

Оглавление

Предисловие редактора Ю. А. Парменова	11
Глава I. Основные сведения из физики полупроводников	13
I.1. Элементы зонной теории	13
I.2. Собственные и примесные полупроводники	18
I.3. Концентрации электронов и дырок	19
I.3.1. Равновесное состояние	19
I.3.2. Неравновесное состояние	27
I.3.3. Уровень инжекции	29
I.4. Кинетика носителей заряда	29
I.5. Рекомбинация и генерация носителей заряда	33
I.5.1. Механизмы рекомбинации—генерации	33
I.5.2. Прямая межзонная рекомбинация	34
I.5.3. Ловушечная рекомбинация	35
I.5.4. Ударная рекомбинация	36
I.5.5. Поверхностная рекомбинация	36
I.5.6. Превалирующие механизмы рекомбинации	37
I.6. Общий подход к анализу полупроводниковых приборов	38
I.7. Уравнения непрерывности	39
<i>Литература</i>	44
Глава II. p-n переходы и полупроводниковые диоды	45
II.1. Понятие о p - n переходе	45
II.1.1. Определение и классификация p - n переходов	45
II.1.2. Структура p - n перехода	48
Основные выводы	50
II.2. Равновесное состояние p - n перехода	51
II.2.1. Энергетическая диаграмма p - n перехода	51
II.2.2. Токи через p - n переход в равновесном состоянии	53
II.2.3. Методика определения параметров p - n перехода	57
II.2.4. Расчет параметров ступенчатого p - n перехода	60
II.2.5. Переход с линейным распределением примеси	62
II.2.6. Диффузионные p - n переходы	65
Основные выводы	67
II.3. Неравновесное состояние p - n перехода	69
II.3.1. Прямое и обратное включение p - n перехода	69
II.3.2. Энергетические диаграммы неравновесного p - n перехода	69

П.3.3. Граничные условия и уровень инжекции	71
П.3.4. Ширина p - n перехода	74
Основные выводы	75
П.4. Анализ идеализированного диода	76
П.4.1. Модель идеализированного диода	76
П.4.2. Методика анализа ВАХ идеализированного диода	80
П.4.3. Распределения неосновных носителей заряда в квазинейтральных областях	81
П.4.4. ВАХ идеализированного диода	84
П.4.5. Тепловой ток	85
П.4.6. Температурная зависимость прямой ветви ВАХ диода	88
П.4.7. Характеристические сопротивления диода	89
П.4.8. Коэффициенты инжекции и эффективность эмиттера	90
Основные выводы	91
П.5. ВАХ реального диода	92
П.5.1. Особенности ВАХ реального диода	92
П.5.2. Термогенерация и рекомбинация носителей заряда в p - n переходе	92
П.5.3. Ток термогенерации (обратное смещение перехода) ..	94
П.5.4. Ток рекомбинации (прямое смещение перехода)	95
П.5.5. Сопротивление базы	97
П.5.6. Характеристики диода при высоком уровне инжекции	99
П.5.6.1. Особенности высокого уровня инжекции.....	99
П.5.6.2. Распределение носителей заряда в базе.....	100
П.5.6.3. Электрическое поле в базе.....	101
П.5.6.4. ВАХ p - n перехода.....	102
П.5.6.5. ВАХ диода.....	102
П.5.6.6. Эффективность эмиттера.....	103
П.5.6.7. Границы высокого и низкого уровней инжекции.....	104
П.5.7. ВАХ реального диода	104
Основные выводы	106
П.6. Пробой p - n перехода	107
П.6.1. Механизмы пробоя p - n перехода	107
П.6.2. Лавинный пробой	107
П.6.3. Туннельный (зенеровский) пробой	111
П.6.4. Особенности лавинного и туннельного механизмов пробоя	113
П.6.5. Тепловой пробой	114
Основные выводы	116
П.7. Частотные и импульсные свойства полупроводникового диода	117

П.7.1. Механизмы инерционности диода	117
П.7.2. Барьерная емкость p - n перехода	117
П.7.3. Диффузионные емкости диода	121
П.7.4. Частотные свойства диода на малом переменном сигнале	125
П.7.5. Импульсные свойства диода	128
Основные выводы	131
Литература	132
Глава III. Транзисторы со структурой металл—диэлектрик— полупроводник	133
III.1. Эффект поля в структурах МДП	133
III.1.1. Структура МДП	133
III.1.2. Идеальная структура МДП в условиях термодинамического равновесия	134
III.1.3. Эффект поля в идеальной структуре МДП	136
III.1.4. Вольтфарадные характеристики идеальной структуры МДП	141
III.1.5. Особенности эффекта поля в реальной структуре МДП	143
III.1.6. Пороговое напряжение структуры МДП	145
Основные выводы	150
III.2. Устройство и принцип действия МДП-транзистора ...	152
III.2.1. Принцип действия МДПТ	152
III.2.2. Устройство и разновидности МДПТ	152
III.2.3. Качественный анализ характеристик МДПТ.....	155
III.2.4. Пороговое напряжение МДПТ и влияние потенциала подложки	159
Основные выводы	165
III.3. Анализ идеализированного транзистора	165
III.3.1. Допущения модели идеализированного МДПТ	165
III.3.2. Характеристики идеализированного транзистора ...	167
III.3.3. Инерционные свойства идеализированного МДПТ	175
Основные выводы	178
III.4. Статические ВАХ МДП-транзисторов с длинным каналом	178
III.4.1. Влияние неоднородности ОПЗ под затвором	178
III.4.2. Подпороговый ток	182
III.4.3. Подвижность носителей заряда в канале	187
III.4.4. Влияние температуры	187
III.4.5. Умножение носителей в канале	189
Основные выводы	190
III.5. Эффекты короткого канала	191
III.5.1. Природа эффектов короткого канала	191

