

# Диоды PEP/CAL —

## НОВЫЕ ПОКОЛЕНИЯ ЧИПОВ SEMIKRON

Диоды SEMIKRON, производимые с применением усовершенствованной технологии PEP (Power Enhancing Passivation, рис. 1), представляют новое поколение выпрямительных полупроводниковых приборов. При их изготовлении используется отработанный процесс формования кристаллов MESA (mesa edge termination), известный по классическим диодам SKR (SEMIKRON Rectifier) [3], в сочетании с инновационным методом пассивации, обеспечивающим расширение температурного диапазона и повышение надежности силовых устройств. Быстрые диоды с плавной характеристикой восстановления семейства CAL (Controlled Axial Lifetime) разработаны для использования в качестве антипараллельных в IGBT-модулях, они также доступны и в виде дискретных приборов. Выпускается два основных поколения этих компонентов: CAL3/HD с максимальной рабочей температурой  $T_{jmax} = +150\text{ °C}$  и CAL4F с  $T_{jmax} = +175\text{ °C}$ . Диоды имеют рабочее напряжение 600–1700 В и ток 6–200 А.

Мартин Хенсмен  
(Martin Hansmann)

Бернард Кениг  
(Bernhard König)

Перевод и комментарии:  
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

### Выпрямительные диоды

Разработка PEP-диодов отражает требования рынка силовых полупроводников, который существенно изменился за последнее десятилетие: новые регионы, такие как Китай, становятся основными стимуляторами дальнейшего роста. В развивающихся странах, имеющих, как правило, низкое качество электрических сетей, силовые полупроводниковые приборы часто функционируют в очень сложных условиях. Кроме того, требования по увеличению плотности мощности и снижению стоимости преобразователей привели к повышению рабочей температуры кристаллов IGBT с  $T_{jop} = +125\text{ °C}$  до  $T_{jop} = +150\text{ °C}$ . Основные поставщики IGBT-модулей выпускают новые поколения транзисторов с  $T_{jop} = +175\text{ °C}$ .

Диоды, используемые совместно с IGBT, должны иметь согласованные характеристики. В интегральных силовых модулях (PIM), содержащих входной выпрямитель и IGBT-инвертор, повышение температуры чипов IGBT неизбежно ведет к перегреву выпрямительных кристаллов за счет тепловой связи. Описанные задачи и проблемы были учтены при разработке диодов серии PEP.



Рис. 1. Пластина с кристаллами SKR PEP

### Выпрямительные диоды PEP

На рынке представлено два семейства диодов, производимых по технологии PEP: SKR PEP 1600V и SKR PEP 2200V. Главной особенностью компонентов с рабочим напряжением 1600 В является повышенная на  $25\text{ °C}$  рабочая температура ( $T_{jmax} = +175\text{ °C}$ ), что позволяет увеличить плотность тока на 20–25%. Такие выпрямительные диоды могут быть использованы в интегральных модулях CIB (выпрямитель + инвертор + тормозной каскад) совместно с IGBT последних поколений. В то же время они полностью совместимы с компонентами предыдущего поколения SKR по размерам и электрическим характеристикам, то есть их применение позволяет увеличить надежность изделия при сохранении существующих технологий монтажа. Важной особенностью новых чипов является повышенная стойкость к воздействию влаги. Опытное производство началось в 2017 году, в ближайшем будущем планируется расширение токового диапазона диодов SKR PEP.

Впервые SEMIKRON предлагает кристаллы выпрямительных диодов с обратным напряжением  $V_{RRM} = 2200\text{ В}$ . Они предназначены для применения в сетях низкого качества с напряжением 600 В и выше, где необходим дополнительный запас по надежности. Из-за более высокого значения  $V_{RRM}$  максимальная температура кристаллов  $T_j$  ограничена на уровне  $+150\text{ °C}$ . Диоды с рабочим напряжением 2200 и 1600 В обладают повышенной стойкостью к воздействию влажности. Линейка продуктов будет расширяться в зависимости от внутренних потребностей и с появлением новых крупных проектов.

### Общие соображения и соответствие характеристик

Свойства выпрямительных диодов очень зависят от особенностей конструктива и технологий промежуточных соединений, используемых при кор-

пусировании. Технические данные, приводимые в спецификации кристаллов, отражают их свойства, подтвержденные при установке в стандартный модуль, рассматриваемый в качестве эталонной сборки с заданными электрическими и тепловыми свойствами. Более того, некоторые характеристики, например максимальное повторяющееся обратное напряжение ( $V_{RRM}$ ), не могут быть достигнуты на отдельном чипе, не установленном в корпус, из-за ограниченной диэлектрической прочности в условиях конкретной окружающей среды (или окружающей атмосферы).

Различные исходные данные, в частности вариации тепловых или электрических параметров, дают разные оценки технических характеристик. Поэтому, например, значения номинального или среднего прямого тока  $I_{F(DC)}$  и пикового тока  $I_{FSM}$  могут быть использованы только в качестве ориентира для выбора размера чипа для конкретного приложения. Термины и граничные условия, необходимые для оценки номинальных величин, далее будут объяснены более подробно.

Потери мощности  $P_v$ , генерируемые полупроводниковым прибором и выделяемые в виде тепла, должны быть рассеяны с помощью системы охлаждения:

$$P_v = V \times I = (T_j - T_c) / R_{th(j-c)} \quad (1)$$

Уравнение показывает, что допустимая токовая нагрузка устройства с заданными электрическими характеристиками (и температурой кристалла  $T_j$ ) определяется температурой корпуса  $T_c$  и тепловым сопротивлением  $R_{th}$  — основными характеристиками сборки. Корпус должен иметь тепловую связь с радиатором, от свойств которого во многом зависит величина  $T_c$ . В противном случае для устройства с фиксированными значениями  $T_c$  и  $R_{th}$  токовая нагрузка будет ограничена максимально допустимой температурой кристаллов  $T_{jmax}$ . Чем она выше, тем больше плотность тока и эффективность работы устройства.

Важно понимать, что термин  $T_{jmax}$  описывает предельно допустимую локальную температуру в любой части полупроводникового прибора при любых условиях применения. Это означает, что в реальных режимах эксплуатации необходим некоторый запас прочности. Как правило, запас в 25 °C считается достаточным для безопасной работы прибора, и величина  $T_{jop} = T_{jmax} - 25$  °C определится как максимальная рабочая температура. По этой причине многие статические параметры, необходимые для расчета потерь, часто приводятся в технических спецификациях при  $T$  на 25 °C ниже  $T_{jmax}$ .

