

Современные полупроводниковые приборы на основе карбида кремния фирмы ROHM Semiconductor

Юрий ПЕТРОПАВЛОВСКИЙ

Первым практическим применением карбида кремния (SiC) в области электротехники был светодиод Генри Раунда, созданный в 1907 г., однако коммерческие образцы различных полупроводниковых приборов на основе этого материала начали производиться только в последние 15–20 лет.

Для изготовления полупроводниковых приборов из почти двухсот пятидесяти модификаций карбида кремния применяются только две — 4 H-SiC и 6 H-SiC. По сравнению с приборами на основе кремния и арсенида галлия изделия на основе SiC имеют ряд преимуществ:

- высокие, теоретически до +600 °С, допустимые рабочие температуры;
- высокая теплопроводность: почти в три раза больше, чем у кремния, и почти в 10 раз больше, чем у арсенида галлия;
- в несколько раз большая ширина запрещенной зоны — 3,26 эВ (у кремния 1,12 эВ, у арсенида галлия 1,5 эВ);
- почти в 10 раз большая критическая напряженность поля электрического пробоя — 2,2 МВ/см (0,25 МВ/см у кремния);
- устойчивость к воздействию радиации;
- стабильность электрических параметров при изменении температуры и отсутствие дрейфа параметров во времени;
- высокое быстродействие.

Однако реализовать преимущества SiC-приборов в промышленном производстве далеко не просто. Карбид кремния является

материалом, при получении которого очень трудно обеспечить качество, сравнимое с качеством чистого кремния. В кристаллах SiC возможно появление целого ряда дефектов полупроводника, некоторые из которых могут отрицательно повлиять на долговременную стабильность характеристик полупроводниковых приборов, особенно биполярных. Поэтому промышленное производство компонентов из карбида кремния с большой площадью кристаллов затруднительно. Другая проблема состоит в том, что стимул к повышению качества карбида кремния у его производителей практически отсутствует, так как основная часть получаемого материала используется для изготовления подложек светодиодов. Для этой цели требуется карбид кремния другой разновидности (6 H вместо 4 H), к качеству которого, учитывая малые размеры светодиодов, требования весьма низкие [1].

На основе карбида кремния выпускаются диоды Шоттки, полевые транзисторы (MOSFET, JFET), биполярные (IGBT, BJT) и тиристоры на напряжения до 10 кВ. Карбид-кремниевые транзисторы имеют очень низкое сопротивление в открытом состоянии

R_{on} — единицы мОм·см² (у кремниевых транзисторов R_{on} — десятки мОм·см²). Малое R_{on} в сочетании с высокой плотностью тока и теплопроводностью позволяет использовать миниатюрные кристаллы для силовых приборов. Большая ширина запрещенной энергетической зоны обеспечивает чрезвычайно малый ток утечки диодов с барьером Шоттки. В отличие от кремниевых, выключение SiC-диодов Шоттки не сопровождается процессом рассасывания заряда, и ток обратного восстановления отсутствует.

В области силовой электроники потери, возникающие в кремниевых полупроводниковых приборах преобразователей электроэнергии и приводов двигателей, становятся все большей проблемой, что подталкивает разработчиков к поиску альтернативных материалов. В последние годы карбид кремния рассматривается как наиболее перспективный материал для силовых полупроводников.

Большое число достоинств SiC-приборов не привело к их быстрому распространению из-за трудностей технологического порядка, преодолеть которые удалось сравнительно недавно нескольким ведущим производителям полупроводниковых приборов, таким как Cree, Infineon, STMicroelectronics, SemiSouth, Mitsubishi Electric и ROHM Semiconductor. Из перечисленных производителей только ROHM располагает всем циклом производства приборов на основе карбида кремния: производит SiC-пластины кристаллов больших размеров, обладает технологией эпитаксиального выращивания кристаллов, производит силовые приборы и силовые модули (соответствующая диаграмма представлена на рис. 1).

