

Конструктивные особенности и применение IGBT исполнения Press-Pack

компании CRRC Times Semiconductor

Компания CRRC Times Semiconductor (Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd.) — дочерняя компания CRRC, ведущего мирового поставщика силовых полупроводниковых приборов и систем управления для подвижного состава и владельца известной торговой марки Duplex — разработала два новых варианта IGBT-модулей. Благодаря использованию новых чипов и ноу-хау в части корпусирования, они отличаются малой собственной паразитной индуктивностью, высокой эффективностью и производительностью¹.

Владимир Рентюк

Rvk.modul@gmail.com



Введение

Биполярный транзистор с изолированным затвором, вместо БТИЗ уже давно привычно называемый IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor), — это комбинированный прибор, состоящий из биполярного и полевого транзисторов. Такие транзисторы, как правило, силовые, в прижимных корпусах с технологией корпусирования, получившей название press-pack, стали альтернативой изолированным пластмассовым модулям. Вместо проволочных перемычек и паяных соединений, используемых в традиционных модулях с изолированным основанием, технология корпусирования press-pack основана на обеспечении электрического контакта с полупроводниковыми кристаллами (далее — чипами) путем приложения внешней прижимной силы. По сравнению с традиционным IGBT-модулем IGBT с технологией корпусирования press-pack (далее — press-pack IGBT) имеют следующие характеристики, обеспечивающие их преимущества в целом ряде приложений:

1. Они выигрывают от присущей им более высокой надежности, так как контакты под давлением, как правило, более прочные, чем проводные и паяные соединения. Используемая для этого технология пружинного и прессового зажима решает проблемы термической усталости соединений проволочными перемычками проводов и паяных соединений, повышает долговременную надежность соединения, значительно увеличивает срок службы устройства, а также существенно снижает паразитную индуктивность внутри самого IGBT-устройства.
2. Направление электрического поля в press-pack IGBT соответствует оси прижима, поэтому здесь легко подключать IGBT последовательно и выполнять электрическое соединение сверху вниз. Поскольку традиционный IGBT установлен на теплоотводе горизонтально, для него необходимо согнуть электрическое соединение, что вводит в цепь дополнительную паразитную индуктивность.
3. В конструкции press-pack IGBT нет основания (подложки) и опорной плиты, а примененные

¹ Оригинал статьи доступен по ссылке [1].

материалы отличаются лучшей теплопроводностью, соответственно, press-pack IGBT имеют меньшее тепловое сопротивление, чем традиционный IGBT-модуль.

4. Чипы в press-pack IGBT наглухо запечатаны в корпусе, а сам корпус герметичен и хорошо защищен от попадания влаги из окружающей воздушной среды. Поскольку влажный воздух не может распространяться внутрь корпуса press-pack IGBT, влагостойкость такого исполнения оказывается выше, нежели традиционного IGBT-модуля.

В 2008 году компания CRRC Times Semiconductor (Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., далее — CRRC), дочерняя компания CRRC, ведущего мирового поставщика силовых полупроводниковых приборов и систем управления для подвижного состава, приобрела британскую компанию Duxep Semiconductor Ltd. и стала владельцем торговой марки Duxep, что усилило ее позиции в части НИОКР. Недавно CRRC разработала и предлагает два варианта press-pack IGBT: TG2000SW45ZC-P200 и TG3000SW45ZC-P200. Основные характеристики новых модулей представлены в таблице.

Для того чтобы представить преимущества предлагаемых компанией CRRC press-pack IGBT, в статье в качестве примера взят модуль TG2000SW45ZC-P200 [2], основанный на базовой технологии от Duxep [4], являющейся теперь частью компании CRRC.

Конструкция press-pack IGBT компании CRRC

Внутренняя схема IGBT-модуля

Press-pack IGBT-модуль разработан компанией CRRC как цельное и полностью завершённое устройство IGBT (рис. 1). Внутри устройства находится сам IGBT-транзистор и быстро восстанавливающийся антипараллельный защитный диод FRD (Fast Recovery Diode). Номинальные рабочие токи IGBT-транзистора и FRD-диода модуля одинаковы.

