

ИСПЫТАНИЯ МНОГОКРИСТАЛЬНЫХ IGBT-МОДУЛЕЙ НА СТОЙКОСТЬ К ЦИКЛИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ СИЛОВОГО ТОКА

В. В. ВЕРЕВКИН¹, С. Л. СТРИГУНОВ¹, А. П. ПИЛИПЕНКО¹,
К. А. ВОЛОБУЕВ¹, В. А. ЛОБАНОВА²

¹АО „Протон-Электротекс“, 302040, Орёл, Россия
E-mail: verevkin.v52@gmail.com

²Орловский государственный университет им. И. С. Тургенева, 302026, Орёл, Россия

Представлены результаты экспериментального сравнения многокристалльных IGBT-модулей с различным расположением кристаллов транзисторов на DBC-подложке после ресурсных испытаний в режиме электротермоциклирования. Установлено, что топология многокристалльных модулей в части расположения кристаллов транзисторов влияет на степень равномерности распределения температуры между чипами. Описана разработанная для проведения испытаний установка для электротермоциклирования IGBT-модулей, основные преимущества которой — возможность точного мониторинга состояния испытуемых образцов по значениям двух термочувствительных параметров и повышенная надежность оборудования. В ходе эксперимента с помощью термопары типа К и тепловизора определено распределение температуры между параллельно включенными кристаллами макетных образцов и другими токопроводящими элементами конструкции приборов. Получены экспериментальные зависимости параметров модуля от количества циклов, позволяющие оценить степень деградации испытуемого образца до его разрушения. Экспериментально установлено, что, во-первых, значение термочувствительного параметра и, следовательно, циклоустойкость многокристалльных модулей зависят от температуры наиболее разогретого транзисторного чипа, и, во-вторых, температура отдельных участков проводных соединений в многокристалльном модуле сопоставима с температурой кристаллов и также может приводить к деградации элементов конструкции модуля вследствие термомеханических напряжений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке и проектировании многокристалльных IGBT-модулей.

Ключевые слова: силовые полупроводниковые приборы, многокристалльные IGBT-модули, ресурсные испытания, испытательное оборудование, электротермоциклирование, распределение температуры в многокристалльном IGBT-модуле

Введение. Широкое распространение модулей на базе IGBT-транзисторов возродило актуальность исследований стойкости силовых полупроводниковых приборов (СПП) паяной конструкции к циклическому воздействию силового тока. Для биполярных СПП эта проблема всесторонне исследована в 70-е годы прошлого века [1]. В многочисленных исследованиях циклоустойкости IGBT-модулей [2—4] недостаточно полно освещаются два аспекта проблемы: оборудование для испытаний в режиме электротермоциклирования (ЭТЦ) и влияние конструкции и топологии многокристалльных модулей на их стойкость к длительному воздействию циклов „нагрев силовым током — остывание“. Кроме того, совершенствование конструкции и применение современных материалов обусловили необходимость уточнения механизмов отказов модулей в циклических режимах работы.

Аппаратура для электротермоциклирования силовых IGBT-модулей. Как правило, испытательный стенд для ЭТЦ представляет собой источник тока либо сетевого [1, 5, 6], либо инверторного типа, нагрузкой которого являются испытуемые полупроводниковые приборы,

включенные последовательно. Длительность воздействия силового тока, осуществляющего нагрев испытуемых образцов, и длительность паузы, во время которой происходит их охлаждение до температуры окружающей среды, задаются регулятором источника тока. Для обеспечения минимального времени установления стационарного теплового состояния испытуемые образцы размещаются на жидкостных (водяных) охладителях. При всей простоте реализации испытательный стенд, созданный на базе регулятора тока, который работает в прерывистом режиме, имеет ряд недостатков. Во-первых, работающий в циклическом режиме регулятор тока также вырабатывает и свой ресурс, поэтому его приходится выполнять с большим запасом по нагрузочной способности. Во-вторых, индуктивный характер выходного импеданса регулятора тока обуславливает значительную длительность спада импульса силового тока — порядка 10 мс и более. Большая длительность интервала времени — от момента, соответствующего максимальному значению силового тока, до момента прекращения действия тока — приводит к значительной ошибке определения максимальной температуры перегрева по измеряемому термочувствительному параметру. Ошибка обусловлена уменьшением температуры перегрева полупроводниковой структуры испытуемого образца на этом интервале времени. В-третьих, при отказе испытуемого образца отключение регулятора тока происходит с определенной задержкой, что приводит к расширению разрушенной области полупроводниковой структуры и затруднениям при оценке механизма отказа.

