SEMIKRON
innovation+service

КОНЦЕПЦИЯ МОЩНОГО SIC-МОДУЛЯ СО СВЕРХНИЗКОЙ КОММУТАЦИОННОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Петер Бекедаль (Peter Beckedahl), Свен Бетоу (Sven Bütow), Андреас Мол (Andreas Maul), Мартин Роеблитц (Martin Roeblitz), Матиас Спенг (Matthias Spang)

Перевод и комментарии: Андрей Колпаков
Andrey.Kolpakov@semikron.com

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологии карбида кремния потребовало кардинального изменения подхода к проектированию корпусов силовых модулей. В мощных источниках питания, преобразователях для солнечной энергетики, медицинской техники и индукционного нагрева востребованы сильноточные быстрые ключи с номинальным током свыше 400 А. Сегодня на рынке предлагаются кристаллы SiC-диодов и SiC MOSFET, имеющие I_{nom} до 50 А, поэтому для повышения нагрузочной способности силовой модуль должен содержать большое количество параллельных чипов.

При разработке конструкции перспективных карбидокремниевых ключей необходимо решить две основные задачи. Для обеспечения высокой скорости переключения SiC-приборов следует снизить паразитную индуктивность силовых терминалов до уровня не более 5 нГн. Кроме того, параллельное включение сверхбыстрых кристаллов предполагает высокую симметрию силовых и сигнальных цепей внутри силового модуля [1].

Использование гибких SKiN-пленок для соединения чипов и терминалов открывает новые возможности проектирования силовых ключей и обеспечивает значительное снижение коммутационных индуктивностей [2]. Еще одной проблемой является разработка терминалов для подключения DC-шины. Отраслевые стандарты требуют соблюдения определенных зазоров и путей тока утечки, что приводит к образованию паразитной индуктивности более 10 нГн только в зоне подключения звена постоянного тока силовых модулей.

Новый SiC MOSFET-модуль создан на основе SKiN-технологии, применение которой позволяет преодолеть основные ограничения традиционных технологий силовой электроники. Двухслойная гибкая пленка, которая спекается с контактными поверхностями кристаллов, используется и для их соединения с силовым интерфейсом. Такой принцип корпусирования обеспечивает ультранизкую индуктивность токового пути, соединяющего звено постоянного тока и силовые кристаллы. При этом дополнительные снабберные конденсаторы не требуются. Как будет показано далее, паразитная индуктивность полумостового SKiN-модуля с восемью параллельными 50-А кристаллами SiC MOSFET не превышает 1,4 нГн.

ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КОММУТАЦИИ

В современных IGBT с номинальным током 400 А используется два-четыре параллельных кристалла на один ключ. Активная площадь чи-

пов при этом составляет около 400 мм^2 для IGBT 12-го класса и 220 мм^2 для обратных диодов (например, SEMITRANS 3 или SEMiX 3 [3]). Типовая паразитная индуктивность подобных конструкций достигает 20 нГн, к ней добавляется индуктивность цепи постоянного тока (20–30 нГн, в дальнейших расчетах мы будем использовать величину 21 нГн на модуль). Скорость переключения тока при этом составляет 4–8 кА/мкс, фронты напряжения в переходном процессе около 5–10 кВ/мкс. При номинальных условиях эксплуатации на IGBT-чипы действуют перенапряжения в диапазоне:

$$U_{ov} = 41\ \text{нГн} \times (4–8\ \text{кА/мкс}) = 164–328\ \text{В}$$

При отключении тока короткого замыкания (КЗ) перенапряжение может легко превысить уровень 500 В, если не применяются специальные методы управления (Soft Turn-Off — «плавное выключение» или Active Clamp — «активное ограничение»), реализуемые схемой драйвера. Очевидно, что традиционные конструктивы силовых модулей не способны в полной мере реализовать динамические возможности карбидокремниевых кристаллов. Значительное снижение уровня коммутационных потерь достижимо при увеличении скорости переключения до 20–40 кА/мкс. Для этого величина паразитной индуктивности силового модуля должна быть менее 5 нГн, соответственно, следует снизить и распределенную индуктивность внешней DC-шины.

