

Бескорпусные сварочные диоды

с повышенной стойкостью к электротермоциклированию

Александр Писарев

a.pisarev@proton-electrotex.com

Сергей Матюхин

inbox@proton-electrotex.com

Компания «Протон-Электротекс» расширяет номенклатуру сварочных диодов в таблеточном исполнении (рис. 1). Первым подобным устройством, выпущенным компанией, был прибор Д053-7100 с блокирующим напряжением до 400 В при температуре +170 °С.



Рис. 1. Сварочные диоды в таблеточном исполнении, выпускаемые ЗАО «Протон-Электротекс»

Данные изделия применяются в основном в машинах контактной сварки. В настоящее время требуются диоды, способные пропускать большие токи, чтобы была возможность сократить число параллельно включенных приборов. Для этих целей был разработан Д063-11500 с блокирующим напряжением до 600 В при температуре +180 °С. Основные характеристики сварочных диодов в таблеточном исполнении, выпускаемых компанией, представлены в таблице 1.

Особенностью работы диодов в сварочных машинах являются краткосрочные циклы пропуска импульсов тока, приводящих к разогреву полупроводниковой структуры, и затем дальнейшее ее охлаждение, связанное с ограничениями на время непрерывной работы сварочных машин (режим «нагрев – охлаждение»). В результате приборы подвергаются циклическому термомеханическому

стрессу. Определяющими параметрами являются пиковый ток, время работы и время отдыха. Все это диктует жесткие требования к статическим и динамическим характеристикам приборов.

Вследствие неравномерного распределения усилия сжатия и неоднородностей металлизации контактных поверхностей могут возникать локальные проплавы полупроводникового элемента. Один из примеров такого дефекта показан на рис. 2.



Рис. 2. Локальные проплавы полупроводникового элемента

Совершенствование конструкции сварочных диодов было необходимо для дальнейшего развития по следующим направлениям:

- увеличение среднего прямого тока, протекающего через прибор;
- повышение устойчивости к электротермоциклированию;
- уменьшение статических потерь.

Таблица 1. Основные характеристики сварочных диодов

Параметр	Д053-7100	Д063-11500
Максимальный диаметр корпуса, мм	59,5	76
Диаметр контактных поверхностей корпуса, мм	44,4	57
Высота корпуса, мм	8,5	8
Повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} при T_{max} , В	400	600
Средний прямой ток I_{AV} , А	7100 [$T_c = +84,5$ °С]	11500 [$T_c = +94$ °С]
Максимальное пороговое напряжение U_{TO} при T_{max} , В	0,7	0,74
Динамическое сопротивление r_T при T_{max} , мОм	0,029	0,018
Импульсное прямое напряжение U_{FM} при $T_j = +25$ °С, В	1,05 [$I_{FM} = 5000$ А]	0,88 [$I_{FM} = 6300$ А]
Тепловое сопротивление р-п-переход-корпус R_{th-jc} , °С/Вт	0,010	0,006
Температура р-п-перехода T_{jmax} , °С	+170	+180
Масса, г	140	220



Рис. 3. Бескорпусные сварочные диоды, разработанные ЗАО «Протон-Электротекс»

Эти задачи успешно решены в принципиально новых приборах «Протон-Электротекс» — бескорпусных сварочных диодах Д056-9500 и Д066-12500. Их достоинства:

- Отсутствие керамического корпуса позволяет оптимизировать массо-габаритные характеристики.
- Из-за сокращения числа контактирующих поверхностей уменьшено значение теплового сопротивления, что позволяет этим приборам пропускать большие токи даже при существенных перепадах температуры.

Сварочные диоды должны выдерживать до нескольких миллионов циклов сварки. В целях обеспечения повышенной стойкости к электротермоциклированию сотрудниками компании ведется освоение перспективной технологии низкотемпературного спекания на основе серебряной пасты.