ROHM Semiconductor проводила исследования в области применения карбида кремния в течение нескольких лет, начав в 2004 г. с успешной разработки прототипа полевого транзистора. В 2005 г. для производства диодов с барьером Шоттки был проведен

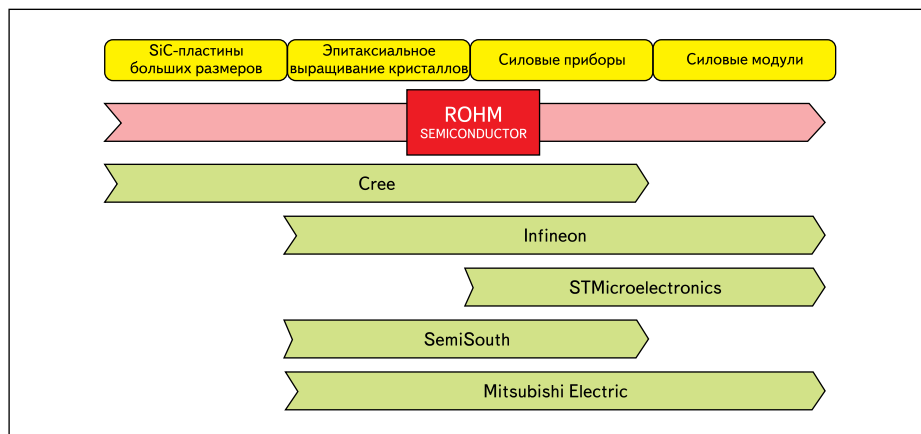


Рис. 1. Производители приборов на основе карбида кремния



Рис. 2. Внешний вид силовых модулей ROHM & Honda

ряд изменений и улучшений. Их результатом стала разработка технологии производства SiC-компонентов, а также приобретение производителя высококачественных пластин карбида кремния (SiCrystal AG, Германия) для обеспечения бесперебойных поставок высококачественного материала. Компанией были решены многие проблемы, связанные с массовым производством SiC-приборов, такие как однородность формирования барьера Шоттки и охранных колец высокого сопротивления без использования высокотемпературных процессов и другие, что в результате и позволило создать полный цикл собственного производства.

В 2008 г. ROHM Semiconductor в сотрудничестве с Honda R & D Co., Ltd разработала мощный инверторный модуль на полевых транзисторах и диодах Шоттки из карбида кремния, предназначенный для использования в электромобилях следующего поколения. Функционально модуль состоит из однофазного преобразователя и трехфазного инвертора в одном корпусе. Потери переключения нового модуля составляют примерно 1/7 от потерь сопоставимого модуля на основе кремниевых IGBT. Общие потери преобразования сокращены также за счет повышения частоты переключения с 20 кГц (IGBT) до 80 кГц, внешний вид разработанного модуля показан на рис. 2 [2].

В 2009 г. ROHM Semiconductor приступила к выпуску новых силовых модулей, объединяющих карбид-кремниевые полевые транзисторы и диоды Шоттки и имеющих значительно более низкие потери переключения (на 77% по сравнению с кремниевыми приборами). Разработанные модули хорошо подходят для солнечного энергетического оборудования, устройств преобразования электроэнергии, инверторов с минимальным тепловыделением, высокой рабочей частотой и низкой температурной зависимостью параметров [3].

В том же году компания в сотрудничестве с профессором Высшей школы инженеров Киотского университета Тсуненобу Кимото (Tsunenobu Kimoto) достигла резкого увеличения тока полевых транзисторов из карбида кремния (SiC Trench MOSFET). Впервые в мире был достигнут прямой ток вели-

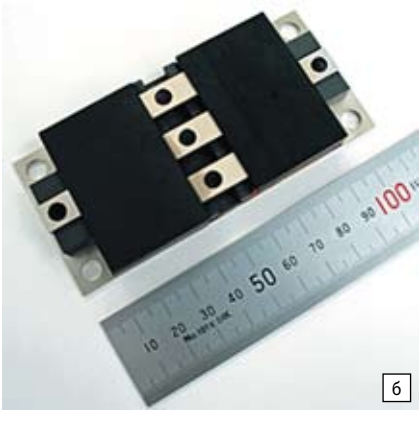
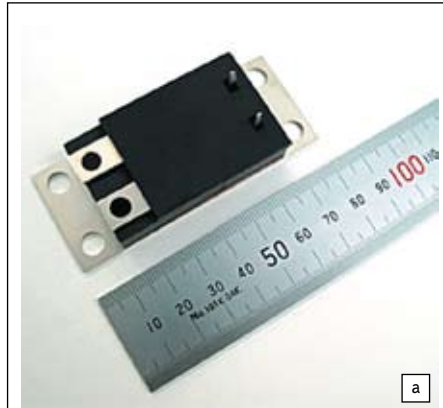