Один из способов решения задачи — интеграция звена постоянного тока или его частей в состав силового модуля [4, 5], что позволяет заметно сократить общую индуктивность контура коммутации. Однако интегрированные решения не являются универсальными, поэтому разработчики инверторов заинтересованы в конструкциях с гибким интерфейсом подключения и различными способами охлаждения. Если в силовой модуль встроена только часть DC-шины, то между ее различными элементами могут возникать мощные осцилляции, этот эффект хорошо известен из опыта применения снабберных конденсаторов.

Хорошее сочетание технических и экономических показателей могут предложить карбидокремниевые силовые модули в корпусе, отвечающем промышленным стандартам по изоляционным свойствам и выполняющем следующие требования:

- изоляционные зазоры соответствуют рабочему напряжению кристаллов до 1700 В;
- полумостовая конфигурация, выходной ток до 400 A_{RMS};
- возможность монтажа на различные типы радиаторов;
- простота подключения DC- и AC-выходов;
- паразитная индуктивность цепи коммутации: << 5 нГн.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ

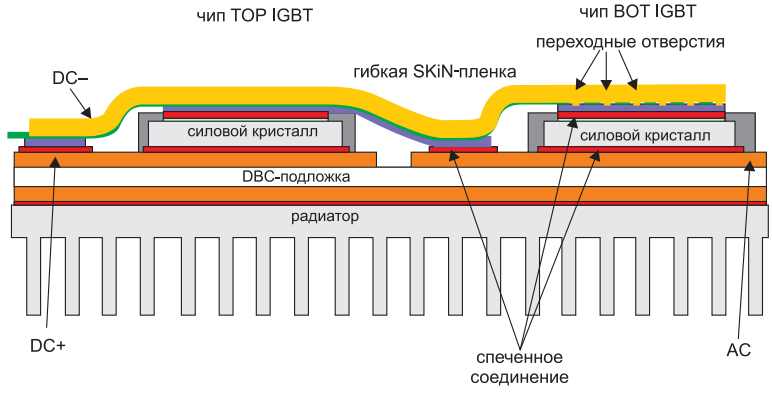
Технология SKiN

Технология SKiN впервые была представлена в 2011 году, подробное описание можно найти в [2]. Новая концепция корпусирования подразумевает, что все паяные и сварные соединения, традиционно используемые для подключения кристаллов, DBC-подложки и базовой платы в стандартных силовых ключах, заменяются диффузионным спеканием серебряного порошка. На рис. 1 показано поперечное сечение интеллектуального силового модуля, изготовленного с применением технологии SKiN. Все чипы установлены на DBC-подложку методом спекания, этот же способ использован для подключения их контактной поверхности к медным трассам, нанесенным диффузионным методом на гибкую полимерную пленку. Токонесущие цепи на ее нижнем слое предназначены для подключения кристаллов к силовым цепям на подложке.

Массивы переходных отверстий, передающих большие токи с нижнего на верхний (связанный с DC-терминалами) слой SKiN-пленки, расположены над поверхностью чипов. Такая конструкция соединений позволяет получить сверхмалую индуктивность коммутационных цепей.

В то время как традиционные алюминиевые проводники имеют контакт только с 21% активной поверхности кристаллов, SKiN-пленка расширяет площадь контакта до 85%. Увеличение контактной поверхности и использование толстых медных трасс на гибкой пленке улучшает распределение тепла, повышает нагрузочную

Рис. 1. Поперечное сечение SKiN-прибора



и перегрузочную способность кристаллов. При этом значительно выше оказывается и стойкость силового модуля к термоциклированию.

Конструкция 400-А SiC SKiN силового модуля

В новом силовом модуле использованы кристаллы SiC MOSFET 1200 В (площадь 25 мм^2, R_{DS_on} = 45 мОм) компании ROHM. Дизайн чипов был оптимизирован для двухстороннего спекания по заданию Semikron. В модуле параллельно включено восемь кристаллов, что дает общее значение R_{DS_on} = 5,6 мОм. Их расположение на DBC-подложке показано на рис. 2 (четыре чипа в параллель на ключ). Гибкая SKiN-пленка несет отрицательный DC-потенциал на верхнем слое, поэтому топология подложки получается очень простой, поскольку на ней расположены только цепи с положительным DC-потенциалом и AC-цепи.

