

## О г л а в л е н и е

	Стр.
От издательства . . . . .	8
Предисловие автора . . . . .	9
Условные обозначения . . . . .	11

### 1. Введение в современную физику

1.1. Введение . . . . .	25
1.2. Излучение абсолютно чёрного тела . . . . .	26
1.3. Фотоэлектрический эффект . . . . .	29
1.4. Природа атома . . . . .	32
1.5. Дискретность в природе . . . . .	34
1.6. Корпускулярная природа волн и эффект Комптона . . . . .	36
1.7. Волновая природа частиц. Волны де Бройля . . . . .	39
1.8. Двойственная природа волн и частиц . . . . .	41
1.9. Общая теория. Волновое уравнение Шредингера . . . . .	42
1.10. Интерпретация $\Psi$ . . . . .	44
1.11. Принцип неопределённости Гейзенберга . . . . .	46
1.12. Принцип соответствия . . . . .	49
1.13. Квантово-механический эффект туннельного прохождения . . . . .	50
1.14. Выводы . . . . .	53
Задачи . . . . .	53
Литература . . . . .	54

### 2. Зонная теория и основные процессы в полупроводниках

2.1. Введение . . . . .	55
2.2. Принцип запрета Паули . . . . .	58
2.3. Картина энергетических зон . . . . .	59
2.4. Понятие дырки . . . . .	62
2.5. Индексы Миллера . . . . .	65
2.6. Эффективная масса и пространство энергии — импульс . . . . .	66
2.7. Электропроводность и её зависимость от температуры в изоляторах, полупроводниках и проводниках . . . . .	74
2.8. Связь удельной проводимости с концентрациями свободных электронов и дырок . . . . .	77
2.9. Несовершенства кристалла . . . . .	80
2.10. Химические примеси и энергетические зоны . . . . .	82
2.11. Влияние температуры на удельную проводимость полупроводника $n$ - и $p$ -типа . . . . .	84
2.12. Эффект Холла . . . . .	86
2.13. Функция плотности состояний . . . . .	90
2.14. Функция распределения Ферми—Дирака . . . . .	92
2.15. Вычисление $n$ и $p$ через уровень Ферми . . . . .	94
2.16. Расчёт уровня Ферми для некоторых простейших случаев . . . . .	96
2.17. Вычисление концентрации свободных электронов и уровня Ферми в общем случае . . . . .	98

	Стр.
2.18. Диффузия . . . . .	102
2.19. Рекомбинация . . . . .	103
2.20. Выводы . . . . .	109
Задачи . . . . .	110
Литература . . . . .	111

### 3. $p-n$ -переход

3.1. Введение . . . . .	112
3.2. Невыпрямляющий переход . . . . .	112
3.3. $p-n$ -переход без внешнего приложенного поля . . . . .	115
3.4. Граничные условия в $p-n$ -переходе при подведении внешнего напряжения . . . . .	120
3.5. Уравнение непрерывности . . . . .	123
3.6. Уравнение идеального диода с $p-n$ -переходом в случае постоянного тока . . . . .	127
3.7. Отклонение от идеального диода с $p-n$ -переходом при обратном смещении . . . . .	132
3.8. Отклонение от характеристики идеального диода с $p-n$ -переходом при прямом смещении . . . . .	138
3.9. Практическая эквивалентная схема диода с $p-n$ -переходом для постоянного тока . . . . .	142
3.10. Ёмкость перехода . . . . .	143
3.11. Выводы . . . . .	149
Задачи . . . . .	150
Литература . . . . .	151

### 4. Теория диффузионных процессов в транзисторе при протекании постоянного тока

4.1. Введение . . . . .	152
4.2. Качественная картина работы транзистора . . . . .	153
4.3. Постоянная составляющая концентрации дырок в области базы . . . . .	155
4.4. Значение плотности заряда неосновных носителей . . . . .	168
4.5. Отклонение от случая идеального плоскостного транзистора . . . . .	169
4.6. Дифференциальная эквивалентная схема . . . . .	170
4.7. Выводы . . . . .	172
Задачи . . . . .	173
Литература . . . . .	174