Рис. 3. Промышленные образцы: а) SiC Trench MOSFET; б) SiC-модуль

ной 300 А на один кристалл, ранее, из-за дефектов кристаллической структуры пластин SiC, было возможно получение таких токов только на Si-транзисторах. Для достижения таких показателей исследователи ROHM усовершенствовали технологию эпитаксиального выращивания SiC-кристаллов, что позволило увеличить их площадь в 2,5 раза — с 3×3 до 4,8×4,8 мм. Кроме того, было достигнуто уменьшение на 20% сопротивления транзисторов в открытом состоянии. Ожидается, что эта технология значительно повысит эффективность преобразования энергии в таких силовых приложениях, как гибридные и электрические транспортные средства, железнодорожный транспорт и др.

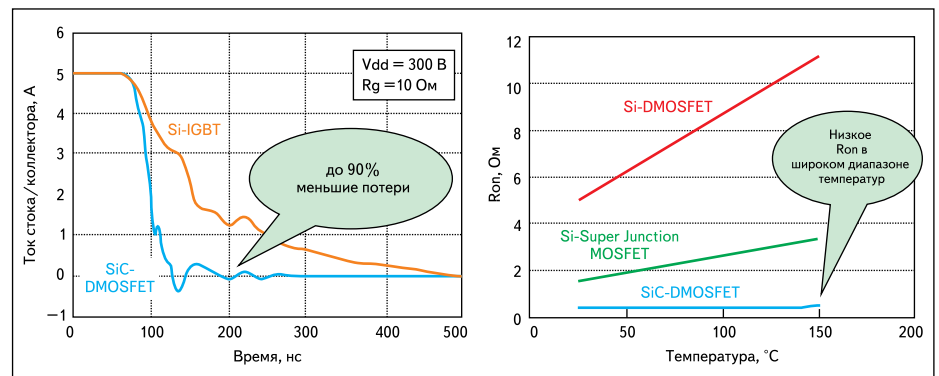


Рис. 5. Сравнительные характеристики переключения и температурные зависимости карбид-кремниевых DMOSFET и IGBT

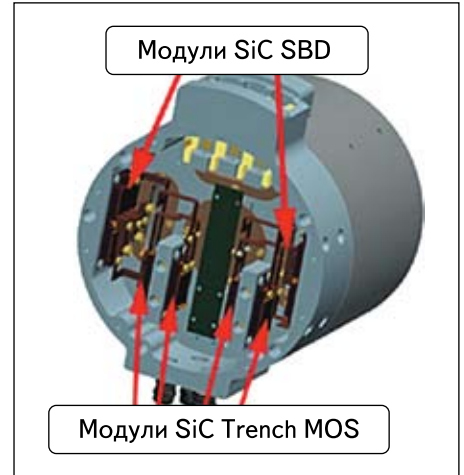


Рис. 4. SiC-приборы в электродвигателе

На выставке CEATAC 2010 в Экспоцентре Makuhare Messe (префектура Тиба) ROHM Semiconductor представила первые в мире промышленные образцы Trench MOSFET (внешний вид приборов показан на рис. 3а) и силовые модули с диодами Шоттки на основе карбида кремния на напряжение 600 В и ток 450 А (рис. 3б) для автомобильных двигателей. В сравнении с Si-приборами новые модули имеют на 50% меньший объем и способны работать при температуре окружающей среды до +200 °С, что позволяет интегрировать их непосредственно в двигатели (рис. 4).