Для того чтобы рассчитать размер чипа для заданной номинальной мощности, следует принять во внимание некоторые граничные условия. Они непосредственно связаны с особенностями работы сетевого выпрямителя, динамическими потерями в котором можно пренебречь: только величины  $R_{th(j-c)}$  и  $T_c$  необходимы для расчета среднего прямого тока синусоидального сигнала  $I_{F(AV)}$  или DC-сигнала  $I_{F(DC)}$  соответственно. Чтобы облег-

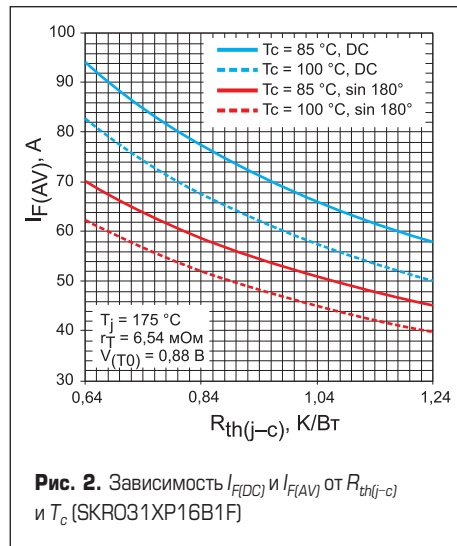


Рис. 2. Зависимость  $I_{F(DC)}$  и  $I_{F(AV)}$  от  $R_{th(j-c)}$  и  $T_c$  (SKR031XP16B1F)

чить эти вычисления, в новых спецификациях приводится график зависимости  $I_{F(DC)}$  и  $I_{F(AV)}$  от  $R_{th(j-c)}$  для двух различных температур корпуса (рис. 2). В [2] подробно объяснена взаимосвязь различных тепловых и электрических параметров.

**Соответствие SKR и SKR PEP 1600 V**

Как будет объяснено далее, некоторые граничные условия, необходимые при расчете номинального тока, адаптированы для нового поколения PEP-диодов. Модель теплового сопротивления  $R_{th}$ , используемая для этих компонентов, отражает характеристики модуля с базовой платой и изолирующей DBC-подложкой толщиной 0,38 мм (рис. 3). Значения  $I_{F(DC)}$  и  $I_{F(AV)}$  относятся к температуре корпуса +85 °C, как в большинстве технических спецификаций SEMIKRON. Величина  $T_c = +85$  °C используется с тех времен, когда

предельная рабочая температура модулей нормировалась на уровне  $T_{jmax} = +125$  °C. Поэтому вторая кривая при  $T_c = +100$  °C на рис. 2 отражает токовые характеристики современных приборов с типовой системой охлаждения и увеличенной температурой кристаллов. Данные в ранних спецификациях относятся к фиксированной температуре корпуса ( $T_c$ ) или радиатора ( $T_s$ ) — +80 °C в зависимости от размера чипа.

С учетом приведенных выше фактов можно пересчитать номинальные токи новых компонентов для точного сравнения. Следует ожидать, что величина  $I_{F(AV)}$  у SKR PEP-диодов будет примерно на 20–25% больше при том же размере чипа и в таком же корпусе благодаря повышенной допустимой температуре кристаллов (на 25 °C). Пиковый ток остается неизменным при аналогичных условиях измерения.

**Система обозначений**

Для описания очередного поколения выпрямительных диодов введена новая система обозначений, поэтому сравнение параметров компонентов на основании цифр и букв, приведенных в их названии, достаточно проблематично. В основе новой системы лежит площадь кристалла, предыдущий способ базировался на электрических характеристиках. Для примера в таблице 1 приведена расшифровка наименования диода SKR031XP16B1F.

**Данные в технических спецификациях**

Технические спецификации диодов SKR нового и предыдущего поколений внешне похожи, однако в документации на SKR PEP

Таблица 1. Система обозначений диодов PEP

SKR	031	X	P	16	B	1	F
SEMIKRON Rectifier	Площадь чипа, мм <sup>2</sup>	Технология	Ориентация выводов	Класс напряжения ( $V_{rrm}/100$ )	Металлизация верхней части чипа	Изменения конструкции	Вид поставки
Возможные варианты	Вариации 3 цифры	X: усиленная пассивация (PEP)	P: анод сверху N: катод сверху	16: 1600 В 22: 2200 В	B: под сварку Al-проводниками	1: существующий дизайн	F: распиленные на раме T: на пластине

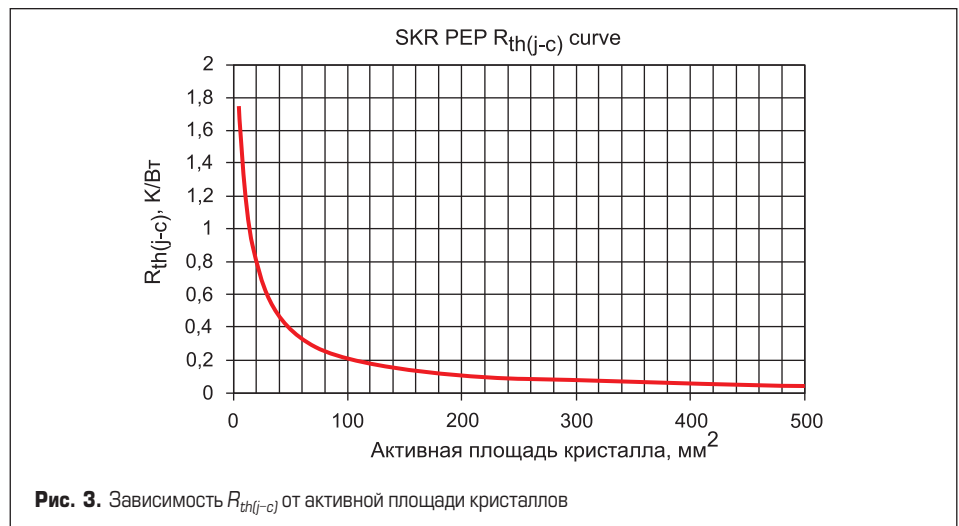


Рис. 3. Зависимость  $R_{th(j-c)}$  от активной площади кристаллов

есть ряд улучшений, дающих разработчику больше полезной информации. Файлы доступны на сайте компании SEMIKRON [1]. Необходимо понимать, что данные, приведенные в спецификации на кристалл, действительны только при соблюдении всех правил корпусирования, то есть обеспечения требований по тепловым и электрическим соединениям, а также защите кристаллов (например, путем заливки силиконовым гелем).