Внутренняя структура

Когда устройство зажато, пружинные контакты его внутренней структуры сжимаются так, чтобы передавать внешнее усилие на контактные поверхности соответствующих внутренних узлов. Если усилие сжатия превышает пороговое усилие, указанное в техническом описании продукта (спецификация типа data sheet), то избыточное усилие прикладывается к внутреннему каркасу, что обеспечивает ограничение давления на внутренние структуры устройства. При этом высота устройства будет уменьшена — так, исходная высота TG2000SW45ZC-P200 и TG3000SW45ZC-P200 составляет 35 мм, но после сжатия их высота уменьшится до 33,4 мм. Это сжатие показано на рис. 2.

Внутренняя структура модуля

Для изготовления внутренних составляющих press-pack IGBT-модулей компания CRRC использует крупногабаритные чипы размером 21×21 мм. Для их объединения

Таблица. Основные характеристики новых press-pack IGBT компании CRRC

Тип модуля	Номинальный рабочий ток I_c , А	Номинальное рабочее напряжение $V_{ce(sat)}$, В	Размеры, мм	Исполнение	Полная информация
TG2000SW45ZC-P200	2000	4500	206×206	Одиночный	[2]
TG3000SW45ZC-P200	3000				[3]



Рис. 1. Внутренняя схема и внешний вид press-pack IGBT-модуля компании CRRC

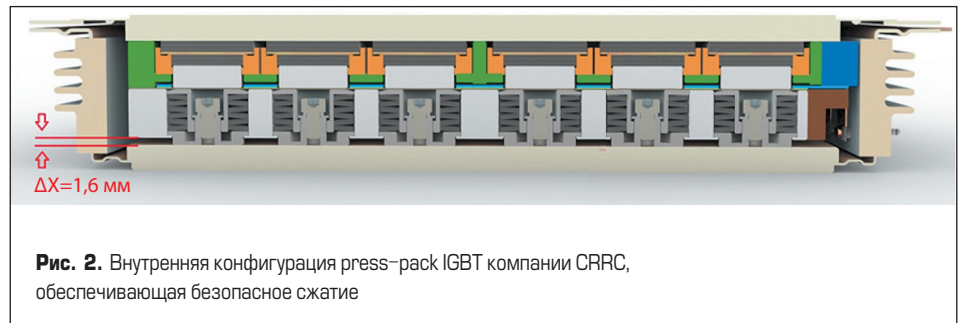


Рис. 2. Внутренняя конфигурация press-pack IGBT компании CRRC, обеспечивающая безопасное сжатие

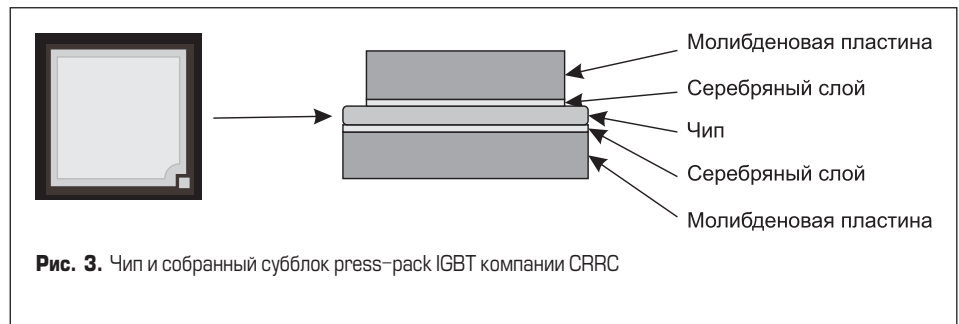


Рис. 3. Чип и собранный субблок press-pack IGBT компании CRRC

(рис. 3), то есть для связывания чипа и с верхней и с нижней молибденовыми пластинами, компания применяет технологию серебряного спекания.

Скомбинированные молибденовые пластины и чипы обрамлены высокотемпературным, стойким к воспламенению пластиковым каркасом. Затворы IGBT сочленяются с соединительной платой пружинными штифтами (рис. 4).

