

УДК 665.637.88

В. В. Верёвкин, К. А. Волобуев, С. Л. Стригунов
АО «Протон-Электротекс»

А. П. Пилипенко, В. А. Лобанова
ФГБОУ ВО «ОГУ им. И. С. Тургенева»

Механизмы отказов IGBT-модулей при испытании в режиме электротермоциклирования

Исследованы основные механизмы деградации компонентов и соединительных интерфейсов силовых IGBT-модулей паяной конструкции при испытании в режиме электротермоциклирования. Разработаны классификации и схемы появления и развития механизмов деградации компонентов силовых IGBT-модулей паяной конструкции, включающие причины их возникновения и индикаторы обнаружения. Подготовлен и проведен эксперимент с целью исследования влияния режима циклирования на степень нагрузки различных элементов конструкции макетных образцов IGBT-модулей. По результатам испытаний в режиме короткого и длинного электротермоциклирования построены зависимости напряжения насыщения коллектор-эмиттер от количества циклов, позволяющие определять доминирующий механизм деградации исследуемого прибора в случае отсутствия данных о режиме его испытания или эксплуатации без необходимости проведения дополнительных диагностических мероприятий.

Силовые IGBT-модули паяной конструкции, ресурсные испытания, механизмы отказов, электротермоциклирование, усталость припоя, разрушение сварных соединений, реструктуризация металлизации кристалла, деламинация подложки

В процессе разработки силовых полупроводниковых приборов следует ориентироваться не только на требования к технологичности, себестоимости и желаемым характеристикам разрабатываемого прибора, но и на его ожидаемую наработку до отказа. Прогнозируемые значения показателей надежности полупроводниковых приборов обеспечивают возможность оценки надежности преобразовательного устройства в целом. Для объективной оценки ресурса полупроводниковых модулей необходимо изучить особенности процессов деградации, происходящих в модуле во время его работы. В данной статье рассмотрены основные механизмы, обуславливающие разрушение компонентов силовых IGBT-модулей паяной конструкции и приводящие к их окончательному отказу. В нормальных условиях эксплуатации срок службы IGBT-модулей составляет около 10...12 лет, поэтому для изучения механизмов отказа были проведены ускоренные испытания модулей.

Конструктивно паяные IGBT-модули модификации НВ (от *англ.* Half-Bridge – полумост) представляют собой несколько соединенных между собой механически и электрически «слоев». Сверху вниз это, как правило, контакты управления и силовые шины, соединения поверхностного монтажа, полупроводниковые кристаллы транзисторов и диодов, паяные или синтершвы кристалл-подложка, подложки DBC (Direct Bond Copper – керамическая подложка, покрытая медью с двух сторон, предназначенная для обеспечения электрической прочности изоляции прибора, отвода тепла от активных элементов и формирования топологии), паяный шов подложка-основание и само основание для отвода тепла от активных элементов. Управление активными элементами модуля – полупроводниковыми кристаллами – осуществляется через контакты управления и силовые шины. Схематично «слои» описываемых в данной статье приборов изображены на рис. 1, где алюминиевые проводники (разварка)

соединяют кремниевые кристаллы с соответствующими дорожками DBC-подложки. Паяные соединения кристаллов с подложкой и подложки с медным основанием выполнены при помощи бессвинцового серебросодержащего припоя. Для присоединения алюминиевых проводников к кристаллам поверхность кремния покрыта слоем алюминия – металлизацией. В соответствии с принятыми стандартами объем испытаний IGBT-модулей на надежность включает в себя испытания в трех режимах – термоциклирование [1], работу в «ждушем» режиме [2] и электротермоциклирование [2], причем именно режим электротермоциклирования (ЭТЦ), с одной стороны, наиболее полно соответствует реальным режимам эксплуатации, а с другой – обеспечивает максимальную степень усталостных явлений в конструкции модулей. При включении и выключении активных элементов модуля в каждом цикле происходит перепад температуры до заданных крайних значений, которые для обеспечения требуемой точности контролируются по термочувствительному параметру (ТЧП) [3].

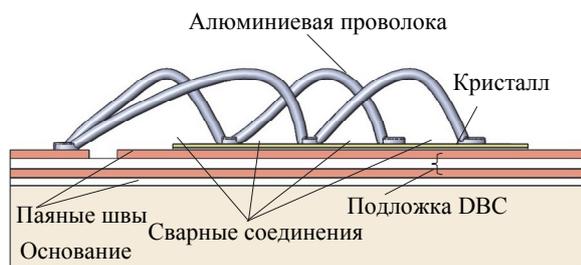


Рис. 1

Циклические изменения температуры внутренних компонентов модуля обуславливают возникновение в элементах конструкции термомеханических напряжений ввиду существенного различия коэффициентов температурного расширения (КТР) компонентов модуля: так, например, КТР алюминия, из которого выполнены алюминиевые проводники и металлизация полупроводниковых кристаллов кремния, примерно в 9 раз выше КТР самого кремния [4]. Возникающие термомеханические напряжения напрямую способствуют запуску и развитию деградаций внутренних компонентов и соединительных интерфейсов модуля. В первую очередь разрушающему воздействию подвержены паяные, сварные соединения и металлизация полупроводниковых кристаллов [5]. Стоит отметить, что ресурс модуля в целом определяется деградационными явлениями и последующим отказом наиболее ненадеж-

ного элемента (например, кристалла или соединительной проволоки). При этом обычно состояние данного элемента не исследуется до тех пор, пока он не выйдет из строя, после чего выявление ответственного за разрушение модуля компонента значительно затрудняется или становится невозможным благодаря финальным стадиям отказа, приводящим, например, к возгоранию некоторых деталей, взрывам, расплавлению компонентов [6], [7].

Элемент конструкции модуля, подвергающийся наибольшему деградационным явлениям, зависит, главным образом, от режима циклирования, в особенности от длительности цикла [8]. Это связано с тем, что с увеличением длительности цикла перепад температур воздействует на более «глубокие» элементы конструкции или их интерфейсы, подвергая их влиянию термомеханических нагрузок. При короткой длительности циклов наибольшей степени деградации подвергаются «верхние» элементы конструкции и их интерфейсы, а воздействие нагрузок на «нижние» элементы незначительно.

