

УДК 621.3.049.76  
ББК 32.85:34я73  
В75

Электронные версии книг  
на сайте [www.prospekt.org](http://www.prospekt.org)

**Авторы:**

**Воротынцев В. М.** — доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой «Нанотехнологии и биотехнологии» Института физико-химических технологий и материаловедения Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева;

**Скупов В. Д.** — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Нанотехнологии и биотехнологии» Института физико-химических технологий и материаловедения Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева.

**Рецензенты:**

**Болдыревский П. Б.** — доктор физико-химических наук, профессор;

**Мочалов Г. М.** — доктор технических наук, профессор.

**Воротынцев В. М., Скупов В. Д.**

В75 Базовые технологии микро- и наноэлектроники : учебное пособие. — Москва : Проспект, 2017. — 520 с.

ISBN 978-5-392-25297-8

Учебное пособие разработано в соответствии с государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированных специалистов 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника». Впервые технологии микро- и наноэлектроники рассмотрены неразрывно с технологиями высокочистых веществ и материалов в основополагающем ключе «высокая чистота материала — высокое качество продукции». Рассмотрены основные процессы получения высокочистых веществ и материалов на их основе, процессы и технологии получения эпитаксиальных структур кремния, арсенида галлия и др., технологии их обработки при переходе к компонентам электронной техники.

Пособие может быть использовано студентами всех форм обучения, в том числе и по смежным специальностям, как для самостоятельной работы, так и выполнения курсовых проектов, а также в качестве конспекта лекций по курсу «Технология материалов электронной техники». Содержит перечень контрольных вопросов для оценки усвоения студентами материала.

УДК 621.3.049.76  
ББК 32.85:34я73

*Учебное издание*

**Воротынцев Владимир Михайлович,  
Скупов Владимир Дмитриевич**

**БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МИКРО-  
И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**  
Учебное пособие

Санитарно-эпидемиологическое заключение  
№ 77.99.60.953.Д.004173.04.09 от 17.04.2009 г.

Подписано в печать 05.04.2017. Формат 60×90 1/16.  
Печать цифровая. Печ. л. 32,5. Тираж 500 экз. Заказ №

ООО «Проспект»

111020, г. Москва, ул. Боровая, д. 7, стр. 4.

ISBN 978-5-392-25297-8

© Воротынцев В. М., Скупов В. Д., 2017  
© ООО «Проспект», 2017

# ОГЛАВЛЕНИЕ

## Глава 1

### ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТЫХ ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

1.1.	Влияние степени чистоты на свойства веществ. Классификация веществ по степени их чистоты .....	3
1.2.	Классификация исходных веществ и материалов, применяемых в производстве изделий микро- и нанoeлектроники .....	8
1.3.	Химические методы глубокой очистки полупроводниковых материалов .....	11
1.4.	Электрохимические методы синтеза летучих неорганических гидридов и фторидов для микроэлектроники .....	16
1.5.	Дистилляционные методы глубокой очистки летучих веществ .....	26
1.5.1.	Распределение примесных компонентов между жидкостью и паром. Перегонка .....	29
1.5.2.	Теория процесса глубокой очистки веществ методом ректификации.....	40
1.5.3.	Ректификация при повышенном и пониженном давлении. Вакуумная дистилляция .....	65
1.5.4.	Хеморекификация. Влияние загрязняющего действия материала аппаратуры на процесс ректификации .....	69
1.5.5.	Конструкции и режимы работы ректификационных колонн .....	75
1.6.	Кристаллизационные методы глубокой очистки летучих веществ .....	84
1.6.1.	Распределение примесного компонента в системе «кристалл—расплав». Коэффициент распределения.....	85
1.6.2.	Направленная кристаллизация, зонная перекристаллизация .....	90
1.6.3.	Противоточная кристаллизация из расплава. Сравнение с ректификацией .....	98
1.7.	Базовые технологические схемы получения высокочистых полупроводниковых материалов .....	114
1.7.1.	Процесс получения поликристаллического полупроводникового кремния .....	115
1.7.2.	Технология получения хлорсиланов .....	117
1.7.3.	Технология получения моносилана .....	123
1.8.	Технология получения монокристаллов полупроводникового кремния.....	126
1.9.	Технология получения германия .....	137
1.10.	Технология получения аммиака и структур <i>GaN</i> для светодиодов.....	152
1.11.	Технология получения исходных материалов для волоконных светодиодов....	159
	Контрольные вопросы .....	175
	Список рекомендуемой литературы.....	176

## Глава 2

### ТЕХНОЛОГИЯ АБРАЗИВНОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПОДЛОЖЕК

2.1.	Классификация полупроводниковых материалов .....	178
2.2.	Основные требования к полупроводниковым материалам и подложкам.....	181
2.2.1.	Полупроводниковые материалы в электронной технике .....	181
2.2.2.	Требования к полупроводниковым подложкам.....	189
2.3.	Методы исследования и контроля качества подложек .....	195
2.3.1.	Контроль кристаллографических и геометрических параметров подложек .....	195
2.3.2.	Методы исследования и контроля структурно нарушенных слоев полупроводников.....	201
2.4.	Технологические процессы получения полупроводников в микроэлектронике .....	222
2.4.1.	Резка полупроводников на пластины.....	224
2.4.2.	Шлифование пластин свободным и связанным абразивом .....	233
2.4.3.	Полирование полупроводниковых пластин.....	241
2.5.	Химическое травление и полирование полупроводников.....	244
2.5.1.	Общие положения. Классификация методов химического травления ...	244
2.5.2.	Составы травителей, кинетика и механизмы растворения нанокристаллов.....	248
2.5.3.	Механизм химического полирования поверхности полупроводников... 256	
2.5.4.	Влияние химического травления на геометрические параметры пластин.....	258
2.5.5.	Устройства для химического травления и полирования пластин полупроводников .....	259
2.5.6.	Химическое травление и полирование кремния и германия .....	262
2.5.7.	Химическое травление и полирование соединений $A_3B_5$ .....	268
2.5.8.	Химическое травление и полирование соединений $A_2B_6$ .....	278
2.5.9.	Анизотропное травление и полирование полупроводниковых монокристаллов.....	280
	Приложение .....	286
	Контрольные вопросы .....	289
	Список рекомендуемой литературы.....	291

