

# Ускоряем освоение SiC-технологии

## В силовой электронике

**На рынке в течение многих лет ходят разговоры о концепциях и планах по выпуску широкозонных приборов, обладающих массой новых возможностей. Тем не менее вы не можете сделать что-либо на базе презентации PowerPoint или предварительной спецификации. Эта статья подтверждает тот факт, что компания Wolfspeed вышла далеко за рамки любой шумихи, разговоров и поддельных новостей и стала пионером широкого внедрения карбидокремниевых приборов в потребительской технике — уже сегодня.**

Гай Мокси (Guy Moxey)

Перевод:  
Евгений Карташов  
Валерия Смирнова

gsee@macrogroup.ru

**М**ы демонстрируем, как широко используемые SiC-приборы решают реальные проблемы на примерах системного уровня, работающих на рынке уже сегодня. Обсуждаемые практические, реальные и готовые к применению схемотехнические решения охватывают диапазон мощности от единиц до сотен кВт. Каждое решение использует имеющиеся на рынке, полностью квалифицированные SiC-приборы. Все они имеют рыночное подтверждение улучшения системных показателей по эффективности, плотности мощности и цене. Приборы SiC — это не только будущее — Wolfspeed SiC доступны уже сегодня.

### Пример 1: двухполярный ККМ мощностью 2 кВт

Преимущества диодов SiC в традиционных схемах бустеров ККМ для серверов хорошо известны и приняты рынком уже в течение нескольких лет. В последнее время, с учетом повышенных требований по эффективности новых стандартов по источникам питания Energy star и «80+», разработчики систем питания сталкиваются с еще большим количеством вызовов при решении задач увеличения эффективности и плотности мощности в условиях постоянно сокращающегося бюджета на покупку комплектующих.

Наработанные решения по одиночным бустерам ККМ или схемам с интерливингом являют-

ся основой любой стандартной схемы, проектируемой с учетом стандарта 80+ классов «bronze, silver, gold» по электропитанию серверов. Однако они не могут удовлетворить намного более жесткие нормы по эффективности, установленные для достижения стандарта «80+ Titanium», поэтому креативные идеи и широкодиапазонные технологии в настоящее время означают намного больше, чем просто «интересные исследования».

Что касается архитектуры системы питания сервера, на рис. 1 показана блок-схема типового однофазного серверного импульсного источника питания или Netcom, выполняющего определенные функции. В рамках данной статьи мы обсуждаем схему бустера AC/DC, также известного как ККМ. Стандартный подход к проектированию такого устройства предусматривал бы мостовой выпрямитель, одиночный ключ или схему с интерливингом и последующий изолированный DC/DC-каскад.

### Проблемы проектирования

Повышение эффективности систем питания серверов является хорошо известным требованием, поскольку серверные станции функционируют круглосуточно и на них распространяются все нормы и законодательства по энергосбережению. Стандарт «80+» — это программа добровольной сертификации, предназначенная для повышения эффективности использования энергии в компьютерных системах питания. Несмотря на то, что стандарт является добровольным, он принят и широко используется в промышленности.

Нормы «80+» предусматривают 6 уровней эффективности, начиная с базового и заканчивая самым строгим «80+ Titanium». Этот высший уровень соответствует самым последним требованиям, к которым стремятся разработчики систем питания серверов. Уровень «80+ Titanium» предусматривает эффективность 94% при половинной нагрузке и 90% при полной нагрузке (входное напряжение 115 В),

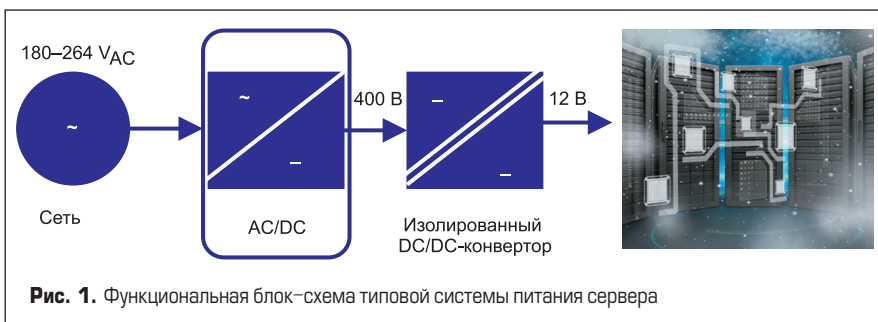


Рис. 1. Функциональная блок-схема типовой системы питания сервера

Таблица 1. Технические требования к ККМ

Основные требования	
Параметр	Значение
$P_{out}$	2 кВт
$V_{in}$	90-264 В
Рабочая частота	85 кГц
THD	<5%
Корпус MOSFET	SMD
$V_{out}$	400 В

а также 96% при половинной нагрузке и 91% при полной нагрузке (входное напряжение 230 В). Это требование относится к сочетанию узлов ККМ и DC/DC-конвертера, поэтому отдельно для ККМ целевой показатель составляет 96,4% при половинной нагрузке, 93,8% при полной нагрузке ( $V_{in} = 115 В$ ), а также 98,5% при половинной нагрузке и 94,8% при полной нагрузке ( $V_{in} = 230 В$ ).

