

Новое поколение SiC MOSFET в DC/DC-преобразователе

с жестким режимом переключения

Джимми Лю
(Jimmy Liu)

Кин Лэп Вонг
(Kin Lap Wong)

Скотт Аллен
(Scott Allen)

Джон Мооккен
(John Mookken)

Введение

Силовые преобразователи на основе ключей из карбида кремния (SiC) отличаются высокой плотностью мощности, они имеют большую величину блокирующего напряжения, меньшее сопротивление открытого канала и лучшую теплопроводность, чем их кремниевые аналоги. По сравнению с SiC JFET или SiC биполярными транзисторами, N-канальные SiC MOSFET являются наилучшей заменой для обычных кремниевых MOSFET или IGBT благодаря более простой структуре, легкости управления и низким потерям мощности. В марте 2013 г. компания Cree начала коммерческий выпуск второго поколения SiC MOSFET, обладающего повышенной производительностью и меньшей стоимостью по сравнению с ключами первой генерации. Новые технические возможности карбидокремниевых транзисторов, наряду с улучшенными экономическими показателями, могут обеспечить более широкое проникновение на рынок.

В настоящее время фотоэлектрические преобразователи, источники бесперебойного питания (UPS), инверторы привода электромобилей являются приложениями, где характеристики SiC особенно привлекательны. Высокая плотность мощности и большая частота коммутации очень важны для сокращения массогабаритных характеристик системы и ее стоимости. Кроме того,

для их охлаждения можно использовать более простые и дешевые системы отвода тепла. В данной статье будет рассмотрен DC/DC-конвертер мощностью 10 кВт, работающий в режиме жесткого переключения с интерливингом, на его примере продемонстрирован потенциал повышения производительности и сокращения затрат за счет применения SiC-технологии. Использование этих ключей позволило повысить рабочую частоту до 100 кГц при сохранении эффективности 99,3% и снижении общей стоимости комплектующих. Приведено сопоставление динамических характеристик, КПД и тепловых параметров карбидокремниевых приборов относительно кремниевых быстрых ключей H3 IGBT.

Схема повышающего конвертера с интерливингом

Для разработки повышающего преобразователя с чередованием фаз (интерливингом) и рабочей частотой 100 кГц необходимо дополнительно изучить свойства SiC MOSFET и индуктора. На рис. 1 представлена структурная схема повышающего преобразователя с интерливингом на основе SiC-транзисторов. В данной конфигурации каждый канал конвертера включает в себя один SiC MOSFET-ключ C2M0080120D (1200 В/20 А, 80 мОм) и один SiC-диод Шоттки C4D10120D (1200 В/10 А), обеспечивающие повышающее преобразование при выходной мощности 10 кВт. Благодаря использованию SiC силовых приборов конвертер работает на высокой частоте с большой плотностью мощности, кроме того, конвертер на основе SiC-ключей не нуждается в дополнительном контуре мягкого переключения (например, ZVS) для достижения высокой эффективности. Эта цель реализуется за счет режима интерливинга, при этом используется небольшое количество компонентов, что является прорывом в схемотехнике силовой электроники.

Конструкция высокочастотного повышающего индуктора

Из-за необходимости работы на высокой частоте (100 кГц) в режиме жесткого переключения, правильный выбор конструкции индуктора (таблица 1) очень важен для определения стоимости и удельной мощности. Высокие динамические потери быстрых IGBT ограничивают диапазон работы традиционных преобразователей на кремниевых ключах на уровне 20–40 кГц. Однако применение SiC MOSFET позволяет увеличить частоту до 100 кГц практически без ущерба для эффективности работы системы. На частоте переключения SiC MOSFET 100 кГц индуктивность повышающего конвертера уменьшается в соответствии с уравнением (1),

