

Приборы на основе карбида кремния — основа преобразователей для электроэнергетики

В статье дается анализ динамики рынка силовой электроники и рассмотрено промышленное освоение новых технологий в виде карбида кремния для мощных IGBT-транзисторов и для менее мощных MOSFET-транзисторов. Приведены физические свойства и характеристики MOSFET-транзисторов на основе карбида кремния и отмечены их преимущества в части температурной, электрической и радиационной стойкости сравнительно с IGBT-транзисторами на основе кремния. Анализ модулей и блоков с использованием карбида кремния показал возможность их реализации в виде готовых преобразователей напряжения и частоты на мощности 200 кВт и выше.

Роберт Шульга, к. т. н.

rnshulga@vei.ru

Преобразователи для электроэнергетики

Преобразователи для электроэнергетики особенно широко применяются при передаче электроэнергии, а в последнее время и при распределенной генерации. Распределенная генерация занимает диапазон мощностей до 15 МВт и создается с помощью традиционных и альтернативных источников малой и средней мощности. Такие же источники используются для автономного электроснабжения различных объектов, включая электротранспорт. Непременной принадлежностью таких устройств являются статические преобразователи тока, напряжения или частоты. По топологии они подразделяются на AC/DC, DC/AC и DC/DC.

Наибольшее распространение получили преобразователи с использованием тиристорных на базе кремния (Si), которые и сегодня формируют базу передач и вставок постоянного тока, а также распределенной генерации и электропривода. Однако указанные преобразователи работают в двух квадрантах активной и реактивной мощностей (соответственно P и Q), что не позволяет применять их в пассивной энергосистеме или работать на пассивную нагрузку. Поэтому на смену им пришли преобразователи, также выполненные на основе Si с использованием биполярных IGBT-транзисторов или запираемых тиристорных (GTO, а затем IGCT). Эти приборы действуют в четырех квадрантах P и Q , позволяя преобразователям работать в качестве инвертора на пассивную энергосистему или пассивную нагрузку. Благодаря мягкому включению приборы IGBT широко распространяются в каскадных схемах преобразователей, наращивая их напряжение и мощность для любых применений. Запираемые тиристоры из-за жесткого

включения и требования малого разброса импульсов управления не получили развития в каскадных схемах преобразователей.

Эффективность работы преобразователей определяется падением напряжения на силовых полупроводниковых приборах (СПП), влиянием «хвостов» обратного тока этих приборов и частотой переключения, которая определяет коммутационные потери. Преобразователи на тиристорах обычно работают на частоте сети или близкой к ней и обладают наиболее низкими потерями (примерно на уровне 1%). Преобразователи на IGBT действуют на частотах до 5 кГц и имеют потери на уровне 2–3% в зависимости от топологии. Использование наиболее предпочтительной топологии многоуровневого модульного конвертера (MMC), предложенного фирмой Siemens (Германия) в виде технологии HVDC PLUS, позволяет снизить частоту переключений и приблизить потери к уровню потерь тиристорных.

Отрабатываемые рядом фирм полевые транзисторы на карбиде кремния (SiC) обладают наибольшими перспективами в части снижения потерь и повышения энергоэффективности и компактности за счет отсутствия «хвостов» обратного тока, упрощения топологии и числа приборов, а также повышения частоты переключений вплоть до 100 кГц.

Области применения и показатели приборов СПП

За последние три года приборы на карбиде кремния в виде MOSFET-транзисторов получили промышленное исполнение и практически достигли уровня мощности IGBT-транзисторов на кремнии

(Si), в то же время обеспечив частотный диапазон на порядок выше. В результате для энергетики, а тем более для электротранспорта MOSFET-транзисторы становятся более предпочтительными, нежели IGBT. Пять лет назад преобразовательные подстанции передач и вставок постоянного тока (соответственно ППТ и ВПТ) выполнялись на тиристорах в преобразователях тока (SCR) или на IGBT-транзисторах в преобразователях напряжения [1, 2]. Однако последние три года ознаменовались стремительным освоением новых промышленных технологий MOSFET-транзисторов, которые произвели революцию в силовой электронике, начав вытеснять IGBT.

