

Транзисторы SiC MOSFET

со сверхнизким сопротивлением канала в приводах электромобилей

Три технологических фактора, оказывающих влияние на рынок, одновременно создают возможность для SiC MOSFET стать основным типом силовых ключей в электромобилях с батарейным питанием (BEV). Совершенствование тяговых приводов BEV, в которых применение SiC-технологии позволяет снизить потери инвертора до ~78% в цикле EPA, предлагает разработчикам таких систем увеличение пробега или снижение цены батареи при заданном пробеге. Компания Cree/Wolfspeed серийно выпускает SiC-пластины с 1991 года, диоды — с 2001 и MOSFET — с 2011 года. Рынок силовых SiC-модулей растет постоянно и на сегодня превышает \$200 млн.

Джефф Касади
(Jeff Casady)

Монти Б. Хейес
(Monty B. Hayes)

Перевод:
Евгений Карташов
Валерия Смирнова

cree@macrogroup.ru

Развитие SiC-технологии

Прогресс технологии карбида кремния, идущий по пути увеличения диаметра, объема выпуска, повышения качества и снижения стоимости SiC, достиг точки, когда массовое производство 150-мм пластин основано на использовании карбидокремниевых заготовок, как показано на рис. 1. В 2016 календарном году компания Wolfspeed произвела почти 18 тонн 150-мм SiC-пластин [1] для рынков LED-, RF- и силовых приборов с прогнозом дальнейшего роста. Также были продемонстрированы опытные образцы SiC-пластин диаметром 200 мм как пример дальней-

шего увеличения диаметра. Качество SiC-пластин непрерывно улучшалось на протяжении нескольких лет, в 2016 году средняя величина MPD (MicroPore Density) упала до 0,2/см². Это позволяет выпускать кристаллы SiC MOSFET большой площади, удовлетворяющие требованиям автомобильного стандарта AEC-Q-101.

Удельное сопротивление канала на единицу площади SiC MOSFET, появившихся в 2011 году, продолжает улучшаться. Например, первое поколение SiC MOSFET (серия CMF Wolfspeed [2]), изготовленное в 2011 году, имело удельное значение $R_{DS(ON)}$ при +25 °C около 8 мОм·см², возрастающее до 11 мОм·см² при +150 °C. У второго поколения (C2M), появившегося в 2013 году, эта величина существенно снижена, и наконец, SiC MOSFET 1200 В третьего поколения (C3M [3]), выпущенные в 2017 году, характеризуются очередным резким снижением $R_{DS(ON)}$, особенно при рабочей температуре. Как показано на рис. 2, у SiC MOSFET 1200В (C3M0075120K) удельное значение $R_{DS(ON)}$ составляет всего 4,4 мОм·см² при +150 °C, что на 60% ниже, чем у исходного CMF-транзистора. Особенности конструкции этих приборов описаны в [4]; все три генерации имеют планарную структуру DMOS, при этом в третьем поколении использован более компактный шаг ячейки и оптимизирован процесс легирования в дрейфовой области для снижения сопротивления MOSFET во всем температурном диапазоне. Пиковые электрические поля в структурах SiC MOSFET такие же или меньшие, чем у компонентов предыдущих поколений, поэтому показатели надежности остались на прежнем уровне.



Рис. 1. Подложки диаметром 150 мм теперь используются для массового изготовления SiC-приборов. Почти 18 т 150-мм пластин произведено Wolfspeed в 2016 г. [1]

SiC-технология для автомобильных применений

Мировой рост рынка BEV, обеспечивающий соответствие современным стандартам по экономичности и снижению выбросов CO₂, требует применения новых полупроводниковых технологий в инверторе привода. Напряжение питания инвертора BEV находится в диапазоне 400–900 В в зависимости от мощности привода, типа батареи и наличия повышающего конвертера. Поскольку инвертор привода управляет мотором, его рабочая частота обычно не превышает 20 кГц. Преимущество использования более высоких частот здесь состоит только в уходе от слышимого диапазона аудиосуммов. Следовательно, основные потери инвертора — это потери проводимости, особенно при малых нагрузках BEV.

