

Карбид кремния выводит диоды Шоттки 17-го класса на новый уровень

Майкл О'Нил
(Michael O'Neill)

Перевод:
Евгений Карташев

Введение

Хотя карбид кремния (SiC) был открыт Йенсом Якобом Берцелиусом (Jöns Jakob Berzelius) еще в начале XIX в., для производства коммерческих полупроводников этот материал стал применяться только в последние 20 лет. Впервые SiC был использован в серийном производстве для изготовления сверхъярких голубых и зеленых светодиодов компании Cree. И только семь лет назад началось производство коммерческих 600- и 1200-В SiC-диодов Шоттки, пригодных для использования в мощных AC/DC- и DC/AC-конвертерах.

Совершенствование качества материала, уменьшение размера и стоимости кристаллов сделало SiC достойной заменой Si в силовой электронике. С увеличением размера пластин (Cree сейчас использует пластины диаметром 100 мм), снижением плотности дефектов и удешевлением материала появляются все более мощные полупроводниковые модули на основе карбида кремния. Разница в характеристиках диодов Шоттки на базе SiC и эквивалентных кремниевых (Si PiN) диодов становится все более существенной для каждого следующего класса напряжения. SiC-диоды с рабочим напряжением 600 и 1200 В уже имели большой рыночный успех, однако принципиально новый уровень характеристик был достигнут после недавнего появления в продукции Cree новой линейки SiC-диодов Шоттки 17-го класса.

Преимущества карбида кремния

Ключевым свойством SiC, делающим его идеальным материалом для производства силовых полупроводников, является высокое критическое значение напряженности поля (E_c). Напряженность электрического поля определяет толщину кристалла и концентрацию примесей, необходимые для блокирования определенной величины напряжения. Для заданного значения обратного напряжения (V_b) чем тоньше и сильнее легирован слой SiC по сравнению

с Si, тем ниже сопротивление открытого канала полупроводника (преимущество может быть трехкратным).

$$R = 4V_b^2 / (\epsilon_{SiC} \times \mu_n \times E_c^3),$$

где ϵ_{SiC} — это диэлектрическая проницаемость материала 4H-SiC, а μ_n — подвижность его электронов. При сравнении униполярных полупроводников это означает, что открытое сопротивление Si быстро растет с увеличением блокирующего напряжения, поэтому кремниевые диоды Шоттки, как правило, не применяются после 200 В. При более высоких уровнях напряжения приходится использовать модуляцию проводимости, что возможно, если активная площадь биполярного чипа не становится при этом слишком большой. Чем выше значение блокирующего напряжения, тем важнее эффективная биполярная проводимость, обеспечивающая низкие прямые потери.

Недостатком высокой концентрации неосновных носителей, улучшающей биполярную проводимость, является необходимость рассасывания дополнительного заряда при выключении полупроводникового прибора. Объединение «хвостового» тока с током рассасывания ведет к росту динамических потерь, при этом чем выше класс напряжения модуля, тем больше заряд, образованный неосновными носителями. Следует также отметить, что образовавшийся суммарный ток заметно возрастает с увеличением температуры перехода.

Оптимизация параметров высоковольтных кремниевых полупроводниковых приборов заключается в поиске компромисса между потерями проводимости и переключения. Как правило, производители силовых модулей адаптируют их характеристики в зависимости от режимов работы, важнейшим из которых является частота коммутации.

Использование SiC-диодов, врожденным свойством которых являются низкие потери проводимости, позволяет создавать эффективные ключи даже для относительно высоковольтных примене-

ний. У кремниевых модулей с напряжением 1700 В, где высокая биполярная проводимость необходима для достижения низкого сопротивления открытого канала, поиск компромисса между статическими и динамическими потерями очень сложен. Для этого и более высоких классов напряжения преимущества униполярной SiC-технологии очевидны. Компания Cree продемонстрировала, что карбид кремния может с успехом применяться для производства диодов Шоттки с напряжением до 10 кВ.

Характеристики 1700-В SiC-диодов Шоттки

Первые коммерческие 1700-В SiC-чипы диодов с рабочим током 10 и 25 А были анонсированы Cree во втором квартале 2010 г. Выпуск этих приборов в пластиковых двухвыводных корпусах ТО-247, рассчитанных на ток 10, 25 и 50 А, начался во II квартале 2011 г. В этой главе мы рассмотрим главные

отличия их характеристик от параметров аналогичных кремниевых приборов.

