значения физических величин, как следствие – перегрев, электрический пробой и т.п.

В рамках сохранения традиционного подхода возможно улучшение параметров микроэлектронных устройств за счет решения проблем из второй группы. Совершенствование технологии осуществляется за счет применения новых методов выполнения традиционных технологических операций. При этом часто необходимо создание нового оборудования и материалов.

Наряду с традиционным подходом ведутся разработки в двух основных направлениях:

1. Создание традиционных элементов ИМС при смене элементной базы. Приводит к разработке новых конструкций и технологий изготовления наноэлектронных устройств, с учетом фундаментальных физических ограничений, отсутствием технологических операций, где эти ограничения принципиальны. Требуется кардинальной перестройки производственно-технологической базы, технологии работы с альтернативными материалами во многом еще не разработаны.

2. *Функциональная электроника* – реализация сложных функций электронных устройств за счет физических явлений в материалах без формирования элементов электрических схем в традиционном понимании. Заменяя множество элементов, устройства функциональной электроники могут быть и достаточно большими, не нано-, а микро- и даже макроразмерными. Это во многом снимает технологические проблемы и позволяет изготавливать подобные устройства и при сегодняшнем уровне технологий. Существенные недостатки: для многих функций физические принципы не разработаны, применение разнообразных материалов ухудшает технологичность.

Фундаментальные вопросы микро- и наноэлектроники обсуждаются в [3].

7. Зондовые методы исследования наноструктур

Зондовыми называются методы исследования, где чувствительный элемент (зонд) взаимодействует с атомами на поверхности образца, находясь на расстоянии, сравнимом с атомными размерами (единицы нм). Являются основой изучения и создания наноструктур, которые могут стать базой для электронных устройств. Ниже приводятся основные принципы работы зондовых методов. Подробное описание дано в [10].

Сканирующая туннельная микроскопия (СТМ). Чувствительным элементом является электрод в виде атомарно-тонкой иглы. При подаче на иглу напряжения относительно поверхности образца может происходить туннелирование электронов через зазор между ними. Величина тока сильно зависит от высоты потенциального барьера, определяемой электронной структурой иглы и образца и напряжением, и шириной зазора. Следовательно, по туннельному току можно судить об электронной структуре и рельефе поверхности на атомарном уровне. При этом на ток существенно влияют только 1–2 приповерхностных слоя атомов. При увеличении напряжения возможен перенос атомов между иглой и образцом, т.е. формирование на его поверхности наноструктур.

Основой конструкции туннельных микроскопов являются пьезоэлектрические трубки, которые выполняют одновременно несущую функцию и функцию перемещений зонда за счет деформаций, управляемых напряжением. Отметим, что для СТМ не обязателен вакуум, хотя в вакууме метрологические характеристики и улучшаются. Это связано с тем, что при нормальных условиях в туннельном зазоре большую часть времени не находится ни одной молекулы газов воздуха.

Атомно-силовая микроскопия (АСМ). Чувствительным элементом является *кантилевер* – атомарно-тонкая игла, подвешенная на гибкой консоли. Под воздействием атомных сил притяжения и отталкивания игла перемещается, изгибая консоль. Изгиб измеряется по смещению отраженного от консоли пучка света при помощи фотодиодов. Поскольку атомные силы быстро убывают с ростом расстояния, на изгиб существенно влияют только 1–2 приповерхностных слоя атомов. Измеренный изгиб характеризует силу взаимодействия иглы и поверхности, что позволяет характеризовать рельеф поверхности на атомном уровне и электронную структуру.

В основе конструкции атомно-силового микроскопа также лежит система позиционирования на пьезотрубках. Кантилевер изготавливают методами микроэлектроники (легирование, нанесение пленок, фотолитография, плазменное травление), формируя консоль и иглу из кристалла, являющегося основанием для консоли.

Ближнепольная оптическая микроскопия. Зондом является *субволновая диафрагма* – отверстие размером много меньше длины волны подаваемого в него света видимого диапазона. В субволновой диафрагме не происходит явлений, типичных для волновой и геометрической оптики. Однако электромагнитное поле волны проникает через диафрагму на расстояние порядка размеров отверстия (наглядная аналогия – капля, свисающая из капилляра) – область *ближнего поля*. Если в этой области действует стороннее поле, например – поле приповерхностных атомов, то поле волны изменяется, что влияет и на характеристики света внутри зонда, и может быть измерено оптическими приборами.

