

Методы оценки надежности силовых модулей IGBT SEMIKRON

В предельных режимах

В статье рассматриваются основные причины отказов мощных IGBT-модулей, приводятся технологические методы повышения надежности. Подробно описаны способы обеспечения высоких показателей надежности и методики испытаний, используемые SEMIKRON.

Андрей Колпаков

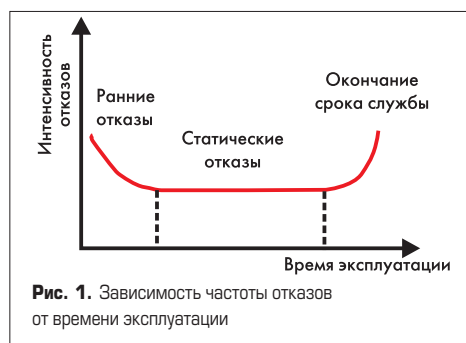
Andrey.Kolpakov@semikron.com

Прогресс в разработке интеллектуальных силовых модулей IGBT привел к созданию технологии SKiP — SEMIKRON integrated intelligent Power. В изделиях, изготовленных по этой технологии, отсутствуют паяные и сварные соединения, являющиеся главным источником отказов мощных интегральных модулей. Революционным шагом явилась разработка конструкции **pressure-contact**, при которой связи элементов конструкции модуля осуществляются за счет прижима, соединение выводов силовых кристаллов с платой драйвера выполнено с помощью пружинных контактов, а медное основание отсутствует. При этом теплоотвод является составной частью конструкции.

Технология SKiP, разработанная специалистами фирмы SEMIKRON, позволила создать интеллектуальные модули с высокими показателями надежности и долговечности, что подтверждается многочисленными испытаниями и результатами статистического анализа. Для подтверждения столь высоких показателей необходим анализ состояния модуля в момент отказа.

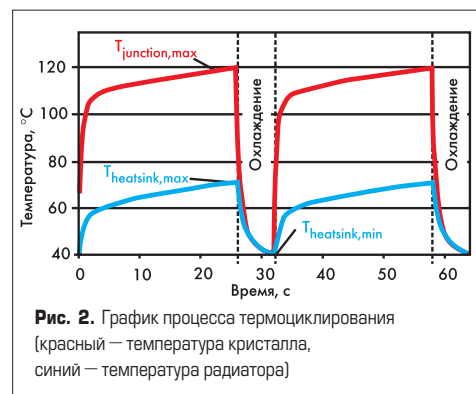
Общие положения

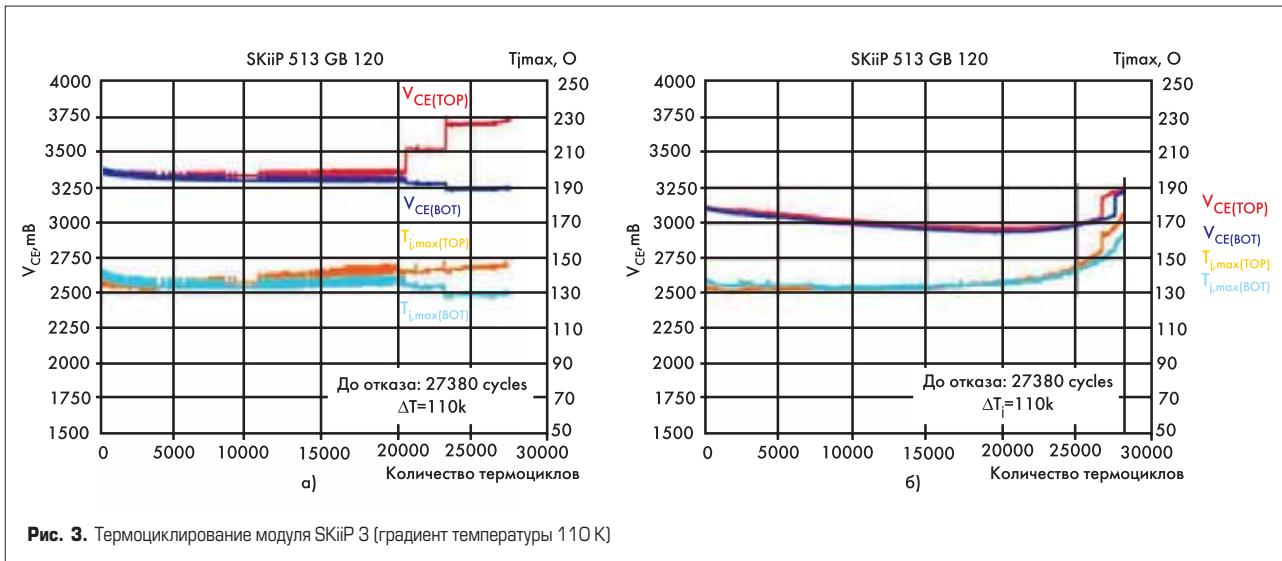
Одним из основных параметров, характеризующих надежность работы любого изделия, является интенсивность (или частота) отказов λ (рис. 1).



Эпюра, приведенная на рис. 1 и называемая кривой надежности, имеет 3 ярко выраженных участка. Первый участок, определяющий область ранних неисправностей, характеризуется спадом частоты отказов. Скорость спада зависит в основном от конструкции изделия, свойств примененных материалов и технологии изготовления. На форму кривой в данной части заметное влияние оказывают методы испытаний и контроля качества, используемые в процессе производства. Основным методом снижения количества отказов на ранней стадии эксплуатации является электротермотренировка в процессе изготовления. Данный метод широко применяется на фирме SEMIKRON при производстве интеллектуальных силовых модулей SKiP и драйверов SEMITRANS.

