

СОВРЕМЕННЫЕ IGBT-МОДУЛИ НА НАПРЯЖЕНИЕ 1200–1700 В ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

П.Машевич, к.т.н. mashevich@angstrem.ru; В.Мартыненко martin@moris.ru;
Т.Крицкая kritskaya@angstrem.ru; В.Мускатиньев sl_a167@rambler.ru;
А.Бормотов support-nicpp@saransk-com.ru; М.Тогаев support-nicpp@saransk-com.ru

В России IGBT-модули производятся несколькими электронными компаниями. Однако большинство из них используют импортные комплектующие, что не всегда приемлемо, например при выполнении стратегически важных проектов государственного значения. ОАО "Ангстрем" и ОАО "Электровыпрямитель" в рамках соглашения между предприятиями о стратегическом сотрудничестве в сфере силовой электроники и системотехники провели работы по созданию производства конкурентоспособных IGBT- и FRD-кристаллов на напряжения 1200 и 1700 В и силовых модулей на их основе. IGBT-модули на напряжение 1200 В применяются в трехфазных инверторах с напряжением звена постоянного тока 600 В, источниках бесперебойного питания, резонансных инверторах, в электросварке и во многих других устройствах. Области применения IGBT-модулей на напряжение 1700 В – высоковольтные сети переменного и постоянного тока с напряжением соответственно до 800 и 1250 В, в тяговых приводах городского транспорта (метро, троллейбусы, трамваи), системах электропитания надводных и подводных судов, железнодорожных и большегрузных автомобильных транспортных средствах, преобразователях солнечных, ветровых станций и т.д.

ТЕХНОЛОГИЯ КРИСТАЛЛОВ IGBT

Основу силовых модулей на напряжения 1200 и 1700 В, которые производятся в ОАО "Электровыпрямитель", составляют IGBT- и FRD-кристаллы [1, 2]. Они изготавливаются в компании "Ангстрем" на технологической линии, рассчитанной на работу с пластинами кремния диаметром 150 мм. Минимальные топологические размеры – 0,6 мкм. Производительность линии до 10 тыс. пластин с кристаллами IGBT и мощных ДМОП-транзисторов в месяц.

Были проведены исследования различных вариантов конструкции IGBT-кристалла с точки зрения обеспечения минимальных статических и динамических потерь, высокой устойчивости к перегрузкам по току и напряжению. Две последние версии кристаллов IGBT (рис.1), изготовленные по технологии NPT⁺ с улучшенными

свойствами микроячеек, показали хорошие результаты тестирования в IGBT-модулях. В кристаллах IGBT версии 1 (V1) размеры транзисторных микроячеек стандартные, а в кристаллах IGBT версии 2 (V2) они меньше. Данный вариант IGBT-транзистора спроектирован с расчетом на более низкий уровень потерь при переключении и меньший ток короткого замыкания без изменения V_{CEsat} .

СИЛОВЫЕ МОДУЛИ

Сборка кристаллов в модули производилась на действующей в компании "Электровыпрямитель" технологической линии с применением узлов и деталей собственного изготовления. Для исследований параметров и характеристик новых IGBT- и FRD-кристаллов использовались стандартные конструкции IGBT-модулей

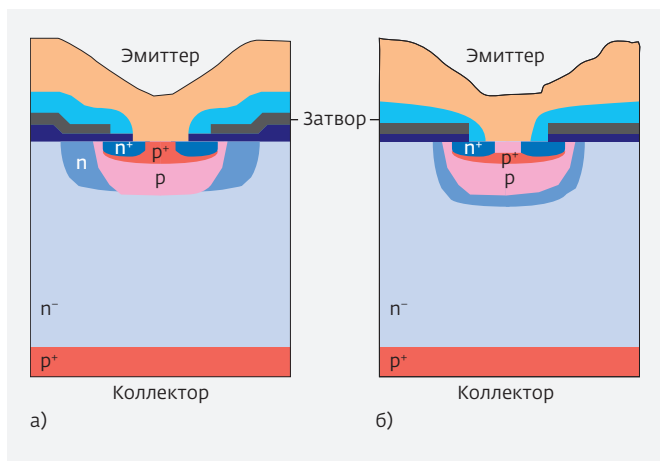


Рис.1. Поперечное сечение ячеек планарных NPT+ IGBT: а – стандартная микроячейка (версия V1), б – ячейка с уменьшенным шагом (версия V2)