Функциональная схема оборудования, которое было разработано для проведения испытаний IGBT-модулей, представлена на рис. 1.

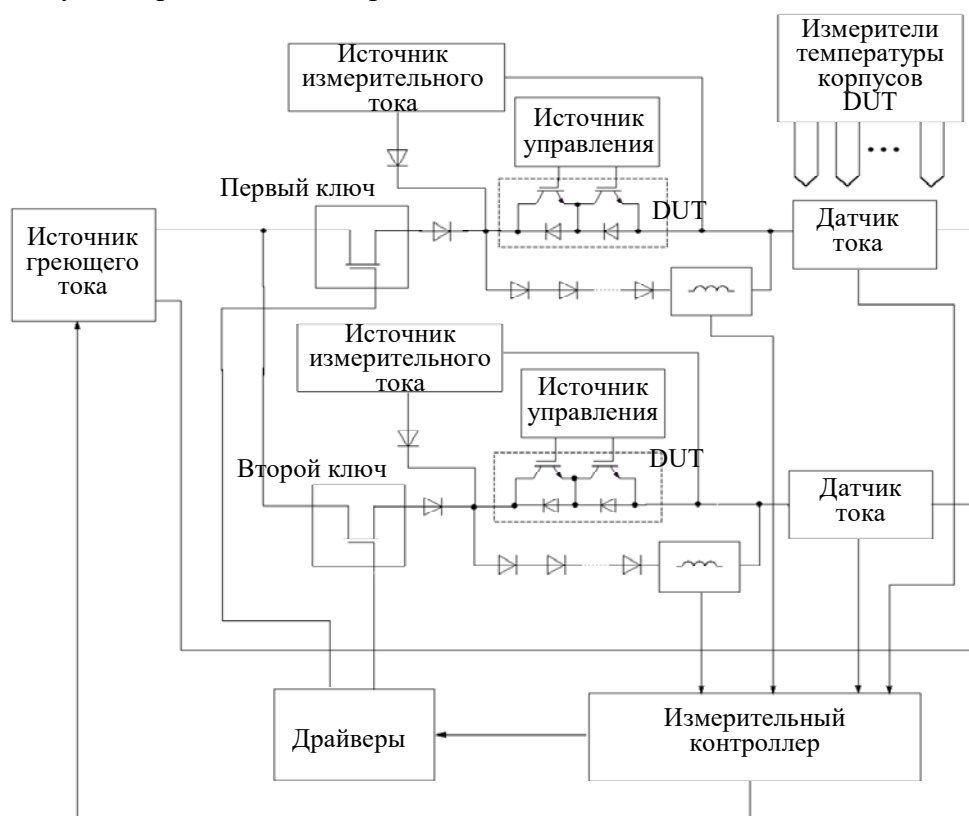


Рис. 1

Принципиальным отличием рассматриваемой установки электротермоциклирования является использование стандартного низковольтного источника постоянного тока, обеспечивающего хорошую стабилизацию тока в широком диапазоне нагрузок. Формирование импульсов силового тока заданной длительности осуществляется двумя ключами, последовательно с которыми установлены испытуемые модули (DUT). Поочередная работа ключей

