

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. Бирманн¹⁾,
К.-Х. Хоппе¹⁾,
О. Шиллинг¹⁾,
Й. Г. Бауэр²⁾,
А. Маудер²⁾,
Е. Фальк²⁾,
Х.-Й. Шульце²⁾,
Х. Рютинг²⁾,
Г. Ашатц³⁾

Введение

Стремительная эволюция IGBT-технологий в переходе от планарной структуры к технологиям «утопленного» канала (trench gate technology) и «Field Stop», требует постоянного 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⁺-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 °C, 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

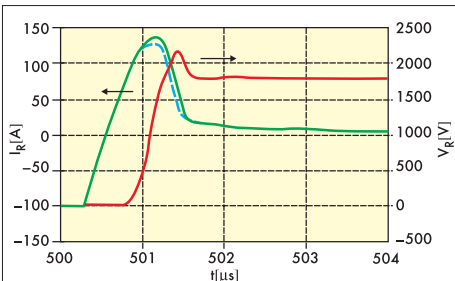


Рис. 1. Симулированные кривые восстановления новейшего EmCon-диода 3,3 кВ (сплошная линия) и EmCon-HDR-диода 3,3 кВ (пунктирная линия)

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-

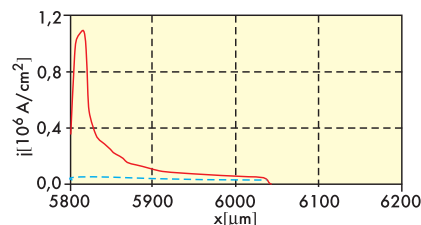


Рис. 2. Симулированные плотности дырочного тока на поверхности полупроводника (сплошная линия: новейший EmCon-диод; пунктирная линия: Emcon-HDR-диод с оптимизацией контактов)

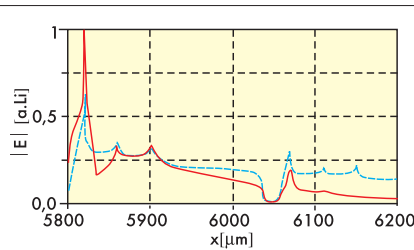


Рис. 3. Симулированная величина электрического поля на поверхности полупроводника (сплошная линия: новейший EmCon-диод; пунктирная линия: с оптимизацией контактов)

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 на поверхности для новейшего EmCon-диода 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

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 di/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-

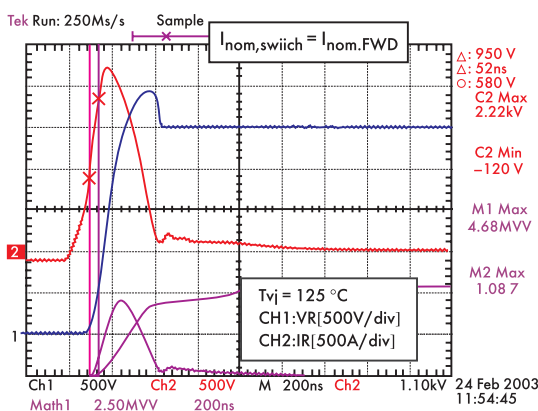


Рис. 4. Восстановление диода при критической dv/dt и $T_{vj} = 125$ °С. Чтобы достичь 20 кВ/мкс, коммутируется небольшой ток, а внешнее $R_{Gon} = 0$ Ом. $I_{nom} = 1200$ А

