

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК УЧАСТНИКОВ	13
ПРЕДИСЛОВИЕ	16
Глава 1	
ОБЩИЕ МЕТОДОЛОГИИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ:	
КЛАССИФИКАЦИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЕ	20
1.1. Введение и классификация	20
1.1.1. Что такое нанотехнология?	20
1.1.2. Классификация наноструктур	20
1.1.3. Нанометровая архитектура	24
1.2. Основные электронные свойства атомов и твердых тел	24
1.2.1. Изолированный атом	24
1.2.2. Связь между атомами	27
1.2.3. Многоатомные твердые тела	30
1.2.4. Модель свободного электрона и энергетические зоны	31
1.2.5. Кристаллы	33
1.2.6. Периодичность кристаллических решеток	34
1.2.7. Электронная проводимость	37
1.3. Эффекты нанометрового масштаба длин	40
1.3.1. Изменения полной энергии системы	40
1.3.2. Изменения структуры системы	41
1.3.2.1. Вакансии в нанокристаллах	42
1.3.2.2. Дислокации в нанокристаллах	44
1.3.3. Как нанометровые размеры влияют на свойства	45
1.3.3.1. Структурные свойства	46
1.3.3.2. Тепловые свойства	47
1.3.3.3. Химические свойства	48
1.3.3.4. Механические свойства	49
1.3.3.5. Магнитные свойства	50
1.3.3.6. Оптические свойства	51
1.3.3.7. Электронные свойства	52
1.3.3.8. Биологические системы	52



1.4. Технологии изготовления	54
1.4.1. Процессы «сверху вниз»	55
1.4.1.1. Измельчение	55
1.4.1.2. Литография	55
1.4.1.3. Механическая обработка	59
1.4.2. Процессы «снизу вверх»	60
1.4.2.1. Методы осаждения из газовой фазы	60
1.4.2.2. Плазменное осаждение	63
1.4.2.3. МПЭ и МОГФЭ	65
1.4.2.4. Жидкофазные методики	69
1.4.2.5. Коллоидные методики	69
1.4.2.6. Методы золь—гель	71
1.4.2.7. Электроосаждение	72
1.4.3. Методы шаблонного роста наноматериалов	73
1.4.4. Упорядочение наносистем	76
1.4.4.1. Самосборка и самоорганизация	77
1.5. Вопросы изготовления, безопасности и хранения	79
<i>Литература</i>	80

Глава 2

ОБЩИЕ МЕТОДОЛОГИИ НАНОТЕХНОЛОГИЙ:

СНЯТИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

2.1. Общая классификация методов исследования	82
2.1.1. Аналитические методы и способы визуализации	83
2.1.2. Некоторые вопросы физики рассеяния	84
2.1.2.1. Рентгеновские лучи и их взаимодействие с веществом	85
2.1.2.2. Электроны и их взаимодействие с веществом	86
2.1.2.3. Нейтроны и их взаимодействие с веществом	87
2.1.2.4. Ионы и их взаимодействие с веществом	87
2.1.2.5. Упругое рассеяние и дифракция	87
2.2. Методы микроскопии	91
2.2.1. Общие вопросы визуализации	91
2.2.2. Увеличение изображения и разрешающая способность	93
2.2.3. Прочие вопросы визуализации	95
2.2.4. Оптическая микроскопия	96
2.2.4.1. Сканирующая ближнеполевая оптическая микроскопия	97
2.3. Электронная микроскопия	98
2.3.1. Общие аспекты электронной оптики	98
2.3.2. Получение электронного луча	98
2.3.3. Взаимодействие электронов с образцом	99
2.3.3.1. Вторичные электроны	99
2.3.3.2. Обрато рассеянные электроны	100
2.3.3.3. Оже-электроны и рентгеновское излучение	101
2.3.4. Сканирующая электронная микроскопия	101
2.3.4.1. Визуализация вторичных электронов	102
2.3.4.2. Визуализация электронов обратного рассеяния	104



