

Новые силовые SiC-модули

обеспечивают большую плотность мощности в меньших габаритах, чем Si IGBT

В связи с растущим спросом (рис. 1) на энергию для широкого спектра применений, включая производство электроэнергии, ее хранение и транспортировку, возникает необходимость в создании более эффективных систем преобразования и управления, обеспечивающих будущее энергетических систем. Соответственно, растет потребность в более компактных и мощных силовых модулях, способных работать при высоких температурах.

Евгений Карташов

Валерия Смирнова

cree@macrogroup.ru

Введение

До недавнего времени на рынке силовых модулей доминировали кремниевые биполярные транзисторы с изолированными затворами (Si IGBT). Изменение спроса и ориентация на более высокую эффективность преобразования снизило популярность этих модулей в приложениях высокой мощности, что привело к появлению силовых устройств на основе карбида кремния. Новые компоненты на основе SiC способны работать при больших напряжениях и токах (большой мощно-

сти) в меньших габаритах, чем их аналоги на основе кремния, что позволяет создавать модули с высокой плотностью мощности, минимальными паразитными элементами и высокой рабочей температурой.

Цель данной статьи — ознакомить специалистов в области энергетики с преимуществами новейших SiC-модулей по сравнению с Si IGBT в современных приложениях силовой электроники. Приведено сравнение двух технологий, а также продемонстрированы возможности новейших силовых SiC-модулей на примере проектирования трехфазного инвертора.



Тенденции силовой электроники

Силовые модули становятся все более востребованными в промышленности благодаря простоте применения и совместимости с промышленными стандартными шинными соединениями, контроллерами и датчиками, а также коммерчески доступными радиаторами. Использование силовых модулей позволяет разработчикам сосредоточиться на получении максимальной эффективности энергетической системы, вместо того чтобы тратить ценное время на проектирование нестандартных корпусов, радиаторов, шинных соединений, на интеграцию и настройку сенсорной и управляющей электроники.

Сегодня более чем когда-либо растет потребность в быстрой и эффективной разработке энергетических систем, что связано с ошеломляющей скоростью развития многих новых приложений (рис. 2). Спрос на возобновляемые источники энергии, электромобили, железнодорожный транспорт, более эффективные сетевые системы, включая накопители энергии и источники бесперебойного питания (ИБП), которые обеспечивают постоянную работу центров обработки данных и критически важных электрических систем, — эти приложения из года в год демонстрируют двузначный рост.

Как новые SiC-приборы превосходят устаревшие Si IGBT

Высокий спрос на силовые модули для разработки новых приложений и улучшения существующих систем создает возможности для инноваций, направленных на повышение производительности и возможностей силовых модулей. Традиционные силовые ключи используют технологию Si IGBT, которая существует уже несколько десятилетий. Специфические типоразмеры и особенности конструкции Si IGBT определяют общие ожидания в отношении плотности мощности и конструктивных ограничений.

Однако с появлением новых силовых модулей, оптимизированных для SiC-технологии, существующие стандарты и представления требуют корректировки. Новейшие SiC-транзисторы разработаны с использованием полупроводников из карбида кремния, который имеет ширину запрещенной зоны почти в три раза выше, чем у кремния, в 10 раз большее критическое поле, в пять раз лучшую теплопроводность, а по общей мощности значительно превосходит возможности кремния (табл.).

Преимущества технологии SiC в сочетании с MOSFET-транзисторами, в отличие от биполярных транзисторов, позволяют новым 100% SiC-приборам обеспечивать гораздо более вы-



сокие рабочие напряжения и токи в корпусах, соизмеримых со стандартными Si IGBT. Кроме того, SiC-приборы способны обеспечить гораздо меньшие (> 5 раз) коммутационные потери, чем Si IGBT, следовательно, частота переключения SiC может быть в несколько раз выше (типичное значение 10–50 кГц), чем у Si IGBT, имеющих ограниченную скорость коммутации. Меньшие потери проводимости SiC позволяют обеспечить большую эффективность при частичных нагрузках по сравнению с Si IGBT.

Инновации запускают силовые SiC-модули на коммерческие рынки

При рассмотрении особенностей мощных модулей следует понимать, что сами силовые чипы — это лишь часть проблемы. Особенности конструкции и интегральные характеристики сборки и связанной с ней электроники также заметно влияют на эффективность работы и функциональность всего силового модуля. Как следствие, при его проектировании требуется оптимизация производительности силовых чипов и учет таких особенностей, как паразитные индуктивности, надежность при высоких температурах и особенности подключения для соответствующих приложений.

