ФОТОЭЛЕКТРОНИКА
PHOTOELECTRONICS

УДК 621.315.5:621.383 PACS: 85.30.-z, 85.60.-q
EDN: RZJFSO

Влияние локальных дефектов в окисных слоях на вольт-амперные характеристики кремниевых фотодиодов

© К. О. Болтарь[1,2], М. Н. Вильдяева[1], С. С. Демидов[1], Е. А. Климанов[1,3,*], Д. С. Молчанов[1], Э. А. Макарова[1], К. А. Попов[1], А. А. Жукович-Гордеева[1], А. В. Егоров[1]

[1] *АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия*
[*] *E-mail: klimanov3@mail.ru*
[2] *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Московская обл., г. Долгопрудный, 141701 Россия*
[3] *МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия*

Статья поступила в редакцию 6.11.2025; после доработки 18.11.2025; принята к публикации 11.12.2025
Шифр научной специальности: 1.3.11

Исследован механизма образования тока утечки в p^+–n-переходах фотодиодов при наличии локальных дефектов. Рассмотрены закономерности образования локальных дефектов в диэлектрических слоях с целью определения условий, снижающих их плотность. На пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si) n-типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом·см и ориентацией (100) изготавливались элементы (ФЧЭ) с размером площадок 1,4×1,4 мм^2. Технологический цикл изготовления включал операции окисления в парах $H_2O + HCl$, фотолитографии, загонки (осаждения) бора из BN, диффузии бора и диффузии фосфора в различных режимах. В качестве источника диффузанта при диффузии фосфора использовались как жидкие источники $POCL_3$ и PCL_3, так и твердый источника – пластины метафосфата алюминия (МФА) (Al_2O_3, $3P_2O_5$). Установлено, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) кремниевых фотодиодов с аномальными «мягкими» характеристиками определяется туннельным механизмом протекания тока. Применение оптимальных режимов геттерирования приводит к резкому снижению количества фоточувствительных элементов с аномальными ВАХ.

Ключевые слова: кремниевые фотодиоды; монокристаллический кремний; дефекты; вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-7-13

Введение

Цикл изготовления кремниевых фотодиодов обычно включает в себя диффузию бора и фосфора с высокой концентрацией для формирования *p*–*n*-переходов и легированных областей. При этом процесс диффузии фосфора часто приводит к образованию локальных дефектов в диэлектрических слоях, служащих защитной маской [1–3]. Указанные дефекты могут приводить к образованию локальных n^+-каналов в p^+–*n*-переходах и дефекты на поверхности кремния, вызывая токи утечки («мягкие» вольт-амперные характеристики), приводящие к увеличению шумов фотодиодов, в том числе низкочастотных со спектром типа $1/f$.

В работе [4] были рассмотрены закономерности образования указанных дефектов с целью определения условий, снижающих их плотность.

Целью настоящей работы является исследование механизма образования тока утечки в p^+–*n*-переходах фотодиодов при наличии указанных дефектов.

Эксперимент

На пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si) *n*-типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом·см и ориентацией (100) изготавливались элементы (ФЧЭ) с размером площадок 1,4×1,4 мм^2. Технологический цикл изготовления включал операции окисления в парах H_2O + HCl, фотолитографии, загонки (осаждения) бора из BN, диффузии бора и диффузии фосфора в различных режимах.

В качестве источника диффузанта при диффузии фосфора использовались как жидкие источники $POCL_3$ и PCL_3, так и твердый источник – пластины метафосфата алюминия (МФА) ($Al_2O_3/3P_2O_5$).

На изготовленных образцах определялась концентрация и распределение по пластине локальных дефектов с помощью оптического микроскопа. Для определения размеров и формы дефектов использовались оптический, атомно-силовой микроскопы и РЭМ. На изготовленных образцах проводились измерения вольтамперных характеристик (ВАХ) ФЧЭ в диапазоне температур от -60 °С до +70 °С и обратных напряжений от 0,01 В до 20 В.

Результаты

На части образцов наблюдалось значительное увеличение темновых токов (I_d) с ростом обратного смещения («мягкие» ВАХ). С целью определения причин указанного явления на ФЧЭ с такими характеристиками проводились измерения ВАХ в диапазоне температур от -60 °С до +70 °С и обратных напряжений от 0,01 В до 20 В, результаты которых приведены на рис. 1. Полученные результаты показывают ослабление температурной зависимости темнового тока с ростом обратного напряжения и ее практически отсутствие при больших токах утечки (напряжение 20 В).

