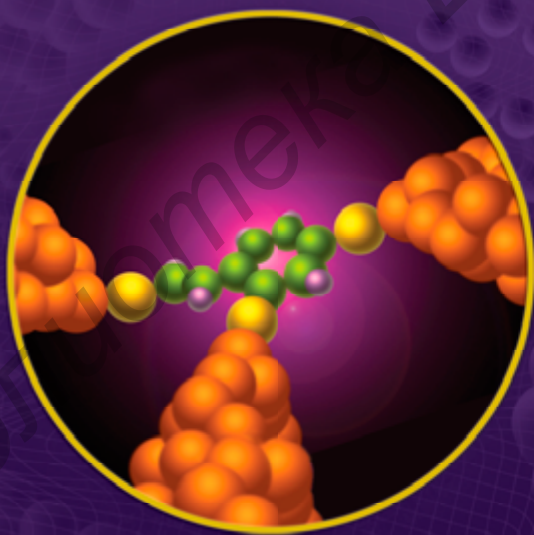


УЧЕБНИК ДЛЯ ВЫСШЕЙ ШКОЛЫ

НАНОЭЛЕКТРОНИКА

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА



ИЗДАТЕЛЬСТВО

БИНОМ

НАНОЭЛЕКТРОНИКА ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Утверждено
Министерством образования
Республики Беларусь
в качестве учебника
для студентов высших учебных заведений
по специальностям

«Квантовые информационные системы»,
«Нанотехнологии и наноматериалы
в электронике»

«Микро- и наноэлектронные технологии и системы»,

3-е издание (электронное)



Москва
БИНОМ. Лаборатория знаний
2013

УДК 621.382(075.8)

ББК 32.844.1

Б82

Серия основана в 2009 г.

Борисенко В. Е.

Б82 Наноэлектроника: теория и практика [Электронный ресурс] : учебник / В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, А. Л. Данилюк, Е. А. Уткина. — 3-е изд. (эл.). — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. — 366 с. : ил. — (Учебник для высшей школы).

ISBN 978-5-9963-2104-9

Подробно рассмотрены фундаментальные физические эффекты и электронные процессы, характерные для наноразмерных структур. Описаны принципы функционирования и типы наноэлектронных приборов для обработки информации. Приведены нанотехнологические подходы, позволяющие формировать приборные структуры наноэлектроники и спинтроники. Наряду с обновленным и расширенным теоретическим материалом предыдущего издания в данное издание включены практические задачи и контрольные вопросы для самопроверки, призванные закрепить изучаемый теоретический материал.

Для студентов, магистрантов и аспирантов, профессионально ориентированных на карьеру в области современной электроники и нанотехнологий.

УДК 621.382(075.8)

ББК 32.844.1

По вопросам приобретения обращаться:

«БИНОМ. Лаборатория знаний»

Телефон: (499) 157-5272

e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

ISBN 978-5-9963-2104-9

© БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБ АВТОРАХ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ.	11
1.1. Фундаментальные явления в низкоразмерных структурах	11
1.1.1. Квантовое ограничение	12
1.1.2. Баллистический транспорт носителей заряда	21
1.1.3. Туннелирование носителей заряда	27
1.1.4. Спиновые эффекты	33
1.2. Элементы низкоразмерных структур	38
1.2.1. Свободная поверхность и межфазные границы.	38
1.2.2. Сверхрешетки	41
1.2.3. Моделирование атомных конфигураций	45
1.3. Структуры с квантовым ограничением, создаваемым внутренним электрическим полем.	51
1.3.1. Квантовые колодцы	51
1.3.2. Модуляционно-легированные структуры	55
1.3.3. Дельта-легированные структуры	57
1.4. Структуры с квантовым ограничением, создаваемым внешним электрическим полем	60
1.4.1. Структуры металл/диэлектрик/полупроводник	60
1.4.2. Структуры с расщепленным затвором	61
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ НАНОЭЛЕКТРОННЫХ СТРУКТУР	64
2.1. Традиционные методы формирования пленок	67
2.1.1. Химическое осаждение из газовой фазы	67
2.1.2. Молекулярно-лучевая эпитаксия	81