**Основные моменты**

На левой стороне листа спецификации серым фоном выделен столбец с основными характеристиками полупроводникового прибора, включающими типоразмер, класс напряжения и средний прямой ток для идеального DC-сигнала  $I_{F(DC)}$ . Величина  $I_{F(DC)}$  рассчитывается аналогично  $I_{F(AV)}$  (см. далее) и определяется как номинальный ток диода. Граничные условия для оценки номинальных режимов приведены в правой части таблицы данных, некоторые из них отмечены в сноске. На первом листе спецификации дано изображение пластины с кристаллами, относящееся ко всему семейству продуктов, размеры чипа указаны в конце спецификации.

**Абсолютные максимальные значения**

В разделе спецификации, озаглавленном «Absolute Maximum Ratings», приведены предельные значения базовых электрических характеристик кристалла. Строго говоря, эти величины не отражают «абсолютные» параметры полупроводникового прибора, поскольку граничные условия, заданные для корпусированного чипа, такие как  $R_{th}$  или технология промежуточных электрических соединений играют здесь решающую роль. Класс напряжения определяется как максимальное повторяющееся обратное напряжение ( $V_{RRM}$ ) при комнатной температуре и заданном токе утечки. Напряжение пробоя  $V_{(BR)}$  зависит от температуры и уменьшается вместе с ней.

Как уже упоминалось, новые спецификации основаны на согласованной теоретической модели теплового сопротивления  $R_{th(j-c)}$  модуля с паяной базовой платой и изолирующей DBC-подложкой толщиной 0,38 мм. Кривая, отражающая типовые значения  $R_{th}$  (не для «наихудшего случая»), показана на рис. 3. Измерения сделаны при референтной температуре корпуса  $T_c = +85^\circ\text{C}$ , обычно указываемой в документации SEMIKRON. Эти граничные условия используются при расчете справочных значений  $I_{F(AV)}$  и  $I_{F(DC)}$ .

Величина среднего прямого тока для сигнала синусоидальной формы  $I_{F(AV)}$  при условиях, указанных в документации, определяется следующим образом:

$$I_{F(AV)}(F_i) = \sqrt{\frac{V_{(TO)}^2 + 4 \frac{F_i^2 r_T (T_j - T_c)}{R_{th(j-c)}}}{2 F_i^2 r_T}} - V_{(TO)}$$

Выражение (2) представляет собой приближенное решение уравнения (1).

Значение форм-фактора  $F_i$  зависит от вида электрического сигнала. Для синусоидального режима с полупериодом 10 мс ( $I_{F(AV)} \times F_i = \pi/2$ , для DC-сигнала ( $I_{F(DC)} \times F_i = 1$ ).

Зависимость теплового сопротивления  $R_{th}$  от формы сигнала или переходных эффектов не учитывается.

Параметры  $V_{(TO)}$  и  $r_T$  предназначены для линейной аппроксимации прямой вольт-амперной характеристики:

$$V_{F(\text{approximation})} = V_{(TO)} + r_T I_F \quad (3)$$

Граничные условия линейной аппроксимации изложены в новом разделе технической спецификации под названием «Только для расчета потерь» (For power loss calculation only). Способность устройства выдерживать кратковременный ток перегрузки задается величиной  $I_{FSM}$ , определяемой для полусинусоидального сигнала длительностью 10 мс при комнатной температуре и температуре  $+150^\circ\text{C}$  (в начале импульса перегрузки). Интегральное значение  $i^2 t$  рассчитывается на основании тока перегрузки:

$$i^2 t = I_{FSM}^2 \times 10 \text{ мс} / 2 \quad (4)$$

Максимальная температура кристалла  $T_{jmax}$  даже кратковременно не должна быть превышена при любых условиях эксплуатации в любой точке полупроводникового прибора. Перегрев кристалла выше этого значения приводит к быстрой деградации полупроводника и потере надежности.

**Электрические характеристики**

В данном разделе описано статическое и динамическое поведение диодов в типовых и/или предельных условиях. Максимальный обратный ток дается при определенном значении напряжения  $V_{RRM}$  при комнатной, а также повышенной температуре. Прямая вольт-амперная характеристика задана типовым и максимальным значением падения напряжения  $V_F$  при определенном уровне плотности тока, что отражает типовые токовые характеристики кристаллов большинства полупроводниковых приборов. Поскольку

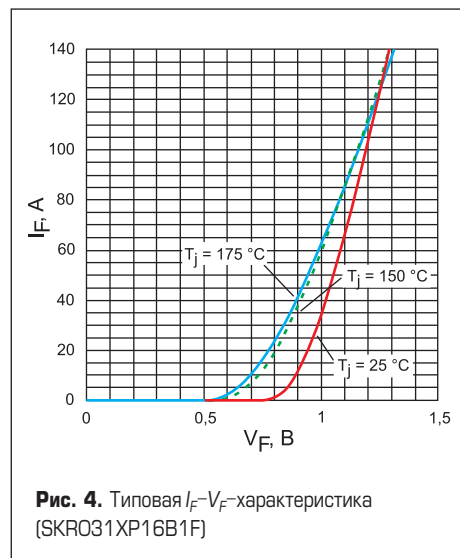


Рис. 4. Типовая  $I_F-V_F$  характеристика (SKR031XP16B1F)

тест чипов на пластине не допускает проверки на номинальном токе, в большинстве случаев этот уровень тока ниже номинального значения  $I_{F(DC)}$ .

Прямые характеристики определяются при трех температурах кристалла:  $T1 = +25^\circ\text{C}$ ;  $T2 = T_{jmax} - 25^\circ\text{C}$  и  $T3 = T_{jmax}$ . Типовая вольт-амперная кривая и ее температурная зависимость приводятся в виде графиков в конце спецификации, как показано на рис. 4.

Динамическими потерями выпрямителей на сетевых частотах 50/60 Гц можно пренебречь. Однако следует помнить о том, что время обратного восстановления  $t_{rr}$  и заряд восстановления  $Q_{rr}$  при соответствующих условиях испытаний определяют динамическое поведение диодов. Параметр  $t_{rr}$  и его связь с другими динамическими характеристиками подробно описаны в [2].

**«Только для расчета потерь»**

Для моделирования используется линейная аппроксимация прямой вольт-амперной характеристики, определяемая в спецификации параметрами  $V_{(TO)}$  и  $r_T$ . Аппроксимация задается выражением (3), для нее на кривой I-V выбирают две точки. Одна из них соответствует току, при котором определяется справочное значение  $V_F$  (например, для SKR031XP16B1F  $I_{F1} = 26 \text{ A}$ ), вторая — в три раза превышает этот уровень ( $I_{F2} = 78 \text{ A}$ ). Они также упоминаются в поле «Условия измерений» (Conditions) таблицы данных.