серии M13 шириной 34 мм и серии M14 шириной 62 мм, собранные по схеме полумоста.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ NPT+ IGBT

Для проверки работоспособности кристаллов NPT+ IGBT, оценки их соответствия требованиям применения в промышленных приводах всесторонне исследовались статические и динамические параметры кристаллов в IGBT-модулях в предельных режимах при комнатной и максимально допустимой температурах. Приборы испытывались на устойчивость к выключению с двойного тока нагрузки (RBSOA) и к току короткого замыкания (SCSOA) при переключении с номинального напряжения. Были измерены входные, выходные и передаточные характеристики IGBT-модулей.

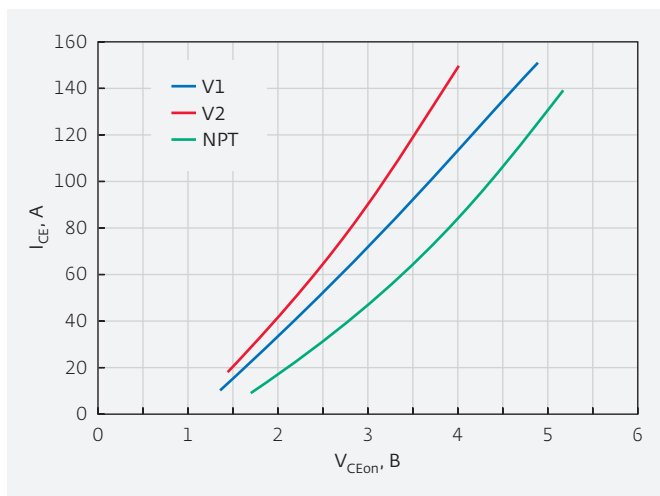


Рис.2. Вольт-амперные характеристики IGBT во включенном состоянии при $T_j=125^{\circ}\text{C}$

Исследовались зависимости динамических параметров и энергии потерь в IGBT и FRD от сопротивления входного резистора и тока коллектора при максимальной температуре. Для сравнения приведены результаты испытаний IGBT-модулей, собранных на кристаллах IGBT и FRD других производителей.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЕЙ NPT+ IGBT НА НАПРЯЖЕНИЕ 1200 В
Статические параметры

Основные статические параметры IGBT-модулей, изготовленных на основе 1200 В кристаллов NPT+ IGBT компании "Ангстрем", практически совпадают с зарубежным NPT-аналогом, а по параметру V_{CEsat} существенно превосходят его (рис.2, 3). Для IGBT версии V2 (по сравнению с IGBT версии V1) характерно более низкое значение напряжения насыщения, которое приближается к значениям, получаемым для IGBT со структурой trench gate.

Динамические параметры

При измерении динамических параметров IGBT и FRD важны схема и условия измерений. Выбранная полумостовая схема измерений обеспечивает такое же взаимодействие между IGBT и антипараллельным диодом при переключении, как и в реальных условиях применения.

Коммутационные характеристики модулей измерялись при напряжении питания 600 В, токе коллектора 50–75 А и температуре $T_j=125^{\circ}\text{C}$ (рис.4). Величина сопротивления внешнего резистора R_C варьировалась в диапазоне от 5 до 33 Ом.

