

# **Особенности эксплуатации и монтажа силовых полупроводниковых приборов**

**Станислав Стригунов, инженер-конструктор ЗАО «Протон-Электротекс»**

## ВВЕДЕНИЕ

Основой конструкции полупроводникового прибора является полупроводниковая структура, определяющая его электрические параметры и характеристики. Полупроводниковый элемент должен иметь надежную защиту от влияния окружающей среды, поэтому он помещается в корпус, обеспечивающий герметизацию и механическую прочность всей конструкции.

Силовые полупроводниковые приборы по виду конструкции корпуса можно разделить на: штыревые, с плоским основанием (фланцевые), таблеточные и модульные.

**Штыревая конструкция** силового полупроводникового прибора – основание, которого изготавливается из меди совместно с нарезным болтом для обеспечения электрического и теплового контакта с охладителем за счет определенного крутящего момента (рис. 1). Приборы с плоским основанием корпуса, имеют медный фланец для крепления прибора болтами к охладителю. Крышки корпусов в обоих типах выполняются в металлокерамическом или металлокерамическом исполнении. Верхний силовой вывод может быть выполнен в виде металлического (медного) плетеного жгута (гибкий вывод).



Рисунок 1 -Штыревая конструкция силового полупроводникового прибора

**Таблеточная (прижимная) конструкция** силового полупроводникового прибора создана с целью повышения его стойкости к термоциклическим воздействиям, так как не имеет паяных и сплавных соединений, что дает возможность внутренним элементам с различными температурными коэффициентами расширения перемещаться независимо друг от друга (рис.2). Однако, если силовой полупроводниковый прибор находится в не сжатом состоянии, такой конструкцией не обеспечивается надежное электрическое соединение внутренних элементов между собой – возможно даже полное отсутствие контакта. **Тестирование и эксплуатация силовых полупроводниковых приборов таблеточного типа недопустимы без применения устройств, создающих внешнее регламентированное прижимное усилие.** Любое воздействие электрическим напряжением на прибор, находящийся в несжатом состоянии, приводит к разрушению полупроводникового кристалла или наносит повреждения, существенно сокращающие срок его службы. Величина осевого усилия сжатия является одним из параметров силового полупроводникового прибора. Наиболее подходящим устройством, обеспечивающим необходимое прижимное усилие, является стандартный охладитель. Его конструкция обеспечивает равномерное распределение усилия по всей поверхности электродов силового полупроводникового прибора и не создает их перекосов.



Рисунок 2 - Таблеточная конструкция тиристора без охладителя

**Модульная конструкция** силового полупроводникового прибора - гибридные интегральные приборы, содержащие по два силовых полупроводниковых элемента (кристалла). Конструкция корпуса модуля создается таким образом, чтобы наиболее точно удовлетворить требования заказчика. При изготовлении модулей подбираются наиболее подходящие кристаллы и соответствующий тип корпуса (от миниатюрного F до большого D), а также корпуса типа А, С, Е, G. (рис. 3). При изготовлении модулей используются следующие схемы соединения двух кристаллов: встречно-параллельное, параллельное с общим катодом и параллельное с общим анодом.

Все типы модулей имеют стандартизованную конструкцию, что облегчает их монтаж.



Рисунок 3 - Модульная конструкция силового полупроводникового прибора

### **ОБЩИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРИМЕНЕНИЮ СИЛОВОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРИБОРА (СПП)**

Большое значение при проектировании преобразовательных устройств имеет правильный выбор типа силового полупроводникового прибора. В процессе расчетов проектировщик должен учитывать множество различных причин, которые могут повлиять на нормальную работу преобразователя. Например:

- возникновение недопустимых перенапряжений при коммутации,
- наличие недопустимых перегрузок по току при внешних и внутренних коротких замыканиях,
- перегрев приборов из-за повышения температуры внутри конструкции преобразователя за счет нагрева силового элемента схемы,
- недостаточно мощный сигнал управления,
- наличие помех в цепи управления тиристоров и т.д.

Игнорирование хотя бы одной из таких причин исключает нормальную работу преобразователя.

Несмотря на важность этого вопроса, в настоящее время не существует единых методических указаний по выбору силовых полупроводниковых приборов при проектировании преобразовательных устройств. В каждом индивидуальном случае лучше обращаться к специалисту компании-производителя или задать вопрос на сайте производителя силовых полупроводниковых приборов ЗАО «Протон-Электротекс» ([www.proton-electrotex.com](http://www.proton-electrotex.com)).