Статистические отказы в средней части графика имеют практически неизменную интенсивность. Данный участок, имеющий максимальную длительность — время нормальной эксплуатации изделия. И, наконец, последняя область графика с возрастающей частотой отказов соответствует окончанию срока службы изделия. Для силовых модулей IGBT этот участок характеризуется лавинообразным ростом теплового сопротивления кристаллов, разрывом электрических связей, потерей управляемости.





Ускоренные испытания силовых модулей позволяют получить данные, с помощью которых можно достаточно точно рассчитать показатели надежности изделия, определить механизмы отказа, предсказать, как будет вести себя изделие при различных условиях эксплуатации.

Многочисленные проверки показали, что основной причиной отказа мощных полупроводниковых модулей являются механические напряжения, вызванные колебаниями температуры — термоциклами. Термоцикл представляет собой нормальный рабочий режим эксплуатации изделия: это и нагрев при включении «холодного» изделия, и циклическое изменение нагрузки от минимального до максимального значения. Поэтому основным видом испытания мощных модулей на сегодняшний день является термоциклирование или периодический нагрев и охлаждение кристаллов силовых транзисторов.

Методы анализа отказа силовых модулей

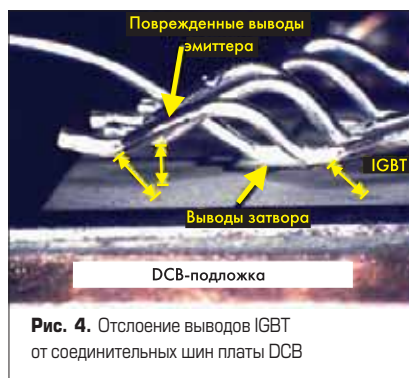
В процессе испытаний чипы транзисторов нагреваются до максимальной температуры за счет протекания постоянного тока определенной величины. После достижения предельного значения температуры ток прерывается, кристаллы быстро охлаждаются до температуры теплостока благодаря низкой теплоемкости. Далее скорость охлаждения модуля до минимальной рабочей температуры определяется тепловой постоянной времени радиатора и эффективностью охлаждающей системы. График процесса термоциклирования приведен на рис. 2.

Данный цикл многократно повторяется с периодом 30–60 с, вызывая ускоренное «старение» модуля. Короткие термоциклы с периодом 1 с и менее воздействуют только на состояние кристалла и его выводов, поэтому для оценки надежности всей конструкции модуля применяются длительные циклы. Такие испытания являются наиболее «приближенными к жизни», так как изменения, которые они вызывают, совпадают с реальными

процессами, происходящими с модулем при эксплуатации. Многократное термоциклирование в конечном итоге приводит к резкому изменению параметров или отказу модуля.

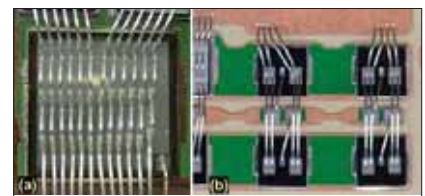
На рис. 3 приведены результаты ускоренных испытаний модуля SKiiP 3 с 14 кристаллами IGBT, соединенными параллельно. После 20000 циклов графики (рис. 3а) показывают изменение напряжения насыщения и температуры кристалла, вызванные одним из процессов, приводящих к отказу модуля, — отслоением выводов кристаллов. Этот процесс сопровождается скачкообразным ростом напряжения насыщения V_{CE} . Характер изменений на графиках (рис. 3б) несколько другой: начиная с 21500 циклов напряжение насыщения V_{CE} и температура кристалла T_j плавно возрастают в результате увеличения теплового сопротивления, вызванного разрушением паяного соединения силового чипа. Несмотря на то, что полный отказ модуля наблюдается, как и в предыдущем случае, после отслоения выводов (отмечено вертикальной чертой), в данном случае этот механизм отказа является вторичным, следующим после нарушения тепловой связи кристалла и керамической платы DCB. На рис. 4 показаны выводы эмиттера IGBT-транзистора, отошедшие от соединительных медных шин керамической подложки в результате воздействия многочисленных термоциклов.

Изменяя значение ускоряющих факторов испытаний (градиент температуры ΔT , сред-



нее значение температуры T_m , предельную температуру кристалла $T_{j,max}$), можно выбрать один из двух механизмов, преобладающих при отказе, и анализировать поведение модуля в критических ситуациях.

Непосредственное измерение таких параметров, как тепловое сопротивление R_{th} и напряжение насыщения V_{CEsat} , служащих «индикаторами отказа», в реальных модулях является достаточно сложной задачей. Основную сложность представляет измерение параметров в процессе отказа модуля, когда наступает разрушение конструкции и потеря управляемости. Для детального анализа процесса отказа могут использоваться дополнительные параллельные элементы конструкции (выводы и чипы), которые позволяют сохранять контроль над силовым кристаллом даже при его отказе. В случае силового IGBT-модуля дополнительные элементы (выводы эмиттера и чипы IGBT) могут быть установлены при изготовлении модуля, как показано на рис. 5.