На рис. 1 представлены области применения и показатели силовых полупроводниковых приборов (СПП) трехгодичной давности. По оси ординат отложены мощности (В·А), по оси абсцисс показан диапазон рабочих частот (Гц). Наибольшие мощности на уровне 10 МВ·А достигнуты тиристорами (SCR) и запираемыми тиристорами (GTO, IGCT) в диапазоне до 5 кГц. Им несколько уступают по мощности IGBT-транзисторы мощностью до 3 МВ·А в виде модулей с диапазоном до 30 кГц. Сегодня MOSFET-транзисторы, прежде имевшие мощность до 10 кВ·А, приблизились к частотам 1 МГц, обеспечив компактность и лучшие показатели и экономичность.

На рис. 2 приведены зависимости усредненных мощностей преобразователей СПП (Вт) от частоты (Гц). Эти зависимости показывают расширение области применения SiC на рынке силовой электроники (СЭ) и преобразователей напряжения (инверторов). Динамика столь быстро изменяющегося рынка СЭ отражена в многочисленных публикациях [3–6].

Согласно рис. 2, усредненная мощность преобразователей на тиристорах достигает 1 ГВт и ограничена частотой 100 Гц для снижения коммутационных потерь. IGBT-транзисторы на Si почти достигают мощ-

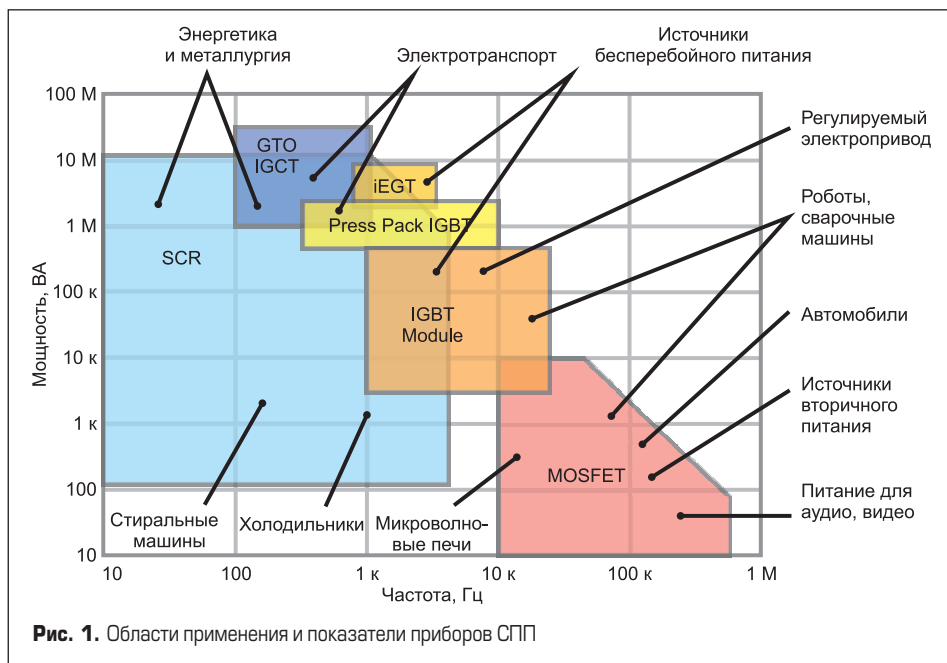


Рис. 1. Области применения и показатели приборов СПП

ности 10 МВт с полосой частот до 100 кГц. MOSFET-транзисторы на Si ограничены мощностью 50 кВт, в то время как на SiC уже превышают 200 кВт, а полоса частот увеличивается со 100 кГц до 10 МГц. Низковольтные преобразователи на GaN и GaAs мощностью ниже 10 кВт имеют наивысшую полосу частот до 100 МГц. Приведенные графики позволяют в настоящее время говорить о вытеснении IGBT из диапазона мощностей наиболее распространенных инверторов для электротранспорта и распределенной генерации.

Физические свойства приборов СПП

Физические свойства приборов СПП изложены в [7–10] и в качественном виде приведены на рис. 3. Рассматриваются основные виды СПП: Si — кремний, 4H-SiC и 6H-SiC — поли-

типы карбида кремния, а также GaN и GaAs — нитрид галлия и арсенид галлия.

Из графика рис. 3 следует, что по всем показателям политип 6H-SiC (карбид кремния) превосходит кремний Si: по теплопроводности — больше чем в три раза, по напряженности поля пробоя — в 7 раз, по ширине запрещенной зоны — больше чем в три раза, по температуре плавления — в два раза, по предельной скорости носителей — более чем в два раза.