По сравнению со стандартным процессом сплавления технология низкотемпературного спекания дает ряд важных преимуществ:

- сокращение дефектов в кремниевой пластине;

Таблица 2. Основные характеристики бескорпусных сварочных диодов

Параметр	Д056-9500	Д066-12500
Максимальный диаметр прибора, мм	56	65
Диаметр катода, мм	50	58
Высота корпуса, мм	5	5
Повторяющееся импульсное обратное напряжение U_{RRM} при T_{jmax} , В	600	600
Средний прямой ток I_{TAV} , А	9500 [$T_c = +84^\circ C$]	12500 [$T_c = +90^\circ C$]
Максимальное пороговое напряжение U_{TO} при T_{jmax} , В	0,7	0,7
Импульсное прямое напряжение U_{FM} при $T_j = +25^\circ C$, В	1,05 [$I_{FM} = 6300 A$]	0,95 [$I_{FM} = 6300 A$]
Динамическое сопротивление r_T при T_{jmax} , мОм	0,040	0,027
Тепловое сопротивление р-п-переход-корпус R_{thj-c} , $^\circ C/Wt$	0,0062	0,0047
Температура р-п-перехода T_{jmax} , $^\circ C$	+180	+180
Масса, г	110	155

- снижение механических напряжений в области шва.

Новый технологический процесс позволяет соединить кремниевые пластины с термокомпенсатором посредством спекания под высоким давлением порошка из наночастиц серебра. Хорошая теплопроводность и коэффициент теплового расширения данного материала делают его пригодным для соединения кремниевых пластин с термокомпенсатором. Для обеспечения оптимальных режимов применяется гидравлический пресс, позволяющий регулировать температуру и усилие сжатия. Кроме того, для уменьшения значений электрического и теплового сопротивлений, а также для улучшения механической стойкости контактных поверхностей производится напыление дополнительных слоев на поверхности анода и катода. Все это позволяет существенно улучшить характеристики сварочных диодов, технический уровень которых соответствует самым жестким современным требованиям к данной группе приборов (рис. 3).

Основные характеристики бескорпусных сварочных диодов представлены в таблице 2.

В процессе проектирования новых сварочных диодов, чтобы выяснить, как отраз-

ится изменение технологии легирования пластины на распределении примесных атомов и характеристиках самих устройств, были рассчитаны профили легирования и некоторые характеристики приборов, изготовленных по следующим технологиям:

- Стандартная технология: исходная пластина легируется фосфором, а затем бором.
- Измененная технология (опытный образец 2): исходная пластина сначала легируется бором и алюминием, затем загоняется фосфор, после чего осуществляется одновременная разгонка бора, алюминия и фосфора в течение 24, 32 и 48 ч (2а, 2б, 2с на рис. 4 соответственно).

Распределение примесных атомов в полупроводниковой структуре сварочных диодов, изготовленных по стандартной технологии, а также в опытном образце 2 полупроводниковой структуры, изготовленного по измененной технологии, показано на рис. 4. Исходному уровню легирования *n*-кремния соответствует голубая пунктирная линия.

ВАХ приборов, изготовленных по стандартной и измененной технологиям, рассчитанные при помощи программы Techdiod, представлены на рис. 5. Оценочные значения

