

УДК 621.382.2

В. А. СОЛОДУХА, д. т. н. А. С. ТУРЦЕВИЧ, к. т. н. Я. А. СОЛОВЬЁВ,
к. т. н. И. И. РУБЦЕВИЧ, А. Ф. КЕРЕНЦЕВ

Республика Беларусь, г. Минск, ОАО «ИНТЕГРАЛ»

E-mail: AKerentsev@transistor.com.by

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДИОДОВ ШОТТКИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Исследования диодов Шоттки с барьерной структурой на основе молибденовой пленки показали, что устойчивость структур к разрядам статического электричества зависит от параметров конструкции, а также от глубины охранного кольца. Установлено, что для повышения надежности диодов Шоттки необходимо использовать структуры с распределенным охранным кольцом, которое представляет собой матрицу ячеек p-типа. Это позволяет снизить напряженность электрического поля в критических зонах активной структуры за счет выравнивания потенциала по периметру охранного кольца и площади диода.

Ключевые слова: диод Шоттки, потенциальный барьер, разряд статического электричества.

Диоды Шоттки находят широкое применение в выходных каскадах импульсных источников электропитания компьютеров, серверов систем связи и передачи данных, а также в современных мобильных беспроводных устройствах и других блоках радиоэлектронной аппаратуры (РЭА). Использование диодов Шоттки в качестве выпрямительных элементов позволяет уменьшить динамические коммутационные потери, устранить режим короткого замыкания, уменьшить бросок тока через коллекторы силовых транзисторов в момент переключения диода. В современных системных блоках питания компьютеров диоды Шоттки представляют собой, как правило, сборки из двух диодов (диодные полумосты), что повышает технологичность и компактность блоков питания, а также улучшает условия охлаждения диодов. Вместе с тем, миниатюризация блоков РЭА и активных компонентов обостряет проблему надежности в условиях воздействия разрядов статического электричества (РСЭ) при которых увеличивается риск отказов.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния конструктивно-технологических факторов, таких как удельное сопротивление эпитаксиального слоя, площадь диода, а также геометрия охранного кольца, на устойчивость диодов Шоттки к воздействию РСЭ.

Как известно, диод Шоттки характеризуется потенциальным барьером, который определяется разностью работ выхода металла и полупроводника. Если работа выхода металла больше, чем работа выхода полупроводника, то контакт «металл — полупроводник» является выпрямляющим. Для выпрямляющего контакта вольтамперная характеристика (ВАХ) в рамках об-

щепринятой теории термоэлектронной эмиссии описывается зависимостью

$$J = AT^2 \left[\exp\left(-\frac{q\phi_b}{k_B T}\right) \right] \left[\exp\left(-\frac{qV}{nk_B T}\right) - 1 \right], \quad (1)$$

где J — плотность тока;

A — постоянная Ричардсона;

T — абсолютная температура;

q — заряд электрона;

ϕ_b — высота барьера;

k_B — постоянная Больцмана;

V — напряжение смещения;

n — коэффициент неидеальности диода.

В реальных структурах на высоту барьера Шоттки влияют также поверхностные состояния полупроводника, дополнительное статическое понижение высоты барьера Шоттки, обусловленное наличием промежуточного слоя между металлом и полупроводником, а также силы зеркального отображения или эффект Шоттки [1]. Для изготовления диодов Шоттки с требуемыми характеристиками, как правило, необходимо сформировать контакт «металл — полупроводник» с заданной высотой потенциального барьера.

Типовая структура диода Шоттки представлена на **рис. 1**, а его эквивалентная электрическая схема — на **рис. 2** (C_{SD} — емкость диода; R_{SD} — сопротивление контакта «металл — полупроводник»; R_{ser} — суммарное сопротивление объема полупроводника и омического контакта).