Специализированные конструкции платы подключения затвора обеспечивают одинаковую траекторию линии связи затвора каждого субблока.

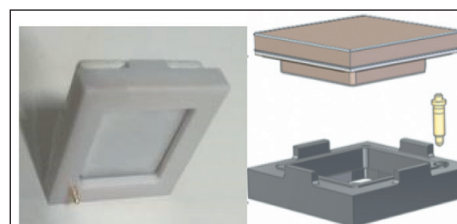


Рис. 4. Чип и субблок press-pack IGBT компании CRRC

Зажим модуля

На рис. 5 показана зона зажима внутренних узлов и каркаса под нагрузкой 85 кН. Использование такого решения весьма эффективно для устройств данного типа и широко распространено на практике вместо не-

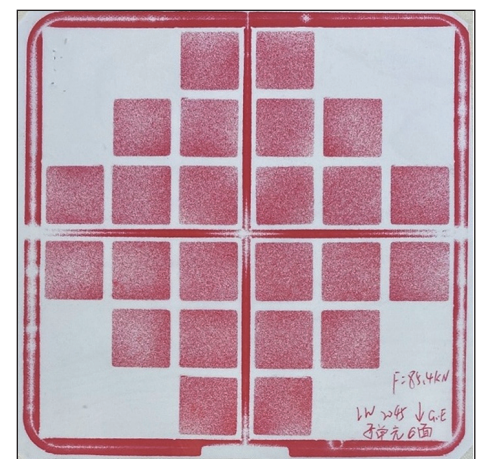


Рис. 5. Прижимная площадь внутренних узлов и каркаса с усилием до 85 кН

надежных паяных соединений, но требует определенного конструктивного подхода. Соответствующая внешняя зажимная зона внутренних узлов под усилием сжатия в 85 кН показана на рис. 6.

Тепловой расчет модуля

Компания CRRC провела тепловое моделирование и испытание на тепловое сопротивление для пресс-пакета IGBT и получила соотношение теплового сопротивления для двух сторон устройства как:

$$R_{th(C)} : R_{th(E)} = 1 : 10,5.$$

Общая оценка решения press-pack IGBT-модуля компании CRRC

Технические характеристики press-pack IGBT-модуля

Определения большинства параметров, приведенные в спецификации на press-pack IGBT компании CRRC, аналогичны

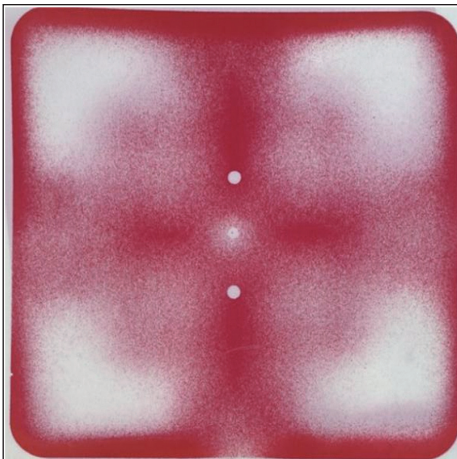


Рис. 6. Внешняя зажимная зона внутренних узлов под усилием сжатия в 85 кН

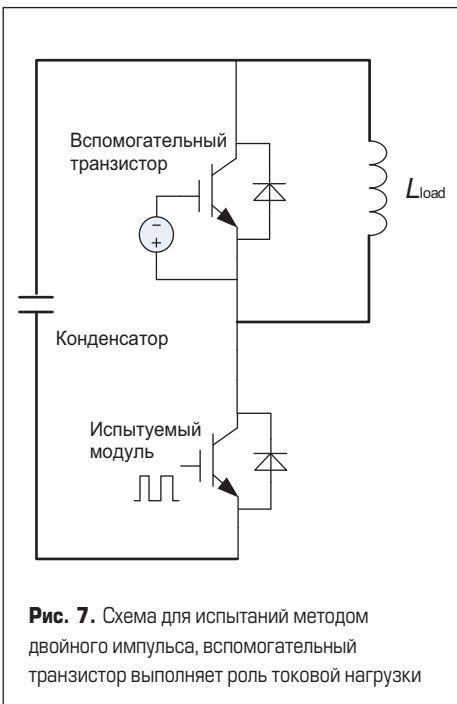


Рис. 7. Схема для испытаний методом двойного импульса, вспомогательный транзистор выполняет роль токовой нагрузки

значениям, указанным в таблице данных для изолированных IGBT-модулей компании. С точки зрения пользователя существенная разница заключается только в особенности установки нового устройства.