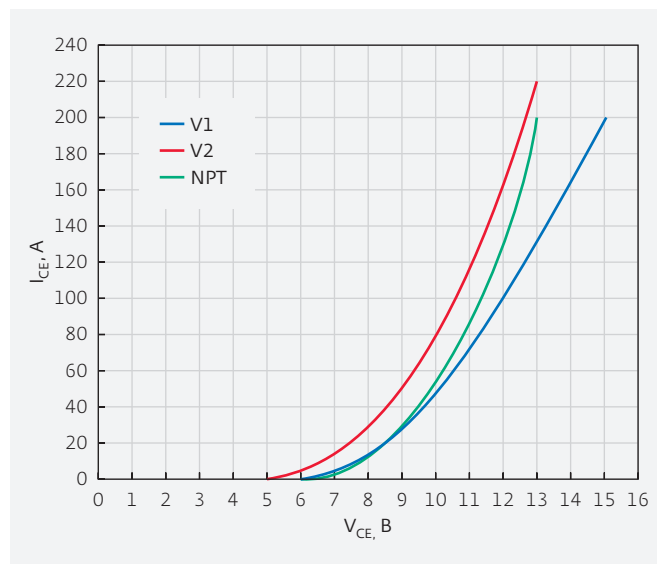


Рис.3. Передаточные характеристики IGBT $I_C=f(V_{CE})$ при $T_j=125^{\circ}\text{C}$

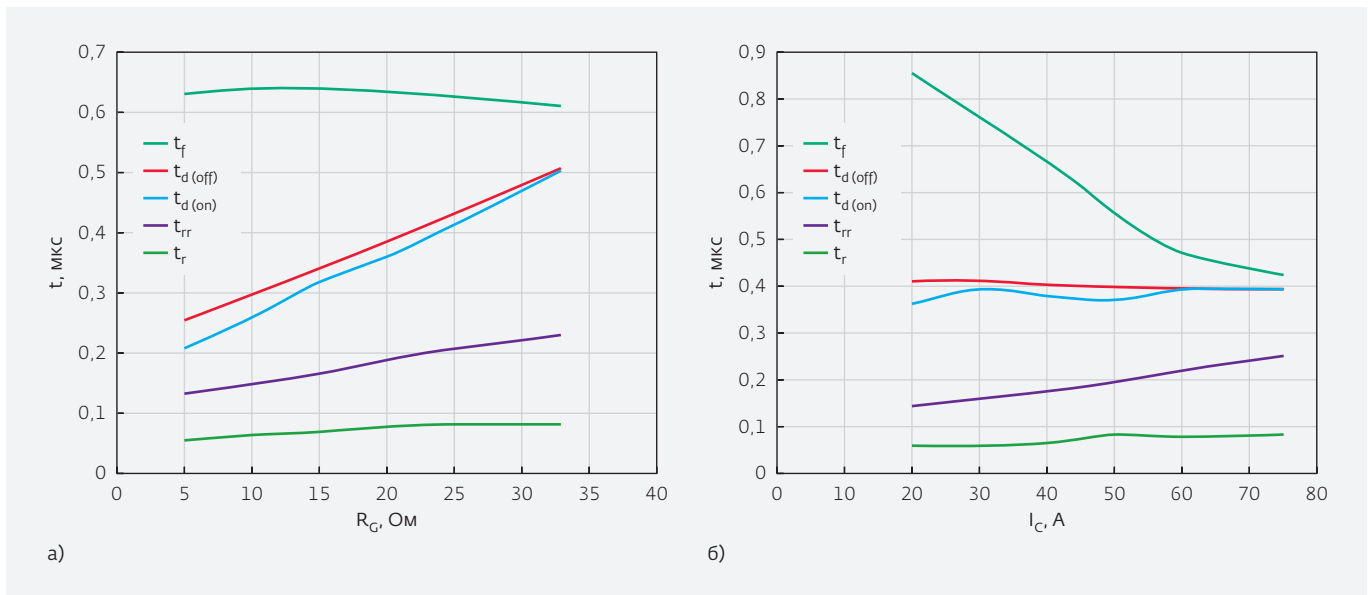


Рис. 4. Зависимость динамических параметров IGBT V2 и An75FRD12 при $V_{CC}=600$ В, $T_j=125^\circ\text{C}$: а – от сопротивления входного резистора ($I_C=50$ А), б – от тока коллектора ($R_G=22$ Ом)

Зависимости динамических параметров IGBT версии V2 и антипараллельного диода An75FRD12 от сопротивления входного резистора и тока коллектора (см. рис.4) позволяют сделать следующий вывод: по мере снижения сопротивления входного резистора (с увеличением di/dt коммутации) уменьшаются практически все времена переключения и их составляющие, кроме времени спада тока коллектора t_f , которое в большей степени зависит от физических свойств и толщины n-базы составного p-n-p-транзистора.

