

УДК 621.315.5

## Влияние параметров границы раздела полупроводник-диэлектрик на ток охранного кольца кремниевых фотодиодов

С. С. Демидов, Е. А. Климанов

Приведены соотношения, определяющие требования к сопротивлению инверсионного слоя для уменьшения влияния тока охранного кольца на темновой ток и шумы фотодиодов, и получения заданного значения коэффициента взаимосвязи между ФЧЭ в многоэлементных ФД. Показано, что зависимости тока охранного кольца от напряжения смещения и заряда на границе раздела Si—SiO<sub>2</sub> при наличии инверсионного слоя удовлетворяют модели генерации тока в его области пространственного заряда. Сопротивление инверсионного слоя возрастает с ростом напряжения смещения в соответствии с зависимостью  $R_u \sim V^{1,5}$ .

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: полупроводник, диэлектрик, фотодиод, шум, ток, охранное кольцо.

### Введение

Значительный вклад в шумы фотодиодов (ФД) могут вносить токи утечки, создаваемые инверсионными слоями, возникающими на поверхности базовой области с низкой концентрацией легирующей примеси, например, в кремниевых  $p-i-n$ -фотодиодах, изготавливаемых на подложках  $p$ -типа.

Одним из известных способов снижения их влияния на темновые токи и шумы фоточувствительных элементов (ФЧЭ) является использование двух типов охранных колец: изолирующих периферию за счет высокой концентрации основных носителей, а именно, кольцо  $p^+$ -типа на подложке  $p$ -типа и кольцевые  $n^+-p$ -переходы, включенные в цепь, параллельную сигнальной цепи ФЧЭ [1, 2, 5, 6].

Другим важным параметром является коэффициент взаимосвязи между ФЧЭ в многоэлементных фотодиодах, который также увеличивается при наличии на поверхности инверсионных слоев.

Целью настоящей работы является исследование технологических факторов, влияющих на ток охранного кольца второго типа  $I_k$  и коэффициент взаимосвязи  $k$ .

### Влияние тока охранного кольца и сопротивления инверсионного слоя на параметры ФД

Из эквивалентной схемы ФД с охранным кольцом следует выражение для темнового тока, протекающего через сопротивление нагрузки, оценивающее вклад в него тока охранного кольца  $I_k$ :

$$I_n = I_{\text{ФЧЭ}} \frac{R_u + R_n}{R_u + R_n + R_k} + I_k \frac{R_k}{R_u + R_n + R_k}, \quad (1)$$

где  $I_{\text{ФЧЭ}}$ ,  $I_k$  — темновые токи ФЧЭ и охранного кольца,  $R_n$ ,  $R_k$ ,  $R_u$  — сопротивления нагрузки, охранного кольца и инверсионного слоя между охранным кольцом и ФЧЭ.

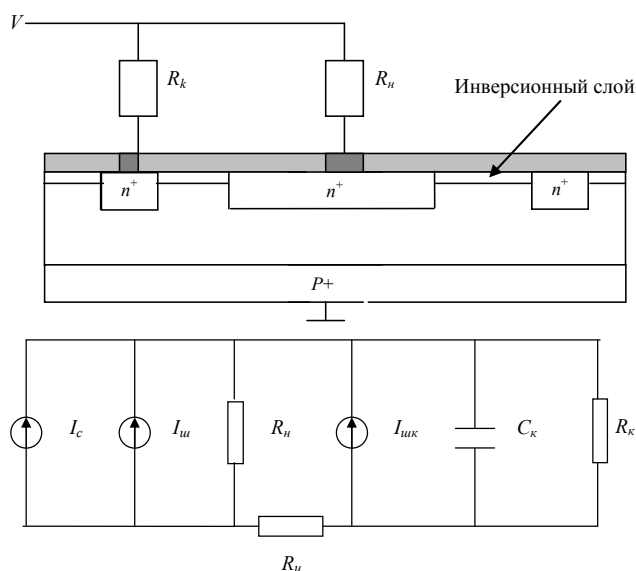


Рис. 1. Схема включения фотодиода с охранным кольцом и эквивалентная схема на переменном токе:  $I_c$ ,  $I_u$ ,  $I_{\text{ФЧЭ}}$  — сигнальный, шумовой токи ФЧЭ,  $I_k$  — шумовой ток кольца

Демидов Станислав Стефанович, ст. научный сотрудник.  
Климанов Евгений Алексеевич, гл. научный сотрудник.  
ОАО «НПО «Орион».  
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 10 августа 2014 г.

