

# SiC MOSFET в корпусах с кельвиновским выводом

## для зарядных станций электромобилей

**Достижения в разработке корпусов для широкозонных полупроводников позволяют транзисторам SiC MOSFET работать на более высоких частотах при меньших потерях переключения. Улучшенные низкоиндуктивные корпуса дают возможность использовать все преимущества быстрой коммутации для улучшения эффективности силовых преобразователей и, соответственно, обеспечить энергосбережение для заказчиков. Простые и практичные усовершенствования коммерчески доступных дискретных корпусов могут значительно расширить возможности SiC MOSFET без внедрения специализированных типов транзисторов, применение которых в практических системах является сложным и дорогостоящим.**

**В статье описаны основные факторы, ограничивающие скорость переключения обычных дискретных MOSFET, представлены и количественно оценены два новых корпуса Wolfspeed и показано, как эти новые продукты могут быть использованы для снижения потерь и упрощения конструкции активного выпрямителя мощностью 20 кВт, предназначенного для автономной станции быстрой зарядки.**

**Эдгар Айербе**  
(Edgar Ayerbe)

**Адам Баркли**  
(Dr. Adam Barkley)

**Джон Муккен**  
(Dr. John Mookken)

**Перевод:**  
**Валерия Смирнова**

cree@macrogroup.ru

### Введение

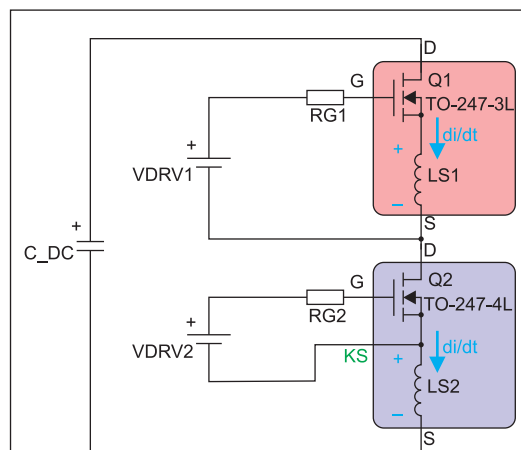
С появлением новейших SiC MOSFET-транзисторов СЗМ Wolfspeed индуктивность корпуса и топология печатной платы стали критическими факторами, во многом ограничивающими динамические характеристики системы. Кристаллы СЗМ MOSFET предназначены для коммутации сотен вольт и десятков ампер в течение наносекунд. Однако большая индуктивность обычного корпуса TO-247-3 (суммарный показатель проводников подключения кристалла и силовых выводов) создает отрицательную обратную связь, которая ограничивает достижимую величину  $di/dt$  и увеличивает связанные с этим потери переключения.

Как показано на рис. 1 для ключа верхнего уровня, индуктивность истока Q1 (LS1) и соответствующее падение напряжения делятся между силовым контуром и контуром управления затвором. При быстрой коммутации тока  $di/dt$  это наведенное напряжение противодействует приложенному сигналу управления затвором (VDRV1). В результате напряжение «затвор-исток» на кристалле MOSFET уменьшается, что замедляет скорость коммутации и увеличивает потери переключения.

Одним из способов решения проблемы является применение варианта корпуса с дополнительным сигнальным выводом Кельвина для подключения к драйверу — такой вывод (KS) показан у нижнего ключа (Q2) на рис. 1. При использовании изолированного драйвера затвора (VDRV2) контур управления не будет подвержен влиянию напряжения, наводимого на индуктивности силового контура коммутации. Это подавляет механизм отрицательной

обратной связи, что позволяет повысить скорость переключения и снизить динамические потери.