Изменения, вносимые в печатную плату модуля и сам модуль, позволяющие измерять характеристики в процессе испытаний, приведены на рис. 6. Как показано на рисунке, соединение коллектора кристалла с медной шиной DCB-керамики осуществляется с помощью пайки, а выводы эмиттера и затвора подключаются к шинам посредством ультразвуковой сварки. Модификация заключается в том, что эмиттер каждого из параллельно соединенных IGBT подключается к дополнительной шине (Сенсор) через измерительный шунт с помощью дополнительных параллельных выводов. Эти выво-

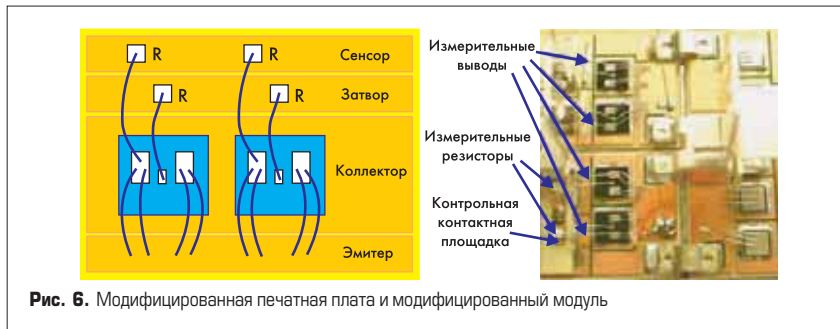


Рис. 6. Модифицированная печатная плата и модифицированный модуль

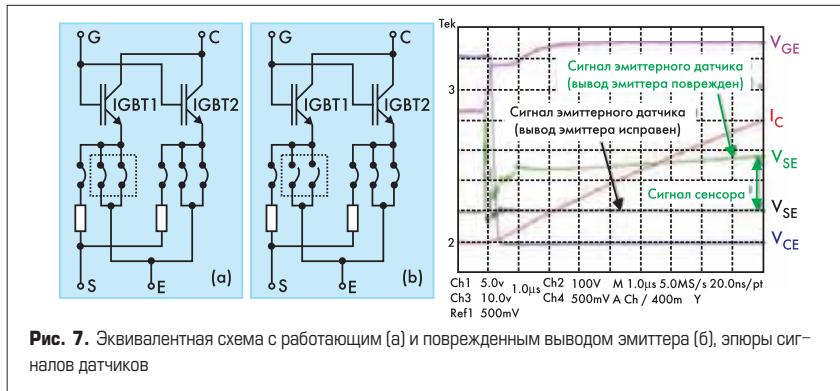


Рис. 7. Эквивалентная схема с работающим (а) и поврежденным выводом эмиттера (б), эпюры сигналов датчиков

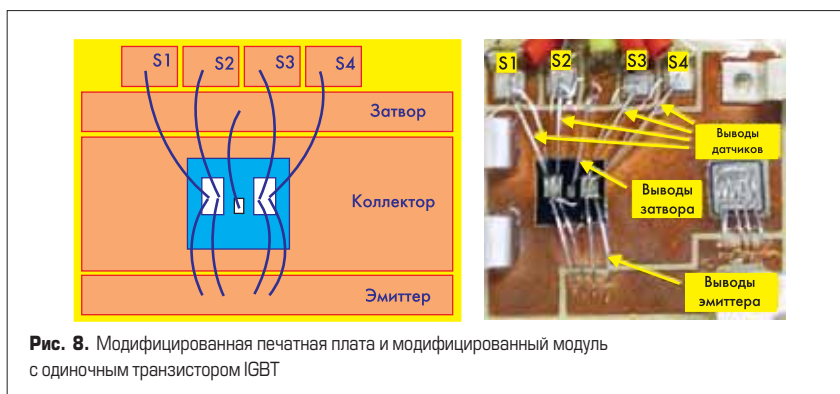


Рис. 8. Модифицированная печатная плата и модифицированный модуль с одиночным транзистором IGBT

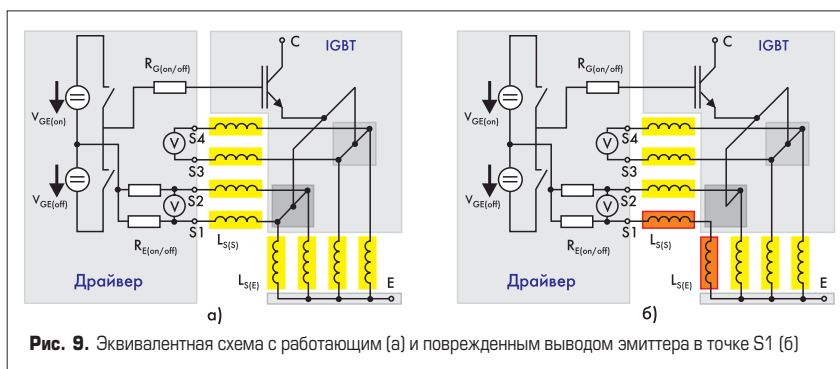


Рис. 9. Эквивалентная схема с работающим (а) и поврежденным выводом эмиттера в точке S1 (б)

ды не проводят силовой ток, но сохраняют контакт с эмиттером при повреждении основных эмиттерных связей, то есть поддерживают управляемость транзистора. Дополнительные выводы эмиттера объединены в группы с помощью низкоомных резисторов, также установленных на керамической подложке. Точка соединения резисторов (шина Сенсор) подключается к схеме управления (драйверу).