Тем не менее, существуют и **общие правила эксплуатации:**

- во всех случаях применения рекомендуется не допускать эксплуатацию приборов при их максимально допустимой загрузке по всем параметрам. Коэффициент запаса определяется в зависимости от требуемой степени надежности преобразовательных устройств;
- при замене вышедшего из строя прибора необходимо выбирать прибор с параметрами, соответствующими параметрам заменяемого прибора;
- параллельное и последовательное соединения приборов одного типа допускается только при соблюдении определенных условий (далее в статье);
- монтаж приборов с охладителями должен производиться с учетом конкретных требований (далее в статье).

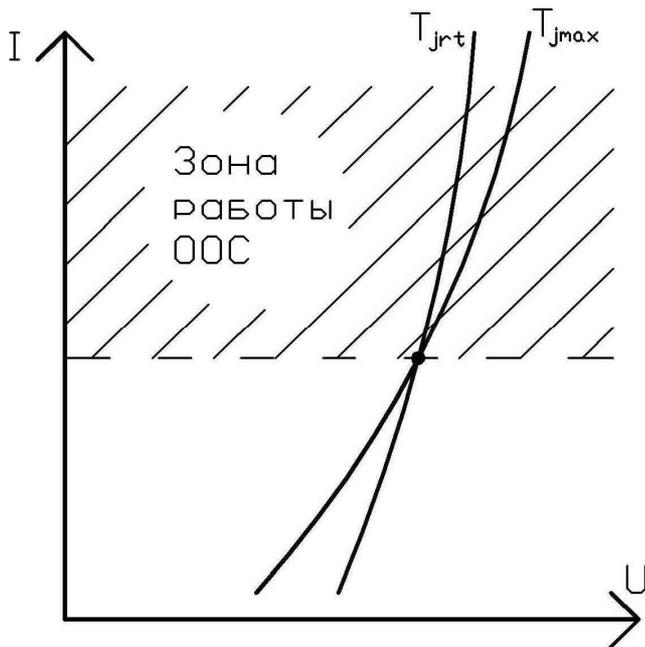
Во многих случаях в преобразователях большой мощности приходится использовать групповое соединение силовых полупроводниковых приборов, так как выпускаемые приборы ограничены по максимальным токам и блокирующим напряжениям. Основные типы соединений при этом следующие: - **перевод – в статье 1\_eng**

- параллельное соединение - используется при необходимости увеличения максимального тока;
- последовательное соединение - используется при необходимости увеличения максимального блокирующего напряжения;
- смешанное соединение - параллельное + последовательное.
- 

**Соединяя приборы параллельно**, необходимо стремиться к равному распределению тока нагрузки по приборам. Нужно обеспечить идентичность условий работы СПП и равенство вольтамперных характеристик, учитывая технологический разброс параметров.

Для решения этой задачи необходимо следующее:

- последовательно с каждым полупроводниковым прибором устанавливать индуктивные или омические делители тока;
- осуществлять подбор полупроводниковых приборов по статическим потерям в рабочей точке (по значению  $U_{Tm}/U_{\Gamma m}$  на рабочем токе). Следует заметить, что всегда существует определенный технологический разброс параметров СПП.
- при проектировании преобразователей, имеющих параллельное соединение полупроводниковых приборов, рекомендуется выбирать рабочие токи, находящиеся выше точки инверсии вольтамперной характеристики СПП. В этом случае выравнивание токов в параллельных ветвях будет происходить автоматически, так как в области ВАХ, лежащей выше точки инверсии, действует отрицательная обратная связь, то есть при увеличении температуры р-п перехода увеличивается его сопротивление и уменьшается прямой ток, что приводит к снижению температуры р-п перехода;



- для минимизации влияния времени включения отдельных тиристоров и - как следствие - неравномерного распределения тока по ветвям в первоначальный момент времени, необходимо применять мощные импульсы управления с крутым фронтом, что приводит к уменьшению времени задержки включения тиристора и минимизации влияния этого эффекта на распределение тока по параллельным ветвям;
- в схемах, где применяются мощные высоковольтные тиристоры; тиристоры, выполненные на кристаллах больших диаметров (более 56 мм), а также при наличии больших индуктивностей в силовой части, которые ограничивают скорость изменения силового тока, необходимо дополнительно учитывать время распространения включенного состояния тиристора. Это связано с тем, что мощные тиристоры в первоначальный момент времени включаются в ограниченной области вблизи управляющего электрода, после этого за ограниченное время происходит продольное распространение включенного состояния;
- конструктивное расположение параллельных ветвей должно обеспечивать равенство сопротивлений токоведущих шин, включая предохранители;
- для всех приборов, входящих в параллельное соединение, условия охлаждения должны быть одинаковы.

