



«Инфра-Инженерия»



И. К. НИКИФОРОВ

# ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА

ДИОДЫ И ТИРИСТОРЫ,  
ИХ ОСОБЕННОСТИ И ПРИМЕНЕНИЕ.  
ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ

**И. К. Никифоров**

**ЭЛЕКТРОННАЯ АППАРАТУРА  
ДИОДЫ И ТИРИСТОРЫ, ИХ ОСОБЕННОСТИ  
И ПРИМЕНЕНИЕ. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ**

Учебное пособие

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2023

УДК 621.382.2/3: 621.383: 621.385.1

ББК 32.851+32.853.2+32.853.4

Н62

Рецензент:

канд. техн. наук, доцент кафедры промышленной электроники  
ФБГОУ ВО «Чувашский государственный университет  
им. И. Н. Ульянова» *Г. В. Малинин*

**Никифоров, И. К.**

**Н62**

Электронная аппаратура. Диоды и тиристоры, их особенности и применение. Оптоэлектронные приборы : учебное пособие / И. К. Никифоров. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 800 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-1231-5

Рассматриваются основные положения электроники, приводится ряд сведений и справочных данных о проводниковых, диэлектрических, полупроводниковых и магнитных материалах, применяемых в радио-, электро-технике и электроэнергетике.

Для студентов электротехнических и радиотехнических специальностей. Может быть полезно специалистам, занимающимся разработкой силовой электронной аппаратуры и мощных источников вторичного электропитания.

УДК 621.382.2/3: 621.383: 621.385.1

ББК 32.851+32.853.2+32.853.4

ISBN 978-5-9729-1231-5

© Никифоров И. К., 2023

© Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Обозначения физических величин .....	3
Условные сокращения .....	5
Предисловие .....	8
<b>1. Диоды. Общие вопросы</b> .....	<b>10</b>
1.1. Устройство полупроводниковых диодов .....	11
1.2. ВАХ диода .....	13
1.3. Пробой диода .....	16
1.4. Дифференциальные параметры и емкости диода .....	21
1.5. Выпрямительный режим работы диодов .....	24
1.6. Импульсный режим работы диодов .....	28
1.7. Модели диода .....	33
1.7.1. Виды моделей ПП-приборов .....	33
1.7.2. Математическая модель .....	36
Контрольные вопросы .....	41
Список литературы .....	41
<b>2. Разновидности ПП-диодных структур</b> .....	<b>42</b>
2.1. Выпрямительные диоды .....	42
2.2. Силовые диоды с $p-n$ -переходом .....	50
2.3. Быстрые (выпрямительные) диоды .....	55
2.4. Диоды Шоттки .....	59
2.4.1. Выпрямительные диоды Шоттки .....	60
2.4.2. Импульсные диоды Шоттки .....	63
2.4.3. Сверхвысокочастотные диоды Шоттки .....	63
2.4.4. Сильноточный низковольтный диод Шоттки .....	65
2.4.5. Диоды Шоттки на основе карбида кремния .....	70
2.4.6. Бездиффузионная технология изготовления диодов Шоттки .....	72
2.5. Импульсные диоды .....	77
2.6. Стабилитроны и стабисторы .....	78
2.7. Варикапы .....	84
2.8. Туннельные диоды .....	87
2.9. Обращенные диоды .....	92
2.10. Лавинно-пролетные диоды .....	93
2.11. Диоды Ганна .....	96
2.12. Другие разновидности СВЧ-диодов .....	100
2.13. Защитные диоды .....	103
Контрольные вопросы .....	119
Список литературы .....	120
<b>3. Выпрямители на неуправляемых вентилях</b> .....	<b>123</b>

3.1. Общие сведения .....	123
3.2. Однофазные выпрямители .....	129
3.2.1. Однофазная однотактная схема ВУАН.....	129
3.2.2. Двухполупериодная схема с выводом средней точки и активной нагрузкой .....	137
3.2.3. Двухполупериодная схема ВУ с выводом средней точки и емкостной нагрузкой .....	144
3.2.4. Двухполупериодная схема ВУ с выводом средней точки и индуктивной нагрузкой.....	158
3.2.5. Двухполупериодная мостовая схема ВУ с активной нагрузкой .....	162
3.2.6. Двухполупериодная мостовая схема ВУ с активно-емкостной нагрузкой .....	168
3.2.7. Двухполупериодная мостовая схема ВУ с активно-индуктивной нагрузкой .....	170
3.2.8. Разновидности двухтактных схем .....	176
3.2.9. Однофазные схемы удвоения и умножения напряжения.....	181
3.2.10. Сетевые выпрямители с бестрансформаторным выходом.....	188
3.2.11. Электрические фильтры.....	195
Контрольные вопросы и задания.....	214
Список литературы.....	219
<b>4. Тиристорные структуры .....</b>	<b>220</b>
4.1. Разновидности тиристорных структур .....	220
4.1.1. Общая классификация .....	220
4.1.2. Однооперационные (отпираемые) тиристоры.....	222
4.1.3. Двухоперационные (запираемые) тиристоры .....	240
4.1.4. Индукционные и полевые тиристоры.....	252
4.2. Управление тиристорами .....	259
4.2.1. Отпирание тиристоров .....	260
4.2.2. Запирание тиристоров .....	264
4.2.3. Способы переключения тиристоров .....	268
4.3. Особенности применения тиристоров .....	278
4.3.1. Влияние температуры на выходную ВАХ тиристора.....	278
4.3.2. Методы защиты схем на тиристорах .....	281
4.3.3. Последовательное и параллельное включение тиристоров.....	299
4.3.4. Расчет параметров цепи управления тиристора.....	302
4.4. Модели тиристоров .....	310
4.4.1. Статические модели .....	310
4.4.2. Динамическая двухступенчатая модель .....	311