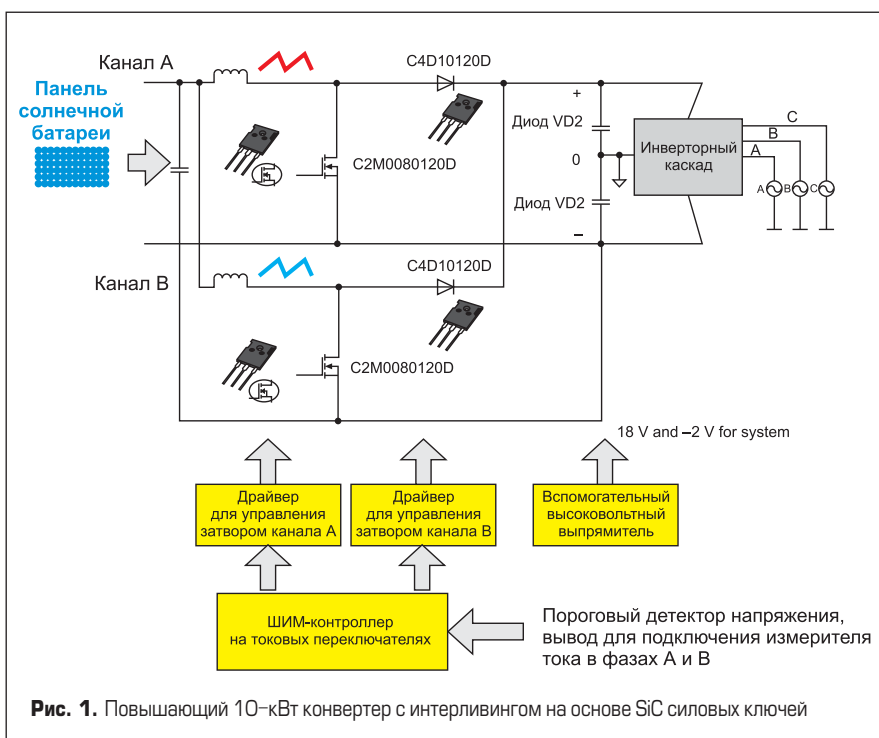


Рис. 1. Повышающий 10-кВт конвертер с интерливингом на основе SiC силовых ключей

Таблица 1. Индуктор повышающего преобразователя мощностью 5 кВт (параметры на частотах 20 и 100 кГц)

Параметр	Si IGBT	SiC MOSFET
Частота, кГц	20	100
Индуктивность (L _{ном}), мкГн	1100	400
Материал сердечника	Fe-Si	Fe-Si-Al
Тип сердечника	AWG8×1×98Ts	AWG12×1×55Ts
Габариты, мм	140×108×68	OD:63×HT:26
Вес, кг	2,3	0,4
R _{DC} , мОм	22	25
Потери в обмотке, Вт	6,1	7
Потери в сердечнике, Вт	13	15,8
Рыночная цена, \$	31	12

таким образом, размер, вес и стоимость индуктора значительно сокращаются, в то время как производительность системы оказывается выше, чем у IGBT на частоте 20 кГц. В таблице 2 приведены параметры дросселя преобразователя мощностью 5 кВт, построенного на кремниевых IGBT на частоте 20 кГц и SiC MOSFET на 100 кГц (рис. 2). Оба индуктора рассчитаны на мощность до 10 кВт.

$$L = (V_{i\min} \times D_{\max}) / (f_s \times \Delta i). \quad (1)$$

Требования к конструкции по EMI

Необходимо уделить особое внимание требованиям по EMI при проектировании высокочастотных преобразователей на базе SiC силовых ключей. В данной статье даются практические рекомендации по снижению уровня шумов на высокой частоте коммутации.

С ростом частоты коммутации быстрых SiC MOSFET уровень паразитных осцилляций на стоке может стать гораздо выше, особенно с учетом паразитной емкости индуктора. Когда силовые транзисторы включаются и выключаются, они возбуждают высокочастотный резонансный контур между паразитной емкостью катушки и распределенными индуктивностями цепи коммутации, что приводит к возникновению колебаний с высокой амплитудой. Чтобы подавить высокочастотный звон, настоятельно рекомендуется использовать однослойную конструкцию обмотки индуктора. На рис. 3 показано, насколько отличается паразитная емкость двухслойной и однослойной обмотки. Применение однослойной обмотки позволяет резко снизить распределенную емкость индуктора, в то же время при этом обеспечивается хорошая магнитная связь. В результате снижается звон в точках подключения выводов транзистора Vds и, соответственно, уменьшается уровень электромагнитных помех.

Минимизация площади петель трасс на печатной плате

На рис. 4 показаны петли цепей переключения повышающего преобразователя. Петли 1

Таблица 2. Основные характеристики

Параметр	Значение	
Входное напряжение, В DC	450	
Входное напряжение, В DC	650	
Номинальная выходная мощность, кВт	10	
Частота, кГц	SiC MOSFET – 100	Si IGBT – 20
Габариты PCB, мм	240×140×90	
Габариты индуктора, мм	100 кГц	OD:63×HT:26
	20 кГц	140×108×68

