

А.И. ЛЕБЕДЕВ

ФИЗИКА
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ
ПРИБОРОВ



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2008

УДК 621.382

ББК 32.852

Л 33

Лебедев А. И. **Физика полупроводниковых приборов.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. — 488 с. — ISBN 978-5-9221-0995-6.

Рассмотрены физические принципы работы наиболее важных классов современных полупроводниковых приборов: диодов, биполярных и полевых транзисторов, тиристоров, СВЧ приборов с отрицательным дифференциальным сопротивлением (диодов Ганна, лавинно-пролетных и инжекционно-пролетных диодов), приборов с зарядовой связью, оптоэлектронных приборов (фотоприемников, светодиодов, инжекционных лазеров и др.). Выведены основные теоретические соотношения, определяющие характеристики этих приборов. Большое внимание уделено описанию особенностей современных быстродействующих приборов с субмикронными и нанометровыми размерами, в том числе приборов, в работе которых используются гетеропереходы, квантовые ямы и квантовые точки. Помимо этого, в книге рассмотрены основы планарной технологии, описаны возникшие в последнее время технологические проблемы и указаны перспективные пути их решения.

Для студентов старших курсов, аспирантов и научных сотрудников, работающих в области физики полупроводников.

Рекомендовано УМО по классическому университетскому образованию РФ в качестве учебного пособия для студентов ВУЗов, обучающихся по специальностям 010701 — «Физика», 010704 — «Физика конденсированного состояния вещества», 010803 — «Микроэлектроника и полупроводниковые приборы».



ISBN 978-5-9221-0995-6

© ФИЗМАТЛИТ, 2008

© А. И. Лебедев, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.	7
Глава 1. Полупроводниковые диоды.	11
1.1. Потенциальный барьер в p - n -переходе	11
1.2. Вольт-амперная характеристика p - n -перехода	19
1.2.1. Вольт-амперная характеристика тонкого p - n -перехода	19
1.2.2. Влияние генерации и рекомбинации в области пространственного заряда на вольт-амперные характеристики p - n -перехода (модель Са-Нойса-Шокли)	28
1.2.3. p - n -переход при высоких уровнях инжекции	33
1.2.4. Вольт-амперная характеристика p - n -диода	39
1.3. Явление пробоя p - n -перехода	44
1.3.1. Лавинный пробой p - n -перехода	45
1.3.2. Туннельный пробой p - n -перехода	55
1.3.3. Тепловой пробой p - n -перехода	57
1.3.4. Стабилитроны	58
1.4. Туннельные диоды	62
1.4.1. Вольт-амперная характеристика туннельного диода	64
1.4.2. Избыточный ток в туннельных диодах	74
1.4.3. Выбор материалов для туннельных диодов	76
1.4.4. Обращенные диоды	81
1.5. Диоды с барьером Шоттки	83
1.5.1. Энергетическая диаграмма контакта металл-полупроводник	84
1.5.2. Вольт-амперная характеристика барьера Шоттки	89
1.5.3. Омические контакты к полупроводникам	99
1.6. Гетеропереходы и сверхрешетки.	103
1.6.1. Гетеропереходы	103
1.6.2. Квантовые ямы и сверхрешетки	110
1.7. Диод на переменном токе	121
1.7.1. Барьерная емкость	121
1.7.2. Диффузионная емкость.	126
1.7.3. Импульсные характеристики и быстродействие диодов	128

1.7.4. Диоды с накоплением заряда	133
1.7.5. Емкостная спектроскопия глубоких уровней	135
Глава 2. Биполярные транзисторы	140
2.1. Немного истории. Конструкции биполярного транзистора. . .	140
2.2. Параметры, определяющие коэффициент усиления транзистора.	148
2.2.1. Коэффициент инжекции эмиттера	149
2.2.2. Коэффициент переноса носителей через базу	153
2.2.3. Эффективность инжекции при очень малых и очень больших токах	155
2.2.4. Эффект оттеснения эмиттерного тока.	157
2.2.5. Влияние напряжения на коллекторе на коэффициент усиления.	158
2.3. Транзистор при высоком напряжении на коллекторе.	160
2.4. Высокочастотные свойства и быстродействие транзисторов. .	165
2.4.1. Частота отсечки и максимальная частота генерации . .	165
2.4.2. Гетеропереходные транзисторы	170
2.5. Транзисторы в схемах усиления сигналов	177
2.5.1. Схемы включения транзистора и выбор рабочей точки	177
2.5.2. Описание транзистора с помощью h -параметров	178
2.6. Шумы в биполярных транзисторах.	182
2.7. Особенности работы транзисторов в импульсном режиме. . .	187
2.8. Элементы интегральных схем на биполярных транзисторах	190
2.8.1. Планарная технология	191
2.8.2. Особенности устройства цифровых ИС на биполярных транзисторах.	209
Глава 3. Тиристоры и другие многослойные структуры . . .	215
3.1. Тиристоры.	215
3.1.1. Вольт-амперные характеристики тиристора.	216
3.1.2. Процессы включения и выключения тиристора	231
3.2. Многослойная структура — симистор	236
Глава 4. Полевые транзисторы	239
4.1. Полевые транзисторы с изолированным затвором.	241
4.1.1. МОП-конденсатор	241

<i>Оглавление</i>	5
4.1.2. Вольт-амперная характеристика МОП-транзистора . . .	249
4.1.3. Особенности реальных полевых транзисторов	252
4.1.4. Полевые транзисторы с коротким каналом	255
4.1.5. Быстродействие полевых транзисторов	259
4.1.6. Пути дальнейшего повышения быстродействия МОП-транзисторов	261
4.1.7. Мощные и высоковольтные МОП-транзисторы	264
4.2. Элементы интегральных схем на МОП-транзисторах	269
4.2.1. Интегральные схемы на n -МОП-транзисторах	271
4.2.2. КМОП-структуры	279
4.2.3. Энергонезависимые постоянные запоминающие устройства на МОП-транзисторах	285
4.3. Полевые транзисторы с управляющим p – n -переходом и барьером Шоттки	294
Глава 5. Приборы с зарядовой связью	311
Глава 6. Полупроводниковые СВЧ приборы	332
6.1. Диоды Ганна	333
6.2. Лавинно-пролетные диоды	355
6.3. Инжекционно-пролетные диоды	368
6.4. Другие способы генерации СВЧ колебаний	376
6.4.1. ТРАПАТТ-режим	376
6.4.2. Туннельно-пролетные диоды (TUNNETT)	376
6.4.3. QWITT-диоды	379
Глава 7. Оптоэлектронные приборы	380
7.1. Приемники излучения	381
7.1.1. Механизмы поглощения излучения в полупроводнике	381
7.1.2. Фотоприемники, основанные на явлении фотопроводимости	384
7.1.3. Шумы в фотоприемниках	401
7.1.4. Фотовольтаические приемники (фотодиоды)	405
7.1.5. Лавинные фотодиоды	410
7.1.6. Преобразователи солнечной энергии (солнечные элементы)	414
7.1.7. Детекторы ядерных излучений	423

7.2. Светодиоды и полупроводниковые лазеры	428
7.2.1. Механизмы излучательной рекомбинации	428
7.2.2. Светодиоды	432
7.2.3. Инжекционные полупроводниковые лазеры	445
Приложение	461
Список литературы	463
Предметный указатель	478