III.5.2. Пороговое напряжение	192
III.5.3. Эффект смыкания канала	195
III.5.4. Зарядка оксида	198
III.5.5. Ограничение дрейфовой скорости носителей в канале	198
III.5.6. Влияние ограничения дрейфовой скорости носителей в канале на основные свойства МДПТ	200
III.5.7. Модуляция длины канала	204
III.5.8. Пологая область ВАХ МДПТ и коэффициент усиления	208
III.5.9. Емкости затвор—исток и затвор—сток	212
III.5.10. Особенности ВАХ короткоканального МДПТ	213
III.5.11. Подпороговый ток	215
III.5.12. Критерий короткого канала	215
Основные выводы	216
Приложение III.1. Определение зависимости эффективной длины канала от напряжения сток-исток	217
III.6. Моделирование МДП-транзисторов	219
III.6.1. Классификация моделей полупроводниковых приборов	219
III.6.2. Особенности моделирования МДПТ	222
III.6.3. Нелинейная эквивалентная схема МДПТ для большого сигнала	224
III.6.4. Линейные эквивалентные схемы МДПТ для малого сигнала	231
III.6.5. Формальные линейные модели	235
Основные выводы	238
III.7. Масштабирование МДП-транзисторов	238
III.8. Структуры короткоканальных МДП-транзисторов	244
III.8.1. Требования к МДПТ в СБИС	244
III.8.2. Типовая структура короткоканального МДПТ	245
III.8.3. Структурные модификации короткоканальных МДПТ	249
Литература	252
Глава IV. Биполярные транзисторы	254
IV.1. Устройство и принцип действия биполярного транзистора	254
IV.1.1. Устройство биполярного транзистора	254
IV.1.2. Принцип действия и режимы работы транзистора	256
IV.1.3. Разновидности биполярных транзисторов	259
IV.1.4. Основные физические процессы в транзисторе (нормальный режим)	263
IV.1.5. Эффективность эмиттера и коэффициент переноса	266

Основные выводы	267
IV.2. Модель идеализированного транзистора Эберса—Молла	267
IV.2.1. Модель Эберса—Молла	267
IV.2.2. Статические характеристики идеализированного транзистора в схеме ОБ	274
IV.2.3. Статические характеристики идеализированного транзистора в схеме ОЭ	276
IV.2.4. Тепловые токи коллектора и эмиттера	279
Основные выводы	281
IV.3. Параметры идеализированного транзистора	282
IV.3.1. Коэффициент переноса	283
IV.3.2. Тепловые токи эмиттерного диода и эффективность эмиттера	286
IV.3.3. Влияние коэффициента переноса и эффективности эмиттера на усилительные свойства транзистора	287
IV.3.4. Инверсные параметры	288
Основные выводы	291
IV.4. Частотные и импульсные свойства коэффициентов передачи тока	292
IV.4.1. Механизм внутренней инерционности биполярного транзистора и форма представления частотных и импульсных характеристик	292
IV.4.2. Частотная характеристика коэффициента переноса	294
IV.4.3. Частотная характеристика эффективности эмиттера	295
IV.4.4. Частотные и импульсные свойства коэффициента передачи эмиттерного тока	297
IV.4.5. Частотные и импульсные свойства коэффициента усиления тока базы	299
IV.4.6. Сравнительный анализ частотных и импульсных характеристик коэффициентов α и β	301
IV.4.7. Диффузионные емкости в транзисторе	303
IV.4.8. Накопление заряда в коллекторе	305
Основные выводы	307
IV.5. Действие факторов, не учтенных в идеализированной модели транзистора	308
IV.5.1. Факторы, не учтенные в идеализированной модели	308
IV.5.2. Эффект Эрли	309
IV.5.3. Сопротивления базы и коллектора	316
IV.5.4. Эффект оттеснения эмиттерного тока	317