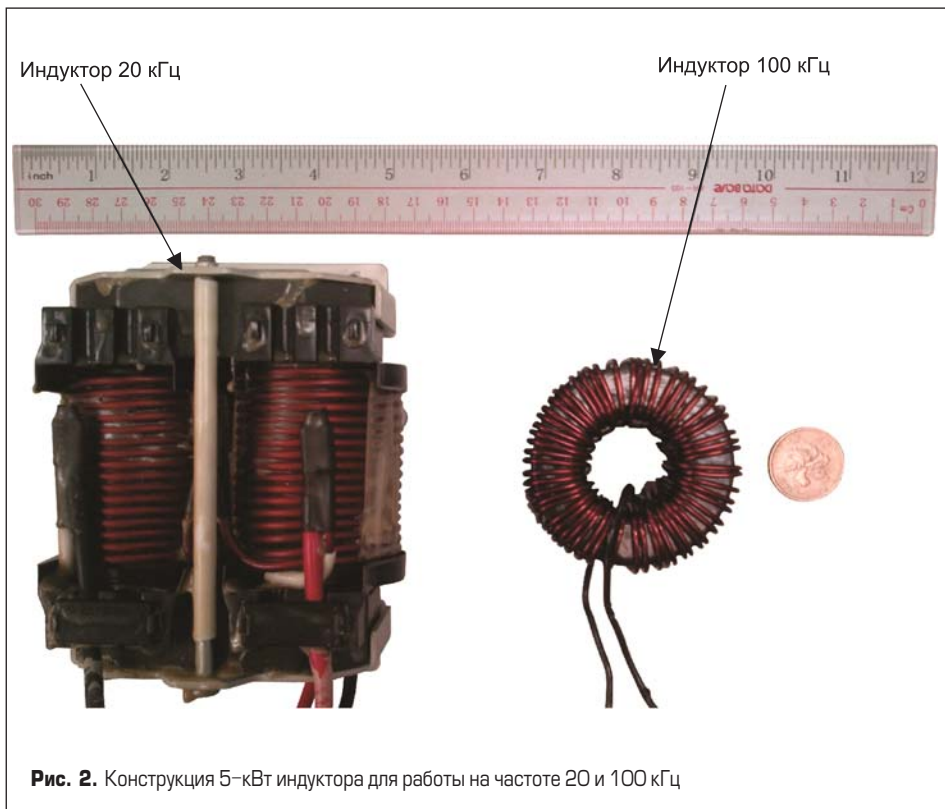


Рис. 2. Конструкция 5-кВт индуктора для работы на частоте 20 и 100 кГц

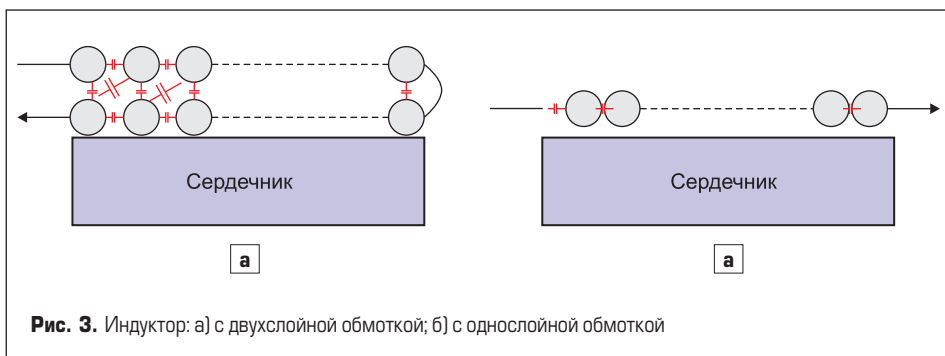


Рис. 3. Индуктор: а) с двухслойной