

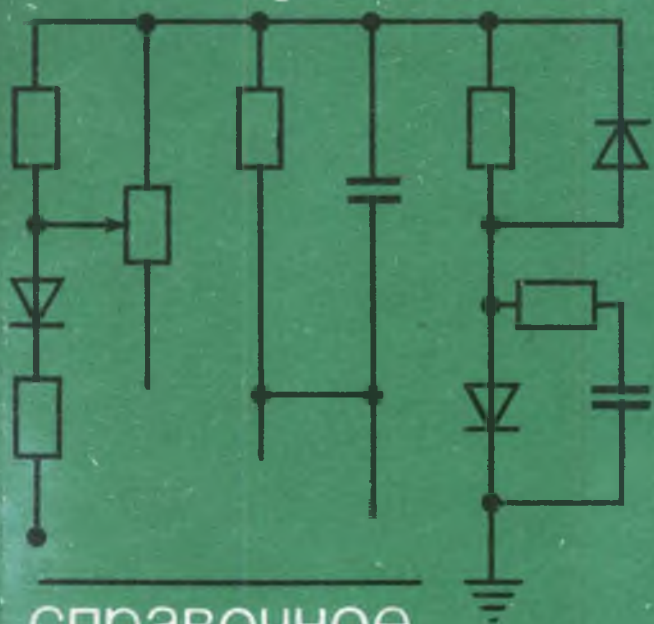
(013852 0004)

УДК

Б. Уильямс

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

- приборы
- управление
- применение



справочное
пособие

Б. Уильямс

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

***приборы
применение
управление***

**справочное
пособие**

Перевод с английского
В. В. Попова



Москва Энергоатомиздат 1993

ББК 31.264.5
У36
УДК 621.382(035.5)

Рецензенты О. Г. Булатов, А. Г. Поликарпов

B. W. WILLIAMS
POWER ELECTRONICS.
DEVICES, DRIVERS AND APPLICATIONS
Macmillan, London, 1987

Уильямс Б.

У 36 Силовая электроника: приборы, применение, управление. Справочное пособие: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.: ил.

ISBN 5-283-02499-7

Приведены основные сведения о мощных полупроводниковых приборах — диодах, биполярных и полевых транзисторах, тиристорах. Рассмотрены вопросы работы этих приборов на нагрузку, их параллельные и последовательные схемы соединения. Дан анализ применения мощных полупроводниковых приборов в устройствах преобразования электрической энергии: регуляторах напряжения, тиристорных прерывателях, статических преобразователях, ключевых источниках электропитания.

Для инженерно-технических работников.

2202070500-083
У ————— 82-91
051(01)-93

ББК 31.264.5

ISBN 5-283-02499-7 (рус.)
ISBN 0-333-39661-8 (англ.)

© В. W. Williams, 1987
© Перевод на русский язык.
Энергоатомиздат, 1993

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие автора книги	3
Список обозначений	4
ЧАСТЬ I. ПРИБОРЫ	8
Глава 1. Основы физики и технологии полупроводников	8
1.1. Процессы формирования $p-n$ -переходов	9
1.1.1. Сплавной переход	9
1.1.2. Диффузионный переход	10
1.1.3. Эпитаксиальный переход	10
1.1.4. Переход, полученный методом ионной имплантации	11
1.2. Процесс изготовления маски	11
Глава 2. Свойства $p-n$-перехода	11
2.1. Прямосмещенный $p-n$ -переход (статика)	13
2.2. Обратносмещенный $p-n$ -переход (статика)	13
2.2.1. Напряжение смыкания	14
2.2.2. Лавинный пробой	15
2.2.3. Пробой Зенера, или туннельный пробой	15
2.3. Тепловые эффекты	15
2.4. Кусочно-линейная модель диода	16
Глава 3. Силовые переключающие приборы и их статические электрические характеристики	17
3.1. Силовой диод	17
3.1.1. Лавинные диоды	17
3.1.2. $p-i-n$ -Диоды	18
3.1.3. Силовые диоды Зенера	20
3.1.4. Диод с барьером Шоттки	21
3.2. Силовые переключающие транзисторы	23
3.2.1. Биполярные $n-p-n$ -силовые транзисторы	24
3.2.2. Силовые МДП-транзисторы	30
3.3. Тиристоры	33
3.3.1. Однооперационный тиристор	33
3.3.2. Несимметричный ООТ	38
3.3.3. Тиристор с обратной проводимостью	39
3.3.4. Комбинированно-выключаемые тиристоры (КВТ)	40
3.3.5. Тиристор, запираемый по управляющему электроду	40
3.3.6. Симметричный тиристор	41
3.4. Полевой тиристор	44
Глава 4. Электрические параметры и характеристики силовых полупроводниковых ключевых приборов	45
4.1. Общие максимальные эксплуатационные параметры силовых полупроводниковых приборов	46
4.1.1. Параметры, связанные с напряжением	46
4.1.2. Параметры, связанные с прямым током	46
4.1.3. Температурные параметры	46

