

# Особенности механического сжатия силовых прижимных полупроводниковых приборов

Алексей Чекмарёв (Москва)

Прижимные силовые полупроводниковые приборы являются мощными компонентами управления потоками электрической энергии.

Для того чтобы полностью использовать их потенциал, важно правильно выбрать механическую конструкцию всей сборки, включая прижимные полупроводники, охладители, шины и другие компоненты. В этой статье представлены некоторые важные аспекты, касающиеся механической конструкции и работы всей сборки, в которой использованы прижимные силовые полупроводники.

Даны рекомендации по механическому сжатию прижимных силовых полупроводниковых приборов.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПАРАМЕТРАМ СОПРЯЖЕНИЯ

Токовые и теплопроводящие поверхности должны быть разработаны таким образом, чтобы обеспечить хорошие проводящие характеристики в течение всего жизненного цикла оборудования. Это достигается путём создания достаточного количества стабильных соединений металл-металл, называемых в теории контакта а-точками, которые могут эффективно проводить ток от полупроводника через охладитель к силовой шине. Эти а-точки должны выполнять свои функции в тяжёлых эксплуатационных условиях, таких как цикличность нагрузки, воздействие окружающей среды посредством вибрации и химического загрязнения. Для этого особое внимание должно быть уделено правильному выбору материалов для прижимной сборки; они должны



Рис. 1. Водяные охладители для прижимных полупроводниковых приборов

иметь надлежащее покрытие и степень обработки поверхностей. Эти требования выполняются путём контроля следующих параметров: шероховатость, плоскопараллельность и сила сжатия.

*Шероховатость* – это характеристика микроструктуры поверхности. Согласно ISO 4287, она выражается через Ra. Так, например, для всех прижимных полупроводниковых приборов компании ABB шероховатость Ra не превышает 0,8 мкм.

*Плоскопараллельность* – это мера параллельности контактных поверхностей. Для приборов компании ABB плоскопараллельность не превышает 10 и 15 мкм для приборов с диаметром контактной поверхности до и более 50 мм соответственно.

*Сила сжатия ( $F_m$ )* – это рекомендованное усилие для обеспечения оптимальных характеристик прибора. При снижении этой силы ниже допустимого значения тепловое сопротивление и падение напряжения в прямом направлении будут увеличиваться, а номинал импульсного тока – уменьшаться. Слишком большая сила сжатия может снизить устойчивость к цикличности нагрузки вследствие большой деформации кремниевой структуры (возможен даже её излом).

В этой статье внимание акцентируется на сопряжении между прижимным полупроводником и охладителем.

## КОНСТРУКЦИЯ ОХЛАДИТЕЛЕЙ

При использовании водяных охладителей необходимо обеспечить, насколько это возможно, высокую однородность контактной поверхности прибора. Единичный водяной канал через центр охладителя может оказаться недостаточным для обеспечения теплообмена при работе оборудования с большой нагрузкой, что приведёт к перегреву края прибора. Предпочтительнее использовать водяные каналы, которые создают турбулентность. Использование прямого пути охлаждения допустимо, в основном, для легконагруженного оборудования. Ряд компаний поставляют компактные водяные охладители для оборудования, работающего с большими нагрузками (рис. 1). Охладители должны иметь адекватную механическую прочность, чтобы выдерживать усилие до 135 кН без деформации, которая может привести к неравномерному распределению давления. Для литых или прессованных охладителей практически всегда требуется надлежащая механическая обработка для получения необходимого качества поверхности.

## ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ

Состояние поверхностей критично для оптимальной проводимости тепла и тока между прибором и охладителем. Целесообразно, чтобы поверхности охладителя имели такие же значения шероховатости и плоскопараллельности, как и у прижимного прибора. Рекомендуется использовать охладители с покрытием необходимого качества из никеля или серебра. Для сфер применения с сильными внешними воздействиями на компоненты химическое нанесение никеля или серебра предпочтительнее электролитического. Не рекомендуется использовать медные или алюминиевые поверхности без защитного покрытия по причине возникновения коррозии, которая быст-

ро разрушает контактную поверхность. Никель и серебро также корродируют, однако окись серебра по сравнению с окисью алюминия не оказывает разрушающего воздействия на контактную поверхность. В случае никелевого покрытия толщина никеля на охладителе и приборе должна быть одинакова.

