

# 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

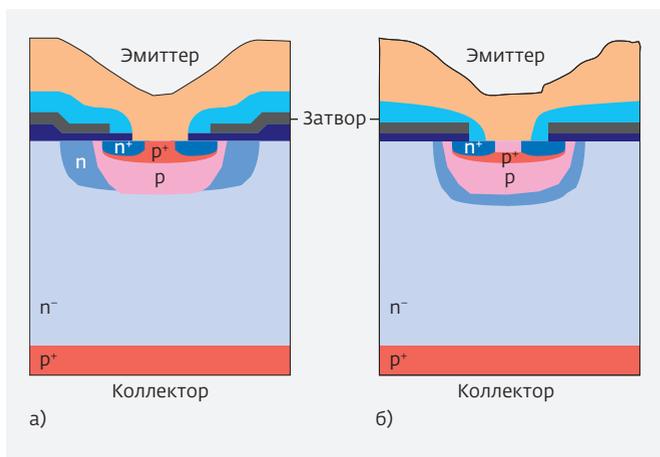
Основу силовых модулей на напряжения 1200 и 1700 В, которые производятся в ОАО "Электровыпрямитель", составляют IGBT- и FRD-кристаллы [1, 2]. Они изготавливаются в компании "Ангстрем" на технологической линии, рассчитанной на работу с пластинами кремния диаметром 150 мм. Минимальные топологические размеры – 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<sup>+</sup> 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

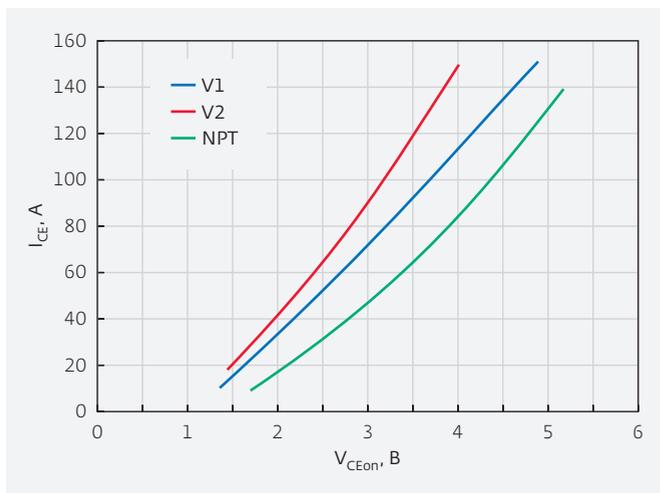


**Рис.1.** Поперечное сечение ячеек планарных NPT+ IGBT: а – стандартная микроячейка (версия V1), б – ячейка с уменьшенным шагом (версия V2)

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<sub>j</sub>=125°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.

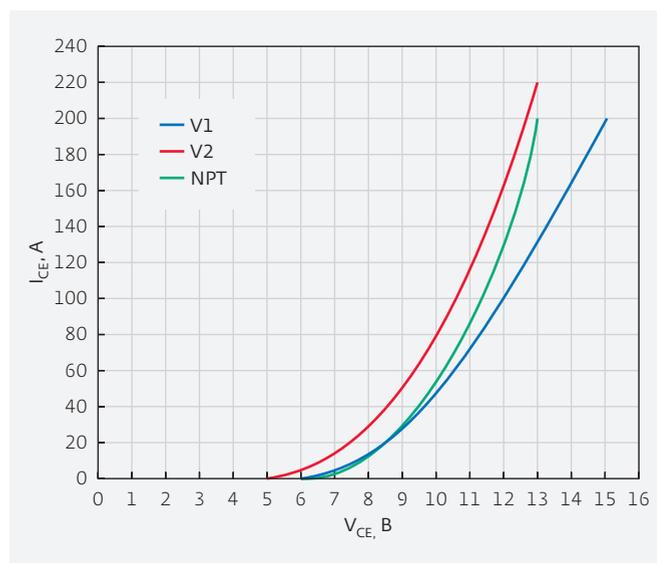
**ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЕЙ NPT+ IGBT НА НАПРЯЖЕНИЕ 1200 В**  
**Статические параметры**

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<sub>CEsat</sub> 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<sub>j</sub>=125°C (рис.4). Величина сопротивления внешнего резистора R<sub>C</sub> варьировалась в диапазоне от 5 до 33 Ом.