IV.5.5. Влияние режима работы транзистора на коэффициенты передачи тока	319
IV.5.6. Ограничение скорости носителей заряда в базе и в коллекторном переходе	321
IV.5.7. Специфика пробоя в биполярных транзисторах	326
IV.5.8. Диодное включение транзисторов	328
Основные выводы	330
IV.6. Особенности дрейфовых планарных транзисторов	331
IV.6.1. Примесный профиль планарного дрейфового транзистора и встроенные электрические поля	332
IV.6.2. Распределение избыточных носителей заряда в базе	336
IV.6.3. Время пролета неосновных носителей через базу и тепловые токи	339
IV.6.4. Коэффициент передачи эмиттерного тока	342
IV.6.5. Тиристорный эффект	344
Основные выводы	348
IV.7. Моделирование биполярных транзисторов	349
IV.7.1. Особенности моделирования биполярных транзисторов	349
IV.7.2. Эквивалентные схемы для большого сигнала на основе модели Эберса—Молла	350
IV.7.3. Метод Гуммеля—Пуна	351
IV.7.4. Модель Гуммеля—Пуна	357
IV.7.5. Эквивалентные схемы для малого сигнала	359
IV.7.6. Формальные линейные модели	364
Основные выводы	366
IV.8. Структуры интегральных биполярных транзисторов ..	367
<i>Литература</i>	375
Глава V. Сравнительный анализ принципов действия и свойств биполярных и полевых транзисторов	377
V.1. Сходства и различия в устройстве и принципе действия МДП- и биполярных транзисторов	377
V.2. Основные электрические свойства МДП- и биполярных транзисторов в рамках классических моделей	379
V.3. Эффекты, ограничивающие характеристики реальных МДП- и биполярных транзисторов	381
V.4. Важнейшие характеристики МДП- и биполярных транзисторов	381
V.5. Анализ важнейших характеристик МДП- и биполярных транзисторов	384
V.6. Области применения МДП- и биполярных транзисторов	391

Глава VI. Контакты металл—полупроводник	393
VI.1. Контакты металл—полупроводник	393
VI.1.1. Типы и основные характеристики контактов металл—полупроводник	393
VI.1.2. Параметры барьерных контактов	394
VI.1.3. Эффект Шоттки	397
VI.2. Теория выпрямления на контакте металл—полупроводник	399
VI.2.1. Общий подход	399
VI.2.2. Теория термоэлектронной эмиссии (диодная теория выпрямления)	400
VI.2.3. Диффузионная теория выпрямления	402
VI.2.4. Сравнение результатов ТТЭ и диффузионной теории выпрямления	405
VI.3. Омические контакты	405
VI.4. Диоды Шоттки	407
Основные выводы	410
<i>Литература</i>	411
Глава VII. Полевые транзисторы с управляющим барьерным переходом	412
VII.1. Полевые транзисторы с управляющим $p-n$ переходом	412
VII.1.1. Устройство и принцип действия	412
VII.1.2. ВАХ идеализированного транзистора	414
VII.1.3. Эквивалентная схема и особенности ВАХ	417
VII.1.4. Сравнение полевого транзистора с управляющим $p-n$ переходом и МДПТ	418
Основные выводы	420
VII.2. Полевые транзисторы с затвором Шоттки на основе GaAs	420
VII.2.1. Особенности GaAs как материала микроэлектроники	421
VII.2.2. Устройство и особенности ПТШ на GaAs	423
VII.2.3. Особенности характеристик и применения ПТШ	425
Основные выводы	427
<i>Литература</i>	428
Глава VIII. Гетеропереходные транзисторы	429
VIII.1. Гетеропереходы	429
VIII.1.1. Особенности гетеропереходов	430
VIII.1.2. Гетеропереходы на основе GaAs	432
VIII.1.3. Инверсионный слой в гетеропереходе и двухмерный электронный газ	434

Основные выводы	436
VIII.2. Гетеропереходные полевые транзисторы на основе GaAs	437
VIII.2.1. Устройство и принцип действия ГПТ на основе GaAs	437
VIII.2.2. Пороговое напряжение	439
VIII.2.3. ВАХ ГПТ	441
VIII.2.4. Разновидности ГПТ на основе соединений A^3B^5	442
VIII.2.5. ГПТ на основе структур Si/SiGe	444
Основные выводы	446
VIII.3. Гетеропереходные биполярные транзисторы	446
VIII.3.1. Возможности улучшения характеристик биполярных транзисторов за счет использования гетеропереходов	446
VIII.3.2. ГБТ на основе GaAs	449
VIII.3.3. ГБТ на основе гетероструктур Si-Ge/Si	454
Основные выводы	455
Литература	455
ПРИЛОЖЕНИЯ	458
Приложение 1. Физические константы	458
Приложение 2. Список общих обозначений	458
Приложение 3. Свойства некоторых полупроводниковых материалов ($T = 300\text{ K}$)	460
Приложение 4. Энергии ионизации примесей в Si, Ge и GaAs	462
Приложение 5. Греческий алфавит	462
Литература к приложениям 3, 4	463