обмоткой; б) с однослойной обмоткой

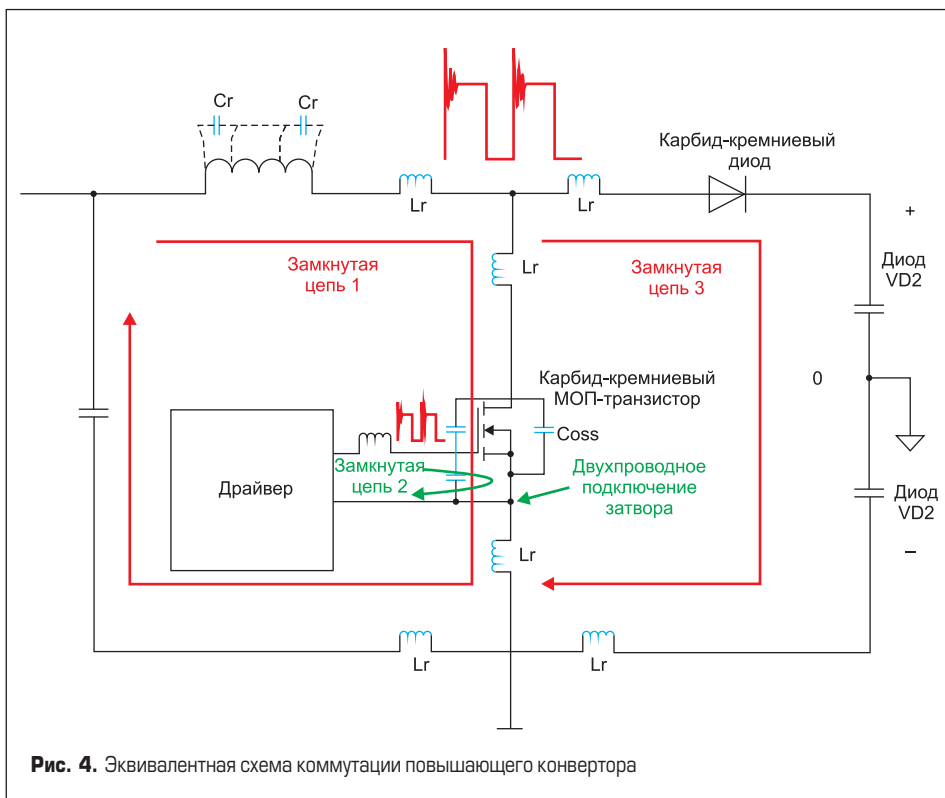
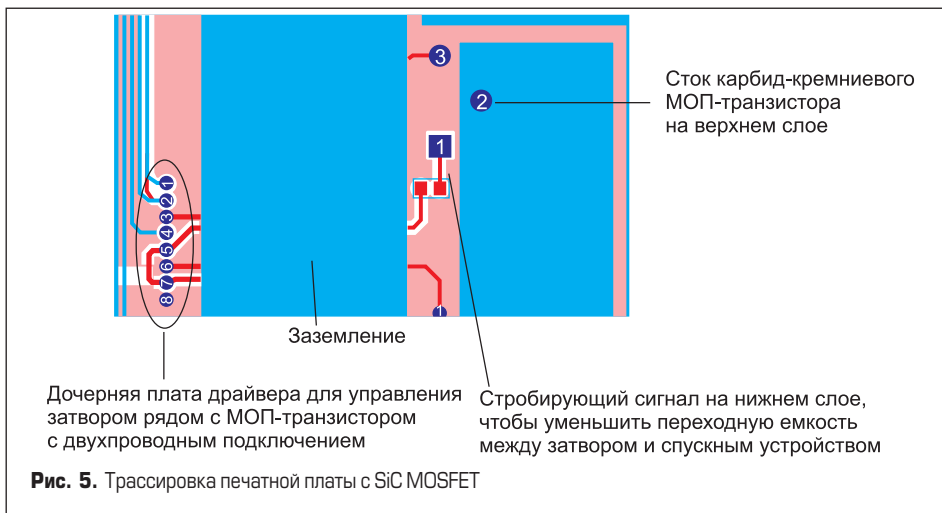
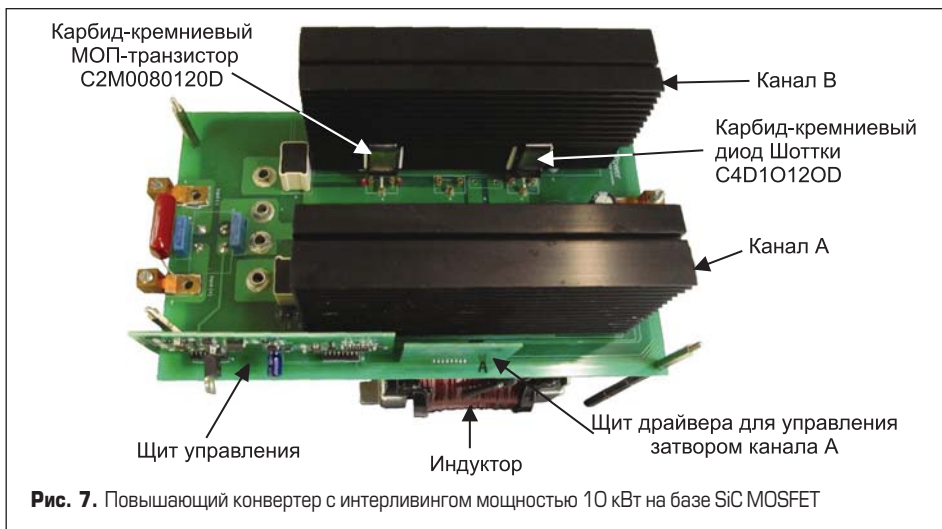
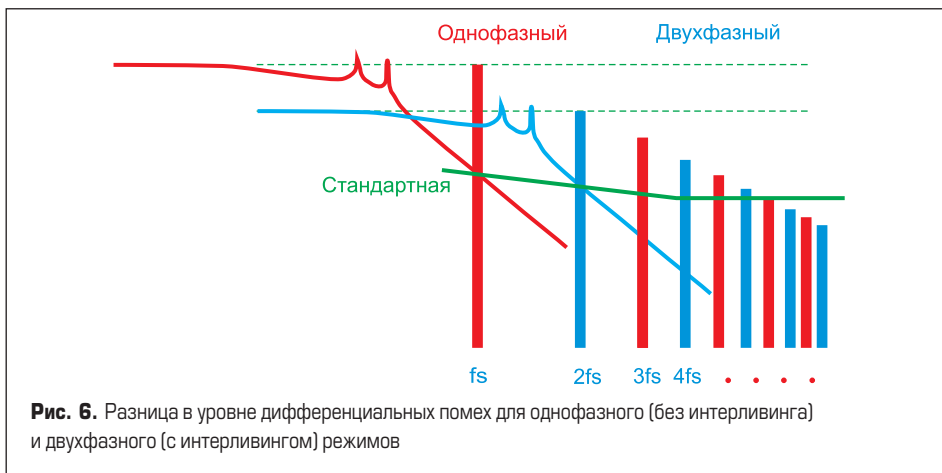


