

# Создание карбида кремния.

## Повышение плотности мощности и эффективности

Процесс изготовления SiC-подложек подробно описан в первой части статьи («Силовая электроника», №4'2017, с. 4), возможные структуры SiC-приборов были предметом обсуждения во второй части («Силовая электроника», №5'2017, с. 14). Третья часть серии статей посвящена особенностям готовой продукции.

Али Машали  
(Aly Mashaly)

Перевод:  
Евгений Карташов

В целом SiC-диоды и MOSFET могут быть изготовлены в любых видах стандартных корпусов (дискретных приборов и модулей). Дискретные устройства можно подразделить на две категории: THT-компоненты (с выводами под сквозные отверстия) и SMD-компоненты (для поверхностного монтажа). При выборе типа корпуса следует понимать и учитывать физические свойства SiC. Например, для SiC-полупроводников паразитные индуктивности корпуса имеют гораздо большее значение, чем для Si-IGBT, из-за большей скорости переключения SiC. Поэтому компания ROHM прилагает активные усилия для уменьшения паразитных параметров дискретных приборов и модулей.

Серийное производство коммерческих SiC-продуктов ROHM начала в 2010 г. С тех пор компания расширила свои производственные возможности в разных категориях мощности для удовлетворения требований промышленных и автомобильных рынков. ROHM поставляет широкую гамму дискретных устройств (THT и SMD), а также модулей. Компания также предлагает SiC-пластины (кристаллы) и сотрудничает с крупнейшими производителями модулей для расширения мирового рынка SiC-устройств.

ROHM производит диоды второго поколения SiC-SBD, в настоящее время это компоненты с рабочим напряжением 650 В и током от 5 до 100 А, а также с напряжением 1200 и 1700 В и током до 50 А. В 2016 г.

началось массовое производство третьего поколения SiC-SBD с напряжением 650 В и током до 10 А. В сегменте SiC-MOSFET гамма продукции ROHM еще шире и включает две различные технологии (планарная и double-trench). Планарная технология уже доступна для дискретных приборов и модулей на 650, 1200 и 1700 В с током до 300 А.

Массовое производство третьего поколения SiC-MOS началось с дискретных приборов и 100% SiC-модулей на основе фирменной технологии double-trench, что позволит компании расширить семейство MOSFET и будет способствовать дальнейшему развитию высокоэффективных, высоконадежных изделий силовой электроники.

### Новые 1700-В SiC-MOSFET для импульсных источников питания

Импульсный источник питания (SMPS) является одним из важнейших элементов любой силовой электронной системы. Невозможно реализовать функционирование устройства без соответствующего источника питания. Как правило, подсистема SMPS используется в качестве внутреннего источника для всех электронных узлов системы, формируя необходимые уровни напряжения питания микроконтроллера, датчиков и драйверов силовых полупроводниковых приборов.

Самой популярной топологией SMPS является обратногоходовой преобразователь, обеспечивающий на мощностях до нескольких сотен ватт передачу электрической энергии от входной DC-шины к гальванически развязанному DC-выходу. На практике Si-MOSFET часто работает в качестве основного ключа с типовой частотой коммутации в диапазоне от 16 до 500 кГц. Повышение частоты переключения позволяет снизить величину индуктивности, однако более высокие потери в Si-MOSFET и диоде являются ограничивающим фактором. Новый 1700-В SiC-MOSFET от ROHM оптимально подходит для таких приложений благодаря лучшим характеристикам переключения и низкому сопротивлению  $R_{ds(on)}$ . ROHM производит SiC-MOSFET 17 класса в корпусах TO-3PFM и TO268-2L (рис. 1).

Благодаря высокой напряженности электрического поля SiC-MOSFET сохраняет низкое удельное сопротивление канала (относительно площади чипа) даже при высоком напряжении пробоя. На рис. 2 приведе-

