

УДК 537.2:621.38

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДИОДЫ ШОТТКИ

В.А. СОЛОДУХА, В.Л. ЛАНИН\*, Я.А. СОЛОВЬЕВ

ОАО «ИНТЕГРАЛ»–управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

\*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 14 апреля 2015

Предложена методика прогнозирования допустимых потенциалов разрядов статического электричества положительной и отрицательной полярности с напряжением до 15 кВ на структуры диодов Шоттки с охранным кольцом.

*Ключевые слова:* статическое электричество, разряды, диоды Шоттки, охранный кольцо.

### Введение

Электростатические разряды (ЭСР) создают весьма значительные потери в производстве и эксплуатации полупроводниковых приборов. Многие исследования показывают, что ЭСР вызывают 16–22 % отказов у изготовителей приборов, 9–15 % у различных субподрядчиков, 9–13 % у изготовителей электронной аппаратуры, и 27–33 % у потребителей аппаратуры [1]. Общеизвестно отрицательное влияние ЭСР, в первую очередь, на интегральные схемы МОП- и ОП-ИС. Электростатические разряды вызывают такие виды повреждений, как тепловой пробой *p-n*-перехода, образование в оксиде пустот, расплавление металлических проводников и др. Некоторые биполярные приборы также чувствительны к ЭСР. Особенно опасны ЭСР для ТТЛ ИС с барьером Шоттки, которые пробиваются при энергии ЭСР в 2–3 раза меньшей, чем необходимо для пробоя ТТЛ ИС. Это происходит вследствие меньшего размера барьера Шоттки [2].

Развитие и совершенствование диагностических методик, направленных на определение работоспособности полупроводниковых приборов в тех или иных условиях эксплуатации, требует достаточно больших материальных затрат, что в большинстве случаев обусловлено высокой стоимостью диагностического оборудования. В настоящее время наиболее оптимальное решение минимизации затрат при получении данных по устойчивости ИС к воздействию ЭСР достигается с помощью моделирования. Построение моделей во многом зависит от правильного выбора физических параметров, влияющих на достоверность полученных результатов, а также математического аппарата, позволяющего максимально адекватно описать и оценить полученный результат [3, 4].

### Методика эксперимента

Повреждения диодов Шоттки с охранным кольцом (рис. 1) импульсами ЭСР происходит, как правило, в области закругления охранного кольца из-за пробоя и *p-n*-перехода и барьеров Шоттки, когда сквозь них формируются проводящие каналы. Диод Шоттки может подвергаться воздействию ЭСР как положительной, так и отрицательной полярности. Эквивалентные схемы разряда статического электричества приведены на рис. 2. При воздействии импульса ЭСР положительной полярности диодная структура окажется под

прямым смещением, а, значит, ток разряда будет протекать непосредственно через контакт металл–полупроводник диода Шоттки и частично через  $p-n$ -переход охранного кольца.

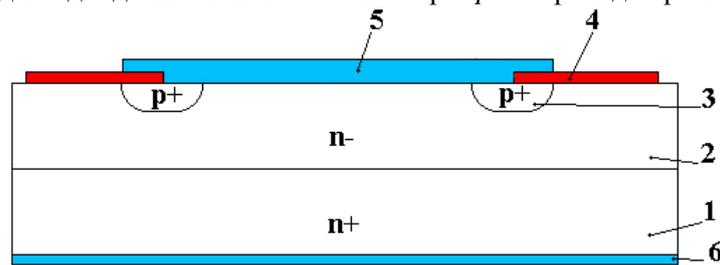


Рис. 1. Структура диода Шоттки с охранным кольцом: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – охранный слой; 4 – защитный слой; 5 – металлизация анода; 6 – металлизация катода