Корректное отображение реальной кривой с помощью коэффициентов  $V_{(TO)}$  и  $r_T$  предусматривает адекватный запас по предельным режимам. При использовании линейной аппроксимации значения  $I_{F(AV)}$  и  $I_{F(DC)}$  можно вычислить с помощью уравнения (2). Справедливость такого приближения зависит от области применения, и она должна быть проверена пользователем для конкретных условий работы.

**Тепловые характеристики**

Тепловые характеристики, приводимые в технических спецификациях, справедливы для рабочих диапазонов температур кристалла  $T_j$  и хранения  $T_{stg}$  соответственно. Рекомендации по режиму пайки  $T_{solder}$  даны для двух различных интервалов времени. Превышение пределов тепловых режимов, указанных в спецификации, может привести к деградации свойств чипа и потере надежности.

**Механические характеристики**

К механическим характеристикам чипа относятся его размеры и площадь. Размеры раstra кристалла на пластине на самом деле определяют верхний предел его фактического контура, поскольку некоторые части утилизируются в процессе нарезки. Электрический символ диода в технической спецификации показывает ориентацию прибора: в стандартной конфигурации вывод анода находится на верхней части чипа, а катода — на нижней части.

Кроме того, в этом разделе указывается тип металлизации. Как правило, анод (верх-

ний контакт) покрыт алюминием (Al), что позволяет подключать толстые проводники методом сварки. Металлизация катода (обратная сторона кристалла) — многослойная контактная структура, основными компонентами которой являются никель и серебро (Ag), которое подходит для широкого спектра технологий сборки.

Способ отгрузки также приводится в разделе «Механические характеристики». В варианте 1600 В диоды SKR PEP площадью ≤106 мм<sup>2</sup> поставляются в нарезанном виде на раме (пластина диаметром 150 мм). Информация в графе Chips/Package определяет максимальное количество «бездефектных» чипов, которое может варьироваться в соответствии с выходом годных. Кристаллы SKR 1600-В PEP-диодов площадью >106 мм<sup>2</sup> и всех SKR PEP 2200-В диодов поставляются на пластинах, по шесть штук в одной упаковке.

### Испытания надежности

Во время квалификационных испытаний выпрямительные диоды PEP проходят тесты на надежность, программа и соответствующие стандарты приведены в таблице 2. Проверка надежности чипов выполняется только в сборке (например, в составе стандартного модуля). Взаимодействие между кристаллами и конструктивом может повлиять на результаты испытаний, поэтому показатели надежности проверяются пользователем в конкретных приложениях.

### Быстрые диоды

#### Технология CAL (Controlled Axial Lifetime)

Быстрый диод (FWD) в составе IGBT-модуля должен демонстрировать плавный характер восстановления при включении оппозитного транзистора, чтобы исключить образование опасных всплесков напряжения. Коммутационные перенапряжения, вызванные наличием паразитных индуктивностей и высокой скоростью спада тока  $di/dt$ , могут разрушить полупроводниковый прибор. Плавность характеристики и малый заряд обратного восстановления диодов SEMIKRON достигаются за счет локальной регулировки времени жизни носителей при прохождении тока между анодом и катодом (так называемая ось Z) [2] путем его интенсивного снижения в области  $p-n$ -перехода (рис. 6). Такое неоднородное поведение отражено в наименовании диода CAL — Controlled Axial Lifetime (управляемое время жизни носителей).

Технология CAL была внедрена SEMIKRON в 1992 году, и ее модернизация продолжается до сих пор. Пластина с CAL-кристаллами показана на рис. 5. Быстрые диоды CAL обладают отличным соотношением показателей плавности восстановления и эффективности, особенно в последнем поколении CAL4F. Кроме того, эти компоненты характеризуются высокой динамической надежностью, то есть стойкостью к  $di/dt$ . Большинство типов CAL-диодов имеют положительный температурный коэффициент прямого напряжения (ТКН) при

Таблица 2. Испытания надежности выпрямительных диодов и тиристоров

Вид испытаний	Стандарт
Хранение при высокой температуре (HTS)	IEC 60068-2-2 Test B
Хранение при низкой температуре (LTS)	IEC 60068-2-1
Хранение во влажной теплой среде (под напряжением)	IEC 60068-2-67
Обратное смещение при высокой температуре (HTRB)	IEC 60749-23
Термоциклирование активное (PC)	IEC 60749-34
Термоциклирование пассивное (TC)	IEC 60068-2-14 Test Na

Таблица 3. Типы выпускаемых CAL-диодов

Класс напряжения, В	$T_{jmax}$ , °C	$I_{ном}$ , А	Площадь кристалла, мм <sup>2</sup>
600	150 и 175	10–210	4–121
650	175	50–200	24–81
1200	150 и 175	6–160	6–121
1700	150 и 175	55–150	47–81

номинальной нагрузке. Это свойство обеспечивает статическое выравнивание токов как параллельных чипов внутри силового модуля, так и самих силовых модулей.

#### Общие соображения по выбору диодов

Для достижения высокой производительности силового модуля антипараллельный/оппозитный диод FWD должен быть по своим характеристикам согласован с IGBT. Их совместимость можно проверить сопоставлением некоторых базовых параметров, в том числе класса напряжения, температуры перехода и номинального тока. Основные характеристики производимых CAL-кристаллов приведены в таблице 3.

К ключевым параметрам относится максимальное повторяющееся обратное напряжение ( $V_{rrm}$ ), которое может быть приложено к диоду при комнатной температуре. Его выбирают в зависимости от условий эксплуатации, в первую очередь от напряжения питания  $V_{DC}$ . Еще одним важным фактором является температура кристалла  $T_j$ .

Мощность потерь  $P_v$ , рассеиваемая при работе полупроводникового прибора, или выделяемое тепло должно быть рассеяно с помощью системы охлаждения:

$$P_v = V \times I = \Delta T / R_{th}; \Delta T = T_j - T_s.$$

Для конкретной сборки с фиксированной температурой радиатора и тепловым сопротивлением  $R_{th}$  максимальная токовая нагрузка ограничена предельно допустимым нагревом кристалла  $T_{jmax}$ . Чем выше эта величина, тем больше плотность тока и производительность устройства. Важно понимать, что параметр  $T_{jmax}$  описывает максимальную температуру



Рис. 5. Пластина с CAL-диодами

в любой части полупроводникового прибора при любых условиях — таким образом, в реальных режимах работы необходим некоторый запас по надежности. Как и в случае выпрямительных диодов, достаточным запасом считается 25 °C, и величина  $T_{jmax} - 25$  °C иногда рассматривается как максимальная рабочая температура  $T_{jop}$ . По этой причине в технических спецификациях динамические и статические параметры, необходимые для расчета потерь, нормируются при  $T_{jmax} - 25$  °C.

