

Новая серия высоковольтных IGBT-модулей с улучшенными параметрами надежности

Необходимый период безотказной работы силовых полупроводниковых приборов, устанавливаемых в ответственных устройствах и системах, в настоящее время достигает 30 лет. Чтобы удовлетворить столь высокие требования к надежности, компания Mitsubishi Electric разработала новую линейку высоковольтных IGBT-модулей (HVIGBT) с использованием последних достижений в области разработки чипов, получившую название «X-серия». Она была создана для того, чтобы снизить количество выходов модулей из строя благодаря улучшенным характеристикам надежности. В статье представлены особенности новой X-серии, которые обычно не приведены в спецификации к этим модулям.

Нобухико Танака
(Nobuhiko Tanaka)

Виктор Толстомятов

victor.tolstopyatov@mer.mee.com

Введение

В таких областях применения силовой электроники, как, например, железнодорожный транспорт и системы распределения электроэнергии, делается все возможное для того, чтобы минимизировать количество отказов, однако аварийные выходы из строя все же происходят, что, конечно, является серьезной проблемой. Идеальный силовой модуль должен иметь необходимый запас по значениям характеристик, чтобы продолжать функционировать и в случае перехода на режим работы, не являющийся номинальным. Однако заранее предсказать все возможные аварийные режимы просто

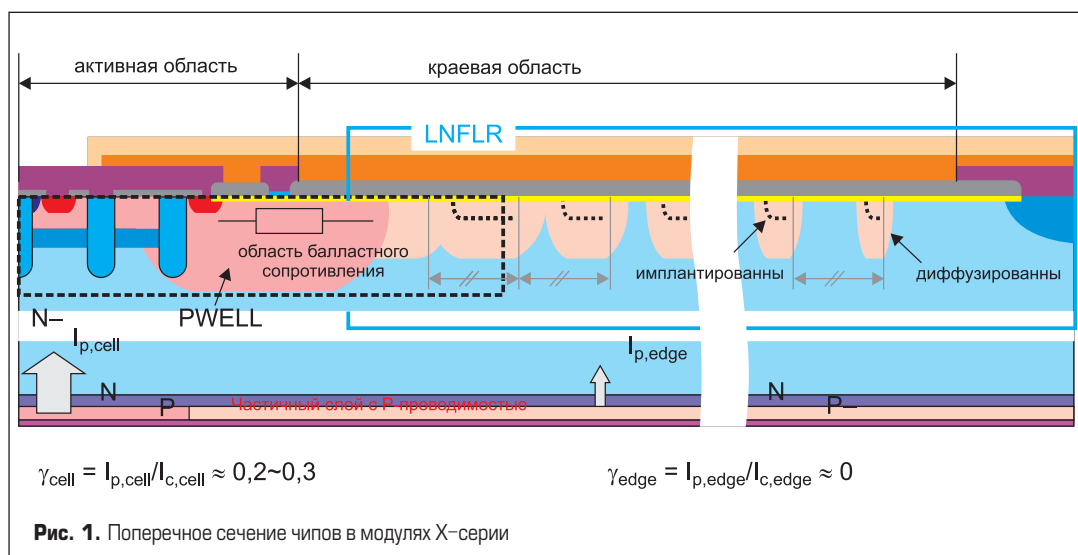
невозможно, поэтому важно обеспечивать баланс между параметрами надежности модуля и его производительностью. Ниже приведены технические решения, использованные при разработке новой X-серии, которые повышают надежность и, следовательно, увеличивают срок службы модулей.

Концепции повышения надежности

Стойкость к динамическим перегрузкам

Режим перегрузки

При использовании силовых модулей должны быть учтены такие внешние факторы, как паразит-



ная индуктивность шины, сопротивление затвора, флуктуации напряжения в звене постоянного тока (ЗПТ) и внешняя температура. Обычно в спецификации на модули указан максимальный ток, способный отключить транзистор на уровне двукратного номинального тока. Максимальную отключающую способность высоковольтных IGBT в основном определяют параметры чипов. Например, в результате внедрения в структуру чипа частичного слоя с *p*-проводимостью со стороны коллектора может быть достигнута большая отключающая способность. На рис. 1 показан поперечный разрез кристалла последнего поколения, имеющего данный слой.

Короткое замыкание

Существуют три типа коротких замыканий:

КЗ — когда транзистор не проводит ток (тип 1);

КЗ — когда транзистор проводит ток (тип 2);

КЗ — в процессе протекания тока через обратный диод (тип 3).

При этом имеется два пути увеличения стойкости модулей к коротким замыканиям. Один состоит в изменении структуры IGBT-чипов, а другой заключается в оптимизации конструкции корпуса модуля с целью минимизировать наводки магнитного поля на затвор транзистора во время протекания тока КЗ. Стойкость IGBT-кристаллов к КЗ с сохранением отключающей способности транзистора может быть улучшена изменением МОП-структуры ячеек в области затвора, а также увеличением их плотности (метод подбора допустимого тока насыщения). Для снижения влияния помех на затвор проводят анализ электромагнитного поля внутри кристалла, с учетом которого изменяют его геометрию.

В случае возникновения короткого замыкания третьего типа в процессе обратного восстановления диод также может выйти из строя. Поэтому наряду с транзистором обратный диод должен обладать стойкостью к высоким токам КЗ. Благодаря внедрению в диоды RFC-структуры (Relaxed Field Cathode — катод с ослаблением поля), повышающей стойкость к пиковой мощности, высоковольтные IGBT-модули новой серии обладают высокой стойкостью ко всем трем типам коротких замыканий.