Компания Wolfspeed реализовала эти требования в своих новейших силовых модулях XM3 full SiC (рис. 3), в которых также сделан ряд усовершенствований, позволивших уменьшить площадь основания, увеличить плотность мощности и снизить количество комплектующих, одновременно повысив про-



изводительность. По многим особенностям новой технологии модули XM3 SiC напоминают сложные компактные специализированные производственные системы, однако эти компоненты созданы для обеспечения высокой производительности и функциональности в крупносерийных применениях при чрезвычайно конкурентоспособной цене.

Высшие достижения SiC силовых модулей

Модуль XM3 (CAB450M12XM3) создан с применением чипов новейшего поколе-

Таблица. Свойства полупроводников Si и SiC

Материал	Ширина запрещенной зоны, эВ (~ 300К)	Насыщенная скорость электронов, ×10 ⁷ см/с	Подвижность электронов, см ² /Вс	Критическое поле E _c , В/см	Теплопроводность, Вт/м·К	Кoeffициент теплового расширения, ppm/К	Показатель качества силового модуля, u_n*E_c^3	Диэлектрическая константа, epsilon_r
Si	1,12; I	1	1400	300000	130	2,6	1	11,8
SiC (4H, α)	3,25; I	~2	700	3180000	700	5,12	675	10

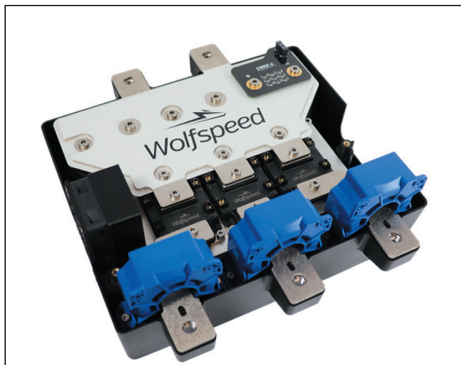


Рис. 4. Трехфазный инвертор мощностью 300 кВт демонстрирует высокую плотность мощности и эффективность на системном уровне, полученные за счет новой модульной платформы Wolfspeed XM3. Плотность мощности трехфазного инвертора более чем вдвое выше, чем у сопоставимых конструкций на основе кремния, его эффективность превышает 98%

ния SiC MOSFET от Wolfspeed, оптимизированных по параметрам проводимости. Новое поколение силовых модулей отличается высокой рабочей температурой, низкой паразитной индуктивностью, а также чрезвычайно высокой плотностью мощности, которая превышает этот показатель как у Si IGBT, так и у других SiC-ключей. Рабочее напряжение этих модулей может достигать предельных значений 1200 В при номинальном токе до 450 А.

Ключевые особенности XM3:

- пиковая мощность: 100–300 кВт при очень высокой плотности мощности (32 кВт/л);
- высокая рабочая температура: +175 °С;
- низкая распределенная индуктивность: 6,7 нГн;
- в пять раз меньшие динамические потери позволяют повысить частоту коммутации (типичное значение 10–50 кГц);
- низкие потери проводимости без перегиба прямой характеристики для повышения эффективности при малых нагрузках;

- интегрированный термодатчик рядом с транзистором TOP (вблизи выводов NTC);
- встроенный сенсор выхода из насыщения (De-Sat) для простоты подключения драйвера;
- смещенная топология терминалов для простого и низкоиндуктивного подключения внешних шин;
- надежная подложка из нитрида кремния для приложений, требующих повышенной стойкости к термоциклированию.

Ключи XM3 демонстрируют отличные электрические характеристики, они разработаны с учетом высокой степени интеграции. Новые SiC-модули созданы с применением компактного конструктива 80×53×19 мм, который обеспечивает плотность мощности более 30 кВт/л, этот корпус на 60% меньше, чем другие сопоставимые по мощности компоненты. Данный факт в сочетании с оптимизированной стратегией подключения шин позволяет снизить паразитную индуктивность на системном уровне и реализовать КПД силового модуля на уровне более 98%.

