

С.Н. Чеботарев
В.В. Калининчук
Л.С. Лунин

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ
С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ
ПОДЗОНОЙ



С.Н. Чеботарев

В.В. Калининчук

Л.С. Лунин

**ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ
НАНОГЕТЕРОСТРУКТУРЫ
С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ
ПОДЗОНОЙ**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2016

УДК 537.22
ББК 22.379
Ч 34

Чеботарев С.Н., Калинин В.В., Лунин Л.С. **Полупроводниковые наногетероструктуры с промежуточной подзоной.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2016. — 192 с. — ISBN 978-5-9221-1694-7.

Рассмотрены физические свойства и закономерности формирования полупроводниковых наногетероструктур с промежуточной подзоной. Представлены механический и термодинамический подходы к описанию самоорганизованного роста в процессе релаксации механически напряженных гетеросистем с различающимися параметрами кристаллических решеток. Описаны методы получения и аналитические методики исследования свойств полупроводниковых наноструктур. Основное внимание уделено новому перспективному ростовому методу — ионно-лучевой кристаллизации. Проведены исследования массопереноса и закономерностей формирования гетероструктур с квантовыми точками, полученных ионно-лучевой кристаллизацией. Развита математическая аппаратура функций Грина и получены данные о распределении механических напряжений в нанослоях, содержащих включения кубической, гексагональной и пирамидальной форм для гетеросистем InAs/GaAs(111), InN/AlN(0001), InAs/GaAs(001). Проведено моделирование, выращены и измерены характеристики прототипов фотоэлектрических преобразователей с промежуточной энергетической подзоной для прямозонных и непрямозонных наногетеросистем.

Книга предназначена научным и инженерно-техническим работникам, специализирующимся в области физики и технологии полупроводниковой оптоэлектроники.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 14-19-01676 «Исследование влияния размерных факторов на динамику и процессы контактного взаимодействия макро-, микро- и наноразмерных структурно-неоднородных тел в условиях связанности физических полей различной природы».

© ФИЗМАТЛИТ, 2016

© С. Н. Чеботарев, В. В. Калинин,
Л. С. Лунин, 2016

ISBN 978-5-9221-1694-7

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Глава 1. Физика наноструктур с промежуточной подзоной	9
1.1. Классификация наногетероструктур	9
1.1.1. Огибающие функции	10
1.1.2. Плотность энергетических состояний в наноструктурах	13
1.1.3. Типы наноструктур	15
1.2. Наногетероструктуры с квантовыми точками	16
1.2.1. Энергетические состояния в квантовых точках	16
1.2.2. Электронный транспорт в наносистемах с квантовыми точками	18
1.2.3. Оптические свойства гетероструктур с квантовыми точками	19
1.3. Фотоэлектрические наноматериалы с промежуточной подзоной	20
1.3.1. Направления совершенствования фотопреобразователей	20
1.3.2. Фотоэлектрические преобразователи с промежуточной энергетической подзоной	22
1.3.3. Теоретический предел эффективности фотопреобразователей с промежуточной подзоной	25
Глава 2. Формирование наноструктур с промежуточной подзоной	31
2.1. Механизмы роста наноструктур	31
2.1.1. Эффект самоорганизованного роста	31
2.1.2. Термодинамическое описание	33
2.1.3. Механическое рассмотрение	35
2.2. Методы получения наноструктур с промежуточной подзоной	38
2.2.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия	38
2.2.2. Газофазное осаждение	39
2.2.3. Жидкофазная эпитаксия	40
2.2.4. Ионно-лучевое распыление	40
2.3. Ионно-лучевая кристаллизация	41
2.3.1. Теория распыления одно- и многокомпонентных мишеней	41
2.3.2. Угловая зависимость коэффициента распыления	44
2.3.3. Методики измерения коэффициентов распыления	44
2.3.4. Варианты реализации метода ионно-лучевой кристаллизации	46
2.3.5. Литературные данные о коэффициентах распыления	48
Глава 3. Аппаратурное оформление и методики исследования наноструктур с промежуточной подзоной	52
3.1. Ростовое оборудование ионно-лучевой кристаллизации	52
3.1.1. Вакуумная система	52
3.1.2. Ионный источник	56

