

Силовые SiC-модули

для высоковольтных приложений

Разработка силовых приборов с высоким рабочим напряжением (6,5 кВ и выше) позволила передавать большую мощность при заданном токе и уменьшить количество ключей, необходимых для реализации данных величин напряжения в многоуровневых преобразователях. Силовые приборы на основе карбида кремния имеют значительно большее блокирующее напряжение (до десятков киловольт), более высокие частоты коммутации и рабочие температуры (+200 °С). Их применение дает возможность специалистам силовой электроники разрабатывать компактные силовые модули, способные работать при более высоких напряжениях и требующие меньших усилий по отводу тепла, чем силовые модули на основе обычных кремниевых кристаллов.

**Брэндон Пассмор
(Brandon Passmore)**

**Перевод:
Евгений Карташев**

Проектирование и производство новых компактных высоковольтных силовых модулей на основе карбида кремния (SiC) требует внимательного изучения свойств изоляционных материалов, анализа путей токов утечки, оптимизации паразитарных элементов конструкции и внешних цепей подключения, а также проведения тестов при высоких температурах и других предельных воздействиях окружающей среды. Два силовых SiC-модуля, описанных в этой статье, наглядно демонстрируют потенциал карбидокремниевых приборов в высоковольтных применениях, таких как хранение энергии, сетевая силовая электроника, а также железнодорожные и судовые энергетические системы.

Силовые SiC-модули для применений с напряжением 15 кВ

Компанией Cree разработан низкопрофильный (малогабаритный) силовой модуль на основе высоковольтных SiC-приборов последнего поколения, позволяющий увеличить рабочее напряжение при минимальном размере модуля и снизить необходимость в его эффективном охлаждении. По сравнению с аналогичным Si-прибором на 6,5 кВ, SiC-модуль занимает только треть его объема и весит в половину меньше, обеспечивая при этом на порядок более высокую скорость переключения и вдвое большее напряжение пробоя при пониженных требованиях к охлаждению. На системном уровне это выражается в росте КПД более чем на 10% и снижении потерь энергии на 50%, что увеличивает удельную мощность всей системы. Таким образом, новый SiC-модуль представляет собой «кирпичик» для построения силовых конвертеров, отличающихся простотой конструкции и повышенной эффективностью преобразования.

В разработанном приборе (рис. 1), имеющем полумостовую конфигурацию, использовано восемь SiC-приборов на ключ: четыре SiC-транзистора и четыре SiC-диода Шоттки. Конструкция модуля может исполь-

зовать широкий спектр различных высоковольтных приборов, в том числе SiC MOSFET на 10 кВ/40 А или SiC IGBT на 15 кВ/80 А. В состав модуля входит встроенный термодатчик, контролирующий температуру кристаллов в процессе работы.

В модуле предусмотрен стандартный способ подключения выводов кристаллов с помощью ультразвуковой сварки, а также возможность монтажа методом «флип-чип». Изолирующие подложки, базовые платы и корпуса стандартизированы для обеих конфигураций модуля с целью упрощения типизации и повышения технологичности конструкции. После соединения базовой платы и подложки с помощью высокотемпературного припоя производится проверка четырех отдельных полумостовых блоков перед их включением в прибор. Независимое тестирование и контроль качества для всех узлов дает уникальную возможность доработки силового ключа перед окончательной сборкой.

Оптимизация положения силовых элементов внутри модуля позволяет улучшить термомеханические



Рис. 1. SiC-модуль с рабочим напряжением 15 кВ и рабочей температурой +200 °С. Ключевыми параметрами конструктива являются гибкость, модульность и малый форм-фактор

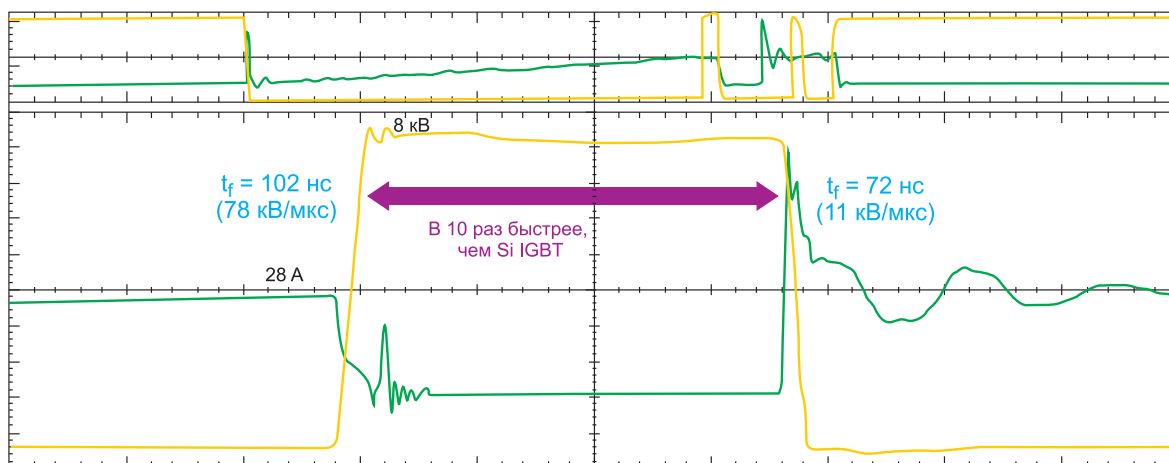


Рис. 2. Кривые коммутации связанной индуктивной нагрузки ($V_{DC} = 8 \text{ кВ}$, $I_{sw} = 28 \text{ А}$, $R_g = 2,5 \text{ Ом}$) для субмодуля с рабочим напряжением 15 кВ