© Демидов С. С., Климанов Е. А., 2014

Из эквивалентной схемы на переменном токе (рис. 1) следуют ограничения, накладываемые на сопротивление инверсионного слоя между ФЧЭ и ФЧЭ и охранным кольцом для уменьшения его влияния на коэффициент взаимосвязи  $k$ , а также влияния тока кольца на  $I_n$ :

$$R_u > R_n, R_k, \quad R_u > |z_n| [(1/k) - 1], \quad (2)$$

где  $|z_n|$  — модуль эффективной нагрузки ФЧЭ. Дополнительное ограничение вытекает из условия минимизации вклада теплового шума  $R_u$  в общий шум ФД

$$R_u > 2kT / I_d.$$

Обычно последнее условие является наиболее жестким.

### Зависимости тока охранного кольца и сопротивления инверсионного слоя от напряжения и заряда на границе раздела

#### Ток охранного кольца

Если величина тока охранного кольца определяется генерационным током, возникающим в области пространственного заряда (ОПЗ) инверсионного слоя, то его величина определяется выражением, вытекающим из соотношения, полученного в работе [3] для ограниченного канала:

$$I_k^2 = \left[ \frac{n_i \mu_s \varepsilon \varepsilon_0 kT}{2\tau} P^2 \exp\left(\frac{q\phi_s}{kT}\right) \exp(q(E_f - E_i) / kT) \right] V, \quad (3)$$

где  $\mu_s$ ,  $\phi_s$ ,  $P$ ,  $V$  — подвижность электронов в инверсионном слое, поверхностный потенциал, периметр охранного кольца и приложенное напряжение, соответственно;  $E_f$ ,  $E_i$  — уровни Ферми и середины запрещенной зоны.

В случае инверсии на границе раздела также справедливо соотношение из работы [4]:

$$Q_{ss} = \sqrt{\frac{2kTn}{\varepsilon \varepsilon_0}} \exp\left(\frac{q\phi_s}{kT}\right), \quad (4)$$

где  $Q_{ss}$  — величина заряда на границе раздела полупроводник-диэлектрик,  $n$  — концентрация электронов в объеме полупроводника.

Отсюда, используя (3, 4), получаем выражение для тока охранного кольца:

$$I_k^2 = \left[ \mu_s P^2 \left(\frac{n_i}{2\tau}\right) p^{-1} Q_{ss}^2 \right] V, \quad (5)$$

где  $p$  — концентрация основных носителей в подложке.

Экспериментальные вольт-амперные характеристики (ВАХ) охранного кольца для нескольких кремниевых фотодиодов, приведенные на рис. 2, качественно подтверждают зависимости  $I_k$  от  $V$ ,  $Q_{ss}$  и  $n$ , следующие из выражения (5):

