НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МОЩНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ТИРИСТОРОВ

ДМИТРИЙ ТИТУШКИН, «Протон-Электротекс», d.titushkin@proton-electrotex.com,
АЛЕКСЕЙ СУРМА, «Протон-Электротекс», a.surma@proton-electrotex.com,
АНАТОЛИЙ ЧЕРНИКОВ, «Протон-Электротекс», a.chernikov@proton-electrotex.com,
СЕРГЕЙ МАТЮХИН, «Госуниверситет – УНПК», sim1@mail.ru

В статье обсуждаются новые возможности изготовления мощных быстродействующих тиристоров за счет применения технологии низкотемпературного соединения кремниевых кристаллов и молибденовых дисков посредством синтеринга на серебряную пасту. Эта технология объединяет все преимущества несплавного метода (free floating silicone technology) и сплавления на силумин (alloying to siluminium). Применение этой технологии позволяет изготавливать быстродействующие тиристоры с диаметром полупроводникового кристалла 100 мм и более. Новые приборы имеют повышенную циклостойкость и быстродействие, а также меньшее тепловое сопротивление.

ВВЕДЕНИЕ

Традиционные технологии соединения кремниевой пластины и термокомпенсатора не удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к перспективным силовым элементам. Низкотемпературное спекание (синтеринг) в настоящее время находит все более широкое применение в полупроводниковом производстве. Актуально применение этой технологии для соединения полупроводникового кристалла и молибденовых дисков тиристоров и диодов высокой и сверхвысокой мощности, рассчитанных на коммутацию токов от тысяч до сотен тысяч ампер и имеющих характерный размер кремниевого кристалла 50–150 мм [1, 5].

Опыт применения синтеринга в производстве мощных однокристальных тиристоров и диодов показывает также другие преимущества этой технологии, к которым относится повышенная циклостойкость [3–4], меньшее тепловое сопротивление [2–4], а также увеличенные значения ударного тока [1].

В настоящее время ЗАО «Протон-Электротекс» осваивает производство силовых полупроводниковых приборов с использованием технологии синтеринга. В этой статье обсуждаются возможности улучшения характеристик быстродействующих тиристоров и диодов при применении этой технологии.

СОЕДИНЕНИЕ КРЕМНИЕВОГО КРИСТАЛЛА И МОЛИБДЕНОВОГО ДИСКА

В настоящее время при производстве элементов силовых тиристоров широко используются две технологии: сплавная (alloying) и несплавная (free floating silicone).

В технологии сплавления соединение кремниевого кристалла и молибденового диска-термокомпенсатора осуществляется методом вакуумной пайки с помощью сплавов алюминий-кремний. Этот метод обеспечивает прочное и весьма циклостойкое соединение с очень малым тепловым сопротивлением.

Однако сплавление – это высокотемпературный процесс (около 700°C). Следовательно, при остывании в полупроводниковом элементе возникают термомеханические напряжения, обусловленные различиями коэффициентов температурного расширения кремния и молибдена. Эта проблема становится значительной при больших значениях линейных размеров (диаметров) кремниевых кристаллов.

Другой проблемой этой технологии является активное растворение поверхностных слоев кремниевого кристалла. Эта проблема становится актуальной при изготовлении быстродействующих приборов, т.к. для получения требуемых характеристик быстродействия необходимо уменьшать толщину кремниевого кристалла и толщину сформированного анодного эмиттера. Уменьшение толщины и наличие проплавлений приводит к разбросу коэффициента инжекции эмиттерного слоя по площади и, как следствие, к неоднородности распределения анодного тока.

При использовании несплавной технологии в конструкции прибора имеется кремниевая пластина с алюминиевой металлизацией на катоде и аноде, расположенная между катодным и анодным термокомпенсаторами. При этом благодаря отсутствию паяного соединения обеспечивается исключительно прижимной тепловой и электрический контакт между молибденовым термокомпенсатором и кремниевой пластиной.

К достоинствам прижимной конструкции относится отсутствие характерных деформаций и остаточных напряжений, возникающих при пайке кремниевой пластины и термокомпенсатора из-за различия температурных коэффициентов линейного расширения. Это обстоятельство особенно важно при изготовлении полупроводниковых элементов диаметром более 80 мм. Еще одним важным достоинством несплавной технологии является отсутствие частичного растворения поверхностных слоев кремния.

К недостаткам этого подхода относится повышенное тепловое сопротивление со стороны анода по сравнению с аналогичным параметром полупроводниковых элементов, имеющих паяный контакт.

Кроме того, для исключения замыкания управляющей области и катода монтажное усилие не прикладывается к управляющей области тиристора. Соответственно, это усилие не распространяется по той же площади, но с анодной стороны структуры. Как следствие, это может привести к проблемам при коммутации импульсов тока с повышенным di/dt нарастания. Тиристоры, оснащенные вспомогательным элементом для обеспечения тока управления разветвленного управляющего электрода основной структуры, тоже могут столкнуться с проблемами при работе на малых анодных токах.

