

Повышение эффективности автономных импульсных источников питания (SMPS)

при переходе на SiC MOSFET Wolfspeed

Технология карбида кремния (SiC) позволила усовершенствовать компоненты систем и подсистем в различных областях применения. По сравнению с кремнием (Si) приборы на основе SiC демонстрируют большую плотность мощности и эффективность за счет высокой скорости переключения, плоской характеристики зависимости $R_{DS(on)}$ от температуры и лучших параметров body-диодов. В статье речь идет о том, как SiC-компоненты Wolfspeed позволяют автономным системам SMPS превосходить устройства на базе Si и GaN по эффективности, плотности мощности и общей стоимости системы.

Евгений Карташов
Валерия Смирнова

wolfspeed@macrogroup.ru

Тенденции SMPS и сравнение технологий Si, SiC и GaN

Автономные SMPS, как правило, представляют собой силовые AC/DC-устройства, используемые в центрах обработки данных, базовых станциях связи и майнинговых системах. Центры обработки данных потребляют около 10% всей вырабатываемой электроэнергии, и если внедрение SiC дает экономию даже 1% энергии, это будет эквивалентно отказу от трех атомных электростанций (каждая мощностью 1 ГВт).

По сравнению со стандартной промышленной архитектурой питания центров обработки данных первого поколения в системах второго поколения отсутствует источник бесперебойного питания и блок распределения мощности от AC-входа, напряжение DC-шины изменено с 12 на 48 В и к DC-шине добавлен батарейный блок резервного питания (48 В). Благодаря этим изменениям общая эффективность системы возросла до 85%, что позволило сэкономить количество энергии, эквивалентное 27 атомным электростанциям.

Типовые характеристики центра обработки данных второго поколения, содержащего выпрямитель OSCP3.0 или HE telecom:

- диапазон входных напряжений: 180–305 В AC;
- выходная мощность: 3000 Вт;
- выходное напряжение: 48 В;
- эффективность: 97,5% (пиковая), 96,5% при нагрузке 30–100%;
- время сброса: 20 мс;
- диапазон рабочих температур: 0...+55 °C.

Эффективность системы варьируется в зависимости от нагрузки, но в целом для корректора коэффициента мощности (ККМ или PFC) требуется КПД более 99%, а для DC/DC-конвертеров понадобится КПД свыше 98,5%. Чтобы соответствовать этим новым требованиям по эффективности и плотности мощности, разработчики должны внимательно изучать топологии схем и особенности силовых ключей. Это можно сделать при сравнении технологий полупроводников, таких как Si, SiC и GaN-on-Si.

Сравнения физические различия между Si или SiC MOSFET и GaN-приборами с высокой подвижностью электронов (HEMT), можно заметить (рис. 1), что латеральная структура GaN HEMT требует увеличения занимаемой площади для обеспечения большей мощности и горизонтального токового пути, в то время как структура Si и SiC MOSFET является вертикальной. Это напоминает вертикальный «шланг», толкающий ток вверх, с «водосточным желобом», обеспечивающим горизонтальный поток.

Кроме того, GaN HEMT не могут выдерживать энергию лавинного пробоя в условиях перенапряжения, что может привести к катастрофическим отказам. Они также отличаются очень низкой стойкостью к короткому замыканию (несколько сотен нс), а несоответствие коэффициентов теплового расширения их кристаллической решетки может привести к дефектам структуры.

При анализе зависимости сопротивления канала $R_{DS(on)}$ от температуры видно, что SiC превосходит другие технологии. Кроме того, большинство спецификаций определяют $R_{DS(on)}$ при комнатной

температуре (+25 °C), но разработчики должны учитывать реальные рабочие температуры кристаллов, которые могут варьироваться в пределах +120...+140 °C. Также важно отметить, что $R_{DS(on)}$ коррелирует с I^2R потерями (потери проводимости), то есть SiC-транзистор с номинальным сопротивлением канала 60 мОм эквивалентен транзисторам Si и GaN с сопротивлением канала 40 мОм.

Для более точного количественного сравнения SiC с Si и GaN-на-Si в таблице 1 показано, как улучшаются температурные характеристики, напряжение и размеры/конструктив при использовании SiC-компонентов.