2.1.3. Электрохимическое осаждение металлов и полупроводников	84
2.1.4. Электрохимическое оксидирование металлов и полупроводников	95
2.2. Методы, основанные на использовании сканирующих зондов	102
2.2.1. Физические основы	103
2.2.2. Атомная инженерия	106
2.2.3. Зондовые методы формирования наноструктур	112
2.3. Нанолитография	115
2.3.1. Электронно-лучевая литография	115
2.3.2. Зондовая нанолитография	120
2.3.3. Нанопечать	124
2.3.4. Сравнение нанолитографических методов	128
2.4. Саморегулирующиеся процессы	132
2.4.1. Самосборка	132
2.4.2. Самоорганизация в объемных материалах	136
2.4.3. Самоорганизация при эпитаксии	141
2.4.4. Формирование пленок Ленгмюра—Блоджетт	151
2.5. Формирование и свойства наноструктурированных материалов	159
2.5.1. Пористый кремний	159
2.5.2. Пористый оксид алюминия	164
2.5.3. Пористые оксиды тугоплавких металлов	171
2.5.4. Углеродные наноструктуры	179
ГЛАВА 3. ПЕРЕНОС НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ И ПРИБОРЫ НА ИХ ОСНОВЕ	198
3.1. Транспорт носителей заряда вдоль потенциальных барьеров	198
3.1.1. Интерференция электронных волн	199
3.1.2. Вольтамперные характеристики низкоразмерных структур	203
3.1.3. Квантовый эффект Холла	210
3.1.4. Электронные приборы на основе интерференционных эффектов и баллистического транспорта носителей заряда	216
3.2. Туннелирование носителей заряда через потенциальные барьеры	226
3.2.1. Одноэлектронное туннелирование	226

3.2.2. Приборы на основе одноэлектронного туннелирования	236
3.2.3. Резонансное туннелирование	255
3.2.4. Приборы на основе резонансного туннелирования	259
3.3. Спин-зависимый транспорт носителей заряда	267
3.3.1. Гигантское магнитосопротивление	269
3.3.2. Спин-контролируемое туннелирование	278
3.3.3. Управление спинами носителей заряда в полупроводниках	284
3.3.4. Эффект Кондо	296
3.3.5. Спинтронные приборы	301
ПРАКТИКУМ	319
1. Низкоразмерные структуры	320
2. Квантовые колодцы	321
3. Самоорганизация	322
4. Проводимость низкоразмерных структур	323
5. Одноэлектронное туннелирование	324
6. Резонансное туннелирование	324
7. Гигантское магнитосопротивление	325
8. Спин-контролируемое туннелирование	326
ПРИЛОЖЕНИЯ	328
Нобелевские лауреаты: краткая история познания наномира	328
Словарь терминов	346
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	359
ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	361

ОБ АВТОРАХ

Борисенко Виктор Евгеньевич — профессор, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, научный руководитель Центра нанoeлектроники и новых материалов. Образование получил в Минском радиотехническом институте (1973 г.) — инженер электронной техники. Кандидатская (1980 г.) и докторская (1988 г.) диссертационные работы посвящены твердофазным процессам в полупроводниках в условиях радиационных и нестационарных тепловых воздействий. Начиная с 1990 г., активно занимается проблемами нанoeлектроники, спинтроники, нанотехнологий и наноматериалов. Автор более 350 научных статей и 7 книг, редактор 9 сборников докладов Международных конференций по физике, химии и применению наноструктур "Nanomeeting", которую с 1995 г. организует и проводит в Минске в качестве сопредседателя Международного организационного комитета. Подготовленный им совместно с профессором С. Осичини (S. Ossicini) энциклопедический справочник "*What is What in the Nanoworld*" (2004 г., издательство Wiley-VCH) переиздавался дважды (в 2008 г. и 2012 г.). Подготовил 24 кандидата и 5 докторов наук.

