

# Новая технология изготовления диодов большой мощности EmCon-HDR с более высокими динамическими характеристиками

**Компании eures GmbH и Infineon Technologies AG разработали новую усовершенствованную технологию изготовления диодов, которая улучшает их характеристики при переключении внутри всей области безопасной работы, с названием EmCon-HDR (Emitter Controlled — управляемый по эмиттеру; High Dynamic Robustness — высокая динамическая устойчивость). Новый диод может в 100% случаев заменить диод стандартного типа. Благодаря более широкой области безопасной работы управление переключением диода может осуществляться при очень высоких значениях  $di/dt$  и  $dv/dt$ , что, в свою очередь, может значительно уменьшить потери при включении IGBT-транзистора.**

**Статью подготовил  
Андрей Копылов**

andrei.kopylov@intech-ec.ru

## Авторы:

Й. Бирманн<sup>1)</sup>,  
К.-Х. Хоппе<sup>1)</sup>,  
О. Шиллинг<sup>1)</sup>,  
Й. Г. Бауэр<sup>2)</sup>,  
А. Маудер<sup>2)</sup>,  
Е. Фальк<sup>2)</sup>,  
Х.-Й. Шульце<sup>2)</sup>,  
Х. Рютинг<sup>2)</sup>,  
Г. Ашатц<sup>3)</sup>

## Введение

Стремительная эволюция IGBT-технологий в переходе от планарной структуры к технологиям «утопленного» канала (trench gate technology) и «Field Stop», требует непрерывного улучшения рабочих характеристик антипараллельного диода FWD (Free-Wheeling Diode — безынерционный диод). Включение IGBT-транзистора, а следовательно, и энергия потерь при его включении зависят от процесса обратного восстановления антипараллельного диода. Предыдущий вариант обратного диода — EmCon-диод был получен путем оптимизации внутренних вертикальных структур полупроводникового прибора, предложенной компаниями Infineon и eures. В данной статье рассказывается о последующих шагах усовершенствования антипараллельных диодов за счет оптимизации их латеральных структур.

## Структура диода

В основе структуры диода лежит EmCon-концепция [1], оптимизирующая распределение носителей заряда и форму электрического поля во внутренней структуре. В то время как другие технологии требуют больших усилий на создание однородности эпитаксиального кремниевого слоя и еще более значительных затрат на снижение времени жизни носителей, такие, как имплантация протонов или гелия, испускание электронов или диффузия тяжелых металлов, EmCon-концепция использует в качестве исходного материала кремний, выращенный методом плавающей зоны (float-zone), имплантацию ионов и требует лишь незначительных действий по сокращению времени жизни основных носителей зарядов.

В частности, диод состоит из низколегированного основного материала, выращенного методом плавающей зоны, с неглубокими р-эмиттерами на перед-

ней стороне. Обратная сторона — n<sup>+</sup>-эмиттер — выполняет две функции. Она используется для определения нарушения электрического поля на обратной стороне и фиксации эффективности n-эмиттера на желаемом уровне. Так, распределение носителей зарядов находится главным образом под влиянием имплантированных р- и n-эмиттеров, и нет необходимости сокращать время жизни дополнительных местных носителей; это иногда используется, чтобы снизить эффективность р-эмиттера для получения низкого пика обратного тока.

## Симуляция восстановления диода и улучшение контакта кристалла

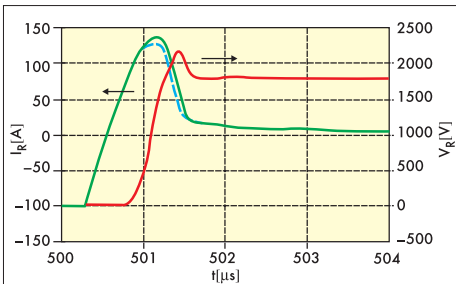
Диоды высокого напряжения требуют хорошо сконструированных краевых контактов. Это может быть достигнуто различными способами, например, с помощью технологии JTE (Junction Termination Extension — продление границ кристалла) [2–4], технологии VLD (Variation of Lateral Doping — вариация легирования в латеральном направлении) [5], технологии пространственного сверхперехода RESURF [6] или технологии плавающих предохранительных колец [7], соединенных с полевыми пластинами [8], — последняя и используется в EmCon-диодах. Данная система выводов должна быть сконструирована для достаточного блокирующего напряжения. Числовая симуляция восстановления диода достигнута при использовании двумерного устройства симуляции MEDICI [9]. В отличие от одномерных симуляций, где рассматривается только активная часть диода, мы рассчитываем полную вертикальную структуру 3,3 кВ EmCon-диода, включая систему выводов.

