

Новое поколение преобразовательных систем

на основе карбидокремниевых силовых ключей

Перевод:
Евгений Карташов

Мировая экономика имеет несомненный выигрыш от технологических инноваций и непрерывного совершенствования высоко интегрированных и надежных преобразовательных систем. Однако недостатком этого процесса являются более высокие энергетические затраты и негативные экологические эффекты, связанные с освоением и выпуском продуктов, потребляющих большее количество энергии.

Для решения указанных проблем прикладываются глобальные усилия, позволяющие сделать новые системы более «зелеными» за счет ужесточения норм и стандартов, а также путем освоения новых рынков и разработки новых приложений. Например, технология, используемая в современных электрических и гибридных транспортных средствах, позволяет успешно конвертировать более 85% электроэнергии в полезную, т. е. она вдвое эффективнее, чем бензин. Однако максимальная цель популяризации электрических и гибридных автомобилей, установленная американским Министерством энергетики (DOE), — повышение эффективности до 93% и плюс еще 1% (т. е. достижение КПД в 94%) к 2020 г. На пике сложных задач, установленных DOE, находятся требования по уменьшению вдвое габаритов электрических тяговых приводов и снижению их стоимости к 2020 г. более чем на 20%.

Кроме того, многие государства приняли жесткие требования к возобновляемым источникам энергии, обязывающие обеспечить непрерывный рост процента электроэнергии, поступающей от экологически чистых источников, таких, например, как энергия Солнца. По данным Союза заинтересованных ученых (UCS), в последние пару лет появились несколько тенденций в отношении государственных стандартов по возобновляемой энергии. UCS отмечает, что все больше государств «ставят перед собой более высокие цели, а многие страны с существующими энергетическими стандартами уже увеличили свои задачи или ускорили их достижение». В 16 штатах Америки (плюс Колумбия) уже существуют требования к расширению сектора альтернативной энергетики на 20% и более. Кроме того, все большее количество государственных стандартов стало содержать положения, специально ориентированные на поддержку

солнечной энергетики и/или малых систем возобновляемых источников энергии.

Таким образом, мы видим три основных движителя развития следующего поколения силовых полупроводниковых приборов:

- нормативные правила, требующие повышения эффективности преобразования энергетических систем;
- запрос рынка на улучшенные, облегченные, малогабаритные, экономически эффективные системы;
- появление принципиально новых приложений, таких как электрические транспортные средства (EV) и твердотельные трансформаторы (SST).

До недавнего времени кремний был основным материалом, используемым в силовой электронике. Хотя кремниевая технология продолжает совершенствоваться, ей присущи определенные ограничения, не позволяющие удовлетворять растущие требования, предъявляемые к современным системам преобразования энергии.

Исследования, проведенные в прошедшее десятилетие, показали, что широкозонные (WBG) материалы, такие как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN), могут служить основой для разработки следующего поколения силовых полупроводниковых приборов. Преимущества WBG-устройств обеспечивают значительное повышение эффективности преобразования, а также ряд новых возможностей, недоступных при использовании кремниевых приборов. Однако только в последнее время мощные полупроводниковые ключи на основе SiC стали «диспорьем» разработчиков силовых конвертеров.

Для решения задачи необходимо стечение следующих факторов: наличие всех компонентов, необходимых для создания полноценных преобразовательных систем (SiC-диоды, транзисторы и модули); широкая логистическая цепь; поставщики, предлагающие конкурентоспособные цены. Поскольку GaN-приборы в коммерческом исполнении начали предлагаться только недавно, разработки на их основе находятся пока в зачаточном состоянии. Данная статья посвящена последним типам SiC-ключей, а именно — MOSFET. Представлены основные характеристики SiC-устройств и описаны преимущества этой революционной технологии для силовых систем.

История SiC-приборов

Первые коммерческие SiC-диоды с барьером Шоттки (SBD) появились на рынке более десяти лет назад. С тех пор SiC-SBD начали применяться во многих силовых системах, в первую очередь в корректорах коэффициента мощности (ККМ или PFC) импульсных блоков питания. За ними последовали силовые SiC-ключи — полевые JFET, биполярные BJT и MOSFET. Для приложений, требующих более высоких уровней мощности, чем могут обеспечивать дискретные транзисторы, разрабатываются силовые модули, содержащие несколько дискретных кристаллов в стандартных корпусах. В настоящее время такие компактные модули доступны в виде 100%-ных SiC-компонентов и в гибридных версиях IGBT+SiC-SBD.

В настоящее время SiC-диоды присутствуют в производственной программе многих компаний. Первыми SiC-ключами были JFET и BJT, а более современные SiC-MOSFET появились всего лишь несколько лет назад. Однако технологическая зрелость, высокая производительность и заметное снижение стоимости за счет увеличения объема производства — вот основные причины того, что SiC-MOSFET используются во все большем количестве приложений. SiC-SBD в настоящее время доступны в диапазоне напряжений и токов 600–1700 В/1–60 А соответственно. Таким образом, SiC-приборы могут конкурировать с маломощными кремниевыми MOSFET и IGBT классов 06, 12 и 17.