Основным преимуществом SiC-технологии является практически полное отсутствие тока обратного восстановления. На рис. 1 показаны характеристики восстановления карбидокремниевых диода Шоттки производства Cree (1700 В, 25 А) по сравнению со стандартным Si PiN-прибором.

Поскольку SiC-диод Шоттки является прибором, работающим на основных носителях, у него практически отсутствует ток восстановления, обусловленный рекомбинацией неосновных носителей, однако существует некоторый заряд за счет емкости перехода. Он не зависит от температуры и пренебрежимо мал по сравнению с зарядом восстановления Si PiN-прибора.

Отметим, что ток восстановления кремниевых переходов возрастает с увеличением температуры. Большой заряд восстановления не только способствует росту собственных динамических потерь диода,

он увеличивает и потери включения связанных с ним коммутационной цепью силовых ключей, в частности оппозитного IGBT. В системах с Si PiN-диодами 17-го класса эти потери настолько велики, что именно они ограничивают рабочую частоту преобразователя и требуют применения больших и дорогостоящих фильтрующих компонентов.

Характеристики переключения

Стандартным методом оценки динамических характеристик любого диода и его влияния на оппозитный ключ в полумостовой схеме является так называемый «двухимпульсный тест». Схема для проведения данного вида испытаний приведена на рис. 2.

Схема имеет индуктивную нагрузку, которая может подключаться к +/- потенциалам DC-шины через оппозитные диоды, с помощью которых производится циркуляция энергии, запасенной в ходе цикла коммутации. Два отпирающих импульса, длительность и интервал времени между которыми могут регулироваться независимо, последовательно подаются на затвор нижнего IGBT. Во время подачи первого импульса идет накопление энергии в индуктивности и рост тока нагрузки. При подаче второго импульса мы можем наблюдать процесс обратного восстановления диода и его влияние на потери включения IGBT. Режимы работы схемы выбраны так, чтобы отпирание транзистора происходило в то время, когда диод проводит практически весь ток нагрузки. Длительность первого импульса выбирается из следующего выражения:

$$\Delta t = L/V \times \Delta I,$$

где V — напряжение DC-шины; L — амплитуда тока индуктивной нагрузки; ΔI — прямой ток тестируемого прибора. Интервал времени до второго включения обычно составляет несколько микросекунд, а сам импульс может быть намного короче первого, чтобы не допустить насыщения индуктивности. Как правило, коммутация идет на очень низкой частоте, чтобы исключить влияние саморазогрева тестируемых полупроводников. Температура их переходов может задаваться различными способами, например с помощью нагрева радиатора, таким образом определяется температурная зависимость характеристик восстановления.

Снижение потерь включения IGBT

Режимы двухимпульсного теста были выбраны для оценки влияния SiC-диода на параметры включения IGBT в схеме стандартного инверторного моста. Приведенные ниже данные получены при испытаниях сборки «IGBT-диод» (Si-IGBT/PiN) на элементах с номинальным напряжением 1700 В и током 16 А. В подавляющем большинстве подобных систем используются стандартные модули, но для простоты и возможности отдельного тестирования были использованы дискретный диод и транзистор.

