

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Буквенные сокращения и обозначения.....	6
Предисловие.....	7
Введение.....	8
1. Полупроводниковая элементная база силовой электроники в электротехнике и электроэнергетике. Назначение и объекты применения силовых полупроводниковых приборов.....	9
2. Основные типы современных полупроводниковых приборов.....	14
2.1. Специфика требований к СПП.....	14
2.2. Основные типы СПП.....	15
2.3. Типы классификации СПП.....	19
2.4. История возникновения и временные тренды развития СПП разных типов.....	20
3. Полупроводниковые структуры СПП. Система характеристик основных типов полупроводниковых приборов.....	24
3.1. Основы физических явлений в полупроводниковых структурах.....	24
3.2. Силовые диоды.....	30
3.3. Силовые тиристоры.....	46
3.4. Силовой МОП-транзистор.....	68
3.5. Биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT).....	73
4. Тепловые характеристики силовых полупроводниковых приборов.....	94
4.1. Температура полупроводниковой структуры – критерий работоспособности прибора.....	94
4.2. Тепловые потери в рабочих режимах СПП.....	94
4.3. Характеризующие параметры перегрузочной способности силовых полупроводниковых приборов.....	96
4.4. Характеристики перегрузочной способности МОП-транзисторов и IGBT.....	97
4.5. Способы охлаждения полупроводниковых структур СПП в эксплуатационных режимах.....	97
4.5.1. Рабочие режимы эксплуатации СПП в устройствах силовой электроники.....	97
4.5.2. Режимы перегрузки.....	104

5. Конструкции силовых полупроводниковых приборов.....	107
5.1. Основные типы конструкций.....	107
5.1.1. Тиристоры и диоды штыревого типа.....	107
5.1.2. Диоды и тиристоры в таблеточных корпусах.....	109
5.1.3. СПП модульного типа.....	111
5.1.4. Тиристорные и диодные модули.....	111
5.1.5. Модули на основе МОП-транзисторов.....	113
5.1.6. IGBT-модули.....	115
5.1.7. Модули паяной конструкции, основные типы, проблемы, пути их решения.....	117
5.1.8. Модули с «частичным» прижимом.....	129
5.1.9. Прижимные модули для системы энергетики типа StakPack.....	132
5.1.10. Таблеточные прижимные модули.....	134
5.1.11. Интеллектуальные силовые модули (IPM).....	136
6. Технология производства СПП.....	139
6.1. Технологические группы СПП высокой мощности.....	139
6.2. Основные операции изготовления полупроводниковых структур, их особенности для разных технологических групп СПП.....	139
6.3. Технология производства приборов традиционных конструкций.....	143
6.3.1. Изготовление полупроводниковой структуры СТ.....	145
6.3.2. Технологический процесс изготовления выпрямительного элемента СТ.....	154
6.3.3. Последовательность операций сборки СТ.....	161
6.4. Технология производства кристаллов силовых МОП-транзисторов и IGBT.....	169
7. Тенденции модернизации полупроводниковой элементной базы силовой электроники.....	182
7.1. Фундаментальные и инженерно-технические ограничения параметров и характеристик силовых полупроводниковых приборов.....	182
7.1.1. Ограничение соотношения пробивного напряжения и сопротивления дрейфового слоя для приборов с униполярной проводимостью (МОП-транзисторов, диодов Шоттки).....	182
7.1.2. Ограничение соотношения допустимого блокируемого напряжения и рабочего тока для приборов с биполярной проводимостью.....	183
7.2. Разработка новых типов силовых полупроводниковых приборов.....	185

7.2.1. CoolMOS-транзисторы. Приборы с суперпереходом (super-junction devices).....	185
7.2.2. Силовые тиристоры с элементами самозащиты.....	188
7.2.3. Перспективные типы новых биполярных приборов с полевым управлением.....	196
7.2.4. Гибридные сборки с МОП-управлением (СИТМОП, ЕСТ, ЕТО).....	203
7.3. Силовые приборы на основе новых полупроводниковых материалов...	209
7.4. Функциональная интеграция в приборах силовой электроники.....	214
8. Прогноз развития полупроводниковой элементной базы.....	216
8.1. Современный уровень предельных значений параметров и характеристик основных типов СПП.....	216
8.2. Перспективы развития полупроводниковой элементной базы в достижении предельных параметров по току, напряжению, мощности СПП.....	221
Библиографический список	224

## БУКВЕННЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

СПП – силовой полупроводниковый прибор  
ТКР – температурный коэффициент расширения  
ОПЗ – область пространственного заряда  
ОБР – область безопасной работы  
ШИМ – широтно-импульсная модуляция  
ЧИМ – частотно импульсная модуляция  
IPM – Intelligent Power Module, интеллектуальный силовой модуль  
GTO – Gate Turn Off Thyristor, запираемый тиристор (ЗТ)  
LTТ – Light Triggered Thyristor, фототиристор (ФТ)  
MOSFET – Metal – Oxide – Semiconductor Field-Effect Transistor, МОП-транзистор  
CoolMOS – высоковольтные MOSFET с «суперпереходом»  
IGBT – Insulated-Gate Bipolar Transistor, биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ)  
IGCT – Integrated Gate-Commutated Thyristor, запираемый тиристор с «жестким» выключением и интегрированным драйвером  
GCT – Gate-Commutated Thyristor, запираемый тиристор с «жестким» выключением  
ETO – Emitter Turn-Off Thyristor, ECT – Emitter Commuted Thyristor, тиристор, выключающий прерыванием тока в эмиттере  
BIGT – Bi-Mode Integrated Gate Transistor, IGBT с интегрированным в полупроводниковую структуру обратным диодом  
 $U_{br}$  – напряжение пробоя, В  
 $q$  – заряд электрона, Кл  
 $\tau$  – время жизни носителей заряда, мкс  
 $\rho$  – удельное сопротивление, Ом·м  
 $g$  – удельная электрическая проводимость  $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$   
 $\mu$  – подвижность носителей заряда,  $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$   
 $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала,  $\Phi/\text{см}$   
 $j$  – плотность тока,  $\text{А}/\text{см}^2$   
ВАХ – вольт-амперная характеристика  
 $P$  – мощность, Вт  
 $T_j$  – температура перехода,  $^\circ\text{C}$   
 $R_{thjc}$  – внутреннее установившееся тепловое сопротивление, (переход – корпус),  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$   
 $Z_{thjc}$  – внутреннее переходное тепловое сопротивление, (переход – корпус),  $^\circ\text{C}/\text{Вт}$   
 $\Delta W_0$  – ширина запретной зоны, Дж, эВ  
 $du/dt$  – скорость нарастания напряжения, В/мкс  
 $di/dt$  – скорость нарастания тока, А/мкс

*Satius est supervacua discere quam nihil.*  
Лучше изучить лиинее, чем ничего не изучить.  
Сенека

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Силовые полупроводниковые приборы (СПП) составляют одну из важнейших частей элементной базы мощных преобразователей электроэнергии в составе оборудования современной электротехники. Типаж, номенклатура и уровень достигнутых технических характеристик СПП, по сути, определяют набор типовых технических решений, составляющий «облик» современной силовой электроники, ее возможности и перспективы по повышению энергоэффективности, надежности и безопасности систем транспортировки, распределения и потребления электроэнергии.

В книге рассмотрены основные типы современных СПП, их основные технические характеристики, особенности конструкции и технологии изготовления. Обсуждены основные технические и технологические факторы, определяющие предельные значения характеристик различных типов СПП, а также перспективы их улучшения.

Материал рассчитан на студентов высшего профессионального образования, а также научно-технических работников, занимающихся разработкой и исследованиями устройств силовой электроники.

Авторы благодарны всем коллегам, оказавшим помощь при подготовке рукописи к печати, и с благодарностью примут замечания, которые просят отправлять по адресу редакции издательства.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Анализ тенденций развития мировой экономики в последние 20 лет свидетельствует о проникновении силовой электроники практически во все сферы хозяйствования как важнейшего инструмента экономии и эффективного использования электроэнергии. По мнению ведущих экспертов в области прогнозирования мировых тенденций развития техники, очередной виток научно-технической революции будет обусловлен успехами в интеллектуальной силовой электронике. Постоянное обновление номенклатуры СПП и улучшение их характеристик и параметров определило динамичное развитие силовой электроники.

Производство промышленной электроэнергии сегодня осуществляется в основном генераторами, подсоединенными к турбинам тепловых и атомных станций, гидрогенераторами ГЭС, в меньшей степени ветрогенераторами и солнечными батареями. Для всех этих устройств характерны свои параметры вырабатываемой электроэнергии, более того, для достижения максимального КПД эти параметры должны находиться, как правило, в жестко заданном и узком диапазоне.