Разработчикам преобразовательных устройств уже более 10 лет хорошо известны преимущества SiC-диодов Шоттки. Недавно появившиеся SiC MOSFET завоевывают все большую популярность, поскольку эти контролируемые напряжением приборы отличаются от полевых (JFET) и биполярных (BJT) транзисторов простотой управления и отсутствием тока затвора.

Компания ROHM Semiconductor объявила о выпуске двух новых SiC-транзисторов 12 класса SCT2080KE и SCH2080KE, предназначенных для построения экономически эффективных преобразователей с высочайшими значениями КПД. Оба ключа имеют сопротивление открытого канала 80 мОм, причем SCH2080KE является первым промышленным SiC-MOSFET ключом, интегрированным с антипараллельным SiC-диодом Шоттки. Их основные характеристики, преимущества и результаты измерений приведены в данной статье в качестве примера.

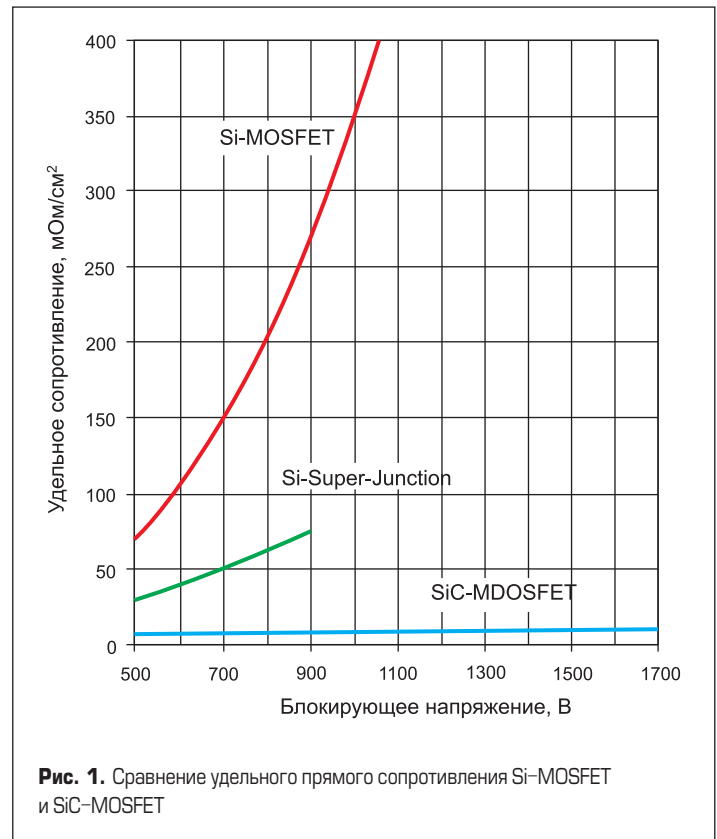
Технология SiC позволяет приблизить характеристики MOSFET к параметрам идеального ключа, который:

- способен проводить большие токи при нулевом падении напряжения в открытом состоянии;
- способен блокировать высокое напряжение с нулевой утечкой в выключенном состоянии;
- имеет нулевые потери энергии при коммутации из выключенного состояния во включенное и наоборот.

При использовании кремниевых приборов очень трудно совместить эти диаметрально противоположные характеристики, особенно касающиеся высокого напряжения и тока. Например, при напряжении пробоя 800 В и выше сопротивление канала (и, следовательно, прямое падение напряжения) становится очень высоким из-за расширения дрейфовой области, требуемой для блокировки такого сигнала. Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) были разработаны именно для решения этой проблемы.

Таблица. Физические характеристики основных широкозонных материалов

Свойства	Si	4H-SiC	GaAs	GaN
Структура кристалла	Алмаз (ромбовидная)	Гексагональная	Сфалерит (цинковая обманка)	Гексагональная
Энергетический зазор E _g (eV)	1,12	3,26	1,43	3,5
Подвижность электронов μ _n (см ² /V _s)	1400	900	8500	1250
Подвижность дырок μ _p (см ² /V _s)	600	100	400	200
Пробивная напряженность поля E _b (В/см)·10 ⁶	0,3	3	0,4	3
Теплопроводность (Вт/см·°C)	1,5	4,9	0,5	1,3
Насыщенная скорость дрейфа V _s (см/с)·10 ⁷	1	2,7	2	2,7
Относительная диэлектрическая постоянная ε _s	11,8	9,7	12,8	9,5
Контроль p, n	0	0	0	Δ
Термический окисел	0	0	X	X



Модули IGBT имеют низкое сопротивление при высокой блокирующей способности, расплатой за это является ухудшение динамических характеристик. Неосновные носители заряда вводятся в дрейфовую область для уменьшения прямого сопротивления. При выключении транзистора требуется время для их рекомбинации и «рассеяния» из базовой области, что увеличивает потери и время переключения. Краткий анализ свойств полупроводниковых материалов объясняет, почему мощные приборы, выполненные на основе SiC-технологии, могут превзойти их кремниевые аналоги. В таблице приведены основные электрические и тепловые свойства кремния и некоторых широкозонных материалов.