Таким образом, механизмы деградации силовых IGBT-модулей паяной конструкции в процессе ЭТЦ обусловлены рассогласованностью КТР их внутренних компонентов, воздействием на них термомеханических напряжений. Механизмы деградации можно условно разделить (рис. 2) на связанные с деградацией напряжения насыщения коллектор-эмиттер (разрушение сварных соединений, рекристаллизация металлизации кристалла транзистора) и связанные с деградацией теплового сопротивления (разрушение паяных соединений). Каждому механизму деградации соответствует определенный «индикатор» – электрическая характеристика, изменение которой во времени сигнализирует о работе данного механизма и приближающемся отказе прибора. Так, при разрушении паяных соединений нарушается целостность структуры припоя: может происходить его растрескивание, вспучивание, деламинация припоя и DBC-подложек, что приводит к нарушению теплоотвода от активных элементов или, в случае деламинации DBC, к повреждению керамики. В связи с этим «индикатором» разрушения паяных соединений является увеличение теплового сопротивления (R_T), а в случае расслаивания самих подложек DBC – потеря изолирующих свойств (резкое падение напряжения изоляции $U_{\text{изол}}$). В случае разрушения части сварных соединений (их растрескивания и отрыва, выгорания или даже расплавления) повышающаяся токовая нагрузка на оставшиеся соединения

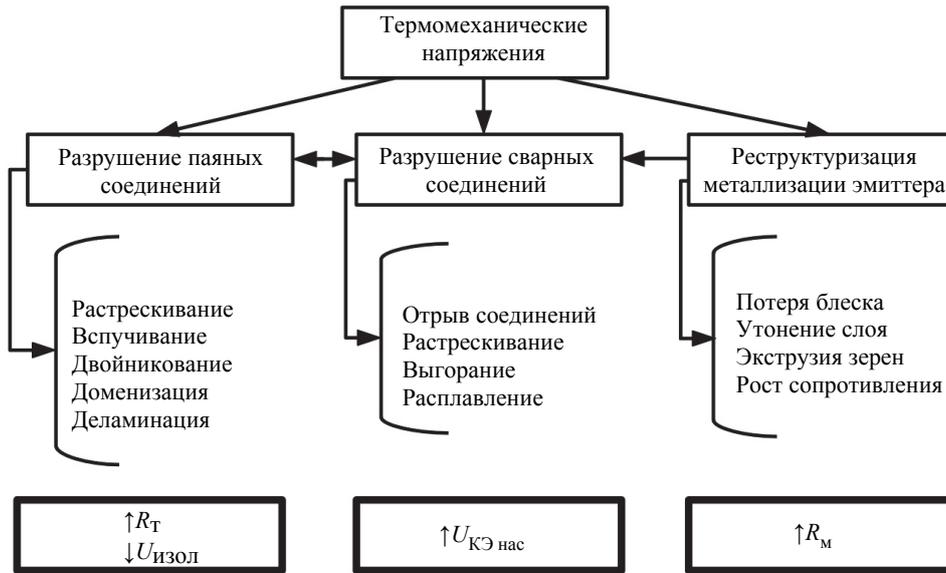


Рис. 2

проявляется ростом напряжения насыщения коллектор-эмиттер ($U_{КЭ\text{ нас}}$). При этом происходит взаимовлияние механизмов отказа: возникновение локальных перегревов в результате разрушения паяных соединений выступает «катализатором» разрушения сварных соединений и наоборот, нарушение токового и температурного распределения по кристаллу в результате разрушения части сварных соединений способствует деградации паяных соединений. Воздействие циклических термомеханических напряжений не обходит стороной и сами кристаллы: процессы рекристаллизации алюминиевой металлизации кремниевых кристаллов приводят к деформации, сдвигу и экструзии зерен, в результате чего толщина слоя металлизации уменьшается, контактное сопротивление металлизации R_M растет, а сама поверхность изменяет свою структуру, способствуя разрушению сварных соединений.

При испытании или эксплуатации модулей в режиме «длинных» циклов с периодом более 10 с наиболее подвержены влиянию термомеханических напряжений паяные соединения. Усталостные явления наблюдаются как в интерфейсе между кристаллами и подложкой, так и в интерфейсе между подложкой и основанием, но в различной степени [7]: паяные соединения под кристаллами нагреваются достаточно быстро, вместе со сварными соединениями и металлизацией кристаллов, в то время как нагрев и остывание паяных соединений подложки с основанием происходит с некоторой задержкой.

Усталость припоя (ползучесть) является вязкопластичным процессом, зависящим от времени и скорости изменения воздействующей термоме-

ханической нагрузки [9]. Помимо рассогласованности КТР компонентов возникновение циклических нагрузок обусловлено особенностями процесса пайки (неравномерная толщина паяного шва, состав сплава припоя) и конструкции прибора (равномерность токовой и тепловой нагрузок между компонентами). В бессвинцовых серебро-содержащих припоях с высоким пределом текучести растрескивание, как правило, зависит не только от пластической деформации, но и от изменений микроструктуры припоя: деформаций и переориентаций кристаллической решетки [10]. Серебро в припое в основном присутствует не в чистом виде, а в виде интерметаллидов Ag_3Sn , располагающихся вокруг границ зерен олова. Под действием термомеханических нагрузок зерна интерметаллидов увеличиваются в размере, ослабляя связь между границами зерен олова. Размер зерен олова при этом также растет, зерна сдвигаются, и на их границах образуются микропустоты. Эти микропустоты и запускают растрескивание припоя вдоль границ зерен [11]. Механизм развития дефектов в паяных соединениях и их влияние на дальнейший отказ прибора иллюстрирует схема на рис. 3.

Возникновение дефектов в паяных соединениях ведет к ухудшению теплоотвода от кристаллов, изменению распределения температуры по поверхности кристаллов, возникновению локальных перегревов [7]. Все это, в свою очередь, увеличивает нагрузку на прилегающие компоненты модуля, в том числе на сварные соединения, и в итоге приводит к отказу прибора [10].

