

Содержание

Предисловие к третьему изданию	11
Предисловие ко второму изданию	12
Предисловие к первому изданию	13
Введение	15

Глава 1

Необходимые сведения из физики твердого тела и физики полупроводников	19
1.1. Зонная структура полупроводников.....	19
1.2. Терминология и основные понятия.....	20
1.3. Статистика электронов и дырок в полупроводниках	21
1.3.1. Распределение квантовых состояний в зонах	21
1.3.2. Концентрация носителей заряда и положение уровня Ферми.....	23
1.4. Концентрация электронов и дырок в собственном полупроводнике	25
1.5. Концентрация электронов и дырок в примесном полупроводнике	26
1.6. Определение положения уровня Ферми	27
1.7. Проводимость полупроводников	28
1.8. Токи в полупроводниках	29
1.9. Неравновесные носители.....	30
1.10. Уравнение непрерывности.....	32
Контрольные вопросы	33
Задачи	33

Глава 2

Барьеры Шоттки, p-n-переходы и гетеропереходы.....	35
2.1. Ток термоэлектронной эмиссии	35
2.2. Термодинамическая работа выхода в полупроводниках p - и n -типов	37
2.3. Эффект поля	38
2.4. Концентрация электронов и дырок в области пространственного заряда.....	40
2.5. Дебаевская длина экранирования	40
2.6. Барьер Шоттки	42
2.7. Зонная диаграмма барьера Шоттки при внешнем напряжении.....	43
2.8. Распределение электрического поля и потенциала в барьере Шоттки.....	44
2.9. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки	46
2.10. Электронно-дырочный p - n -переход	47
2.10.1. Распределение свободных носителей в p - n -переходе	49
2.10.3. Поле и потенциал в p - n -переходе.....	50
2.11. Компоненты тока и квазиуровни Ферми в p - n -переходе	53
2.12. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода	55
2.13. Гетеропереходы.....	58
Контрольные вопросы	65
Задачи	65

Глава 3

Физика поверхности и МДП-структуры.....	67
3.1. Область пространственного заряда (ОПЗ) в равновесных условиях эмиссии.....	67
3.1.1. Зонная диаграмма приповерхностной области полупроводника в равновесных условиях	67
3.2. Заряд в области пространственного заряда	71

3.2.1. Уравнение Пуассона для ОПЗ	71
3.2.2. Выражение для заряда в ОПЗ	72
3.2.3. Избыток свободных носителей заряда	73
3.2.4. Среднее расстояние локализации свободных носителей от поверхности полупроводника	76
3.2.5. Форма потенциального барьера на поверхности полупроводника	79
3.3. Емкость области пространственного заряда	80
3.4. Влияние вырождения на характеристики ОПЗ полупроводника	81
3.5. Поверхностные состояния	84
3.5.1. Основные определения	84
3.5.2. Природа поверхностных состояний	85
3.5.3. Статистика заполнения ПС	86
3.6. Вольт-фарадные характеристики структур МДП	87
3.6.1. Устройство МДП-структур и их энергетическая диаграмма	87
3.6.2. Уравнение электронейтральности	89
3.6.3. Емкость МДП-структур	92
3.6.4. Экспериментальные методы измерения вольт-фарадных характеристик	94
3.6.5. Определение параметров МДП-структур на основе анализа C-V характеристик	96
3.6.6. Определение плотности поверхностных состояний на границе раздела полупроводник – диэлектрик	100
3.7. Флуктуации поверхностного потенциала в МДП-структурах	104
3.7.1. Виды флуктуаций поверхностного потенциала	104
3.7.2. Конденсаторная модель Гетцбергера для флуктуаций поверхностного потенциала	106
3.7.3. Среднеквадратичная флуктуация потенциала, обусловленная системой случайных точечных зарядов	107
3.7.4. Потенциал, создаваемый зарядом, находящимся на границе двух сред с экранировкой	108
3.7.5. Потенциальный рельеф в МДП-структуре при дискретности элементарного заряда	111
3.7.6. Функция распределения потенциала при статистических флуктуациях	113
3.7.7. Зависимость величины среднеквадратичной флуктуации от параметров МДП-структуры	115
3.7.8. Пространственный масштаб статистических флуктуаций	116
3.7.9. Сравнительный анализ зависимости среднеквадратичной флуктуации σ_ψ и потенциала оптимальной флуктуации	120
Контрольные вопросы	122
Задачи	122

Глава 4

Полупроводниковые диоды	124
Введение	124
4.1. Характеристики идеального диода на основе <i>p-n</i> -перехода	124
4.1.1. Выпрямление в диоде	124
4.1.2. Характеристическое сопротивление	126
4.1.3. Эквивалентная схема диода	126
4.2. Варикапы	127
4.3. Влияние генерации, рекомбинации и объемного сопротивления базы на характеристики реальных диодов	127
4.3.1. Влияние генерации неравновесных носителей в ОПЗ <i>p-n</i> -перехода на обратный ток диода	129

