

100% SiC или гибрид?

Инновации в сфере силовой электроники связаны в первую очередь с внедрением широкозонных материалов, применение которых позволяет не только повысить эффективность преобразования, но и создавать силовые ключи с принципиально новыми свойствами. Карбид кремния рассматривается как один из наиболее перспективных материалов для разработки новых поколений силовых ключей. Особенности SiC-технологии посвящено множество публикаций, а ведущие мировые производители уже предлагают широкую гамму транзисторов SiC MOSFET и диодов SiC Шоттки.

Однако широкое внедрение технологии SiC ограничено рядом факторов, связанных с относительно большой стоимостью, некоторыми физическими особенностями и высокой плотностью дефектов. Замена традиционных типов транзисторов на карбидокремниевые также является достаточно сложной задачей, поэтому целесообразность использования SiC-ключей в конкретных устройствах должна тщательно анализироваться.

Говоря об очевидных достоинствах карбидокремниевых модулей (и зачастую умалчивая об их недостатках), не стоит забывать об альтернативной технологии, предусматривающей совместную работу IGBT и диодов SiC Шоттки. Подобные «гибридные» модули выпускаются многими мировыми производителями, в том числе SEMIKRON.

**Штефан Хаузер
(Stefan Häuser)**

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Чем хорош гибридный модуль?

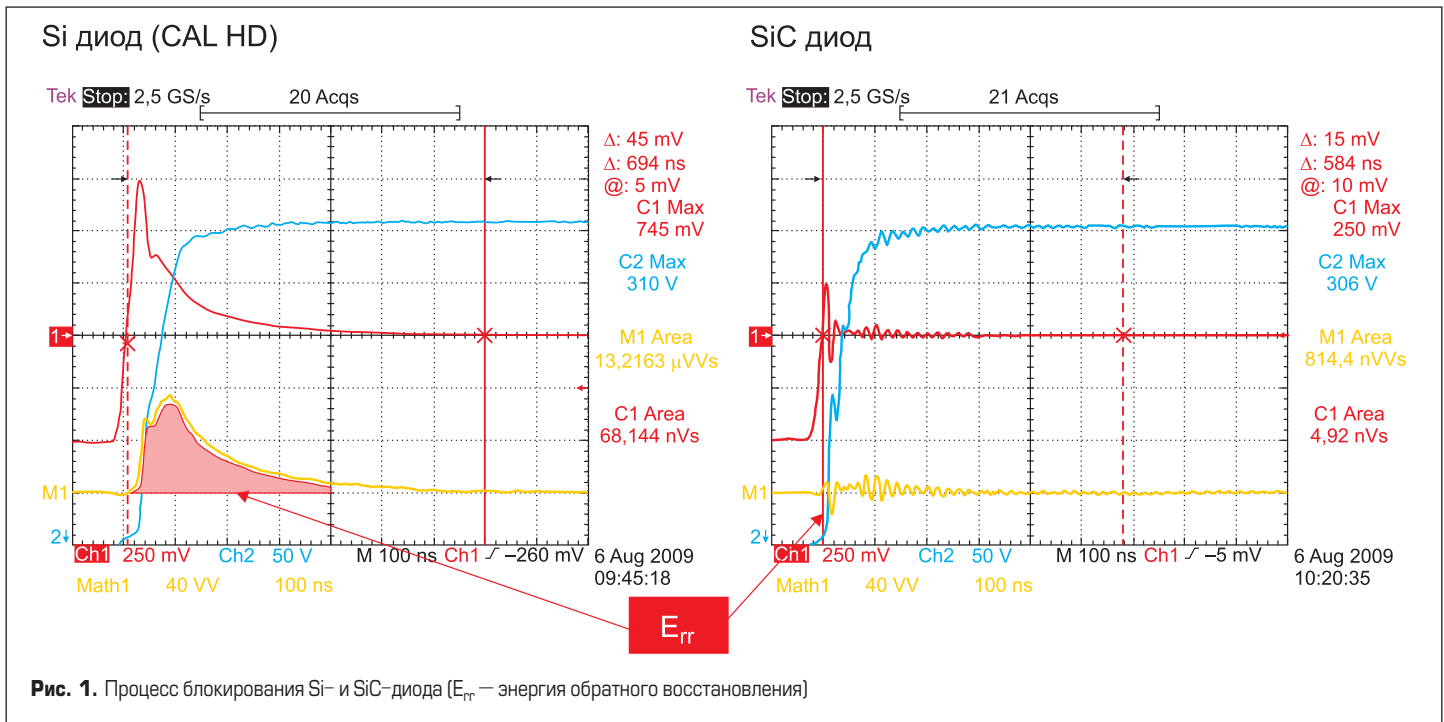
Каждый раз, когда мы обсуждаем возможность применения карбидокремниевых транзисторов в каком-либо устройстве, мы, как правило, имеем в виду «полные», или 100%, SiC MOSFET-модули (с встроенными диодами SiC Шоттки или без них). Подобные униполярные приборы имеют более высокую скорость коммутации и меньший уровень динамических потерь, чем любые кремниевые ключи, что позволяет существенно повысить рабочую частоту F_{sw} и эффективность работы преобразовательной системы.

