

Транзисторы на карбиде кремния:

перспективы развития и снижение себестоимости готового изделия

Антон Гореев

goreev@promelec.ru

Физические параметры материала SiC значительно превосходят параметры кремния (Si) и арсенида галлия (GaAs). Так, электрическая прочность SiC в 10 раз выше, удельное сопротивление достаточно низкое, радиационная стойкость высокая, крайне малые обратные токи благодаря относительно большой ширине запрещенной зоны, высокая теплопроводность компонентов на SiC, высокое быстродействие, высокие допустимые рабочие температуры (до +200 °С).

Но ни для кого не секрет, что производство таких транзисторов обходится недешево, что отражается на стоимости конечного компонента. Кристаллы SiC выращивают из газовой фазы или из растворов в расплаве. Наибольшее распространение получил метод сублимации, который заключается в получении кристаллов из газовой фазы в высокотемпературных графитовых тиглях при температуре +2500 °С. Помимо этого, доставляет сложность и травление материала. Получению высококачественного материала препятствуют микропоры, которые образуются во время роста эпитаксиального слоя (рис. 1).

Данный процесс образования микропор имеет прямую связь с величиной вектора Бюргера и привязан к теории Франка, а именно: вакантные места группируются внутри кристалла, главным образом, около дислокаций или других нарушений решетки, создающих концентрацию напряжений. При известных условиях вакансии скапливаются и самопроизвольно образуют ничтожных размеров полости или поры; например, группирование вакансий в одном слое может породить так называемую сидячую (то есть мало проводимую) дислокацию, которая сама по себе уже представляет устойчивый зародыш микропоры. Эти микропоры и являются существенной проблемой массового применения SiC, к тому же они могут являться причиной выхода компонента из строя.

Существует ряд способов решения данной проблемы, один из которых представлен на рис. 2 [1]. Данный метод был разработан компанией TDI (Technologies and Devices International, Inc.). Суть

его заключается в следующем: каналы микропор в стандартных SiC-подложках заполняются карбидом кремния, а затем поверх него выращивается новый SiC эпитаксиальный слой. Несмотря на то, что разрабатываемые способы снижают плотность распределения микропор в подложке, качество материала оставляет желать лучшего.

Существует перспектива получения SiC изначально хорошего качества. Так, в 2007 г. компании Cree удалось получить подложку *n*-типа диаметром 100 мм абсолютно без пор, а в 2010 г. — подложку диаметром 150 мм [2]. Несомненно, эти достижения позволяют снизить стоимость изготавливаемых компонентов.

Помимо компании Cree, существует ряд других компаний, которые разрабатывают электронные компоненты на SiC. Среди них — STMicroelectronics (STM), которая на фоне успешного выпуска диодов на SiC разработала MOSFET SCT20N120 [3]

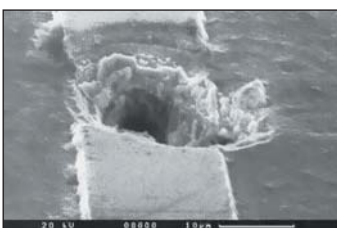


Рис. 1. Микропора в карбиде кремния

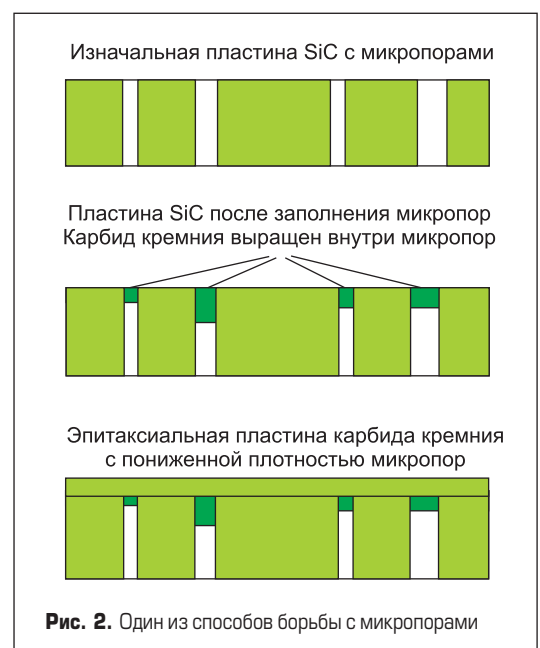


Рис. 2. Один из способов борьбы с микропорами

и SCT30N120 [4]. Параметры этих транзисторов приведены в таблице 1.

