

Второе поколение SiC MOSFET

с повышенной эффективностью и сниженной стоимостью

Пол Кирстед
(Paul Kierstead)

Перевод:
Евгений Карташов

С тех пор как в январе 2011 года компания Cree анонсировала свои первые транзисторы на основе карбида кремния, технология (SiC) MOSFET стала действенным инструментом повышения эффективности преобразователей до уровня, недостижимого с применением прежних кремниевых приборов. Улучшение энергетических показателей позволяет разработчикам силовой электроники снизить энергоемкость своих устройств и соответственно получить больше полезной энергии от преобразователей солнечных батарей и других альтернативных источников, а также удешевить и упростить систему отвода тепла.

Кроме того, применение новых силовых ключей повышает скорость переключения, что, в свою очередь, снижает требования к индуктивным и емкостным пассивным компонентам, позволяя улучшить массо-габаритные и экономические показатели систем. Уменьшение объема и веса своих продуктов на 30–60% уже продемонстрировали производители промышленных источников питания, инверторов солнечных батарей и даже вспомогательных силовых установок для электропоездов. Разработка этих

инновационных, пионерских систем позволяет ускорить вывод силовых SiC-приборов на рынок. Выпуск компанией Cree и другими производителями второго поколения SiC MOSFET являет собой важный шаг на пути к этой цели.

В чем преимущество SiC MOSFET перед традиционными кремниевыми силовыми ключами?

При производстве SiC MOSFET используется планарная DMOS-структура, подобная ранним кремниевым MOSFET-транзисторам (рис. 1). Чтобы понять преимущества этой технологии, необходимо рассмотреть ключевые характеристики, продемонстрированные на рис. 2. Карбид кремния является структурой естественного обогащения, это нормально выключенные приборы. При подаче напряжения на затвор область канала обеспечивает прохождение тока от вывода истока через канал, расположенный под затвором, JFET-зону и, наконец, через дрейфовую область. Суммарная величина сопротивления открытого канала $R_{ds(on)}$ прибора определяется путем суммирования импедансов канала, JFET и дрейфовой зоны.

Сопротивление области дрейфа зависит от толщины эпитаксиального слоя, который определяет напряжение блокировки в выключенном состоянии: у SiC MOSFET для поддержания аналогичного запирающего напряжения она может составлять всего одну десятую относительно обычных кремниевых приборов. Таким образом, дрейфовое сопротивление в высоковольтных кремниевых MOSFET-транзисторах выступает доминирующим при определении блокирующей способности. Соответственно, для повышения обратного напряжения следует значительно увеличить площадь кристалла, что необходимо для получения разумного значения $R_{ds(on)}$. В результате получается громоздкий и дорогой кремниевый полевой транзистор с большими емкостями и ограниченными частотными свойствами.

Технология Superjunction позволяет создавать кремниевые MOSFET с приемлемыми характеристиками на напряжение до 600 В (при более высоких напряжениях, как правило, используются