Для сравнения различных технологий можно проанализировать их основные характеристики, такие как V_{gs} , температура кристалла T_j , сопротивление открытого канала $R_{DS(on)}$, емкость и процесс восстановления при переключении. Хотя карбид кремния побеждает не во всех категориях, он предпочтителен в большинстве случаев. В отношении температуры SiC имеет наибольшее значение $T_{j,max}$ что обеспечивает высокую общую надежность, однако тепловое сопротивление кристаллов SiC (R_{th}) не самое маленькое. Тем не менее сопротивление канала $R_{DS(on)}$ карбида кремния в большом диапазоне рабочих температур является самым низким, что уменьшает потери и повышает эффективность, обеспечивая максимальную отдачу энергии.

Поскольку GaN не обладает стойкостью к лавинному пробое, то SiC, у которого лавинная энергия определена для одного импульса, имеет лучшую надежность и защиту. Кроме того, более высокое пороговое напряжение $V_{gs,th}$ увеличивает помехоустойчивость и облегчает управление. По характеристикам переключения GaN имеет наименьшее значение заряда Q_{rr} и емкости затвора, но у SiC данные параметры не намного хуже. Это важно, поскольку во многом определяет динамические потери и эффективность. В целом, Si прост в управлении, но не может конкурировать с другими технологиями по характеристикам переключения и потерям. GaN превосходит конкурентов по динамическим параметрам, но не обладает надежностью, в то время как SiC обеспечивает универсальное эффективное решение с отличными тепловыми свойствами и минимальными потерями.

В таблице 2 дано сравнение параметров транзисторов IPW60R055CFD7 (Si), C3M0060065J (SiC) и IGT60R070D1 (GaN).

Топологии и выбор компонентов для ККМ (PFC)

Традиционно для реализации корректора коэффициента мощности (ККМ) требуется мостовой выпрямитель с LC-цепочкой, однако эта простая схема представляется громоздкой

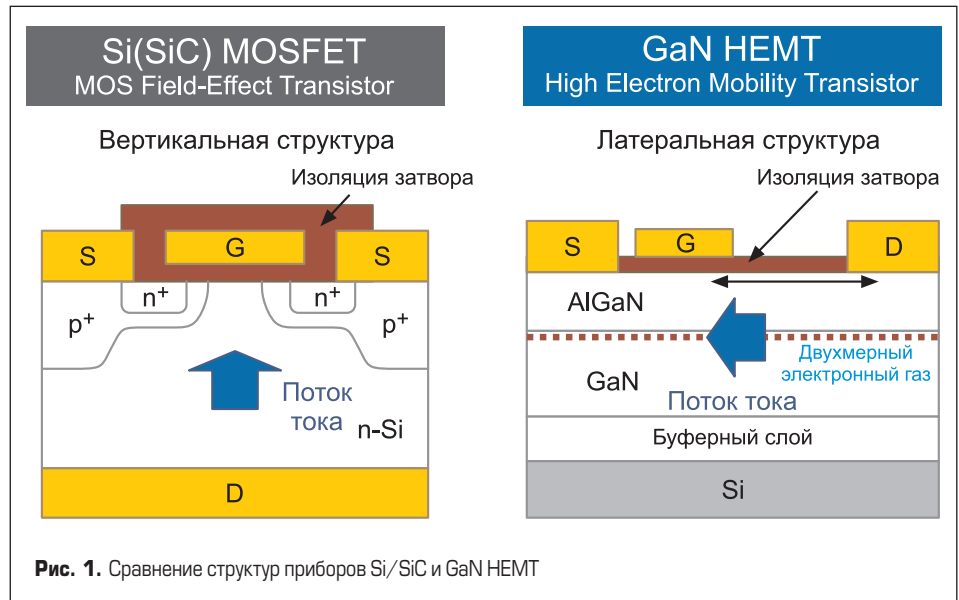


Рис. 1. Сравнение структур приборов Si/SiC и GaN HEMT

Таблица 1. Сравнение возможностей технологий Si, SiC, GaN-on-Si

Параметр	SiC	GaN-on-Si	Si
$R_{DS(on)}$ @ температура	~1,4x	~2,6x	> 2x
Теплопроводность	3x	1x	1x
Рабочее напряжение, В	600-10000	40-600	5-10000
Рабочая температура, °C	175 и выше	150	
Размер чипа	1x	2-3x	2-4x
Стоимость	1x	1,3-2x	0,5-0,75x
Наработка	>7 трлн ч	~20 млн ч	очень много
Корпус	стандартный	специализированный	любой
Интеграция	Только силовой прибор	Драйвер, защита	От низкой до высокой

и тяжелой. В современной промышленности используется топология ККМ с активным бустером, содержащая выпрямитель и повышающий преобразователь. Эта популярная конфигурация обеспечивает достаточную производительность при приемлемых затратах, но предполагает соответствие новейшим требованиям по эффективности. В настоящее время развитие промышленности позволяет реализовать двухтактный безмостовой ККМ (рис. 2), отличающийся уменьшенными потерями и повышенной плотностью мощности. Именно здесь применение SiC MOSFET дает возможность значительно повысить эффективность и удовлетворить перспективные потребности разработчиков.

