

MOSFET-модуль на основе SiC

заменяет кремниевые IGBT-модули
с втрое большим номинальным током
в инверторах напряжения

В статье приводится оценка работы в широко распространенных инверторах напряжения (VSI) на обычных частотах серийно выпускаемых модулей на SiC и кремниевых модулей с номинальным напряжением 1200 В. На низкой частоте 5 кГц SiC-модуль с током 100 А способен заменить кремниевый модуль с током как минимум 150 А, обеспечив значительное преимущество по рабочим характеристикам и надежности. На частоте 16 кГц модуль на SiC с током 100 А заменяет кремниевый модуль с током до 300 А с соблюдением требований к работе при перегрузке и к запасу по тепловыделению. Малые потери при переключении, свойственные полевым МОП-транзисторам (MOSFET) на основе карбида кремния (SiC), обеспечивают снижение стоимости конечной системы даже на низкой частоте.

**Мринал К. Дас
(Mrinal K. Das)**

Введение

В настоящее время карбид кремния — это единственный материал с большой шириной запрещенной зоны, удовлетворяющий потребности рынка силовой электроники в высококачественных устройствах с напряжением 1200 и 1700 В. Технология диодов на основе карбида кремния процветает на рынке более десятилетия, при этом недавно появилось много ключей, позволяющих создавать «чисто карбид-кремниевые» (all-SiC) схемные решения. Например, в ноябре 2012 г. компания Cree объявила о том, что первый all-SiC модуль (MOSFET CAS100H12AM1 на SiC с напряжением 1200 В и током 100 А), прошедший полный цикл промышленных испытаний и имеющий полный комплект документации, готов к безотлагательному проведению анализа разработки и к массовому производству (рис. 1). Полумостовой модуль с габаритными размерами 50×90×25 мм соз-

дан на основе промышленно выпускаемого набора элементов, включающего пять MOSFET 1-го поколения на карбиде кремния с напряжением 1200 В и сопротивлением 80 МОм (CPMF-1200-S080B) и пять диодов Шоттки 2-го поколения на карбиде кремния с напряжением 1200 В и током 10 А (CPW2-1200-S010B) на ключ. Этот all-SiC модуль смонтирован на подложке из алюминий-карбида кремния (Al-SiC) для повышения качества работы при тепловом расширении и снижении веса по сравнению с традиционными медными подложками. Силовые полупроводниковые приборы изолируют от подложки диэлектриком из нитрида кремния (Si_3N_4), отличающимся тем, что паяное соединение активного металла с медью способно выдерживать циклические перепады температуры и мощности в широких пределах. Эти свойства модуля обеспечивают максимальную надежность корпусов высококачественных кристаллов SiC.

Конструкция инвертора напряжения (VSI)

Благодаря значительному снижению потерь при переключении у устройств на SiC ожидается, что MOSFET на его основе с током 100 А смогут заменить кремниевые биполярные транзисторы с изолированным затвором с гораздо большим током. Чтобы проиллюстрировать этот факт и дать ему количественную оценку, опишем базовый трехфазный инвертор напряжения, встречающийся во многих преобразователях постоянного тока в переменный, например в электроприводе, в источниках бесперебойного питания и в инверторах устройств, ис-



Рис. 1. Серийно выпускаемый силовой модуль CAS100H12AM1 на SiC с номинальным напряжением 1200 В и током 100 А

пользующих энергию солнца. Его основные характеристики приведены в таблице 1.

В ходе анализа сравниваются кремниевые Trench-Field Stop IGBT-модули полумоста 6-го поколения с током 150 А и 200 А с MOSFET-модулями полумоста на основе SiC с током 100 А (таблица 2). При номинальном среднеквадратическом значении тока устройства (75 А) значения прямого падения напряжения для MOSFET на SiC с током 100 А и для кремниевого IGBT с током 150 А примерно одинаковы при $T_j = +150\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 2). В условиях перегрузки (при среднеквадратическом значении тока 90 А) у карбид-кремниевого MOSFET с током 100 А прямое падение напряжения на 0,3 В выше, чем у кремниевого IGBT с током 150 А (при $T_j = +150\text{ }^\circ\text{C}$). Однако превосходная переключающая способность MOSFET на SiC проявляется в снижении суммарных потерь при переключении ($E_{\text{вкл}} + E_{\text{выкл}} + E_{\text{гг}}$) в 4–7 раз по сравнению с кремниевым IGBT с током 150 А. Это обеспечивает значительное снижение общих потерь в полупроводнике при использовании SiC-компонентов даже в системах с низкой частотой переключения (5 кГц). Снижение общих потерь в полупроводнике обеспечивает повышение граничной температуры (выше надежность) или увеличение мощности системы.