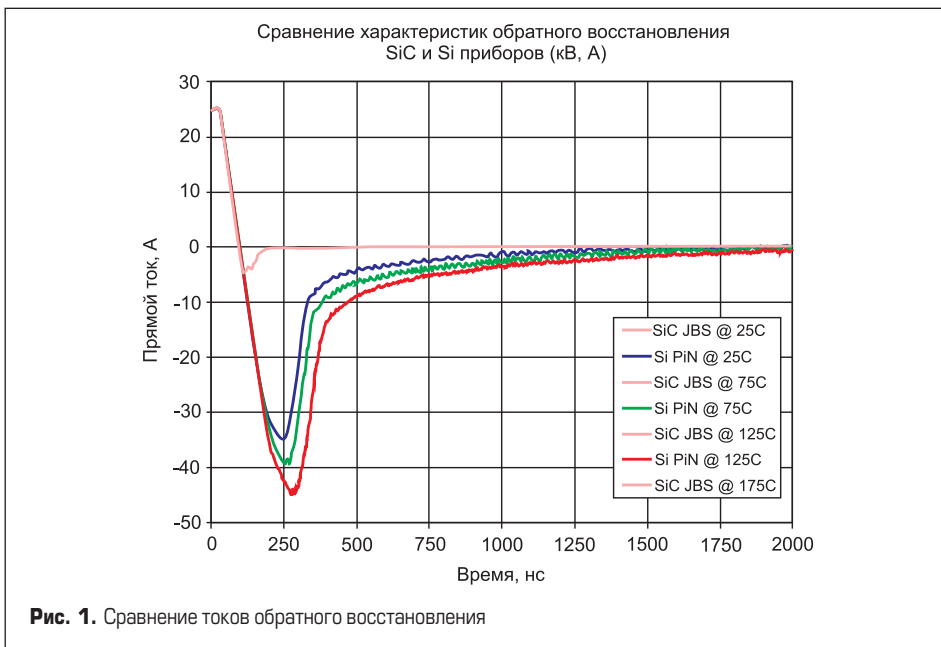


Рис. 1. Сравнение токов обратного восстановления

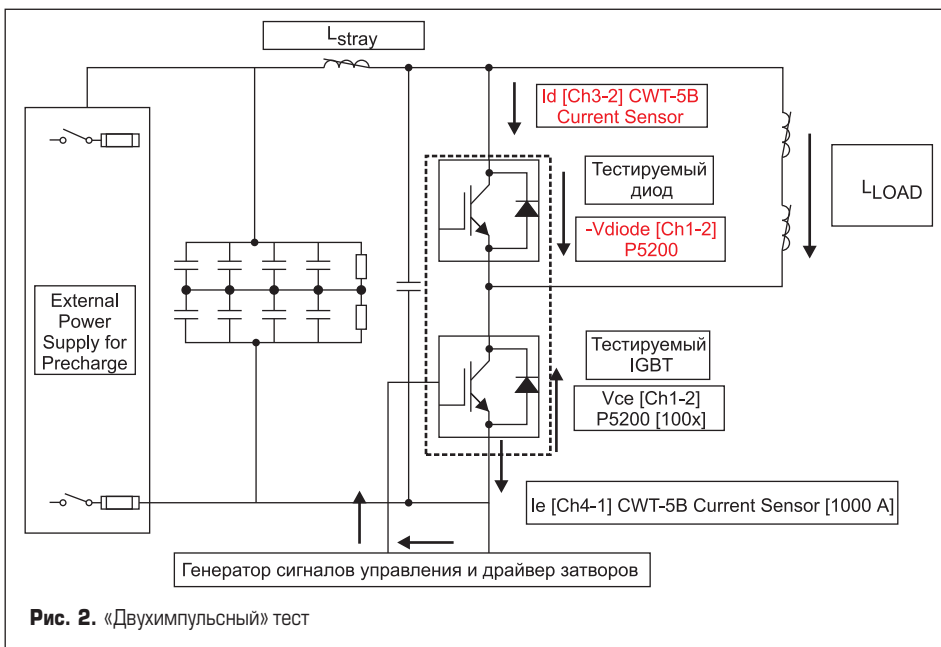


Рис. 2. «Двухимпульсный» тест

На рис. 3 показаны эюры, полученные при подаче второго импульса включения полумоста с обычным кремниевым оппозитным диодом. На рисунке видно, что большой ток обратного восстановления (пиковое значение — 76 А, 350 нс) непосредственно влияет на ток и потери включения IGBT. Измерение площади под математически полученной эюрой ($V_{CE} \times I_C$) показывает, что энергия включения (E_{on}) составляет 12,3 мДж.

После проведения измерений стандартный кремниевый диод был заменен карбидокремниевым (Cree SiC — 1700 В, 10 А), далее испытания были повторены с использованием того же самого IGBT.

На рис. 4 показано, что потери заметно снизились как в диоде, так и в оппозитном транзисторе. Отметим, что коммутационные потери в диоде практически отсутствуют (наблюдается только их небольшая емкостная составляющая). Характеристики включения IGBT существенно улучшились, измерения показали, что значение E_{on} уменьшилось до 0,76 мкДж, то есть снижение составило 94%.

Важно отметить, что в ходе теста SiC-диод с номинальным током 10 А успешно работал совместно с более мощным 16-А IGBT. Применение карбидокремниевых диодов позволяет существенно улучшить характеристики всей системы, оптимизация которой позволяет снизить суммарное значение потерь на 40–60%. Благодаря положительному коэффициенту напряжения насыщения SiC-диоды можно соединять параллельно, что позволяет с успехом применять 25-А кристаллы в модулях IGBT с номинальным током до сотен ампер.

Заключение

Разработчики преобразовательных систем на базе кремниевых модулей 17-го класса, как правило, выбирают значение рабочей частоты в диапазоне 1–4 кГц, что обусловлено высоким значением коммутационных потерь технологий 1700 В. Применение карбидокремниевых (SiC) диодов позволяет существенно расширить диапазон частот, который даже при использовании стандартных IGBT может быть доведен до 10–20 кГц.

