

# Roll2Rail:

силовые модули нового поколения для тягового привода — общие требования, рыночный анализ, технологическая дорожная карта и прогнозы.

## Часть 1. Дорожная карта

**В статье представлены результаты совместной работы крупнейших европейских поставщиков железнодорожного тягового оборудования по выработке технических требований и стандартизации нового усовершенствованного силового полупроводникового модуля. Ключевым фактором является повышение эффективности, надежности и ресурса железнодорожных тяговых преобразователей следующего поколения.**

Под редакцией:  
Т. Вийк (T. Wiik)

Перевод:  
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

### Введение

В разделе, посвященном технологической дорожной карте, исследуются и сравниваются технические преимущества униполярных SiC и биполярных приборов Si, в частности низкие коммутационные потери и высокая рабочая температура. Также рассматриваются технические проблемы, которые должны быть решены для получения надежных и коммерчески привлекательных SiC-приборов, и задачи, связанные с новыми технологиями корпусирования SiC.

Анализ рынка показывает, что в обозримом будущем технология Si IGBT останется основной для железнодорожного тягового привода. SiC-приборы с номинальными характеристиками, необходимыми для данного применения, пока не обеспечивают коммерческой и технической доступности и целесообразности.

В настоящей работе уточняются механические характеристики модуля, его топология, требуемые электрические параметры, надежность и условия окружающей среды. На основе решений и разработок, уже выполненных поставщиками силовых полупроводниковых ключей, а также производителями железнодорожного оборудования, пока не удалось согласовать общий набор требований для низковольтного модуля (1,7–3,3 кВ). Чтобы учесть различия и достичь общего согласия, принят ограниченный набор требований относительно его габаритов и пространства для установки драйвера. Для высоковольтного исполнения модуля (3,3–6,5 кВ) задан общий набор механических параметров.

На основании приведенных в отчете технических требований начато производство силовых модулей всеми

ведущими производителями. Приборы имеют разные названия, в частности новый транспортный модуль SEMIKRON получил наименование SEMITRANS 20 [1].

### Цели и план работы

Цель дорожной карты состоит в том, чтобы дать обзор состояния и перспектив применения силовой электроники в будущих тяговых системах железнодорожного транспорта. В частности, рассматривается целесообразность использования силовых полупроводниковых приборов следующего поколения на основе SiC. В целом ожидается, что внедрение full-SiC силовых модулей в тяговое оборудование позволит существенно снизить потери коммутации и проводимости. Карбидокремниевые приборы отличаются высокой запрещенной зоной, большим значением критического поля и лучшей теплопроводностью. По сравнению со своими кремниевыми аналогами силовые приборы на основе SiC обладают более высоким блокирующим напряжением и меньшим сопротивлением канала, благодаря чему униполярные ключи с низкими коммутационными потерями реализуемы и конкурентоспособны даже при напряжениях выше 1 кВ. Как следствие, в силовых модулях для железнодорожного тягового привода традиционные биполярные Si IGBT могут быть заменены SiC MOSFET, а биполярные Si FWD-диоды — соответственно униполярными SiC-диодами Шоттки. Ожидается, что это позволит увеличить плотность мощности и частоту коммутации силовых модулей. Внедрение карбида кремния в существующие тяговые ж/д системы считается очень перспективным, но сложным делом.

### Технологическая дорожная карта

Для достижения требуемого снижения весогабаритных показателей электронного оборудования, используемого в железнодорожном тяговом приводе, необходимо увеличить плотность мощности и частоту коммутации силовых ключей. Соответственно, требуется снизить статические и динамические потери полупроводниковых приборов или поднять рабочую температуру кристаллов. Однако в широко используемых биполярных IGBT и диодах снижение коммутационных потерь приводит к увеличению потерь проводимости и наоборот. Поэтому мощность биполярных Si-приборов повышается за счет увеличения соотношения между активной и общей площадью чипов.

Например, благодаря внедрению Trench-структуры затвора в IGBT потери проводимости удалось уменьшить на 75%, тогда как потери переключения остались примерно на том же уровне. Тем не менее из-за физических ограничений Si даже для Trench IGBT в ближайшем будущем не ожидается существенного повышения плотности мощности и частоты коммутации. Поэтому разрабатываются и выпускаются на рынок новые концепции приборов, такие как RC-IGBT. В отличие от планарных и Trench IGBT в концепции RC-IGBT функция антипараллельного диода интегрирована в чипе IGBT. Это позволяет заметно повысить активную площадь IGBT и FWD без увеличения общей площади кристалла. За счет этого снижается тепловое сопротивление и увеличивается нагрузочная способность без влияния на температуру перехода. Теоретически у RC-IGBT потери проводимости могут быть снижены до 25%. Однако из-за сильного влияния напряжения затвора RC-IGBT на эффективность эмиттера внутреннего FWD-диода для реализации преимуществ данного прибора необходимо разработать новые и более сложные схемы управления.

