

А. А. Щука

НАНОЭЛЕКТРОНИКА

Под ред. академика РАН
доктора физико-математических наук
А.С. Сигова

5-е издание, электронное

Рекомендовано
УМО вузов РФ по образованию
в области прикладной математики и физики
Министерства образования и науки Российской Федерации
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки
«Прикладные математика и физика»



Москва
Лаборатория знаний
2020

УДК 621.38-002.532
ББК 32.85 я73
Щ94

Серия основана в 2006 г.

Рецензенты:

заведующий кафедрой вакуумной электроники МФТИ
доктор ф.-м. наук, академик РАН А. С. Бугаев

генеральный директор компании «Нанотехнологии МДТ»
доктор техн. наук, профессор В. А. Быков

Щука А. А.

Щ94 Нанoeлектроника : учебное пособие / А. А. Щука ; под ред. А. С. Сигова. — 5-е изд., электрон. — М. : Лаборатория знаний, 2020. — 345 с. — (Нанотехнологии). — Систем. требования: Adobe Reader XI ; экран 10". — Загл. с титул. экрана. — Текст : электронный.

ISBN 978-5-00101-730-1

Рассмотрены основные направления развития современной электроники, использующей физические эффекты, имеющие место в наноструктурах. Проанализированы пути перехода от микро- к нанoeлектронным приборам, приведены описания нанотехнологических процессов, элементов и приборов нанoeлектроники и новых материалов, с которыми тесно связано развитие приоритетной области нанонауки и нанотехнологий.

Для студентов по направлениям подготовки «Прикладная математика и физика», «Электроника и нанoeлектроника», «Нанотехнологии и микросистемная техника», а также для аспирантов и научных работников, специализирующихся в области нанoeлектроники и нанотехнологий.

**УДК 621.38-002.532
ББК 32.85 я73**

Деривативное издание на основе печатного аналога: Нанoeлектроника : учебное пособие / А. А. Щука ; под ред. А. С. Сигова. — 4-е изд. — М. : Лаборатория знаний, 2019. — 342 с. : ил. — (Нанотехнологии). — ISBN 978-5-00101-156-9.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации

ISBN 978-5-00101-730-1

© Лаборатория знаний, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Глава 1. От микро- к нанoeлектронике	13
1.1. Микроэлектроника как мотор прогресса	13
1.2. Нанoeлектроника — путь «обогнать не догоняя»	19
1.3. Нанoeлектронные приборы и устройства	21
Контрольные вопросы к главе 1	28
Литература к главе 1	28
Глава 2. Методы нанотехнологии	29
2.1. Гетерогенные процессы формирования наноструктур	29
2.1.1. Молекулярно-лучевая эпитаксия	29
2.1.2. Газофазная эпитаксия из металлоорганических соединений	36
2.1.3. Формирование структур на основе коллоидных растворов	40
2.1.4. Золь–гель-технология	43
2.1.5. Атомно-слоевое осаждение	45
2.1.6. Технология сверхтонких пленок металлов и диэлектриков	47
Контрольные вопросы к разделу 2.1	48
Литература к разделу 2.1	48
2.2. Нанοформοобразование	49
2.2.1. Гетеропленки	49
2.2.2. Формирование полупроводниковых и металлических нановолокон и спиралей	54
2.2.3. Наногοфрированные структуры	57
2.2.4. Технология создания квантовых точек	59
2.2.5. Нанопечатная литοграфия	65
2.2.6. Ионный синтез квантовых наноструктур	67
Контрольные вопросы к разделу 2.2	69
Литература к разделу 2.2	69
2.3. Методы зондовой нанотехнологии	69
2.3.1. Физические основы зондовой нанотехнологии	69
2.3.2. Контактное формирование нанорельефа	74
2.3.3. Бесконтактное формирование нанорельефа	75
2.3.4. Локальная глубинная модификация поверхности	76
2.3.5. Межэлектродный массοперенос	77
2.3.6. Электрοхимический массοперенос	80

2.3.7. Массоперенос из газовой фазы	80
2.3.8. Локальное анодное окисление	81
2.3.9. Литография с помощью сканирующего туннельного микроскопа	83
2.3.10. Совместное использование лазера и СТМ в нанолитографии	86
Контрольные вопросы к разделу 2.3	87
Литература к разделу 2.3	88
2.4. Технологии самоорганизации структур	88
2.4.1. Процессы самоорганизации в природе	88
2.4.2. Химическая самосборка	91
2.4.3. Самоорганизация наноструктур	94
Контрольные вопросы к разделу 2.4	95
Литература к разделу 2.4	96
2.5. Технология фотонных кристаллов	96
2.5.1. Методы упорядочивания наноструктур	96
2.5.2. Синтез инвертированных фотонных кристаллов	98
2.5.3. Бестемплатный синтез фотонных кристаллов	100
2.5.4. Технология селективного травления	101
2.5.5. Синтез фотонных кристаллов с контролируемой шириной запрещенной зоны	102
2.5.6. Другие технологии создания фотонных кристаллов	104
Контрольные вопросы к разделу 2.5	104
Литература к разделу 2.5	105
2.6. Графеновые технологии	105
Литература к разделу 2.6	108
Глава 3. Материалы наноэлектроники	109
3.1. Полупроводниковые структуры	109
3.1.1. Масштабы и свойства материалов	109
3.1.2. Гетеропереходы	111
3.1.3. Гетероструктуры	114
3.1.4. Сверхрешетки	116
Контрольные вопросы к разделу 3.1	120
Литература к разделу 3.1	120
3.2. Углеродные наноматериалы	120
3.2.1. Аллотропные модификации углерода	120
3.2.2. Алмазные пленки	124
3.2.3. Графен — двумерный монокристалл	125
3.2.4. Нанотрубки	129
3.2.5. Фуллерены	137
Контрольные вопросы к разделу 3.2	144
Литература к разделу 3.2	144
3.3. Мультиферроики	145
3.3.1. Классификация мультиферроиков	145
3.3.2. Магнитные полупроводники	147