Как правило, диод Шоттки формируют нанесением металлического контактного слоя 5 на слаболегированный эпитаксиальный слой 2 n -типа проводимости, сформированный на силь-

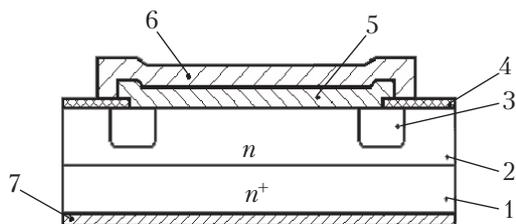


Рис. 1. Структура диода Шоттки [2]:

1 — подложка; 2 — эпитаксиальный слой; 3 — охранный слой; 4 — защитный слой; 5 — контактный слой; 6, 7 — слой металлизации, соответственно, анода и катода

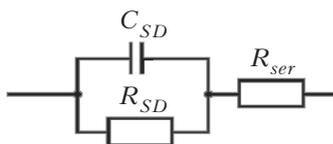


Рис. 2. Эквивалентная схема диода Шоттки [2]

нолегированной подложке 1 того же типа проводимости. Металлизацию анода 6, обеспечивающую внутрикорпусный монтаж, наносят поверх контактного слоя 5. Преимущественное использование полупроводниковых структур *n*-типа проводимости обусловлено их более низким удельным сопротивлением по сравнению со структурами *p*-типа проводимости при одних и тех же уровнях легирования. С целью исключения краевых токов утечки металлизация анода формируется в окне защитного слоя 4, по периметру которого сформировано охранный слой *p*-типа проводимости 3. Для обеспечения омического контакта к подложке и возможности монтажа структур в корпус на обратную сторону подложки наносят металлизацию катода 7.

Основными параметрами диодов Шоттки являются напряжение при прямом смещении V_F , максимальное обратное напряжение V_R и обратный ток I_R . Величина обратного тока диода Шоттки определяется выражением (1). Прямое напряжение с учетом последовательного сопротивления диодной структуры может быть представлено в следующем виде [2]:

$$V_F = \varphi_b + \frac{k_B T}{q} \ln \left(I_F / (A T^2 S) \right) + I_F R_{ser}, \quad (2)$$

где I_F — прямой ток;

S — площадь выпрямляющего контакта металл-полупроводник.

В свою очередь, максимальное обратное напряжение определяется напряжением лавинного пробоя *p-n*-перехода охранный слой [1]:

$$V_R = 60 \left(\frac{E_g}{1,1} \right)^{3/2} \left(\frac{N_D}{10^{22}} \right)^{-3/4}, \quad (3)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника;
 N_D — концентрация легирующей примеси.

Таким образом, основные параметры диодов Шоттки определяются как высотой барьера Шоттки, так и конструктивно-технологически-

ми параметрами диодной структуры: ее площадью, толщиной и удельным сопротивлением слоев, входящих в ее состав, которое зависит от концентрации легирующей примеси.

Конструктивно-технологические способы повышения устойчивости к РСЭ

Воздействие РСЭ на диоды Шоттки может приводить к их катастрофическим или параметрическим отказам. При этом наиболее характерным является механизм отказа в виде увеличения обратного тока утечки и снижения пробивного напряжения барьерной структуры Шоттки, приводящий к деградации ее электрических свойств.

Диод Шоттки стандартной структуры (рис. 1) недостаточно надежен при воздействии РСЭ величиной более 4 кВ. Поскольку наибольшая напряженность электрического поля наблюдается по периметру в угловых областях контакта Шоттки [3], именно в этих местах наиболее вероятно возникновение лавинного пробоя, когда сквозь область с наиболее высокой напряженностью электрического поля начинает протекать электрический ток, направленный от высоколегированной области к краю контакта Шоттки вдоль силовых линий электрического поля. С другой стороны, электрическое поле концентрируется также на структурных дефектах на границе раздела «металл — полупроводник», которые являются причиной возникновения лавинного пробоя вследствие локального увеличения напряженности электрического поля. Протекание избыточного электрического тока вызывает локальный нагрев полупроводника и, в свою очередь, приводит к уменьшению его электрического сопротивления по пути протекания тока. Эта своеобразная положительная обратная связь приводит к эффекту «шнурования» электрического тока [4].

