

Высшее профессиональное образование

**В. И. Марголин
В. А. Жабрев
В. А. Тупик**

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Учебник



Радиоэлектроника

ВЫСШЕЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

В. И. МАРГОЛИН, В. А. ЖАБРЕВ, В. А. ТУПИК

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

УЧЕБНИК

Рекомендовано

*Учебно-методическим объединением по образованию
в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники
и автоматизации в качестве учебника для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных
средств» направления «Проектирование и технология электронных средств»*



Москва
Издательский центр «Академия»
2008

УДК 621.3.049.77(075.8)
ББК 32.844.1я73
М25

Рецензенты:

зав. кафедрой электроники Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики,
д-р техн. наук, проф. *Г. Н. Лукьянов*;
президент Российского химико-технологического университета
им. Д. И. Менделеева, академик РАН *П. Д. Саркисов*

Марголин В. И.

М25 **Физические основы микроэлектроники : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. И. Марголин, В. А. Жабрв, В. А. Ту- пик. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — 400 с.**

ISBN 978-5-7695-4227-5

Изложены основы квантовой механики, фрактальной геометрии и фрактальной физики, нелинейной динамики. Рассмотрены физические основы основных технологических процессов микро- и нанoeлектроники: получение тонкопленочных структур, создание и перенос литографического изображения, методы модификации поверхностных и объемных структур, основы и методы контроля и метрологии.

Для студентов высших учебных заведений.

УДК 621.3.049.77(075.8)
ББК 32.844.1я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом
без согласия правообладателя запрещается*

© Марголин В. И., Жабрв В. А., Ту-пик В. А., 2008

© Шевченко В. Я., предисловие, 2008

© Образовательно-издательский центр «Академия», 2008

© Оформление. Издательский центр «Академия», 2008

ISBN 978-5-7695-4227-5

Существует ли наномир, т. е. имеются ли в природе наноразмерные объекты, индивидуальные по свойствам и независимые от других объектов? Несомненно, что наномир существует. Соответственно для мира науки и техники есть проблема перехода от микромира к наномиру, а в более узком аспекте — от микротехнологии и микроэлектроники к нанотехнологии и нанозлектронике. Наша цель заключается в том, чтобы показать, что полученные экспериментальные факты (достаточно парадоксальные) приводят к развитию новых концепций и идей, которые дадут доказательства очевидности наномира. Проблема наносостояния не нова для химии и материаловедения. Р. Зигмонди в 1925 г. и Т. Сведберг в 1926 г. были первыми, кто получил Нобелевские премии за важные наблюдения в химии дисперсных систем (наносистем). За 70...80 лет химики синтезировали несколько сотен различных нанообъектов: частиц, материалов, структур (кентавры, коацерваты, тактоиды, фазоиды, аллофены, гигантские кластеры, фуллерены, фуллериды, нанотрубки и т. д.). Важно, что все это многообразие форм и составов существует в узком интервале размеров (наноразмеров) либо состоит из наноэлементов структуры.

Для неорганической химии переход в масштаб наноразмеров позволил обнаружить многие новые структурные типы, строение которых не соответствует незыблемым в макромире законам классической (обобщенной) кристаллографии. Наночастицы демонстрируют самые разнообразные структурные элементы: одномерные, двумерные, трехмерные, фрактальные и всевозможные их комбинации. Что же предопределяет такое многообразие структур в наномире? Ответ на этот вопрос кроется в квантовом характере наносостояния и особых статистических законах, доминирующих в наномире. Наносистемы далеки от равновесия также из-за наличия развитой поверхности. Положения атомов вблизи поверхности отличаются (геометрически и физически) от положений атомов в объеме кристалла. Состав приповерхностного слоя не соответствует стехиометрическому составу химического соединения. Глубина модуляции структуры может простирается на несколько моноатомных слоев. Такие эффекты позволяют говорить о существовании

неавтономных поверхностных фаз и псевдоморфном сопряжении их с внутренней частью частицы.

Ограничение требований регулярности трансляционной симметрии приводит к появлению икосаэдрических форм упаковки с пентагональной симметрией для неорганических частиц. Реализуются также наночастицы — кентавры с когерентными границами раздела между структурными фрагментами различной симметрии. Для того чтобы представить, как это происходит, используют художественные образы, обращаясь к фантастическому (ставшему теперь реальным) миру метаморфоз, развитых выдающимся голландским художником Морисом Эшером, в рисунках которого показано постепенное изменение симметрии при трансляции (метаморфозе).