Вид гибкой SKiN-пленки, спеченной с верхними контактными поверхностями MOSFET-кристаллов, показан на рис. 3. Она используется не только для распределения сигналов на DBC-подложке, но и для соединения DC-шины модуля с внешней цепью постоянного тока, а также подключения AC-выхода. Верхний слой пленки несет на себе отрицательный потенциал DC-шины, нижний — положительный потенциал, при этом оба слоя параллельно применяются для соединения AC-шины с соответствующим терминалом. Верхняя (отрицательная) DC-шина заканчивается на 8,5 мм раньше, что необходимо для формирования требуемого пути тока утечки. Перекрывающаяся полосковая структура шин постоянного тока обеспечивает сверхнизкое значение паразитной индуктивности.

Трассы подключения затворов расположены в центральной части SKiN-пленки. В каждой сильноточной линии объединено по два кристалла. Общая цепь затвора, расположенная перпендикулярно к силовой трассе, соединяет сигнал управления с контактной площадкой на краю подложки. Датчик температуры NTC установлен рядом с чипами BOT.

На следующем этапе сборка устанавливается в пластиковый корпус, как показано на рис. 4. Подключение сигналов управления и датчиков осуществляется с помощью пружинных контактов, силовые выводы SKiN-пленки позиционируются с помощью элементов корпуса. Специальная рамка, расположенная на верхней части силовых кристаллов, будет прижимать DBC-подложку к радиатору после монтажа модуля.

Последний этап сборки — установка трех низкопрофильных контактных пружин над полосковыми выводами силовых DC- и AC-интерфейсов SKiN-пленки. Контактные пружины закрепляются и позиционируются с помощью дополнительной крышки.

На рис. 5 показано схематическое поперечное сечение фрагмента конструкции готового

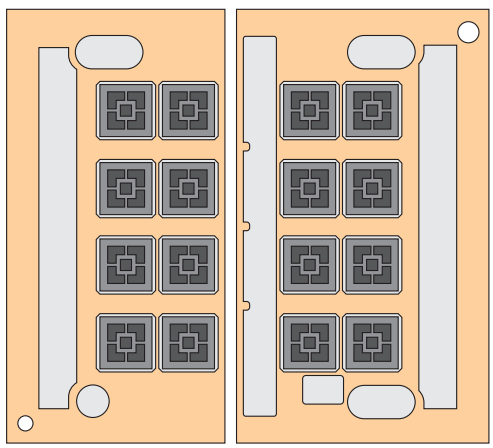


Рис. 2. Топология DBC-подложки

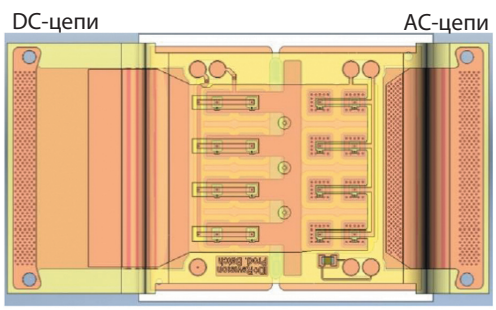


Рис. 3. Топология SKiN-пленки на контактной поверхности чипов MOSFET

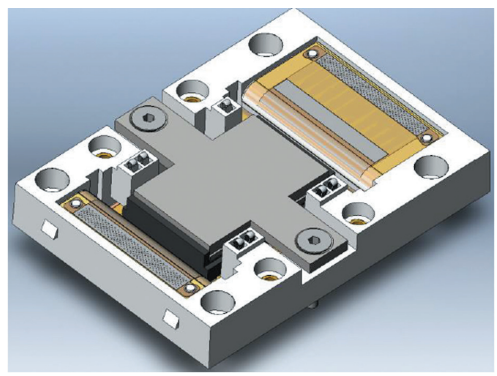
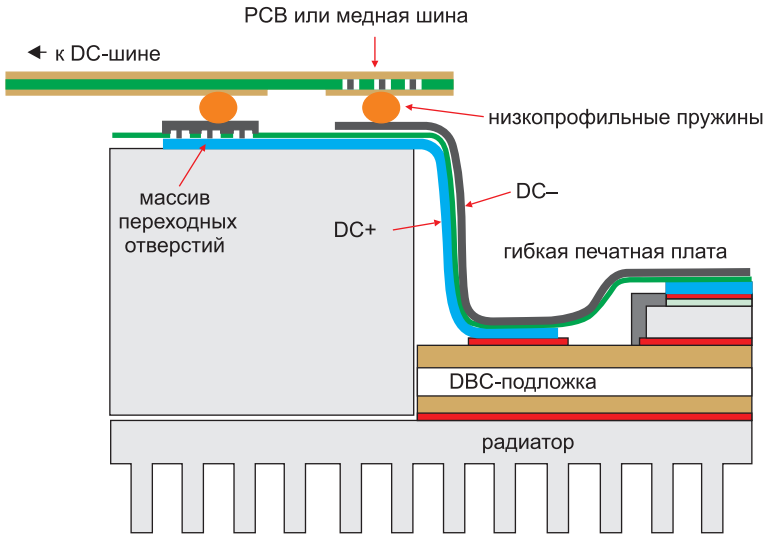


