

Влияние кольцевой неоднородности распределения времени жизни носителей заряда в кремниевых пластинах на параметры фотодиодов

М. Н. Вильдяева, С. С. Демидов, Е. А. Климанов, А. В. Ляликов, А. С. Фокина

Методом спада фотопроводимости μ -PCD в образцах кремниевых пластин n -типа, выращенных методом Чохральского, обнаружены кольцевые неоднородности в распределении времени жизни неосновных носителей заряда, отсутствующие или слабо выраженные в кремнии p -типа. Средняя величина указанных неоднородностей возрастает при проведении термических операций при изготовлении фотодиодов. Обнаруженные кольцевые неоднородности в распределении времени жизни коррелируют с неоднородностями в распределении фото- и темнового тока фотодиодов, изготовленных на исследованных пластинах.

Ключевые слова: кремниевые фотодиоды, неоднородность времени жизни, темновой ток, чувствительность.

Введение

Кремниевые фотодиоды (ФД) в течение многих лет используются во многих оптоэлектронных устройствах видимого и ближнего ИК-диапазона. Однако совершенствование кремниевой технологии позволяет улучшать их параметры и увеличивать выход годных изделий.

Основными параметрами фотодиодов, определяющими их пороговые характеристики, являются темновые токи и токовая чувствительность. Для многоэлементных ФД важным параметром также является разброс чувствительности между элементами. В настоящее время известны исследования влияния ростовых неоднородностей в кремнии (страт) на снижение эффективности солнечных элементов [1–4] и высказываются предположения о типах дефектов, ответственных за этот эффект [1, 2].

Целью данной работы являлось исследование влияния страт в кремнии и технологических про-

цессов на основные параметры кремниевых фотодиодов.

Изготовление образцов

В качестве исходного материала для исследования неоднородностей в распределении времени жизни использовались кремниевые пластины n и p -типа диаметром 100 мм, ориентацией (100) и удельным сопротивлением 4,5 (КЭФ-4,5) и 10 Ом см (КДБ-10) соответственно, выращенные методом Чохральского.

Фотодиоды изготавливались из аналогичных пластин n -типа и представляли собой линейки фотодиодов с размерами фоточувствительных площадок 1,4×1,4 мм и общими размерами кристалла 26×2,8 мм.

Для изготовления ФД использовалась стандартная планарная диффузионная технология с термической двуокисью кремния (SiO_2) в качестве пассивирующего диэлектрика. Технология имела следующие особенности:

- применение термического окисления при относительно низкой температуре 950 °С;
- использование для антиотражающего покрытия SiO_2 , получаемой пиролизом тетраэтоксисилана (ТЭОС) при температуре 800 °С, что позволяло надежно контролировать его толщину;
- использование операции геттерирования сильнолегированным диффузионным слоем фосфора [5];
- формирование мелкого p – n -перехода для увеличения чувствительности в коротковолновом диапазоне.

Вильдяева Мария Николаевна¹, студентка.

Демидов Станислав Стефанович², старший научный сотрудник, к.т.н.

Климанов Евгений Алексеевич^{1,2}, главный научный сотрудник, профессор, д.т.н.

Ляликов Алексей Владимирович², ведущий инженер.

Фокина Алёна Сергеевна², инженер 2 кат.

¹ Московский технологический университет (МИРЭА). Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

² АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 30 мая 2017 г.

© Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Фокина А. С., 2017

Измерения параметров

Темновые токи и ампер-ваттная чувствительность измерялись на пластинах и отдельных кристаллах с помощью автоматизированной зондовой установки «Зонд-А5». Чувствительность определялась с использованием полупроводниковых излучателей с длинами волн 0,5 и 0,86 мкм. На отдельных образцах измерялась интегральная чувствительность к источнику «А». Время жизни носителей заряда в образцах оценивалась методом спада фотопроводимости μ -PCD на установке Semilab Model WT-2000 с использованием излучения с длиной волны 0,9 мкм [6–8].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Были проведены измерения времени жизни носителей в исходных кремниевых пластинах n - и p -типа, а также после проведения основных термических операций, используемых при изготовлении ФД, а именно: термического окисления, диф-