С учетом ограничений биполярных кремниевых приборов результаты приведенных в данном отчете исследовательских программ свидетельствуют о том, что внедрение SiC-технологии имеет реальный потенциал. Силовой SiC-модуль с номинальным напряжением 3,3 кВ и выходным током 1500 А может быть продемонстрирован на уровне полномасштабного прототипа. По сравнению с аналогичным кремниевым прибором общие потери у него снижены примерно на 55%. Это подтверждает возможность замены биполярных Si-транзисторов на униполярные SiC MOSFET, а биполярных Si FWD-диодов на униполярные SiC Шоттки. В отличие от биполярных приборов потери проводимости SiC могут быть сведены к минимуму без повышения коммутационных потерь.

Кроме того, благодаря особенностям выходной характеристики SiC MOSFET снижение статических потерь достигается для токов, меньших номинального, что характерно для работы при частичной нагрузке. Однако существует ряд вопросов, которые необходимо решить, прежде чем карбид кремния станет реальным конкурентом кремнию. Одна из основных проблем — надежность оксид-

ного слоя затвора SiC MOSFET. На уровне исследований было продемонстрировано, что этот показатель у карбидокремниевых приборов в принципе может быть таким же, как у Si-аналогов. Но из-за большего критического поля и широкой запрещенной зоны SiC на оксидный слой затвора SiC MOSFET воздействует гораздо больший стресс, особенно при планарной структуре затвора.

По надежности и долговременной стабильности оксидного слоя SiC-MOSFET с правильно спроектированной Trench-структурой затвора превосходят SiC-транзисторы с планарным затвором. Такое предположение подтверждается данными, продемонстрированными Infineon и ROHM для коммерческих SiC Trench MOSFET. Однако этот факт должен быть доказан в результате детальных исследований. Тем не менее результаты свидетельствуют о том, что проблемы, связанные с надежностью планарного затвора SiC MOSFET, могут быть решены. Как упоминалось ранее, эти проблемы связаны с технологией изготовления и высоким электрическим полем в полупроводнике. Поэтому характеристики, продемонстрированные для SiC Trench MOSFET с номинальным напряжением 1,2 кВ, должны быть аналогичны для SiC-транзисторов с Trench-структурой затвора и с более высоким номинальным напряжением.

Для того чтобы SiC-модули с номинальным напряжением свыше 3,3 кВ стали конкурентоспособны силовым ключам Si по надежности и долгосрочной стабильности, производители силовых приборов должны увидеть экономическую выгоду от их производства. В настоящее время SiC-модули, продемонстрированные на уровне полномасштабных прототипов, имеют коммерчески доступные версии с напряжением до 1,7 кВ и током до 325 А. В основном это связано с небольшим номинальным током коммерчески доступных чипов SiC MOSFET, который обычно не превышает 50 А. Тем не менее результаты, полученные несколькими группами исследователей, указывают на то, что проблема связана не с физическими ограничениями, а скорее с технологией производства.

В отличие от кремния SiC-пластины обладают значительным количеством дефектов, что приводит к большому проценту брака. Как следствие, выход годных при производстве SiC составляет всего около 65%. Затраты на изготовление силовых SiC-приборов с номинальным напряжением выше 1,7 кВ и активной площадью более 0,5 см<sup>2</sup>, необходимыми для получения номинального тока 100 А, чрезвычайно высоки. Для их снижения запущено несколько проектов и ожидается, что в ближайшие пять лет выход годных при производстве SiC будет поднят до 80%. Значительного роста активной области чипов не ожидается, соответственно, в ближайшем будущем ток SiC MOSFET с номинальным напряжением 3,3 кВ не превысит 50 А.

Номинальная мощность силовых SiC-приборов может быть увеличена параллельным соединением, однако этому мешает большой разброс динамических характеристик. Для до-