Результаты моделирования инвертора напряжения

Моделирование инвертора напряжения, описанного в таблице 1, проводилось при помощи программного обеспечения, предоставленного производителем кремниевых IGBT, с использованием в качестве входных данных параметров модулей из таблицы 2. Моделирование проводилось для двух значений рабочего тока (номинального со среднеквадратическим значением 75 А и тока перегрузки со среднеквадратическим значением 90 А), а также для двух значений частоты переключения (5 и 16 кГц), при одинаковых размерах радиатора для кремниевого IGBT-модуля с током 150 А и MOSFET-модуля на SiC с током 100 А.

Как показано в таблице 3, при работе на частоте 5 кГц кремниевый IGBT-модуль с током 150 А при номинальных параметрах и в услови-

Таблица 1. Технические характеристики инвертора напряжения

Параметр	Значение
Среднеквадратическое значение выходного напряжения, В	до 415
Среднеквадратическое значение номинального выходного тока, А	75
Перегрузочная способность	20% в течение 5 мин. при среднеквадратическом значении тока 90 А
Напряжение звена постоянного тока, В	–690 постоянного тока
Основная частота, Гц	60
Частота переключения, кГц	Минимальная – 5
	Номинальная – 16
Номинальный коэффициент мощности нагрузки	0,9
Способ охлаждения	Принудительное воздушное
Максимальная температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$	+50

Таблица 2. Ключевые параметры кремниевых IGBT-модулей с током 150 и 200 А Si и MOSFET-модуля на SiC с током 100 А

Характеристика	MOSFET на основе SiC 100 А	Кремниевый IGBT	
		150 А	200 А
Номинальный ток при $T_{\text{корпуса}} = +100\text{ }^\circ\text{C}$, А	100	150	200
Номинальное напряжение, В	1200	1200	1200
Максимальная температура перехода, $^\circ\text{C}$	+150	+150	+150
$V_{\text{сг}} V_{\text{дс}}$ при 100 А, +150 $^\circ\text{C}$, В	2,0	1,6	1,5
V_f диода при 100 А, +150 $^\circ\text{C}$, В	2,5	1,5	1,4
Потери при переключении ($E_{\text{вкл}} + E_{\text{выкл}}$) при 100 А, 600 В, +150 $^\circ\text{C}$, мДж	3,9	16,5	19,3
Потери диода ($E_{\text{вкл}}$) при 100 А, 600 В, +150 $^\circ\text{C}$, мДж	0,0	8	9,5
Тепловое сопротивление участка «переход ключа–корпус», $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,240	0,140	0,100
Тепловое сопротивление участка «корпус–радиатор», $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,026	0,025	0,025
Размеры, см	9×5×2,5	9,2×4,5×3	9,7×4,5×3
Вес, г	150	240	250

ях перегрузки поддерживает среднюю температуру перехода ниже максимально допустимого значения 150 $^\circ\text{C}$. Однако повышение частоты переключения до 16 кГц приводит к тому, что среднеквадратическое значение максимально допустимого тока становится равным 75 А, не обеспечивается работа при перегрузке и нет запаса по тепловыделению. Чтобы обеспечить способность выдерживать 20%-ную перегрузку (среднеквадратическое значение тока 90 А), модуль кремниевого IGBT с током 150 А нужно заменить на модуль кремниевого IGBT с током 200 А. Если необходим запас по тепловыделению в условиях перегрузки, потребуются модуль кремниевого IGBT с током 250 или 300 А. С другой стороны, модуль MOSFET на SiC с током 100 А способен выдерживать все условия работы, заданные для этого инвертора напряжения, на обеих частотах.

Эффективное переключение модуля MOSFET на SiC также обеспечивает преимущество по тепловыделению. При среднеквадратическом значении тока 75 А и частоте 5 кГц потери при переключении уменьшаются на 13,7%, что приводит к снижению температуры перехода на 2,1 $^\circ\text{C}$. Потери диода становятся меньше на 58,3%, что ведет к снижению температуры перехода на 9,2 $^\circ\text{C}$. Общие потери в полупроводнике снижаются на 23,2% (или 145,3 Вт). Кроме того, температура радиатора и корпуса понижается на 7,4 и 8,0 $^\circ\text{C}$ соответственно, вследствие чего возрастает срок службы материала, в котором осуществляется тепловое взаимодействие. По сути, модуль MOSFET на SiC обеспечивает значительное снижение потерь и создает потенциал для повышения надежности даже в системах с низкой частотой переключения.

