

Джафер Меджахед (КОМПЭЛ), Дмитрий Цветков

# «ИДЕАЛЬНЫЕ ДИОДЫ» ОТ КОМПАНИИ STMICROELECTRONICS

В июне этого года популярный французский журнал по электронике вручил заслуженную награду “Electron d’Or 2009” новым **SiC-диодам** от **STMicroelectronics** в категории “силовые преобразователи”. SiC-диоды — сравнительно новое направление в силовой электронике, в перспективе приходящее на смену кремниевым диодам.

Диод Шоттки по сути является «идеальным диодом», так как имеет низкое прямое падение напряжения и незначительные потери при переключении. К сожалению, такой диод не способен работать с напряжениями более 200 В. Однако, используя карбид-кремниевые подложки (Silicon Carbide — SiC) в качестве основы, можно повысить рабочее напряжение до 1200 В.

Впервые кристаллический карбид кремния был получен в 1892 году и тогда был назван карборундом. Отец транзистора Уильям Шокли назвал карбид кремния «идеальным полупроводником» и уже в 1950 году был уверен, что этот материал быстро заменит кремний за счет превосходных свойств. В таблице 1 указаны ключевые различия между карбидом кремния и кремнием.

Карбид кремния является полупроводником с непрямой зонной структурой (то есть вероятность излучательной рекомбинации в нем небольшая), с шириной запрещенной зоны от 2,4 до 3,3 эВ, что больше по сравнению с Si и GaAs, а это в свою очередь, означает больший диапазон рабочих температур (теоретически — до 1000°C, практически — до 600°C) и малый ток утечки (менее 70 мкА при 200°C). Карбид кремния имеет высокую теплопроводность (примерно на уровне меди), что упрощает проблему отвода тепла, снижая тепловое сопротивление кристалла по сравнению с Si в два раза. Вдобавок, карбид кремния имеет в десять раз более высокое критическое поле пробоя. Это означает, что напряжение пробоя может быть в десять раз выше, чем в кремнии. Приведенные характеристики обуславливают перспективное использование этого материала в силовой электронике.

Силовые приборы на основе SiC применяются в устройствах средней (1...10 кВт) и большой мощности

(10 кВт...1 МВт), а также в устройствах, работающих при высоких значениях температуры и радиации: в приборах для нефте- и газодобычи, в автомобилестроении, турбиностроении для АЭС и т.д. Лучшая радиационная стойкость карбида кремния в сравнении с кремнием и хорошие результаты по надежности дают ему преимущество и в случае специальных применений.

## SiC-диоды Шоттки

Многие десятилетия кристаллический карбид кремния существовал исключительно в исследовательских центрах. Сложность выращивания высококачественных карбид-кремневых подложек препятствовала промышленному использованию этого материала. Сегодня несколько производителей сумели создать воспроизводимые технологические процессы для производства таких кристаллов. Стоимость карбид-

кремниевых подложек остается высокой в сравнении с кремниевыми подложками (превышение до 100 раз). По этой причине применение карбид-кремневых приборов на сегодняшний день ограничивается специфическими случаями, где физические превосходства этого материала делают решения на его основе более эффективными.

Первым промышленным применением карбида кремния стали в 2001 году SiC-диоды Шоттки. В данный момент компания STMicroelectronics производит карбид-кремниевые диоды на трехдюймовых пластинах, используя новейшие технологии изготовления подложек, и в этом году переходит на четырехдюймовые пластины (рис. 1). В 2011 году STMicroelectronics планирует начать производить карбид-кремниевые МОП-транзисторы (PMOS).