## Глава 3

### БАЗОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИБОРНЫХ СТРУКТУР

3.1.	Методы газофазной эпитаксии .....	293
3.2.	Особенности метода жидкофазной эпитаксии кремния .....	302
3.2.1.	Жидкофазная эпитаксия кремния в производстве полупроводниковых приборов .....	302
3.2.2.	Способы реализации процесса жидкофазной эпитаксии кремния .....	305
3.2.3.	Расплавы для жидкофазной эпитаксии кремния.....	307
3.2.4.	Основные закономерности кинетики процесса жидкофазной эпитаксии кремния .....	308
3.2.5.	Особенности аппаратного оформления процесса жидкофазной эпитаксии кремния .....	311
3.3.	Молекулярно-лучевая эпитаксия — метод изготовления полупроводниковых структур.....	314
3.4.	Осаждение диэлектрических слоев.....	316
3.4.1.	Окисление кремния .....	318

3.4.2. Технология формирования пленок $Si_3N_4$ , поли- $Si$ , $SiC$ и $Al_2O_3$ .....	323
3.5. Основы литографических процессов.....	326
3.5.1. Фотолитография.....	327
3.5.2. Электронно-лучевая литография .....	330
3.5.3. Рентгеновская литография .....	331
3.5.4. Ионно-лучевая литография .....	332
3.5.5. Перспективы развития литографии .....	333
3.6. Диффузионное легирование полупроводников .....	335
3.6.1. Физические основы диффузии .....	335
3.6.2. Практически важные решения второго закона диффузии .....	340
3.6.3. Способы определения параметров диффузии .....	345
3.6.4. Некоторые особенности диффузии в полупроводниках .....	346
3.6.5. Технология диффузионных процессов .....	348
3.7. Ионно-лучевое легирование полупроводников.....	350
3.7.1. Основы метода ионной имплантации .....	350
3.7.2. Дефектообразование при ионном легировании .....	355
3.7.3. Диффузия примесей из ионно-имплантированных слоев .....	357
3.8. Осаждение тонких пленок.....	358
3.8.1. Осаждение пленок в вакууме .....	359
3.8.2. Ионное (катодное), ионно-плазменное, магнетронное и ионно-термическое распыление.....	361
3.9. Формирование структур со слоями пористого кремния.....	366
3.9.1. Технология получения пористого кремния .....	366
3.9.2. Свойства пористого кремния и его практическое применение .....	375
3.10. Специальные радиационно-термические обработки в технологии изготовления электронных структур.....	386

#### Глава 4 СТРУКТУРЫ «КРЕМНИЙ НА ДИЭЛЕКТРИКЕ» И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

4.1. Структуры «кремний на сапфире» (КНС).....	394
4.2. Структуры «кремний на изоляторе» (КНИ) .....	397
Контрольные вопросы .....	405
Список рекомендуемой литературы.....	406

#### Глава 5 ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

5.1. Основные положения квантового описания низкоразмерных твердотельных композиций .....	408
5.2. Особенности технологий формирования низкоразмерных твердотельных композиций.....	422
5.2.1. Основные технологические методы создания функциональных элементов нанoeлектроники.....	425
5.2.2. Образование квантоворазмерных структур вследствие самоорганизации .....	428
5.3.3. Микро- и нанотехнологии в производстве микросистемной техники.....	437
Контрольные вопросы .....	444
Список рекомендуемой литературы.....	444

# **Глава 6** **СТРУКТУРНЫЕ ДЕФЕКТЫ В МАТЕРИАЛАХ —** **КОМПОНЕНТАХ ПРИБОРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

6.1.	Классификация дефектов в кристаллах.....	446
6.2.	Термодинамически равновесные собственные точечные дефекты в кристаллах .....	448
6.3.	Комплексы точечных дефектов .....	452
6.4.	Теоретические и экспериментальные оценки энергии образования СТД .....	454
6.4.1.	Модель жестких межатомных связей .....	454
6.4.2.	Модель полости в жесткой среде .....	455
6.4.3.	Модель полости в упругой среде.....	458
6.4.4.	Особенности энергетических характеристик СТД в металлах и полупроводниках.....	460
6.5.	Кинетика восстановления равновесной концентрации СТД.....	466
6.6.	Дислокационная структура кристаллов.....	469
6.6.1.	Основные определения .....	469
6.6.2.	Дислокации в структурах алмаза и сфалерита .....	474
6.6.3.	Собственная упругая энергия дислокаций.....	478
6.6.4.	Взаимодействие дислокаций между собой и другими типами дефектов...	481
6.6.5.	Образование и движение дислокаций .....	486
6.7.	Микродефекты в бездислокационных кристаллах .....	492
6.8.	Дефектообразование в приборных структурах при проведении базовых технологических операций.....	495
6.8.1.	Рост кристаллов.....	495
6.8.2.	Изготовление подложек .....	496
6.8.3.	Эпитаксиальное наращивание.....	499
6.8.4.	Окисление и диффузия .....	501
6.8.5.	Ионная имплантация .....	505
6.9.	Геттерирование фоновых примесей и протяженных дефектов .....	511
	Контрольные вопросы .....	513
	Список рекомендуемой литературы.....	514