

Коммутационные возможности 750 А/3300 В сдвоенных SiC-модулей

Бурно развивающаяся в настоящее время технология изготовления полупроводниковых силовых транзисторов на основе карбида кремния (SiC) связана с очень высокими частотами переключения, что, собственно, и приводит разработчиков к возможности проектирования и изготовления их с использованием компактных преобразователей и приводов. В статье основное внимание уделяется особенностям поведения SiC МОП-транзисторов при переключении. С этой целью характер переключения транзисторов в модулях исполнения Full SiC (МОП-транзистор и диод Шоттки выполнены на основе карбида кремния) и Hybrid SiC (гибридные устройства — кремниевый IGBT-транзистор и SiC-диод Шоттки) сравнивается с поведением традиционных модулей, полностью реализованных на кремниевых силовых полупроводниковых приборах (кремниевые транзистор и диод Шоттки). Для того чтобы предоставить читателям непредвзятое и наглядное сравнение характерных особенностей переключения транзисторов в модулях этих трех вариантов исполнения, были выбраны для рассмотрения модули, рассчитанные на рабочее напряжение (или на блокирующее напряжение) 3,3 кВ с одинаковым диапазоном номинальных рабочих токов. В конце статьи мы кратко рассмотрим перспективы развития технологии SiC МОП-транзисторов и дадим обзор будущей SiC-технологии, позволяющей работать на более высоком напряжении, а именно на 6,5 кВ.

Евгений Виснер
(Eugen Wiesner)

д-р Нильс Зольтау
(Dr. Nils Soltau)

Нобухико Танака
(Nobuhiko Tanaka)

Перевод и дополнения:
Владимир Рентюк

Вступление

С 1990-х компания Mitsubishi Electric занимается исследованиями и разработкой полупроводниковых приборов, выполненных на основе карбида кремния (SiC) [1]. В 2017 году было завершено создание таких устройств, рассчитанных на рабочее напряжение 3,3 кВ. В этом Full SiC-модуле с двумя транзисторами используется новейшее корпусирование LV100, отличающееся уменьшенными габаритами и малыми

паразитными индуктивностями. Модуль LV100 рассчитан на номинальный рабочий ток 750 А (рис. 1).

Как известно, при увеличении блокирующего напряжения электрическое сопротивление открытого канала МОП-транзистора пропорционально увеличивается. Поэтому, исходя из приемлемого компромисса, кремниевые (Si) МОП-транзисторы обычно предлагаются с рабочими напряжениями до 600 В. Для более высоких уровней напряжения полупроводники на основе кремния требуют присутствия биполярных устройств, способных посредством модуляции проводимости уменьшать падение напряжений во включенном состоянии. Поэтому высоковольтные устройства на основе кремния обычно представляют собой гибриды биполярных IGBT (IGBT — Insulated-gate bipolar transistor, трехэлектродный силовой полупроводниковый прибор, сочетающий два транзистора в одной полупроводниковой структуре: биполярный, образующий силовой канал, и полевой, образующий канал управления) транзисторов и PIN-диодов (разновидность диода, в котором между областями электронной (*n*) и дырочной (*p*) проводимости находится собственный (нелегированный, англ. intrinsic) полупроводник — *i*-область).

Вследствие более высокого пробоя диэлектрика в приборах на основе карбида кремния могут использоваться униполярные МОП-транзисторы



Рис. 1. 3,3-кВ/750 А SiC-модуль в корпусе LV100

и диоды с барьером Шоттки (в английской терминологии часто используется аббревиатура SBD — Schottky Barrier Diode, которая, собственно, и означает «диод с барьером Шоттки»), причем, что особенно важно, даже при высоком рабочем напряжении. В этих диодах, в отличие от обычных диодов, в которых используется *p-n*-переход, в качестве барьера предусмотрен переход «металл-полупроводник», имеющий особенные свойства, отличные от свойств полупроводникового *p-n*-перехода. К ним относятся: пониженное падение напряжения при прямом включении и очень маленький, можно сказать, несущественный заряд обратного восстановления. Недостаток — более высокий ток утечки. Преимущество однополярных устройств заключается в отсутствии накопления носителей заряда. Следовательно, эти униполярные устройства переключаются быстрее и имеют меньшие потери на переключение по сравнению с их биполярными конкурентами.