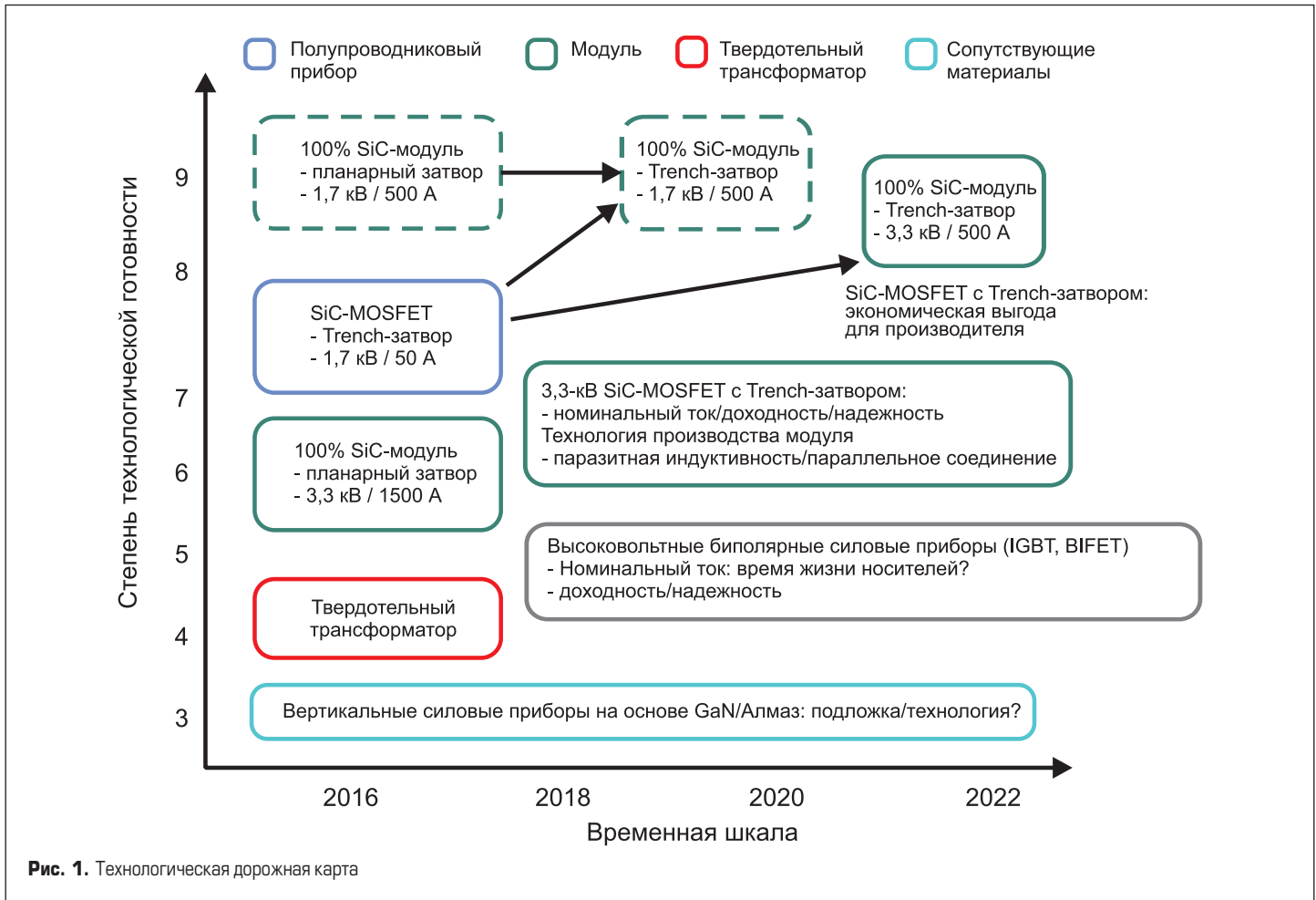
стижения номинального тока 500 А, являющегося реалистичным показателем для нового стандартизированного модуля с номинальным напряжением 3,3 кВ, требуется параллельное соединение не менее 10 чипов. Следует учитывать, что этот расчет основан на предположении, что Si IGBT можно легко заменить на SiC MOSFET. Но из-за более высоких электрических полей в карбидокремниевых ключах, напряженность которых обычно в 10 раз больше, чем в Si IGBT, электрическое поле вне активной площади прибора также выше. Как следствие, наличие пустот в слое пассивации может привести к очень высокой концентрации поля и пробоем диэлектрика. Помимо вопросов, касающихся плотности тока проводников, используемых для подключения чипов, и технологии их пайки, важных для повышения нагрузочной способности и стойкости к короткому замыканию, а также снижения паразитной индуктивности силового модуля, обязательным является улучшение качества материалов корпуса.

Кроме возможности замены биполярных (Si) силовых приборов униполярными (SiC) в модулях, используемых для тяговых приводов, физические свойства SiC открывают совершенно новые возможности для применений силовой электроники. Например, в отличие от кремниевых силовых ключей с максимальным номинальным напряжением 6,5 кВ SiC могут иметь номинальное напряжение до 10 кВ и выше. Первые карбидокремниевые модули с номинальным напряжением 10 кВ были продемонстрированы только на уровне прототипов, их выпуск для коммерческого применения требует решения ряда принципиальных задач. Во-первых, необходимо преодолеть проблемы, связанные с надежностью и ограниченным токовым диапазоном. Во-вторых, по потерям проводимости при номинальном напряжении выше 10 кВ биполярные приборы превосходят униполярные. Тем не менее целесообразность использования биполярных SiC-приборов определяется временем жизни носителей в слоях SiC и качеством эпитаксиального роста кристаллов. К настоящему времени решения этих проблем нет. Неизвестно, когда будут созданы коммерческие высоковольтные биполярные силовые SiC-модули, и их появление на рынке не ожидается в течение ближайших 10 лет.