Для определения характера изменения I_d от обратного напряжения строилась ВАХ в координатах I_d/V от $V^{-1/2}$ (рис. 2), на которой наблюдается переход от участка с зависимостью $I_d \sim V^{1/2}$, характерной для генерационного тока, к участку с экспоненциальным ростом тока.

На рис. 3 приведены ВАХ на участке «мягкой» характеристики при двух температурах (-60 °С и 25 °С), подтверждающие экспоненциальную зависимость тока от напряжения и ее слабую зависимость от температуры.

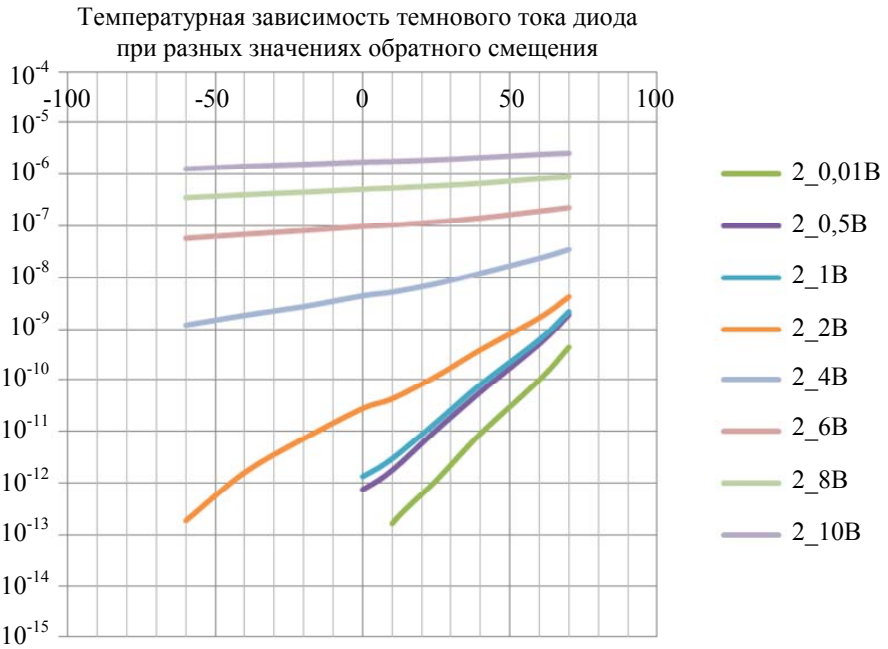


Рис. 1. Температурные зависимости тока при различных напряжениях смещения

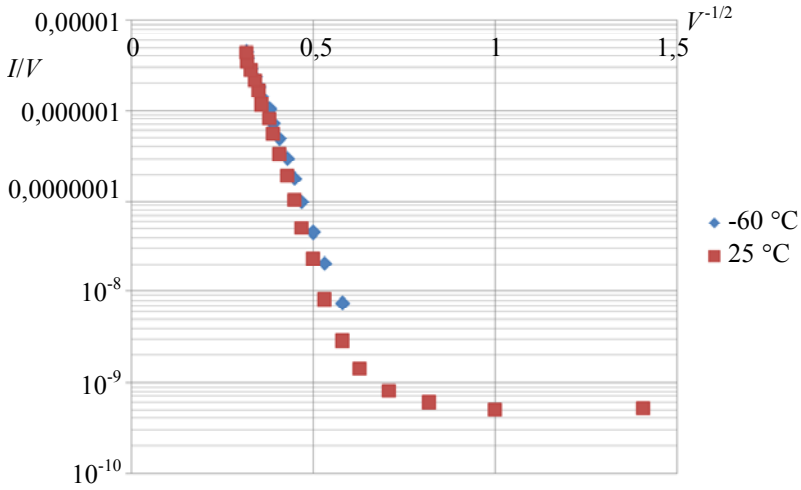
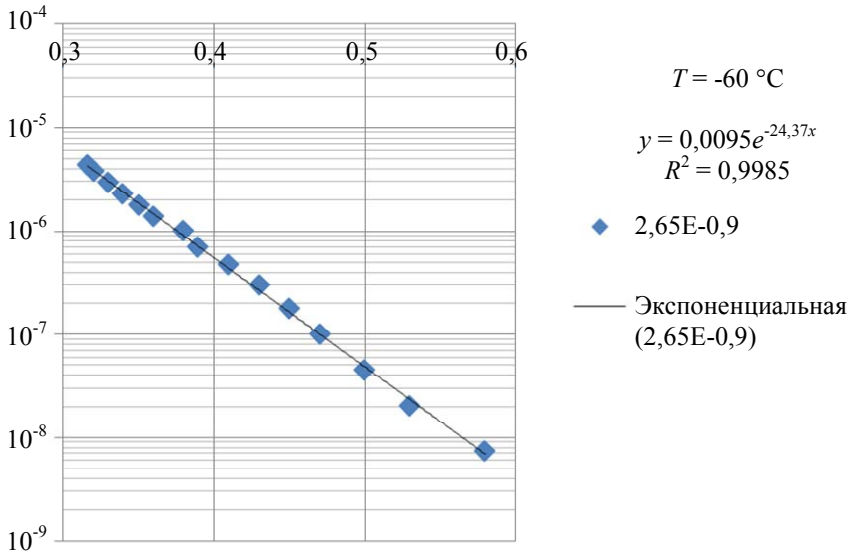
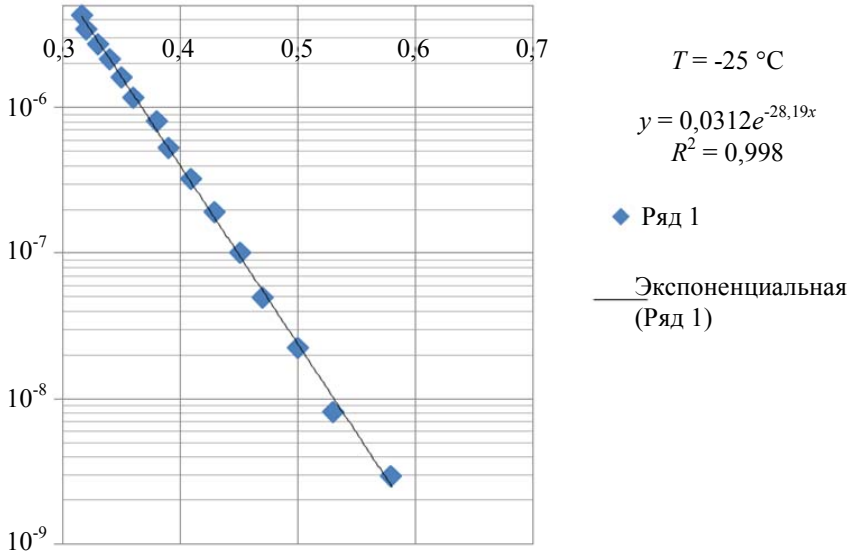


Рис. 2. Зависимость тока от напряжения при температурах -60 ℃ и 25 ℃ в диапазоне напряжений 0,4–10 В



а)



б)

Рис. 3. Зависимость туннельного тока от напряжения при температурах -60 ℃ и 25 ℃ в диапазоне напряжений 3–10 В

Обсуждение результатов

Полученные зависимости темнового тока от обратного напряжения на участке его экспоненциального роста свидетельствуют о туннельном механизме протекания тока.

Действительно, известное выражение для туннельного тока имеет вид [5]:

$$I = AE^2 \exp(-B/E) \qquad (1)$$