В статье сравнивается поведение переключения биполярных кремниевых и униполярных карбид-кремниевых устройств, рассчитанных на рабочее напряжение 3,3 кВ и одинаковые номинальные токи. Соревноваться должен равный с равным. Измерения демонстрируют природу этих двух различных полупроводниковых технологий в отношении их характеристик переключения.

Коммутационные возможности и особенности приборов Full SiC

Итак, недавно компания Mitsubishi Electric выпустила на рынок модули в корпусах LV100. Они рассматриваются как дополнительный стандартный корпус для высоковольтных силовых модулей. Преимуществами подобного корпусирования являются простое параллельное соединение модулей и высокая плотность мощности (на единицу площади радиатора). Такой модуль содержит полумостовую однофазную схему и предназначен для подключения звена шины напряжения постоянного тока (DC-link) с малой паразитной индуктивностью. Это условие обязательно для использования полного потенциала, который позволяет быстро переключать приборы на основе карбида кремния. В корпусах, аналогичных корпусу LV100, компания Mitsubishi Electric предлагает модули, полностью выполненные на основе традиционного кремния, и модули, целиком реализованные на базе карбида кремния. Кроме того, потребителю доступен гибридный модуль, в котором используется биполярный кремниевый IGBT-транзистор и униполярный карбид-кремниевый диод Шоттки. Далее мы проведем анализ достигаемых преимуществ и сравнение указанных трех вариантов исполнения силового модуля.

На рис. 2 отображены формы сигналов включения Si-, Hybrid SiC- и Full SiC-модулей. Пока их транзисторы (IGBT или МОП) включаются (открываются), соответствующие им защитные диоды выключаются (блокируются обратным напряжением). Если это кремниевый диод, то здесь генерируется ток

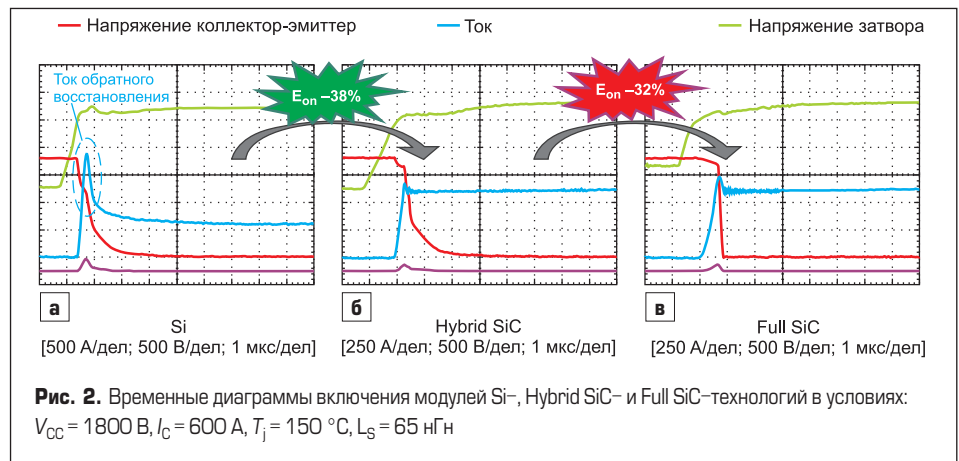


Рис. 2. Временные диаграммы включения модулей Si-, Hybrid SiC- и Full SiC-технологий в условиях: $V_{CC} = 1800 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$, $T_j = 150 \text{ }^\circ\text{С}$, $L_S = 65 \text{ нГн}$

обратного восстановления, который также протекает и через транзисторы. Обратный ток восстановления отображается как пиковый ток при включении ключа. Его хорошо видно на рис. 2а. В случае если обратный защитный диод выполнен на основе технологии SiC, как в гибридном модуле (Hybrid SiC), пиковый ток практически исчезает (рис. 2б). Использование такого диода приводит к снижению затрат энергии включения E_{on} на 38%. Применение МОП-транзистора SiC-технологии и более крутого фронта рабочего импульса напряжения дополнительно снижает энергию включения еще на 32%. Более того, необходимо принять во внимание, что энергия потерь при обратном восстановлении E_{rec} в диоде для Hybrid SiC- и Full SiC-модулей равна нулю. Причина в том, что, как уже было сказано, у них практически отсутствует заряд обратного восстановления.

