

# Предисловие

Развитие электроники в течение десятилетий происходило и происходит по пути миниатюризации и усложнения изделий микроэлектроники и одновременного снижения их стоимости. Если первые работающие (1959 г.) простейшие чипы состояли из десятка элементов, то к 1970 г. микросхемы включали до 10 тысяч элементов, современный чип содержит несколько миллионов элементов. Так, наиболее распространенный процессор конца XX — начала XXI века Pentium®Pro содержит 5,5 миллионов транзисторов и имеет производительность 300 миллионов операций в секунду. Размер транзисторов достиг предельной минимальной величины, доступной для современных технологий, и поэтому дальнейшее уменьшение размеров может быть достигнуто только при использовании нанотехнологии. Использование наноструктур в электронике приведет к дальнейшей миниатюризации электронных устройств с выходом на наноразмерные элементы для создания процессоров нового поколения.

В конце декабря 1959 года Р. Фейнман, выступая с лекцией на рождественском обеде в Калифорнийском технологическом институте, обратил внимание на проблему контроля и управления строением вещества в интервале очень малых размеров как на малоизученную, но очень перспективную область физики и науки в целом. В частности, он отметил, что «научившись регулировать и контролировать структуры на атомном уровне, мы получим материалы с совершенно неожиданными свойствами и об-

наружим совершенно необычные эффекты. ... Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить многие проблемы.» . Технику манипуляции на атомном уровне сейчас называют нанотехнологией. Под термином «нанотехнология» понимают создание и использование материалов, устройств и систем, структура которых реализуется в нанометровом масштабе, т. е. в диапазоне размеров атомов, молекул и надмолекулярных образований. Нанотехнология подразумевает умение работать с такими объектами и создавать из них более крупные структуры, обладающие принципиально новой молекулярной (точнее надмолекулярной) организацией. Нанообъекты являются искусственными образованиями и характеризуются новыми физическими, химическими и биологическими свойствами, отличными от свойств объемных материалов.

Основными типами наноматериалов по размерности являются кластеры, волокна, пленки и многослойные материалы, а также нанокристаллические материалы, зерна которых имеют наноразмеры во всех трех направлениях. К нанокристаллическим относятся материалы с размером частиц (зерен) от долей нанометра и примерно до 100 нм. Можно выделить две основные характеристические черты наночастиц (кластеров), отличающие их как от атомов, так и от массивных твердых тел — это наличие большой удельной (на единицу объема) поверхности и квантовые ограничения коллективных процессов, связанных с фононами, электронами, плазмонами, магнонами и т. д. Это и определяет их необычные свойства.

Переход к наноразмерным элементам интегральных схем качественно меняет принципы функционирования транзисторных и других элементов схемы. В работе этих элементов проявляются волновые свойства электронов, вместо гальванических связей основными становятся полевые связи, становятся преобладающими процессы размерного квантования, туннелирования и другие квантовые эффекты.

Особое строение и свойства малых атомных агрегаций (кластеров) представляют значительный научный и прикладной интерес.

Научный интерес к нанокристаллическому состоянию твердого тела в дисперсном или компактном виде связан прежде всего с ожиданием различных размерных эффектов в свойствах наночастиц и нанокристаллитов, размеры которых соизмеримы или меньше, чем характерный корреляционный масштаб того или иного физического явления или характерная длина, фигурирующие в теоретическом описании какого-либо свойства или процесса (например, длина свободного пробега электронов, длина когерентности в сверхпроводниках, длина волны упругих колебаний, размер экситона в полупроводниках, размер магнитного домена в ферромагнетиках и т. д.).