характеристики и снизить эффект деформации из-за несоответствия коэффициентов теплового расширения (КТР) используемых материалов. Базовые платы полумостовых «субблоков» выполнены из матричного композиционного материала с низкой плотностью и малым КТР. Это обеспечивает снижение веса на 80%, так как база, как правило, является самой «тяжелой» составляющей модуля. Кроме того, поскольку в системе обычно используется несколько ключей, уменьшение их веса может способствовать значительному снижению массо-габаритных показателей системы.

Корпус модуля изготовлен из высокотемпературного пластика, который обеспечивает защиту от внешней среды и позволяет работать при высоких температурах. Термостойкий пластиковый корпус также был разработан для удовлетворения требованиям стандартов UL и МЭК по длинам путей утечки (степень загрязнения 2), соответствующим эксплуатации при напряжении 15 кВ. Необходимые внутренние зазоры обеспечиваются путем заливки высокотемпературным силиконовым гелем.

Высокая производительность и отличные характеристики переключения нового 10-кВ

SiC MOSFET продемонстрированы на рис. 2 на примере динамических параметров субмодуля. Эпюры получены при коммутации ключа на связанную индуктивную нагрузку при напряжении 8 кВ и токе 28 А. При использовании резистора затвора 2,5 Ом субмодуль имеет скорость переключения до 111 кВ/мкс, что в 10 раз выше, чем у обычных Si IGBT. На рис. 3 показаны кривые энергии включения и выключения, а также общее значение энергии потерь субмодуля при различных токах.

Силовой модуль SiC IGBT 24 кВ/30 А

Инженерные образцы модуля на основе высоковольтных 24-кВ SiC IGBT кристаллов были разработаны по контракту с исследовательской лабораторией американской армии (Договор о сотрудничестве W911NF-13-2-0023) для удовлетворения конкретных требований по ультравысоковольтному модулю в компактном конструктиве. Конструкция силового ключа, показанного на рис. 4, спроектирована с учетом работы при напряжении 24 кВ. Расстояния между терминалами

не соответствуют требованиям, позволяющим предотвращать пробой на открытом воздухе, поэтому модуль спроектирован с учетом работы в диэлектрической жидкости.

Конфигурация прибора может быть изменена для различных топологий схем, это может быть одиночный IGBT с антипараллельным диодом, чоппер или полумост, таким образом, разработчики получают набор базовых блоков для реализации широкого спектра высоковольтных приложений. Модуль специально разработан для применения при высоких температурах (+200 °C), для чего внутреннее пространство заполнено диэлектрическим наполнителем, а внешняя часть корпуса изготовлена из высокотемпературного пластика.

Разработка силового модуля производилась с использованием моделирования методом конечных элементов (FEM), а также усовершенствованных CAD инструментов для определения механических напряжений, температурных градиентов, напряженности электрических полей и величин паразитных элементов. Кроме того, был выбран материал базовой платы, имеющий хорошее согласование по коэффициенту теплового расширения с керамической подложкой, использованной для электрической изоляции высоковольтного SiC IGBT.

В предыдущих работах, например [1], были представлены характеристики обратного напря-

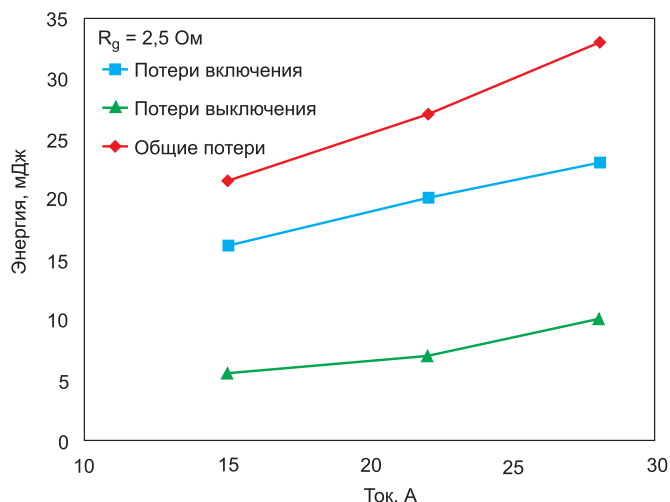


Рис. 3. Энергия переключения в зависимости от тока при $V_{DC} = 8 \text{ кВ}$ для субмодуля: общие динамические потери в 70 раз ниже, чем у модуля Si IGBT (6,5 кВ/250 А)