Слабая зависимость $t_{d(on)}$, t_r и $t_{d(off)}$ от тока коллектора в диапазоне от 20 до 80 А, а также резкий спад t_f по мере увеличения тока коллектора подтверждают, что кристаллы IGBT V2 обладают высокой нагрузочной способностью и, несмотря на сравнительно небольшую активную площадь (79 мм²), могут быть использованы в качестве единичного 75-амперного кристалла в модулях на токи 75, 150, 300 А и выше.

Энергия потерь при переключении

Этот параметр транзисторов определяет мощность потерь при работе IGBT в частотном режиме. Его можно записать так:

$$E_{sw} = E_{on} + E_{off},$$

где E_{on} , E_{off} – энергия потерь в IGBT соответственно при включении и выключении. Поскольку транзистор работает в модуле в паре с антипараллельным диодом, необходимо учитывать и энергию потерь E_{rec} , выделяющуюся в кристалле FRD во время выключения

диода. Суммарная энергия потерь, возникающая в IGBT-модулях с IGBT и антипараллельными FRD при коммутации тока, равна:

$$E_{tot} = E_{on} + E_{off} + E_{rec}.$$

На примере IGBT версии V2 показаны зависимости энергии потерь E_{on} , E_{off} и E_{rec} в IGBT-модуле от сопротивления входного резистора (рис.5а) и тока коллектора (рис.5б). На этих же рисунках приведены кривые зависимости $E_{tot} = f(R_g, I_C)$. Для сравнения на рис.6 представлены зависимости суммарной энергии потерь E_{tot} от тока коллектора для всех трех исследованных пар IGBT и FRD кристаллов: версия V1/An75FRD12, версия V2/An75FRD12, NPT аналог/FRD EmCon. Можно констатировать, что суммарные динамические потери E_{tot} у пары IGBT V2 и An75FRD12, собранной в модуль по полумостовой схеме, равны и даже немного (примерно на 5%) ниже в диапазоне токов от 60 А до 100 А динамических потерь E_{tot} зарубежного аналога с кристаллами NPT IGBT и FRD EmCon. При этом статические потери у транзисторов версии V2 на 41%, а у версии V1 на 19% ниже статических потерь зарубежного NPT-аналога.

Устойчивость к короткому замыканию

Для применения IGBT-модулей в схемах электропривода важна их устойчивость к короткому замыканию. Характеристики короткого замыкания V1- и V2-версий IGBT проверялись в полумостовой схеме в режиме КЗ первого рода. По представленным осциллограммам токов и напряжений при коротком замыкании IGBT V2

