

IGBT Trench 6,5-кВ/1000-А

модуль расширяет границы RBSOA на различных температурах

В аварийных режимах, особенно в системах HVDC, IGBT-модули в последовательной или параллельной конфигурации должны выдерживать высокие линейные напряжения (V_{line}) и при этом безопасно отключаться. В таких экстремальных условиях полупроводниковые приборы обычно функционируют за пределами рекомендованной в технической документации области безопасной работы (RBSOA), ограничивающей режим отключения из-за повышенной вероятности динамического лавинного пробоя, увеличивающего энергию потерь выключения (E_{off}). Повышение E_{off} снижает надежность из-за ускорения процесса старения и увеличивает вероятность «теплого убегания» и разрушения устройства. В статье проводятся исследования RBSOA модуля Trench IGBT Duplex 6,5 кВ/1000 А при экстремально высоких напряжениях и различных температурах. На основе экспериментальных результатов и моделирования предложены рекомендации по усовершенствованию конструкции прибора, направленные на уменьшение вероятности динамического лавинного пробоя и времени работы в режиме SSCM (Switching Self-Clamping Mode — режим динамического самоограничения).

**Лютер-Кинг Нгвенсон
(Luther-King Ngwendson)**

Luther.Ngwendson@dynexsemi.com

Ян Дивайни (Ian Deviny)

Ли Кулбек (Lee Coulbeck)

Артур Су (Arthur Su)

**Эрайфул Ислам
(Ariful Islam)**

Введение

На выставке PCIM-19 Duplex представил новые варианты IGBT-модулей 6,5 кВ/1000 А с основанием 190×140 мм, предназначенные для применения в системах HVDC и тяговых приводах (рис. 1) [1]. Традиционно кривая RBSOA IGBT-модуля 6,5 кВ для режима переключения ограничена по току на уровне $2 \times I_{nom}$ (при $V_{ce} = 4,5$ кВ). Это обеспечивает достаточный запас по перенапряжению, наводимому на паразитной индуктивности, и исключает пробой транзистора из-за превышения V_{ce} [2–5]. Однако в аварийных режимах IGBT в последовательной или

параллельной конфигурации может находиться под напряжением свыше 4,5 кВ, при этом он также должен безопасно отключаться без превышения тепловых возможностей конструктива.

В статье впервые представлены результаты исследований пределов напряжения RBSOA для Trench IGBT Duplex 6,5 кВ/1000 А. Подход предусматривает оценку влияния динамического лавинного процесса на режим выключения и энергию E_{off} при увеличении линейного напряжения до 5,3 кВ и при сохранении фиксированного значения тока отключения 1000 А. Показано, что до $V_{line} = 5,3$ кВ прибор безопасно отключается, блокирующая способность не превышает и в динамическом лавинном процессе доминирует режим SSCM, что приводит к увеличению времени задержки отключения и энергии E_{off} причем эффект снижается с ростом температуры. Кроме того, отмечено, что некоторая оптимизация буферной/коллекторной области и сопротивления n -базы в новом модуле еще больше сокращает продолжительность периода SSCM.

Экспериментальные результаты

Для тестирования RBSOA была использована установка, показанная на рис. 2. Тестируемый прибор (DUT) — вариант модуля Duplex 1 кА/6,5 кВ с низкими потерями. На рис. 3 представлен процесс выключения тока $I_c = 2$ кА при напряжении $V_{line} = 4,6$ кВ, пиковая мощность ~ 10 МВт. Здесь имеется достаточный

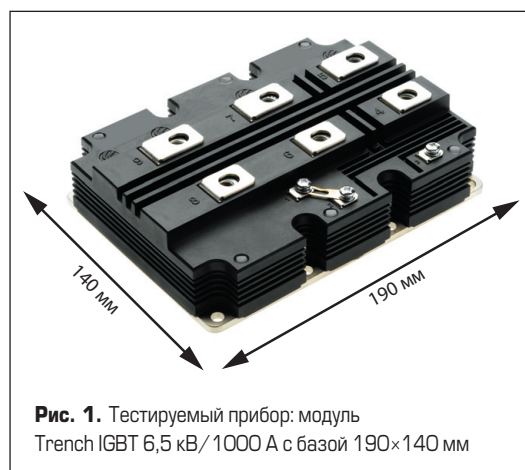


Рис. 1. Тестируемый прибор: модуль Trench IGBT 6,5 кВ/1000 А с базой 190×140 мм

запас для типовых приложений, где V_{line} обычно составляет 3600 В. Однако основное внимание уделено изучению RBSOA при $V_{line} > 4,5$ кВ при различных температурах.