4.3.2. Влияние рекомбинации неравновесных носителей в ОПЗ p - n -перехода на прямой ток диода	131
4.3.3. Влияние объемного сопротивления базы диода на прямые характеристики	132
4.3.4. Влияние температуры на характеристики диодов	134
4.4. Стабилитроны	135
4.4.1. Туннельный пробой в полупроводниках.....	136
4.4.2. Лавинный пробой в полупроводниках	138
4.4.3. Приборные характеристики стабилитронов.....	140
4.5. Туннельный и обращенный диоды	140
4.5.1. Вольт-амперная характеристика туннельного диода	142
4.5.2. Вольт-амперная характеристика обращенного диода	144
4.5.3. Использование туннельного диода в схемах автогенераторов колебаний ...	144
4.6. Переходные процессы в полупроводниковых диодах.....	146
Контрольные вопросы	149
Задачи	149

Глава 5

Биполярные транзисторы.....	150
5.1. Общие сведения.....	150
5.2. Основные физические процессы в биполярных транзисторах	152
5.2.1. Физические процессы	152
5.2.1.1. Зонная диаграмма и схема биполярного транзистора в схеме с общей базой	153
5.3. Формулы Молла–Эберса.....	155
5.4. Вольт-амперные характеристики биполярного транзистора в активном режиме в схеме с общей базой	156
5.5. Дифференциальные параметры биполярных транзисторов в схеме с общей базой	158
5.5.1. Коэффициент инжекции.....	159
5.5.2. Коэффициент переноса	159
5.5.3. Дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода	162
5.5.4. Дифференциальное сопротивление коллекторного перехода	162
5.5.5. Коэффициент обратной связи	164
5.5.6. Объемное сопротивление базы.....	165
5.5.7. Тепловой ток коллектора	166
5.6. Биполярный транзистор в схеме с общим эмиттером	167
5.7. Эквивалентная схема биполярного транзистора	170
5.8. Эффект оттеснения тока эмиттера	171
5.9. Составные транзисторы	173
5.10. Дрейфовые транзисторы	174
5.11. Параметры транзистора как четырехполюсника	178
5.11.1. z -, y -, h -параметры	178
5.11.2. Связь h -параметров с физическими параметрами.....	180
5.11.3. Расчет h -параметров из вольт-амперных характеристик.....	182
5.12. Частотные и импульсные свойства транзисторов	183
5.12.1. Частотная зависимость комплексного коэффициента переноса	184
5.12.2. Представление частотной зависимости коэффициента передачи RC -цепочкой	187
5.12.3. Частотная зависимость коэффициента β в схеме с общим эмиттером	189
5.12.4. Эквивалентная схема транзистора на высоких частотах.....	191
5.13. Биполярные транзисторы с гетеропереходами.....	192

5.13.1. Типовая структура ГБТ на основе SiGe	192
5.13.2. Типовая структура ГБТ на GaAs.....	194
5.13.3. Биполярные транзисторы с гетеропереходами на соединениях с фосфидом индия.....	195
Контрольные вопросы	195
Задачи	195

Глава 6

Полевые транзисторы.....	197
6.1. Типы и устройство полевых транзисторов.....	197
6.2. Принцип работы МДП-транзистора	198
6.3. Выбор знаков напряжений в МДП-транзисторе	199
6.4. Характеристики МДП-транзистора в области плавного канала	201
6.5. Характеристики МДП-транзистора в области отсечки.....	203
6.6. Влияние типа канала на вольт-амперные характеристики МДП-транзисторов	206
6.7. Эффект смещения подложки	208
6.8. Малосигнальные параметры	209
6.9. Эквивалентная схема и быстродействие МДП-транзистора	211
6.10. Методы определения параметров МОП ПТ из характеристик	212
6.11. Топологические реализации МДП-транзисторов	213
6.12. Размерные эффекты в МДП-транзисторах.....	216
6.13. Подпороговые характеристики МДП-транзистора.....	219
6.13.1. Учет диффузионного тока в канале	221
6.13.2. Неравновесное уравнение Пуассона.....	222
6.13.3. Уравнение электронейтральности в неравновесных условиях.....	223
6.13.4. Вольт-амперная характеристика МДП-транзистора в области сильной и слабой инверсии.....	226
6.14. Ячейка памяти на основе МДП-транзистора.....	231
6.15. Типы МДП-транзисторов для репрограммируемых элементов памяти	232
6.15.1. МНОП-транзистор	233
6.15.2. МОП ПТ с плавающим затвором.....	234
6.15.3. Характеристики флэш-памяти.....	235
6.15.4. Механизм записи информационного заряда на плавающий затвор в <i>p</i> - и <i>n</i> -канальном МДП-транзисторе.....	236
6.15.5. Режимы записи/стирания в МДП-транзисторах флэш-элементов памяти	241
6.16. Полевой транзистор с затвором в виде <i>p-n</i> -перехода	244
6.17. СВЧ полевые транзисторы с барьером Шоттки	247
6.17.1. GaAs полевой транзистор с барьером Шоттки.....	247
6.17.2. GaN полевой транзистор с гетеропереходом.....	250
6.17.3. Монолитные интегральные схемы с СВЧ полевыми транзисторами	251
Контрольные вопросы	252
Задачи	253