Основным преимуществом перехода на более высокие частоты коммутации является возможность применения малогабаритных и де-

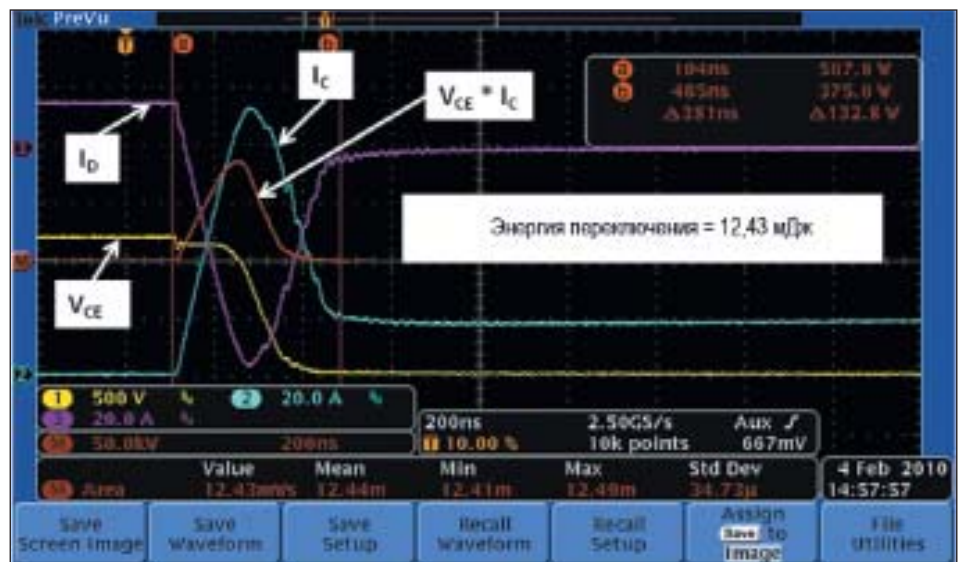


Рис. 3. Второе включение IGBT со стандартным диодом Si PIN

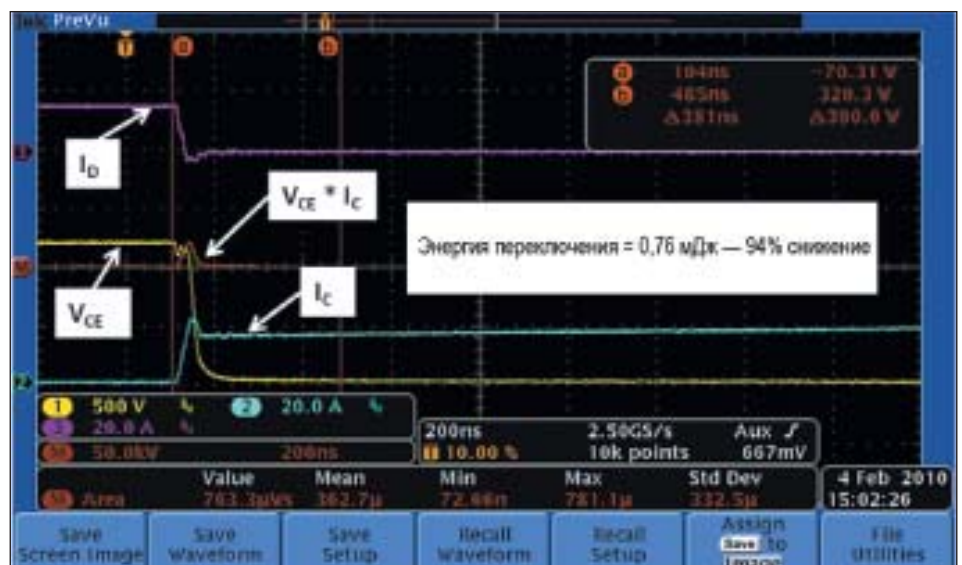


Рис. 4. Второе включение IGBT с диодом SiC Шоттки

шевых магнитных компонентов фильтров. Это, в свою очередь, позволяет встраивать элементы фильтра в корпус преобразователя. Снижение массо-габаритных показателей трансформаторов и дросселей дает возможность улучшать соответствующие характеристики

системы, уменьшать ее стоимость, повышать плотность мощности. Указанные улучшения, прежде всего, относятся к общепромышленным приводам, а также маломощным преобразователям для транспорта и энергетики, получающим питание от сети 690 В.