Хорошо известно, что с приближением к напряжению пробоя допустимое значение тока отключения для IGBT уменьшается, поэтому для предотвращения «теплого убегания» в данном исследовании был установлен ток коммутации 1000 А. На рис. 4а, б показан процесс отключения при V_{line} до 5,3 кВ, температуре +25 и +100 °С, пиковая величина напряжения достигает 5,5 кВ. Период времени, в течение которого устройство находится в стадии динамического лавинного пробоя SSCM (ΔT), составляет около 5 мкс при +100 °С и ~9 мкс при +25 °С. Увеличение времени SSCM при +25 °С может привести к чрезмерному росту потерь E_{off} . Модуль IGBT не имеет оппозитного диода при этих испытаниях, и в некоторых зонах температура кристалла может легко превысить рекомендуемый порог T_{jmax} . Это приведет к отказу, а потому тестирование проводится при температуре базовой платы +100 °С. Данные режимы были подтверждены в процессе моделирования.

На рис. 5 представлены результаты моделирования: успешное отключение тока 1000 А при $V_{dc} = 5500$ В и выход из строя при отключении под напряжением 5700 В. Из графиков видно, что температура внутри отказавшего прибора продолжает расти и это приводит к его разрушению. Таким образом, даже если температура базовой платы удерживается на уровне +125 °С, ее повышение до +260 °С из-за увеличения E_{off} вследствие динамического лавинного пробоя приводит к росту T_{jmax} выше рекомендуемого значения +150 °С и отказу. При выключении IGBT и начале

подъема V_{ce} динамический лавинный процесс начинается сразу же после отключения MOS-каналов, снабжающих электронами область n -дрейфа.

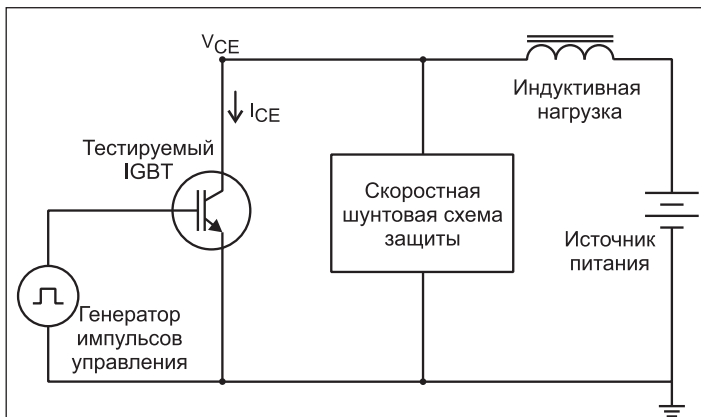


Рис. 2. Схема тестирования для анализа процесса выключения IGBT. Тестируемый прибор (DUT) не имеет оппозитного диода