Достижение такой эффективности при использовании обычных топологий схем ККМ невозможно для большинства кремниевых MOSFET. Задачу можно решить с применением приборов с повышенной производительностью, однако затраты при этом увеличиваются до уровня, делающего реализацию бессмысленной. Таким образом, задача проектирования сводится к достижению эффективности «80+ Titanium» и увеличению плотности мощности при сохранении стоимости на уровне типовых систем на основе кремниевых ключей с меньшей производительностью.

Системные требования для однофазных бустеров ККМ являются достаточно общими в отношении напряжений, токов, гармоник и показателей EMI, поэтому в таблице 1 приведены стандартные параметры ККМ. Нагрузка  $P_{out} = 2 кВт$  выбрана в качестве типовой для наиболее мощных систем, где требуется высокая эффективность. Кроме того, по мере увеличения плотности мощности задача выбора приборов для поверхностного монтажа является одной из наиболее сложных при проектировании.

Немостовые топологии корректоров коэффициента мощности не обязательно являются новыми, что относится к однофазным и трехфазным схемам. К их преимуществам можно отнести более высокую эффективность, плотность мощности и меньшее количество компонентов. Однако зачастую недостаточно хорошие характеристики кремниевых приборов в сочетании с нестандартными режимами управления ограничивают возможность практической реализации. Теперь использование новых подходов позволяет разработчикам создать четырехключевую двухполярную схему на основе наиболее эффективных SiC MOSFET. Также было оценено бюджетное решение, предусматривающее использование двух SiC MOSFET в высокочастотном плече устройства и двух  $V_F$  кремниевых диодов в низкочастотном плече, что значительно снижает стоимость комплектующих.

Такой подход значительно сокращает номенклатуру полупроводниковых ключей и их стоимость, а также существенно упро-



Рис. 2. Внешний вид платы ККМ

щает управление схемой и, соответственно, цену интегральных микросхем. Транзистор СЗМ0065090J выбран прежде всего благодаря своему конструктиву для поверхностного монтажа, что позволяет уменьшить размер печатной платы и увеличить плотность мощности. Кроме того, этот прибор имеет отдельные выводы для подключения Кельвина, что при правильном использовании значительно снижает потери переключения по сравнению с обычными корпусами D2PAK или трехвыводными ТО.

**Результаты испытаний полумостового двухполярного каскада**

Двухключевая двухполярная схема ККМ, работающая на частоте 85 кГц и спроектированная в соответствии с требованиями таблицы 1, обеспечивает требуемые результаты. При входном напряжении 230 В и 50%-ной нагрузке измеренная эффективность составляет 98,61%, а при полной нагрузке — 98,54%, что превышает целевые показатели (98,5 и 95% соответственно).

Указанное значение КПД включает в себя потери вспомогательного источника питания и вентилятора. На рис. 2 показан внешний вид устройства, размер печатной платы составляет 213x112 мм, что подтверждает высокую плотность мощности устройства. Также на рисунке видны одиночный вентилятор, SMD MOSFET-транзисторы и диоды. Устройство по габаритам не больше существующего решения на кремниевых ключах, выполненного по стандарту «80+ Gold», но соответствует стандарту «80+ Titanium» по эффективности. Схема, содержащая два ключа, удобнее для практической реализации и, следовательно, более пригодна для коммерческого применения. В преобразователе использованы силовые транзисторы, прошедшие квалификационные

испытания и производимые в стандартных корпусах.

**Пример 2: двунаправленный трехфазный AC/DC-конвертор 20 кВт**

Сетевые трехфазные силовые конвертеры AC/DC (или DC/AC) необходимы в широком диапазоне промышленных применений — от систем возобновляемой энергии (солнечных, ветряных, батарейных), промышленных зарядных устройств для городского электро-транспорта до регенеративных моторных приводов (лифтов, прокатных станов и т. п.). Примером реализации такой трехфазной сетевой AC/DC-системы является станция быстрой зарядки для электромобилей. На рис. 3 показана функциональная блок-схема трехфазного бортового зарядного устройства для батарейного транспорта (BEV). Использование двунаправленного конвертера дает возможность возвращать энергию от автомобиля в сеть (V2G).