Динамические характеристики SiC-MOSFET

Благодаря тому что пробивная напряженность поля SiC в десять раз выше, чем у Si, карбидокремниевые приборы способны обеспечивать такую же блокирующую способность при гораздо меньшей области дрейфа. Теоретически SiC-технология позволяет уменьшить сопротивление на единицу площади дрейфовой области в 300 раз по сравнению с кремнием при том же напряжении пробоя (рис. 1).

MOSFET являются устройствами с основными носителями, поэтому у них нет «хвоста» тока при выключении, свойственного IGBT. Следовательно, SiC-MOSFET объединяют все три основные характеристики силового ключа: высокое напряжение пробоя, низкое сопротивление открытого канала и высокую скорость коммутации. Например,

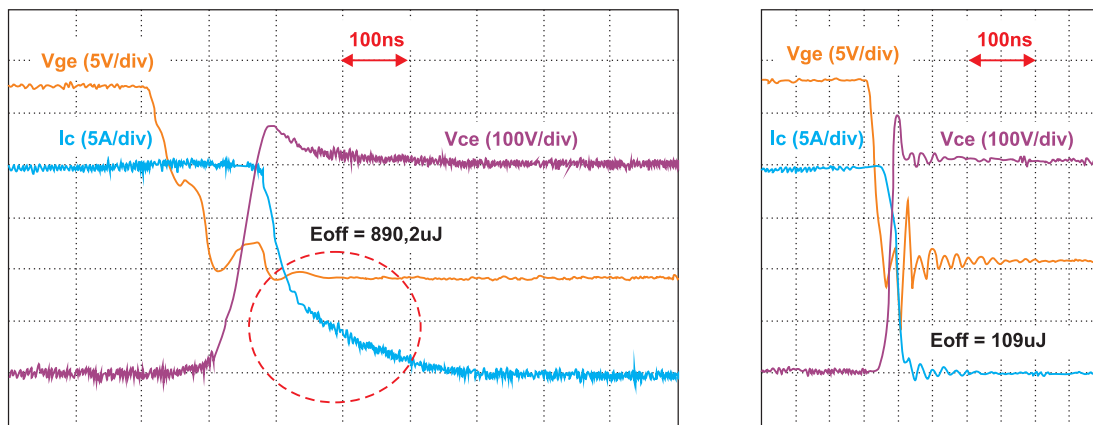


Рис. 2. Снижение потерь выключения на 88%: SiC-MOSFET + SiC-SBD против Si-IGBT + FRD

SiC-MOSFET фирмы ROHM SCT2080KE имеет рабочее напряжение 1200 В, прямое сопротивление 80 мОм и время включения/выключения менее 70–90 нс, что позволяет использовать его на частотах в диапазоне сотен кГц. Компания планирует разработку новых транзисторов с сопротивлением, сниженным еще на 50%.

Меньшие размеры кристаллов SiC-MOSFET означают и меньшие паразитные емкости. Например, величина Ciss и Coss у них на порядок ниже, чем у 900-В Si-MOSFET, а заряд ворота примерно в пять раз меньше — 100 нКл. Отличные динамические характеристики SiC-MOSFET

подтверждаются кривыми на рис. 2 и 3. По сравнению с кремниевыми IGBT с быстрыми диодами (FRD) модуль ROHM SCH2080KE, сочетающий в себе SiC-MOSFET и SiC-SBD, имеет на 88% меньшие потери выключения и на 34% меньшие потери включения.

Лучшие характеристики выключения обусловлены отсутствием хвоста тока у MOSFET. Улучшение процесса включения получено благодаря гораздо более низким потерям восстановления SiC-диодов. Тесты, представленные на рисунках, проводились при Vdd = 400 В, Icc = 20 А и температуре +25 °С, потери восстановления диодов учтены.

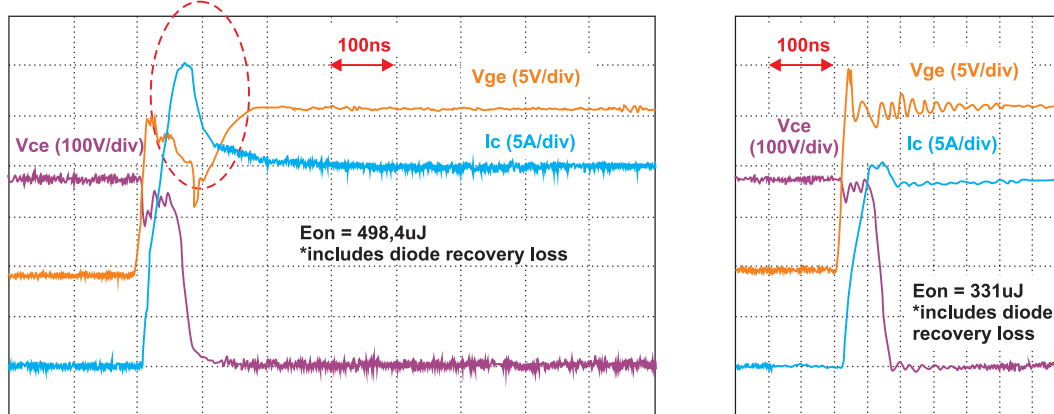


Рис. 3. Снижение потерь включения на 34%: SiC-MOSFET + SiC-SBD против Si-IGBT + FRD

