

# Выбор SiC-диодов Шоттки

## для активных корректоров коэффициента мощности, работающих в режиме непрерывных токов

Карбид-кремниевые (SiC) диоды Шоттки являются оптимальными полупроводниковыми приборами для использования в качестве диодов повышающей ступени в активных корректорах коэффициента мощности (ККМ), работающих в режиме непрерывных (средних) токов (Continuous Current Mode, CCM). Это связано с присущим диодам этой технологии малым влиянием эффекта обратного восстановления, что обеспечивает нулевой обратный ток. SiC-диоды Шоттки выгодно отличаются от своих ближайших конкурентов — кремниевых (Si) сверхбыстродействующих диодов с присущим им мягким режимом восстановления, которые имеют потери энергии при обратном восстановлении, являющиеся причиной снижения эффективности преобразователя, и, как правило, большие массогабаритные характеристики. С целью облегчить разработчикам источников питания решение проблемы выбора подходящего SiC-диода Шоттки, инженеры компании Cree создали специальный файл в системе Mathcad<sup>1</sup>. Файл дает проектировщикам блоков питания подробное объяснение и все необходимые сопутствующие расчеты, позволяющие выбрать SiC-диоды Шоттки, подходящие для активных ККМ с повышением (boost converter) с режимом CCM, предназначенных для применения во вторичных импульсных источниках питания различной мощности.

Авторский перевод:  
Владимир Рентюк

Валерия Смирнова

cree@macrogroup.ru

### Введение

Схемы активной коррекции коэффициента мощности получили широкое распространение в конструкциях вторичных импульсных источников питания (ИИП), выполненных в виде AC/DC-преобразователей (Switch Mode Power Supply, SMPS). Это связано с вступлением в силу

с января 2001 г. обязательных для выполнения требований стандарта IEC-61000-4-3<sup>2</sup>. Для выполнения требований стандарта для ИИП с выходной мощностью более 300 Вт необходим активный ККМ, который представляет собой повышающий преобразователь, обычно предназначенный для работы в режиме непрерывных (средних) токов — CCM. Именно для таких преобразователей оптималь-

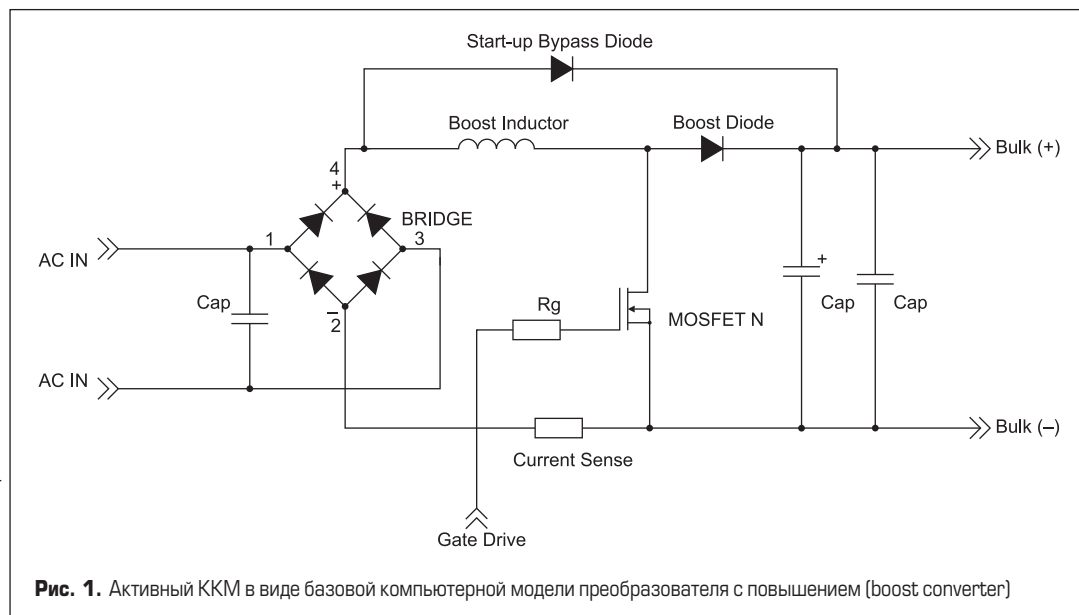


Рис. 1. Активный ККМ в виде базовой компьютерной модели преобразователя с повышением (boost converter)

<sup>1</sup> Mathcad — система компьютерной алгебры из класса систем автоматизированного проектирования. — Прим. перев.