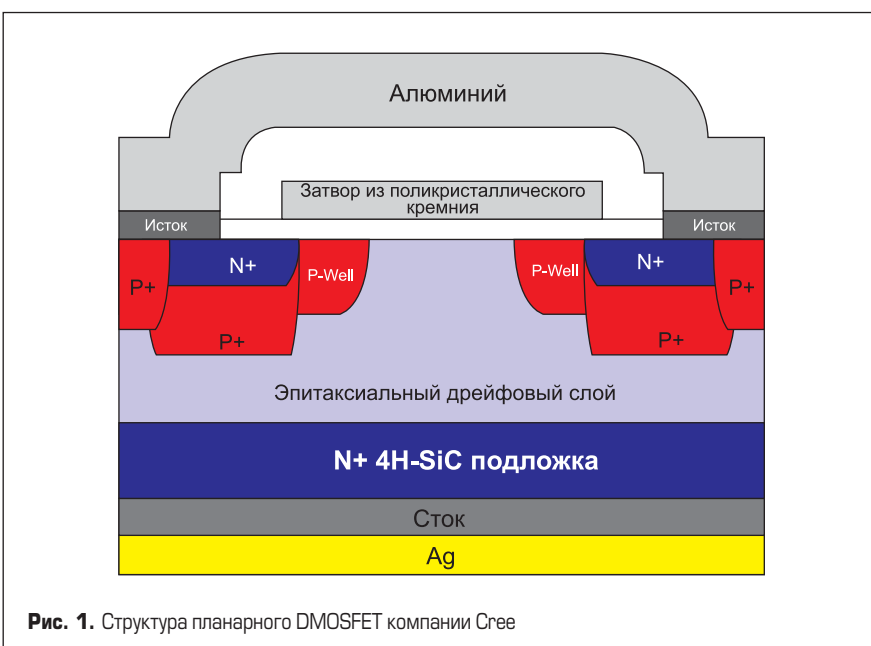
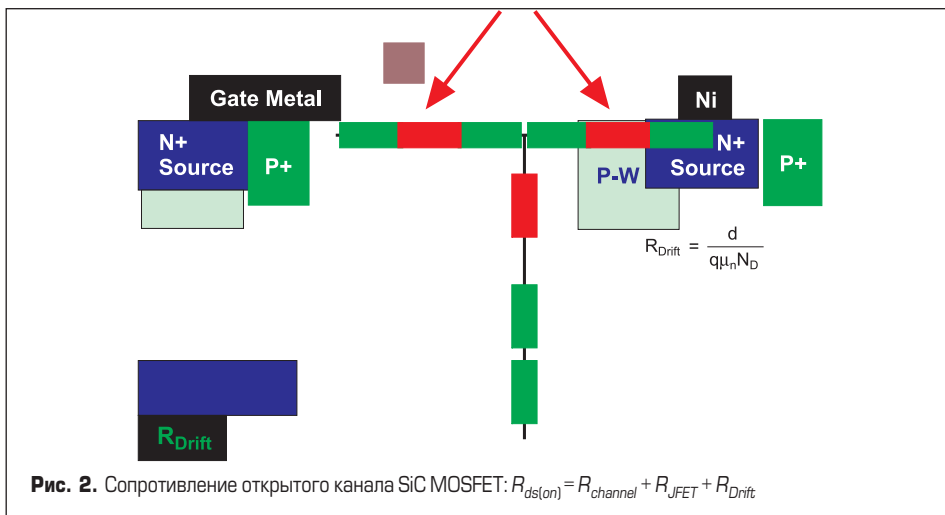


Рис. 1. Структура планарного DMOSFET компании Cree



IGBT-приборы, обеспечивающие низкие потери проводимости при доступной цене). Кремниевые IGBT в настоящее время служат рабочей лошадкой для построения силовых преобразователей с напряжением выше 600 В. В этих ключах сочетаются высокий импеданс структуры затвора, управляющего переключением устройства, и биполярный характер проводимости, обеспечивающий удельный низкий уровень статических потерь (относительно площади кристалла). Такая комбинация гарантирует простоту управления, высокую блокирующую способность и низкие потери проводимости.

Тем не менее характеристики IGBT никак нельзя назвать удовлетворительными в отношении коммутационных потерь. Вследствие того что силовой ток проходит через биполярный канал, при выключении прибора необходимо устранить заряд, накопленный в барьерном переходе. В результате образуется значительный «хвостовой» ток, трансформирующийся в динамические потери энергии. Характеристики SiC-приборов позволяют использовать униполярную структуру MOSFET в высоковольтных применениях и, следовательно, обеспечивать аналогичные IGBT-параметры проводимости. При этом собственные емкости кристалла оказываются намного ниже и отсутствуют проблемы, связанные с «хвостовым» током.

В целом уровень потерь проводимости и переключения SiC MOSFET в два — пять раз ниже, чем у кремниевых MOSFET или IGBT 12-го класса (в зависимости от схемы и рабочей частоты). Это преимущество растет с увеличением рабочего напряжения. На сегодня серийно производятся модули SiC MOSFET второго поколения с напряжением 1200 и 1700 В.