Аналогично на рис. 3 показаны формы сигналов при выключении ключей. Формы сигнала при выключении для Si и Hybrid-SiC одинаковы, и, следовательно, энергия выключения обоих модулей также одинакова. Фактически в обоих случаях выключается один и тот же IGBT, а поведение модуля при этом не зависит от типа диода. Однако использование варианта Full-SiC снижает потери на выключение из-за отсутствия хвоста тока в импульсе и повышенной скорости спада заднего фронта рабочего импульса при выключении. При измерении достигается снижение до 87%. Конечно, и об этом нельзя забывать, снижение потерь на переключе-

ние подразумевает и быстрые переходные процессы напряжения. Производительность при более низких скоростях переключения также имеет свои особенности и обсуждается в [2].

Обратное восстановление и хвосты тока, характерные для кремниевых устройств, обычно имеют высокую температурную зависимость. Следовательно, потери на переключение таких транзисторов с увеличением температуры их кристаллов возрастают. А вот в устройствах на основе карбида кремния этот эффект менее выражен. Как показано на рис. 4, поведение SiC-транзисторов при переключении на температурах их полупроводниковых переходов $T_j = +25 \text{ }^\circ\text{С}$ и $T_j = +150 \text{ }^\circ\text{С}$ очень похоже. Для них изменение потерь переключения при номинальном токе $+25 \text{ }^\circ\text{С}$ до $+150 \text{ }^\circ\text{С}$ составляет лишь около 10%.

Снижение потерь на переключение

После объяснения общей физики касательно снижения потерь на переключение (их иногда называют «коммутационные потери») мы обсудим их влияние на рабочий диапазон модулей более подробно. На рис. 5 показана зависимость общей энергии переключения, то есть суммы потерь энергии на включение E_{on} , выключение E_{off} и восстановление E_{rr} для различных токов переключения. Как уже говорилось, потери энергии на переключение значительно уменьшаются при использовании SiC-технологии. Чтобы выразить это в цифрах, отметим, что по сравнению с технологией на основе кремния потери энергии

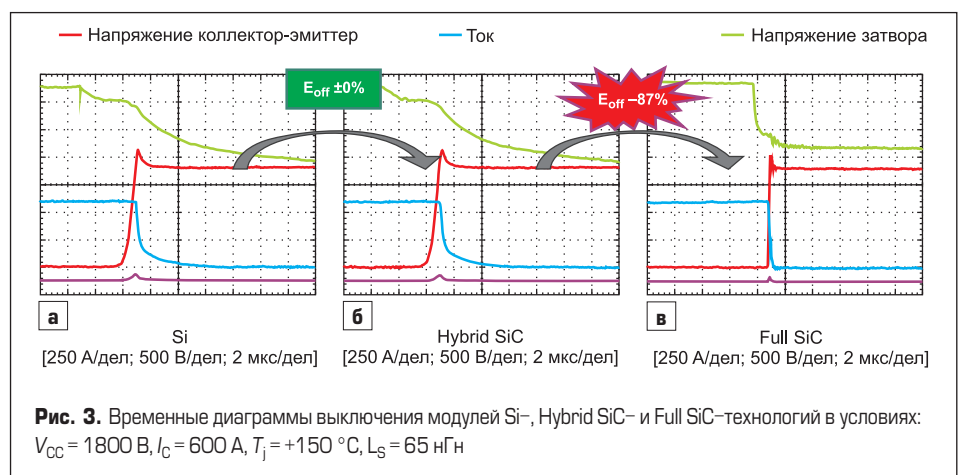


Рис. 3. Временные диаграммы выключения модулей Si-, Hybrid SiC- и Full SiC-технологий в условиях: $V_{CC} = 1800 \text{ В}$, $I_C = 600 \text{ А}$, $T_j = +150 \text{ }^\circ\text{С}$, $L_S = 65 \text{ нГн}$

