

О термоциклах и термоциклировании

Достоинства силовых ключей, производимых по IGBT-технологии, неоспоримы. Высокая плотность тока и хорошая перегрузочная способность, низкие статические и динамические потери, способность работать при напряжении промышленных сетей делают IGBT-модули чрезвычайно привлекательными для использования в преобразовательных устройствах широкого диапазона мощности. Это относится и к приводам, применяющимся на электротранспорте: в трамваях, троллейбусах, метро и транспортных средствах будущего — электро- и гибридомобилях. Очень важно, чтобы экстремальные температурные режимы работы полупроводников, свойственные транспортным применениям, обеспечивались без ущерба для надежности и не приводили к снижению срока службы. Как показывают многочисленные исследования, отказы силовых модулей, как правило, происходят вследствие термомеханических напряжений, вызванных перепадами температуры. Для подтверждения стойкости силовых ключей к специфическим условиям эксплуатации существуют различные виды ускоренных испытаний. В процессе подобного тестирования исследуется зависимость количества термоциклов, которые модуль может выдержать без разрушения, от градиента температуры и ее среднего значения.

Андрей Колпаков

Основные требования

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Наиболее сложные проблемы, возникающие при работе компонентов силового транспортного электропривода, связаны с предельными температурами эксплуатации и необходимостью обеспечения высокой стойкости к термоциклированию. При рассмотрении показателей надежности в отношении автоэлектроники учитывается рабочее и нерабочее состояние привода. Общий срок службы, который должен быть не менее 15 лет, предусматривает длительность рабочего режима 10 тыс. часов, что соответствует пробегу 300 тыс. км при средней скорости 30 км/час.

Время наработки разделяется на две фазы: примерно 95% времени привод работает при температуре охладителя ниже 90 °С, а остальные 5%, соответственно, при температуре выше 90 °С. Предположим, что в течение 15 лет транспортное средство подвергается в среднем двум холодным пускам в день, когда охлаждающая жидкость разогревается от 5 до 105 °С и охлаждается до исходного состояния. Таким образом, за время эксплуатации все составные части электронного модуля привода испытывают воздействие 10 тыс. термоциклов с градиентом 100 °С.

Температура «пассивного» или внешнего термоцикла является базовой, к ней добавляется «активный» термоцикл, образуемый за счет тепловыделения силовых ключей. Создаваемому таким образом термомеханическому стрессу подвергаются полупроводники и «интерфейсные» материалы: соединительные проводники, керамическая DBC-плата (Direct Bonded Copper — керамика с медными шинами, нанесенными диффузионным методом, на которой

установлены силовые кристаллы), паяные соединения и т. д. В зависимости от характеристик циклограммы каждое ускорение и замедление транспортного средства трансформируется в циклическое изменение температуры. Анализ типовых характеристик движения показывает, что силовые элементы преобразователя транспортного привода за время работы испытывают в среднем 3 млн активных термоциклов с градиентом 40 °С.

Соответственно, для оценки устойчивости электронных компонентов к воздействию перепадов температуры существует два основных метода:

- активное термоциклирование (power cycling), при котором нагрев элемента происходит за счет его собственного тепловыделения в процессе коммутации тока, а снижение температуры обеспечивается системой охлаждения;
- пассивное термоциклирование (temperature cycling), при котором градиент температуры создается за счет помещения элемента в климатические камеры с высокой и низкой температурой.

По своим воздействиям оба метода совпадают с естественными условиями эксплуатации, когда активное и пассивное изменение температуры вызывается рассеянием мощности и воздействием окружающей среды. Однако проведение нескольких миллионов циклов испытаний с «естественной» длительностью потребовало бы слишком много времени. Поэтому на практике используются ускоренные методы проверки при повышенном градиенте температуры ΔT и максимальной температуре кристалла T_{jmax} , вызывающие активизацию механизмов, приводящих к отказу модулей. Анализ результатов испытаний и их статистическая обработка позволяют установить

Таблица 1. Ожидаемые перепады температуры ΔT и количество термоциклов в течение срока службы (для городского электротранспорта)

	Режим 1	Режим 2	Режим 3
T, °C	20–40	10–30	30–100
№ циклов	< 10 ²	< 10 ⁴	10 ⁴ –10 ⁸

зависимость количества термоциклов от перепада температуры ΔT и ее среднего значения T_m . Это необходимо для расчетов надежности работы изделия в реальных условиях эксплуатации и прогнозирования срока службы.

Термин «надежность» в отношении электронных компонентов можно определить как способность элемента обеспечивать заданные характеристики при специфических воздействиях окружающей среды в течение срока службы. Надежность силовых модулей зависит от ряда факторов, в первую очередь от величины рассеиваемой мощности и уровня внешних механических и климатических воздействий. При проектировании транспортно-привода особое внимание надо обращать на следующие тепловые режимы:

1. Сезонные изменения температуры;
2. Дневные колебания температуры (день — ночь, рабочее — нерабочее состояние);
3. Изменения температуры в результате активного термоциклирования.

Основные характеристики трех типов тепловых циклов приведены в таблице 1. Самую высокую частоту повторения и перепад температуры имеют тепловые нагрузки, вызванные термоциклированием. Они же оказывают и наибольшее влияние на ресурс силовых модулей.

Классическим примером силового преобразователя, работающего в напряженном температурном режиме, может служить асинхронный привод трамвая, условия эксплуатации которого характеризуются следующими параметрами:

- срок службы — 30 лет;
- продолжительность эксплуатации (30 лет × 300 дней × 15 часов/день) — 135 000 ч.;
- время движения между остановками — 30 с;
- время остановки — 30 с;
- количество термоциклов в течение срока службы — 8 100 000.