<sup>2</sup> В РФ действует аналогичная редакция 2010 г. стандарта ГОСТ IEC 61000-4-3-2016 «Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 4-3. Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к излучаемому радиочастотному электромагнитному полю». — Прим. перев.

ным выбором являются SiC-диоды Шоттки. Следует отметить, что для выполнения современных требований и достижения конкурентных преимуществ в части эффективности (КПД) во многие модели вторичных ИИП более низкой мощности также включают те или иные схемы ККМ. Типичный активный ККМ в виде базовой компьютерной модели преобразователя с повышением (boost converter) показан на рис. 1.

Во время включения МОП-транзистора (MOSFET N на рис. 1) и, как следствие, выключения основного диода (Boost Diode на рис. 1) чрезмерный ток обратного восстановления, свойственный Si-диодам, не только способствует росту коммутационных потерь непосредственно в самом диоде, но также приводит к дополнительным коммутационным потерям при включении МОП-транзистора. Для обеспечения заданной эффективности и тепловых характеристик относительно высокий уровень этих потерь требует применения полупроводниковых приборов, рассчитанных на большие рабочие токи, и соответственно, с большими размерами кристаллов. Это касается как МОП-транзистора, так и непосредственно самого диода ККМ.

Для данных приложений оптимально подходит SiC-диод Шоттки, основное преимущество которого — практически нулевой ток обратного восстановления. Таким образом, потери на диоде резко снижаются, что, в свою очередь, уменьшает и коммутационные потери повышающего МОП-транзистора. Это позволяет использовать транзисторы и диоды с меньшими рабочими токами и, соответственно, меньшими размерами кристаллов. Кроме того, из схемы ККМ могут быть исключены и элементы демпфирования ключа, обязательные для решений, выполненных на базе Si-диода. Таким образом, использование SiC-диодов Шоттки обеспечит лучшее общее системное решение. Причем оно даст выигрыш в уменьшении уровня излучаемых и кондуктивных (наведенных) электромагнитных помех (ЭМП) не только с точки зрения обеспечения более высокой эффективности. Использование меньшего по объему радиатора и уменьшение занимаемой ККМ площади на печатной плате облегчает общее конструктивное решение конечного продукта. Кроме того, само уменьшение числа используемых компонентов не только снижает себестоимость решения, но также сокращает расходы на логистику, складские расходы, время на сборку и на тестирование схемы.

### Особенности SiC-диодов Шоттки

SiC — это материал с широкой запрещенной зоной и высоким напряжением пробоя, что и позволяет выпускать высоковольтные диоды Шоттки. В настоящее время компания Cree выпускает коммерчески доступные SiC-диоды Шоттки 600, 650 и 1200 В. Диоды 600 В доступны с рабочими номинальными значениями тока 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 16 и 20 А;

650 В — 6, 8 и 10 А; 1200 В — 2, 5, 7,5, 10, 15, 20, 30 и 40 А. Как уже отмечалось выше, основное преимущество высоковольтного SiC-диода Шоттки заключается в его превосходных динамических характеристиках. В диодах Шоттки в качестве барьера используется переход «металл–полупроводник», в отличие от обычных диодов, где используется *p-n*-переход. У таких диодов отсутствует диффузия, связанная с инжекцией неосновных носителей, то есть они работают только на основных носителях, а их быстродействие определяется лишь барьерной емкостью, поскольку они не нуждаются в рассасывании заряда при переходе.