Стоит обратить внимание на прилагаемые в документации графики зависимости изменения сопротивления канала стока-исток в открытом состоянии от температуры (рис. 3).

Как видим, изменения незначительны: при росте температуры с +25 до +200 °C в транзисторе SCT20N120 сопротивление канала увеличивается всего на 18%, а в SCT30N120 — на 30%. Таким образом, можно совершенно уверенно использовать транзистор на более

высокий номинальный ток при повышенной температуре эксплуатации, а это существенное преимущество. Для примера рассмотрим аналогичный график для MOSFET STW12N120K5 на структуре MDmesh K5 (рис. 4): при таком же изменении температуры сопротивление канала увеличивается на 160%. Превышение по сравнению с Si MOSFET колоссальное.

Стоит отметить и другие особенности SiC MOSFET, а лучше просто провести сравнение с последними разработками Si IGBT и SiC JFET. Несмотря на то, что в последнее

время Si IGBT сделали огромный рывок вперед по сравнению с предыдущими версиями, а именно, значительно снизились потери на переключение, потери SiC MOSFET остаются ниже. Причем не только динамические, но и статические.

Для сравнения характеристик SiC MOSFET (SCT30N120), SiC JFET (1,2 кВ 80 мОм) и Si IGBT (таблица 2) была собрана схема — простой 5-кВт повышающий DC/DC-преобразователь в режиме непрерывной проводимости (CCM) без обратной связи. Плата охлаждалась радиатором с закрепленным на нем вентилятором [5].

Фотография эксперимента представлена на рис. 5.

На рис. 6 представлен график статических потерь.

На графике (рис. 6) присутствуют две граничные точки, которые разделяют области наилучшего применения того или иного компонента. При температуре эксплуатации +25 °C и токе до 25 А падение напряжения на открытом канале SiC MOSFET остается ниже, чем у Si IGBT. Но поскольку IGBT имеет нелинейную характеристику с более выраженной крутизной, в области выше 25 А падение напряжения V_{cesat} становится ниже, чем у SiC MOSFET. Аналогичная ситуация и при температуре +175 °C, только граница области смещается до 35 А. Если сравнивать с суммарными потерями, то это преимущество Si IGBT не играет существенной роли.

Таблица 1. Параметры транзисторов SCT20N120 и SCT30N120

Параметр		SCT20N120	SCT30N120
Напряжение между стоком и истоком V_{ds} , В		1200	
Напряжение насыщения затвор-исток V_{gs} , В		-10/+25	
Непрерывный ток стока при $t = +25$ °C I_{D} , А		20	45
Непрерывный ток стока при $t = +100$ °C I_{D} , А		16	34
Импульсный ток стока I_{dm} , А		45	90
Мощность транзистора при $t = +25$ °C P_{tot} , Вт		175	270
Температура хранения T_{stg} , °C		-55...+200	
Допустимая температура кристалла T_j , °C		-55...+200	
Сопротивление сток-исток открытого канала $R_{ds(on)}$, мОм	$V_{GS} = 20$ В, $I_D = 10$ А	215; 290	80; 100
	$V_{GS} = 20$ В, $I_D = 10$ А, $T_j = +150$ °C	240	90
	$V_{GS} = 20$ В, $I_D = 10$ А, $T_j = +200$ °C	280	100
Пороговое напряжение включения $V_{gs(th)}$, В		$V_{DS} = V_{GS}$, $I_D = 1$ мА	
Суммарный заряд затвора Q_{g} , нКл		$V_{DD} = 800$ В, $I_D = 10$ А, $V_{GS} = 0/20$ В	
Потери	при включении E_{on} , мкДж	160	500
	при отключении E_{off} , мкДж	90	350
	при включении E_{on} , мкДж	165	500
	при отключении E_{off} , мкДж	100	400
Входная емкость C_{iss} , пФ		650	1700
Выходная емкость C_{oss} , пФ		65	130
Емкость «затвор-сток» C_{rss} , пФ		14	25
Задержка включения $t_{d(on)}$, нс		10	19
Время нарастания t_r , нс		17	28
Задержка выключения $t_{d(off)}$, нс		27	45
Время спада t_f , нс		16	20