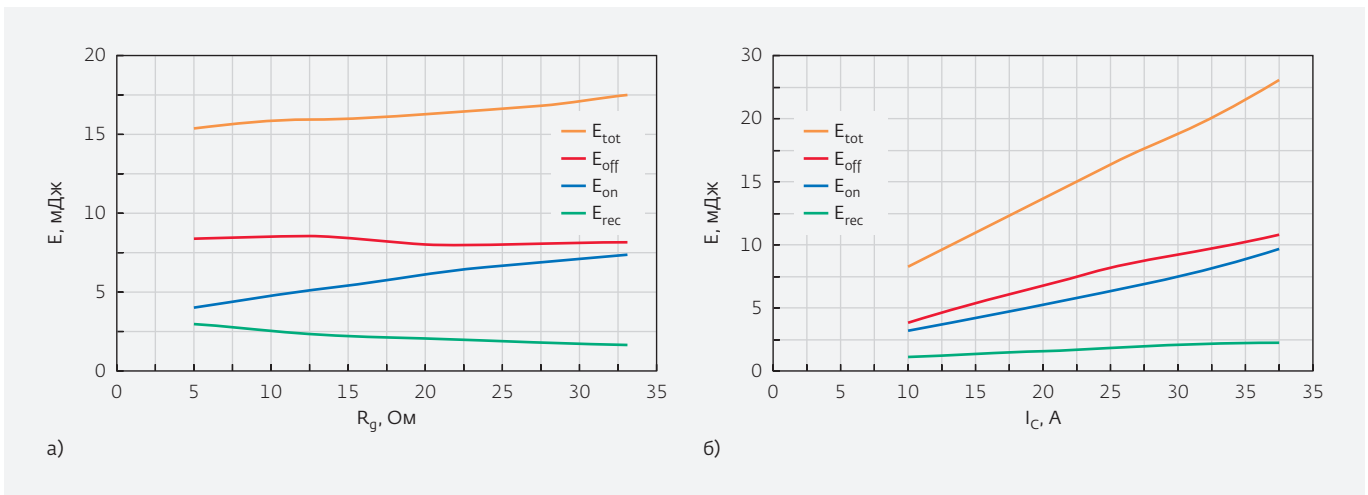


Рис.5. Зависимость энергии динамических потерь при переключении в IGBT версии V2 и диоде An75FRD12 при $V_{CC}=600$ В, $T_j=125^\circ\text{C}$: а – от сопротивления входного резистора ($I_C=50$ А), б – от тока коллектора ($R_G=22$ Ом)

в течение специфицированного времени 10 мкс в режиме $V_{CC}=900$ В, $R_G=22$ Ом, $V_{GE}=\pm 15$ В, $T_j=125^\circ\text{C}$ (рис.7а) можно сделать вывод, что транзистор успешно выдержал этот режим короткого замыкания. Одновременно с воздействием тока КЗ транзистор находился под высоким напряжением амплитудой 1100 В (с учетом индуктивного пика при выключении).

Приборы версии V1 ограничивают ток короткого замыкания на уровне четырехкратного номинального тока, формы импульсов токов и напряжений при коротком замыкании IGBT версии V1 при $t_{SC}=40$ мкс изображены на рис.7б.

Транзисторы IGBT V1 успешно выдержали испытания, продемонстрировав тем самым высочайшую прочность при коротком замыкании в течение 40 мкс при повышенных напряжении и температуре без ухудшения характеристик.

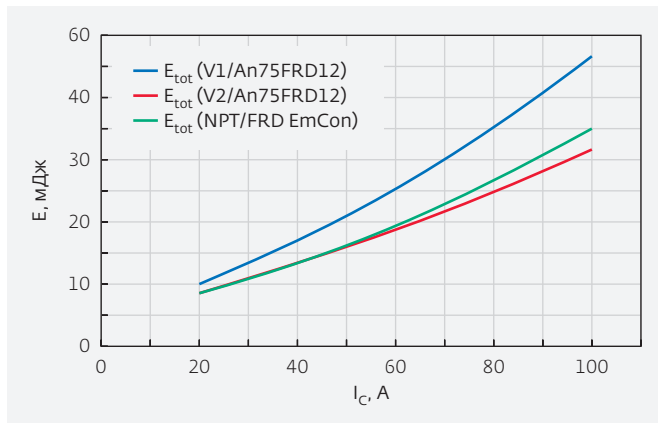


Рис.6. Зависимость суммарной энергии динамических потерь от тока коллектора

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЕЙ NPT+ IGBT НА НАПРЯЖЕНИЕ 1700 В Статические параметры

Из анализа прямых ВАХ транзисторов NPT+ IGBT компании "Ангстрем" и NPT-аналога 100 А/1700 В при $V_{GE}=15$ В и температурах 25 и 125°C (рис.8) следует

