

# Преимущества 1200-В карбид-кремниевых диодов Шоттки с совмещенными p-n-переходами (MPS)

Современные однофазные и трехфазные инверторы солнечных батарей, источники бесперебойного питания или приложения для накопления энергии отличаются повышенными требованиями в части высокой эффективности, компактности их конструкций и длительной надежности. Однако возможности реализации инверторов для таких приложений ограничены высокими динамическими потерями кремниевых полупроводниковых приборов при их использовании для напряжения 1200 В. Альтернативные конструкции, с использованием полупроводниковых приборов с рабочим напряжением 600/650 В, могут лишь частично повысить эффективность работы инвертора. Тем не менее необходимо учитывать, что это повышение осуществляется за счет применения более сложных топологий со специальными схемами управления и увеличением входящих в них компонентов.

Омар Хармон  
(Omar Harmon)

Томас Баслер  
(Thomas Basler)

Фанни Бьёрк  
(Fanny Björk)

Перевод:  
Владимир Рентюк

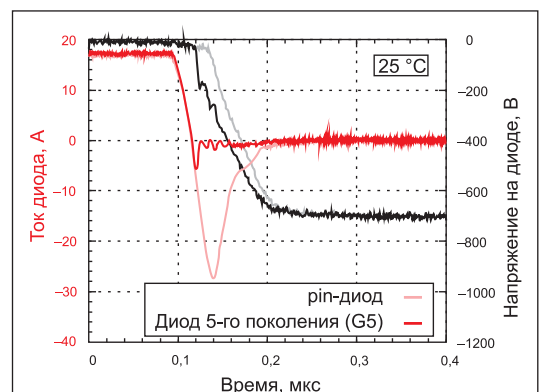
Карбид-кремниевый (SiC) диод с барьером Шоттки не имеет реального заряда обратного восстановления. Таким образом, гибридный набор, состоящий из 1200-В SiC-диода и 1200-В кремниевый (Si) IGBT, позволяет упростить топологию второго уровня за счет снижения потерь на запирающие диоды, а также резко снизить потери на выключение Si IGBT. Однако в таком сочетании статические потери диода на основе карбида кремния часто ограничивают потенциал оптимизации решений в виде 1200-В SiC-диода и 1200-В кремниевый (Si) IGBT. Чтобы преодолеть это ограничение и уменьшить статические потери, новое, пятое поколение диодов компании Infineon имеет уменьшенное прямое падение напряжения и меньшую его температурную зависимость. В данной статье описывается, как инновации в конструкции и в технологии изготовления привели к улучшению общих характеристик диода, повышению его надежности и уменьшению стоимости, что в результате облегчило использование таких диодов для разработки на их основе более эффективных, надежных и устойчивых к токовым перегрузкам инверторов.

## Нулевой обратный заряд восстановления — характерная черта SiC-диодов Шоттки

Кремниевые *pin*-диоды — это биполярные устройства, которые характеризуются большим зарядом обратного восстановления, зависящим от инжекции неосновных носителей заряда. Во время состояния проводимости диода носители заряда вводятся в устройство и должны быть удалены из устройства до того, как напряжение может быть заблокировано, иначе область пространственного заряда может быть

застроена. Однако более высокая концентрация носителей заряда приводит к высоким значениям обратного заряда восстановления. Кроме того, заряд обратного восстановления зависит от прямого тока и температуры перехода такого полупроводникового устройства.

Преимуществом использования диодов Шоттки, выполненных на основе карбида кремния, является то, что основные носители заряда показывают практически нулевой заряд обратного восстановления. На диаграмме переключения, приведенной на рис. 1,



**Рис. 1.** Временная диаграмма, описывающая поведение быстрого Si 1200-В диода Шоттки и SiC диода Шоттки пятого поколения (G5), в режиме обратного восстановления. Условия измерения:  $V_{DC} = 700$  В, ключ — 1200-В IGBT,  $di/dt = 1300$  А/мкс. Потери: 50 мкВт — для диода Шоттки G5, 190 мкВт — для Si *pin*-диода. Обратное напряжение, приложенное к диоду, выделено черным цветом

видно, что, по сравнению с быстрым Si-диодом, пиковый ток обратного восстановления диодов Шоттки на основе SiC очень мал. Мы видим здесь лишь ток заряда, связанный с емкостью обратного смещения перехода. Это приводит к значительно более низким потерям при выключении. К тому же, поскольку динамические характеристики диода Шоттки носят емкостной характер, характеристика обратного восстановления SiC-диода Шоттки не зависит ни от величины номинального прямого тока, ни от скорости нарастания тока  $di/dt$ , ни от температуры перехода.