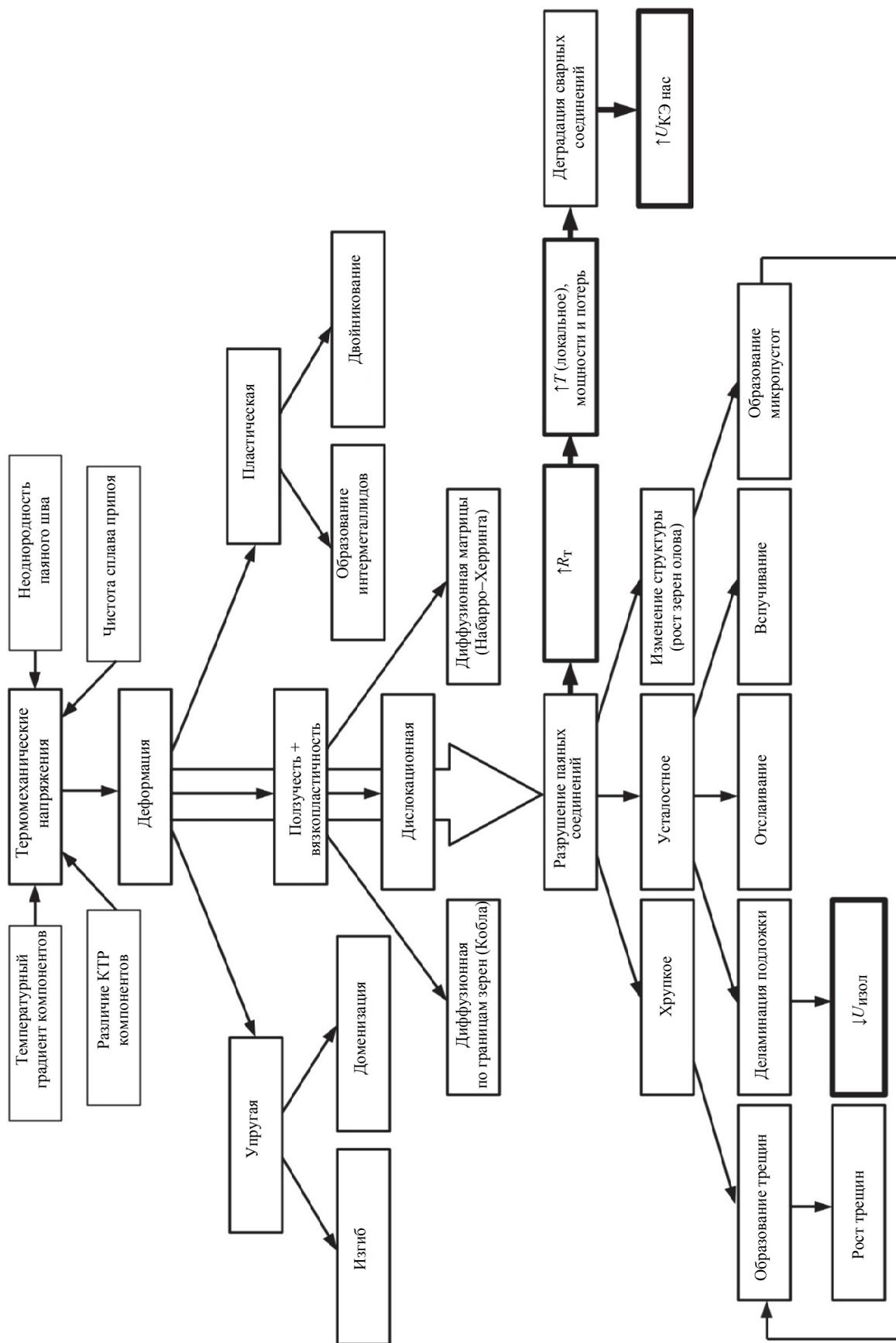


Рис. 3

Усталость и разрушение сварных соединений вызваны повторяющимся воздействием на них напряжений сдвига, обусловленных несогласованностью КТР алюминиевой проволоки и металлизации кристалла ($22...24 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) с КТР структуры кремниевого кристалла ($2...4 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$) [4], [12]. С увеличением числа циклов усилие на срез сварных соединений уменьшается вследствие возникновения растрескиваний в сварных соединениях. Возникновение трещин начинается на наиболее подверженных воздействию напряжений сдвига «хвостиках» и «пятках» сварных точек, где компенсаторные микроперемещения проволоки невозможны, а размер зерен наименьший, и затем распространяется к центру сварного соединения [13]. Следует отметить, что растрескивания изначально проявляются не в самом интерфейсе сварного соединения, а выше – как правило, на границах зерен в объеме проволоки над сварным соединением [14], [15]. Это связано с тем, что прочность на разрыв структуры сварного соединения выше, чем прочность структуры самой проволоки, в соответствии с законом Холла–Петча, согласно которому предел текучести поликристаллического материала увеличивается обратно пропорционально размеру зерна [16]. Из закона Холла–Петча следует, что напряжение сдвига уменьшается по мере удаления от сварного соединения, а значит, на определенном расстоянии от сварного соединения происходит уравнивание ударной вязкости и эффективного напряжения, ограничивающее дальнейшее распространение трещины в вертикальном направлении, и развитие трещины происходит в параллельном кристаллу направлении до полного отрыва сварного соединения [17]. Распространение трещин, в конечном итоге, приводит к отрыву сварного соединения. На кристалле при этом наблюдаются остатки алюминиевой проволоки, свидетельствующие о развитии трещины в объеме проволоки [18], и признаки рекристаллизации металлизации [19]. Появление трещин означает уменьшение площади контактной поверхности алюминиевых проводников с металлизацией кристаллов, увеличение токовой и тепловой нагрузок на проволоку, возникновение локальных перегревов вследствие неравномерности токораспределения между проволоками на кристалле, а также, по «эффекту домино», может привести к выгоранию проволоки при возникновении короткого замыкания вследствие протекания сильного тока на отдельных наиболее нагруженных участках кристалла и их мгновенному нагреву в практически адиабатических условиях [4], [20].

Деградация сварных соединений непосредственно влияет на электрические характеристики прибора: деградация сварных соединений на транзисторе приводит к увеличению напряжения насыщения коллектор-эмиттер ($U_{КЭ \text{ нас}}$), а на диоде – к увеличению прямого падения напряжения U_f . Так, при отрыве 17 % сварных соединений на кристалле транзистора напряжение насыщения коллектор-эмиттер увеличивается на 1 %; при отрыве 33 % сварных соединений – на 2.5 %, 50 % – на 7 %, а такая же степень деградации сварных соединений на диоде приводит к увеличению U_f на 0.5, 1.5 и 3 % соответственно. При этом по достижении деградации 67 % сварных соединений оставшиеся расплавляются в связи с возросшими токовой и тепловой нагрузками [21].

Механизм развития и условно принятые [22], [23] виды разрушения сварных соединений схематично изображены на рис. 4.