Очевидно, что наибольший выигрыш применение SiC-транзисторов дает в высокочастотных устройствах, имеющих выходной фильтр, таких как инверторы солнечных батарей и источники бесперебойного питания (UPS). Увеличение F_{sw} позволяет снизить размеры и стоимость моточных изделий. То же самое справедливо для DC/DC-конвертеров, гальваническая изоляция в которых обеспечивается с помощью трансформаторов. Снижение суммарного уровня потерь позволяет использовать менее эффективную систему отвода тепла или даже перейти от принудительного охлаждения к естественной конвекции, а следовательно, уменьшить габариты и вес всего изделия.

Однако стоимость системы при переходе на 100% SiC-ключи, как правило, заметно возрастает, поскольку карбидокремниевые приборы намного дороже кремниевых, и в ближайшее время данное соотношение вряд ли изменится. Это объясняется рядом

факторов, в первую очередь тем, что производство SiC-пластин гораздо сложнее, чем Si, а выход годных гораздо ниже. Рост карбидокремниевых структур происходит очень медленно, их формирование производится из парообразного фазового состояния. Карбид кремния является одним из самых твердых материалов, поэтому для резки пластин приходится использовать дорогостоящий алмазный инструмент. Отметим также и тот очевидный факт, что переход на ключи с гораздо более высокой скоростью коммутации di/dt требует кардинального пересмотра конструкции звена постоянного тока и цепей управления.

В высокочастотных маломощных устройствах (<10 кВт) силовые ключи не являются «ценообразующими», и применение 100% SiC-транзисторов дает ощутимые преимущества на системном уровне. Однако это утверждение никак нельзя отнести к диапазону средних и высоких мощностей, где замена кремниевых ключей на карбидокремниевые, как правило, не оправдана технически, но резко увеличивает цену изделия. Стоимость SiC-кристаллов с увеличением их размера растет экспоненциально, таким образом, их применение целесообразно только в тех приложениях, где переход на более высокую частоту коммутации позволяет снизить стоимость за счет уменьшения размеров фильтров и упрощения системы охлаждения. Типичными примерами устройств, где SiC-технология приобретает все большую популярность, являются инверторы солнечных батарей и источники питания



(UPS). И даже в этих изделиях следует стремиться к использованию SiC-чипов минимально возможных размеров, а для наращивания мощности использовать их параллельное соединение.

Реальной альтернативой IGBT для применений среднего диапазона мощности являются т. н. гибридные модули (Hybrid SiC), обеспечивающие существенное повышение КПД при умеренном росте стоимости. Термин «гибрид» в данном случае означает сочетание кремниевого ключа (чаще всего, это быстрый IGBT) и карбидокремниowego антипараллельного диода (SiC Шоттки). Особенно ярко достоинства гибридов проявляются в том случае, когда характеристики IGBT и SiC Шоттки хорошо согласованы.

В униполярных карбидокремниевых диодах для переноса заряда используются только основные носители (электроны). В отличие от биполярных кремниевых приборов, у SiC Шоттки отсутствуют неосновные носители, которые рекомбинируют с электронами в режиме блокирования. Процесс рекомбинации приводит к т. н. обратному восстановлению, в процессе которого возникает ток I_{rr} , проходящий через блокируемый диод, когда на нем присутствует практически полное напряжение. В результате генерируются динамические потери E_{rr} , величина которых может достигать 35% от общего значения. Кроме того, данный процесс создает мощный динамический стресс для $p-n$ -перехода, поэтому для повышения устойчивости кремниевых структур к di/dt принимаются специальные технологические меры. В униполярной SiC-структуре отсутствует эффект обратного восстановления и связанные с ним потери мощности, а небольшой обратный ток при запираии диода SiC Шоттки обусловлен только наличием небольшой паразитной емкости (рис. 1).

Ток восстановления $p-n$ -перехода I_{rr} проходит через оппозитный открывающийся транзистор, что создает дополнительные потери включения (E_{on}) IGBT. Соответственно, использование SiC-диодов Шоттки в качестве FWD позволяет резко снизить и эту составляющую суммарных потерь мощности. В общем случае уменьшение величины E_{on} при переходе на карбидокремниевые диоды достигает 40%, при этом значение E_{off} остается неизменным.

Униполярные приборы отличаются очень хорошими динамическими характеристиками (табл. 1). По сравнению с аналогичными кремниевыми выпрямителями, у SiC-диодов пиковый ток обратного восстановления I_{rrm} меньше на 50%, заряд восстановления Q_{rr} — в 14 раз, а энергия выключения E_{off} — в 16 раз. У Si-Fast диодов динамические характеристики несколько лучше, чем у Si, однако они также существенно уступают карбиду кремния.