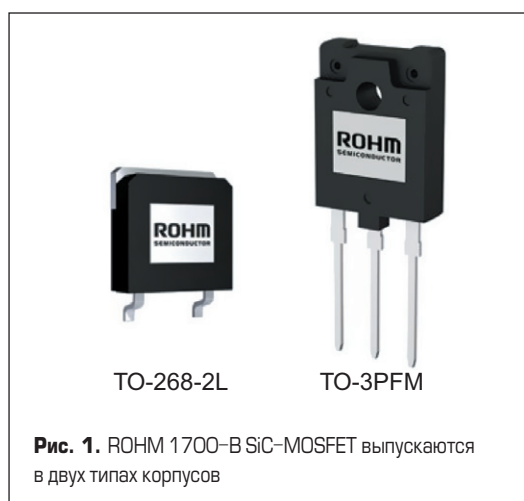


Рис. 1. ROHM 1700-В SiC-MOSFET выпускаются в двух типах корпусов

но сравнение недавно разработанного ROHM 1700-B SiC-MOSFET и лучшего в своем классе из доступных на рынке Si-MOSFET, который очень часто используется в обратноходовых конвертерах. SiC-MOSFET 17 класса имеет гораздо меньше сопротивление канала ( $R_{dson}$ ), чем Si-MOSFET с рабочим напряжением 1500 В. У SiC-транзисторов достигнуты величины сопротивлений 0,75/1,15 Ом, в то время как Si-транзистор имеет  $R_{dson} = 9$  Ом, несмотря на то, что кристалл SiC-MOSFET в 17 раз меньше, чем Si-MOSFET.

Использование SiC-MOSFET (SCT2H12NY) в корпусе TO268-2L позволяет значительно улучшить сопротивление открытого канала и нагрузочные характеристики по сравнению с Si-MOSFET в том же корпусе. Благодаря очень низким величинам паразитных емкостей SiC-MOSFET ( $C_{iss}$  и  $C_{oss}$ ) частоту коммутации можно повысить за пределы 100 кГц без каких-либо проблем с тепловыделением. Это позволяет минимизировать размеры индуктивных компонентов и площадь печатной платы. Кроме того, это дает возможность использовать автоматизированную линию для установки SMD-компонентов, способную работать с корпусами TO268-2L SMD, что значительно снижает издержки производства и общую стоимость системы. Чтобы добиться оптимальных характеристик переключения SiC-MOSFET в обратноходовой топологии, ROHM разработала драйвер (BD768xJF-LB) со специализированным контроллером в корпусе SOP-J8S.

В промышленных системах с трехфазным питанием 400 В (AC) в основном ключе обратноходового конвертера обычно два Si-MOSFET соединяются последовательно, чтобы обеспечить достаточный запас по напряжению в выключенном состоянии. Благодаря наличию нового 1700-B SiC-MOSFET от ROHM, два Si-MOSFET можно заменить на один SiC-транзистор.

### Повышение эффективности привода

В промышленных приложениях, таких как приводные инверторы, требующих установки синусоидального фильтра, применение SiC-приборов дает определенные преимущества. Примером является инвертор привода электродвигателя мощностью в диапазоне

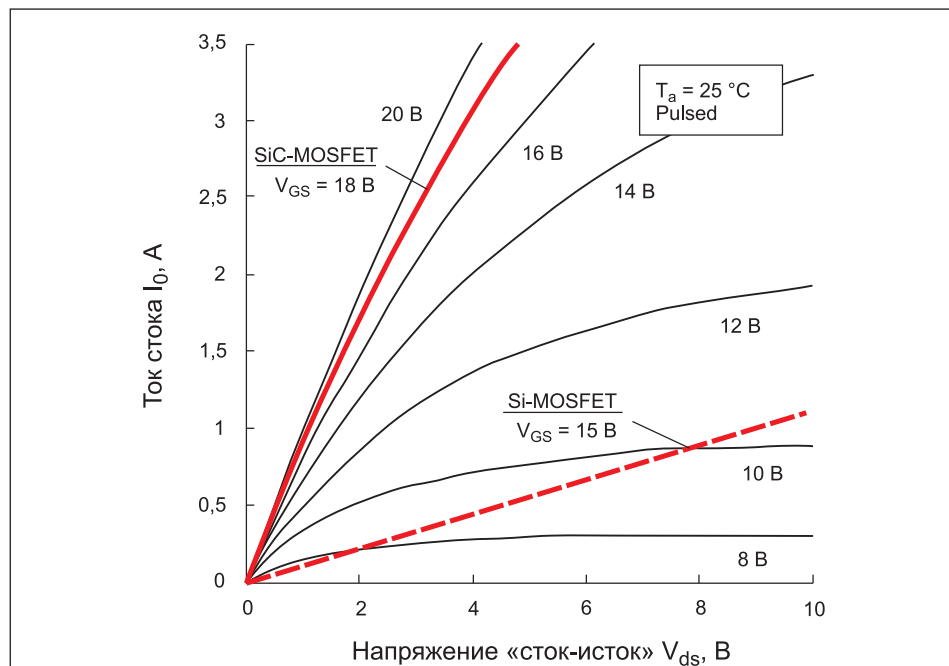


Рис. 2. Характеристики проводимости ROHM 1700-B (1,15 Ом) SiC-MOSFET в сравнении с 1500-B (9 Ом) Si-MOSFET