Перед тем как прибор устанавливается между охладителями, на контактные поверхности можно нанести тонкий слой легкой смазки или специального силиконового геля. Эти материалы должны быть тщательно подобраны для их долгосрочной химической стабильности по целому ряду параметров: антикоррозийным свойствам, диапазону рабочих температур, электрических характеристик и простоте использования. Одним из лучших материалов является силиконовая смазка SF1154 (GE).

Рекомендации по охладителю справедливы для всех других поверхностей прижимной конструкции, используемых в контакте с полупроводником (например, силовой шины, соединённой с неохлаждаемой стороной прижимного полупроводника в сборке с односторонним охлаждением).

### МЕХАНИЧЕСКАЯ КОНСТРУКЦИЯ И СБОРКА ПРИЖИМНОЙ СИСТЕМЫ

Механическая конструкция и сборка прижимной системы являются наиболее критичными характеристиками для надёжности прижимных силовых полупроводников. Неравномерное распределение давления из-за неудовлетворительной механической конструкции или сборки обычно приводит к повреждениям прибора. В этом разделе рассматриваются некоторые важные аспекты разработки надёжных прижимных полупроводниковых сборок.

Система сжатия должна гарантировать равномерное распределение усилия сжатия по всей контактной поверхности прибора. Неравное усилие приводит к деформации корпуса и внутренним напряжениям между различными слоями внутри прибора. Конструкция для обеспечения однородности давления не всегда проста, и сложность её не должна быть недооцененной. Простое решение, например, сжатие прибора между двумя

прямоугольными пластинами болтовым соединением углов, покажет низкую надёжность в эксплуатации. Для проверки равномерности распределения давления используют специальную плёнку Fuji Prescale или другую аналогичную. Измеряемое давление для большинства приборов находится в диапазоне  $1...5 \text{ кН/см}^2$ . У больших приборов (GTO и IGCT – запираемые тиристоры) диапазон контролируемого давления ниже:  $0,25...1 \text{ кН/см}^2$ . Примеры распределения давления, измеренные с помощью плёнки Fuji Prescale в приборе IGCT, приведены на рис. 2. Вариант (а) характеризуется лучшим распределением давления по сравнению с вариантом (б), где видны области, имеющие слабое или хорошее давление.

В идеале сила сжатия должна прикладываться в одной точке над центром прибора. Центр приложения силы должен находиться внутри 2-мм расстояния от центра прибора на минимальном расстоянии от его поверхности (а), как показано на рис. 3. При этом достигается равномерность распределения давления с  $90^\circ$  конусным усилием. Сферическая чаша между устройством монтажного сжатия и распределителем давления над охладителем может действовать как одиночная точка приложения усилия. Она обеспечивает симметричную передачу усилия на прибор и позволяет минимизировать влияние непараллельности охладителя и полупроводника. Например, непараллельность анодной и катодной контактных поверхностей для приборов с диаметром контактной поверхности до 50 мм составляет менее 100 мкм, а для приборов с диаметром более 50 мм – до 150 мкм.

Вследствие ограничений свободного места иногда нет возможности выдерживать рекомендованное расстояние (половина диаметра контактной поверхности). В таких случаях приемлемые результаты могут быть получены за счёт использования более жёстких материалов (например, стали).

Компоненты и устройства сжатия должны быть в достаточной степени согласованы по температурному коэффициенту расширения, чтобы без повреждений выдерживать напряже-