### 5. Низкочастотные эквивалентные схемы. Метод четырёхполюсника

5.1. Введение . . . . .	175
5.2. Т-образная эквивалентная схема . . . . .	176
5.3. Другие эквивалентные схемы, основанные на эквивалентных схемах разд. 5.2 . . . . .	181
5.4. Эквивалентная схема, построенная на системе $h$ -параметров . . . . .	184
5.5. Эквивалентные схемы с общим эмиттером и общей базой . . . . .	187
5.6. Более сложные эквивалентные схемы . . . . .	188
5.7. Замечания об использовании независимого источника в эквивалентной схеме . . . . .	192
5.8. Несколько простых примеров расчёта полного сопротивления и усиления при помощи эквивалентных схем транзисторов . . . . .	193
5.9. Схема с общим эмиттером . . . . .	195
5.10. Схема с общим коллектором . . . . .	196
5.11. Приближённые выражения . . . . .	197

5.12.	Относительная точность данных, полученных из коллекторных характеристик	199
5.13.	Сравнение эквивалентных схем для транзисторов $p-n-p$ и $n-p-n$	200
5.14.	Использование аппроксимации при быстрых вычислениях	201
5.15.	Выводы	203
	Задачи	204
	Литература	205

## 6. Стабилизация смещения и некоторые вопросы режима большого сигнала

6.1.	Введение	206
6.2.	Значение зависимости $I_{к0}(T)$	207
6.3.	Обобщённые теоремы Тевенена и Нортона	211
6.4.	Обобщённые выражения для коэффициентов стабильности по току и напряжению	214
6.5.	Вопросы усиления	218
6.6.	Изменение $\beta_0$ при изменении $i_э$	218
6.7.	Границы выбора линий нагрузки	227
6.8.	Выводы	228
	Задачи	228
	Литература	229

## 7. Простая теория работы прибора на переменном токе

7.1.	Введение	230
7.2.	Граничные условия	231
7.3.	Нестационарное диффузионное уравнение	232
7.4.	Решение на переменном токе для $p-n$ плоскостного диода	233
7.5.	Решение для $p-n-p$ транзистора	235
7.6.	Переменный электронный ток	237
7.7.	Эффективность эмиттера и коэффициент переноса	238
7.8.	Соображения относительно выбора проводимости областей эмиттера, базы и коллектора	241
7.9.	Выводы	244
	Задачи	245
	Литература	245

## 8. Общая теория прибора для переменного тока

8.1.	Введение	246
8.2.	Обобщённое решение для переменного тока	247
8.3.	Электронный ток и полные диффузионные потенциалы	254
8.4.	Более полная эквивалентная схема	256
8.5.	Внешнее сопротивление базы	258
8.6.	Выводы	260
	Задачи	261
	Литература	261

## 9. Практические схемы и полезные приближения

9.1.	Введение	262
9.2.	Коэффициент передачи тока при коротком замыкании	262

	Стр.
9.3. Эквивалентная схема при включении с общей базой . . . . .	268
9.4. $N$ -параметры схемы с общим эмиттером . . . . .	271
9.5. Приближения для $h$ -параметров . . . . .	274
9.6. Несколько полезных замечаний относительно эквивалентной схемы для $h$ -параметров . . . . .	276
9.7. Зависимость параметров эквивалентной схемы от тока смещения и напряжения . . . . .	278
9.8. Другие эквивалентные схемы . . . . .	280
9.9. Предельные частоты по току и напряжению . . . . .	282
9.10. Коэффициент передачи тока, предельная частота по $\alpha$ и внешние параметры . . . . .	284
9.11. Произведение усиления на полосу пропускания . . . . .	286
9.12. Максимальная частота генерации — характеристика добротности . . . . .	288
9.13. Многокаскадный усилитель . . . . .	291
9.14. Выводы . . . . .	294
Задачи . . . . .	295
Литература . . . . .	296