Доставка электроэнергии потребителю сегодня осуществляется, как правило, в унифицированной форме тока с переменным напряжением (унифицированного ряда значений) синусоидальной формы с частотой 50/60 Гц. При транспортировке применяются те же стандарты по форме и частоте, но более высокие значения напряжений. При транспортировке очень больших мощностей на расстояния свыше 500 км более эффективными (меньшие потери) становятся линии электропередачи постоянного тока высокого и сверхвысокого (свыше 1000 кВ) напряжения. Актуальны также локальные системы электропитания постоянного тока, в том числе на удаленных специализированных объектах (буровые платформы на шельфе и др.), а также на крупных судах морского и речного флота.

Более 70% доставляемой потребителям электроэнергии потребляется устройствами, требующими иных параметров электроэнергии, нежели установлены в силовой распределительной сети. Это – управляемый электропривод (синусоидальное напряжение переменной частоты), постоянное напряжение (сети электропитания железной дороги, городского электротранспорта и метрополитена, питание установок электрохимии и электрометаллургии), напряжение повышенной частоты (установки термической обработки металлов токами высокой частоты) и многое другое.

Таким образом, чтобы осуществить передачу электроэнергии от ее производителя до конечного потребителя с приемлемыми потерями, как правило, необходимо ее неоднократное преобразование, что и обусловило высокую актуальность развития полупроводниковой силовой электроники на основе современных СПП [1].

# **1. ПОЛУПРОВОДНИКОВАЯ ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ В ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ. НАЗНАЧЕНИЕ И ОБЪЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

Рассмотрим основные типы устройств силовой электроники, где применяются СПП [2–6].

1. Электропреобразовательные устройства большой электроэнергетики.

1.1. Вставки и линии электропередачи постоянного тока (HVDC). HVDC – наиболее рентабельный вид линии электропередачи большой мощности на большое расстояние (становится экономически оправданным по сравнению с линиями электропередачи на постоянном токе при передаче энергии на расстояние свыше 500–700 км). Генеральный план развития энергосетей США сегодня опирается на создание пяти сверхмощных протяженных линий постоянного тока. В России также технически давно назрел вопрос об усилении линий электропередачи, соединяющих европейскую часть, Сибирь и Дальний Восток, наиболее разумным решением этого вопроса является строительство нескольких сверхмощных линий постоянного тока в широтном направлении. Кризис 1990-х гг. снизил остроту проблемы, однако уже сегодня дефицит электроэнергии в ряде регионов европейской части РФ вновь заявляет о себе. Усиление сетей Сибири и Дальнего Востока также расширяет возможности экспорта электроэнергии в Китай.

Прогнозируемое сегодня скорое (в течение 5–10 ближайших лет) и довольно серьезное (до 5–7 градусов среднегодовой температуры) локальное похолодание в Западной Европе, инициированное всемирным глобальным потеплением, может сделать актуальной переброску сибирской электроэнергии в страны ЕЭС. Технически и экономически оправданным и опробованным на практике методом межгосударственного сопряжения сетей является применение вставок постоянного тока (решаются вопросы различия национальных стандартов на кондиции электроэнергии в сетях, а также немаловажный «экономический» вопрос дозированного пропуска электроэнергии – покупатель физически лишен возможности воспользоваться лишней электроэнергией из обединенной энергосети).

Сегодня в России работает одна такая вставка – «РФ – Финляндия» в Выборге. Указанные выше причины могут сделать актуальным строительство еще ряда вставок с государствами Западной Европы, а также с Китаем и Украиной.

Оборудование мощных высоковольтных линий и вставок постоянного тока сегодня создается в основном на базе высоковольтных тиристоров и фототиристоров. Быстрый прогресс IGBT позволяет, однако, прогнозировать, что высоковольтные сильнотоковые модули, адаптированные для сборки в последовательные цепи, будут востребованы в этой области электроэнергетики.

## 1.2. Оборудование гибких линий электропередачи (FACTS).

Гибкие (управляемые) системы электропередачи переменного тока (FACTS) содержат ряд полупроводниковых многофункциональных устройств и, в частности, устройства регулирования напряжения (реактивной мощности). Одним из основных представителей устройств этого типа является параллельный статический компенсатор реактивной мощности – СТАТКОМ. Подобного рода устройства различного типа единичной мощности до 250 МВА в последние 10 лет получают за рубежом большое развитие и практическое применение (США, Канада, Бразилия, Южная Корея, КНР, страны ЕС и др.). Практически всеми ведущими фирмами («ABB», «Сименс», «Дженерал Электрик» и др.) организовано производство таких устройств.