Ограничение скорости включения (*di/dt* при включении тока)

При обратном восстановлении классического *p-i-n*-диода в условиях высокого напряжения в звене постоянного тока из-за высокой скорости процесса на транзисторе появляются характерные «всплеск» и колебания напряжения (рис. 2). Этот эффект можно снизить включением IGBT-транзистора с меньшим значением *di/dt*. Но уменьшение скорости процесса неизбежно приводит к увеличению динамических потерь в чипе. При использовании RFC-структуры диода удается избежать выброса напряжения

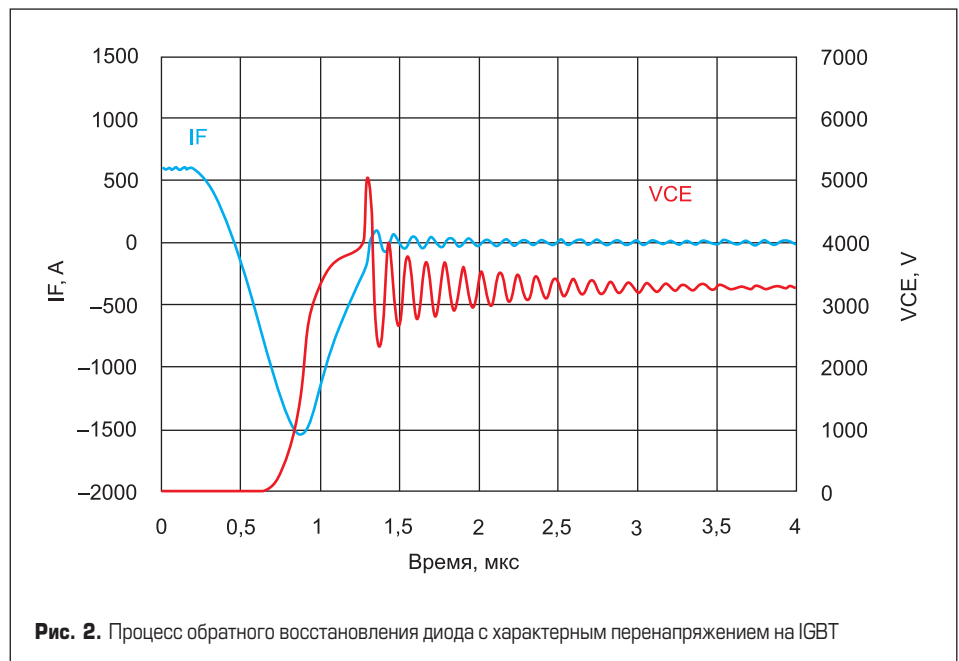


Рис. 2. Процесс обратного восстановления диода с характерным перенапряжением на IGBT

и возникновения колебательного процесса, а также сохранить высокое значение *di/dt*, а значит, не возрастут потери при включении *E_{ON}*. Поперечное сечение диода с RFC-структурой показано на рис. 3.

Широкий температурный диапазон

Интенсивность отказов полупроводниковых устройств, как правило, возрастает с повышением рабочей температуры прибора. В соответствии с MIL-стандартом (MIL-HDBK-217F), интенсивность отказов (π_T) для Si *n-p-n*-транзистора при температуре 150 °C в 1,37 раза выше, чем при 125 °C:

$$\pi_T = \exp \left\{ -2114 \left(\frac{1}{T_j + 273} - \frac{1}{298} \right) \right\}. \quad (1)$$

Следовательно, для обеспечения высокой рабочей температуры необходимо увеличить запас надежности чипов. Нужно также предотвратить тепловой разгон кристалла, вызываемый возрастанием тока утечки при повышении температуры. Кроме того, характеристики корпуса силового модуля, изоляции и всех материалов также должны быть рассчитаны,

чтобы выдерживать более высокую рабочую температуру.

Тепловой разгон

Снижение тока утечки (*I_{CES}*) при высоких температурах — наиболее эффективный способ избежать теплового разгона. Ток утечки *I_{CES}* полупроводниковых чипов можно снизить применением следующих технических решений:

- оптимизацией буферного *n*-слоя (рис. 4а);
- оптимизацией времени жизни носителей заряда в зоне дрефта *N⁻*;
- использованием специальной структуры в краевой области чипов (см. рис. 1);
- усилением процесса геттерирования для снижения примесных дефектов в кристалле кремния (рис. 4б).

Благодаря использованию перечисленных технологий ток утечки *I_{CES}* при 150 °C в новой серии модулей удалось сохранить на том же уровне, что и при 125 °C.