3.1.3. Управление температурой подложки	59
3.1.4. Позиционирование мишени	61
3.1.5. Подготовка мишеней и подложек	61
3.2. Аналитические методики исследования наноструктур	63
3.2.1. Исследование морфологии поверхности	63
3.2.2. Определение состава	72
3.2.3. Изучение электрических и оптических свойств	74
3.2.4. Исследование фотоэлектрических характеристик	77
Глава 4. Массопоток ростового вещества при ионно-лучевой кристаллизации	80
4.1. Коэффициенты распыления модельных материалов	80
4.1.1. Энергетическая зависимость	80
4.1.2. Угловая зависимость	83
4.1.3. Дифференциальные угловые коэффициенты распыления	84
4.2. Эффекты низкоэнергетического распыления	90
4.2.1. Изменение морфологии поверхности мишеней	90
4.2.2. Астехиометрия распыления двухкомпонентных мишеней	91
4.3. Теория массопереноса при ионно-лучевой кристаллизации	94
4.3.1. Исходные приближения	94
4.3.2. Модель массопереноса	95
4.4. Исследование ростового массопотока	102
4.4.1. Расстояние «мишень-подложка»	102
4.4.2. Угол наклона мишени	105
4.4.3. Профиль плотности ионного тока	107
Глава 5. Ионно-лучевая кристаллизация наноструктур с промежуточной подзоной	111
5.1. Ионно-лучевая кристаллизация островковых наноструктур	111
5.1.1. Режимы получения	111
5.1.2. Время осаждения	114
5.1.3. Температура подложки	117
5.1.4. Ионный ток	120
5.1.5. Энергия ионов	124
5.2. Ионно-лучевая кристаллизация однослойных наноматериалов	126
5.2.1. Ростовые условия	126
5.2.2. Вольт-фарадные измерения	128
5.3. Ионно-лучевая кристаллизация многослойных наноматериалов	130
5.3.1. Получение образцов	130
5.3.2. Фотолюминесцентные свойства	132
Глава 6. Внутренние механические напряжения в макро-, микро- и наноразмерных гетероструктурах	135
6.1. Предварительное напряженное состояние сегнетоэлектрической гетероструктуры (макроскопический подход)	135
6.1.1. Линеаризованные соотношения динамики преднапряженной электроупругой сплошной среды	135

6.1.2. Случай однородного напряженного состояния	137
6.2. Материальные константы наноразмерных сегнетоэлектрических пленок	139
Глава 7. Механические напряжения в наноразмерных гетероструктурах с промежуточной подзоной	142
7.1. Существующие подходы к расчету механических напряжений в гетероструктурах с квантовыми точками	143
7.2. Функции Грина в наноструктурах с промежуточной подзоной	145
7.3. Аппарат функций Грина применительно к внедренным гетерогенным включениям в наноструктурах	146
7.4. Расчет механических напряжений в наноструктурах с гетерогенными включениями	149
7.4.1. Включения кубической и пирамидальной формы InAs/GaAs(001)	149
7.4.2. Включения гексагональной формы InN/AlN(0001)	154
Глава 8. Фотоэлектрические устройства с промежуточной энергетической подзоной	159
8.1. Модель фотопреобразователя с промежуточной подзоной	159
8.1.1. Определение оптических параметров	159
8.1.2. Расчет фототока, тока короткого замыкания и коэффициента полезного действия	161
8.1.3. Расчет тока насыщения	165
8.1.4. Оценка времени жизни носителей заряда	166
8.2. Архитектура фотоэлектрических образцов	168
8.3. Анализ теоретических и экспериментальных результатов	169
8.3.1. Вольт-амперные характеристики	169
8.3.2. Спектральные зависимости внешнего квантового выхода	171
Заключение	173
Список литературы	174