Рис. 1 показывает ток  $I_R$  и напряжение  $V_R$  во время включения IGBT-транзистора для EmCon-диода с новейшей системой выводов (сплошная линия) как антипараллельного диода с номинальным током в 100 А. Температура — 125 °С, а напряжение постоянного тока  $V_{CC}$  — 1800 В. Начиная при пря-

1) Eures GmbH, Max-Planck-Straße,  
D-59581 Warstein, Германия;

2) Infineon Technologies AG, Balanstraße 59,  
D-81541 Munich, Германия;

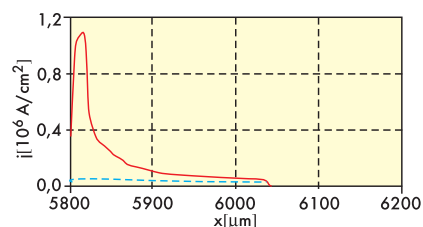
3) Infineon Technologies AG, Siemensstraße 2,  
A-9500 Villach, Австрия



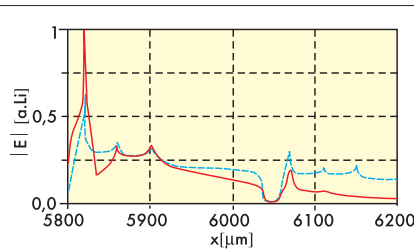
**Рис. 1.** Симулированные кривые восстановления новейшего EmCon-диода 3,3 кВ (сплошная линия) и EmCon-HDR-диода 3,3 кВ (пунктирная линия)

мом тока  $I_F$  100 А, ток диода уменьшается со скоростью коммутации  $di/dt = 460$  А/мкс и  $dv/dt = 6$  кВ/мкс, и максимальный обратный ток  $I_{RM}$  равен 130 А. Данный диод характеризуется «мягким» восстановлением, следующим за «хвостовым» временем около 3 мкс. Пунктирные линии показывают кривые обратного восстановления диода для нового EmCon-HDR с оптимизированной краевой структурой. Значение  $I_{RM}$  почти идентично.

Рис. 2 изображает плотности тока под поверхностью примерно через 0,1 мкс после достижения максимального  $I_{RM}$ , которые возникают на краю во время обратного восстановления. Данная плотность тока может быть редуцирована посредством новой системы выводов. Рис. 2 показывает симулированную плотность дырочного тока для новейшего современного диода (сплошная линия) и для нового EmCon-HDR диода (пунк-



**Рис. 2.** Симулированные плотности дырочного тока на поверхности полупроводника (сплошная линия: новейший EmCon-диод; пунктирная линия: EmCon-HDR-диод с оптимизацией контактов)



**Рис. 3.** Симулированная величина электрического поля на поверхности полупроводника (сплошная линия: новейший EmCon-диод; пунктирная линия: с оптимизацией контактов)

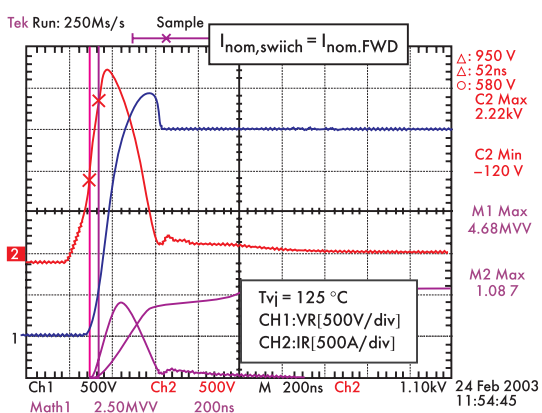
тирная линия). Дырочный ток, протекающий к аноду при выключении диода, приводит к значительному увеличению максимального электрического поля, и, следовательно, к динамической лавине.