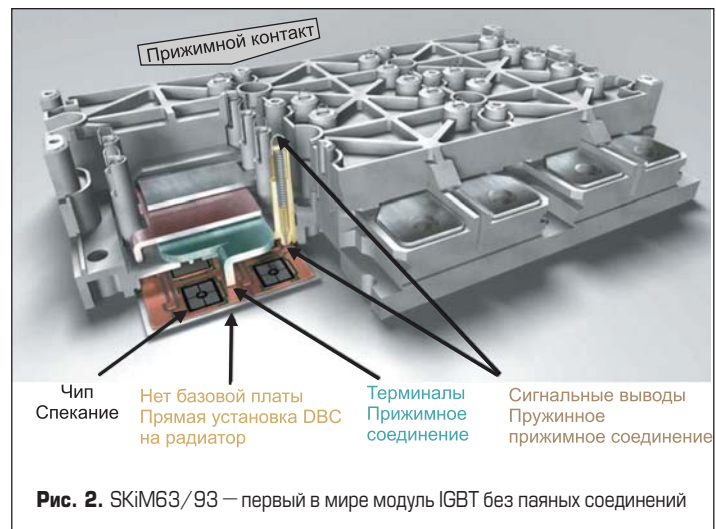
Использование комбинации IGBT+SiC-диод Шоттки дает возможность уменьшить суммарное значение потерь переключения до 60%

по сравнению с традиционной структурой (IGBT+Si-диод). Компания SEMIKRON широко внедряет технологию Hybrid SiC в своих модулях среднего диапазона мощности, предназначенных для использования, в первую очередь, в преобразователях для солнечной энергетики и систем хранения энергии (ESS), где высокая частота коммутации является одним из ключевых требований. В некоторых случаях применение гибридов может быть оправдано и в высокоскоростных приводах.

Для реализации всех возможностей SiC-технологии конструктив силового модуля должен быть рассчитан на высокую скорость коммутации и расширенный температурный диапазон, т. е. иметь малую величину распределенной индуктивности L_s и выполняться из высокотемпературных материалов, включая соединительный слой между кристаллами и изолирующей DBC-подложкой. Отметим, что пайка, традиционно используемая для этой цели в подавляющем большинстве

Таблица 1. Сравнительные динамические характеристики диодов Si (CAL HD), SiC Schottky, Si-Fast (1200 В, 10 А)

Параметр	CAL HD	SiC	Si-Fast
	$V_R = 300 \text{ В}, I_F = 10 \text{ А}, T_J = +150 \text{ °С}$		
$di/dt, \text{ А/мкс}$	750	700	750
$I_{rrm}, \text{ А}$	14,9	5,0	8,2
$Q_{rr}, \text{ мкКл}$	1,36	0,098	0,226
$E_{off,D}, \text{ мДж}$	0,264	0,016	0,024



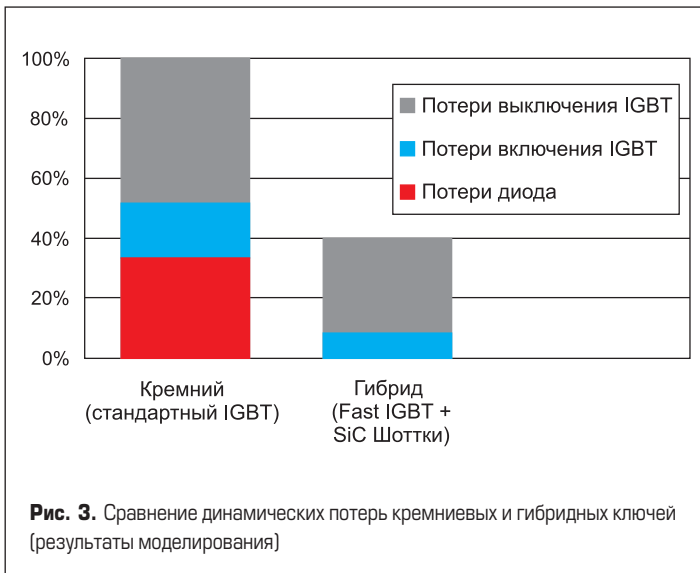


Рис. 3. Сравнение динамических потерь кремниевых и гибридных ключей (результаты моделирования)

силовых модулей, не способна обеспечить надежную работу кристаллов SiC. Всем перечисленным требованиям соответствует новый безбазовый конструктив SEMIKRON SKiM63/93 [7] — он обладает сверхнизкой величиной L_s , монтаж чипов осуществляется путем низкотемпературного спекания серебра (рис. 2). Для обеспечения максимально эффективной работы комбинации Si-SiC в гибридных модулях SEMIKRON использует специальный тип быстрых IGBT. Наглядный выигрыш от замены кремниевых ключей на гибридные с точки зрения снижения уровня динамических потерь продемонстрирован на рис. 3.