Таблица 1. Температурный коэффициент интенсивности отказов

<i>T_r</i> , °C	π_T	Коэффициент
125	5,94	1
150	8,14	1,37

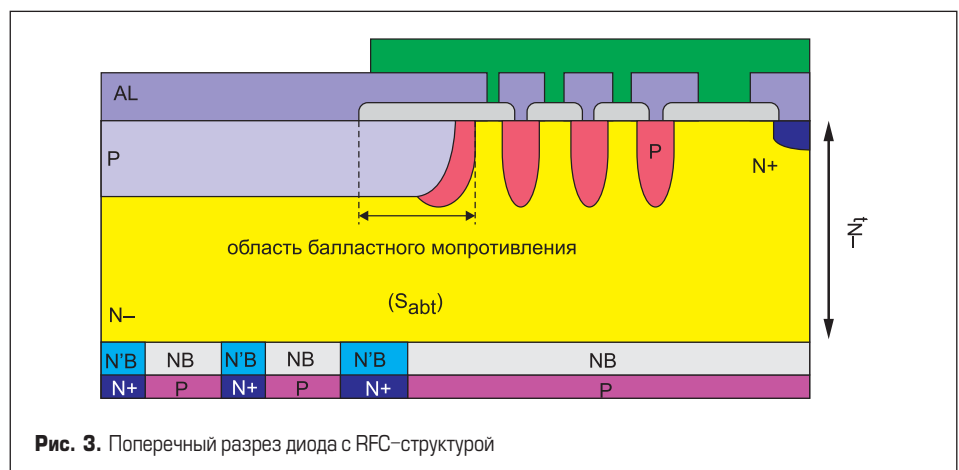


Рис. 3. Поперечный разрез диода с RFC-структурой

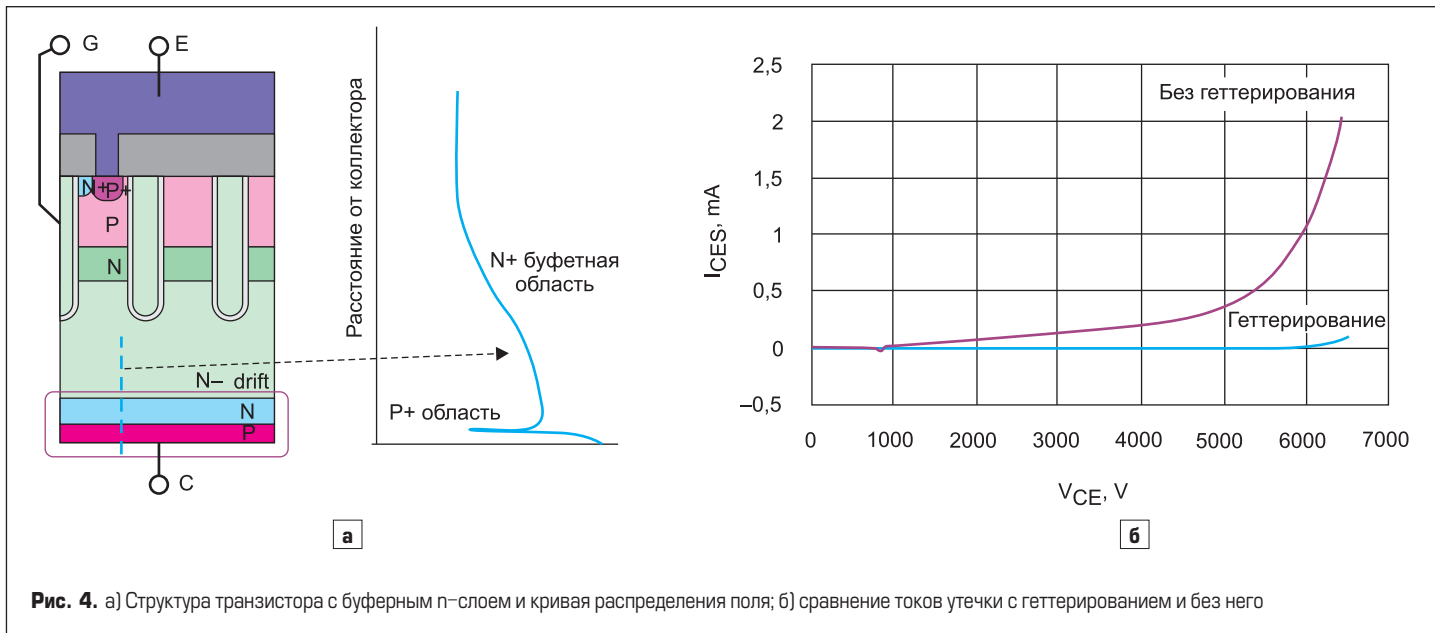


Рис. 4. а) Структура транзистора с буферным p-слоем и кривая распределения поля; б) сравнение токов утечки с геттерированием и без него

Изоляция

Одно из наиболее важных свойств изоляции силовых модулей — характеристика частичных разрядов. Для обеспечения длительного срока службы модулей нужно, чтобы изоляция сохраняла свои первоначальные свойства с течением времени даже в условиях высокой температуры. Для этого применяют специальный высокотемпературный силиконовый гель, а также особый технологический процесс, позволяющий минимизировать частичные разряды, исключая пузырьки воздуха из геля.

Стойкость к жестким условиям внешней среды

Выполнять контроль температуры и влажности воздуха вокруг силовых модулей, применяемых на железнодорожном транспорте, — сложная задача. Поэтому способность прибора выдерживать высокую влажность воздуха при высоком напряжении в течение длительного времени — необходимый критерий его качества.

Влажность и конденсация

Способность кристаллов противостоять высокой влажности можно улучшить путем изменения структуры в краевой области чипа таким образом, чтобы снизилась аккумуляция поверхностных зарядов (Q_{SS}) на охранном кольце (в случае, когда высокое напряжение подается между эмиттером и коллектором). Количество зарядов Q_{SS} на охранном кольце — основной параметр, влияющий на запирающую способность чипа. Благодаря применению полуизолированной пассивационной пленки, а также использованию процессов, в меньшей степени аккумулирующих поверхностные заряды Q_{SS} в краевой области чипов, обеспечивается стабильное значение тока утечки даже в сложных внешних условиях (например, при выпадении росы).

Долговременная стойкость к космической радиации

Долговременная стойкость к космической радиации, заключающаяся в способности противостоять частицам высоких энергий,

приходящим из космоса, — важнейшее требование к высоковольтным IGBT-модулям. В приборах компании Mitsubishi Electric она достигается в результате использования LPT-структуры со смыканием (Light Punch Through), а также снижения тока утечки I_{CES} .

Результаты испытаний

Первым модулем X-серии стал прибор с блокирующим напряжением 6,5 кВ и номинальным током 1000 А. В его конструкции были применены все технические решения, описанные выше. В этом разделе рассмотрена методика тестирования модуля на соответствие требованиям надежности.