В конце 2010 г. компания объявила о начале промышленного выпуска полевых SiC-транзисторов с двойной диффузией (DMOSFET). Приборы могут быть использованы в широком спектре приложений — кондиционерах, солнечных батареях, промышленном оборудовании и др. При напряжении пробоя 600 В новые транзисторы имеют $R_{ds\ on}$ порядка 0,4 Ом, что практически на порядок меньше, чем у сопоставимых кремниевых приборов. Время переключения в сравнении с IGBT меньше в 5 раз, при этом рабочие температуры SiC-DMOSFET значительно выше, чем у кремниевых приборов. На рис. 5 приведены сравнительные характеристики переключения карбид-кремниевых MOSFET и IGBT-транзисторов и сравнитель-

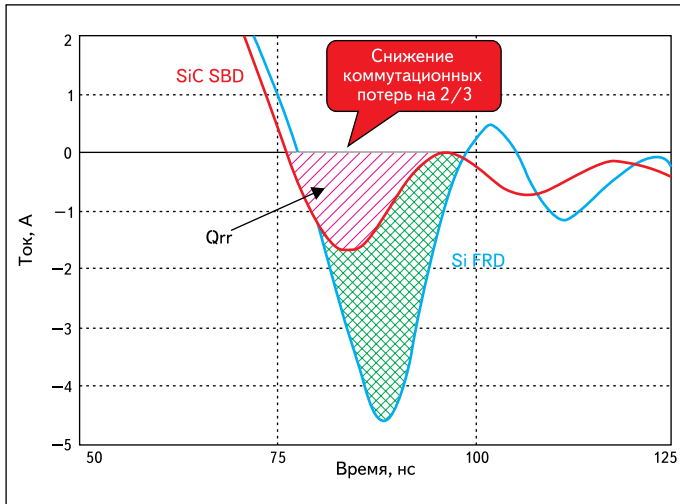


Рис. 6. Сравнительные переходные характеристики диодов SiC-SBD и Si-FRD

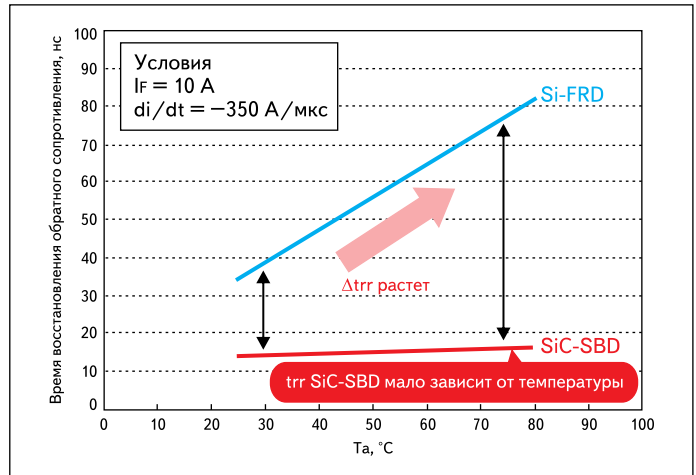


Рис. 7. Зависимости времени восстановления обратного сопротивления диодов SiC-SBD и Si-FRD

Таблица. Классификационные параметры диодов Шоттки

Тип прибора	$U_{обр}$ (max), В	$I_{пр}$ (max), А	$I_{пикс}$ (60 Гц), А	$U_{пр}$ В / при $I_{пр}$ А	$I_{обр}$ мкА / при $U_{обр}$ В	Корпус
SCS106AG	600	6	24	1,5/6	120/600	TO-220AC
SCS108AG	600	8	32	1,5/8	160/600	TO-220AC
SCS110AG	600	10	40	1,5/10	200/600	TO-220AC
SCS112AG	600	12	48	1,5/12	240/600	TO-220AC
SCS120AG	600	20	80	1,5/20	400/600	TO-220AC
SCS106AM	600	6	24	1,5/6	120/600	TO-220FM
SCS108AM	600	8	32	1,5/8	160/600	TO-220FM
SCS110AM	600	10	40	1,5/10	200/600	TO-220FM
SCS112AM	600	12	48	1,5/12	240/600	TO-220FM
SCS120AM	600	20	80	1,5/20	400/600	TO-220FM
SCS105KG	1200	5	20	1,55/5	100/1200	TO-220AC
SCS110KG	1200	10	40	1,55/10	200/1200	TO-220AC
SCS120KG	1200	20	80	1,55/20	400/1200	TO-220AX

ные температурные зависимости сопротивления в открытом состоянии R_{on} SiC-DMOSFET и Si-DMOSFET/Si-Super Junction MOSFET транзисторов. Диаграммы наглядно демонстрируют существенные преимущества транзисторов ROHM на основе SiC последних поколений, их свойства позволяют достичь нового уровня эффективности и упростить схемотехнику импульсных источников питания и преобразователей энергии.