На рис. 6 показан вариант практической реализации «измерительного» модуля с 4 соединенными параллельно кристаллами IGBT. Соответствующие электрические схемы (для 2 транзисторов) для случаев работающей и поврежденной связи эмиттера и эпюры сигналов приведены на рис. 7.

Если связь эмиттера IGBT повреждена вследствие разрушения сварного соединения (рис. 4 и 7б) транзистор остается «управляе-

мым» благодаря дополнительным выводам. При этом эмиттер отказавшего транзистора оказывается подключенным к драйверу через низкоомный резистивный шунт. В результате образуется обратная связь по току эмиттера и ток транзистора резко снижается. Наличие в схеме измерительных шунтов, а также поврежденных и нормально функционирующих транзисторов позволяет провести детальный анализ состояния модуля.

На рис. 7 показаны эпюры сигналов в различных точках схемы: напряжение на эмиттере транзистора при наличии и отсутствии связи и сигнал на измерительном шунте. Напряжение на шунте (сигнал сенсора) составляет около 0,9 В и практически не зависит от номинала шунта и тока коллектора.

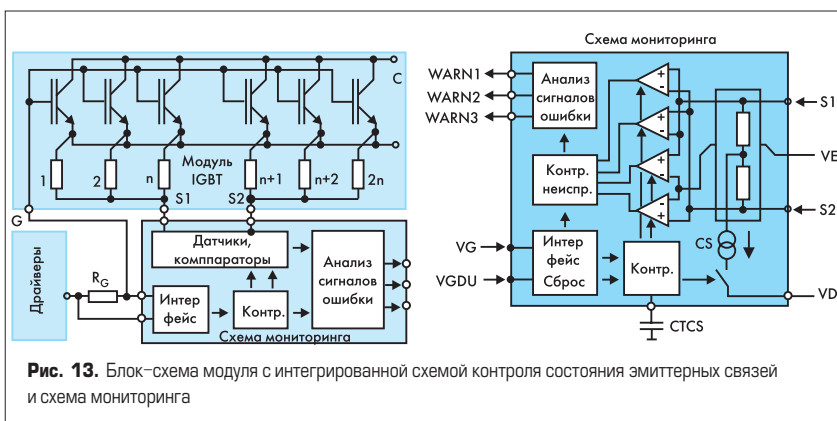
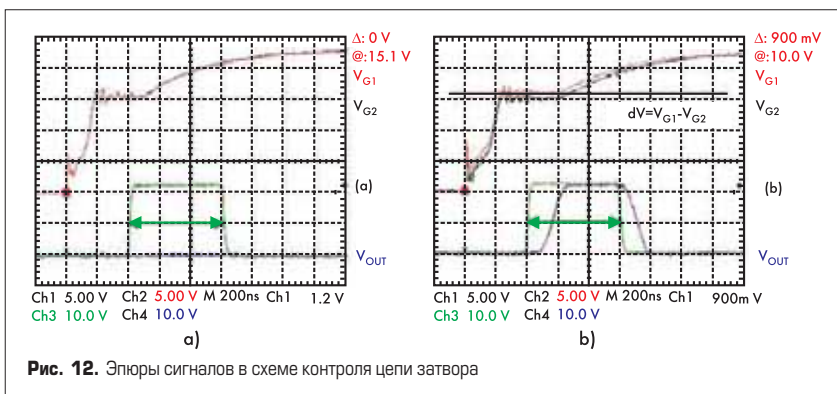
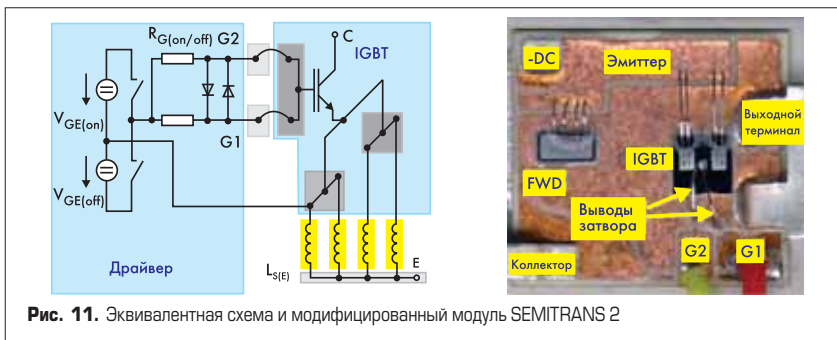
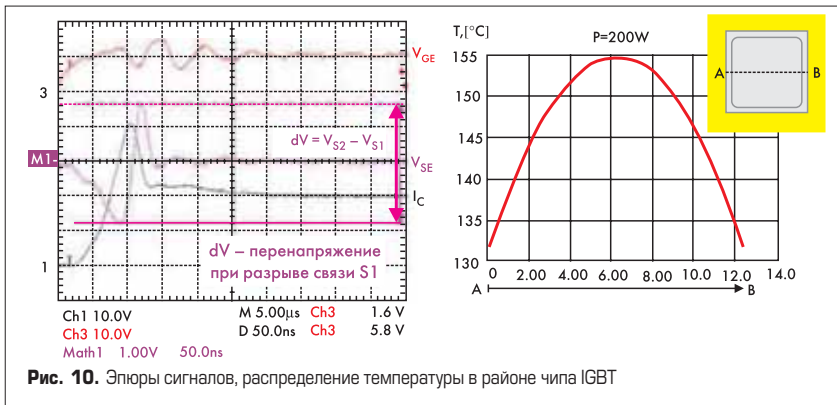
Для корректного анализа поведения модуля, содержащего одиночный транзистор IGBT, необходима модификация печатной платы и модуля, показанная на рис. 8. Как видно из рисунка и эквивалентной схемы, для подключения эмиттера используется 2 группы из 2 проводников, каждый из которых содержит токовый сенсор.