Анализ текущего состояния материалов и приборов GAN позволяет сделать вывод, что они не являются конкурентами SiC в течение следующего десятилетия (рис. 1).

### Перспективы кремниевых силовых модулей

Потенциал карбида кремния в силовой электронике определяется не только прогрессом силовых приборов на основе SiC, но и развитием Si-технологии. Пока силовые модули с номинальными характеристиками, требуемыми для тяговых применений, могут производиться только на основе кремния, что обусловлено его физическими свойствами. Главным образом это связано с шириной запрещенной зоны 1,12 эВ и критическим полем 200 кВ/см, что требует очень низкой



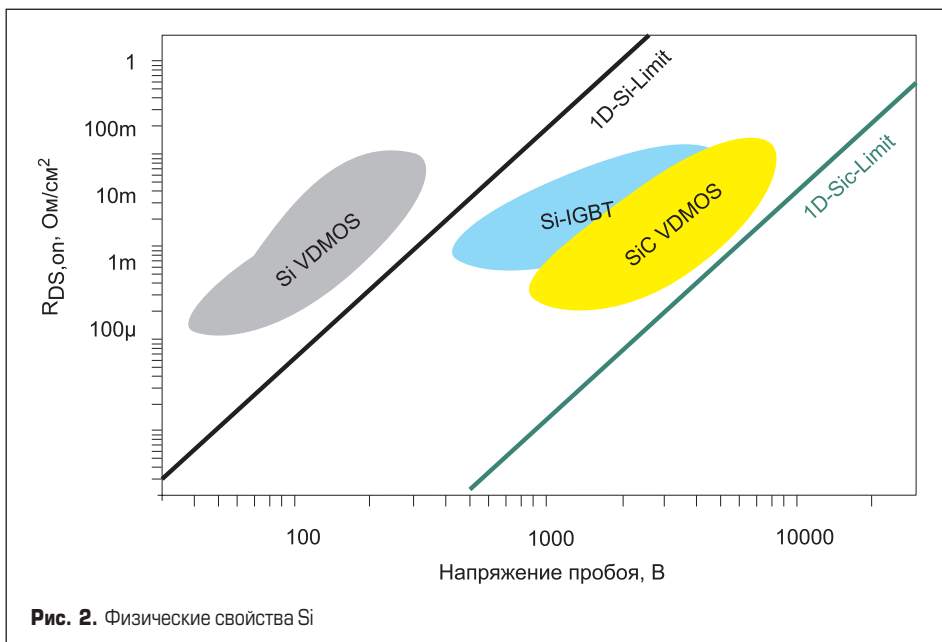
концентрации легирования в дрейфовой области для номинальных напряжений выше 1 кВ. Как показано на рис. 2, из-за низкой концентрации легирования в дрейфовом слое результирующее повышение удельного сопротивления значительно увеличивает требования к эффективности охлаждения.

Для оценки возможностей применения SiC MOSFET в железнодорожных тяговых инверторах был проведен анализ современного состояния и перспектив традиционных биполяр-

ных Si IGBT. С учетом номинального напряжения до 3,3 кВ основными претендентами для данного применения признаны Trench FS IGBT и RC-IGBT. В настоящее время на рынке доступны силовые модули IGBT с номинальным напряжением 3,3 кВ и выше. При температуре кристалла +125 °С они имеют максимальный номинальный ток 1000 А, энергию включения  $E_{on}$  — 3100 мДж и энергию выключения  $E_{off}$  — 2800 мДж соответственно. Из-за таких высоких потерь частота коммутации ограни-

чена несколькими кГц. Поэтому стратегия повышения производительности технологии Trench FS IGBT сосредоточена на уменьшении энергии коммутационных потерь.

Независимо от конкретной структуры Si IGBT и Si FWD снижение потерь переключения обычно приводит к увеличению потерь проводимости и наоборот. Следовательно, плотность мощности биполярных Si-приборов повышается за счет улучшения соотношения между активной и общей площадью чипа. Например, по сравнению с IGBT с планарным затвором использование структуры Trench FS IGBT уменьшает потери проводимости на 75% при неизменных потерях коммутации. Но из-за физических ограничений кремния в ближайшем будущем не ожидается существенного повышения плотности мощности и частоты коммутации даже для Trench FS IGBT. Поэтому разрабатываются и изучаются новые концепции устройств, такие как RC-IGBT, в которых функция антипараллельного диода интегрирована в чипе IGBT. В этом случае как для IGBT, так и для FWD активная площадь растет без изменения общей площади чипа. А значит, снижается тепловое сопротивление, а нагрузочная способность может быть увеличена без влияния на температуру кристалла  $T_j$ . В связи с появлением RC-IGBT на рынке в течение ближайших пяти лет ожидается снижение потерь проводимости на 25%. В основном это связано с повышением  $T_j$  на 33% по сравнению с обычным Trench FS IGBT в аналогичном конструктиве. Помимо этого, в RC-IGBT



удаётся снизить уровень пульсации температуры чипа примерно до +5 °С по сравнению с +20 °С — такая величина характерна для обычных IGBT с внешним диодом. Как следствие, уменьшается термомеханическое воздействие на сварные соединения проводников и паяный слой чипов, что способствует увеличению срока службы силового модуля.