Зонд представляет собой оптоволоконный волновод с атомарно-тонким концом. Боковая поверхность зонда покрыта металлической пленкой, чтобы исключить влияние посторонних источников света. Кроме зонда в конструкцию ближнепольного микроскопа входят лазер в качестве источника света, фотоприемник и пьезосистема для позиционирования зонда.

8. Развитие существующих технологических подходов

Перспективные методы нанесения тонких пленок. При уменьшении толщины пленок до величин ~ 10 нм увеличиваются требования к точности и управляемости процессов получения пленок, стабильности их характеристик. Новые конструкции ИМС требуют применения разнообразных материалов. Для

выполнения этих требований получают применение новые методы. Ниже приводятся примеры таких методов.

1. *Молекулярно-лучевая эпитаксия*. В сущности, это вариант термического испарения в вакууме. Установка в области испарителя дополняется диафрагмой с узкой щелью. Это позволяет формировать узкий поток пара и добиваться однородности воздействия на всю площадь подложки. Подложка при этом равномерно перемещается. Поскольку телесный угол, в который пропускается пар, мал, падает скорость напыления, что улучшает управляемость процесса.

2. *Электроэпитаксия из расплава*. Представляет собой вариант известного в кристаллофизике *метода Чохральского*: рост кристалла происходит на границе расплава и затравки. Для этого затравка охлаждается и вытягивается из раствора, и положение в кристалле становится энергетически выгодным. При электроэпитаксии роль затравки выполняет полупроводниковая пластина или подложка. Охлаждение происходит за счет эффекта Пельтье при пропускании тока через расплав и затравку, вытягивание для тонких пленок не нужно.

3. *Золь-гель методы*. Заключаются в переводе мелкодисперсной среды, взвешенной в жидкости (обычно коллоидные растворы) – *золя* в твердофазное состояние – *гель* в результате каких-либо процессов. Исходные вещества и методы гелирования различны. Используются, в частности, гидролиз и поликонденсация спиртовых растворов алкоксидов металлов (*химический гель*), конденсация ионов неорганических солей при гидратации (*физический гель*).

Данные методы подробно описываются в [8].

Литография. Как отмечалось в разделе 5, возможности литографии ограничены волновыми явлениями, проблемами шаблонов и резистов. Логичный шаг по преодолению волновых явлений – резкое уменьшение длины волны экспонирующего потока. Рассмотрим два таких решения – рентгеновскую и электронно-лучевую литографию.

Рентгеновская литография. Типичные линии рентгеновского излучения имеют достаточно малую длину волны (например, $\text{Cu K}_\alpha - 0,15 \text{ нм}$), проблема волновых явлений снимается. Однако возникает ряд других проблем. Излучение с длиной волны $< 190 \text{ нм}$ ионизует воздух и рассеивается. Это ведет к двум требованиям: источник излучения и большая часть пути до экспонируемой пластины должны быть в вакуумной камере; шаблон должен прилегать к пластине, т.е. невозможно масштабирование изображения. Рентгеновское излучение обладает высокой проникающей и низкой ионизирующей способностью, при этом должно поглощаться шаблоном и вызывать химические преобразования в резисте. Решения к текущему моменту: специальные резисты, например – полиметилметакрилат (ПММА); шаблоны в виде металлических пленок на гибком полимерном основании; мощные источники излучения. Основной проблемой являются погрешности из-за толщины немасштабируемых шаблонов (сотни нм), пути ее решения пока неясны.