Допустим, что только 2 дополнительных вывода (S1, S2) используются для управления транзистором, а 2 других вывода (S3, S4) применяются только для контроля целостности соединения и не связаны с драйвером. На рис. 9б показана та же схема с поврежденной связью в точке S1. Детектирование неисправности в данной схеме производится с помощью мониторинга напряжения, наводимого на распределенных индуктивностях эмиттерных выводов $L_{S(E)}$ при коммутации транзисторов. После разрыва связи между точками S1 и S2 или S3 и S4 возникает перенапряжение dV .

Эпюры сигналов, наблюдаемых в схеме на рис. 9б, приведены на рис. 10. Перепад напряжения при включении транзистора ($dV = V_{S2} - V_{S1}$) между точками S2 и S1 образуется из-за разрушения связи S1.

На практике достаточно сложно выполнить подобную доработку силового модуля на всех кристаллах, поэтому модификация касается только чипа, вероятность выхода из строя которого максимальна. Как правило, кристаллы транзисторов верхнего плеча в полумостовых и мостовых модулях имеют большее тепловое сопротивление из-за меньшей площади медного покрытия, нанесенного на плату DBC, и худшей теплоотдачи, соответственно, они находятся в более напряженном электрическом и тепловом режиме.

Как уже было указано, вероятность отказа зависит от значения ускоряющих факторов ($\Delta T, T_m, T_{jmax}$). Анализ тепловых режимов работы кристалла, позволяющий наблюдать распределение тепла в области чипа, показывает, что максимальный тепловой стресс с предельными значениями ΔT и T_{jmax} наблюдается в центре кристалла. Причиной этого является то, что в центре чипа условия для отдачи тепла хуже, чем на его краях. Следовательно, эмиттерный вывод, расположенный ближе к центру кристалла, разогревается больше и при мониторинге необходимо анализировать состояние именно этого проводника.



В случае, когда главным механизмом отказа является разрушение паяного соединения чипа, основное влияние на состояние чипа оказывает увеличение теплового сопротивления «кристалл — подложка» R_{thjc} , что приводит к перегреву и ускорению отслоения кристалла от платы DCB. В этом случае вторичный ме-

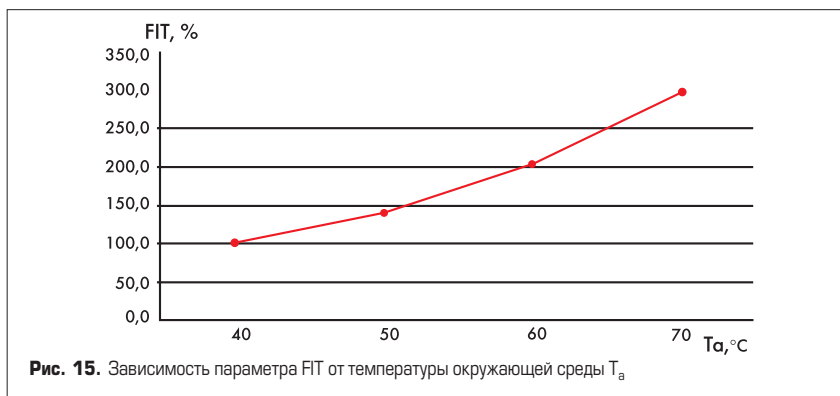
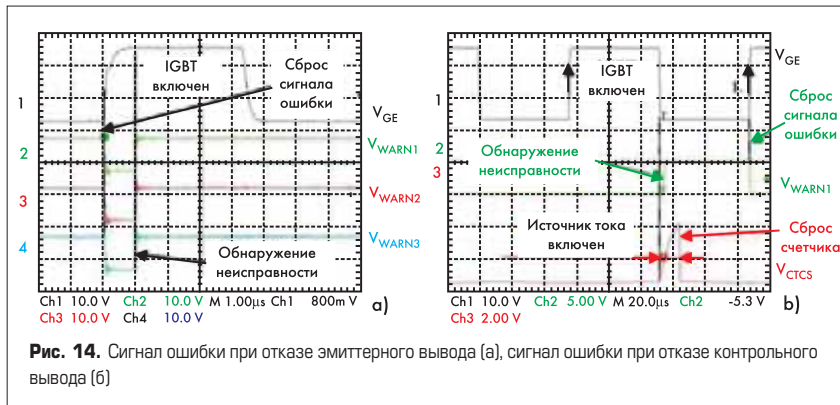
ханизм отказа — разрушение выводов — будет действовать в первую очередь на проводники, расположенные на краях чипа.

Проверка модулей на устойчивость к термоциклированию показала, что выводы затвора также подвержены отслаиванию, хотя вероятность такого повреждения намного ни-

же, чем в описанных выше случаях. В отличие от эмиттера, выводы которого имеют конструктивную избыточность для повышения токовой нагрузки, затвор IGBT всегда подключается только одним проводником. Следовательно, для анализа нарушения соединения вывода затвора необходимо установить параллельно еще хотя бы один проводник.