Глава 7

Тиристоры.....	254
7.1. Общие сведения	254
7.2. Вольт-амперная характеристика диодного тиристора.....	256
7.2.1. Феноменологическое описание ВАХ динистора	257
7.2.2. Зонная диаграмма и токи диодного тиристора в открытом состоянии	259
7.2.3. Зависимость коэффициента передачи α от тока эмиттера	260

7.2.4. Зависимость коэффициента M от напряжения V_G . Умножение в коллекторном переходе	261
7.3. Тринистор.....	262
7.3.1. Феноменологическое описание ВАХ тринистора.....	263
7.3.2. Симметричные тринисторы.....	264
7.4. Однопереходные транзисторы	265
Контрольные вопросы	266
Глава 8	
Лавинно-пролетные диоды	267
8.1. Общие сведения.....	267
8.2. Устройство и зонная диаграмма.....	267
8.3. Малосигнальные характеристики	269
8.4. Использование ЛПД для генерации СВЧ-колебаний.....	271
8.5. Коммутационные p - i - n -диоды.....	273
Контрольные вопросы	276
Глава 9	
Диоды Ганна	277
9.1. Общие сведения	277
9.2. Требования к зонной структуре полупроводников	277
9.3. Статическая ВАХ арсенида галлия.....	279
9.4. Зарядовые неустойчивости в приборах с отрицательным дифференциальным сопротивлением.....	282
9.4.1. Зарядовые неустойчивости в типичных полупроводниках.....	282
9.4.2. Зарядовые неустойчивости при наличии участка отрицательного дифференциального сопротивления на ВАХ	284
9.4.3. Домены сильного электрического поля в GaAs	286
9.5. Генерация СВЧ-колебаний в диодах Ганна	288
Контрольные вопросы	291
Глава 10	
Полупроводниковые лазеры и светодиоды	292
10.1. Электролюминесценция	292
10.2. Оптические переходы.....	294
10.3. Излучательная рекомбинация	297
10.3.1. Связь спектральной зависимости коэффициента поглощения и спектра люминесценции	297
10.3.2. Спектры излучательной рекомбинации при фундаментальных переходах	298
10.3.3. Спектры излучательной рекомбинации при непрямых переходах.....	300
10.4. Методы инжекции	303
10.4.1. Условие односторонней инжекции в p - n -переходе.....	303
10.4.2. Условие односторонней инжекции в гетеропереходе	303
10.5. Светодиоды	307
10.5.1. Светодиоды видимого диапазона.....	309
10.5.2. Светодиоды инфракрасного диапазона	313
10.5.3. Светодиоды коротковолнового диапазона	313
10.6. Полупроводниковые лазеры	320
10.6.1. Зонная диаграмма и конструкция полупроводникового лазера.....	321
10.6.2. Лазеры на гетероструктурах.....	322
10.6.3. Полупроводниковые лазеры с двойным гетеропереходом.....	324

10.6.4. Полупроводниковые лазеры для УФ-диапазона.....	330
10.6.5. Полупроводниковые лазеры на фотонных кристаллах.....	332
10.6.6. Применение полупроводниковых лазеров.....	333
Контрольные вопросы.....	334
Задачи.....	334

Глава 11

Фотоприемники.....	335
11.1. Статистические параметры фотодетекторов.....	335
11.2. Материалы для фотоприемников.....	337
11.3. Фоторезисторы.....	338
11.4. Фотодиоды на основе $p-n$ -перехода.....	341
11.4.1. Общие сведения.....	341
11.4.2. Вольт-амперная характеристика фотодиода.....	341
11.4.3. Спектральная чувствительность.....	346
11.4.4. $p-i-n$ -фотодиоды.....	348
11.4.5. Лавинные фотодиоды.....	350
11.5. Фототранзисторы.....	352
11.6. МДП-фотоприемники с неравновесным обеднением.....	354
11.6.1. Механизмы генерации неосновных носителей в области пространственного заряда.....	354
11.6.2. Время релаксации неравновесного обеднения.....	364
11.6.3. Дискретные МДП-фотоприемники.....	366
11.6.4. Матрицы фотоприемников с зарядовой связью (ФПЗС).....	369
Контрольные вопросы.....	377
Задачи.....	377