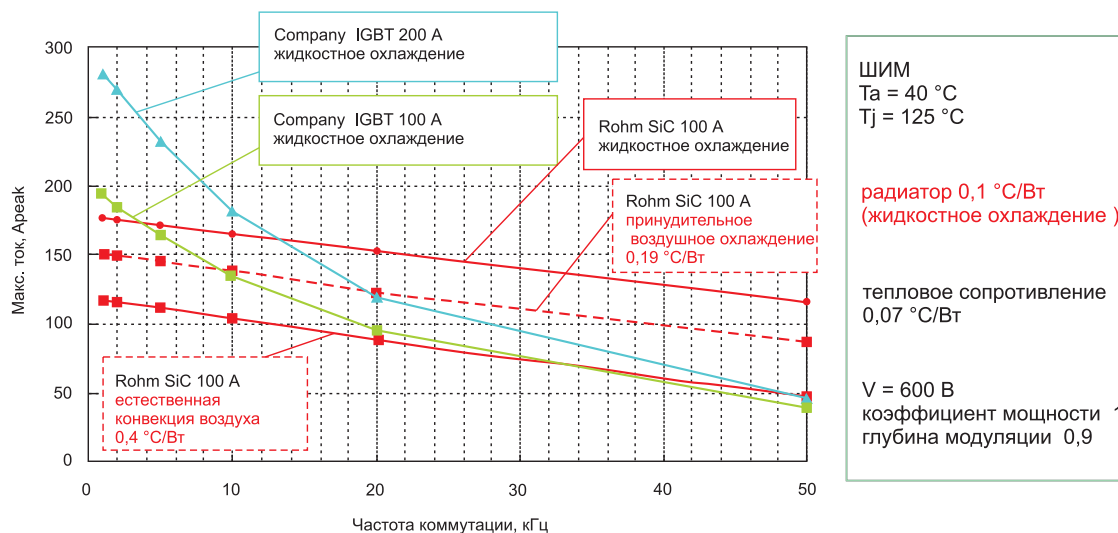


Рис. 4. Благодаря меньшим динамическим потерям 100-А SiC-модуль может заменить IGBT с номинальным током 200 А

ШИМ
 Ta = 40 °C
 Tj = 125 °C
 радиатор 0,1 °C/Вт
 (жидкостное охлаждение)
 тепловое сопротивление 0,07 °C/Вт
 V = 600 В
 коэффициент мощности 1
 глубина модуляции 0,9

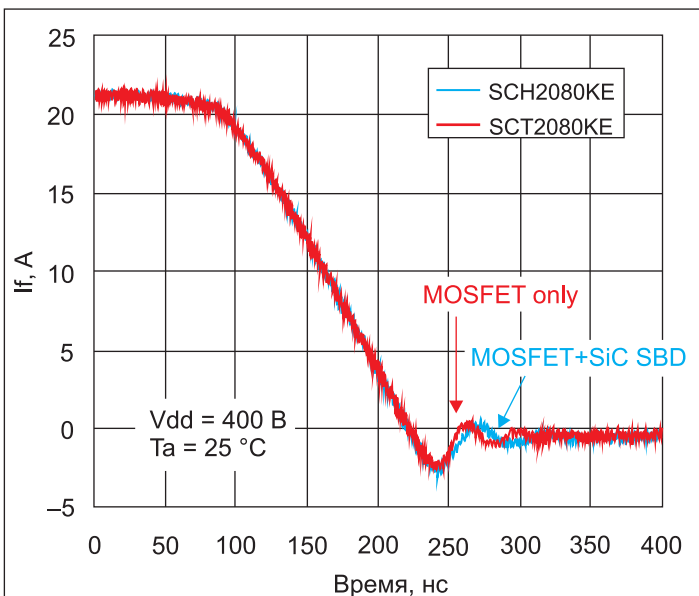


Рис. 5. Обратное восстановление внутреннего диода SiC-MOSFET в сравнении с дискретным SiC-SBD

IGBT-модуль с номинальным током 200 А, работающий в режиме жидкостного охлаждения.

Внутренний диод SiC-MOSFET

Внутренний диод SiC-MOSFET имеет отличные характеристики обратного восстановления, сравнимые с дискретными SiC-SBD. На рис. 5 видно, что кривая обратного восстановления внутреннего диода транзистора ROHM SCT2080KE SiC-MOSFET практически идентична кривой для модуля ROHM SCH2080KE, в состав которого входит MOSFET SCT2080 с дискретным оппозитным SiC-SBD. Единственное значимое различие между ними состоит в прямом падении напряжения: величина V_f внутреннего диода составляет 4,6 В, в то время как у дискретного диода $V_f = 1,3$ В.

Преимущества SiC-MOSFET при высокой температуре

Благодаря большей ширине запрещенной зоны SiC-приборы могут работать при очень высоких температурах. Доступные в настоящее время SiC-SBD и MOSFET рассчитаны только на +150...+175 °C, однако эти ограничения связаны, в основном, с особенностями материалов корпусов. Силовые модули SiC, в которых используются специальные технологии подключения кристаллов, способны функционировать при температуре +250 °C. Ведутся исследовательские работы, где эти приборы были протестированы при нагреве до +650 °C. Верхний предел рабочей температуры для кремниевых полупроводниковых приборов составляет +300 °C, далее материал перестает вести себя как полупроводник.