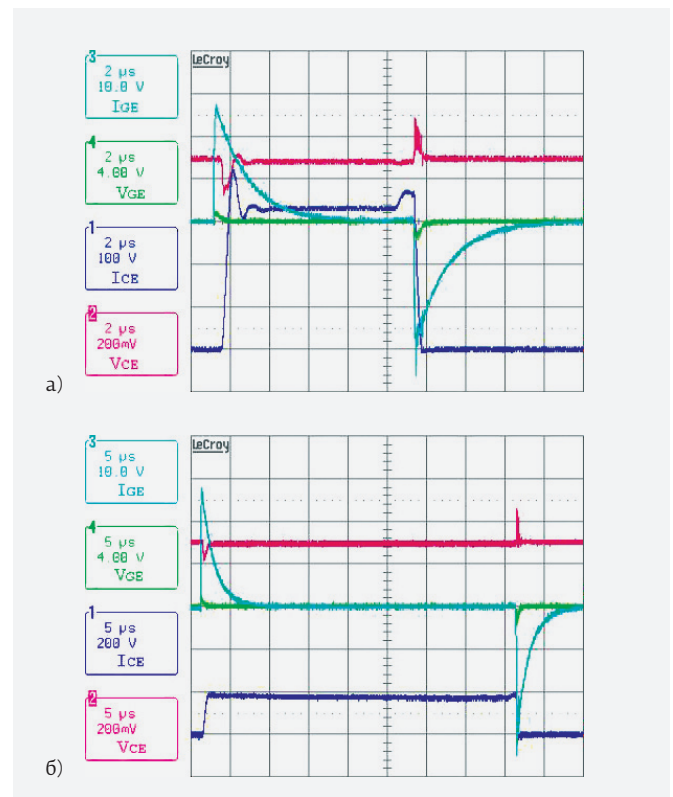


Рис.7. Осциллограммы токов короткого замыкания: а – IGBT V2, б – IGBT V1

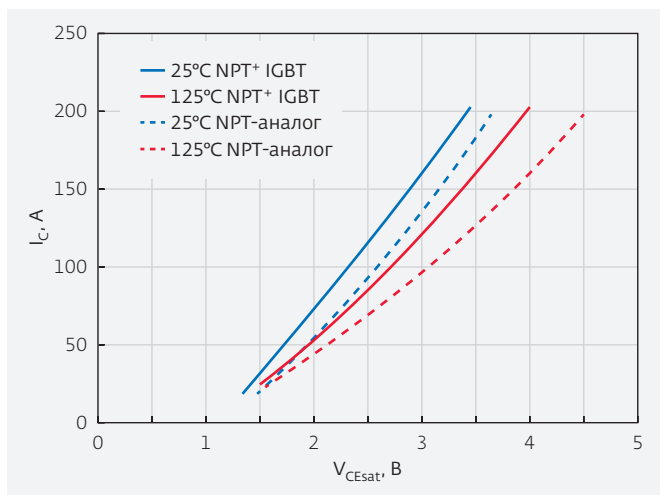


Рис.8. Выходные ВАХ транзисторов 100А/1700В

вывод, что NPT+ IGBT, так же, как и NPT-аналог, имеет положительный температурный коэффициент напряжения насыщения в диапазоне токов от 10 до 200 А. Это делает возможным легкое параллельное соединение как кристаллов NPT+ IGBT, так и модулей на их основе без специального подбора IGBT. Из полученных результатов следует также, что NPT-аналог имеет более высокие напряжения насыщения в сравнении с новым NPT+ IGBT.

Передаточная характеристика IGBT компании "Ангстрем" (рис.9) показывает изменение тока коллектора транзистора при изменении напряжения на затворе и величину прямой транспроводимости g_{fs} , которая определяется как производная функции $I_C = f(V_{GE})$ при специфицированном коллекторном токе. При токе коллектора 100 А величины g_{fs} у транзисторов NPT+ IGBT и у NPT-аналога одинаковы и составляют приблизительно 50 См.

Динамические параметры

Переходные характеристики переключения модулей измерялись при токе коллектора 100 А, напряжении шины постоянного тока 900 В и температурах 25 и 125°C. Величина сопротивления внешнего резистора R_G составила 15 Ом. По результатам измерения характеристик переключения были определены основные динамические параметры NPT+ IGBT и NPT аналога, которые обычно указываются в информационных материалах и документации изготовителя: $t_d (on)$, t_r , $t_d (off)$, t_f . Определялась также суммарная энергия потерь, генерируемая внутри IGBT во время включения и выключения тока коллектора (одиночный импульс). Энергия потерь IGBT на ток 100 А и напряжение 1700 В, измеренные в режиме $V_{CC} = 900$ В, $I_C = 100$ А, $R_G = 15$ Ом, $T_j = 125^\circ\text{C}$, представлены в таблице.