Таблица 2. Сравнительные характеристики испытуемых компонентов

Компоненты	Параметры $R_{ds(on)}/V_{ce}$
SiC MOSFET, HIP247	80 мОм, 20 В (V_{gs}) при +25 °C; 100 мОм, 20 В (V_{gs}) при +200 °C
SiC JFET normally-off, TO-247	80 мОм, 3 В (V_{gs}) при +25 °C; 200 мОм, 3 В (V_{gs}) при +125 °C
Si IGBT, TO-247	2,1 В при 15 В (V_{ge}), 25 А (эквивалентно 84 мОм) при +25 °C; 2,7 В при 15 В (V_{ge}), 25 А при +175 °C

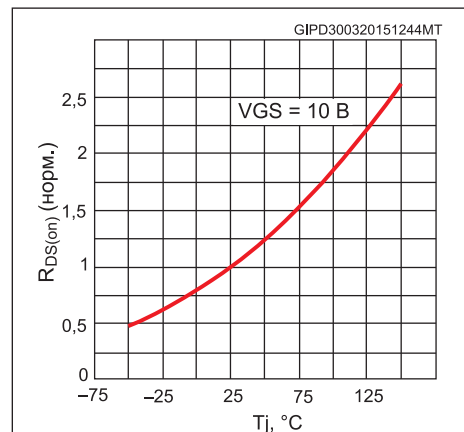
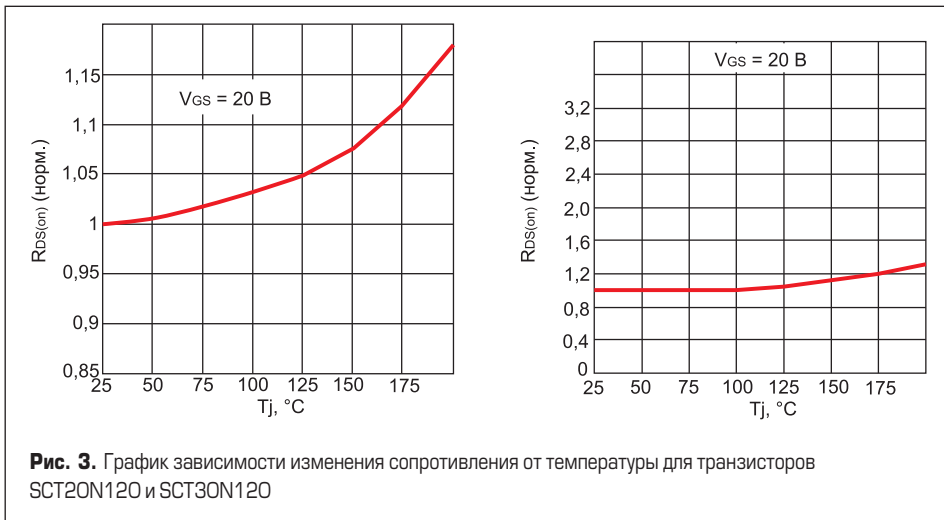


Рис. 4. График зависимости изменения сопротивления от температуры для транзистора STW12N120K5

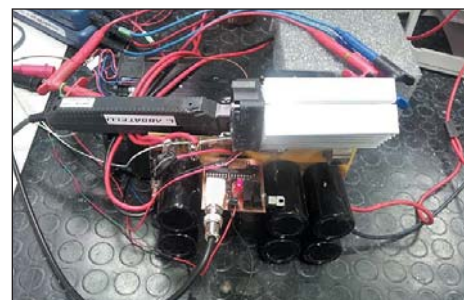
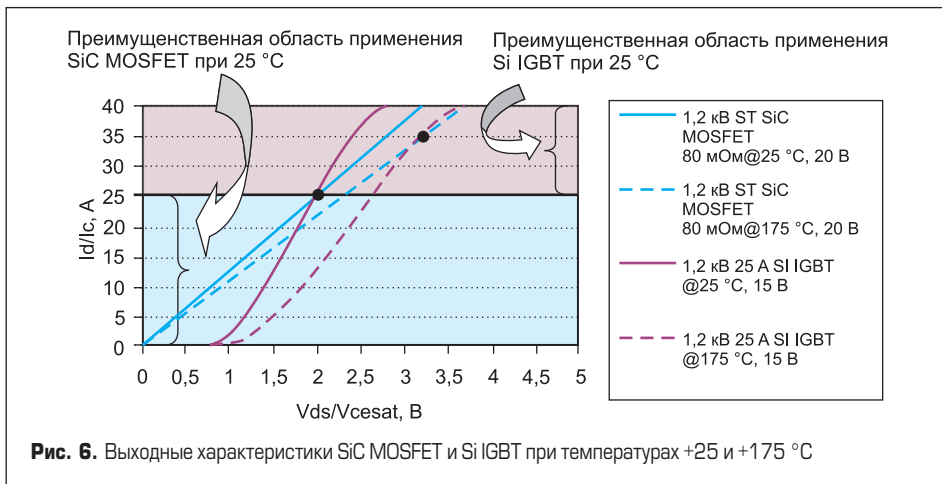