Воробьева Алла Ильинична — доцент, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории технологических процессов микроэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Получила образование на факультете радиоэлектроники Минского радиотехнического института — инженер электронной техники. Автор более 100 научных работ, в том числе 23 авторских свидетельств на изобретения, 3 учебных пособий и 60 статей в отечественных и зарубежных изданиях. Область научных интересов — технология формирования, исследование и применение в микро- и нанoeлектронике наноструктурированных пористых оксидов, создаваемых в процессе электрохимического анодного окисления алюминия и его сплавов, а также тугоплавких металлов.

Данилюк Александр Леонидович — кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Центра наноэлектроники и новых материалов Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Получил образование на конструкторско-технологическом факультете Минского радиотехнического института — инженер-конструктор. Автор монографии и более 150 научных публикаций в отечественных и зарубежных изданиях. Занимается теоретическим исследованием и компьютерным моделированием процессов переноса заряда в низкоразмерных структурах, разработкой перспективных элементов наноэлектроники и спинтроники.

Уткина Елена Апполинарьевна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории технологических процессов микроэлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Получила образование на химическом факультете Белорусского государственного университета со специализацией «Химия полупроводников».

Автор более 60 научных публикаций и двух учебных пособий. Область научных интересов — закономерности электрохимических процессов на поверхности металлических и полупроводниковых материалов при их анодной и катодной обработке в жидких средах, разработка электрохимических технологических процессов для микро- и наноэлектроники.

ВВЕДЕНИЕ

Четыре года, прошедшие после выхода первого издания этой книги, отмечены стремительным развитием нанонауки и нанотехнологий. Все возрастающая значимость этих направлений в развитии науки наглядно продемонстрирована присуждением в 2010 г. Нобелевской премии по физике работающим в Великобритании российским ученым А. Гейму и К. Новоселову за экспериментальное получение уникального по своим свойствам углеродного материала с естественным наноструктурированием — графена. По мнению специалистов этот материал и изготовленные на его основе сверхминиатюрные электронные, оптические и магнитные приборы, состоящие из десятков и сотен атомов, призваны если не заменить полностью, то по крайней мере существенно расширить возможности современной кремниевой электроники. И это не последнее впечатляющее достижение в области исследования наноструктур и разработки нанотехнологий¹, что в полной мере касается и нанoeлектроники.

Нанoeлектроника (*nanoelectronics*)² — область науки и техники, занимающаяся созданием, исследованием и применением электронных приборов с нанометровыми размерами элементов, в основе функционирования которых лежат квантовые эффекты. Типичные размеры элементов, с которыми имеет дело нанoeлектроника — от единиц до сотен нанометров.

Следует различать понятия «наноразмерные структуры» и «низкоразмерные структуры». В первом случае главным признаком является линейный размер структуры, который хотя бы в одном направлении должен соответствовать нанометровому диапазону. **Низкоразмерными структурами** (*low-dimensional structures*)

¹ Приставка «нано-» обозначает одну миллиардную долю той единицы измерения, перед которой она поставлена. Так, один нанометр равен одной миллиардной доле метра, т. е. $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$.

² Здесь и далее основные русскоязычные термины сопровождаются их англоязычными эквивалентами, что призвано облегчить последующее чтение и понимание оригинальных публикаций на английском языке.

называют структуры, у которых, по крайней мере, один размер равен нулю. Такое определение носит, конечно, условный характер, поскольку реальный физический мир состоит из трехмерных объектов. Например, толщина сконструированной из атомов плоскости равна не нулю, а диаметру одного атома, что составляет около 10^{-10} м. Нужно понимать: двумерные, одномерные и нульмерные структуры не являются таковыми в строгом геометрическом смысле, а называются так лишь потому, что их размер в одном, двух или трех линейных направлениях меньше определенного «критического» значения, ниже которого физические свойства структуры в этом направлении (направлениях) становятся существенно отличными от свойств объемного (трехмерного) материала, из которого данная структура изготовлена. В твердотельных структурах это размеры порядка нанометра. В научной и технической литературе наноразмерные структуры часто называют **наноструктурами** (*nanostructures*). Квантово-механические явления в них являются доминирующими, что и определяет их специфические электронные, оптические, магнитные и другие свойства.