Характеристика переключения press-pack IGBT-модуля

Динамический тест важен для оценки динамики поведения press-pack IGBT компании CRRC. Обычно мы используем метод испытания с двойным импульсом, на рис. 7 показана топология испытательной цепи для теста с двойным импульсом, а на рис. 8 показана форма динамического испытательного сигнала.

Области безопасной работы (Safe Operating Area, SOA) press-pack IGBT-модуля компании CRRC

Номинальные параметры области безопасной работы для press-pack IGBT-модуля компании CRRC находятся в диапазоне до 4,5 кВ, что позволяет им эффективно работать с шиной напряжением до 3,4 кВ, и при этом напряжении гарантируется способность IGBT отключать сверхтоки, в два раза превышающие номинальный рабочий ток изделия. Но, как правило, press-pack IGBT компании CRRC имеют максимальные возможности, намного превышающие их приведенные в спецификациях номинальные значения. Чтобы проиллюстрировать надежность press-pack IGBT компании CRRC, рассмотрим следующие примеры.

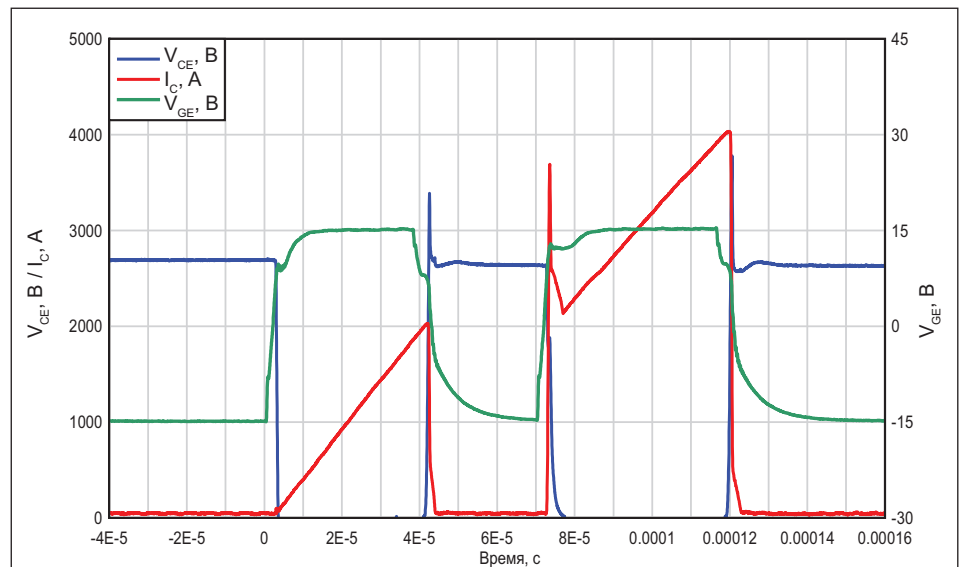


Рис. 8. Осциллограммы теста двойного импульса

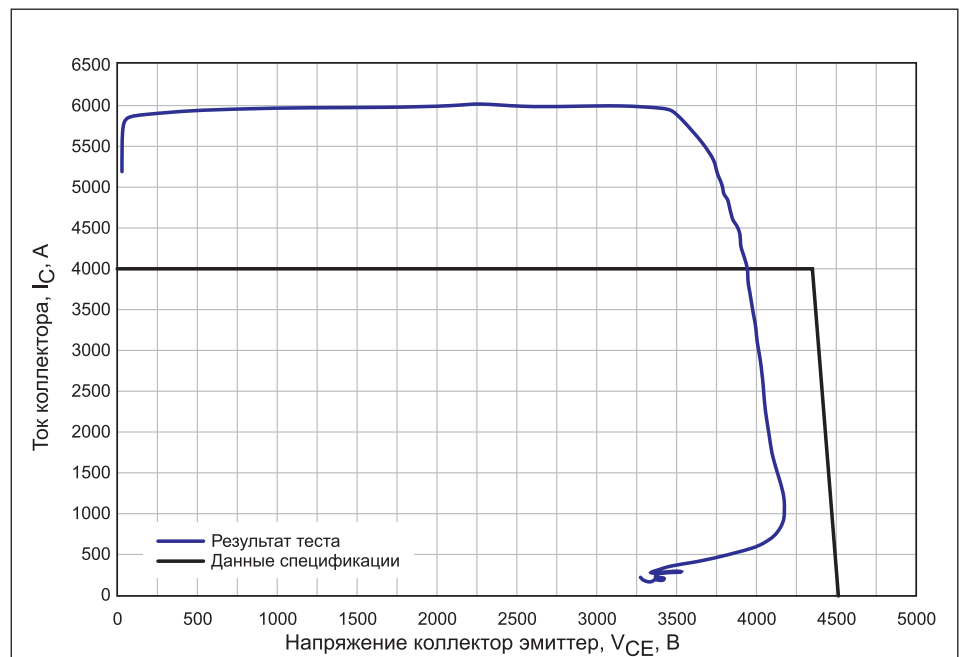


Рис. 9. Демонстрация надежности press-pack IGBT в условиях RBSOA (прямоугольная безопасная рабочая зона обратного смещения) — успешное отключение нагрузки при токе 6000 А устройством TG2000SW45ZC-P200, рассчитанным на номинальные значения тока и напряжения 2000 А/4500 В

Безопасная рабочая зона press-pack IGBT с обратным смещением (Reverse Bias Safety Operating Area, RBSOA)

На рис. 9 показана характеристика отключения press-pack IGBT TG2000SW45ZC-P200, имеющего согласно спецификации [2] рабочий ток 2000 А и блокирующее напряжение 4500 В. Отключение проводилось при напряжении шины 3400 В и температуре полупроводникового перехода +125 °С, при токе нагрузки 6000 А, что в три раза больше номинального тока этого устройства.

