

Режим повторяющегося короткого замыкания в Trench IGBT-структурах

Бернт ГУТСМАН (Bernd GUTSMANN)
 Петер КАНШАТ (Peter KANSCHAT)
 Марк МЮНЦЕР (Mark MÜNZER)
 Манфред ПФАФФЕНЛЕНЕР
 (Manfred PFAFFENLEHNER)
 Томаш ЛАСКА (Thomas LASKA)

Перевод: Андрей КОЛПАКОВ
 Andrey.Kolpakov@semikron.com

Статья посвящена вопросам обеспечения устойчивости модулей IGBT 3-го поколения, выполненных по технологии Trench FS, к короткому замыканию (КЗ). Описаны механизмы отказа модулей, приведены методы оптимизации структуры кристаллов, позволяющие повысить их стойкость к КЗ. Анализ состояния чипов Trench FS в условиях повторяющихся коротких замыканий показал, что количество КЗ, приводящих к повреждению IGBT, экспоненциально зависит от максимальной температуры чипа в конце импульса перегрузки.

Введение

В традиционных для низковольтных IGBT применениях, таких как промышленные приводы, требование обеспечения стойкости к токовым перегрузкам и короткому замыканию — одно из самых важных. По этому показателю NPT (Non Punch Through) IGBT с однородной базой имели очевидные преимущества перед оригинальной эпитаксиальной PT (Punch Through) технологией. Тенденцией последних лет стало развитие вертикальной структуры, получившей название FS (Field Stop) [1, 2], или LPT (Light Punch Through) IGBT [4]. Стремление к снижению стоимости вынуждает производителей кристаллов IGBT непрерывно уменьшать их размеры. Эта тенденция, вызвавшая активное развитие тонкопленочных технологий FS/LPT, представлена на рис. 1.

С появлением 4-го поколения IGBT произошло очередное снижение габаритов чипов, следствием чего стало повышение плотности тока и уровня потерь, что особенно критично в состоянии КЗ. Очевидно, что кристалл меньшего размера имеет меньшую теплоемкость, большее тепловое сопротивление и худшую способность к рассеянию мощности, генерируемой в состоянии перегрузки. Поэтому снижение объема кремния должно сопровождаться уменьшением уровня потерь, в противном случае обеспечить высокую стойкость к КЗ невозможно. Способность чипа IGBT противостоять токам короткого замыкания и соответствующие физические аспекты этого процесса обсуждались в многочисленных публикациях, например [5, 6]. Последние работы Otsuki [2] посвящены предельным возможностям упомянутых вертикальных структур IGBT.

В первой части статьи обсуждаются различные механизмы отказа IGBT в условиях КЗ и объясняется, как эти проблемы решались при разработке 3-го поколения вертикальных кристаллов за счет оптимизации структуры Trench FS ячеек. Для надежной работы модулей IGBT в промышленных применениях важно обеспечить стойкость ключа в условиях повторяющихся коротких замыканий и понять механизм воздействия многократного КЗ на процесс разрушения кристалла. Этот вопрос обсуждается во второй части статьи, в которой также анализируется работа IGBT в различных условиях перегрузки.

Механизмы отказа и оптимизация структуры IGBT

В источнике [7] подробно описаны три механизма отказа в условиях стандартизованного импульса КЗ длительностью 10 мкс:

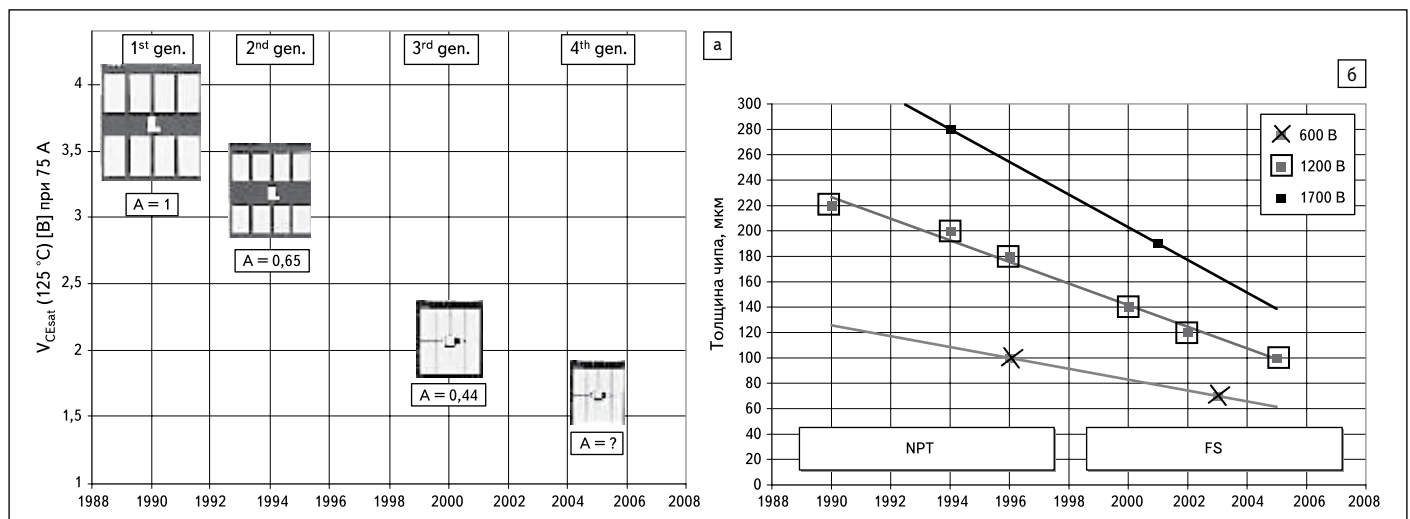


Рис. 1. а) Эволюция размеров чипов и снижение потерь проводимости IGBT (75 А / 1200 В); б) уменьшение толщины кристаллов NPT и Trench FS IGBT

- Разрушение чипа через несколько сотен микросекунд после успешного отключения тока КЗ.
- Разрушение чипа в процессе аварийного отключения.
- Режим «разрушающего КЗ» — повреждение чипа при протекании аварийного тока.

Исследования показали, что процессы 1 и 2 зависят от уровня мощности, рассеиваемой за импульс короткого замыкания. Механизм 3 находится в процессе изучения, однако выявлено, что величина рассеиваемой мощности при этом не влияет на характер отказа. Выход кристалла из строя в данном случае происходит спустя несколько микросекунд после возникновения состояния перегрузки только при высокой плотности тока. Напряжение на DC-шине и рабочая температура при этом могут находиться на номинальном уровне.

Оптимизация архитектуры кристаллов Trench FS IGBT позволила существенно снизить ток самоограничения I_{SC} доведя его до 5-кратного номинального значения, и решить таким образом проблему перегрева чипов при работе механизмов 1 и 2. Напомним, что у NPT IGBT ток КЗ был примерно в 10 раз выше номинального. По сравнению с этими транзисторами структура Trench 3 обеспечивает гораздо более равномерное распространение тепла в теле чипа. Это происходит благодаря «трапецеидальному» (рис. 2) характеру распределения электрического поля в вертикальном кристалле. Для сравнения укажем, что у NPT IGBT распределение поля имеет треугольную форму, при этом основная часть тепла выделяется в области $p-n$ -перехода, вследствие чего при возникновении тока КЗ в этой зоне возникает мгновенный локальный перегрев. В аналогичной ситуации кристалл Trench FS разогревается равномерно, что позволяет ему рассеять высокий уровень энергии без повреждения. Оба упомянутых эффекта — низкий уровень тока самоограничения и трапецеидальное распределение поля — позволяют резко снизить перегрев чипов Trench IGBT, несмотря на меньшие размеры и большую плотность тока. Эти выводы были подтверждены с помощью моделирования, описанного в [7]. Необходимо также отметить, что в структуре Trench полностью устранен эффект защелкивания, наблюдаемый у NPT IGBT в предельных режимах эксплуатации. Подавление паразитных триггерных структур, достигнутое с помощью внедрения высокопроводящего p -слоя вблизи зоны эмиттера, обеспечило еще более высокую стойкость Trench IGBT к отказам 1-го и 2-го типа.