Рис. 5. Фотография повышающего DC/DC-преобразователя



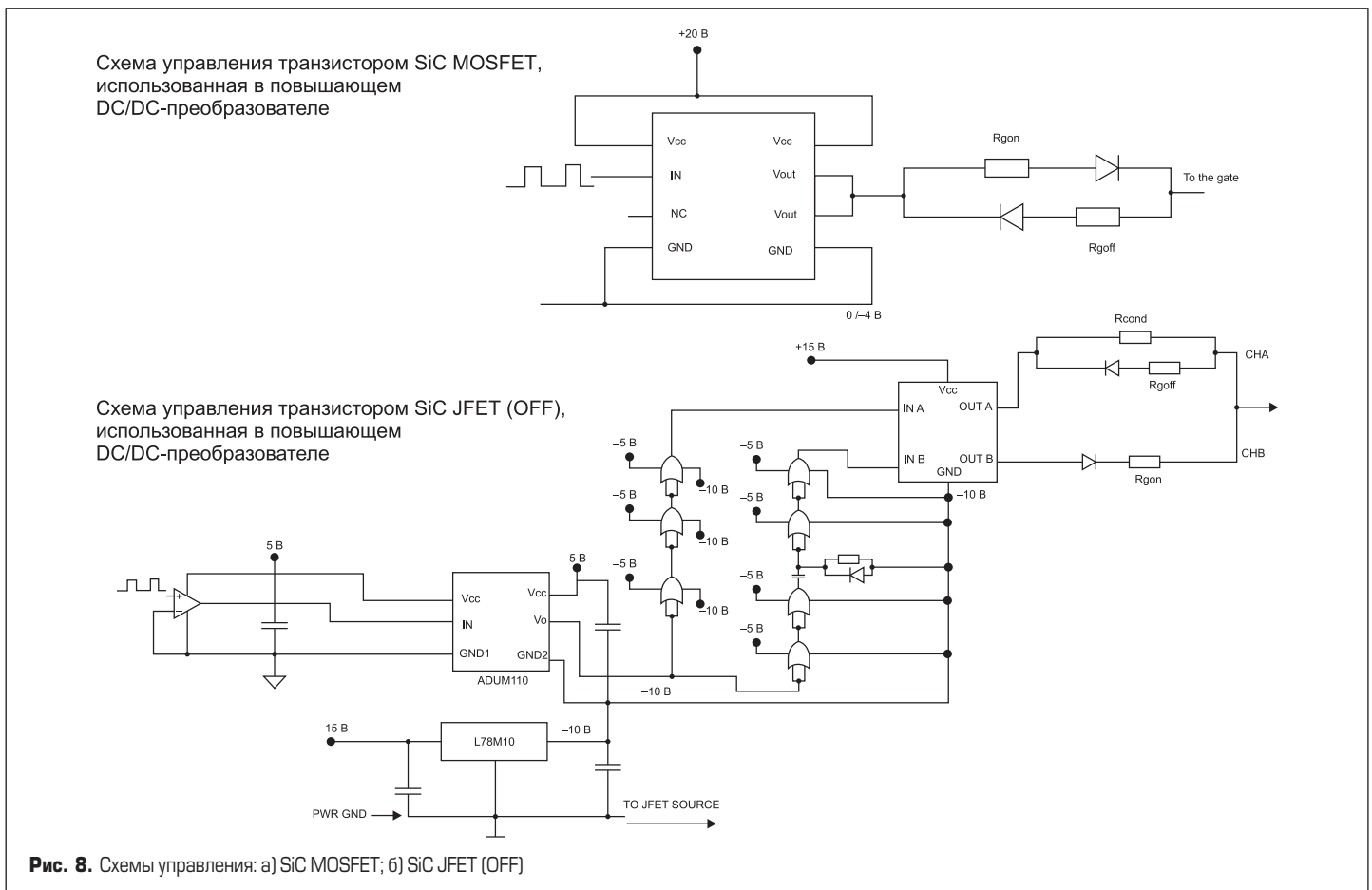
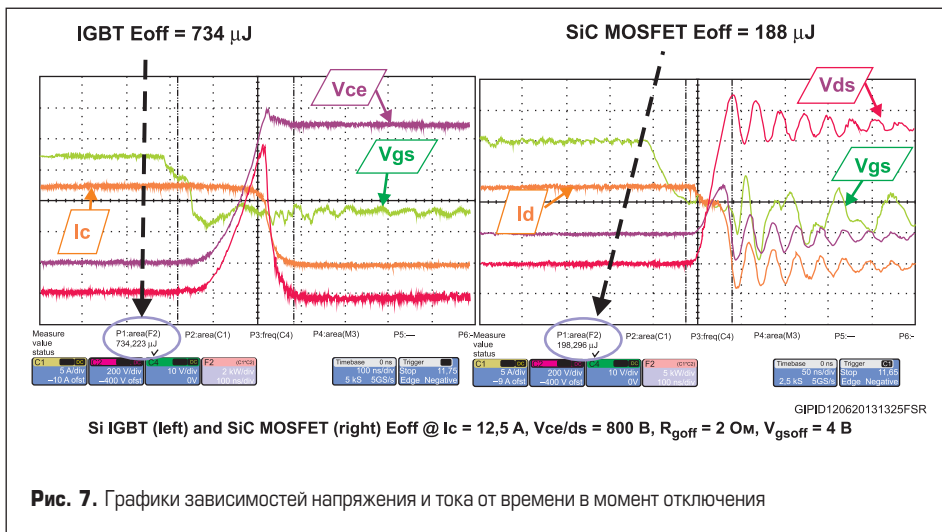
Рассмотрим динамические потери, приведенные на рис. 7. Анализ проводился при частоте 25 кГц.

