ФОТОЭЛЕКТРОНИКА
PHOTOELECTRONICS

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

Влияние микродефектов на вольт-амперные характеристики и шумы кремниевых фотодиодов

© К. О. Болтарь[1,2], М. Н. Вильдяева[1], С. С. Демидов[1], Е. А. Климанов[1,3*], Д. С. Конорев[1], Э. А. Макарова[1], Д. С. Молчанов[1], К. А. Попов[1], В. В. Полунеев[1], А. А. Жукович-Гордеева[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 27.03.2026; после доработки 7.04.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 1.3.11

Проведено исследование дефектов, вызывающих токи утечки и шумы в p^+–n-переходах кремниевых фотодиодов. Установлено, что причиной возникновения туннельной компоненты темновых токов являются локальные дефекты в окисле и примесные преципитаты в ОПЗ p–n-перехода. Протекание туннельных токов приводит к возникновению шумов, имеющих широкий спектр, в том числе «взрывного» шума.

Ключевые слова: кремниевый фотодиод, микродефекты, туннельные токи, вольт-амперные характеристики.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-35-42

Введение

Одним из основных требований к фотодиодам (ФД), используемым в фотоприемных устройствах, является низкий уровень шума, что требует снижения темновых токов и исключения избыточных шумов в низкочастотном диапазоне.

Цикл изготовления кремниевых фотодиодов включает в себя ряд термических операций (окисление, диффузия бора и фосфора, низкотемпературные отжиги), во время проведения которых происходит загрязнение образцов примесями металлов и образование локальных дефектов в окисле, кислородных и примесных преципитатов в объеме кремния. [1–3]. Указанных дефекты могут приводить к образованию локальных n^+-каналов в p^+–n-переходах, дефектов на поверхности и в объеме кремния, вызывая токи утечки – «мягкие» вольт-амперные характеристики (ВАХ) [4], приводящие к увеличению шумов фотодиодов, в том числе низкочастотных.

В работе [5] было установлено, что причиной «мягких» ВАХ является возникновение туннельного тока в сильном электрическом поле локальных дефектов.

1. Эксперимент

На пластинах монокристаллического кремния (Cz-Si) n-типа диаметром 100 мм с удельным сопротивлением 4–5 Ом·см, ориентацией (100), без свирловых дефектов изготавливались линейки фоточувствительных элементов (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 пластин нитрида бора (BN), диффузии (разгонки) бора и диффузии фосфора в различных режимах.

На пластинах с изготовленными ФЧЭ определялась концентрация и распределение по пластине локальных дефектов с помощью селективного травления и оптического микроскопа, а также распределение времени жизни носителей заряда. На изготовленных образцах проводились измерения ВАХ ФЧЭ в диапазоне обратных напряжений от 0,01 В до 90 В и шумов в диапазоне частот 10–12000 Гц.

2. Результаты

2.1 Вольт-амперные характеристики

Поскольку наблюдаемые в оптический микроскоп дефекты окисных слоев [2] имеют различный диаметр (5–10 мкм) и глубину, не все из них являются электрически активными, что затрудняет сравнение пространственных распределений ФЧЭ с «мягкими» ВАХ и дефектов на пластине. Наблюдалась лишь качественная связь пространственных распределений таких ФЧЭ и плотности дефектов.

Поэтому для нахождения зависимости величины туннельных токов от плотности дефектов окисла определялось распределение величины порогового напряжения $U_п$ для ФЧЭ с различным числом наблюдаемых дефектов (N) (рис. 1) по массиву из 350 ФЧЭ. За пороговое напряжение принималось значение, при котором темновой ток I_d превышал величину 10^{-7} А.

Наблюдаемая корреляция величин N и $U_п$ подтверждает взаимосвязь между ними.

В то же время сравнение пространственных распределений темновых токов при напряжениях 0,01, 1 и 5 В показывают существование областей, в которых наблюдается корреляция между туннельными токами и токами при низких напряжениях (рис. 2). Данная взаимосвязь подтверждается возрастанием доли ФЧЭ с величиной темнового тока $I_d < 10^{-11}$ А при 0,01 В среди элементов с высоким пороговым напряжением (рис. 3).

Качественная корреляция величин N, $U_п$ и I_d указывает на взаимосвязь между ними и, соответственно, между числом дефектов N и величиной темнового тока I_d.

