

Новые мощные тиристоры с повышенной нагрузочной способностью

А.А. Писарев, А.А. Черников, А.В. Ставцев, А.М. Сурма

Современная силовая электроника активно развивается по целому ряду направлений. Несмотря на бурное развитие полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей (IGBT, IGCT), для целого ряда применений, особенно в высоковольтном энергетическом оборудовании, остается технически оправданным использование мощных высоковольтных тиристоров с повышенной нагрузочной способностью. В последнее время интерес потребителей таких тиристоров смещается в сторону приборов, построенных на базе полупроводниковых элементов диаметром 4" – 6" (100-150 мм).

Компания ЗАО «Протон-Электротекс» провела научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы с целью освоения производства нового поколения тиристоров на базе 4" (100 мм), отличающегося повышенной надежностью, увеличенной областью безопасной работы и улучшенными эксплуатационными характеристиками. В настоящий момент производство подготовлено к серийному выпуску таких тиристоров, имеющих блокирующие напряжения от 1800 В до 6500 В.

Базовые параметры приборов представлены в таблице.

Наименование прибора	I_{TAV} , А	I_{TSM} , кА	U_{DRM} U_{RRM} , В	I_{DRM} I_{RRM} , МА	tq, мкс	Макс. диаметр/ диаметр контакта/ высота корпуса, мм
T193-5000-18	5 000 [85 °С]	94	1 800	300	400	150/100/26
T393-5000-18	5 000 [78 °С]					150/100/35
T193-4000-28	4 000 [94 °С]	75	2 800	300	500	150/100/26
T393-4000-28	4 000 [90 °С]					150/100/35
T193-3600-36	3 600 [91 °С]	72	3 600	300	630	150/100/26
T393-3600-36	3 600 [86 °С]					150/100/35
T193-3200-44	3 200 [91 °С]	60	4 400	300	800	150/100/26
T393-3200-44	3 200 [86 °С]					150/100/35
T193-2500-52	2 500 [98 °С]	55	5 200	300	800	150/100/26
T393-2500-52	2 500 [94 °С]					150/100/35
T193-2000-65	2 000 [99 °С]	45	6 500	300	800	150/100/26
T393-2000-65	2 000 [95 °С]					150/100/35

Для тиристоров с большим диаметром полупроводникового элемента одной из основных проблем является обеспечение надежного электрического и теплового контакта кремниевой пластины с молибденовым термокомпенсатором. Существуют два подхода к отводу выделяемого тепла от кремниевой пластины:

1. Сплавная конструкция, когда кремниевая пластина, имеющая сформированные диффузионные слои, соединяется с молибденовым термокомпенсатором.

2. Полностью прижимная конструкция, когда кремниевая пластина, имеющая сформированные диффузионные слои и металлизацию на анодной и катодной стороне, зажимается между двумя молибденовыми термокомпенсаторами. При этом обеспечивается исключительно механический контакт между молибденовым термокомпенсатором и кремниевой пластиной.

Оба подхода широко применяются различными мировыми производителями, однако и один, и второй способ имеют свои достоинства и недостатки.

К достоинствам сплавной конструкции можно отнести обеспечение качественного теплового контакта кремниевой пластины к молибденовому термокомпенсатору со стороны анода, что снижает общее тепловое сопротивление и улучшает отвод выделяемого тепла.

Недостатком такой конструкции является деформация полупроводникового элемента с термокомпенсатором из-за его нагрева до высоких температур (650-680 °С) и последующего охлаждения в процессе сплавления. Кроме того, при неравномерном нагревании и охлаждении возникают коробления полупроводникового элемента, которые приводят к отсутствию на их месте электрического и теплового контакта, даже при сборке тиристора с охлаждаемым. Степень деформации определяется различием коэффициентов теплового расширения сплавляемых деталей, абсолютным значением температур и тепловым профилем процесса сплавления. При этом, чем больше диаметр сплавляемой кремниевой пластины, тем больше степень деформации. На полупроводниковых элементах, сплавленных с молибденовым термокомпенсатором диаметром 100 мм, амплитуда деформации достигает 100 – 120 мкм (рисунок 1). Деформация полупроводникового элемента, естественно, сопровождается возникновением остаточных механических напряжений, что может приводить к ухудшению циклоустойкости, стойкости к ударному току и другим характеристикам тиристора.

Поэтому для такой конструкции тиристора чрезвычайно важным является качество технологии соединения кремниевой пластины с молибденовым термокомпенсатором. Эта технология должна обеспечить отсутствие локализации механических напряжений по площади полупроводникового элемента – только тогда может быть достигнут качественный тепловой контакт между структурой и корпусом прибора.