Наблюдаемое многообразие частиц и структурная неоднородность наносостояния означают, что законы строения наночастиц иные — они не соответствуют законам, используемым в классической кристаллографии. В области теории строения наносостояния развит локальный подход в рамках алгебраической геометрии и аппарата расслоенных пространств, определяемый уникальной полупростой алгеброй, которой соответствует восьмимерная решетка корней.

Дуализм состояний наночастиц определяет случайный характер их образования, что означает временную зависимость параметров системы частиц. Для теоретического анализа наносостояния необходимо преодолеть и другие трудности концептуального характера (главное, что они известны).

В 1959 г. Нобелевский лауреат Р. Фейнман сказал, что полно игрушек на полу в комнате, объясняя тем самым, что в области малых размеров много интересного. Многие считают это началом наноэпохи. Но это не так, так как Р. Фейнман имел в виду чисто количественные аспекты. В 1977 г. другой Нобелевский лауреат И. Р. Пригожин указал на невозможность простого перехода от процессов на макроскопическом уровне к обратимым процессам на микроскопическом уровне и определил круг проблем, связанных с решением этой задачи. Можно сказать, что И. Р. Пригожин указал, где «дверь в комнату».

Выдающиеся открытия зарубежных и отечественных химиков в области синтеза и исследования строения наночастиц открывают новую страницу в исследовании этой проблемы. Методы микроскопии высокого разрешения и методы изучения фемтосекундных физических и химических процессов позволяют также экспериментально изучать наносостояние с открытыми глазами и определить многие свойства, необходимые для следующего шага — перехода от микро- к нанотехнологиям.

В силу действия различных причин (как чисто геометрических, так и физико-химических) вместе с уменьшением размеров па-

дает и характерное время протекания разнообразных процессов в системе, т.е. возрастает ее потенциальное быстродействие, что очень важно для электроники и вычислительной техники. Уже сейчас достигнутое *быстродействие* — время, затрачиваемое на одну элементарную операцию в серийно производимых компьютерах, — составляет около 1 нс (10^{-9} с), но может быть еще уменьшено на несколько порядков (до фемтосекунд в ряде наноструктур).

Наивно было бы думать, что до наступления эры нанотехнологии человек не сталкивался и не использовал объекты и процессы на наноуровне. Так, биохимические реакции между макромолекулами, из которых состоит все живое; получение фотографических изображений; катализ в химическом производстве; бродильные процессы при изготовлении вина, сыра, хлеба и другие происходят на наноуровне. Однако «интуитивная нанотехнология», первоначально развившаяся стихийно, без должного понимания природы используемых объектов и процессов, не может быть надежной основой в будущем. Поэтому первостепенное значение имеют фундаментальные исследования, направленные на создание принципиально новых технологических процессов и продуктов. Возможно, нанотехнологии смогут заменить некоторую часть морально устаревших и неэффективных технологий, но, все-таки, их главное место — в новых областях, в которых традиционными методами в принципе невозможно достигнуть требуемых результатов.

Возможность прямого исследования нанометрических объектов позволила открыть новый уровень организации материи, находящийся между макроскопическим и микроскопическим уровнями. Важным этапом в познании принципиальных свойств наномира было открытие в 1999 г. когерентных границ в наночастицах (кентаврах), из которого следует, что многофазные наночастицы не имеют стандартных границ раздела. Впоследствии А. И. Русанов показал, что понятие фазового, или агрегатного, состояния неприменимо к наночастицам. На новый тип динамических состояний материи, названных диссипативными структурами, указал И. Р. Пригожин. Для химии и биологии диссипативные структуры представляют особый интерес. Их появление в системе свидетельствует о когерентных процессах, идущих на надмолекулярном уровне, отражением чего являются совершенно своеобразные их свойства.