Процессы деградации при циклической нагрузке происходят также и на алюминиевой металлизации кристаллов кремния – зернистой поликристаллической структуры толщиной $3...4 \text{ мкм}$ с диаметром зерна менее 1 мкм [17] методом физического осаждения из паровой фазы в сочетании с термическим отжигом [24]. Циклические термомеханические воздействия на материалы с отличающимися КТР (алюминий и кремний), а также напряжения сжатия, воздействующие на металлизацию кристалла в фазе нагрева, приводят к деформации зерен на границе пластичности, экструзии единичных зерен в процессе рекристаллизации металлизации, увеличению контактного сопротивления металлизации, а на участках с наиболее высокой плотностью тока появляется вероятность электромиграции [25]. Электромиграция – это явление переноса вещества в проводнике за счет постепенного дрейфа ионов, возникающее благодаря обмену количеством движения при столкновениях между проводящими носителями и атомной решеткой под воздействием определенного значения плотности тока, чаще всего проходящих вдоль границ зерен [26]. Чаще всего данный процесс возникает в наиболее нагруженных областях с неравномерным температурным распределением, неравномерной структурой или включениями. Электромиграция может создавать пустоты или кластеры, приводящие к увеличению сопротивления или размыканию цепи [27]. Для IGBT-модулей существующих в настоящий момент номиналов электромиграция не является пусковым механизмом отказа, но под воздействием термомеханических нагрузок могут создаваться области с возможностью электромиграции.

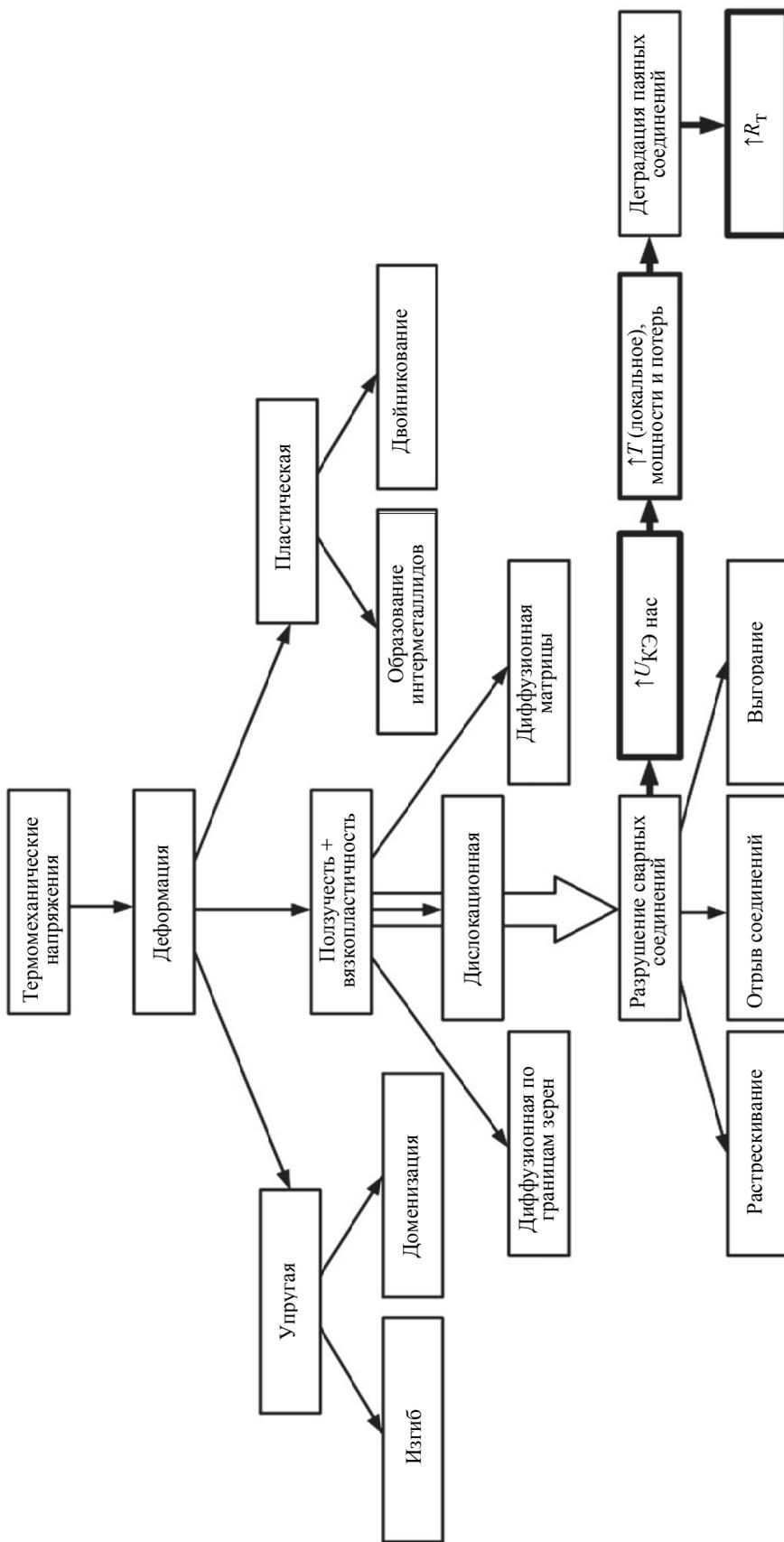


Рис. 4

В фазу охлаждения растягивающее напряжение приводит к эффектам кавитации на границах зерен за пределами упругости и сдвигу зерен. В результате этих процессов металлизация становится шероховатой, тусклой, матовой. Кроме того, данные процессы способствуют увеличению контактного электрического сопротивления металлизации, так как рекристаллизация металлизации кристалла уменьшает плотность контактного слоя. Так как толщина слоя металлизации обычно составляет 3...4 мкм, а сдвиг зерен примерно равен толщине металлизации, то изменение проводимости слоя металлизации значитель-

но [19]. Возросшее контактное сопротивление в свою очередь приводит к разбалансированию токораспределения по кристаллу и локальным увеличениям температуры на его поверхности. Рост контактного сопротивления, потеря контакта металлизации с каналами транзистора, уменьшение толщины металлизации и отрыв сварных соединений приводят к изменению прямого напряжения. Развитие процесса реструктуризации металлизации и его взаимовлияние с другими механизмами деградации в общем виде показано на рис. 5.