где E – напряженность электрического поля; A, B – коэффициенты, слабо зависящие от электрического поля.

Зависимость электрического поля в резком p^+–n-переходе E от приложенного напряжения V при наличии локальных областей с повышенной напряженностью поля можно представить в виде [6]:

$$E = \beta E_{\max} = \beta\left(\frac{2qN_d}{\varepsilon_S}\right)\left(V_b + V\right)^{1/2} \qquad (2)$$

где V_b – встроенный потенциал, N_d – концентрация носителей заряда в n-области, $E_{\max}$ – максимальная напряженность поля в однородной области пространственного заряда (ОПЗ), β – коэффициент, учитывающий локальные изменения поля вследствие наличия дефекта, ε_s – диэлектрическая постоянная.

С учетом (1, 2) зависимость тока от напряжения можно выразить следующим образом:

$$\ln\left(\frac{I}{V}\right) = \ln a - b\left(V_b + V\right)^{-1/2} \qquad (3)$$

где [5]:

$$a = \frac{\left(2m^*\right)^{1/2} q^3 EV}{4\pi^2\left(\frac{h}{\pi}\right)^2 E_g^{1/2}}, \qquad (4а)$$

$$b = \frac{4\left(2m^*\right)^{1/2} E_g{}^{3/2}}{3q\left(\frac{h}{\pi}\right)\beta\left(\frac{2qN_d}{\varepsilon_s}\right)^{\frac{1}{2}}\left(V_b + V\right)^{1/2}} \qquad (4б)$$

где m^* – эффективная масса электрона; E_g – ширина запрещенной зоны кремния.