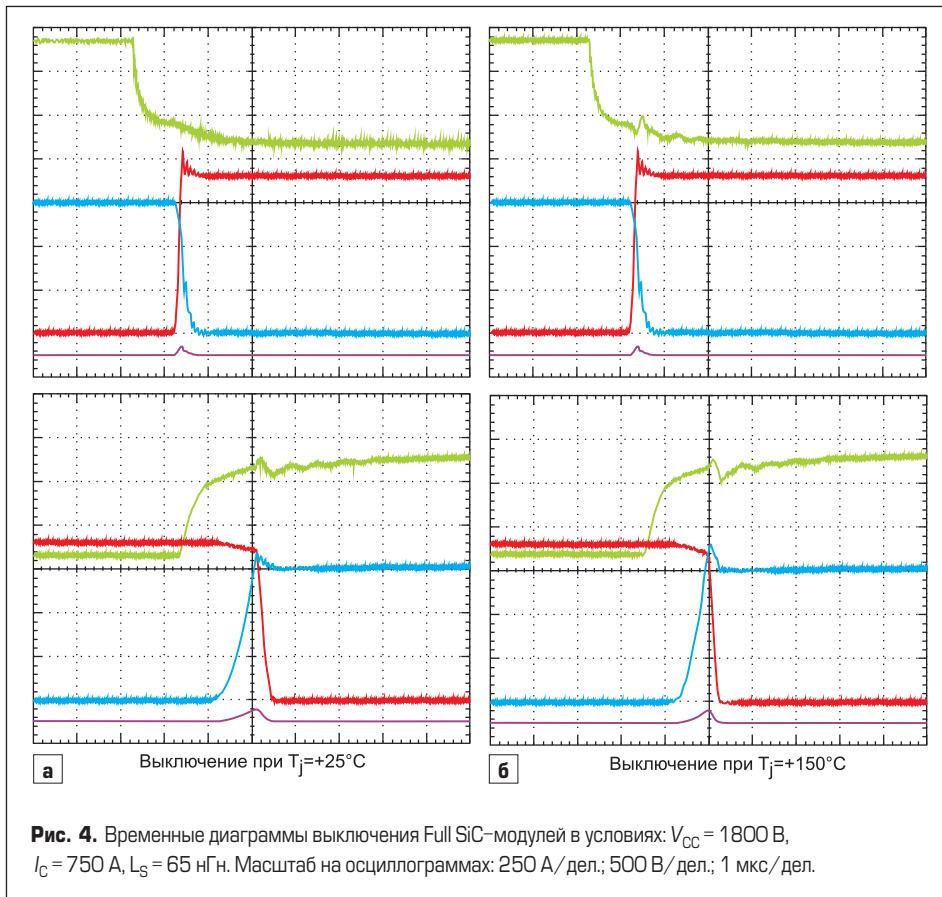


Рис. 4. Временные диаграммы выключения Full SiC-модулей в условиях: $V_{CC} = 1800 \text{ В}$, $I_C = 750 \text{ А}$, $L_S = 65 \text{ нГн}$. Масштаб на осциллограммах: 250 А/дел.; 500 В/дел.; 1 мкс/дел.

переключения уменьшаются, для гибридных и полностью карбид-кремниевых модулей при рабочем токе 600 А будут ниже на 50 и 80% соответственно.

Благодаря более низким потерям энергии на переключение SiC-технология обеспечивает и более высокие частоты переключения. На рис. 6 показано соотношение частоты переключения, достигнутой для модулей на основе карбида кремния, по отношению к традиционной кремниевой с учетом тех же потерь переключения.

Как можно видеть, даже гибридный вариант модуля (Hybrid SiC) достигает примерно в два раза большей частоты переключения (при но-

минальном токе) по сравнению с чисто кремниевым исполнением модуля. Кроме того, Full SiC-модули достигают примерно в пять раз более высоких частот переключения при одном и том же токе переключения. Используя эту особенность для применения в преобразователях на основе ШИМ-регулирования и учитывая снижение потерь проводимости, можно ожидать рост частоты переключения в 5–9 раз по сравнению с ранее используемой [3].