В каталоге фирмы 2011 г. представлены следующие типы приборов из карбида кремния: диоды Шоттки, полевые транзисторы DMOSFET, Trench MOSFET, силовые модули и интеллектуальные силовые высокотемпературные модули [4]. Классификационные параметры диодов Шоттки при температуре окружающей среды +25 °C приведены в таблице. На рис. 6 показаны сравнительные переходные импульсные характеристики диодов Шоттки ROHM Semiconductor на основе карбида кремния (SiC-SBD) и кремниевых диодов с быстрым восстановлением обратного сопротивления (Si-FRD); на диаграммах отмечены обратные заряды восстановления (Q_{rr}) обоих приборов. Меньшая площадь Q_{rr} у SiC-приборов означает и существенно меньшие потери переключения. На рис. 7 приведены сравнительные зависимости времени восстановления обратного сопротивления t_{rr}

SiC-SBD и Si-FRD от температуры. SiC-диоды Шоттки показывают существенно меньшее значение t_{rr} (≈ 15 нс против 30–50 нс у Si-FRD), незначительно зависящее от температуры, что существенно снижает потери переключения (примерно на 2/3), особенно при высоких температурах кристаллов диодов.

На рис. 8 приведены ВАХ диодов Шоттки на основе карбида кремния. Прямое напряжение приборов достаточно стабильно в ши-

роком диапазоне температур (1,2–1,4 В при токе 5 А). Основные области применения SiC-диодов Шоттки: коммутационные схемы, привод электродвигателей, корректоры фактора мощности (PFC). На рис. 9 приведена типовая схема включения корректора фактора мощности в импульсном преобразователе напряжения (SMPS).

Приведенные в таблице приборы выпускаются в двухвыводных корпусах TO-220 (неизолированных и изолированных), в ближайшее время будет налажен выпуск и вдвоенных приборов в трехвыводных корпусах TO-220, TO-247. Внешний вид диодов SCS110AG, SCS110AX показан на рис. 10.

ROHM Semiconductor также имеет успешный опыт в освоении технологии диодов с гетеропереходом (Heterojunction Diode, HJD) на основе карбида кремния. В 2008 г. такой прибор был разработан совместно с компанией Nissan Motor Co., Ltd. Энергия лавинного пробоя (Avalanche Energy) и сопротивление к разрушению HJD-приборов в 10 раз превосходит соответствующие параметры диодов SiC-SBD и Si-PN, что значительно повыша-