**Рис.3.** Передаточные характеристики IGBT I<sub>C</sub>=f(V<sub>CE</sub>) при T<sub>j</sub>=125°C

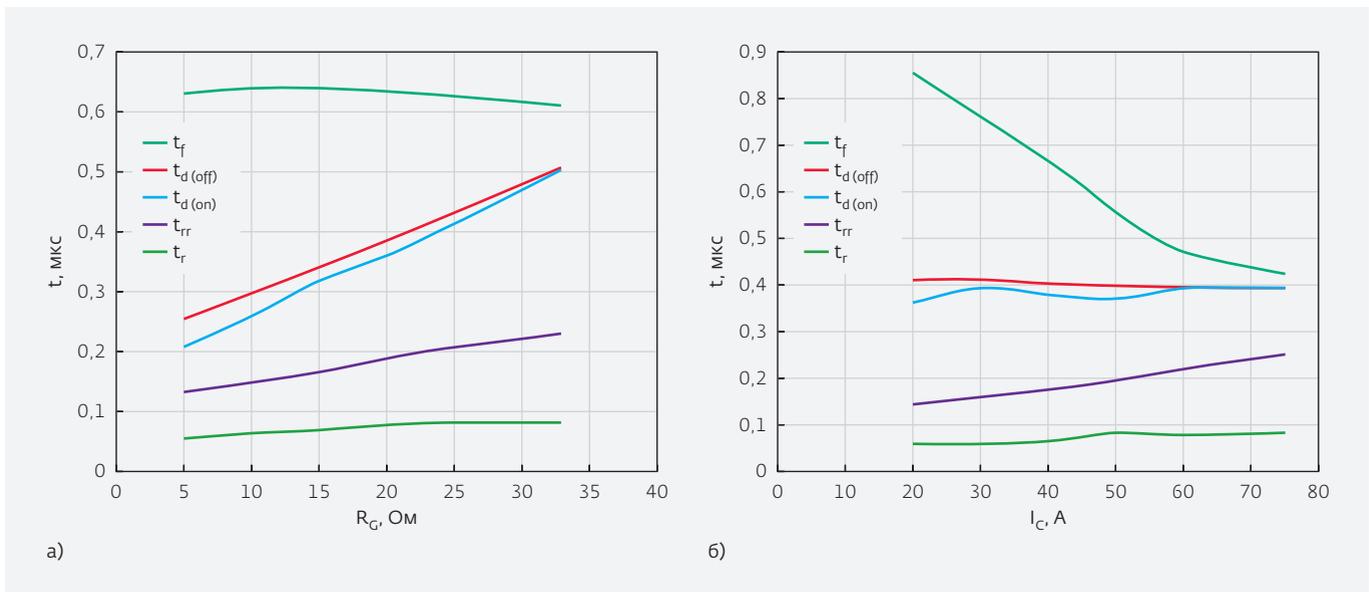


Рис. 4. Зависимость динамических параметров IGBT V2 и An75FRD12 при  $V_{CC} = 600$  В,  $T_j = 125^\circ\text{C}$ : а – от сопротивления входного резистора ( $I_C = 50$  А), б – от тока коллектора ( $R_G = 22$  Ом)

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 мм<sup>2</sup>), 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