Проверка стойкости к динамическим нагрузкам

Область безопасной работы

Проверка на максимальную отключающую способность модуля была проведена путем постепенного увеличения тока коллектора (I_C) при напряжении в ЗПТ (V_{CC})

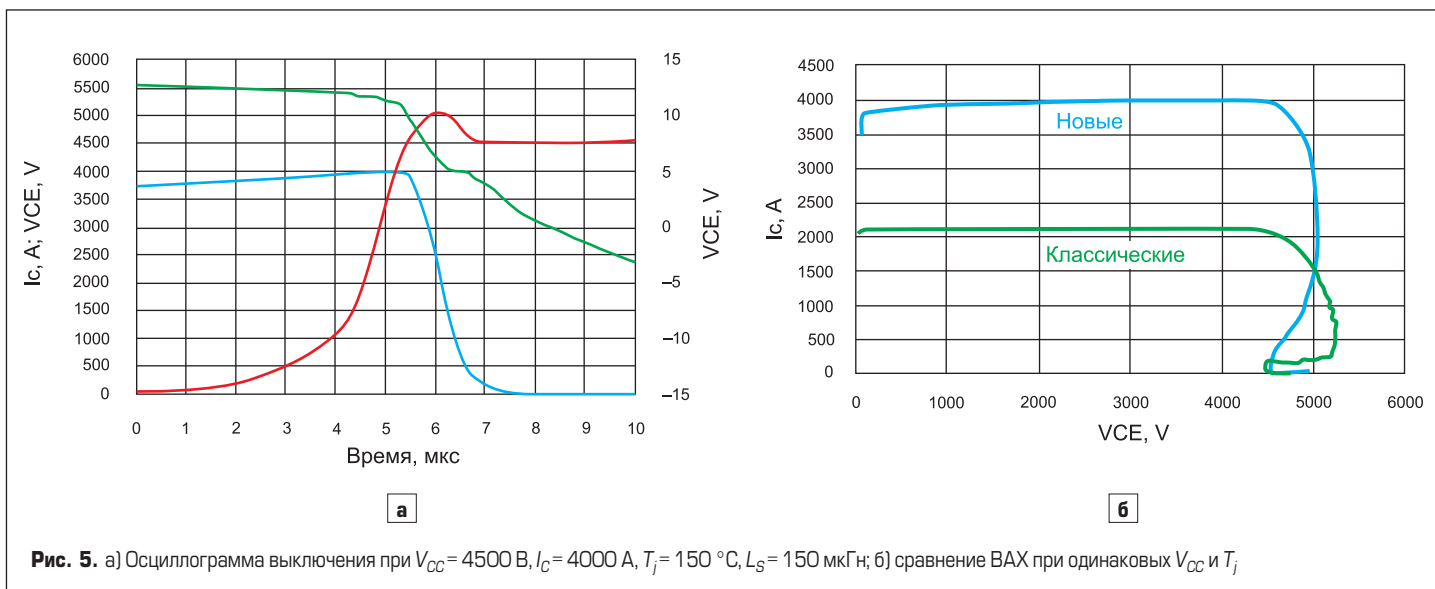


Рис. 5. а) Осциллограмма выключения при $V_{CC} = 4500$ В, $I_C = 4000$ А, $T_j = 150$ °С, $L_S = 150$ мкГн; б) сравнение ВАХ при одинаковых V_{CC} и T_j

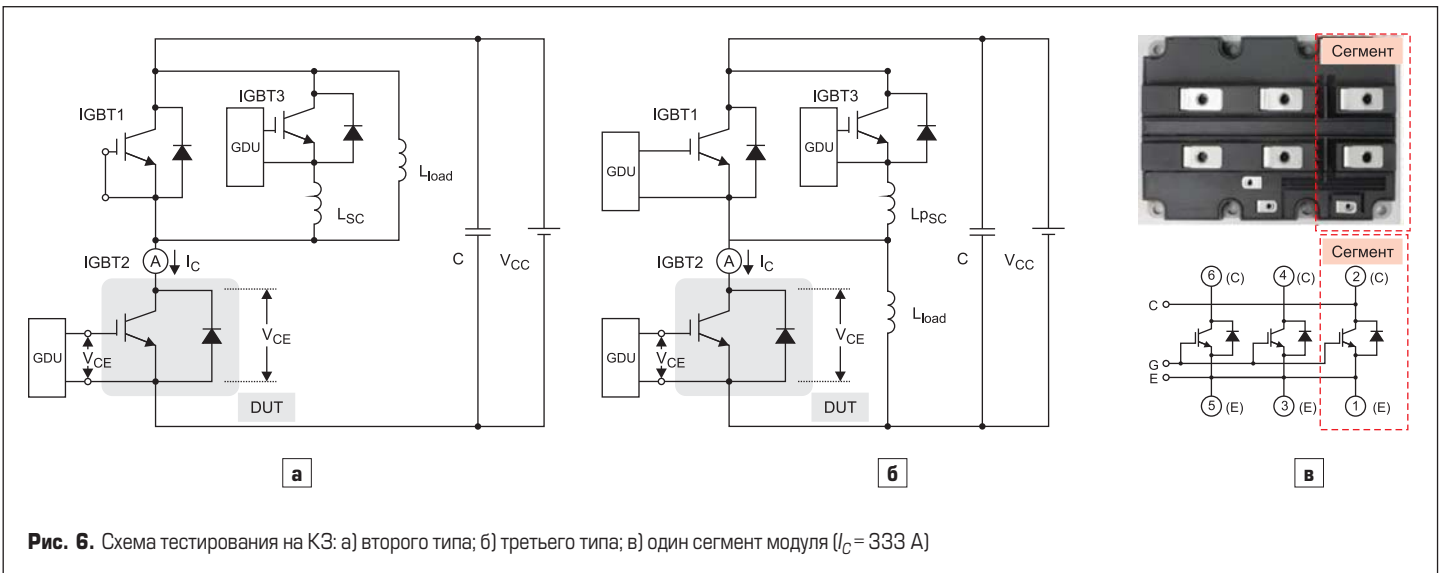


Рис. 6. Схема тестирования на КЗ: а) второго типа; б) третьего типа; в) один сегмент модуля ($I_C = 333 \text{ A}$)