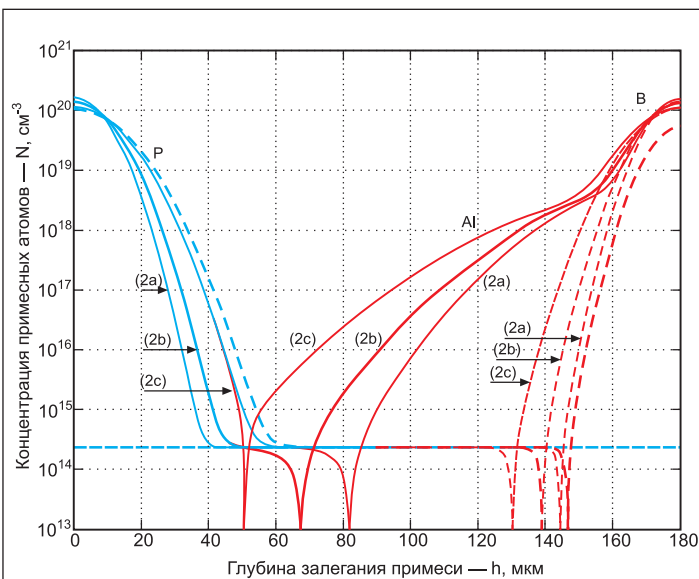


Рис. 4. Распределение примесных атомов фосфора (синие кривые), бора и алюминия (красные кривые) по полупроводниковой структуре сварочных диодов, изготовленных по стандартной технологии (жирные пунктирные кривые), и в опытном образце 2, изготовленном с использованием одновременной разгонки бора, алюминия и фосфора

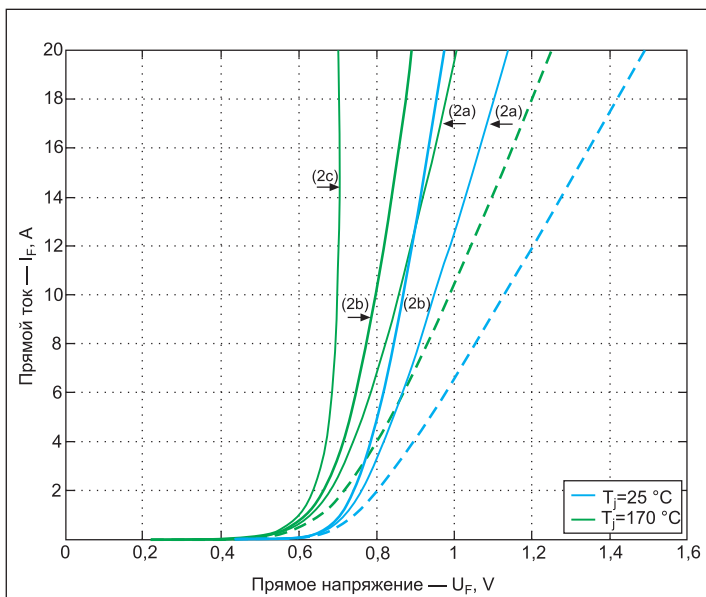


Рис. 5. ВАХ сварочного диода, изготовленного по стандартной технологии (жирные пунктирные кривые), и опытного образца 2, изготовленного с использованием одновременной разгонки бора, алюминия и фосфора

некоторых других характеристик этих приборов приведены в таблице 3.

Дополнительное легирование полупроводниковой структуры сварочных диодов алюминием приводит к уменьшению значений порогового напряжения U_{TO} и импульсного прямого напряжения U_{FM} , что снижает значение выделяемой мощности при работе и позволяет сварочным диодам пропускать большие токи при заданном охлаждении.

Это особенно важно при работе в импульсном режиме, когда через прибор пропускают импульсы тока, приводящие к циклическому

Таблица 3. Оценка некоторых характеристик сварочного диода, изготовленного по стандартной технологии, и опытного образца 2 этого диода *

Прибор	h_n , мкм	h_b , мкм	h_p , мкм	V_{TO} , В (+25/+170 °C)	r_T , МОм (+25/+170 °C)
Стандартный	61,44	84,95	33,61	0,758/0,705	0,037/0,028
Образец 2а	40,77	40,95	98,27	0,751/0,691	0,020/0,016
Образец 2б	46,87	20,45	112,68	0,748/0,686	0,012/0,011
Образец 2в	43,37	0	136,63	0,744/0,677	0/0,002

Примечание: * h_n — толщина катодной p⁺-области; h_p — толщина анодной p⁺-области; h_b — толщина n-базы; V_{TO} — пороговое напряжение, r_T — дифференциальное сопротивление.

разогреву и охлаждению полупроводниковой структуры. Уменьшение выделяемой мощности при работе способствует снижению перепада

температур ΔT (в цикле режима «нагрев — охлаждение»), что в итоге увеличивает число возможных циклов сварки. ■