

ТРИ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТА РЕШЕНИЙ НА БАЗЕ SiC-УСТРОЙСТВ

КЕВИН СПИР (KEVIN SPEER), Microchip Technology

В статье рассматриваются некоторые аспекты применения силовых ключей на базе карбида кремния. Особое внимание уделено эксплуатационным характеристикам.

ВВЕДЕНИЕ

После быстрого расширения ассортимента устройств на базе карбида кремния (SiC) перед отраслью встала задача упростить проектирование изделий конечными пользователями. Разработчикам систем питания требуются комплексные решения, которые не только помогают применять отдельные элементы в схемах, но и учитывают их взаимодействие. Другими словами, производители карбидокремниевых MOSFET должны не только обеспечить отличные характеристики и надежность устройств, но и помогать в решении задач разработчиков, предлагая рынку низкоиндуктивные корпуса, а также более сложные устройства – драйверы затвора для точной настройки параметров схем и дополнительной защиты. Тщательное рассмотрение этих трех ключевых элементов, несомненно, упростит анализ и проектирование для тех, кто хочет извлечь выгоду из революционных схемотехнических решений, ставших возможными благодаря SiC-устройствам.

НАДЕЖНЫЕ И СТОЙКИЕ SiC MOSFET

Возможно, SiC MOSFET как наиболее критичное звено в цепях питания должны надежно работать в тех случаях, в которых прежде они были уязвимы. Как и у Si MOSFET, у карбидокремниевых ключей имеются такие внешние дефекты как примеси, центры рекомбинации (ловушки) и другие дефекты материала вблизи границы «оксид – полупроводник», вызывающие нестабильную работу устройств и ускоряющие их деградацию. Устранение этих проблем требует, чтобы у SiC MOSFET для промышленных систем было стабильное пороговое напряжение, высокая электрическая прочность оксидного слоя затвора, надежность внутреннего диода и стойкость к лавинным пробоям. Каждая из этих характеристик должна быть проверена с помощью квалификационных испытаний, поскольку параметрическая стабильность и срок службы могут