3.3.3. Спин-электронные слоистые структуры	148
Контрольные вопросы к разделу 3.3	152
Литература к разделу 3.3	152
3.4. Полимерные материалы. Органические проводники и полупроводники	152
Контрольные вопросы к разделу 3.4	160
Литература к разделу 3.4	160
3.5. Фотонные кристаллы	161
Контрольные вопросы к разделу 3.5	166
Литература к разделу 3.5	166
3.6. Пленки поверхностно-активных веществ	166
3.6.1. Пленки Ленгмюра–Блоджетт	166
3.6.2. Свойства ленгмюровских пленок	170
Контрольные вопросы к разделу 3.6	171
Литература к разделу 3.6	171
3.7. Бионаноструктуры. ДНК как составляющая наноструктур	172
Контрольные вопросы к разделу 3.7	175
Литература к разделу 3.7	176
Глава 4. Элементы и приборы наноэлектроники.	177
4.1. Нанотранзисторные структуры на традиционных материалах ...	177
4.1.1. Кремниевые транзисторы с изолированным затвором	177
4.1.2. КНИ-транзисторы.	182
4.1.3. Транзисторы на структурах SiGe	184
4.1.4. Многозатворные транзисторы	186
4.1.5. Гетеротранзисторы.	188
4.1.6. Гетероструктурный транзистор на квантовых точках	195
4.1.7. Биполярные транзисторы	197
4.2. Нанотранзисторные структуры на новых материалах	198
4.2.1. Нанотранзисторы на основе углеродных нанотрубок	198
4.2.2. Нанотранзисторы на основе графена	203
4.2.3. Спиновой нанотранзистор.	205
4.2.4. Наноэлектромеханический транзистор	209
4.2.5. Успехи и перспективы транзисторостроения	211
Контрольные вопросы к разделам 4.1. и 4.2	211
Литература к разделам 4.1. и 4.2.	212
4.3. Основы одноэлектроники	212
4.3.1. Эффект одноэлектронного туннелирования	212
4.3.2. Транзисторные структуры одноэлектроники	219
4.3.3. Устройства на одноэлектронных транзисторах.	228
Контрольные вопросы к разделу 4.3	232
Литература к разделу 4.3	233
4.4. Спинтроника.	233
4.4.1. Свойства магнитоупорядоченных структур	233
4.4.2. Приборы на магнитостатических волнах.	241

4.4.3. Приборы спинтроники	243
Контрольные вопросы к разделу 4.4	249
Литература к разделу 4.4	249
4.5. Квантовые компьютеры.	250
4.5.1. От битов к кубитам	250
4.5.2. Квантовые вычисления	255
4.5.3. Элементная база квантовых компьютеров.	259
Контрольные вопросы к разделу 4.5	268
Литература к разделу 4.5	269
4.6. Молеотроника.	270
4.6.1. Молекулярный подход в нанoeлектронике	270
4.6.2. Молекулярные транзисторы и элементы логики.	271
4.6.3. Молекулярная память	281
Контрольные вопросы к разделу 4.6	285
Литература к разделу 4.6	285
4.7. Политроника.	285
4.7.1. Органические транзисторы	286
4.7.2. Органические светоизлучающие диоды.	290
4.7.3. Нанопроводники.	295
4.7.4. Вычислители на основе ДНК	297
4.7.5. Эластичная электроника	302
Контрольные вопросы к разделу 4.7	303
Литература к разделу 4.7	303
4.8. Нанопотоника	303
4.8.1. Структуры с пониженной размерностью	303
4.8.2. Устройства на фотонных кристаллах	307
4.8.3. Фотонные транзисторы	313
4.8.4. Лазерные наноструктуры.	316
4.8.5. Волоконные лазеры	319
Контрольные вопросы к разделу 4.8	321
Литература к разделу 4.8	321
4.9. Наноплазмоника.	321
4.9.1. Кванты плазмы твердых тел	321
4.9.2. Спазер — лазер на плазмонах	324
4.9.3. Однофотонный транзистор	326
4.9.4. Интегральные схемы на плазмонах	327
Контрольные вопросы к разделу 4.9	328
Литература к разделу 4.9	329
4.10. Мемристорная электроника	329
4.10.1. Мемристор и его свойства.	329
4.10.2. Кроссбар-архитектура	332
4.10.3. Нанoeлектронные устройства памяти	334
Контрольные вопросы к разделу 4.10	336
Литература к разделу 4.10	337
Предметный указатель.	338