Прикладной интерес к наноматериалам обусловлен возможностью значительной модификации и даже принципиального изменения свойств известных материалов при переходе в нанокристаллическое состояние, новыми возможностями, которые открывает нанотехнология в создании материалов и изделий из структурных элементов нанометрового размера. Сущность нанотехнологии состоит в возможности работать на атомном и молекулярном уровне, в масштабе длин 1–100 нм, для того, чтобы создавать и использовать материалы и устройства, имеющие новые свойства и функции благодаря малой шкале их структуры. Уже сегодня нанопродукты играют важную роль почти во всех отраслях индустрии. Сфера их применения огромна — более эффективные катализаторы, пленки для микроэлектроники, новые магнитные материалы, защитные покрытия, наносимые на металлы, пластмассу и стекло. В ближайшие десятилетия наноструктурные образования будут функционировать в биологических объектах, найдут применение в медицине. Наиболее ярко успехи нанотехнологии могут проявиться в электронике и компьютерной технике благодаря дальнейшей миниатюризации электронных устройств и созданию нанотранзисторов. Уже сегодня созданы образцы полупроводниковых гетеролазеров с низким поро-

гом генерации и малой потребляемой мощностью за счет введения в активную область квантовых точек. Имеются впечатляющие примеры реализации одноэлектронных эффектов при температуре, вплоть до комнатной, в системах с квантовыми точками.

В качестве материалов в нанoeлектронике широко используются хорошо известные из интегральной электроники кремний, германий, их твердые растворы, соединения  $A^{III}B^V$  (GaAs, AlAs, GaP, InP и др.) и твердые растворы на их основе, соединения  $A^{II}B^{VI}$  и многие другие, а также широко известные диэлектрические материалы и металлы. В последние годы появились и новые чрезвычайно интересные и перспективные для нанoeлектроники углеродные нанoобразования, такие как фуллерены и углеродные нанотрубки. Очень интересные свойства и широкую перспективу применения в нанoeлектронике имеют тонкие слои гибридных нанoкомпозиов, полученные методом Ленгмюра–Блоджетт.

В данном учебном пособии для студентов ВУЗов рассматриваются вопросы по программе курса «Материалы и методы нанотехнологии», входящего в учебный план по подготовке специалистов по направлению «Нанотехнология».

В первой главе учебного пособия рассматриваются размерные эффекты, характерные особенности и свойства наночастиц, которые зависят от размера последних. Показано, что уменьшение размера частиц или структурных элементов твердого тела (кристаллов, зерен) ниже некоторой пороговой величины может приводить к заметному изменению их свойств. Такие эффекты появляются, когда средний размер частиц не превышает 100 нм, и наиболее отчетливо наблюдаются, когда размер зерен менее 10 нм.

Вторая глава посвящена методам получения, структуре и свойствам новых материалов для нанoeлектроники — фуллеренов, углеродных нанотрубок и ленгмюровских молекулярных пленок.

Фуллерены являются во многих отношениях идеальными квантовыми точками, они имеют шанс стать самой ма-

ленькой схемой в компьютерном нанопроцессоре. Фуллерены используются как прекурсоры для роста алмазных пленок и пленок карбида кремния, перспективных для использования в высокотемпературной электронике и оптоэлектронике. Фуллерены используются также как строительный материал для создания различного рода наноструктур, например, фуллеритов — полимерных фуллеренов. Фуллериты обладают рядом перспективных электропроводящих и магнитных свойств, обладают сильно нелинейными оптическими свойствами и перспективны для применения в качестве оптических ограничителей интенсивного лазерного излучения, фоторефрактивных сред для записи динамических голограмм и др.

Углеродные нанотрубки представляют собой нанобъект типа нанопроволоки, который, собственно, «нано» только в двух измерениях, а в третьем — представляет собой «микро» объект. Это — один из перспективных материалов для разнообразных применений, поскольку углеродные нанотрубки обладают уникальными механическими свойствами, включая прочность, жесткость, ударную вязкость, химическую стойкость, теплопроводность и, что, возможно, важнее всего, обладают очень высокой электропроводностью. Они могут быть идеальными соединительными проводниками в наносхемах, обладают интенсивной эмиссией электронов при приложении небольшого электрического поля, что может использоваться для усовершенствования плоских панельных дисплеев. Приводятся примеры использования углеродных нанотрубок в нанoeлектронике.