На рис. 10 показана характеристика выключения press-pack IGBT TG2000SW45ZC-P200. Отключение проводилось при напряжении шины 4200 В и токе нагрузки 4000 А, что в два раза больше номинального тока этого устройства [2]. При этом имеется перенапряжение модуля до 4500 В, а температура полупроводникового перехода достигает +125 °С.

Безопасная рабочая зона защитного диода (FRD) с обратным смещением (Reverse Bias Safety Operating Area RBSOA) press-pack IGBT-модуля компании CRRC

На рис. 11 показана характеристика переключения защитного диода press-pack IGBT-модуля TG2000SW45ZC-P200, рассчитанного на ток 2000 А и обратное напряжение 4500 В [2], который переключается при напряжении шины 3400 В и температуре полупроводникового перехода +125 °С (сопротивление резистора драйвера затвора включения IGBT выбрано равным 3 Ом) и осуществляет обратное восстановление при токе 5000 А, что в 2,5 раза больше его номинального тока.

Безопасная рабочая зона при коротком замыкании (Short Circuit Safe Operating Area, SCSOA) press-pack IGBT-модуля компании CRRC

На рис. 12 показано, как press-pack IGBT из состава модуля TG2000SW45ZC-P200, рассчитанный на номинальные значения тока и напряжения 2000 А/4500 В, выдерживает испытание на короткое замыкание первого типа при напряжении на шине 3400 В и температуре перехода +125 °С в течение двух раз по 20 мкс, что является промышленным стандартом. Замыкание первого типа характеризуется условием, когда IGBT-транзистор модуля включается (открывается) во время уже имеющегося на этот момент короткого замыкания в нагрузке.