Соответствующая эквивалентная схема с двумя параллельными цепями управления затвором и фотография доработанного модуля показаны на рис. 11, а эпюры сигналов — на рис. 12. При нормальной работе цепи управления напряжением между точками G1 и G2 равно нулю. Если связь в одной из затворных цепей будет нарушена, весь ток управления затвором потечет через параллельный проводник и один из диодов, установленных между выводами G1 и G2. В данном случае наличие напряжения на диоде служит индикатором разрушения одной из цепей управления затвором. На рис. 12а видно, что сигнал индикации отказа V_{OUT} постоянно равен нулю. Эпюры 12б демонстрируют, что при обрыве цепи G1 сигналы в точках G1 и G2 (V_{G1} , V_{G2}) отличаются, появляется напряжение V_{OUT} , сигнализирующее об отказе. В отличие от нарушения связи эмиттера, повреждение цепи управления затвором не нарушает нормальной работы транзистора в случае, если затвор соединен с драйвером параллельным проводником.

На рис. 13 приведена блок-схема модуля IGBT со встроенной схемой анализа неисправностей, связанных с отслоением выводов кристаллов. Модуль содержит несколько соединенных параллельно кристаллов IGBT, объединенных в 2 группы. Эмиттеры транзисторов каждой группы объединены через шунты и выведены на контрольные контакты S1, S2. Для контроля потери проводимости к выводам S1 и S2 подключены компараторы. Состояние измерительных выводов проверяется отдельно, в этом случае схема индикации работает, даже если контрольные выводы разрушатся первыми. В зависимости от того, какой проводник откажет раньше, сигнал V_{SE} (см. рис. 7б) или разностный сигнал V_{S1S2} будет воздействовать на вход соответствующего компаратора. Естественно, что индикация обрыва эмиттерных выводов возможна только, когда транзистор находится в проводящем состоянии. Контроль обрыва измерительного вывода производится при закрытом транзисторе. Для определения целостности контрольных выводов используется источник тока CS, который включается, когда транзисторы закрыты. Ток источника создает падения напряжения на резистивных датчиках, а компараторы сравнивают напряжение в точках S1 и S2. Эмиттерные резисторы IGBT и датчики схемы мониторинга образуют резистивный измерительный мост. Контакты S1 и S2 находятся в диагонали моста, и напряжение между этими точками близко к нулю, когда все цепи исправны и симметричны. Чтобы снизить мощность, рассеиваемую из-за протекания тока CS, источник тока работает в импульсном режиме. Скважность импульсов и, соответственно, среднее



значение тока регулируется конденсатором, подключаемым к выводу CTCS. Временной алгоритм управления компараторами и время подачи сигнала сброса выбраны для обеспечения высокого уровня помехозащищенности. Для этого все сигналы синхронизируются с импульсами управления затворами VG и опорными импульсами драйвера GDU.

Алгоритм работы схемы мониторинга исключает срабатывание драйверов во время переключения IGBT, чтобы помехи, образующиеся при коммутации транзистора, не искажали контрольный сигнал. Если обнаружено разрушение связи, сигнал ошибки в первую очередь поступает на драйвер, отключающий транзисторы, а далее — на управляющий контроллер. При обнаружении любой неисправности блок анализа сигналов ошибки (см. рис. 13) вырабатывает код ошибки на выводах WARN1, WARN2, WARN3. Блок мониторинга неисправности, структура которого показана в правой части рис. 13, выполняется в виде интегральной схемы, встраиваемой в драйвер.

Эпюры сигналов схемы мониторинга неисправности приведены на рис. 14. На рис. 14а показаны сигналы контроля ошибки, наблюдаемые в случае обрыва эмиттерного вывода чипа IGBT. При открывании транзистора, при подаче отпирающего напряжения V_{GE} формируется сигнал сброса ошибки, устанавливающий выходы WARN1, WARN2, WARN3 в состояние логического нуля (код 000). После завершения переходного процесса, сопровождающего включение транзистора, разрешается работа компараторов по сигналу неисправности на выводе S2. На эпюрах 14а показан случай, когда при неисправности все

3 контрольных выхода устанавливаются в состояние логической единицы (код 111). После запирания транзисторов сигнал ошибки запоминается до тех пор, пока не поступит очередная команда на сброс схемы мониторинга и открывание транзисторов.

Эпюры 14б соответствуют другой неисправности — обрыву контрольных выводов. Потеря проводимости этих цепей определяется по сигналу, наблюдаемому на выводе S1. Для безошибочного распознавания данного типа отказа необходим достаточно большой ток возбуждения (CS) измерительного моста из-за того, что плечи моста являются низкоомными. По этой причине источник тока работает в импульсном режиме с низким коэффициентом заполнения, как было указано выше. Время работы источника CS на рис. 14б составляет примерно 15 мкс. Такое время необходимо для того, чтобы контрольный сигнал V_{CTCS} успел вырасти от нулевого значения до определенного порогового значения. Отключение источника тока CS, вызванное спадом напряжения V_{CTCS}, сбрасывает счетчик схемы мониторинга. Данный процесс происходит только при каждом 240-м включении транзисторов, что необходимо для снижения рассеяния мощности, вызываемого протеканием тока источника. Любой сигнал ошибки, свидетельствующий об обрыве контрольных выводов, запоминается схемой контроля и поступает на выход WARN1.

