

# Повышая скорость: SiC-модули Mitsubishi Electric

Во втором номере журнала «Силовая электроника» 2018 года была опубликована статья о новейшей разработке компании на то время — полумостовых модулях напряжением 3,3 кВ на основе карбида кремния (SiC), рассчитанных на тяговые применения [1]. Сейчас, всего год спустя, технологии в области SiC продвинулись существенно дальше — завершается разработка кристаллов на 6,5 кВ. В данной статье представлен обзор последних достижений компании Mitsubishi Electric в области исследования, разработок и применения SiC-модулей. Особое внимание уделяется высоковольтным SiC-модулям.

**Экхард Таль**  
(Eckhard Thal)

**Дзюндзи Ямада**  
(Junji Yamada)

**Виктор Толстомятов**

Victor.Tolstopyatov@mer.mee.com

### SiC-исследования в Японии

Исследования в области полупроводников на основе SiC в Японии координируются организацией под названием NEDO (New Energy and Industrial Development Organization — организация новых типов энергии и промышленного развития). NEDO — крупнейшая японская R&D-организация, координирующая развитие передовых стратегических технологий в стране. Разработка силовых модулей высокого напряжения с высокой плотностью мощности — одно из важнейших направлений, и компания Mitsubishi Electric здесь ключевой игрок [2]. В данной статье приведены несколько выдающихся достижений в области SiC-технологий, поддерживаемых NEDO.

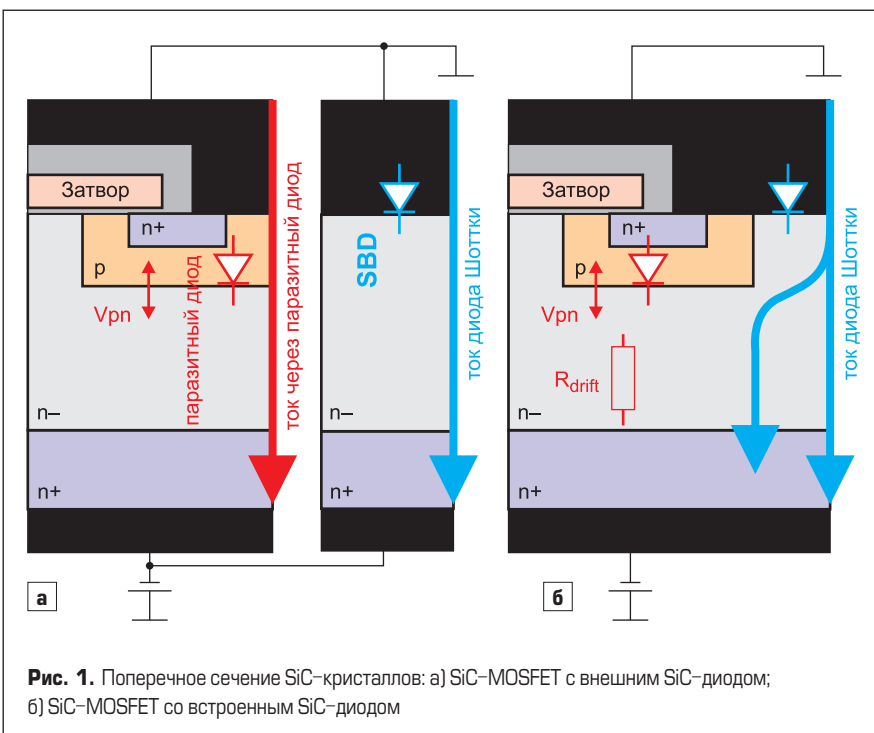
### SiC-MOSFET — транзистор со встроенным диодом Шоттки