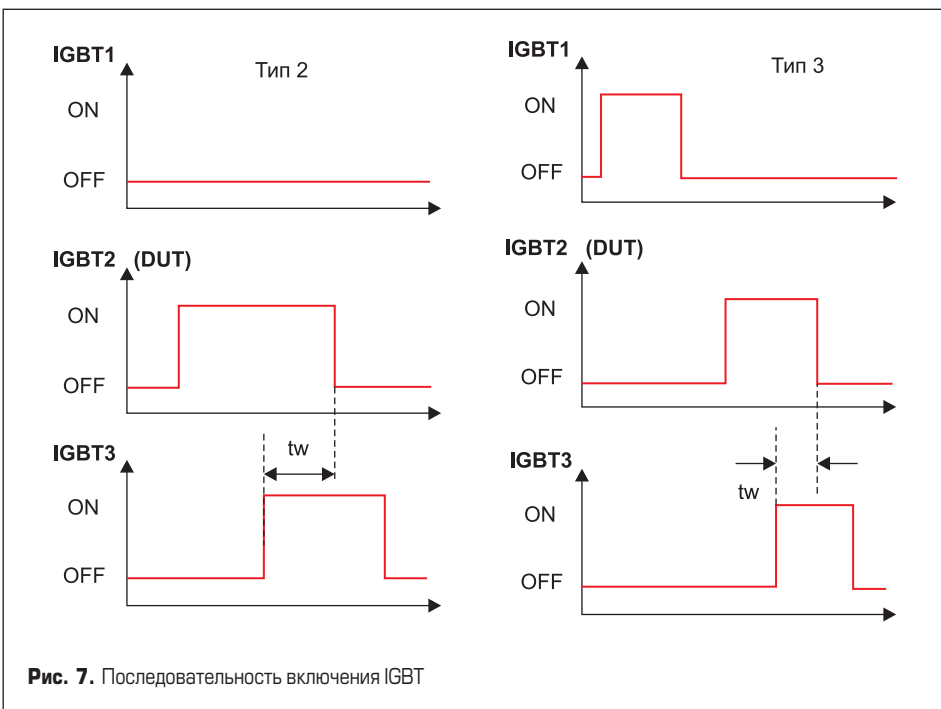


Рис. 7. Последовательность включения IGBT

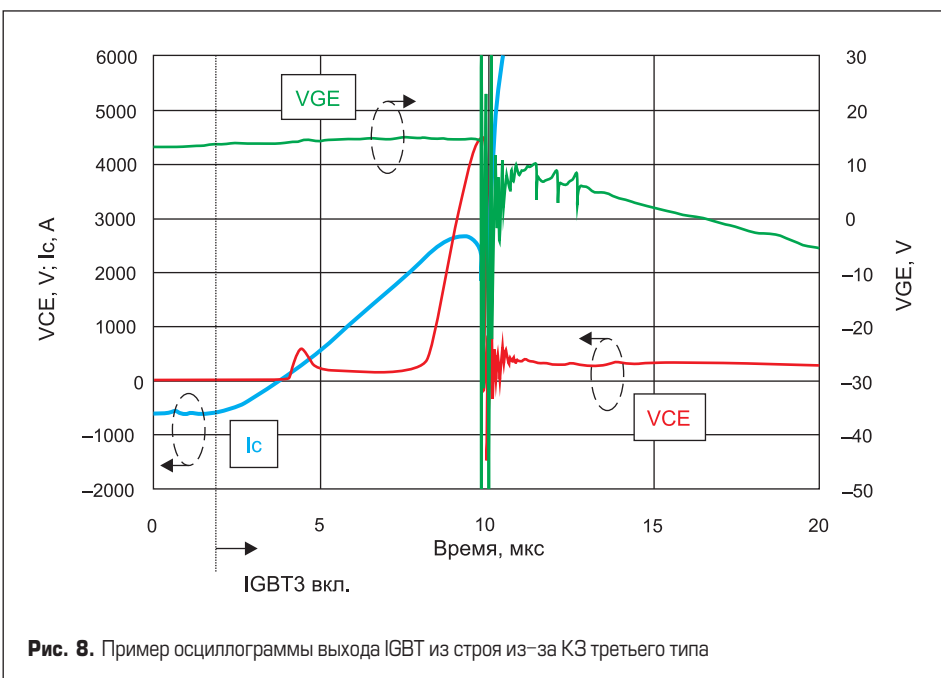


Рис. 8. Пример осциллограммы выхода IGBT из строя из-за КЗ третьего типа

4500 В и максимальной температуре кристаллов (T_j) в 150 °С. При этом были использованы полумостовая топология и индуктивная нагрузка. Как показано на рис. 5, было установлено, что новые высоковольтные IGBT-модули способны отключить более чем четырехкратный ток от номинального, причем с сохранением плавных фронтов тока и напряжения.

Стойкость к коротким замыканиям

Способность модуля выдерживать короткие замыкания обычно указывают в виде максимальной допустимой длительности импульса тока КЗ, т. е. в соответствующей энергии, выделяющейся в кристаллах и определяющейся индуктивностью цепи КЗ. Однако существует множество вариантов видов КЗ, зависящих от контура протекания тока и других параметров. Ниже приведены результаты тестов на короткие замыкания второго типа (когда рабочий ток уже протекает через IGBT) и третьего типа (когда ток идет через обратный диод). Измерения проводили с использованием полумостовой топологии (рис. 6) и соответствующей последовательности импульсов (рис. 7). Модуль IGBT 3 обеспечивает коммутацию цепи и протекание тока КЗ. Для того чтобы ток короткого замыкания через испытуемый модуль не ограничивался током насыщения транзистора IGBT 3, при тестировании была использована одна треть прибора (рис. 6). Эксперимент проводили при напряжении 4200 В и температуре кристаллов 150 °С. Если чипы модуля не обладают достаточной стойкостью к КЗ, то происходит выход прибора из строя (рис. 8). В результате тестирования было подтверждено, что модули X-серии обладают высокой выносливостью к режимам коротких замыканий (рис. 9).