2.3.4.3. Визуализация потенциального контраста	105
2.3.4.4. Визуализация наведенного электронным пучком тока	105
2.3.4.5. Визуализация магнитного контраста	105
2.3.4.6. Сканирующая электронная микроскопия в нормальных условиях	105
2.3.5. Просвечивающая электронная микроскопия	106
2.3.5.1. Дифракция электронов	107
2.3.5.2. Получение ПЭМ-изображения	109
2.3.6. Сканирующая просвечивающая электронная микроскопия	114
2.4. Полевая ионная микроскопия	115
2.5. Сканирующие зондовые методы	116
2.5.1. Сканирующая туннельная микроскопия	116
2.5.2. Атомно-силовая микроскопия	119
2.5.3. Другие сканирующие зондовые методы	124
2.6. Дифракционные методы	125
2.6.1. Объемные дифракционные методики	125
2.6.2. Дифракционные методы изучения поверхности	129
2.7. Методы спектроскопии	131
2.7.1. Фотонная спектроскопия	133
2.7.1.1. Оптические измерения	134
2.7.1.2. Фотolumинесценция	136
2.7.1.3. Рамановская и ИК-спектроскопия	136
2.7.1.4. Рентгеновская спектроскопия	139
2.7.2. Радиочастотная спектроскопия	140
2.7.3. Электронная спектроскопия	143
2.7.3.1. Излучение рентгеновских лучей в СЭМ и ПЭМ	144
2.7.3.2. Катодolumинесценция в СЭМ и СПЭМ	145
2.7.3.3. Спектроскопия характерных потерь энергии электрона	146
2.8. Анализ поверхности и профиль глубины	149
2.8.1. Электронная спектроскопия поверхностей	151
2.8.2. Масс-спектрометрия поверхности	154
2.8.3. Ионно-пучковый анализ	157
2.8.4. Рефлектометрия	158
2.9. Обзор методов измерения физических свойств	161
2.9.1. Механические свойства	161
2.9.2. Электрические свойства	164
2.9.3. Магнитные свойства	166
2.9.4. Термические свойства	167
Литература	168

Глава 3

НЕОРГАНИЧЕСКИЕ ПОЛУПРОВОДИЩИЕ НАНОСТРУКТУРЫ	170
3.1. Введение	170
3.2. Краткое введение в физику полупроводников	171
3.2.1. Что такое полупроводник?	171



3.2.2. Легирование	172
3.2.3. Эффективная масса	173
3.2.4. Перенос и подвижность носителей и электрическая проводимость	173
3.2.5. Оптические свойства полупроводников	175
3.2.6. Экситоны	175
3.2.7. <i>p-n</i> -переход	176
3.2.8. Фононы	177
3.2.9. Типы полупроводников	178
3.3. Квантовые ограничения в полупроводящих наноструктурах	179
3.3.1. Квантовые ограничения в одном измерении: квантовые ямы	179
3.3.2. Квантовые ограничения в двух измерениях: квантовые проволоки	182
3.3.3. Квантовые ограничения в трех измерениях: квантовые точки	183
3.3.4. Сверхрешетки	183
3.3.5. Разрывы зон	184
3.4. Плотность электронных состояний	185
3.5. Методы изготовления	186
3.5.1. Требования к идеальной полупроводниковой наноструктуре	186
3.5.2. Эпитаксиальное выращивание квантовых ям	187
3.5.3. Литография и травление	188
3.5.4. Выращивание на краю скола	188
3.5.5. Рост на вращающихся подложках	189
3.5.6. Деформационные точки и проволоки	190
3.5.7. Электрически наведенные точки и проволоки	191
3.5.8. Квантовые ямы с флуктуациями	192
3.5.9. Термический отжиг квантовых ям	192
3.5.10. Полупроводниковые нанокристаллы	193
3.5.11. Коллоидные квантовые точки	193
3.5.12. Методы самосборки	193
3.5.13. Резюме по методам изготовления	200
3.6. Физические явления в полупроводниковых наноструктурах	200
3.6.1. Модуляционное легирование	200
3.6.2. Квантовый эффект Холла	203
3.6.3. Резонансное туннелирование	204
3.6.4. Эффект зарядки	207
3.6.5. Баллистический перенос носителей	209
3.6.6. Межзонное поглощение в полупроводящих наноструктурах	211
3.6.7. Внутризонное поглощение в полупроводящих наноструктурах	213
3.6.8. Процессы светоизлучения в наноструктурах	214
3.6.9. Фононное горло в квантовых точках	217
3.6.10. Квантово-ограниченный эффект Штарка	218
3.6.11. Нелинейные эффекты	219
3.6.12. Когерентность и процессы дефазировки	220