У силового выпрямительного диода на основе SiC благодаря большой ширине запрещенной зоны практически отсутствуют обратные токи при комнатной температуре. Он имеет большое быстродействие и высокие рабочие температуры. Испытания показали, что использование SiC-диодов в составе преобразователя позволяет увеличить его

Таблица 1. Сравнительные характеристики кремния и карбида кремния

Свойства материала	Кремний	Карбид кремния*
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,12	3,05
Критическое поле пробоя, $\times 10^6$ В/см	0,25	2,5
Теплопроводность, Вт $\times$ см <sup>-1</sup> $\times$ К <sup>-1</sup>	1,56	4,9
Температура плавления, °С	1420	2830

\* — 6H Si-C

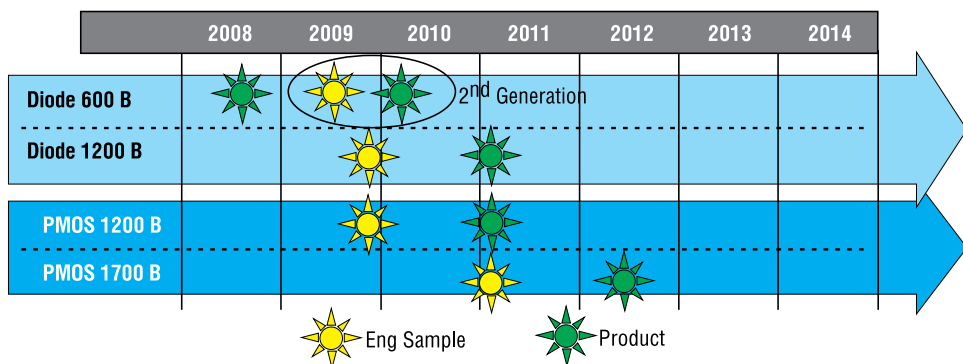


Рис. 1. Диаграмма развития производства карбид-кремневых приборов компанией STMicroelectronics

Таблица 2. Сравнительные характеристики биполярного кремниевого и SiC-диодов STMicroelectronics

Наименование	Технология	VRRM, В	IF, А	VF, В	TJ max, °С	TRR, нс
STTH806DTI	Кремний	600	8	2,24	150	12
STPSC806D	Карбид кремния	600	8	1,70	175	—

Таблица 3. Основные характеристики SiC диодов STMicroelectronics

Наименование	Средний рабочий ток, А	Максимальный импульсный ток, А	Максимальное обратное напряжение, В	Падение напряжения при 25°С, В	Падение напряжения при 150°С, В	Обратный ток, мкА	Емкость перехода, пФ	Корпус
STPSC406D	4	14	600	1,55...1,90	1,90...2,40	10...50	20	TO-220AC
STPSC406B-TR	4	14	600	1,55...1,90	1,90...2,40	10...50	20	DPAK
STPSC606D	6	27	600	1,40...1,70	1,60...2,10	15...75	30	TO-220AC
STPSC606G-TR	6	27	600	1,40...1,70	1,60...2,10	15...75	30	D2PAK
STPSC806	8	30	600	1,40...1,70	1,60...2,10	20...100	35	TO-220AC
STPSC1006	10	40	600	1,40...1,70	1,60...2,10	30...150	50	TO-220AC
STPSC1206	12	50	600	1,40...1,70	1,60...2,10	30...150	65	TO-220AC

КПД на 0,5...1%, особенно на малых нагрузках и высоких частотах преобразования. Высокая плотность мощности – второе преимущество SiC-диодов над обычными кремниевыми диодами. Это дает возможность удвоения частоты преобразования без ухудшения характеристик переключения, что, в свою

стабильным независимо от температуры диода (рис. 2). В биполярных кремниевых диодах главные физические эффекты связаны с неосновными носителями заряда, которые сильно повышают обратный ток восстановления (IRM) и обратный заряд восстановления (QRR). Для такого типа диода при увеличении

ния, причем амплитуда тока и временной интервал его протекания имеют существенную температурную зависимость.

Основные параметры карбид-кремневого диода при комнатной температуре в сравнении с его ближайшим конкурентом приведены в таблице 2:

Прямое падение напряжения у SiC диода при температуре 25°С ниже, но значения падения напряжения приблизительно совпадают при температуре 50...70°С. Значение емкостного заряда карбид-кремниевых диода практически не зависит от скорости изменения тока (рис. 3), тогда как заряд обратного восстановления у кремниевых диодов увеличивается, и, соответственно, растут потери на высоких частотах.