фузии бора и диффузии фосфора в режиме геттерирования. При этом были получены следующие основные результаты:

- в пластинах n -типа наблюдалась кольцевая картина неоднородного распределения времени жизни τ , которая отсутствовала или была слабо выражена в пластинах p -типа (см. рис. 1);
- характер распределения τ в образцах сохранялся после проведения термических операций и в готовых фотодиодных структурах (см. рис. 2);
- средние $\tau_{\text{ср}}$ и медианные $\tau_{\text{м}}$ значения времени жизни резко снижались после операции окисления и возрастали на последующих операциях, достигая в образцах n -типа после геттерирования значений близких к исходным (см. таблицу);
- разброс значений времени жизни в пластинах (девиация $\frac{\delta\tau}{\tau_{\text{ср}}}$) увеличивался после проведения термических операций, достигая наибольших значений после диффузии фосфора (операции геттерирования), что отражено в таблице.

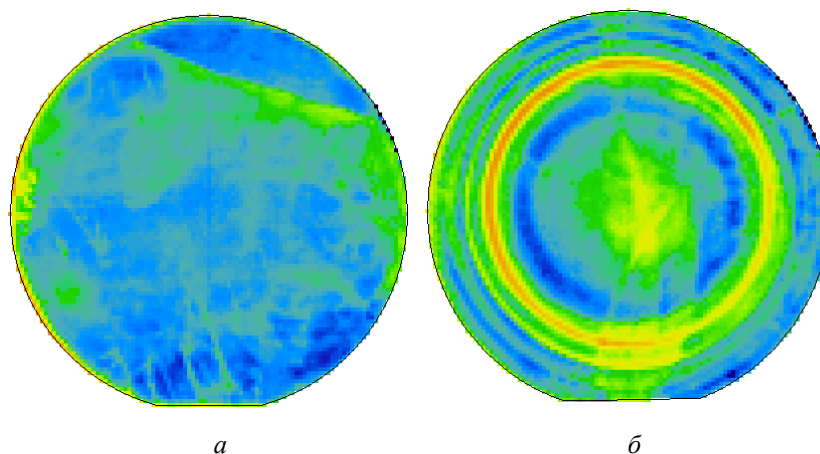


Рис. 1. Распределение времени жизни носителей заряда в пластинах: а) пластины p -типа; б) пластины n -типа.

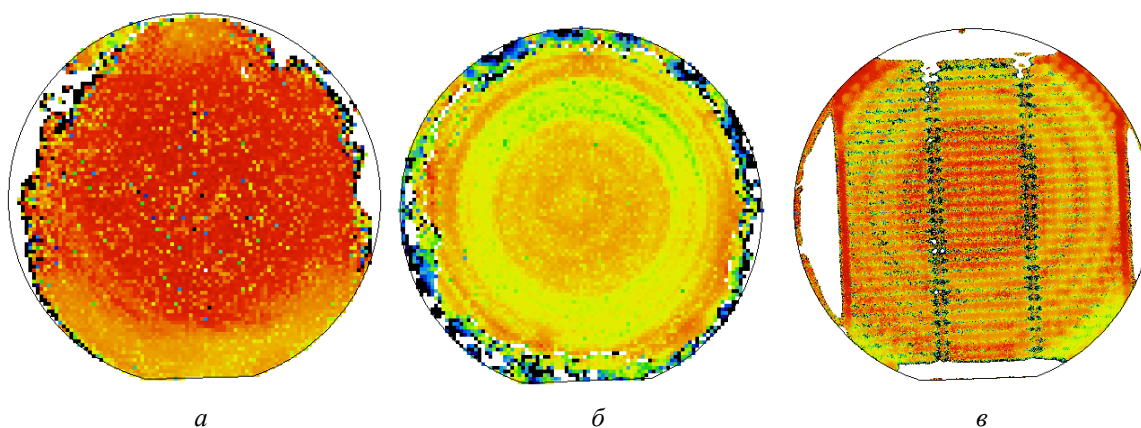


Рис. 2. Распределение времени жизни носителей заряда в пластинах p - (а) и n -типа (б) после диффузии фосфора, а также в фотодиодной структуре (в).