4.1.4. Параметры, связанные с рассеиваемой мощностью	47
4.2. Диод с малым временем восстановления	47
4.2.1. Характеристики включения	47
4.2.2. Характеристики выключения	48
4.3. Биполярный силовой высоковольтный $n-p-n$ -транзистор ..	50
4.3.1. Параметры транзистора	50
4.3.2. Статические характеристики транзистора	56
4.3.3. Переключательные характеристики транзистора	57
4.4. Силовые МДП-транзисторы	59
4.4.1. Максимальные параметры МДП-транзистора	59
4.4.2. Статические характеристики	60
4.4.3. Динамические характеристики	62
4.5. Тиристор	66
4.5.1. Параметры тиристора	66
4.5.2. Статические характеристики	67
4.5.3. Динамические характеристики	68
4.5.4. Тиристор, выключаемый по управляющему электроду (двухоперационный)	71
Задачи	73
Глава 5. Тепловой режим силовых полупроводниковых приборов	73
5.1. Тепловое сопротивление	74
5.1.1. Тепловое сопротивление корпус—охладитель, $R_{\theta c-s}$	75
5.1.2. Тепловое сопротивление охладитель—окружающая среда, $R_{\theta s-a}$	75
5.2. Способы рассеяния мощности	77
5.2.1. Рассеяние импульсной мощности	78
5.2.2. Рассеяние постоянной мощности	79
5.3. Среднее значение рассеиваемой мощности	79
5.3.1. Метод графического интегрирования	80
5.3.2. Метод суперпозиции	80
5.4. Потери мощности в приборе	80
5.4.1. Мощность, выделяющаяся в переходных режимах	80
5.4.2. Мощность, выделяющаяся в режиме отсечки	81
5.4.3. Мощность, выделяющаяся во включенном состоянии ..	81
5.4.4. Мощность, выделяющаяся во входной цепи	81
5.5. Различные случаи проектирования теплоотвода	81
5.5.1. Диоды и тиристоры	82
5.5.2. Теплоотвод для биполярного транзистора	85
5.5.3. Теплоотвод для силового МДП-транзистора	86
Задачи	87
ЧАСТЬ II. УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ ПРИБОРАМИ	89
Глава 6. Влияние характера нагрузки	89
6.1. Активная нагрузка	89
6.2. Индуктивная нагрузка	92
Задачи	96
Глава 7. Управление транзистором и его защита	97
7.1. Особенности управления силовым МДП-транзистором	97
7.1.1. Схемы управления напряжением затвора	99
7.1.2. Управление МДП-транзистором по цепи затвора	102
7.2. Применение биполярного транзистора	104
7.2.1. Схемы управления транзистором	106
7.2.2. Проектирование схемы управления	107
7.2.3. Цепи формирования траектории рабочей точки транзи- стора	108
7.3. Варианты построения транзисторного ключа	116