В нашем EmCon-HDR-диоде результатом сниженной плотности дырочного тока является, в то же самое время, значительное уменьшение величины электрического поля на поверхности полупроводника. На рис. 3 сплошная линия — распределение электрического поля в пределах краевой системы. Пунктирная линия показывает величину электрического поля, вызванного оптимизацией пространства кольца поля, пластины поля и профилями легирования EmCon-HDR-диода. Максимальная величина электрического поля снижена на 35%. Как снижение плотности тока, так и снижение электрического поля ведут к значительному улучшению устойчивости диода.

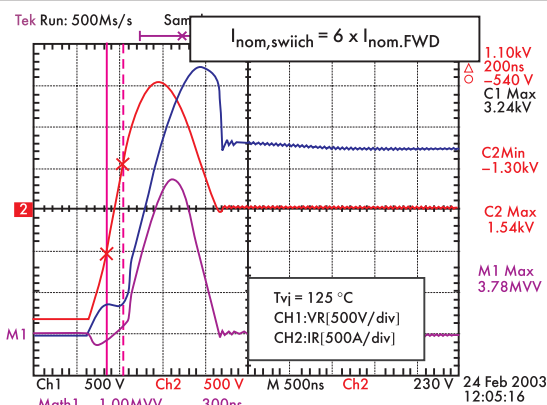
### Устойчивость Emcon-HDR-диода

Испытания двойным импульсом проводились для того, чтобы исследовать предел устойчивости нового EmCon-HDR-устройства. Нагрузка на диод, лежащая далеко за пределами установленной области безопасной работы, вызывалась изменением одного из параметров, обозначенных стрелкой в таблице.

Кривые, выведенные при критических условиях, показаны на рис. 4 и 5. Коммутационный диод нагрет до 125 °С, а коммутацией управляет IGBT 1200 А/3,3 кВ. Здесь нет



**Рис. 4.** Восстановление диода при критической  $dv/dt$  и  $T_{vj} = 125$  °С. Чтобы достичь 20 кВ/мкс, коммутируется небольшой ток, а внешнее  $R_{Gon} = 0$  Ом.  $I_{nom} = 1200$  А



**Рис. 5.** Восстановление диода при критической  $di/dt$ . Антипараллельный диод с расчетным током 200 А выключен при использовании переключателя, имеющего расчетный ток 1200 А. Достигнуто значение 5,5 кА/мкс ( $=27 \cdot I_{nom}/\text{мкс}$ )

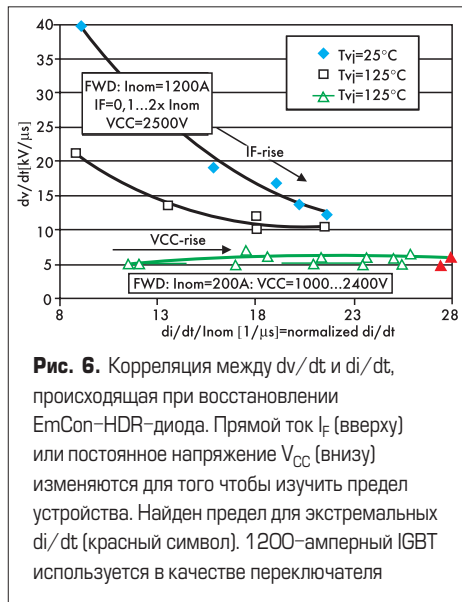
Таблица

параметр		эффект
$T_{vj}$	↗ температура перехода	увеличивается накопленный заряд $Q_{IT}$
$R_{Gon}$	↘ сопротивление вкл. на затворе	увеличивается $di/dt$ и $dv/dt$
$V_{CC}$	↗ пост. напряжение промеж. звена	увеличивается $dv/dt$ ; $V_{Rmax}$
$I_F$	↗ прямой ток	увеличивается $Q_{IT}$ ; уменьшается $dv/dt$
$L_{setup}$	↗ индуктивность рассеяния	$V_{Rmax}$