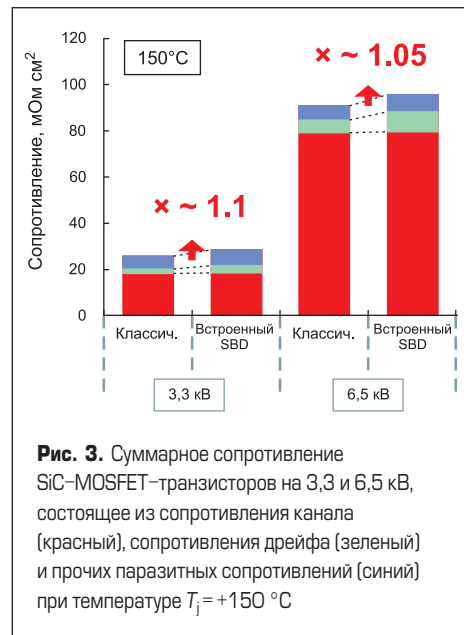
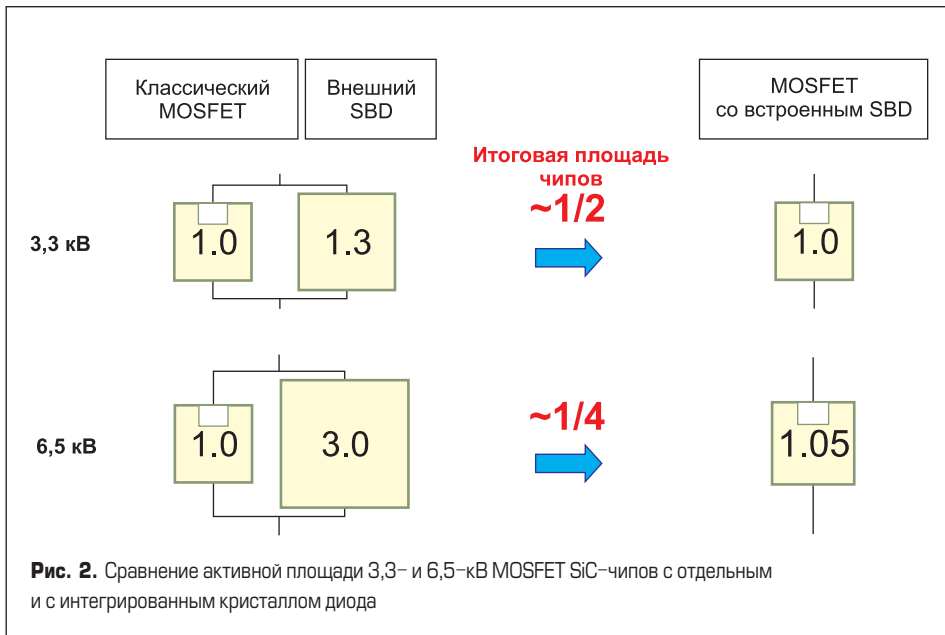
Концепция встроенного диода Шоттки (SBD — Schottky-Barrier-Diode) в полевой транзистор показана на рис. 1 [3].

Из рисунка видно, что SiC-MOSFET-транзистор уже сам по себе имеет в своей структуре паразитный диод. Однако использовать его не рекомендуется, поскольку биполярный ток приводит к увеличению так называемых дефектов упаковки в структуре транзистора, что ведет к нарушению его параметров (росту сопротивления канала). Чтобы избежать этого эффекта, используется отдельный кристалл диода (рис. 1а). Обе структуры, показанные на рис. 1, по сути, работают на одном и том же принципе: пока падение напряжения во внешнем диоде меньше, чем напряжение  $V_{pn}$  в MOSFET, и ток через паразитный диод не протекает.

Основная масса представленных сейчас на рынке SiC-модулей построена по принципу (а). Однако исследования показывают [3], что объединение SBD с MOSFET-транзистором в одном чипе (б) позволяет добиться гораздо большей плотности мощности до появления тока в паразитном диоде, чем в случае с отдельными чипами. Соответственно, активная площадь кристалла, необходимая для формирования пары транзистор-диод, может быть существенно уменьшена с использованием подхода (б).

Исследования показывают [4], что суммарная площадь кристалла со встроенным диодом для напряжения 3,3 кВ на 50% ниже, чем в случае с отдельными чипами MOSFET и SBD. Для напряжения 6,5 кВ эта разница еще больше и достигает 75% (рис. 2). Таким образом, можно сделать вывод, что актуальность технологии объединения SiC-чипа диода и транзистора в один кристалл возрастает с повышением напряжения. Однако внедрение структуры SBD в транзистор увеличивает (ухудшает) сопротивление его канала, но это влияние незначительно (рис. 3).





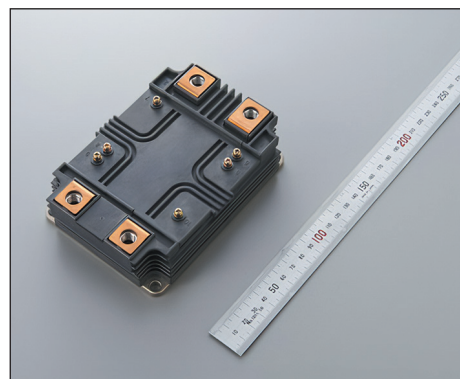
Характеристика прямого падения в MOSFET SiC-транзисторе со встроенным SBD показана на рис. 4.