Методы защиты диодов Шоттки от воздействия РСЭ делятся на организационно-технические и конструктивно-технологические. Первые реализуются на этапе изготовления диодов Шоттки и направлены на предотвращение возникновения РСЭ и ускорение стекания электрических зарядов. Конструктивно-технологические методы можно условно разделить на три группы:

- шунтирование барьера контакта «металл — полупроводник» интегрированным *p-n*-переходом с меньшим обратным пробивным напряжением (структуры с распределенным охранным кольцом [5], тренч-МОП-структуры [6]);

- уменьшение напряженности электрического поля, индуцированного РСЭ, в критических местах структуры (структуры с полевой обкладкой [7], структуры с резистивной полевой обкладкой [8]);

- уменьшение проводимости полупроводникового материала при обратном смещении диода Шоттки (структуры с дифференциальным легированием охранный слой и ячеек распре-

деленного охранного кольца [9], структуры с поверхностным каналом [10]).

Методика исследований

Структуры диодов Шоттки в образцах для исследований формировали на поверхности эпитаксиальных слоев толщиной 5–10 мкм с удельным сопротивлением 0,6, 1,2 и 2,5 Ом·см, обеспечивающих номинальное обратное напряжение 40, 60 и 100 В соответственно. Барьер «металл – полупроводник» формировали нанесением пленки молибдена толщиной 0,3 мкм методом магнетронного распыления вакуумной установке типа «Оратория 29» с криогенной системой откачки и предельным давлением менее 10^{-5} Па. В качестве рабочего газа использовали аргон чистотой не хуже 99,999%, давление которого в процессе распыления составляло 0,6–0,8 Па. Для исследований использовали структуры типового диода (рис. 1) и диода с распределенным охранным кольцом (рис. 3).

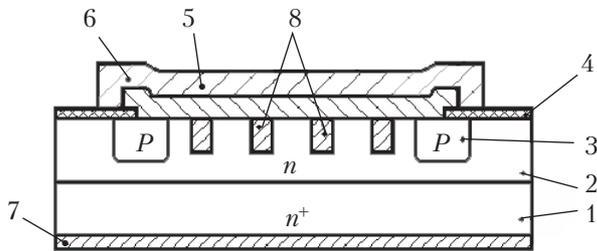


Рис. 3. Структура диода Шоттки с распределенным охранным кольцом: 1–7 – то же, что на рис. 1; 8 – локальные ячейки p-типа над барьером

Охранное кольцо (поз. 3 на рис. 3) глубиной от 1,3 до 2,1 мкм с поверхностным сопротивлением 50–70 Ом/□ формировали методом двухстадийной диффузии. Размеры структуры варьировали в пределах от 0,76×0,76 до 2,7×2,7 мм. Кристаллы диодных структур припаивали припоем ПОС-10 в среде водорода, а разварку проволочных межсоединений выполняли УЗ-сваркой с использованием проволоки АОЦПоМ-150. После формирования монолитного полимерного корпуса (КТ-90) и корпуса со свободным внутренним объемом (КТ-97В) проводили испытания на воздействие РСЭ по методу, который имитирует прикосновение к кристаллу металлического предмета. На испытуемое изделие подавали разряд статического электричества напряжением от 2 до 14 кВ с шагом 2 кВ. Для каждого уровня напряжения подавали по пять импульсов положительной и отрицательной полярности с интервалом между ними 5 с. После каждого этапа испытаний измеряли электрические параметры. Критерием годности диодов Шоттки после испытаний являлось отсутствие деградации электрических параметров. Диоды Шоттки, отказавшие в процессе испытаний, были разгерметизированы, а их активная структура исследована с использованием растровой электронной микроскопии.