Электронно-лучевая литография (ЭЛЛ). Волновые свойства электронов определяются длиной волны де Бройля. Искомые значения $< 1 \text{ нм}$ достигаются

при энергии ~ 10 эВ. Установки для ЭЛЛ представляют собой электронно-оптические системы, подобные электронным микроскопам, с рабочим напряжением 20–200 кВ. Электронно-оптическая система должна целиком находиться в вакууме – это главный недостаток, усложняющий и удорожающий установки. Проблема шаблонов и резистов в данном случае решается лучше, чем для рентгеновской литографии. Ионизирующая способность потока электронов выше, чем у рентгеновского излучения. Это позволяет успешно экспонировать специальные резисты, в частности – ПММА. Предложены конструкции *проекционных* и *сканирующих* систем для ЭЛЛ, возможно проецирование с уменьшением и мультиплицированием изображения. Сканирование остросфокусированным пучком позволяет в принципе отказаться от шаблонов, но занимает много времени. Поэтому для производства считаются перспективными системы с *символьным проецированием*. В таких системах применяются шаблоны отдельных часто повторяющихся элементов (символы), которые проецируются в разные точки пластины за счет сканирования прошедшим через них пучком.

Электронно-лучевая и рентгеновская литография описаны в [3, 8].

Легирование ионной имплантацией. Имплантация заключается в бомбардировке поверхности мишени ионами с энергией 10^3 – 10^8 эВ, которые остаются в веществе мишени на определенной глубине. Торможение ионов происходит вследствие их взаимодействия с атомами вещества.

Столкновение в направлении, близком к направлению на ядро атома, из-за высокой кинетической энергии иона приводит к его выходу из кристаллической решетки, т.е. распылению или аморфизации приповерхностных слоев. Интерес представляет случай *каналирования* ионов. Когда ион входит в направлении, близком к одному из кристаллографических направлений в веществе мишени, для его входа имеются «каналы» между атомными рядами, т.е. его движение не направлено на ядро атома мишени на протяжении многих слоев. Глубина проникновения в этом случае определяется отталкиванием электронных оболочек иона и атомов мишени, сопровождающимся небольшими потерями энергии и небольшими изменениями направления движения. Считается, что каналирование происходит при углах входа ионов $\sim 1^\circ$ от кристаллографических направлений.

Глубина имплантации имеет существенный статистический разброс, но в отличие от глубины диффузии значительно более управляема, поскольку есть возможность управлять как энергией ионов, так и направлением их входа. Ионная имплантация позволяет создавать различное распределение концентрации примесей по глубине, тогда как при диффузии каждый следующий слой должен легироваться сильнее предыдущего. После имплантации требуется отжиг для восстановления аморфизованной поверхности. Отжиг сопровождается диффузией, что необходимо учитывать в конструкции и технологии производимых приборов.

Установка для ионной имплантации включает в себя, источник ионов, ускоритель, магнитный сепаратор для отбора ионов с нужной энергией, камеру мишени. Вся установка помещается в вакуумную камеру.

Метод ионной имплантации описан в [1, 3].

9. Квантоворазмерные полупроводниковые структуры

Гетероструктура — выращенная на подложке слоистая структура из различных полупроводников, в общем случае отличающихся шириной запрещённой зоны. Между двумя различными материалами формируется гетеропереход, на котором возможна повышенная концентрация носителей, и отсюда — формирование вырожденного двумерного электронного газа. В отличие от гомоструктур (т.е. контактов двух областей с разной проводимостью, в т.ч. p-n переходов и МОП-структур), обладает большей гибкостью в конструировании нужного потенциального профиля зоны проводимости и валентной зоны.

Гетеропереходы обычно используются для создания потенциальных ям для электронов и дырок в гетероструктурах. Например, лазер на двойной гетероструктуре делают на основе GaAs. В тонкий слой GaAs, который имеет более узкую запрещённую зону по сравнению с расположенными по его краям слоями AlGaAs, инжектируются электроны и дырки, которые рекомбинируют там с испусканием фотонов. Модулированно-легированные гетероструктуры используют для получения двумерного электронного газа с высокой подвижностью, который необходим для исследований дробного квантового эффекта Холла, а также для создания полевых и биполярных транзисторов для сверхбыстрой электроники. Комбинируя различные полупроводники, можно создать и другие структуры: сверхрешётки, структуры с множественными квантовыми ямами. Если полупроводники обладают различными постоянными решётки, то возможно создание структур с самоформирующимися квантовыми точками, квантовыми проводами.

В физике полупроводников под термином *сверхрешётка* принято понимать твердотельную структуру, в которой помимо периодического потенциала кристаллической решётки имеется дополнительный потенциал, период которого существенно превышает постоянную решётки.