Как было отмечено выше, третий сценарий отказа в настоящее время находится в процессе изучения. Эксперименты, направленные на исследование его физической сущности, показали, что основное влияние в данном случае оказывает структура примесей FS-слоя и эмиттера, а также толщина чипа. Считается, что механизм отказа № 3 в наибольшей степени связан с градиентом концентрации носителей в крайних зонах эмиттера. Несмотря на то, что физи-

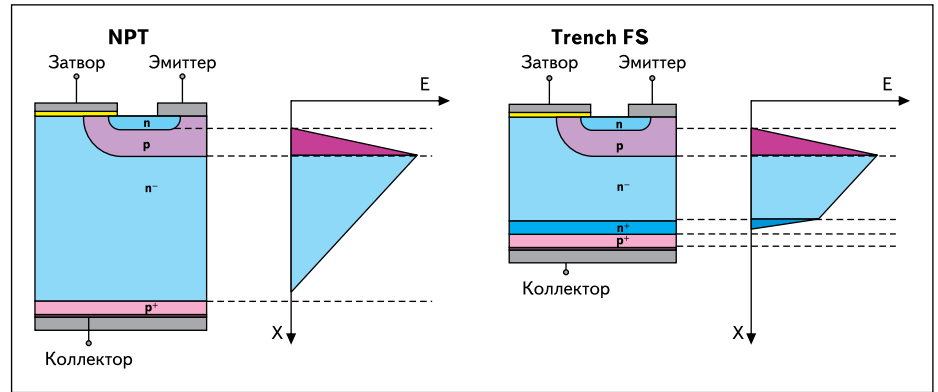


Рис. 2. Распределение поля у NPT и Trench FS структур (буферный слой n^+ обеспечивает высокую блокирующую способность тонкопленочного кристалла)

ка процесса до конца не выяснена, феноменологический анализ показывает, что и по этому показателю кристаллы Trench FS оказываются более стойкими, чем NPT.

Поведение IGBT в режиме повторяющегося КЗ

Исследование стойкости Trench FS IGBT 3-го поколения проводилось на двух типах модулей Infineon 12 класса с номинальным током 3600 и 600 А, разработанных для применений высокой и средней мощности. В каждом из указанных силовых ключей установлены самые мощные из доступных кристаллы ($I_{ном} = 150$ А), соединенные в параллель для обеспечения требуемого номинального тока (24 чипа на 3600 А и 4 чипа на 600 А соответственно). Как было указано выше, ток КЗ (ток самоограничения) для IGBT данного типа превышает номинальное значение примерно в 5 раз.

Целью экспериментов был поиск ответов на следующие вопросы:

- Какое количество импульсов КЗ способен выдержать IGBT в различных условиях эксплуатации до начала разрушения чипов или промежуточных соединений модуля?

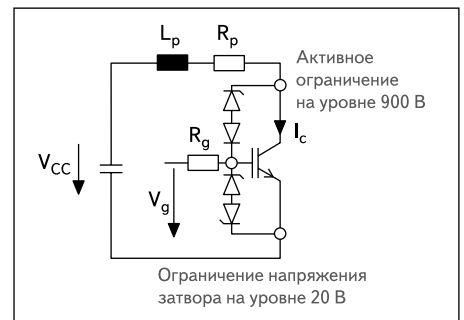


Рис. 3. Схема для анализа режима повторяющегося КЗ (L_p, R_p — паразитные элементы)

- Приводит ли воздействие многократных токовых перегрузок к старению элементов конструкции силового ключа?
- Как зависит устойчивость IGBT к короткому замыканию от условий эксплуатации? На рис. 3 показана электрическая принципиальная схема с учетом паразитных элементов, используемая для анализа режима повторяющегося КЗ. В схеме использовано активное ограничение напряжения «коллектор – эмиттер» V_{CE} и «затвор – эмиттер» V_g с помощью стабилитронов с напряжением пробоя 900 и 20 В соответственно.