Способность выдерживать ток в случае аварийного отказа press-pack IGBT-модуля компании CRRC

Для того чтобы подтвердить, что press-pack IGBT-модули компании CRRC способны выдерживать ток в течение некоторого заданного времени после возникновения короткого замыкания, компания провела

следующие испытания. Для моделирования ситуации отказа были специально собраны два отказавших субблока, полученный тестовый образец и подвергался испытанию на устойчивость при токе коллектора $I_C = 1500$ А. На рис. 13 показана схема тестирования, на рис. 14 — вариации напряжения коллектор-эмиттер V_{CE} образца относительно времени испытания.

Указание по монтажу press-pack IGBT-модуля компании CRRC

Требования к поверхности для установки радиатора

Для достижения указанных характеристик устройства монтажные поверхности должны соответствовать следующим механическим характеристикам:

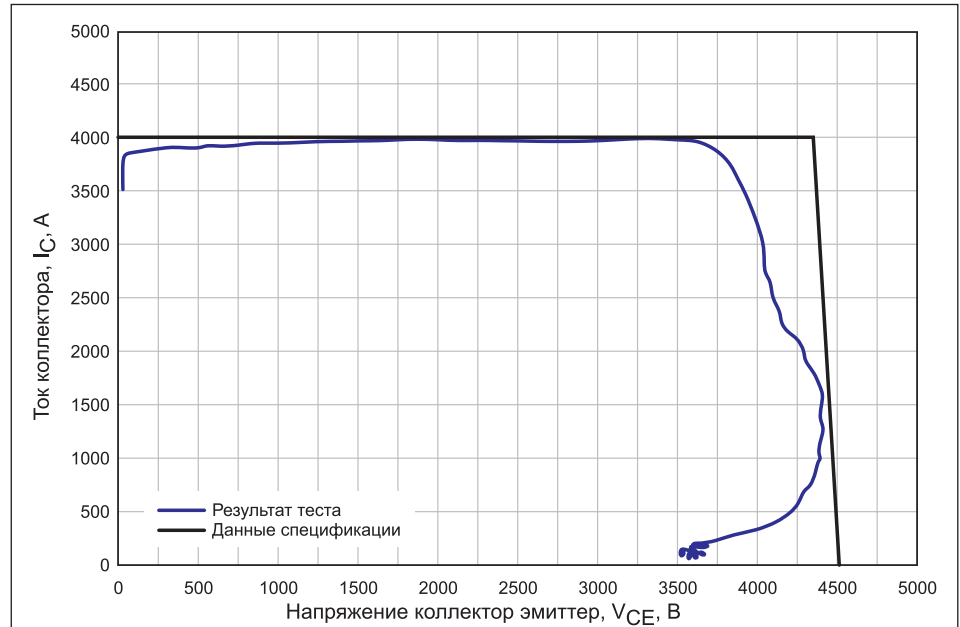


Рис. 10. Демонстрация надежности press-pack IGBT в условиях RBSOA (прямоугольная безопасная рабочая зона обратного смещения) — успешное отключение нагрузки при токе 4000 А при испытательном напряжении 4200 В устройством TG2000SW45ZC-P200, рассчитанном на номинальные значения тока и напряжения 2000 А/4500 В