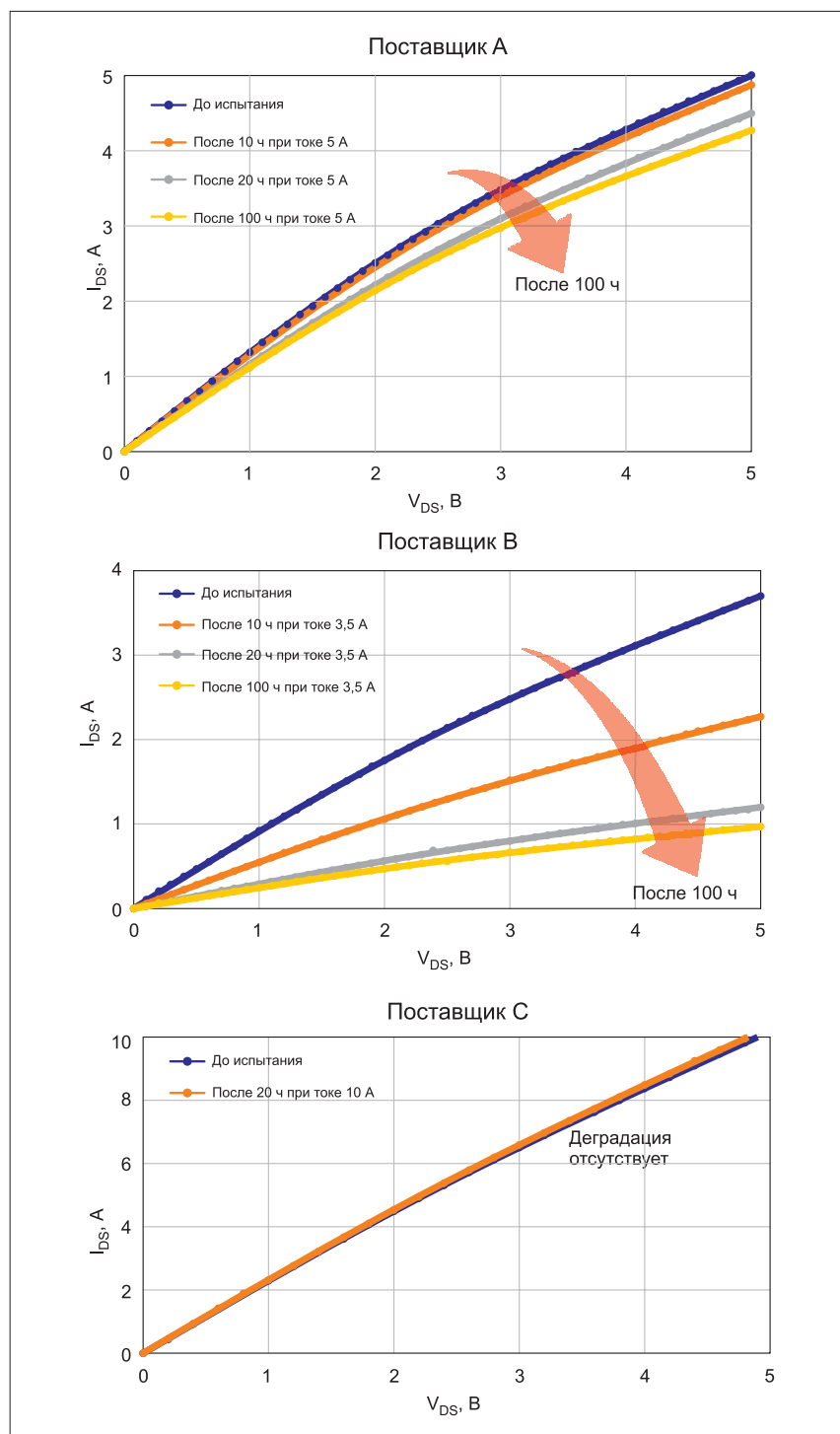


Рис. 1. Только у SiC MOSFET от поставщика С отсутствует деградация внутреннего диода

значительно варьироваться от одного поставщика к другому.

Для проверки стабильности порогового напряжения (V_{th}) SiC MOSFET обычно применяют положительное (p -HTGB) и отрицательное (n -HTGB) высокотемпературное смещение затвора к статистически значимому количеству устройств, а затем сравнивают значения V_{th} этой выборки до и после. Например, испытания p - и n -HTGB были выполнены на наборах из 64 1200-В SiC MOSFET в течение 1000 ч. Среднее наблюдаемое изменение V_{th} составило 59,6 мВ после смещения p -HTGB и $-22,8$ мВ – после смещения n -HTGB. Такие уровни прогнозируемого напряжения позволяют проектировать приложения с высокой стабильностью параметров в течение продолжительного срока службы.

Электрическая прочность оксидных слоев затвора имеет решающее значение для всех применений, особенно тех, которые требуют длительного срока службы. Для определения электрической прочности оксидного слоя исследуемого SiC MOSFET измерялся заряд до пробоя (Q_{BD}) на трех образцах 1200-В SiC MOSFET. Все наблюдаемые отказы оказались внутренними, что свидетельствует о высоком уровне зрелости технологии. Нарботка до отказа и средняя наработка до отказа были рассчитаны с использованием большей выборки, состоящей из 192 устройств. Для p -HTGB эти значения составили 20 и 5618 лет; для n -HTGB – 93 и 1233 года, соответственно. Конечных пользователей должно обнадеежить то, что эти результаты согласуются с отчетами о деградации подзатворного диэлектрика, полученными от нескольких поставщиков.

Явление биполярной деградации в p - n -переходах SiC-устройств в значительной степени изучено. Из-за ее наличия во внутреннем диоде (body diode) SiC MOSFET увеличивается не только сопротивление открытого канала, но и падение напряжения на диоде во время коммутации тока (проявляется в виде дрейфа характеристик в 3-м квадранте). К счастью, технологии материалов SiC MOSFET к настоящему времени стали достаточно совершенными, и количество дефектов кристаллов уменьшилось. Тем не менее, необходимо проводить оценку SiC MOSFET каждого поставщика. Ученые из Университета штата Огайо сравнили деградацию внутренних диодов после 100 ч под нагрузкой при полном номинальном токе ($V_{GS} = -5$ В) у 1200-В SiC MOSFET нескольких поставщиков, выявив существенные различия в их рабочем состоянии. Деградация диодов отсутствовала у ключей только от одного поставщика (см. рис. 1).