Рис. 4. Эквивалентная схема коммутации повышающего конвертора



и 3 замыкают основные цепи коммутации силовых транзисторов с высоким значением dv/dt . Минимизация площади этих петель позволяет уменьшить величину их паразитных индуктивностей и, таким образом, снизить уровень коммутационного звона. В данной конструкции индуктор помещен под печатной платой, при этом он расположен рядом с SiC MOSFET и выходом диода, что позволяет минимизировать силовые петли 1 и 3. Поскольку SiC MOSFET обладает высокой скоростью переключения, петля 2 цепи затвора также имеет важное значение при трассировке печатных плат. Настоятельно рекомендуется подключение Кельвина с отдельными

сигнальными выводами для цепи затвора. Выходной каскад драйвера затвора расположен вблизи радиатора MOSFET, чтобы связь сигнала управления и затвора SiC MOSFET была как можно короче. Кроме того, общий провод драйвера подключен к истоку SiC MOSFET отдельным проводом. SiC-транзистор имеет низкую прямую проводимость по сравнению с кремневыми приборами, из-за этого время включения и выключения, а также динамические потери SiC MOSFET тесно связаны с временем нарастания напряжения на затворе. Уменьшение внешнего сопротивления затвора напрямую приводит к снижению потерь переключения



и повышению КПД. Внешний резистор затвора может быть использован в качестве демпфера, позволяющего минимизировать влияние быстрого нарастания/спада напряжения на затворе. Однако здесь существует компромисс между уровнем ЕМІ и эффективностью. Уменьшение сопротивления может помочь повысить КПД, но при этом снижается и демпфирующий эффект относительно напряжения на затворе.

Минимизация паразитной емкости «затвор-сток»

В частности, необходимо уделить внимание распределенной емкости между дорожками подключения затвора и стока на печатной плате. Поскольку быстрые MOSFET способны обеспечить чрезвычайно высокое значение dv/dt , любая паразитная связь фронта выходного напряжения и затвора может привести к искажению сигнала управления и сбою в работе. Поскольку SiC MOSFET имеют крайне низкие значения емкости Миллера C_{gd} (C_{rss} в спецификации транзистора), величина паразитной емкости связи должна быть меньше C_{gd} для исключения искажения сигналов управления затвором. Как показано на рис. 5, выводы стока и затвора выполнены отдельными дорожками, расположенными на верхнем и нижнем слое платы без параллельной трассы между ними, что позволяет подавить паразитную емкость между стоком и затвором.

Режим чередования фаз (интерливинг) для двухканального повышающего преобразователя

На рис. 6 показана разница уровней дифференциальных помех для двухфазного (с интерливингом) режима и однофазного режима без интерливинга. Благодаря режиму чередования фаз первая гармоника дифференциальной помехи наблюдается на частоте $2 \times f_s$ (двойная частота переключения), соответственно, входные/выходные пульсации могут быть подавлены. Таким образом, частота среза фильтра ЕМІ будет выше при использовании интерливинга, это означает, что требуется меньший уровень подавления и для соответствия стандартным требованиям может использоваться более простой ЕМІ-фильтр.

Результаты экспериментов

Для подтверждения характеристик второго поколения 1200 В/20 А SiC MOSFET был разработан 10-кВт повышающий DC/DC-преобразователь, работающий в режиме жесткого переключения, показанный на рис. 7. При этом также проводилось сравнение скорости переключения и производительности кремниевого ключа 1200 В/40 А IGBT IGW40N120H3 и 1200 В/20 А SiC MOSFET. Размеры печатной платы 240×140×90 мм, использован контроллер ШИМ с интерливингом UCC28220 и драйвер затвора IC-IXYS IXDN609.

Эффективность преобразования

На рис. 8 представлены результаты измерения КПД для SiC MOSFET на частоте 100 кГц (первое поколение SiC MOSFET CMF20120D и второе поколение SiC MOSFET

C2M0080120D) и Si IGBT (IGW40N120H3) на частоте 20 кГц. Во всех случаях использовались выходные диоды Cree 1200 В SiC Шоттки C4D10120D, что необходимо для корректного сравнения; все данные получены при величине внешнего резистора затвора 2 Ом.

Из результатов теста видно, что применение ключа SiC на частоте коммутации, в пять раз превышающей F_{sw} кремниевого транзистора, позволяет добиться максимальной эффективности 99,3% при 100 кГц. При этом снижение потерь составляет 18% относительно IGBT, работающего на частоте 20 кГц. При небольших нагрузках, где КПД имеет наихудшее значение, в обоих случаях вариант 100 кГц SiC соответствует производительности кремниевого ключа на 20 кГц, этим подтверждается, что SiC MOSFET обладает очень низкими динамическими потерями. При любом способе сравнения оказывается, что преобразователи на основе карбидокремниевых структур имеют преимущество как по эффективности, так и по частоте коммутации.