**Уменьшение статических потерь и улучшение тепловых характеристик**

Новые 1200-В SiC-диоды Шоттки выполнены с имплементацией совмещенных  $p-n$ -переходов (Merged pn-Schottky, MPS), представляющей собой ту же технологическую базу, что и у диодов последнего поколения с рабочим напряжением 650 В. Для лучшего понимания конструкции с реализацией технологии MPS на рис. 2 показана структура SiC-диода Шоттки с его анодной стороны. Возможность блокировочных свойств диода на SiC во время подачи обратного напряжения обеспечивается наличием дрейфового слоя. Однако этот слой также вносит основной вклад в общее сопротивление канала такого полупроводникового устройства. В связи с этим, чтобы понизить прямое напряжение в режиме прямой проводимости диода, необходимо понизить сопротивление этого дрейфового слоя. Более высокий уровень легирования дрейфового слоя ( $n$ ) снижает сопротивление, но это приводит к более высокому току утечки диода.

Введение  $p+$ -островков в этой структуре дополнительно экранирует электрическое поле от контакта с барьером Шоттки, таким образом уменьшая токи утечки диода. Следовательно, использование структуры с технологией MPS позволяет снизить общее сопротивление открытого диода за счет увеличения уровня легирования дрейфового слоя, но уже без существенного увеличения тока утечки.

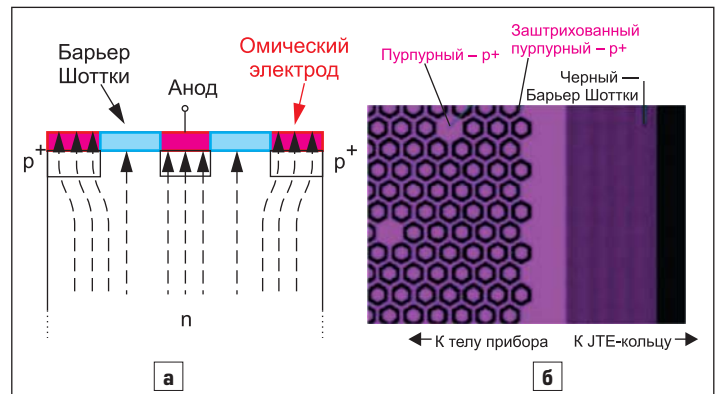
Новая структура диодов пятого поколения дает уменьшение на 50% сопротивления пролетной области по сравнению с предыдущим, вторым поколением, которое представляет собой обычную конструкцию диода Шоттки. На рис. 3 приведены вклады различных компонентов в величину конечного прямого падения напряжения при плотности тока  $600 \text{ A/cm}^2$  для нового и предыдущего поколений диодов. Плотность тока, как правило, тут ниже, и в основном она зависит от достигаемого теплового сопротивления  $R_{th}$  корпуса прибора. Еще более важным достижением является весьма незначительное увеличение прямого напряжения во время работы конечного приложения при полной нагрузке. Это улучшение теперь можно использовать для более высокой плотности тока конструкции с уменьшением ее статических потерь.