Показатели надежности

Основными параметрами, используемыми в зарубежной литературе для характеристики надежности изделий, являются FIT —

Failure In Time и MTBF — Mean Time Between Failure. Параметр FIT характеризует количество отказов в час, наблюдаемых при определенных условиях эксплуатации некоторого количества компонентов в течение определенного времени.

$$FIT = \lambda = n_f / (N \times t)$$

где n_f — количество обнаруженных отказов; N — количество испытываемых компонентов; t — время испытаний.

Как правило, параметр FIT дается в спецификациях при температуре окружающей среды 40 °C.

MTBF — величина, обратная значению интенсивности отказов, она характеризует среднее время между двумя отказами аналогичных компонентов.

Приведем пример расчета количества отказов в год для драйвера SKHI 22. Предположим, что драйвер в течение года находится в эксплуатации 220 дней по 8 часов в день. Тогда время работы за год t_{oper/year} = 220 × 8 = 1760 ч.

В справочных данных на SKHI 22 дается значение MFTB = 2 × 10⁶ при температуре окружающей среды 40 °C. Соответственно,

$$FIT = 1/MTBF = 500 \times 10^{-9} \text{ (ч}^{-1}\text{)}.$$

$$N_f = FIT \times t_{oper/year} \times 100\% = 500 \times 10^{-9} \times (220 \times 8) \times 100\% = 0,088\%/год = 880 \text{ ppm}.$$

Количество компонентов, работающих в течение года без отказов n₀, определяется следующим образом: n₀ = MTBF / t_{oper/year} - 1 = 1135. Это означает, что в среднем 1 из 1136 драйверов должен выйти из строя в течение года при данных условиях эксплуатации.

Рассчитываемый процент брака зависит от времени работы в течение года. Например, аналогичный элемент будет иметь гораздо меньше отказов при t_{oper/year} = 400 ч:

$$N_f = FIT \times t_{oper/year} \times 100\% = 500 \times 10^{-9} \times 400 \times 100\% = 0,02\%/год = 200 \text{ ppm}.$$

Значение количества отказов в течение года экспоненциально зависит от температуры (закон Аррениуса). При увеличении температуры от 40 до 60 °C значение MTBF уменьшается вдвое. Зависимость параметра FIT от температуры приведена на рис. 15.

В таблицах 1 и 2 приведены данные FIT для интеллектуальных модулей IGBT SKIIP, а в таблице 3 — значения MTBF для драйверов SEMIDRIVER, производимых SEMIKRON.

Основным типом испытаний, позволяющим оценить надежность модуля в условиях реальных нагрузок, является термоциклирование. Срок службы модулей является функцией средней температуры кристалла и градиента температуры ΔT_j. Многочисленные исследования показали, что средняя температура является для определения надежности не менее важным параметром, чем перепад температур. Количество циклов до отказа N_{cf} связано со средней температурой кристалла T_m = T_{jmin} + ΔT_j/2 в соответствии с выражением:

Таблица 1. Значения параметра FIT для модулей SKiiP (силовые каскады)

Тип SKiiP	Количество кристаллов в модуле				Общее кол-во чипов	SKiiPACK (без драйвера) FIT × 10 ⁻⁹ ч ⁻¹
	IGBT		Диод			
	Кол-во ключей	Кол-во чипов на 1 ключ	Кол-во ключей	Кол-во чипов на 1 ключ		
2 полумоста параллельно	4	5	4	2	28	66
	4	7	4	2	36	85
	4	10	4	3	52	123
3 полумоста параллельно	6	5	6	2	42	99
	6	7	6	2	54	128
	6	10	6	3	78	185
4 полумоста параллельно	8	5	8	2	56	133
	8	7	8	2	72	170
	8	10	8	3	104	246

Таблица 2. Значения параметра FIT для модулей SKiiP (с драйвером)

Тип SKiiP	FIT × 10 ⁻⁹ ч ⁻¹			
	SKiiPACK с драйвером «СТУ»			GDL
	GB	GD	GH	
2 полумоста параллельно	1113		1526	
	1122		1535	
	1138		1551	
3 полумоста параллельно	1490	2054		
	1502	2066		
	1527	2091		
4 полумоста параллельно	1718		2418	2226
	1735		2435	2243
	1768		2468	2276

Таблица 3. Значения параметра MTBF для драйверов SEMIDRIVER

Тип драйвера	MTBF/10 ⁶ ч @ 40 °C
SKH 10	1,72
SKH 21A, 22A	2,0
SKH 23	0,95
SKH 24	1,6
SKH 26	1,73
SKH 60	0,73
SKH 61	0,84
SKH 71	0,72

$$N_{gf} = A \times \Delta T_j^y \times \exp\left(\frac{E_a}{k_b \times T_m}\right)$$

где k_b — постоянная Больцмана. Выражение позволяет получить хорошую аппроксимацию результатов тестов с помощью метода наименьших квадратов по трем параметрам: константа A , показатель степени и энергия активации E_a .

Заключение

Технология прижимного соединения **pressure-contact**, разработанная фирмой SEMIKRON, открывает новые возможности производства модулей средней и большой мощности для различных областей применения: электротранспорта, мощных приводов, источников вторичного электропитания. Испытания модулей на отказ при воздействии многократных тепловых ударов (термоциклов) являются важным инструментом, позволяющим оценить их надежность. Вся продукция SEMIKRON подвергается жестким испытаниям, виды которых приведены в таблице 4.