Рис. 4. Конструкция модуля с сигнальными пружинными контактами и прижимными силовыми терминалами



модуля. Соединение цепей постоянного тока выполняется с помощью силовых шин или печатной платы. На верхнем слое SKiN-пленки установлен терминал DC–, на нижнем слое — DC+. Копланарность этих трасс, обеспечивающая низкую распределенную индуктивность L_S, поддерживается вплоть до конденсаторов внешнего звена постоянного тока. Величина L_S определяется только толщиной изоляции, то есть расстоянием между слоями и высотой контактных пружин, находящихся между SKiN-пленкой и DC-шиной.

Обеспечение изоляционных зазоров является одной из основных проблем при проектировании быстрых низкоиндуктивных модулей. В частности, в многослойных конструкциях, работающих при высоком напряжении, следует избегать любых сквозных отверстий, так как они должны иметь большой диаметр или требуют установки дополнительных изолирующих втулок для увеличения пути тока утечки между верхними и нижними трассами. В новом SKiN-модуле эта проблема решена с помощью изолированной прижимной стойки, находящейся на верхней части силовых терминалов. Стойка монтируется на радиатор за пределами перекрывающихся DC-трасс, она прижимает DC-шину или печатную плату (PCB) к модулю, формируя таким образом гибкий и надежный силовой интерфейс (рис. 6).

Рис. 5. Поперечное сечение модуля с подключением к DC-шине

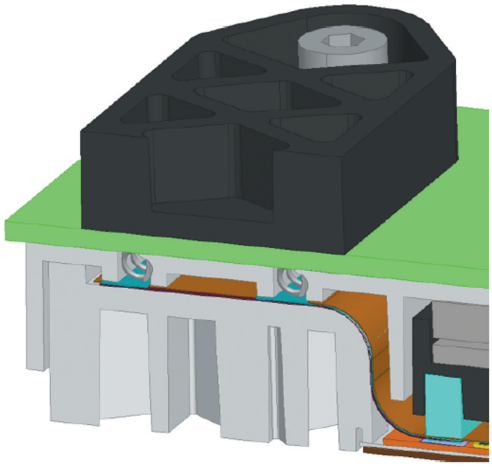


Рис. 6. Фрагмент прижимной стойки, осуществляющей связь DC-шины с силовым модулем

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Паразитная индуктивность L_S

Моделирование паразитных характеристик нового SKiN-модуля проводилось с помощью программного комплекса ANSYS Q3D Extractor. Процесс переключения особенно сильно зависит от распределенных параметров цепи коммутации, цепи затвора и истока. Расчетная величина L_S модуля с учетом DBC-подложки с кристаллами MOSFET, SKiN-пленки и низкопрофильных пружинных контактов — 1,3 нГн. Вклад подложки и гибкого слоя составляет 0,45 нГн, остальные 0,85 нГн приходятся на пружинные элементы.

На рис. 7 показано смоделированное высокочастотное распределение тока на нижней поверхности SKiN-пленки, находящейся в верхней части модуля. Ток протекает в противоположных направлениях через верхние и нижние медные трассы, поэтому на рисунке хорошо видно влияние эффекта близости. Плотность тока в верхнем слое концентрируется в областях, перекрывающихся с нижним слоем, что позволяет минимизировать площадь коммутационной петли.

Расчетные значения индуктивностей затвора с учетом DBC-подложки, SKiN-пленки и контактных пружин находятся в диапазоне 20 нГн. Доля пружин здесь составляет 13 нГн.