Необходимо также проверять устойчивость к лавинному пробую, которая оценивается методом разблокированного индуктивного переключения (unclamped inductive switching, UIS). На MOSFET подается импульс напряжения, когда он находится в закрытом состоянии, что заставляет весь ток лавинообразно течь на периферию кристалла, поскольку его канал не открыт. Это испытание отличается от теста

на стойкость при коротком замыкании, когда MOSFET находится в открытом состоянии и ток более равномерно распределяется по всей активной области устройства. Чтобы точно имитировать реальные условия эксплуатации, на SiC MOSFET подаются повторные импульсы UIS; параметрическая стабильность и целостность оксида сравниваются до и после 100 тыс. повторяющихся импульсов при двух третях номинально-

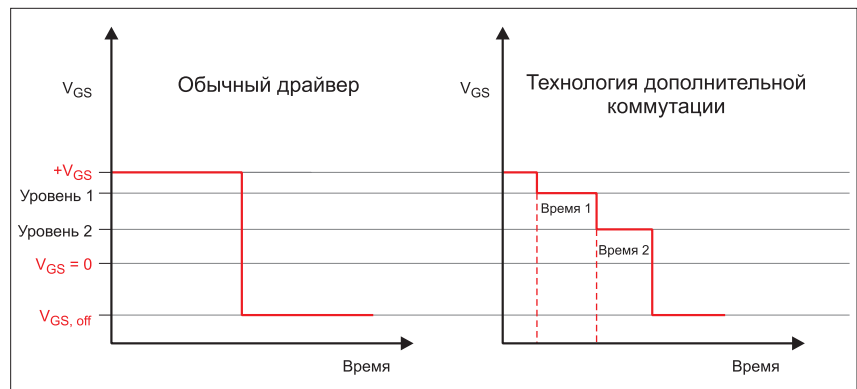


Рис. 2. Цифровые драйверы затвора, использующие дополнительную коммутацию, решают задачу по определению оптимальных расчетных точек и их значений

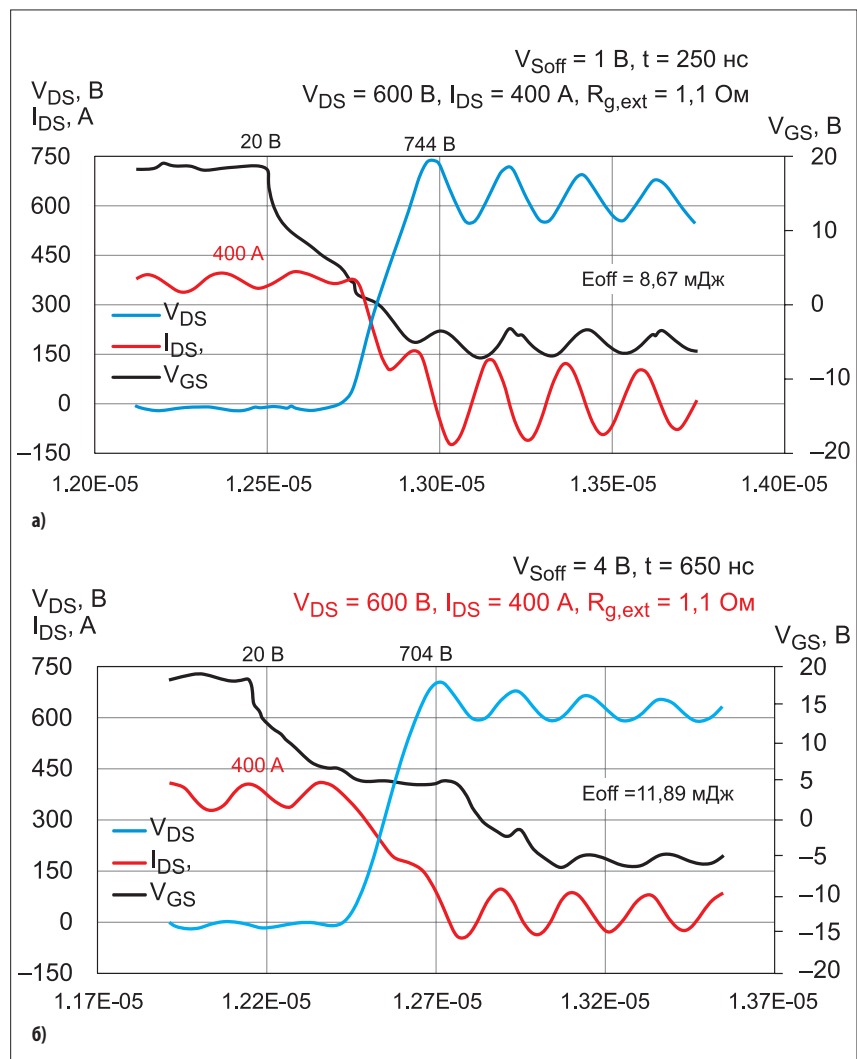


Рис. 3. Временные зависимости характеристик модуля SiC MOSFET в зависимости от влияния параметров дополнительной коммутации

го тока (согласно MIL-STD-750). V_{BR} , V_{th} и V_F внутреннего диода не подвержены влиянию повторяющегося UIS, что свидетельствует об отличной устойчивости к лавинному пробую.