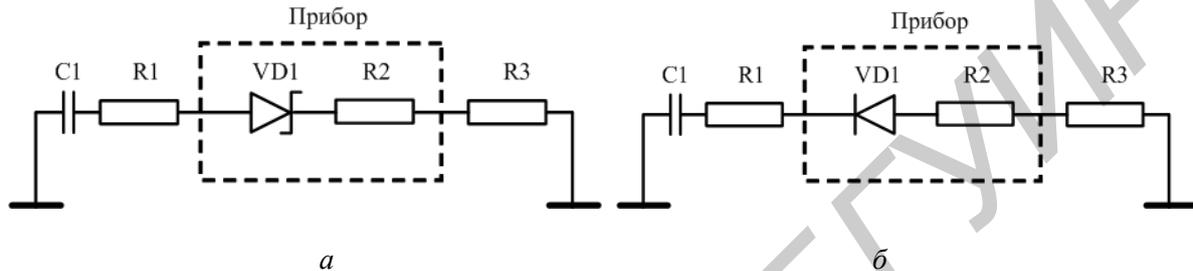


Рис. 2. Эквивалентные схемы разряда статического электричества через диод Шоттки: а – для импульсов положительной полярности, б – для импульсов отрицательной полярности

Учитывая, что доля тока, протекающего через контакт металл-полупроводник, на 2–3 порядка превосходит долю тока, протекающего через  $p-n$ -переход охранного кольца, эквивалентная схема разряда статического электричества положительной полярности соответствует приведенной на рис. 1, а. При рассмотрении модели человека, держащего металлический предмет (метод ИЕС 61000-4-2), емкость  $C1$  в расчетах принимается равной 150 пФ, а сопротивление  $R1$  – 330 Ом [5]. Напряжение на диодной структуре  $VD1$  соответствует падению напряжения на контакте металл-полупроводник при прямом смещении [6]:

$$V_D = \phi + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_P}{AT^2 S_k}\right), \quad (1)$$

где  $I_P$  – ток разряда,  $A$  – постоянная Ричардсона,  $T$  – абсолютная температура,  $q$  – заряд электрона,  $S_k$  – площадь выпрямляющего контакта металл–полупроводник,  $k$  – постоянная Больцмана,  $\phi$  – высота барьера.

Сопротивление  $R2$  соответствует последовательному сопротивлению диода и складывается из последовательного соединения сопротивлений эпитаксиального слоя  $R_{N-}$  и подложки  $R_{N+}$ :

$$R2 = R_{N-} + R_{N+}. \quad (2)$$

Величина сопротивления эпитаксиального слоя определяется выражением:

$$R_{N-} = \rho_{N-} \frac{d_{N-}}{S_k}, \quad (3)$$

где  $\rho_{N-}$  – удельное сопротивление эпитаксиального слоя,  $d_{N-}$  – его толщина.

В свою очередь:

$$R_{N+} = \rho_{N+} \frac{d_{N+}}{S_{N+}}, \quad (4)$$

где  $\rho_{N+}$  – удельное сопротивление подложки,  $d_{N+}$  – ее толщина,  $S_{N+}$  – площадь кристалла.

Сопротивление  $R3$  соответствует контактному сопротивлению между прибором и землей, его величина будет пренебрежимо мала по сравнению с  $R1$ , поэтому в расчетных целях

принимается  $R3 = 0$ . Согласно теории Вунша–Белла, пороговая плотность мощности определяется зависимостью [7]:

$$P / S = \sqrt{\pi K_P C_P (T_{\max} - T_1) t}^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где  $S$  – площадь перехода,  $K_P$  – коэффициент теплопроводности кремния,  $C_P$  – удельная теплоемкость кремния,  $T_{\max}$  – максимальная температура структуры,  $T_1$  – рабочая температура структуры.

Теория Вунша–Белла предусматривает три случая отказа полупроводникового прибора из-за импульсного воздействия ЭСР [8].

*Случай 1.* Нагрев структуры от комнатной температуры до температуры плавления  $675^\circ\text{C}$  (отказ полупроводникового прибора из-за плавления алюминиевой металлизации). Уравнение (5) для данного случая принимает вид:

$$P / S = 1109,4t^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

*Случай 2.* Нагрев структуры от комнатной температуры до температуры плавления  $1415^\circ\text{C}$  (отказ полупроводникового прибора из-за плавления кремния). Уравнение (5) примет вид:

$$P / S = 1809,7t^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

*Случай 3.* Аналогичен случаю 2, но ток через структуру протекает не равномерно, а через горячие точки и энергия импульса рассеивается на  $1/10$  от площади перехода. Тогда:

$$P / S = 180,9t^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Учитывая, что рассеяние энергии импульсов ЭСР происходит в приповерхностной области полупроводника, в настоящей работе при расчете максимального допустимого потенциала использовали критерии, соответствующие случаям 2 и 3.