По данным моделирования, индуктивность общего истока не превышает 0,03 нГн. То есть индуктивная связь между коммутируемым то-

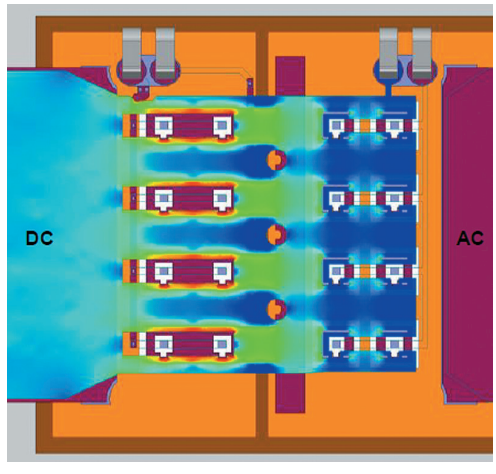


Рис. 7. Моделирование высокочастотного распределения тока в процессе коммутации

ком и цепью затвора очень низка, что обеспечивает высокую скорость переключения. В случае короткого замыкания нагрузки индуктивная связь в цепях затворов будет снижать уровень напряжения управления. Такой эффект достигается за счет соответствующего расположения пружинных контактов затвора и эмиттера, величина связанной индуктивности составляет примерно 0,4 нГн.

Моделирование цепей коммутации

Динамические характеристики сверхбыстрых силовых модулей зависят от паразитных емкостей и индуктивностей кристаллов, корпуса и внешних компонентов. Схемотехническое моделирование позволяет разделить и оценить их влияние, что дает возможность упростить и оптимизировать процесс разработки модуля. На основе результатов исследований паразитных индуктивностей и поведенческих моделей SiC MOSFET-чипов, предоставленных компанией ROHM, был проведен PSPICE-анализ имитационной модели силового модуля.

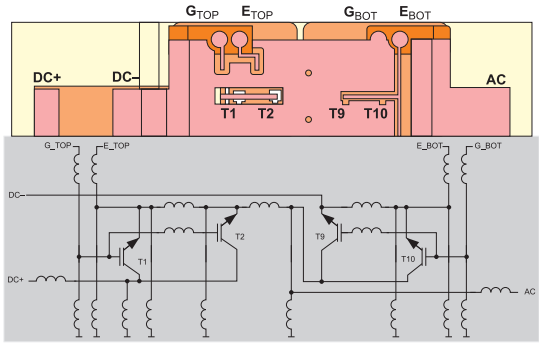


Рис. 8. Структура SPICE-модели модуля и топология DBC-подложки (показано 2×2 из 2×8 чипов)

Оптимизация цепи затвора

Индуктивность цепи управления L_G образована паразитными элементами выходов драйвера и выводов затворов, находящихся внутри и снаружи модуля и последовательно соединенных с сопротивлением затвора R_G. Она оказывает заметное влияние на динамические характеристики модуля, в частности на время задержки, и ограничивает скорость изменения тока управления при коммутации. Пиковый ток драйвера при общем значении R_G = 1 Ом и напряжении управления $V_{G_off/on}$ = –5 В/19 В может снизиться с 24 А (при нулевой паразитной индуктивности) менее чем до 16 А при L_G = 30 нГн. Это сопровождается небольшим увеличением времени задержки переключения: примерно с 20 до 35 нс при включении (t_{d_on}) и с 70 до 90 нс при выключении (t_{d_off}).

В период коммутации индуктивность цепи управления действует как источник тока, передающий затвору энергию, запасенную во время задержки переключения. Это увеличивает скорость и снижает динамические потери E_{sw} до 50% (рис. 9). Начальное значение E_{sw} без учета L_G ограничено емкостями чипа и сопротивлением затвора.

Максимальная величина индуктивности цепи управления ограничена опасностью ложного срабатывания. Увеличение L_G при появлении положительного фронта dV_{DS}/dt приводит к повышению напряжения на затворе из-за эффекта Миллера. Если V_G превысит пороговое значение, то заблокированный транзистор кратковременно откроется, следствием чего будет резкий рост потерь переключения. Кроме того, при слишком высокой индуктивности в цепи затвора могут возникнуть опасные осцилляции.

По результатам моделирования и измерений было выявлено, что оптимальная суммарная величина L_G находится в диапазоне 20–30 нГн. Это означает, что к собственной индуктивности затвора модуля (около 20 нГн) выходная цепь драйвера может добавить до 10 нГн.