В модуле, содержащем несколько близко расположенных кристаллов, необходимо принимать во внимание наличие тепловой связи между ними. Не рекомендуется использовать совместно чипы IGBT- и CAL-диодов с разными значениями  $T_{jmax}$ , поскольку элемент с меньшей рабочей температурой будет ограничивать предельные возможности модуля.

Величину номинального тока FWD интерпретировать труднее. При заданной конструкции кристалла токовая нагрузка масштабируется по размеру чипа (точнее, по его активной площади при определенной плотности тока в А/мм<sup>2</sup>). Чтобы рассчитать размер чипа, соответствующий заданной номинальной мощности, следует принять во внимание некоторые граничные условия. Как указано выше, для диодов, используемых в сетевых выпрямителях, где динамическими потерями можно пренебречь, только параметры  $R_{th}$  и  $T_s$  требуются

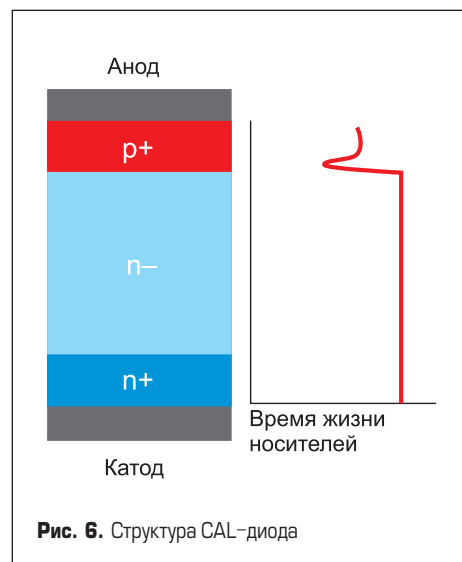


Рис. 6. Структура CAL-диода

Таблица 4. Система обозначений CAL-диодов

SKCD	81	C	120	14F	1
SemiKron CAL Diode	Площадь чипа, мм <sup>2</sup>	Разделитель	Класс напряжения	CAL-семейство	Опции
Возможные варианты			060: 600 В	I: быстрые	R: прямоугольный чип
			065: 650 В	I3: быстрые (CAL3)	По умолчанию: квадратный чип
			120: 1200 В	IHD: высокая плотность (CAL3)	
			170: 1700 В	I4F: быстрые (CAL4F)	

для расчета среднего прямого тока синусоидального или DC-сигнала, то есть  $I_{F(AV)}$  и  $I_{F(DC)}$  соответственно [2]. Однако проблема усложняется в случае быстрых антипараллельных диодов с частотами переключения в килогерцевом диапазоне. Динамические потери при этом зачастую становятся доминирующим фактором при расчете потерь. Оптимизация режимов работы IGBT и FWD требует определения следующих параметров:

- динамические и статические потери диода в конкретных рабочих режимах;
- динамические и статические потери IGBT в конкретных рабочих режимах;
- частота коммутации;
- тепловые характеристики ( $R_{th}$ , температура корпуса  $T_c$  и радиатора  $T_r$ );
- режимы работы конвертера (например, коэффициент мощности  $\cos \phi$ ).

На основе этих данных можно смоделировать и выбрать размер кристалла диода, наилучшим образом подходящего для использования с IGBT с заданной нагрузочной способностью. Такой подход был использован при разработке компонентов последнего поколения CAL4F. Значение номинального тока, приводимого в спецификации такого диода, всегда идентично величине  $I_{C_{nom}}$  соответствующего IGBT.

Номинальные токи диодов предыдущей генерации CAL3/IHD рассчитывались на основе только статических параметров, рассмотренных выше и отражающих значение  $I_{F(DC)}$ . До настоящего времени не существует единых правил или стандартов по определению номинального тока, учитывающих все необходимые параметры. Вследствие этого очень трудно сравнивать номинальные характеристики диодов с плавным восстановлением, выпускаемых различными производителями. Поэтому целесообразно использовать

площадь чипа как еще один показатель фактической нагрузочной способности прибора. Однако различия в конструкции могут привести к неоднозначности в определении размера кристалла, соответствующего заданным токовым параметрам. Единственным решением этой дилеммы является тестирование диодов в составе модуля в конкретных условиях применения, позволяющее сделать реальное сравнение различных технологий.

**Сравнение технологий CAL3 и CAL4F**

Семейство CAL3 включает две подгруппы: I3 и IHD. В целом компоненты IHD (High Density — «высокая плотность») оптимизированы для получения низких статических потерь за счет минимального значения  $V_F$  при компромиссном уровне коммутационных потерь. Номинальные параметры диодов CAL3, как правило, нормируются при  $T_{jmax} = +150^\circ\text{C}$ , а 600-В CAL IHD квалифицированы для  $T_{jmax} = +175^\circ\text{C}$ .

Символ «I» в названии подгруппы I3 диодов 17-го класса напряжения указывает на особый процесс производства, увеличивающий срок службы. В 2008 году SEMIKRON вышел на рынок с семейством CAL4 [5], несколько позже появились улучшенные диоды следующего поколения — CAL4F [6] с мягким восстановлением. Их главной особенностью является повышенная температура кристалла  $T_{jmax} = +175^\circ\text{C}$ , что было достигнуто благодаря новой схеме пассивации. Такое увеличение рабочей температуры соответствует росту плотности тока в активной области примерно на 25%, это позволяет уменьшить размеры чипа или получить более высокую производительность при сохранении размеров. Кроме того, технология CAL4F предусматривает повышенную защиту от влаги, благодаря чему новые компоненты могут работать в более жестких условиях окружающей среды.

**Система обозначений**

Новая система обозначений диодов CAL поясняется таблице 4 на примере SKCD 81 C 120 I4F.

**Данные технических спецификаций**

Последние версии технических спецификаций доступны на сайте [www.semikron.com](http://www.semikron.com) [1]. Они состоят из нескольких разделов, содержание которых описано ниже. Форма листа данных может незначительно отличаться для разных поколений чипов. Важно понимать, что указанные в спецификации величины действительны только при правильной установке чипов — при соблюдении требований к тепловым и электрическим связям, а также при наличии их защиты (например, с помощью заливки мягким гелем).

**Абсолютные максимальные значения**

В этом разделе установлены основные ограничения режимов работы полупроводникового прибора. Класс напряжения определяет максимально допустимое повторяющееся обратное напряжение ( $V_{rrm}$ ) при комнатной температуре. Напряжение пробоя  $V_{BR}$  зависит от температуры и уменьшается при ее понижении.