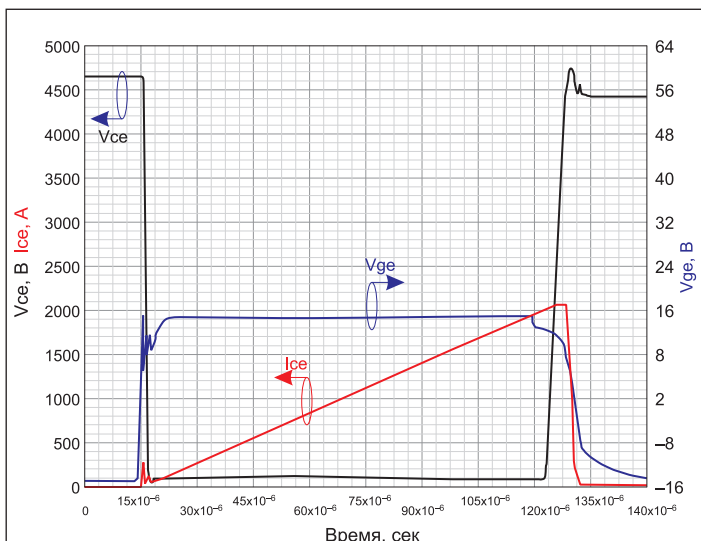
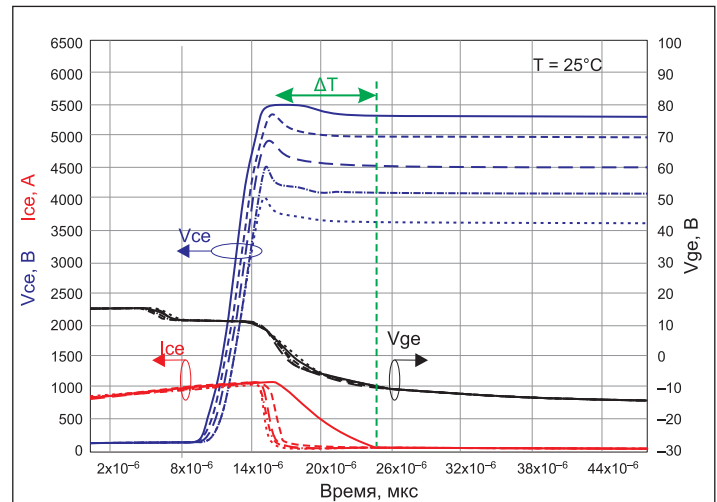
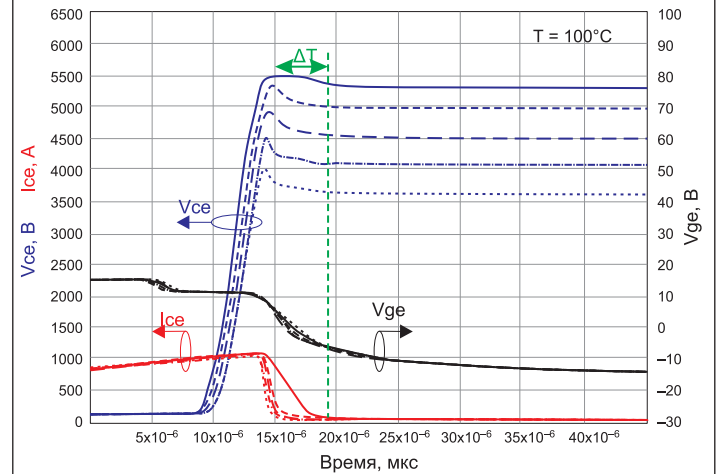


Рис. 3. Отключение тока $I_c = 2000$ А при $V_{line} = 4600$ В, $T = +150$ °С, $V_{ge} = \pm 15$ В, $C_{ge} = 330$ нФ, $R_{goff} = 15$ Ом, $L_s = 200$ нГн



а



б

Рис. 4. Выключение IGBT при увеличении V_{line} при температуре: а) +25 °С; б) +100 °С, ΔT – рост времени задержки выключения из-за увеличения периода SSCM при 5,3 кВ, $V_{line} = 3,6-5,3$ кВ, $V_{ge} = \pm 15$ В, $I_{OFF} = 1000$ А, $L_s = 200$ нГн, $C_{ge} = 330$ нФ, $R_{goff} = 15$ Ом

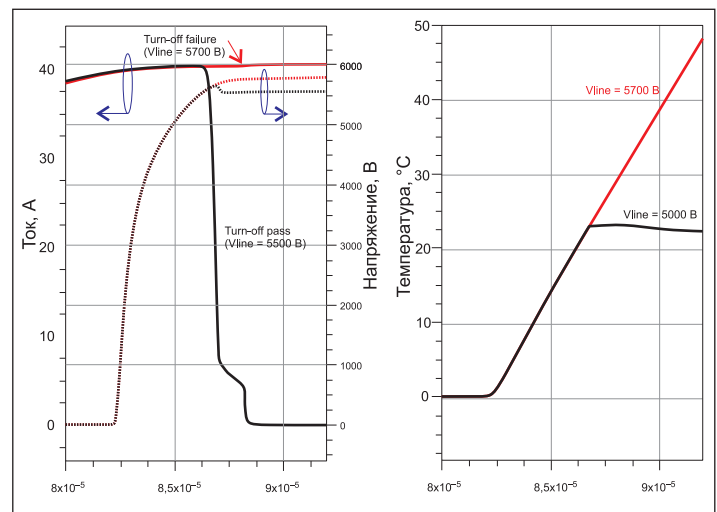


Рис. 5. Электротермическое моделирование при температуре базовой платы +125 °С показывает успешное выключение при $V_{line} = 5500$ В и отказ при 5700 В. Температура прибора начинает снижаться после выключения, при отказе она продолжает увеличиваться