$$I_k \sim V^{0.5}, \quad I_k \sim Q_{ss}, \quad I_k \sim p^{-1/2}.$$

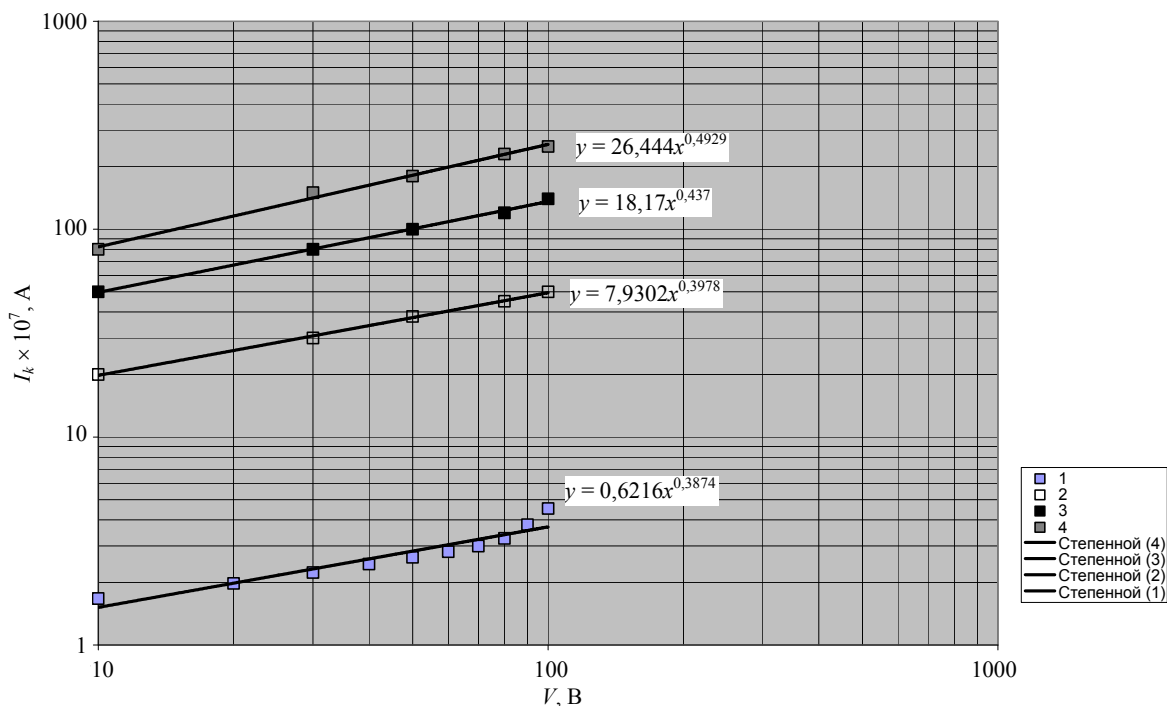


Рис. 2. ВАХ охранного кольца при различной плотности фиксированного заряда  $Q_{ss}$  и концентрации дырок в подложке:  $Q_{ss}/q = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  (4),  $2,5 \cdot 10^{11}$  (3),  $4 \cdot 10^{10}$  (2),  $p_0 = 10^{12} \text{ см}^{-3}$ ; 1 —  $p_0 = 10^{15} \text{ см}^{-3}$

Генерационная природа  $I_k$  подтверждается также сравнением температурных зависимостей тока ФЧЭ и охранного кольца (рис. 3). Температурная зависимость тока охранного кольца более слабая, что соответствует зависимостям:

$$I_{\text{ФЧЭ}}(T) \sim (n_i/\tau), I_k(T) \sim (n_i/\tau)^{1/2}.$$

Следует отметить, что наблюдаемые отклонения от приведенной зависимости  $I_k \sim V^{0,5}$  в работе [5] могут быть связаны с распространением инверсионного слоя с высокой проводимостью (малым  $R_u$ ) до периферии кристалла.

Следовательно, снижение тока охранного кольца достигается увеличением времени жизни носителей заряда в ОПЗ инверсионного слоя и снижением величины  $Q_{ss}$  на границе раздела. Достижение той же цели увеличением концентрации основных носителей в приповерхностной области

ограничивается требуемой величиной рабочего напряжения ФД.

### Сопротивление инверсионного слоя

Величина сопротивления инверсионного слоя  $R_u$  зависит от  $Q_{ss}$  и напряжения смещения на ФЧЭ и охранном кольце  $V$ .

Зависимость  $R_u$  от напряжения измерялась на переменном токе на частоте 20 Гц при амплитуде переменного сигнала  $\sim 50$  мВ для устранения влияния реактивных параметров цепи и при одинаковых потенциалах, приложенных к соседним с ним ФЧЭ. Полученные зависимости (рис. 4) показывают значительное возрастание  $R_u$  с увеличением напряжения смещения в соответствии с приближенной зависимостью  $R_u \sim V^{1,5}$ , что приводит к уменьшению влияния инверсионного слоя на параметры ФД в соответствии с соотношениями (2).