Таблица

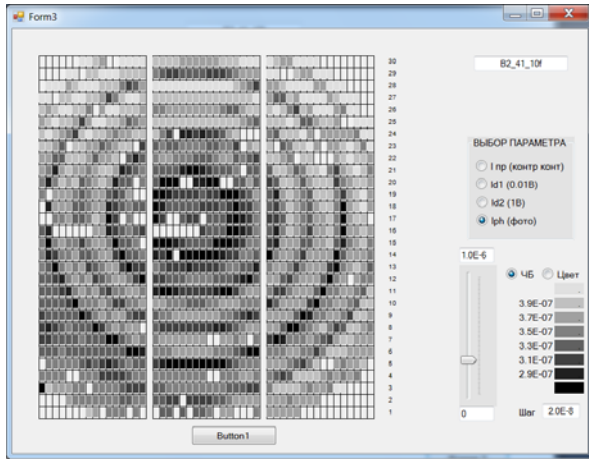
Результаты измерений

Операция	Номер образца											
	КДБ-10-3			КДБ-10-4			КЭФ-4,5-3			КЭФ-4,5-4		
	$\tau_{ср}$, мкс	τ_M , мкс	$\frac{\delta\tau}{\tau_{ср}}$	$\tau_{ср}$, мкс	τ_M , мкс	$\frac{\delta\tau}{\tau_{ср}}$	$\tau_{ср}$, мкс	τ_M , мкс	$\frac{\delta\tau}{\tau_{ср}}$	$\tau_{ср}$, мкс	τ_M , мкс	$\frac{\delta\tau}{\tau_{ср}}$
Хим. обработка	9,33	9,83	93,31	10,12	10,22	44,03	13,03	12,87	16,66	13,03	12,87	16,66
Окисление	1,04	1,06	76,02	1,17	1,21	38,11	3,27	3,46	52,74	3,55	3,67	31,36
Диффузия бора	2,14	2,04	68,99	2,04	2,12	70,98	5,37	5,49	33,44	5,07	4,99	40,18
Диффузия фосфора	2,66	7,12	416,25	2,19	6,04	394,02	8,81	11,84	192,46	7,67	9,38	227,62

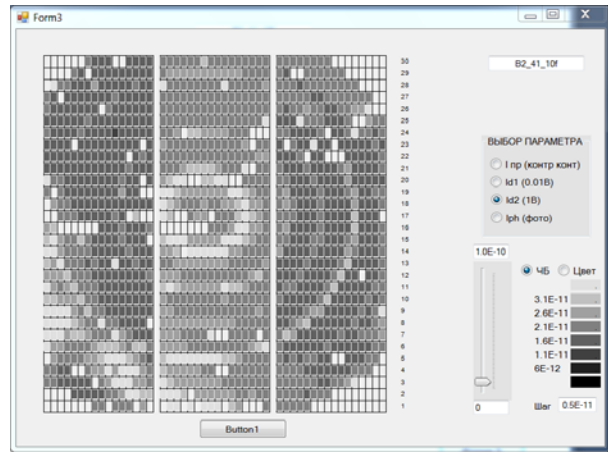
Сравнение распределений времени жизни, фото- и темновых токов

Приведенные на рис. 3 распределения времени жизни неосновных носителей заряда τ , фотото-

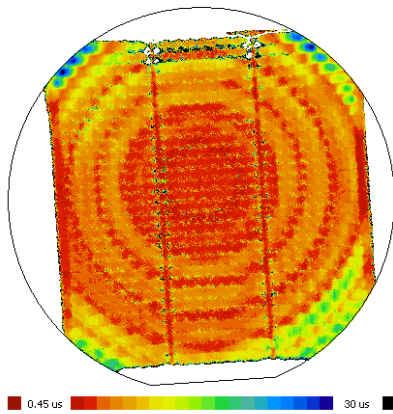
ка и темнового тока на одной из пластин n -типа подобны, что свидетельствует о влиянии неоднородностей в распределении τ на указанные параметры фотодиодов.



а



б



в

Рис. 3. Сравнение распределений по площади пластины фототока (а), темнового тока (б) и времени жизни неосновных носителей заряда (в).