НИЗКОИНДУКТИВНЫЕ ТЕПЛОТВОДЯЩИЕ КОРПУСА

Следующей инструментальной частью решений проблем SiC-устройств является оптимизированный теплоотводящий корпус. Эффективный многокристальный корпус должен позволить использовать преимущества SiC, а не подавлять их.

При проектировании учитывается множество требований. Поскольку кристалл SiC MOSFET сравнительно мал, параллельно подключается много транзисторов, чтобы добиться низкого сопротивления открытого канала. Кроме того, параллельно подключенные MOSFET должны переключаться за одинаковое время и с равномерным распределением тока, чтобы обеспечить симметрию и низкую индуктивность схем соединения кристаллов.

Примером может служить модуль SP6LI компании Microchip, паразитная индуктивность которого составляет всего 2,9 нГн, тогда как типичное значение паразитной индуктивности обычных корпусов превышает 20 нГн. Индуктивность силового контура снижается за счет реализации соединений в сборных шинах с полосковой линией. Соединения с подложкой распределены симметрично и максимально близко к полупроводниковому кристаллу. Что касается контура затвор–исток, то для каждого из 12 кристаллов используются независимые последовательные резисторы затвора, служащие для оптимальной синхронизации и распределения тока. Независимые резисторы затвора уменьшают паразитную индуктивность в контуре затвор–исток, защищая от одновременного включения двух плеч моста и минимизируя потери при коммутации.

УМНАЯ И ГИБКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДРАЙВЕРА ЗАТВОРА

Наконец, третьим важным элементом, который учитывается при создании SiC-системы, является управление. Электромагнитные помехи и скачки напряжения в переходных процессах при быстрых переключениях SiC MOSFET подвергают неоптимизированные системы риску сбоя. Требуется новый класс технологий для изготовления драйверов затвора, обеспечивающих управление динамикой переключения и разумные компромиссы. Кроме того, драйвер затвора должен быстро реагировать на повышенное напряжение, поскольку SiC MOSFET устойчивы к перенапряжениям меньшее время по сравнению с большинством кремниевых IGBT.

Благодаря запатентованной технологии дополнительной коммутации (Augmented Switching) новейшие решения для цифровых драйверов затвора позволяют делать паузу на заданном пользователем промежуточном значении V_{GS} в течение требуемого времени для разрядки емкости затвор–сток, вызывающей эффект Миллера, до последующей подачи напряжения V_{GS} (см. рис. 2). Эта технология контрастирует с традиционными подходами, которые переключают V_{GS} напрямую с открытого состояния на закрытое, не предлагая возможности избежать других менее устранимых ловушек, к которым относится паразитная индуктивность кабеля, используемого для подключения нагрузки. Однако можно найти компромисс между превышением напряжения и эффективностью благодаря небольшим изменениям в профиле дополнительной коммутации (уровни V_{GS} и время задержки).

На рисунке 3 показаны сигналы выключения с использованием двух расширенных профилей коммутации и модуля 1200-В SiC MOSFET в корпусе D3 (106×62×31 мм). Можно заметить, что выбор меньшего значения промежуточного V_{GS} сокращает коммутационные потери в тех случаях, когда эффективность является приоритетной, тогда как большее

напряжение V_{GS} гасит выбросы V_{DS} и смягчает колебания всех трех сигналов. Прилагаемая программа помогает точно настраивать драйверы затвора на всех этапах проектирования одним щелчком мыши, экономя многие часы, которые ушли бы на работу с паяльником.

Цифровые драйверы затвора повышают интеллектуальность устройств. Например, их можно использовать для запуска совершенно другого профиля выключения в случае неисправности, улучшив безопасность системы. Дополнительная коммутация в схеме защиты от короткого замыкания позволяет уменьшить $R_{\theta jc}$, а MOSFET – мягче и управляемее перейти в выключенное состояние с меньшей вероятностью возникновения лавинного процесса.

К другим полезным функциям относятся выполняемые в режиме реального времени функции диагностики – контроль напряжения линии постоянного тока и температуры устройства.

ВЫВОДЫ

По мере перехода с использования кремниевых IGBT на SiC MOSFET разработчики силовой электроники все больше полагаются на поставщиков компонентов в вопросах обеспечения ключевыми элементами для создания комплексных системных решений. К этим элементам относятся SiC MOSFET с доказанной надежностью, мощные корпуса с очень малой индуктивностью и интеллектуальные драйверы затвора нового класса, упрощающие проектирование. Каждый из этих элементов является необходимым условием для оптимизации проектирования SiC-устройств, начиная с исходной оценки и заканчивая внедрением. ◀