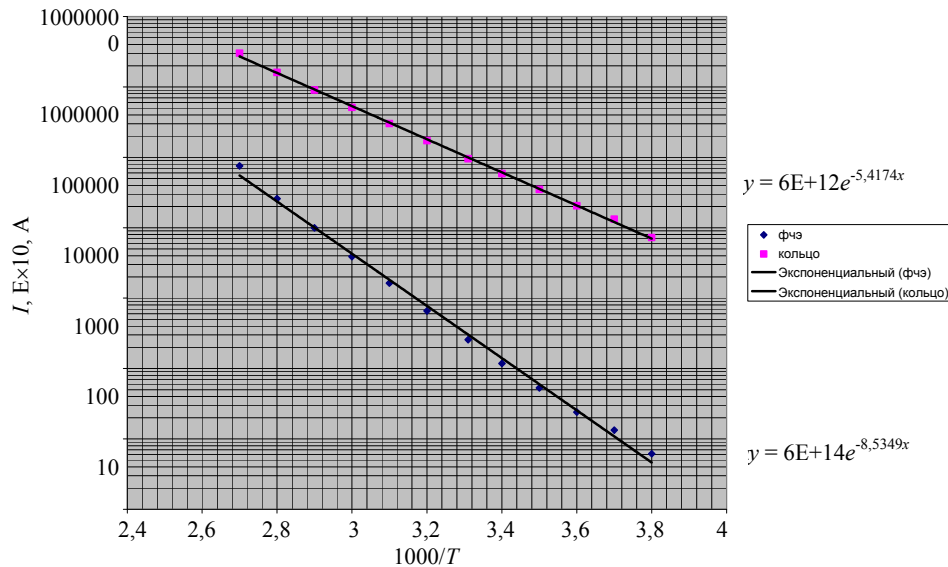


Рис. 3. Температурные зависимости фоточувствительного элемента и охранного кольца

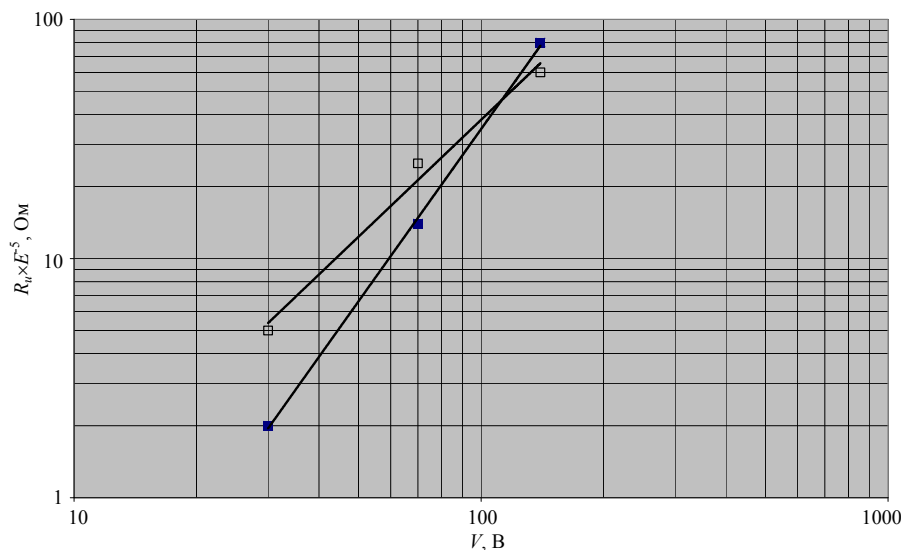


Рис. 4. Зависимость сопротивления инверсионного слоя  $R_u$  от напряжения  $V$

Приведенную зависимость от напряжения смещения можно качественно объяснить следующим образом. В работах [7, 8] для диодов с полевым электродом получены зависимости величины заряда в инверсионном слое от напряжения на полевом электроде  $V_g$  и напряжения смещения между каналом и подложкой ( $V_c - V_b$ ):

$$Q_n = -C_{ox}(V_g - V_{FB} - V_c - 2\phi_p) + [2\varepsilon_s q N_A (2\phi_p + (V_c - V_b))]^{0,5}, \quad (6)$$

где  $V_{FB}$ ,  $C_{ox}$ ,  $\phi_p$ ,  $N_A$  — напряжение плоских зон, удельная емкость окисла, потенциал Ферми и концентрация акцепторов в полупроводнике.

Используя (6), можно получить выражение для изменения концентрации электронов в инверсионном слое при приложении обратного смещения между каналом и подложкой:

$$\delta n = -\frac{1}{q} C_{ox} (V_c - V_b) - \left[ \frac{1}{q} \varepsilon_s N_A (V_c - V_b) \right]^{0,5}, \quad (7)$$

из которого следует почти линейная зависимость снижения концентрации электронов в инверсионном слое от ( $V_c - V_b$ ). Более резкая зависимость проводимости  $\sigma = qn\mu$  от смещения может объясняться снижением подвижности  $\mu$  при увеличении вертикальной составляющей электрического поля в слое [7, 9, 10].