обеспечивает непрерывность выходного тока источника, следовательно, отсутствие коммутационных перенапряжений и протекание через испытываемые модули импульсов силового тока практически прямоугольной формы и длительностью, регулируемой от 1 до 120 с, а также скважностью, равной 2. Каждый ключ выполнен на транзисторах MOSFET типа IRFPS3810, включенных параллельно по 30 шт. и установленных на жидкостный охладитель. Низкое сопротивление сток-исток и эффективное охлаждение обуславливают минимальный перегрев транзисторов ключа (не более 20 °С) при протекании суммарного тока до 1000—1200 А и, следовательно, высокую надежность установки. Источники управления испытываемыми модулями во время испытаний удерживают транзисторы модулей постоянно открытыми. В ходе испытаний осуществляется мониторинг таких параметров испытываемых модулей, как амплитуда силового тока; мощность, рассеиваемая на каждом испытываемом модуле; температура корпуса модулей; напряжение коллектор-эмиттер при протекании силового тока; значения термочувствительных параметров (ТЧП) в два момента времени. В качестве ТЧП используется установленное стандартами [7] значение напряжения коллектор-эмиттер при протекании измерительного коллекторного тока, который регулируется в диапазоне от 0,3 до 3 А. Первое значение ТЧП измеряется непосредственно за задним фронтом импульса силового тока и соответствует максимальной температуре перегрева полупроводниковой структуры испытываемого модуля. За счет малой длительности заднего фронта импульса силового тока измерение ТЧП может производиться через 30—50 мкс после прекращения действия силового тока, что обеспечивает минимальную ошибку определения температуры чипов модуля, обусловленную их охлаждением. Второе значение ТЧП измеряется перед началом формирования следующего импульса силового тока и соответствует минимальной температуре полупроводниковой структуры.

Вторая особенность разработанной установки — построение схемы защиты испытываемого модуля от разрушения при его отказе. Отказ элемента модуля, как правило, сопровождается скачком напряжения коллектор-эмиттер, обусловленным частичной или полной потерей контакта между алюминиевыми проводниками и металлизацией транзисторного чипа [8]. Для обеспечения непрерывности тока и соответственно отсутствия перенапряжений параллельно каждому испытываемому модулю установлено восемь силовых диодов, соединенных последовательно и выполняющих функцию низковольтного мощного стабилитрона на напряжение порядка 5 В. При обрыве внутренней цепи испытываемого модуля или потере им управляемости при разрушении чипа напряжение коллектор-эмиттер на нем увеличивается, и силовой ток протекает через цепочку диодов и включенный в эту цепь бесконтактный датчик тока. Сигнал с выхода датчика тока обрабатывается управляющим контроллером, который формирует сигнал на отключение источника силового тока.

Установка обеспечивает одновременные испытания восьми образцов модулей (по четыре соединенные последовательно образца в каждой ветви) с диапазоном регулирования силового тока от 100 до 1200 А. Диапазон длительности импульсов силового тока соответствует современным требованиям проведения испытаний в режимах „коротких циклов“ длительностью 1—3 с и „длинных циклов“ длительностью 20—50 с.

Экспериментальное сравнение макетов силовых IGBT-модулей с различной топологией. В качестве объектов для оценки влияния конструкции и топологии модулей на их стойкость к циклическому воздействию силового тока использовались макеты модулей, выполненные по схеме полумоста, каждый элемент которого был собран на одной DBC-подложке и состоял из трех включенных параллельно чипов IGBT и трех чипов обратно-параллельно включенных диодов. Модули такой конструкции выпускаются большинством производителей силовых полупроводниковых приборов. Макеты были изготовлены на чипах, имеющих напряжение коллектор-эмиттер 1200 В и предельный ток 200 А. Исследуемые образцы были выполнены по двум вариантам топологии, влияние которой на распределение

тока между чипами рассмотрено в работе [9]. Для каждого варианта топологии проводились измерения показателя, характеризующего распределение температуры по элементам конструкции, включая не только температуру чипов, но и температуру проводников, через которые течет суммарный ток модуля. Для регистрации стационарного распределения температуры между элементами конструкции модуля и исключения влияния инерционности измерителя температуры время между началом протекания тока и моментом измерений составляло не менее 60 с.