Помимо применения СТАТКОМов в сетях существует также рыночная ниша применения этих устройств у потребителей – на предприятиях, особенности технологии которых приводят к большому потреблению реактивной мощности или искажениям напряжения промышленной частоты в питающей сети. Принятая в ряде стран тарификация потребления реактивной мощности (планируется также ее введение в РФ) делает экономически оправданным применение СТАТКОМов на таких предприятиях или в их цехах с большим энергопотреблением. Мощность таких устройств, естественно, меньше – до нескольких МВт.

## 1.3. Альтернативная и распределенная электроэнергетика.

За рубежом направлением, имеющим серьезную государственную поддержку, является альтернативная электроэнергетика, ориентированная в основном на «солнечные», ветряные, микро- и мини-гидроэлектростанции. При этом развиваются как относительно мощные электростанции, так и маломощные, вплоть до обслуживающих одно хозяйство, но с возможностью сдачи излишков электроэнергии в сеть. Оформление разрешения на такую деятельность имеет несложную и вполне «проходимую» процедуру (в отличие от таковой в РФ), а оплата сдаваемой электроэнергии от «альтернативных» источников идет по завышенному тарифу (для солнечных установок до 5-кратного), издержки завышенной тарификации оплачивает государство. В таких «тепличных» условиях альтернативная электроэнергетика, естественно, расцветает очень бурно (хотя ее перспектива в условиях развивающегося мирового кризиса вызывает серьезные вопросы).

Кондиции электроэнергии, вырабатываемой альтернативными источниками, несовместимы с сетью и не позволяют ее использовать напрямую в стандартных электроприборах и установках. Для сопряжения необходимы специальные полупроводниковые преобразователи.

В России в настоящее время альтернативная энергетика для «внутреннего употребления» менее перспективна, так как финансово государством не поддерживается, без чего экономически оправданы только единичные проекты для удаленных объектов.

Довольно актуальна, однако, концепция распределенной энергетики, предусматривающая создание сети мини-ТЭЦ на тепловую мощность несколько десятков МВт, электрическую мощность до 20–30 МВт, объединенных, где это возможно, с сетью, либо локальных для удаленных объектов. Объединение с

сетью дает дополнительный резерв электрической мощности для регионов, где эта мощность в дефиците (например, в Москве), а небольшие котельные, как правило, не оборудованы электрогенераторами и используются только для теплоснабжения. Преобразовательное оборудование таких распределенных мини-ТЭЦ построено на элементной базе высоковольтных IGBT ключей.

2. Управляемый электропривод синхронных и асинхронных электродвигателей. Сегодня в развитых странах на управляемый электропривод приходится до 65% всей потребляемой электроэнергии. В подавляющем своем большинстве устройства управления электродвигателем реализованы с использованием преобразователя частоты (ПЧ) в составе выпрямителя на «входе» и автономного инвертора напряжения на «выходе», работающего по алгоритму широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Инвертор собирается по схеме трехфазного моста – либо «традиционного» моста Ларионова (двухуровневый инвертор), либо по схеме многоуровневого (трех и более) инвертора, менее распространенной сейчас, но весьма перспективной, особенно для высокомощных и высоковольтных устройств. Элементная база для выпрямителя инверторов – тиристоры, МОП-транзисторы, IGBT.

Рассматривая области применения устройств управляемого электропривода, элементной базой которого служат диоды и/или тиристоры, можно выделить следующие области хозяйства и виды техники.

2.1. Сверхмощный индустриальный привод (прокатные станы, дробилки, мельницы и др.). Диапазон установленной мощности двигателей – свыше 1 МВт.

2.2. Электропривод мощных насосов, промышленных вентиляторов, мешалок, черпалок и др. (ЖКХ, нефте- и газодобыча и перекачка, промышленность). Употребительный диапазон установленной мощности двигателей от 100 кВт до нескольких МВт, источник питания – напряжение промышленной частоты 0,4, 6, 10 кВ.

2.3. Обрабатывающие и другие станки, исполнительные механизмы промышленных роботов. Наиболее употребительный диапазон установленной мощности двигателей от 3 до 50 кВт, источник питания – напряжение промышленной частоты 380 В.