Дополнительно стоит отметить особенности применения новых диодов STM – падение напряжения имеет положительный температурный коэффициент: чем выше температура, тем выше падения напряжения. Это значительно упрощает использование диодов при их параллельном включении, так как в этом случае не требуются согласующие резисторы для выравнивания их токов. При последовательном включении емкость перехода каждого диода достаточно велика, что снимает необходимость организации динамического регулирования баланса напряжений на каждом диоде, входящим в состав такой цепочки.

В таблице 3 приведены имеющиеся в производстве карбид-кремниевые диоды Шоттки. Диапазон рабочих токов начинается с 4 А и достигает 12 А с максимальным обратным напряжением 600 В.

**Пример применения**

Для примера можно рассмотреть выгоду от замены обычных кремниевых диодов в активных корректорах коэффициента мощности (ККМ) на SiC-диоды STM. Одним из основных компонентов, определяющих массогабаритные показатели ККМ (рис. 4), является дроссель повышающего преобразователя. Уменьшение его размеров возможно за счет

**У силового выпрямительного диода на основе SiC благодаря большой ширине запрещенной зоны практически отсутствуют обратные токи при комнатной температуре. Использование SiC-диодов в составе преобразователя позволяет увеличить его КПД на 0,5%...1%, особенно на малых нагрузках и высоких частотах преобразования. Высокая плотность мощности – второе преимущество SiC диодов над обычными кремниевыми диодами...**

очередь, позволяет уменьшить габариты индуктивных компонентов схемы. Более того, сокращаются помехи, создаваемые работой преобразователя на основе SiC-диодов, что опять-таки позволяет упростить фильтры по питанию и сократить их размеры.

Ключевая особенность карбид-кремниевых диодов – малый динамический обратный ток восстановления. Это непосредственно связано с емкостью р-п перехода. Вдобавок, этот ток остается

температуры перехода с 25 до 125°С значение IRM удваивается, а значение QRR увеличивается в четыре раза.

Необходимо отметить, что форма тока, протекающего через SiC-диод при включении имеет характер слабого переходного процесса, амплитуда которого не зависит от температуры, а у быстродействующего Si диода имеется ярко выраженный эффект обратного восстано-

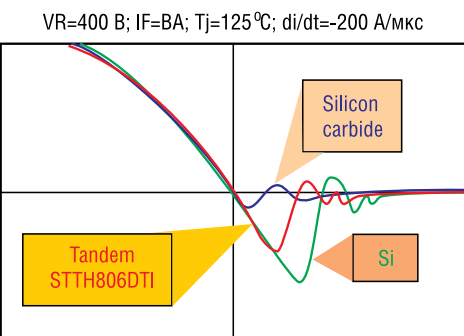


Рис. 2. Сравнительные характеристики обратного тока восстановления в зависимости от технологии

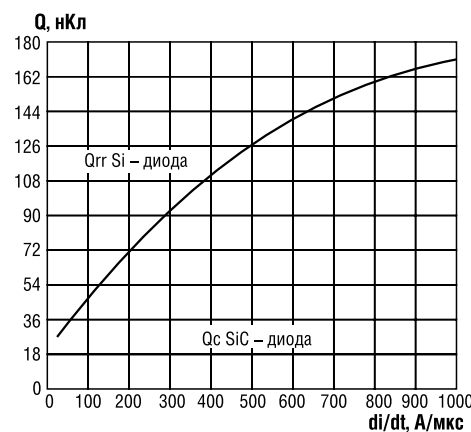


Рис. 3. Зависимость заряда обратного восстановления от скорости изменения тока через диод для Si- и SiC-диодов