ни внешнего сопротивления затвора  $R_{Gon}$ , ни емкости  $C_{GE}$  на выводах IGBT затвор — эмиттер; время коммутации процесса восстановления ограничено только посредством  $V_{CC}$ ,  $I_F$ ,  $L_{setup}$  и коммутационными характеристиками IGBT. На рис. 4 показано восстановление диода 1200 А при  $V_{CC} = 2500$  В в схеме включения с  $L = 65$  нГ. Прямой ток выбран довольно небольшим, чтобы достичь высокого значения  $dv/dt$  — 20 кВ/мкс. Даже в этом режиме  $dv/dt$  возможно восстановление без разрушения.

Антипараллельные диоды с небольшим номинальным током  $I_{nom} = 200$  А подчиняются коммутации, управляемой тем же самым IGBT-транзистором на 1200 А. При использовании силового ключа, имеющего более высокий расчетный ток, чем антипараллельный диод, можно выявить режим критических  $di/dt$  (по отношению к проверяемому диоду). В данной конфигурации антипараллельный диод подвергается нагрузке при условиях, далеких от тех, которые ожидаются при нормальном режиме работы, когда расчетный ток IGBT-ключа и антипараллельного диода обычно одинаковы. Результат испытания  $di/dt$  показан на рис. 5 для постоянно-го напряжения 2300 В. Обратное восстановление  $di/dt$  достигает 5,5 кА/мкс (то есть  $27 \cdot I_{nom}/\text{мкс}$  по отношению к диоду) и диод все еще выдерживает процесс восстановления. В условиях нормального режима работы  $di/dt$  обычно достигает только значений до десяти раз больших, чем  $I_{nom}/\text{мкс}$ . Введение EmCon-HDR-технологии гарантирует высокий предел безопасности.

Обзор нескольких экспериментов, осуществленных при различных условиях для изучения предела коммутационной устойчивости, представлен на рис. 6 графиком корреля-



ции между  $dv/dt$  и  $di/dt$ .  $di/dt$  упорядочивается относительно номинального тока диода, для того чтобы представить на одном графике данные из различных экспериментов.

В верхней части рис. 6 расчетный ток IGBT и антипараллельного диода одинаковы ( $I_{nom} = 1200$  А). Эффект увеличения прямого тока  $I_F$  рассматривается для двух температур (25 °C; 125 °C). С увеличением  $I_F$  наблюдается сильное возрастание  $di/dt$ , в то время как  $dv/dt$  уменьшается. Уменьшение  $dv/dt$  происходит потому, что переключаящий IGBT коммутует напряжение медленнее, когда он должен передавать высокий ток после включения. Самые высокие значения  $dv/dt$  (40 кВ/мкс) наблюдаются для низкого тока  $I_F$  и низкой температуры  $T_{vj}$ . Это особенная черта нового EmCon-HDR-диода: надежно восстанавливаться в условиях единичного пика даже в таком тяжелом режиме. Устойчивость инверторной системы по параметру  $dv/dt$  не будет ограничена диодом, если применяется технология EmCon-HDR. Имеются и другие элементы, подобные обмотке двигателя, которые вызывают увеличение значения  $dv/dt$  до предела.

В нижней части рис. 6 та же самая оценка сделана для конфигурации, в которой расчетный ток антипараллельного диода намного меньше по сравнению с IGBT-ключом (200 А по сравнению с 1200 А). Данная испы-