В третьей главе рассматриваются гетерогенные процессы формирования твердотельных нанокластеров, упорядоченных структур наночастиц, самоорганизованных коллоидных структур, тонких наноструктурированных слоев и слоев гибридных полимер-неорганических нанокомпозитов, полученных методом Ленгмюра–Блоджетт, и основные области их применения. Здесь же рассмотрены наноструктурированные материалы и влияние наноструктурирования на различные свойства этих материалов, в том числе и на магнитные. В настоящее время большой интерес вызывают эффекты гигант-

ского магнетосопротивления. Последние достижения в области разработок устройств с использованием этого эффекта связаны с созданием высокочувствительных датчиков для регистрации очень слабых магнитных полей. Применение ГМС-структур может в корне изменить все промышленное производство устройств магнитной записи на жесткие диски. Наноструктурирование позволяет создавать материалы с регулируемыми электромагнитными свойствами. В результате регулируемого наноструктурирования магнитных сплавов возникают новые возможности создания магнитомягких или магнито жестких материалов с улучшенными механическими свойствами.

Методы получения упорядоченных наноструктур с механизмом самоорганизации, формирование квантовых ям, проволок и квантовых точек с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), газофазной эпитаксии слоев из металлоорганических соединений (ГФЭ МОС) и ионного синтеза описаны в четвертой главе. Здесь же обсуждаются механизмы аккомодации механического напряжения в гетероструктурах из-за рассогласования параметров решеток материалов, входящих в гетероструктуры, и механизм, приводящий к формированию квантовых точек. На эффект самоорганизации возлагаются большие надежды, связанные с проектированием завершенных технологических процессов для создания наноэлектронных систем и дешевым производством их в промышленном масштабе. Приводятся примеры приборов на квантовых ямах и квантовых точках.

Природа дает прекрасные примеры создания функциональных наноструктур. Такими структурами являются уже упоминавшиеся фуллерены и углеродные нанотрубки. Очевидно, что при наличии развитой технологии твердых тел нельзя ограничиваться только природными нанообъектами, поэтому в последние годы идет активный поиск методов, позволяющих искусственно создавать двух- и трехмерные полупроводниковые наноструктуры разнообразной формы с заданием высокой точности геометрических размеров.

Недавно сотрудниками Института физики полупроводников Сибирского отделения РАН был предложен такой метод, основанный на использовании гетероэпитаксиальных структур, выращенных методом МЛЭ [5]. Суть подхода к изготовлению полупроводниковых структур контролируемого размера и состава в виде нанотрубок, нанооболочек, спиралей, колец, нановолокон и других наноструктур состоит в освобождении напряженной полупроводниковой пленки с помощью селективного травления жертвенного слоя в эпитаксиальной гетероструктуре. Эти вопросы рассмотрены в пятой главе.

Технологическое оборудование для исследования поверхности твердых тел и создания наноструктур (сканирующий туннельный микроскоп — СТМ, атомно-силовой микроскоп — АСМ и другие микроскопы ближнего поля); физические эффекты, используемые в туннельно-зондовой нанотехнологии, и методы зондовой нанотехнологии рассматриваются в шестой главе. Здесь же излагаются различные методы записи информации с использованием сканирующих зондовых микроскопов. Рассмотрен электрохимический массоперенос с использованием СТМ, позволяющий с высоким разрешением формировать рисунок металлизации, что может быть использовано в нанолитографии. При подготовке этой главы была использована прекрасно написанная книга В. Л. Миронова «Основы сканирующей зондовой микроскопии» [2].

В последней, седьмой главе рассматриваются литографические методы формирования наноструктур. Наряду с широко используемыми в микроэлектронике, а сегодня и в нанoeлектронике, методами литографии (рентгеновская, электронная и ионная литографии) рассмотрены новые недавно появившиеся методы, такие как перьевая нанолитография, литография наносферами, нанопечатная литография, литографически индуцированная самосборка наноструктур, литография с помощью локального анодного окисления с использованием атомно-силового микроскопа с проводящим зондом. Для масштабного производства наноструктур боль-

шую перспективу имеет нанопечатная литография, которая отличается своей простотой и может быть дешевой. Литография наносферами хорошо подходит для формирования матриц с одинаковыми наноструктурами, например, матриц квантовых точек.

Настоящее пособие предназначено студентам и аспирантам, специализирующимся в области наноэлектроники.

Автор благодарен профессору Л. Н. Патрикееву за ценные замечания по содержанию учебного пособия и поддержку, благодаря которой это пособие вышло в свет.