Квантовая точка — фрагмент проводника или полупроводника, ограниченный по трём пространственным измерениям и содержащий электроны проводимости. Точка должна быть настолько малой, чтобы были существенны квантовые эффекты. Это достигается, если кинетическая энергия электрона будет заметно больше всех других энергетических масштабов: в первую очередь больше температуры, выраженной в энергетических единицах. Управляемый переход электронов через квантовую точку позволяет создавать полупроводниковые приборы.

Квантовый провод — фрагмент проводника или полупроводника, ограниченный по двум пространственным измерениям и содержащий

электроны проводимости. Квантовые эффекты оказывают существенное влияние на эффекты переноса вследствие расщепления энергетических уровней из-за малых поперечных размеров. В перспективе это должно позволить отказаться от металлических пленок в полупроводниковых структурах.

Квантовая яма — это потенциальная яма, которая ограничивает подвижность частиц с трех до двух измерений, тем самым заставляя их двигаться в плоском слое. Квантово-размерные эффекты проявляют себя когда длина ямы становится сравнима с длиной волны де Бройля частиц (обычно электронов или дырок), и приводят к появлению энергетических минизон. Квантовые ямы широко используются в лазерных диодах, включая красные лазеры для DVD и лазерных указок, инфракрасных лазерах для оптических передатчиков и синих лазерах. Также используются в транзисторах с высокой подвижностью электронов используемых в маломощной электронике. Инфракрасные фотодетекторы также основаны на использовании квантовых ям.

Физические свойства и применение гетероструктур описаны в [3, 5, 6, 11].

10. Углеродные наноструктуры

Структура и свойства форм углерода. Многообразие углеродных наноструктур обусловлено способностью атома углерода к гибридизации валентных s - и p -электронов. Возможна гибридизация 2, 3 или всех 4 валентных электронов (sp -, sp^2 -, sp^3 -гибридизация). Гибридизованные электроны образуют прочные σ -связи, негибридизованные – непрочные π -связи. Это приводит к формированию множества аллотропных форм. Наиболее разнообразны формы с sp^2 -гибридизацией. Равновесной и распространенной формой является графит, представляющий собой плоскости с гексагональной структурой, связанные друг с другом π -связями. Обладает слоистой структурой. По электронным свойствам является полуметаллом. Наноструктуры формируются на основе структуры графита. При этом происходит искажение строения листа, что приводит к искажению и электронной структуры и различию физических свойств. Рассмотрим наиболее важные наноструктуры

Графен — монослой атомов углерода. Носители зарядов в графене обладают высокой подвижностью при комнатной температуре. Благодаря этому графен считается перспективным материалом для быстро переключаемых электронных устройств. Однако электронная структура графена полуметаллическая, необходимо решить задачу о формировании в нем запрещенной зоны. Графен можно также использовать, как детектор молекул с чувствительностью в единицы частиц.

Углеродные нанотрубки — протяжённые цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свёрнутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей (графенов) и обычно заканчивающиеся полусферической головкой. Электронная структура

нанотрубки зависит от направления и радиуса ее сворачивания (*хиральности*) и состоит из отдельных ветвей. Ветви могут пересекаться, давая полуметаллические свойства, или быть разделены запрещенной зоной, давая полупроводниковые свойства. Полупроводниковые нанотрубки могут быть основой для диодов и транзисторов. Кроме того, нанотрубки обладают высокими показателями полевой электронной эмиссии. Это позволяет создавать на их основе осветительные приборы и дисплеи.

Методы синтеза нанотрубок заключаются в основном в конденсации углеродсодержащего пара, полученного различными способами: электродуговым, лазерным испарением графита, каталитическим разложением углеводородов и др. Эти методы не позволяют создавать ИМС на нанотрубках, поскольку получается случайный набор нанотрубок с разными свойствами, отдельно от подложки. В лабораторных условиях для создания электронных приборов нанотрубку перемещают на подложку при помощи иглы СТМ.