Исходя из значений потерь, полученных экспериментальным путем, можно сделать вывод, что потери SiC MOSFET при переключении намного ниже, чем у Si IGBT. Об этом явно свидетельствует график мощности (отмечен светло-розовым цветом). Столь высокие потери Si IGBT при отключении появляются из-за «хвоста», который образуется в связи с рекомбинацией неосновных носителей заряда. Потери при включении были аналогичные.

Проведем сравнение с другим конкурирующим компонентом, а именно с SiC JFET. Здесь прежде всего необходимо обратить внимание на схемы управления (рис. 8).

Управление SiC MOSFET осуществляется с помощью драйвера положительным напряжением +20 В для обеспечения наименьшего сопротивления канала $R_{ds(on)}$. Для отключения используется напряжение -4 В, хотя это не является обязательным условием — достаточно будет и потенциала земли. Аналогичная схема управления была приведена и для IGBT, только управление осуществлялось напряжением +15 В.

Что касается схемы управления SiC JFET, то здесь ситуация иная. Для задания специальной формы заряда затвора управление транзистором осуществлялось по двойному каналу: канал «В» обеспечивает быстрый заряд затвора коротким импульсом напряжения (200 нс), канал «А» отключает транзистор и способствует удержанию канала во включенном состоянии при низком заряде. Особое внимание следует уделить синхронизации каналов, поскольку от этого зависят ди-