Постоянная времени схемы, представленной на рис. 2, *a*, определяется как:

$$\tau = (R1 + R2 + R3)C1. \quad (9)$$

Время действия импульса ЭСР, приведенного к прямоугольному импульсу:

$$t = 5\tau. \quad (10)$$

Средняя мощность, рассеиваемая структурой за время  $5\tau$ , равна [1]:

$$P = \frac{V_D I_P}{5} + \frac{I_P^2 R2}{10}. \quad (11)$$

Уравнение (11) решается относительно  $I_P$  численными методами оптимизации второго порядка, входящими в стандартный пакет функций табличного процессора EXCEL.

### Результаты и их обсуждение

Расчеты максимально допустимых потенциалов ЭСР проводили для диодных структур с номинальным обратным напряжением 45 В (эпитаксиальный слой 5 КЭФ 0,6), 60 В (эпитаксиальный слой 6,5 КЭФ 1,2) и 100 В (эпитаксиальный слой 9 КЭФ 2,5) в диапазоне площадей контакта металл–кремний от 0,3 до 4 мм<sup>2</sup>, согласно критериям для случаев 2 и 3. Результаты расчетов максимального допустимого потенциала импульса положительной полярности для диодных структур с номинальными обратными напряжениями 45 и 100 В, с площадью контакта металл–кремний 0,314 мм<sup>2</sup> и высотой барьера Шоттки 0,82 В представлены в табл. 1. Расчетные зависимости максимального допустимого потенциала импульса положительной полярности диодных структур приведены на рис. 3.

Таблица 1. Расчетные значения максимального допустимого потенциала импульса ЭСР положительной полярности

Номинальное обратное напряжение, В	Критерий	$R_2$ , Ом	$\tau$ , нс	$t$ , мкс	$P$ , Вт	$I_p$ , А	$V_D$ , В	$U_p$ , кВ
45	Случай 2	0,49	49,6	0,248	2823,8	237,9	0,820	78,6
	Случай 3				282,4	74,1	0,818	24,5
100	Случай 2	3,87	50,1	0,250	2838,2	85,4	0,818	28,5
	Случай 3				283,8	26,8	0,816	8,9

Как видно из табл. 1, величина максимально допустимого потенциала импульса ЭСР положительной полярности снижается с увеличением номинального обратного напряжения диода Шоттки, что главным образом обусловлено увеличением сопротивления  $R_2$ , определяемого толщиной эпитаксиального слоя и его удельным сопротивлением.

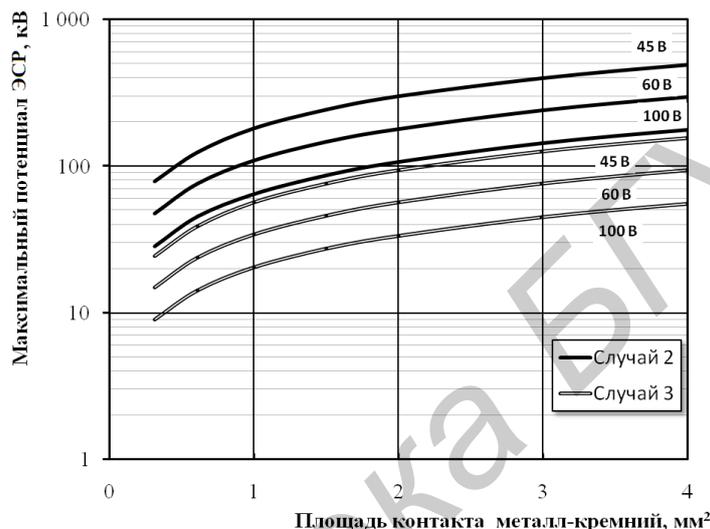


Рис. 3. Зависимости максимально допустимых потенциалов импульсов ЭСР положительной полярности для диодов Шоттки от номинальных обратных напряжений и площади контакта