Экспериментальные данные, приведенные на рис. 3, с высокой достоверностью подтверждают наличие указанной зависимости между величиной тока и приложенным напряжением при значениях β в выражении (4б) равных 184,6 и 211,8 для температур –60 °С и 25 °С соответственно. Полученные значения β в соответствии с (2) приводят к значениям электрического поля в дефектной области $(3{,}1–3{,}6)\times10^6$ В/см при напряжении $V = 1$ В и $(0{,}98–1{,}15)\times10^7$ В/см при 10 В, что существенно превышает величину напряженности поля при лавинном пробое в кремнии ($\sim5\times10^5$ В/см) и согласуется с литературными данными для туннельного пробоя [5, 6]. Дополнительным аргументом, подтверждающим туннельный механизм протекания тока, является его слабая температурная зависимость с отрицательным температурным коэффициентом ($dI/dT < 0$) (рис. 1).

Используя выражение (4а) и экспериментально полученные зависимости туннельного тока от напряжения (рис. 3):

$$I/V = 0{,}0095\exp\left(-24{,}37V^{-1/2}\right) \text{ при } -60\ ^\circ\text{C}, \qquad (5а)$$

$$I/V = 0{,}031\exp\left(-28{,}18V^{-1/2}\right) \text{ при } 25\ ^\circ\text{C}, \qquad (5б)$$

можно определить отношение туннельного тока к его плотности J_t и, соответственно, площадь эмитирующей области A_t из соотношения $A_t = I/J_t$. Полученные значения A_t = = 350–650 А свидетельствуют о наличии локальных областей протекания тока, составляющих 5×10^{-10}–2×10^{-9} от площади p–n-перехода при температурах -60 °С и 25 °С соответственно.

Поскольку распределение ФЧЭ с «мягкими» характеристиками по площади пластин носит случайный характер, причиной их возникновения могут быть локальные дефекты, такие как дефекты в окисле и на поверхности кремния, образующиеся при диффузии фосфора [6]. Расположение дефектов, вызывающих туннельные токи, вблизи поверхности подтверждается тем, что в рассматриваемом диапазоне обратных напряжений ширина области пространственного заряда (ОПЗ) p^+–n-перехода с высокой напряженностью поля не превышает 5 микрон. Сквозные дефекты указанного типа могут приводить к туннельному

пробою паразитных p^+–n^+-переходов из-за высокой концентрации легирующих примесей, а также образованию локальных дефектных областей на поверхности кремния (рис. 4), содержащих примеси кислорода, углерода [6] и тяжелых металлов (примесные преципитаты), вокруг которых увеличивается напряженность электрического поля.

Влияние указанных локальных дефектов на образование ФЧЭ с аномальными «мягкими» ВАХ подтверждается наличием корреляции между числом ФЧЭ с низкой плотностью дефектов на пластине (< 5 см$^{-2}$), обнаруживаемых с помощью оптического микроскопа ($N_{деф}$), и числом ФЧЭ с низкими темновыми токами ($N_{фэп}$) (рис. 5). Приведены данные для 100 пластин из разных партий изделий, на каждой из которых размещены 70 линеек по 16 ФЧЭ. Следовательно, важной задачей является снижение плотности дефектов окисла, что достигается как оптимизацией режимов процесса диффузии фосфора, так и улучшением качества окисла, формируемого перед диффузией [1, 4].