Более высокая частота переключения дает преимущества во многих приложениях. Одно из основных преимуществ здесь выражается в том, что зачастую фильтры, трансформаторы

или преобразователи в целом могут быть выполнены более компактными, что повышает эффективность системы и снижает общие затраты на ее изготовление. Наконец, следует отметить, что эти модули предназначены для критически важных приложений, к которым предъявляют самые высокие требования к качеству и надежности, например, таким как тяговые приводы подвижного железнодорожного состава. Разработка Full SiC-модуля с рабочим напряжением 3,3 кВ уже завершена, и в нем достигается такая же или даже более высокая надежность по сравнению с классическими тяговыми модулями на основе кремния. Более того, компания Mitsubishi Electric обладает многолетним опытом работы с модулями на напряжение 3,3 кВ, выполненными на базе SiC-технологии и предназначенными для эксплуатации в железнодорожных системах. Таким образом, можно с уверенностью сказать, что карбид-кремниевая технология с рабочим напряжением 3,3 кВ стала уже базовой и надежной технологией этой компании.

Развитие SiC-технологии: взгляд в будущее

Хорошо известным негативным эффектом в SiC-полупроводниках является так называемая bipolar degradation («биполярная деградация») или stacking fault expansion («рост дефектов упаковки»). Эти термины описывают изменения SiC-решетки, вызванные рекомбинацией электронно-дырочных пар в результате действия биполярных токов [4, 5]. В конечном счете, этот эффект приводит к необратимому ухудшению, вызывающему увеличение прямого падения напряжения. Предотвращает биполярный ток и биполярную деградацию SiC МОП-транзистора подключенный параллельно к нему обратный диод Шоттки.

В современных SiC-модулях, рассчитанных на рабочее напряжение 3,3 кВ, успешно используются отдельные защитные диоды, подключенные внутри модуля и расположенные в непосредственной близости с кристаллами МОП-транзисторов. Тем не менее,

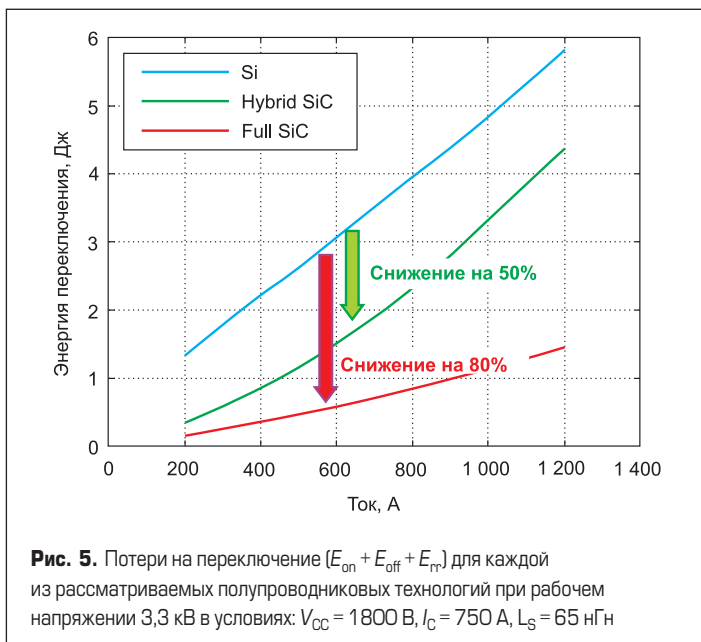


Рис. 5. Потери на переключение ($E_{on} + E_{off} + E_T$) для каждой из рассматриваемых полупроводниковых технологий при рабочем напряжении 3,3 кВ в условиях: $V_{CC} = 1800 \text{ В}$, $I_C = 750 \text{ А}$, $L_S = 65 \text{ нГн}$