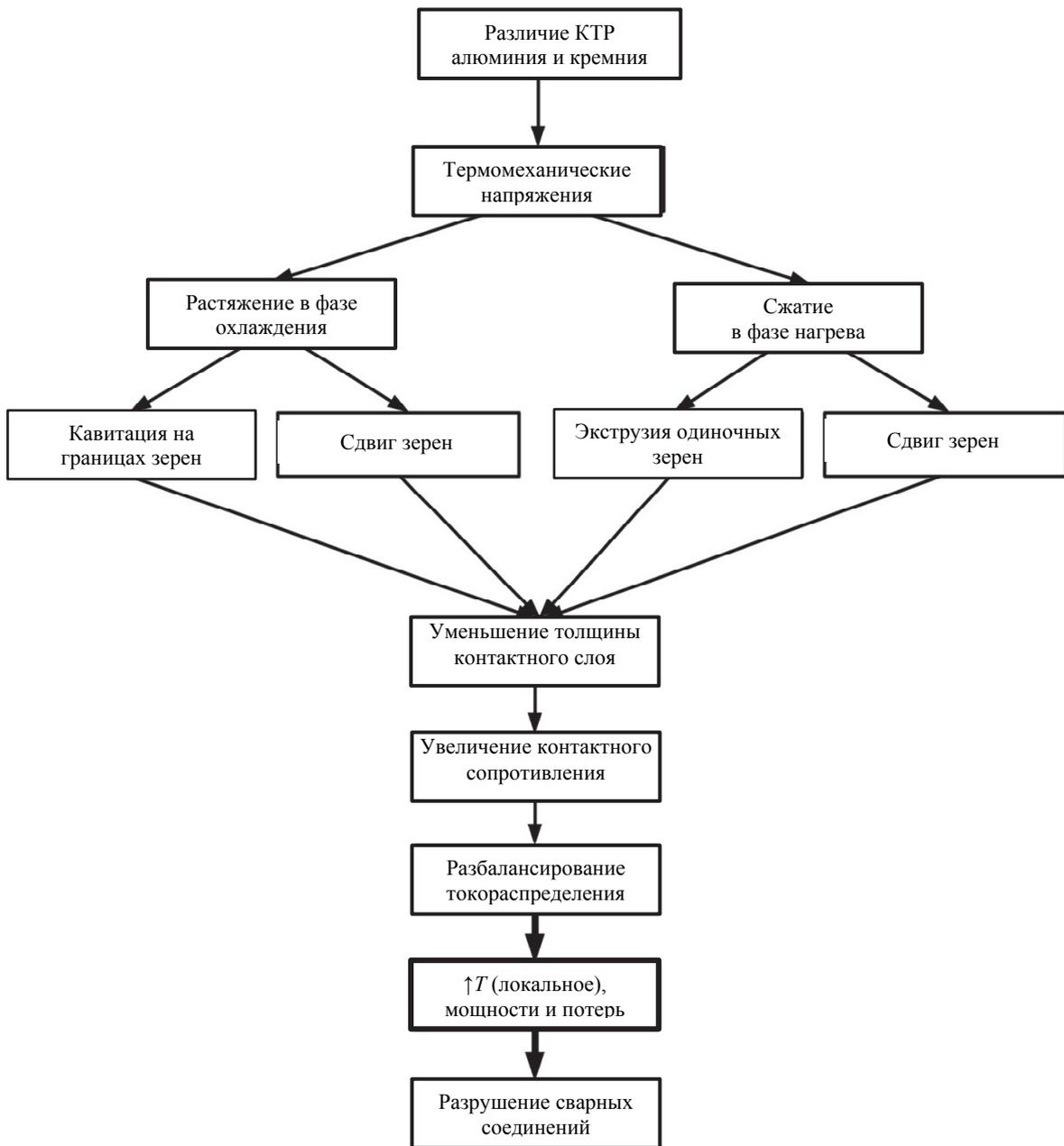


Рис. 5

Таким образом, взаимовлияние механизмов деградации существенно усложняет определение первопричины отказа модуля. Увеличение теплового сопротивления при разрушении припоя приводит к локальным перегревам вплоть до достижения припоем температуры ликвидуса и дальнейшего перехода к температуре солидуса, вследствие чего припой становится особенно хрупким и склонным к растрескиванию даже при незначительном механическом воздействии. Это, в свою очередь, приводит к увеличению локального электрического сопротивления и возникновению локальных перегревов кристалла, провоцирующих разрушение сварных соединений [28]. С другой стороны, разрушение сварных соединений, сопровождающееся увеличением напряжения насыщения коллектор-эмиттер в совокупности с постоянно возрастающими потерями и ростом температуры кристалла, приводит к росту термомеханических нагрузок в паяных соединениях. При этом ускорить, а при определенных условиях даже запустить процесс разрушения прибора может и реструктуризация металлизации эмиттера.

Основной механизм отказа зависит, главным образом, от выбранного режима испытания либо эксплуатации, регулирующего степень нагрузки элементов конструкции прибора [29]. В имеющихся исследованиях процессы деградации были рассмотрены по отдельности, однако определению коренной причины отказа не уделялось должного внимания. В связи с этим в описываемом исследовании был поставлен эксперимент, целью которого явилось выявление особенностей деградации компонентов модуля, однозначно указывающих на первичный механизм отказа.

Для проведения эксперимента были подготовлены и испытаны в режиме коротких и длинных электротермоциклов макетные образцы IGBT-модулей паяной конструкции. В процессе испытания с целью оценки степени деградации компонентов испытываемых образцов производился мониторинг напряжения насыщения коллектор-эмиттер при протекании силового тока и перепаде температуры ΔT транзисторных чипов, определяемом по термочувствительному параметру.

В режиме коротких циклов распределение температуры по элементам конструкции не достигает стационарного состояния благодаря выбранной длительности цикла, равной 4 с для об-

разцов испытываемой конструкции (длительность нагрева и длительность охлаждения равны 2 с). Таким образом, процессы деградации развиваются прежде всего в тех элементах конструкции, в которых максимален перепад температуры за один цикл, а именно в соединениях поверхностного монтажа. По результату мониторинга после завершения испытания в режиме коротких ЭТЦ был построен график зависимости $U_{КЭ\text{ нас}}$ и ΔT от количества циклов (рис. 6).

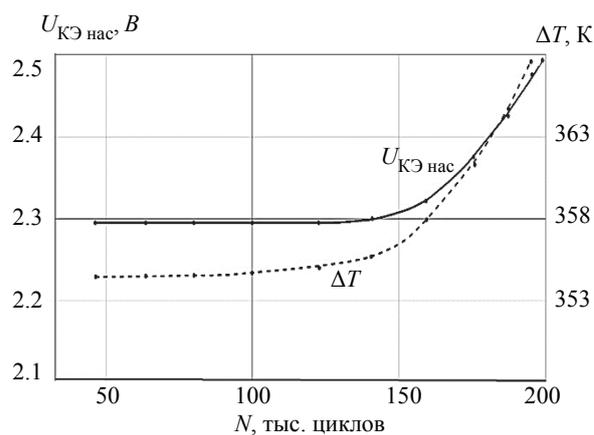


Рис. 6

Рост значений $U_{КЭ\text{ нас}}$ свидетельствует о деградации соединений поверхностного монтажа, а увеличение перепада температуры – повышение температуры перегрева транзисторной структуры при том же уровне греющего тока – обусловлено как деградацией сварных точек, приводящей к росту рассеиваемой мощности, так и деградацией паяного шва, приводящей к ухудшению теплоотвода от транзисторного чипа.