Теплопроводность SiC в три раза выше, чем у кремния. Эта особенность позволяет снизить требования к системе охлаждения и упростить процесс отвода тепла от SiC-компонентов. Соответственно, система охлаждения может быть меньше, легче и дешевле. Кроме того, электрические характеристики SiC-MOSFET не зависят от температуры столь же сильно, как у кремниевых MOSFET (это справедливо и для SiC-SBD). Например, сопротивление открытого канала $R_{ds,on}$ транзистора ROHM SCT2080KE составляет 80 мОм при $T_j = +25$ °C. При $T_j = +125$ °C $R_{ds,on} = 125$ мОм, т. е. на 56% больше. У кремниевых MOSFET увеличение при тех же условиях составляет более 200%. Соответственно, снижение максимального тока с ростом температуры у SiC-MOSFET также существенно меньше, чем у Si-MOSFET.

Расширенный температурный диапазон SiC силовых приборов не используется в полной мере из-за ограничений, связанных с современными технологиями корпусирования и низкой рабочей температурой других компонентов, используемых в системе.

Надежность SiC-MOSFET

Надежность является одним из наиболее важных факторов при проектировании изделий силовой электроники. Это относится как к преобразователям энергетических систем и приводам электрических транспортных средств, так и к изделиям бытовой техники. Поскольку SiC — новый материал, то одним из основных для инженеров — проектировщиков силовых преобразователей является вопрос о надежности SiC-компонентов в сравнении с кремниевыми. Мы рассмотрим три наиболее важных аспекта, связанных с данной проблемой: надежность затворного оксидного слоя, стабильность порогового напряжения затвора (V_{th}) и стойкость внутреннего диода к режиму обратной проводимости.

Основной причиной отказа MOS-приборов является электрическое перенапряжение на оксидном слое затвора. Соответственно, его качество непосредственно влияет на надежность SiC-MOSFET. Разработка высококачественного оксидного слоя на SiC-подложке являлась достаточно сложной задачей для промышленности до недавнего времени. Основная цель состоит в минимизации плотности дефектов (т. н. поверхностных и объемных ловушек) таким образом, чтобы они не влияли на срок службы и стабильность электрических характеристик. На рис. 6 показаны результаты так называемого CCS TDDDB-теста, позволяющего измерить временную стабильность диэлектрической прочности при воздействии постоянного тока. Это

Низкие потери переключения обеспечивают следующие преимущества:

- Снижение уровня потерь эквивалентно уменьшению выделения тепла, что, в свою очередь, означает более простые, дешевые, малогабаритные и/или легкие системы охлаждения и, соответственно, более высокую плотность мощности.
- Снижение потерь переключения позволяет увеличить рабочую частоту и, соответственно, уменьшить размеры пассивных компонентов (конденсаторы, индуктивности), т. е. снизить стоимость, габариты и вес системы. Уменьшение размеров примерно пропорционально увеличению частоты.
- Меньшее тепловыделение позволяет снизить перегрев компонентов и повысить их ресурс или допустить использование менее мощных и менее дорогих модулей. На системном уровне это означает, что SiC-ключами с меньшим номинальным током могут заменить более мощные кремниевые приборы, что поясняет рис. 4. Можно видеть, что на частоте переключения 20 кГц полумостовой 100-А SiC-модуль в режиме принудительного воздушного охлаждения может заменить