**Значительное увеличение импульсного рабочего тока**

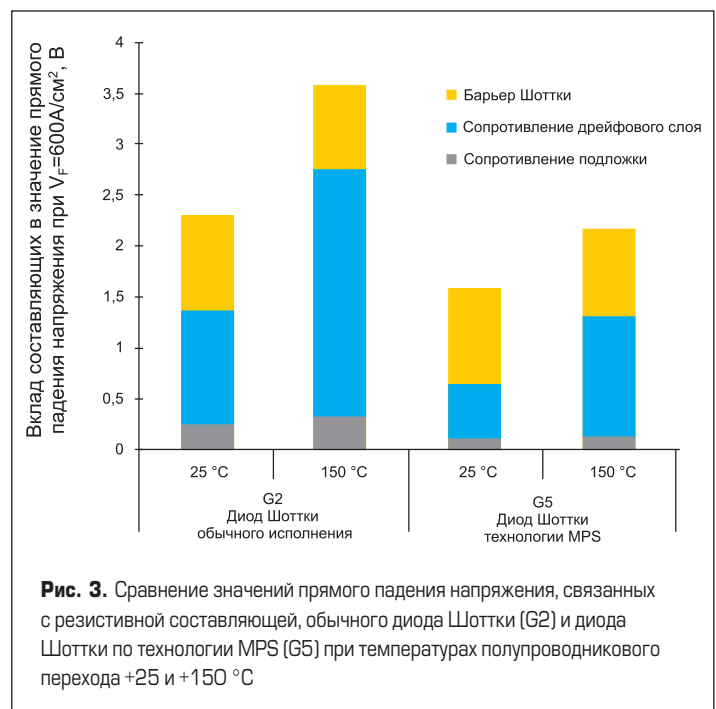
Еще один положительный побочный эффект, связанный с технологией MPS, — увеличение максимально допустимого импульсного тока. При более высоких токах потенциал  $p-n$ -перехода в островках  $p+$  в  $n$ -области преодолевается, и дырки вводятся в дрейфовый слой. Диод становится биполярным с точки зрения прямой передаточной характеристики, как это показано на рис. 4. Благодаря новой технологии 1200-В SiC-диоды Шоттки пятого поколения компании Infineon способны выдерживать броски тока, более чем в 15 раз превышающие номинальный ток для типичной 10-мс синусоидальной полуволны.

**Использование технологии тонких пластин для достижения более низкого прямого падения напряжения и улучшения тепловых характеристик диода**

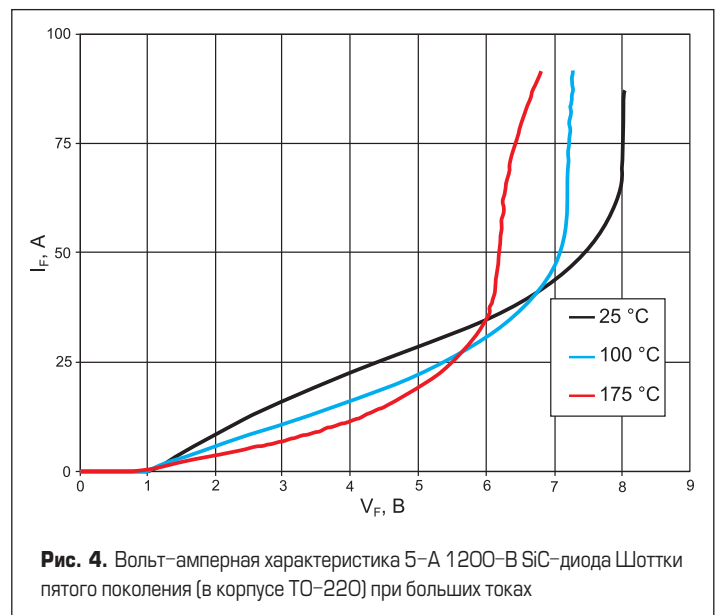
Чтобы обеспечить механическую прочность полупроводникового прибора, в его конструкции используется подложка (рис. 5). На рисунке схематично показано поперечное сечение диода Шоттки на основе SiC. Сопротивление подложки ( $R_{bulk}$ ) также вносит определенный вклад в общее дифференциальное сопротивление диода. Когда диод