В первой главе данного учебника рассмотрены фундаментальные физические эффекты, имеющие место в наноструктурах и обусловленные их пониженной мерностью. Дана классификация элементарных и комбинированных низкоразмерных структур. Описаны подходы, позволяющие формировать такие структуры в полупроводниках.

Развитию нанотехнологий во многом способствовало постоянное совершенствование традиционных методов изготовления полупроводниковых приборов, таких как химическое осаждение из газовой фазы, молекулярно-лучевая эпитаксия и электронно-лучевая литография. Кроме того применение сканирующих атомарно острых зондов и саморегулирующихся процессов значительно расширило возможности создания твердотельных наноструктур. Нанотехнологические приемы постоянно совершенствуются, появляются все новые и новые методы. Во второй главе основное внимание уделено методам, уже прошедшим экспериментальную проверку и использующимся достаточно широко. Описаны и некоторые подходы, которые хоть и кажутся сегодня «экзотическими», завтра вполне могут превратиться в коммерческие.

Третья глава посвящена особенностям транспорта (переноса) носителей заряда в низкоразмерных структурах. Главный акцент сделан на то, что размеры наноструктур сравнимы с длиной свободного пробега электронов или дырок. Это приводит к свободно-му перемещению носителей через наноструктуру без рассеяния на

дефектах, примесях и фонах. Так как фазы невзаимодействующих электронных волн сохраняются на всем пути их следования, то весьма естественно ожидать интерференции электронных волн. Кроме того, в наноструктурах нарушается большинство предположений, на которых основано использование уравнения Больцмана для описания переноса носителей заряда. Транспорт носителей заряда, обусловленный, с одной стороны, волновой природой электрона (волнам свойственна непрерывность), а с другой — дискретностью переносимого им заряда, рассматривается как квантовый режим переноса. Он принципиально отличается от классического режима, в котором длина свободного пробега электронов намного меньше размеров структуры, в которой они находятся, а сами электроны считаются классическими частицами. На транспорт носителей заряда накладывает свой отпечаток и специфическая для низкоразмерных структур дискретность разрешенных энергетических состояний. В этой главе приведены примеры электронных приборов, основанных на рассматриваемых явлениях и эффектах.

Каждая тема в названных частях учебника завершается вопросами для самопроверки и закрепления рассмотренного теоретического материала. В разделе «Практикум» собраны задачи, полезные для практического освоения дисциплины. Вспомогательные материалы, включающие рекомендуемую дополнительную литературу, краткий обзор о Нобелевских лауреатах и словарь терминов даны в Приложениях.

При представлении материала использованы термины, основные понятия и определения из энциклопедического справочника по нанонауке и нанотехнологиям — V. E. Borisenko, S. Ossicini, *What is What in the Nanoworld* (Wiley-VCH, Weinheim, 2012) и материалы ранее вышедшего учебного пособия В. Е. Борисенко, А. И. Воробьева, Е. А. Уткина, *Нанозлектроника* (Бином. Лаборатория знаний, Москва, 2009).

Авторы выражают признательность Ф. Ф. Комарову, С. К. Лазаруку, Д. Б. Мигасу, Л. А. Опену, Л. Н. Патрикееву, А. А. Позняку, Г. П. Яблонскому за полезное критическое обсуждение материалов, вошедших в данный учебник, и конструктивные предложения по его совершенствованию.

Надеемся, что приведенные в книге материалы позволят читателю овладеть физическими и технологическими основами нанозлектроники и использовать их для дальнейшего развития этого перспективного направления.

1

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Нанoeлектроника, как самостоятельная область науки и техники, сформировалась во второй половине XX века. В ее основу легли последние достижения физики конденсированного состояния, квантовой механики, физики низкоразмерных систем, квантовой химии, а также технологии изготовления полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. В историческом ракурсе главные вехи формирования этих основ и их последующее практическое воплощение можно проследить по содержанию научных исследований и разработок, удостоенных Нобелевских премий по физике и химии. В кратком изложении они даны в разделе «Нобелевские лауреаты: история познания наномира», помещенном в Приложения.