**Новый FullSiC полумостовой модуль на 6,5 кВ**

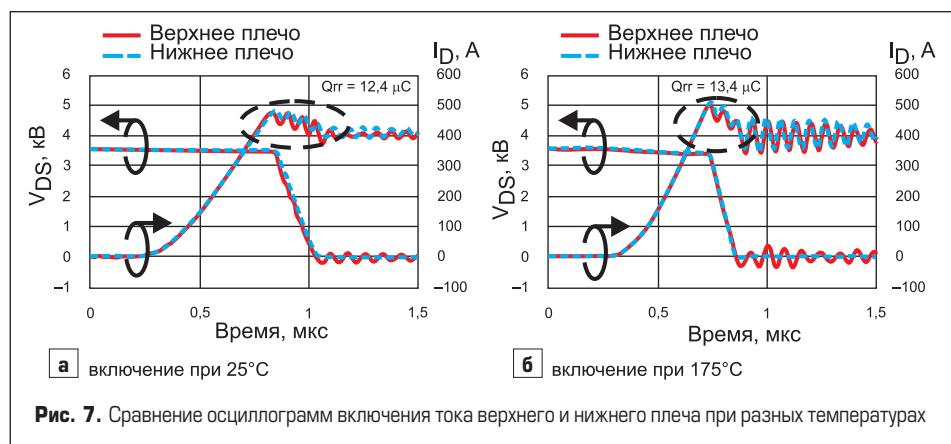
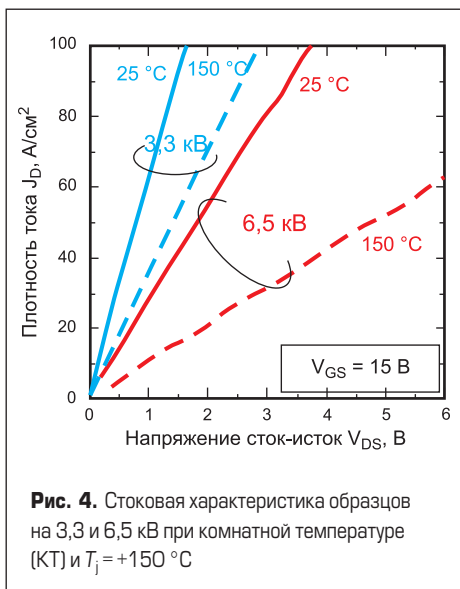
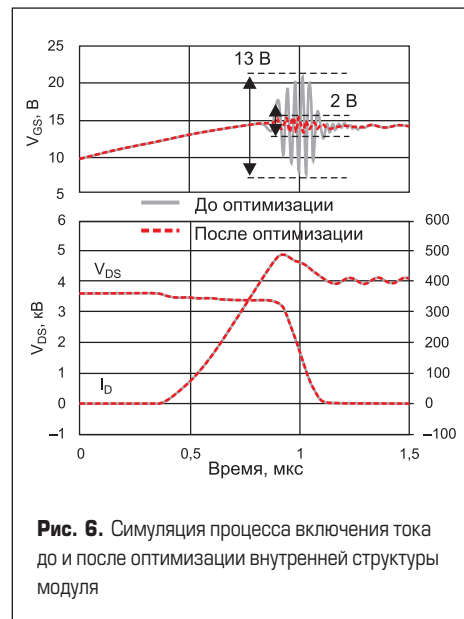
Благодаря использованию новой технологии совмещения карбид-кремниевых SBD и MOSFET в одном кристалле в январе 2018 г. исследовательским научным центром «Мицубиси Электрик» был анонсирован модуль на 6,5 кВ с самым высоким показателем плотности мощности в мире — 9,3 кВА/см<sup>3</sup> (рис. 5). Если сравнить это значение с показателем 5,1 кВА/см<sup>3</sup>, который имеют аналогичные модули на основе кремния, становится очевиден огромный потенциал по снижению массогабаритных показателей инверторов, который дает карбид кремния.

Все параметры производительности нового полного модуля на основе SiC на 6,5 кВ были измерены в различных режимах [6]. Модуль выполнен в корпусе нового конструктива HV100 [7], а его внутренняя структура

была оптимизирована. При проектировании модуля использовалась технология 3D-моделирования электромагнитного поля внутри модуля, благодаря которой удалось достичь максимально равномерного распределения тока между кристаллами, а также низкой паразитной индуктивности шин и низкого излучения ЭМП. В частности, особое внимание было уделено исключению влияния ЭМП на цепи затвора при высоких частотах переключения. На рис. 6 показана симуляция процесса включения тока до и после оптимизации.



Измеренная осциллограмма включения тока при температуре  $T_j = +25\text{ }^\circ\text{C}$  и  $+175\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 7) показывает, что скорости переключения верхнего (P) и нижнего (N) плеча практически равны. Более того, нельзя заметить существенных отличий между переключением при температуре  $+25\text{ }^\circ\text{C}$  и  $+175\text{ }^\circ\text{C}$ , что говорит об униполярных характеристиках модуля.



Суммарная энергия переключения нового SiC-MOSFET-транзистора со встроенным диодом на 6,5 кВ составляет менее 10% от значения классического кремниевого IGBT (рис. 8).

Такое существенное снижение динамических потерь позволяет поднять частоту работы высоковольтных инверторов до не-

скольких кГц, в то время как классические Si-модули на 6,5 кВ не способны работать на таких частотах даже в резонансном режиме (к примеру, в твердотельных трансформаторах). Итоговое сравнение потерь для трех типов модулей на частотах 0,5; 2; и 10 кГц показано на рис. 9.

**Улучшение стойкости SiC-MOSFET к короткому замыканию**

Одним из существенных недостатков современных MOSFET-транзисторов на основе SiC является их низкая стойкость к току короткого замыкания. Одним из путей повышения допустимого времени КЗ ( $t_{SC}$ ) является увеличение сопротивления канала транзистора, однако это приведет также к росту статических потерь в кристалле. Принцип баланса между сопротивлением канала и допустимым временем  $t_{SC}$  показан на рис. 10.

