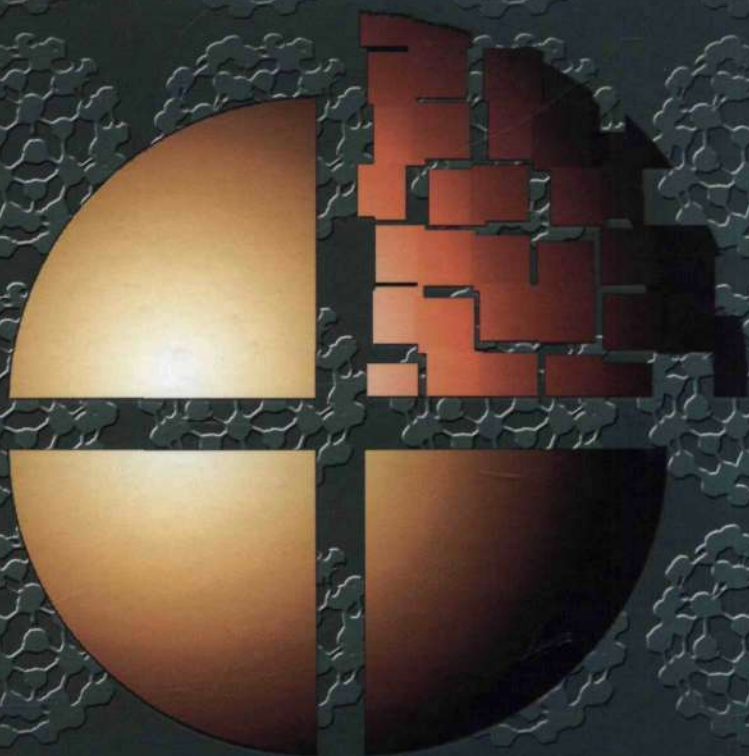


● ● ● НАНОТЕХНОЛОГИИ ● ● ●

Г. Г. Шишкин, И. М. Агеев

# НАНОЭЛЕКТРОНИКА

ЭЛЕМЕНТЫ  
ПРИБОРЫ  
УСТРОЙСТВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО

**БИНОМ**

**Г. Г. Шишкин, И. М. Агеев**

# **НАНОЭЛЕКТРОНИКА**

## **ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРЫ УСТРОЙСТВА**

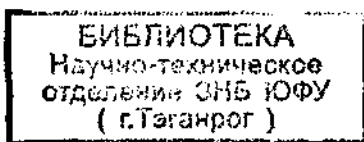
**Учебное пособие**

Рекомендовано  
Государственным образовательным  
учреждением высшего профессионального образования  
«Московский государственный технический  
университет имени Н. Э. Баумана»  
в качестве учебного пособия для студентов  
высших учебных заведений, обучающихся по направлениям  
210600 «Нанотехнология», 152200 «Наноинженерия»,  
210100 «Электроника и наноэлектроника»



Москва  
БИНОМ. Лаборатория знаний  
2011

УДК 621.382(075.8)  
ББК 38.852+32.844.1  
Ш65



M-13592

**Шишкин Г. Г.**

**Ш65** Нанoeлектроника. Элементы, приборы, устройства : учебное пособие / Г. Г. Шишкин, И. М. Агеев. — М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. — 408 с. : ил.

ISBN 978-5-9963-0638-1

В учебном пособии излагаются физические и технологические основы нанoeлектроники, в том числе принципы функционирования и характеристики нанoeлектронных устройств на базе квантово-размерных структур: резонансно-туннельных, одноэлектронных и спинтронных приборов. Рассматриваются особенности квантовых компьютеров, электронных устройств на сверхпроводниках, а также приборов нанобиелектроники. Каждая глава снабжена контрольными вопросами и заданиями для самоподготовки.

Для студентов технических вузов, аспирантов, преподавателей и практических специалистов в области электроники.

УДК 621.382(075.8)  
ББК 38.852+32.844.1

Издание осуществлено при финансовой поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по лоту «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области нанотехнологий и наноматериалов», госконтракт № 02.740.11.0790 от 17 мая 2010 г.

*Учебное издание*

**Шишкин Геннадий Георгиевич**  
**Агеев Игорь Михайлович**

**НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ЭЛЕМЕНТЫ, ПРИБОРЫ, УСТРОЙСТВА**  
**Учебное пособие**

Ведущий редактор *И. Я. Ицкоки*

Художник *Н. А. Новак*

Технический редактор *Е. В. Денюкова*

Подписано в печать 14.07.11. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 25,5. Тираж 500 экз. Заказ 6115

Издательство «БИНОМ. Лаборатория знаний»

125167, Москва, проезд Аэропорта, д. 3

Телефон: (499) 157-5272, e-mail: binom@Lbz.ru, http://www.Lbz.ru

При участии ООО Агентство печати «Столица»

тел: (495) 331-14-38; e-mail: apostolica@bk.ru

Отпечатано с готовых файлов заказчика

в «УЛЬЯНОВСКОМ ДОМЕ ПЕЧАТИ»,  
филиале ОАО «Первая Образцовая типография»  
432980, г. Ульяновск, ул. Гончарова, 14