Насколько улучшена производительность у модулей второго поколения?

Как уже говорилось, первое поколение SiC MOSFET продемонстрировало существенное повышение эффективности преобразования. С целью дальнейшего совершенствования были уменьшены сопротивления (рис. 2),

что позволило снизить общий уровень потерь и использовать кристаллы меньшего размера для данного токового класса. Дрейфовое сопротивление доминирует при определении блокирующей способности, поэтому здесь возможно только поэтапное улучшение.

Основная цель совершенствования SiC MOSFET-топологии — улучшение структуры затвора и геометрии канала, что необходимо для увеличения крутизны характеристики затвора. Поставленная задача была решена за счет оригинальной конструкции прибора и совершенствования технологических процессов (см. таблицу). В новых устройствах крутизна характеристики повышена более чем на 30%, что наряду с другими производственными мерами позволило сократить площадь чипа на 35%. В свою очередь, стало возможным обеспечить заданную величину $R_{ds(on)}$ при меньшей площади SiC-кристалла, то есть теперь на пластине можно расположить больше чипов (а соответственно, повысить выход годных) и снизить конечную стоимость изделия.

Кроме того, использование кристаллов меньшего размера повышает энергетическую эффективность и улучшает характеристики переключения. Проведенные усовершенствования, повысив мобильность канала, позволили также снизить величину емкостей затвора и его заряд, что привело к снижению потерь переключения на системном уровне.

Обратите внимание на улучшение параметров переключения, отмеченное в таблице. Ключи SiC первой генерации при коммутации напряжения 800 В при максимальной рабочей температуре рассеивали на 40% более высокую мощность. Приборы второго поколения могут переключаться намного быстрее при меньших потерях, позволяя повысить рабочую частоту системы и сохраняя или даже повышая при этом эффективность преобразования.

Что должны знать разработчики силовых систем, чтобы реализовать преимущества новейших SiC-приборов?

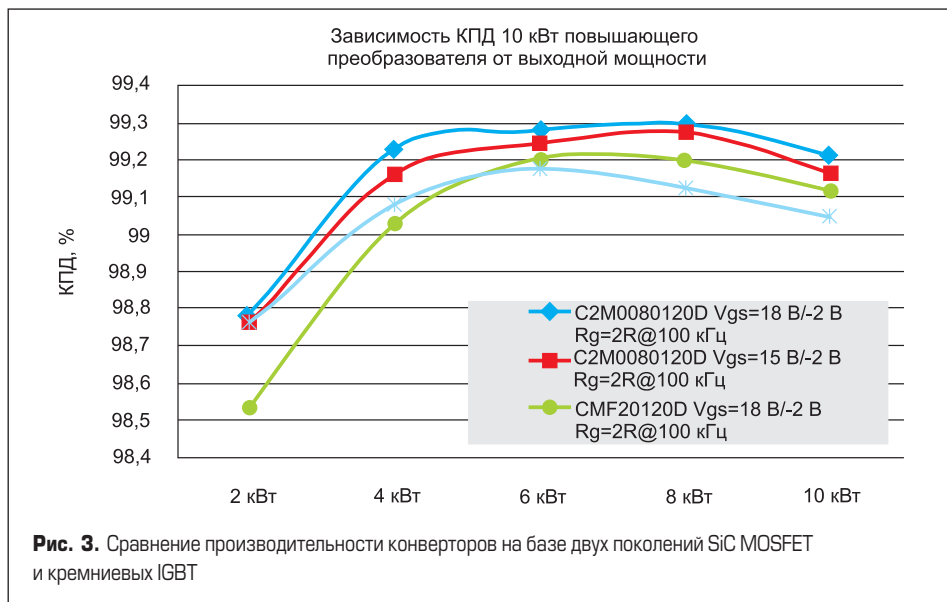
Сниженная величина емкостей и увеличенная скорость переключения должны быть учтены в процессе проектирования устройства управления, поскольку это может повлиять на уровень ЕМI. Повышенная скорость коммутации требует особого внимания при разводке печатной платы драйвера и выборе компонентов. Внешние сопротивления затвора могут быть использованы для подавления звона в цепи управления и снижения уровня электромагнитных помех. Компания Cree опубликовала руководства по применению и разработке драйверов, призванные помочь в преодолении этих проблем.