Энергия включения и выключения E_{on} и E_{off}

Меньшее значение потерь переключения является ключевым преимуществом SiC MOSFET при работе на высокой частоте. На рис. 9 и 10 представлены эпюры включения C2M0080120D

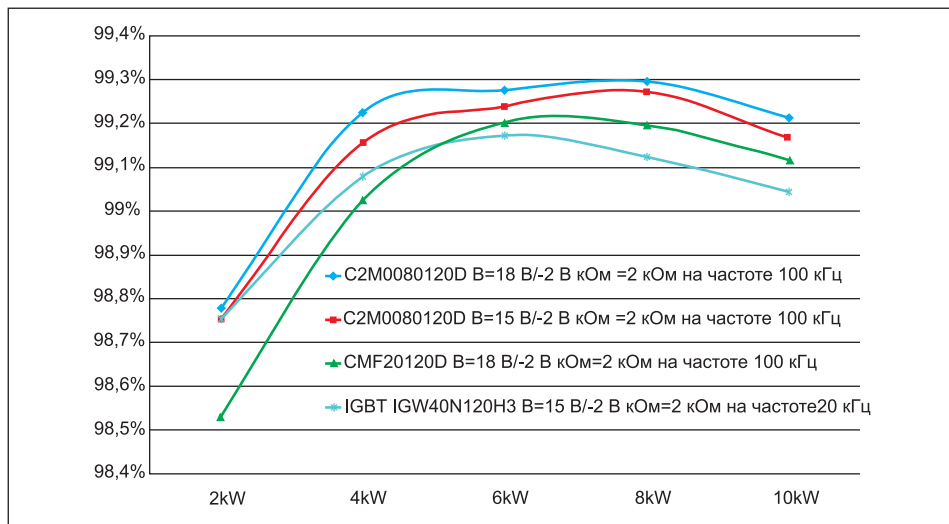


Рис. 8. Сравнение КПД 10-кВт преобразователя на базе 1-го и 2-го поколения SiC MOSFET и Si IGBT

и IGW40N120H3, $E_{on} = 54,5$ мДж для SiC MOSFET и 115,1 мДж для Si IGBT. На рис. 11 и 12 показаны эпюры выключения сигналов транзисторов C2M0080120D и IGW40N120H3, $E_{off} = 83,3$ мДж для SiC MOSFET и 911,5 мДж для Si IGBT, то есть преимущество SiC-структур примерно десятикратное. Полученные при тестировании общие потери переключения

для SiC MOSFET на частоте 100 кГц составляют 13,8 Вт, в то время как для IGBT на частоте 20 кГц этот показатель около 20,5 Вт, что примерно на треть выше. Это подтверждает тот факт, что применение SiC MOSFET вместо Si IGBT позволяет снизить потери переключения даже на значительно большей частоте коммутации, наиболее ярко это преимущество

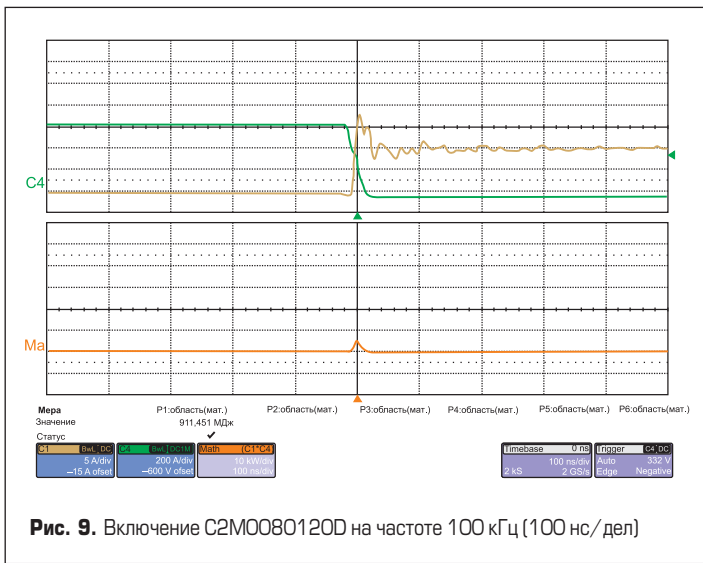


Рис. 9. Включение C2M0080120D на частоте 100 кГц (100 нс/дел)

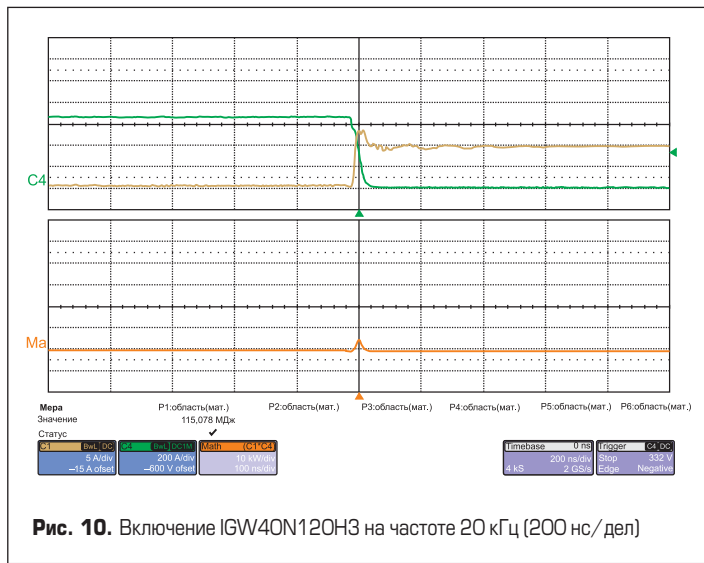


Рис. 10. Включение IGW40N120H3 на частоте 20 кГц (200 нс/дел)