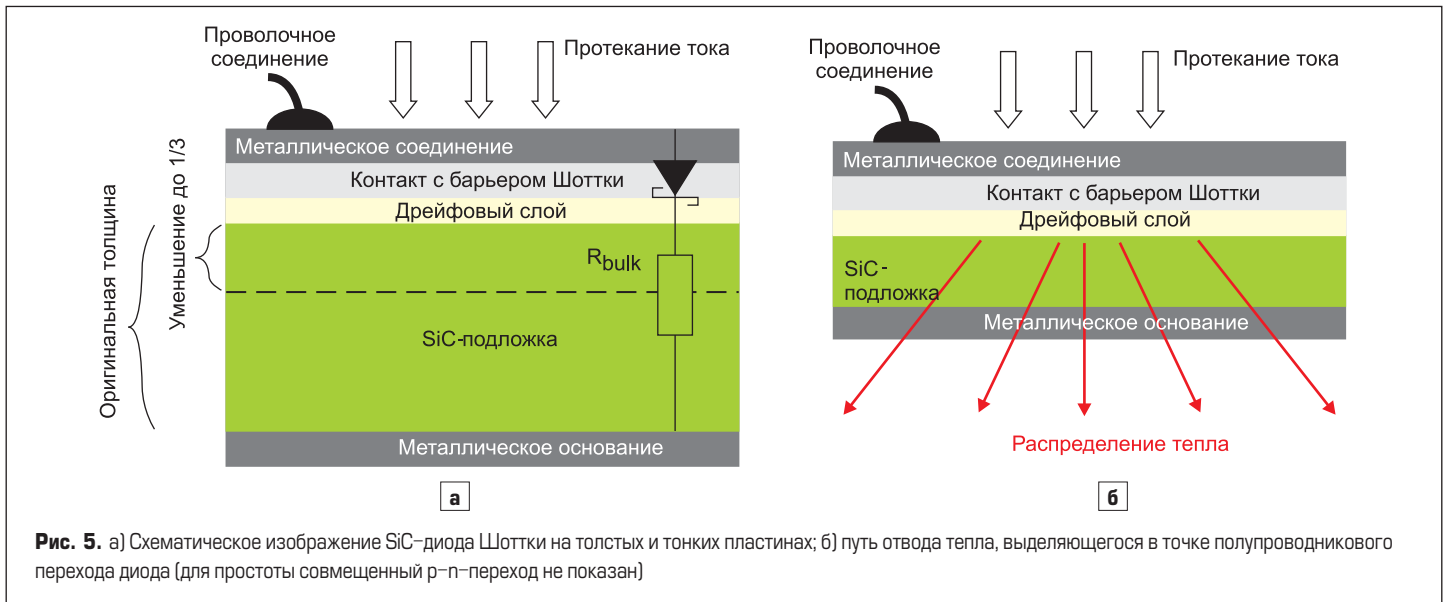
**Рис. 2.** Конструкция 1200-В thinQ! SiC-диода Шоттки пятого поколения. MPS-структура сочетает в себе экранирование электрического поля от барьера Шоттки и повышенную устойчивость к ударным токам путем инъекции дырок: а) пунктирные линии показывают плотность тока при более высоких токах; б) конструкция ячейки оптимизирована путем использования ячеистой структуры с гексагональными  $p+$ -островками



**Рис. 3.** Сравнение значений прямого падения напряжения, связанных с резистивной составляющей, обычного диода Шоттки (G2) и диода Шоттки по технологии MPS (G5) при температурах полупроводникового перехода +25 и +150 °C



**Рис. 4.** Вольт-амперная характеристика 5-А 1200-В SiC-диода Шоттки пятого поколения (в корпусе TO-220) при больших токах



работает в режиме прямой проводимости, то толщина этой подложки оказывает самое непосредственное влияние на величину его прямого падения напряжения. Поэтому, чтобы понизить прямое напряжение, целесообразно уменьшить ее толщину, принимая, однако, во внимание и требования по механической прочности прибора.

Правильно выбранная технология формирования толщины пластин позволяет уменьшить толщину подложки примерно до одной трети по сравнению с исходной компоновкой. При такой толщине приведенное общее дифференциальное сопротивление ведет к снижению типичного прямого падения напряжения для чипов одинаковой площади от 150 до 200 мВ.

Помимо снижения прямого падения напряжения, уменьшенная толщина кристалла также приводит к улучшению теплового сопротивления, которое, в свою очередь, дает преимущества в части рассеиваемой мощности таким полупроводниковым устройством. Очевидно, что более тонкий слой подложки характеризуется более коротким путем для отвода тепла, генерируемого внутри барьера Шоттки и дрейфовым слоем диода. Отвод тепла от полупроводникового перехода повышается, тем самым уменьшая и тепловое сопротивление между переходом и кристаллодержателем или корпусом. Это особенно верно, если в конструкции диода используются такие сложные, имеющие низкое тепловое сопротивление кристалла ( $R_{th}$ ) технологии, как диффузионная пайка.