SiC — карбид кремния (в обиходе карборунд) представляет комбинацию равных долей Si и C, отличается особой прочностью, трудностью обработки (возникают сколы поверхности). Ранее на политипе 4H-SiC в процессе эксплуатации наблюдались дефекты типа SF (Stacking Faults), связанные с увеличением тока утечки и снижением сопротивления в прямом направлении. В дальнейшем указанные недостатки удалось преодолеть.

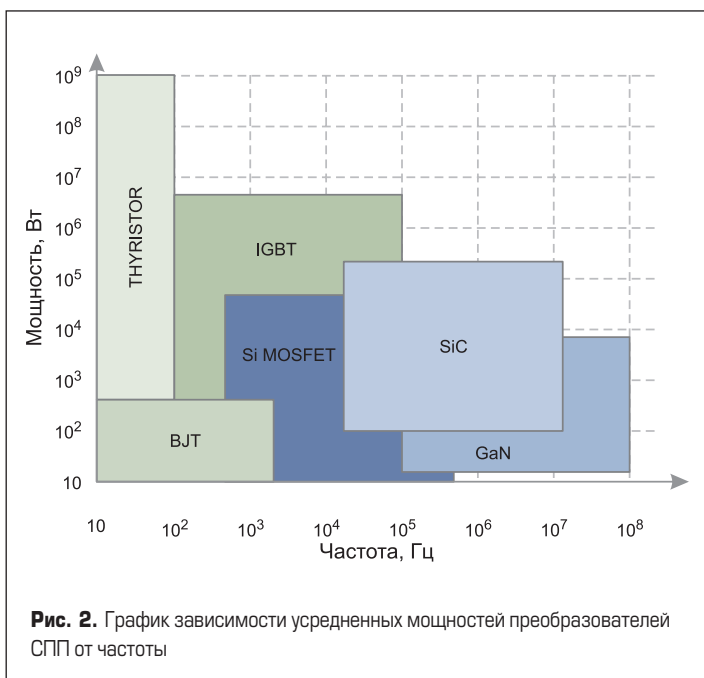


Рис. 2. График зависимости усредненных мощностей преобразователей СПП от частоты



Рис. 3. Основные физические свойства перспективных СПП [7]

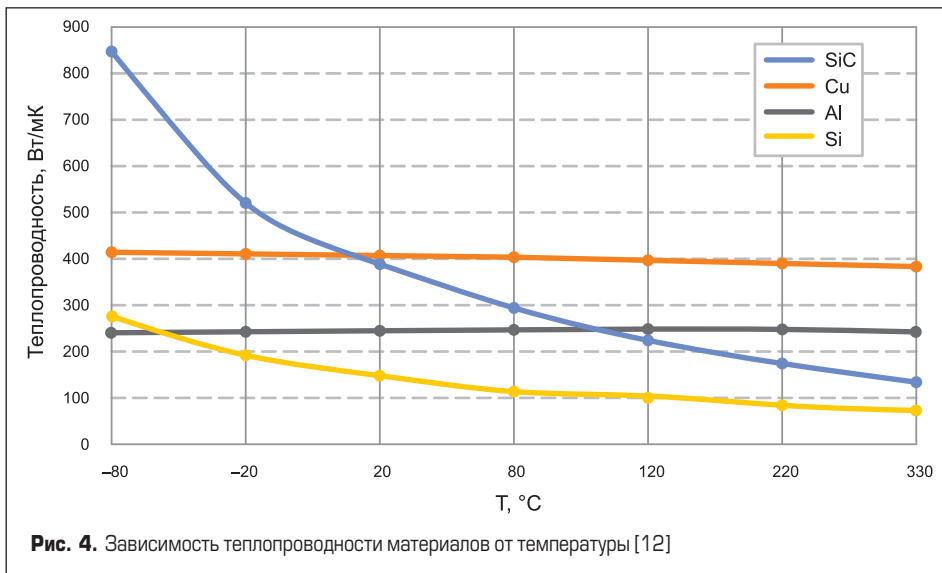


Рис. 4. Зависимость теплопроводности материалов от температуры [12]

Лидером в освоении SiC и поставке комплектующих MOSFET-транзисторов (85–90% рынка) является компания Cree (США), основанная в 1987 году. В 2006-м она представила промышленный образец на пластине диаметром 100 мм, а в 2011-м — высокопроизводительный MOSFET-транзистор с прямым сопротивлением на порядок ниже сопротивления MOSFET на Si, а теплопроводностью в 3,7–3,8 раза выше. Это обеспечило прорыв в силовой электронике! Данный транзистор отличался от МОП-транзисторов и IGBT-транзисторов на Si высокой электрической прочностью (на порядок выше), низким прямым сопротивлением, которое мало зависит от температуры перехода, широкой запретной зоной и малым током утечки, стабильностью теплопроводности во времени и от температуры, высокой надежностью, радиационной стойкостью (в 12 раз выше Si и в 17 раз выше GaAs) [9].