Существует несколько вариантов реализации безмостовых ККМ, при проектировании которых следует учитывать возможности технологии MOSFET, включая Si, SiC и GaN. Анализ количества/стоимости компонентов, плотности мощности, пиковой эффективности и требований к управлению затвором показывает, что двухтактный безмостовой ККМ на базе SiC MOSFET, работающий в режиме непрерывной проводимости (CCM), является очевидным выбором для высокоэффективных

решений с большой плотностью мощности. В таблице 3 дается сравнение различных топологий и технологий, подчеркивающее явные преимущества двухтактных ССМ-систем на основе SiC.

При сравнении тех же основных параметров, что и выше, GaN по-прежнему обладает лучшими динамическими свойствами, но гораздо более высоким значением $R_{DS(on)}$ в диапазоне температур, что снижает его мощностные характеристики. Кроме того, очень низкое поро-

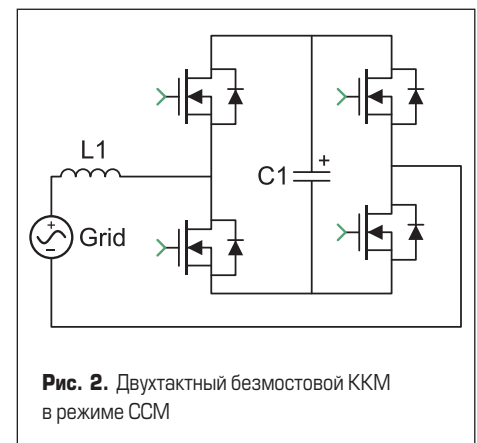


Рис. 2. Двухтактный безмостовой ККМ в режиме ССМ

Таблица 2. Основные сравнительные характеристики Si, SiC, GaN

Тип	$V_{GS(th)}$ (мин.), В	$T_{j,max}$, °C	$R_{DS(on)}$ мОм (тип.), +25 °C	$R_{DS(on)}$ мОм (тип.), +75 °C	$R_{DS(on)}$ мОм, (тип.), +125 °C	$C_{oss tr}$ пФ	$C_{oss en}$ пФ	Q_{rr} нК	R_{th} К/Вт
IPW60R055CFD7	3,5	150	46	64,4	88,8	1172	114	770	0,7
C3M0060065J	1,8	175	60	63	70	132	95	62	1,1
IGT60R070D1	0,9	150	55	80	108	102	80	0	1

Таблица 3. Сравнение схем и технологий ККМ

Технология	ККМ-дроссель	Силовые ключи	Плотность мощности	Пиковый КПД, %	Стоимость	Управление	Драйвер
Si стандартный CCM PFC	1	3+	Средняя	98,3	Низкая	1	1
Si мостовой CCM PFC				98,9	Высшая	2	2
Si 2-бустер безмостовой PFC	2	6	Низкая	98,6	Средняя	1	1
Si 2-бустер безмостовой PFC SR				98,9	Высокая	3	
Si H-мост PFC	1		Высокая	98,6	Средняя	2	2
Si CrM двухтактный безмостовой PFC	2		Средняя	98,9	Высшая	4	3
SiC CCM двухтактный BL PFC	1	4	Высшая	98,8	Средняя	2	2
SiC CCM двухтактный безмостовой PFC				99,1		Высокая	3
GaN CCM двухтактный BL PFC				98,8	2		
GaN CCM двухтактный безмостовой PFC				99,2	3	4	
GaN CRM двухтактный безмостовой PFC	2	6	Средняя	99,1	Высшая	4	5