Тем не менее применение RC-IGBT в тяговых инверторах требует создания новых и более сложных устройств управления затвором. В основном это связано с сильным влиянием напряжения затвора IGBT на эффективность эмиттера внутреннего FWD-диода. Соответственно, динамические и статические потери диода также очень зависят от напряжения управления. Очевидно, что уровень потерь можно контролировать путем изменения  $V_g$  в режиме обратной проводимости в зависимости от условий применения. Однако для реализации этой особенности необходима очень сложная схема управления с функцией мониторинга направления тока.

### Текущее состояние и требования, предъявляемые к SiC-модулям

Хотя возможности SiC MOSFET-транзисторов и SiC-диодов кажутся очень многообещающими, к настоящему времени в полной мере в силовых модулях удаётся реализовать только преимущества карбидокремниевых диодов. В последние годы гибридные силовые модули, содержащие биполярный Si IGBT и униполярный SiC Шоттки, были коммерциализованы многими ведущими производителями. В результате в солнечных инверторах с номинальным напряжением 600 В коммутационные потери, генерируемые антипараллельными диодами, удалось снизить примерно на 17%. Благодаря усовершенствованию архитектуры и внедрению гибридных силовых модулей в тяговые инверторные системы удалось значительно уменьшить энергопотребление метростроения в Японии.

Помимо этого, на рынке появились первые силовые SiC-модули с номинальным напряжением 1,7 кВ. При температуре кристалла +150 °С они обеспечивают сопротивление открытого канала 16 мОм и суммарную энергию переключения  $E_{tot} = 24$  мДж. Для сравнения, при температуре +150 °С величина  $E_{tot}$  сопоставимого кремниевого силового модуля составляет 2500 мДж, тогда как потери проводимости при номинальном токе примерно одинаковы. Однако из-за ограниченной активной площади силовых SiC-приборов их номинальный ток обычно не превышает 400 А при температуре +25 °С и 250 А при температуре +150 °С. Как следствие, до настоящего времени не создано ни одной реальной тяговой системы, где кремниевые ключи были бы заменены SiC-модулями.

Первый силовой SiC-модуль с номинальным напряжением 3,3 кВ и выходным током 1500 А продемонстрирован на уровне полноразмерного прототипа. Он включает 16 SiC-MOSFET чипов с активной площадью 0,83 см<sup>2</sup> и 16 SiC-диодов Шоттки с активной

площадью 0,75 см<sup>2</sup>, соединённых параллельно. Номинальное напряжение одного чипа SiC MOSFET и SiC Шоттки составляет 3,3 кВ при токе 94 А. Напряжение насыщения транзистора, измеренное при  $V_{gs} = 15$  В, составляет 2,1 В при температуре +25 °С и 4,3 В при температуре +175 °С. В этом же температурном диапазоне пороговый уровень включения SiC MOSFET уменьшается с 2 до 1 В. Данное исследование должно продемонстрировать стабильные характеристики внутреннего «тельного» диода при протекании прямого тока в сравнении с обычными SiC MOSFET. Расчёты показали величину энергии включения 1440 мДж и энергии выключения 530 мДж при  $T_j = +175$  °С. По сравнению с параметрами сопоставимого кремниевого силового модуля снижение коммутационных потерь составляет примерно 55%.

Хотя полученные результаты весьма многообещающи, дальнейшее снижение коммутационных потерь ожидается за счёт усовершенствования технологии корпусирования. В данном исследовании чипы Si IGBT заменены на SiC MOSFET в стандартном силовом модуле, спроектированном для установки кремниевых чипов. Поэтому, чтобы коммутационные перенапряжения не превышали блокирующей способности SiC MOSFET из-за высокой паразитной индуктивности, для снижения скорости коммутации SiC MOSFET используется резистор затвора в диапазоне 2,4–4,1 Ом. В этом случае для того, чтобы использовать потенциал карбида кремния, паразитная индуктивность силового модуля должна быть намного ниже 34 нГн.

Преимущества SiC силовых модулей с номинальным напряжением до 1,7 кВ в отношении потерь проводимости и переключения могут быть продемонстрированы в коммерчески доступных продуктах, а для ключей с номинальным напряжением свыше 1,7 кВ — на уровне прототипов. Однако токовый диапазон серийных модулей все ещё очень мал и ограничен на уровне около 400 А. Поэтому, помимо вопросов надёжности и долговременной стабильности параметров, которые будут рассмотрены ниже, перспективы силовых SiC-модулей связаны с возможностью производства больших кристаллов SiC MOSFET и SiC Шоттки с номинальным напряжением не менее 3,3 кВ и номинальным током, сопоставимым с современными Si IGBT. Для реализации всех возможностей SiC-технологии необходимо разрабатывать конструктивы с низкой паразитной индуктивностью.