На рис. 2 представлены два варианта топологии исследуемых макетов: *а* — с „шахматным“ расположением транзисторных чипов, *б* — с подключением ближнего к эквипотенциальной точке транзисторного чипа через проводники диода. В точках 1—4 измерялась температура элементов конструкции двумя способами: с помощью термопары типа „К“, контактирующей с исследуемым элементом конструкции через слой теплопроводящей пасты, и с помощью тепловизора типа HotFind S80VIS. Полученные с помощью тепловизора фотографии теплового поля образцов с различным расположением чипов приведены на рис. 3 (слева — по топологии рис. 2, *а*, справа — по топологии рис. 2, *б*).

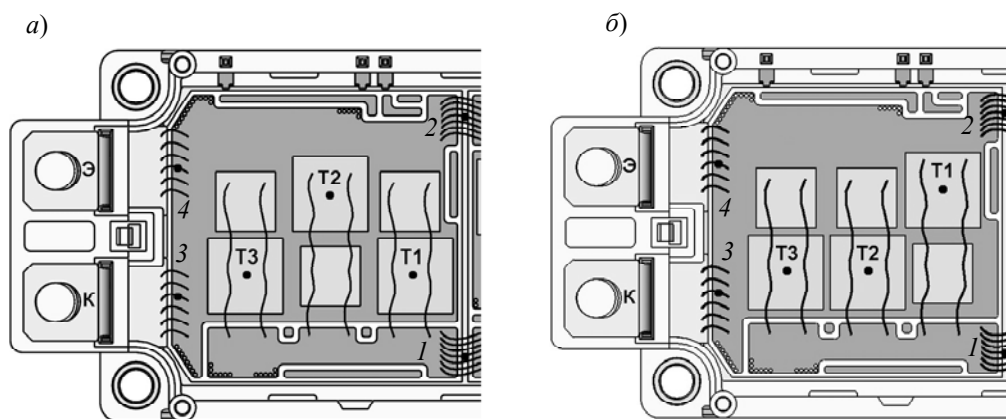


Рис. 2



Рис. 3

Результаты измерения различными способами температуры транзисторных чипов и температуры перегрева проводников при протекании силового тока 350 А представлены в таблице. Температура, измеренная с помощью тепловизора, несколько ниже, чем при измерении термопарой. Вероятно, это обусловлено отводом тепла излучением от поверхности испытуемых образцов, которая покрывалась черной краской для исключения отражений при измерении тепловизором.

Ток, А	Точка	T , °С, топология 2, а		T , °С, топология 2, б	
		Термопара	Тепловизор	Термопара	Тепловизор
350	T1	169	161	157	150
	T2	159	150	160	145
	T3	150	139	146	136
	1	123	119	129	114
	2	125	124	135	118
	3	85	—	86	—
	4	89	—	86	—
δT , %		12	14,6	9,1	9,7
ТЧП, мВ		279		248	
Температура по ТЧП, °С		172		163	

Для транзисторов размах температуры рассчитывался следующим образом:

$$\delta T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{(T_1 + T_2 + T_3) / 3}.$$

Как и следовало ожидать, согласно результатам [9], вне зависимости от метода измерений температуры величина δT составляет не менее 10 °С, причем в варианте топологии, соответствующей рис. 2, б, она значительно меньше. Следует отметить, что температура соединительных проводников сопоставима с температурой перегрева чипов модуля и ее влияние на возникновение термомеханических напряжений в конструкции модуля при его работе в циклических режимах необходимо учитывать.