Обратное восстановление диода

Главная характеристика стойкости диода к перегрузкам — пиковая мощность (P_{rr}), которую он способен выдержать в процессе обратного восстановления. В случае когда диод

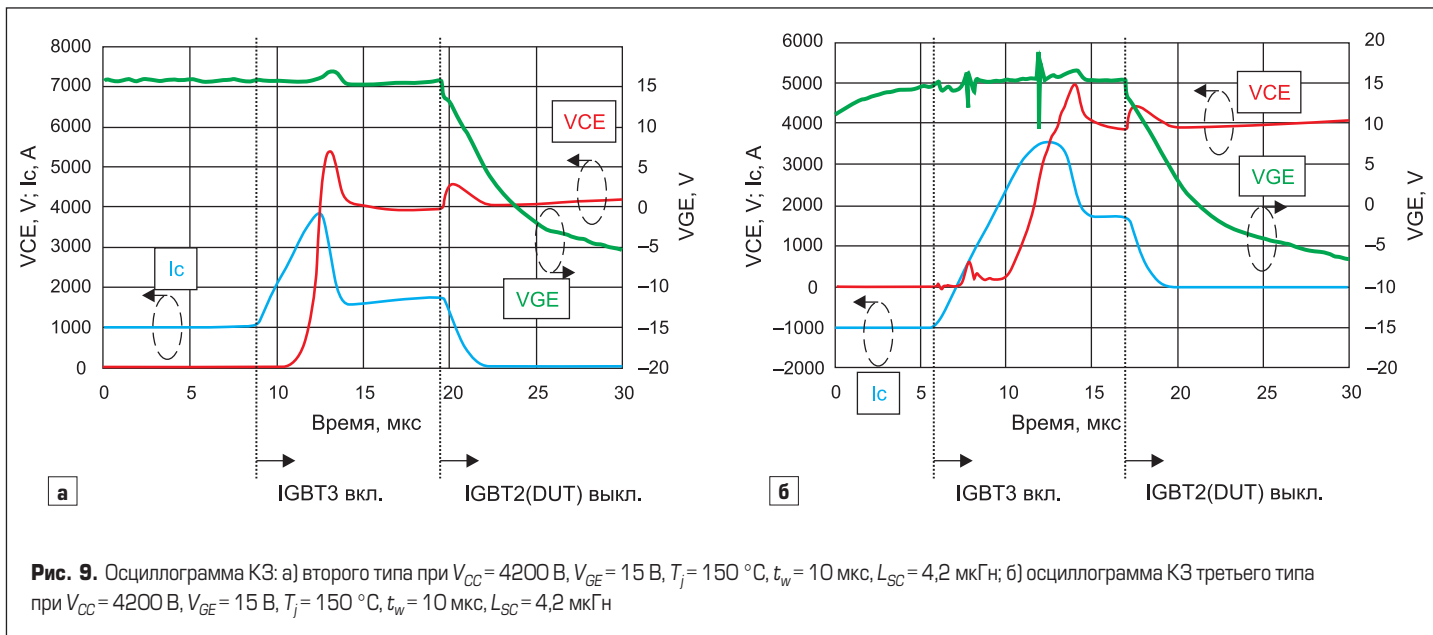


Рис. 9. Осциллограмма КЗ: а) второго типа при $V_{CC}=4200\text{ В}$, $V_{GE}=15\text{ В}$, $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$, $t_w=10\text{ мкс}$, $L_{SC}=4,2\text{ мкГн}$; б) осциллограмма КЗ третьего типа при $V_{CC}=4200\text{ В}$, $V_{GE}=15\text{ В}$, $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$, $t_w=10\text{ мкс}$, $L_{SC}=4,2\text{ мкГн}$

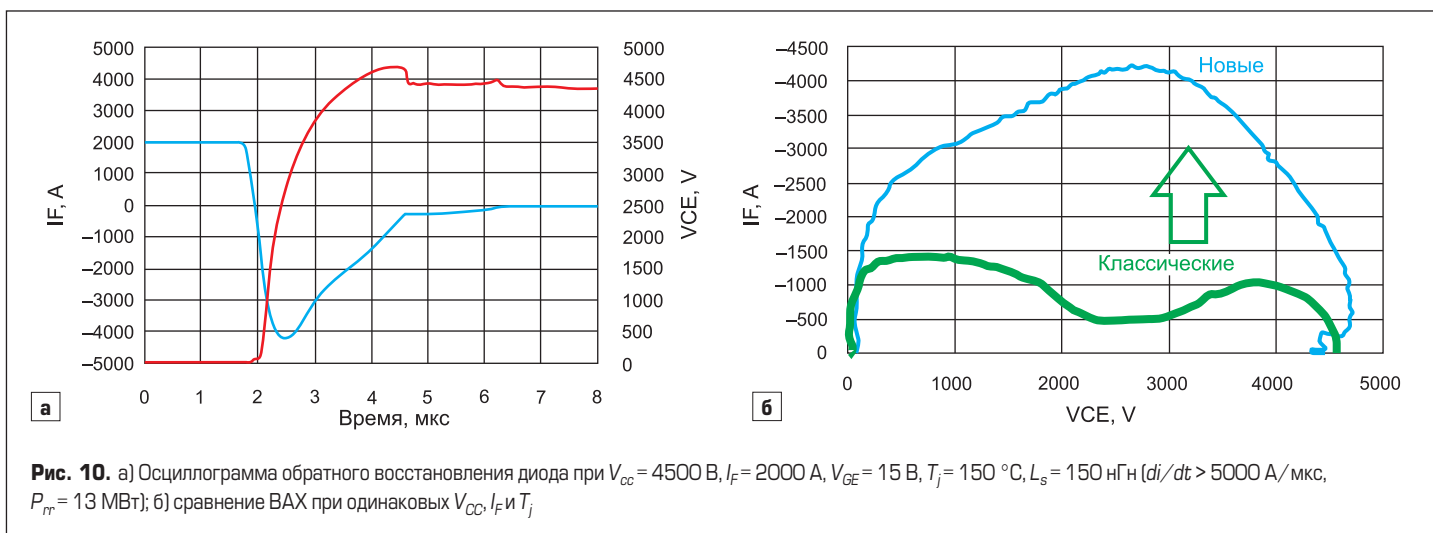


Рис. 10. а) Осциллограмма обратного восстановления диода при $V_{CC}=4500\text{ В}$, $I_F=2000\text{ А}$, $V_{GE}=15\text{ В}$, $T_j=150\text{ }^\circ\text{C}$, $L_s=150\text{ нГн}$ ($di/dt > 5000\text{ А/мкс}$, $P_{rr}=13\text{ МВт}$); б) сравнение ВАХ при одинаковых V_{CC} , I_F и T_j