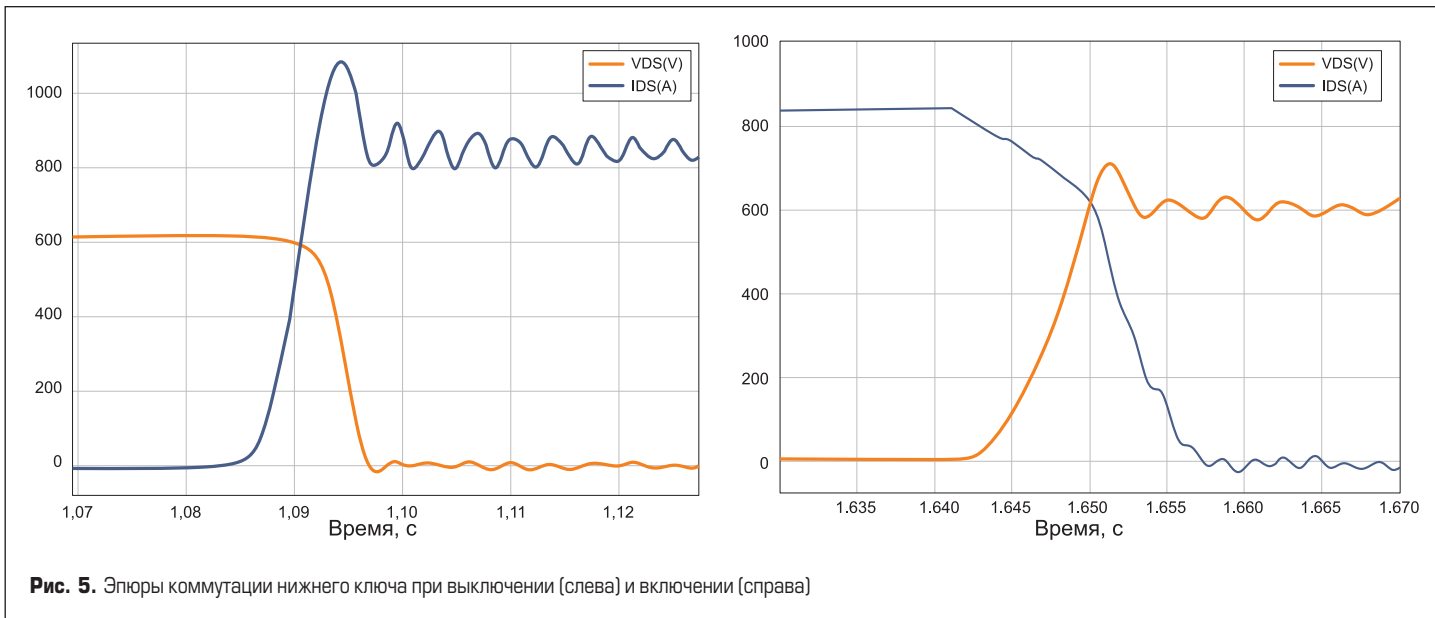


Рис. 5. Эпюры коммутации нижнего ключа при выключении (слева) и включении (справа)