При определении температуры транзисторных чипов по значению ТЧП в многоэлементном модуле возникает вопрос, какая именно температура определяется: средняя по всем чипам или температура максимально нагретого чипа [10]. Для оценки точности определения температуры перегрева чипов по значению ТЧП оба образца предварительно градуировались: образцы помещались в камеру тепла, где проводилось измерение падения напряжения коллектор-эмиттер этих образцов при токе коллектора в 1 А. Измерение ТЧП (градуировка) производилось при разной температуре в диапазоне 90—150 °С. Во время испытаний на стойкость к ЭТЦ значения ТЧП измерялись с помощью вышеописанной установки и составляли в установившемся режиме (после нагрева в течение 60 с) 279 мВ для образца с топологией 2, а и 248 мВ для образца с топологией 2, б. С учетом результатов градуировки температура перегрева, определенная по ТЧП, равна 172 и 163 °С соответственно. Сопоставление с результатами измерений, приведенными в таблице, показывает, что температура транзисторов, определяемая по ТЧП, близка к фактической температуре наиболее нагретого чипа, причем отклонение результатов составляет не более 5 %. Более того, можно предположить, что температура перегрева по ТЧП определяется более достоверно, чем с помощью термопары, так как отсутствует составляющая погрешности, обусловленная качеством теплового контакта между измеряемой поверхностью и термопарой.

Методика испытаний. Исследование стойкости модулей с различной топологией к циклическому воздействию токовой нагрузки проводилось в режиме „коротких циклов“ при воздействии на образцы силового тока амплитудой 400 А и при водяном охлаждении. Длительность импульсов греющего тока и длительность периода охлаждения были равны 3 с. Перепад температуры ΔT чипов в моменты времени, соответствующие T_{\max} и T_{\min} , измерялся по термочувствительному параметру и составлял в начале испытаний примерно 82 °С. При такой длительности нагрева и охлаждения распределение температуры по элементам конструкции не достигает стационарного состояния, следовательно, перепад температуры, который обеспечивается за один цикл в каждом элементе конструкции модуля, уменьшается от чипов

к основанию модуля. В описанном режиме процессы деградации развиваются, прежде всего, в тех элементах конструкции, в которых максимален перепад температуры за один цикл, а именно в паяном шве между чипом и DBC-подложкой и/или в сварных соединениях алюминиевых проводников с металлизацией транзисторных чипов.

Для оценки деградации параметров модулей во время испытаний для каждого образца контролировались значения напряжения насыщения коллектор-эмиттер U_{cesat} при протекании силового тока и перепад температуры ΔT транзисторных чипов, определяемый по измеренным значениям ТЧП. Типичные зависимости U_{cesat} и ΔT от количества циклов N приведены на рис. 4. Увеличение значений U_{cesat} и ΔT по достижении 150 тыс. циклов свидетельствует о деградации элементов конструкции модуля. При этом увеличение значений U_{cesat} связано, в первую очередь, с деградацией сварных соединений алюминиевых проводников, а увеличение ΔT , т.е. температуры перегрева транзисторной структуры при том же уровне греющего тока, обусловлено как деградацией сварных точек, приводящей к увеличению рассеиваемой мощности, так и деградацией паяного шва, приводящей к ухудшению теплоотвода от транзисторного чипа [11].

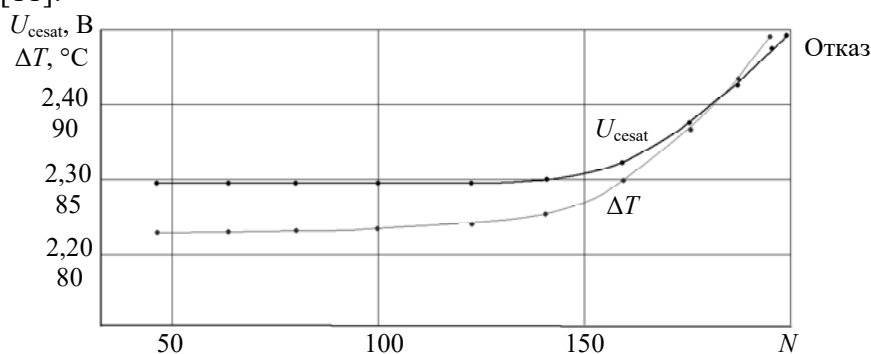


Рис. 4

На рис. 5 приведены типичные результаты ультразвукового сканирования образцов после проведения испытаний в режиме „коротких циклов“ с различным расположением чипов на DBC-подложке: шахматным (вверху) и с подключением ближнего к эквипотенциальной точке транзисторного чипа через проводники диода (внизу).