**Проблемы проектирования**

В двунаправленных ККМ обычно используются двухуровневые топологии с применением 1200 В IGBT или трехуровневые с применением SJ FET. Обычные 2L-инверторы на основе IGBT отличаются простотой, низкой стоимостью комплектующих и большей мощностью (>20 кВт), но из-за низкой частоты переключения (<20 кГц) у них меньше плотность мощности и эффективность, а также дороже моточные изделия. Многоуровневые схемы на базе IGBT, такие как выпрямитель с фиксированной нейтралью (NPC), обладают более высокой плотностью мощности и эффективностью (за счет меньших потерь переключения), однако схема NPC сложнее в реализации. В однонаправленных преобразователях также используются кремниевые MOSFET с напряжением 650 В.

Схема «Vienna» в ее обычном или модернизированном виде может обеспечить достаточную эффективность преобразования по однонаправленному выходу, но она не дает приемлемой плотности мощности, сложна в проектировании и не обладает способностью двунаправленной передачи мощности. Сегодня существуют альтернативные подходы с использованием MOSFET SiC, которые существенно уменьшают потери переключения и значительно расширяют диапазон рабочих частот двухуровневого трехфазного

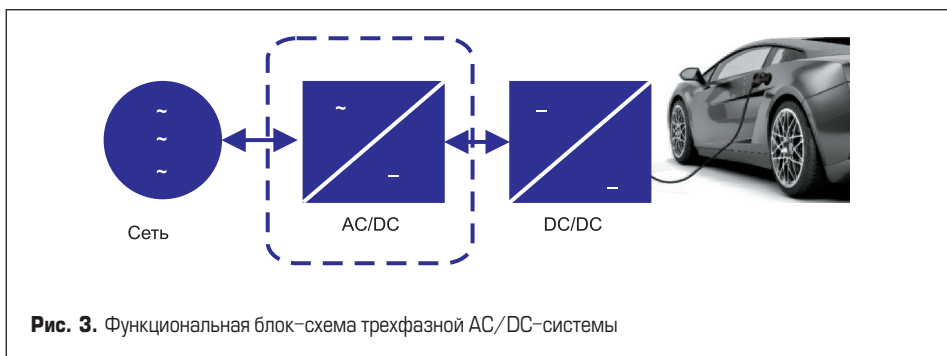


Рис. 3. Функциональная блок-схема трехфазной AC/DC-системы

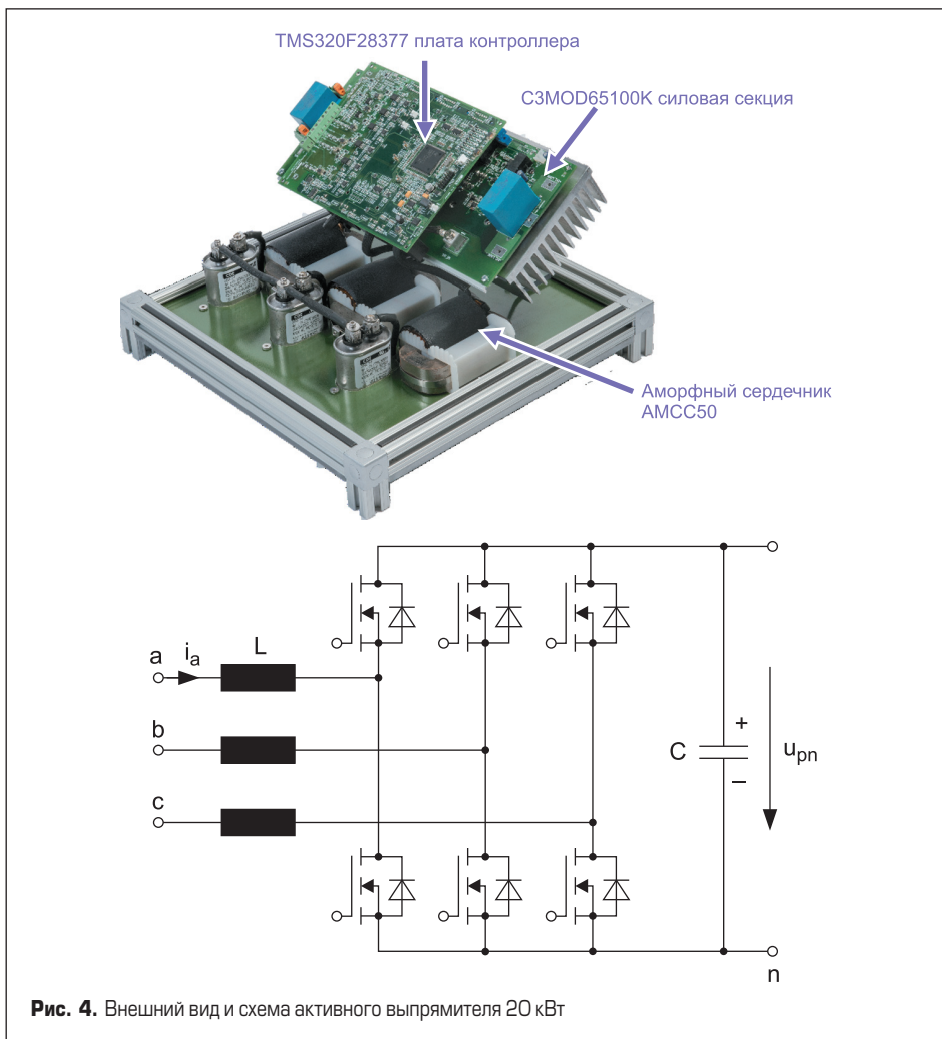


Рис. 4. Внешний вид и схема активного выпрямителя 20 кВт

конвертера, обеспечивая при этом высокую эффективность при максимальной и частичной нагрузке.

С помощью SiC MOSFET можно существенно увеличить плотность мощности системы за счет уменьшения размера моточных изделий и радиатора. Кроме того, тельный диод SiC MOSFET способен работать как антипараллельный диод, что снижает сложность и стоимость схемы.

На рис. 4 показана силовая цепь двухуровневого преобразователя на основе SiC MOSFET. Это пример рентабельной, высокоэффективной реализации промышленного KKM с применением серийно выпускаемых SiC MOSFET. Будучи альтернативой традиционному 2L-инвертору на 1200 В Si IGBT, схема соответствует таким же системным требованиям, но отличается более высокой эффективностью, плотностью мощности и меньшей

стоимостью. Для данного уровня мощности выбран SiC MOSFET с характеристиками 1000 В / 65 мОм. Он обеспечивает предельно низкие потери переключения благодаря использованию четырехвыводного корпуса TO-247 с возможностью подключения Кельвина.