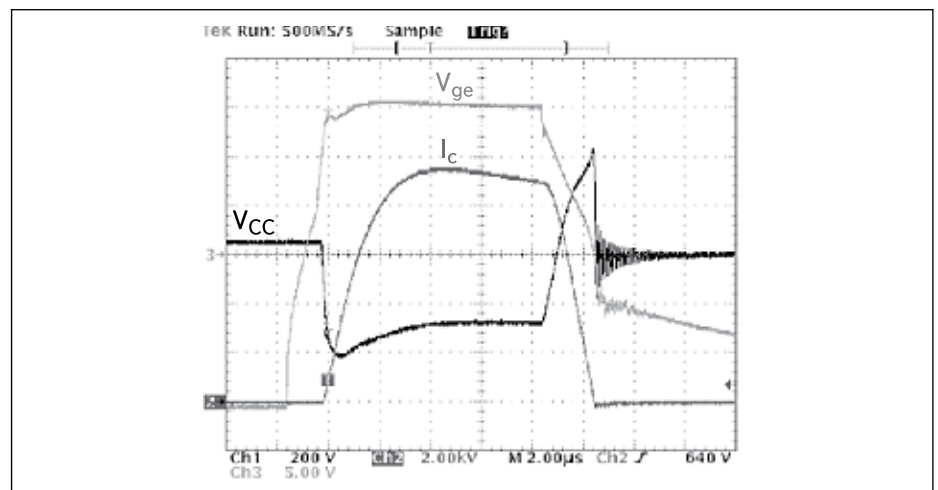


Рис. 4. Типовой режим КЗ при номинальных условиях ($V_{ge} = 5$ В/дел., $V_{CC} = 200$ В/дел., $I_c = 2000$ А/дел.)

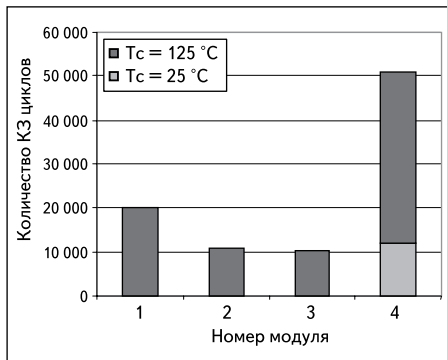


Рис. 5. Циклическое короткое замыкание IGBT 1200 В/3600 А, нет отказов

Эпюры процессов, происходящих при стандартизированном коротком замыкании длительностью 10 мкс при номинальных условиях работы ($V_{CC} = 600\text{ В}$, $V_g = 15\text{ В}$, $T_c = 125\text{ °C}$), приведены на рис. 4. Максимальное значение рассеиваемой мощности при этом составляет около 3 МВт, цикл короткого замыкания повторяется 1 раз в 3 с. Испытывались 4 модуля, количество импульсов КЗ для каждого из них было разным. На рис. 5 показано, как 90 000 испытательных циклов распределялись между тестируемыми компонентами. В ходе проверки не было выявлено выходов из строя, после чего модуль, перенесший наиболее сильное воздействие (50 000 циклов), подвергся детальному анализу. Критичные параметры IGBT, такие как обратный ток коллектора, ток утечки затвора, напряжение блокировки, а также выходная и переходная характеристики, остались в пределах допусков.

Надежность сварного подключения выводов чипов исследовалась в ходе тестов на отрыв и сдвиг, которые не показали отклонений от нормы. Ультразвуковой анализ паяного соединения кристаллов и визуаль-

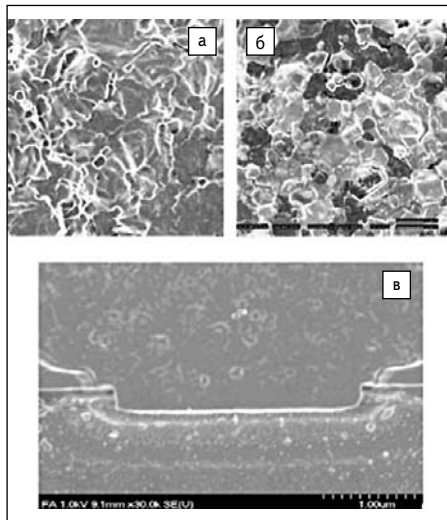


Рис. 6. Металлизированная поверхность чипа: а) до испытаний; б) после испытаний; в) поперечное сечение эмиттерного контакта чипа после испытаний

ный контроль промежуточных соединений модуля также не выявили никаких следов деградации или усталости.