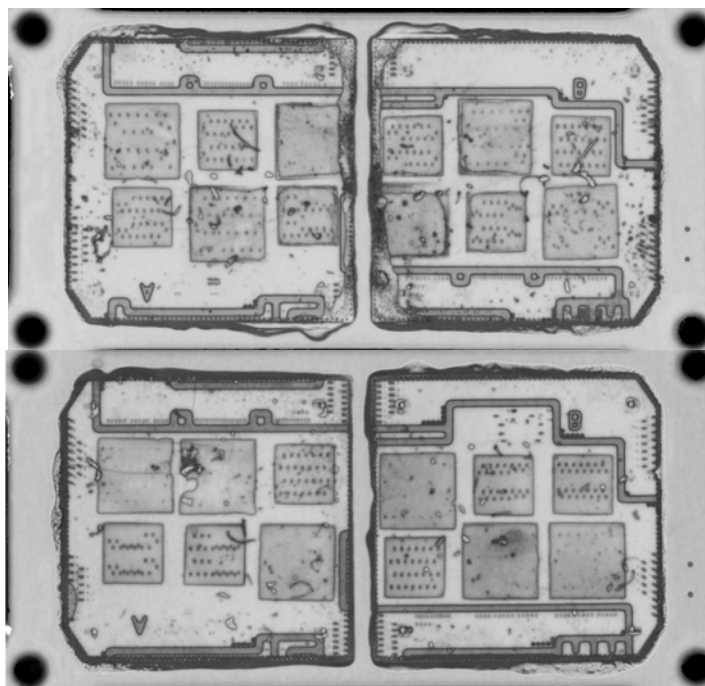


Рис. 5

На изображениях наблюдаются различные дефекты, образованные в результате действия термомеханических напряжений: разрушения сварных соединений алюминиевых проводников с металлизацией транзисторных чипов, деградация паяных швов между транзисторными чипами и подложкой, деламинация ДВС-подложки. Следует обратить внимание на нетипичную с точки зрения общепринятых представлений деламинацию ДВС-подложки не на периферии, а в центральной части модуля. Предположительно это объясняется возникновением в этой области механических напряжений, обусловленных значительным нагревом соединительных проводников.

Заключение. В результате проведенного исследования:

— предложена установка для испытаний IGBT-модулей, основные преимущества которой — возможность точного мониторинга параметров испытываемых образцов и повышенная надежность оборудования;

— показано, что значение термочувствительного параметра в многокристалльных модулях соответствует температуре наиболее разогретого чипа;

— экспериментально установлено, что температура перегрева отдельных участков проводных соединений в многокристалльном модуле сопоставима с температурой перегрева кристаллов и также может приводить к деградации элементов конструкции модуля вследствие термомеханических напряжений;

— показано влияние топологии многокристалльных модулей на степень равномерности распределения температуры между чипами;