По данным [8], MOSFET-транзистор напряжением 1200 В на ток 20 А имеет прямое сопротивление на уровне 100 мОм, напряжение управления 15 В (сопоставимо с IGBT). В диапазоне температур +25...+150 °С его сопротивление изменяется на 20% (IGBT — на 200%, MOSFET с Si — на 300%). Благодаря тому что этот прибор униполярный и не имеет хвостов тока при коммутации, его потери гораздо ниже, чем у кремния. Например, у MOSFET-транзистора на SiC с напряжением 10 кВ током 10 А потери в 200 раз ниже, чем у IGBT 6,5 кВ. Задержка включения составляет 64 нс против 1,4 мкс, а задержка выключения 50 нс против 540 нс.

Некоторые характеристики приборов на основе кремния и карбида кремния

В части IGBT-транзисторов, модулей и блоков на основе Si лидируют компании

Infineon Technologies (Германия) и Mitsubishi (Япония), модули которых имеют напряжение 600–6500 В и ток 50–3600 А. Эти модули позволяют создавать блоки преобразователей напряжения мощностью 0,5 кВт — 1 ГВт. Эти же компании выпускают тиристоры на основе Si напряжением до 10 000 В на ток до 4600 А. Infineon разработала новое поколение IGBT-кристаллов на Si с рабочей температурой +175 °С (обычно +125 °С). Все дисковые керамические корпуса выполнены с диаметром 41–172 мм, а ударные токи допускают амплитуду до 100 кА (обычно 50 кА). Фототиристоры выпускаются на напряжение до 5200 В и ток до 3500 А. Выпрямительные диоды имеют напряжение до 10 000 В и ток до 13 000 А [13].

Карбид кремния (SiC) обладает уникальными физическими свойствами, приведенными выше, которые делают его применение оправданным для СПП. Ширина запрещенной зоны в 3 раза выше, нежели для Si (3,2 эВ сравнительно с 1,1 эВ для Si). Пробивная напряженность поля составляет 2,4 МВ/см против 0,25 МВ/см для Si, то есть в 9 раз выше. Коэффициент теплопроводности 4,1 Вт/смК против 1,5 Вт/смК, то есть втрое выше, чем у Si, и такой же, как у меди. Радиационная стойкость SiC тоже гораздо больше, что важно для аэрокосмических применений. На рис. 4 приведены графики зависимости теплопроводности материалов от температуры. Эти кривые показывают выигрыш SiC по теплопроводности, что позволяет поднять его рабочую температуру вдвое — до +250 °С [12].

Указанные преимущества позволили компании Infineon создать MOSFET-транзисторы на напряжение до 2000 В и ток 200 А с временем выключения 100 нс, что на порядок лучше, чем у Si. Такие транзисторы имеют фирменное название CoolSiC и выпускаются как в дискретных корпусах, так и в виде модулей преобразователей частоты мощностью до 200 кВт стандартом 62 мм. Данные приборы изготавливаются как одиночные в дискретном корпусе, так и в виде модулей с топологией «полумост» и «полный трехфазный мост» [13].

Такие быстродействующие приборы и модули позволяют расширить диапазон применения от бытовых устройств до электроэнергетики и электротранспорта, что уже реализовано на электромобилях Tesla и в инверторах частотного привода.

Необходимость применения быстродействующих приборов может быть проиллюстрирована графиком рис. 5, на котором представлены зависимости диапазонов частот колебаний F от типа колебаний n для разных типов приборов и преобразователей. По вертикали отложены частоты до 30 кГц, которые возникают в преобразователях и приборах под влиянием гармоник на переходные процессы коммутации, передаваемые по проводам. В диапазоне 10^6 – 10^7 Гц возникают ВЧ-колебания при выключении приборов, которые распространяются в виде электромагнитных волн (выше 100 кГц). В диапазоне до 10^8 Гц возникают колебания в LC-цепях быстровосстанавливаемых диодов (FRD). Вплоть до 1 ГГц возникают переходные колебания в паразит-