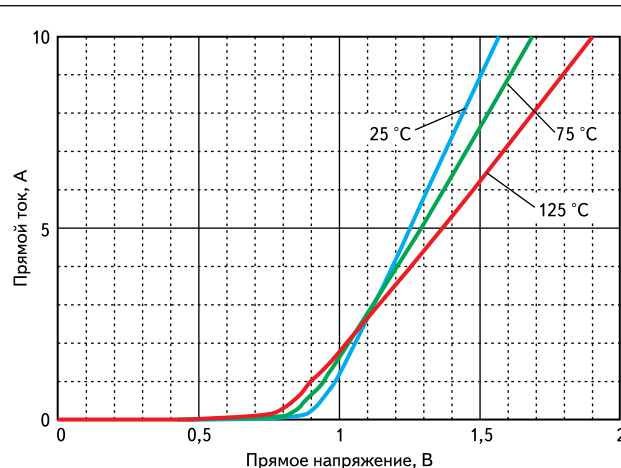


Рис. 8. ВАХ SiC-диодов Шоттки

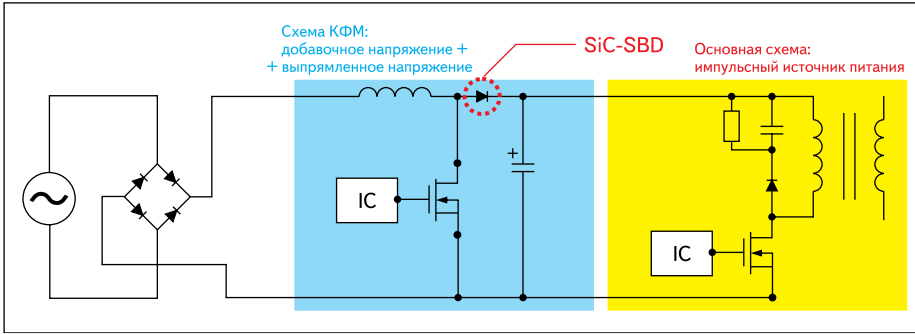


Рис. 9. Импульсный источник питания с корректором фактора мощности



Рис. 10. Внешний вид SiC-диодов Шоттки

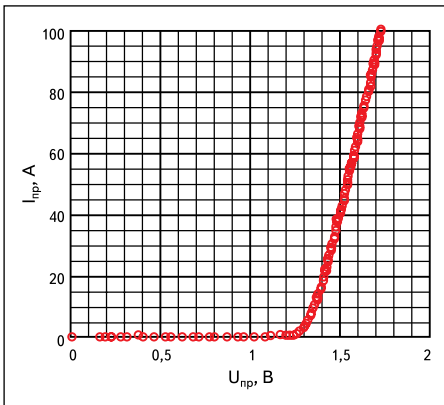


Рис. 11. VAX HJD-диода

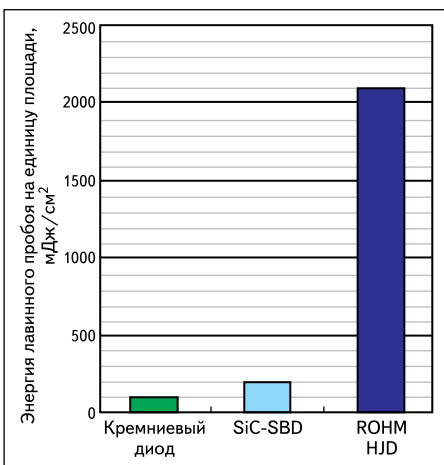


Рис. 12. Сравнительные показатели энергии лавинного пробоя диодов Si-PN, SiC-SBD, SiC-HJD

ет надежность. Приборы разработаны для применения в инверторах гибридных (HEV) и электрических (EV) двигателей автомобилей, а также двигателей на топливных элементах (Fuel Cell Vehicle, FCV). Новые сдвоенные диоды HJD в корпусах TO-220 с тремя выводами выпускаются на напряжение 900 В, имеют сопротивление R_{on} 0,85 мОм·см², площадь кристалла 5 мм². Инженеры ROHM и Nissan считают, что за счет увеличения энергоэффективности на 20% и уменьшения радиаторов охлаждения приборы SiC-HJD имеют прекрасные перспективы для применения в инверторах преобразователей электроэнергии для широкого круга приложений. На рис. 11 приведена ВАХ диода SiC-HJD, на рис. 12 показаны сравнительные значения энергии лавинного пробоя диодов Si-PN, SiC-SBD, SiC-HJD (ROHM) [5].

Особенности полевых транзисторов с двойной диффузией SiC-DMOS, разработанных фирмой:

- значительное, по сравнению с кремниевыми приборами, снижение мощности потерь;
- небольшие размеры кристаллов;
- высокая температура подложки (до +300 °С);
- номинальное рабочее напряжение 600 В, максимальное 1000 В;
- рабочие токи 5–20 А;
- малое и слабо зависящее от температуры сопротивление $R_{ds\ on}$ (менее 0,4 Ом);

- высокая скорость переключения (рис. 5). Основные области применения приборов: инверторы для кондиционеров, преобразователей солнечной энергии, двигателей транспортных средств. Подробные характеристики приборов высылаются по запросам заказчиков [6].