3.7. Характеристики полупроводящих наноструктур	221
3.7.1. Оптические и электрические исследования	221
3.7.2. Структурные исследования	226
3.8. Применение полупроводящих наноструктур	228
3.8.1. Инжекционные лазеры	228
3.8.2. Квантовые каскадные лазеры	233
3.8.3. Однофотонные источники	235
3.8.4. Биологические метки	236
3.8.5. Оптические запоминающие устройства	236
3.8.6. Влияние нанотехнологий на традиционную электронику	237
3.8.7. Устройства на основе кулоновской блокады	243
3.8.8. Фотонные структуры	244
3.9. Итоги и перспективы	247
<i>Литература</i>	248
Глава 4	
НАНОМАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА	250
4.1. Магнетизм	250
4.1.1. Магнитостатика	250
4.1.2. Диамагнетики, парамагнетики, ферромагнетики	251
4.1.3. Магнитная анизотропия	253
4.1.4. Домены и доменные стенки	256
4.1.5. Процесс намагничивания	260
4.2. Наномангнитные материалы	261
4.2.1. Порошковые наномангниты	261
4.2.2. Геометрические наномангниты	268
4.3. Магнитосопротивление	270
4.3.1. Магнитные вклады в сопротивление металлов	270
4.3.2. Гигантское магнитосопротивление	272
4.3.3. Спиновые вентили	277
4.3.4. Туннельное магнитосопротивление	279
4.4. Зондовая техника наномангнитных материалов	281
4.5. Наномангнетизм в технике	283
4.6. Новые вызовы для наномангнетизма	285
<i>Литература</i>	286
Глава 5	
ТЕХНОЛОГИЯ И СВОЙСТВА НЕОРГАНИЧЕСКИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ	288
5.1. Введение	288
5.1.1. Классификация	289
5.2. Термодинамика и кинетика фазовых превращений	290
5.2.1. Термодинамика	290
5.2.2. Гомогенная нуклеация	292



5.2.3. Гетерогенная нуклеация	295
5.2.4. Рост	296
5.2.5. Полная скорость превращения	297
5.3. Методы получения	298
5.3.1. Процесс быстрого отверждения жидкости	298
5.3.2. Расстекловывание	299
5.3.3. Конденсация в инертном газе	301
5.3.3.1. Факторы, влияющие на нуклеацию и рост наночастиц	302
5.3.3.2. Улучшение выхода, качества порошка, производительности	304
5.3.4. Электроосаждение	304
5.3.4.1. Импульсное электроосаждение	305
5.3.4.2. Ингибиторы роста	305
5.3.4.3. Температура	305
5.3.4.4. Кислотность (pH) электролита	306
5.3.4.5. Продукты	306
5.3.5. Механические методы	306
5.3.5.1. Механическое сплавление, или механический помол	306
5.3.5.2. Механохимическая обработка	310
5.4. Структура	311
5.4.1. Микроструктура	312
5.4.1.1. Размер зерна и деформация матрицы	312
5.4.1.2. Измерение размера частицы	313
5.4.2. Структура границ зерен	313
5.4.3. Структурная метастабильность	314
5.5. Стабильность микроструктуры	314
5.5.1. Диффузия	315
5.5.2. Рост зерна	316
5.5.3. Пиннинг	318
5.5.4. Торможение движения границ зерен растворенным веществом	319
5.6. Консолидация порошков	320
5.6.1. Компактирование нанопорошков	321
5.6.2. Спекание	322
5.6.3. Роль примесей	323
5.6.4. Пористость	325
5.6.5. Нетрадиционные методы обработки	325
5.7. Механические свойства	327
5.7.1. Жесткость и прочность	328
5.7.2. Пластичность и вязкость	329
5.7.3. Ползучесть и суперпластичность	331
5.8. Ферромагнитные свойства	332
5.8.1. Фундаментальные магнитные свойства	333
5.8.2. Нанокompозитные мягкие магнитные материалы	333
5.8.3. Жесткие магнитные материалы	334
5.9. Каталитические возможности	335



