

620.3
Т-384

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Юго-Западный государственный университет»**

52508

**ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ
МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ**

2 издание, переработанное и исправленное

УДК 621.315.5

ББК 32.843.308

Т 38

Авторы:

Л.В. Кожитов, С.Г. Емельянов, В.Г. Косушкин,
С.С. Стрельченко, Ю.Н. Пархоменко, В.В. Козлов, С.Л. Кожитов

Рецензенты:

Доктор физико-математических наук, профессор, директор
Калужского филиала Института кристаллографии РАН *В.И. Стрелов*
Доктор технических наук, профессор, генеральный директор НИИ
точного машиностроения (ОАО «НИИТМ») *В.В. Одинокоев*

Т 38 Технология материалов микро- и нанoeлектроники /
Л.В. Кожитов, С.Г. Емельянов, В.Г. Косушкин [и др.]; Юго-
Зап. гос. ун-т. 2-е изд., перераб. и испр. Курск, 2012. 862 с.
ISBN 978-5-7681-0760-4

Приведены теоретические основы и математические модели процессов выращивания монокристаллов полупроводников из расплава.

Рассмотрены основы эпитаксиального роста плёнок полупроводников и оборудование для их производства, а также процессы плазмохимических технологий и высокоэнергетических воздействий получения материалов для электроники.

Изложены основные методы получения современных нанопозитивных материалов на основе углерода, проанализированы основные модели процессов, определены перспективы развития технологий.

Книга предназначена для широкого круга научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области получения и исследования материалов микро- и нанoeлектроники, а также может быть использована для подготовки специалистов по таким направлениям, как 210100 «Электроника и нанoeлектроника», 152200 «Нанотехнологии», 222900 «Нанотехнологии и микросистемная техника».

УДК 621.315.5

ББК 32.843.308

ISBN 978-5-7681-0760-4



© Юго-Западный государственный университет, 2012

© Кожитов Л.В., Емельянов С.Г.,
Косушкин В.Г., Стрельченко С.С.,
Пархоменко Ю.Н., Козлов В.В.,
Кожитов С.Л., 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	9
СПИСОК ПРИНЯТЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	14
ВВЕДЕНИЕ.....	15
ГЛАВА 1. ВЫРАЩИВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ ИЗ РАСПЛАВА. МОДЕЛИ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ	22
1.1. Основные методы кристаллизации из расплавов	25
1.2. Модельные представления, используемые в науке о росте кристаллов	31
1.2.1. <i>Некоторые положения теории подобия</i>	31
1.2.2. <i>Виды моделей, используемых в исследованиях роста кристаллов</i>	33
1.3. Модели нормальной направленной кристаллизации	36
1.4. Экспериментальное определение граничных условий для моделирования процесса выращивания монокристалла по методу Чохральского	49
1.5. Постановка задачи моделирования течений в тигле с использованием уравнения Навье – Стокса	56
1.6. Методика выбора тепловых условий выращивания монокристаллов	64
1.7. Классификация и свойства нагревателей установок выращивания монокристаллов по методу Чохральского	73
1.8. Кристаллизация как стохастический процесс	75
1.9. Электромагнитное воздействие на расплав	83
1.10. Условия роста и формирование неоднородностей монокристаллов	85
1.10.1. <i>Примесные неоднородности</i>	85
1.10.2. <i>Ячеистая субструктура</i>	87
1.10.3. <i>Дислокации</i>	94
1.10.4. <i>Малоугловые границы</i>	96
1.11. Методика расчета основных узлов установок выращивания монокристаллов	110
1.12. Методика расчета и оптимизации тепловых узлов установок выращивания монокристаллов	118
1.13. Методика расчета вакуумной системы установки выращивания монокристаллов по методу Чохральского	131
1.14. Кинематические расчеты механизмов установки	136
1.14.1. <i>Методика расчета параметров привода вращения тигля</i>	136
1.14.2. <i>Методика расчета параметров привода перемещения тигля</i>	137
1.14.3. <i>Методика расчета привода вращения затравки</i>	139
1.14.4. <i>Методика расчета привода перемещения затравки</i>	141