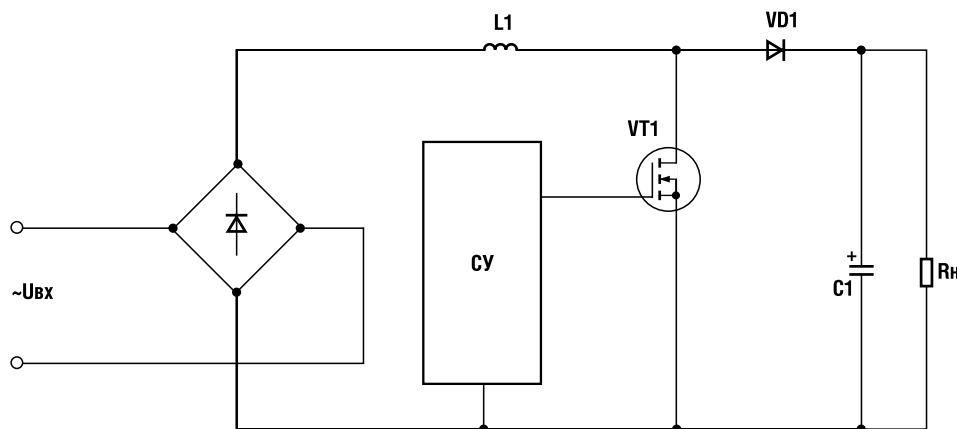


Рис. 4. Типовая схема классического активного корректора коэффициента мощности

повышения частоты преобразования, однако это неизбежно приводит к росту динамических потерь в ключе транзистора и диоде, а также требует увеличения размеров теплоотвода.

Согласно результатам экспериментов, простая замена кремниевых диодов на SiC диоды STM позволяет снизить тепловую нагрузку в ККМ почти вдвое. Практически такой же результат получается при использовании схемы с мягким переключением, но при этом количество элементов повышается в три раза, что увеличивает габариты, снижает надежность и, соответственно, выигрыш

от повышения частоты преобразования. В итоге стоимость решения на базе SiC диода оказывается значительно ниже.

Помимо корректоров коэффициента мощности, SiC диоды находят важное применение в качестве диодов, включаемых параллельно мощным IGBT- и MOSFET-транзисторам и модулям. Это особенно актуально для мостовых инверторов, работающих на индуктивную нагрузку, например — для приводов электродвигателей, где потери за счет обратного восстановления диода вносят существенный вклад в рассеиваемую мощность.

Литература

[1] <http://www.st.com/stonline/stappl/cms/press/news/year2009/p2365.htm>  
 [2] Process Technology for silicon carbide devices, edited by Carl-Mikael Zetterling, 2002.  
 [3] John Day, “SiC Schottky Diodes Tout Breakdown Voltage”, Power Electronics Technology, May 2004.  
 [4] Mark Valentine, “SiC Technology Enables Discrete Revolutions”, Power Electronics Technology, November 2006.  
 [5] A.Y.Nikiforov, “SiC Pressure Sensors Radiation Hardness Investigations”  
 [6] Martin O. Patton, “Strategies for Radiation Hardness Testing of Power Semiconductor Devices”, NASA/CR—2005-213807.  
 [7] Roberto Zafalon, “Compound Semiconductors”, presentation at Rusnanotech December 2008.  
 [8] Александр Полищук, “Применение карбид кремниевых диодов Шоттки в инверторах с жестким переключением”, Силовая Электроника, Н1-2006.  
 [9] Michael O’Neil, “Silicon carbide diodes make solar power systems more efficient”, EE times India, May 2006.

Получение технической информации, заказ образцов, поставка – e-mail: power.vesti@compel.ru

## КАРБИД-КРЕМНИЕВЫЕ ДИОДЫ ШОТКИ

V<sub>R</sub> = 400 V, I<sub>F</sub> = 8 A, T<sub>J</sub> = 125 °C,  
di/dt = -200 A/μs

- Пренебрежимо малое время восстановления
- Независимость ключевых характеристик от изменения температуры
- Незначительное электромагнитное излучение
- Преимущественное использование в корректорах мощности

Москва  
Тел.: (495) 995-0901  
Факс: (495) 995-0902

Санкт-Петербург  
Тел.: (812) 327-9404  
Факс: (812) 327-9403

Компэл

www.compel.ru