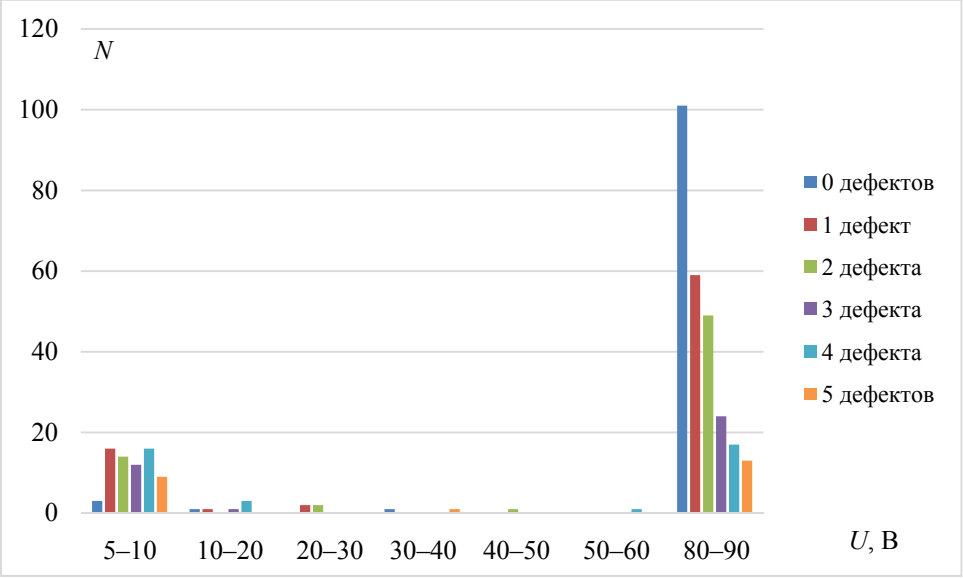


Рис. 1. Гистограмма распределения ФЧЭ по пороговому напряжению для различного числа дефектов на одном элементе