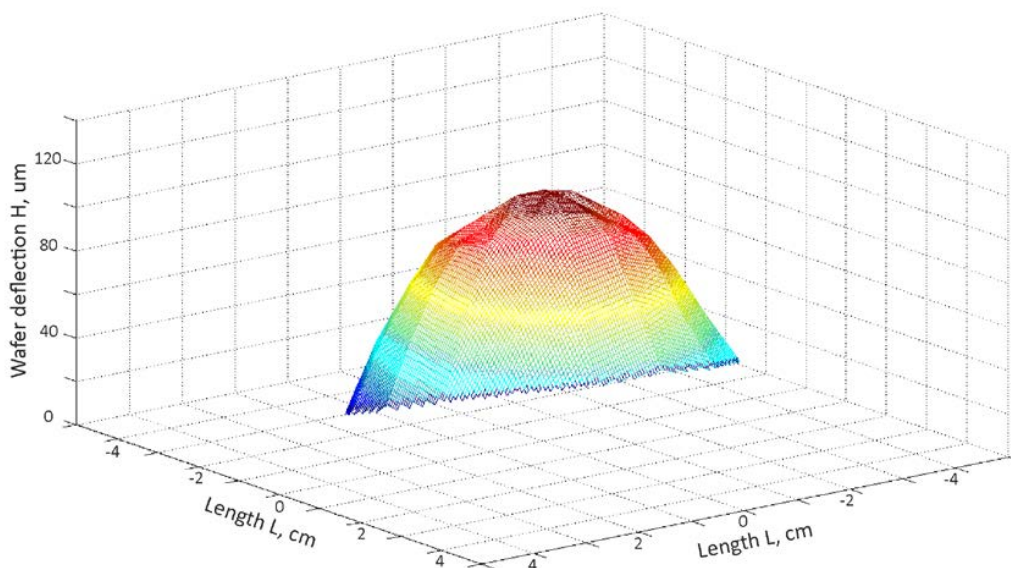


Рисунок 1. Деформация полупроводникового элемента с молибденовым термокомпенсатором после процесса сплавления.

К достоинствам прижимной конструкции относится отсутствие вышеописанных деформаций, т.к. исключен нагрев до высоких температур и последующее охлаждение полупроводникового элемента, что позволяет получать высокое значение ударного тока и хорошую циклостойкость, даже при отклонениях от номинального усилия сжатия при сборке тиристора с охладителем.

К недостаткам данного подхода относится повышенное тепловое сопротивление со стороны анода по сравнению с аналогичным параметром сплавных полупроводниковых элементов, что ухудшает отвод выделяемого тепла. Также следует обратить внимание на то, что область управляющего электрода в полупроводниковом элементе не находится под внешним давлением при сборке тиристора с охладителем, так как в катодной прокладке область управляющего электрода вскрыта для исключения короткого замыкания катода и управляющего электрода. Таким образом, у прижимного полупроводникового элемента и со стороны анода область, находящаяся под управляющим электродом, также не прижимается к молибденовому диску, что приводит к еще большему ухудшению теплоотвода.

Как следствие, тиристоры с полностью прижимной конструкцией имеют определенные ограничения области безопасной работы. При этом могут возникать ситуации, когда определенная последовательность безопасных по отдельности режимов может создать предпосылки для отказа тиристора. Так, например, при длительной работе во включенном состоянии на малом анодном токе, протекающем только через вспомогательный тиристор, из-за отсутствия теплоотвода в этой области возникает локальный разогрев до температуры, не превышающей максимальную допустимую, а область основного тиристора остается холодной. Если режим работы предусматривает последующее быстрое нарастание анодного тока до уровня, не превышающего допустимый, то из-за разницы температур основной и вспомогательной областей тиристора, вспомогательный тиристор не отключается после включения основного. При этом уровень тока вспомогательного тиристора превысит безопасный предел, что приведет к недопустимому перегреву области вспомогательного тиристора и тепловому пробую.

В результате проведенного комплекса работ «Протон-Электротекс» сегодня располагает технологией бездефектного сплавления полупроводникового элемента с молибденовым термокомпенсатором для диаметров соединяемых элементов вплоть до 100 мм. С помощью такой технологии возможно изготовление полупроводниковых элементов, сплавленных с молибденовым термокомпенсатором диаметром 100 мм, с амплитудой деформации 45 – 55 мкм (рисунок 2). Что позволяет обеспечивать хороший электрический и тепловой контакт между полупроводниковым элементом и корпусом при сборке тиристора с охладителем, если соблюдены рекомендации по монтажному усилию (70÷90 кН).