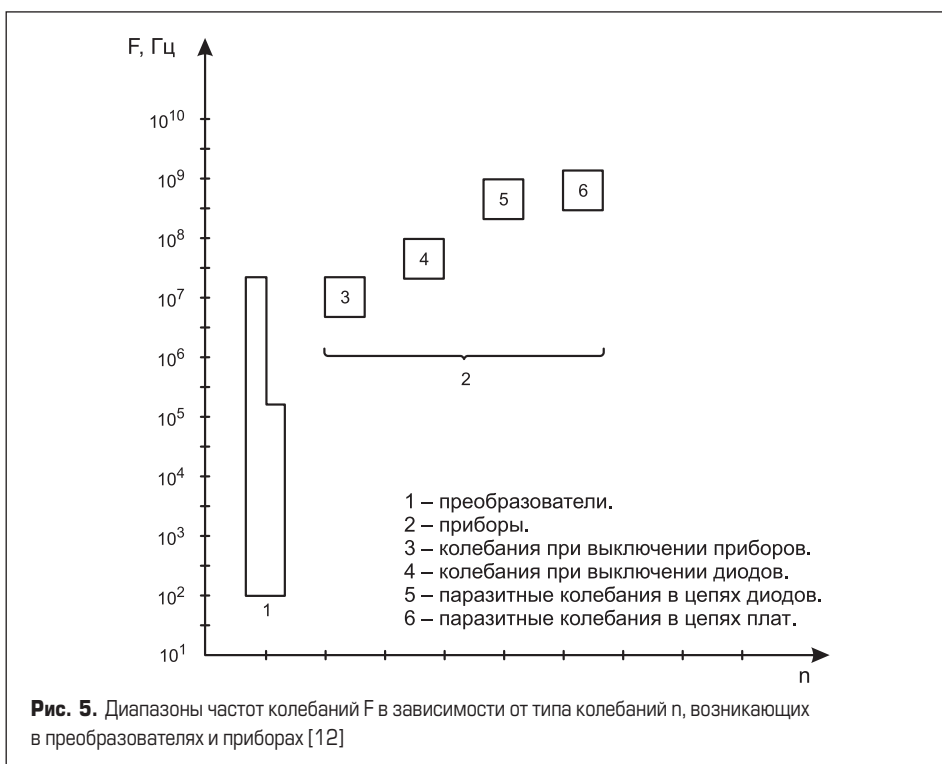


Рис. 5. Диапазоны частот колебаний F в зависимости от типа колебаний n , возникающих в преобразователях и приборах [12]

