

Содержание

Предисловие	5
Список сокращений	7
Термины и определения	7
1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ	9
1.1. Введение в физические основы микро- и нанoeлектроники	10
Тесты к лекции 1.1	12
1.2. Элементы квантовой механики и физической статистики	13
1.2.1. Волновые свойства частиц. Уравнение Шредингера	13
1.2.2. Теорема Феликса Блоха	16
1.2.3. Соотношения неопределенности Гейзенберга	17
Тесты к лекции 1.2	18
1.3. Потенциальные барьеры полубесконечной толщины	19
Тесты к лекции 1.3	22
1.4. Потенциальные барьеры конечной толщины. Функция Ферми	23
1.4.1. Прямоугольный потенциальный барьер	23
1.4.2. Функция Ферми	24
1.4.3. Строение атома	25
Тесты к лекции 1.4	25
1.5. Волновые процессы в твердом теле	27
1.5.1. Фазовая и групповая скорости, фононы	27
1.5.2. Низкоразмерные объекты: квантовая яма, квантовая нить, квантовая точка	28
Тесты к лекции 1.5	30
1.6. Элементы зонной теории твердых тел	31
Тесты к лекции 1.6	35
1.7. Зоны Бриллюэна и понятие эффективной массы	36
1.7.1. Зоны Бриллюэна	36
1.7.2. Эффективная масса электрона	38
Тесты к лекции 1.7	40
1.8. Зонная схема кристаллических тел и плотность состояний	42
1.8.1. Зонная схема кристаллических тел — проводники, диэлектрики, полупроводники	42
1.8.2. Плотность состояний	43
Тесты к лекции 1.8	48

1.9. Статистика электронов и дырок в полупроводниках	49
1.9.1. Собственные и примесные полупроводники	49
1.9.2. Зависимость концентрации свободных носителей в полупроводнике от положения уровня Ферми	51
1.9.3. Уровень Ферми и равновесная концентрация носителей в невырожденных собственных полупроводниках	53
1.9.4. Положение уровня Ферми и концентрация носителей в примесных полупроводниках	55
Тесты к лекции 1.9	58
1.10. Неравновесные носители и уравнение непрерывности	60
1.10.1. Неравновесные носители, рекомбинация носителей	60
1.10.2. Поверхностная рекомбинация	61
1.10.3. Уравнение непрерывности	62
Тесты к лекции 1.10	64
1.11. Электропроводность твердых тел	65
1.11.1. Движение электронов под действием внешнего электрического поля	65
1.11.2. Зависимость подвижности носителей заряда от температуры ...	67
1.11.3. Электропроводность чистых металлов	67
1.11.4. Электропроводность собственных полупроводников	68
1.11.5. Электропроводность примесных полупроводников	70
1.11.6. Диффузионные уравнения	71
Тесты к лекции 1.11	72
1.12. Контактные явления	74
1.12.1. Контакт электронного и дырочного полупроводников	74
1.12.2. Равновесное состояние $p-n$ -перехода	76
1.12.3. Зонная диаграмма $p-n$ -перехода при приложении внешнего электрического поля	78
1.12.4. Вольт-амперная характеристика тонкого $p-n$ -перехода	80
Тесты к лекции 1.12	84
1.13. Емкость $p-n$ -перехода	86
1.13.1. Барьерная и диффузионная емкость $p-n$ -перехода	86
1.13.2. Механизмы пробоя $p-n$ -переходов	87
Тесты к лекции 1.13	89
1.14. Биполярные транзисторы	90
1.14.1. Общие сведения	90
1.14.2. Принцип действия биполярного транзистора	91
1.14.3. Схемы включения биполярных транзисторов	93
1.14.4. Гетеропереходы	96
Тесты к лекции 1.14	98
1.15. Поверхностные явления	100
1.15.1. Основные понятия о поверхностных состояниях	100
1.15.2. Эффект поля. Металл–диэлектрик–полупроводник–структуры	100
1.15.3. Вольт-фарадная характеристика	102