Как уже говорилось выше, обратный заряд восстановления в SiC-диоде Шоттки чрезвычайно низок и является лишь следствием емкости перехода, а не накоплением сохраненного заряда. Кроме того, в отличие от кремниевых *p-n*-диодов, выключение *p-i-n*-диодов Шоттки не сопровождается рассасыванием заряда в *n*-области, поэтому ток обратного восстановления отсутствует. Имеется лишь незначительный ток, связанный с зарядом барьерной емкости, который не зависит ни от температуры, ни от скорости изменения тока  $di/dt$ , значения прямого тока и температуры перехода. Максимальная температура перехода SiC-диодов Шоттки равна +175 °С и представляет собой их фактическую рабочую температуру. Сверхнизкий заряд на уровне перехода в SiC-диодах Шоттки приводит к уменьшению коммутационных потерь в жестком, типичном переключении ККМ преобразователя с повышением, работающего в ССМ-режиме.

Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) 10-А диода Шоттки показаны на рис. 2.

Вольт-амперные характеристики SiC-диода Шоттки в области прямой проводимости могут быть легко смоделированы путем использования источника напряжения постоянного тока  $V_d$  с температурной зависимостью, выполняющего здесь роль модели прямого падения напряжения на диоде и последовательного, также зависящего от температуры, резистора  $R_d$ . Обратите внимание, что SiC-диоды Шоттки имеют положительный температурный коэффициент напряжения, что делает параллельную работу этих устройств более легкой задачей.

Значения  $V_d$  и  $R_d$  при заданной температуре полупроводникового перехода  $T_j$  можно рассчитать, используя следующие формулы:

$$V_d = \alpha \times T_j + V_{d0},$$

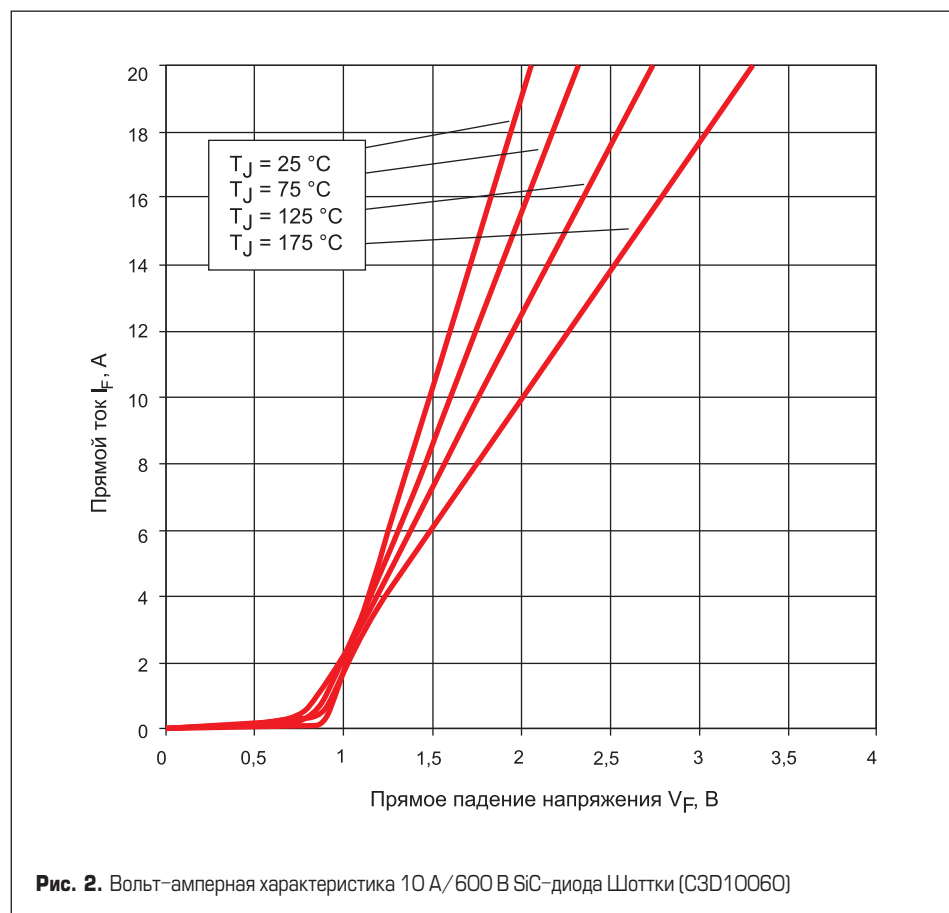
$$R_d = \beta \times T_j + R_{d0}.$$

Здесь коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и значения  $V_{d0}$ ,  $R_{d0}$  экстраполируются из эмпирических данных по вольт-амперным характеристикам диода в области прямой проводимости.

Прямое падение напряжения  $V_F$  SiC-диода Шоттки при любом заданном прямом токе  $I_F$  и требуемой температуре перехода можно легко вычислить по следующему уравнению:

$$V_F = I_F \times R_d + V_d,$$

где значения  $V_d$  и  $R_d$  рассчитываются из двух предыдущих формул.



### Расчет потерь мощности в SiC-диоде Шоттки для активного ККМ, работающего в режиме ССМ

Расчет потерь мощности в основном диоде ККМ, выполненном по архитектуре преобразователя с повышением, важен по двум причинам. Во-первых, допустимый рабочий ток диода зависит от потери на нем мощности и рабочей температуры перехода. Таким образом, при вычислении потерь мощности разработчики конечного решения могут быть уверены в правильности выбора диода соответствующего типоразмера. Во-вторых, предложенная программа Mathcad, вычисляя значение потерь, позволяет разработчикам выбирать характеристики диода на основе заданной ими эффективности (КПД).

Потери мощности в диоде повышающего преобразователя состоят из потерь проводимости и потерь при переключении. Потери проводимости в основном обусловлены прямым падением напряжения диода при заданном прямом токе. Потери при переключении, или, как мы часто говорим, коммутационные потери, связаны с потерями энергии обратного восстановления. Как уже не раз отмечалось, в SiC-диодах Шоттки потери проводимости являются основными потерями мощности, а коммутационные потери практически ничтожны, поскольку обратный ток восстановления таких диодов близок к нулю. Однако в Si-диодах все наоборот: их потери из-за затрат энергии на обратное восстановление намного превышают потери проводимости, поэтому разработчикам ИИП приходится использовать при выборе полупроводниковые устройства гораздо больших форм-факторов, что в равной степени касается и диода, и МОП-транзистора. Это необходимо для удовлетворения требованиям по эффективности и тепловым характеристикам. Чтобы избежать распространенного заблуждения относительно возможности простой замены Si-диода на SiC с одинаковым значением тока, как раз и был создан пошаговый файл Mathcad с расчетом потерь мощности SiC-диода Шоттки. Он дает разработчикам ИИП понимание, почему и насколько меньший по рабочему току SiC-диод Шоттки может заменить гораздо более мощный диод, выполненный на основе кремния.

Файл Mathcad позволяет разработчикам электропитания рассчитывать потери мощности SiC-диода Шоттки с любыми заданными требованиями и характеристиками.

Предлагаемый вариант расчета основан на принципах функционирования ККМ, выполненного по архитектуре преобразователя с повышением и использующего режим ССМ. Если принимать коэффициент мощности за единичный, то в этом случае ток находится

в фазе и совпадает по форме с напряжением питающей сети переменного тока, то есть он имеет форму синусоиды, а выходное напряжение ККМ является уже напряжением постоянного тока.

Потери проводимости диода при использовании SiC-диода Шоттки рассчитываются, как уже было показано выше, с использованием эквивалентной схемы, выполненной на основе источника напряжения постоянного тока  $V_d$  с последовательно включенным резистором  $R_d$ . Коммутационные потери вычисляются по потерям энергии, вызванным зарядом емкости перехода диода при заданном рабочем напряжении за один цикл переключения и умножением его на частоту коммутации. Обратите внимание, что потери, вызванные этим емкостным зарядом, включены в эту модель потерь диода, хотя такие потери обычно относят к ключам повышающих преобразователей.