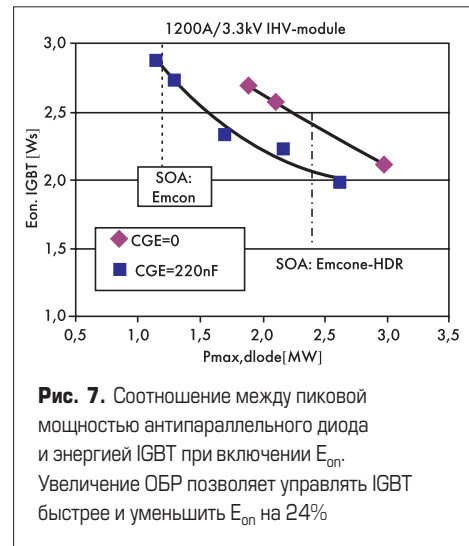
тательная конфигурация подходит для достижения критических значений  $di/dt$ , доходящих до  $30 \cdot I_{nom}/\text{мкс}$ . При увеличении постоянного напряжения  $V_{CC}$  скорость переключения непрерывно увеличивается до тех пор, пока не произойдет разрушения при  $di/dt = 27 \cdot I_{nom}/\text{мкс}$  (5,4 кА/мкс для антипараллельного диода на 200 А). Для изучения механизма разрушения представляется анализ разрушенного диода. В диоде была обнаружена расплавленная зона в центре анодного контакта кристалла диода. Тот факт, что не наблюдается повреждений контактов кристалла или пассивации на чипе, вновь доказывает, что измерения, проведенные для снятия динамической нагрузки с контактных слоев кристалла, были верными.

#### ОБР для диода Emcon-HDR

Более высокая динамическая устойчивость EmCon-HDR-диода позволяет в два раза расширить область безопасной работы (ОБР; SOA — Safe Operating Area) для непрерывного режима по сравнению с имеющимся стандартным диодом 3,3 кВ, выпускаемым компанией eures. Особые динамические характеристики могут быть применимы главным образом в двух направлениях: во-первых, имеется явное увеличение предела безопасности, что особенно важно, когда устройства эксплуатируются в неправильных условиях и должны выдерживать более высокую нагрузку, чем при обычном режиме включения. Кроме того, возможна спецификация более крутых значений  $di/dt$  и  $dv/dt$  при включении для IGBT в преобразователе даже для нормального режима работы. Как следствие, возможно уменьшение коммутационных потерь  $E_{on}$ . Для нахождения оптимизированных характеристик управления модуля IHV (высоковольтный транзисторный модуль с напряжением выше 2,5 кВ) 1200 А, 3,3 кВ сделана оценка критических динамических значений.

Рис. 7 показывает соотношение между нагрузкой, оказываемой на диод во время переключения (характеризуется  $P_{max}$ : пиковой мощностью в процессе восстановления) и коммутационными потерями IGBT  $E_{on}$ .

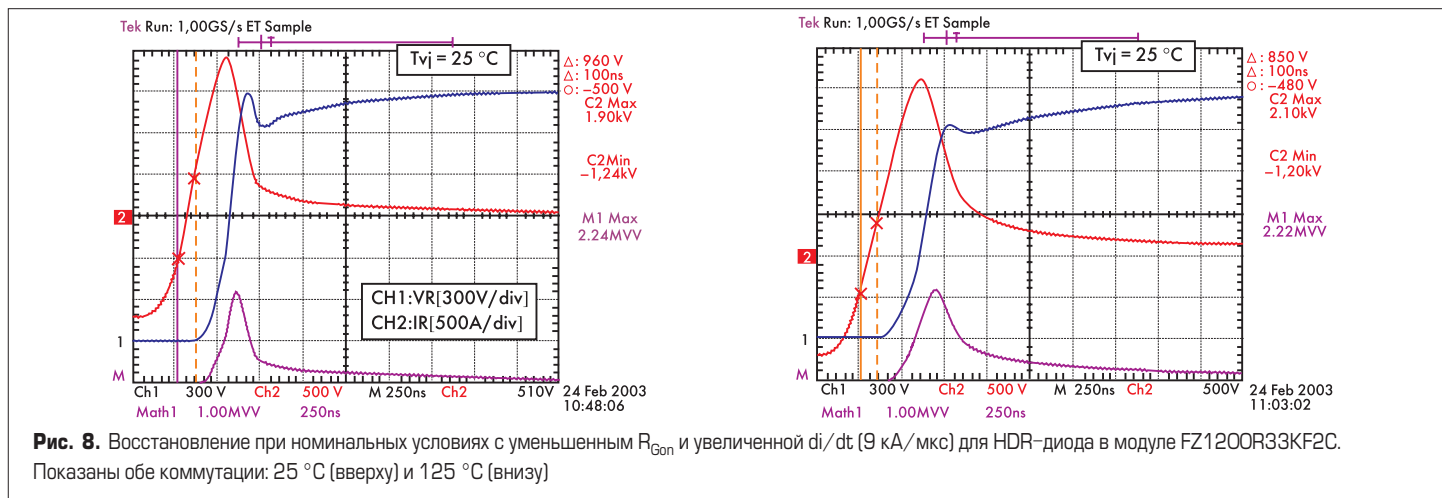
Данные на рис. 7 относятся к модулю IHV 1200 А, 3,3 кВ; они получены при изменении сопротивления на затворе  $R_{Gon}$  и емкости  $C_{GE}$