1.15.4. Полевые транзисторы	104
1.15.5. Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ -переходом	109
1.15.6. Механизмы переноса заряда через тонкие диэлектрические пленки	110
Тесты к лекции 1.15	112
1.16. Туннельные эффекты и полупроводниковые сверхрешетки	114
1.16.1. Основные понятия о туннельных эффектах	114
1.16.2. Сильнополевая туннельная инжекция	115
1.16.3. Туннельный эффект в $p-n$ -переходе, образованном вырожденными полупроводниками	116
1.16.4. Резонансно-туннельные диоды	118
1.16.5. Полупроводниковые сверхрешетки	120
Тесты к лекции 1.16	122
1.17. Одноэлектронные устройства, устройства молекулярной и спин-электроники	124
1.17.1. Кулоновская блокада	124
1.17.2. Одноэлектронный транзистор	127
1.17.3. Устройства молекулярной электроники	129
1.17.4. Самосборка и самоорганизация	133
1.17.5. Устройства спин-электроники	134
Тесты к лекции 1.17	139
1.18. Физические основы низкоразмерных структур	141
Тесты к лекции 1.18	143
1.19. Углеродные наноструктуры	145
1.19.1. Общие сведения об углеродных нанотрубках	145
1.19.2. Углеродные нанотрубки	145
1.19.3. Графен	149
1.19.4. Фуллерены и фуллериты	150
Тесты к лекции 1.19	152
1.20. Термоэлектрические явления в полупроводниковых структурах	153
1.20.1. Эффект Зеебека	153
1.20.2. Эффект Пелетье	154
1.20.3. Эффект Томсона	155
Тесты к лекции 1.20	156
1.21. Высокотемпературная полупроводниковая электроника	158
1.21.1. Общие сведения о высокотемпературных полупроводниках	158
1.21.2. Твердотельные приборы на карбиде кремния	160
Тесты к лекции 1.21	163
1.22. Фоточувствительные элементы полупроводниковой электроники	165
1.22.1. Фотоприемники	165
1.22.2. Фоторезисторы	167
1.22.3. Фотодиоды	167
1.22.4. Лавинный фотодиод	168

1.22.5. Фототранзистор	169
1.22.6. Оптроны	169
1.22.7. Приборы с зарядовой связью	170
Тесты к лекции 1.22	172
1.23. Мемристоры	174
1.23.1. Основные понятия мемристивных технологий	174
1.23.2. Основные свойства мемристора	178
1.23.3. Анализ материалов мемристивных структур	180
Тесты к лекции 1.23	181
1.24. Датчики	183
1.24.1. Основные понятия в области измерения физических величин	183
1.24.2. Пьезоэлектрические датчики	184
Тесты к лекции 1.24	190
1.25. Основы квантовых вычислений	191
1.25.1. Основные понятия в области квантовых технологий	191
1.25.2. Архитектура квантового процессора	193
1.25.3. Физические платформы для реализации квантовых вычислений	198
1.25.4. Области применения квантовых компьютеров	203
1.25.5. Квантовые компьютеры в России	208
Тесты к лекции 1.25	211
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ	213
Лабораторная работа № 1. Определение ширины запрещенной зоны полупроводника	213
Контрольные вопросы и задания	220
Лабораторная работа № 2. Исследование термоэлектрических явлений в полупроводниках	221
Контрольные вопросы и задания	235
Лабораторная работа № 3. Исследование зависимости барьерной и диффузионной емкости $p-n$ -перехода от приложенного напряжения	237
Контрольные вопросы и задания	243
Лабораторная работа № 4. Определение концентрации и подвижности носителей тока в полупроводнике	245
Контрольные вопросы и задания	250
3. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ	251
3.1. Примерная базовая программа дисциплины	251
3.2. Структура и состав фондов оценочных средств по дисциплине	258
3.3. Спецификация учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, эскизов, плакатов и других дидактических материалов	267
Литература	285

Учебное издание

Андреев Владимир Викторович
Жалнин Владимир Петрович
Столяров Александр Алексеевич

**Физические основы
микро- и нанoeлектроники**

Редактор *Л.Т. Мартыненко*
Художник *Я.М. Асинкритова*
Корректор *Ю.Н. Морозова*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
Компьютерная верстка *Е.В. Жуковой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В оформлении использованы шрифты
Студии Артемия Лебедева.

Подписано в печать 20.05.2023. Формат 70×100/16.
Усл. печ. л. 23,73. Тираж 100 экз.

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
info@bmstu.press
<https://bmstu.press>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, улица 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.
baumanprint@gmail.com