Кроме того, наличие оптимизированного тельного диода с блокирующей возможностью 1000 В позволяет при минимальной цене кристалла работать с напряжением DC-шины до 800 В. Этот пример еще раз показывает реальные возможности доступного на рынке транзистора Wolfspeed SiC MOSFET (C3M0065100K). Они соответствуют новым требованиям рынка по двунаправленной передаче энергии в простом двухуровневом инверторе с частотой переключения 48 кГц. В режиме полной мощности устройство обеспечивает измеренное улучшение эффективности примерно на 1% относительно решений на основе Si IGBT.

### Пример 3: трехфазный инвертор 250 кВт

Очевидно, что рынок электромобилей является одним из наиболее перспективных для силовых полупроводников в течение следующего десятилетия и далее. Кремниевые приборы уже зарекомендовали себя как адекватный выбор для применения в ранних гибридах и BEV, однако силовые конвертеры для зарядных устройств батарей электромобилей и их тяговых приводов требуют значительных улучшений в плане эффективности и плотности мощности. Это необходимо, чтобы соответствовать требованиям рынка по увеличению пробега, снижению веса транспортных средств и улучшению экономических показателей.

Автомобильная промышленность уже оценила преимущества SiC в бортовых зарядных устройствах (ОБС) и моторных приводах. Впечатляющий результат показала замена кремниевых IGBT на SiC MOSFET Wolfspeed в инверторе привода 250 кВт, позволившая снизить потери инвертора примерно на 80% в комбинированном транспортном цикле! Подробности показаны на рис. 5: использование SiC-ключей в ОБС позволяет увеличить эффективность на системном уровне на более чем 1,5%, а плотность мощности — на 30% по сравнению с традиционным решением на основе кремния.

Для сокращения процесса проектирования и выбора SiC-компонентов Wolfspeed разработал оценочный прототип трехфазного преобразователя 250 кВт, ориентированного на применение в приводе EV. Прототип сконструирован для того, чтобы пользователи могли реально увидеть преимущества применения SiC-приборов в оптимизированной сборке инвертора в их собственной лаборатории при минимальном уровне инвестиций в разработку концепции системы. Вес инвертора 250 кВт Wolfspeed менее 16 кг при объеме 26,3 л, габариты: 44 мм (длина), 39,8 мм (ширина), 15 см (высота), как показано на рис. 6.