Таблица. Моделирование влияния различных структур буферной и коллекторной области на характеристики динамического лавинного процесса, $V_{ce(sat)}$ и E_{off} .
 $V_{ce} = 5 \text{ кВ}$, $I_{ce} = 42 \text{ А}$, $R_{goff} = 8 \text{ Ом}$, $T = +25 \text{ °C}$

Моделирование структуры	Буфер	Коллектор	Ударная ионизация (II)	Начало динамического лавинного процесса, В	$V_{ce(sat)}$, В	E_{off} на чип, Дж
Ref	std	std	OFF	ref	2,4	0,29 (ref)
A	std		ON	1500		0,64 (+120%)
B	LC	2500		0,35 (+20%)		
C	std	33%		3,5	0,31 (+7%)	
D	66%-ная доза + увеличенная глубина	33%	3200	3,2	0,35 (+20%)	

Из-за недостатка электронов для компенсации восстанавливающихся дырок изменяется эффективное фоновое легирование и распределение электрического поля, характеризующееся меньшим значением dV/dt , в котором доминирует динамический лавинный процесс. Если не произойдет отказ прибора, динамический пробой продолжится, пока не израсходуется оставшаяся плазма. Пока тепловой предел не превышен, перенапряжение на паразитной индуктивности в цепи коммутации будет расти до достижения напряжения пробоя V_{ce} [6]. Увеличенный «хвостовой ток» при испытаниях на 5,3 кВ объясняется тем, что носители, генерируемые во время

динамического лавинного пробоя, обеспечивают дополнительный ток базы для работы биполярной $n-p-n$ -части прибора, даже когда MOS-каналы выключены. Таким образом, увеличение длительности SCCM-периодов может привести к потере управления затвором, что сопровождается образованием нитевых пробоев, повышением температуры и отказом прибора.

Оптимизация для улучшения характеристик динамического лавинного процесса

При выключении IGBT, когда MOS-каналы блокированы, 1-D-изменение электрического поля может быть описано уравнением (1),

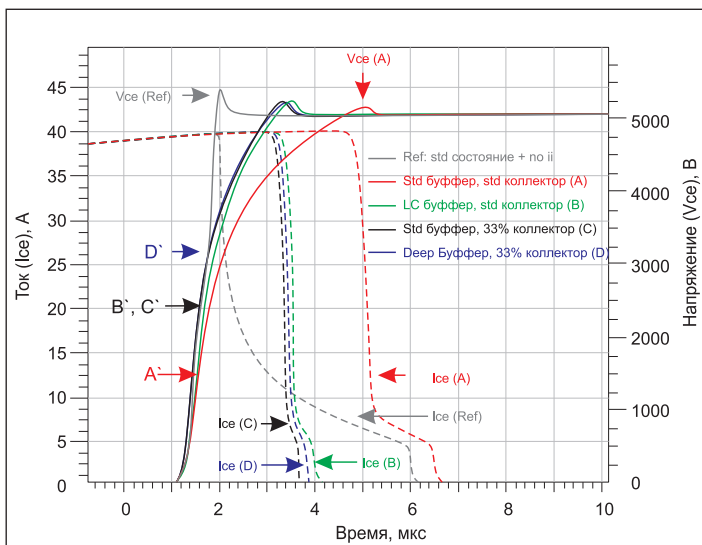


Рис. 6. Моделирование процесса выключения для различных вариантов буферной и коллекторной области (A–D) в сравнении с идеальной стандартной структурой, где ударная ионизация отключена. Стрелки A–D указывают на начало динамического лавинного пробоя, когда наклон V_{ce} становится меньше, чем у $V_{ce(ref)}$. $V_{line} = 5 \text{ кВ}$, $I_{ce} = 42 \text{ А}$, $R_{goff} = 8 \text{ Ом}$, $T = +25 \text{ °C}$