десятков киловатт. Мотор может соединяться с инвертором кабелем длиной до 100 м, в таких случаях синусоидальный фильтр часто устанавливается на выходе преобразователя.

Использование выходного фильтра позволяет выполнять соединение неэкранированным кабелем, что ощутимо снижает общую стоимость оборудования. Дополнительное преимущество состоит в том, что наличие фильтра заметно снижает уровень высокочастотных токов в обмотках двигателя, что, в свою очередь, приводит к уменьшению потерь мощности в нем. Это позволяет улучшить температурный режим работы двигателя и снизить уровень шумов. В целом, синусоидальный фильтр оказывает положительное влияние на срок службы и показатели надежности всей системы. Поэтому целесообразно принять меры для уменьшения габаритов и стоимости фильтра, что, в основном, достигается за счет увеличения частоты коммутации транзисторов в инверторе.

По умолчанию Si-IGBT используются на частотах переключения до 10 кГц. Эффективность

IGBT резко падает с ростом частоты коммутации из-за высоких потерь энергии и ухудшения тепловых режимов работы инвертора. Благодаря отличным физическим свойствам, SiC-полупроводники открывают новые возможности для такого рода сложных приложений. В частности, использование SiC-ключа позволяет перейти на высокие частоты переключения без создания чрезмерных термических стрессов в полупроводниках.

Повышение рабочей частоты дает в результате два основных преимущества: уменьшение выходного фильтра и улучшение резонансных характеристик всей системы. На рис. 4 приведено сравнение потерь переключения технологий Si-IGBT и ROHM SiC в стандартной схеме инвертора (рис. 3). Сравнение сделано при следующих условиях: напряжение DC-шины ( $V_{dc}$ ) — 600 В, фазный ток двигателя ( $I_{motor}$ ) — 200 А, частота переключения ( $F_{sw}$ ) — 10 кГц.

Данные, приведенные на рис. 4, нормированы относительно потерь комбинации транзистора Si-IGBT и диода Si-FRD (черная диаграмма).