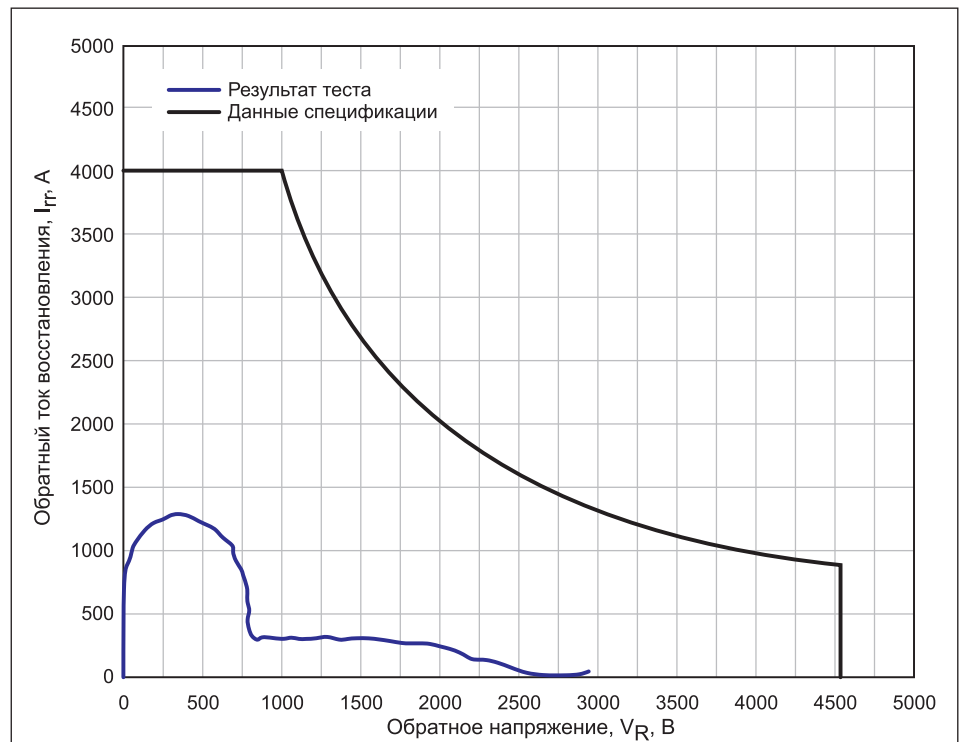


Рис. 11. Демонстрация надежности FRD в условиях RBSOA (прямоугольная безопасная рабочая зона обратного смещения) — успешное отключение нагрузки при токе 5000 А и напряжении 3400 В защитного диода устройства TG2000SW45ZC-P200, рассчитанного на номинальные значения тока и напряжения 2000 А/4500 В

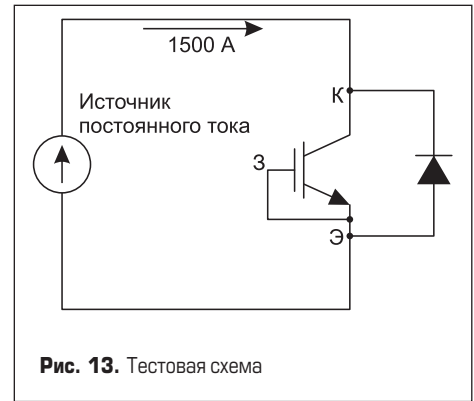
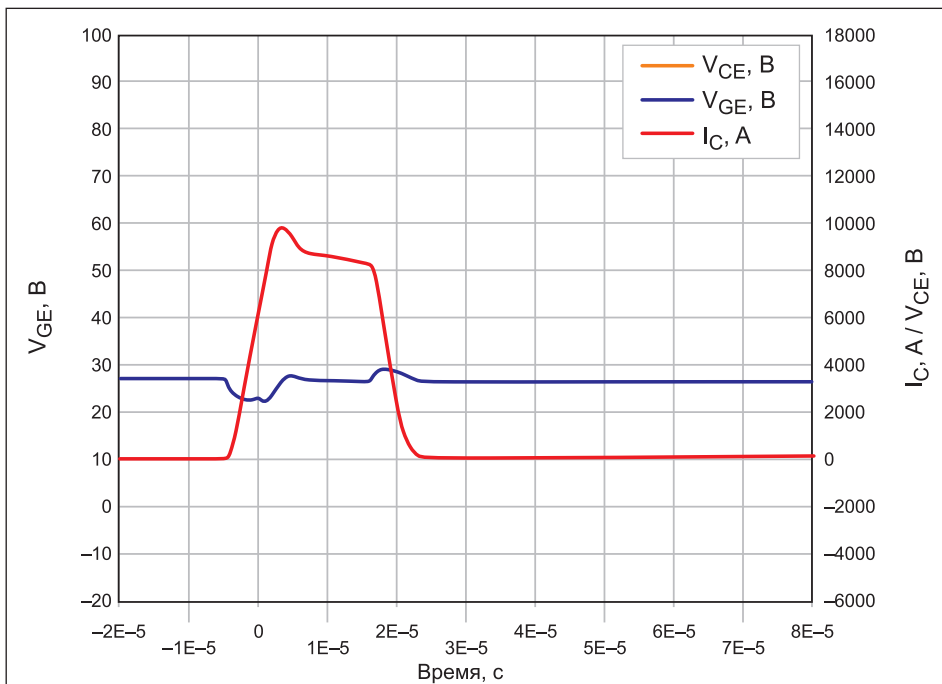