В публикациях [8] и [9] компания Mitsubishi Electric анонсировала новую запатентованную структуру чипа, находящуюся в настоящий момент в статусе НИОКР, которая позволяет улучшить стойкость чипа к КЗ за счет дополнительной зоны со стороны истока (рис. 11). С ее помощью контролируется последовательное сопротивление истока MOSFET-транзистора, а также снижается максимальный ток, протекающий через кристалл при КЗ.

С помощью данного подхода было достигнуто значение допустимого времени КЗ  $t_{SC} = 8$  мкс (схожее с современными Si-IGBT) без существенного увеличения сопротивления канала транзистора. В пресс-релизе компании Mitsubishi Electric от сентября 2017 года было показано, что данная SiC-структура позволяет достигнуть самой высокой эффективности среди всех 1200-В силовых транзисторов в мире с допустимым временем КЗ более 8 мкс [9].

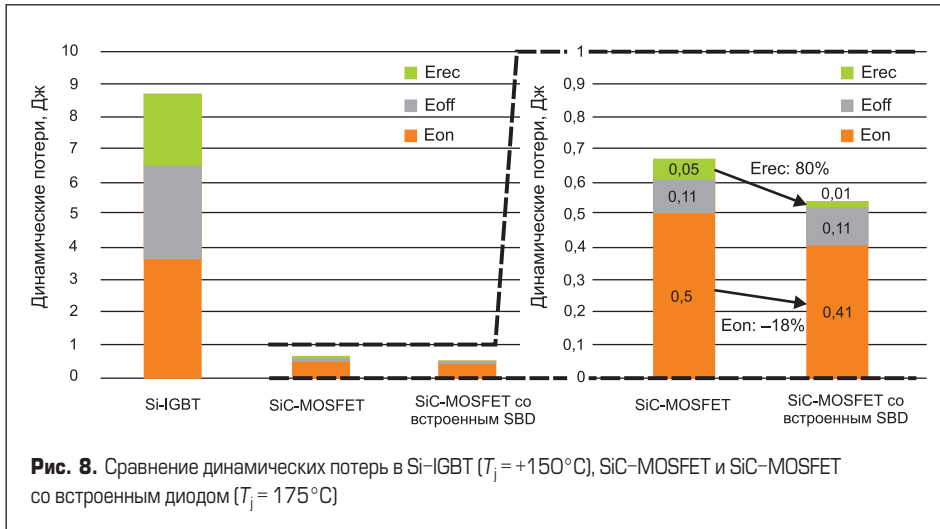


Рис. 8. Сравнение динамических потерь в Si-IGBT ( $T_j = +150^\circ\text{C}$ ), SiC-MOSFET и SiC-MOSFET со встроенным диодом ( $T_j = 175^\circ\text{C}$ )

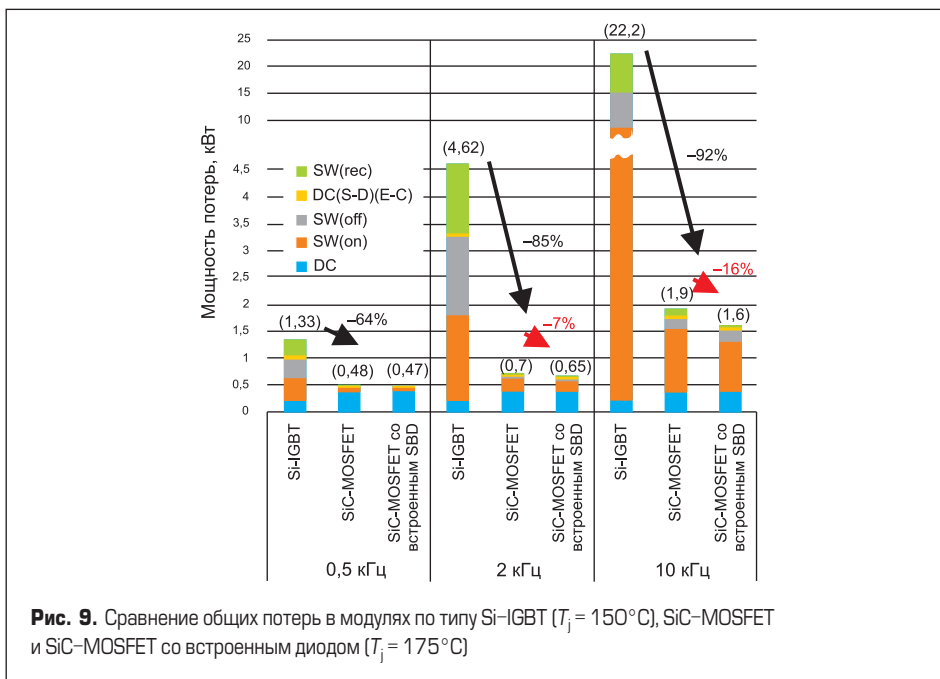


Рис. 9. Сравнение общих потерь в модулях по типу Si-IGBT ( $T_j = 150^\circ\text{C}$ ), SiC-MOSFET и SiC-MOSFET со встроенным диодом ( $T_j = 175^\circ\text{C}$ )