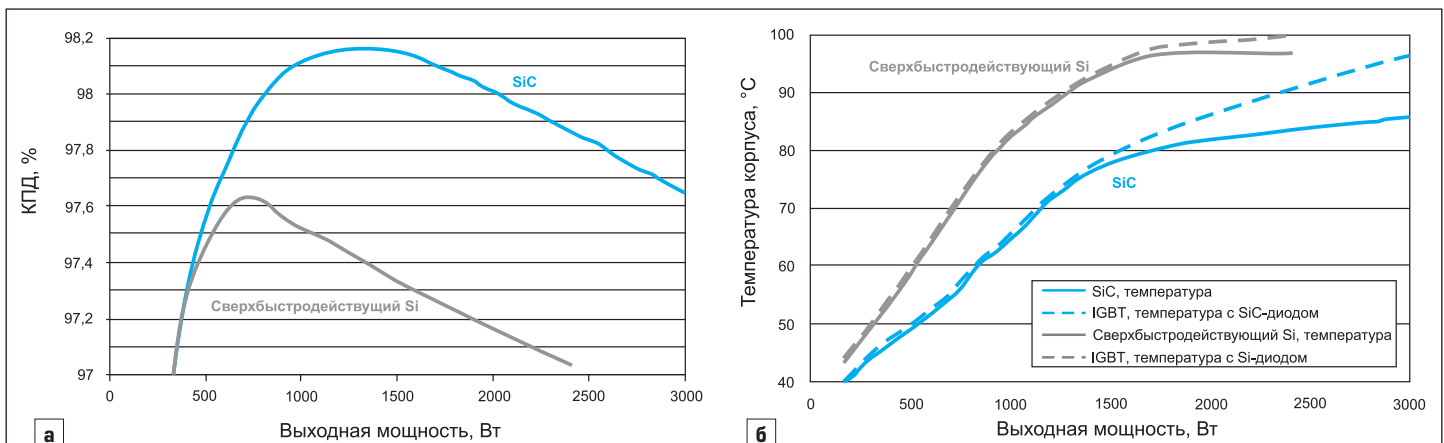
Кроме того, тонкая подложка улучшает распространение теплового потока не только по вертикали, но и в боковом направлении, как это показано на рис. 5б. Уменьшение теплового сопротивления, таким образом, соответствует эквивалентному увеличению рассеиваемой

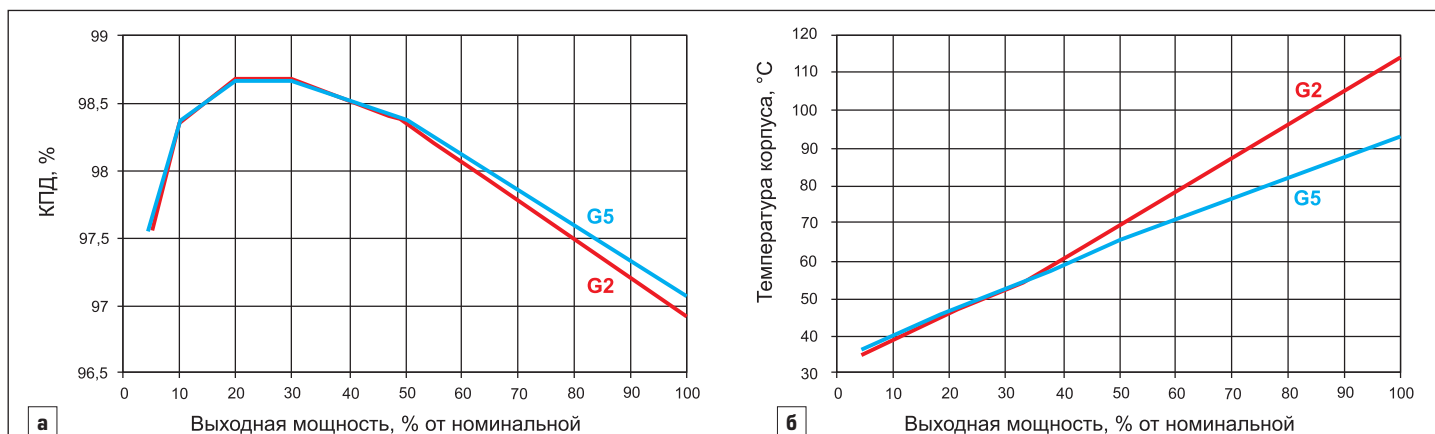
мощности при той же температуре корпуса. Тем не менее здесь необходимо иметь в виду, что при использовании очень тонких пластин удельная тепловая емкость ( $C_{th}$ ) вблизи перехода также уменьшается. Что касается кратковременных событий, таких как скачок тока, то здесь необходимо найти приемлемый компромисс между снижением прямого падения напряжения и уменьшением значения  $C_{th}$ .