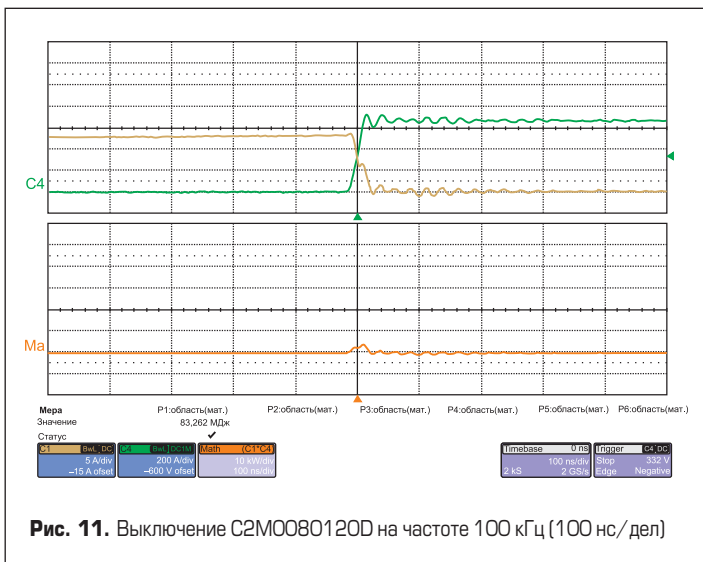


Рис. 11. Выключение C2M0080120D на частоте 100 кГц (100 нс/дел)

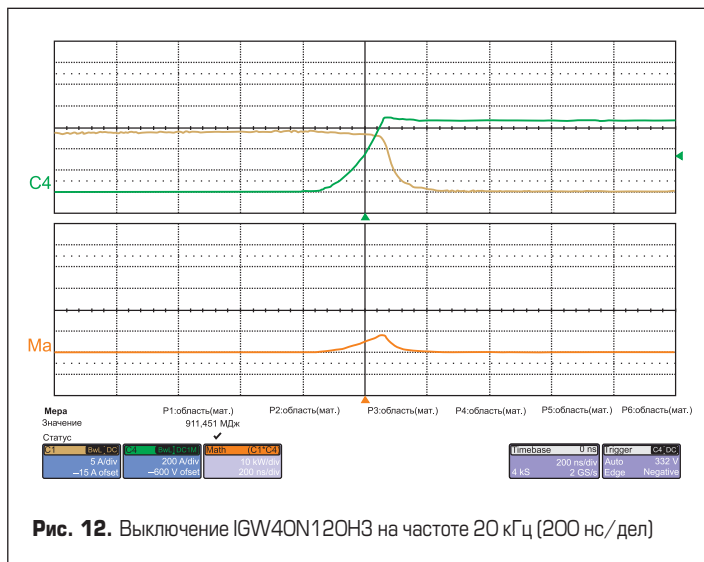
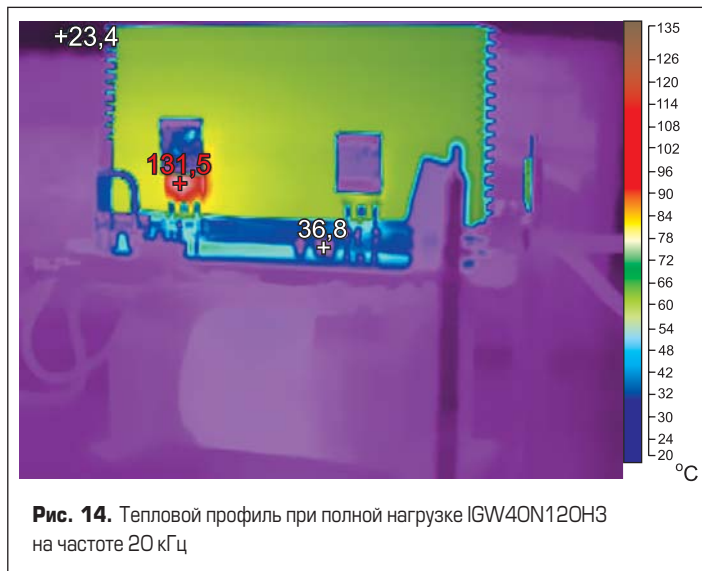
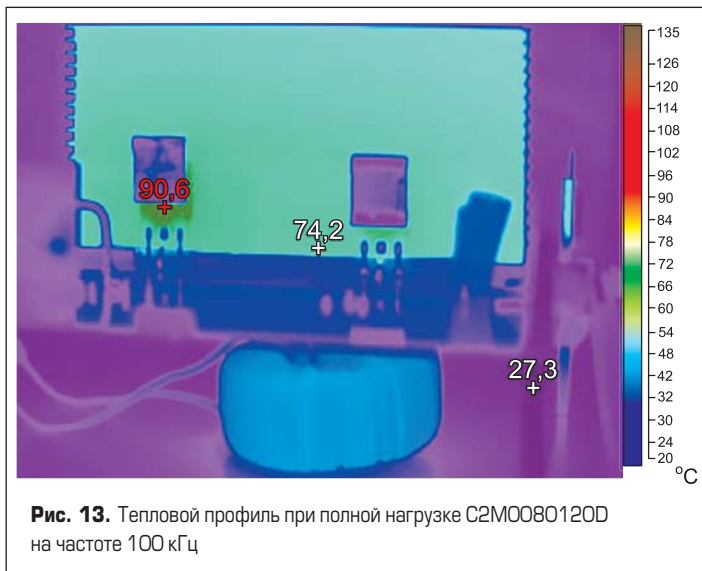