Описанная в статье схема мониторинга отказов, встроенная в силовой модуль, позволяет производить диагностику неисправностей,

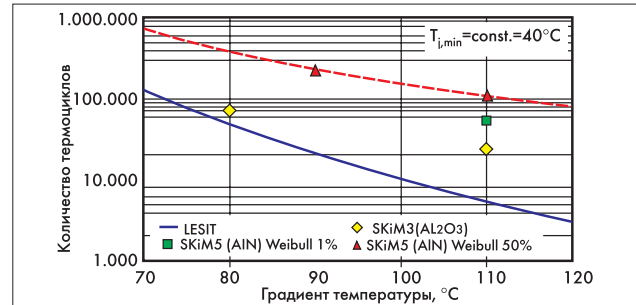
Таблица 4. Виды и условия испытаний интеллектуальных силовых модулей SEMIKRON

Испытание	Условия испытаний	Испытания до полного отказа	Стандарт
Повышенная температура при повышенном напряжении на коллекторе	$t = 125\text{ °C}$ $V_{GE} = 570\text{ В}$ $T_i = 1000\text{ ч}$		IEC 60747-9
Повышенная температура при повышенном напряжении на затворе	$t = 125\text{ °C}$ $V_{GE} = 20\text{ В}$ $T_i = 1000\text{ ч}$		IEC 60747-9
Повышенная температура хранения	$t = 125\text{ °C}$ $T_i = 1000\text{ ч}$		IEC 68-2-2
Пониженная температура хранения	$t = -40\text{ °C}$ $T_i = 1000\text{ ч}$		IEC 68-2-1
Повышенная влажность	$t = 85\text{ °C}$, $H = 85\%$ $V_{GE} = 80\text{ В}$ $T_i = 1000\text{ ч}$		IEC 68-2-3
Перепады температуры	500 циклов $-40\text{ °C}/+125\text{ °C}$	900 циклов	IEC 68-2-14
Циклическая нагрузка мощностью	20000 циклов $\Delta t = 125\text{ К}$	30000 циклов	IEC 60747-9
Вибрация, удары	5g/100 циклов/ 20–500 Гц 30g/ 18мс/6 ударов		IEC 68-2-6 IEC 68-2-27

связанных с отслоением выводов кристаллов, до того, как наступает необратимый отказ модуля. Это необходимо для анализа отказов, причиной которых является разрушение соединений эмиттера, затвора, контрольных выводов или параллельных соединений кристаллов. Разрушение выводов кристаллов является вторым по значимости механизмом, вызывающим отказ модуля, после усталостных процессов в паяном слое силовых чипов. Какой из механизмов окажется доминирующим — зависит от условий эксплуатации, значения ускоряющих факторов, характера нагрузки.

В 1991 году была принята европейская программа оценки технических решений Technology Assessment. В рамках этой программы советом по науке Швейцарии сформулированы требования по энергосбережению и надежности изделий силовой электроники, а также требования к системным и информационным технологиям LESIT (Leistungselektronik, Systemtechnik und Informationstechnologie). В процессе осуществления программы LESIT проводились многочисленные испытания надежности силовых модулей различных производителей.

Сравнение результатов программы LESIT с результатами статистического анализа ис-

Рис. 16. Сравнение результатов испытаний: SKiM5 с кристаллами Trench IGBT и DBC-AlN, SKiM3 с DBC-Al₂O₃, стандартные модули с медным основанием (по программе LESIT)

пытаний модулей SKiM SEMIKRON показало, что вероятность отказа 1% модулей SKiM ниже вероятности полного отказа выборки модулей стандартной конструкции в одинаковых температурных условиях. Сказанное иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 16. Эпюры показывают зависимость количества термоциклов до полного отказа модулей с медной базовой платой (по данным испытаний в рамках программы LESIT) и до отказа 1% и 50% модулей SKiM3 и SKiM5 (по результатам испытаний SEMIKRON) от перепада температуры при испытаниях на термоциклирование. Видно, что преимущество в надежности модулей без базовой платы проявляется значительно при больших перепадах температуры.

Анализ отказов и изучение механизмов их возникновения позволяет вносить соответствующие изменения в конструкцию модуля и моделировать поведение модуля при различных условиях эксплуатации. Преимущество технологии pressure-contact, используемой при изготовлении силовых модулей SEMIKRON, а также строгий контроль электрических и конструктивных параметров позволяет получить беспрецедентные показатели надежности и практически исключить отказы в течение срока службы при любых режимах эксплуатации.

Литература

1. J. Lehmann, M. Netzel, S. Pawel, Th. Doll. Method for Electrical Detection of End-of-Life Failures in Power Semiconductors. Semikron Elektronik GmbH.
2. K. Backhaus, Performance of New Compact Power Semiconductor Module Families Featuring Pressure Contact Technology, Proc.
3. U. Scheuermann. Reliability of Pressure Contacted Intelligent Power Modules. Semikron Elektronik GmbH.
4. U. Scheuermann, U. Hecht. Power Cycling Lifetime of Advanced Power Modules for Different Temperature Swing. Semikron Elektronik GmbH.
5. С. Флоренцев. Силовые IGBT-модули — основа современного преобразовательного оборудования // Электронные компоненты. 2002. № 6.
6. Колпаков А. И. Обеспечение надежности интеллектуальных силовых модулей // Электронные компоненты. 2003. № 4.