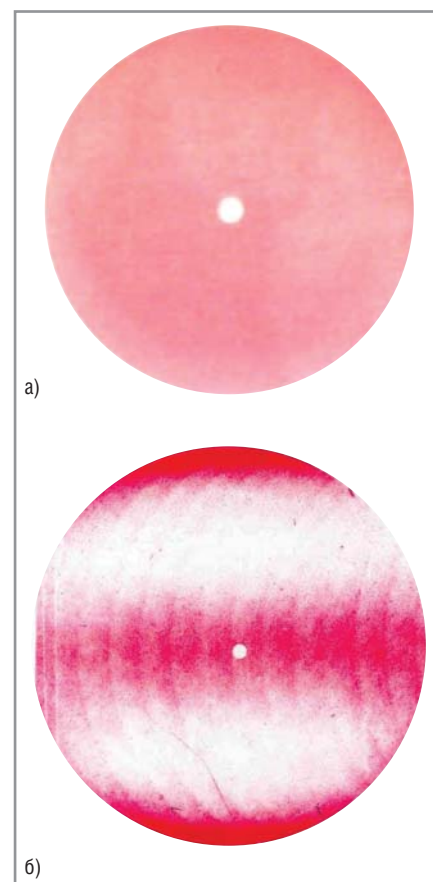


Рис. 2. Хорошее (а) и плохое (б) распределение давления

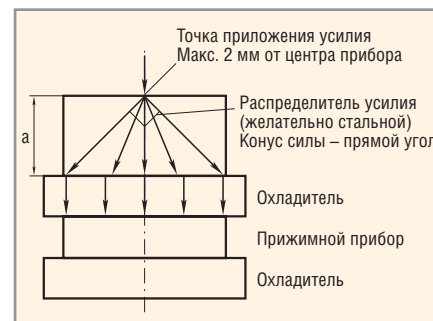


Рис. 3. Рекомендуемое приложение сжимающего усилия

ния, возникающие вследствие температурных изменений в процессе эксплуатации. Конструкция также должна допускать температурные расширения и сжатия без особых изменений усилия и его распределения по поверхности прижимного полупроводника.

В длинных сборках с более чем двумя приборами и охладителями достичь высокой механической стабильности при использовании двух распорок и стандартного устройства сжатия затруднительно. В таких случаях следует использовать четырёхраспорочную конструкцию (рис. 4). Прижимные силовые полупроводники, соединённые параллельно, долж-

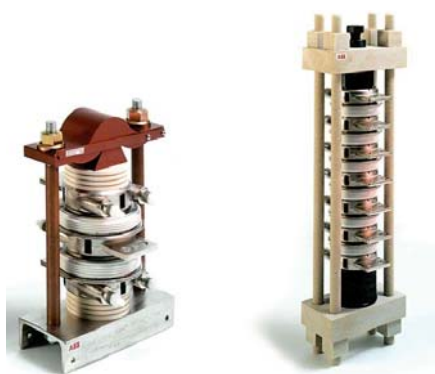


Рис. 4. 2- и 4-распорочные конструкции для длинных сборок

ны быть прижаты раздельно, как показано на рис. 5. Вследствие наличия погрешностей по высоте и параллельности в большинстве случаев возникают механические усилия, способные значительно уменьшить жизненный цикл прибора с двумя или более жёсткими охладителями или силовыми шинами.

Если устройство сжатия или болты имеют потенциал земли, то должны быть использованы соответствующие материалы и надлежащие изоляционные расстояния. В качестве материала болтов может быть использован изоляционный материал Vetresit (эпоксидная смола со стекловолокном), упрощающий или делающий более компактной полупроводниковую сборку по сравнению со стальными болтами, которые требуют решения проблемы их изоляции.

Приборы, собираемые в одну сборку, должны иметь одинаковые монтажные

усилия во избежание механических перенапряжений или слишком малого давления для отдельных приборов. В целях упрощения конструкции охладителей и достижения равномерного распределения усилия сжатия на все полупроводники желательно использовать приборы с одинаковыми диаметрами контактных поверхностей. Если используются приборы с разным диаметром контактной поверхности, то существует большая вероятность пережатия у прибора меньшего диаметра либо край прибора большего диаметра будет недожат. Пример удачной конструкции сборки показан на рис. 6а. Конструкция неудачна, когда используются только тонкие распределители усилий и недостаточно эффективный охладитель с различными диаметрами контактных поверхностей (рис. 6б). Такую конструкцию без дополнительной доработки охладителей и распределителей усилия использовать не рекомендуется.

Силовые шины или их соединения со сборкой должны иметь гибкую часть во избежание появления механических напряжений на стороне сборки. Механические напряжения могут возникнуть как из-за механических погрешностей, так и вследствие теплового расширения и сжатия во время изменений электрической нагрузки. Для сборок с IGBT интегрированный драйвер необходимо закрепить так, чтобы он выдержал вибрационные нагрузки, прикладываемые во время транспортировки и

эксплуатации. Следует учитывать, что драйвер и металлический корпус вокруг драйвера у больших приборов имеют потенциал катода и должны быть изолированы от опоры сборки.