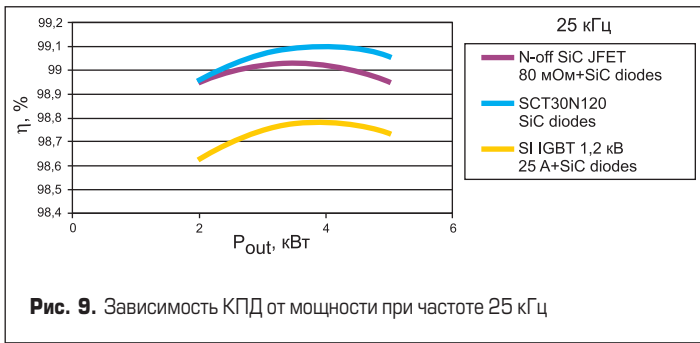


Рис. 9. Зависимость КПД от мощности при частоте 25 кГц

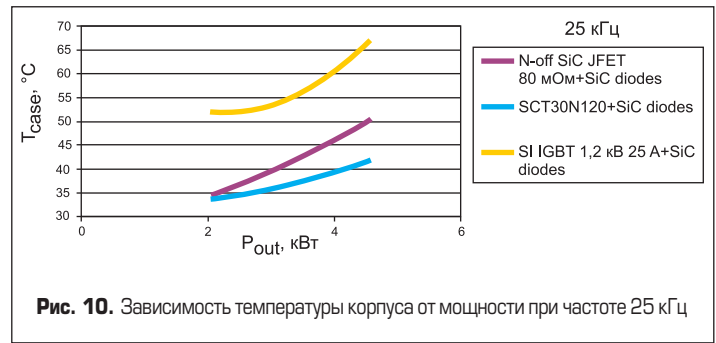


Рис. 10. Зависимость температуры корпуса от мощности при частоте 25 кГц

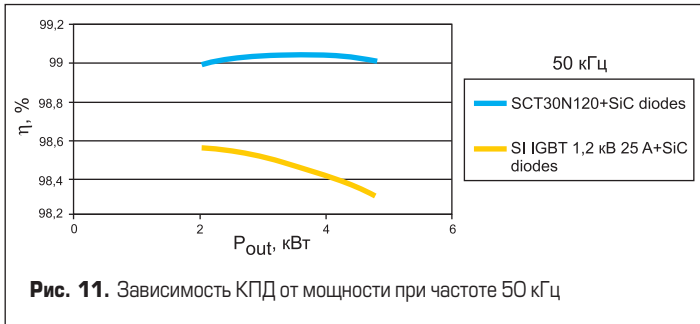


Рис. 11. Зависимость КПД от мощности при частоте 50 кГц

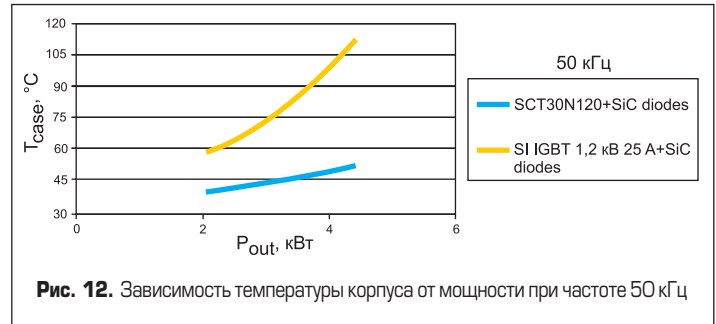


Рис. 12. Зависимость температуры корпуса от мощности при частоте 50 кГц

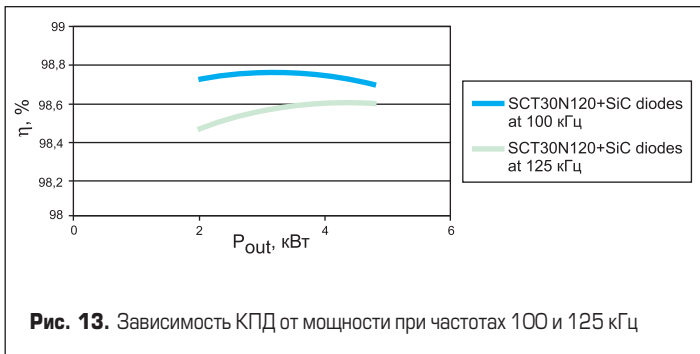


Рис. 13. Зависимость КПД от мощности при частотах 100 и 125 кГц

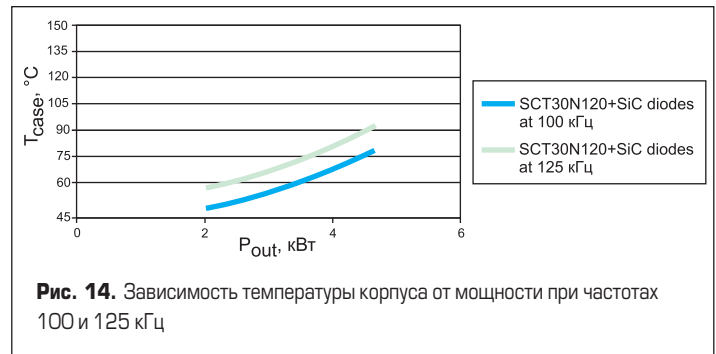


Рис. 14. Зависимость температуры корпуса от мощности при частотах 100 и 125 кГц

намические характеристики транзистора. К тому же для снижения вероятности нежелательного включения SiC JFET необходимо подать большее отрицательное напряжение –10 В.

Все эти особенности необходимо учитывать при управлении SiC JFET, что в значительной степени усложняет схему управления, в отличие от SiC MOSFET.

Тестирование всех трех компонентов (Si IGBT, SiC MOSFET и SiC JFET) на 5-кВт повышающем DC/DC-преобразователе проводилось на частоте 25 кГц. Оценивались как эффективность, так и температура корпуса в зависимости от мощности. Графики приведены на рис. 9 и 10.

Эффективность работы компонента SiC MOSFET во всем диапазоне мощности незначительно превышает КПД SiC JFET и 1,5% — КПД IGBT, при этом температура корпуса SiC MOSFET намного ниже, чем у остальных компонентов.

На частоте 50 кГц Si IGBT достигает своего предела, работа становится небезопасной, снижается КПД (рис. 11), а температура вырастает на 90 °C (рис. 12). После нескольких минут работы плата с Si IGBT была остановлена, так как была достигнута максимально допустимая температура.

Поскольку для SiC MOSFET были заявлены частоты до 100 и 125 кГц, то, естественно, были сняты характеристики транзистора на этих частотах (рис. 13 и 14).