с недостаточной пиковой мощностью P_{rr} , находится в условиях высокого напряжения и большой скорости изменения тока (di/dt), он может выйти из строя. В процессе измерений было установлено, что новые RFC-диоды, применяемые в модулях X-серии,

способны выдержать пиковую мощность $P_{rr}=13\text{ МВт}$. Также на рис. 10 видно, что даже при максимальных токе, напряжении и температуре осциллограммы восстановления диода носят плавный характер, без явления осцилляции.

Результаты тестирования в жестких условиях внешней среды

Высокая температура

Для проверки режима теплового разгона кристаллов были проведены измерения тока утечки I_{CES} в модуле, закрепленном на радиаторе, имеющем температуру $150\text{ }^\circ\text{C}$. Между коллектором и эмиттером модуля подавалось напряжение $1\text{--}6,5\text{ кВ}$ с шагом $0,5\text{ кВ}$. Ток утечки I_{CES} составил менее 30 мА при $150\text{ }^\circ\text{C}$ и $6,5\text{ кВ}$ (рис. 11). Более того, при $125\text{ }^\circ\text{C}$ он оказался ниже, чем типичный для других модулей (табл. 2).

Свойства изоляции модулей новой серии были проверены путем измерения количества частичных разрядов, выполненного после теплового стресса. Количество разрядов было измерено при действующем уровне переменного напряжения $6,9\text{ кВ}$ (рис. 12) после двух типов теплового воздействия (табл. 3). Результаты измерения показали,

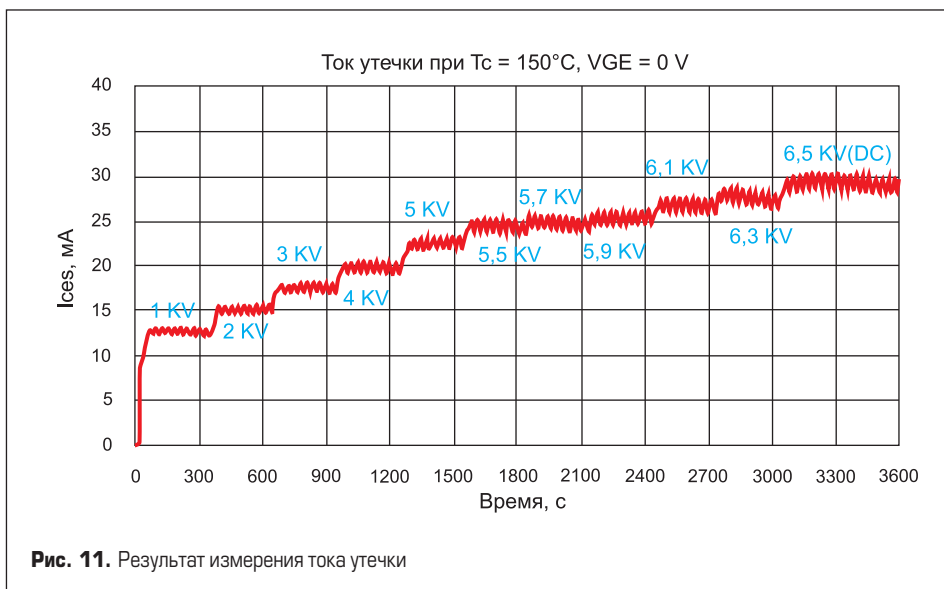


Рис. 11. Результат измерения тока утечки

Таблица 2. Значение тока I_{CES}

Серия	I_{CES} при $125\text{ }^\circ\text{C}$, мА (тип.)	I_{CES} при $150\text{ }^\circ\text{C}$, мА (тип.)
Новая X-серия	5	30

что разницы между количеством частичных разрядов до и после воздействия не прослеживается. Из этого можно сделать вывод о достаточной электрической прочности изоляции модуля к тепловому влиянию.

Высокая влажность

Способность силовых модулей выдерживать условия высокой влажности может быть проверена проведением теста на конденсацию. В ходе его измеряется ток утечки I_{CES} до и после конденсации влаги в корпусе при $V_{CE} = 5200$ В, $V_{GE} = 0$ В и $T_a = 25$ °С. Новая серия высоковольтных IGBT обладает высокой стойкостью к влажности, так как ток утечки после пятикратного повторения теста не увеличился (рис. 13).

Заключение

Полупроводниковые модули — важнейшие элементы устройств силовой электроники. Они должны не только обладать стойкостью при экстремальных режимах работы, но и обеспечивать высокую производительность системы. Представленные в статье высоковольтные модули X-серии были разработаны с использованием последних технологий, позволяющих увеличить срок службы приборов, а также обеспечить высо-