Поперечное сечение модуля IGBT традиционной конструкции показано на рис. 1. Основными элементами конструкции являются керамическая DBC-плата, на которой расположены силовые кристаллы и медные токонесущие шины, медная базовая плата и пластмассовый корпус. Для того чтобы повысить стойкость

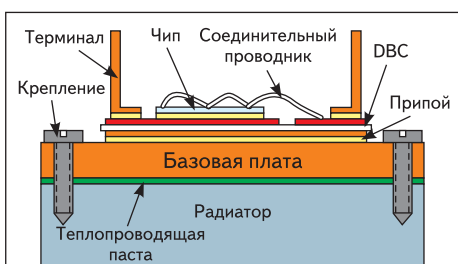


Рис. 1. Поперечное сечение силового модуля стандартной конструкции

Таблица 2. Свойства материалов силового модуля

Элемент	Материал	Толщина, мкм	Теплопроводность 20 °C, Вт/(м·К)	Относительное смещение 20 °C, 10 ⁻⁴ /K
Выходы чипа металлизация чипа	Алюминий (Al)	300 3	240	24
Кристалл	Кремний (Si)	300	80–150	3
Соединение чипа Соединение DBC	Припой (Sn/Pb)	50 100	35	25
Верхний слой DBC Нижний слой DBC Базовая плата	Медь (Cu)	300 300 3000	390	16,8
DCB-керамика	Al ₂ O ₃ AlN	700	35 140–170	74

конструкции к воздействию влаги, внутренний объем модуля обычно заполняют мягким силиконовым гелем. К тому же корпус герметизируют с помощью эпоксидного наполнителя. Основные свойства материалов, входящих в состав модуля, приведены в таблице 2.

Кристаллы IGBT соединяются с медным покрытием DBC-платы с помощью пайки — только такое соединение обеспечивает достаточный отвод тепла. Нарращивание тока модуля достигается благодаря параллельному включению чипов. Подключение выводов кристаллов, а также промежуточное соединение токоведущих шин DBC-платы выполняется методом ультразвуковой сварки (wire bonding) или пайки.

Керамическая плата реализует две основные функции: осуществляет электрическую изоляцию токоведущих цепей модуля от базовой платы и передает на нее тепло, выделяемое кристаллами. Для производства DBC-керамики широко применяются два материала: оксид алюминия (Al₂O₃) и нитрид алюминия (AlN), отличающиеся высокой теплопроводностью, хорошими электроизоляционными свойствами и технологичностью.

Базовая плата, являющаяся основанием модуля и предназначенная для передачи тепла на радиатор и крепления, обычно изготавливается из меди. В ряде случаев, для улучшения согласования коэффициентов теплового расширения и повышения стойкости к термоциклированию, для ее производства применяется композитный материал AlSiC. Однако его теплопроводность несколько хуже, чем у меди, а стоимость гораздо выше.

В качестве материала выводов кристаллов используется чистый алюминий (99,99% или 99,999%) с небольшим добавлением титана и меди. Состав этого сплава оптимизируется для обеспечения надежного соединения выводов чипа с медными шинами, получаемого

с помощью ультразвуковой сварки. Кроме того, сплав должен обеспечивать проводникам соответствующие механические свойства, в частности гибкость, необходимую для протягивания и многократного изгибания провода в процессе автоматической сборки. Металлизация кристалла, к которой крепится проводник, состоит из сплава алюминия (99%) с кремнием или титаном (1%).

Существует два основных механизма, приводящих к выходу из строя силовых модулей при термоциклировании и вызванных рассогласованием коэффициентов теплового расширения (КТР): отслоение выводов кристаллов от медных шин и разрушение паяных соединительных слоев. Самому сильному воздействию подвергается паяное соединение медного основания и керамики, имеющее большую площадь, на втором месте — соединение чипов с керамикой. Сказанное подтверждается многолетней статистикой отказов, проводимой ведущими производителями силовых модулей, в частности Semikron.

В зависимости от условий эксплуатации доминирующим может быть первый или второй механизм отказа. В первую очередь это зависит от периода цикла и градиента температуры ΔT . В обоих случаях отказы происходят вследствие термомеханических стрессов, вызванных термоциклированием и разницей КТР кремния, алюминия, меди и керамики. В условиях «быстрых» циклов при небольших перепадах температуры основной причиной выхода из строя является отслоение выводов чипов, после чего происходит разрушение соединительного слоя пайки.

На рис. 2 показаны разрушенные связи эмиттера IGBT и фотография места отслоения проводника, сделанная сканирующим электронным микроскопом (SEM). Данный процесс сопровождается так называемым эффектом «домино»: отрыв алюминиевых проводов

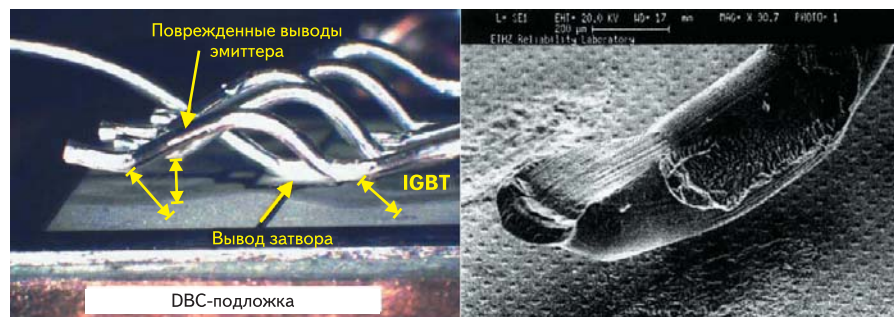


Рис. 2. Отслоение алюминиевых выводов кристаллов в результате воздействия термоциклов