Описанный недостаток несплавной технологии существенно проявляется у мощных тиристоров, у которых диаметр полупроводникового элемента превышает 80 мм, поскольку для обеспечения необходимых характеристик включения они должны иметь сложную разветвленную управляющую область с большой площадью.

В настоящее время на рынке увеличивается спрос на тиристоры с большей плотностью мощности и более продолжительным сроком службы. Особенно это актуально для высокочастотных применений, где используются быстродействующие тиристоры.

Таким образом, для изготовления мощных быстродействующих тиристоров желательно использовать технологию, которая объединяла бы преимущества сплавной и несплавной технологий и сводила бы недостатки этих технологии к минимуму. Новая оригинальная технология должна отвечать следующим требованиям:

- быть пригодной для элементов с большими площадями;
- иметь высокую электро- и теплопроводность;
- обеспечивать высокую стабильность при термоциклировании.

Всем изложенным требованиям удовлетворяет технология низкотемпературного спекания серебряных мелкодисперсных слоев (технология синтеринга).

С одной стороны, синтеринг обеспечивает жесткое соединение с молибденовым диском и отсутствие частичного растворения поверхностных слоев кремния (см. рис. 1).

С другой стороны, использование синтеринга при производстве силовых полупроводниковых приборов позволяет уменьшить остаточные термомеханические напряжения и профиль деформации на полупроводниковом элементе. Экспериментальные результаты показывают, что у полупроводниковых элементов, изготовленных с помощью синтеринга, изгиб полупроводникового элемента в два раза меньше по сравнению с результатами применения технологии сплавления.

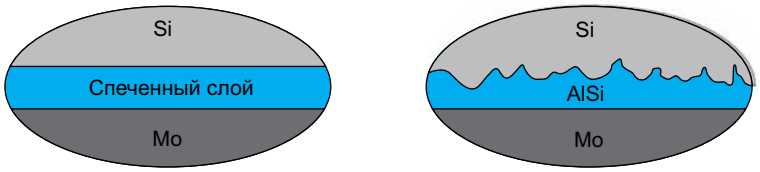

Рис. 1. **Отсутствие частичного растворения поверхностных слоев кремния со стороны анода**

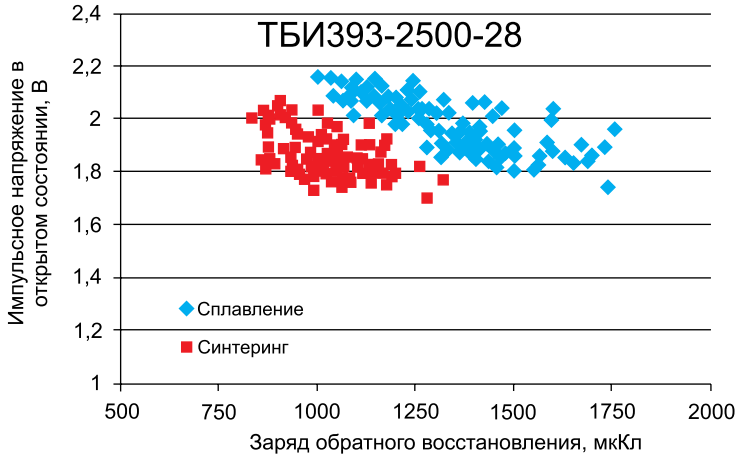

Рис. 2. **Соотношение характеристик U_{TM}/Q_{rr} для тиристоров TFI393-2500-28**