Таким образом, между макроуровнем (где действуют хорошо разработанные континуальные теории сплошных сред и инженерные методы расчета и конструирования), плавно переходящим в микроуровень, и атомарным уровнем, подчиненным законам квантовой механики, находится обширный уровень структуры материи — наномир. На этом уровне протекают жизненно важные биохимические процессы между макромолекулами ДНК, РНК, белков, ферментов, субклеточных структур, требующие более глубо-

кого понимания. Именно в наном мире могут быть искусственно созданы неизвестные ранее продукты и технологии, способные радикально изменить жизнь всего человеческого сообщества. При этом не потребуются больших затрат как сырья и энергии, так и средств для их транспортирования, уменьшатся количество отходов и загрязнение окружающей среды, труд станет более интеллектуальным и здоровым и т. д.

Основаниями для новой технологии являются глубокие знания свойств каждого атома вещества из Периодической системы элементов Д. И. Менделеева и наличие сил притяжения между ними при расстояниях менее 1 нм. В результате действия этих сил могут образовываться атомные конфигурации с прочными связями (ковалентными, ионными, металлическими) или слабыми (ван-дер-Ваальсовыми, водородными и др.). Атомные ассоциаты, содержащие небольшое количество атомов, называют *молекулами*, или *кластерами*. Чем меньше частица и ниже температура, тем сильнее проявляются ее квантовые свойства. Однако сильные изменения свойств наночастиц по сравнению с макрочастицами того же вещества наступают, как правило, задолго до проявления квантовых пределов (обычно при размерах менее 100 нм). Для разных свойств (химических, физических и др.) этот критический размер может быть различным даже для одного и того же вещества, как и характер их изменений.

При малых размерах и низких температурах могут возникнуть специфические квантовые размерные эффекты, которые могут быть использованы в электронике, оптике, вычислительной технике. Ярким проявлением подобного поведения являются так называемые квантовые точки, проволоки, кольца и т. д. Ввиду резкой зависимости свойств вещества от числа одинаковых атомов в кластере его иногда аллегорически называют третьей координатой Периодической системы элементов Д. И. Менделеева.

Взаимодействие наночастиц, образующих большие системы и структуры, — кристаллы, квазикристаллы, спирали, колеса, оболочечные частицы — будет определяться самоорганизацией этих систем. Наиболее подробно эти вопросы проработаны Ю. Д. Третьяковым. Бакминстер Фуллер заметил, что химики вынуждены признать существенными эти процессы, так как каждый раз, когда они пытаются выделить один элемент из комплекса или изолировать атомы или молекулы из соединения, отдельные части или их отдельные свойства не объясняют целого. Однако работы И. Р. Пригожина показывают глубокую, фундаментальную основу самоорганизации (правда, до сих пор описание этих процессов носит феноменологический характер).

Большая часть работ по выводу генетических алгоритмов образования неорганических материалов основана на оптимизации строения частиц из заданного числа атомов исходя из принципа

минимизации его энергии при фактическом игнорировании особенностей взаимодействия с окружением и геометрическими свойствами «вмещающего» пространства. Непоследовательность такого подхода достаточно очевидна, если обратить внимание на многообразие структур, в состав которых входят, например, элементарные координационные многогранники. Общий подход заключается в учете как геометрических свойств первообразующих «строительных» единиц в форме геометрических структурных комплексов, чьи локальные свойства могут быть записаны в виде кода, так и топологических характеристик вмещающего его пространства.

Прогресс в области наноэлектроники связан с непрерывным прогрессом в области миниатюризации, быстродействия и уменьшения мощности для устройств обработки информации: сенсоров приема сигналов, логических устройств обработки, запоминающих устройств, дисплеев и коммуникационного оборудования. Показательными являются достижения в области накопителей информации на магнитных носителях. Можно создать системы, которые под воздействием магнитного поля изменяют свое электрическое сопротивление. Этот эффект, называемый магниторезистивностью, используется для детектирования магнитных полей, представляющих собой магнитные биты информации в компьютерных жестких дисках. За последние 10 лет (после обнаружения эффекта магнитосопротивления) эта нанотехнология полностью вытеснила старые производства головок для компьютерных дисков. Новая считывающая головка расширила объем памяти с 1 до 20 Гбит. *Гигантская магниторезистивность* (ГМР) — это энергонезависимая магнитная память. Так как ГМР-эффект защищен от радиационных повреждений, эти блоки памяти будут иметь важное значение в космической и оборонной промышленности. В головке на спиновом затворе, использующей ГМР, медный слой — прокладка — имеет толщину 2 нм, а ГМР-прокалывающий слой — 2,5 нм.