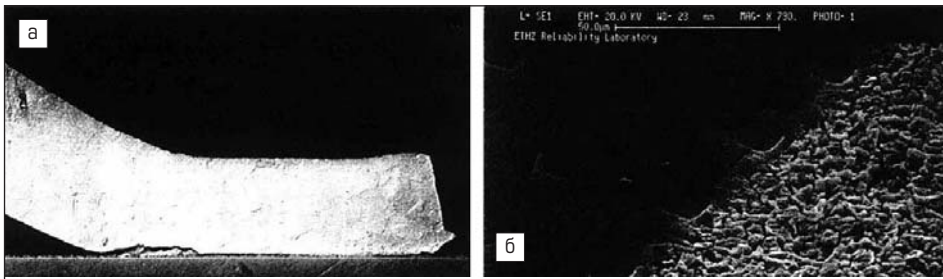


Рис. 3. а) поперечное сечение зоны повреждения контакта, б) экструзия зоны металлизации чипа в непассивированной области

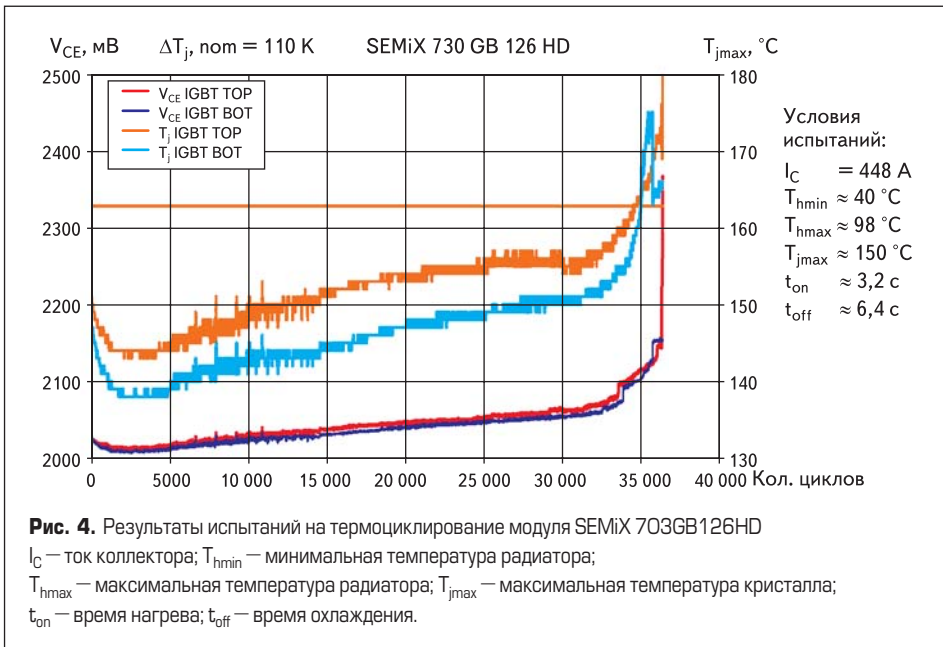


Рис. 4. Результаты испытаний на термоциклирование модуля SEMiX 703GB126HD
 I_C — ток коллектора; T_{hmin} — минимальная температура радиатора;
 T_{hmax} — максимальная температура радиатора; T_{jmax} — максимальная температура кристалла;
 t_{on} — время нагрева; t_{off} — время охлаждения.

приводит к нарушению равномерного распределения токов IGBT (вывод эмиттера подключается с помощью группы выводов, соединенных параллельно) и соответствующему локальному повышению температуры, ускоряющему разрушение оставшихся связей.

Разрастание трещин внутри алюминиевого проводника начинается на границе мелкозернистой и крупнозернистой зон и идет от краев области контакта к ее центру. Предполагается, что изменение размера частиц микроструктуры алюминия и образование зон, содержащих крупные и мелкие зерна, происходит в процессе ультразвуковой сварки выводов кристаллов. Когда повреждения достигают центра контактной области, начинается отслоение проводника и разрыв электрического контакта. У оставшихся проводников возрастает токовая нагрузка, соответственно увеличивается перегрев как самих выводов, так и зоны их контакта с чипом.

Другим следствием термомеханического стресса является экструзия зерен алюминия в зоне металлизации кристалла. Фотография поверхности чипа, подвергшейся экструзии, показана на рис. 3б. В результате возрастает активное сопротивление области металлизации и вызванное им увеличение напряжения насыщения «коллектор-эмиттер» V_{CEsat} . Соответственно увеличивается рассеиваемая кристаллом мощность, что сопровождается дальнейшим повышением температуры и усилением термомеханического воздействия. Экструзия также приводит к разрушению локаль-

ных ячеек эмиттера, снижению площади контактной зоны и повышению плотности тока в областях, где контакт сохранился.

Интересно, что данный процесс не происходит в областях, покрытых пассивирующим слоем. Однако зона электрического контакта, составляющая примерно 50% области металлизации, естественно, не может быть подвергнута пассивации.