## 10. Переходные процессы в плоскостном транзисторе

10.1. Введение . . . . .	297
10.2. Определения времён переключения . . . . .	298
10.3. Время задержки выходного сигнала . . . . .	299
10.4. Время нарастания и спада . . . . .	308
10.5. Учёт нелинейности при определении времени нарастания и спада выходного сигнала . . . . .	316
10.6. Время рассасывания . . . . .	320
10.7. Зарядная концепция . . . . .	326
10.8. Переходной процесс выключения плоскостного диода с точки зрения диффузионного уравнения . . . . .	335
10.9. Диффузионное уравнение и переходные процессы в транзисторах . . . . .	340
10.10. Использование диффузионного уравнения для расчёта времени рассасывания в транзисторе . . . . .	345
10.11. Время спада и общее время выключения с точки зрения диффузионного уравнения . . . . .	350
10.12. Выводы . . . . .	360
Задачи . . . . .	362
Литература . . . . .	363

## 11. Транзисторы с полем в базовой области

11.1. Введение . . . . .	365
11.2. Градиент примеси и поле в области базы . . . . .	365
11.3. Некоторые предварительные соображения относительно поля в области базы . . . . .	368
11.4. Высокий уровень инжекции . . . . .	370
11.5. Стационарное распределение концентрации неосновных носителей . . . . .	373
11.6. Уравнения для переменного сигнала и полные проводимости . . . . .	375
11.7. Практические эквивалентные схемы для включения транзистора по схемам с общей базой и общим эмиттером . . . . .	379
11.8. Коэффициент передачи тока и сдвиг по фазе . . . . .	384
11.9. Физическая структура и некоторые трёхмерные эффекты . . . . .	385
11.10. Трёхмерный эффект и время рассасывания . . . . .	389
11.11. Сравнение транзисторов с диффузионной и однородной областями базы . . . . .	391

11.12. Выводы . . . . .	392
Задачи . . . . .	392
Литература . . . . .	393

## 12. Туннельные диоды

12.1. Введение . . . . .	394
12.2. Эффекты сильного легирования . . . . .	395
12.3. Прямой туннельный переход . . . . .	397
12.4. Непрямой туннельный переход . . . . .	401
12.5. Некоторые выражения для туннельного тока . . . . .	405
12.6. Избыточный ток . . . . .	410
12.7. Исследование свойств материалов с помощью туннельных характеристик . . . . .	415
12.8. Влияние температуры . . . . .	416
12.9. Эквивалентная схема туннельного диода . . . . .	417
12.10. Условия устойчивости . . . . .	418
12.11. Выводы . . . . .	424
Задачи . . . . .	424
Литература . . . . .	425

## 13. Некоторые другие полупроводниковые приборы

13.1. Введение . . . . .	427
13.2. Канальный транзистор . . . . .	427
13.3. Однопереходный триод . . . . .	433
13.4. Слесистор . . . . .	434
13.5. Фотопроводимость в полупроводниках . . . . .	436
13.6. Транзисторный тетрод . . . . .	437
13.7. Четырёхслойные <i>p-n-p-n</i> диоды и триоды . . . . .	438
13.8. Выводы . . . . .	441
Литература . . . . .	441

Приложение I. Периодическая таблица . . . . .	442
---	-----

Приложение II. Расчёт коллекторного коэффициента размножения $\alpha^*$ . . . . .	445
---	-----

Приложение III. Непрямой туннельный эффект и более общие выражения для прямого туннельного эффекта . . . . .	449
--	-----

Приложение IV. Составление нелинейного дифференциального уравнения для переходных процессов . . . . .	453
---	-----

Приложение V. Некоторые физические константы . . . . .	455
--	-----

Приложение VI. Свойства германия, кремния и арсенида галлия . . . . .	456
---	-----