Как правило, выбором в таком случае становится кремниевый IGBT, однако присущее ему пороговое напряжение насыщения (из-за его «биполярной» структуры) на малой нагрузке нельзя уменьшить, даже при параллельном включении большого количества IGBT. Карбид кремния имеет в 10 раз более высокую напряженность электрического поля (~3 МВ/см), чем Si, поэтому униполярная SiC MOSFET-структура хорошо подходит для реализации силовых транзисторов 650, 900 и 1200 В благодаря следующим основным особенностям:

- SiC MOSFET не имеют напряжения насыщения, в отличие от Si IGBT; при параллельном включении чипов SiC MOSFET можно снизить сопротивление открытого канала до ≤ 1–2 мОм;
- SiC MOSFET могут реализовать проводимость в третьем квадранте (в отличие от Si IGBT) за счет использования тельного диода в «мертвое» время (время *T_{dt}* очень малое у SiC-структур) и последующего открывания канала SiC MOSFET в третьем квадранте, что дает такие же низкие потери в состоянии обратной проводимости, как и при прямой проводимости. Комбинация использования тельного диода в течение «мертвого» времени и синхронного выпрямления исключает необходимость во внешнем антипараллельном диоде, что позволяет снизить габариты и стоимость при минимальном влиянии на эффективность на частотах до 50 кГц; применение SiC MOSFET может снизить потери инвертора в типовом приводном цикле BEV EPA до ~78 % [5].

Результаты

Компания Wolfspeed разрабатывает силовые модули SiC MOSFET с низким сопротивлением канала $R_{DS(ON)}$ для применения в приводе BEV. Базовую технологию SiC MOSFET можно масштабировать в пределах от 650–900 до 1200 В путем простой модификации эпитаксиальной дрейфовой зоны (блокирующий слой) и краевых областей. Базовая топология MOSFET остается одинаковой для всех приборов в указанном диапазоне напряжения, что обеспечивает простоту интеграции в силовые модули.

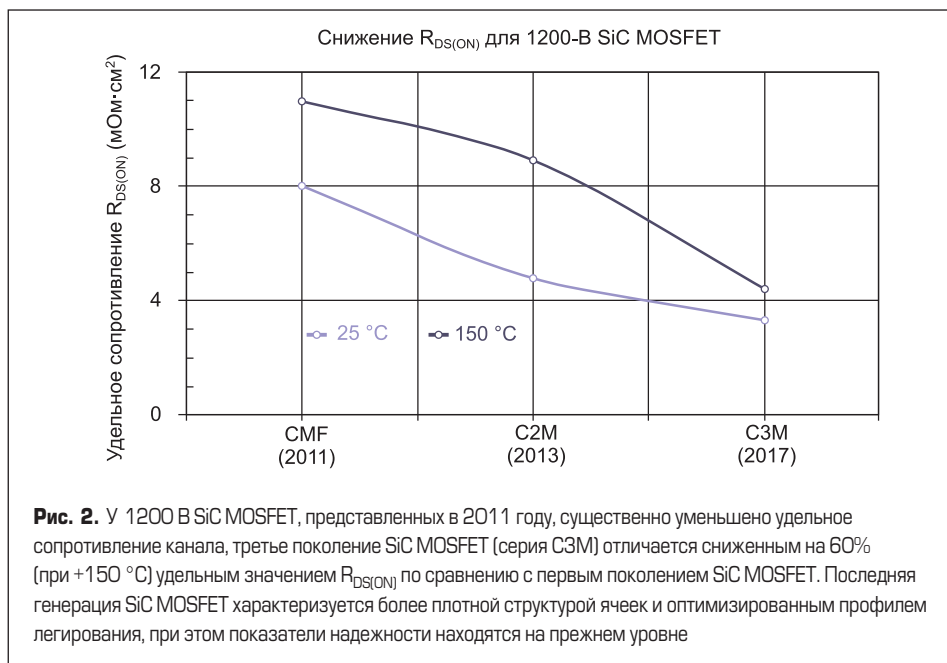


Рис. 2. У 1200 В SiC MOSFET, представленных в 2011 году, существенно уменьшено удельное сопротивление канала, третье поколение SiC MOSFET (серия C3M) отличается сниженным на 60% (при +150 °C) удельным значением $R_{DS(ON)}$ по сравнению с первым поколением SiC MOSFET. Последняя генерация SiC MOSFET характеризуется более плотной структурой ячеек и оптимизированным профилем легирования, при этом показатели надежности находятся на прежнем уровне