Компания Wolfspeed представила два новых варианта SiC MOSFET в корпусе с отдельным выводом Кельвина; типы и основные характеристики транзисторов даны в таблице 1. Первым показан кор-



**Рис. 1.** Гипотетическая схема полумоста MOSFET с верхним ключом в корпусе TO-247-3L (Q1) и нижним ключом TO-247-4L (Q2). Достижимое значение  $di/dt$  в TO-247-3L ограничено падением напряжения на индуктивности LS1 общего истока, противодействующим приложенному сигналу управления затвором VDRV1. Добавление вывода Кельвина в TO-247-4L в сочетании с изолированным драйвером VDRV2 снимает ограничение  $di/dt$ , существенно уменьшая потери переключения

пус для поверхностного монтажа TO-263-7, спроектированный для MOSFET с рабочим напряжением до 1700 В, имеющий площадь на 52% меньше, чем у D3PAK, который обычно используется в приборах 12- и 17-го классов. Наличие пяти параллельных выводов истока существенно уменьшает индуктивность силового контура по сравнению с другими компонентами для поверхностного монтажа. Второй вариант TO-247-4L с выводами для сквозного монтажа отличается длиной тока утечки 8 мм (между стоком и истоком).

**Результаты измерений:  
оценка улучшения  
динамических параметров**

Улучшение динамических характеристик новых типов корпусов подтверждено в ходе испытаний на индуктивную нагрузку, проведенных на семействе транзисторов, упомянутых в таблице 1. На рис. 2 приведено сравнение эпюр включения (600 В/40 А) MOSFET (1000 В, 65 мОм) в корпусе TO-263-7L с сигнальным выводом Кельвина и TO-247-3L без встроенного вывода Кельвина. Даже для подобного «среднеразмерного» MOSFET с типовым внешним резистором затвора 10 Ом время переключения снижено с 72 до 27 нс, то есть скорость коммутации повышена в 2,6 раза.




Поскольку данный эффект контролируется величиной  $di/dt$  MOSFET, можно предположить, что существуют большие возможности для уменьшения потерь переключения для силовых MOSFET с большой площадью чипов, управляемых через малое внешнее сопротивление затвора.

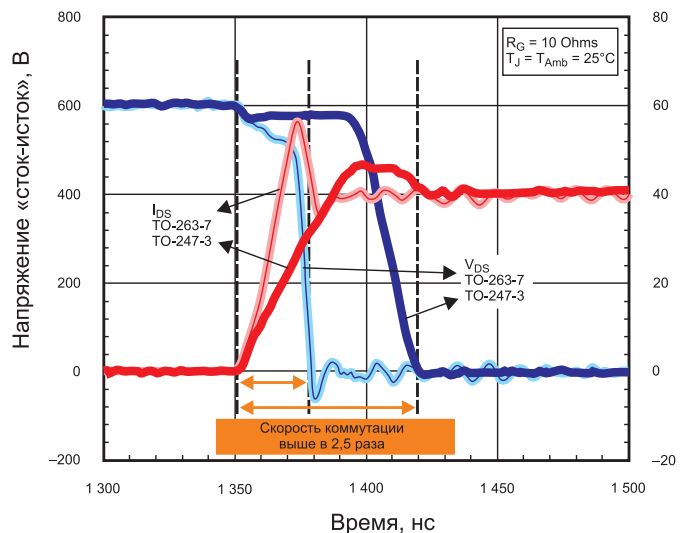
Следующий индуктивный импульсный тест проводился на кристалле 10 мОм, 900 В при сигнале управления  $V_{GS} = -4/+15$  В, сопротивлении затвора  $R_G = 5$  Ом и напряжении  $V_{DD} = 600$  В. На рис. 3 показана зависимость коммутационных потерь от тока стока для транзисторов в стандартном корпусе TO-247-3L (слева) и корпусе TO-247-4L с отдельным выводом Кельвина (справа). В обоих случаях измеренные величины включают потери внутреннего диода верхнего MOSFET, используемого в качестве оппозитного. Результаты демонстрируют потенциальное уменьшение потерь переключения в 3,5 раза при измерении в области номинального тока. Транзисторы SiC MOSFET также обеспечивают более высокую рабочую частоту в режимах мягкой коммутации или резонансной коммутации, которые обычно используются в DC/DC-преобразователях внешних и бортовых DC-станций быстрой зарядки [2].