Косвенным параметром, позволяющим следить за процессами отслоения проводников и экструзией и оценить их уровень, является напряжение насыщения V_{CEsat} . Оба описанных процесса вызывают рост температуры кристалла T_j и увеличение напряжения насыщения в соответствии с характеристикой $V_{CEsat} = f(T_j)$ при заданном значении тока коллектора. Зна-

чение этого напряжения может быть измерено в процессе термоциклирования в режиме реального времени, когда IGBT находится в проводящем состоянии, и в статическом режиме, когда испытания прерываются для проведения измерений. Статические измерения гораздо более точные, поскольку выполняются при стабилизированном и калиброванном значении тока I_{cal} (обычно 100 мА). Кроме того, лишь такой способ оценки напряжения насыщения и температуры кристалла позволяет сравнивать модули в различных режимах эксплуатации, изменяя уровень электрической нагрузки и параметры термоцикла. Нагрев модуля в процессе испытаний, как правило, производится его номинальным током.

Критический уровень V_{CEsat} , соответствующий выходу модуля из строя, зависит от его параметров, в первую очередь от номинального тока. На рис. 4 показаны результаты проведенных в 2005 году испытаний: были протестированы модули IGBT последнего поколения SEMiX на воздействие термоциклов с периодом 9,6 с. Условия, в которых проводились испытания, также приведены на рисунке. В данном случае пороговым значением напряжения насыщения (горизонтальная прямая) является уровень, на 15% превышающий максимальное допустимое значение при токе 450 А.

В течение первых 2 тыс. циклов наблюдается снижение температуры кристаллов и напряжения насыщения. Причина этого — высокое гидравлическое сопротивление теплопроводящей пасты, находящейся в зазоре между модулем и теплоотводом, препятствующее ее распределению. При термоциклировании данный процесс ускоряется, теплопроводящий слой становится более равномерным, и тепловое сопротивление снижается, приводя к уменьшению температуры кристаллов.

В последней фазе испытаний напряжение насыщения транзисторов плеча увеличивается с возрастающей скоростью, скачок характеристики в районе 33 тыс. циклов соответствует началу отслоения выводов кристаллов от токонесущих шин. Этот процесс провоцирует лавинообразное увеличение плотности тока, температуры и разрушение паяного соединения кристаллов.

В обоих случаях чипы транзисторов верхнего плеча имеют большее тепловое сопротивление и, соответственно, температуру

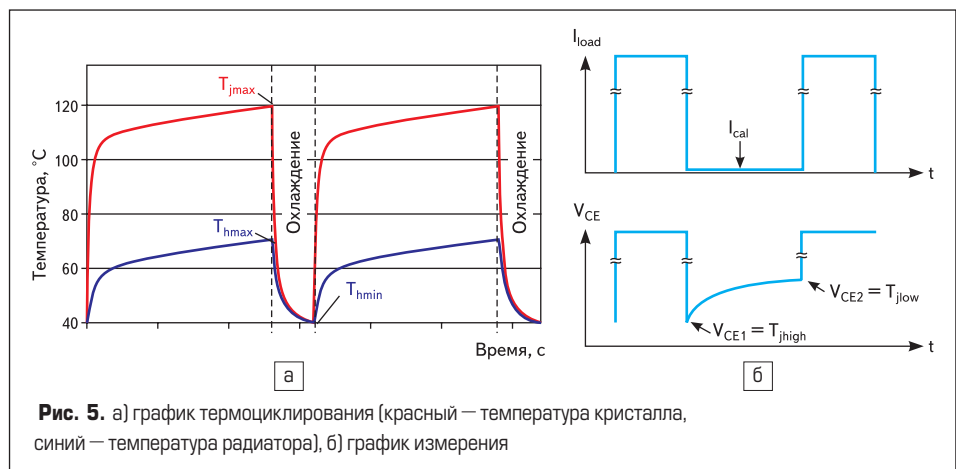


Рис. 5. а) график термоциклирования (красный — температура кристалла, синий — температура радиатора), б) график измерения

в течение всего теста. Происходит это потому, что площадь медного покрытия, нанесенного на DBC-плату, под транзисторами нижнего плеча больше, что улучшает их теплоотдачу.

Испытательные циклы с периодом менее 10 с (рис. 4) используются для анализа отказов, связанных с отслоением выводов силовых кристаллов. Быстрое изменение температуры более эффективно воздействует на проводники и зоны металлизации, благодаря их малой тепловой инерционности и быстрому отклику на нагрев кристалла IGBT.

На рис. 5а представлен типовой график испытательного термоцикла, включающего время нагрева и охлаждения. В процессе испытаний чипы силовых транзисторов нагреваются до максимальной температуры за счет протекания постоянного тока определенной величины, как правило, номинального тока модуля. При этом, как правило, используется максимально допустимое значение напряжения включения V_{GE} , что позволяет обеспечить равномерное распределение тока в ячейках структуры IGBT и в параллельно соединенных чипах.

После достижения предельного значения температуры ток прерывается, кристаллы быстро охлаждаются до температуры теплоотвода благодаря низкой теплоемкости. Далее скорость охлаждения модуля до минимальной рабочей температуры определяется тепловой постоянной времени радиатора и эффективностью системы охлаждения. Для ускорения процесса охлаждения при подобных тестах применяют жидкостную охлаждающую систему.

Такие испытания являются наиболее «приближенными к жизни», поскольку 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.

При испытаниях производится постоянный мониторинг температуры чипов T_j и теплоотвода T_h . Контроль T_h позволяет исключить влияние нестабильности работы системы охлаждения и учесть изменение тепловых сопротивлений.