Особенности однокристалльных SiC Trench MOSFET, разработанных ROHM:

- площадь кристаллов прибора 4,8×4,8 мм (без дефектов кристаллической решетки);
- допустимый рабочий ток 300 А на один кристалл;
- малое значение $R_{ds\ on}$ (зависимости тока через открытый транзистор I_c от напряжения V_{ds} при различных напряжениях V_{gs} для кристаллов площадью 4,8×4,8 мм и 3×3 мм приведены на рис. 13);
- возможность параллельного соединения двух и более приборов для увеличения рабочего тока;
- эффективная работа на индуктивную нагрузку (обмотки двигателей), характеристики переключения транзисторов в схеме инвертора с индуктивной нагрузкой приведены на рис. 14.

Основные сферы применения приборов: инверторы для двигателей гибридного, электрического и железнодорожного транспорта, пере-

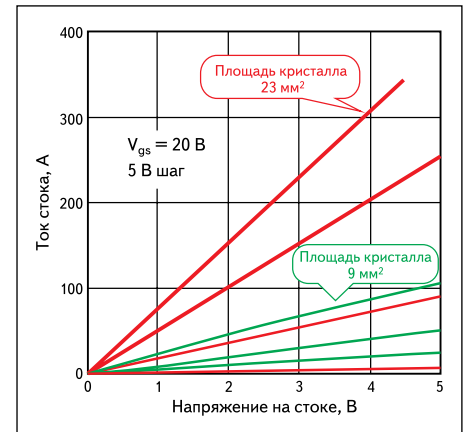


Рис. 13. Переходные характеристики SiC Trench MOSFET

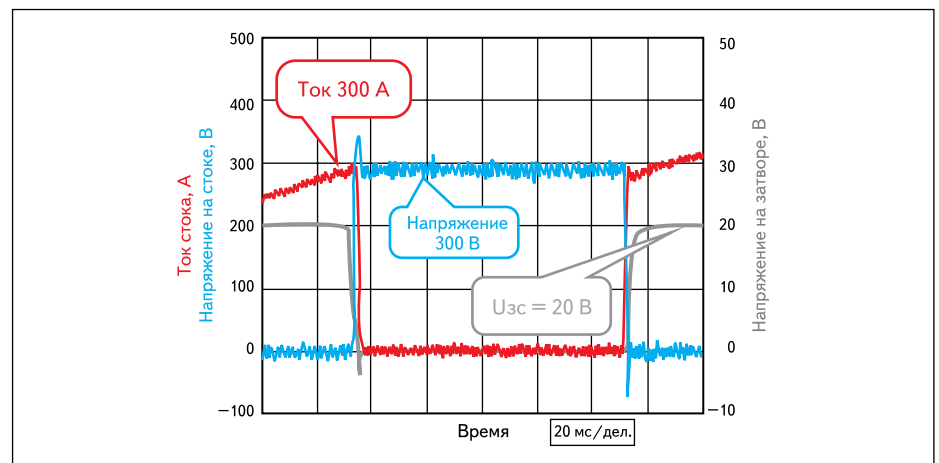


Рис. 14. Характеристики переключения и схема измерений параметров SiC Trench MOSFET

SiC power module



Рис. 15. Внешний вид силового модуля на основе SiC

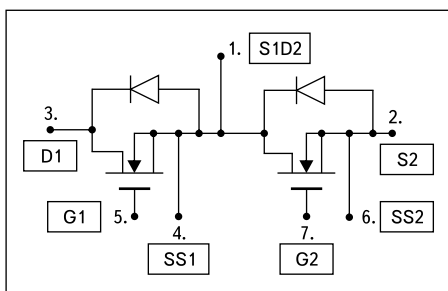


Рис. 16. Структура силового модуля на основе SiC

дача электроэнергии и другие силовые приложения. Подробные характеристики приборов высылаются по запросам заказчиков [7].

Внешний вид новых силовых карбид-кремниевых модулей ROHM Semiconductor показан на рис. 15. В состав приборов входят полевые транзисторы и антипараллельные диоды (Шоттки) верхнего и нижнего полумоста инвертора. Структура и нумерация выводов модулей приведена на рис. 16, габаритный чертеж — на рис. 17.