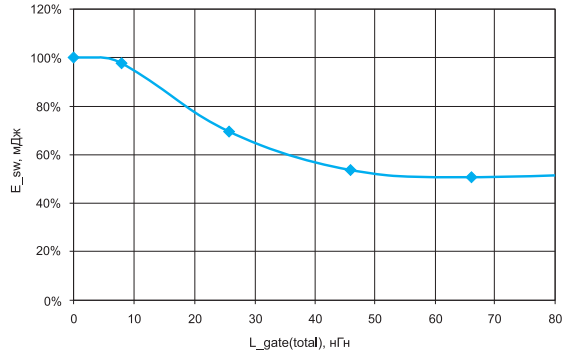


Рис. 9. Зависимость динамических потерь MOSFET от индуктивности затвора (результаты моделирования)

Тепловые режимы SKiN-пленки

При анализе тепловых режимов гибкой SKiN-пленки наиболее важным узлом является интерфейс между силовыми трассами на DBC-подложке и звеном постоянного тока. В этой зоне ток проходит через относительно длинный и тонкий медный лист, который охлаждается только на концах — в местах соединения подложки и DC-шины. Моделирование показывает, что перегрев максимален в середине пленки (считается, что температура на концах одинакова), расчетный тепловой профиль показан на рис. 10.

Для грубой оценки степени перегрева T_{max} рассмотрим теплоизолированный медный лист с заданной температурой T0 на обоих концах. Если пренебречь температурной зависимостью электрической и тепловой проводимости k_{Cu} и λ_{Cu}, то величина T_{max} может быть рассчитана следующим образом:

$$T_{max} = T_0 + I_{RMS,DC}^2 a^2/(8b^2d^2\kappa_{Cu}\lambda_{Cu}),$$

где a — длина; b — ширина; d — толщина медного листа. Среднеквадратичное значение тока через один DC-терминал рассчитывается исходя из тока нагрузки:

$$I_{RMS,DC}^2 = I_{RMS,AC}^2/2.$$

В первом варианте конструкции a = 30 мм, b = 26 мм, d = 70 мкм, k_{Cu} = 58 MS/м, λ_{Cu} = 398 Вт/(м•К), $I_{RMS,AC}$ = 400 А. При этих исходных данных уравнение дает $T_{max} = T_0$ + 118 К, соответствующие потери мощности в меди составляют 23 Вт. Очевидно, что это неприемлемо для промышленного применения. Увеличение ширины и толщины листа позволило существенно снизить перегрев $T_{max} = T_0$ + 31 К, что подтверждено с помощью тепловизионных измерений.

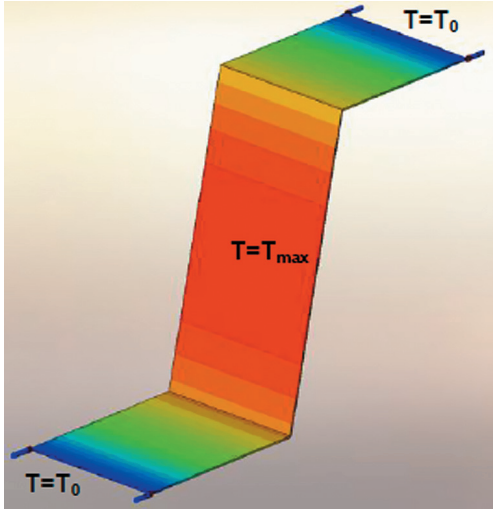


Рис. 10. Моделирование распределения температуры в области SKiN-пленки, связывающей модуль и DC-шину

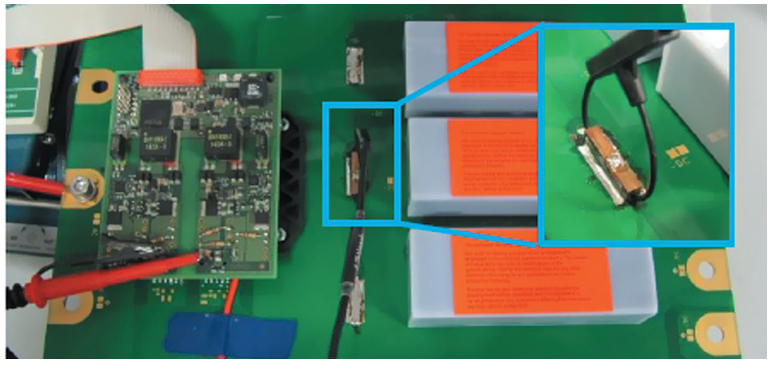
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Потери переключения