Управляющие кабели для тиристорных фазового управления и GTO должны прокладываться так, чтобы избежать контакта с потенциалом анода и минимизировать электромагнитное излучение (ЭМИ). Для снижения чувствительности к ЭМИ рекомендуется использовать витые или коаксиальные кабели. Кабели должны быть как можно короче и по возможности располагаться под углом 90° к основному направлению протекания тока.

Для систем с водяным охлаждением применение слишком жёстких труб, используемых между различными охладителями, может оказаться проблемным. Причиной этому являются механические усилия, вызванные тепловым расширением и сжатием. Поскольку вода обладает электрической проводимостью, расстояние между охладителями с различными потенциалами должно быть достаточно большим. Должна использоваться деионизированная вода с низким уровнем проводимости. Трубы должны быть из нержавеющей стали или тефлона (нельзя использовать медные или алюминиевые).

Для оборудования, используемого в неблагоприятных условиях окружающей среды, должны быть предприняты специальные меры для исключения возможности повреждения прижимных силовых полупроводников от вибрационных нагрузок, изменений температуры и т.д. Специальные меры, касающиеся защиты от вибрации, должны быть соблюдены для приборов в преобразователях подвижного состава.

**ПРИМЕР КОНСТРУКЦИИ СБОРКИ**

Пример сборки GTO показан на рис. 7. Ниже перечисляются составные части сборки и поясняются их функции:

- перемещение листовой пружины (1)  $\Delta x$  должно быть больше, чем тепловое расширение частей сборки для обеспечения постоянства силы  $F_m$  во времени и температурных изменениях;
- сферическая чашка (2) гарантирует, что сила  $F_m$  симметрично пере-

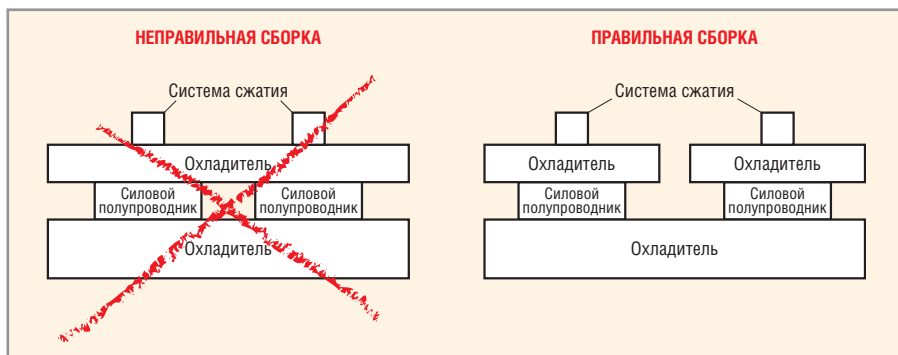


Рис. 5. Конструкция с раздельным сжатием приборов

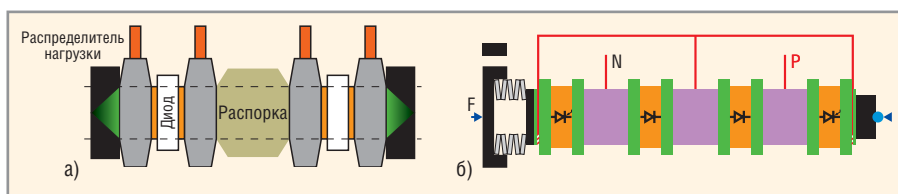


Рис. 6. Удачно скомпонованная сборка с эффективными распределителями нагрузки и одинаковыми диаметрами приборов (а) и неудачная конструкция сборки с неэффективными распределителями нагрузки и различными диаметрами приборов (б)

даётся прижимным полупроводникам и позволяет частям внутри сборки адаптироваться к неизбежно присутствующей непараллельности;

- массивная стальная плита (3) для равномерной передачи давления охладителю;
- высококачественный охладитель (4);
- прижимной полупроводник (5), поверхности которого перед установкой очищены и покрыты тонким слоем силиконовой смазки;
- массивный хомут (6), гарантирующий равномерное распределение давления на охладитель;
- силовые шины (7), соединённые с охладителем посредством гибких соединений (8) во избежание появления неконтролируемых «внешних» усилий, нарушающих равномерность распределения давления внутри сборки.