Таблица 3. Результаты моделирования для инвертора напряжения с модулями кремниевых IGBT с током 150 и 200 А и модулем MOSFET на SiC с током 100 А

Параметр	Кремниевые IGBT-модули					MOSFET-модули на основе SiC			
	150	150	150	200	200	100	100	100	100
Номинальный ток модуля, А	150	150	150	200	200	100	100	100	100
Среднеквадратическое значение рабочего тока, А	75	90	75	75	90	75	90	75	90
Частота переключения, кГц	5	5	16	16	16	5	5	16	16
Потери при переключении ключа, Вт	37,0	43,2	118,5	124,2	146,6	7,6	9,1	24,2	29,1
Потери при переключении диода, Вт	15,2	17,7	48,7	58,0	66,9	0,0	0,0	0,0	0,0
Потери проводимости ключа, Вт	44,9	58,4	44,9	40,0	51,9	63,1	88,3	64,2	90,9
Потери проводимости диода, Вт	7,1	9,1	7,1	6,5	8,2	9,3	15,4	9,7	16,3
Средняя температура радиатора, $^\circ\text{C}$	+86,1	+94,4	+125,8	+109,9	+121,5	+78,7	+90,4	+85,2	+98,8
Средняя температура корпуса, $^\circ\text{C}$	+88,7	+97,6	+131,3	+115,6	+128,3	+80,7	+93,4	+87,7	+102,4
Средняя температура перехода ключа, $^\circ\text{C}$	+100,1	+111,8	+154,1	+132,1	+148,2	+98,0	+116,7	+109,0	+131,1
Средняя температура перехода диода, $^\circ\text{C}$	+93,1	+102,9	+142,7	+126,0	+140,3	+83,9	+98,1	+90,8	+107,3
Общие потери в полупроводнике, Вт	625,2	770,4	1315,3	1372,0	1641,6	479,9	676,9	588,9	817,7