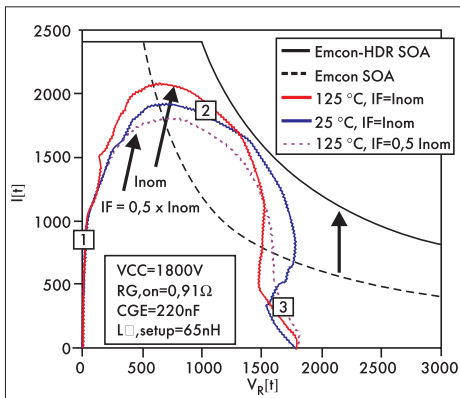
на затворе-эмиттере. Для EmCon-диода 3,3 кВ дозволена ОБР ограничивается мощностью  $P_{max} = 1,2$  МВт и установленной энергией при включении  $E_{on} = 2,9$  Вт·с согласно рис. 7. Увеличение ОБР до 2,4 МВт (в два раза) позволяет уменьшить  $R_{Gon}$ . При ограничении  $P_{max}$  до значений, не превышающих 2,4 МВт,  $E_{on}$  может быть значительно уменьшена (на 24%) — от 2,9 Вт·с до 2,2 Вт·с. Установленное сопротивление затвора уменьшается до  $R_{Gon} = 0,9$  Ом; емкость  $C_{GE} = 220$  нФ.

Такая же серия измерений была осуществлена с  $C_{GE} = 0$  (нижняя кривая на рис. 7). Очевидно, что корреляция сдвигается к более высокому уровню  $E_{on}$  при отсутствии  $C_{GE}$ . При использовании конденсатора между затвором и эмиттером можно влиять на  $di/dt$  и  $dv/dt$  независимо друг от друга.  $dv/dt$  имеет преобладающее влияние на энергию IGBT при включении. Применение  $C_{GE}$  позволяет увеличить  $dv/dt$ , при этом  $di/dt$  может поддерживаться в умеренном диапазоне. При таких условиях  $E_{on}$  уменьшается, не оказывая очень сильной нагрузки на антипараллельный диод.

Коммутационные кривые для режима работы с  $R_{Gon} = 0,9$  Ом и  $C_{GE} = 220$  нФ показаны на рис. 8 для температур 25 и 125 °C. Даже при очень крутом возрастании  $di/dt$  до 9 кА/мкс восстановление диода протекает «мягко». Эти диоды без проблем выдерживают максимальную скорость нарастания напряжения  $dv/dt$  во время переключения, равную примерно 7,6 (13,0) кВ/мкс при 125 °C (25 °C).