Гибридный модуль в конструктиве SKiM может иметь различные конфигурации и использоваться, например, как трехфазный инвертор (преобразователь солнечной батареи) или трехфазный двунаправленный DC/DC-конвертер (ESS). Повышение мощности и «масштабируемость» достигаются путем параллельного соединения.

В серийно выпускаемых преобразователях для солнечной энергетики простая замена кремниевых модулей на гибридные дает возможность удвоить частоту коммутации (например, с 8 до 16 кГц) при неизменном уровне рассеиваемой мощности. Это позволяет уменьшить размеры и цену выходного фильтра примерно на 30% и таким образом в некоторой степени скомпенсировать увеличение стоимости системы. При этом будут соответственно уменьшаться габаритные размеры всего изделия, что, в конечном итоге, также улучшает экономические показатели.

Теоретически, применение гибридных силовых ключей может увеличить выходной ток более чем на 50% (при $F_{sw} = 40$ кГц, рис. 4), а общую эффективность системы — более чем на 2%. Отметим, что температура кристаллов как IGBT, так и SiC Шоттки при этом остается на прежнем

уровне, т. е. рост частоты коммутации не ухудшает показатели надежности.

На рис. 4 представлена зависимость мощности и КПД от частоты коммутации для инвертора, построенного на трехфазном модуле SKiM306GB12E4 (Trench IGBT+Si-диод) и аналогичном гибридном SiC-модуле (Fast IGBT+SiC Шоттки) компании SEMIKRON. Как видно из рассмотрения рисунка, преимущества SiC-диодов позволяют заметно улучшить характеристики преобразователя при F_{sw} более 10 кГц. При этом отметим, что на традиционных «приводных» частотах (менее 7 кГц) из-за более высоких статических потерь SiC-структур лучшим выбором по-прежнему являются кремниевые IGBT и диоды.

Еще одним, не менее важным достоинством гибридных модулей является то, что для их управления можно использовать стандартные драйверы IGBT без какой-либо модификации. Для работы с SiC MOSFET они не подходят, более подробно этот вопрос будет рассмотрен далее.

SiC — немного о грустном

Широкому применению карбидокремниевых компонентов на сегодня препятствует ограниченная нагрузочная способность кристаллов и высокая цена. Основным путем расширения токового диапазона является увеличение размера чипов, однако это не лучший способ в отношении SiC-структур, поскольку он ведет к резкому росту процента дефектных кристаллов и дальнейшему повышению стоимости готовых изделий.

Кремниевые чипы производятся на «условно бездефектных» (не более 10% поврежденных чипов) пластинах диаметром 8" и 12" по удельной цене около 0,1 €/см². Плотность дефектов и, соответственно, стоимость пластин SiC диаметром 4" пока что примерно на порядок выше. Отметим, что кристаллы карбида кремния при прочих равных условиях могут иметь меньшую площадь, т. е. более высокую плотность тока, соответственно, на SiC-пластинах можно размещать большее количество чипов. Очевидно, что с увеличением плотности упаковки кристаллов затраты на их изготовление должны снижаться.

Последние достижения SiC-технологии привели к заметному уменьшению плотности дефектов, которая, однако, по-прежнему гораздо выше, чем у кремниевых приборов. Наиболее известными «врагами» SiC-структур являются т. н. микротрубки или микропоры, представляющие собой кристаллографические дефекты структуры. При использовании новейшей технологии Dow Corning плотность микропор поддерживается на уровне менее 1/см².

В процессе производства материал подложки подвергается воздействию внутренних и внешних стрессов, что приводит к увеличению размера дефектов и сдвигам внутри атомной решетки. Чаще всего возникает т. н. винтовое смещение, которое нарушает последовательность атомных плоскостей в кристаллической решетке и располагает их в форме спирали. Винтовое смещение, происходящее во время вы-