**Соединяя приборы последовательно,** необходимо стремиться к равному распределению блокирующего (прямого и (или) обратного) напряжения, как в стационарном состоянии, так и в динамических режимах, а именно - при включении тиристора и при восстановлении блокирующих свойств во время выключения тиристора или диода. Причины неравномерного распределения блокирующих напряжений могут быть следующие:

- различия утечек в последовательно соединенных приборах вследствие естественного технологического разброса и (или) различных рабочих температур вследствие, например, различных условий охлаждения (к сведению: в среднем изменение температуры на  $8^{\circ}\text{C}$  приводит к изменению утечек в два раза). Перенапряжение возникает на приборах, имеющих меньшее значение тока утечки;
- разброс времени включения отдельных тиристоров, соединенных последовательно в ветви, ведет к перераспределению напряжения между включившимися ранее и включающимися с запозданием тиристорами. Перенапряжение возникает на

тиристорах, включающихся с опозданием;

- разброс величин заряда обратного восстановления в последовательно соединенных приборах приводит к тому, что в момент восстановления такие приборы принимают обратное напряжение в различное время. Перенапряжение возникает на тиристорах, имеющих меньший заряд обратного восстановления.

Существуют следующие способы выравнивания распределения блокирующих напряжений:

- для снижения влияния неравномерности токов утечки последовательно включенных СПП используют включение шунтирующих высокоомных резисторов параллельно каждому полупроводниковому прибору (диоду или тиристор). Чем выше требование к выравниванию напряжения в этом режиме, тем меньше должны быть значения шунтирующих резисторов;
- для уменьшения неравномерности распределения блокирующих напряжений, которое возникает из-за разброса значений зарядов обратного восстановления СПП, применяются снабберные RC-цепи, включенные параллельно каждому полупроводниковому прибору. Чем больше значение снабберной емкости, включенной параллельно прибору, тем меньше неравномерности распределения блокирующих напряжений. Однако увеличение емкости - это не всегда рациональный способ, поэтому необходимо подбирать приборы для последовательного соединения по заряду обратного восстановления. Как правило, разброс зарядов принимают равным 5% или 10%.
- для уменьшения разброса времени включения СПП применяют мощные импульсы управления с крутым фронтом, что приводит к уменьшению времени задержки включения тиристора и минимизации влияния этого эффекта на распределение напряжения. Наличие снабберных RC-цепей параллельно каждому прибору оказывает положительное воздействие, так как до момента включения к тиристорам прикладывалось некоторое прямое напряжение, до которого также были заряжены снабберные конденсаторы. Это напряжение в первый момент времени после включения тиристора прикладывается к нему и обеспечивает равномерность распределения напряжения.

Большой спектр мощных преобразователей содержат в себе СПП, включенные параллельно и (или) последовательно. При их проектировании, обслуживании и ремонте важно учитывать вышеназванные требования и особенности групповых включений приборов. Это позволит максимально использовать ресурс СПП, разрабатывать и изготавливать надежное и долговечное оборудование.

## **МОНТАЖ ПРИБОРОВ С ОХЛАДИТЕЛЯМИ**

Силовые полупроводниковые приборы в процессе эксплуатации выделяют мощности тепловых потерь величиной от десятков ватт до нескольких киловатт. Тепловые потери вызывают значительный перегрев прибора по отношению к температуре окружающей среды, что приводит к ухудшению различных параметров прибора, к снижению работоспособности, срока службы и, в конечном итоге, к выходу из строя. Для надежной безотказной работы требуется эти мощности от СПП отводить, то есть охлаждать, обеспечивая тем самым номинальные тепловые режимы прибора.

Наиболее распространенным видом охлаждения является воздушное (естественное или принудительное) охлаждение. Охлаждатели воздушных систем охлаждения подразделяются на односторонние (для приборов штыревого исполнения) и двусторонние (для приборов таблеточного исполнения).

Охладитель в изделиях должен располагаться таким образом, чтобы его ребра были параллельны направлению потока охлаждающего воздуха. Неплоскостность контактной поверхности - не более 0,03 мм, шероховатость – не более 1,6 мкм. Надежный электрический и тепловой контакт обеспечивается приложенным к охладителю осевым усилием сжатия, приведенным в ТУ на соответствующий прибор. Значение прогиба траверсы прижимного устройства, соответствующее определенному усилию сжатия, приводится в паспорте на охладитель.

## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СИЛОВЫМИ ТИРИСТОРАМИ

Тиристор является биполярным полупроводником, который управляется током, поэтому на его управляющий электрод необходимо подать сигнал определенной амплитуды, длительности и полярности. При этом амплитуда и длительность управляющего импульса ограничивается рядом требований. Ниже приведены требования для наиболее распространенных случаев применения тиристора. В случае специального применения рекомендуется обратиться к специалистам ЗАО «Протон – Электротекс» за консультацией.