Развитие наноэлектроники приведет к созданию наноструктурированных микропроцессоров, коммуникационного оборудования с более высокой передающей частотой, легких запоминающих устройств с емкостями порядка мультитерабитных, интегральных наносенсорных устройств минимального размера, массы и энергопотребления. Лазер с вертикальным резонансным селективным эмиттером используется для волоконной связи, оптических датчиков, кодирующих устройств, дальномеров.

Последние достижения в области нанотехнологий стали возможными в связи с появлением в руках исследователей набора аналитических методов расшифровки тонкой структуры наночастиц, локального химического анализа и компьютерных программ, обеспечивающих пространственную трансляцию изображения наблюдаемых процессов.

Таким образом, будущее наномира не только в том, что будет нанoeлектроника, или нанохимия, или нанобиология. Важнейшим прикладным значением наносостояния является возможность конвергенции неорганического, органического и биологического мира и создание невиданных ранее в природе новых веществ.

Поэтому можно только приветствовать появление учебника, в котором рассматриваются не только традиционные вопросы микротехнологии и микroeлектроники, но и проложен мост к пониманию физических основ и физико-химических проблем нанотехнологии и нанoeлектроники, рассмотрены на соответствующем уровне основы фрактальной геометрии и фрактальной физики и нелинейной динамики. Рассмотрены также физические основы технологических процессов микroeлектроники и ее метрологической базы, что является хорошим фундаментом для изучения основ нанотехнологии и нанoeлектроники.

Академик РАН В. Я. Шевченко

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анищенко В. С. Знакомство с нелинейной динамикой : учеб. пособие / В. С. Анищенко. — М. — Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2002.
2. Броудай И. Физические основы микротехнологии / И. Броудай, Дж. Мерей. — М. : Мир, 1985
3. Головин Ю. И. Введение в нанотехнологию : учеб. пособие / Ю. И. Головин. — М. : Машиностроение, 2003.
4. Гречихин Л. И. Физика наночастиц и нанотехнологий / Л. И. Гречихин. — Минск : УП «Технопринт», 2004.
5. Драгунов В. П. Основы нанoeлектроники : учеб. пособие / В. П. Драгунов, И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2000.
6. Жабрев В. А. Основы субмикронной технологии : учеб. пособие / В. А. Жабрев, В. И. Марголин, В. А. Мошников. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2001.
7. Золотухин И. В. Новые направления физического материаловедения : учеб. пособие / И. В. Золотухин, Ю. Е. Калинин, О. В. Стогней. — Воронеж : Изд-во Воронеж. ун-та, 2000.
8. Мандельброт Б. Фрактальная геометрия природы / Б. Мандельброт. — М. : Институт компьютерных исследований, 2002.
9. Марголин В. И. Основы нанотехнологии. Электронная литография и ионная имплантация : учеб. пособие / В. И. Марголин, В. А. Тупик. — СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2000.
10. Миронов В. Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В. Л. Миронов. — М. : Техносфера, 2004.
11. Моро У. Микролитография : в 2 т. / У. Моро. — М. : Мир, 1990.
12. Практическая растровая электронная микроскопия / под ред. Дж. Голдстейна, Х. М. Яковица. — М. : Мир, 1978.
13. Пул Ч. Нанотехнологии / Ч. Пул, Ф. Оуэнс. — М. : Техносфера, 2004.
14. Рыбалкина М. Нанотехнологии для всех / М. Рыбалкина. — М. : Изд. NNN, 2005.
15. Смирнов В. М. Химия наноструктур. Синтез, строение, свойства : учеб. пособие / В. М. Смирнов. — СПб. : Изд-во СПб. ун-та, 1996.
16. Суздаев И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздаев. — М. : КомКнига, 2006.
17. Таруи Я. Основы технологии СБИС / Я. Таруи. — М. : Радио и связь, 1985.
18. Технология СБИС : в 2 т. / под ред. С. Зи. — М. : Мир, 1986.
19. Шредер М. Фракталы, хаос, степенные законы / М. Шредер. — Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
От авторов	9
Введение	10
Глава 1. Основные физические представления, лежащие в основе микро- и нанотехнологии	15
1.1. Переход от микротехнологии к нанотехнологии	15
1.2. Основные положения квантовой механики	25
1.2.1. Макромир, микромир, наномир, мир элементарных частиц	25
1.2.2. Основные понятия квантовой механики	29
1.2.3. Волновой дуализм де Бройля	30
1.2.4. Принцип неопределенности Гейзенберга	32
1.2.5. Принцип запрета Паули	32
1.2.6. Волновая функция	34
1.2.7. Уравнение Шредингера	35
1.2.8. Волновые функции свободных частиц	38
1.2.9. Квантование энергии. Частица в потенциальном ящике	40
1.2.10. Туннельный эффект	43
1.2.11. Квантовое состояние и вырождение	46
1.3. Электронные состояния в твердых телах	47
1.3.1. Энергетические уровни атома	47
1.3.2. Подвижность электронов	49
1.3.3. Энергия Ферми	51
1.3.4. Эффективная масса электрона	54
1.4. Кристаллическое и аморфное состояния вещества	56
1.4.1. Понятие кристаллической решетки	56
1.4.2. Симметрия кристаллов	58
1.4.3. Решетки Браве	59
1.4.4. Индексы Миллера	62
1.4.5. Плотнейшие упаковки шаров	63
1.4.6. Аморфное состояние вещества	65
1.4.7. Энергетический спектр аморфных твердых тел	67
1.4.8. Аморфные полупроводники, диэлектрики и металлы	68
1.4.9. Модели аморфной структуры	70
1.5. Энергия связи в кристаллической решетке	71
1.5.1. Расчет энергии связи двух атомов	71

