

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭМИТТЕРА БЫСТРО ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ДИОДОВ С МЯГКИМ ВОССТАНОВЛЕНИЕМ

Быстро восстанавливающиеся диоды (БВД) используются в качестве элементной базы управляемых твердотельных ключей постоянного тока – IGBT, IGCT и т.п. Требования к комплектным БВД (т.е. диодам, согласованным с IGBT, IGCT для сборки в один модуль) весьма жесткие и технологически трудновыполнимые. Прежде всего они не должны уступать IGBT по быстродействию и должны иметь оптимальное сочетание статических и динамических параметров. Кроме того, БВД должны обеспечивать мягкий характер обратного восстановления и обладать повышенной устойчивостью к высоким скоростям изменения тока коммутации при работе на индуктивную нагрузку.

В режиме обратного восстановления, когда диод закрывается, накопленный им заряд должен разрядиться, что приводит к росту его обратного тока. Кривая этого тока характеризует режим обратного восстановления диода (рис. 1). Время восстановления обратного сопротивления t_{rr} определяется интервалом между началом процесса восстановления обратного сопротивления t_0 и моментом, когда

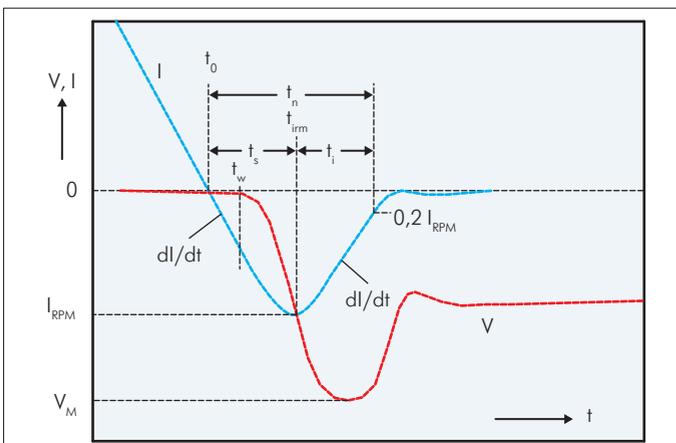
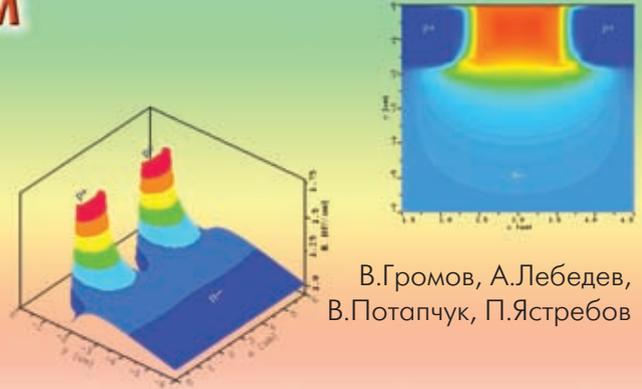


Рис. 1. Кривые тока и напряжения процесса "мягкого" восстановления диода в цепи



В.Громов, А.Лебедев, В.Потапчук, П.Ястребов

значение обратного тока диода достигает 20% пикового значения I_{rrm} .

Для процесса мягкого восстановления обратного сопротивления диода характерен график, приведенный на рис.1. Одним из условий получения мягкого восстановления является увеличение коэффициента "мягкости" $s = t_{rrf}/t_{rrr}$, где t_{rrf} – время спада тока обратного восстановления (reverse recovery current fall time), определяемое по уровню $0,2 I_{rrm}$; t_{rrr} – время нарастания тока обратного восстановления (reverse recovery current rise time). Это достигается путем контролируемого уменьшения эффективности инжекции эмиттера и, следовательно, концентрации избыточных носителей в базе со стороны эмиттерного p⁺-n(p-i)-перехода. Для заданного значения t_{rr} это эквивалентно требованию уменьшения значений времени нарастания тока обратного восстановления t_{rrr} и, соответственно, пиковых значений обратного тока I_{rrm} .

Другое условие "мягкости" восстановления – исключение эффекта срыва, т.е. резкого сброса обратного тока с чрезмерно высокой скоростью di_p/dt .

Один из способов улучшения режимов восстановления диодов и увеличения коэффициента "мягкости" – реализация так называемой эмиттерной концепции. В обычных p-n-диодах (рис.2) p-n-переход накапливает больше носителей заряда, чем n-p⁺-переход. Эмиттерная концепция предусматривает формирование обратного распределения носителей заряда: превышение концентрации носителей в n-p⁺-переходе по сравнению с p-n-переходом за счет уменьшения инжекции носителей p-эмиттером.