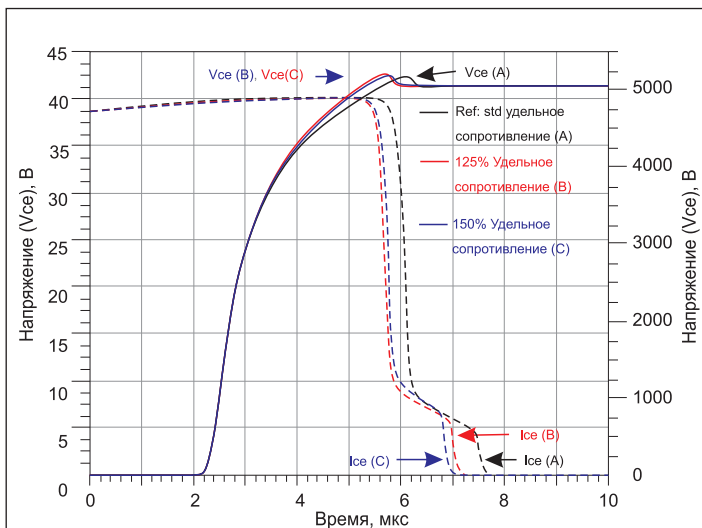


Рис. 7. Моделирование процесса выключения для различных сопротивлений p -базы

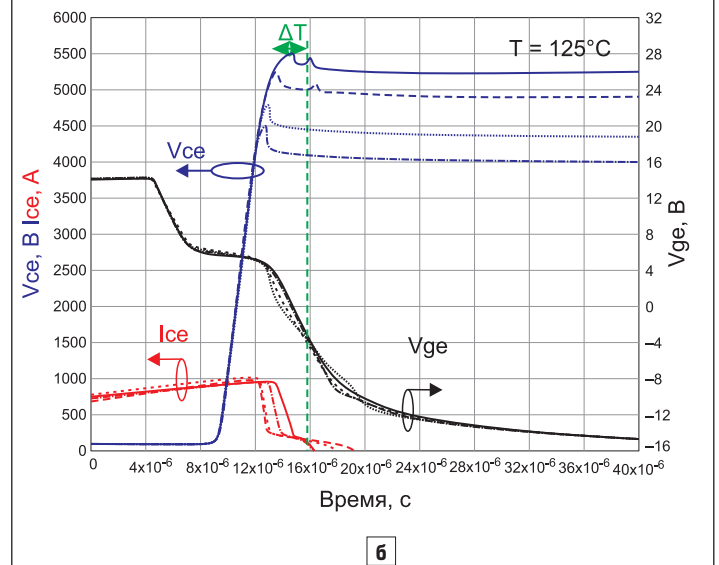
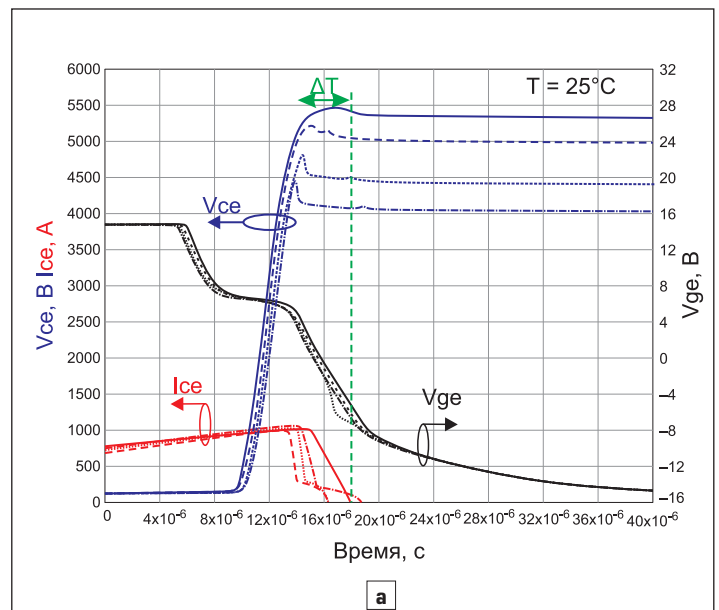