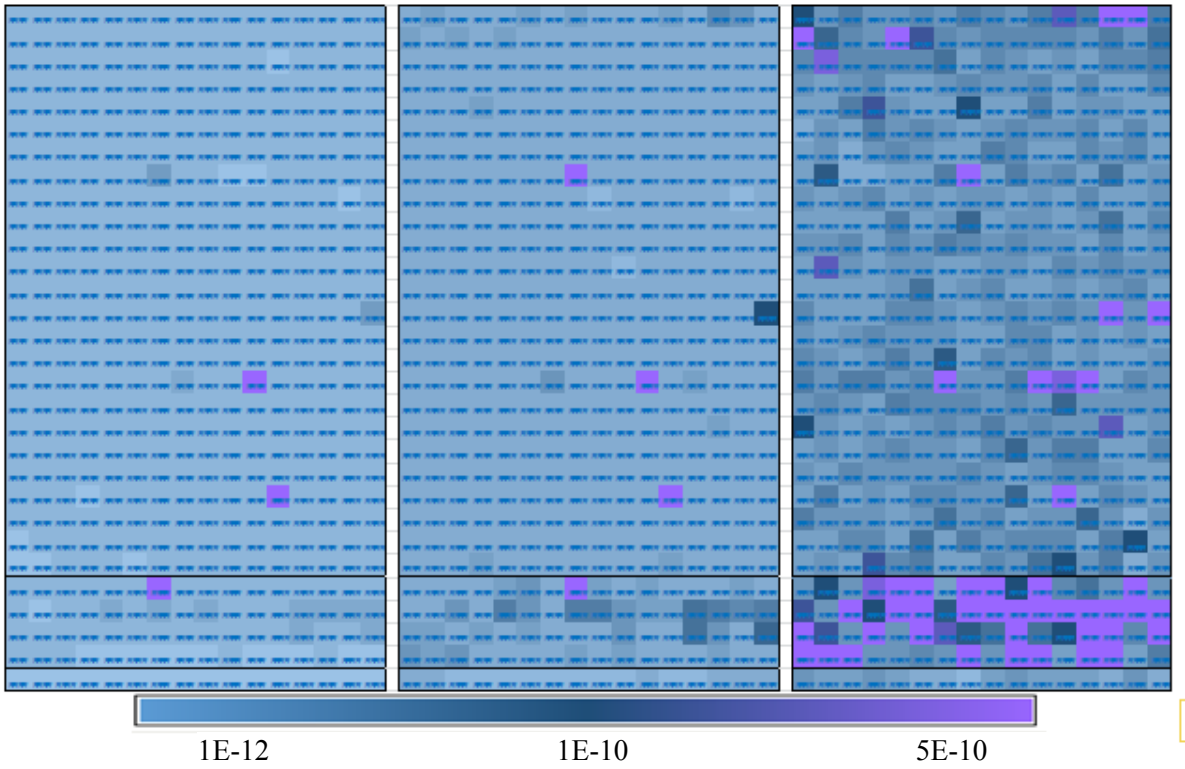


Рис. 2. Распределение темновых токов по площади пластины при напряжениях 0,01 В, 1 В и 5 В

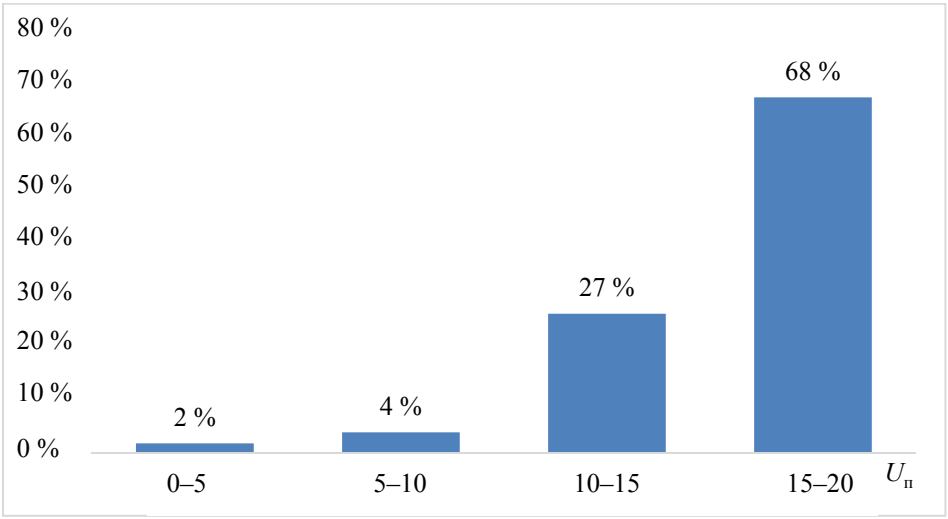
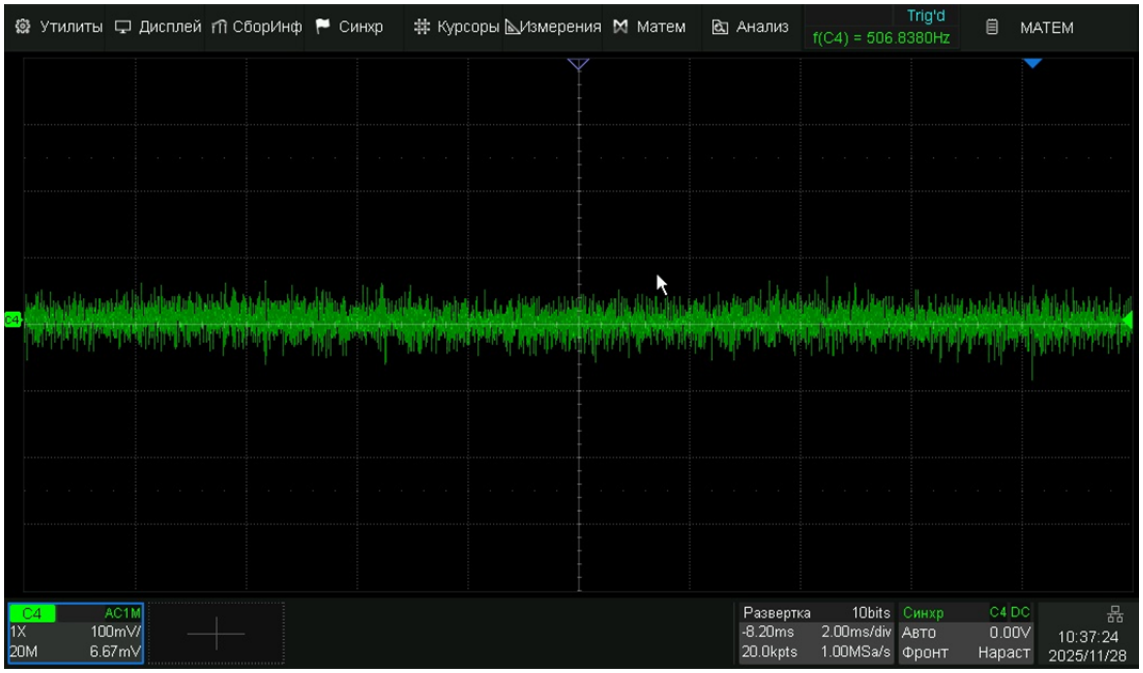