7.4. Приложение. Анализ процесса выключения транзистора в схеме с ЦФРТГ	118
Задачи	120
Глава 8. Управление тиристором и его защита	122
8.1. Схема управления	123
8.2. Проектирование схемы управления	124
8.3. Схема управления двухоперационным тиристором	126
8.4. ЦФРТГ для тиристора	126
8.4.1. ЦФРТГ тиристора при выключении	126
8.4.2. ЦФРТГ тиристора при включении	129
8.5. ЦФРТГ для двухоперационного тиристора	129
8.6. Приложение. Анализ работы ЦФРТГ при выключении	129
Глава 9. Цепи формирования траектории рабочей точки с рекуперацией энергии	130
9.1. Схемы рекуперации энергии ЦФРТГ при включении транзистора ...	131
9.1.1. Вариант пассивной схемы рекуперации энергии	131
9.1.2. Вариант активной схемы рекуперации энергии	132
9.2. Схемы рекуперации энергии ЦФРТГ при выключении транзистора	133
9.2.1. Пассивные схемы рекуперации энергии	133
9.2.2. Активная схема рекуперации энергии	138
9.3. Полная схема ЦФРТГ транзистора	138
Задача	139
Глава 10. Последовательная и параллельная работа приборов и их защита ...	139
10.1. Необходимость параллельного или последовательного соединения приборов	139
10.1.1. Последовательное соединение	139
10.1.2. Параллельное соединение	145
10.2. Защита	147
10.2.1. Сверхток	147
10.2.2. Перенапряжение	150
10.2.3. Устройство обесточивания нагрузки	153
10.2.4. Подавление помех, создаваемых работающей аппаратурой	153
Задачи	154
ЧАСТЬ III. СХЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ	155
Глава 11. Конвертеры с естественной коммутацией	155
11.1. Однофазные неуправляемые конвертеры	155
11.1.1. Однополупериодный выпрямитель с $R-L$ -нагрузкой	155
11.1.2. Однополупериодный выпрямитель с $R-L$ -нагрузкой и шунтирующим диодом	158
11.1.3. Мостовая схема выпрямления	160
11.2. Однофазный полууправляемый конвертер	161
11.3. Однофазные управляемые тиристорные конвертеры	163
11.3.1. Однополупериодный управляемый выпрямитель с $R-L$ -нагрузкой	163
11.3.2. Двухполупериодные схемы с $R-L$ -нагрузкой	165
11.3.3. Двухполупериодная схема, работающая на $R-L$ -нагрузку и противоЭДС	166
11.4. Трехфазные неуправляемые конвертеры	168
11.4.1. Однополупериодная схема с индуктивной нагрузкой	168
11.4.2. Двухполупериодная схема с индуктивной нагрузкой	170
11.5. Трехфазный полууправляемый конвертер	170
11.6. Трехфазные управляемые тиристорные конвертеры	172
11.6.1. Однополупериодная схема с индуктивной нагрузкой	172

11.6.2. Однополупериодный конвертер с шунтирующим диодом	173
11.6.3. Двухполупериодная схема с индуктивной нагрузкой ...	173
11.6.4. Двухполупериодный конвертер с шунтирующим диодом	174
Задачи	175
Глава 12. Регуляторы переменного напряжения	177
12.1. Однофазный регулятор переменного напряжения	177
12.2. Трехфазный регулятор переменного напряжения	178
12.3. Позиционное регулирование	182
12.4. Однофазный регулятор напряжения с изменяемым коэффициентом трансформации сетевого трансформатора	183
12.5. Циклоконвертер	185
12.6. Коэффициент мощности питающей сети	185
12.6.1. Формы кривых напряжения на нагрузке	185
12.6.2. Формы кривых тока и напряжения питающей сети	186
Задачи	187
Глава 13. Тиристорные ключи постоянного тока с принудительной коммутацией	187
13.1. Тиристорный ключ постоянного тока, запираемый приложением обратного напряжения	189
13.1.1. Математический анализ процесса коммутации	190
13.1.2. Расчет требуемых значений L и C коммутирующего контура	191
13.2. Тиристорный ключ постоянного тока, запираемый импульсом обратного тока	192
13.2.1. Математический анализ процесса коммутации	193
13.2.2. Расчет требуемых значений индуктивности катушки L и емкости конденсатора C	195
13.3. Некоторые варианты схем коммутации	197
13.4. Сравнение схем коммутации током и напряжением	198
Задачи	198
Глава 14. Статические инверторы	200
14.1. Мостовой инвертор напряжения	200
14.1.1. Однофазный мостовой инвертор напряжения	200
14.1.2. Трехфазный мостовой инвертор напряжения	204
14.1.3. Схемы коммутации тиристоров	208
14.1.4. Способы управления выходным напряжением и частотой	214
14.1.5. Выборочная многоимпульсная модуляция	216
14.2. Инверторы тока	218
Задачи	220
Глава 15. Ключевые источники электропитания	220
15.1. Однотактный прямоходовой конвертер	221
15.1.1. Режим непрерывного тока	222
15.1.2. Режим прерывистого тока	223
15.2. Однотактный обратногоходовой конвертер	224
15.2.1. Конвертер с последовательно включенным дросселем	224
15.2.2. Конвертер с параллельно включенным дросселем	226
15.3. Сравнение базовых схем конвертеров	230
15.4. Двухтактные конвертеры с трансформаторным выходом	232
15.4.1. Двухтактный конвертер с выводом средней точки обмотки трансформатора	233
15.4.2. Мостовые конвертеры	234
Задачи	235