### Экспериментальные результаты в топологии повышающего преобразователя

Технические характеристики SiC- и Si-диодов оценивались в схеме повышающего преобразователя. Испытательная установка имела входное напряжение и выходное напряжение постоянного тока 400 и 800 В соответственно и была рассчитана обеспечивать выходную мощность до 3000 Вт. В качестве ключей повышающего преобразователя использовались 1200-В 25-А IGBT IKW25N120H3 компании Infineon. Рабочая частота повышающего преобразователя была выбрана равной 20 кГц. В схеме преобразователя был использован коммерчески доступный 18-А сверхбыстродействующий Si-диод, который обычно используется для этого диапазона выходной мощности. Повышающий дроссель имел индуктивность 2,5 мГн. На рис. 6 представлен график эффективности (КПД) и кривая повышения температуры корпуса диода в зависимости от выходной мощности для 10-А SiC- и 18-А Si-диодов, которые использовались в данной схеме повышающего преобразователя. Испытания проводились при температуре окружающей среды +25 °С.

Как показывают приведенные графики, при выходной мощности в 2400 Вт КПД повышающего преобразователя с использованием





**Рис. 7.** а) КПД; б) зависимости температуры корпуса SiC-диода в схеме повышающего преобразователя с выходным напряжением 800 В при использовании 10-А SiC-диодов Шоттки 5-го (G5) и 2-го (G2) поколения компании Infineon в корпусах TO-247

SiC-диодов составляет 97,9% по сравнению с 97,0% при использовании кремниевых диодов. Измеренная температура корпуса при указанной выходной мощности для Si-диода составляет +96,7 °C, а для SiC-диода она достигает всего +84 °C. Из-за уменьшения заряда обратного восстановления, характерного для технологии с использованием SiC, выходная мощность повышающего преобразователя может достигать 3000 Вт при температуре корпуса диода, равной +85 °C.

Для сравнения повышения КПД при использовании SiC-диодов разных технологических поколений использовалась та же самая, упомянутая выше, испытательная установка повышающего преобразователя, за исключением транзисторов ключей. В ходе этого испытания в качестве повышающих ключей использовались JFET на основе карбида, что обеспечило максимальную выходную мощность преобразователя до 6 кВт. На рис. 7 представлены соответствующие кривые эффективности (КПД), а также график изменения температуры корпуса диода в зависимости от процентного уровня выходной мощности.

При 100%-й выходной мощности КПД повышающего преобразователя в случае использования диодов 5-го поколения (G5) составил 97,1%, а 2-е поколение диодов (G2) показало

КПД, равный 96,2%. Кроме того, при этой выходной мощности измеренная температура корпуса для диодов 5-го поколения составляет +93,6 °C, в то время как температура корпуса 2-го поколения диодов составила +115,1 °C. Это снижение температуры корпуса при 100%-й выходной мощности является результатом снижения потерь диодов, которое составило 30%.

## Выводы

По сравнению с использованием обычных решений на базе Si-диодов Шоттки, получить более высокую гибкость при оптимизации системы для случая ИБП, солнечных инверторов, систем накопления и хранения энергии, а также других промышленных применений можно при использовании гибридных сборок в виде 1200-В SiC-диода и 1200-В Si IGBT. Замена обычного Si-диода на диод, выполненный по технологии с использованием SiC, повышает надежность системы из-за более низких собственных температур таких приборов. Кроме того, здесь может быть достигнута более высокая выходная мощность в том же формате. При незначительных дополнительных конструктивных изменениях в системе плотность мощности может быть увеличена даже при использовании меньших радиато-

ров и фильтров подавления электромагнитных помех. Новое, 5-е поколение 1200-В SiC-диода Шоттки от компании Infineon обеспечивает эту более высокую гибкость с низкими потерями на выключение, значительное уменьшение статических потерь, особенно при повышенной температуре, а также резкое увеличение устойчивости к броскам тока.

## Литература

1. Björk F., Harmon O., Draghici M., Gerlach R., Basler T., Rupp R. 1200 V thinQ! SiC Schottky Diode Generation 5: what are the three keys for simple, compact and high efficiency inverter designs?. PCIM Europe. 2015.
2. Fichtner S., Lutz J., Basler T., Rupp R., Gerlach R. Electro – Thermal Simulations and Experimental Results on the Surge Current Capability of 1200 V SiC MPS Diodes. Proceedings of CIPS. 2014.
3. Rupp R., Gerlach R., Kirchner U., Schlögl A., Ronny Kern R. Performance of a 650V SiC diode with reduced chip thickness. ICSCRM2011, proceedings of.
4. Scarpa V., Kirchner U., Gerlach R., Kern R. New SiC Thin-Wafer Technology Paving the Way of Schottky Diodes with Improved Performance and Reliability. PCIM Europe. 2012.