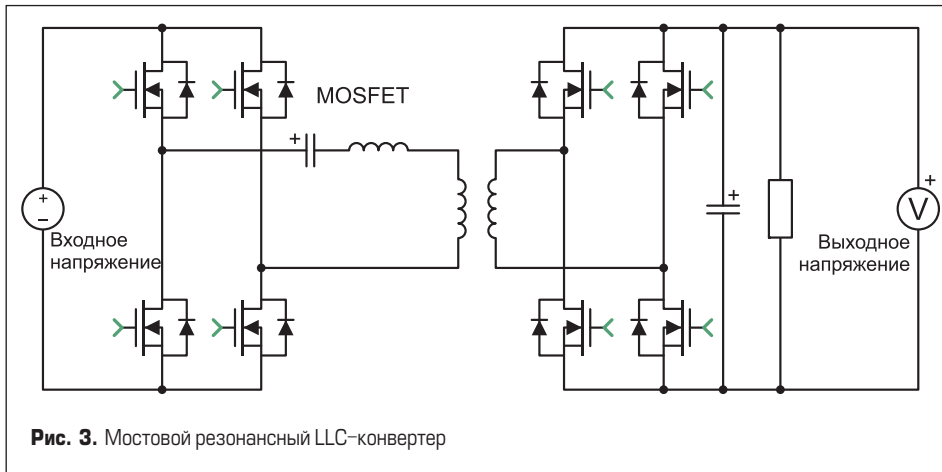


Рис. 3. Мостовой резонансный LLC-конвертер

говое напряжение V_{th} затрудняет управление и снижает помехозащищенность. Что касается эффективности, двухтактная схема CCM ККМ на базе SiC может иметь больший КПД, чем H-мост на основе Si, и аналогичный GaN. Однако в конечном счете более высокая надежность и рабочая температура наряду со стойкостью к лавинному пробую делают SiC лучшим выбором для реализации двухтактного ККМ.

Хотя стоимость решений с применением Si является самой низкой, двухтактная топология на основе SiC дешевле, чем на GaN, что

обеспечивает высокую производительность при разумной цене. Был проведен анализ затрат на реализацию двухтактной схемы ККМ мощностью 3 кВт на базе SiC Wolfspeed (C3M0060065J) по сравнению с пятью эквивалентными компонентами GaN. Полученные результаты показали, что при сравнении силовых ключей, источников питания, драйверов затворов, изоляции, датчиков тока, ККМ-дросселей и радиаторов охлаждения некоторые решения с применением GaN могут стоить на 84% дороже, чем SiC.

CRD-02AD065N — это модуль двухтактного ККМ Wolfspeed мощностью 2,2 кВт, использующий транзистор C3M MOSFET и соответствующий стандарту Titanium 80plus (пиковая эффективность 98,8%). При этом уровень общих гармонических искажений системы не превышает 5% при полной нагрузке. Соответствующие технологические файлы и обучающие материалы доступны на сайте Wolfspeed.

Топологии и выбор компонентов для DC/DC-конвертеров

Еще одним устройством, которое может работать с высокой эффективностью, соответствующей Titanium 80plus, является резонансный LLC-преобразователь (рис. 3). Такая конфигурация схемы обеспечивает включение при нулевом напряжении, отключение при низком токе (что приводит к низким потерям переключения), высокочастотную коммутацию, малый уровень перенапряжений (что позволяет снизить уровень электромагнитных помех) и гибкость управления. Это делает топологию LC сопоставимой по эффективности и плотности мощности.

Сравнение основных параметров дает результаты, аналогичные представленным в предыдущем случае для ККМ. Транзисторы