Рис. 3. Зависимость доли ФЧЭ с током $I_d < 10^{-11}$ А от порогового напряжения

2.2. Шумы

На ФЧЭ с «мягкими» ВАХ проводились измерения шумов и спектральной плотности шума в полосе частот 100–12000 Гц при различных обратных напряжениях. На рис. 4 приведены временные осциллограммы шумового напряжения при напряжениях смещения 1 В (*а*) и 10 В (*б*). При напряжении 10 В, которое соответствует участку экспоненциального роста туннельного тока, появляется большое числа шумовых выбросов с амплитудой до 400 мВ на фоне шумовой дорожки с амплитудой до 50 мВ. Одновременно у некоторых ФЧЭ наблюдался участок осциллограммы с двумя состояниями, характерный для «взрывного» (телеграфного) шума [5, 6].

На рис. 5 показаны соответствующие частотные зависимости спектральной плотности шума при напряжениях 1 В (*а*) и 10 В (*б*), показывающие резкое возрастание спектральной плотности шума при напряжении 10 В, особенно значительное на частоте 1 кГц.

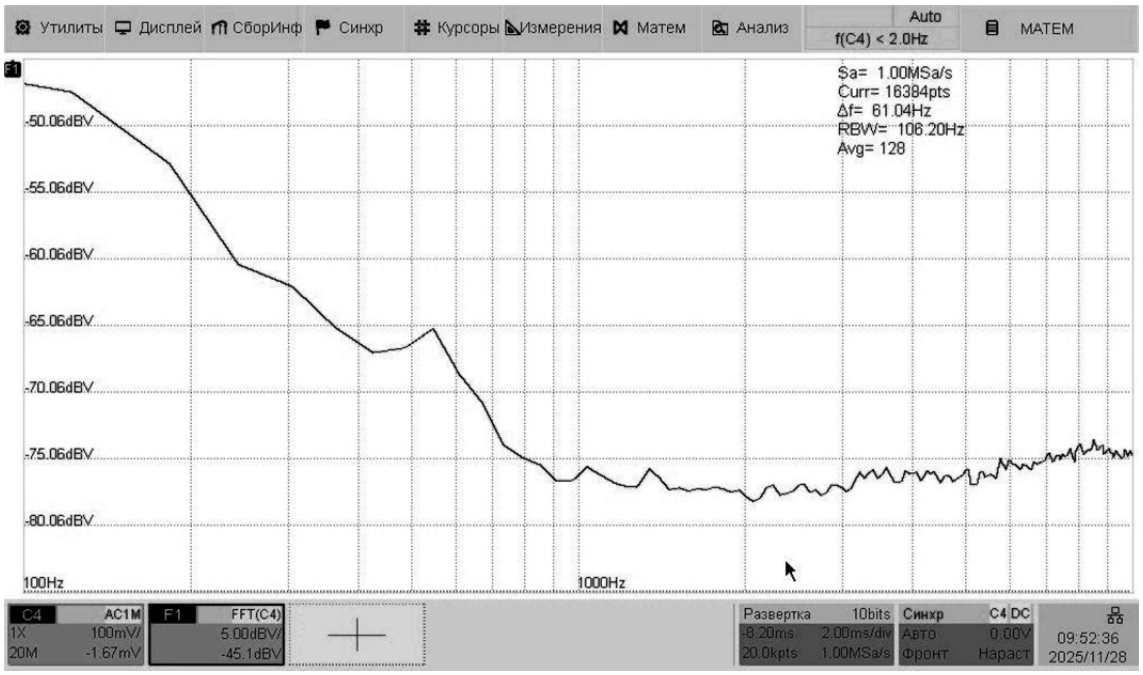


а)