2.4. Бытовая электротехника с установленной мощностью от сотен ватт до единиц киловатт (холодильники, стиральные машины, кондиционеры, насосы, вентиляторы, электроинструмент и др.). Используются малогабаритные модули на напряжение 600 В (соответствующее «обслуживанию» промышленного стандарта переменного напряжения 220 В), токи до 50 А.

3. Тяговый управляемый электропривод транспортных средств. Используются импульсные преобразователи (ИП) для управления электродвигателями постоянного тока, ПЧ для управления асинхронными двигателями, а также специальные преобразователи для управления вентильными двигателями, быстро развивающимися в последнее время.

3.1. Наземный городской электротранспорт (трамвай, троллейбус). Используются обычно электродвигатели мощностью 100–300 кВт.

3.2. Метрополитен. Моторные секции поездов комплектуются двигателями на установленную мощность 250–500 кВт.

3.3. Железнодорожные транспортные средства. В зависимости от типа (электровоз, пригородный поезд, скоростной поезд и др.) меняется установленная мощность двигателей.

3.4. Транспортные средства с двигателем внутреннего сгорания и электротрансмиссией.

3.4.1. Легковые автомобили. Схема с электротрансмиссией для легкового автомобиля приобретает все большую популярность по мере удешевления гибридных автомобилей (с накопителем электроэнергии, двигателем внутреннего сгорания «неполной» мощности и электротрансмиссией: генератор – преобразователь – электродвигатели) и удорожания топлива. Сегодня это еще почти экзотика, завтра может превратиться в емкий сегмент рынка.

3.4.2. Сельскохозяйственная техника. Здесь электротрансмиссия востребована уже сейчас, так как ее применение становится экономически выгодным, учитывая специфические требования поддержания высокой мощности на валу и высокого КПД в очень широком диапазоне скоростей, а также необходимость передачи мощности различным прицепным и навесным механизмам и агрегатам. Сектор рынка за рубежом сформирован, у нас – в стадии формирования.

3.4.3. Автобусы. Схема гибридного городского автобуса востребована в зарубежной технике и постепенно начинает внедряться у нас, в России.

3.4.4. Большегрузные автомобили, спецтехника. Сегмент рынка не очень емкий, но существующий. Возможно его существенное расширение, если схема с электротрансмиссией распространится на «магистральные» большегрузные автомобили (что под большим вопросом, так как экономия от применения, например, гибридного привода на трассе значительно меньше, чем в городе, а цена – остается). Однако применение для карьерных самосвалов, танков, тягачей, вездеходов и т. п. однозначно эффективно.

3.4.5. Магистральные и маневровые тепловозы на железной дороге – см. п. 3.3.

3.5. Водный транспорт. Система электродвижения значительно упрощает судовождение, улучшает условия эксплуатации и повышает надежность плавсредств, поэтому технически востребована во всех областях судостроения, как речного, так и морского, начиная от сравнительно малотоннажного и заканчивая суперлайнерами и танкерами. В области малотоннажного и среднетоннажного судостроения применение систем электродвижения сдерживается их сравнительно высокой стоимостью, поэтому они внедряются преимущественно на плавсредствах «верхней половины ценового диапазона» – яхтах, прогулочных катерах и теплоходах, скоростном водном транспорте. В области крупнотоннажного судостроения экономических ограничений нет, однако приходится решать достаточно сложные технические задачи реализации управляемого электропитания гребных электроустановок (ГЭУ) мощностью до нескольких десятков мегаватт.

Однозначно применение систем электродвижения на подводных лодках. Надводные военные суда также все в большей мере оборудуются такими сис-

темами. В последние 10–15 лет появилась и интенсивно развивается (теоретически – во всем мире и в России, на практике – больше всего в США) концепция «полностью электрического» корабля. Эта концепция заключается в создании на борту единой мощной электросети, питаемой от энергоустановки корабля и способной «воспринять» и распределить всю ее мощность, включая форсажные резервы и мощность рекуперации при торможении судна. От этой сети через систему преобразователей питается все электрооборудование корабля, включая гребные установки, сервисные электромеханизмы, системы радиолокации и РЭБ, системы лазерного и электродинамического вооружения.

В высокой степени оснащен системами электродвижения ледокольный флот.