Перед установкой частей сборки в систему сжатия все поверхности должны быть очищены этанолом или подобными веществами. Рекомендуется смазать их тонким слоем кремниевой пасты для улучшения теплового контакта и предотвраще-

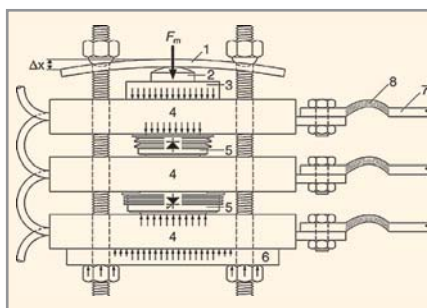


Рис. 7. Пример сборки, показывающей основные правила надлежащей системы сжатия прижимных силовых полупроводниковых приборов

ния коррозии в том случае, если сборка эксплуатируется в агрессивной среде. Следует отметить, что кремниевая паста или контактная смазка не смогут компенсировать низкое качество поверхности охладителя.

Если предъявляются серьезные требования к вибрационным воздействиям, то драйвер IGCT не может быть оптимально зафиксирован только одним креплением GCT. Крепление обеспечивается с помощью двух пар отверстий: одна пара располагается между корпусом

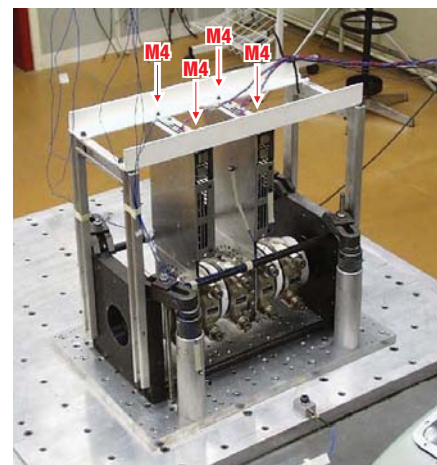


Рис. 8. Сборка для вибрационных испытаний IGCT

GCT и корпусом драйвера, которая также может быть использована для закрепления охладителя, а другая – на заднем крае корпуса. Для примера на рис. 8 показана простая конструкция сборки для вибрационных испытаний, где использована только одна пара отверстий, расположенных на заднем крае корпуса.

В статье использована техническая информация компании ABB Switzerland Ltd. Semiconductors. ©

## Полупроводники НА ОСНОВЕ КАРБИДА КРЕМНИЯ

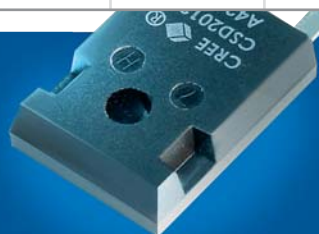
### Практическое применение

#### Характеристики высоковольтных диодов Шоттки фирмы Cree

Наименование	CSD04060A CSD04060D CSD04060E	CSD06060A CSD06060D CSD06060G	CSD10060A CSD10060D CSD10060E	CSD20060D	CSD05120A	CSD10120A CSD10120D	CSD20120D
$U_{\text{макс}}$ , В	600	600	600	600	1200	1200	1200
$I_{\text{пост}}$ , А	4	6	10	20	5	10	20
Типы корпусов	T0252, T0220-2, T0220-3	T0263, T0220-2, T0220-3	T0263, T0220-2, T0220-3	T0247-3	T0220-2	T0220-2, T0247-3	T0247-3

#### ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ:

- Активные корректоры коэффициента мощности — снижение динамических потерь в ключевом транзисторе и диоде до 60%
- Антипараллельные диоды MOSFET- и IGBT-транзисторов и модулей для жёсткого переключения — снижение динамических потерь на 20...30%
- Мощные высоковольтные выпрямители для частот до единиц мегагерц



ПРОСОФТ – официальный дистрибьютор компании CREE в России и странах СНГ

**PROSOFT**®

ПРОСОФТ – АКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ВАШЕГО БИЗНЕСА

Телефон: (495) 232-2522 • E-mail: info@prochip.ru • Web: www.cree.ru