Также здесь нормируется ток перегрузки  $I_{FSM}$  для полусинусоидального сигнала (10 мс) при комнатной температуре и  $T_{jmax}$ . Отметим, что его величина зависит не только от свойств кристалла, но и от технологии промежуточных соединений (например, метода подключения выводов). Значения, указанные в спецификации, основаны на типовых технологиях сборки, которые являются стандартными для силовой полупроводниковой индустрии.

Интегральная величина  $i^2t$  рассчитывается на основании  $I_{FSM}$ . Максимальная температура кристалла  $T_{jmax}$  даже кратковременно не должна быть превышена при любых условиях эксплуатации в любой точке полупроводникового прибора. Перегрев кристалла приводит к деградации полупроводника и потере надежности.

**Электрические характеристики**

Этот раздел описывает статическое поведение полупроводникового прибора в прямом и обратном направлении. Максимальная и типовая величина обратного тока приводится при определенном напряжении  $V_{rrm}$  и при различных температурах.

Прямая вольт-амперная характеристика задается типовым и максимальным значением падения напряжения  $V_F$  при некотором фиксированном токе, в большинстве случаев CAL-диоды на пластине испытываются в аналогичных условиях. Поскольку такой тест обычно не допускает проверки на номинальном токе, этот вариант обеспечивает более точное нормирование  $V_F$ .

Температурная зависимость прямой характеристики может быть аппроксимирована с помощью коэффициента ТКН, вычисленного по двум точкам:  $T1 = +25^\circ\text{C}$  и  $T2 = T_{jmax} - 25^\circ\text{C}$ . Большинство CAL-диодов характеризуется положительным ТКН при токах, равных и превышающих номинальное значение. Точка пересечения, как правило, близка к  $I_{nom}$ , пример для CAL4F-диода с напряжением 650 В показан на рис. 7. Температурная зависимость

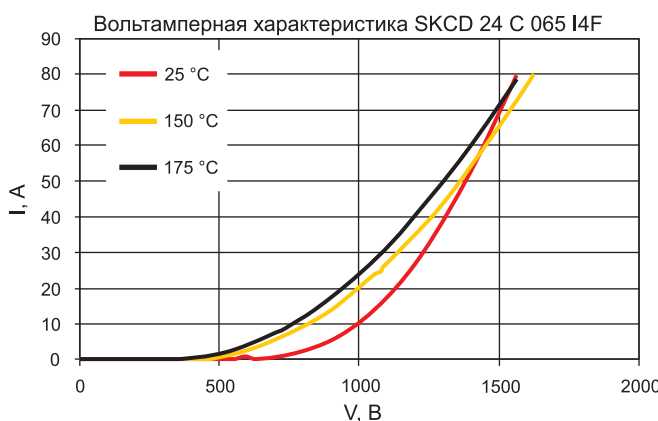


Рис. 7. Температурная зависимость VF-диода CAL4F (50 А/650 В, типовые значения)

в промежуточных состояниях должна определяться в соответствии с рабочими режимами устройства.

При моделировании используется линейная аппроксимация вольт-амперной характеристики, задаваемая формулой:

$$V_{F(\text{approximation})} = V_{(T0)} + r_T I_F$$

Для линейной аппроксимации, как правило, используются две точки на кривой I-V, находящиеся вблизи  $I_{F\text{ном}}$  и  $2/3 I_{F\text{ном}}$ . Максимальные значения параметров  $V_{(T0)}$  и  $r_T$  включают некоторый адекватный запас по надежности. Аппроксимация позволяет вычислить еще одну характеристику —  $I_{F(AV)}$ . Этот расчет предусматривает определенные допущения относительно теплового сопротивления, температуры корпуса, формы сигнала и т. д. Его можно использовать только в первом приближении, поскольку динамические граничные условия здесь полностью игнорируются.

### Динамические характеристики

Во многих случаях доминирующим фактором потерь FWD являются потери выключения, поэтому данный режим работы следует рассмотреть детально. Это делается при тестировании диода в лабораторных условиях с применением метода двойного импульса [7]. Для нормирования параметров в технических спецификациях используются условия коммутации, близкие к реальным типовым режимам применения. С этой целью определяются следующие входные параметры:

- температура;
- ток перед отключением;
- напряжение DC-шины;
- скорость спада тока диода  $di/dt$  (задаваемая резистором затвора IGBT).

Использование IGBT в качестве силового ключа — еще один фактор, влияющий на режимы работы оппозитного диода. Предположим, что перед отключением транзистор проводит ток, близкий к номинальному, и напряжение DC-шины составляет приблизительно  $0,5 V_{r\text{ном}}$ . Скорость спада тока диода  $di/dt$  тоже подбирается близко к реальному значению, при этом соотношение  $I_F/(di/dt)$  является постоянным для компонентов семейства CAL.

Можно определить следующие выходные параметры: энергию потерь при обратном восстановлении  $E_{rr}$ , заряд обратного восстановления  $Q_{rr}$ , пиковый ток  $I_{rrm}$  и время восстановления  $t_{rr}$ . Смысл этих характеристик поясняется на рис. 8. Наиболее важными из них являются  $E_{rr}$  и/или  $Q_{rr}$ , которые описывают вклад потерь диода в общее значение, а также  $I_{rrm}$  — этот показатель отображает его реальные характеристики отключения.

В отличие от них параметр  $t_{rr}$  является экстраполированным: для определения времени спада тока через пиковое значение на кривой  $I_{rrm}$  и точку 25%  $I_{rrm}$  проводится прямая линия. Это предполагает треугольную форму графика обратного восстановления. Однако у большинства диодов с «плавным» характером восстановления он характеризуется начальным пиком и дальнейшим длинным «хвостом»

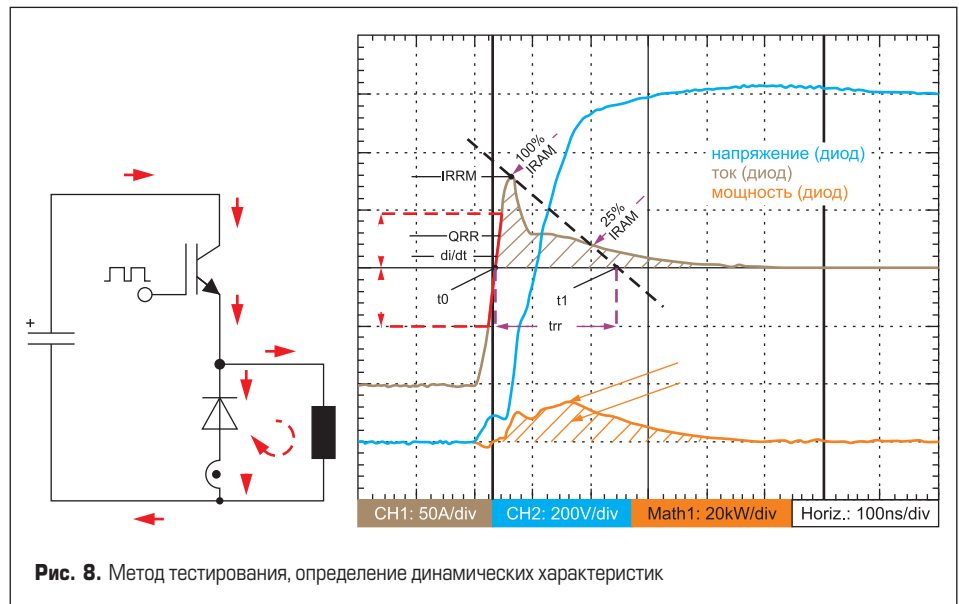


Рис. 8. Метод тестирования, определение динамических характеристик

тока, что позволяет избежать критических перенапряжений при коммутации.