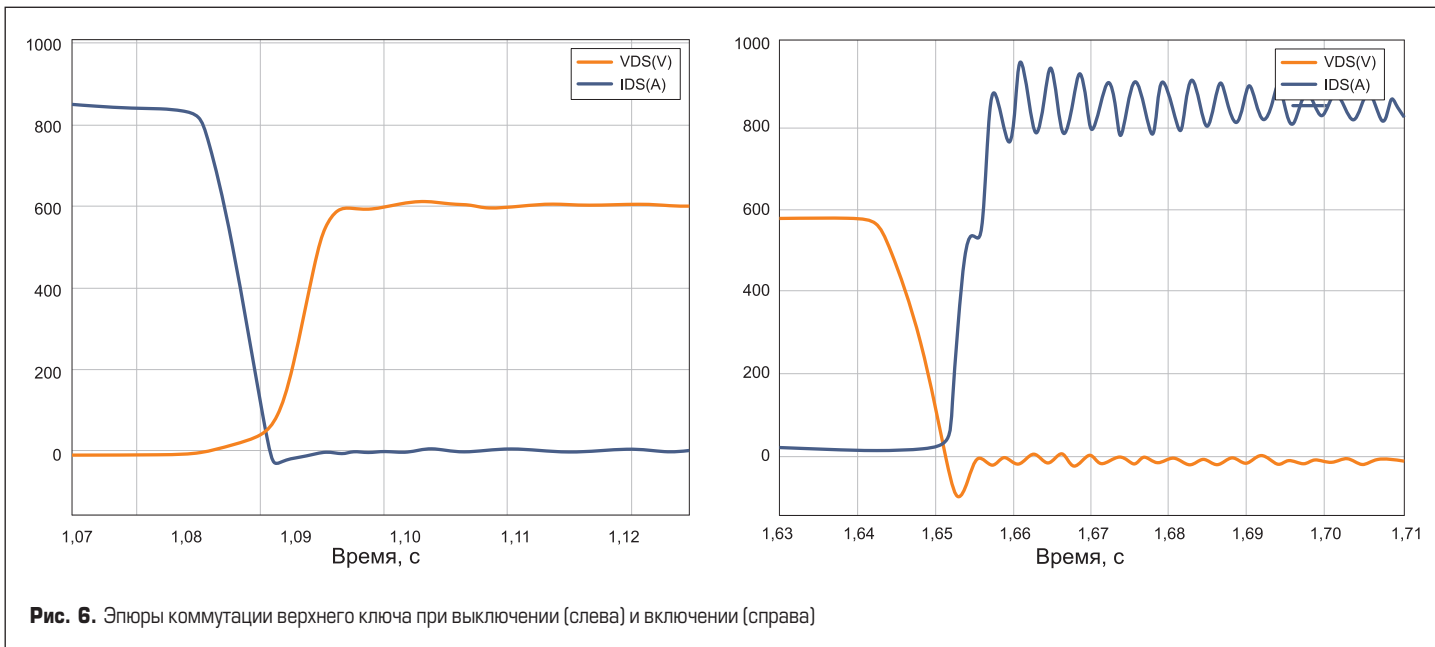


Рис. 6. Эпюры коммутации верхнего ключа при выключении (слева) и включении (справа)

Прототип — трехфазный инвертор мощностью 300 кВт

Существует множество применений, получающих преимущества от высокой плотности мощности и низкой распределенной индуктивности силовых модулей XM3 SiC. Ниже приводится описание эталонной конструкции трехфазного инвертора мощностью 300 кВт, разработанного Wolfspeed, идеально подходящего для моторных и тяговых приводов, сетей с распределенной структурой и высокоэффективных преобразователей (рис. 4).

В соответствии с концепцией дизайна силовых модулей XM3 конструкция трехфазного инвертора оптимизирована для достижения минимальной распределенной индуктивности и максимальной мощности, что снижает стоимость и сложность всей системы. Кроме того, для минимизации внешней индуктивности использована перекрывающаяся планарная структура шин, а конденсаторы, предназначенные для подавления пульсаций, также являются низкоиндуктивными компонентами. Эти факторы обеспечивают минимальную паразитную индуктивность системы, что позволяет повысить скорость переключения при высоком уровне эффективности.

Наряду с другими конструктивными особенностями, включая микродеформационный жидкостный радиатор Wolverine, инвертор имеет размеры 279×291×155 мм при плотности мощности 32,25 кВт/л. Данная эталонная конструкция инвертора обеспечивает мощность 250 кВт при рабочем напряжении 1,2 кВ и расширяет гамму разработанных ранее прототи-

пов инверторов Wolfspeed. В ходе тестирования трехфазный инвертор, использующий технологию XM3 SiC, продемонстрировал очень малые потери переключения и минимальный уровень паразитных осцилляций, несмотря на низкое сопротивление затвора, используемое в устройстве (рис. 5, 6).

Примеры применения SiC-модулей

Новые силовые модули Wolfspeed XM3 SiC предназначены для работы в разных областях применения, включая современные моторные и тяговые приводы, UPS и зарядные станции для электротранспорта. Кроме того, любое устройство мощностью 100–300 кВт, работающее в условиях высоких магнитных полей и требующее применения больших входных и/или выходных фильтров, может получить преимущества от снижения габаритов за счет применения компактного корпуса XM3 и оптимизированной конструкции шин.

Преобразователи, возможности которых были ограничены килогерцовыми частотами переключения Si IGBT, могут извлечь выгоду из многократного увеличения скорости коммутации, обеспечиваемого модулями SiC. Сюда относятся системы питания центров обработки данных, системы автоматизации производства и другие приложения, требующие высоких затрат на системном уровне, в которых увеличение эффективности и сокращение количества комплектующих дают экономию эксплуатационных и общих расходов. Кроме того, по надежности и диапазону рабочих температур SiC MOSFET

превосходят Si IGBT. Эти силовые модули оптимальны для работы в экстремальных условиях и в сложных условиях эксплуатации, таких как железные дороги, тяговое оборудование и машиностроение, которые все больше электрифицируются.

Закключение

Рыночный рост и усилия по освоению новых рынков в индустрии силовой электроники предъявляют требования по производительности, выходящие за пределы технических ограничений кремниевых силовых модулей. Wolfspeed использовал свое превосходство в технологии карбида кремния для разработки новейшего и наиболее мощного из коммерчески доступных силовых ключей — SiC-модуля XM3 53 мм. Благодаря компактным размерам, высокой рабочей температуре, большой скорости переключения и низкой распределенной индуктивности новые модули XM3 позволяют создавать малогабаритные силовые системы с высокой эффективностью, что необходимо для новых типов преобразователей, инверторов и источников питания.

Литература

1. What is driving the power electronics industry?
2. High-Performance 300 kW 3-Phase SiC Inverter Based on Next Generation Modular SiC Power Modules (IEEE)
3. Wolfspeed CAB450M12XM3 1200V/450A Silicon Carbide XM3 Half-Bridge Module