Используя оптимизированную конструкцию CAS-модуля, специалисты Wolfspeed

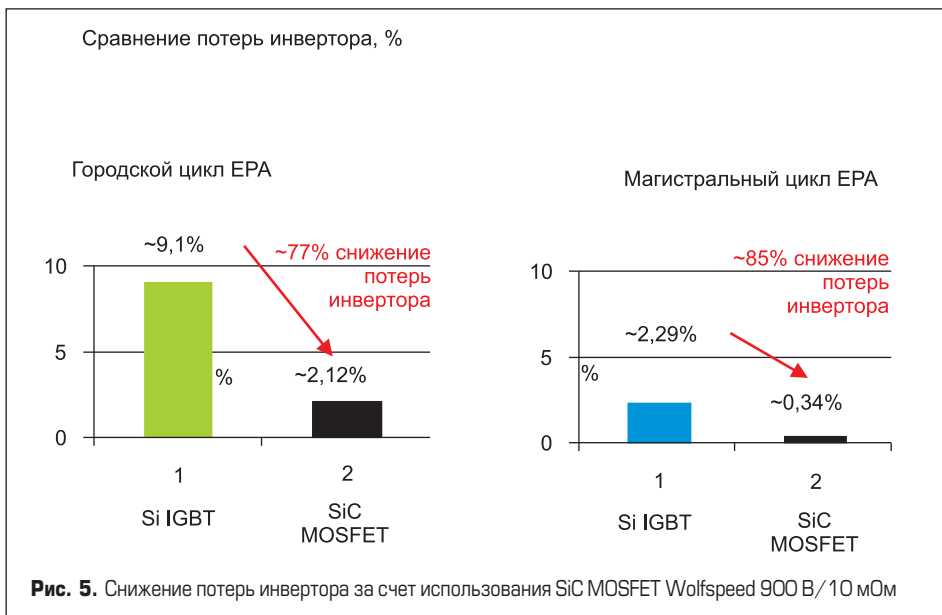
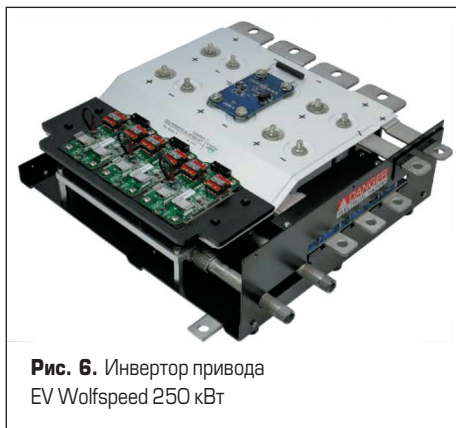


Рис. 5. Снижение потерь инвертора за счет использования SiC MOSFET Wolfspeed 900 В / 10 мОм

сосредоточились на разработке решений с высокой гравиметрической и объемной плотностью, также обеспечивающих сверхнизкую паразитную индуктивность (около 7,5 нГн), при весе 180 г устройство занимает почти такое же пространство, что и средний смартфон. Инвертор обеспечивает непрерывную мощность до 250 кВт при напряжении на DC-шине 850–900 В и частоте переключения 20 кГц. Потери инвертора уменьшены примерно на 80% (в совмещенном ездовом цикле) по отношению к аналогичному инвертору на кремниевых IGBT.

### Заключение

Переломный момент для принятия и освоения технологии SiC наступил, и на многих рынках заказчики уже используют преимущества, которые дает карбид кремния.



**Рис. 6.** Инвертор привода EV Wolfspeed 250 кВт

Компания Wolfspeed была пионером SiC-революции, и теперь она однозначно имеет самый крупный портфель этих продуктов в отрасли. А разработчики получают ре-

альные решения, обеспечивающие системе повышение эффективности, снижение габаритов, увеличение плотности системы и последнее, но не менее важное — меньшую стоимость силовых компонентов по сравнению с менее эффективными решениями на основе кремния.

Можно попрощаться с предварительными спецификациями, дорожными картами и фейковыми новостями. В результате 30-летнего опыта освоения и оптимизации SiC-технологии и начала крупносерийного производства Wolfspeed разработал высокопроизводительные типовые решения, построенные на дискретных компонентах и модулях SiC. С их помощью разработчики силовых преобразователей могут вкладывать минимум усилий в создание передовых высокопроизводительных систем на основе карбида кремния.