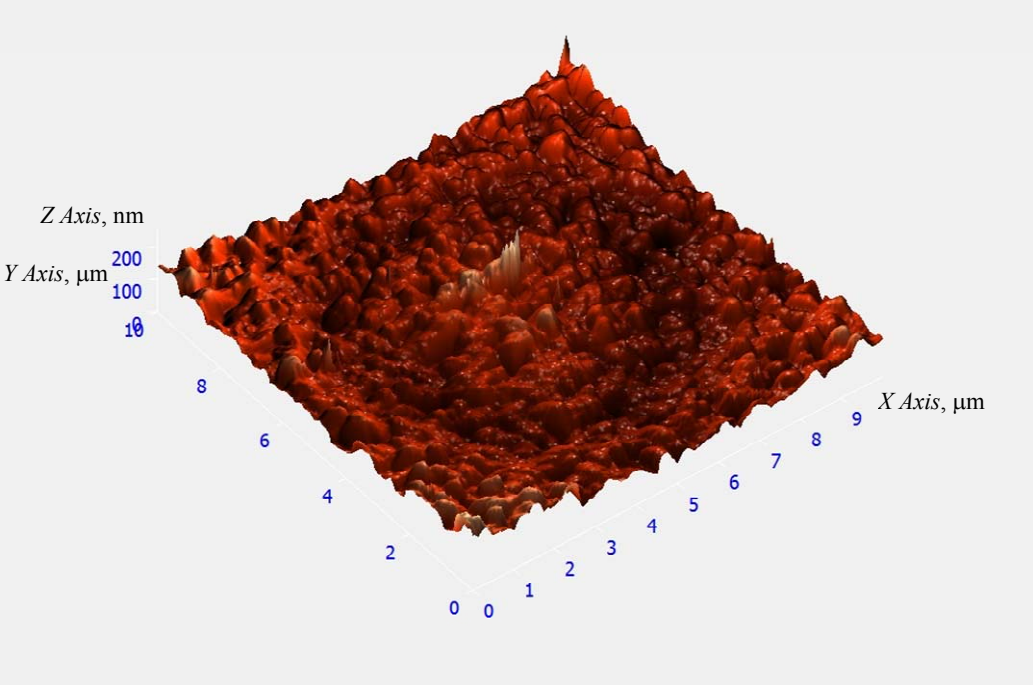


Рис. 4. Изображение дефекта в кремнии в атомно-силовом микроскопе

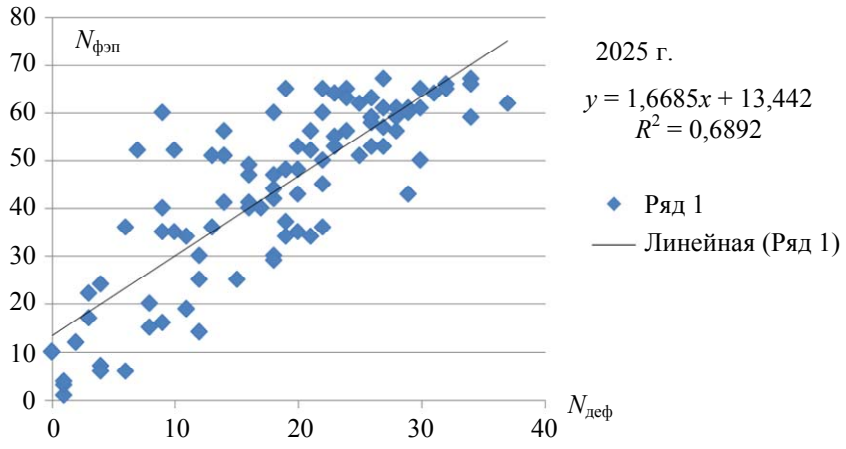


Рис. 5. Зависимость числа ФЧЭ с $I_d < 1\times10^{-11}$ А при 10 мВ от числа ФЧЭ с плотностью дефектов меньше 5 см$^{-2}$

Из двух рассмотренных причин возникновения туннельных токов более вероятным является образование примесных преципитатов в области дефектов. Действительно, следующие за диффузией фосфора термические операции не могут удалить образовавшийся n^+-канал. В тоже время подбором оптимальных режимов последующей операции геттерирования, приводящей к удалению загрязняющих примесей из объема кремния, в том числе и примесных преципитатов, удается практически полностью исключить образование ФЧЭ с аномальными характеристиками.

Повторное проведение операции геттерирования примесей на пластинах, содержащих ФЧЭ с «мягкими» характеристиками, также приводит к уменьшению количества таких элементов.

Выводы

1. Установлено, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) кремниевых фотодиодов с аномальными «мягкими» характеристиками определяется туннельным механизмом протекания тока.

2. Причиной возникновения туннельных токов являются локальные области небольшой площади с напряженностью электрического поля 3×10^6–10^7 В/см. Причиной образования указанных областей могут быть примесные преципитаты, образующиеся на поверхности кремния при формировании дефектов в окисле.

3. Применение оптимальных режимов геттерирования примесей приводит к резкому снижению количества фоточувствительных элементов с аномальными ВАХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Blackstone S., Henry W., Jastrzebski L., Fisher A. W.* / Journal of Electrochemical Society. 1982. Vol. 3. P. 667–668.

2. *Storch W., Mohr U., Elstner L., Leihkauf R.* / Phys. Stat. Sol. (a). 1992. Vol. 132. P. K109.