#### 4. Источники электропитания.

4.1. Широкий спектр преобразователей типов AC-DC, DC-AC, AC-DC-AC, используемых для питания электротехнической и электронной аппаратуры в быту, промышленности, транспорте – для компьютерной техники, техники связи, источников сервисного электроснабжения на железной дороге, аппаратуры авиации и космической техники и др.

#### 4.2. Промышленные аппараты бесперебойного электропитания.

4.3. Специальные источники электропитания для промышленных электрофизических технологий: импульсная сварка, упрочение материалов импульсами токов, обработка токами высокой частоты, лазерная техника и др.

Таким образом, можно выделить характерный диапазон электрических параметров СПП [2]:

- коммутируемые токи 10–10 000 А;
- напряжение 10–10 000 В;
- коммутируемая мощность 100 Вт – 10 МВт.

### **Требования к силовым полупроводниковым приборам**

Перечислим основные требования к силовым полупроводниковым приборам нового поколения для комплектации преобразовательных устройств ответственных потребителей [4, 5]:

- срок службы: 20–30 лет;
- средняя наработка на отказ: 50 000–100 000 ч;
- рабочая температура: от –60 до 125°C;
- циклостойкость: не менее 300 000 циклов при перепаде температуры ±50°C;
- напряжение изоляции (приборы с изолированным основанием): 10–20 кВ.

## **2. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СОВРЕМЕННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ**

### **2.1. Специфика требований к СПП**

К силовым обычно относят полупроводниковые приборы, способные проводить рабочий ток свыше 10 А и рассчитанные на возможность блокирования напряжения свыше 100 В, таким образом – это приборы, предназначенные для функционирования в устройствах с источниками электрической мощности свыше 1000 Вт. Это нижний условный предел «операционной» (коммутируемой) мощности, характерной для СПП, верхний же лежит сегодня в диапазоне 10–20 МВт (для разных типов СПП) и постепенно растет по мере совершенствования конструкций и технологий производства приборов [6–8].

Для того чтобы устройство силовой электроники могло успешно решать задачу повышения эффективности транспорта, распределения и потребления электроэнергии, оно должно иметь высокий КПД. Следовательно, высокий КПД должны иметь и комплектующие устройство СПП.

Отсюда следует важная особенность СПП и режимов их функционирования в схемах силовой электроники: силовые приборы, как правило, работают в режиме ключа [3, 8–10]. Это означает, что прибор имеет два возможных состояния, в которых он способен функционировать длительное время: состояние высокой проводимости, в котором он проводит большой ток, имея при этом относительно малое «остаточное» напряжение, и состояние низкой проводимости, в котором к прибору может быть приложено высокое напряжение, а протекающий через него ток «утечки» имеет малую величину.

Остаточное напряжение на СПП в состоянии высокой проводимости имеет, как правило, значение не более нескольких единиц вольт, т. е. в несколько сот или тысяч раз меньше, чем допустимое напряжение в состоянии низкой проводимости, а ток утечки в состоянии низкой проводимости обычно составляет не более одной десятитысячной доли от допустимого рабочего тока в состоянии высокой проводимости. Таким образом, мощность потерь, которую рассеивает прибор при работе в таких состояниях, как правило, значительно меньше 1% от произведения величин допустимых тока в проводящем состоянии и напряжения в непроводящем состоянии, т. е. той мощности, которую прибор способен передать от источника в нагрузку.

Ясно, что длительное функционирование СПП в так называемом «активном» режиме, когда одновременно к прибору о приложено значительное напряжение и через него протекает значительный ток, для устройств силовой электроники, как правило, неприменимо, так как это привело бы к «фатальному» снижению КПД устройства, а также к трудноразрешимым проблемам по отводу от СПП рассеиваемой тепловой мощности.

В процессах перехода из состояния низкой проводимости в состояние высокой проводимости (включение) и обратно (выключение) приложение к СПП высокого напряжения одновременно с протеканием большого тока может на-

блюдаться, поэтому время протекания таких процессов желательно сокращать, что позволяет сократить энергию потерь СПП в переходных процессах и, следовательно, увеличить допустимую частоту переключений СПП.

Возможность работать на большей частоте является важным преимуществом для ряда устройств силовой электроники, так как позволяет уменьшать массогабаритные показатели и стоимость фильтров и промежуточных трансформаторов, а также повысить общий КПД. Поэтому снижение энергии потерь при переключении также является весьма актуальной задачей для СПП.