Результаты и их обсуждение

Для удобства анализа был введен коэффициент структуры k , который определяется как отношение толщины свободной части эпитаксиального слоя ($h_{эс} - h_{ок}$) к глубине залегания охранного кольца $h_{ок}$ (рис. 4):

$$k = \frac{h_{эс} - h_{ок}}{h_{ок}}$$

В процессе испытаний типовой структуры диода Шоттки в корпусах КТ-90 и КТ-97В было установлено, что воздействие РСЭ напряжением более 8 кВ приводит к отказу структур с коэффициентом $k > 1,2$.

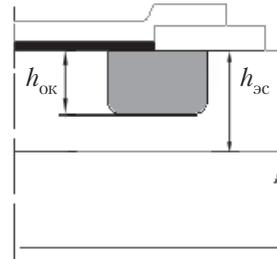


Рис. 4. Фрагмент структуры диода с охранным кольцом

Как видно из рис. 4, при уменьшении коэффициента структуры k пробой локализуется в объеме полупроводника, что способствует более равномерному протеканию обратного тока и повышает устойчивость диода к РСЭ. Однако уменьшение разности $h_{эс} - h_{ок}$ (увеличение глубины залегания охранного кольца) приводит к снижению обратного напряжения диода Шоттки.

Также было установлено, что для одинаковых структур устойчивость к РСЭ повышается при использовании металлокерамических корпусов КТ-97В (рис. 5). Это обусловлено тем, что в полимерном монолитном корпусе КТ-90 кристалл диода Шоттки подвергается дополнительным термическим деформациям из-за различия в температурных коэффициентах линейного расширения используемых материалов. Возникающие в полимерном корпусе механические напряжения способны снизить потенциальный барьер с 0,64 до 0,58 эВ, что приводит к росту протекающего через структуру тока [11]. С уменьшением площади структуры доля отказов зако-

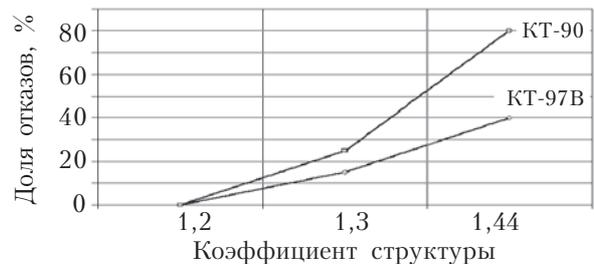


Рис. 5. Зависимость доли отказов диодов в различных корпусах от параметров структуры при величине РСЭ 14 кВ

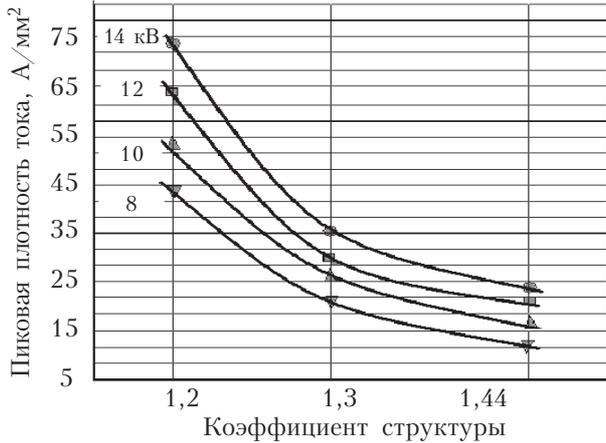


Рис. 6. Расчетная зависимость пиковой плотности тока в кристалле от его площади при воздействии РСЭ различной величины



Рис. 7. Зависимость доли отказов от напряжения разряда для диодов Шоттки (площадь структуры 0,76×0,76 мм) со стандартным (1, 2) и распределенным (3, 4) охранным кольцом и различным удельным сопротивлением:

1, 3 – 2,5 Ом·см; 2, 4 – 0,6 Ом·см

номерно увеличивается в результате роста напряженности электрического поля в углах кристалла и увеличения пиковой плотности тока импульса РСЭ (рис. 6). Доля отказов также увеличивается с ростом удельного сопротивления (рис. 7), что связано с повышением напряженности электрического поля в охранным кольце.