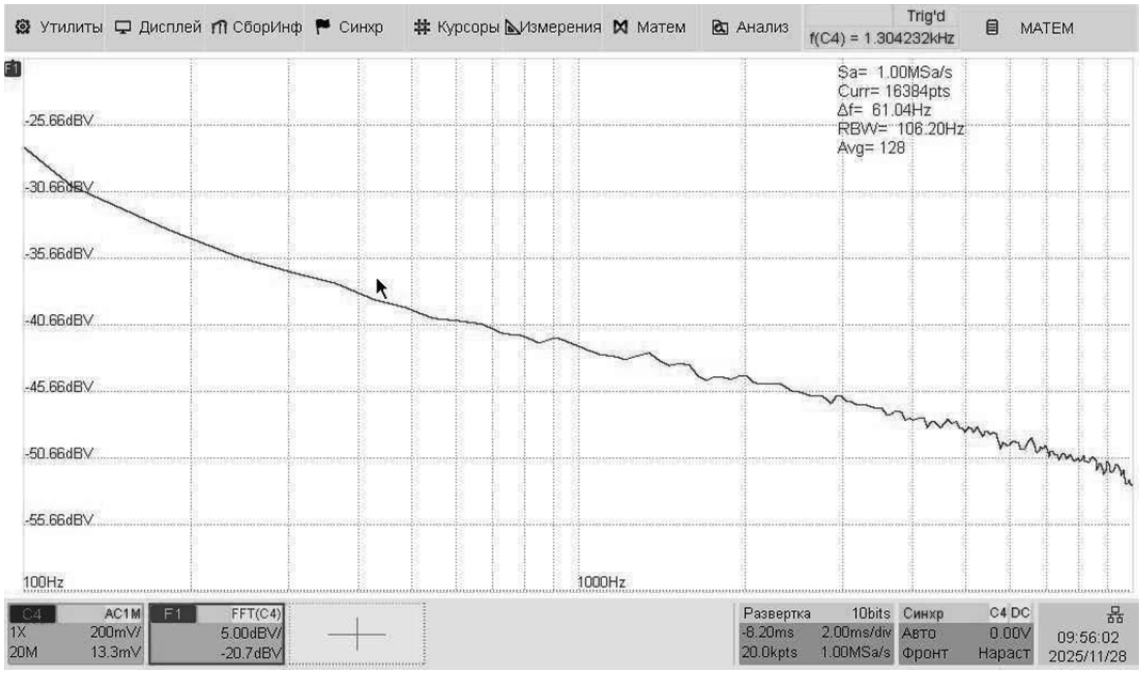


б)

Рис. 4. Осциллограммы напряжения шума при напряжениях 1 В и 10 В



а)



б)

Рис. 5. Зависимости спектральной плотности шума от частоты при напряжениях 1 В и 10 В

Обсуждение результатов

В работах [3, 7] было установлено влияние кислородных преципитатов на время жизни носителей заряда в кремнии, а также на темновые токи и фоточувствительность фотодиодов, изготовленных на кремнии с кольцевым распределением концентрации кислорода по площади пластины [8].

В данной работе использовался кремний без свирловых дефектов с более однородным распределением кислорода, что приводит к более равномерному распределению времени жизни носителей заряда (разброс значений 10–12 %) и микродефектов (ямок травления) по площади пластин и, соответственно, случайному распределению ФЧЭ с «мягкими» ВАХ.

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 [2]. 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 5–7 микрон. Глубокие дефекты указанного типа могут приводить к туннельному пробою паразитных p^+–n^+-переходов из-за высокой концентрации легирующих примесей, а также образованию локальных дефектов на поверхности кремния, содержащих примеси кислорода, углерода и тяжелых металлов (примесные преципитаты). Туннельный пробой p^+–n^+-переходов приводит к ВАХ с резким пробоем при напряжениях 6–7 В.

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, 2].