— получены экспериментальные зависимости параметров модуля от количества циклов, позволяющие оценить степень деградации испытываемого образца до его разрушения.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и проектировании многокристалльных IGBT-модулей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бардин В. М. Надежность силовых полупроводниковых приборов. М.: Энергия, 1978. 96 с.
2. Колтаков А. Методы оценки надежности силовых модулей IGBT Semikron в предельных режимах // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 40—45.
3. Guth K., Heuck N. et al. End-of-life investigation on the .XT interconnect technology // PCIM Europe. 2015.
4. Bouarroudj M., Khatir Z. et al. Degradation behavior of 600V-200A IGBT modules under power cycling and high temperature environment conditions // Proc. of the 18th European Symp. on Reliability of Electron Devices: Failure Physics and Analysis. Bordeaux, France, 2007. P. 1719—1724.
5. Бардин В. М. и др. Аппаратура и методы контроля параметров силовых полупроводниковых вентиляей. М.: Энергия, 1971.
6. Лытаев Р. А., Севрюгов А. В. Типовые испытания высоковольтных тиристорных вентиляей электропередач и вставок постоянного тока // Электричество. 1984. № 7. С. 16—20.
7. International Standard IEC 60747-9, Semiconductor devices — Discrete devices — Part 9: IGBTs. Edition 2.0, 6.3.13.1
8. Özkol E., Hartmann S., Pâques G. Improving the power cycling performance of the emitter contact of IGBT modules: Implementation and evaluation of stitch bond layouts // Microelectronics Reliability. 2014. Vol. 54, N 12. P. 2796—2800. DOI: 10.1016/j.microrel.2014.08.015.
9. Веревкин В. В., Стригунов С. Л., Пилипенко А. П., Волобуев К. А. Влияние топологии многокристалльных IGBT-модулей на распределение тока между транзисторными чипами в статических режимах работы // Вестн. МЭИ. 2019. № 6. С. 101—105.
10. Винтрих А., Бекедаль П. Нормирование теплового сопротивления IGBT: базовые принципы и некоторые особенности // Силовая электроника. 2017. № 2. С. 16—23.

11. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. Packaging and reliability of power devices // Semiconductor Power Devices. Springer, Berlin-Heidelberg, 2010. P. 343—418.

Сведения об авторах

- Владимир Викторович Веревкин** — канд. техн. наук; АО „Протон-Электротекс“, отдел испытаний полупроводниковых приборов; начальник отдела; E-mail: verevkin.v52@gmail.com
- Станислав Леонидович Стригунов** — АО „Протон-Электротекс“, отдел испытаний полупроводниковых приборов; инженер-конструктор; E-mail: st.strigunov@proton-electrotex.com
- Анастасия Петровна Пилипенко** — студентка; АО „Протон-Электротекс“, отдел разработки IGBT-приборов; инженер-технолог; E-mail: a.pilipenko@proton-electrotex.com
- Кирилл Андрианович Волобуев** — АО „Протон-Электротекс“, отдел разработки IGBT-приборов; начальник отдела; E-mail: k.volobuev@proton-electrotex.com
- Валентина Андреевна Лобанова** — канд. техн. наук, доцент; ОГУ им. И. С. Тургенева, кафедра электроники, радиотехники и систем связи; профессор; E-mail: lvanata@yandex.ru

Поступила в редакцию
06.02.2020 г.

Ссылка для цитирования: Веревкин В. В., Стригунов С. Л., Пилипенко А. П., Волобуев К. А., Лобанова В. А. Испытания многокристалльных IGBT-модулей на стойкость к циклическому воздействию силового тока // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 451—459.

TESTS OF MULTI-CHIP IGBT-MODULES FOR RESISTANCE TO CYCLIC POWER CURRENT

V. V. Verevkin¹, S. L. Strigunov¹, A. P. Pilipenko¹,
K. A. Volobuev¹, V. A. Lobanova²

¹ Proton-Electroteks JSC, 302040, Orel, Russia
E-mail: verevkin.v52@gmail.com

² I.S. Turgenev Orel State University, 302026, Orel, Russia

Results of experimental study of multi-chip IGBT-modules with different position of transistors on DBC are presented. A system for power cycling tests of IGBT-modules is developed. Experiments carried out to compare the multi-chip IGBT modules with different position of transistors on DBC after power tests in electro thermal cyclic mode demonstrate that the topology of multi-chip modules (the position of transistors on DBC) has an effect on the temperature distribution between the chips. The main features of the test setup include accurate monitoring of the sample status using two temperature sensitive parameters and high reliability of the test equipment. During the test with a type K thermocouple and the thermal imager, the temperature distribution between the parallel connected chips of the tested samples and other conductive elements of the samples, including copper wire bond connections, were calculated. The received data allowed to obtain experimental dependency curves for the electrical parameters of the tested modules vs the number of cycles to failure. This can help to estimate the degradation degree of a sample before its failure. The temperature sensitive parameter value and, consequently, number of cycles to failure of a multi-chip module is found to depend on the hottest chip temperature. It is also found that the temperature of some wire bond connections in the multi-chip module can be comparable to the chip temperature and can cause the module constructive elements degradation due to the thermomechanical stress. These results can be used in development and design of the multi-chip IGBT-modules.