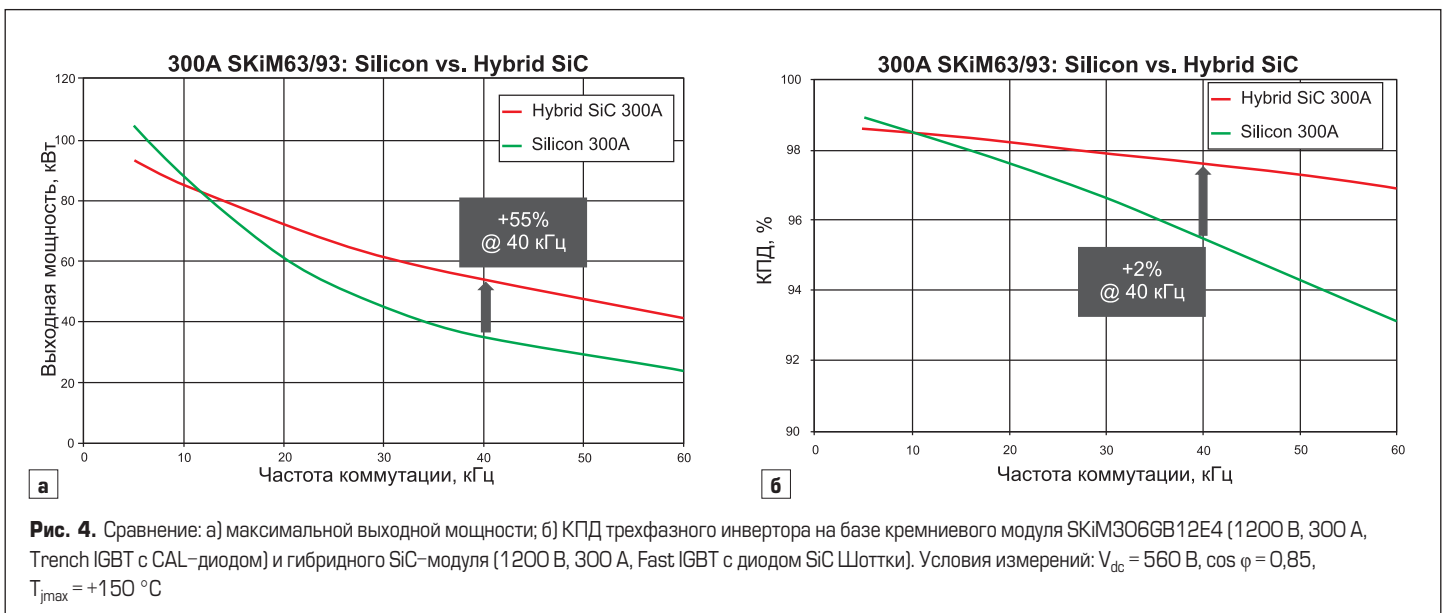


Рис. 4. Сравнение: а) максимальной выходной мощности; б) КПД трехфазного инвертора на базе кремниевых модуля SKiM306GB12E4 (1200 В, 300 А, Trench IGBT с CAL-диодом) и гибридного SiC-модуля (1200 В, 300 А, Fast IGBT с диодом SiC Шоттки). Условия измерений: $V_{dc} = 560$ В, $\cos \varphi = 0,85$, $T_{jmax} = +150$ °C

ращивания подложки, образует микропоры, с повышением плотности которых резко растет процент дефектных чипов.

Степень выхода годных SiC в основном ограничена поверхностными дефектами, образующимися при химическом осаждении из газовой фазы в ходе эпитаксиального процесса (CVD). На сегодня это наиболее значимая проблема, резко снижающая эффективность работы полупроводниковых устройств. Размеры эпитаксиальных дефектов зависят от толщины пленки, а их плотность (1,5–2/см²) характерна для приборов с блокирующим напряжением до 2 кВ.

Особенности SiC-структур

- SiC-структуры обладают рядом специфических свойств:
- Прозрачность. SiC-пластины прозрачны, что создает трудности для фотолитографии, автоматизированного обнаружения дефектов и автоматизированной обработки пластин. Оптический контроль может ошибочно принять особенности подповерхностной структуры за поверхностные дефекты. Датчики технологического оборудования рассчитаны на непрозрачные материалы, их ошибки могут привести, например, к повреждению пластин при загрузке и выгрузке.
- Состав легирующих примесей.

Процесс имплантации и активации примесных атомов в SiC-структурах гораздо сложнее, чем в кремнии, поскольку их способность к диффузии чрезвычайно мала. Активация примесей в карбиде кремния требует температуры свыше +1500 °С, поэтому поверхность пластины необходимо соответствующим образом защитить, чтобы предотвратить ее повреждение и образование шероховатостей. Эффективность активации зависит от общей концентрации легирующей примеси.

- Сопротивление подложки. SiC-структуры имеют более высокое удельное сопротивление, чем Si. Поскольку толщина эпитаксии у карбида кремния меньше, чем у кремния, SiC-подложка вносит больший вклад в ESR (эквивалентное последовательное сопротивление) полупроводникового прибора. Формирование омических контактов у SiC-кристаллов требует отжига при температуре более +800 °С. Этот производственный этап должен выполняться в начале изготовления, так как такой перегрев может негативно сказаться на последующих циклах производства. Оптимизация процесса важна для минимизации ESR и, соответственно, получения низкого значения прямого падения напряжения у SiC-диодов и SiC MOSFET.
- Дефекты.