Другой причиной возникновения туннельных токов могут являться примесные преципитаты, в том числе кислородные, в ОПЗ p–n-переходов [9, 10], приводящие к «мягким» ВАХ с увеличивающимися токами при напряжениях больше 10 В. Подбором оптимальных режимов операции геттерирования, приводящих к удалению примесей тяжелых металлов из объема кремния, в том числе из примесных преципитатов, удается значительно снизить количество ФЧЭ с такими характеристиками.

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

Зависимости спектральной плотности шума от величины обратного напряжения 1 В, 10 В на частотах 100 Гц и 1 кГц показывают значительно более слабую зависимость от тока для низкочастотного шума, что может свидетельствовать о различных механизмах генерации шума: на низкой частоте преобладает шум типа 1/f, вызываемый перезарядкой поверхностных состояний на границе Si-SiO_2, на высокой – «взрывной» (RTN) шум, имеющий широкий спектр. Поскольку известны работы [11, 12], связывающие возникновение RTN в p–n-переходах с модуляцией тока, протекающего через примесные преципитаты, приведенные данные также могут подтверждать модель генерации туннельного тока в электрическом поле преципитата.

Выражение для электрического поля в области преципитата можно представить в виде [9]:

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

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.

Используя экспериментально полученные значения коэффициента $\beta = 100$–200 для различных образцов, можно оценить форму дефектов. Большие значения β свидетельствуют о вытянутой форме дефекта в направлении приложенного поля, что позволяет использовать для анализа электрического поля дефекта решение для потенциала поля проводящего вытянутого в направлении электрического поля полусфероида с полуосями c и b в однородном электрическом поле E_0 [13]. Выражение для электрического поля на поверхности полусфероида в направлении большой оси имеет вид:

$$E = E_0 \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\ln\frac{\eta_0 + 1}{\eta_0 - 1} - 1\right)\left(\eta_0^2 - 1\right)}, \qquad (2)$$

где $\eta_0 = c/(c^2 - b^2)^{1/2}$, E_0 – поле области пространственного заряда (ОПЗ) p–n-перехода.

Из выражения (2) и приведенных значений β получаем отношения полуосей $c/b = 10$–20. Полагая b равным половине диаметра дефекта и используя значения $b = 200$–300 А [2], получаем размер дефекта в направлении поля

0,2–0,6 мкм. Разброс значений *c*/*b* приводит к соответствующему разбросу в значениях пороговых напряжений туннельного тока.

Таким образом, другой причиной «мягких» ВАХ и повышенных шумов ФЧЭ являются примесные преципитаты вытянутой формы в ОПЗ *p*–*n*-перехода, для удаления которых необходимо использовать оптимальные режимы геттерирования металлических примесей.

Выводы

1. Вольт-амперная характеристика кремниевых фотодиодов с «мягкими» характеристиками определяется наличием туннельной компоненты протекания тока. Величина темнового тока при малых напряжениях (0,01 В) зависит от напряжения начала резкого роста туннельного тока (порогового напряжения).

2. Существует корреляция между пороговым напряжением, величиной темнового тока и числом дефектов окисла.

3. Протекание туннельных токов приводит к возникновению шумов, имеющих широкий спектр. В ряде случаев при большом темновом токе наблюдается «взрывной» шум.

4. Причиной возникновения туннельных токов являются локальные дефекты небольшой площади в окисле, приводящие к образованию паразитных p^+–n^+-переходов, и примесные преципитаты в ОПЗ *p*–*n*-перехода, имеющие вытянутую в направлении электрического поля форму.

5. Улучшение качества диэлектрика и применение оптимальных режимов геттерирования примесей приводит к резкому снижению количества фоточувствительных элементов с туннельными ВАХ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. *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.

3. *Murphy J. D., Al-Amin M., Bothe K., Olmo M., Voronkov V. V., Falster R. J.* / Journal of Applied Physics. 2015. Vol. 118. P. 215706.

4. *Рейви К.* Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. – М.: «Мир», 1984. С. 269.

5. *Болтарь К. О., Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Молчанов Д. С., Макарова Э. А., Попов К. А., Жукович-Гордеева А. А., Егоров А. В.* / Прикладная физика. 2025. № 6. С. 7.

6. *Букингем М.* Шумы в электронных приборах и устройствах. – М.: «Мир», 1986. С. 193.