Это подтверждается также наличием статистических зависимостей между величинами темновых токов I_T и фототоков I_ϕ и времени жизни τ_p , полученных из измерений распределений этих параметров по диаметру пластин (см. рис. 4), кото-

рые описываются следующими соотношениями для средних значений: для связи темнового и фототока $I_T = 9,68 I_\phi^{-0,86}$ (при 0,01 В) и $I_T = 137,88 I_\phi^{-1,3}$ (при 1 В); для фототока и времени жизни $I_\phi^- = 2,37\tau^{0,13}$.

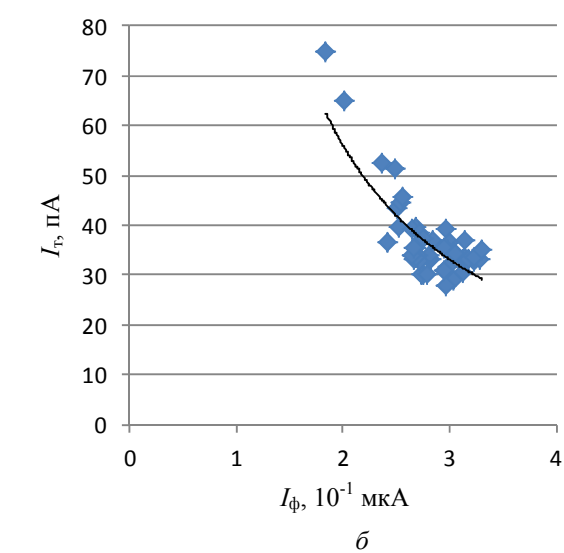
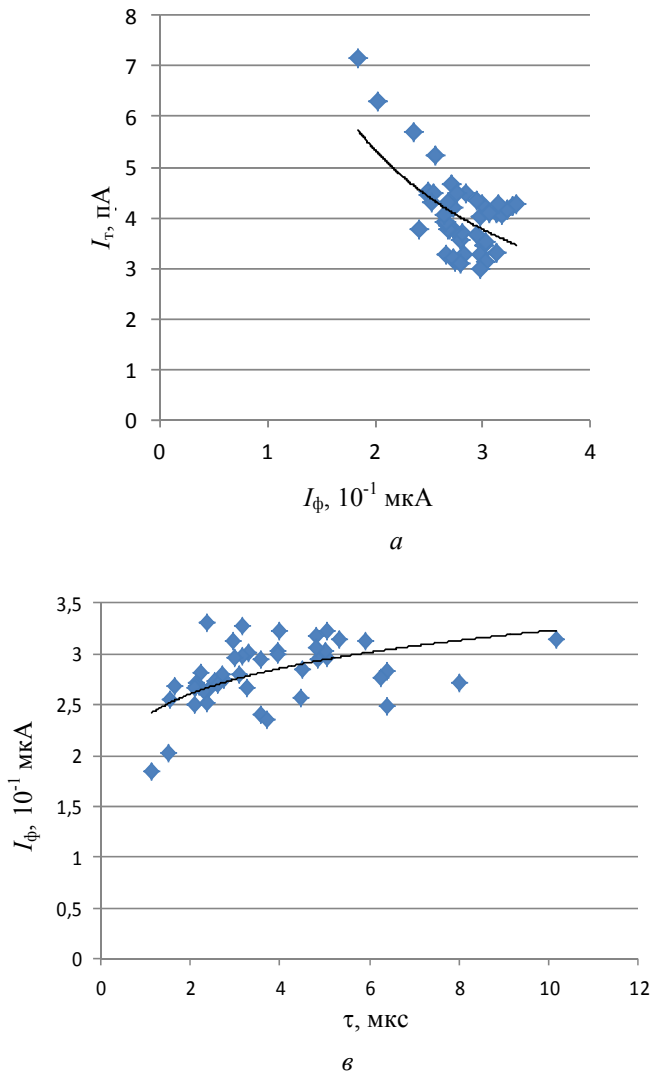


Рис. 4. Соотношения между темновым током и фототоком (а – $V = 0,01$ В, б – $V = 1$ В) и фототоком и временем жизни неосновных носителей заряда (в).

Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о существовании неоднородностей в распределении времени жизни неосновных носителей заряда τ_p , возникающих при выращивании кремния и сохраняющихся в материале во время проведения высокотемпературных технологических операций, несмотря на значительные изменения в абсолютной величине этого параметра. Кольцевой характер распределения τ_p сходен с известным распределением концентрации легирующих примесей – стратами роста, что позволяет считать их, в согласии с работами [1–4], возможной причиной неоднородного распределения τ_p по площади пластин.

Как показывают полученные результаты, неоднородные распределения τ_p вызывают подобные неоднородности в распределении основных параметров фотодиодов: фототока и, следовательно, чувствительности, а также темнового тока.

Приведенные зависимости можно объяснить следующим образом.

Наблюдаемая для исследованных образцов корреляционная зависимость темнового тока от фототока, близкая к обратно-пропорциональной (рис. 4, а, б) должна выполняться при преобладании в темновом токе диффузионной компоненты, поскольку в этом случае $I_T \sim \tau_p^{-1/2}$, $I_\phi \sim \tau_p^{+1/2}$, что подтверждается измеренными зависимостями I_T от температуры с энергией активации, близкой к ширине запрещенной зоны кремния 1,1–1,2 эВ в диапазоне напряжений 0,01–1 В.

Связь между разбросами в величинах τ_p и фототока (чувствительности) можно найти с помощью известного выражения из работ [8, 9], справедливого при $d \gg L_p$:

$$I_\phi = q\eta(1-R)Q_0 \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} A, \tag{1}$$

где d – толщина базы фотодиода, L_p – диффузионная длина дырок в базе фотодиода, α – коэффициент поглощения излучения, η – квантовая эффективность, R – коэффициент отражения, Q_0 – поток

фотонов, A – площадь фоточувствительного элемента.

Отсюда следует соотношение:

$$\frac{\delta I_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{1}{2} \frac{1}{(1 + \alpha L_p)} \frac{\delta \tau_p}{\tau_p}. \quad (2)$$

Поскольку при измерениях фототока использовалась длина волны излучателя $\lambda = 0,85$ мкм ($\alpha \approx 300 \text{ см}^{-1}$), а типичное значение $L_p = 50\text{--}100$ мкм, то из соотношения (2) следует коэффициент пропорциональности порядка 0,1. Таким образом, разброс значений τ_p в 200 % приводит к разбросу значений фототока (чувствительности) в 15–20 %, что и наблюдается в эксперименте. Из соотношения (1) следует также зависимость I_{ϕ} от τ_p , близкая к корневой, но более слабая, что согласуется с характером корреляционной зависимости между ними (рис. 4, в).

Необходимо, однако, отметить, что указанные значения разброса чувствительности могут превышать типичные требования к разбросу чувствительности для многоэлементных фотодиодов (≤ 10 %). Кроме этого, разброс увеличивается при увеличении длин волн регистрируемого излучения (уменьшении произведения αL_p), например, для излучения от источника «А». Отсюда вытекает необходимость предварительной отбраковки пластин по разбросу величины времени жизни носителей заряда.

Природа дефектов, вызывающих неоднородности в распределении τ , в настоящее время неизвестна. В качестве основных в литературе обсуждаются дефекты упаковки и кислородные комплексы [1, 2]. В исследованных нами образцах наблюдалось кольцевое распределение дефектов упаковки, выявляемых селективным травлением после термического окисления. Однако после операции геттерирования наблюдались лишь отдельные линейные дислокации, что свидетельствует об аннигиляции дефектов упаковки при диффузии фосфора с высокой концентрацией, что наблюдалось и в кремнии, выращиваемым бестигельной зонной плавкой. [5]. Таким образом, выяснение природы дефектов, а также причин отсутствия подобных неоднородностей в кремнии p -типа требуют дальнейших исследований.

Выводы

В работе методом спада фотопроводимости μ -PCD в образцах кремниевых пластин n -типа, выращенных методом Чохральского, обнаружены кольцевые неоднородности в распределении времени жизни неосновных носителей заряда, отсутствующие или слабо выраженные в кремнии p -типа.

Средняя величина указанных неоднородностей возрастает при проведении термических операций при изготовлении фотодиодов.

Обнаруженные кольцевые неоднородности в распределении времени жизни коррелируют с неоднородностями в распределении фото- и темнового тока фотодиодов, изготовленных на исследованных пластинах.