Как упоминалось ранее, для тестирования быстрых ключей элементы внешней схемы и измерительной установки также должны иметь очень малую паразитную индуктивность. Стенд для измерения характеристик модуля показан на рис. 11. Четырехслойная печатная плата с толстыми медными трассами установлена поверх модуля. На ней расположены драйвер затвора, три конденсатора звена постоянного тока и адаптер, соединенный с датчиком Роговского (полоса пропускания 30 МГц), который используется для измерения тока. Контроль напряжения выполняется с помощью пассивного высоковольтного пробника и двух высоковольтных дифференциальных зондов с полосой 400 МГц.

Номиналы затворных резисторов выбраны с учетом безопасной коммутации тока/напряжения вплоть до 800 А/ 800 В. Пиковые уровни коммутационных всплесков сигнала ни при каких условиях не должны превышать максимальную блокирующую способность MOSFET-чипов. Тесты подтвердили, что скорость переключения и амплитуду перенапряжения можно очень точно регулировать с помощью внешнего резистора R_G.

Рис. 11. Низкоиндуктивный стенд для измерения характеристик модуля

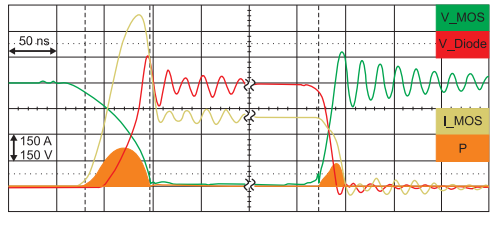


Минимальное значение R_{Goff} ограничено пиковым перенапряжением при отключении транзистора. Это связано с наличием паразитной индуктивности и возбуждением резонансного контура, в котором также присутствует выходная емкость коммутируемого MOSFET. При его включении аналогичная резонансная схема образована индуктивностью коммутации и выходной емкостью транзистора, работающего в качестве оппозитного диода. После отпирания MOSFET-контур дополнительно возбуждается током обратного восстановления оппозитного «тельного» диода. Это приводит к генерации пиков перенапряжения, величина которых ограничена максимальной скоростью включения [6]. На рис. 12 показаны эпюры включения и выключения при номинальных условиях работы.

В этой рабочей точке суммарные потери коммутации (E_{on} + E_{off} + E_{RR}) составляют примерно 22 мДж, или менее 20% от уровня потерь IGBT с аналогичным номинальным током. Скорости нарастания тока и напряжения SiC-ключа очень высоки, измеренное значение dv/dt около 40 кВ/мкс, di/dt — более 27 кА/мкс. Несмотря на это, пиковая величина коммутационного перенапряжения не превышает 180 В.

Теоретически такое высокое значение di/dt соответствует расчетному времени спада око-

Рис. 12. Эпюры переключения при V_{DC} = 600 В, I_{load} = 400 А, T_j = 150 °C, R_{Gon} = 1 Ом, R_{Goff} = 0,5 Ом



ло 15 нс. Это означает, что для точного измерения токовый сенсор должен иметь полосу пропускания более 33 МГц. В действительности она ограничена на уровне 30 МГц, поэтому предполагаемая реальная величина di/dt выше, чем измеренная. К сожалению, в настоящее время не существует токового пробника, соответствующего всем необходимым требованиям (широкая полоса пропускания, высокий пиковый ток и низкая собственная индуктивность).

Как влияют описанные выше ограничения на результаты испытаний, неизвестно, поэтому были проведены калориметрические измерения режимов работы инвертора на частотах до 50 кГц. В результате были подтверждены данные, полученные в ходе «двухимпульсного» теста.

Измерения паразитной индуктивности

Для точного измерения паразитных индуктивностей требуется прецизионное измерительное оборудование. Из-за ограничения полосы пропускания токового датчика необходимо снизить скорость переключения транзистора путем увеличения резистора затвора. Измерение величины di/dt, а также падения напряжения на силовых терминалах модуля и непосредственно на кристаллах MOSFET позволяет вычислить распределенную индуктивность звена постоянного тока и полной цепи коммутации:

$L_{STRAY} = \Delta v/(di/dt)$.