1.15. Основные операции процесса выращивания монокристаллов по методу Чохральского	143
1.16. Автоматизация процесса выращивания монокристаллов по методу Чохральского	145
1.16.1. Динамические характеристики установок выращивания монокристаллов	147
1.16.2. Цифровые алгоритмы управления	153
1.16.3. Цифровые алгоритмы управления с базовым управляющим воздействием	156
1.16.4. Особенности реализации адаптивной системы управления по схеме с большим коэффициентом усиления	160
1.16.5. Проектирование системы управления с использованием идентификационного моделирования	165
1.16.6. Методика экспериментальных исследований и программа предварительной обработки экспериментальных данных при разработке алгоритма адаптивного управления установкой выращивания монокристаллов	167
1.16.7. Алгоритмы и программы параметрической идентификации. Решение задачи управления	170
1.16.8. Особенности управления процессом поддержания диаметра кристалла в процессе вытягивания кристаллов из-под слоя флюса	174
1.17. Использование результатов современных нанотехнологических исследований в технологии получения монокристаллов белковых молекул	188
1.17.1. Общая характеристика проблемы кристаллизации биоматериалов	189
1.17.2. Обзор методов выращивания биокристаллов, применяемых в наземных и космических условиях	192
1.17.3. Обзор средств управления кристаллизацией при диффузионном тепломассопереносе	194
1.17.4. Элементы технологии роста кристаллов в условиях диффузионного тепломассопереноса	196
1.17.5. Управление температурой при выращивании монокристаллов белков	198
1.17.6. Оптимизация условий роста биокристаллов	199
1.17.7. Описание математической модели	200
1.17.8. Моделирование осаждения кристаллов	201
1.17.9. Результаты моделирования роста монокристаллов в условиях уменьшенной термогравитационной конвекции	213
Библиографический список к главе 1	219

ГЛАВА 2. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ВЫРАЩИВАНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНЫХ СЛОЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВ.....	226
2.1. Эпитаксиальные процессы в современной электронике	226
2.1.1. Типы эпитаксиальных структур, использующиеся в современных полупроводниковых приборах.....	226
2.1.2. Основные материалы и процессы получения эпитаксиальных структур	228
2.1.3. Основные параметры эпитаксиальных слоев	230
2.2. Газофазная эпитаксия.....	234
2.2.1. Физико-химическая модель эпитаксиального роста.....	237
2.2.2. Пример построения модели процесса выращивания эпитаксиального слоя кремния методом газовой эпитаксии.....	252
2.2.3. Оборудование для газофазной эпитаксии.....	313
2.2.4. Интерактивная метрология газовых эпитаксиальных процессов – состояние и задачи.....	333
2.3. Молекулярно-лучевая (пучковая) эпитаксия.....	336
2.3.1. Физико-химическая модель роста в условиях молекулярно-лучевой эпитаксии	339
2.3.2. Математическое моделирование процесса молекулярно-лучевой эпитаксии	344
2.3.3. Выбор технологических и конструктивных параметров процесса молекулярно-лучевой эпитаксии с использованием математической модели	348
2.3.4. Оборудование для молекулярно-лучевой эпитаксии и его элементы	359
2.4. Жидкофазная эпитаксия (ЖФЭ).....	368
2.4.1. Физико-химические основы процесса	369
2.4.2. Изотермические методы жидкофазной эпитаксии.....	376
2.4.3. Метод изотермического смешения двух растворов.....	378
2.4.4. Метод испарения растворителя	379
2.4.5. Метод электрожидкофазной эпитаксии	380
2.4.6. Математическая модель процесса жидкофазной эпитаксии на примере получения эпитаксиальных слоев соединений $A^{III}B^V$ и их твердых растворов	382
2.4.7. Особенности жидкофазной эпитаксии элементарных полупроводников (на примере кремния)	397
2.4.8. Аппаратурное оформление процессов жидкофазной эпитаксии	399
2.4.9. Получение гетероэпитаксиальных композиций с использованием жидкофазной эпитаксии	402
2.5. Возможности методов молекулярно-лучевой и газофазной эпитаксии в нанoeлектронике	421
Библиографический список к главе 2	423

ГЛАВА 3. ТЕХНОЛОГИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЛАЗМЕННЫХ, ИОННЫХ И ДИФFUЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ	431
3.1. Параметры и классификация ионно-плазменных процессов	434
3.2. Механизм и способы формирования плазмы	441
3.3. Классификация методов ионно-плазменной обработки.....	451
3.3.1. <i>Травление распылением</i>	454
3.3.2. <i>Ионно-лучевое травление</i>	455
3.3.3. <i>Ионно-плазменное нанесение</i>	456
3.3.4. <i>Реактивное ионно-плазменное нанесение</i>	456
3.3.5. <i>Нанесение пленок ионно-лучевым распылением</i>	457
3.3.6. <i>Плазмохимическое травление</i>	458
3.4. Устройства реализации процессов ионно-плазменной обработки	461
3.4.1. <i>Диодные и триодные устройства распыления</i>	461
3.4.2. <i>Магнетронные устройства распыления</i>	462
3.4.3. <i>Устройства ионно-лучевой обработки</i>	465
3.5. Параметры и характеристики рабочих газов, используемых в процессах ионно-плазменной обработки	470
3.6. Физические явления, сопутствующие ионной бомбардировке и облучению материалов	472
3.6.1. <i>Нейтрализация бомбардирующих ионов на обрабатываемой поверхности</i>	475
3.6.2. <i>Вторичная ионно-электронная эмиссия с поверхности</i>	476
3.6.3. <i>Отражение бомбардирующих ионов от поверхности обрабатываемого материала</i>	479
3.7. Использование ионно-плазменных методов в обработке подложек полупроводниковых материалов	480
3.8. Модели взаимодействия частиц высокой энергии с веществом	487
3.8.1. <i>Ионная имплантация</i>	487
3.8.2. <i>Полиэнергетическое легирование</i>	504
3.8.3. <i>Образование радиационных дефектов при ионной имплантации</i>	517
3.8.4. <i>Диффузия</i>	519
3.8.5. <i>Модели термического окисления</i>	550
3.9. Получение и исследование скрытых проводящих, полупроводниковых и диэлектрических слоев в кремнии	575
3.9.1. <i>Ионно-лучевой синтез</i>	577
3.9.2. <i>Скрытые проводящие слои дисилицида кобальта в кремнии, полученные методом ионно-лучевого синтеза</i>	580
3.9.3. <i>Образование и рост зародышей дисилицида кобальта в процессе имплантации</i>	586
3.9.4. <i>Термически активированный рост зародышей дисилицида кобальта</i>	597
3.9.5. <i>Схема процесса фазообразования</i>	601
3.10. Свойства скрытых проводящих слоев	607