На рис. 3 иллюстрируется традиционный метод подключения проводников с помощью ультразвуковой сварки к верхней контактной поверхности на примере третьего поколения кристаллов SiC MOSFET. Эта технология может быть использована в модулях 650, 900 или 1200 В при небольшом изменении топологии чипов. Кристаллы SiC MOSFET 900 В с низким сопротивлением канала (10 мОм у CPM3-0900-0010A) уже доступны [6], они были использованы при разработке версии модулей 900 В [5, 7], проверка статических и динамических потерь которых уже проведена. Специалисты компании Ford сравнили измеренные параметры полумостового модуля SiC 900 В с сопротивлением 2,5 мОм (четыре MOSFET-кристалла на ключ) с параметрами 700-В инвертора

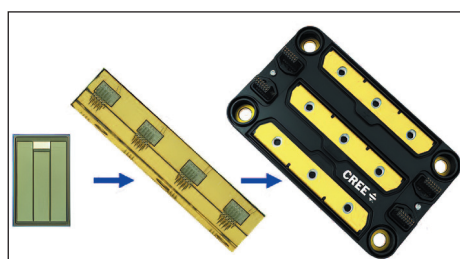


Рис. 3. Чипы Wolfspeed SiC MOSFET (слева) масштабируются от 650 В/7 мОм до 900 В/10 мОм и 1200 В/13 мОм путем простой модификации блокирующей зоны и краевых областей. Кристаллы SiC MOSFET можно соединять параллельно для создания силового модуля с низким сопротивлением открытого канала. На рисунке (в центре и справа) четыре чипа 900 В/10 мОм SiC MOSFET (CPM3-0900-0010A) соединены в параллель в одном ключе полумостового низкопрофильного модуля 62 мм (справа). Результирующие характеристики SiC-модуля: 900 В, 2,5 мОм, 400 А. Количество кристаллов может быть удвоено, что даст дальнейшее снижение $R_{DS(ON)}$ до 1,25 мОм

на базе Si IGBT в двигателе мощностью 90 кВт и выявили среднее снижение потерь на 78% в стандартном приводном цикле EPA [5].

В последнее время большое внимание уделяется технологии спекания чипов SiC [8–10], позволяющей исключить использование сварных проводников при сборке. Одним из основных достоинств является увеличение так называемого прерывающегося срока службы (IOL), поскольку усталостные процессы в сварных соединениях проводников или соединениях кристаллов часто становятся причиной отказов. Другие потенциальные преимущества состоят в лучшем (двухстороннем) охлаждении, лучшем распределении тепла и более высокой стойкости к короткому замыканию. Недавний пример Delphi [10] демонстрирует использование пяти двухсторонних спеченных SiC MOSFET (650 В, 7 мОм) в параллель в одиночном ключе (1,7 мОм), как показано на рис. 4. Спекание кристаллов Wolfspeed SiC MOSFET (650 В, 7 мОм) проводилось по верхней и нижней стороне с металлизацией Ni:Au.