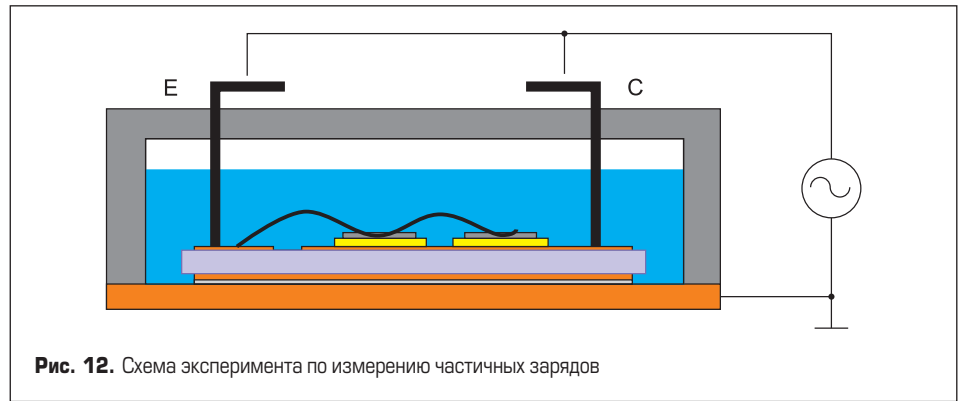


Рис. 12. Схема эксперимента по измерению частичных зарядов

кий выходной ток и низкие потери в ключах. В работе приведены результаты проверки основных параметров, определяющих надежность модулей: тестирование стойкости к коротким замыканиям основных типов, измерение количества частичных разрядов после теплового стресса изоляции, а также эксперимент, показывающий ток утечки в модулях в жестких условиях внешней среды.

Литература

1. Tanaka N. Durable Design of the New HVIGBT Module / PCIM 2016 Europe, Germany.

2. Chen Z., et al. LPT (II)-CSTBTM (III) for High Voltage Application with Ultra Robust Turn-off Capability Utilizing Novel Edge Termination Design / Proc. ISPSD 2012 Europe, Belgium.
 3. Hatori K., et al. The Next Generation 6.5 kV IGBT Module with High Robustness / Proc. PCIM 2014 Europe, Germany.
 4. Luts J., et al. Short Circuit III in High Power IGBTs / Proc. EPE 2009 Europe, Barcelona.
 5. Pierstorff S., et al. "Different Short Circuit Types of IGBT Voltage Source Inverters," Proc. PCIM 2011 Europe, Germany
 6. Hatori K., et al. "Wide temperature operation of high isolation HV-IGBT," Proc. PCIM 2010 Europe, Germany
 7. Nishii A., Nakamura K., Masuoka F., and T. Terashima. Relaxation of Current Filament due to RFC Technology and Ballast Resistor for Robust FWD Operation / Proc. ISPSD'11, San Diego, USA, 2011.
 8. Uemura H., et al. Optimized Design against Cosmic Ray Failure for HVIGBT Modules / Proc. PCIM 2011 Europe, Germany.
 9. Chen Ze, et al. A Balanced High Voltage IGBT Design with Ultra Dynamic Ruggedness and Area-efficient Edge Termination / Proc. ISPSD 2013, Kanazawa, Japan.
 10. Tanaka N., et al. Robust HVIGBT module design against high humidity / Proc. PCIM 2015 Europe, Germany.

Таблица 3. Результаты измерения частичных разрядов

Вид воздействия	Условия	Результаты теста
Хранение при высокой температуре	$T_a = 150$ °С, 500 ч	
Длинные термоциклы	$T_c = -40...+125$ °С ($\Delta T_c = 165$ °С), 200 циклов	

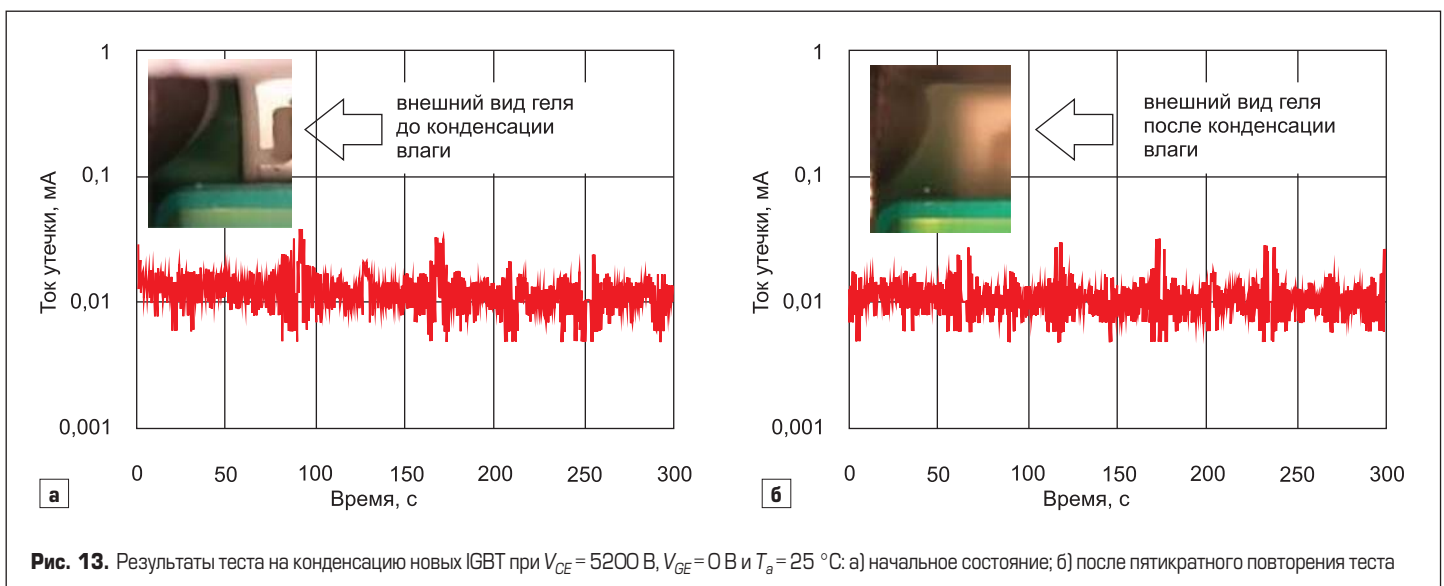


Рис. 13. Результаты теста на конденсацию новых IGBT при $V_{CE} = 5200$ В, $V_{GE} = 0$ В и $T_a = 25$ °С: а) начальное состояние; б) после пятикратного повторения теста