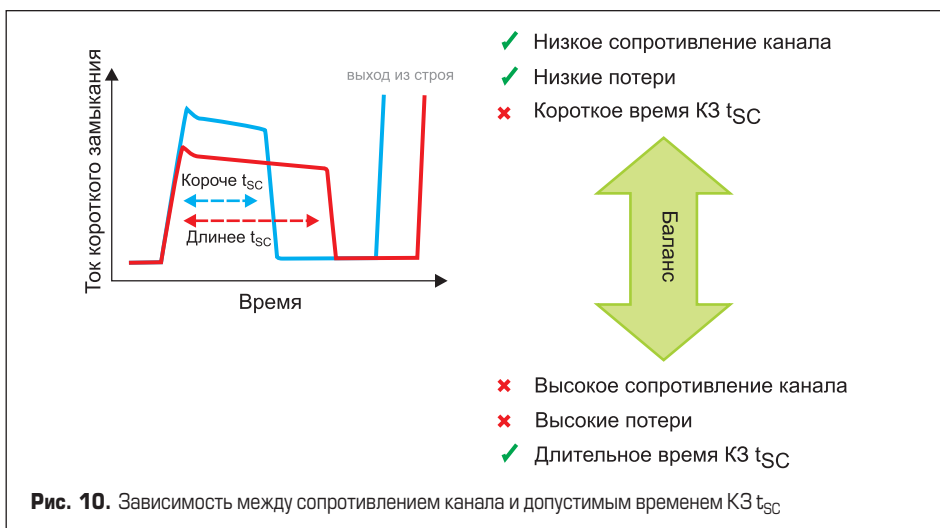


Рис. 10. Зависимость между сопротивлением канала и допустимым временем КЗ  $t_{SC}$

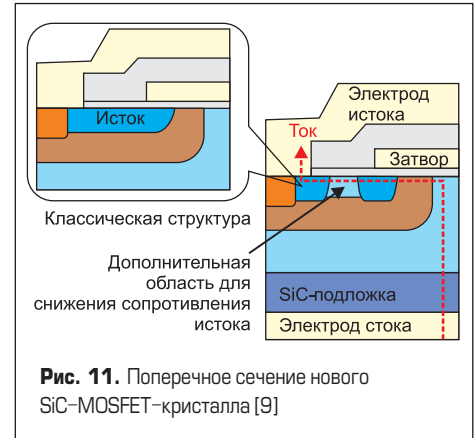


Рис. 11. Поперечное сечение нового SiC-MOSFET-кристалла [9]

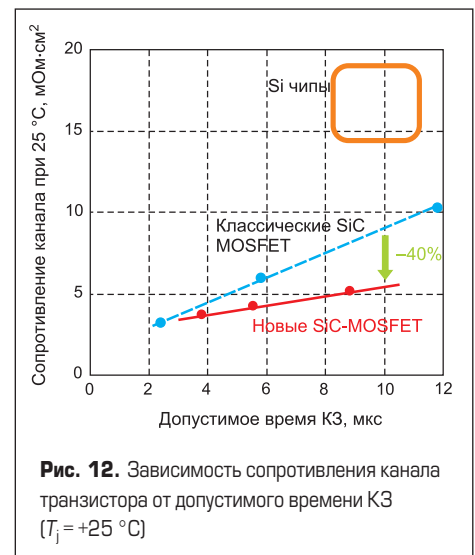
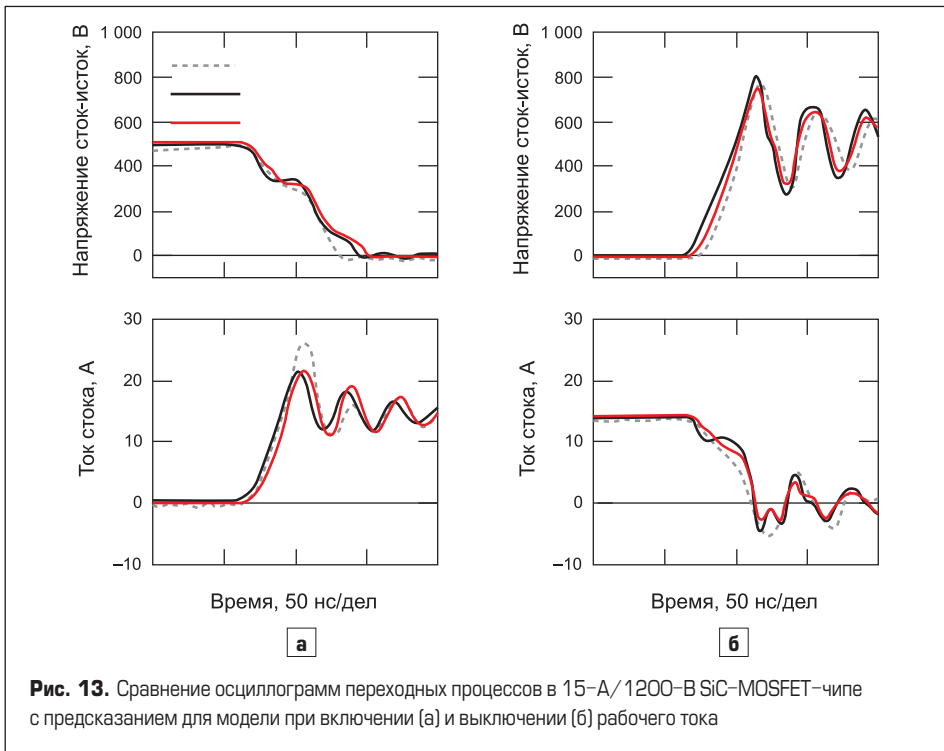