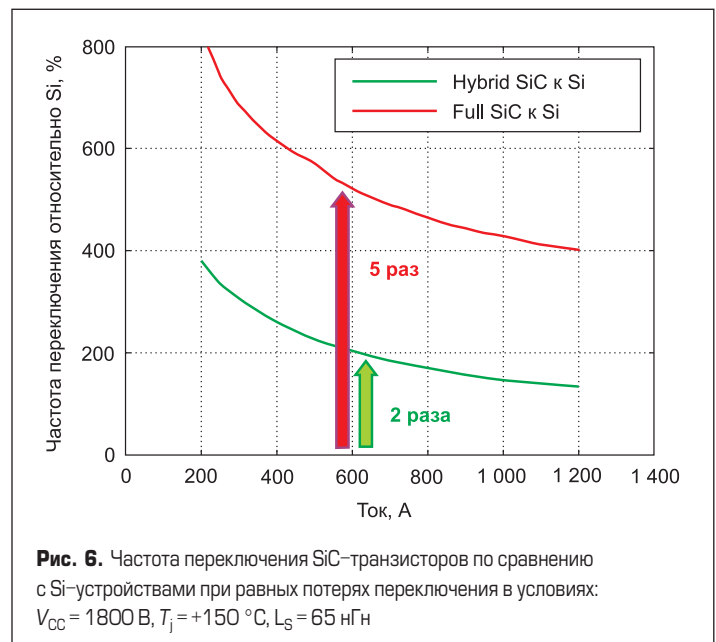


Рис. 6. Частота переключения SiC-транзисторов по сравнению с Si-устройствами при равных потерях переключения в условиях: $V_{CC} = 1800 \text{ В}$, $T_j = +150 \text{ °C}$, $L_S = 65 \text{ нГн}$

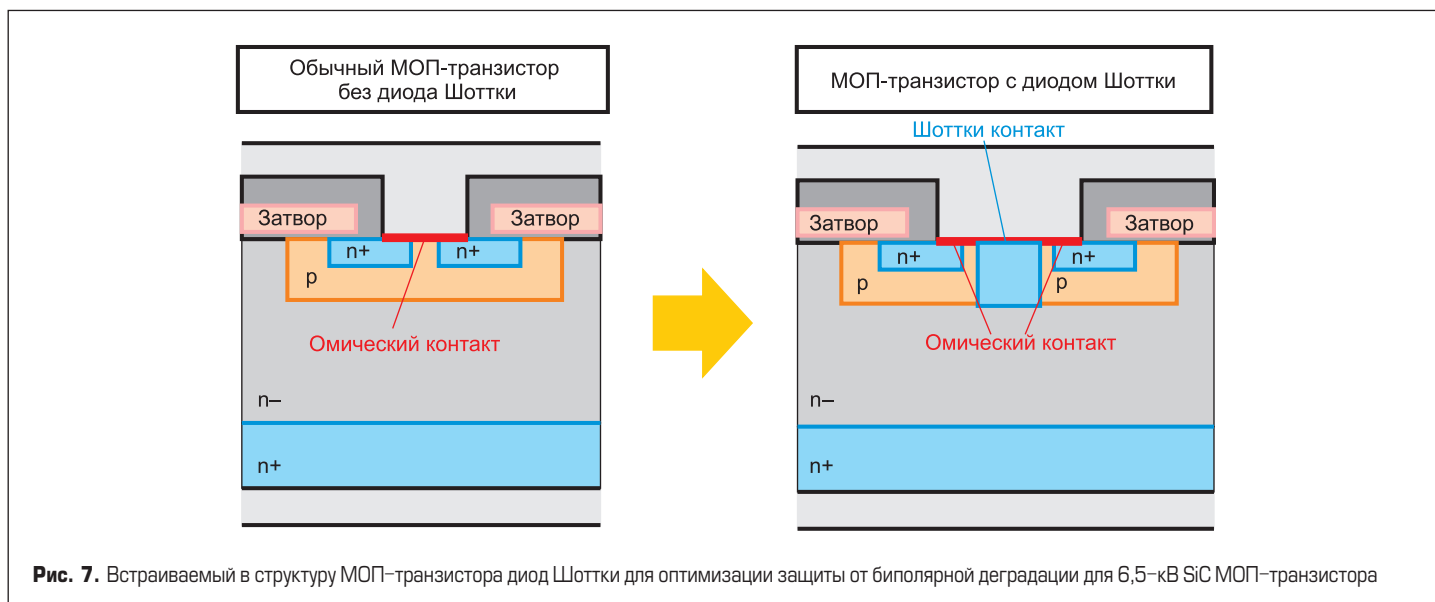


Рис. 7. Встраиваемый в структуру МОП-транзистора диод Шоттки для оптимизации защиты от биполярной деградации для 6,5-кВ SiC МОП-транзистора