Рис. 13. Тестовая схема

Защита от электростатического разряда (Electrostatic discharge, ESD)

IGBT-модули чувствительны к воздействию электростатического разряда (ESD), следовательно, при транспортировке и хранении модули должны быть защищены от его воздействия соответствующим образом. При работе с press-pack IGBT-модулями, для предотвращения повреждения их статическим электричеством, затворы и вспомогательные клеммы модулей должны быть замкнуты накоротко проволокой или металлической полосой. При сборке настоятельно рекомендуется использовать электростатический браслет для оператора и рабочее место с токопроводящей поверхностью.

Рис. 12. Демонстрация надежности IGBT-транзистора, рассчитанного на номинальные значения тока и напряжения 2000 А/4500 В, в условиях SCSOA (безопасная рабочая зона в режиме короткого замыкания) — испытания на короткое замыкание длительностью 20 мкс при напряжении 3400 В

- неплоскостность по площади субмодуля, не более: 20 мкм;
 - неплоскостность по всей площади радиатора, не более: 100 мкм;
 - чистота поверхности, Ra, не хуже: 1,6 мкм.
- Контактные поверхности радиатора должны обрабатываться без выступов, ступенек или канавок.

Требования по монтажу

Поверхности полупроводников и радиатора желательно сначала слегка отполировать. Перед сборкой все контактные поверхности

должны быть тщательно очищены. Сборка должна проводиться в чистой среде, свободной от пыли и влаги, так как поверхности должны быть чистыми в течение всего процесса сборки. Не допускается контакт с поверхностями незащищенными руками. Для работы с полупроводниковыми приборами и радиаторами компания CRRC рекомендует использовать безворсовые перчатки. С радиаторами и с IGBT-модулями следует обращаться осторожно, чтобы избежать царапин и каких-либо других повреждений поверхностей.

Заключение

IGBT-технология, которая соединила преимущества биполярных и полевых транзисторов, обеспечивает малые затраты энергии на управление, малые потери в открытом состоянии и высокую скорость переключения. Она нашла широкое применение в импульсных источниках питания, частотных преобразователях, системах управления электрическими и тяговыми приводами, в которых она играет особую роль. Представленные в статье новые IGBT-модули компании CRRC Times Semiconductor на основе новых чипов и ноу-хау в части корпусирования обеспечивают высокую эффективность и производительность и, несомненно займут достойное место на рынке силовых полупроводниковых приборов.

Литература

1. Application Note Of CRRC Press-Pack IGBT. Zhuzhou CRRC Times Semiconductor Co.,Ltd, 2019. 08 // TG2000SW45ZC-P200 Press-pack IGBT Product Datasheet Ver.1907.
2. www.sbu.crrczic.cc/Portals/0/AttachUpload/pdf/2020011515471718.pdf
3. TG3000SW45ZC-P200 Press-pack IGBT Product Datasheet Ver.1905. www.sbu.crrczic.cc/Portals/0/AttachUpload/pdf/2020011515481872.pdf
4. Simpson R., Nicholson M. Press-pack IGBT, Application Manual, February 2019. Dynex Semiconductor Ltd. www.dynexsemi.com/assets/downloads/Press-pack_IGBT_application_manual_20190220.pdf



Рис. 14. Изменение напряжения коллектор-эмиттер VCE в течение времени испытаний