### Текущее состояние и перспективы SiC-приборов

Благодаря своим физическим свойствам силовые приборы на основе карбида кремния имеют более высокие блокирующие напряжения и меньшие потери проводимости по сравнению с кремниевыми аналогами. Как следствие, в модулях, используемых в тяговых инверторах, биполярные Si IGBT могут быть заменены униполярными SiC MOSFET, а биполярные Si FWD — униполярными диодами

SiC Шоттки. Коммутационные потери у униполярных приборов незначительны, а потери проводимости могут быть сведены к минимуму без какого-либо ущерба для статических характеристик. В настоящее время на рынке доступно несколько типов карбидокремниевых приборов, таких как SiC-диоды Шоттки, а также SiC MOSFET и JFET. Хотя в литературе упоминаются силовые ключи с номинальным напряжением до нескольких кВ, коммерчески доступные приборы имеют номинальное напряжение 600–1700 В и диапазон токов 2–60 А на кристалл. Основными применениями для них являются инверторы солнечных станций, UPS, трехфазные импульсные источники питания и специализированные приводы.

Для подтверждения высоких динамических характеристик SiC проведено сравнение энергии выключения и включения MOSFET CoolSiC и последнего поколения Si IGBT Highspeed 3 на частотах свыше 20 кГц при различных токах нагрузки. Энергия включения и выключения измерялась при напряжении на затворе 5/15 В, сопротивлении  $R_g = 2,2$  Ом и рабочем напряжении 800 В. Показано, что энергия выключения транзистора CoolSiC MOSFET меньше в 10 раз, а энергия включения — в 2 раза по сравнению с Highspeed 3 Si IGBT. Аналогичные результаты продемонстрированы другими производителями, такими как Rohm, что подчеркивает перспективную возможность снижения коммутационных потерь за счёт внедрения технологии SiC в тяговых приводах.

Предполагается, что приборы CoolSiC MOSFET и Highspeed 3 Si IGBT имеют сопоставимое напряжение насыщения и, следовательно, потери проводимости при номинальном токе 40 А. Однако в нормальных режимах работы ток нагрузки обычно ниже номинального значения. Благодаря линейной прямой характеристике MOSFET CoolSiC прямое напряжение падает при малых токах, в то время как напряжение насыщения Si IGBT почти не меняется.

Учитывая снижение потерь SiC MOSFET с номинальным напряжением 1,7 кВ, ожидается, что такие характеристики могут быть получены и для чипов 3,3 кВ и выше, необходимых для применения в железнодорожном тяговом приводе. Разработка подобных приборов ведётся несколькими группами исследователей. Тем не менее из-за более высокого сопротивления дрейфового слоя удельное сопротивление открытого канала также увеличивается с ростом блокирующей способности. С ростом номинального напряжения, как правило, снижается ток SiC MOSFET. Номинальный ток современных чипов SiC MOSFET 1,7 кВ составляет 50 А, а для приборов 3,3 кВ — 30 А.

Для достижения номинального тока 3,3 кВ SiC MOSFET — 1500 А требуется общая активная площадь чипов примерно 30 см<sup>2</sup>, а при номинальном напряжении 1,2 кВ общая активная площадь должна быть 10 см<sup>2</sup>. Но из-за наличия дефектов в SiC-слоях выход годных составляет около 65%, поэтому активная площадь коммерчески доступных SiC MOSFET чипов ограничена на уровне

примерно  $0,5 \text{ см}^2$ . Существует несколько стратегий, находящихся в стадии исследования, позволяющих увеличить активную область кристаллов. Главной задачей при этом становится кардинальное снижение плотности дефектов в SiC-слоях. Вводятся технологические улучшения и ожидается, что в ближайшем будущем выход может быть увеличен до 80%, однако следует учитывать, что этот показатель в значительной степени зависит от активной площади. Весьма перспективным представляется внедрение Trench-технологии. В отличие от транзисторов с планарной структурой размер ячейки SiC MOSFET с Trench-затвором значительно меньше. Это позволяет поднять номинальный ток без увеличения активной площади кристалла.

Помимо активной области, номинальный ток зависит от сопротивления открытого канала SiC-транзисторов и диодов. Например, у коммерческих SiC MOSFET с номинальным напряжением 1,2 кВ величина  $R_{DS(on)}$  указанная в техническом описании, обычно составляет 45 мОм. Общее сопротивление ключа определяется сопротивлением MOS-канала, JFET-области, дрейфового слоя и подложки. До настоящего времени SiC MOSFET обычно изготавливаются на SiC-подложке толщиной примерно 350 мкм. Таким образом, самый простой способ уменьшить  $R_{DS(on)}$  — сделать подложку более тонкой. Хотя данный метод представляется очень перспективным, для его реализации следует разработать специальную технологию и уменьшить количество производственных этапов обработки тонких SiC-подложек. Для этого вместо быстрого термического отжига, который обычно используется при производстве SiC-приборов, необходимо внедрить лазерный отжиг для формирования обратной стороны силицида после изготовления активных областей чипа на лицевой стороне.