Рис. 12. Зависимость сопротивления канала транзистора от допустимого времени КЗ ( $T_j = +25^\circ\text{C}$ )



**Рис. 13.** Сравнение осциллограмм переходных процессов в 15-А/1200-В SiC-MOSFET-чипе с предсказанием для модели при включении (а) и выключении (б) рабочего тока

На рис. 12 показано сравнение параметров сопротивления и времени КЗ новой структуры с классической SiC-MOSFET. Из графика видно, что при значении  $t_{SC} = 8$  мкс сопротивление канала транзистора может быть снижено на 40%.

**Симуляция переходных процессов SiC-MOSFET-кристалла**

При разработке и оптимизации внутренней структуры чипа крайне важна возможность математического моделирования (симуляции) таких параметров, как производные напряжения сток-исток  $dV_{DS}/dt$ , а также тока  $dI_D/dt$  при переключении транзистора. В работе [10] была предложена модель поведения SiC-MOSFET-кристалла, учитывающая внутренние паразитные индуктивные и емкостные составляющие. Используя данную модель, стало возможным точное предсказание работы SiC-чипов даже в условиях теплового дисбаланса [11]. На рис. 13

показаны измеренные осциллограммы включения и выключения чипом SiC-MOSFET рабочего тока в сравнении с предсказаниями для модели до и после ее улучшения [12].

**Новый FullSiC полумостовой модуль на 750 А / 3300 В**

Впервые данный модуль был представлен компанией Mitsubishi Electric на конференции в рамках выставки PCIM-Европа в 2017 году [13]. В настоящее время модуль коммерчески доступен и находится в массовом производстве, его артикул: FMF750DC-66A. Для минимизации внутренней индуктивности корпуса, а также для хорошего распределения токов между параллельными кристаллами модуль реализован в наиболее современном конструктивном варианте LV100 (рис. 14).

По сравнению с классическими HVIGBT-модулями новый прибор предоставляет ряд



**Рис. 14.** Внешний вид модуля FMF750DC-66A

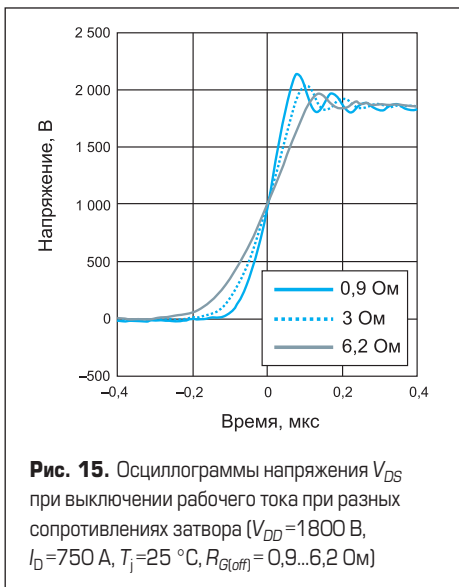
возможностей по повышению производительности инвертора [14]:

а) увеличение частоты ШИМ при сохранении тех же потерь (той же системы охлаждения), что и у современных Si-IGBT-модулей. Результаты расчетов показывают [14], что с использованием модуля FMF750DC-66A при том же выходном токе частота коммутации транзисторов может быть увеличена в 5–7 раз в сравнении с обычными Si-модулями;