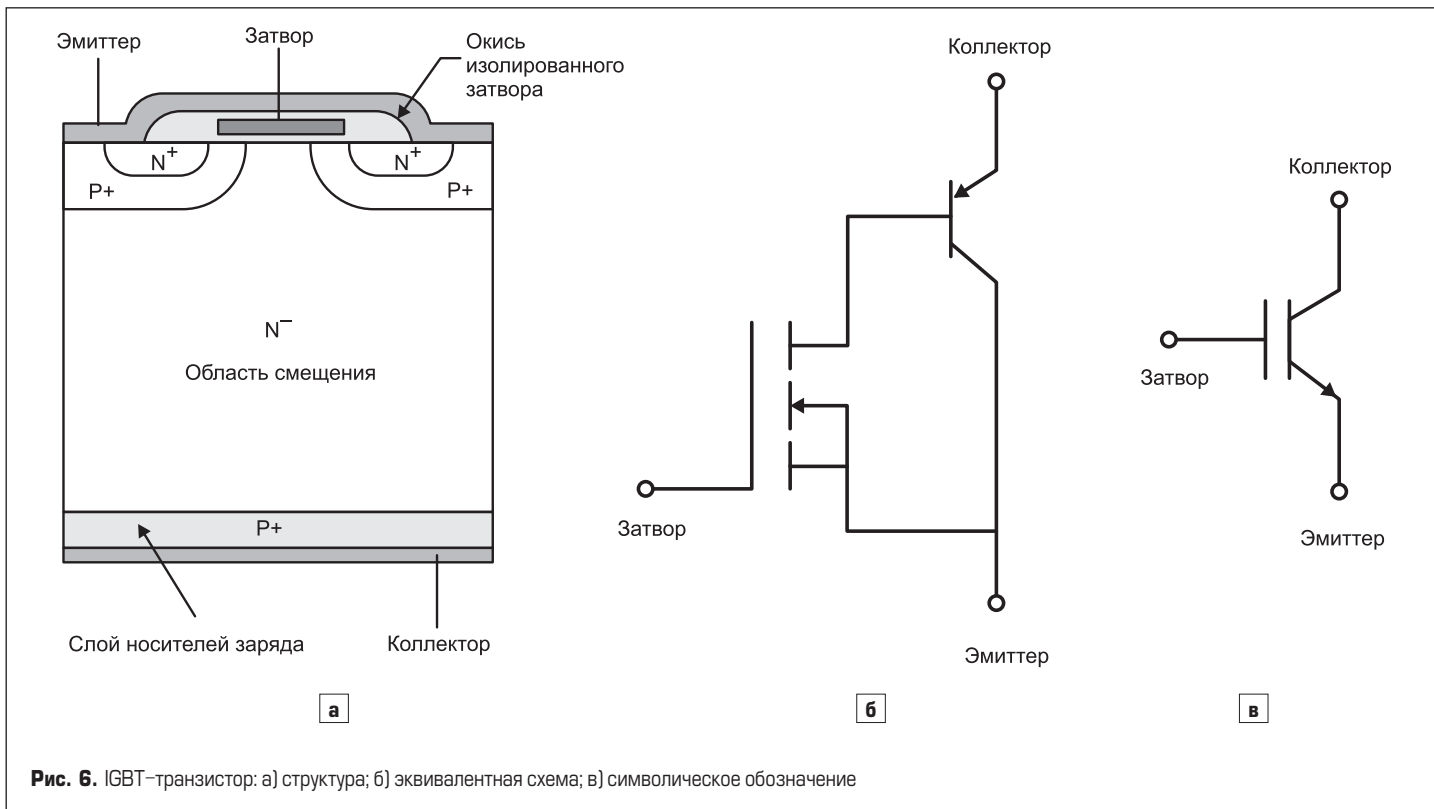


Рис. 6. IGBT-транзистор: а) структура; б) эквивалентная схема; в) символическое обозначение

ных цепях приборов и преобразователей, которые определяются компоновкой элементов на плате и в модулях [12].

Схемотехника IGBT- и MOSFET-транзисторов

Схемотехника IGBT- и MOSFET-транзисторов несколько различается из-за различий в кристаллах, подложках и даже терминологии электродов, однако производственная база и технологические установки довольно схожи, что позволяет достаточно быстро осуществить переход на промышленный выпуск. Реализованные в ряде фирм (Infineon, Mitsubishi, TCMS и др.) производства MOSFET-транзисторов на дисках диаметром до 200 мм позволяют в близкой перспективе перейти на диаметр 300 мм. В России, судя по данным [9], также имеется возможность изготовления таких транзисторов на дисках диаметром 100–150 мм. Такой переход расширит диапазон применений SiC-приборов и еще больше будет способствовать вытеснению приборов Si, показанных на рис. 1 и 2.

На рис. 6 приведены изображения IGBT-транзистора — его структуры, эквивалентной схемы и символического обозначения. Эквивалентная схема на рис. 6б демонстрирует состав из двух элементов: слева — полевого транзистора, справа — биполярного транзистора. Символическое обозначение подчеркивает двойственность структуры IGBT в виде сдвоенной вертикальной черты на затворе прибора.

Изображение эквивалентной схемы MOSFET-транзистора, как видно на рис. 7 (справа вверху), содержит один прибор (одна черта), а обратный FRD-диод входит в состав кристалла, хотя и показан на схеме, так

как присутствует функционально. На рис. 7 приведен эквивалент трехуровневого инвертора на Si (3L) и двухуровневого инвертора на SiC (2L) (вверху, слева направо) и зависимость КПД от выходной мощности (внизу). Преимущества применения SiC и технологии MOSFET заключены в снижении числа приборов с четырех до двух, в повышении частоты

с 24 до 48 кГц (вдвое), что снижает стоимость и габариты инвертора.

На нижнем графике рис. 7 показана зависимость энергоэффективности различных мероприятий по их улучшению в схеме двухуровневого преобразователя сравнительно с исходной схемой трехуровневого IGBT на основе Si с частотой 24 кГц (черная сплошная кривая).