Основные параметры модулей при температуре +25 °С:

- напряжение сток–исток V_{ds} — 1200 В;
- напряжение затвор–исток V_{gs} — 0...+20 В;
- максимальный ток стока I_{ds} — 100 А, истока I_s — 100 А;
- максимальная мощность рассеяния на стоке P_c — 340 Вт;
- температура кристаллов — -40...+150 °С;
- напряжение изоляции — 2500 В.

Приборы характеризуются низкими коммутационными потерями (на 77% меньше, чем у сопоставимых кремниевых приборов), малым тепловыделением при высокой частоте

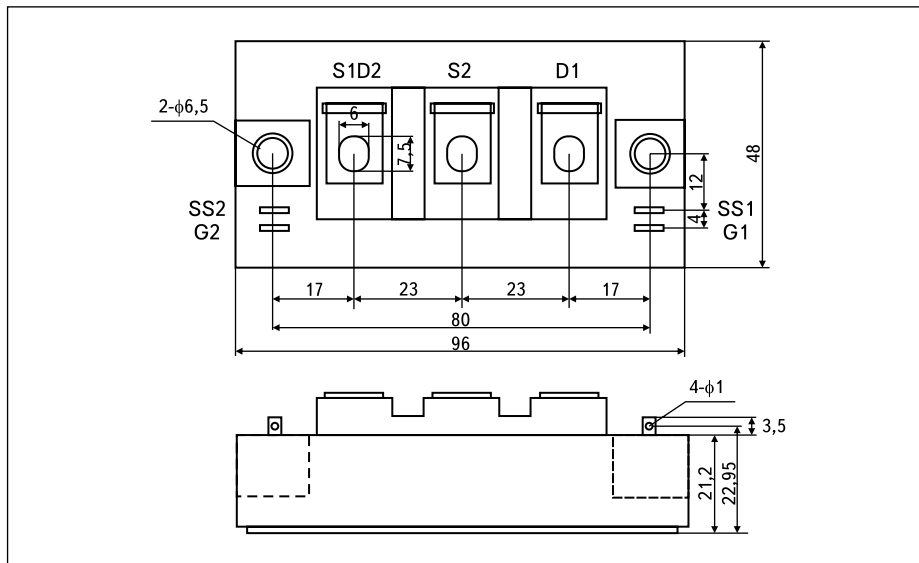


Рис. 17. Габаритный чертеж силового модуля на основе SiC

Infrared camera image of power module

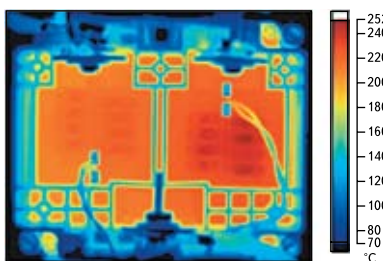


Рис. 18. Диаграмма распределения температур внутри силового модуля

переключения (на 64% меньше) и слабой зависимостью параметров от температуры. Кроме того, резко снижен уровень выбросов и, соответственно, уровень электромагнитных помех. Модули могут быть использованы в инверторах преобразователей электроэнергии общего и промышленного назначения [8].

Результатом научно-исследовательских работ, проведенных компанией совместно с университетами Киото и Арканзаса, стала

разработка карбид-кремниевый интеллектуального силового модуля, способного эффективно работать при температуре кристаллов +250 °С. Распределение температур внутри работающего модуля показано на рис. 18. Основные особенности модулей:

- высокая термостойкость корпуса (до +300 °С);
- возможность работы с выходными токами до 150 А;
- высокая термостойкость драйверов [9]. ■

Литература

1. Линдер С. Силовые полупроводниковые приборы. Часть 2. Улучшение характеристик за счет совершенствования корпусов и перспективы использования новых полупроводниковых материалов // АББ Ревю. 2007. № 1.
2. <http://www.rohm.com/news/080911.html>
3. http://www.rohm.com/news/091005_2.html
4. <http://www.rohm.com/products/discrete/sic/>
5. <http://www.rohm.com/news/080425.html>
6. <http://www.rohm.com/news/101221.html>
7. <http://www.rohm.com/products/sic/trench.html>
8. <http://www.rohm.com/products/sic/pm.html>
9. <http://www.rohm.com/products/sic/high.html>