7. *Вильдяева М. Н., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Макарова Э. А., Скребнева П.* / Прикладная физика. 2017. № 6. С. 54.

8. *Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Фокина А. С.* / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 3. С. 282–287.

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

10. *Вильдяева М. Н., Демидов С. С., Климанов Е. А., Ляликов А. В., Скребнева П. С., Хлызова У. Д.* / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 13. № 6. С. 511–514.

11. *Hsu S. T., Whittier R. J., Mead C. A.* / Solid-State Electronics. 1970. Vol. 13. P. 1055–1070.

12. *Mori Y., Takeda K., Yamada R.* / Journal of Applied Physics. 2010. Vol. 107. P. 014509.

13. *Smythe W. R.* Static and Dynamic Electricity. – McGraw-Hill, 1969. P. 178–179.

PACS: 85.30.-z, 85.60.-q

The effect of microdefects on the current-voltage characteristics and noise of silicon photodiodes

K. O. Boltar[1,2], M. N. Vildyaeva[1], S. S. Demidov[1], E. A. Klimanov[1,3*], D. S. Konorev[1], E. A. Makarova[1], D. S. Molchanov[1], K. A. Popov[1], V. V. Poluneev[1], and A. A. Zhukovich-Gordeeva[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 27.03.2026; revised 7.04.2026; accepted 27.04.2026

A study was conducted of defects causing leakage currents and noise in the p^+–n junctions of silicon photodiodes. It was established that the tunneling component of dark currents is caused by local defects in the oxide and impurity precipitates in the space charge region of the p–n junction. The flow of tunneling currents leads to the generation of noise with a wide spectrum, including "burst" noise.

Keywords: silicon photodiode, microdefects, tunneling currents, current-voltage characteristics.

REFERENCES

1. Blackstone S., Henry W., Jastrzebski L. and Fisher A. W., Journal of Electrochemical Society **3**, 667–668 (1982).
2. 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).
3. Murphy J. D., Al-Amin M., Bothe K., Olmo M., Voronkov V. V., and Falster R. J., Journal of Applied Physics **118**, 215706 (2015).
4. Rejvi K. Defekty` i primesi v poluprovodnikovom kremnii. Moscow: “Mir”, 1984, pp. 269.
5. Boltar K. O., Vildyaeva M. A., Demidov S. S., Klimanov E. A., Molchanov D. S., Makarova E. A., Popov K. A., Zhukovich-Gordeeva A. A., and Egorov A. V., Applied Physics, № 6, 5 (2025).
6. Bukingem M. Shumy` v e`lektronny`x priborax i ustrojstvax. Moscow: “Mir”, 1986, pp. 193.
7. Vil’dyaeva M. N., Demidov S. S., Klimanov E. A., Lyalikov A. V., and Fokina A. S., Applied Physics, № 6, 54 (2017) [in Russian].
8. Vil’dyaeva M. N., Demidov S. S., Klimanov E. A., Lyalikov A. V., and Fokina A. S., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **5** (3), 282–287 (2017) [in Russian].
9. Busta H. H. and Waggener H. A., Journal of Electrochemical Society **124** (9), 1424–1429 (1977).
10. Vil’dyaeva M. N., Demidov S. S., Demidova Yu. S., Klimanov E. A., Skrebneva P. S., and Khlyzova U. D., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **13** (6), 511–514 (2023) [in Russian].
11. Hsu S. T., Whittier R. J., and Mead C. A., Solid-State Electronics **13**, 1055–1070 (1970).
12. Mori Y., Takeda K., and Yamada R., Journal of Applied Physics **107**, 014509 (2010).
13. Smythe W. R. Static and Dynamic Electricity. McGraw-Hill, 1969, pp.178–179.

Об авторах

Болтарь Константин Олегович, д.ф.-м.н., начальник НТК, 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: 9249-2720, AuthorID: 171355

Вильдяева Мария Николаевна, инженер 1 категории, 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, д.т.н., профессор, главный научный сотрудник, 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: 7697-4688, AuthorID: 171375

Конорев Дмитрий Сергеевич, инженер, АО « НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). E-mail: konorev.dima@mail.ru

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

Макарова Элина Алексеевна, инженер 2 категории, 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

Полунеев Владимир Васильевич, главный специалист, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, д. 9). SPIN-код: 5228-6837, AuthorID: 780556

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