3. *Miyashita M., Fukui H., Kubota A., Samata S., Hiratsuca H., Matsushita Y.* / International Conference on Solid State Devices and Materials. – Yocohama, 1991. P. 568–570.

4. *Болтарь К. О., Вильдяева М. А., Иродов Н. А., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Малыгин В. А., Молчанов Д. С., Макарова Э. А.* / Прикладная физика. 2025. № 2. С. 39.

5. *Зи С.* Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984.

6. *Busta H. H., Waggener H. A.* / Journal of Electrochemical Society. 1977. Vol. 124. № 9. P. 1424–1429.

PACS: 85.30.-z, 85.60.-q

The effect of defects in oxide layers on the performance of silicon photodiodes

K. O. Boltar[1,2], M. N. Vildyaeva[1], S. S. Demidov[1], E. A. Klimanov[1,3,*], D. S. Molchanov[1], E. A. Makarova[1], K. A. Popov[1], A. A. Zhukovich-Gordeeva[1] and A. V. Egorov[1]

[1] *RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia*
[*] *E-mail: klimanov3@mail.ru*
[2] *Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow Region, Dolgoprudny, 141701 Russia*
[3] *MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia*

Received 6.11.2025; revised 18.11.2025; accepted 11.12.2025

The mechanism of leakage current formation in p+-n junctions of photodiodes in the presence of local defects is investigated. The patterns of formation of local defects in dielectric layers are considered in order to determine the conditions that reduce their density. On n-type monocrystalline silicon (Cz-Si) wafers with a diameter of 100 mm and a resistivity of 4–5 ohms.cm and orientation (100) were used to produce elements with a pad size of 1.4×1.4 mm^2. The manufacturing process cycle included the operations of oxidation in H_2O + HCl vapors, photolithography, corralling (precipitation) of boron from BN, boron diffusion and phosphorus diffusion in

various modes. Both liquid sources $POCL_3$ and PCL_3 and solid sources – aluminum metaphasate (MFA) (Al_2O_3, $3P_2O_5$) plates were used as a diffusant source during phosphorus diffusion. It has been established that the current-voltage characteristic of silicon photodiodes with anomalous "soft" characteristics is determined by the tunneling current flow mechanism. The use of optimal gettering modes leads to a sharp decrease in the number of photosensitive elements with anomalous current-voltage characteristic.

Keywords: silicon photodiodes; monocrystalline silicon; defects; current-voltage characteristics.

REFERENCES

1. Blackstone S., Henry W., Jastrzebski L. and Fisher A. W., Journal of Electrochemical Society **3**, 667–668 (1982).
2. Storch W., Mohr U., Elstner L. and Leihkauf R., Phys. Stat. Sol. (a) **132**, K109 (1992).
3. Miyashita M., Fukui H., Kubota A., Samata S., Hiratsuca H. and Matsushita Y., International Conference on Solid State Devices and Materials. Yocohama, 1991, pp. 568–570.
4. Boltar K. O., Vildyaeva M. A., Irodov N. A., Klimanov E. A., Lyalikov A. V., Malygin V. A., Molchanov D. S., Makarova E. A., Applied Physics, № 2, 39 (2025).
5. Zi S., Physics of Semiconductor Devices. Moscow, Mir, 1984.
6. Busta H. H. and Waggener H. A., Journal of Electrochemical Society **124** (9), 1424–1429 (1977).

Об авторах

Болтарь Константин Олегович, начальник НТК, д.ф.-м.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (141701, Россия, г. Долгопрудный, Московская обл., Институтский пер., д. 9). E-mail: boltarko@yandex.ru SPIN-код РИНЦ 9249-2720, Author ID 171355

Вильдяева Мария Николаевна, инженер 1 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: mari.vildyaeva@mail.ru

Демидов Станислав Стефанович, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). SPIN-код: 2028-9758, AuthorID: 780596

Климанов Евгений Алексеевич, главный научный сотрудник, профессор, д.т.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА) (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, д. 78). E-mail: klimanov3@mail.ru. SPIN-код РИНЦ 7697-4688, Author ID 171375

Молчанов Дмитрий Сергеевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Макарова Элина Алексеевна, инженер 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Попов Константин Алексеевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: kostya.popov.2001@gmail.com SPIN-код: 5321-4009

Жукович-Гордеева Александра Александровна, инженер 2 кат. АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).

Егоров Александр Васильевич, ученый секретарь, доцент, к.т.н., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9).