Существуют различные структуры эмиттеров, способствующих снижению инжекции. Например, "p-i-n/Шоттки диод",

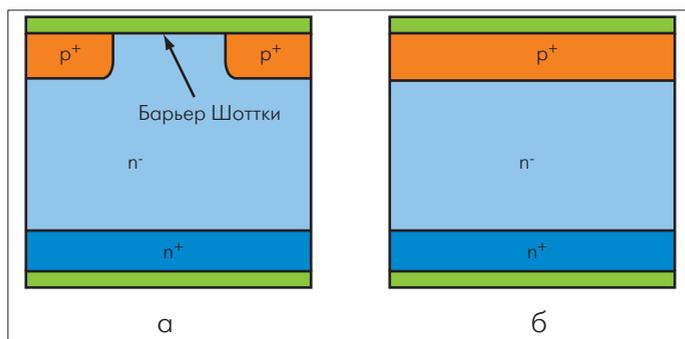


Рис.2. БВД с: а – р-і-п/Шоттки-структурой; б – эмиттером с низкой концентрацией носителей

состоящий из последовательности p^+ -областей и областей с переходом Шоттки [1] (рис. 2а). Достоинства перехода Шоттки или подобных ему областей – малые значения падения прямого напряжения (0,5–0,6 В) при номинальном токе и отсутствие избыточного тока – проявляются лишь при обратном напряжении менее 600 В. При значениях обратного напряжения 1000 В и более достоинства использования областей Шоттки слабо ощутимы.

Сегодня разработки направлены на улучшение режима обратного восстановления путем уменьшения концентрации носителей эмиттера [2, 3]. Однако этот, казалось бы, простой метод снижения эффективности эмиттера приводит к увеличению падения прямого напряжения из-за увеличения сопротивления перехода металл-эмиттер. Кроме того, как показали статистические данные, число отказов, вызванных низкой концентрацией примеси эмиттера диодов и, следовательно, высоким сопротивлением p^+ -области (160 Ом/кв), было больше, чем у диодов с высокой концентрацией примеси и меньшим сопротивлением p -области (60 Ом/кв). Но у диодов с низкой концентрацией примеси p -области процесс обратного восстановления улучшался. Таким образом, требования к технологии формирования БВД противоречивы: с одной стороны, необходимо обеспечить "мягкое" восстановление, с другой – динамическую устойчивость, и даже при ограничении "мягкого" восстановления выхода диодов из строя полностью избежать не удастся.

Дальнейшего улучшения процесса обратного восстановления можно добиться за счет комбинации двух последних вариантов – создания ячеистой структуры с чередующимися p^+ - и p -областями. Правда, и этот метод формирования эмиттера не лишен недостатков. Наличие мелких (глубиной менее 1 мкм) слаболегированных областей (с концентрацией носителей менее 10^{16} см^{-3}) приводит к снижению выхода годных диодов, так как при обратном смещении области мелкого перехода не всегда защищаются за счет перекрытия объемным зарядом смежных p^+ -областей, что обусловлено поверхностными дефектами кристалла, возникающими при проведении технологических операций.

Указанные недостатки можно устранить путем формирования глубокой (6–20 мкм) слаболегированной (менее $7 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$)

области эмиттера и последующего легирования поверхностного слоя до концентрации $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ для обеспечения надежного контакта эмиттера с металлом. В такой конструкции эмиттер действует так же, как и в ячеистой.

Были изготовлены и обследованы образцы БВД на ток 50 А с различной конструкцией эмиттера (см. таблицу). Для получения требуемого быстродействия кристаллы с диодами перед посадкой в корпус прошли операцию регулирования времени жизни неосновных носителей путем облучения протонами.

Сводные усредненные данные статических и динамических параметров, измеренных при нормальной температуре

Конструкция эмиттера диода	Статический режим Прямое падение напряжения U, В	Динамический режим					
		$I_{\text{пр}}, \text{ А}$	$Q_{\text{пр}}, \text{ мкКл}$	$t_{\text{пр}}, \text{ нс}$	$t_{\text{пр}}, \text{ нс}$	$t_{\text{пр}}, \text{ нс}$	S
Сплошной p^+ -типа	2,5	36	5,4	90	60	150	0,67
p^+ -переход Шоттки	2,7	20	1,3	50	80	130	1,6
Ячеистый p^+-p^-	2,6	26	3,4	65	65	130	1
Глубокий p^- -типа с p^+ -подлегированием	2,5	25,6	3,3	64	67	131	1,04

Наилучшими динамическими параметрами обладают диоды p^+ -Шоттки. Однако при температуре 125°C обратные токи этих диодов оказались максимальными в сравнении с другими типами диодов (до 4 мА), что не позволяет использовать их в качестве элементной базы управляемых твердотельных ключей постоянного тока. В то же время по выходу годных диоды с глубоким p^- -слоем эмиттера превосходили в полтора раза диоды с p^+ -Шоттки и ячеистой структурами эмиттера. Очевидно, такая структура эмиттера предпочтительна с точки зрения выполнения противоречивых требований к одновременному обеспечению "мягкого" восстановления обратного сопротивления и технологичности изготовления БВД.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Baliga, B.J.** Analysis of a High Voltage Merged p-i-n/Schottky (MPS).– Rectifier IEEE El. Dev. Letters, 1987, Edl., v.8, No.9.
2. **Porst A.** et al. Improvement of the Diode Characteristics using Emitter-Controlled Principles (EMCONDiode).– ISPSD, 1997, Weimar Proc., p.213–216.
3. **Rahimo M.T.; Shammas N.Y.A.** Optimisation of the Reverse Recovery Behavior of Fast Power Diodes Using Injection Efficiency and Lifetime Control Techniques.– EPE'97, Trondheim. Proc., v.2, p.99–10.