В таблице приведены данные по распределению значений темновых токов и коэффициентов взаимосвязи при  $V = 135$  В для  $p-i-n$ -ФД с площадью ФЧЭ  $38,5 \text{ мм}^2$ , изготовленных в одной партии, в зависимости от величины  $Q_{ss}$  на границе раздела Si — SiO<sub>2</sub>. Экспериментальные данные качественно подтверждают приведенные закономерности. Различная величина  $Q_{ss}$  достигалась использованием подложек с разной ориентацией поверхности.

### Заключение

В работе приведены соотношения, определяющие требования к сопротивлению инверсионного слоя для уменьшения влияния тока охранного кольца на темновой ток и шумы фотодиодов, а также для получения заданного значения коэффициента взаимосвязи между ФЧЭ в многоэлементных ФД.

Показано, что зависимости тока охранного кольца от напряжения смещения и заряда на границе раздела Si — SiO<sub>2</sub> при наличии инверсионного слоя удовлетворяют модели генерации тока в его области пространственного заряда.

Сопротивление инверсионного слоя возрастает с ростом напряжения смещения в соответствии с зависимостью  $R_u \sim V^{1,5}$ , что качественно объясняется уменьшением концентрации носителей в инверсионном слое при увеличении напряжения между слоем и подложкой.

Таблица

Средняя величина $Q_{ss}/q$ , $\text{см}^{-2}$	Процент приборов со значениями коэффициента взаимосвязи (%)		
	$\leq 1$	1—2	2—3
$5 \cdot 10^{11}$	11	33	56
$8,5 \cdot 10^{10}$	50	52	8
	Процент приборов со значениями темнового тока (мкА)		
	0,01—0,1	0,1—1,0	1,0—10,0
$5 \cdot 10^{11}$	36	36	28
$8,5 \cdot 10^{10}$	46	54	0

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

### Литература

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. — М.: Физматкнига. 2011.
2. Wendland P. // Electro-optical systems design. 1970. No. 8.

3. Климанов Е. А., Кульманов А. В., Лисейкин В. П. и др. // Радиотехника и электроника. 1976. Т. 21. № 9. С. 1967.
4. Inkson J. C. // Solid-State Electronics. 1970. V. 13. P. 1167.
5. Кофтолюк Н. Ф. Электронные элементы на основе структур полупроводник — диэлектрик. — М.: Энергия. 1976.
6. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. и др. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 79.
7. Астахов В. П., Болесов И. А., Гиндин Д. А. и др. // Прикладная физика. 2002. № 1. С. 48.
8. Grove A. S., Fitzgerald D. J. // Solid-State Electronics. 1966. V. 9. P. 783.
9. Миллер Р., Клейминс Т. Элементы интегральных схем. — М., Мир. 1989.

10. Stats H., deMass G. A., L. Davis, et al. // Physical Review. V. 101. No. 4. P. 1272.

11. Remashan K., Wong N. A., Chan K., et al. // Solid-State Electronics. 2002. V. 46. P. 153.

## Influence of parameters of a semiconductor-dielectric border on the current of a guard ring for silicon photodiodes

S. S. Demidov and E. A. Klimanov

Orion R&P Association  
46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received August 10, 2014

*Investigated is influence of parameters of a semiconductor-dielectric border on the current of a guard ring for silicon photodiodes. It is shown that a resistance of the inversion layer increases with grow of electrical bias as  $R_u \sim V^{1.5}$ .*

PACS: 85.60.-q

*Keywords:* semiconductor, dielectric, photodiode, noise, currentm guard ring.

### References

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. P. Wendland, *Electro-Optical Systems Design*, No. 8, (1970).
3. E. A. Klimanov, A. V. Kulymanov, V. P. Liseikin, et al., *J. Commun. Technol. Electron.* **21**, 1967 (1976).
4. J. C. Inkson, *Solid-State Electronics.* **13**, 1167 (1970).
5. N. F. Koftonyuk, *Electron Elements on Base of Semiconductor-Dielectric Structures* (Energia, Moscow, 1976) [in Russian].
6. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, V. V. Karpov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 79 (1999).
7. V. P. Astakhov, I. A. Bolesov, D. A. Gindin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 48 (2002).
8. A. S. Grove and D. J. Fitzgerald, *Solid-State Electronics* **9**, 783 (1966).
9. R. Miller and T. Kleimins, *Elements of Integrated Chips* (Mir, Moscow, 1989) [in Russian].
10. H. Stats, G. A. deMass, L. Davis, et al., *Physical Review* **101**, 1272.
11. K. Remashan, N. A. Wong, K. Chan, et al., *Solid-State Electronics* **46**, 153 (2002).