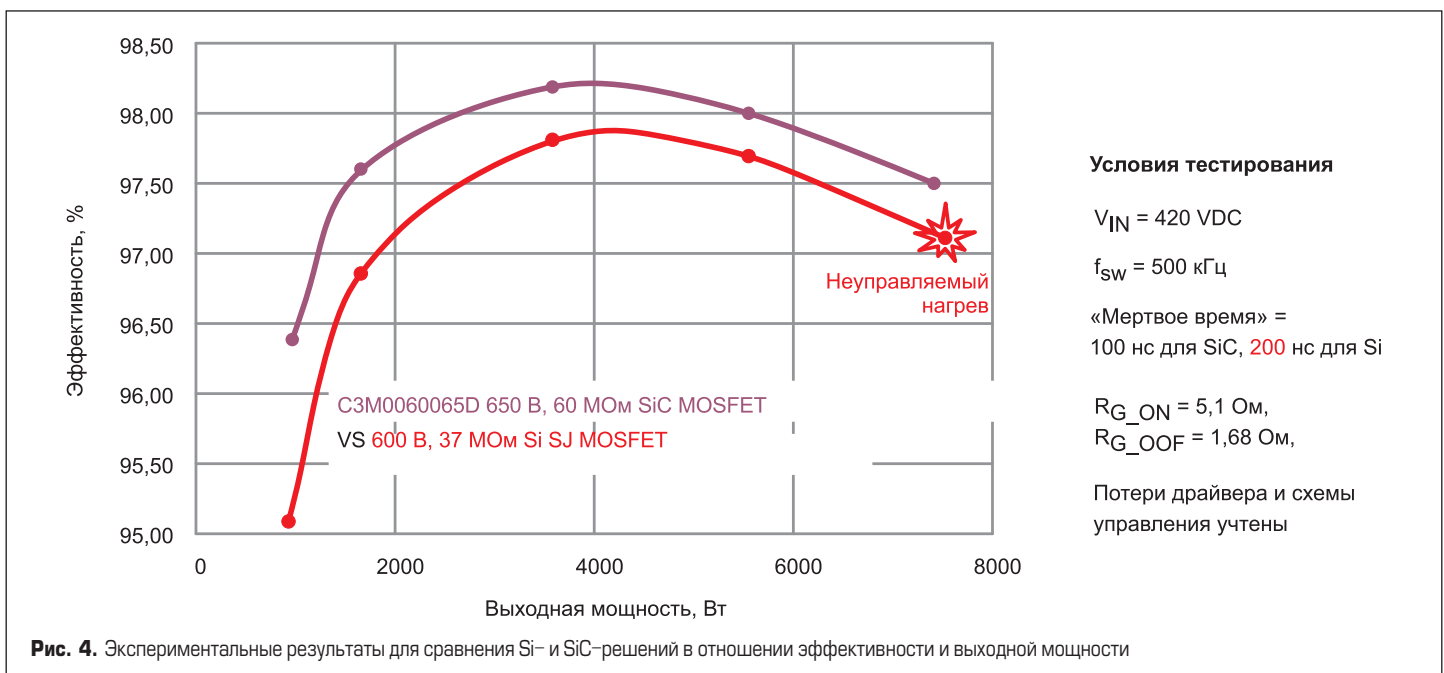


Рис. 4. Экспериментальные результаты для сравнения Si- и SiC-решений в отношении эффективности и выходной мощности

SiC обладают характеристиками переключения, близкими к GaN, но у них меньше значение $R_{DS(on)}$ во всем диапазоне температур, выше рабочая температура кристаллов и стойкость к лавинному пробую, что делает их надежным выбором для применения в конвертерах LLC.

CRD06600DD065N — пример разработанного Wolfspeed LLC DC/DC-преобразователя на 500 кГц с выходным напряжением 400 В (замкнутый контур) или 390–440 В (разомкнутый контур), максимальной мощностью 6,6 кВт и пиковой эффективностью более 98%. Соответствующие технологические файлы схем/PCB доступны на сайте Wolfspeed для помощи разработчикам в освоении этой топологии.

Таким образом, в LLC-преобразователях SiC-приборы обеспечивают мощность, аналогичную Si, но при гораздо меньших габаритах и весе изделия за счет более высокой частоты переключения и применения встроенных

и малогабаритных моточных изделий (рис. 4). Экспериментальные результаты показывают, что при параллельной работе Si и SiC MOSFET карбид кремния (C3M0060065 от Wolfspeed) имеет более высокую эффективность благодаря плоской характеристике $R_{DS(on)}$ в диапазоне температур, быстрому переключению и низким потерям мощности драйвера затвора. При более высоких нагрузках ключ Si выходит из строя из-за высоких потерь проводимости и низкой скорости коммутации.

Аналогичные сравнительные тесты SiC и GaN показали, что эти приборы имеют сопоставимую эффективность в первичных каскадах LLC-преобразователя.

Заключение

Стандарт 80plus Titanium для автономных SMPS требует очень высокой эффективности преобразования, которую могут

обеспечить карбидокремниевые приборы. Дополнительным фактором SiC является высокая надежность, гарантирующая стабильную работу приложений. Карбид кремния способен обеспечить КПД более 99%, при этом его очевидное преимущество состоит в малой зависимости $R_{DS(on)}$ от температуры, более высокой номинальной температуре кристаллов, стойкости к лавинному пробую. Выпуск SiC-ключей в промышленных стандартных конструктивах делает их лучшим выбором для использования в двухтактных KKM LLC-конвертерах.

Карбид кремния стал признанной технологией, способной трансформировать энергетику во многих областях применения. С тех пор как Wolfspeed изобрел SiC MOSFET-транзистор, эти ключи отработали уже более 7 трлн эксплуатационных часов. Компания Wolfspeed предлагает полный ассортимент чипов и модулей SiC, которые по-прежнему лидируют на рынке.