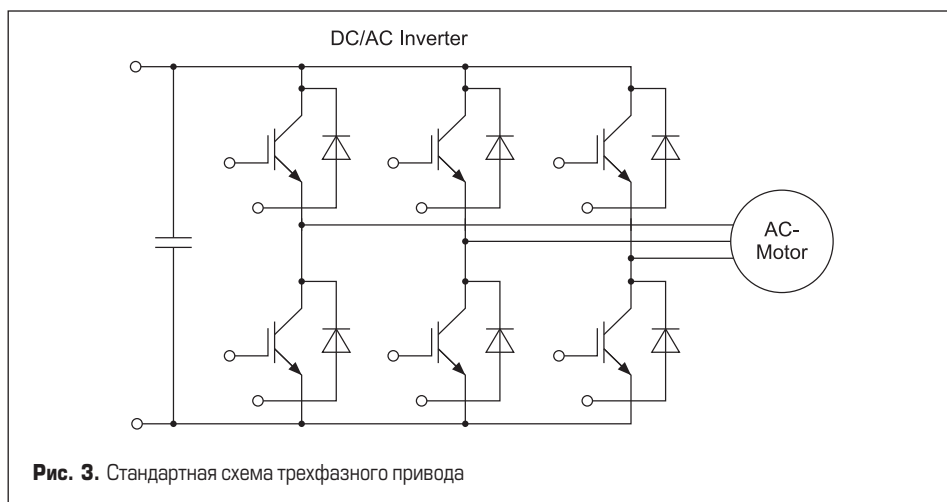


Рис. 3. Стандартная схема трехфазного привода

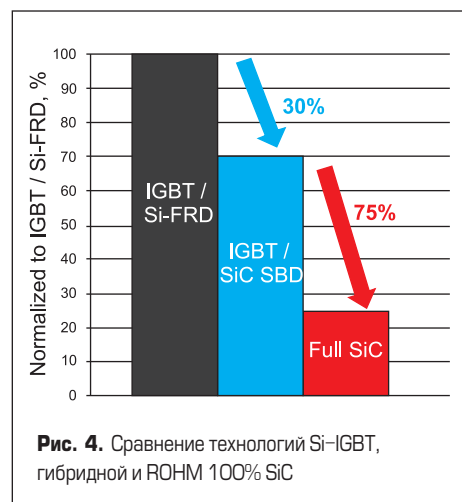


Рис. 4. Сравнение технологий Si-IGBT, гибридной и ROHM 100% SiC



**Рис. 5.** Новый 100% SiC-модуль на основе Trench-технологии ROHM

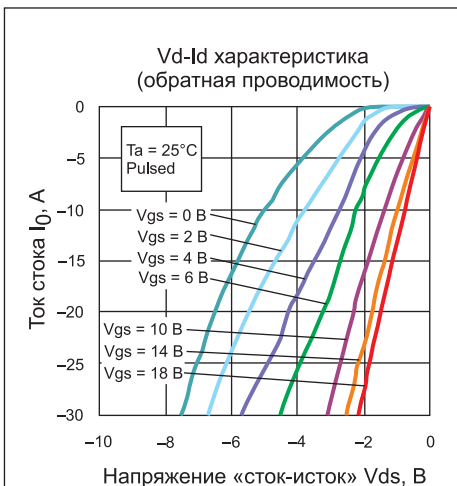
В гибридной конфигурации, состоящей из Si-IGBT и SiC-SBD в качестве антипараллельного диода, динамические потери на 30% ниже (синяя диаграмма). В конфигурации 100% SiC ROHM (SiC-MOSFET и SiC-SBD) потери переключения значительно меньше (красная диаграмма).

Первый в мире 100% SiC-модуль, основанный на недавно разработанной ROHM Trench-технологии, показан на рис. 5. При рабочем напряжении 1200 В модуль имеет ток стока 180 А. ROHM непрерывно расширяет свою гамму продукции и предлагает модули с током до 600 А.

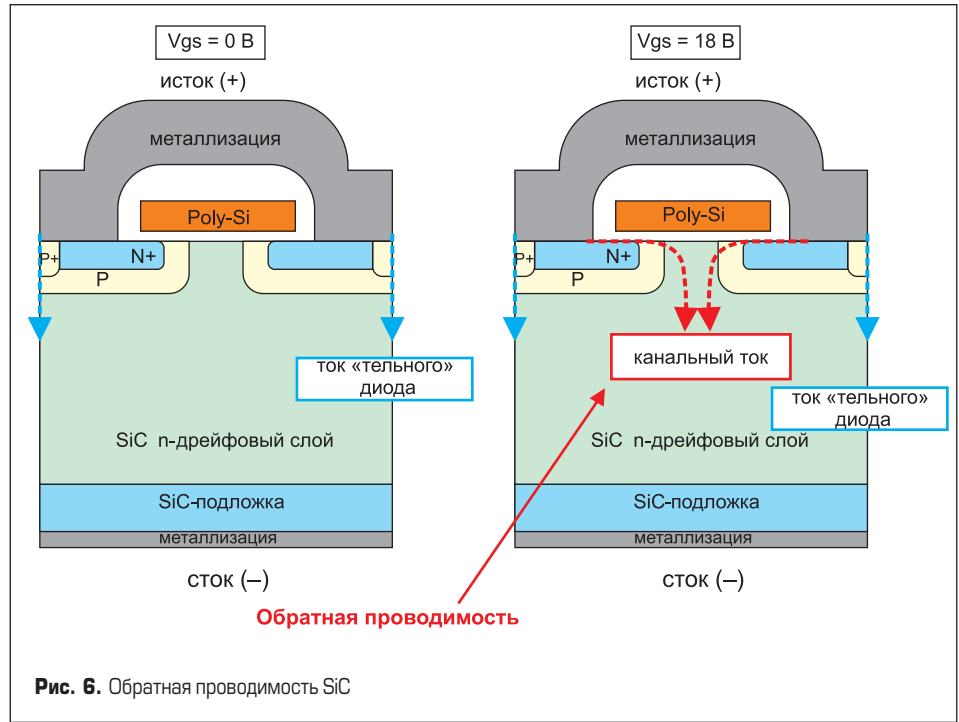
**Обратная проводимость SiC**

Как описано во второй части статьи, паразитный обратный PN-диод («тельный» диод) присутствует в каждом SiC-MOSFET. При коммутации силовых электронных систем с индуктивными нагрузками в «тельном» диоде возникает ток, когда SiC-MOSFET находится в выключенном состоянии. Как и у всех PN-диодов, на нем при этом образуется прямое падение напряжения. К физическим свойствам SiC-транзисторов относится широкая запрещенная зона, что является причиной большого падения напряжения на паразитном диоде.