Из рис. 3 видно, что величина максимально допустимого потенциала импульса ЭСР положительной полярности монотонно возрастает с увеличением площади контакта металл-кремний, что также обусловлено, в первую очередь, уменьшением сопротивления  $R_2$ . Принимаем, что потенциал ЭСР, возникающий в рамках модели человека, держащего металлический предмет, составляет 15 кВ: таким образом, в рамках модели человека, держащего металлический предмет, для случая 2 гарантируется стойкость к импульсам ЭСР положительной полярности диодов Шоттки номинальным обратным напряжением до 100 В и с площадью перехода металл-кремний более 0,3 мм<sup>2</sup>. Для случая 3 гарантируется стойкость к импульсам ЭСР положительной полярности диодов Шоттки номинальным обратным напряжением до 60 В при площади перехода металл-кремний более 0,3 мм<sup>2</sup>, либо до 100 В при площади перехода металл-кремний более 0,6 мм<sup>2</sup>.

При проведении испытаний по методу ИЕС 61000-4-2 (модель человека, держащего металлический предмет) импульсами ЭСР положительной полярности потенциалом 15 кВ на диодных структурах с площадью 0,314 мм<sup>2</sup> и с обратным напряжением 120 В отказы не зафиксированы. Таким образом, могут быть сделаны следующие выводы:

- прохождение тока разряда через диод Шоттки в прямом направлении происходит равномерно, без образования горячих точек;
- структура диода Шоттки с охранным кольцом гарантирует стойкость к воздействию импульсов ЭСР положительной полярности в рамках модели человека, держащего металлический предмет.

Эквивалентная схема разряда статического электричества отрицательной полярности соответствует рис. 2, б. Согласно модели человека держащего металлический предмет (метод ИЕС 61000-4-2) емкость  $C_1$  в расчетах принимается равной 150 пФ, а сопротивление  $R_1$  – 330 Ом. Воздействие на диод Шоттки импульсов ЭСР отрицательной полярности реализуется

путем их подачи на катодный вывод диодной структуры, представленной на рис. 1. При этом диодная структура окажется под обратным смещением.

Напряжение на диодной структуре VD1 (рис. 2, б) соответствует напряжению лавинного пробоя диодной структуры. Сопротивление R2 соответствует дифференциальному сопротивлению диодной структуры при обратном смещении. При этом очевидно, что обратное напряжение диодной структуры соответствует напряжению пробоя *p-n*-перехода охранного кольца и определяется толщиной и удельным сопротивлением эпитаксиального слоя, а также геометрией охранного кольца. В то же время дифференциальное сопротивление будет зависеть от толщины и удельного сопротивления эпитаксиального слоя, поскольку эпитаксиальный слой в структуре диода Шоттки обладает наибольшим электрическим сопротивлением, так как является элементом структуры с наименьшей концентрацией легирующей примеси.

Сопротивление R3 соответствует контактному сопротивлению между прибором и землей. В данном случае его величина будет пренебрежимо мала по сравнению с R1, поэтому в расчетных целях принимается  $R3 = 0$ .

Максимально допустимый потенциал импульса ЭСР отрицательной полярности определяли согласно критерию Вунша–Белла с использованием выражений (5–12). Для импульсов ЭСР отрицательной полярности в уравнении (11) в качестве значения параметра  $V_D$  использовали величину номинального обратного напряжения. Квадратное уравнение (11) в случае импульса ЭСР обратной полярности будет иметь единственное положительное решение относительно  $I_p$ , имеющее положительные значения [4]:

$$I_p = \frac{\sqrt{4U_D^2 + 40PR2} - 2U_D}{2R2}. \quad (12)$$

Анализ уравнений (1–12) показывает, что ключевыми параметрами, влияющими на устойчивость диодов Шоттки к импульсам ЭСР отрицательной полярности, являются дифференциальное сопротивление диодной структуры и площадь *p-n*-перехода охранного кольца. Экспериментальные исследования величины дифференциального сопротивления диодов Шоттки с размерами структуры 0,76×0,76 мм показали, что для структур с номинальным обратным напряжением 45 В оно составило 40 Ом, с номинальным обратным напряжением 60 В – 90 Ом, с номинальным обратным напряжением 100 В – 300 Ом.