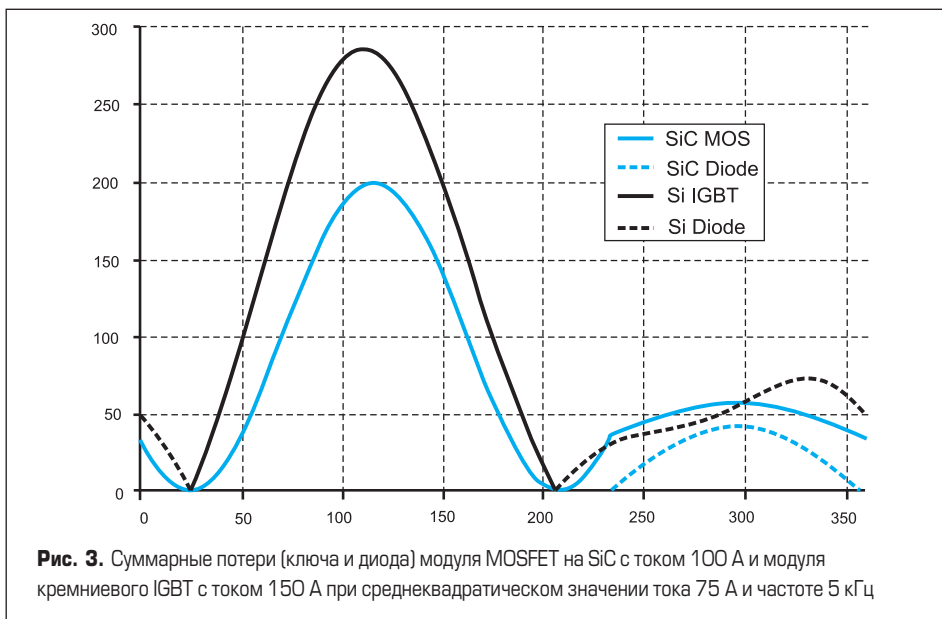
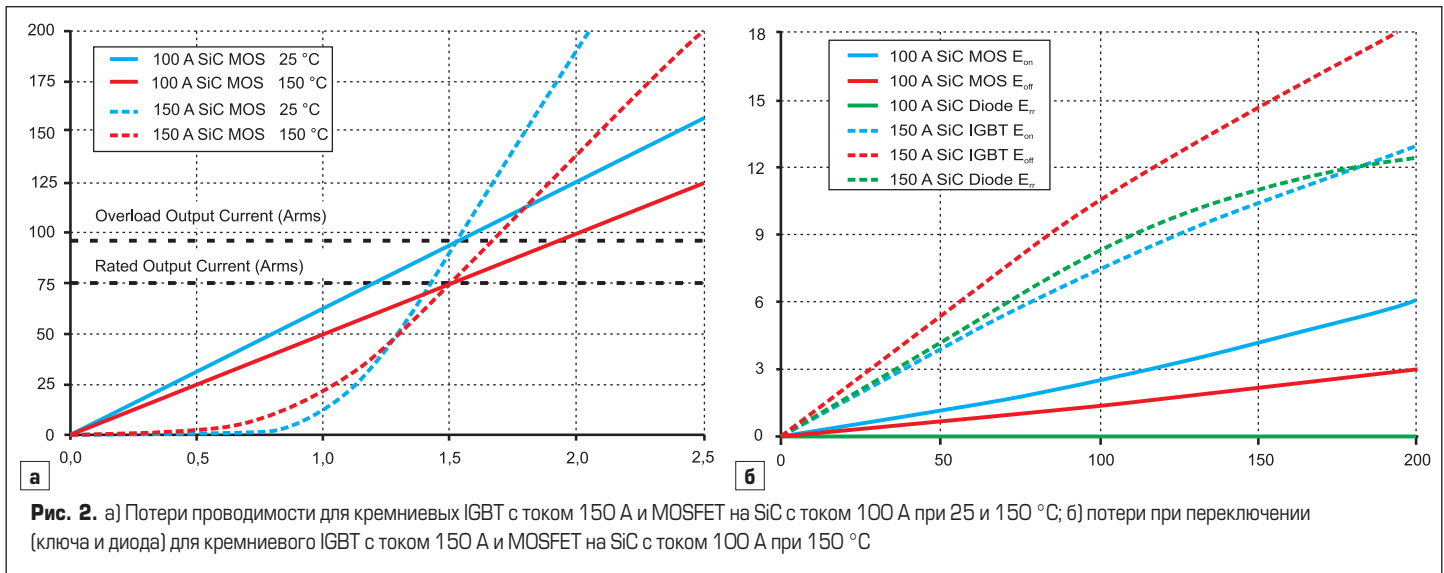


Рис. 2 и 3 показывают, что отношение пикового значения к среднему для кривой суммарных потерь энергии у MOSFET на SiC составляет всего 2,81, а у кремниевого IGBT — 3,48 (примерно на 24% выше). При сходном тепловом сопротивлении у MOSFET на SiC будут наблюдаться температурные пульсации при нормальной работе меньшие, чем у кремниевого IGBT, что также повышает надежность модуля.

При повышении частоты переключения с 5 до 16 кГц преимущества технологии MOSFET на SiC становятся еще более заметными. Чтобы удовлетворять условиям перегрузки, кремниевый модуль IGBT требует ток 200 А, не обеспечивая при этом никакого запаса по тепловыделению. При номинальных условиях (среднеквадратическое значение тока 75 А) для модуля MOSFET на SiC с током 100 А величина общих потерь в полупроводнике составляет 57,1% (или

783,1 Вт), что ниже, чем у кремниевого модуля IGBT с током 200 А. Это приводит к значительному снижению температуры перехода, корпуса и радиатора и обеспечивает выигрыш в надежности. Чтобы выполнить требования к запасу по тепловыделению, требуется кремниевый модуль IGBT с током 250 или 300 А.

Выводы

Моделирование инвертора напряжения показывает, что модуль MOSFET на SiC с током 100 А способен заменить модуль кремниевого IGBT с током 150, 200 и даже 300 А, в то же время обеспечивая повышение качества работы, снижение потерь и создавая потенциал для повышения надежности. Поскольку на системном уровне номинальный ток для SiC не равен номинальному току для кремния, при разработке устройств на основе карбида кремния требуется оценка стоимости единицы мощности системы (\$/кВт) как ключевая мера затрат, а не стоимости единицы номинального тока. Поскольку кривая стоимости силовых устройств на SiC быстро идет вниз по мере увеличения объема выпуска, накопления производственного опыта и применения новых материалов и устройств, такие all-SiC модули, как CAS100H12AM1, приживаются на рынке благодаря снижению стоимости конечной системы при дополнительном повышении качества работы и надежности.