Рис. 12. Выключение IGW40N120H3 на частоте 20 кГц (200 нс/дел)



проявляется в режиме выключения. Ключи Si IGBT имеют большие потери выключения из-за наличия «хвостового» тока IGBT, свойственного даже высокоскоростным транзисторам.

Тепловые характеристики

На рис. 13 и 14 приведено сравнение теплового профиля преобразователя на базе SiC MOSFET C2M0080120D и Si IGBT IGW40N120H3. Тесты проведены при входном напряжении 450 В DC, выходном напряжении 650 В DC и полной нагрузке 2×5 кВт. Температура окружающей среды составляет +25 °С, применен режим естественного охлаждения радиатора, измерения проведены с открытым корпусом. При всех испытаниях использованы выходные диоды SiC Шоттки C4D20120D, что обеспечивает корректное сравнение обоих вариантов исполнения. Транзисторы SiC MOSFET имеют меньшие потери, благодаря чему температура корпуса оказывается ниже на 40 °С, т. е. более чем на 40% по сравнению с Si IGBT. Это значит, что для охлаждения SiC MOSFET можно применить более легкий, тонкий и дешевый радиатор. Кроме того, при использовании Si IGBT на частоте 20 кГц необходим большой дроссель с низкой плотностью мощности по сравнению с SiC MOSFET на частоте 100 кГц.

Описанный в статье повышающий преобразователь мощностью 10 кВт, работающий в режиме жесткого переключения с интерливингом, наглядно демонстрирует достоинства SiC-транзисторов и диодов в системах данного диапазона мощности. Преимущества от использования SiC-структур с присущей им энергетической эффективностью проявляются в уменьшении энергии потерь, снижении размеров и веса преобразователя, меньшей стоимости комплектующих и впечатляющем снижении рабочей температуры. Конвертеры, полностью разработанные на основе SiC-приборов, особенно эффективны в новых применениях силовой электроники, в результате чего все больше и больше SiC-устройств в различных корпусах находят применение на рынке. В ближайшем будущем ожидается массовый переход от кремниевых приборов на карбидокремниевые в системах мощностью от сотен ватт до сотен киловатт.

Заключение

IEEE Industrial Electronics 34th Annual Conference. IECON 2008. 10–13 Nov, 2008.

- Richmond J., Leslie S.; Hull B., Das M., Agarwal A., Palmour J. Roadmap for megawatt class power switch modules utilizing large area silicon carbide MOSFETs and JBS diodes // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition 2009. ECCE 2009.
- C2M0080120D datasheet. Cree Inc. March, 2013.
- Callanan B. Application Considerations for Silicon Carbide MOSFETs. Cree Inc. Jan, 2011.
- Vanam K., Barlow F., Ozpineci B., Marlino L. D., Chinthavali M. S., Tolbert L. M. and Elshabini A. High-temperature SiC Packaging for HEV traction applications // Proc. IMAPS Int. Symp. Microelectron. Nov, 2007.
- Sarkar T. and Mazumder S. K. Photonic compensation of temperature-induced drift of SiC-DMOSFET switching dynamics. // IEEE Trans. Power electron. Vol. 25, №.11. Nov, 2010.
- Zhang X., Domes D. and Rupp R. Efficiency improvement with silicon carbide based power modules // Proc. PCIM Europe Conf. Nurnberg, 2009.
- Sheng K. Maximum junction temperature of SiC power devices // IEEE Trans. Electro Devices. Vol. 56. № 2. Feb, 2009.

ЛИТЕРАТУРА

- Callanan R. J., Agarwal A., Burk A., Das M., Hull B., Husna F., Powell A., Richmond J., Sei-Hyung Ryu and Zhang Q. Recent Progress in SiC DMOSFETs and JBS Diodes at Cree //