Расчеты максимально допустимых потенциалов ЭСР проводили для диодных структур с номинальным обратным напряжением 45, 60 и 100 В с учетом приведенных выше значений дифференциальных сопротивлений и в диапазоне площадей *p-n*-переходов от 0,05 до 0,4 мм<sup>2</sup>, согласно критериям Вунша–Белла для случаев 2 и 3. Результаты расчетов максимального допустимого потенциала импульса ЭСР отрицательной полярности для диодных структур с номинальными обратными напряжениями 45 и 100 В с площадью *p-n*-перехода охранного кольца 0,104 мм<sup>2</sup> (размеры кристалла диодной структуры 1,42×1,42 мм) представлены в табл. 2. Расчетные зависимости максимального допустимого потенциала импульса ЭСР отрицательной полярности диодных структур Шоттки приведены на рис. 4.

Таблица 2. Расчетные значения максимального допустимого потенциала импульса ЭСР отрицательной полярности

Номинальное обратное напряжение, В	Критерий	R2, Ом	τ, нс	t, мкс	P, Вт	I <sub>p</sub> , А	V <sub>D</sub> , В	U <sub>p</sub> , кВ
45	Случай 2	40	55,5	0,278	5133	34,6	50	12,8
	Случай 3				513,3	10,1	50	3,8
100	Случай 2	300	94,5	0,473	3968,2	11,1	120	7,1
	Случай 3				696,8	3,26	120	2,1

Как видно из табл. 2, при одинаковых размерах и топологии диодной структуры при увеличении номинального обратного напряжения с 45 до 100 В максимально допустимый потенциал импульса ЭСР обратной полярности уменьшается почти в 2 раза. Данный эффект объясняется, главным образом, существенным ростом дифференциального сопротивления диодной структуры, обусловленным увеличением толщины эпитаксиального слоя с 5 до 10 мкм и его удельного сопротивления с 0,6 до 2,5 Ом·см.

При одинаковых значениях дифференциального сопротивления в рамках случая 2 (рис. 4) максимально допустимый потенциал импульса ЭСР отрицательной полярности более

15 кВ обеспечивается для диодных структур с номинальным обратным напряжением 45 В при площади  $p$ - $n$ -перехода охранного кольца более  $0,2 \text{ мм}^2$  (размер кристалла диодной структуры  $2,5 \times 2,5 \text{ мм}$ ), с номинальным обратным напряжением 60 В – более  $0,37 \text{ мм}^2$  (размер кристалла диодной структуры  $4,57 \times 4,57 \text{ мм}$ ) и не обеспечивается для структур с номинальным обратным напряжением 100 В.

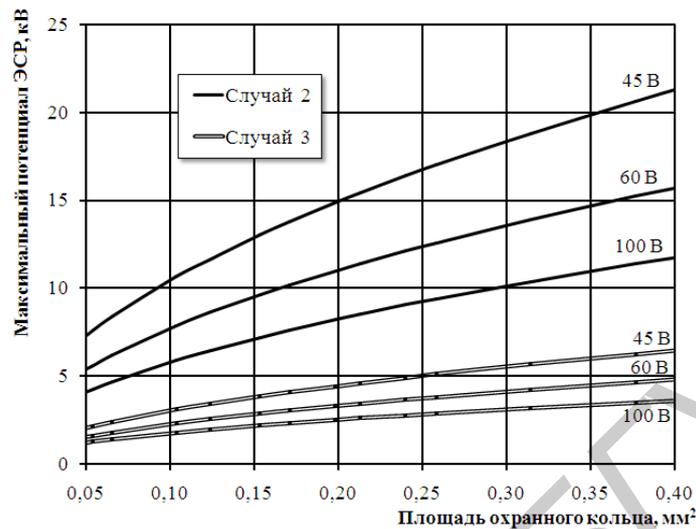


Рис. 4. Зависимости максимально допустимых потенциалов импульсов ЭСР отрицательной полярности для диодов Шоттки от величины обратных напряжений и площади охранного кольца