Таким образом, по результатам эксперимента основным механизмом отказа в режиме коротких ЭТЦ является деградация сварных соединений кристаллов транзисторов. Акустическое изображение типичного образца после испытания в режиме коротких ЭТЦ приведено на рис. 7.

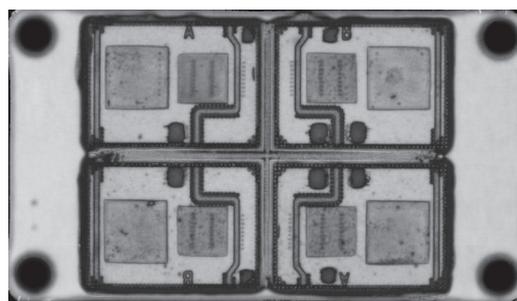


Рис. 7

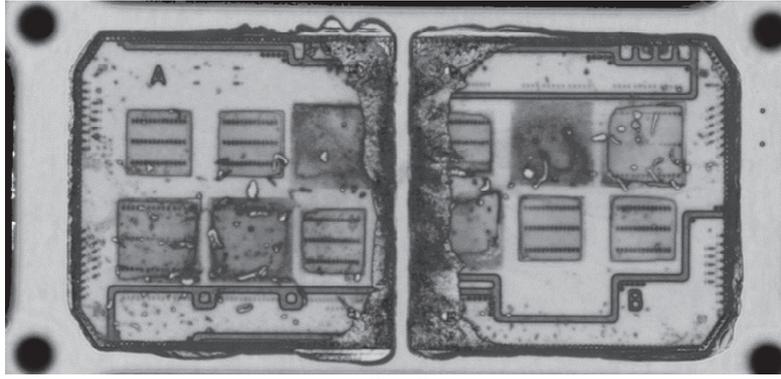


Рис. 8

В режиме длинных ЭТЦ выбранная длительность цикла (по 40 с для нагрева и охлаждения) обеспечила прогрев всех слоев макетных образцов испытуемой конструкции, включая ДВС и паяные швы под ними. На акустических изображениях макетных образцов после испытания (рис. 8) отчетливо видно, что наименее надежным элементом, запустившим механизм деградации, в данном случае являются магистрали медных проводников, соединяющие ДВС в центральной части модуля. Микродвижения медных проводников привели к деламинеции ДВС, а та, в свою очередь, – к деградации паяных швов под кристаллами. Разрушение паяных швов вызвало рост теплового сопротивления и локальные перегревы кристалла, которые, в свою очередь, привели к разрушению соединений поверхностного монтажа кристаллов транзисторов. Видимые разрушения включают в себя помутнение и разрушение металлизации эмиттера, локальные перегревы кристалла под сварными точками и точечное расплавление проволоки (рис. 9). По результату мониторинга после завершения испытания в режиме длинных ЭТЦ был построен график зависимости $U_{КЭ\text{ нас}}$ от количества циклов (рис. 10).

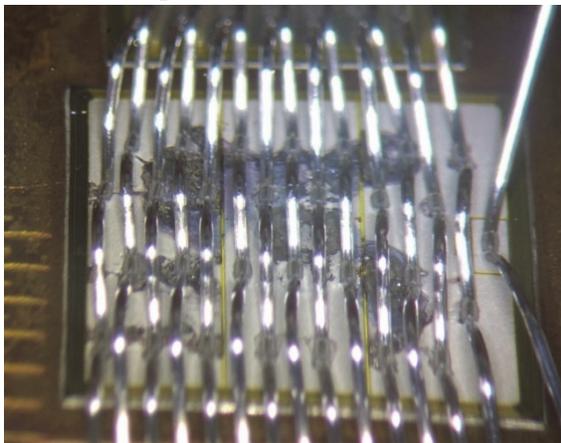


Рис. 9

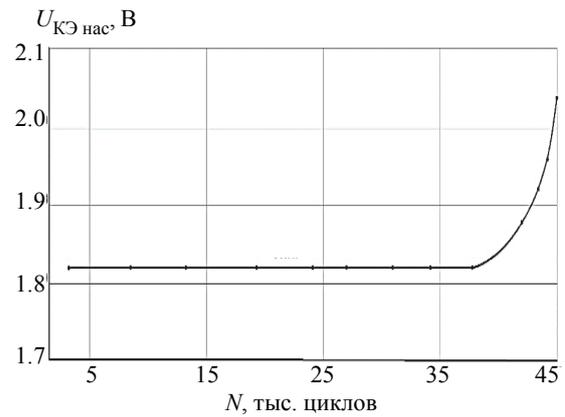


Рис. 10

При переводе полученных графиков зависимости $U_{КЭ\text{ нас}}$ от количества коротких и длинных циклов в процентный масштаб (рис. 11) видно, что $U_{КЭ\text{ нас}}$ при испытании в режиме коротких ЭТЦ начинает деградировать примерно с 60 % от 100 % циклов, соответствующих отказу, а при испытании в режиме длинных ЭТЦ деградация $U_{КЭ\text{ нас}}$ начинается примерно с 75 % циклов. Это связано с тем, что, как уже отмечалось, в режиме коротких ЭТЦ наибольшая нагрузка приходится на сварные соединения, а деградация сварных соединений напрямую вызывает деградацию напряжения насыщения коллектор-эмиттер, что и видно из рис. 11. При испытании в режиме длинных циклов наибольшая нагрузка первоначально воздействует на паяные соединения, деградация которых определяется увеличением теплового сопротивления, а уже затем разрушенные паяные соединения вызывают деградацию сварных соединений – более позднюю в относительном масштабе по сравнению с коротким циклированием. Исходя из полученного результата, по характеру зависимости $U_{КЭ\text{ нас}}$ от количества циклов в процентном масштабе можно определить

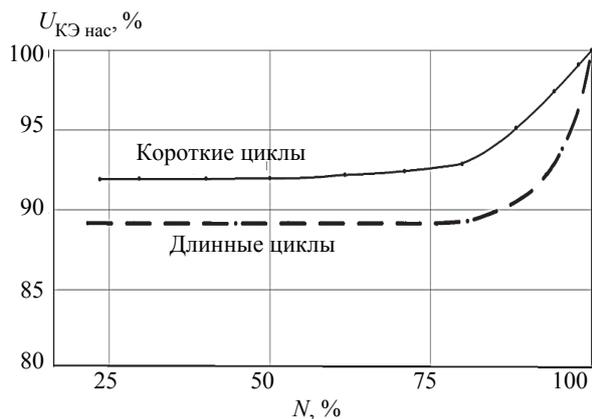


Рис. 11

доминирующий механизм отказа прибора: при деградации паяных соединений она будет соответствовать нижней кривой на рис. 11, а при деградации сварных соединений – верхней кривой. Перевод осей в процентный масштаб более показателен для испытаний с различной длительностью циклирования: по горизонтальной оси выравниваются масштабы количества циклов N для «длинного» и «короткого» ЭТЦ, а по вертикальной оси перевод $U_{КЭ\text{ нас}}$ в процентный масштаб также сглаживает разницу между изначальными значениями $U_{КЭ\text{ нас}}$, что позволяет провести более корректное сравнение.