**Пример применения:  
оптимизированный активный  
выпрямитель (AFE) мощностью  
20 кВт для станции быстрой зарядки**

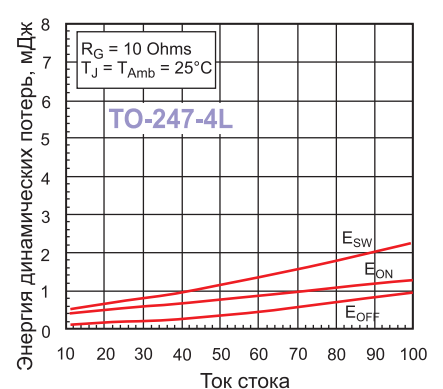
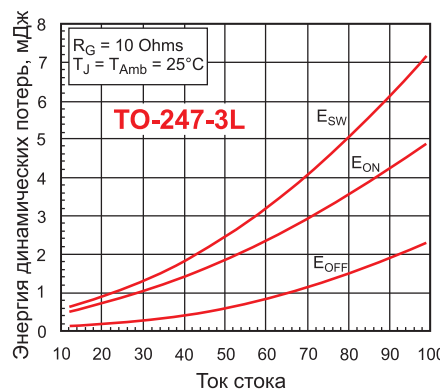
Бурное развитие электротранспорта создает новые возможности для внедрения технологии SiC MOSFET как на самих автомобилях, так и вне их. Подумостовые схемы с жесткой коммутацией используются

**Таблица 1.** Корпуса SiC MOSFET с кельвиновским выводом истока

Номер партии	$R_{ds(on)}$ мОм	Напряжение, В	Внешний вид
C3M0065090J	65	900	
C3M0120090J	120		
C3M0280090J	280		
C3M0065100J	65	1000	
C3M0120100J	120		
C3M0075120J	75		
C2M1000170J	1000	1700	
C3M0010090K	10	900	
C3M0065100K	65		
C3M0120100K	120		
C3M0075120K	75	1200	



**Рис. 2.** Измеренные эпюры включения одного и того же чипа SiC MOSFET в двух типах корпусов: TO-263-7L (с сигнальным выводом Кельвина) обеспечивает скорость коммутации в 2,6 раза выше, чем обычный TO-247-3



**Рис. 3.** Зависимость энергии динамических потерь от тока стока для SiC MOSFET (10 мОм, 900 В) в корпусах TO-247-3L и TO-247-4L. Для кристаллов большой площади при использовании внешнего резистора затвора 5 Ом наблюдается 3,5-кратное снижение энергии потерь на номинальном токе