Рис. 8. Результаты измерений режима выключения оптимизированного модуля при: а) $+25 \text{ °C}$; б) $+100 \text{ °C}$, ΔT — увеличение времени задержки выключения из-за лавинного периода SCCM при 5,3 кВ, $V_{line} = 3,6-5,3 \text{ кВ}$, $V_g = \pm 15 \text{ В}$, $I_{off} = 1000 \text{ А}$, $L_s = 200 \text{ нГн}$, $C_{ge} = 330 \text{ нФ}$, $R_{goff} = 15 \text{ Ом}$

если сопротивление R_{goff} достаточно мало, чтобы не оказывать никакого влияния. Следовательно, градиент электрического поля dE/dx зависит от концентрации легирования n -базы N_D и плотности дырок (ρ). Выражение (2) показывает, что плотность тока J_p внутри прибора сильно влияет на dE/dx .

$$\frac{dE}{dx} = \frac{q}{\epsilon} (N_D + \rho), \quad (1)$$

$$\rho = \frac{J_p}{V_{sat} \times q}. \quad (2)$$

Это означает, что при одинаковом значении V_{ce} при выключении устройство с большей плотностью плазмы (или плотностью тока) будет иметь более высокий dE/dx (и электрическое поле) из-за меньшего пространственного заряда, поскольку истощение краевых областей идет гораздо медленнее по направлению к коллекторному переходу. Сильное электрическое поле приводит к увеличению ударной ионизации и, следовательно, динамического лавинного процесса.

Дизайн буферной и коллекторной области

На рис. 6 показаны результаты моделирования влияния различных вариантов буферной и коллекторной области на характеристики выключения IGBT. Эталонная версия представляет собой идеальный случай стандартной структуры (а), где ударная ионизация (II), моделирующая динамический лавинный процесс, отключена. На графиках видно, что малая коллекторная область (С), буферная зона с контролем времени жизни носителей или LC-буфер (В), а также комбинация малого коллектора и глубокого буфера (D) могут улучшить динамические лавинные характеристики, но только за счет $V_{ce(sat)}$, как показано в таблице. Начало динамического лавинного процесса отмечено стрелками А', В', С' и D', указывающими на точки, где наклон V_{ce} становится меньше, чем у эталонного $V_{ce(ref)}$.

Показано, что хотя структуры В, С и D имеют улучшенные динамические лавинные характеристики за счет снижения дырочной инжекции и плотности плазмы внутри прибора, вариант с низкой дозой и глубокой буферной областью (D) сдвигает начало динамического лавинного процесса до $V_{ce} = 3200$ В по сравнению с 2500 В для вариантов В и С и только 1500 В для варианта А.

Влияние удельного сопротивления n -базы

Из выражения (2) видно, что более высокое удельное сопротивление n -базы (то есть меньший N_D) дает меньшее значение dE/dx . Другие преимущества от снижения N_D состоят в повышении пробивного напряжения и уменьшении интенсивности отказов FIT за счет сокращения пикового электрического поля. На рис. 7 показано, что при большем удельном сопротивлении кремния улучшаются динамические лавинные характеристики, поскольку при этом растет скорость dV/dt , уменьшается задержка выключения и «хвостовой ток». Моделирование демонстрирует снижение E_{off} на 7 и 15% соответственно для структур с удельным сопротивлением 125 и 150%. Еще одним преимуществом повышенного удельного сопротивления кремния является то, что при этом отсутствует риск ухудшения $V_{ce(sat)}$ из-за модуляции проводимости n -базы биполярной части IGBT. Необходимо уделять пристальное внимание выбору удельного сопротивления кремния, поскольку очень слабое легирование n -базы может привести к негативным тепловым эффектам, таким как образование нитевых пробоев при высоких температурах.