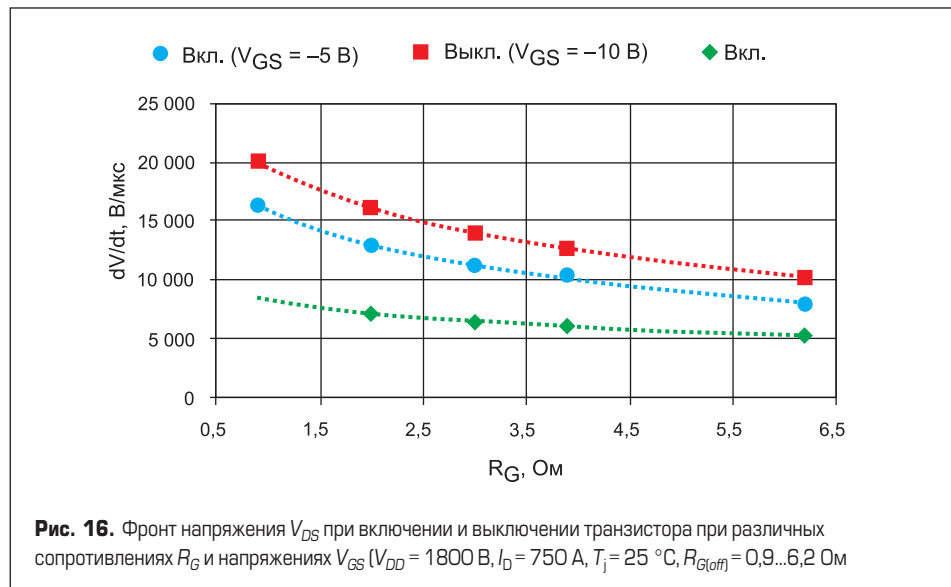
б) снижение потерь (рост КПД системы), за счет которого могут быть уменьшены размеры и масса преобразователя либо повышена общая производительность системы (больше время автономной работы, длиннее пройденный путь и т. д.).

В зависимости от требований, предъявляемых при использовании, возможно также применение комбинации факторов (а) и (б) для повышения производительности.

При создании силовых преобразователей с использованием FullSiC транзисторных модулей неизбежно встает вопрос ЭМП-совместимости из-за их высокой скорости переключения (по сравнению с Si-модулями) и, особенно, высокого  $dV_{DS}/dt$ . В работе [15] показано влияние температуры, а также сопротивления и напряжения затвора на потери при переключении модуля FMF750DC-66A. Осциллограммы выключения транзистора и зависимости параметра  $dV_{DS}/dt$  от сопротивления затвора приведены на рис. 15 и 16



**Рис. 15.** Осциллограммы напряжения  $V_{DS}$  при выключении рабочего тока при разных сопротивлениях затвора ( $V_{DD}=1800$  В,  $I_D=750$  А,  $T_J=25$  °С,  $R_{G(off)}=0,9...6,2$  Ом)



**Рис. 16.** Фронт напряжения  $V_{DS}$  при включении и выключении транзистора при различных сопротивлениях  $R_G$  и напряжениях  $V_{GS}$  ( $V_{DD} = 1800$  В,  $I_D = 750$  А,  $T_J = 25$  °С,  $R_{G(off)} = 0,9...6,2$  Ом)

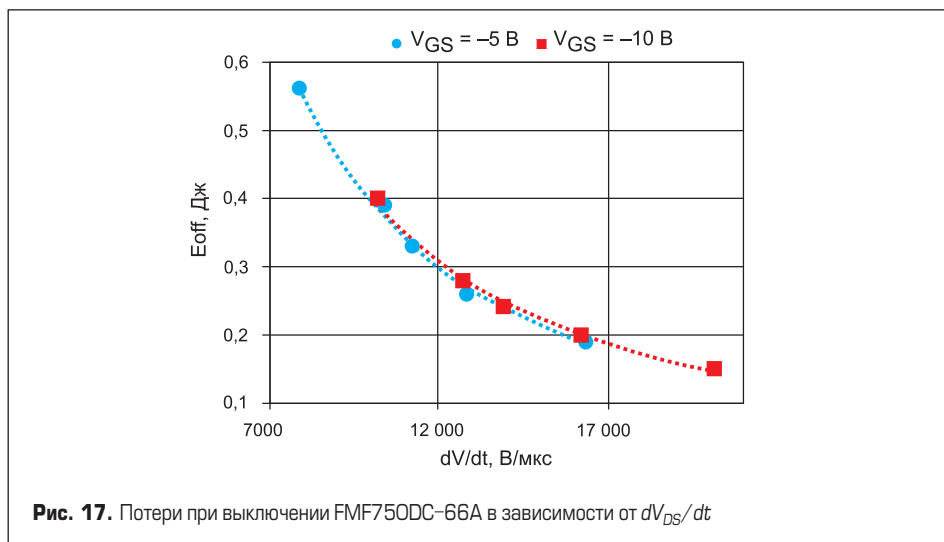


Рис. 17. Потери при выключении FMF750DC-66A в зависимости от  $dV_{DS}/dt$

соответственно. Кривая энергии потерь в зависимости от скорости изменения напряжения  $dV_{DS}/dt$  показана на рис. 17. Из приведенных данных видно, что SiC-MOSFET-кристаллы модуля FMF750DC-66A имеют отличный контроль скорости переключения с помощью изменения сопротивления затвора, что позволяет найти оптимальную точку баланса между динамическими потерями в модуле и уровнем ЭМП, излучаемых силовой частью.