В ходе дальнейших исследований контролировалось качество металлизированной поверхности и зоны контактного окна между металлом и кремнием чипов IGBT. При этом наблюдались некоторые изменения структуры, являющиеся следствием эффекта рекристаллизации на поверхности алюминиевого контактного слоя (рис. 6а, б). Однако известно, что эти изменения, вызванные нагревом кристаллов, не критичны для работы модуля. Кроме того, не было выявлено никаких фатальных изменений (например, оплавления металлизации) в контактной зоне чипов (рис. 6в). Модуль IGBT средней мощности

(600 А) выдержал без повреждения более полумиллиона циклов КЗ.

Для исследования предельных возможностей IGBT-чипов и их соединений модули подвергались воздействию импульсов короткого замыкания в условиях эксплуатации, приближающихся к предельным. На рис. 7 показана зависимость количества циклов КЗ, приводящих к разрушению чипа IGBT, от напряжения DC-шины V_{DC} напряжения на затворе V_g (влияющего на ток самоограничения) и температуры корпуса модуля T_c . Испытания показали, что для всех случаев данная зависимость имеет ярко выраженный экспоненциальный характер. В диапазоне анализируемых величин «безопасное» количество циклов КЗ варьируется

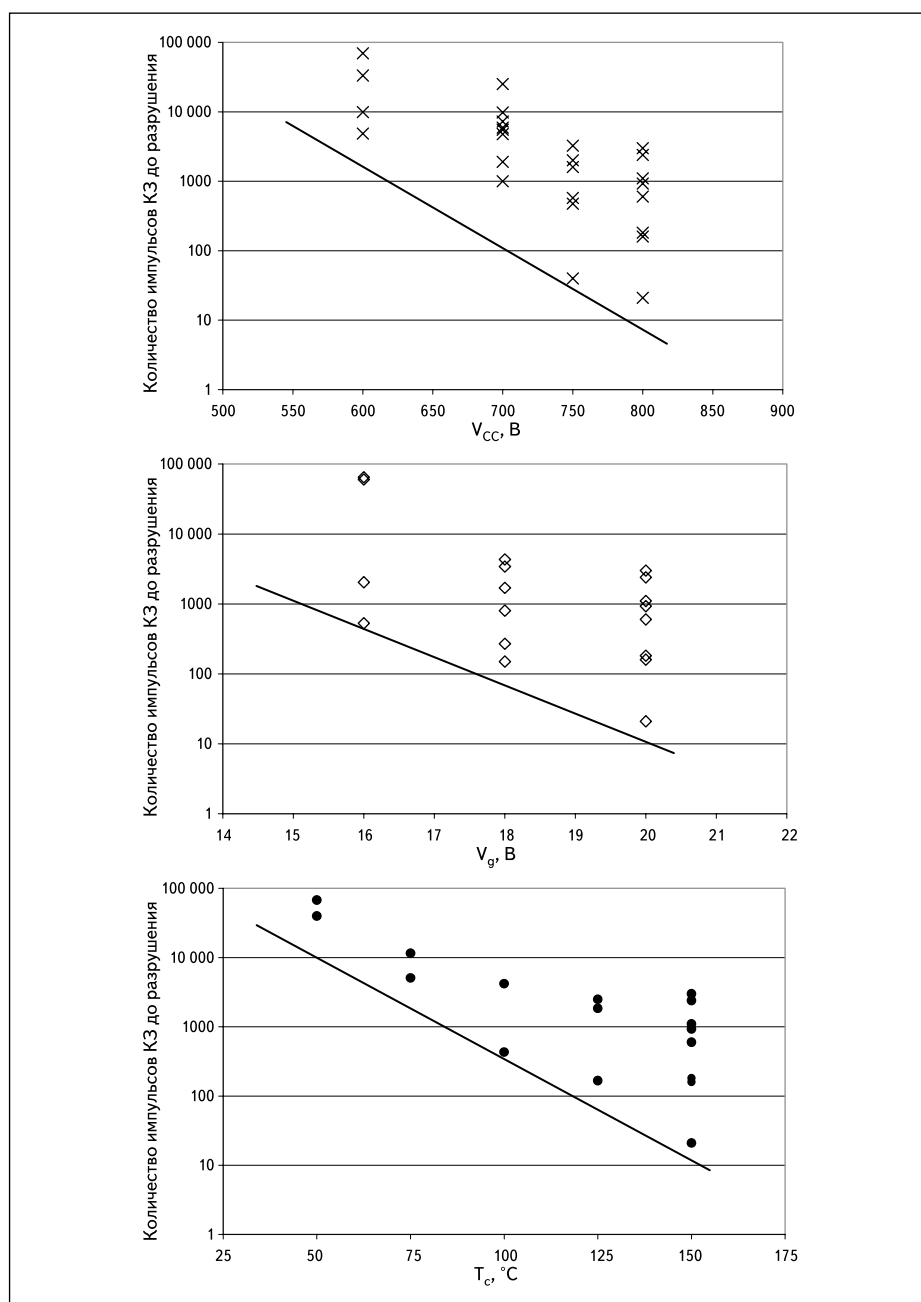


Рис. 7. Количество импульсов КЗ до разрушения модуля при $V_{CC} = 800\text{ В}$, $V_g = 20\text{ В}$, $T_c = 150\text{ °C}$ (каждая диаграмма отображает изменение одного из параметров)

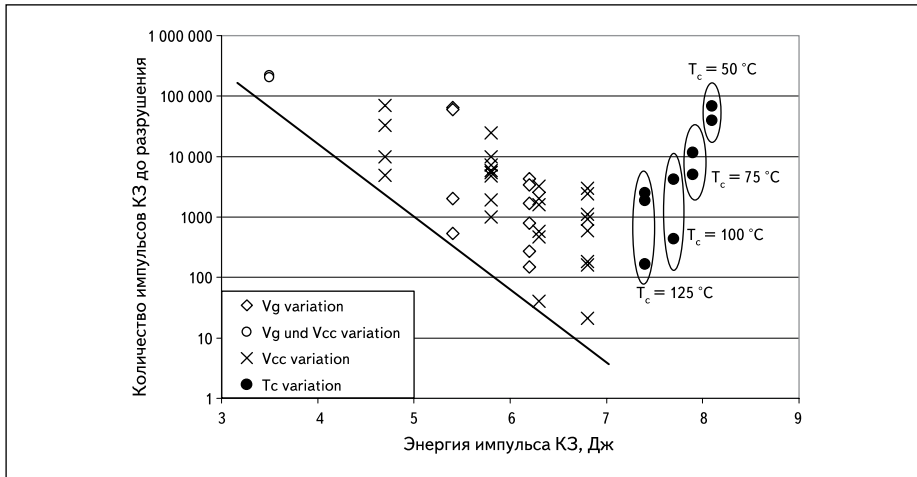


Рис. 8. Количество импульсов КЗ до разрушения модуля в функции от рассеиваемой мощности