Диоды и транзисторы на основе нанотрубок. Принцип действия диодов и транзисторов в большинстве случаев связан с возможностью туннелирования электронов с металлических электродов на нанотрубку и с нее. Конструктивно приборы представляют собой токноплечные исток и сток (типичный материал – Pt), напыленные на диэлектрическую подложку (SiO_2) и соединенные нанотрубкой, играющей роль канала. Положение энергетических уровней в нанотрубке изменяется при наложении на нее электрического поля затвора (тип. поли-Si). Поскольку из-за малого числа состояний в нанотрубке уровни в ней дискретны, ВАХ таких приборов может быть также дискретной. Также сообщается о транзисторах на Y-образных нанотрубках, где потенциал одного конца влияет на проводимость между двумя другими. [12]. Транзисторы на нанотрубке обладают малым сопротивлением канала, так как в нанотрубке не происходит рассеяния при движении электронов. Это дает возможность создавать приборы с низким энергопотреблением и высокой рабочей частотой.

Дисплеи и осветительные приборы на нанотрубках. Нанотрубки могут быть использованы в качестве катодов для электронной эмиссии. Несмотря на то, что работа выхода электронов у нанотрубок сравнима с таковой у типичных металлов (порядка 5 эВ), малые размеры позволяют добиться очень высокого эффекта краевого усиления поля и эксплуатировать катод при напряженности $\sim 10^5$ В/м, что на порядок ниже, чем у металлов. Работа светоизлучающих приборов основана на бомбардировке электронами экрана с люминофором. Дисплей представляет собой матрицу катодов, облучающих по одному пикселю на экране с расстояния порядка единиц мм. При типичной яркости возможна работа от напряжения < 1 кВ и мощности 50–100 Вт.

Осветительные лампы имеют цилиндрический анод, в центре которого располагается катод. При расстоянии в единицы см рабочее напряжение ламп с яркостью 10^4 Кд/м² порядка единиц кВ [13].

Катоды на нанотрубках могут использоваться в качестве источника электронов также в газоразрядных приборах, источниках рентгеновского излучения и других приборах вакуумной и плазменной электроники.

11. Одноэлектроника

Теоретические основы одноэлектроники. Идея одноэлектронных устройств является пределом миниатюризации электроники в энергетическом аспекте: минимальные затраты энергии – это затраты на перемещение через потенциальный барьер одного или нескольких электронов; они оцениваются в 10^{-8} Вт/прибор при частоте порядка 10^{12} Гц. В основе работы одноэлектронных приборов лежит явление *одноэлектронного туннелирования*, описываемое теорией *кулоновской блокады*. Пусть существует туннельный переход емкостью C , заряженный до эффективного заряда Q . Энергия такого перехода:

$$E = \frac{Q^2}{2C}.$$

Величина Q может быть любой и определяется поляризацией окружающего вещества. В то же время, изменения должны быть кратны заряду электрона, т.к. описывают прохождение электронов через переход. Тогда туннелирование электрона энергетически выгодно только при начальном заряде $|Q| > \frac{e}{2}$, т.е. при

напряжениях $-\frac{e}{2C} < U < \frac{e}{2C}$ тока через переход нет. Это и называется

кулоновской блокадой. Таким образом, одноэлектронный туннельный переход обладает управляющими свойствами. Создание приборов на одном туннельном переходе практически невозможно. Чтобы электрон не мог преодолеть потенциальный барьер перехода за счет теплового движения, необходимо обеспечить емкость $C \ll \frac{e^2}{2kT} = 3 \cdot 10^{-18}$ Ф при 300 К. Столь малая емкость

шунтируется емкостью подводящих проводников ($> 10^{-15}$ Ф). Выходом является создание приборов на двух переходах, включенных последовательно, так что каждый переход соединен с внешней цепью только одним концом. Два перехода можно получить, располагая какую-либо частицу (*кулоновский остров*) между двумя электродами (истоком и стоком). Управляющего действия можно добиться, вводя третий электрод (затвор), поле которого влияет на начальный заряд кулоновского острова. Для такой системы характерна ступенчатая ВАХ (*кулоновская лестница*), связанная с неодинаковой зависимостью от напряжения скорости поступления электронов с истока и ухода через сток. Потенциал затвора непрерывно изменяет начальный заряд, что дает периодическую зависимость наличия кулоновской блокады, а, следовательно, и тока.