Потери проводимости SiC-диода Шоттки в ККМ с повышением, работающем в режиме ССМ, определяются следующим образом:

$$P_{d\_cond} = I_{d\_rms}^2 \times R_d + I_o \times V_d.$$

Здесь:  $I_o$  — выходной ток ККМ преобразователя;  $V_d$  и  $R_d$  — эквивалентное сопротивление и прямое падение напряжения при заданной температуре перехода SiC-диода Шоттки;  $I_{d\_rms}$  — это среднеквадратичный ток через диод повышающего ККМ в течение одного периода выходного напряжения при заданной величине входного напряжения, выходном напряжении ККМ и токе нагрузки и рассчитывается как:

$$I_{d\_rms} = \frac{I_o}{\eta} \times \sqrt{\frac{16 \times V_o}{3 \times \pi \times V_{in}}},$$

где  $\eta$  — ожидаемая эффективность ККМ преобразователя (КПД).

Потери при переключении SiC-диода Шоттки ККМ с повышением в режиме ССМ определяются согласно следующему уравнению:

$$P_{d\_sw} = Q_c \times V_o \times f_s.$$

Здесь:  $Q_c$  — общий заряд полупроводникового перехода SiC-диода Шоттки при заданном напряжении;  $V_o$  — выходное напряжение ККМ,  $f_s$  — частота переключения преобразователя ККМ.

Общие потери на диоде ККМ с повышением, работающего в режиме ССМ, представляют собой сумму потерь проводимости и потерь при переключении:

$$P_d = P_{d\_cond} + P_{d\_sw}.$$

Превышение температуры перехода относительно температуры окружающей среды может быть рассчитано на основе известного теплового сопротивления «переход-корпус», которое приведено в спецификации на диод конкретного типа. Разработчики ИИП могут сами, исходя из тех или иных соображений, решить, какой из SiC-диодов Шоттки следует использовать в каждом конкретном приложении ККМ. Такой выбор должен делаться исходя из того, чтобы устройство работало с определенным запасом по тепловым характеристикам, поскольку это оказывает влияние на надежность самого диода и устройства в целом, а также отвечало бы при этом и требованиям в части эффективности (КПД).

### Заключение

Выбор SiC-диода Шоттки для ККМ повышающего типа отличается от выбора Si-диода, в первую очередь по причине практически нулевого обратного тока, присущего диодам, выполненным по SiC-технологии. Расчет потерь для SiC-диодов Шоттки упрощается, поскольку их характеристики, в части обратного восстановления, не зависят от скорости изменения тока  $di/dt$ , прямого тока и температуры перехода. Как правило, в приложениях ККМ нет возможности использования Si-диодов малого форм-фактора, поскольку это связано с необходимостью выполнять повышенные требования к тепловому режиму таких диодов и эффективности ИИП из-за присущей последним чрезмерной потери энергии обратного восстановления. В случае с SiC-диодами Шоттки они могут быть выбраны с меньшими рабочими токами, а следовательно, и с меньшим размером кристалла. Так что в этом случае для ККМ разработчики могут использовать диоды меньших физических размеров, чем в решениях с Si-диодами, причем не только с сохранением всех заданных технических характеристик конечного продукта, а даже повышая их. С целью облегчения выбора SiC-диодов Шоттки при проектировании вторичных ИИП, использующих активный ККМ с повышением и работающий в режиме ССМ, компанией Cree создан специальный файл Mathcad, облегчающий разработчикам эту задачу. В основу расчета положен детальный расчет потерь мощности на диоде.

Детальный расчет, выполненный в рамках настоящей статьи, и его результаты приводятся в файле Mathcad, который можно загрузить по ссылке: [www.cree.com/power/tools-and-support/document-library](http://www.cree.com/power/tools-and-support/document-library)