Наиболее важными параметрами, максимально влияющими на надежность соединений выводов кристаллов, являются температура в зоне их подключения и в области металлизации чипа. Благодаря своей близости к основному источнику тепла — кристаллу IGBT, эти области нагреваются примерно до такой же температуры, то есть T_j . Минимальное T_{jlow} и максимальное T_{jhigh} значение температуры чипа определяют градиент термоцикла. Исходя из величины ΔT , выбирают характеристики испытательных воздействий: ток нагрева I_{load} , время нагрева t_{on} , время охлаждения t_{off} и параметры самой охлаждающей системы. Как было указано выше, граничные температуры цикла контролируются по напряжению насыщения V_{CE1} , V_{CE2} по характеристике $V_{CE} = f(T_j)$ при калиброванном токе коллектора $I_{cal} = 100$ мА (рис. 5б).

Для лучшего понимания процессов, вызываемых термомеханическими стрессами, рассмотрим двухслойную структуру, состоящую из кремния и алюминия. В таком соединении основные пластические деформации происходят в слое алюминия благодаря его более низкому пределу текучести. Эквивалентная амплитуда деформации $\Delta \epsilon_{eq}$, вызванная термоциклированием, зависит от градиента температуры ΔT и разницы коэффициентов теплового расширения $\Delta \alpha$ сопрягающихся материалов:

$$\Delta \epsilon_{eq} = c \times \Delta T \times \Delta \alpha,$$

где c — ограничивающий коэффициент, учитывающий, что механическое напряжение имеет место в двух плоскостях:

$$c = 1/(1-\nu)$$

ν — коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона), который для алюминия составляет 0,345 в области упругой деформации и 0,5 в области пластической деформации. Уровень механического напряжения, приведенный к 1 К, для алюминия выражается следующим образом:

$$\sigma/\Delta T = \Delta \alpha \times E \times c.$$

При расчете данного параметра с учетом свойств материалов, приведенных в таблице 3, его значение в области упругой деформации составляет 2,3 МПа/К.

Таблица 3. Свойства материалов контактной зоны

Параметр, единица измерения	Al	Si
Коэффициент теплового расширения CTE, 10 ⁻⁶ /K	24	3
Модуль Юнга E, ГПа	72	130
Предел текучести σ_y , МПа (при $\epsilon_{pl} = 0,2\%$)	20	—
Коэффициент Пуассона ν	0,345	0,23

Таким образом, пластическая деформация для алюминиевого проводника чистотой 99,99%, имеющего предел текучести $\sigma_y = 20$ МПа, достигается при $\Delta T = 9$ К. Следовательно, если градиент температуры термоцикла равен 18 К (то есть $2\Delta T$ при циклическом достижении предела текучести $-\sigma_y \dots + \sigma_y$) в алюминии, являющемся самым «податливым» звеном соединения, происходит мгновенная пластическая деформация.

Циклические термомеханические напряжения приводят к возникновению усталостных процессов в алюминии, росту трещин и в конечном итоге к отслоению проводников. Однако приведенный здесь механизм отказа не учитывает стрессы и пиковые напряжения, происходящие в основании области сварки. Наличие данных зон концентрации напряжения в дополнение к описанным выше процессам объясняет, почему реальное количество отказов, вызванных термоциклированием, превышает ожидаемый уровень.

Предел текучести зоны алюминиевой металлизации очевидно выше, чем для проводников, благодаря меньшему размеру зерен алюминиевой структуры, наличием легирующих

добавок (Si, Ti...) и высокой плотности дефектов кристаллической решетки, возникающих в процессе металлизации. Соответственно, для инициирования пластической деформации и исследования процесса экструзии в области металлизации необходимо использовать более высокие градиенты температуры при испытаниях.

Исследование влияния термомеханических напряжений на процессы, происходящие в материалах силовых модулей — пластические деформации и необратимые смещения, — является очень сложной задачей и не факт, что с помощью испытательных ускоренных термоциклов можно полностью имитировать реальные воздействия. Одной из самых серьезных проблем остается корреляция результатов, связь цифр, полученных по итогам тестов, с реальными условиями эксплуатации. Основным недостатком ускоренных испытаний с применением «коротких» термоциклов — нулевое время выдержки при предельных температурах. Это уменьшает термомеханический стресс и ослабляет эффект релаксации, оказывающий основное разрушающее воздействие на соединение DBC-платы с основанием модуля. Но в любом случае можно утверждать, что модуль, выдерживающий большее количество испытательных термоциклов, имеет более высокую надежность в реальных условиях эксплуатации.

Для того чтобы коррелировать результаты тестов, полученные с применением быстрых циклов (0,75–9 с), с реальными эксплуатационными циклами (периодом до 60 с и выше), необходимо учесть разницу в механизмах их работы и оценить возможный уровень деформаций. Общий уровень механического напряжения, вызванного несогласованием КТР, является величиной постоянной. Составляющей этой величины, зависящей от времени воздействия, становится так называемая «деформация ползучести». Она снимает часть упругой деформации, вызывая механическую релаксацию.