Наиболее серьезной проблемой SiC-технологии являются поликристаллические дефекты поверхности пластин, которые образуются в процессе эпитаксии. Наличие подобных дефектов на поверхности может привести к образованию особых формаций в слоях фоторезиста, следствием чего является повреждение участков пластин, находящихся

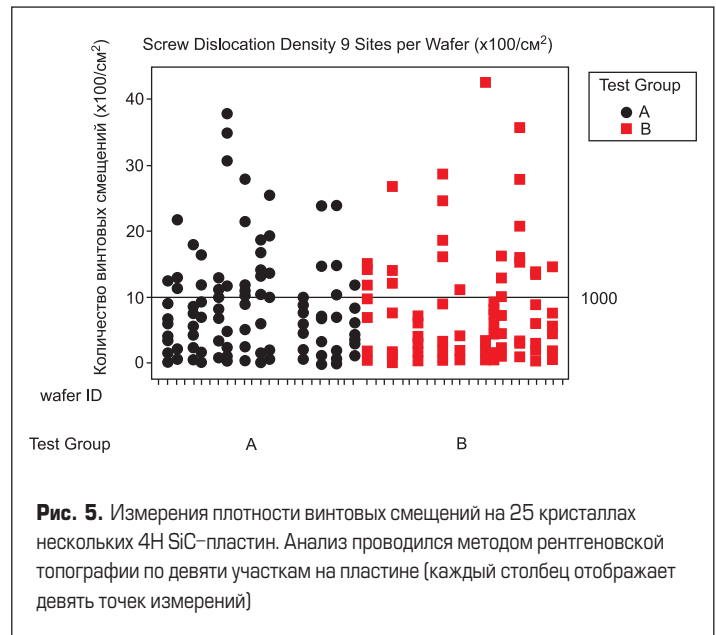


Рис. 5. Измерения плотности винтовых смещений на 25 кристаллах нескольких 4H SiC-пластин. Анализ проводился методом рентгеновской топографии по девяти участкам на пластине (каждый столбец отображает девять точек измерений)

вдали от дефекта. Оптическая инспекция фоторезиста является важным производственным этапом, необходимым для выявления потенциальных проблем. Существуют и другие факторы, влияющие на качество работы полупроводниковых устройств. Например, при полировке могут образовываться мелкие линейные повреждения эпитаксиального слоя, которые потом проявляются в процессе металлизации. Следствием этого является возникновение т. н. горячих точек в зоне под затвором или на концевых областях выводов кристалла.

Особенности управления SiC MOSFET

Оптимальные свойства SiC-ключей обеспечиваются при напряжении управления $V_{GS} = 20$ В, что подтверждается кривыми, показанными на рис. 6 и 7. Это справедливо для режимов, где SiC-прибор ведет себя, как управляемое напряжением сопротивление или как управляемый напряжением источник тока, зависящего от V_{DS} . Переключение SiC MOSFET происходит при более высоких значениях V_{DS} , чем Si MOSFET и IGBT. Данный факт может повлиять на работу схем контроля выхода из насыщения, особенно если учесть свойство перехода транзисторов в режим стабилизации тока при низких значениях прямого напряжения.

Необходимо уделять особое внимание нормированию характеристик схемы управления. Типичной ошибкой является выбор устройства по напряжению включения/выключения без учета выходного сопро-