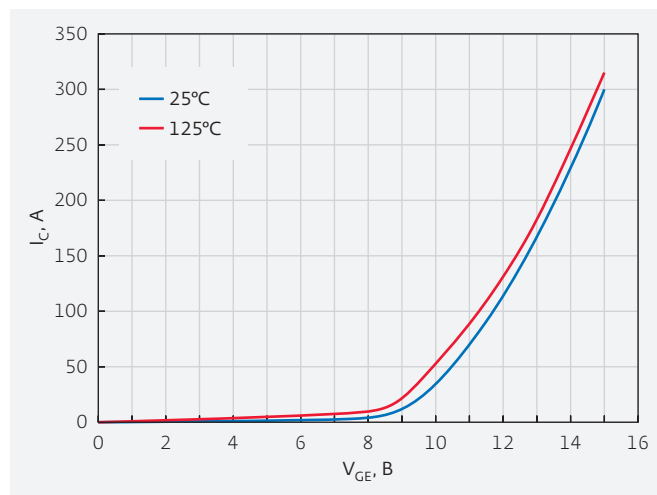


Рис.9. Передаточные характеристики транзисторов 100А/1700В NPT+ IGBT компании "Ангстрем"

Энергия потерь при включении и выключении транзисторов NPT+ IGBT и NPT-аналога практически одинакова. Нужно отметить, что радиационным облучением готовых структур NPT+ IGBT можно снизить динамические потери при выключении E_{off} . Напряжение насыщения у NPT+ IGBT будет увеличиваться, однако режим облучения можно подобрать таким образом, чтобы V_{CEsat} не превышало значения V_{CEsat} NPT-аналога.

Устойчивость к токам перегрузки и короткого замыкания

С целью проверки способности IGBT выключить ток перегрузки, значение которого в два раза превышает номинальное (классификационное) значение, проводят испытания на воздействие двойного по величине тока. При этом транзистор должен выдерживать возникающие при резком спаде коллекторного тока перенапряжения и высокие dv/dt , которые могут достигать 10 кВ/мкс.

Транзисторы на 100 А/1700 В успешно выдержали испытания двойным током при напряжении на шине

Весь мир СВЧ электроники **AVREX**
www.AVREX.ru

SignalCore
PRESERVING SIGNAL INTEGRITY
Миниатюрные
синтезаторы
частоты

spectratime
Precision Timing Solutions®
Рубидиевые
стандарты
частоты

vaunix
USB-приборы:
аттенуаторы
фазовращатели
синтезаторы частоты

Мощные СВЧ-фильтры

Официальный представитель в России

Таблица. Энергия потерь IGBT 100 A/1700 В (типичные значения)

Тип IGBT	Тест включения IGBT, E_{on} , мДж	Тест выключения IGBT, E_{off} , мДж	E_{sw} мДж
NPT+	53	31	84
NPT-аналог	51	32	83

постоянного тока 900 В и максимально допустимой температуре. Перенапряжения, вызванные резким изменением токов при выключении двойного тока коллектора, не превышали 200 В ($V_{CE\ max} < 1100$ В).

Характеристики короткого замыкания зависят от следующих факторов: напряжение на затворе V_{GE} , напряжение шины постоянного тока V_{CC} , время короткого замыкания t_{SC} , температура перехода T_j (рис.10). Они обычно специфицируются при напряжении затвора $V_{GE}=15$ В. В зависимости от передаточной характеристики рост или уменьшение напряжения на затворе вызывает соответственно повышение или снижение тока короткого замыкания I_{SC} (см. рис.10). Увеличение температуры приводит к снижению тока короткого замыкания транзисторов NPT+ IGBT компании "Ангстрем" и NPT-аналога из-за роста напряжения насыщения (см. рис.10). Причем точка инверсии у аналога расположена на кривой зависимости $I_{SC}=f(V_{GE})$ при токе 130 А, а у транзистора NPT+ IGBT при токе 300 А. Вследствие этого в рабочем режиме при $T_j=125^\circ\text{C}$ значения токов короткого замыкания у транзистора NPT+ IGBT и NPT-аналога отличаются не более, чем на 50 А.