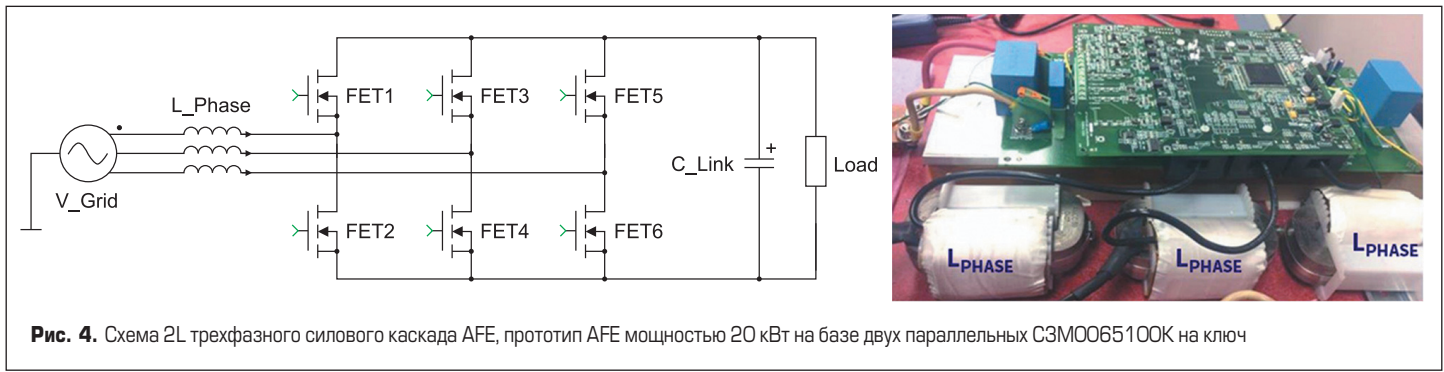


Рис. 4. Схема 2L трехфазного силового каскада AFE, прототип AFE мощностью 20 кВт на базе двух параллельных C3M0065100K на ключ

в DC/DC-преобразователях, тяговых приводах и активных выпрямителях с ККМ зарядных устройств. Транзисторы SiC MOSFET также обеспечивают более высокую рабочую частоту в режиме мягкой коммутации или резонансном режиме, часто применяемых в DC/DC-преобразователях бортовых и внешних зарядных станций постоянного тока.

Новые варианты корпусов и возможность сигнального подключения Кельвина обеспечивают заметное уменьшение потерь переключения в режиме жесткой коммутации. Сочетание улучшенных динамических характеристик 1000-В C3M SiC MOSFET с малыми статическими потерями во всем диапазоне температур, низкий заряд восстановления QRR «тельного» диода и более линейный характер выходной емкости позволяет разработчикам вдохнуть новую жизнь в хорошо известную и простую двухуровневую топологию. Для демонстрации этих преимуществ на системном уровне специалистами Wolfspeed изготовлен и протестирован двухуровневый активный выпрямитель (AFE) на базе SiC-транзисторов (рис. 4), используемый в первичном каскаде бортового зарядного устройства электромобиля.

Прототип AFE разработан с применением MOSFET C3M0065100K, каждый ключ содержит два транзистора без дополнительных антипараллельных диодов. Частота переключения 48 кГц выбрана для того, чтобы обеспечить сбалансированное соотношение

стоимости фазного индуктора, коэффициента гармоник тока THD и простоты фильтра EMI (частота третьей гармоники ниже 150 кГц). Фазные индукторы 400 мкГн имеют сердечник AMCC 50 Metglass 2605SA1, обмотка выполнена из медной фольги. Стандартный метод ШИМ-управления с пространственным вектором реализован с помощью контроллера TMS320F28335. Длительность «мертвого времени» уменьшена до ~100 нс, чтобы снизить искажения напряжения на участке перехода фазного напряжения. Измеренные значения эффективности и THD показаны на рис. 5, который подтверждает, что все поставленные цели достигнуты.

По сравнению с популярной трехуровневой топологией выпрямителя Vienna с применением кремниевых ключей описанный в статье подход обеспечивает снижение потерь мощности более чем на 30% (то есть энергосбережение), упрощение схемы, уменьшение количества комплектующих, простоту управления, поддержку двунаправленной передачи энергии (V2G) и соответствующие улучшения на системном уровне. Более подробную информацию о сравнении прототипа AFE с выпрямителем Vienna можно найти в [1].

### Заключения и выводы

Ожидается, что в ближайшие пять лет мировой рынок силовых полупроводников, используемых в автотранспорте, вырастет более

чем на \$3 млрд за счет электрификации транспортных средств [3]. Высокоэффективные бортовые и внешние станции быстрой зарядки становятся ключевым фактором широкого распространения EV. Использование дискретных MOSFET SiC в экономичных корпусах при разработке таких устройств предлагает разработчикам новые возможности по повышению эффективности преобразования, плотности мощности и энергосбережению. На примере прототипа двухуровневого активного выпрямителя показано, что MOSFET-транзисторы Wolfspeed C3M SiC обеспечивают высокую производительность и 30%-ное снижение потерь мощности при использовании простой топологии схемы и стандартного способа управления.