Таким образом, приведенные расчеты для случая 2 указывают на необходимость повышения стойкости диодных структур в диапазоне номинальных обратных напряжений от 45 до 100 В и площади  $p$ - $n$ -переходов охранного кольца даже  $0,6 \text{ мм}^2$  и более. То есть, диодные структуры, соответствующие случаю 3 критерия Вунша–Белла, не обеспечивают стойкость к импульсам ЭСР отрицательной полярности структур малой площади, в особенности при наибольшем номинальном обратном напряжении.

Также видно, что для одинаковых значений дифференциального сопротивления для случая 3 максимально допустимый потенциал импульса ЭСР отрицательной полярности более 15 кВ не обеспечивается для диодных структур в диапазоне номинальных обратных напряжений от 45 до 100 В и площади  $p$ - $n$ -переходов охранного кольца от  $0,6 \text{ мм}^2$  и более. То есть, диодные структуры, соответствующие случаю 3 критерия Вунша–Белла, не обеспечивают стойкость к импульсам ЭСР отрицательной полярности.

### Заключение

1. На основе критериев Вунша–Белла разработана методика расчета максимальных допустимых потенциалов импульсов ЭСР положительной и отрицательной полярности, воздействующих на структуру диодов Шоттки с охранным кольцом, в соответствии с моделью человека, держащего металлический предмет (метод ИЕС 61000-4-2).

2. Расчеты показывают, что структура диода Шоттки с охранным кольцом с площадью контакта металл–кремний более  $0,3 \text{ мм}^2$  и обратным напряжением до 120 В обеспечивает стойкость к воздействию импульсов ЭСР положительной полярности с напряжением до 15 кВ.

3. Стойкость диодов Шоттки с охранным кольцом к воздействию импульсов ЭСР отрицательной полярности с потенциалом 15 кВ в рамках критерия Вунша–Белла, соответствующего случаю 2 (отказ при воздействии импульса ЭСР обусловлен плавлением кремния), обеспечивается для структур с номинальным обратным напряжением 45 В при площади  $p$ - $n$ -перехода охранного кольца более  $0,2 \text{ мм}^2$  с номинальным обратным напряжением 60 В – более  $0,37 \text{ мм}^2$ , и не обеспечивается для структур с номинальным обратным напряжением 100 В.

4. Для обеспечения стойкости диодов Шоттки к ЭСР целесообразно определить ключевые конструктивно-технологические факторы, непосредственно влияющие на устойчивость диодов Шоттки к воздействию импульсов отрицательной полярности, и обеспечить их соответствие случаю 2 критерия Вунша–Белла.

# FORECASTING OF MAXIMALLY ADMISSIBLE POTENTIALS OF THE STATIC ELECTRICITY CATEGORIES AND THEIR INFLUENCE TO THE SHOTTKI DIODES

V.A. SOLODUCHA, V.L. LANIN, Y.A. SOLOV'YOV

## Abstract

The forecasting technique of admissible potentials of the static electricity categories of positive and negative polarity with voltage to 15 kV on structures of diodes Shottki with the guard ring is offered.

## Список литературы

1. Горлов М.И., Емельянов А.В., Плебанович В.И. Электростатические заряды в электронике. Минск, 2006.
2. Строгонов А., Горлов М. // Компоненты и технологии. 2008. № 3. С. 188–192.
3. Кечиев Л.Н., Пожидаева Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М., 2005.
4. Пискун Г.А., Алексеев В.Ф., Ланин В.Л. и др. // Докл. БГУИР. 2014, № 4 (82). С. 16–22.
5. ГОСТ 30804.4.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.
6. Солодуха В.А., Турцевич А.С., Соловьев Я.А. и др. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2012. № 5. С. 22–26.
7. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984.
8. Джоветт Ч.Е. Статическое электричество в электронике. М., 1980.