3.10.1. Скрытые полупроводниковые слои дисилицида железа в кремнии, полученные методом ионно-лучевого синтеза	611
3.10.2. Профили распределения железа в кремнии, полученные методом вторичной ионной масс-спектрометрии	614
3.10.3. Исследования распределения железа в кремнии методом просвечивающей электронной микроскопии	623
3.10.4. Исследование скрытых полупроводниковых слоев дисилицида железа методом Фурье ИК-спектроскопии	628
3.10.5. Зависимость фононного спектра от условий ионного синтеза	633
3.10.6. Обработка спектров отражения	634
3.11. Скрытые диэлектрические слои в кремнии, имплантированные атомами кислорода и азота	635
3.11.1. Разработка методов и методик исследования скрытых диэлектрических слоев с помощью электронной Оже-спектроскопии и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии	637
3.11.2. Послойный анализ методом электронной Оже-спектроскопии на большую (порядка 500 нм) глубину	639
3.11.3. Фазовый состав оксинитрида кремния, полученного методом ионного синтеза	643
Библиографический список к главе 3	651
ГЛАВА 4. СОВРЕМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДА ДЛЯ НАНОТЕХНОЛОГИЙ	660
4.1. Актуальность наноматериалов на основе углерода для развития нанотехнологий	661
4.1.1. Фуллерены	664
4.1.2. Нанотрубки	669
4.1.3. Наноструктурированный углеродный материал	674
4.1.4. Металлоуглеродные нанокомпозиты	686
4.2. Свойства, технология и применение фуллеренов	691
4.2.1. Молекулярная структура фуллеренов	692
4.2.2. Механизм образования фуллеренов	696
4.2.3. Свойства фуллеритов – агрегатов фуллерена	698
4.2.4. Фуллерены – катализаторы фазового перехода графит–алмаз	703
4.2.5. Соединения фуллеренов с другими элементами	706
4.2.6. Дуговая технология производства фуллеренов	709
4.2.7. Технология с использованием плазмохимических методов и подачи углеродных порошков	712
4.2.8. Технология производства фуллеренов в пламени	713
4.2.9. Технология получения фуллеренов при лазерном нагреве	717
4.2.10. Применение фуллеренов	717

4.3. Свойства, технология и применение углеродных нанотрубок	718
4.3.1. Технология изготовления углеродных нанотрубок.....	719
4.3.2. Рост углеродных нанотрубок.....	733
4.3.3. Технология на основе химического осаждения из газовой фазы.....	746
4.3.4. Метод селективного роста углеродных нанотрубок на структурах металл – диэлектрик – полупроводник	752
4.3.5. Термодинамический анализ процесса зародышеобразования углерода на поверхности металлических частиц	759
4.3.6. Физико-химические основы разработки катализаторов для селективного синтеза углеродных нанотрубок.....	767
4.3.7. Свойства нанотрубок.....	769
4.3.8. Применение углеродных нанотрубок	779
4.4. Новые металлоуглеродные нанокompозиты и углеродный нанокристаллический материал для развития электроники	791
4.4.1. Методы получения металлоуглеродных нанокompозитов.....	798
4.4.2. Физические и химические превращения в металлоуглеродных нанокompозитах на основе пиролизованного полиакрилонитрила и их свойства.....	814
4.4.3. Металлоуглеродные нанокompозиты с ферромагнитными и суперпарамагнитными свойствами.....	826
4.4.4. Углерод-углеродные нанокompозиты для оптоэлектроники	828
4.4.5. Сенсорные свойства углеродного нанокристаллического полупроводника к pH среды.....	830
Библиографический список к главе 4	838
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	861