### Литература

1. Barkley A., Schupbach M., Agrawal B., Allen S. New 1000V SiC MOSFETs Enable Improved Efficiency, Density, and Cost Tradeoff Space for PFCs. Proceedings of the 32nd Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2017). Tampa, FL, USA, March 26–30, 2017. Mookken J. Fast Charging EV with the Latest 1kV 3rd Generation SiC MOSFET. Proceedings of the 32nd Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2017). Tampa, FL, USA, March 26–30, 2017.
2. IHS 2017 <https://ihsmarkit.com/index.html>

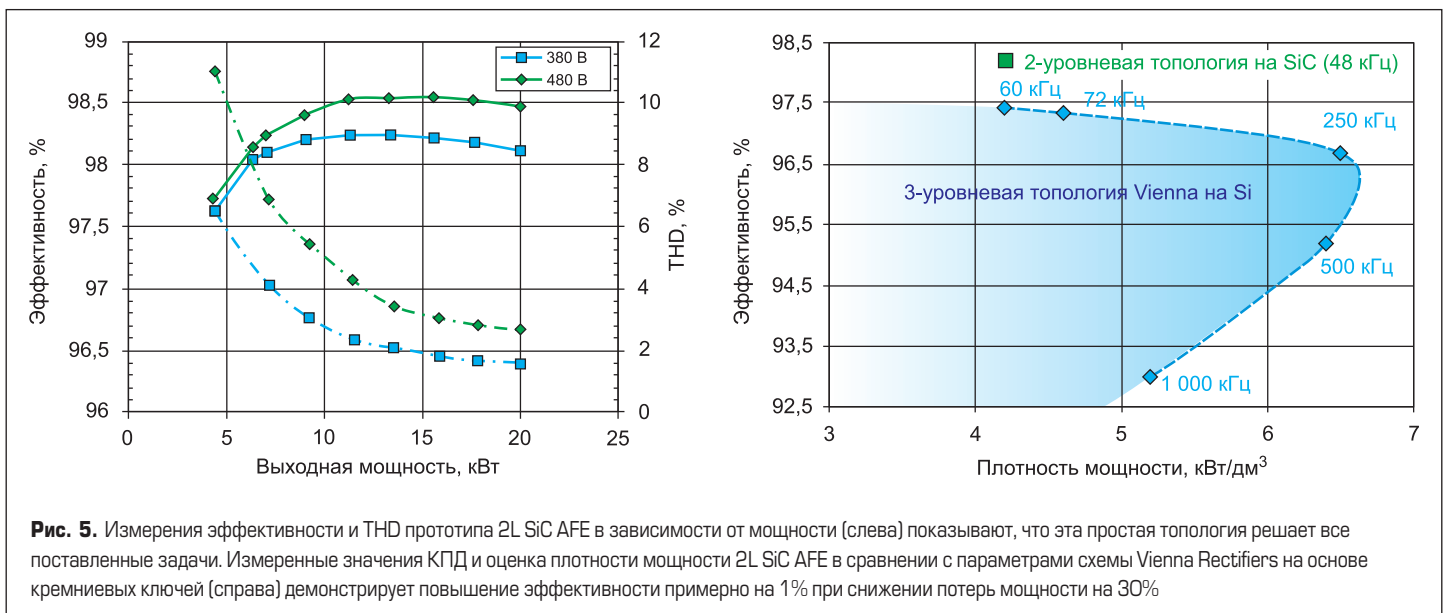


Рис. 5. Измерения эффективности и THD прототипа 2L SiC AFE в зависимости от мощности (слева) показывают, что эта простая топология решает все поставленные задачи. Измеренные значения КПД и оценка плотности мощности 2L SiC AFE в сравнении с параметрами схемы Vienna Rectifiers на основе кремниевых ключей (справа) демонстрирует повышение эффективности примерно на 1% при снижении потерь мощности на 30%