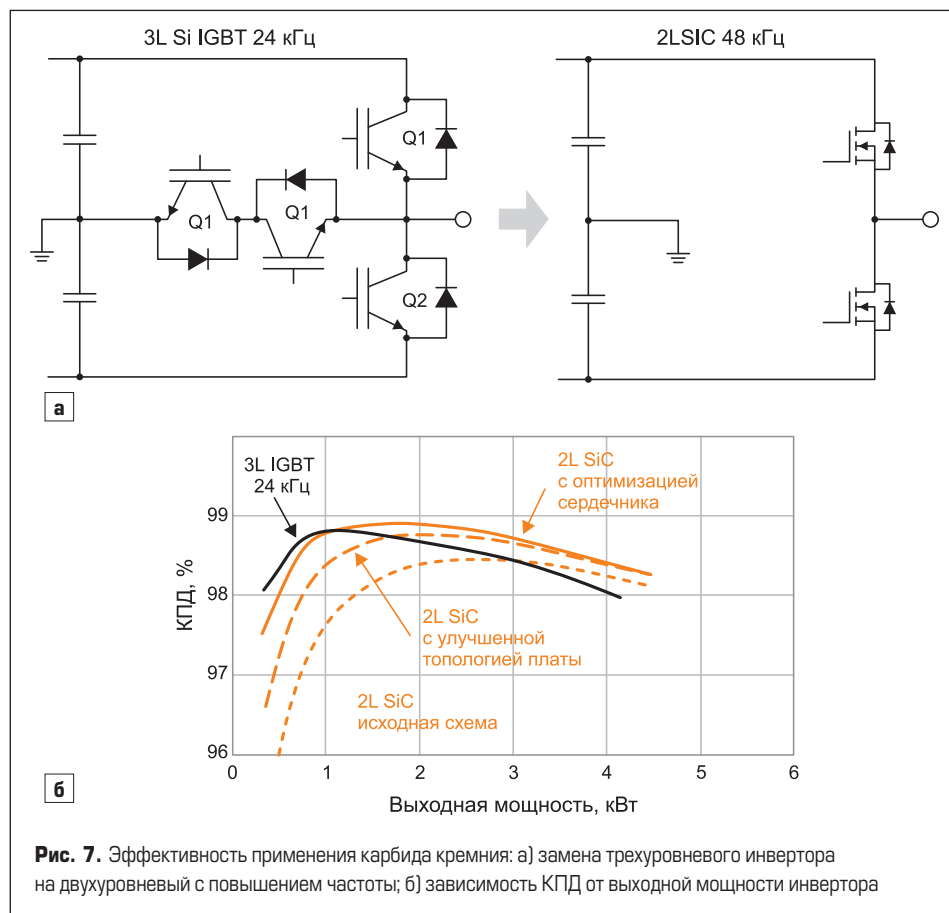


Рис. 7. Эффективность применения карбида кремния: а) замена трехуровневого инвертора на двухуровневый с повышением частоты; б) зависимость КПД от выходной мощности инвертора

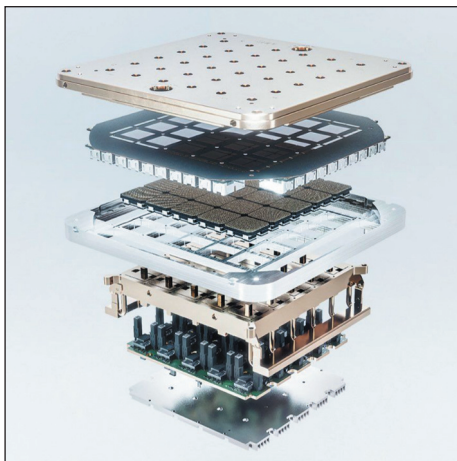


Рис. 8. Конструкция MOSFET-транзистора на SiC

Нижний желтый пунктир соответствует двухуровневому инвертору на SiC и показывает снижение КПД на 0,5%. Улучшенная топология платы за счет уменьшения паразитных емкостей заметно повышает КПД — примерно на 0,25%. Оптимизация сердечника дросселя ИНВ (не показан на рис. 7) позволяет превысить КПД трехуровневого ИНВ и сместить оптимум мощности с 1 до 2 кВт, что благоприятно для потребителей.

Конструкция MOSFET-транзистора на SiC показана на рис. 8 и является довольно сложной по составу и применяемым технологиям, которые непрерывно совершенствуются, чтобы приблизить характеристики к мощным IGBT-транзисторам на Si, пока доминирующим на рынке СЭ. Новые материалы и технологии непрерывно совершенствуются и позволяют на примере компании Infineon и других расширять спектр выпускаемых изделий как в дискретных корпусах TO-247, так и в виде модулей в корпусах Easy промышленного стандарта 62 мм. MOSFET-ключи с фирменным названием CoolSiC позволяют строить преобразователи на мощность до 200 кВт с частотой 72 кГц, что сокращает их габариты, вес, стоимость и решает проблемы отвода тепла [13].