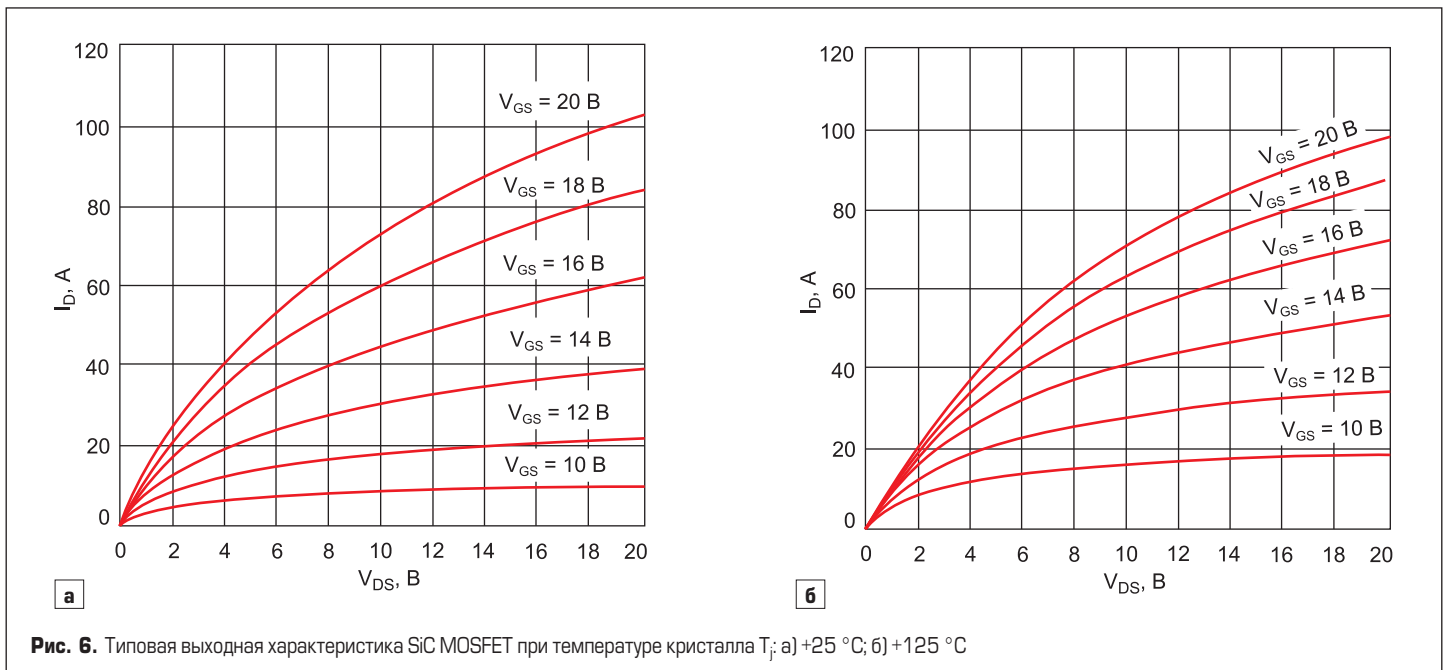


Рис. 6. Типовая выходная характеристика SiC MOSFET при температуре кристалла T_j : а) +25 °С; б) +125 °С

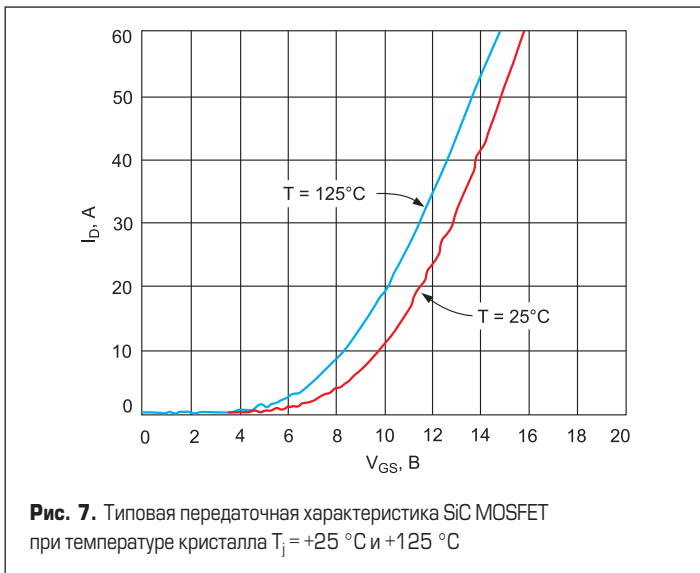


Рис. 7. Типовая передаточная характеристика SiC MOSFET при температуре кристалла $T_j = +25^\circ\text{C}$ и $+125^\circ\text{C}$

тивления и нагрузочной способности. Очевидно, что, кроме соответствующих значений V_{GS_on} и V_{GS_off} , драйвер должен иметь высокий пиковый ток, низкое выходное сопротивление и мощность, достаточную для управления затвором на заданной частоте коммутации.

Напряжение на затворе SiC-ключей V_{GS} должно изменяться в диапазоне не менее 22 В. Рекомендуемые значения ($V_{GS_on} = +20\text{ В}$, $V_{GS_off} = -2\dots-5\text{ В}$) отличаются от величин, традиционно используемых для контроля кремниевых MOSFET и IGBT, при этом суммарный заряд затвора (Q_{g_tot}) у SiC MOSFET значительно меньше. Соответственно, энергия управления или произведение перепада напряжения ΔV_{GS} на заряд Q_g у SiC-ключей также ниже, чем у Si-приборов. Однако это трудно назвать преимуществом SiC-ключей, которые предназначены для работы именно в высокочастотных схемах. Импульсы на затворе должны иметь малое время нарастания и спада (dV/dt) для достижения большой скорости переключения, что требует низкого импеданса драйвера и минимальной индуктивности его соединения с затвором.

Цепь управления затвором следует тщательно контролировать. Номинальное пороговое напряжение составляет 2,5 В, но SiC-ключ не может открыться полностью до тех пор, пока $V_{GS} < 16\text{ В}$. Таким образом, диапазон изменения напряжения на затворе SiC заметно шире, чем у Si MOSFET и IGBT. Следствием этого является меньшая стойкость SiC-

модулей к шумовым сигналам. Любой «дребезг», возникающий на управляющем выводе, будет приводить к ложному включению или частичному выключению устройства.