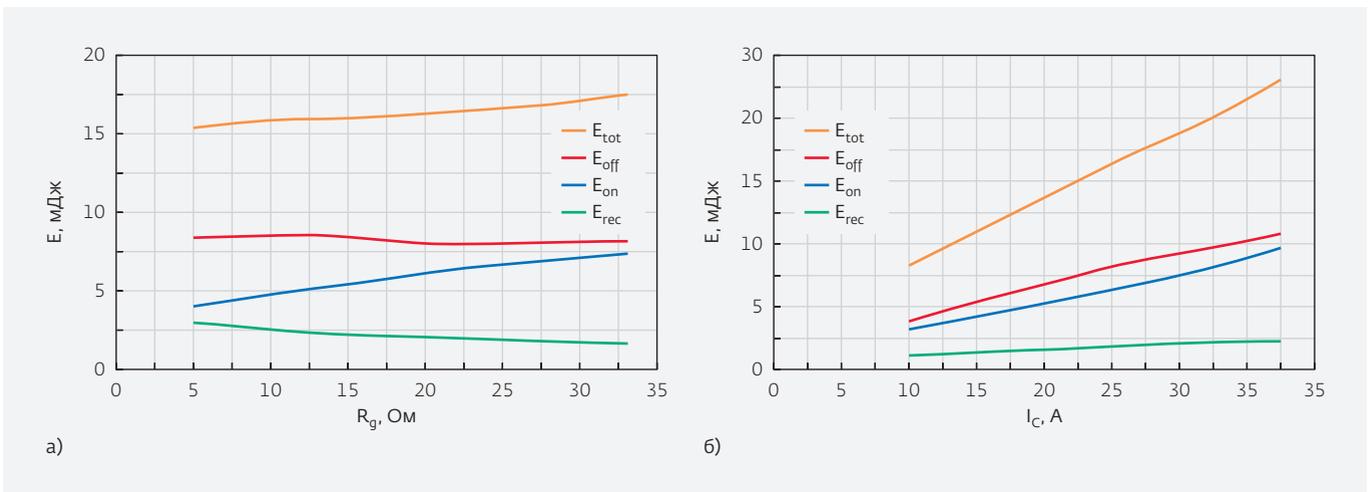


Рис.5. Зависимость энергии динамических потерь при переключении в IGBT версии V2 и диоде An75FRD12 при V<sub>CC</sub>=600 В, T<sub>j</sub>=125°C: а – от сопротивления входного резистора (I<sub>c</sub>=50 А), б – от тока коллектора (R<sub>G</sub>=22 Ом)

в течение специфицированного времени 10 мкс в режиме V<sub>CC</sub>=900 В, R<sub>G</sub>=22 Ом, V<sub>GE</sub>=±15 В, T<sub>j</sub>=125°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<sub>SC</sub>=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.