Поскольку величина  $R_{DS(on)}$  может быть уменьшена путем утончения SiC-подложки, также требуется дополнительное снижение сопротивления MOS-канала. По сравнению с Si MOSFET, сопротивление которых в основном определяется параметрами дрейфового слоя, сопротивление MOS-канала вносит более 60% в общее значение для SiC MOSFET. Главным образом высокий вклад MOS-канала в  $R_{DS(on)}$  связан с низкой подвижностью электронов в инверсионном слое. Обычно низкая подвижность канала объясняется высокой плотностью «интерфейсных ловушек», что приводит к сильному Кулоновскому рассеянию в области перехода. Высокая плотность «ловушек» должна быть связана с процессом окисления SiC. Хотя этот процесс у SiC и Si аналогичен, в отношении карбида кремния необходимо учитывать присутствие углерода в SiC-структурах.

Как следствие, плотность «интерфейсных ловушек» между SiC-подложкой и термически выращенным слоем  $\text{SiO}_2$  значительно выше, чем между Si-подложкой и слоем  $\text{SiO}_2$ . Например, при современной CMOS-технологии плотность «интерфейсных ловушек» на границе раздела Si/ $\text{SiO}_2$  ниже

$10^{10} \text{ см}^{-2}/\text{эВ}$ , тогда как для границы раздела SiC/ $\text{SiO}_2$  характерен показатель в диапазоне  $10^{11} \text{ см}^{-2}/\text{эВ}$  в середине запрещенной зоны и  $10^{13} \text{ см}^{-2}/\text{эВ}$  и выше в краевых областях 4H-SiC. Соответственно, для уменьшения влияния сопротивления MOS-канала на  $R_{DS(on)}$  необходимо снижать влияние заряженных «интерфейсных ловушек» на подвижность канала. В настоящее время стратегия этого снижения, как правило, основана на технологии пассивации «ловушек», например путем нитрирования. Помимо совершенствования технологии, количество заряженных «интерфейсных ловушек» можно регулировать изменением концентрации легирования в области канала. Несмотря на значительное увеличение подвижности при малых электрических полях, в отношении сильных полей, определяющих сопротивление канала SiC MOSFET, существенного улучшения продемонстрировать не удалось. По сравнению с Si IGBT, имеющими пороговое напряжение около 5 В, величина порогового напряжения у SiC MOSFET обычно составляет 1 В, поэтому необходима разработка новых устройств управления.

Благодаря усовершенствованию технологии производства и внедрению Trench-структуры затвора удельное сопротивление канала может быть снижено примерно в 2 раза в течение ближайших лет. Повышение рабочей температуры, а также улучшение показателей надежности и долговременной стабильности способно увеличить плотность тока примерно на 30%. Например, для SiC MOSFET с напряжением 1,2 кВ номинальный ток 50 А может быть повышен до 70 А без увеличения активной площади чипа. Переход на более высокие классы напряжения является очень непростым делом, для этого необходимы дальнейшие исследования. Однако уже анонсированы SiC MOSFET с напряжением 3,3 кВ и номинальным током 50 А. В этом случае для создания силового модуля SiC 3,3 кВ с номинальным током 1500 А требуется параллельное соединение не менее 30 карбидокремниевых чипов.

*Продолжение следует*

## Литература

1. Колпаков А. SEMITRANS 20 — новый уровень надежности транспортного привода // Силовая электроника. 2020. № 6.
2. Przybilla J., Dorn J., Barthelmess R., Kellner-Werdehausen U., Schulze H. J., Niedernostheide F. J. Diodes and thyristor — Past, presence and future. Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on, Barcelona, 2009.
3. Xu Z., Li M., Wang F., Liang Z. Investigation of Si IGBT Operation at 200 °C for Traction Applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28. No. 5.
4. Bauer J. G., Duetemeyer T., Falck E., Schaeffer C., Schmidt G., Schulze H. Investigations on 6.5kV Trench IGBT and adapted EmCon Diode. Proceedings of the 19th International Symposium on Power Semiconductor Devices and IC's. Jeju Island, 2007.