Одним из основных преимуществ SiC MOSFET является отсутствие «хвостового» тока, свойственного IGBT-модулям. Однако отметим, что этот паразитный эффект биполярных структур обеспечивает определенную степень демпфирования переходного процесса при выключении. При замене кремниевых ключей на карбидокремниевые часто появляется дополнительный дребезг и большие всплески напряжения при переключении, уровень которых может оказаться достаточным для пробоя полупроводникового прибора. Для решения этих проблем следует оптимизировать схему управления, минимизировать паразитные индуктивности в цепи коммутации и в ряде случаев использовать дополнительные снабберные цепи.

Заключение

Экономические расчеты показывают, что для достижения конкурентоспособных показателей в диапазоне средних мощностей стоимость 100% SiC-модулей должна быть снижена в среднем в два-три раза. Поэтому пока что их применение целесообразно только в высокочастотных компактных преобразователях, имеющих выходной фильтр. Анализ рынка, проведенный специалистами SEMIKRON, определил целевые показатели, при которых применение 100% SiC и Hybrid SiC оправдано экономически:

- 100% SiC-модули не должны быть дороже кремниевых более чем в три раза;
- гибридные SiC-модули не должны быть дороже кремниевых более чем в полтора раза.

К сожалению, пока что стоимость серийно выпускаемых карбидокремниевых ключей далека от этих показателей.

Благодаря меньшему значению потерь проводимости модули IGBT еще долго будут иметь лучшие нагрузочные характеристики на частотах ниже 5–7 кГц, чаще всего используемых в приводах. Важно понимать, что если для работы изделия не требуется высокая частота коммутации, то применение SiC-ключей не дает никаких технических и, тем более, экономических преимуществ.

Реальной альтернативой традиционным IGBT/MOSFET-ключам в диапазоне средней мощности являются гибридные модули, использующие преимущества униполярных диодов SiC Шоттки. У них отсутствует заряд обратного восстановления, что позволяет снизить не только динамические потери самого диода, но и потери включения оппозитного IGBT примерно на 60% в режиме «жесткой» коммутации. Применение гибридов позволяет удвоить частоту коммутации при сохранении величины рассеиваемой мощности, увеличить плотность мощности более чем на 50%, эффективность — на 1–1,5%.

Одним из достоинств гибридов является возможность использования стандартных драйверов IGBT и цепей их подключения, а также отсутствие необходимости в изменении конструкции звена постоянного тока.

В таблице 2 приведены основные характеристики силовых модулей, производимых компанией SEMIKRON по технологии SiC и SiC Hybrid. Среди гибридных компонентов выделим SKiM450GB12F4SiC2 — трехфазный модуль в низкоиндуктивном корпусе с расширенным температурным диапазоном, и SEMiX603GB12E4SiCp — один из самых мощных гибридов 12 класса в корпусе SEMiX Press-Fit.

Литература

1. Stefan Häuser. Is Only Full SiC the «Real» SiC? // Bodo's Power Systems. April, 2016.
2. Volker Demuth. Silicon Carbide Boost Power Module Performance // Power Electronics EUROPE. Issue 4. June, 2013.
3. Majumdar G., Oomori T. Some key researches on SiC device technologies and their predicted advantages. EPE 2009. Conference Proceedings.
4. M. J. Loboda, G. Chung, E. Carlson. Advances in SiC Substrates for Power and Energy Applications. Dow Corning Corporation, Midland, MI 48686.
5. The Next Generation of Power Conversion Systems Enabled by SiC Power Devices. SiC Power Devices White Paper. www.rohm.com.
6. А. Колпаков. Надежность силовых модулей в предельных условиях эксплуатации // Силовая электроника. 2015. № 2.

Таблица 2. Модули 100% SiC и SiC Hybrid SEMIKRON

Тип	Корпус	Схема	FWD	VCE, В	IC, А
SiC Шоттки					
SKKE60F12	SEMIPACK 2	Single diode	–	1200	60
100% SiC					
SKiiP13ACM12V17	Mini 1	6-pack	+	1200	25
SKiiP13ACM12V18			–		
SK25MH120TSCp	SEMITOP 2	H-мост	–	1200	45
SK45MH120TSCp			+		
SK45MAHT12SCp	SEMITOP 3	6-pack (раздел. выходы)	+	1200	90
SK45MLET12SCp		Triple boost			
SKiiP26ACM12V17	Mini 2	6-pack	–	1200	350
SKM350MB120SCH15	SEMITRANS 3	Полумост	–	1700	500
SKM350MB120SCH17			+		
SKM500MB120SC			–		260
SKM260MB170SCH15			–		
SKM230MB170SCH17			–		230
SKM260MB170SCH17			+		
Hybrid SiC					
SKiiP25AC12F4V19	Mini 2	6-pack	SiC Schottky	1200	50
SKiiP38AC12F4V19	Mini 3				100
SKiiP39AC12F4V19	Mini 3				150
SKM200GB12T4SiC2	SEMITRANS 3	Полумост	–	200	
SKiM459GD12F4SiC2	SKiM93	6-pack	–	450	
SEMiX603GB12E4SiCp	SEMiX 3p	Полумост	–	600	