5.10. Настоящие и перспективные приложения наноматериалов	335
5.10.1. Поглотители ультрафиолета	335
5.10.2. Магнитные приложения	336
5.10.3. Покрытия	337
<i>Литература</i>	337

Глава 6

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРО-ОПТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

6.1. Основные понятия	339
6.1.1. Твердое состояние: кристаллы и стекла	339
6.1.2. Химия углерода	340
6.1.2.1. Гибридизованные орбитали	340
6.1.2.2. Бензольное кольцо	342
6.1.2.3. Сопряженные молекулы	342
6.1.2.4. Бакминстерфуллерен	343
6.1.3. Примеры органических полупроводников	343
6.1.4. Возбуждения в органических полупроводниках	344
6.1.4.1. Поляроны и экситоны	344
6.1.4.2. Светоизлучение в органических молекулах	346
6.1.4.3. Настройка запрещенной зоны	350
6.1.5. Инжекция и перенос носителей заряда	351
6.1.5.1. Инжекция носителей заряда	352
6.1.5.2. Перенос носителей заряда: подвижность	354
6.1.5.3. Перенос носителей заряда: пространственные заряды	355
6.1.5.4. Перенос носителей заряда: ловушки	356
6.1.6. Полимеры или маленькие молекулы	357
6.1.6.1. Запрещенная зона сопряженных полимеров	358
6.1.6.2. Растворимость полимеров	360
6.1.7. Органические металлы?	361
6.2. Конструирование устройств	362
6.2.1. Синтетические металлы	363
6.2.1.1. Растворы синтетических металлов	363
6.2.1.2. Применения синтетических металлов	365
6.2.2. Органические полевые транзисторы	365
6.2.2.1. Принцип работы FET	366
6.2.2.2. Количественное описание работы FET	367
6.2.2.3. Требования к материалам OFET	368
6.2.2.4. Интегральные схемы на базе OFET	372
6.2.3. Светоизлучающие устройства на основе органических соединений	374
6.2.3.1. Краткий обзор явления	374
6.2.3.2. Биполярная инжекция носителей	375
6.2.3.3. Образование экситона	378
6.2.3.4. Оптимизация ОСИД с целью повышения их эффективности	379



6.2.4. Органическая фотоэлектроника	383
6.2.4.1. Устройство фотодиодов	383
6.2.4.2. Органические диоды на объемном гетеропереходе	385
6.3. Углеродные нанотрубки	387
6.3.1. Структура	387
6.3.2. Синтез	389
6.3.3. Электронные свойства	390
6.3.4. Колебательные свойства	393
6.3.5. Механические свойства	394
6.3.6. Применение	395
6.3.6.1. Транзисторы на основе углеродных нанотрубок	395
6.3.6.2. Автоэлектронная эмиссия	396
6.3.6.3. Механическое упрочнение	397
6.3.6.4. Топливные элементы	397
Приложение	398
Литература	406

Глава 7

САМОСОБИРАЮЩИЕСЯ МЯГКИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА ИЗ НИХ

7.1. Введение	407
7.2. Строительные блоки	408
7.2.1. Синтетические	408
7.2.2. Биологические	410
7.3. Принципы самосборки	413
7.3.1. Нековалентные взаимодействия	414
7.3.2. Межмолекулярная упаковка	416
7.3.3. Биологическая самосборка	419
7.3.4. Наномоторы	422
7.4. Самосборка как метод получения и структурирования наночастиц	423
7.4.1. Наночастицы, получаемые при мицеллярной и везикулярной полимеризации	423
7.4.2. Функционализированные наночастицы	424
7.4.3. Кристаллы коллоидных наночастиц	425
7.4.4. Самоорганизация неорганических наночастиц	428
7.4.5. Жидкокристаллические наночастицы	431
7.4.6. Бионаночастицы	432
7.4.7. Нанообъекты	433
7.5. Наноструктуры, получаемые по шаблону	434
7.5.1. Мезопористые кремнеземы	434
7.5.2. Биоминерализация	435
7.5.3. Наноструктуры, самособирающиеся по шаблонам из триблок-сополимеров	437