Из осциллограмм токов и напряжений, снятых при коротком замыкании транзисторов NPT+ IGBT и NPT-аналога в течение специфицированного времени 10 мкс в режиме $V_{CC}=1000$ В, $R_G=15$ Ом, $V_{GE}=\pm 15$ В, $T_j=125^\circ\text{C}$, следует, что транзисторы успешно выдержали этот режим короткого замыкания. Одновременно с воздействием тока КЗ транзисторы находились под высоким напряжением амплитудой 1400 В (с учетом индуктивного пика при выключении).

Проводилась также серия последовательных испытаний NPT+ IGBT при $V_{CC}=1000$ В, $V_{GE}=\pm 15$ В и $T_j=125^\circ\text{C}$ с длительностью импульсов тока короткого замыкания $t_{SC}=10, 20, 30$ и 40 мкс.

Транзисторы 100А/1700В NPT+ IGBT успешно выдержали все испытания SCSOA, продемонстрировав высокую прочность к короткому замыканию при повышенном напряжении и температуре, при длительностях тока, в четыре раза превышающих предельно допустимые значения, без ухудшения характеристик.

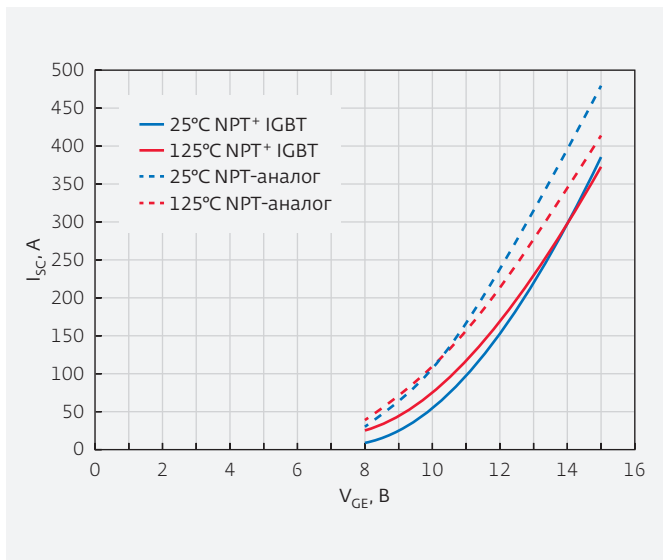


Рис.10. Зависимость тока короткого замыкания транзисторов NPT+ IGBT и NPT-аналога от напряжения затвор-эмиттер

* * *

В заключение можно сказать, что новая технология NPT+ IGBT компании "Ангстрем" обеспечивает высокий уровень параметров и характеристик IGBT-модулей с напряжением 1200 и 1700 В: низкие напряжения насыщения, превосходные характеристики переключения и короткого замыкания. Сделан важный шаг к широкому использованию отечественных кристаллов IGBT и модулей на их основе в промышленных применениях.

На основе отечественных кристаллов NPT+ IGBT в компании "Электровыпрямитель" освоено производство серии беспотенциальных IGBT-модулей на напряжение 1200 и 1700 В по схемам полумостов, чопперов и одиночных ключей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Машевич П.Р., Мартыненко В.А., Мускатиных В.Г., Крицкая Т.Б. и др.** Исследования параметров и характеристик обогащено-планарных IGBT с малыми потерями на напряжение 1200 В // Силовая электроника. № 4. 2013. С. 60–65.
2. **Машевич П.Р., Мартыненко В.А., Мускатиных В.Г., Крицкая Т.Б. и др.** Параметры и характеристики планарных NPT+ IGBT с повышенной инжекцией на напряжение 1700 В российского производства для применения в силовых модулях большой мощности // Силовая электроника. № 2. 2014. С. 26–32.

Контактная информация: тел./факс: (8342) 48-07-33, 27-02-83, e-mail: martin@moris.ru, nicpp@saransk-com.ru