Указанные неоднородности приводят к заметным разбросам в фоточувствительности в многоэлементных фотодиодах.

Возможной причиной неоднородностей являются страты роста, однако выяснение природы генерационно-рекомбинационных центров, определяющих значения τ_p , I_p , I_d , требует дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Donne A. Le, Binetti S., Folegatti V., and Coletti G. // Applied Physics Letters. 2016. Vol. 109. P. 033907.
2. ZHOU Chun-lan, WANG Wen-Jing, LI Hai-Ling, ZHAO Lei, DIAO Hong-Wei, LI-Xu-Dong // Chinese Physical Letters. 2008. Vol. 25. No. 6. P. 3005.
3. Coletti G., Manshanden P., Bernardini S., Bronsveld P. S. P., Gutjahr A., Hu Z., Li G. // Solar Energy Materials and Solar Cells. 2014. Vol. 130. P. 647.
4. Yu Hu, H. Schön, Ø. Nielsen, E. J. Övrelid, and Arnberg // Journal of Applied Physics. 2012. Vol. 111. P. 053101.
5. Климанов Е. А. // Прикладная физика. 2011. № 6. С. 133.
6. Measurement System for the Semiconductor Industry WT-2000, User Manual.
7. Msaad H., Michel J., Reddy A., Kimerling L. C. // J. Electrochemical Society. 1995. Vol. 142. No. 8. P. 2833.
8. Rotondaro A. L. P., Hurd T. Q., Kaniava A., Vanhellefont J., Simoen E., Heyns M. M., Claeys C., Brown G. // J. Electrochemical Society. 1996. Vol. 143. No. 9. P. 3014.
9. Аут И., Генцов Д., Герман К. Фотоэлектрические явления. – М.: Мир, 1980.
10. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматлит, 2011.

Influence of a ring distribution carrier lifetime in the silicon on parameters photodiodes

M. N. Vil'dyaeva¹, S. S. Demidov², E. A. Klimanov^{1,2}, A. V. Lyalikov², and A. S. Fokina²

¹Moscow Technological University (MIREA)
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

²Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received May 30, 2017

The microwave-detected photoconductance decay (μ -PCD) was used to monitor the ring distribution minority carrier lifetime in the n-type Czochralski (Cz) silicon substrates. This ring patterns are not observed in p-type silicon. The increase in ring-like patterns size after high temperature treatments for the photodiodes realization was observed. Strong correlation was observed between distributions carrier lifetime, photo- and dark currents in investigated wafers.

Keywords: silicon photodiodes, inhomogeneity of the lifetime, dark current, sensitivity.

REFERENCES

1. A. Le Donne, S. Binetti, V. Folegatti, and G. Coletti, *Applied Physics Letters*, **109**, 033907 (2016).
2. ZHOU Chun-lan, WANG Wen-Jing, LI Hai-Ling, ZHAO Lei, DIAO Hong-Wei, and LI-Xu-Dong, *Chinese Physical Letters* **25**, 3005 (2008).
3. G. Coletti, P. Manshanden, S., Bernardini, P. S. P. Bronsveld, A. Gutjahr, Z. Hu, and G. Li, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **130**, 647 (2014).
4. Yu Hu, H. Schøn, Ø. Nielsen, E. J. Øvrelid, and Arnberg, *Journal of Applied Physics* **111**, 053101 (2012).
5. E. A. Klimanov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, .133 (2011).
6. *Measurement System for the Semiconductor Industry WT-2000*, User Manual.
7. H. Msaad, J. Michel, A. Reddy, and L. C. Kimerling, *J. Electrochemical Society* **142**, 2833 (1995).
8. A. L. P. Rotondaro, T. Q. Hurd, A. Kaniava, J. Vanhellemont, E. Simoen, M. M. Heyns., C. Claeys, and G. Brown, *J. Electrochemical Society* **143**, 3014 (1996).
9. I. Aut, D. Gentsov, and K. German, *Photoelectric Phenomena* (Mir, Moscow, 1980) [in Russian].
10. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics. Photodiodes* (Fizmatlit, Moscow, 2011) [in Russian].