7.6. Жидкокристаллические мезофазы	437
7.6.1. Мицеллы и везикулы	437
7.6.2. Ламеллярная фаза	438
7.6.3. Трислоенная структура ABC	439
7.6.4. Сметические и нематические жидкие кристаллы	441
7.6.5. Дискотические жидкие кристаллы	443
7.7. Выводы и перспективы	443
<i>Литература</i>	444

Глава 8

МАКРОМОЛЕКУЛЫ НА ГРАНИЦАХ РАЗДЕЛА ФАЗ

И СТРУКТУРИРОВАННЫЕ ОРГАНИЧЕСКИЕ ПЛЕНКИ	447
8.1. Макромолекулы на границах раздела фаз	447
8.2. Основы науки о явлениях на поверхности раздела фаз	449
8.2.1. Энергии поверхности и границ раздела фаз	449
8.3. Анализ смоченных поверхностей	452
8.4. Модификация поверхностей	452
8.4.1. Поверхностно-активная адсорбция	453
8.4.2. Адсорбция полимеров	453
8.4.3. Химия привитых поверхностей	455
8.4.3.1. Химия границы раздела золото—тиол	455
8.4.3.2. Силановые связующие агенты	456
8.4.3.3. Макромолекулярные слои	457
8.4.4. Физические свойства полимерных щеток	458
8.4.4.1. Полуразбавленные растворы	461
8.4.4.2. Концентрированные растворы	461
8.4.4.3. Щетки в расплаве	462
8.4.5. Наноструктурирование органических покрытий с помощью мягкой литографии и других методов	462
8.5. Получение тонких органических пленок	464
8.5.1. Полимерные и коллоидные покрытия, получаемые методом центрифугирования	464
8.5.2. Изготовление органических мультислоев	466
8.5.2.1. Метод послойного осаждения	467
8.5.2.2. Метод Ленгмюра—Блоджетт	469
8.6. Влияние поверхностей на процесс разделения фаз	470
8.6.1. Полимерные смеси	471
8.6.2. Блок-сополимеры	473
8.7. Наноструктурирование поверхностей путем самосборки	476
8.7.1. Структурирование на гетерогенных субстратах	478
8.7.2. Топографически структурированные поверхности	481
8.7.3. Структурирование тонких пленок посредством десмачивания	483
8.8. Наноразмерные устройства, использующие макромолекулы на поверхности раздела фаз	485



8.8.1. Молекулярная и макромолекулярная электроника	485
8.8.1.1. Полимерная электроника	485
8.8.1.2. Устройства на одной молекуле	487
8.8.2. Нанофлюидика	488
8.8.3. Фильтрация и сортировка	490
<i>Литература</i>	493
Глава 9	
БИОНАНОТЕХНОЛОГИИ	495
9.1. Новые методы исследования биологических систем	495
9.1.1. Сканирующая зондовая микроскопия биомолекулярных систем	495
9.1.2. Атомно-силовые измерения в биологических системах	500
9.1.3. Миниатюризация и анализ	506
9.1.4. Организация биомолекулярной структуры в нанометровом масштабе	510
9.2. Биомиметические нанотехнологии	514
9.2.1. ДНК как строительный материал нанотехнологий	514
9.2.1.1. Направленная сборка с помощью ДНК	516
9.2.1.2. ДНК как шаблон для молекулярной электроники	516
9.2.1.3. Моторы и наномашинны на основе ДНК	517
9.2.2. Молекулярные моторы	518
9.2.2.1. Действие биологических моторов	520
9.2.2.2. Биологические моторы как часть синтетических систем	521
9.2.3. Искусственный фотосинтез	523
9.3. Выводы	526
<i>Литература</i>	526