Также компания STM предоставила диаграммы процессов переключения SiC MOSFET

на частоте 125 кГц (рис. 15). Потери при переключении достигли значения 765 мкДж.

Подводя итоги, следует отметить, что преимущества SiC MOSFET доказаны. Цена транзисторов вполне объяснима, поскольку технология выращивания материала дорогостоящая. Но если посмотреть на эти транзисторы с другой стороны, оценив их преимущества по сравнению с другими компонентами, а именно схему управления, систему охлаждения и эффективность работы, то выбор сразу станет очевидным. Любой разработчик прекрасно знает, что с ростом частоты снижаются размеры индуктивных компонентов в схеме согласно закону

$$L = 0,5U_{вх} / \Delta I_{пульсаций} \times 1/f,$$

а следовательно, и габариты изделия.

Благодаря свойствам SiC MOSFET расширяется диапазон мощности, в которой можно построить однокаскадную топологию вместо двухкаскадной, к примеру светодиодные драйверы [6]. К тому же наука не стоит на месте, и дальнейшее совершенствование технологии получения пластин SiC приведет к снижению их стоимости.

Литература

1. www.marubeni-sunnyvale.com/tdi/products/SiC_gen.html
2. <http://optics.org/press/136>
3. www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00118513.pdf
4. www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/DM00053079.pdf
5. Rubino B., Catalisano G., Abbatelli L., Buonomo S. Comparative analysis of driving approach and performance of 1.2 kV SiC MOSFETs, Si IGBTs, and normally-off SiC JFETs. STMicroelectronics.
6. Schupbach M., Ayerbe E. Advances in SiC MOSFET Technology Drive Down Cost of High-Bay and Outdoor Lighting Fixtures. Cree.

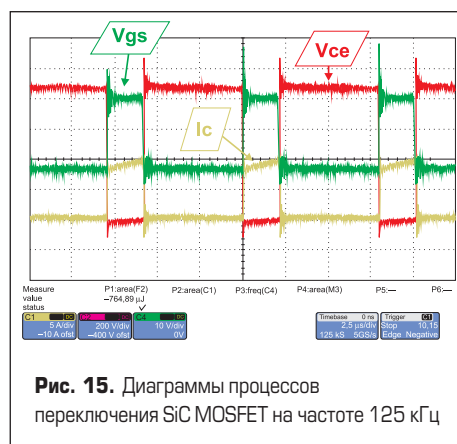


Рис. 15. Диаграммы процессов переключения SiC MOSFET на частоте 125 кГц