Кроме того, при сравнении величины $R_{ds(on)}$ в диапазоне температур между различными устройствами важно отметить, что сопротивление открытого канала в новых приборах увеличивается с ростом рабочей температуры в большей степени, нежели у ранних поколений ключей. Однако даже на сравнительно низких частотах переключения снижение уровня динамических потерь для второго поколения SiC-приборов обеспечивает значительное улучшение суммарных показателей системы.

На рис. 3 представлено относительное улучшение производительности (по сравнению с IGBT) для повышающего конвертера мощностью 10 кВт, разработанного Cree для преобразования энергии солнечных батарей. На графике показана общая энергоэффективность системы в широком диапазоне мощности нагрузки. Полученные данные подтверж-

Таблица. Сравнительные характеристики 80-мОм SiC MOSFET 1-го и 2-го поколения

Параметр	Поколение 1 CMF20120D	Поколение 2 C2M0080120D
Размер кристалла		-35%
Типовое сопротивление канала ($T_j = 25\text{ }^\circ\text{C}$), мОм	80	
Типовое сопротивление канала ($T_j = 125\text{ }^\circ\text{C}$), мОм	95	123
Напряжение на затворе	-5/+25 В	-10/+25 В
Потери переключения ($T_j = 150\text{ }^\circ\text{C}$, $V_{DS} = 800\text{ В}$), мДж	0,78	0,56
Заряд затвора, нКл	91	49
Крутизна характеристики	7,4 С	9,8 С
Входная емкость C_{iss} , пФ	1915	950
Выходная емкость C_{oss} , пФ	120	80
Обратная емкость C_{riss} , пФ	13	6,5
Тепловое сопротивление, $^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,5	0,6



дают значительное улучшение показателей при использовании обоих поколений SiC MOSFET и подчеркивают преимущества новейшей генерации карбидокремниевых приборов по сравнению с предшествующей.

Не менее впечатляет сравнение кремниевых IGBT на частоте 20 кГц с SiC-ключами, работающими на частоте 100 кГц. Экономия на цене комплектующих системы, составляющая около 10%, достигнута за счет перепроцессинга моточных изделий и радиатора на более высокую частоту коммутации и со-

ответственно больший КПД. Дальнейшие подробности, касающиеся рекомендаций по проектированию, а также сравнительные данные по производительности и стоимости системы могут быть предоставлены компанией Cree.

В заключение отметим, что SiC MOSFET-транзисторы могут теперь выпускаться в больших объемах за счет значительного упрощения технологических процессов производства. Новейшие поколения приборов отличаются конструктивными и технологическими улуч-

шениями, что в коммерческом исполнении позволяет обеспечить им еще более высокую надежность. Доказательством тому служат повышенная максимальная рабочая температура и расширенный диапазон напряжения управления. Сравнение вольт-амперных кривых, приводимых в технических характеристиках, показывает гораздо более высокую производительность в диапазоне рабочих напряжений, способствующую упрощению процесса разработки преобразователей.

Заключение

Последние поколения SiC MOSFET-транзисторов демонстрируют заметное улучшение характеристик в сравнении с ранними поколениями, при этом закупочные цены на них постоянно снижаются. Поскольку разработчики применяют эти ключи все более широко, используя преимущества технологии карбида кремния, силовые преобразовательные системы могут уже сегодня стать более энергоэффективными, простыми в реализации, лучшими по массо-габаритным показателям, чем устройства на базе кремниевых ключей. Производители SiC-приборов продолжают работать над повышением их производительности, экономических показателей, расширением гаммы продукции. Компания Cree предполагает, что это позволит SiC-ключам в ближайшее время заменить кремниевые приборы в широком спектре областей применения.