В результате анализа, проведенного с помощью растровой электронной микроскопии, были выявлены участки локального пробоя размером 0,8–4,7 мкм, расположенные в области охранным кольца (рис. 8). Такой локальный пробой носит поверхностный характер, т. к. длительность разрядного импульса не превышает 30 нс. После стравливания металлизации участков структуры с расплавлением кремния обнаружено не было.

При исследовании статических ВАХ диодов с помощью измерителя Л2-56 обнаружено, что воздействие статического токового импульса (длительностью 5 с) в режиме пробоя также приводило к локальному пробую по периметру ох-

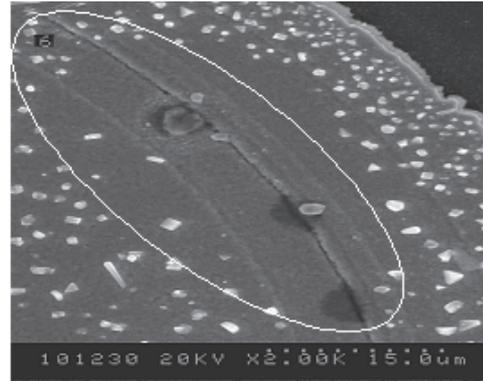


Рис. 8. РЭМ-фото фрагмента структуры диода Шоттки с локальным пробоем в области охранным кольца после воздействия РСЭ (выделена область пробоя)

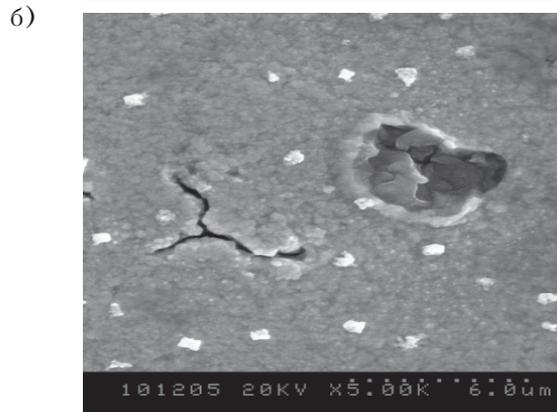


Рис. 9. РЭМ-фото структуры диода Шоттки, отказавшего после воздействия статического токового импульса в режиме пробоя:

а – общий вид (выделены области пробоя); б – локальный пробой структуры

рванного кольца (рис. 9), однако в этом случае выявлено место пробоя структуры с частичным ее проплавлением (рис. 9, б). Пробой структуры локализован преимущественно в области закругления охранным кольца и обусловлен повышенной напряженностью электрического поля. Использование конструкции с распределенным охранным кольцом, содержащим матрицу ячеек р-типа размером от 3 до 8 мкм с шагом от 8 до

20 мкм, позволило обеспечить устойчивость диодов Шоттки к воздействию РСЭ напряжением 14 кВ. При этом средний уровень прямого напряжения увеличился на 2%, что связано с уменьшением эффективной площади активной структуры за счет формирования дополнительных ячеек *p*-типа.

В структуре с распределенным охранным кольцом импульс РСЭ проходит через металлизацию анода и рассеивается охранным кольцом и локальными ячейками *p*-типа проводимости. Наличие матрицы локальных областей *p*-типа проводимости обеспечивает дополнительные пути рассеивания импульса РСЭ и позволяет повысить надежность при воздействии РСЭ за счет снижения сопротивления и выравнивания потенциала по периметру охранный кольца и площади диода Шоттки.