Характеристики модуля оказались впечатляющими: сопротивление $R_{DS(ON)}$ (1,7 мОм, 750 А, 25°C) немного увеличивается до 2,3 мОм при +175 °C, как показано на рис. 5 (вверху). Также первый прототип модуля был испытан на тер-

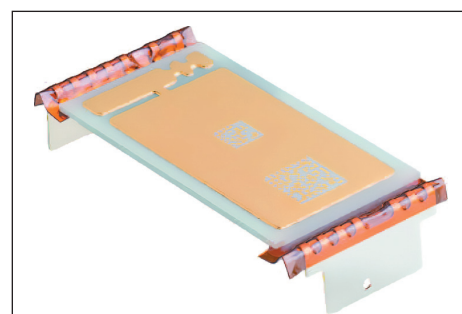


Рис. 4. Модуль 650 В, 1,7 мОм, 750 А содержит в одном ключе пять SiC MOSFET-кристаллов 650 В/7 мОм с двухсторонним спеканием

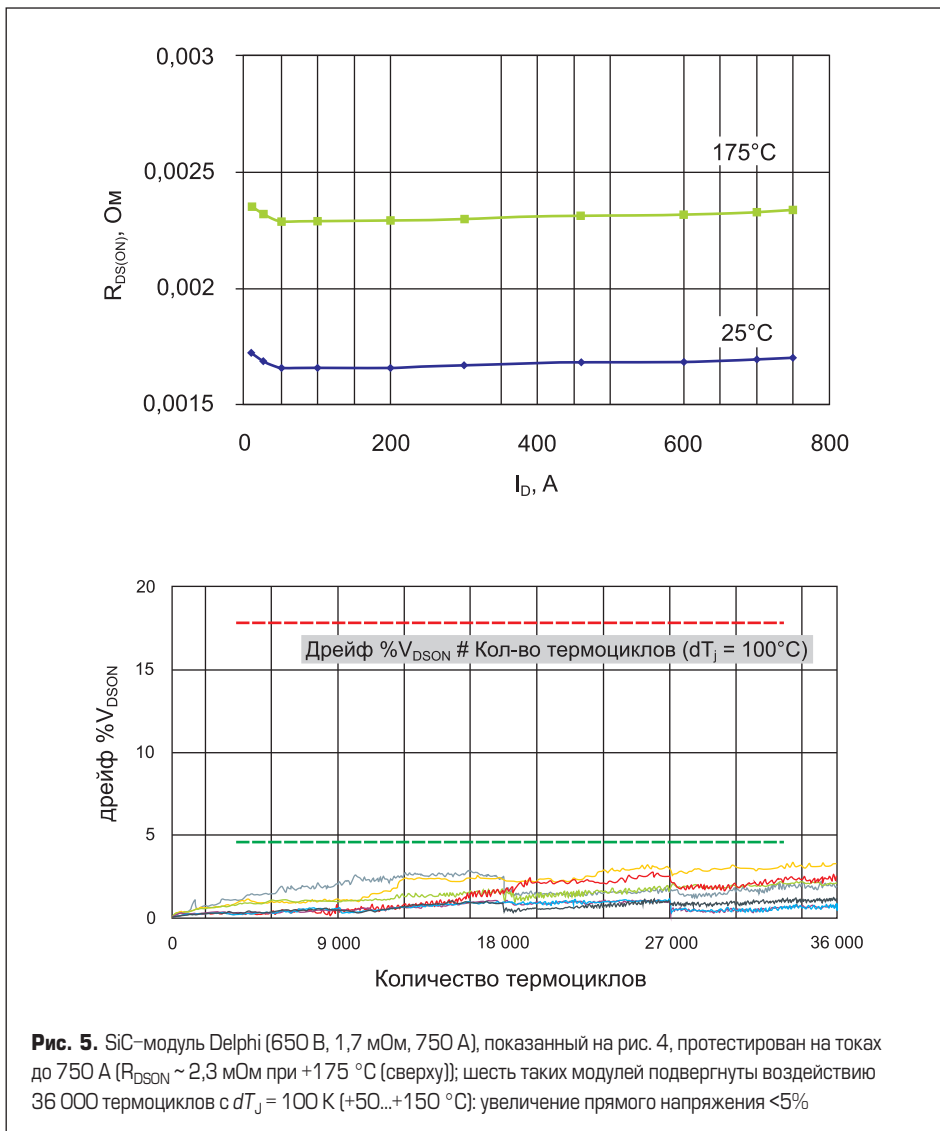


Рис. 5. SiC-модуль Delphi (650 В, 1,7 мОм, 750 А), показанный на рис. 4, протестирован на токах до 750 А ($R_{DS(ON)} \sim 2,3$ мОм при $+175^\circ\text{C}$ (сверху)); шесть таких модулей подвергнуты воздействию 36 000 термоциклов с $dT_j = 100$ К ($+50\dots+150^\circ\text{C}$); увеличение прямого напряжения $<5\%$