На этапе проектирования системы разработчики силового каскада должны проанализировать, насколько часто «тельный» диод используется в процессе коммутации. Если через



**Рис. 7.** Падение напряжения снижается, когда канал MOSFET открывается снова



**Рис. 6.** Обратная проводимость SiC

него протекает большая доля тока, то высокое падение напряжения приведет к большим тепловым потерям. Кроме того, важную роль в тепловых расчетах играет время переключения. В качестве одного из возможных путей устранения проблемы падения напряжения на паразитном диоде можно использовать физическое свойство SiC, которое называется обратной проводимостью (рис. 6).

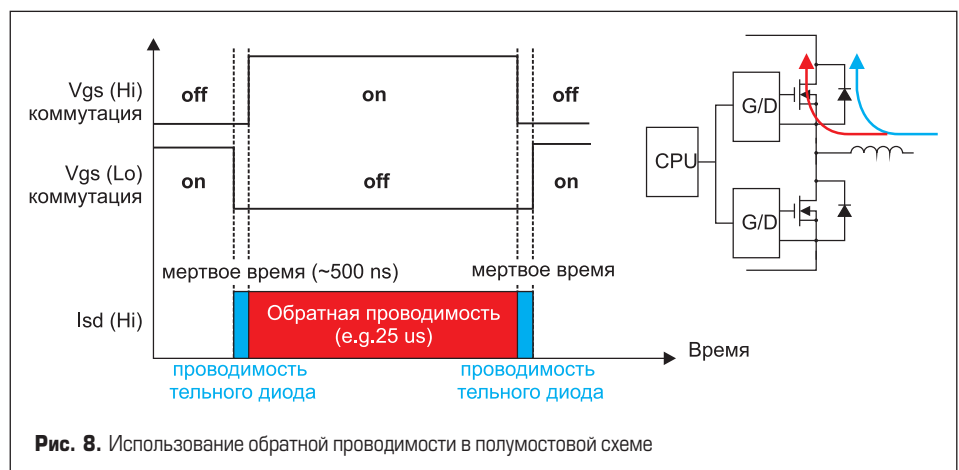
Механизм обратной проводимости основан на том факте, что канал SiC-MOSFET может быть открыт снова, даже если MOSFET находится под обратным смещением. Обратный ток пойдет через канал SiC-MOSFET вместо паразитного диода. Как показано на рис. 7, падение напряжения между стоком и истоком будет уменьшаться при увеличении напряжения на затворе. Оптимальные результаты получаются при напряжении на затворе  $V_{gs} = 18 В$ .

**Использование эффекта обратной проводимости в полумостовых схемах**

Полумостовая схема является очень популярной в силовых системах, в том числе

в инверторах и DC/DC-конвертерах. Она состоит из двух ключей или SiC-MOSFET (верхнее плечо TOP и нижнее плечо BOT). В полумостовой топологии на MOSFET подаются комплементарные сигналы управления, сформированные микроконтроллером и адаптированные с помощью драйвера для обеспечения функционирования системы. Между моментами коммутации ключей необходимо сформировать «мертвое время», чтобы предотвратить короткое замыкание в DC-цепи. В этот период времени через «тельный» диод будет проходить ток. После его окончания MOSFET, который ранее был выключен, может быть открыт снова, несмотря на то, что он находится под обратным смещением.

Как показано на рис. 8, «тельный» диод будет проводить только в «мертвое время» (синяя стрелка) — до тех пор, пока канал MOSFET не откроется снова, и ток пойдет через него (красная стрелка). Эффект обратной проводимости может быть реализован с помощью программного обеспечения, работающего на управляющем микроконтроллере.



**Рис. 8.** Использование обратной проводимости в полумостовой схеме