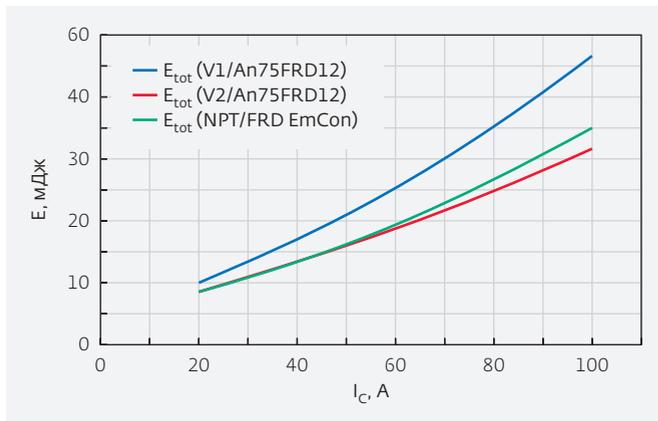


Рис.6. Зависимость суммарной энергии динамических потерь от тока коллектора

### 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<sub>GE</sub>=15 В и температурах 25 и 125°C (рис.8) следует

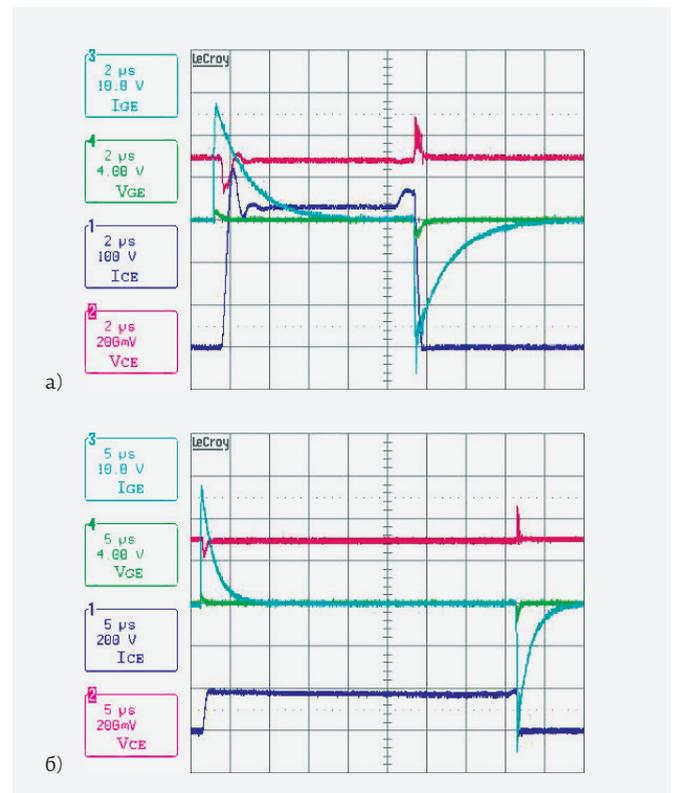


Рис.7. Осциллограммы токов короткого замыкания: а – IGBT V2, б – IGBT V1

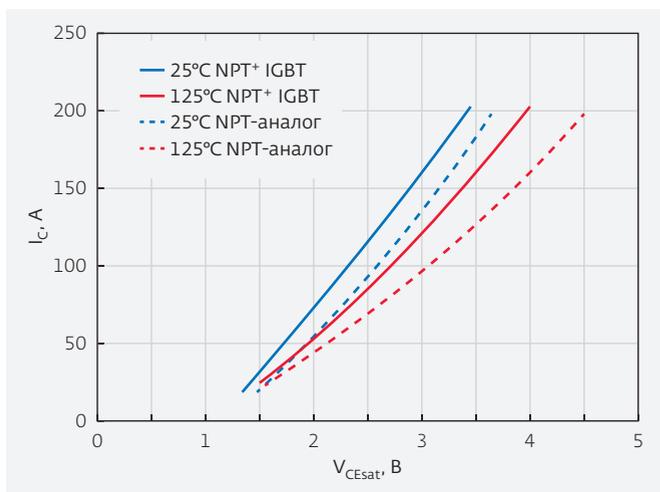


Рис.8. Выходные ВАХ транзисторов 100А/1700В

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.

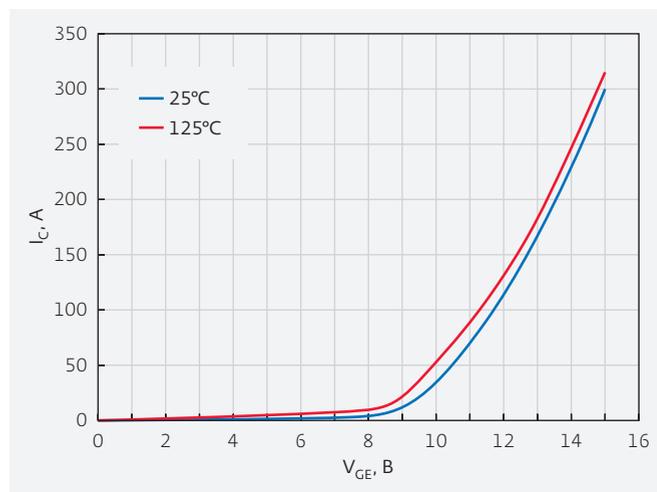


Рис.9. Передаточные характеристики транзисторов 100А/1700В NPT+ IGBT компании "Ангстрем"

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

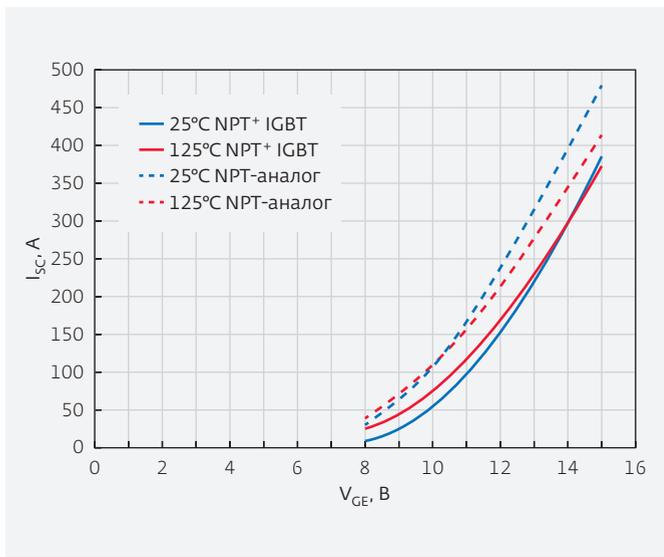
постоянного тока 900 В и максимально допустимой температуре. Перенапряжения, вызванные резким изменением токов при выключении двойного тока коллектора, не превышали 200 В ( $V_{CE\ max} < 1100$  В).

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