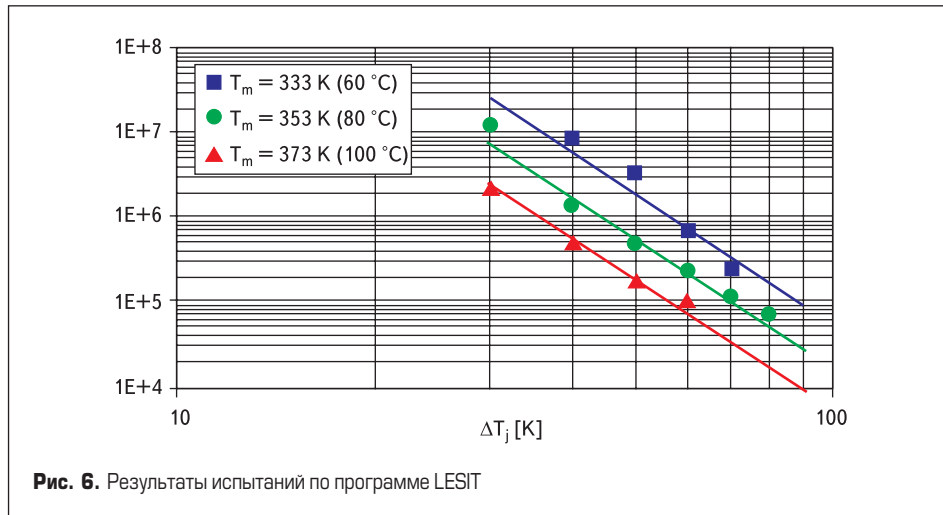
Общая амплитуда деформации описывается выражением:

$$\Delta \epsilon_{tot} = \Delta \epsilon_{pl} + \Delta \epsilon_{el} = c \times \Delta \alpha \times \Delta T.$$

Учитывая, что $\Delta \epsilon_{el} = 2\sigma_y/E$, соотношение упругой и пластической деформации $\Delta \epsilon_{el}/\Delta \epsilon_{pl}$ можно выразить следующим образом:

$$\frac{\Delta \epsilon_{el}}{\Delta \epsilon_{pl}} = \frac{\Delta \epsilon_{tot}}{\Delta \epsilon_{pl}} - 1 = \frac{c \times \Delta T \times \Delta \alpha}{c \times \Delta T \times \Delta \alpha - \frac{2\sigma_y}{E}} - 1.$$

Расчет, проведенный с учетом свойств алюминия при градиенте температуры $\Delta T = 50$ К и значении $c = 2$ в области пластических деформаций, показывает, что величина искомого соотношения составляет около 30% и примерно соответствует уровню деформации ползучести по отношению к пластической деформации. Оценка, основанная на важнейших свойствах материалов, демонстрирует, что неупругая деформация, также вызываемая напряжением, составляет не более трети от $\Delta \epsilon_{el}$. Таким образом, это смещение может добавить



примерно 10% к амплитуде неупругой деформации в случае длительной выдержки при предельных температурах цикла, обеспечивающей механическую релаксацию. Испытания на термоциклирование с использованием «быстрых» циклов инициируют аналогичные механизмы отказа и приводят примерно к таким же последствиям, как и тесты с длительными периодами воздействия. Однако для реальной оценки стойкости силовых модулей к термоциклированию необходимо проводить испытания минимум в двух режимах: с длительностью 30–60 с (надёжность паяного соединения DBC-керамики) и 1–10 с (надёжность соединения чипов и их выводов).

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

На рис. 6 показаны результаты испытаний одиночного модуля IGBT с номинальным током 300 А и напряжением 1200 В, проведенных по программе LESIT. Тесты выполнялись при различных значениях средней температуры кристалла T_m и градиента температуры ΔT_j .

Цель испытаний — выяснение влияния параметров T_m и ΔT_j на стойкость силового модуля к термоциклированию. Испытания проводились при следующих условиях:

- ток нагрузки — 240–300 А;
- время нагрева t_{on} — 0,6–4,8 с;
- время охлаждения t_{off} — 0,4–5 с;
- критерий отказа — увеличение напряжения насыщения V_{CEsat} на 5%.

Поскольку при тестах использовались «короткие» термоциклы, все испытываемые модули отказали в результате отслоения проводников и разрушения слоя металлизации. Важным следствием испытаний стало подтверждение факта, что средняя температура является для определения надёжности не менее важным параметром, чем ее перепад.

Цифры, полученные в ходе тестов, позволили создать математическую модель, описывающую связь количества термоциклов до отказа N_f с перепадом температуры и средней температурой кристалла $T_m = T_{min} + \Delta T_j/2$. Эта модель, конечно, является приблизительной, она не может принять во внимание все процессы, происходящие в структуре модуля при воздействии термомеханических напряжений. Тем не менее при создании модели основные физические механизмы были учтены: зависимость пластической деформации от ΔT и влияние T_m на свойства материалов. Полученные графики предоставляют возможность определить, что между количеством термоциклов до отказа силового модуля и градиентом тем-

пературы существует степенная зависимость. Выяснилось, что кривые, отображающие данную зависимость при различных значениях T_m , расположены почти параллельно, что позволяет описать их в соответствии с законом Аррениуса. Комбинация обоих математических приближений разрешает определить N_f следующим образом:

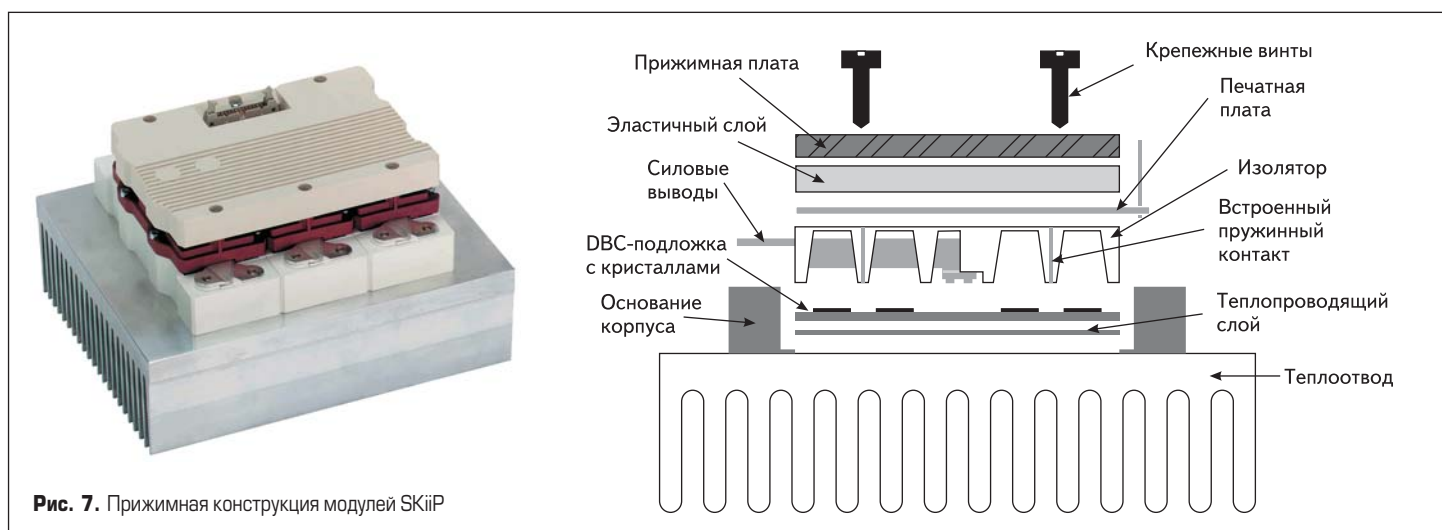
$$N_f = A \times \Delta T_j^\alpha \times \exp\left(\frac{Q}{R \times T_m}\right),$$

- $R = 8,314$ Дж/К моль (газовая постоянная);
- $A = 640$ (специфическая константа);
- $\alpha = -5$;
- $Q = 7,8 \times 10^4$ Дж моль⁻¹.

Данная описательная модель считается достаточно достоверной в рамках проведенных LESIT экспериментов, то есть при $30 \text{ K} < \Delta T < 80 \text{ K}$ и периоде цикла, не превышающем 10 с. Однако для реальных транспортных режимов эксплуатации характерны медленные термоциклы, образуемые изменяемыми условиями нагрузки и внешней среды. Как было сказано, термоциклы длительностью 30–60 с приводят в первую очередь к развитию усталостных процессов в паяном соединении DBC-керамики и медного основания силового модуля.

Исследованиями отказов, вызванных тепловыми циклами, много лет занимается компания Semikron. В соответствии со статистикой отказов именно разрушение соединительного слоя керамической платы и медного основания является основной причиной выхода из строя модулей, работающих в транспортных применениях. Для исключения возможности таких отказов в начале 1990 г. в компании Semikron была разработана прижимная технология производства силовых модулей (pressure contact technology), при которой отпадает необходимость в базовой плате и ее паяном соединении. Особенности этой технологии посвящено достаточно много статей [4, 5].

Тепловой контакт всех сопрягаемых слоев модуля SKiiP (рис. 7), в первую очередь DBC-платы и радиатора, достигается за счет прижима. Усилие прижима распределяется таким образом, чтобы обеспечить наиболее стабильный тепловой контакт в местах установки чипов силовых транзисторов. Поскольку



жесткий контакт между слоями отсутствует, при возникновении линейных перемещений DBC-плата «плавает» по слою теплопроводящей пасты, не испытывая механических напряжений. Соответственно, размер DBC-платы оказывается практически не ограниченным, что позволяет получить максимально высокие значения плотности мощности. Кроме того, появляется возможность использовать различные материалы керамики для DBC-платы. Напомним, что нитрид алюминия AlN имеет очень хорошую теплопроводность и изоляционные свойства, но согласование его КТР с медью хуже, чем у оксида алюминия. Однако в модулях прижимной конструкции этот параметр уже не оказывает влияния на надежность.

Для подтверждения высокого уровня надежности Semikron подвергает свои изделия многочисленным жестким испытаниям. Виды и условия выполнения сертификационных тестов указаны в таблице 4. Периодически проводятся испытания некоторого количества модулей до полного отказа (end-of-life test) при подаче многократных импульсов мощности. В ходе данного теста собирается статистика отказов, а на основе полученных данных вычисляется ожидаемое время отказа 1 и 50% изделий.

Сравнение значений, полученных по программе LESIT и экстраполированных для корректного сопоставления с результатами статистического анализа испытаний модулей прижимной конструкции показало, что в одинаковых температурных условиях вероятность отказа модулей, производимых по технологии SKiiP, ниже, чем у модулей стандартной конструкции. Сказанное иллюстрируется графиками, приведенными на рис. 8. Эшоры показывают зависимость количества термоциклов до полного отказа модулей с медной базовой платой (по данным испытаний в рамках программы LESIT) и модулей прижимной конструкции (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.

Изгиб в средней части красного графика объясняется переходом между двумя основными механизмами отказа при низких и высоких градиентах температуры термоцикла. Для повышения стойкости модулей к «коротким» циклам технологи Semikron стараются по возможности вместо кристаллов большой площади использовать параллельное соединение менее мощных чипов. Специальные тесты, проводимые в течение трех лет на выборке модулей технологии SKiiP при перепаде температур $\Delta T = 40^\circ\text{C}$, не выявили ни одного отказа. За это время модули подверглись воздействию 20^7 термоциклов.

Заключение

Способность силового ключа выдерживать большое количество термоциклов до отказа является его важнейшей характеристикой, обеспечивающей безотказную работу в течение длительного времени.