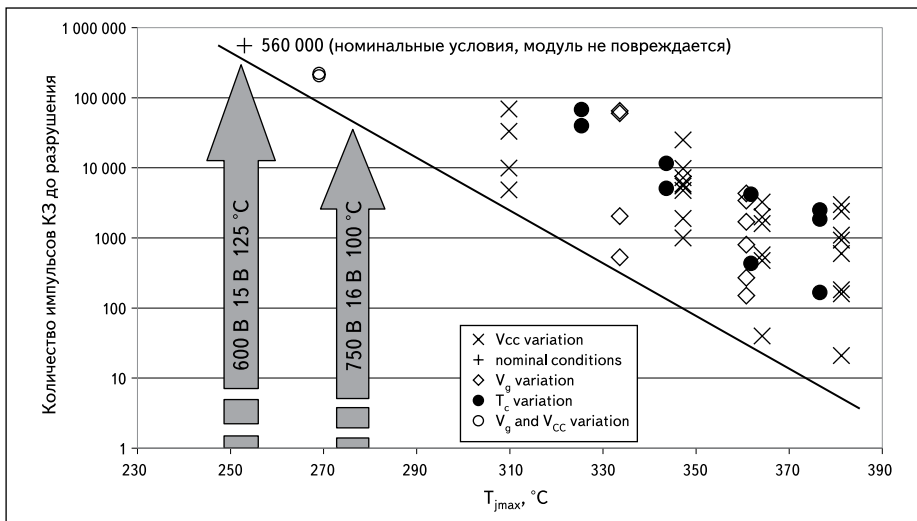


Рис. 9. Количество импульсов КЗ до разрушения модуля в функции от максимальной температуры кристалла (результаты измерений в номинальных условиях работы, при которых модуль не повреждается после 0,5 млн циклов КЗ, также приведены на диаграмме)

от 11 (для очень тяжелых условий эксплуатации) до 560 000 для номинальных режимов.

Чтобы объединить все проведенные измерения, были проведены расчеты энергии потерь, рассеиваемой чипом в течение одного импульса КЗ (рис. 8). В отношении параметров V_{CC} и V_g приведенная диаграмма представляет обычную экспоненциальную зависимость от энергии импульса перегрузки. Исключение составляют измерения, проведенные при изменении температуры. Существует предположение, согласно которому критическим параметром является максимальный градиент температуры кристалла T_{jmax} в конце цикла КЗ относительно корпуса T_c . Как показано на рис. 9, величина T_{jmax} в течение цикла перегрузки может быть рассмотрена как решающий параметр в отношении ожидаемого количества импульсов КЗ, которое способен выдержать модуль. Исследования показали, что для всех вариантов изменения параметров V_{CC} , V_g и T_c действует одинаковая экспоненциальная зависимость от T_{jmax} .

Заключение

В статье представлены три различных механизма отказа современных IGBT при коротком замыкании, рассмотрены аспекты устойчивости к КЗ в отношении новой

технологии Trench FS. Показано, что 3-е поколение модулей IGBT, разработанное с учетом требований высокой сопротивляемости к перегрузкам, способно без повреждения выдерживать многократные циклы КЗ в различных условиях эксплуатации. В ходе специальных тестов было выявлено, что воздействие многократных импульсов короткого замыкания при определенных условиях не приводит к деградации или изменению электрических характеристик силовых ключей, выполненных по технологии Trench FS IGBT. Экспериментально доказано, что существует экспоненциальная зависимость количества циклов КЗ до отказа модуля от максимальной температуры кристалла в конце импульса перегрузки.

Литература

1. Laska T., Münzer M., Pfirsch F., Schäffer C., Schmidt T. The Field Stop IGBT (FS IGBT) — A New Power Device Concept with a Great Improvement Potential. Proceedings of the 12th ISPSD, 2000.
2. Otsuki M., Onozawa Y., Kirisawa M., Kanemaru H., Yoshihara K., Seki Y. Investigation on the Short-Circuit Capability of 1200V Trench Gate Field-Stop IGBTs. Proceedings of the 14th ISPSD, 2002.
3. Dewar S. et al. Soft Punch Through (SPT) — Setting new Standards in 1200V IGBT. Proceedings PCIM Europe, 2000.
4. Nakamura K., Kusunoki S., Nakamura H., Ishimura Y., Tomomatsu Y., Minato T. Advanced Wide Cell Pitch CSTBTs Having Light Punch-Through (LPT) Structures. Proceedings of the 14th ISPSD, 2002.
5. Takata I. Destruction Mechanism of PT and NPT IGBTs in the Short Circuit Operation — an Estimation from the Quasi-Stationary Simulations. Proceedings of the 13th ISPSD, 2001.
6. Takata I. Non Thermal Destruction Mechanism of IGBTs in the Short Circuit Operation. Proceedings of the 14th ISPSD, 2002.
7. Laska T., Miller G., Pfaffenlehner M., Türkes P., Berger D., Gutschmann B., Kanschat P., Münzer M. Short Circuit Properties of Trench-/Field-Stop IGBTs — Design Aspects for a Superior Robustness. Proceedings of the 15th ISPSD, 2003.