Из эпюр, показанных на рис. 13, расчетная величина L_S составляет примерно 1,4 нГн для модуля и 3,2 нГн для DC-шины с учетом печатной платы, датчиков тока и конденсаторов. Полученные данные хорошо согласуются с результатами моделирования.

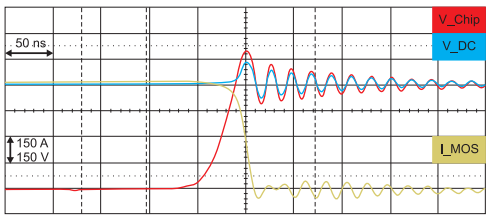


Рис. 13. Измерение уровня перенапряжения на силовых терминалах модуля и MOSFET-кристаллах на DBC-подложке: V_{DC} = 600 В, I_{load} = 600 А, T_j = 150 °C, R_{Goff} = 1,8 Ом

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен перспективный карбидокремниевый силовой модуль с рабочим напряжением 1200 В, разработанный с применением SKiN-технологии. Кристаллы SiC MOSFET установлены на DBC-подложку методом спекания, их верхние контактные поверхности таким же образом соединены с двухслойной полимерной пленкой. Применение специальной топологии SKiN позволило получить ультранизкую индуктивность звена постоянного тока и разнесение цепей отрицательного и положительного DC-потенциалов на верхний и нижний слои.

Общее значение коммутационной индуктивности модуля находится на уровне 1,4 нГн, при этом его конструктив соответствует промышленным стандартам по изоляционным зазорам для полупроводниковых ключей 17-го класса. Это стало возможным благодаря разработке и внедрению новой концепции DC-интерфейса на основе параллельных полосковых линий и прижимных стоек, обеспечивающих требуемые зазоры вне контактной системы.

Оптимизация конструкции DC-соединений позволяет коммутировать SiC-чипы без возникновения критических перенапряжений.

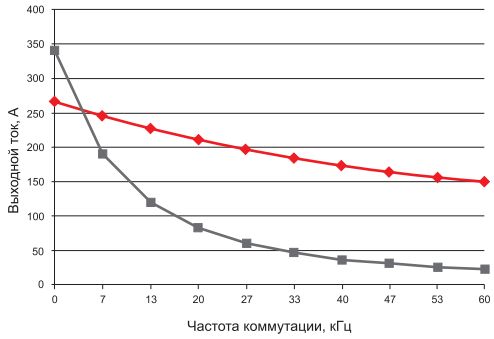


Рис. 14. Зависимость максимального выходного тока трехфазного инвертора от частоты для нового SiC-модуля (красная кривая) и IGBT SKM400GB12T4 (серая кривая). Условия измерений: V_{dc} = 750 В, V_{out} = 400 В, cos φ = 0,85, Ta = 50 °C

Измеренные значения динамических потерь составляют всего около 20% от аналогичных показателей модуля IGBT4. На рис. 14 показано максимальное расчетное значение выходного тока трехфазного инвертора с воздушным охлаждением на частотах коммутации до 60 кГц. На частоте 15 кГц модуль с карбидокремниевыми кристаллами уже имеет двойное преимущество по выходному току.

Литература

1. März A., Horff R., Helsper M., Bakran M.-M. Requirements to change from IGBT to Full SiC modules in an on-board railway power supply. Proc. EPE. Geneva, 2015.
2. Beckedahl P., Spang M., Tamm O. Breakthrough into the third dimension — Sintered multi layer flex for ultra low inductance power modules. Proc. CIPS. Nuremberg, 2014.
3. Product data sheets for reference. www.semikron.com
4. Hoene E., Ostmann A., Marczok C. Packaging Very Fast Switching Semiconductors. Proc. CIPS. Nuremberg, 2014.
5. Tursky W., Beckedahl P. Advanced Drive Sys-tems. Proc. CIPS. Aachen, 2004.
6. Horff R., März A., Lechler M., Bakran M.-M. Optimised Switching of a SiC MOSFET in a VSI using the Body Diode and additional Schottky Barri-er Diode. Proc. EPE. Geneva, 2015.