Рис. 4. Силовой модуль SiC IGBT (24 кВ/30 А)

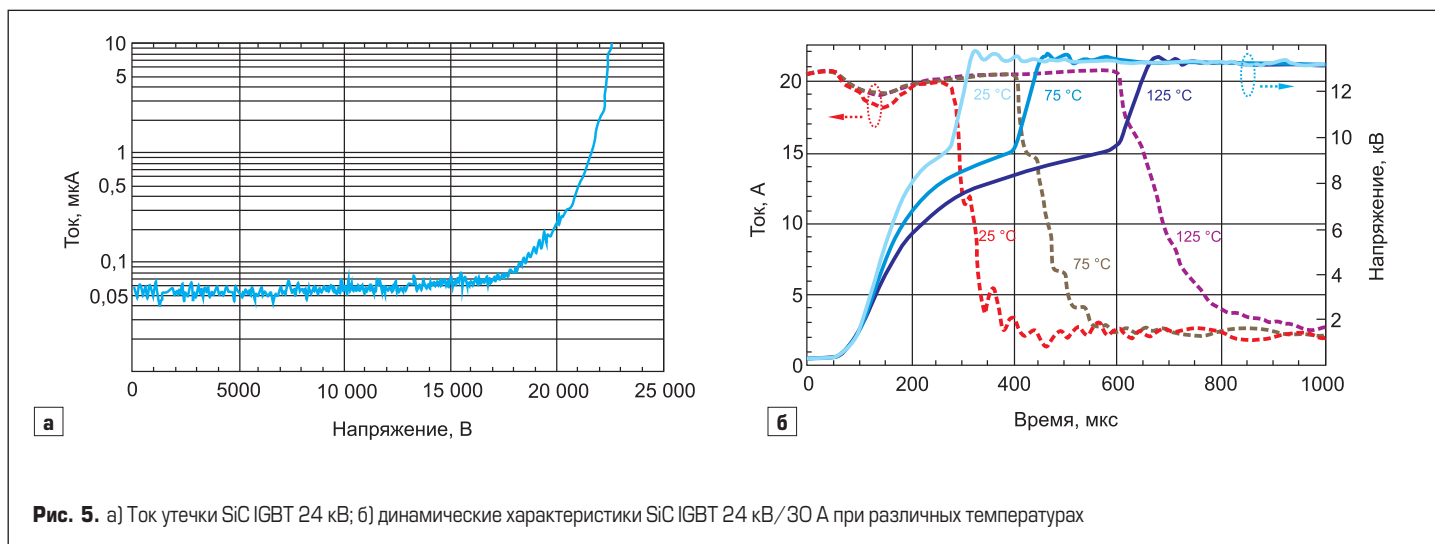


Рис. 5. а) Ток утечки SiC IGBT 24 кВ; б) динамические характеристики SiC IGBT 24 кВ/30 А при различных температурах

жения и режима переключения в диапазоне температур +25...+125 °С (рис. 5). Тестирование, проведенное со связанной индуктивной нагрузкой при напряжении и токе 14 кВ/22 А, продемонстрировало скорость переключения 46 кВ/мкс, некоторое ухудшение было отмечено при повышении температуры до +125 °С. Однако следует отметить, что конструкция и производительность устройства были существенно улучшены в процессе проектирования. В целом, SiC IGBT 24 кВ продемонстрировал экстремально высокие скорости переключения.

Заключение

Два новых высоковольтных, высокотемпературных силовых SiC-модуля показали пре-

дельно высокие характеристики переключения транзисторов на основе карбида кремния. Корпус модуля, разработанный специально для установки этих и других широкозонных мощных полупроводниковых приборов, обеспечивает снижение габаритов и сложности многоуровневых преобразователей (MLI), устранение внешней системы охлаждения, а также значительное повышение КПД и плотности мощности на системном уровне. В частности, высоковольтные и тепловые характеристики мощных SiC-приборов позволяют разработчикам силовой электроники значительно сократить количество схемных уровней MLI по сравнению с обычными Si-модулями.

Хотя стоимость устройств на основе SiC часто рассматривается как препятствие

к их широкому применению, она постоянно уменьшается по мере увеличения объема производства. Кроме того, поскольку применение SiC-приборов позволяет снизить общую стоимость системы и существенно повысить ее эффективность, у системных интеграторов нет необходимости в достижении полного паритета по их стоимости с кремнием.

Литература

1. E. V. Brunt, L. Cheng, M. O'Loughlin, C. Capell, C. Jonas, K. Lam et al. 22 kV, 1 cm², 4H-SiC n-IGBTs with Improved Conductivity Modulation // 26th International Symposium on Power Semiconductor Devices & IC's. Waikoloa, Hawaii. 2014.