Типовые формы тока и напряжения цепи управления приведены на рисунке 4.

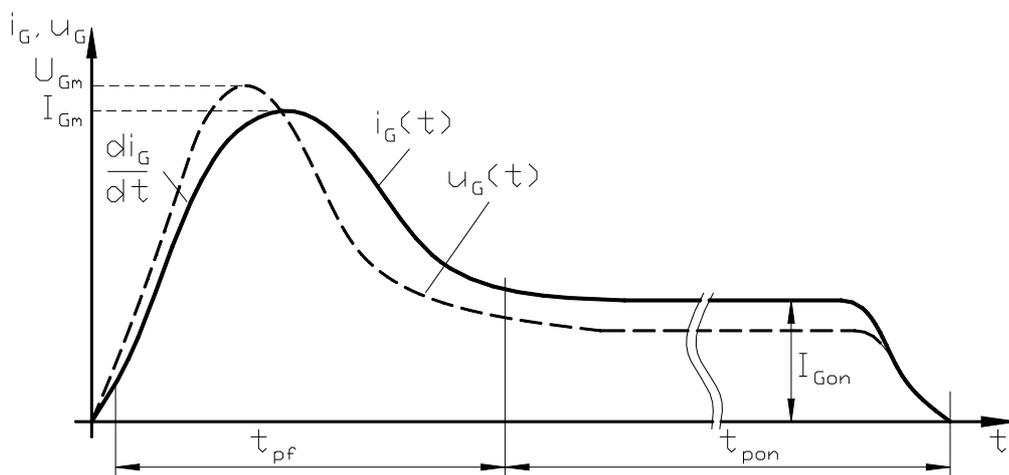


Рисунок 4 - Диаграммы тока и напряжения

$I_{Gon}$  – уровень тока подпитки;  $I_{Gon} = (3 \div 5) I_{GT}$ ;

где  $I_{GT}$  – отпирающий постоянный ток управления (параметр берется для минимальной рабочей температуры при которой будет эксплуатироваться тиристор).

$I_{GM}$  – амплитуда форсирующего импульса;  $I_{GM} = (10 \div 12) I_{GT}$ .

$di_G/dt$  – скорость нарастания тока управления;  $di_G/dt \geq 1$  А/мкс; Для значения  $di_G/dt$  ограничений сверху не существует.

$t_{pf}$  – длительность форсирующего импульса управления;  $t_{pf} = (2 \div 3) t_{gd} \approx 10 \text{ мкс} \div 20 \text{ мкс}$ ;

где  $t_{gd}$  – время задержки;

Для низких рабочих температур рекомендуется выбирать большую длительность импульса управления.  $t_{pon}$  – длительность импульса тока подпитки;  $t_{pon} = (3 \div 5) t_{gt} \approx 50 \text{ мкс} \div \infty$ ; где  $t_{gt}$  – время включения, зависит от схемы включения прибора;

длительность  $t_{\text{рон}}$  определяется характером нагрузки и условиями функционирования схемы, в которой находится тиристор. Ток за время  $t_{\text{рон}}$  выполняет функции страховки тиристора, если есть вероятность снижения анодного тока до значения тока удержания.

Не рекомендуется одновременное присутствие прямого тока управления и обратного напряжения «анод – катод».

Для минимизации влияния индуктивности проводников управления на скорость нарастания тока управления необходимо, чтобы напряжение холостого хода драйвера управления находилось в пределах  $15 \div 30$  В.

Пиковое обратное напряжение управления для повышения уровня помехоустойчивости тиристора (управляющий электрод отрицателен по отношению к катоду) должно быть менее 5 В.

Рабочая точка нагрузки управляющего электрода должна находиться в зоне оптимального управления, а именно - не должна выходить за кривую, соответствующую максимально допустимой мощности потерь на управляющем электроде при принятой длительности и скважности импульсов управления, и не должна попасть в зону негарантированного включения тиристора. Вольтамперная характеристика управляющего электрода приведена в информационных материалах на соответствующий тиристор.

Блок драйвера монтируют по возможности ближе к тиристорам, свивают провода управления между собой. Следует также принимать меры по исключению соприкосновения проводов управления с поверхностями, имеющими высокий потенциал, или воздействию быстро изменяющегося электромагнитного поля для того, чтобы избежать влияния электромагнитных помех на цепь управления.

Для обеспечения надежной работы тиристора, минимальный анодный ток, на который включается тиристор, должен быть больше заданной величины, в зависимости от типа прибора и может варьироваться от нескольких ампер до нескольких десятков ампер.