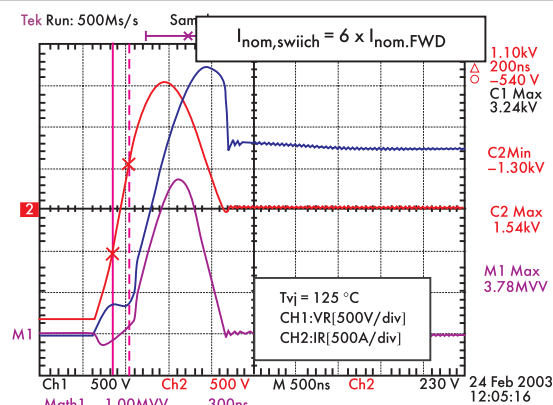
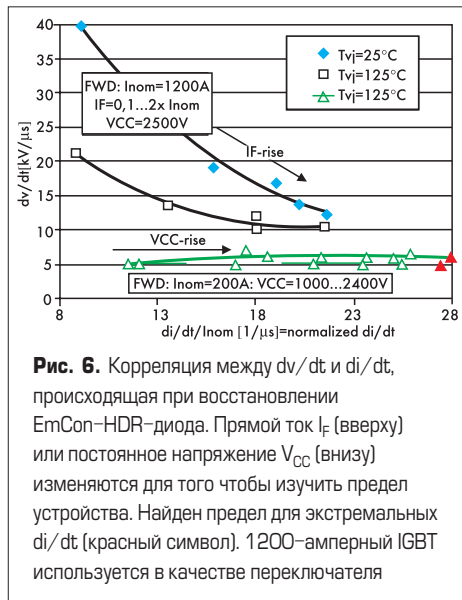


Рис. 5. Восстановление диода при критической di/dt . Антипараллельный диод с расчетным током 200 А выключен при использовании переключателя, имеющего расчетный ток 1200 А. Достигнуто значение 5,5 кА/мкс ($= 27 \cdot I_{nom}/\text{мкс}$)



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 переключающий IGBT коммутирует 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 пуга 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-

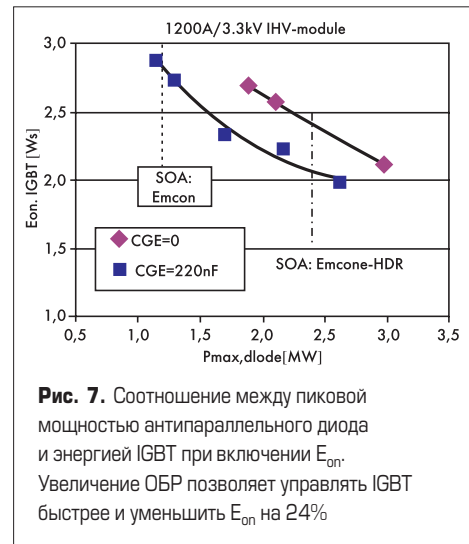
тательная конфигурация подходит для достижения критических значений di/dt , достигающих до $30 \cdot I_{nom}/\text{мкс}$. При увеличении постоянного напряжения V_{CC} скорость переключения непрерывно увеличивается до тех пор, пока не произойдет разрушения при $di/dt = 27 \cdot I_{nom}/\text{мкс}$ (5,4 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).

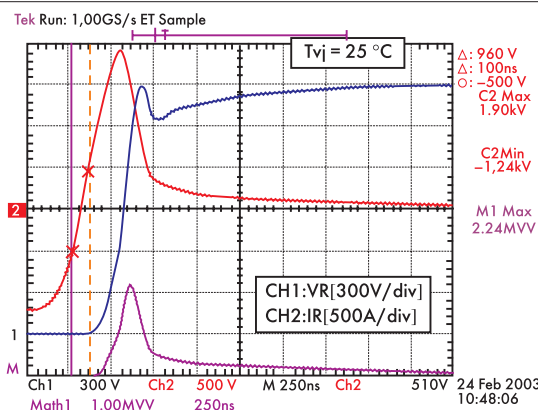


Рис. 8. Восстановление при номинальных условиях с уменьшенным R_{Gon} и увеличенной di/dt (9 кА/мкс) для HDR-диода в модуле FZ1200R33KF2C. Показаны обе коммутации: 25 °C (вверху) и 125 °C (внизу)