Таким образом:

1. СПП – это полупроводниковый прибор, способный передавать от источника в нагрузку ток более 10 А, напряжение более 100 В или мощность более 1000 Вт.

2. СПП – полупроводниковый прибор, предназначенный для работы в режиме ключа.

3. К СПП предъявляются требования минимизации остаточного напряжения при работе в состоянии высокой проводимости и минимизации тока утечки при работе в состоянии низкой проводимости.

4. К СПП предъявляются требования минимизации энергий потерь в процессах перехода из состояния низкой проводимости в состояние высокой проводимости (включение) и обратно (выключение). Снижение энергий потерь при включении и выключении позволяет улучшить частотные характеристики прибора.

## 2.2. Основные типы СПП

Номенклатура типов СПП достаточно разнообразна и включает в себя около полусотни различных приборов. Среди них, однако, можно выделить наиболее распространенные в современной силовой электронике типы, которые описаны ниже [4–6, 8].

**Силовой диод.** Диод – прибор, имеющий два внешних электрода (вывода) – анод и катод, см. рис. 2.1. Основная функция диода – неуправляемый выпрямитель тока: при приложении к нему «прямого» напряжения (с более положительным потенциалом на аноде) диод переходит в состояние с высокой проводимостью и способен проводить большой «прямой» ток (в направлении от анода к катоду). При приложении обратного напряжения (с более положительным потенциалом на катоде) диод переходит в состояние с низкой проводимостью и способен «блокировать» высокое «обратное» напряжение, проводя лишь малый обратный ток утечки.

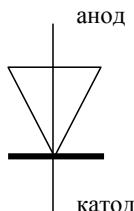


Рис. 2.1

Условное обозначение диода в электрических схемах

**Тиристор.** Полупроводниковый ключ с тремя электродами (анод, катод, управляющий электрод – УЭ), см. рис. 2.2.

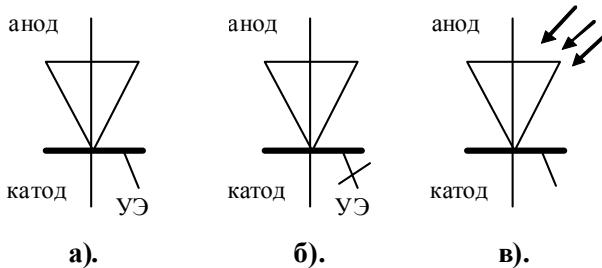


Рис. 2.2

Условные обозначения тиристоров в электрических схемах:

- a) – тиристор;
- б) – запираемый тиристор;
- в) – фототиристор.

Тиристор может быть характеризован тремя основными состояниями:

- закрытое состояние – тиристор находится в состоянии низкой проводимости при приложенном к нему прямом напряжении (с более положительным потенциалом на аноде);
- непроводящее состояние – тиристор находится в состоянии низкой проводимости при приложенном к нему обратном напряжении (с более положительным потенциалом на катоде);
- проводящее состояние – тиристор находится в состоянии высокой проводимости при приложенном к нему прямом напряжении (с более положительным потенциалом на аноде) и проводит ток в цепи анод-катод.

Тиристор – управляемый ключ – при прямом напряжении в цепи анод-катод он может находиться как в состоянии с низкой проводимостью, так и в состоянии с высокой проводимостью. Включение тиристора (переход из состояния низкой проводимости в состояние высокой проводимости) происходит при прохождении тока в цепи УЭ-катод. Если после включения тиристор проводит ток в цепи анод-катод, то ток управления может быть снят, но тиристор останется в состоянии высокой проводимости, т. е. тиристор может быть включен коротким импульсом тока в цепи управления.

Обычный силовой тиристор по цепи управления может быть только включен. Для выключения ток в цепи анод-катод должен быть снят или уменьшен менее некоторого значения, называемого током удержания. Тогда через определенный промежуток времени, называемый временем выключения, тиристор перейдет из проводящего состояния в закрытое состояние.

Важными для силовой электроники подтипами тиристора являются:

**Запираемый тиристор** (3Т или GTO – Gate Turn Off thyristor). Этот прибор может быть как включен, так и выключен (переведен из проводящего в закрытое состояние) импульсами тока в цепи УЭ-катод. Для включения применяются импульсы тока управления прямой полярности (ток втекает в УЭ, вытекает из катода), для выключения – обратной.

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)