5. Werber D. et al. 6.5kV RCDC: For increased power density in IGBT-modules. IEEE 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's (ISPSD). Waikoloa, HI, 2014.
6. Werber D. et al. A 1000A 6.5kV Power Module Enabled by Reverse-Conducting Trench-IGBT-Technology. International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Germany, Nuremberg, 2015.
7. Bernet S. Recent developments of high power converters for industry and traction applications // IEEE Transactions on Power Electronics. 2000. vol. 15. no. 6.
8. Shang F., Arribas A. P., Krishnamurthy M. A comprehensive evaluation of SiC devices in traction applications. Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). IEEE, Dearborn, MI, 2014.
9. Sato K., Yoshizawa M., Fukushima T. Traction systems using power electronics for Shinkansen High-speed Electric Multiple Units. International Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo, 2010.
10. Ishikawa K., Ogawa K., Onose H., Kameshiro N., Nagasu M. Traction inverter that applies hybrid module using 3-kV SiC-SBDs. International Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo, 2010.
11. Ishikawa K., Yukutake S., Kono Y., Ogawa K., Kameshiro N. Traction inverter that applies compact 3.3 kV/1200 A SiC hybrid module. International Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014 — ECCE ASIA). Hiroshima, 2014.
12. Hamada K., Hino S., Miura N., Watanabe H., Nakata S., Suekawa E., Ebiike Y., Imaizumi M., Umezaki I., Yamakawa S. 3.3 kV/1500 A power modules for the world's first all-SiC traction inverter // Japanese Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 54. No. 45.
13. Bakran M. A power electronics view on rail transportation applications. Power Electronics and Applications, 2009 (EPE '09). 13th European Conference on Barcelona, 2009.
14. März A., Horff R., Hesper M., Bakran M. M. Requirements to change from IGBT to Full SiC modules in an on-board railway power supply. Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe). 17th European Conference on Geneva, 2015.
15. Richmond J., Das M., Leslie S., Agarwal A., Hull B., Palmour J. Roadmap for megawatt class power switch modules utilizing large area silicon carbide MOSFETs and JBS diodes. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, CA, 2009.
16. Callanan R. J. et al. Recent progress in SiC DMOSFETs and JBS diodes at Cree. 34th Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics, 2008.
17. Hamada K., Miura N., Hino S., Kawakami T., Imaizumi M., Sumitani H., Oomori T. Investigation of Cell Structure and Doping for Low-On-Resistance SiC Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors with Blocking Voltage of 3300 V // Japanese Journal of Applied Physics. 2013. Vol. 52. No. 4S.

18. Bolotnikov A. et al. 3.3kV SiC MOSFETs designed for low on-resistance and fast switching. 24<sup>th</sup> International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. Bruges, 2012.
19. Nakamura T., Sasagawa M., Nakano Y., Otsuka T., Miura M. Large current SiC power devices for automobile applications. International Power Electronics Conference (IPEC). Sapporo, 2010.
20. Hamada K. Toyota's activities on power electronics for future mobility. Power Electronics and Applications (EPE 2011). 14<sup>th</sup> European Conference on Birmingham, 2011.
21. Stevanovic L. D., Matocha K. S., Losee P. A., Glaser J. S., Nasadoski J. J., Arthur S. D. Recent advances in silicon carbide MOSFET power devices. Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Twenty-Fifth Annual IEEE. Palm Springs, CA, 2010.
22. DiMarino C., Chen Z., Danilovic M., Boroyevich D., Burgos R., Mattavelli P. High-temperature characterization and comparison of 1.2 kV SiC power MOSFETs. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Denver, CO, 2013.
23. Qi F., Fu L., Xu L., Jing P., Zhao G., Wang J. Si and SiC power MOSFET characterization and comparison. Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific) IEEE Conference and Expo. Beijing, 2014.
24. Furuhashi M., Tomohisa S., Kuroiwa T., Yamakaw S. Practical applications of SiC-MOSFETs and further developments // Japanese Journal of Applied Physics, 2016. Vol. 31. No. 9.
25. Agarawal A., Sung W., Marlino L., Gradzki P., Muth J., Ivester R., Justice N. Wide Band Gap Semiconductor Technology for Energy Efficiency. Materials Science Forum. 2016. Vol. 858.
26. Matocha K., Banerjee S., Chatty K. Advanced SiC Power MOSFETs Manufactured on 150mm SiC Wafers. Materials Science Forum. 2016. Vol. 858.
27. Banzhaf C. T., Schwaiger S., Scholten D., Noll S., Grieb M. Trench-MOSFETs on 4H-SiC. Materials Science Forum. 2016. Vol. 858.
28. Sung W., Baliga B. J., Design and Economic Considerations to Achieve the Price Parity of SiC MOSFETs with Silicon IGBTs. Materials Science Forum. 2016. Vol. 858.
29. Wang Y., Tian K., Hao Y., Yu C. H., Liu Y. J. An Optimized Structure of 4H-SiC U-Shaped Trench Gate MOSFET // IEEE Transactions on Electron Devices. 2015. Vol. 62. No. 9.
30. Song Q. et al. 4H-SiC Trench MOSFET With L-Shaped Gate // IEEE Electron Device Letters. 2016. Vol. 37. No. 4.