Одноэлектронные приборы. Одноэлектронные приборы реализованы в виде квантовых точек, туннелирование на которые управляется окружающими электродами. Квантовые точки могут быть постоянными и временными. Постоянные квантовые точки (п.б) обусловлены структурой прибора. Временные квантовые точки – ограничение подвижности носителей заряда по трем направлениям, возникающее вследствие приложения

напряжения между электродами прибора. К настоящему времени имеются приборы следующих видов:

1. В зазоре туннельного микроскопа. Переходы образуются между частицей и иглой, между частицей и подложкой. Используются металлические частицы на диэлектрической подложке, либо окруженные органическими изолирующими лигандами. Единственный тип приборов, работающий при комнатной температуре. Имеет чисто научное значение для исследований процессов при одноэлектронном туннелировании.

2. Вертикальные приборы на гетероструктурах. Известна реализация на структуре GaAs/AlGaAs, созданной методом МЛЭ. На поверхности наносятся электроды истока и затвора, ток течет вглубь подложки. Гетероструктура формирует квантовую яму и два барьера в вертикальном направлении. Подача напряжения на затвор приводит к формированию временной квантовой точки за счет обеднения носителями заряда области вокруг нее.

3. Горизонтальные приборы на основе двумерного электронного газа. Электронный газ локализован в тонком слое гетероструктуры, в плоскости слоя создаются обедненные области за счет наложения потенциалов электродов специальной геометрии. Полученная временная квантовая точка используется в одноэлектронном транзисторе.

4. Горизонтальные приборы на основе Si. Формируется МОП-транзистор – в подложке или по принципу Si-на-изоляторе. На транзистор накладывается дополнительный затвор, подача потенциала на который разрывает канал областями обеднения и формирует временную квантовую точку.

Все полупроводниковые образцы работоспособны при температуре жидкого He (4,2 К). Повышение рабочей температуры до комнатной требует уменьшить размеры квантовой точки в приборе до единиц нм, что пока не достигнуто.

Проблемы одноэлектроники описаны в [2, 12].

12. Устройства функциональной электроники

Запоминающие устройства на основе МОП-структур [1, 3]. *Неперезаписываемые ПЗУ* представляют собой матрицу диодов или транзисторов. Хранимая информация определяется наличием или отсутствием пути для протекания тока в виде диода или транзистора, которое приводит к высокому или низкому потенциалу при обращении к ячейке. По сути, носителем информации в этом случае является фотошаблон проводникового слоя, определяющий, к каким ячейкам есть контакт, а к каким нет.

Поскольку требуется изготовить двумерную разводку информационных шин, по одной из осей они изготавливаются металлическими, а по другой – диффузионными.

Перезаписываемая память. Ячейка состоит из двух МОП-транзисторов – запоминающего и адресного. Адресный транзистор служит в качестве ключа для обращения к запоминающему. Принцип действия основан на поддержании

запоминающего транзистора в открытом состоянии (хранится «0») или закрытом состоянии (хранится «1»).

Для этого используется специальная конструкция запоминающего транзистора с двумя затворами – плавающим и управляющим, разделенных диэлектриком. Для изготовления затворов используются пленки поликристаллического Si. При записи часть заряда, проходящего через канал, туннелирует в плавающий затвор. Заряд плавающего затвора сохраняется после окончания записи и формирует поле, препятствующее инверсии типа проводимости в канале. Это поддерживает транзистор запертым или повышает пороговое напряжение. Для стирания прикладывается повышенное напряжение сток – исток, под действием которого носители заряда туннелируют из плавающего затвора.

Фотосенсоры [8]. Чувствительный элемент, соответствующий одному пикселю, представляет собой МДП-конденсатор, образованный металлическим электродом, слоем диэлектрика и р-областью. Освещение вызывает внутренний фотоэффект, т.е. генерацию электронно-дырочных пар. Положительный потенциал на металлическом электроде вытесняет дырки, и электроны образуют заряд в конденсаторе. Чувствительные элементы составляют матрицы, позволяющие формировать изображение. В приборах с зарядовой связью (ПЗС) матрица состоит из линеек. В каждой линейке для считывания заряда с конкретной ячейки выстраивается «лестница» потенциалов электродов от края линейки до ячейки. В КМОП-сенсорах каждый чувствительный элемент снабжается считывателем-усилителем на базе КМОП-технологии. Таким образом, ПЗС-сенсоры всегда работают с изображением в целом, а КМОП-сенсоры – с каждым пикселем по отдельности. Недостатком КМОП-сенсоров по сравнению с ПЗС считается худшая чувствительность, связанная с тем, что считыватель-усилитель занимает место, которое в ПЗС могут занимать чувствительные элементы. Достоинства КМОП-сенсоров – скорость работы, низкое энергопотребление и возможность усиления сигнала от каждого пикселя.