**Рис. 9.** Геометрическое место точек  $I_R = f(V_R)$  для восстановления диода модуля 1200 А, 3,3 кВ при  $I_F$  от  $0,5 \cdot I_{nom}$  до  $1 \cdot I_{nom}$  и уменьшенном  $R_{Gon}$ . Для  $V_{CC} = 1800$  В,  $L_{\chi, setup} = 65$  нГ EmCon-HDR-диод не выходит за пределы ОБР. Показано расширение ОБР для EmCon-HDR-диода в сравнении со стандартным EmCon-диодом

Установленная ОБР не должна быть превышена в любой момент процесса восстановления при номинальных условиях. Простым методом демонстрации реальной нагрузки, оказываемой на диод при коммутации, является изображение геометрического места точек  $I_R = f(V_R)$  на диаграмме ОБР (SOA), которое представлено на рис. 9 для процесса восстановления, показанного на рис. 8 для модуля IHV 1200 А, 3,3 кВ. Мы делаем вывод, что при различных условиях эта кривая геометрического места точек всегда остается внутри расширенной ОБР для HDR-EmCon-диода.

Более детальный взгляд на форму кривой на рис. 9 дает представление о том, как влияет нагрузка на диод во время восстановления. Процесс начинается в начале диаграммы, когда и ток, и напряжение равны 0. В течение обычных 300 нс (фаза «1»)  $I_R$  достигает своего максимального значения, которое сильно зависит от предшествующего прямого тока  $I_F$  (и от  $T_{vj}$ ). Когда  $I_R$  равен  $I_{RM}$ , напряжение  $V_R$  по-прежнему остается в умеренных рамках 600 В, вызывая тем самым только умеренное внутреннее электрическое поле. После того как обратный ток достиг своего максимального значения, возрастание напряжения становится более отчетливым (фаза «2»), а ток при этом уменьшается. Числовая симуляция процесса восстановления показывает, что в этой облас-

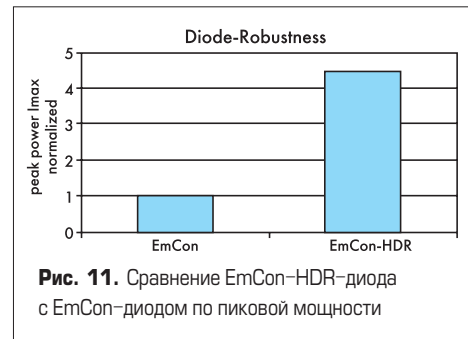
ти на диод оказывается самая большая нагрузка, потому что внутри полупроводникового прибора все еще имеется заряд и должна быть выдержана высокая скорость  $dv/dt$ , приводящая к росту высокой динамической напряженности поля. Наконец, в фазе «3» обратный ток снижается до 0, оставляя диод в статическом обратном непроводящем состоянии.

#### Сравнение новейших современных диодов

При сравнении EmCon-HDR-диодов со стандартными диодами 3,3 кВ EmCon, используемыми в настоящее время в IHV-модулях, основное внимание было уделено коммутационным характеристикам. На рис. 10 показано восстановление обоих типов диодов, измеренных при обычных условиях, рекомендованных в техническом паспорте модуля IHV 1200 А, 3,3 кВ для EmCon-диодов. Здесь явно нет значительной разницы, не важно, при каких температурах  $T_{vj}$  ( $-40$  или  $125$  °С) происходит коммутация. Диод EmCon-HDR характеризуется «мягким» восстановлением во всем диапазоне температур, используемых в электроприводных преобразователях. [10]