Keywords: semiconductor power modules, multi-chip IGBT-modules, reliability tests, testing equipment, power cycling, temperature distribution in multi-chip IGBT-module

REFERENCES

1. Bardin V.M. *Nadezhnost' silovyykh poluprovodnikovyykh priborov* (The Reliability of Power Semiconductor Devices), Moscow, 1978, 96 p. (in Russ.)
2. Kolpakov A. *Silovaya elektronika*, 2004, no. 1, pp. 40—45. (in Russ.)
3. Guth K., Heuck N. et al. *PCIM Europe*, 2015.
4. Bouarroudj M., Khatir Z. et al. *18th European Symposium on Reliability of Electron Devices: Failure Physics and Analysis*, Bordeaux, France, 2007, pp. 1719—1724.
5. Bardin V.M. et al. *Apparatura i metody kontrolya parametrov silovyykh poluprovodnikovyykh ventiley*

- (Equipment and Methods for Controlling Parameters of Power Semiconductor Valves), Moscow, 1971. (in Russ.)
6. Lytayev R.A., Sevryugov A.V. *Elektrichestvo*, 1984, no. 7, pp. 16–20. (in Russ.)
 7. *International Standard IEC 60747-9, Semiconductor devices – Discrete devices – Part 9: IGBTs – Edition 2.0, 6.3.13.1*
 8. Özkol E., Hartmann S., Pâques G. *Microelectronics Reliability*, 2014, no. 12(54), pp. 2796–2800, DOI: 10.1016/j.microrel.2014.08.015.
 9. Verevkin V.V., Strigunov S.L., Pilipenko A.P., Volobuev K.A. *Vestnik MEI. Bulletin of Moscow Power Engineering Institute*, 2019, no. 6, pp. 101–105. (in Russ.)
 10. Vintrikh A., Bekedal' P., Kolpakov A. *Silovaya elektronika*, 2017, no. 2, pp. 16–23. (in Russ.)
 11. Lutz J., Schlangenotto H., Scheuermann U., De Doncker R. *Semiconductor Power Devices*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010, pp. 343–418.

Data on authors

- Vladimir V. Verevkin** — PhD; Proton-Electroteks JSC, Department of Semiconductor Instruments Testing; Head of the Department; E-mail: verevkin.v52@gmail.com
- Stanislav L. Strigunov** — Proton-Electroteks JSC, Department of Semiconductor Instruments Testing; Engineer-Designer; E-mail: st.strigunov@proton-electrotex.com
- Anastasia P. Pilipenko** — Student; Proton-Electroteks JSC, Department of IGBT-Instruments Design; Engineer-Technologist; E-mail: a.pilipenko@proton-electrotex.com
- Kirill A. Volobuev** — Proton-Electroteks JSC, Department of IGBT-Instruments Design; Head of the Department; E-mail: k.volobuev@proton-electrotex.com
- Valentina A. Lobanova** — PhD, Associate Professor; I.S. Turgenev Orel State University, Department of Electronics, Radio Technique, and Communication Systems; Professor; E-mail: Ivanata@yandex.ru

For citation: Verevkin V. V., Strigunov S. L., Pilipenko A. P., Volobuev K. A., Lobanova V. A. Tests of multi-chip IGBT-modules for resistance to cyclic power current. *Journal of Instrument Engineering*. 2020. Vol. 63, N 5. P. 451—459 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-5-451-459