В данной главе учебника представлены основные группы квантово-механических явлений, определяющих закономерности функционирования нанoeлектронных приборов, типы и особенности твердотельных структур, из которых конструируются эти приборы.

1.1. ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В НИЗКОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

Поведение подвижных носителей заряда (электронов и дырок) в низкоразмерных структурах определяют три группы фундаментальных явлений: квантовое ограничение, баллистический транспорт и квантовая интерференция, а также туннелирование (рис. 1.1). Все эти эффекты по своему происхождению представляют собой типичные квантово-механические явления.

Квантовое ограничение возникает, когда свободное движение электронов в одном из направлений оказывается ограниченным потенциальными барьерами, образующими наноструктуру, в которой эти электроны находятся. Оно изменяет спектр разрешенных



Рис. 1.1. Физические явления в низкоразмерных структурах, используемые в нанoeлектронных приборах

энергетических состояний и влияет на перенос носителей заряда через наноструктуры. Транспорт носителей заряда может, в принципе, осуществляться как параллельно, так и перпендикулярно потенциальным барьерам. В случае движения носителей вдоль потенциальных барьеров доминирующими эффектами оказываются баллистический транспорт и квантовая интерференция. Прохождение же носителей заряда через потенциальные барьеры происходит исключительно посредством их туннелирования, что и обеспечивает перенос носителей заряда из одной области нанoeлектронного прибора в другую.

Рассмотрим физическую природу и основные закономерности проявления перечисленных фундаментальных явлений.

1.1.1. Квантовое ограничение

Свободный электрон, движущийся в трехмерной системе (3D), имеет кинетическую энергию, величина которой, в соответствии с пространственными компонентами его импульса p_x, p_y, p_z , составляет

$$E = \frac{1}{2m^*} (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) \quad (1.1.1)$$

или, в волновом представлении,

$$E = \frac{\hbar^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2), \quad (1.1.2)$$

где m^* — эффективная масса электрона (в твердых телах она обычно меньше, чем масса покоя электрона m_0), \hbar — приведенная постоянная Планка ($\hbar = h/2\pi$); k_x , k_y , k_z — пространственные компоненты волнового вектора \mathbf{k} . Плотность электронных состояний при этом является непрерывной параболической функцией энергии:

$$n_{3D}(E) = \frac{m^* \sqrt{2m^* E}}{\pi^2 \hbar^3}.$$

В низкоразмерной структуре свободное движение электрона ограничено, по крайней мере, в одном направлении, а именно в направлении (или направлениях), в котором геометрический размер данной структуры сравним с длиной волны, соответствующей этому электрону, т. е. с длиной волны де Бройля³ $\lambda = h/(m^*v)$, где скорость движения электрона v может быть принята равной скорости, соответствующей энергии электрона на уровне Ферми. Для справки: длина волны де Бройля в металлах находится в пределах 0,1–1,0 нм, а в полупроводниках может достигать 100 нм.

В направлении, ограничивающем свободное движение электрона в низкоразмерной структуре (пусть это будет направление вдоль оси x), потенциальная энергия электрона может быть представлена в виде бесконечно глубокой прямоугольной потенциальной ямы — т. е. квантовым колодецем с бесконечно высокими краями, как это показано на рис. 1.2.

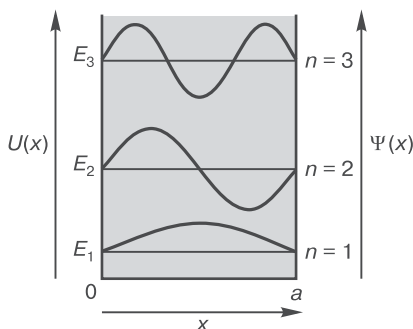


Рис. 1.2. Потенциальная яма и волновые функции электронов в ней

³ Л. де Бройль в своей статье *L. de Broglie, Ondes et quanta*, C. R. Acad. Sci. (Paris) 177, 507–510 (1923) впервые указал на возможность проявления электроном волновых свойств. В 1929 г. он был удостоен Нобелевской премии по физике за открытие волновой природы электрона.