#### Заключение

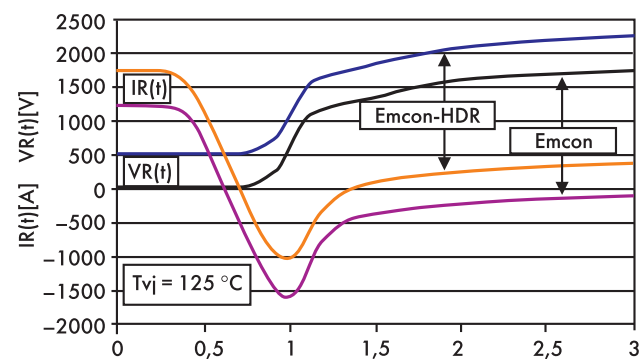
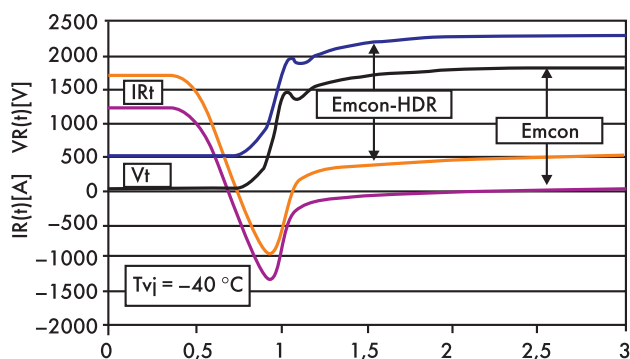
Новая технология HDR изготовления EmCon-диодов внедряется для получения значительного расширения области безопасной работы диодов. Испытания EmCon-HDR-диодов в критических режимах работы показали увеличение в 4,5 раза способности выдерживать пик мощности во время коммутации по сравнению с предыдущим поколением диодов — EmCon. Улучшение устойчивости EmCon-HDR-диодов показано на рис. 10. Улучшение может быть ясно представлено моделированием электрического поля на контактах кристалла. Результатом математического моделирования является оптимизация конструкции, которая улучшает динамические характеристики EmCon-HDR-диода. Основные преимущества новой технологии — это значительное увеличение границ безопасной рабочей области и уменьшение потерь при включении IGBT-транзистора на 24% за счет более быстрого по времени переключения диода.



**Рис. 11.** Сравнение EmCon-HDR-диода с EmCon-диодом по пиковой мощности

#### Литература

1. A. Porst, F. Auerbach, H. Brunner, G. Deboy, F. Hille. Improvement of the diode characteristics using emitter-controlled principles (EMCON-diode) // Proc. ISPSD. 1997.
2. V. A. K. Temple. Increased Avalanche Breakdown Voltage and Controlled Surface Electric Fields using a Junction Termination Extension (JTE) Technique // IEEE Trans. Electr. Dev. 1983. 30.
3. C. Mingues, G. Charitat. Efficiency of junction termination techniques vs oxide trapped charges // Proc. ISPSD. 1997.
4. J. R. Trost, R. S. Ridley, M. K. Kahn, T. Grebs, H. Evans, S. Arthur. The effect of charge in junction termination extension passivation dielectrics // Proc. ISPSD. 1999.
5. R. Stengl, U. Gosele, C. Fellingner, M. Beyer, S. Walesch. Variaton of Lateral Doping as a Field Terminator for High Voltage Power Devices // IEEE Trans. Electr. Dev. 1986. 33.
6. F. Udrea, T. Trajkovic, J. Thomson, L. Coulbeck, P. R. Waind, G. A. J. Amaratunga, P. Taylor. Ultra-high voltage device termination using the 3D RESURF (super-junction) concept — experimental demonstration at 6.5 kV // Proc. ISPSD. 2001.
7. K. P. Brieger, W. Gerlach, J. Pelka. Blocking Capability of Planar Devices with Field Limiting Rings // Sol.-State Electron. 1983. 26.
8. S. Grove, O. Leistiko, W. W. Hooper. Effect of Surface Fields on the Breakdown Voltage of Planar Silicon p-n Junctions // IEEE Trans. Electron. Dev. 1967. 14.
9. MEDICI manual Version 2001.4.0.
10. Й. Бирманн, К.-Х. Хоппе, О. Шиллинг, Й. Г. Байэр, А. Маудер, Е. Фальк, Х.-Й. Шульце, Х. Рютинг, Г. Ашатц. PCIM 2003 Nuremberg Emcon HDR diode.



**Рис. 10.** Поведение при восстановлении 3,3-киловольтных диодов EmCon-HDR и EmCon при  $T_{vj} -40$  °С и  $125$  °С в IHV-модуле 1200 А, 3,3 кВ при  $V_{CC} = 1800$  В,  $I_F = 1200$  А;  $di/dt = 7200$  (5700) А/мкс при  $T_{vj} = -40$  ( $125$ ) °С. Кривые для HDR-EmCon-диода сдвинуты вверх на одно деление. Оба типа диодов взаимозаменяемы на 100%