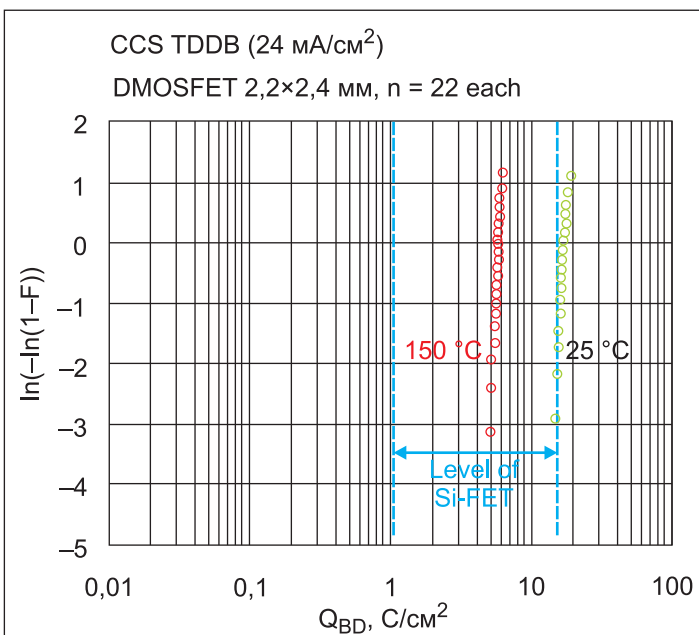
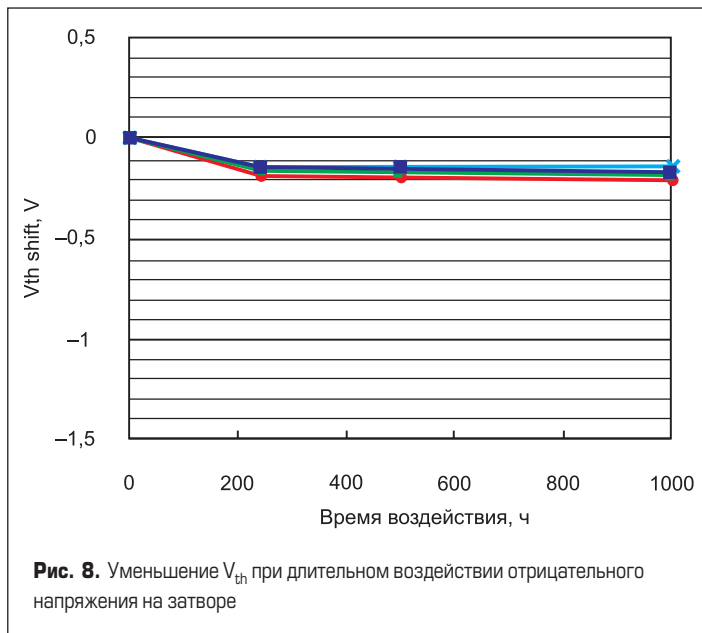
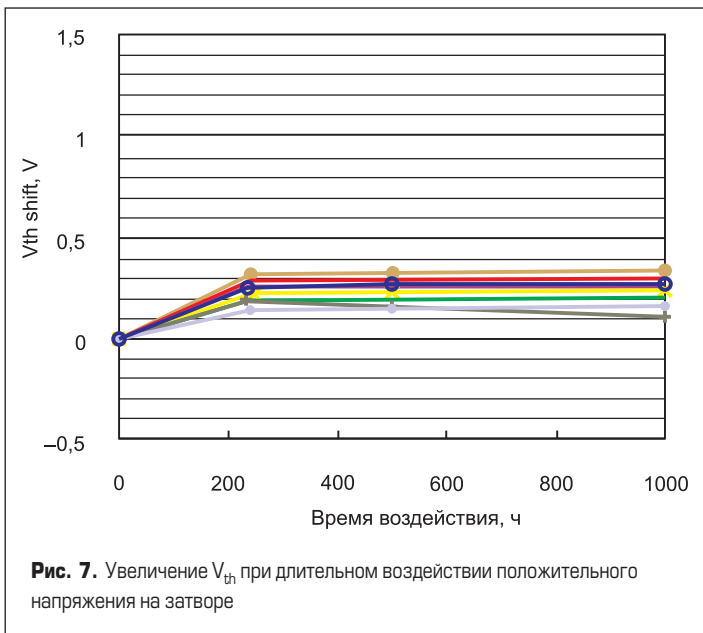


Рис. 6. Постоянный ток: измерения временной стабильности диэлектрической прочности



стандартный тест, позволяющий оценить качество оксидного слоя затвора MOS. Критерием качества является величина накопленного заряда Q_{BD} , полученное значение 15–20 C/cm^2 эквивалентно показателям Si-MOSFET.

Еще одним показателем надежности полупроводникового ключа является стабильность порогового напряжения V_{th} затвора при воздействии положительных и отрицательных смещений. Когда положительное напряжение прикладывается к затвору в течение длительного периода времени, кристаллические дефекты на поверхности оксидного слоя SiC становятся ловушками для электронов, что приводит к увеличению V_{th} , как показано на рис. 7. Аналогичным образом, при воздействии отрицательного напряжения захват дырок вызывает уменьшение V_{th} (рис. 8).