1.5.2. Межатомные связи в твердых телах	76
1.5.3. Валентная теория и метод молекулярных орбиталей	78
1.5.4. Зонная теория твердого тела	80
1.6. Молекулярная и ионная связи	82
1.6.1. Молекулярная связь и молекулярные решетки	82
1.6.2. Физические свойства молекулярных кристаллов	87
1.6.3. Ионная связь и ионные решетки	88
1.6.4. Расчет энергии связи ионной решетки	89
1.6.5. Свойства ионных кристаллов. Соотношение ионных радиусов и структура кристалла	92
1.7. Ковалентная и металлическая связи	94
1.7.1. Ковалентная связь и ковалентные решетки	94
1.7.2. Свойства ковалентных кристаллов	97
1.7.3. Металлическая связь и металлические решетки	100
1.7.4. Свойства металлов	103
1.8. Квазичастицы	106
1.8.1. Фононы	107
1.8.2. Магноны	109
1.8.3. Экситоны	110
1.8.4. Поляроны	112
1.9. Фуллерены и соединения на основе углерода	114
1.9.1. Общие представления	114
1.9.2. Методы получения фуллеренов	117
1.9.3. Некоторые свойства фуллеренов	118
1.9.4. Фуллериты	119
1.9.5. Фуллериды	121
1.9.6. Перспективы применения фуллеренов	123
1.10. Проблема атомных радиусов	124
Глава 2. Основные понятия фрактальной геометрии и фрактальной физики	129
2.1. Общие представления	129
2.1.1. Понятие фрактала	129
2.1.2. Аффинная геометрия	131
2.1.3. Математические фракталы. Фрактальная размерность	132
2.1.4. Некоторые реальные фракталы	135
2.1.5. Перколяция	139
2.1.6. Понятие фрактального кластера	139
2.1.7. Свойства фрактальных кластеров	140
2.1.8. Понятие вязких пальцев	142
2.2. Реальные фракталы	144
2.2.1. Реальные фрактальные структуры	144
2.2.2. Модельные механизмы формирования фракталов	146
2.2.3. Методы определения фрактальной размерности реальных фракталов	148
2.2.4. Физические методы измерения фрактальной размерности	154
2.3. Фрактальный подход в микро- и нанотехнологии	155
2.3.1. Фрактальный анализ процесса кристаллизации	155
2.3.2. Механизм кластер-кластерной агрегатизации	157