ISBN 978-5-9963-0638-1

© БИНОМ. Лаборатория знаний,  
2011



<i>Введение</i> .....	3
<b>Раздел 1. Физические и технологические основы нанoeлектроники</b> .....	7
<b>Глава 1. Теоретические основы нанoeлектроники</b> .....	9
1.1. Основные положения квантовой механики, используемые в нанoeлектронике .....	9
1.2. Момент импульса и спин .....	14
1.3. Магнитный резонанс .....	17
1.4. Туннельный переход через потенциальный барьер .....	21
1.5. Квантовые потенциальные ямы .....	24
1.6. Интерференционные эффекты в наноструктурах .....	27
1.7. Элементы зонной теории и транспортные явления в наноразмерных структурах .....	29
1.8. Сверхрешетки .....	33
1.9. Плотность энергетических состояний в низкоразмерных структурах .....	37
1.10. Одноэлектроника .....	43
1.11. Физические основы спинтроники .....	46
Контрольные вопросы и задания .....	53
<b>Глава 2. Физические свойства наноструктур и наноструктурированных материалов</b> .....	54
2.1. Классификация низкоразмерных структур и наноматериалов .....	54
2.2. Свойства двумерных структур .....	58
2.3. Свойства одномерных структур и материалов .....	76
2.4. Свойства углеродных наноструктур .....	80
2.5. Свойства наночастиц и материалов с наночастицами .....	92
Контрольные вопросы и задания .....	96
<b>Глава 3. Технология создания наноматериалов и наноструктур и методы их диагностики</b> .....	97
3.1. Методы диагностики нанобъектов .....	97
3.2. Эпитаксиальные методы создания тонких пленок и гетероструктур .....	104
3.3. Технология создания квантовых точек и нитей .....	112
3.4. Основные технологические методы создания углеродных наноматериалов .....	118
3.5. Методы зондового сканирования .....	122
3.6. Нанолитография .....	124
Контрольные вопросы и задания .....	127

<b>Раздел 2. Нанoeлектронные приборы</b> .....	<b>129</b>
<b>Глава 4. Полупроводниковые гомо- и гетероструктуры и приборы на их основе</b> .....	<b>131</b>
4.1. Электрические гомо- и гетеропереходы .....	131
4.2. Туннельные диоды .....	159
4.3. Биполярные транзисторы .....	168
4.4. Полевые транзисторы .....	200
Контрольные вопросы и задания .....	232
<b>Глава 5. Нанoeлектронные приборы на основе квантово-размерных структур</b> .....	<b>234</b>
5.1. Резонансно-туннельные приборы .....	234
5.2. Одноэлектронные приборы .....	248
5.3. Спинтронные приборы .....	260
5.4. Полупроводниковые фотоприборы .....	268
5.5. Полупроводниковые инжекционные лазеры и светодиоды .	290
Контрольные вопросы и задания .....	316
<b>Глава 6. Базовые логические элементы квантовых компьютеров</b> .	<b>318</b>
6.1. Общие сведения о квантовых компьютерах .....	318
6.2. Базовые элементы полупроводникового кремниевого квантового компьютера на основе ядерно-магнитного резонанса .....	324
6.3. Базовые элементы для квантовых компьютеров на квантовых точках .....	331
6.4. Логические элементы квантовых компьютеров на сверхпроводниках .....	335
Контрольные вопросы и задания .....	341
<b>Глава 7. Сверхпроводимость и электронные устройства на сверхпроводниках</b> .....	<b>342</b>
7.1. Основные свойства сверхпроводящего состояния .....	342
7.2. Сверхпроводники 1-го и 2-го рода .....	355
7.3. Джозефсоновские переходы и их модели .....	364
7.4. Аналоговые сверхпроводниковые устройства .....	374
7.5. Криотроны, логические элементы и элементы памяти на джозефсоновских переходах .....	383
7.6. Электронные устройства, использующие ВТСП .....	389
Контрольные вопросы и задания .....	390
<b>Глава 8. Нанобиоэлектроника</b> .....	<b>391</b>
8.1. Общие положения и термины .....	391
8.2. Электропроводные свойства ДНК .....	394
8.3. Приборы на основе биоэлектроники .....	396
8.4. Конечный биоавтомат Шапиро .....	401
Контрольные вопросы и задания .....	403
<i>Литература</i> .....	404

Книга охватывает основные разделы современной наноэлектроники, включая электрические и оптические свойства наноструктур и наноматериалов, элементы технологии и диагностики наноматериалов, туннелирование электронов через различные структуры, одноэлектронику, спинтронику. Рассматриваются приборы и устройства наноэлектроники: нанотранзисторы, нанофотоприемники и лазеры, приборы на основе резонансного туннелирования, сверхпроводящие электронные приборы и приборы бионаноэлектроники, базовые элементы квантовых компьютеров.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям «Нанотехнология», «Электроника и наноэлектроника», «Наноинженерия», а также может быть использовано преподавателями вузов, аспирантами и практическими специалистами, работающими в этих областях.

ISBN 978-5-9963-0638-1



9 785996 306381