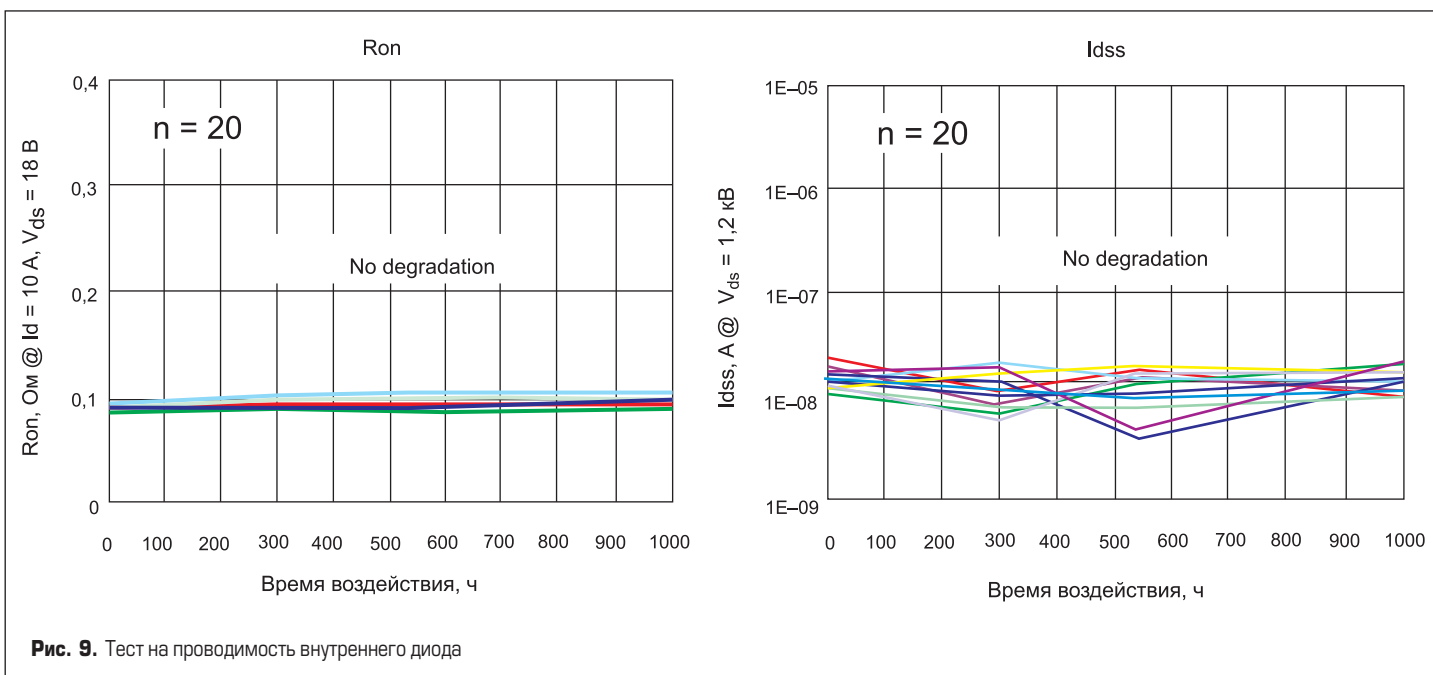
Данные испытания проводились на транзисторе ROHM SCT2080KE. Измеренная величина сдвига V_{th} составляет 0,3 В или несколько меньше. Это сопоставимо с данными, полученными при тестировании кремниевых MOSFET. На практике сдвиг получается гораздо меньше, поскольку транзисторы, как правило, включаются и выключаются с достаточно высокой частотой. Это позволяет захваченным электронам и дыркам «освободиться» между циклами коммутации, соответственно, в ловушках накапливается меньше носителей, вызывающих изменение V_{th} .

Транзисторы SiC-MOSFET с надежными внутренними диодами могут быть использованы в схемах, в которых антипараллельные диоды участвуют в процессе коммутации. При этом самыми распространенными являются мостовые инверторы. Если не контролировать процесс производства, то возникающие дефекты пластины и эпитаксиального слоя приводят к увеличению сопротивления открытого канала R_{on} , прямого падения напряжения и тока утечки диода, которые возрастают пропорционально прямому току через диод. Это связано с распространением дефектов структуры, инициируемым энергией рекомбинации. Локальный нагрев увеличивает значение R_{on} , что приводит к дальнейшему росту числа дефектов.

Фирма ROHM разработала собственную технологию, позволяющую минимизировать плотность дефектов, а также снизить их распространение. Результаты тестов транзистора ROHM SiC-MOSFET SCT2080KE показывают, что внутренний диод надежно работает в режиме обратной проводимости (рис. 9).

Управление SiC-MOSFET

Простота применения SiC-MOSFET обусловлена тем фактом, что эти приборы управляются напряжением точно так же, как кремние-



вые MOSFET- и IGBT-модули. При этом стоит отметить некоторые различия:

- Диапазон изменения напряжения на затворе V_g составляет от -6 до 22 В, рекомендуемые значения — 0 и 18 В. Это больше, чем 15 В — типовая величина V_g , используемая для IGBT. Напряжение 18 В — это минимум, требуемый для достижения номинального сопротивления канала 80 мОм. Более высокое напряжение на затворе необходимо, чтобы «компенсировать» меньшую подвижность носителей в SiC-структуре. Запирание SiC-транзисторов сигналом ниже -6 В вызывает большой сдвиг порогового напряжения V_{th} .
- Поскольку внутренние диоды SiC-MOSFET имеют характеристики обратного восстановления, сравнимые с дискретными SiC-SBD, отпадает необходимость в использовании внешних антипараллельных диодов, за исключением тех случаев, когда это действительно необходимо. Также можно исключить применение последовательного диода для предотвращения протекания тока через внутренний диод, что способствует снижению стоимости системы.
- Поскольку ROHM SiC-MOSFET имеют очень надежные внутренние диоды, они могут быть использованы как двунаправленные коммутаторы. В этом случае большое прямое напряжение внутреннего диода «шунтируется», поскольку оно определяется падением сигнала на сопротивлении «сток-исток», зависящим от V_{gs} . Сказанное поясняет рис. 10.

ROHM SiC-MOSFET — планы на будущее

Фирма ROHM Semiconductor предлагает широкую линейку SiC-MOSFET с рабочим напряжением 400 – 1700 В в диапазоне токов 10 – 63 А. Приборы доступны в корпусах с выводами для сквозного монтажа, а также в виде кристаллов.