### Примеры применения мощных инверторов на основе SiC-модулей в Японии

Во время конференции в рамках международной выставки IPEC'18 (Ниигата, Япония) было подробно рассказано о нескольких успешных применениях SiC-модулей компании Mitsubishi Electric в Японии:

1. Использование гибридных модулей 1200 A / 1700 В в тяговом приводе трамвая с напряжением в звене постоянного тока 600 В позволило снизить размеры инвертора на 40% по сравнению с его Si-IGBT-аналогом [16].
2. После замены IGBT-модулей на FullSiC-модули в модульном многоуровневом преобразователе для высоковольтных линий постоянного тока (HVDC) были получены такие результаты, как приведенные в работе [17]: снижение потерь на 50%, уменьшение размеров на 21% и массы на 14%.
3. Применение SiC-модулей вместо кремниевых IGBT в фотоэлектрическом солнечном преобразователе (PV) на 750 кВт позволило достичь КПД системы в 99%, что на 0,4% выше, чем с классическими модулями [18].

### Вывод

В течение последнего года компания Mitsubishi Electric зафиксировала несколько существенных достижений в области разработки высоковольтных кристаллов на основе карбида кремния. Новый 750-A / 3300-В полумостовой модуль FMF750DC-66A стал коммерчески доступен — он поступил в массовое производство. Благодаря технологии внедрения антипараллельного диода Шоттки в кристалл SiC-MOSFET стало возможным уменьшение суммарной активной

площади чипа на 75% для класса устройств с напряжения 6,5 кВ. Благодаря данной технологии с новыми FullSiC-модулями на 6,5 кВ удалось достичь самой высокой удельной плотности мощности в 9,3 кВ·А/см<sup>3</sup>. Также несколько выдающихся результатов было достигнуто в области применения SiC-модулей на 1,7 и 3,3 кВ в Японии, наглядно демонстрирующих перспективы использования высоковольтных SiC для повышения скорости.

### Литература

1. Yamada J., Thal E. SiC Power Modules for a Wide Application Range, Bodo's Power Systems, Sept. 2017.
2. Nomura S. NEDO's Next-Generation Power Electronics Projects and Recent Activities. IPEC'18, May 20-24, 2018, Niigata, Japan, Industrial Seminar.
3. Kawahara K. et al. 6.5kV Schottky-Barrier Diode-Embedded SiC-MOSFET for compact Full-Unipolar Module. ISPSD'17, May28-June1, 2017, Sapporo, Japan.
4. K. Kawahara et al. Impact of Embedding Schottky Barrier Diodes into 3.3kV and 6.5kV SiC MOSFETs; ICSCRM'17, September 17-22, 2017 Washington, D.C.
5. Mitsubishi Electric Press Release No.3164: Mitsubishi Electric's New 6.5kV Full-SiC Power Semiconductor Module Achieves World's Highest Power Density; Tokyo, January 31, 2018.
6. Nakashima J. et al. 6.5kV Full SiC Power Module (HV100) with SBD embedded SiC MOSFETs; PCIM-Europe 2018, conference proceedings.
7. Толстопятов В., Хатори Кенджи. LV100 — полумостовой модуль для тяговых инверторов новых поколений // Силовая электроника. 2017. № 5.
8. Hatta H. Advances in SiC power devices for power electronics applications, IPEC18, May 20.24, 2018 Niigata, Japan, Industrial Seminar.
9. Mitsubishi Electric Press Release No.3129: Mitsubishi Electric Develops SiC Power Device with Record Power Efficiency, Tokyo, September 22, 2017.
10. Mukunoki Y. et al. Modeling of a Silicon-Carbide MOSFET With Focus on Internal

Stray Capacitances and Inductances, and Its Verification // IEEE Transactions on Industry Applications, vol.54, no.3, May/June 2018.

11. Mukunoki Y. et al. Electro-Thermal Co-Simulation of two Parallel Connected SiC-MOSFETs under Thermally-Imbalanced Conditions.
12. Mukunoki Y. et al. An Improved Compact Model for a Silicon-Carbide MOSFET, and its Application to Accurate Circuit Simulation, article accepted for publication in IEEE Transactions on Industry Applications, DOI 10.1109/TPEL.2018.2796583
13. Negishi T. et al. 3.3kV All-SiC Power Module for Traction Use, PCIM-Europe 2017, Conference Proceedings.
14. Толстопятов В., Хатори Кенджи. Полный карбидкремниевый MOSFET-модуль на 3,3 кВ: новый класс эффективности тяговых инверторов // Силовая электроника. 2018. № 2.
15. Soltan N. et al. Impact of Gate Control on the Switching Performance of a 750A/3300A Dual SiC Module, paper at EPE2018 conference, September 17-21, 2018, Riga, Latvia.
16. Makishima S. et al. The direct benefit of SiC Power Semiconductor Devices for Railway Vehicle Traction Inverters, IPEC'18, May 20-24, 2018, Niigata, Japan, Conference proceedings.
17. Ishii Y. et al. Verification of SiC based Modular Multilevel Cascade Converter (MMCC) for HVDC Transmission Systems, IPEC'18, May 20-24, 2018, Niigata, Japan, Conference proceedings.
18. Kinoshita M. Power Electronics Technology Contributing to Realizing a sustainable Society", IPEC'18, May 20.24.