

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. И. Смирнов

ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Учебное пособие

для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.03.03 – «Конструирование и технология электронных средств»,
профиль «Конструирование и технология электронных средств»

Ульяновск
УлГТУ
2022

УДК 621.382 (075)

ББК 32.965я7

С 50

Рецензенты:

Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (директор д-р техн. наук, профессор В.А. Сергеев); профессор кафедры «Конструирование и технология электронных систем и устройств» Самарского национального исследовательского университета им. академика С.П. Королева, д-р техн. наук, профессор М.Н. Пиганов

*Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Смирнов, Виталий Иванович

С 50 Физика полупроводниковых приборов : учебное пособие /
В. И. Смирнов. – Ульяновск : УлГТУ, 2022. – 203 с.

ISBN 978-5-9795-2198-5

Изложены физические основы работы полупроводниковых приборов. Особое внимание уделено процессам в электронно-дырочных переходах, составляющих основу практически всех полупроводниковых диодов, транзисторов и тиристоров. Отдельно выделены полупроводниковые элементы, предназначенные для работы в силовых устройствах и устройствах СВЧ-электроники.

Пособие снабжено большим количеством рисунков, что облегчает преподавание дисциплины с активным привлечением мультимедийных средств.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.03 – «Конструирование и технология электронных средств», профиль «Конструирование и технология электронных средств».

УДК 621.382 (075)

ББК 32.965я7

ISBN 978-5-9795-2198-5

© Смирнов В. И., 2022

© Оформление. УлГТУ, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1. КОНТАКТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ	9
1.1. Методы формирования электронно-дырочных переходов...	9
1.2. Электрические процессы в <i>p-n</i> -переходе в отсутствие внешнего напряжения.....	14
1.3. Выпрямляющие свойства <i>p-n</i> -перехода.	18
1.4. ВАХ реального <i>p-n</i> -перехода.....	24
1.5. Барьерная и диффузионная емкости <i>p-n</i> -перехода.....	28
1.6. Переходные процессы в <i>p-n</i> -переходе.....	32
1.7. Пробой <i>p-n</i> -перехода.....	35
1.7.1. Лавинный пробой.....	35
1.7.2. Туннельный пробой.....	37
1.7.3. Тепловой пробой.....	39
1.8. Контакт металл-полупроводник.....	40
1.8.1. Процессы в переходе металл-полупроводник.....	41
1.8.2. Выпрямляющие свойства барьера Шоттки.....	44
1.8.3. Омические контакты металл-полупроводник.....	46
1.9. Гетерогенный переход.....	48
Контрольные вопросы.....	51
2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ	52
2.1. Общие сведения о полупроводниковых диодах.....	52
2.2. Выпрямительные диоды.....	53
2.3. Импульсные диоды.....	56
2.3.1. Переходные процессы в импульсных диодах.....	56
2.3.2. Диоды Шоттки.....	60
2.3.3. <i>Pi-p</i> -диоды.....	62
2.3.4. Диоды с накоплением заряда.....	65
2.4. Стабилитроны и стабисторы.....	66
2.5. Варикапы.....	70
2.6. Туннельные и обращенные диоды.....	73
Контрольные вопросы.....	78

3. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	79
3.1. Общие сведения о биполярных транзисторах.....	79
3.2. Режимы работы биполярных транзисторов и схемы включения.....	83
3.3. Физические процессы в биполярном транзисторе.....	85
3.4. Статические характеристики биполярного транзистора.....	89
Контрольные вопросы.....	93
4. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ	95
4.1. Общие сведения о полевых транзисторах.....	95
4.2. Полевые транзисторы с управляющим переходом.....	98
4.3. Полевые транзисторы с изолированным затвором.....	103
4.3.1. Эффект поля в структуре «металл-диэлектрик- полупроводник».....	103
4.3.2. МДП-транзисторы с индуцированным каналом.....	105
4.3.3. МДП-транзисторы с встроенным каналом.....	110
Контрольные вопросы.....	113
5. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ	114
5.1. Общие сведения о силовой электронике.....	114
5.2. Тиристоры.....	117
5.2.1. Структура и принцип действия двухэлектродного тиристора.....	117
5.2.2. Триодные тиристоры.....	121
5.2.3. Симметричные тиристоры (симисторы).....	123
5.2.4. Фототиристоры.....	126
5.3. Мощные силовые МДП-транзисторы.....	128
5.4. Биполярные транзисторы с изолированным затвором.....	132
5.5. Силовая электроника на широкозонных полупроводниках...	136
Контрольные вопросы.....	139
6. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ	140
6.1. Полупроводниковые светодиоды.....	140
6.2. Полупроводниковые инжекционные лазеры.....	144

6.3. Полупроводниковые фотоэлементы.....	150
6.4. Фоторезисторы.....	155
6.5. Фотодиоды.....	159
6.5.1. Принцип действия фотодиода.....	160
6.5.2. Лавинные фотодиоды.....	162
6.5.3. <i>P-i-n</i> -фотодиоды.....	165
6.5.4. Фотодиоды с барьером Шоттки.....	166
6.6. Фототранзисторы.....	169
6.6.1. Биполярные фототранзисторы.....	169
6.6.2. Полевые фототранзисторы.....	171
Контрольные вопросы.....	173
7. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ	
СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ.....	174
7.1. Общие сведения об СВЧ-электронике.....	174
7.2. Лавинно-пролетные диоды.....	176
7.3. Диоды Ганна.....	182
7.3.1. Эффективная масса носителей заряда	
в полупроводниках.....	182
7.3.2. Эффект Ганна.....	184
7.3.3. Генерация электромагнитных колебаний	
в диоде Ганна.....	186
7.3.4. Конструктивные особенности диодов Ганна.....	188
7.4. Транзисторы с высокой подвижностью электронов.....	190
7.5. Гетеропереходные биполярные транзисторы.....	195
Контрольные вопросы.....	198
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	199
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	202
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	203