Первые два компонента линейки SiC-MOSFET (SCT2080KE и SCH2080KE) серийно производятся с июля 2013 г. Оба имеют рабочее напряжение 1200 В и сопротивление канала 80 мОм. SCH2080KE содержит кристалл SCT2080KE и дискретный антипараллельный SiC-SBD в одном корпусе. Такое решение экономит место на печатной плате, упрощает ее трассировку и стоит меньше, чем эквивалентные дискретные устройства.

Первый на рынке SiC-MOSFET SCH2080 оптимально подходит для приложений, в которых важны малые габариты и вес, например для электроприводов и DC/DC-преобразователей для аэрокосмической отрасли, а также электро- и гибридомобилей. Другие члены семейства компонентов с напряжением 1200 В — это меньшие по размеру и стоимости MOSFET с R_{ds-on} в диапазоне 160 – 450 мОм, а также большие кристаллы с высоким номинальным током и R_{ds-on} в два раза меньшим, чем у первых компонентов линейки. Все эти приборы квалифицированы для работы при температурах до $+175$ °С.

Хотя преимущества SiC-MOSFET, как правило, являются более выраженными на высоком напряжении (1000 В и более), они могут также стать хорошим выбором для преобразовательных систем с напряжением 400 – 650 В, в которых требуется сочетание высокой скорости переключения и низкого сопротивления канала, что не могут обеспечить кремниевые MOSFET и IGBT.

В ближайшем будущем ROHM планирует выпустить новое поколение Trench MOSFET с вертикальной архитектурой. Ее основное преимущество заключается в крайне низком сопротивлении во включенном состоянии, получаемом благодаря устранению сопротивления JFET-структуры, присущем планарной архитектуре, и более высокой каналь-

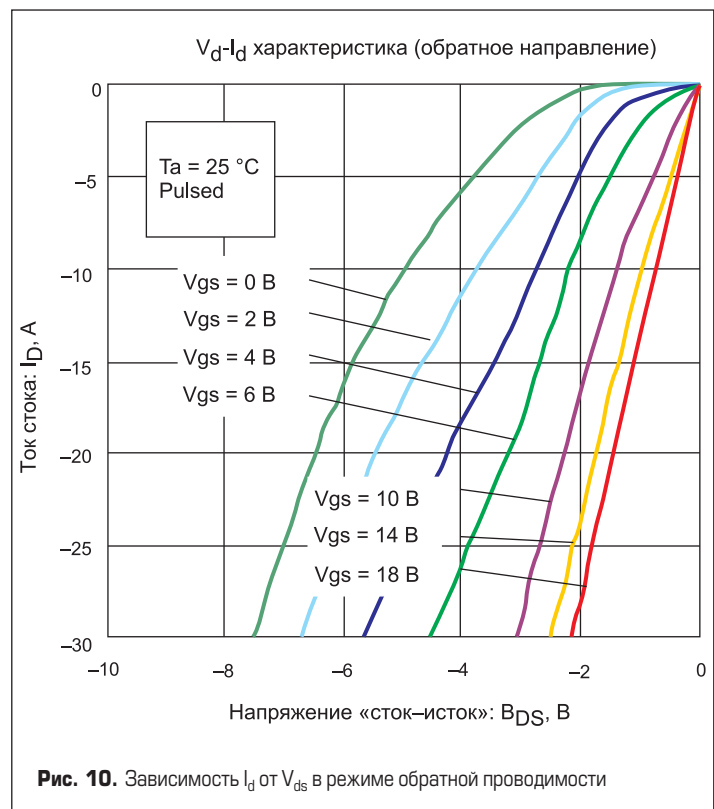


Рис. 10. Зависимость I_d от V_{ds} в режиме обратной проводимости

ной подвижности. Для таких ключей с напряжением 1200 В достигнуто удельное сопротивление менее $1,25$ мОм/см². Меньшие размеры кристаллов означают, что стоимость Trench MOSFET должна быть ниже.

Сочетание этих двух характеристик ключей с высоким номинальным током (60 А и более) обеспечивает высокую экономическую эффективность. Это, в свою очередь, позволяет разрабатывать более экономичные силовые SiC-модули, способные коммутировать очень большой ток, например 600 А... 1 кА. В настоящее время производство таких модулей является экономически нецелесообразным, так как для этого требуется значительно большее количество кристаллов.

Взгляд в будущее силовой электроники

Хотя последние десятилетия отмечены массой значимых достижений в области технологий, а также расширением производственных возможностей, силовая электроника еще находится на заре эры широкозонных полупроводников. Поскольку развитие промышленности подталкивает производителей к полной реализации всего потенциала карбида кремния, следующее поколение SiC-устройств имеет хорошую возможность поучаствовать в реализации новых крупносерийных проектов, таких как электромобили и твердотельные трансформаторы. Расширение этих секторов рынка будет по-прежнему стимулировать рыночный спрос, действуя в качестве локомотива для будущего развития технологий. Приверженность компании ROHM к дальнейшему совершенствованию SiC-компонентов обещает в ближайшее десятилетие участникам рынка силовой электроники еще больше ярких событий.