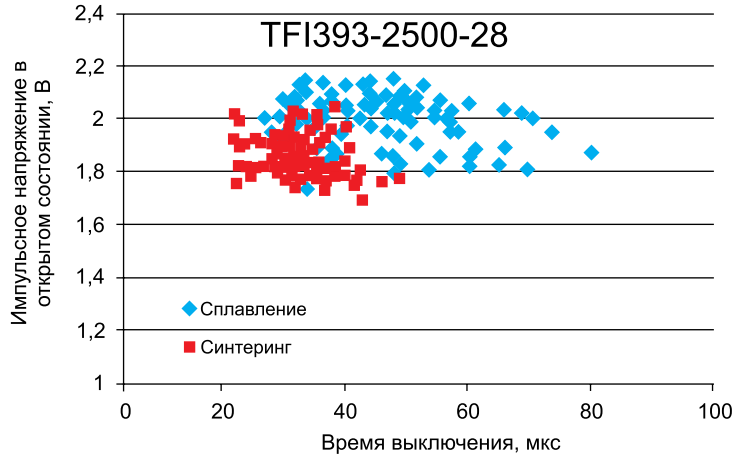

Рис. 3. **Соотношение характеристик U_{TM}/t_q для тиристоров TFI393-2500-28**

УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ТИРИСТОРОВ

Улучшение характеристик быстродействующих тиристоров показано на примере тиристоров TFI393-2500-28 (средний ток 2500 А, повторяющиеся прямое и обратное напряжение – 2800 В), у которых диаметр кремниевого элемента равен 100 мм. Эти тиристоры изготавливаются на кремниевых пластинах с удельным сопротивлением 120 Ом·см и толщиной 580 мкм. Были изготовлены по две партии тиристоров каждого типа, отличающиеся методом соединения кремниевого кристалла и молибденового термокомпенсатора.

Полученные соотношения основных характеристик тиристоров (падение напряжения во включенном состоянии – U_{TM}, время выключения – t_q, заряд обратного восстановления – Q_{rr}) приведены на рисунках 2–3.

Из рисунков видно, что тиристоры, изготовленные с использованием синтеринга, имеют лучшие соотношения U_{TM}/t_q и U_{TM}/Q_{rr}. Отсутствие проплавления анодного эмиттера положительно сказывается на распределении харак-

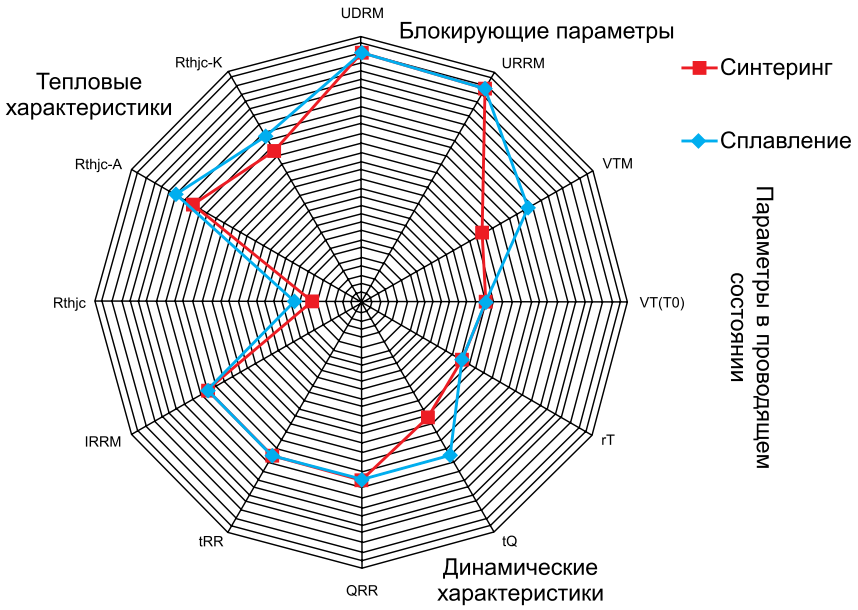

Рис. 4. **Соотношение основных характеристик для тиристоров TFI393-2500-28**

теристик по площади тиристорного элемента.

Таким образом, технология синтеринга позволяет создавать мощные быстродействующие тиристоры с лучшими характеристиками (см. рис. 4).

ВЫВОДЫ

Опыт применения технологии низкотемпературного спекания в производстве мощных однокристальных тиристоров и диодов доказывает возможность улучшить характеристики быстрых тиристоров и диодов. Для быстродействующих тиристоров с диаметром кремниевого кристалла 100 мм применение этой технологии позволяет уменьшить тепловое сопротивление, время выключения и заряд обратного восстановления, а также уменьшить падение напряжения во включенном состоянии, увеличить действующий ток и ударный ток в открытом состоянии.

ЛИТЕРАТУРА

1. *H. Schwarzbauer. Novel Large Area Joining Technique for Improved Power Device Performance. IEEE Transactions on Industrial Applications. 27 (1). 1991.*
2. *A. Chernikov, A. Stavtsev, A. Surma. Features of wafer – Mo Joining by Sintering of Silver Paste for Large Area Silicon Devices. Proc. EPE'2013. Lille. 2013.*
3. *U. Scheuermann, P. Wiedl. Low Temperature Joining Technology – A High Reliability Alternative to Solder Contacts. Workshop on Metal Ceramic Composites for Functional Application. Vienna. 1997.*
4. *C. Göbl, P. Beckedahl, H. Braml. Low Temperature Sinter Technology Die Attachment for Automotive Power Electronic Applications. Proc. Automotive Power Electronics. Paris. 2006.*
5. *Dmitriy Titushkin, Alexander Pisarev, Alexey Suma. Advantages of High Power Fast Thyristors and Diodes Produced by Means of Low Temperature Sintering of Silver Paste. PCIM Europe 2015 Conference. 2015.*