Корректность описанного метода в отношении  $t_{rr}$  вызывает некоторые сомнения. Первое касается способа измерения: точка 25%  $I_{rrm}$  обычно находится на плоской (хвостовой) части кривой обратного тока. Небольшие отклонения от измерения к измерению приводят к большому разбросу экстраполированных значений  $t_{rr}$ . Второе носит более общий характер: величина  $t_{rr}$  не дает никакой информации о том, как процесс уменьшения тока согласуется по времени с фактической кривой «хвостового» тока, поскольку ее форма различается для различных полупроводниковых технологий. Вследствие

этого значение  $t_{rr}$  часто не указывается в современных технических спецификациях. В общем случае динамические свойства в значительной степени зависят от выбранных входных параметров. На рис. 9 показан пример зависимости динамических характеристик от  $di/dt$  при двух различных температурах кристалла.

Таким образом, крайне сложно сопоставлять разные диодные технологии, основываясь только на данных спецификаций, поскольку входные параметры не стандартизированы. Также может ввести в заблуждение сравнение параметров, измеренных в условиях реальной эксплуатации (как это делается в спецификациях SEMIKRON), и результатов малосигнальных измерений.

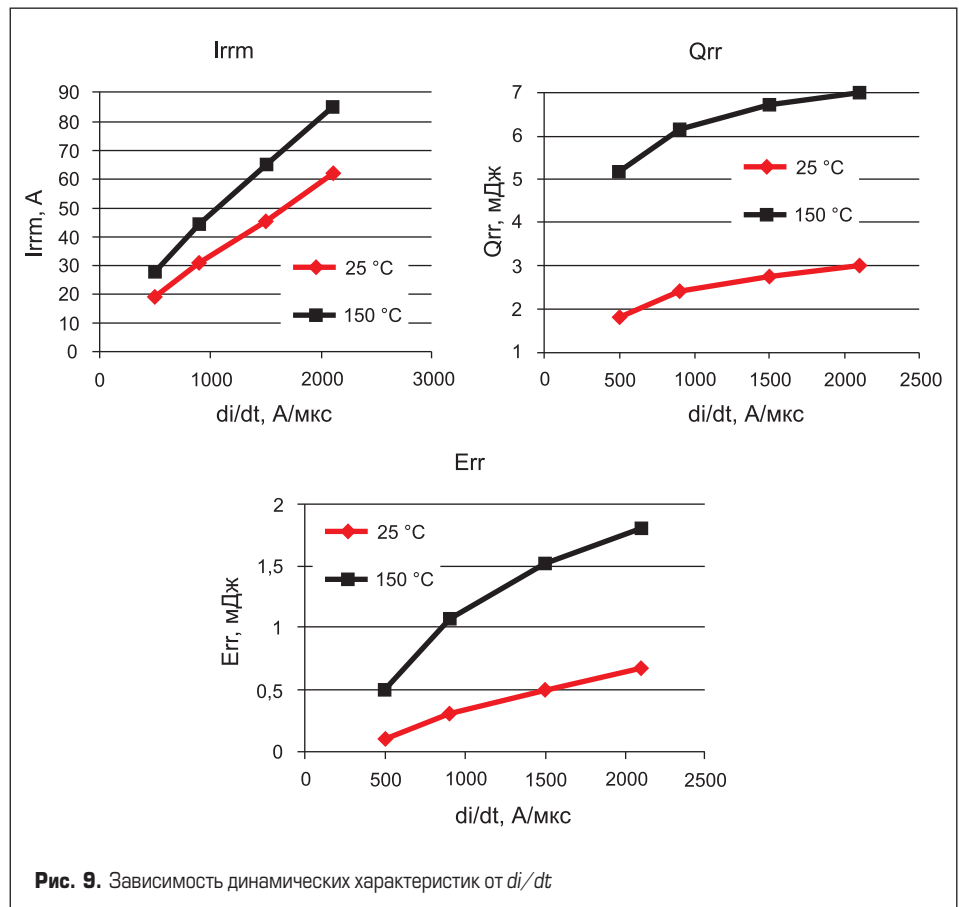


Рис. 9. Зависимость динамических характеристик от  $di/dt$



Рис. 10. Пластина с кристаллами в упаковке

**Тепловые характеристики**

Тепловые характеристики, приводимые в технических спецификациях, относятся к диапазону рабочих температур кристалла  $T_j$  и температур хранения  $T_{sig}$  соответственно. Рекомендации по режимам пайки ( $T_{solder}$ ) даются для двух различных интервалов времени. Превышение допустимых тепловых режимов может вызвать деградацию свойств кристаллов и потерю надежности. В технической документации также приводится величина теплового сопротивления «кристалл — корпус»  $R_{th(j-c)}$ , которая не характеризует свойства отдельного чипа и справедлива только для конкретной сборки.

**Механические характеристики**

В этом разделе приводятся размеры и площадь чипа. Размеры относятся к растру кристалла на пластине — на самом деле они определяют верхний предел для фактического контура кристаллов, поскольку некоторые части утилизируются в процессе нарезки.

Кроме того, здесь дается описание типа металлизации чипа. Как правило, анод (верхний контакт) покрыт алюминием (Al), что позволяет подключать проводники из этого матери-

ала методом сварки. Металлизация катода (обратная сторона кристалла) — многослойная контактная структура, основными компонентами которой являются никель и контактный слой серебра (Ag). Данный материал подходит для широкого спектра технологий сборки.

Диоды CAL поставляются в нарезанном виде на раме. Информация в графе Chips/Package определяет количество чипов на одной пластине. Это также соответствует максимальному количеству бездефектных кристаллов, число которых может варьироваться из-за колебания выхода годных.

**Испытания на надежность**

Во время квалификационных испытаний CAL-диоды проходят тесты на надежность; программа и соответствующие стандарты приведены в таблице 5. Условия испытаний зависят от класса напряжения и максимальной температуры кристалла.