Глава 12

Солнечные батареи.....	378
12.1. Характеристики солнечного излучения.....	378
12.2. Методы преобразования солнечной энергии.....	380
12.3. Солнечные элементы с $p-n$ -переходом.....	381
12.3.1. Вольт-амперная характеристика идеального солнечного элемента.....	381
12.3.2. Коэффициент полезного действия солнечных элементов.....	383
12.3.2. Приборная реализация полупроводниковых солнечных батарей.....	387
12.4. Солнечные батареи на полупроводниковых гетероструктурах.....	388
Контрольные вопросы.....	392

Глава 13

Квантовый эффект Холла в двумерном электронном газе.....	393
13.1. Двумерные электроны.....	393
13.1.1. Уравнение Шредингера для электрона в ОПЗ.....	393
13.1.2. Плотность состояний в двумерной подзоне.....	394
13.1.3. Расчет концентрации $n(z)$ с учетом квантования.....	395
13.1.4. Спектр энергий и вид волновых функций в ОПЗ.....	396
13.1.5. Диаграмма состояния электронного газа в инверсионном канале.....	400
13.2. Квантовый эффект Холла.....	401
13.2.1. Зависимость ЭДС Холла от параметров инверсионного канала.....	401
13.2.2. Циклотронная частота.....	402
13.2.3. Спектр энергии двумерных электронов в поперечном магнитном поле.....	403
13.2.4. Число состояний для электронов на уровне Ландау.....	403
13.2.5. Плотность электронов в 2D электронном газе в сильном магнитном поле.....	404

13.2.6. Эффект Холла для 2D-электронов в сильном магнитном поле	405
Контрольные вопросы	406
Глава 14	
Полевые транзисторы с высокой подвижностью электронов в канале	407
14.1. Общие сведения	407
14.2. Структура и принцип действия НЕМТ-транзисторов	407
14.3. Насыщение дрейфовой скорости электронного газа	410
14.4. Вольт-амперная характеристика НЕМТ транзистора в линейной области	412
14.5. Вольт-амперная характеристика НЕМТ-транзистора в области насыщения	416
14.5.1. Напряжение насыщения и ток насыщения	416
14.5.2. Пороговое напряжение p -НЕМТ-транзистора	418
14.6. Связь концентрации n_s в канале и энергии Ферми E_F с учетом квантования 2D электронного газа	418
Контрольные вопросы	421
Глава 15	
Полупроводниковые приборы при экстремальных температурах	422
15.1. Полупроводниковые материалы для высокотемпературной электроники	422
15.2. Твердотельные приборы на SiC	425
15.3. Твердотельные приборы на GaN	433
Контрольные вопросы	441
Глава 16	
Микроминиатюризация и приборы нанoeлектроники	442
16.1. Микроминиатюризация МДП-приборов	443
16.2. Физические явления, ограничивающие микроминиатюризацию	445
16.3. Приборы нанoeлектроники	448
16.3.1. Наноразмерный полевой транзистор	449
16.3.3. Нанозмиттеры	451
16.3.4. Полевой транзистор с нанотрубками	453
16.3.5. Приборы для квантовых компьютеров	454
16.3.5. Технологический прогресс: от технологий микроэлектроники к нанотехнологиям	457
Контрольные вопросы	457
Глава 17	
Классификация и обозначения полупроводниковых приборов	458
17.1. Условные обозначения и классификация отечественных полупроводниковых приборов	458
17.2. Условные обозначения и классификация зарубежных полупроводниковых при- боров	463
17.3. Графические обозначения и стандарты	466
17.4. Условные обозначения электрических параметров и сравнительные справочные данные полупроводниковых приборов	468
Приложение А.	
Нобелевские премии за работы по твердотельной электронике	470
Приложение Б	
Решения задач	481
Решения задач	481

Глава 1. Необходимые сведения из физики твердого тела и физики полупроводников.....	481
Глава 2. Барьеры Шоттки, <i>p-n</i> -переходы и гетеропереходы.....	485
Глава 3. Физика поверхности и МДП-структуры.....	488
Глава 4. Полупроводниковые диоды	493
Глава 5. Биполярные транзисторы.....	493
Глава 6. Полевые транзисторы.....	494
Глава 10. Светодиоды и полупроводниковые лазеры.....	495
Глава 11. Фотоприемники	496
Приложение В	497
Обозначения физических параметров	497
Обозначения приборных параметров	499
Приложение Г	502
Универсальные физические постоянные	502
Полезные соотношения.....	502
Список рекомендованной литературы	504
Монографии и научные издания.....	504
Учебники и учебные пособия	506
Сборники задач.....	508
Энциклопедии и справочники.....	508
Предметный указатель	509
Об авторе	511