2.3.3. Фрактальная эволюция поликристаллической структуры	161
2.3.4. Фрактальные структуры	163
2.3.5. Фрактоны и их свойства	164
2.4. Методы получения фрактальных структур в микро- и нанотехнологии	166
2.5. Концепция мультифрактала	171
2.6. Основные понятия нелинейной динамики	176
2.6.1. Открытые и динамические системы	176
2.6.2. Линейные и нелинейные системы	178
2.6.3. Понятие хаоса. Точки бифуркации	180
2.6.4. Фазовое пространство. Атрактор	182
Глава 3. Физические основы элементной базы полупроводниковой микрэлектроники	188
3.1. Энергетические диаграммы	188
3.2. Принцип действия $p-n$ -перехода	198
3.3. Биполярный транзистор	203
3.4. Полевой транзистор	206
3.4.1. Принцип действия полевого транзистора с управляющим $p-n$ -переходом	206
3.4.2. Устройство и принцип действия полевого транзистора с МДП-структурой	208
3.5. Приборы с зарядовой связью	212
3.6. Инверторы	219
Глава 4. Физические основы технологий получения тонких пленок ..	222
4.1. Термическое вакуумное напыление	222
4.2. Ионное (катодное) распыление	229
4.3. Ионно-плазменное распыление	234
4.4. Эпитаксия из газовой фазы	240
4.5. Жидкостная эпитаксия	245
4.6. Молекулярно-лучевая эпитаксия	247
4.7. Применение ионных пучков для выращивания тонких аморфных пленок	251
4.8. Золь-гель-технологии и их применение для выращивания тонких пленок	254
4.8.1. Коллоидное состояние вещества. Дисперсные системы	254
4.8.2. Физический и химический гель. Их получение	256
4.8.3. Мицеллярная теория строения коллоидных растворов	257
4.8.4. Физическая теория устойчивости коллоидных систем	259
4.8.5. Методы получения зольей	262
4.8.6. Превращение золя в гель	263
Глава 5. Физические основы литографических методов создания и переноса изображения	267
5.1. Общие понятия. Резисты и их характеристики	267
5.1.1. Понятие литографии	267
5.1.2. Основные характеристики резистов	268
5.2. Фотолитография	271

5.3. Рентгеновская литография	274
5.4. Электронная литография	278
5.4.1. Общие понятия. Проекционная литография	278
5.4.2. Сканирующая электронная литография	280
5.4.3. Проблема совмещения	282
5.4.4. Модель Каная	283
5.4.5. Аналитические модели. Модель прямого рассеяния	284
5.4.6. Модель обратного рассеяния. Сшивка моделей	286
5.5. Низковольтная электронная литография. Эффект близости	291
5.5.1. Процессы энерговыведения в зоне пучка	291
5.5.2. Эффект близости в электронной литографии	293
5.6. Процессы травления в микротехнологии	295
Глава 6. Физические основы методов модификации поверхностных и объемных структур	301
6.1. Диффузия в поверхностных структурах	301
6.2. Лазерное легирование	304
6.3. Ионное легирование или ионная имплантация	306
6.3.1. Схема ионного легирования	306
6.3.2. Физические процессы при ионном легировании	308
6.3.3. Теория ионного легирования Линдхардта — Шарфа — Шютта	310
6.4. Термический отжиг	327
6.4.1. Лазерный отжиг	330
6.4.2. Электронно-лучевой отжиг	318
6.5. Ионно-лучевое и лазерное перемешивание	320
Глава 7. Физические основы методов контроля и метрологии в микро- и нанотехнологии	327
7.1. Просвечивающая электронная микроскопия	327
7.2. Растровая электронная микроскопия	330
7.2.1. Физические и технические основы работы растровых электронных микроскопов	330
7.2.2. Контраст в РЭМ и его разновидности	333
7.2.3. Магнитный контраст в РЭМ	337
7.3. Оже-спектроскопия	340
7.4. Рентгеноспектральный микроанализ	345
7.5. Рентгеноструктурный анализ	351
7.6. Спектроскопия обратного рассеяния Резерфорда	357
7.7. Ионный микроанализ и ионная масс-спектрометрия	362
7.8. Туннельная и атомно-силовая микроскопия	371
7.8.1. Автоионный микроскоп	371
7.8.2. Сканирующий туннельный микроскоп	372
7.8.3. Атомно-силовой микроскоп	377
7.9. Микроскопия ближнего поля	379
7.10. Физические основы эллипсометрии	385
7.11. Конфокальная микроскопия	389
Список литературы	395