моциклирование путем подачи DC-тока 520 А в каждой фазе (сквозной ток), что дает целевой градиент температуры dT_j 100 К (изменение от $+50$ до $+150^\circ\text{C}$). Тестовый цикл продолжался 25 с (испытывалось шесть модулей, все три фазы под током) с 10-с перерывом, прямое напряжение измерялось после 36 000 циклов. Ни на одном из модулей увеличение не превысило 5% за 36 000 циклов, как показано на рис. 5 (внизу). Параллельно с разработкой модулей 650 и 900 В ведется работа над 1200-В SiC MOSFET. У чипа площадью 32 мм² сопротивление $R_{DS(ON)}$

составляет 13 мОм при комнатной температуре и 23 мОм при $+175^\circ\text{C}$.

Заключение

Сочетание SiC-пластин большего диаметра (150–200 мм) с улучшенным качеством материалов и достижений технологии SiC MOSFET (понижение на 60% удельного сопротивления $R_{DS(ON)}$ при $+150^\circ\text{C}$ для модулей 1200 В в течение 2011–17 гг.) позволило получить сверхнизкое (< 15 мОм) сопротивление в коммерче-

ских карбидокремниевых ключах. Модули SiC MOSFET 900 В с $R_{DS(ON)}$ 10 мОм представлены на рынке с января 2017 года.

Совершенствование тяговых приводов BEV с использованием SiC-технологий, позволяющих снизить потери инвертора до $\sim 78\%$ в приводном цикле EPA, может предложить разработчикам систем BEV увеличение пробега или снижение цены батареи при заданном пробеге. Сегодня развитие SiC-технологий направлено на улучшение производительности и надежности карбидокремниевых транзисторов, что было продемонстрировано на примере чипов MOSFET 650 В, 7 мОм, использованных при производстве модулей с двусторонним спеканием с сопротивлением канала 1,7 мОм. Модули предназначены для применения в автомобильных приводных инверторах, которые уже показали очень хорошие характеристики термоциклирования и впечатляюще низкие потери проводимости.

Литература

1. Balkas E., et al. Status on WBG Materials. ECPE SiC & GaN User Forum. Nuremberg, Germany, Mar. 8–9, 2017.
2. Palmour J. et al. SiC MOSFET and Power Module Status and Market Development. WIPDA, Fayetteville, AR (USA). Nov. 20, 2016.
3. Casady J. et al. Advances in ultra-low RDS(on) SiC power MOSFETs. IWBGPEAW. Stockholm, Sweden, May 22–23, 2017. www.wolfspeed.com/media/downloads/959/C3M0075120K.pdf
4. Pala V. et al. Record-low 10mΩ SiC MOSFETs in TO-247, Rated at 900V. APEC, Long Beach, CA (USA), Mar. 20–24, 2016.
5. Ming Su et al. Prospects for the Application of SiC Power Devices in Hybrid Electric Vehicle Drive Systems. WIPDA, Fayetteville, AR (USA), Nov. 20, 2016.
6. Casady J. et al. First Automotive Reliability Assessment and Drive-Train Performance of Large-Area 900V, 10 mOhm SiC MOSFETs. APEC, Tampa, FL (USA), Mar 29, 2017.
7. Casady J. et al. Ultra-low (1.25mΩ) On-Resistance 900V SiC 62 mm Half-Bridge Power Modules Using New 10 mΩ SiC MOSFETs. PCIM Europe. Nuremberg, Germany, May 10–12, 2016.