Акустоэлектроника [2]. Акустоэлектронные приборы используют пьезоэффект для преобразования акустических колебаний в электрические и обратно. Обычно используются поверхностные акустические волны (ПАВ). Для их генерации и приема применяют пленочные электроды, имеющие гребенчатую топологию – встречно-штыревые преобразователи (ВШП). Типичный прибор представляет собой звукопровод с двумя ВШП на противоположных концах. Материалы звукопровода – ниобат лития LiNbO_3 , пьезокварц SiO_2 , германат висмута $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$, пьезокерамика. Параметры прибора зависят от размеров и числа штырей ВШП, материала и размеров звукопровода. Могут быть получены различные приборы для преобразования колебаний: линии задержки, полосовые фильтры, резонаторы, различные датчики и др.

ВОПРОСЫ К ЭКЗАМЕНУ

1. Интегральная технология. Виды интегральных микросхем. Основные конструктивные принципы и технологические подходы при изготовлении.
2. Конструкция биполярного интегрального p-n-p транзистора со скрытым p⁺-слоем. Конструкция p-n-p биполярного интегрального транзистора.
3. Конструкции биполярных интегральных диодов и стабилитронов.
4. Конструкции интегральных диодов Шоттки.
5. Конструкции интегральных резисторов.
6. Конструкции интегральных конденсаторов.
7. Конструкции проводников и контактных площадок полупроводниковых микросхем.
8. Конструкции интегральных МДП-транзисторов.
9. Конструкции интегральных КМДП-структур.
10. Конструкции МДП-микросхем на структурах «кремний на изоляторе».
11. Подложки гибридных микросхем. Требования. Применяемые материалы типоразмеры.
12. Тонкопленочные резисторы. Конструкции. Материалы.
13. Тонкопленочные резисторы. Источники погрешности. Подгонка.
14. Тонкопленочные конденсаторы. Конструкции. Материалы.
15. Тонкопленочные конденсаторы. Источники погрешности. Подгонка.
16. Проводники и контактные площадки гибридных микросхем.
17. Материалы и заготовки в полупроводниковой технологии.
18. Планарно-эпитаксиальная технология изготовления микросхем на биполярных транзисторах.
19. Технология изготовления микросхем на МДП-транзисторах.
20. Технология изготовления МДП-микросхем на структурах «кремний на изоляторе».
21. Технология изготовления гибридных микросхем масочным методом.
22. Технология изготовления гибридных микросхем методом фотолитографии.
23. Технология изготовления гибридных микросхем комбинированным методом.
24. Строение и свойства тонких пленок. Электропроводность. Механизмы роста.
25. Нанесение тонких пленок термическим испарением в вакууме.
26. Нанесение тонких пленок ионным (катодным) распылением.
27. Нанесение тонких пленок ионно-плазменным распылением.
28. Технологические операции метода фотолитографии.
29. Очистка кремниевых пластин.
30. Нанесение диэлектрических пленок на Si.
31. Диффузия примесей в Si.
32. Легирование полупроводников ионной имплантацией.
33. Операции фотолитографии в полупроводниковой технологии.

34. Фундаментальные и технологические проблемы развития кремниевой электроники.

35. Основные направления развития нанoeлектроники, их технологические потребности, достоинства и недостатки.

36. Сканирующая туннельная микроскопия: принцип работы, режимы исследования наноструктур.

37. Сканирующая туннельная микроскопия: принцип работы, устройство туннельного микроскопа.

38. Атомно-силовая микроскопия: принцип работы, режимы исследования наноструктур.

39. Атомно-силовая микроскопия: принцип работы, устройство атомно-силового микроскопа.

40. Ближнепольная оптическая микроскопия: принцип работы, устройство микроскопа.

41. Молекулярно-лучевая эпитаксия.

42. Золь-гель методы нанесения тонких пленок.