Разработка математической модели, учитывающей физические процессы, происходящие

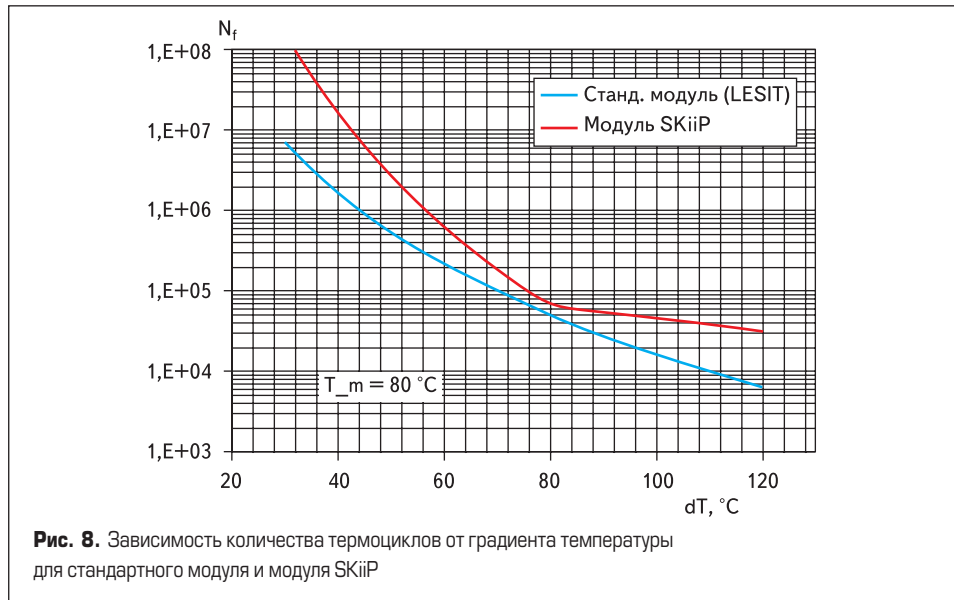


Рис. 8. Зависимость количества термоциклов от градиента температуры для стандартного модуля и модуля SKiiP

Таблица 4. Виды и условия испытаний модулей Semikron

Испытание	Условия испытаний	Испытания до полного отказа	Стандарт
Повышенная температура при повышенном напряжении на коллекторе	$t = 125^\circ\text{C}$ $V_{CE} = 570\text{ В}$ $Tt = 1000\text{ ч}$		IEC 60747-9
Повышенная температура при повышенном напряжении на затворе	$t = 125^\circ\text{C}$ $V_{CE} = 20\text{ В}$ $Tt = 1000\text{ ч}$		IEC 60747-9
Повышенная температура хранения	$t = 125^\circ\text{C}$ $Tt = 1000\text{ ч}$		IEC 68-2-2
Пониженная температура хранения	$t = -40^\circ\text{C}$ $Tt = 1000\text{ ч}$		IEC 68-2-1
Повышенная влажность	$t = 85^\circ\text{C}, H = 85\%$ $V_{CE} = 80\text{ В}$ $Tt = 1000\text{ ч}$		IEC 68-2-3
Перепады температуры	500 циклов $-40/+125^\circ\text{C}$	900 циклов	IEC 68-2-14
Циклическая нагрузка мощностью	20 000 циклов $\Delta t = 125\text{ К}$	30 000 циклов	IEC 60747-9
Вибрация, удары	5 г/100 циклов/(20–500) Гц 30 г/18 мс/ 6 ударов		IEC 68-2-6 IEC 68-2-27

в силовых модулях при воздействии термомеханических стрессов, позволяет понять и описать механизм отказа, выработать рекомендации по улучшению конструкции модулей. Описанная в статье модель считается достоверной в рамках проведенных LESIT экспериментов, то есть при $30\text{ К} < \Delta T < 80\text{ К}$. С помощью модели, используя экстраполяцию, можно получить достаточно корректные результаты и за пределами указанной области.

Испытания с использованием коротких термоциклов позволяют определить стойкость к термоциклированию алюминиевых выводов и зоны металлизации кристаллов. Однако для реальных транспортных режимов эксплуатации характерны как быстрые, так и медленные термоциклы, к которым относятся холодные пуски, изменения температуры окружающей среды, а также изменения температуры кристаллов, вызванные переменным характером нагрузки. Термоциклы длительностью 30–60 с прежде всего приводят к разрушению паяного соединения DBC-керамики и медного основания силового модуля.

Технология прижимного контакта SKiiP, разработанная фирмой Semikron, открывает новые возможности производства модулей ши-

рокого диапазона мощности для различных областей применения, связанных с воздействием высоких перепадов температур. Соединение конструктивных элементов модуля с помощью прижима позволяет улучшить электрические и тепловые параметры модулей и при этом повысить их ресурс.

Литература

1. U. Scheuermann. Reliability of Pressure Contacted Intelligent Power Modules. Semikron Elektronik GmbH.
2. M. Held, P. Jacob, G. Nicoletti, P. Scacco, M. H. Poeh. Fast power cycling test for IGBT modules in traction application. Proc. Power Electronics and Drive Systems, pp.425–430, 1997.
3. U. Scheuermann, U. Hecht. Power Cycling Lifetime of Advanced Power Modules for Different Temperature Swing. Semikron Elektronik GmbH.
4. Колпаков А. Обеспечение надежности интеллектуальных силовых модулей // Электронные компоненты. 2003. № 4.
5. Колпаков А. Сколько интеллекта нужно модулю? (SKiiP против IPM) // Электронные компоненты. 2004. № 9–10.