Все проверки надежности чипов должны выполняться в собранном состоянии (например, в составе стандартного модуля). Взаимодействие между кристаллами и их сборкой может повлиять на результаты, поэтому

Таблица 5. Испытания надежности CAL-диодов

Вид испытаний	Стандарт
Хранение при высокой температуре (HTS)	IEC 60068-2-2
Хранение при низкой температуре (LTS)	IEC 60068-2-1
Хранение во влажной теплой среде (под напряжением)	IEC 60068-2-67 или IEC 60749-5
Обратное смещение при высокой температуре (HTRB)	IEC 60749-23
Термоциклирование активное (PC)	IEC 60749-34



Рис. 12. Этикетка на упаковке пластины

Type	SKCD 18 C 120 I HD	
ID-number	34547021	
Lot-number	1110222219	
Quantity	843	
Delivery date	31.07.2012	RoHS Compliant
		process until: 27.01.2013
		34547021
SKCD 18 C 120 I HD		



Рис. 11. Пластина с кристаллами в упаковке

показатели надежности проверяются пользователями в конкретных приложениях.

**Отгрузка и маркировка**

В стандартном формате CAL-диоды поставляются в нарезанном виде на 150-мм пластине, с помощью скотча наклеенной на монтажную рамку (в документации этот способ называется sawn-on-frame). Каждая пластина упакована в вакуумированный пакет с защитными вставками (рис. 10), 25 штук из одной партии помещаются в транспортную упаковку. Из-за отклонений выхода годных точное количество бездефектных чипов на пластине может различаться, поэтому заказы следует размещать с учетом соответствующего допуска (обычно  $\pm 10\%$ ).

**Маркировка**

Существует три типа этикеток, позволяющих заказчику идентифицировать продукцию SEMIKRON на различных этапах процесса сборки. Первая находится на внешней картонной упаковке, вторая — на упаковочном пакете с пластиной, третья — на красной несущей рамке (она читается, когда все окружающие упаковочные материалы удалены). Нанесенные на них штрихкоды выполняются по стандарту CODE 128, на первой этикетке находится четыре QR-кода (рис. 11):

1. P — № специального материала (используется не всегда).
2. H — № партии SEMIKRON (10 цифр).
3. Q — пластина / кол-во бездефектных чипов / код страны (D) / № партии.
4. X — № по каталогу SEMIKRON.

Штрихкоды на этикетках 2 и 3 имеют одинаковую структуру. Однако внешняя этикетка несет больше информации в текстовом виде:

- тип кристаллов;
- № по каталогу SEMIKRON;
- № партии;
- количество чипов;
- дата поставки;
- поле подписи «QC pass» (соответствие качества);
- поле штрихкода;
- дата изготовления пластины.

Информация на этикетке, расположенной на рамке:

- № по каталогу SEMIKRON;
- тип кристалла;
- поле штрихкода.

Вид двух различных этикеток показан на рис. 12, штрихкод на них имеет одинаковую структуру:

- цифры 1–8: № по каталогу SEMIKRON;
- цифры 9–13: количество бездефектных чипов на пластине;
- цифры 14–17: «использовать до» — календарная неделя и год (формат wwww);
- цифры 18–27: customizable (0 по умолчанию);
- цифры 28–37: № партии;
- цифры 38–40: split number;
- цифры 41–42: № пластины.

Информация на штрихкоде повторяется под ним в текстовом виде.

#### Условия хранения и применения

Для кристаллов SEMIKRON в невскрытой упаковке установлен срок годности шесть месяцев после передачи с производства на склад компании. Рекомендации по транспортированию и хранению приведены в стандарте IEC 62258-3 [8], заказчик должен соблюдать следующие условия хранения:

- температура: +20...+26 °C;
- относительная влажность (RH): <60%.

После вскрытия упаковки чипы должны быть немедленно использованы. Диоды семейства CAL проверены на совместимость с основными промышленными технологиями, они могут монтироваться с применением, например, пайки оплавлением, также допускается вторичная пайка. Тепловые режимы монтажа приведены в спецификации (например,  $T_{solder} = 10$  мин при температуре +250 °C

или 5 мин при +320 °C). Соответствующий профиль пайки зависит от используемой технологии и материалов (например, паяльной пасты). Алюминиевая металлизация анода достаточно прочная, что позволяет подключать толстые проводники методом сварки, типовой диаметр Al-провода около 300 мкм.

#### Заключение

У выпрямительных диодов SEMIKRON SKR PEP нового поколения удачно сочетается проверенная технология формовки mesa и инновационная схема пассивации, позволяющая повысить надежность и одновременно увеличить плотность тока. По электрическим и тепловым характеристикам диоды SKR PEP совместимы с интегральными модулями PIM, содержащими кристаллы IGBT последних поколений. Кроме того, SEMIKRON расширяет класс напряжения выпрямительных кристаллов до 2200 В, что отражает требования рынков развивающихся стран с низким качеством сетей.

Технология Controlled Axial Lifetime (CAL) позволяет добиться оптимального сочетания плавности и скорости восстановления быстрых диодов — это необходимо для минимизации динамических потерь и шумов при совместной работе с IGBT последних поколений. Диоды CAL характеризуются высокой динамической надежностью, кроме того, положительный ТКН обеспечивает статический баланс токов при параллельном включении. Кристаллы CAL могут устанавливаться в сило-

вые модули с помощью стандартных промышленных технологий сборки, в частности пайки и ультразвуковой сварки.

#### Литература

1. Материалы сайта [www.SEMIKRON.com](http://www.SEMIKRON.com)
2. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Manual Power Semiconductors. 2nd edition. ISLE Verlag, 2015.
3. SEMIKRON Technical Explanation Rectifier Diodes and Thyristors. [www.semikron.com](http://www.semikron.com)
4. Spang M. Current sharing between parallel IGBTs in power modules during short circuit with unsymmetrically connected load. Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe). 18th European Conference, 2016.
5. Demuth V. More Power at the Same Size // Power Electronics Europe. 2008. Iss. 5.
6. Kozlowski F., Knig B., Hansmann M., Nichtl-Pecher W. Enhanced 4th generation CAL diode for highly efficient applications. Proceedings of the 10th PCIM Asia Conference, Shanghai, 2011.
7. SEMIKRON Application Note AN-7006, IGBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification, 2008.
8. IEC/TR 62258-3: Semiconductor die products. Part 3: Recommendations for good practice in handling, packing and storage. 2nd edition. Geneva, 2010.
9. Колпаков А. Никакой пайки! О надежности сигнальных соединений силовых модулей // Силовая электроника. 2015. № 3.