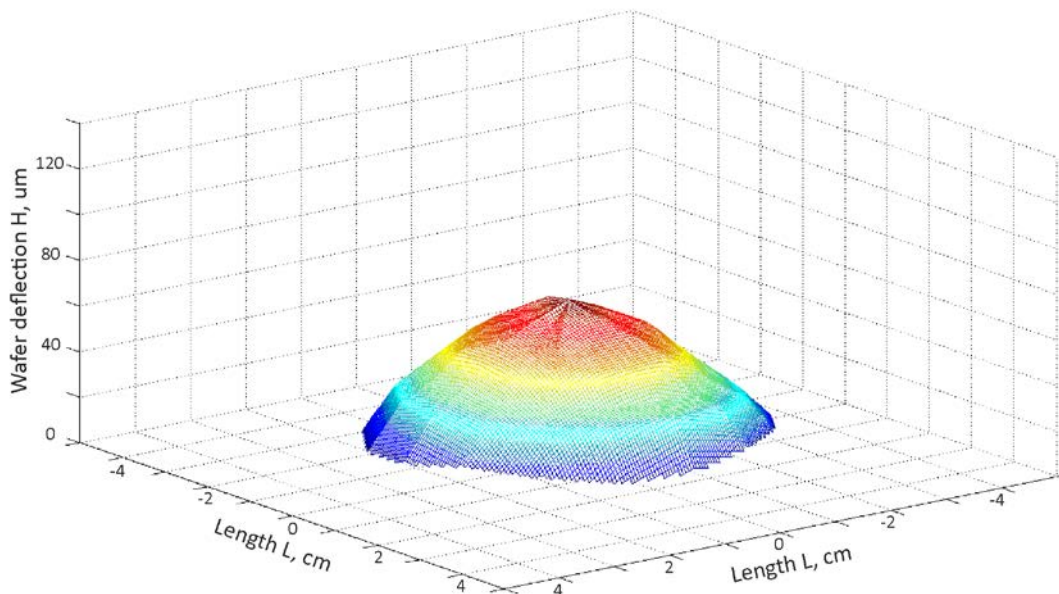


Рисунок 2. Деформация полупроводникового элемента с молибденовым термокомпенсатором после процесса бездефектного сплавления.

Поэтому при разработке тиристоров нового поколения была использована сплавная конструкция, которая позволяет гарантировать отсутствие «мертвых зон» области безопасной работы для всего диапазона анодных токов, включая режимы с существенно нелинейным изменением анодного тока, а также обеспечить высокую циклоустойкость и ударный ток.

Технология сплавления кремниевой пластины с молибденовым термокомпенсатором, используемая на «Протон-Электротекс», применима до диаметра 100 мм включительно, свыше которого следует использовать альтернативные методы соединения кремниевой пластины и молибденового термокомпенсатора. В настоящее время на предприятии ведутся работы по разработке новой технологии соединения молибденового термокомпенсатора с кремниевой пластиной, известной как «синтеринг», когда вместо припоя используется наноструктурированная серебряносодержащая паста. Процесс спекания происходит при относительно низких температурах (200-250 °С) и одновременном обеспечении внешнего усилия порядка 0,6 кН/см². В результате образуется соединение из чистого серебра с минимальными деформациями полупроводникового элемента. Данный подход включает в себя достоинства обоих ранее указанных способов и нивелирует недостатки. При использовании этой технологии возможно изготовление полупроводниковых элементов, соединенных с молибденовым термокомпенсатором диаметром 100 мм, с амплитудой деформации 25 – 30 мкм (рисунок 3).

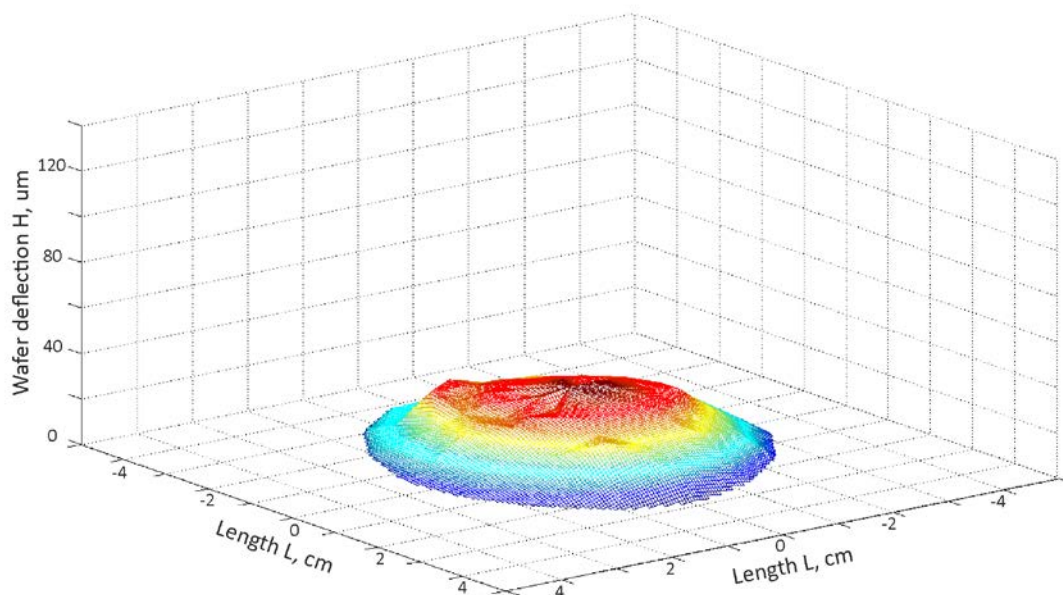


Рисунок 3. Деформация полупроводникового элемента с молибденовым термокомпенсатором после процесса синтеринга.

В настоящий момент по данной технологии изготовлены опытные образцы тиристоров, которые проходят испытания, а также ведутся работы по снижению прямых затрат на изготовление полупроводниковых элементов, соединенных с молибденовым термокомпенсатором с помощью синтеринга, и подготовка серийного производства для использования этой технологии.