43. Рентгеновская литография: принцип действия, проблемы шаблонов и резистов, устройство проекционной системы.

44. Электронно-лучевая литография: принцип действия, проблемы шаблонов и резистов, проекционные системы 1:1.

45. Электронно-лучевая литография: проекционные системы со сканированием пучком.

46. Гетероструктуры как перспективный материал нанoeлектроники.

47. Квантовые точки, проволоки, ямы как перспективный материал нанoeлектроники.

48. Строение и свойства углеродных нанотрубок.

49. Диоды и транзисторы на углеродных нанотрубках.

50. Дисплеи и осветительные приборы на углеродных нанотрубках.

51. Основные проблемы одноэлектроники. Одноэлектронные приборы.

52. Запоминающие устройства на МДП-структурах.

53. Фоточувствительные элементы ПЗС и МДП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коледов, Л.А. Технология и конструкции микросхем, микропроцессоров и микросборок: учебное пособие для вузов по специальности 210201 «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» / Л.А. Коледов. – СПб. и др.: Лань, 2009. – 400 с.
2. Игнатов, А.Н. Классическая электроника и наноэлектроника: учебное пособие для вузов по специальности 210400 – «Телекоммуникации» / А.Н. Игнатов, Н.Е. Фадеева, В.Л. Савиных. – М. : Флинта : Наука, 2009. – 725 с.
3. Щука, А.А. Электроника: учебное пособие для вузов по направлению 654100 – Электроника и микроэлектроника / А.А. Щука. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 739 с.
4. Сергиев, В.Г. Технология микросхем и микропроцессоров: учебное пособие / В.Г. Сергиев, Н.С. Колмакова, Р.В. Смыслова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2000. – 93 с.
5. Зебрев, Г.И. Физические основы кремниевой наноэлектроники: учебное пособие / Г.И. Зебрев. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2011. – 240 с.
6. Раскин, А.А. Технология материалов микро-, опто- и наноэлектроники Ч. 1 : учебное пособие для вузов по направлению подготовки 210100 – «Электроника и микроэлектроника» / А.А. Раскин, В.К. Прокофьева. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2010. – 163 с.
7. Ефимов, И.Е. Основы микроэлектроники: учебник / И.Е. Ефимов, И.Я. Козырь. – СПб. и др.: Лань, 2008. – 383 с.
8. Марголин, В.И. Введение в нанотехнологию: учебник для вузов по направлению 211000 – «Конструирование и технология электронных средств» / В.И. Марголин. – СПб.: Лань, 2012. – 464 с.
9. Барыбин, А.А. Электроника и микроэлектроника: Физико-технологические основы: учебное пособие для вузов / А.А. Барыбин. – М.: Физматлит, 2006. – 423 с.
10. Неволин, В.К. Зондовые нанотехнологии в электронике: монография : учеб. пособие для вузов по специальностям 210601 «Нанотехнология в электронике» и др. / В.К. Неволин. – М.: Техносфера, 2006 – 159 с.
11. Базовые лекции по электронике: сборник: в 2 т. / под ред. В.М. Пролейко. – М.: Техносфера, 2009. – Т.2.– 607 с.
12. Драгунов, В.П. Основы наноэлектроники: учебное пособие для вузов по направлению «Электроника и микроэлектроника» / В.П. Драгунов, И.Г. Неизвестный, В.А. Гридчин. – М.: Логос , 2011. – 494 с.
13. Елецкий А.В. Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства / Елецкий А.В. // Успехи физических наук. – 2002 – Т.172. – С.401–438.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Сведения о курсе	3
Краткое содержание разделов курса	
1. Вводный раздел	6
2. Конструкции элементов полупроводниковых ИМС	7
3. Конструкции элементов гибридных ИМС	10
4. Базовые технологии производства ИМС	12
5. Физико-технологические основы производства ИМС	14
6. Направления развития наноэлектроники	19
7. Зондовые методы исследования наноструктур	20
8. Развитие существующих технологических подходов	21
9. Квантоворазмерные полупроводниковые структуры	24
10. Углеродные наноструктуры	25
11. Одноэлектроника	27
12. Устройства функциональной электроники	28
Вопросы к экзамену	30
Библиографический список	32