4.4.2.1. Переходный процесс включения тиристора.....	314
4.4.2.2. Переходный процесс выключения тиристора.....	325
4.4.3. Динамическая трехэлектродная.....	331
Контрольные вопросы и задания.....	334
Список литературы.....	337
<b>5. Преобразователи на неуправляемых и управляемых вентильях</b> .....	338
5.1. Общие схемы преобразователей.....	339
5.1.1. Классификация преобразователей.....	339
5.1.2. Основные характеристики и параметры СЭУ.....	341
5.1.3. Преобразователи с естественной коммутацией.....	344
5.1.4. Порядок расчета ПЕК, предназначенных для передачи энергии между цепями переменного и постоянного тока.....	349
5.2. Однофазные управляемые ВУ.....	353
5.2.1. Однополупериодный управляемый ВУАН и ВУАИН.....	353
5.2.2. Двухполупериодный управляемый ВУАН и ВУАИН.....	357
5.2.3. Двухполупериодная мостовая схема управляемого ВУ.....	358
5.2.4. Разновидности двухполупериодной мостовой схемы управляемого ВУ.....	362
5.2.5. Решение типовых задач по однофазным схемам ВУ.....	367
5.3. Двух- и трехфазные преобразователи.....	394
5.3.1. Двухфазные преобразователи.....	394
5.3.2. Трехфазные преобразователи.....	399
5.3.2.1. Мостовая схема.....	399
5.3.2.2. Эффект перекрытия фаз.....	406
5.3.2.3. Трехфазное однополупериодное ВУ.....	411
5.3.2.4. Решение типовых задач по трехфазным схемам.....	414
5.4. Многофазные ВУ.....	439
5.5. Различные режимы работы ПЕК.....	449
5.5.1. Инверторы.....	449
5.5.1.1. Однофазные инверторы.....	450
5.5.1.2. Трехфазные инверторы.....	468
5.5.1.3. Типовые задачи по инверторам.....	478
5.5.2. Преобразователи частоты.....	501
5.5.3. Регуляторы (коммутаторы) переменного тока.....	509
5.5.4. Прерыватели постоянного тока и напряжения.....	533
Контрольные вопросы.....	560
Список литературы.....	562
<b>6. Светодиоды и лазерные диоды</b> .....	563
6.1. Историческая справка.....	563
6.2. Общие сведения по созданию светоизлучающих ПП.....	568

6.3. Светодиоды .....	574
6.3.1. Общие сведения .....	574
6.3.2. Технические характеристики СИД.....	576
6.3.3. Органические СИД .....	585
6.4. Мощные СИД.....	587
6.4.1. Общие сведения .....	587
6.4.2. Оценка срока службы СИД и его деградации .....	589
6.4.3. Конструкции и особенности СИД высокой мощности.....	611
6.4.4. Светодиодные светильники .....	625
6.4.5. Светодиодные лампы .....	644
6.5. ПП-лазеры и лазерные диоды.....	652
Контрольные вопросы.....	666
Список литературы.....	668
<b>7. Фотоприемные оптоэлектронные устройства.</b>	
<b>Оптопары .....</b>	<b>670</b>
7.1. Краткая историческая справка.....	670
7.2. Общие сведения по фотоприемным приборам .....	675
7.2.1. Основные определения.....	680
7.2.2. Фотометрические единицы .....	683
7.2.3. Внутренний фотоэффект .....	686
7.2.4. Параметры ФЭП.....	689
7.3. Фотоэлементы .....	695
7.4. Фотодиоды .....	702
7.5. Гибридные фотоприемники. Фототранзисторы и фототиристоры.....	717
7.5.1. Гибридные фотоприемники .....	717
7.5.2. Фототранзисторы и фототиристры .....	726
7.6. Солнечные фотоэлементы.....	733
7.6.1. Особенности внешнего излучения .....	734
7.6.2. Классификация солнечных фотоэлементов.....	737
7.6.3. Основные параметры и характеристики солнечных фотоэлементов .....	740
7.6.4. Принципы работы солнечных фотоэлементов.....	741
7.7. Оптроны. Оптопары .....	743
7.7.1. Общие сведения .....	744
7.7.2. Основные параметры оптронов.....	747
7.7.3. Разновидности оптронов .....	753
Контрольные вопросы.....	762
Список литературы.....	764
<b>8. Оптоэлектронные трансформаторы .....</b>	<b>766</b>

8.1. Общие вопросы перехода к оптоэлектронным трансформаторам .....	766
8.2. Оптоэлектронные трансформаторы тока.....	772
8.3. Оптоэлектронные трансформаторы напряжения.....	778
8.4. Гибридные оптоэлектронные трансформаторы .....	782
Список источников.....	784
Приложение 1.....	785
Приложение 2.....	788
Приложение 3.....	789
Приложение 4.....	790
Приложение 5.....	792