Разработанный драйвер на SiC увеличивает dU/dt при включении до 50 В/нс (сравнить с 5–20 В/нс для Si). Однако при этом, как видно из кривых рис. 7, наблюдается восьмикратный рост потерь в двухуровневом инверторе сравнительно с трехуровневым на Si и снижением КПД до 98,5% из-за влияния паразит-

ных емкостей. В результате, как отмечалось выше, для достижения КПД 99% пришлось оптимизировать плату и дроссели инвертора. Напряжение включения остается на уровне +15 В при пороге –4 В.

Благодаря развитию технологий и переходу на SiC снижаются габариты и число приборов. Кроме того, расширяется функционал модуля, который выполнен на основе этих приборов и обладает свойствами интеллектуального управления, самозащиты, принудительного охлаждения с помощью встроенного вентилятора. Такой модуль уже является блоком преобразователя напряжения или преобразователя частоты и непосредственно или через фильтры соединяется с сетью и нагрузкой в виде электродвигателя.

Прогресс разработки модулей на SiC и стремительное повышение их мощности и напряжения позволяют в настоящее время формировать на их основе преобразователи напряжения для распределенной генерации и альтернативных источников взамен модулей на IGBT. Наиболее подходящей при этом является технология многоуровневых модульных конвертеров типа MMC фирмы Siemens (Германия) [15].

Широкое применение вышеописанных модулей и блоков в электроэнергетике приведено в литературе и отражено в [16–18].

Выводы

1. Выполнен анализ динамики рынка СПП и отмечено промышленное освоение новых технологий в виде карбида кремния для мощных IGBT-транзисторов и для менее мощных MOSFET-транзисторов.
2. Приведены физические свойства и показатели MOSFET-транзисторов на основе карбида кремния и показаны их преимущества в части температурной, электрической и радиационной стойкости сравнительно с IGBT-транзисторами на основе кремния.
3. Анализ модулей и блоков с использованием карбида кремния показал возможность их реализации в виде готовых преобразователей напряжения и частоты на мощности 200 кВт и выше.

Литература

1. Шульга Р. Н. Рынок силовой электроники (динамика и тенденции развития) // Энергия единой сети. 2021. № 5, 6.

2. Шульга Р. Н., Стальков П. М., Смирнова Т. С. Комплексы электротехнического оборудования для передач и вставок постоянного тока // Энергия единой сети. 2021. № 3.
3. Кузнецов Ф. А., Резниченко М. Ф., Преображенский Е. Б., Харитонов С. А. Оценка рынка устройств и систем силовой электроники в Российской Федерации // Химия в условиях устойчивого развития. 2001. № 9.
4. Кондратов И. Силовая электроника — направление перспективное. www.itweek.ru/
5. Гордеев А., Думаневич А., Войтович В. Si, GaAs, SiC, GaN — силовая электроника. Сравнение, новые возможности // Силовая электроника. 2010. № 5.
6. Покровский И. Обзор рынка компонентов силовой электроники. www.vestnikmag.ru
7. Simonka V. Thermal Oxidation and Durant Activation of Silicon Carbide. 2018.
8. О'Нейл М. Карбид-кремниевый MOSFET бросает вызов IGBT. www.elcr.ru
9. Беспалов В. А., Дюжев Н. А., Медведев Б. К. Технология приборов силовой электроники на основе карбида кремния // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2018. Вып. 1.
10. Грехов И. В. Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника // Вестник Российской академии наук. 2008. Т. 78. № 2.
11. Status of the Power Electronics Industry 2019 report. Yole Development, 2019.
12. Luts J., Schlangenotto H., Scheuermann U., Doncker R. E. Semiconductor Power Devices: Physics, Characteristics, Reability, 2011.
13. Компоненты силовой электроники 2019–2020. www.efo-power.ru
14. Семенов Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. М.: Солон-Пресс, 2011.
15. HVDC PLUS and SVS PLUS. www.docplayer.net/
16. Шульга Р. Н., Петров А. Ю., Хренников А. Ю. Энергетические платформы с использованием цифровых модульных подстанций и энергоблоков для Арктики // Российская Арктика. 2020. № 10.
17. Шульга Р. Н. Электрохимические и водородные накопители электроэнергии // Новости электротехники. 2020. № 4, 5.
18. Шульга Р. Н. К вопросу о возможности создания гибридной энергораспределительной сети ГЭРС с накоплением электроэнергии // НРЭ. 2015. № 12.