Из рис. 11 видно, что зависимость $U_{КЭ\text{ нас}}$ можно разбить на 2 участка: 1) область постоянства $U_{КЭ\text{ нас}} = \text{const}$ до начала деградации компонентов модуля под воздействием термомеханических нагрузок и 2) экспоненциальный рост $U_{КЭ\text{ нас}}$. Также можно заметить разницу в скорости возрастания $U_{КЭ\text{ нас}}$ для коротких и для длинных циклов. Полученные с помощью метода наименьших квадратов [30] уравнения экспоненциальной регрессии для длинных и коротких циклов соответственно (по данным эксперимента в процентном выражении) имеют вид:

$$y = e^{4.3224 + 0.0028x}, \quad (1)$$

$$y = e^{3.3869 + 0.0121x}. \quad (2)$$

Таким образом, первичный механизм отказа можно определить также с помощью показателя степени уравнения экспоненциальной регрессии, полученного по экспериментальным данным. Итак, если слагаемое в показателе степени экспоненты в законе распределения отказов больше 4, а

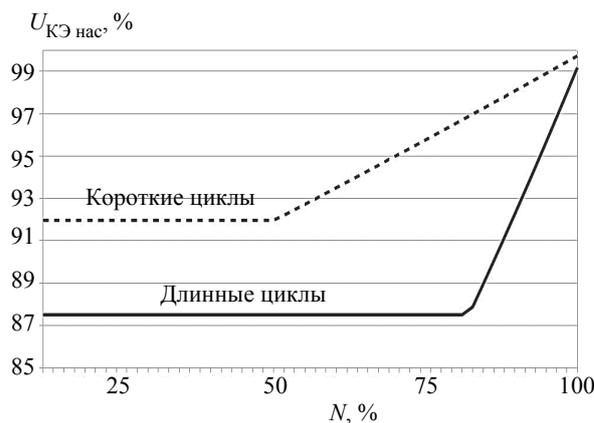


Рис. 12

множитель переменной порядка $2.8E-3$, то основным механизмом деградации, приводящим к отказу прибора, является деградация припоя, а если слагаемое в показателе степени экспоненты меньше 4, а множитель переменной порядка $1.2E-2$, то основным механизмом деградации является разрушение сварных соединений.

Отмеченная тенденция хорошо иллюстрируется графиками на рис. 12, построенными по уравнениям (1) и (2).

В результате исследования:

1. Рассмотрены и классифицированы основные механизмы усталостной деградации IGBT-модулей паяной конструкции при циклическом воздействии термомеханических напряжений.
2. Определено влияние длительности цикла на первичный механизм деградации.
3. Выявлено, что при первичном влиянии на отказ деградации припоя (при «длинных» циклах) возрастание $U_{КЭ\text{ нас}}$ начинается позже примерно на 15 % по сравнению с первичным развитием деградации сварных соединений (при «коротких» циклах), но происходит стремительнее.
4. Получены экспоненциальные уравнения регрессии деградации $U_{КЭ\text{ нас}}$ от количества циклов в процентном масштабе для «длинных» и «коротких» циклов, позволяющие определять первичный механизм отказа аналитически с помощью показателя степени экспоненты полученного уравнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 20.57.406–81. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. М: Изд-во стандартов, 2005. 133 с.
2. ОСТ 16 0.801.464–88. Приборы полупроводниковые силовые. Методы испытаний на надежность. URL: <http://www.docum.ru/ost.asp?id=259635> (дата обращения 12.07.20)
3. Колпаков А. И. Методы оценки надежности силовых модулей IGBT Semikron в предельных режимах // Силовая электроника. 2004. № 1. С. 40-45.
4. Ciappa M. Selected failure mechanisms of modern power modules // *Microelectronics reliability*. 2002. Т. 42, № 4–5. P. 653–667.
5. Wuchen W. Investigation on the long term reliability of power IGBT modules / W. Wuchen, M. Held, P. Jacob, P. Scacco, A. Birolini // *Proc. of The 7th Intern. Symp. on Power Semiconductor Devices & ICs ISPSD'95*. Tokyo, Japan, 1995. P. 443–448.
6. Interface degradation of Al heavy wire bonds on power semiconductors during active power cycling measured by the shear test / J. Goehre, M. Schneider-Ramelov, U. Geissler, K. Lang // *6th Intern. Conf. on Integrated Power Electronics Systems CIPS 2010*. Nuremberg, Germany, 2010. P. 3–4.
7. Power cycling testing and fe modelling focussed on Al wire bond fatigue in high power IGBT modules / O. Schilling, M. Schfer, K. Mainka, M. Thoben, F. Sauerland // *Microelectronics Reliability*. 2012. № 52. P. 2347–2352.
8. Sarkany Z., Vass-Varnai A., Rencz M. Effect of power cycling parameters on predicted IGBT lifetime // *2015 IEEE Aerospace Conf. Montana, USA, 2015*. P. 1–9.
9. Wang G. Z. Applying Anand model to represent the viscoplastic deformation behavior of solder alloys / G. Z. Wang, Z. N. Cheng, K. Becker, J. Wilde. // *J. of Electronic Packaging*. 2001. № 123. С. 247–253.
10. Morozumi A., Yamada K., Miyasaka T. Reliability design technology for power semiconductor modules // *Fuji Electric Review*. 2001. Vol. 47, № 2. P. 54–58.
11. Reliability of power cycling for IGBT power semiconductor modules / A. Morozumi, K. Yamada, T. Miyasaka, Y. Seki // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2003. Т. 39, № 3. P. 665–671.
12. Evaluation of Vce monitoring as a real-time method to estimate aging of bond wire-IGBT modules stressed by power cycling / V. Smet, F. Forest, J. Huselstein, A. Rashed, F. Richardeau // *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*. 2013. Vol. 60, № 7. P. 2760–2770.
13. Rasmus Ø. N., Due J., Munk-Nielsen S. Innovative measuring system for wear-out indication of high power IGBT modules // *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Phoenix, USA, 2011*. P. 1785–1790.
14. Prediction of Short-Circuit-Related Thermal Stress in Aged IGBT Modules / A. S. Bahman, F. Iannuzzo, C. Uhrenfeldt, F. Blaabjerg, S. Munk-Nielsen // *Proc. of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, US, 2016*. P. 1–7.
15. An overview of the reliability prediction related aspects of high power IGBTs in wind power applications / C. Busca, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, S. Munk-Nielsen, L. Helle, T. Abeyasekera, P. Rodriguez // *Microelectronics Reliability*. 2011. № 51. P. 1903–1907.
16. Соотношение Холла–Петча. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 14.10.2020)
17. Pedersen K. B. IGBT module reliability. Physics-of-failure based characterization and modelling: PhD Thesis. Aalborg University, Denmark, 2014. 214 с.
18. Interface degradation of Al heavy wire bonds on power semiconductors during active power cycling measured by the shear test / J. Goehre, J. Goehre, M. Schneider-Ramelov, U. Geißler, K. D. Lang // *Proc. on Integrated Power Electronics Systems*. 2010. № 3–4. P. 1–6.
19. Packaging and reliability of power devices / J. Lutz, H. Schlangenotto, U. Scheuermann, R. Doncker // *Semiconductor Power Devices*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010. P. 343–418. URL: https://www.researchgate.net/publication/323222434_Packaging_of_Power_Devices (дата обращения 19.07.20)
20. Ciappa M., Castellazz A. Reliability of high-power IGBT modules for traction applications // *Reliability physics symposium*. San Jose, USA, 2007. P. 480–485.
21. In situ diagnostics and prognostics of wire bonding faults in IGBT modules for electric vehicle drives / B. Ji, V. Pickert, W. Cao, B. Zahawi // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013. Т. 28, № 12. P. 5568–5577.
22. Ageing and failure modes of igbt modules in high-temperature power cycling / V. Smet, F. Forest, J.-J. Huselstein, F. Richardeau, Z. Khatir, S. Lefebvre, M. Berkani // *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*. 2011. Vol. 58, № 10. P. 4931–4941.
23. Investigation of the heel crack mechanism in Al connections for power electronics modules / Y. Celnikier, L. Benabou, L. Dupont, G. Coquery // *Microelectronics Reliability*. 2011. Vol. 51, № 5. P. 965–974.
24. *Semiconductor Power Devices – Physics* / J. Lutz, U. Scheuermann, H. Schlangenotto, R. D. Doncker // *Characteristics. Reliability*. Springer-Verlag. 2011. Vol. 2.
25. Rudzki J. Power modules with increased power density and reliability using Cu wire bonds on sintered metal buffer layers // *8th Intern. Conf. on Integrated Power Electronics Systems CIPS 2014, Nuremberg, 2014*. P. 1–6.
26. Electromigration challenges for advanced on-chip Cu interconnects / B. Li, C. Christiansen, D. Badami, C.-C. Yang // *Microelectronics Reliability*. 2014. Vol. 54, № 4. P. 712–724.
27. McPherson J. W. *Reliability Physics and Engineering – Time-To-Failure Modeling*. Springer-Verlag, 2010.
28. Numerical prediction of solder fatigue life in a high power IGBT module using ribbon bonding / I. W. Suh, H. S. Jung, Y. H. Lee, S. H. Choa // *J. of Power Electronics*. 2016. Vol. 16, № 5. P. 1843–1850.

29. Испытания многокристалльных IGBT-модулей на стойкость к циклическому воздействию силового тока / В. В. Веревкин, С. Л. Стригунов, А. П. Пилипен-

ко, К. А. Волобуев, В. А. Лобанова // Изв. вузов. Приборостроение. 2020. Т. 63, № 5. С. 451–459.

30. Метод наименьших квадратов. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения 16.10.2020)

V. V. Verevkin, K. A. Volobuev, S. L. Strigunov
JSC «Proton-Electrotex»

A. P. Pilipenko, V. A. Lobanova
Orel State University named after I. S. Turgenev

IGBT MODULES FAILURE MECHANISMS DURING POWER CYCLING TEST

Investigates the main failure mechanisms of the components and interfaces of the soldered power IGBT modules during power cycling test. The authors present classifications and schemes of the appearance and development of degradation mechanisms of components in soldered power IGBT modules, including the causes of their occurrence and detection indicators. An experiment was prepared and carried out to study the influence of the cycling mode on the structural elements degradation of IGBT modules prototypes. Based on the test results in the short and long power cycling mode, the dependences of the collector-emitter saturation voltage on the number of cycles are plotted. The novelty of the paper lies in these dependences, allowing to determine the dominant degradation mechanism of the investigated device in the absence of data on the mode of its testing or operation without the need for additional diagnostic measures. Soldered IGBT

Soldered IGBT power modules, reliability tests, failure mechanisms, power cycling test, solder fatigue, bond wire fatigue, chip surface reconstruction, substrate delamination

1820–2020

Посвящена двухсотлетию
электромеханики

УДК 621.313

М. А. Ваганов, К. А. Колупицкий
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Краткий исторический обзор технической информации по проектированию турбогенераторов

Проектирование турбогенератора (ТГ) представляет собой достаточно сложную в инженерном смысле задачу, в ходе решения которой должны быть даны ответы на целый ряд вопросов разного физического содержания: электромагнитный расчет, выбор активных, конструкционных и электроизоляционных материалов ТГ, механический расчет и конструктивное оформление ТГ, его тепловой расчет. Только удачное решение всех перечисленных разноплановых задач сможет обеспечить высокие технико-экономические показатели этих электрических машин, их надежность в течение всего срока службы и длительность срока службы. Эксплуатация подобных гигантов отечественной электроэнергетики как у нас, так и за рубежом подтвердила их высокую и эффективную работоспособность. Образно выражаясь, можно сказать, что в свое время были созданы ТГ, часть которых заслуживает того, чтобы быть названными научно-техническими шедеврами, достойными их экспонирования на выставках и в музеях мира.

Турбогенератор, методы расчета и проектирования, машинная постоянная и ее физическая трактовка, критерии расчета

Более ста лет тому назад – в конце 10-х– начале 20-х гг. XX в., практически одновременно

с началом широкого промышленного применения электрических машин, появились первые методи-