учитывая необходимость работы на еще более высоких уровнях напряжения, а именно 6,5 кВ, этот подход уже не является экономически и технически оправданным. Поэтому компания Mitsubishi Electric вместо использования отдельных диодных чипов предложила новое решение и разработала технологию, позволяющую встраивать защитный диод Шоттки непосредственно в кристалл МОП-транзистора [6]. Рис. 7 иллюстрирует традиционную и улучшенную структуру такого чипа.

Эта технология способна уменьшить суммарную необходимую площадь SiC-кристалла, что позволяет сделать чипы технологии SiC еще более эффективными и дать специалистам более экономичное решение, обеспечивающее функционирование модулей на номинальных рабочих напряжениях, превышающих 3,3 кВ [7].

Выводы

В статье продемонстрированы особенности характеристик переключения современных силовых 3,3-кВ Full SiC- и Hybrid SiC-модулей. Было объяснено, что исходя из самой природы однополярных SiC-устройств потери на переключение уменьшаются на 50–80%. В результате преобразователь, выполненный на Full SiC-модулях, может работать с частотой переключения в пять раз выше по отношению к традиционным решениям на основе кремниевых модулей. Это помогает разрабатывать и выпускать более компактные преобразователи, отличающиеся при меньшей себестоимости большей эффективностью и объемной плотностью мощности.

В современной SiC-технологии на 3,3 кВ эффективную защиту МОП-транзисторов от характерной для этой технологии биполярной деградации обеспечивают диоды Шоттки, выполненные как отдельные диодные чипы. В настоящее время компания Mitsubishi Electric разработала МОП-транзистор со встроенным в него диодом Шоттки, что является ключевой технологией для еще более эффективной и экономичной SiC-технологии, позволяющей перейти к выпуску модулей с более высокими рабочими напряжениями.

Литература

1. Yamada J., Thal E. SiC Power Modules for a Wide Application range // Bodo's Power Systems. 2017. Sept. www.hy-line.de/fileadmin/Public/Power/hersteller/mitsubishi/dokumente/BPs_17-09_Mitsubishi%20Electric.pdf
2. Soltan N., Wiesner E., Tsuda R., Hatori K., Uemura H. Impact of Gate Control on the Switching Performance of a 750A/3300V Dual SiC-Module. 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe). Riga, 2018. www.ieeexplore.ieee.org/document/8515357
3. Soltan N., E. Wiesner, Hatori K., Uemura H. 3.3 kV Full SiC MOSFETs — Towards High-Performance Traction Inverters // Bodo's Power Systems. 2018. No. 1. // www.mitsubishichips.eu/wp-content/uploads/2018/11/Bodos-Power-Systems_18-01_Mitsubishi-Electric-Semiconductor.pdf

4. Persson P. O. A. et. al. Structural defects in electrically degraded 4H-SiC p+/n-/n+ diodes // Applied Physics Letters. 2002. Vol. 80. No. 25. www.researchgate.net/publication/234944609_Structural_defects_in_electrically_degraded_4H-SiC_pn-n_diodes
5. Jacobsson H. et. al. Properties of Different Stacking Faults that Cause Degradation in SiC PiN Diodes. Materials Science Forum. Switzerland, 2003. www.aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1635996
6. Kawahara K., Hino S. et. al. 6.5 kV Schottky-Barrier-Diode-Embedded SiC-MOSFET for Compact Full-Unipolar Module. 29th Int. Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Sapporo, 2017. www.ieeexplore.ieee.org/document/7988888
7. Mitsubishi Electric Corporation, Mitsubishi Electric's New 6.5 kV Full-SiC Power Semiconductor Module Achieves World's Highest Power Density, Japan: Press Release No. 3164, 2018. // <http://us.mitsubishielectric.com/en/news-events/releases/global/2018/0131-a/index.page>