Выводы

Таким образом, было установлено, что уменьшение коэффициента структуры *k* диодов Шоттки со стандартным охранным кольцом за счет увеличения глубины проникновения охранный кольца позволяет снизить долю отказов в результате снижения сопротивления свободной части эпитаксиального слоя и возникновения условий для пробоя в объеме полупроводника. Однако это может приводить к снижению пробивного напряжения диода Шоттки и к снижению выхода годных. Поэтому для повышения устойчивости диодов Шоттки к РСЭ напряжением до 14 кВ целесообразно использовать структуру с распределенным охранным кольцом, содержащую матрицу *p*-ячеек, что позволит снизить напряженность электрического поля в критических зонах активной структуры.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Кн. 1. — Москва: Мир, 1984. [Zi S. Fizika poluprovodnikovyykh priborov. Kn. 1. Moscow: Mir, 1984]
2. Попов С. Диоды Шоттки для преобразовательной техники // Электронные компоненты. — 2002. — № 3. — С. 35–38. [Popov S. // Elektronnyye komponenty. 2002. N 3. P. 35]
3. Laroche J. R., Ren F., Baik K. W. et al. Design of edge termination for GaN power Schottky diodes // Journal of Electronic materials. — 2005. — Vol. 34, N 4. — P. 370–374.
4. Anand Y., Crowe D. Latent ESD failures in Schottky barrier diodes. Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings. — Orlando, Florida, 1999. — P. 160.
5. Pat. 6717229 US. Distributed reverse surge guard / Fabtech, Inc. — April 6, 2004.
6. Pat. 6078090 US. Trench-gated Schottky diode with integral clamping diode / Siliconix Technology C. V. — June 20, 2000
7. Pat. 4899199 US. Schottky diode with titanium or like layer contacting the dielectric layer / International Rectifier Corporation. — February 6, 1990.

8. Pat. 5027166 US. High voltage, high speed Schottky semiconductor device and method of fabrication / Sanken Electric Co., Ltd. — June 25, 1991.

9. Заявка Японии JP 2009059765. Schottky barrier diode, and manufacturing method thereof. — Panasonic corp, 2009.

10. Pat. 5258640 US. Gate controlled Schottky barrier diode / International Business Machines Corporation. — November 2, 1993.

11. Захаров Н. П., Багдасарян А. В. Механические явления в интегральных структурах. — Москва: Радио и связь, 1992. [Zakharov N. P., Bagdasaryan A. V. Mekhanicheskie yavleniya v integral'nykh strukturakh. Moscow: Radio i svyaz', 1992]

Дата поступления рукописи
в редакцию 05.06 2012 г.

Solodukha V. A., Turtsevich A. S., Solov'yov J. A., Rubtsevich I. I., Kerentsev A. F. **Improving the reliability of Schottky diodes under the influence of electrostatic discharges.**

Keywords: Schottky diode, potential barrier, electrostatic discharge.

Experimental studies of Schottky diodes with molybdenum barrier structure showed that resistance of the structures to electrostatic discharge depends on the design parameters, as well as on guard ring diffusion depth. It has been proven that to improve the reliability of Schottky diodes one should use the structures with distributed guard ring containing *p*-type cell matrix. This reduces the electric field strength in critical areas of the active structure due to potential balancing along the guard ring and the diode area perimeter.

The Republic of Belarus, Minsk, JSC «INTEGRAL».

Солодуха В. О., Турцевич А. С., Соловейов Я. О., Рубцевич І. І., Керенцев А. Ф. **Підвищення надійності діодів Шоттки при впливі розрядів статичної електрики.**

Ключові слова: діод Шоттки, потенційний бар'єр, розряд статичної електрики.

Дослідження діодів Шоттки з бар'єрною структурою на основі молибденової плівки показали, що стійкість структур до розрядів статичної електрики залежить від параметрів конструкції, а також від глибини охоронного кільця. Встановлено, що для підвищення надійності діодів Шоттки необхідно використовувати структури з розподіленим охоронним кільцем, яке являє собою матрицю осередків *p*-типу. Це дозволяє знизити напруженість електричного поля в критичних зонах активної структури за рахунок вирівнювання потенціалу по периметру охоронного кільця і площі діода.

Республіка Білорусь, м. Мінськ, ВАТ «ІНТЕГРАЛ».