Бесконечно высокий потенциальный барьер делает невозможным нахождение электрона за границами области $0 < x < a$. Таким образом, волновая функция электрона должна обращаться в нуль на границах потенциальной ямы, т. е. при $x = 0$ и $x = a$. Такому условию отвечает лишь ограниченный набор волновых функций. Это — стоячие волны с длиной λ , определяемой соотношением

$$\lambda_n = 2a/n, \quad (1.1.3)$$

где $n = 1, 2, \dots$. Соответствующие разрешенные значения волнового вектора дискретны и равны

$$k_n = 2\pi/\lambda_n = n\pi/a. \quad (1.1.4)$$

Как следствие, энергии разрешенных энергетических состояний электрона в яме тоже оказываются дискретными. Спектр этих состояний в яме с бесконечной высотой стенок (потенциальных барьеров, ограничивающих яму) и шириной a имеет вид

$$E_n = \frac{\hbar^2 k_n^2}{2m^*} = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2m^* a^2} = \frac{\hbar^2 n^2}{8m^* a^2}. \quad (1.1.5)$$

Целое число n является квантовым числом, обозначающим квантовое состояние. Таким образом, электрон, помещенный в ограниченную область пространства, может занимать только дискретные энергетические уровни. Самое низкое состояние имеет энергию

$$E_1 = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2m^* a^2}, \quad (1.1.6)$$

которая всегда больше нуля. Ненулевая минимальная энергия отличает квантово-механическую систему от классической, для которой энергия частицы, находящейся на дне потенциальной ямы, равна нулю. Кроме того, разрешенные значения энергии для электрона оказываются квантованными и пропорциональными n^2 .

Чтобы удовлетворить соотношению неопределенностей $\Delta p \Delta x \geq \hbar/2$ (в нашем случае $\Delta x = a$), неопределенность импульса электрона должна быть $\Delta p \geq \hbar/(2a)$, что отвечает минимальному изменению энергии $\Delta E = (\Delta p)^2/(2m^*) = \hbar^2/(8m^* a^2)$, которое, с точностью до множителя $\pi^2/4$, соответствует приведенному выше выражению для E_1 . Таким образом, принцип неопределенности также приводит к выводу о ненулевом значении минимальной энергии электрона в потенциальной яме.

[. . .]

Библиотека БГУИР

Учебное электронное издание
Серия: «Учебник для высшей школы»

Борисенко Виктор Евгеньевич
Воробьева Алла Ильинична
Данилюк Александр Леонидович
Уткина Елена Апполинарьевна

НАНОЭЛЕКТРОНИКА: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

Учебник

Ведущий редактор канд. хим. наук *Д. К. Новикова*

Редактор *С. Ф. Селиверстова*

Технический редактор *Е. В. Денюкова*

Корректор *Д. И. Мурадян*

Компьютерная верстка: *Е. А. Голубова*

Подписано 14.03.13. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 23.

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272

e-mail: binom@Lbz.ru, <http://www.Lbz.ru>

Минимальные системные требования определяются соответствующими требованиями программы Adobe Reader версии не ниже 10-й для платформ Windows, Mac OS, Android, iOS, Windows Phone и BlackBerry.

Наконец-то квантовая механика, предсказавшая и объяснившая необычные электронные и оптические свойства структур, образованных из десятков, сотен и тысяч атомов, начала давать практическую отдачу, составив основу новой области прикладной науки и техники – наноэлектроники.

Именно наноэлектроника продвигает на новый технический уровень разработку, создание и применение электронных приборов, определяющих настоящее и будущее уже привычных для нас Интернета и мобильной радиосвязи, персональных компьютеров и суперкомпьютеров, бытовых и производственных роботов, систем автоматизированного управления производственными процессами и медицинской электроники.

Наноэлектроника – это просто! Убедитесь в этом, прочитав этот учебник.