Характеристики оптимизированного прибора

При разработке новой оптимизированной структуры IGBT были учтены особенности, рассмотренные выше, а также модифицированы ячейки верхнего слоя. При токе 1000 А модуль имеет $V_{ce(sat)}$ 2,3 и 2,8 В при температуре +25 и +150 °С соответственно. На рис. 8а, б показаны результаты измерений: по сравнению с эспорами на рис. 4 длительность SSCM при $V_{line} = 5,3$ кВ уменьшилась с 9 до 4 мкс при +25 °С

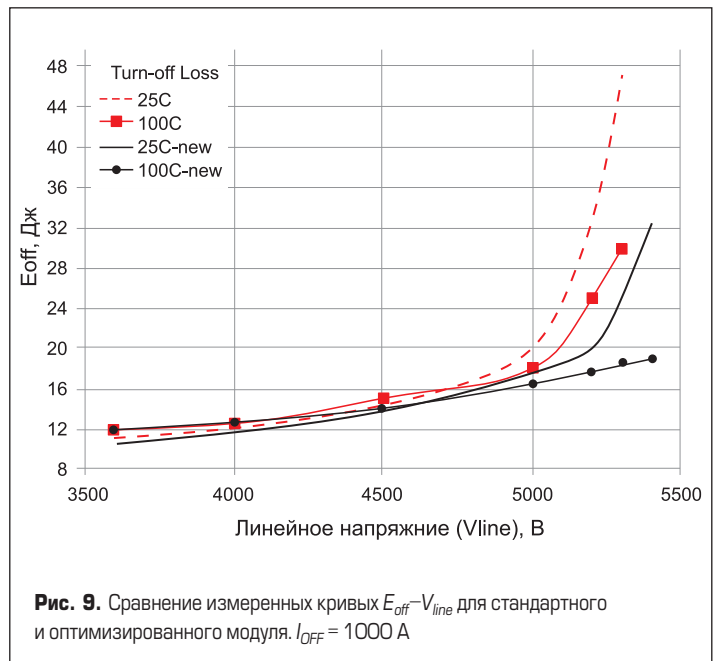


Рис. 9. Сравнение измеренных кривых $E_{off}-V_{line}$ для стандартного и оптимизированного модуля. $I_{OFF} = 1000$ А

и с 5 до 2 мкс при +100 °С. Это выражается в значительном снижении E_{off} при 5,3 кВ, составляющем 40–50%, как показано на рис. 9. В улучшенном приборе граница зоны линейности из-за доминирования лавинного процесса на кривой $V_{line}-E_{off}$ смещается с 4,5 до 5,2 кВ при +25 °С, а при +100 °С — с 5 кВ до >5,4 кВ.

Заключение

В статье продемонстрирована высокая надежность модулей Dynex 6,5 кВ/1000 А в терминах RBSOA для линейного напряжения. Экспериментальные результаты показывают, что модуль может безопасно отключать ток $I_c = 1000$ А при напряжении V_{line} до 5,4 кВ и температуре +25 и +100 °С при тестировании в испытательной установке без оппозитного диода и без охлаждения. Структура IGBT была оптимизирована для сокращения времени, затрачиваемого в режиме динамического лавинного пробоя SSCM (Switching Self-Clamping Mode) перед выключением. Это также приводит к снижению T_{doff} , что важно для использования в системах HVDC и автоматических выключателях.

Оптимизация привела к уменьшению энергии потерь выключения на 40–50%, что позволяет замедлить процессы износа и повысить срок службы модулей. Обсужден вопрос выбора удельного сопротивления буферной зоны, области коллектора и кремния в качестве возможных параметров оптимизации IGBT 6,5 кВ для достижения приемлемых высоких пределов напряжения RBSOA. Правильный выбор конструктивных параметров приводит к смещению границы линейности кривой $V_{line}-E_{off}$ в область более высоких напряжений без ухудшения показателя $V_{ce(sat)}$.

Литература

1. Kopta A. et al. 6500 V SPT+ HiPak Modules Rated at 750 A. PCIM, 2008.
2. Weber D. et al. 6.5kV RCDC for increased Power Density in IGBT-Modules. ISPSD, 2014.
3. Koguchi H. et al. A 6.5kV 1000A IGBT Module with Side Gate HiGT. PCIM, 2018.
4. Papadopoulos C. et al. The 3rd gen 6.5kV HiPak2 module rated 1000A and 150°C. PCIM, 2018.
5. Ngwendon L.-K. et al. New 6.5kV/1000A modules with LOCOS Trench Oxide IGBT Chips and Design Variation for Traction and HVDC Applications. PCIM, 2019.
6. Rahimo M. et al. Switching-Self-Clamping-Mode "SSCM", a breakthrough in SOA performance for high voltage IGBTs and Diodes. ISPSD, Kitakyushu, Japan, 2004.