

07.2

Памяти Серенкова И.Т.

Кремниевый лавинный фотодиод с фронтом нарастания фотоотклика меньше 350 ps на длине волны 1064 nm

© П.Н. Аруев, И.М. Гаджиев, В.В. Забродский, А.В. Николаев, Е.В. Шерстнёв

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: a.v.nikolaev@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 19 октября 2023 г.

В окончательной редакции 4 декабря 2023 г.

Принято к публикации 5 декабря 2023 г.

Проведены исследования оптических, электрических и динамических характеристик разработанного кремниевого лавинного фотодиода с активной областью диаметром 350 μm . Показано, что разработанный лавинный фотодиод обладает следующей совокупностью характеристик: внешний квантовый выход 215 electrons/photon на длине волны 1064 nm, темновой ток 0.77 nA, коэффициент умножения 2353, фронт нарастания менее 350 ps при напряжении обратного смещения 274 V.

Ключевые слова: кремний, лавинный фотодиод, ближний инфракрасный диапазон, LIDAR.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.06.57300.19773

Существует круг задач в научном, коммерческом, промышленном и аэрокосмическом приборостроении, где востребована регистрация ближнего инфракрасного диапазона детекторами с фронтом нарастания менее 1 ns. Для этих систем одним из перспективных является спектральный диапазон вблизи 1064 nm, где, во-первых, существуют доступные лазерные излучатели и фотодетекторы, а во-вторых, уровень помех от солнечного излучения в несколько раз ниже, чем в видимой области. Одним из примеров подобных задач является определение высоты орбиты навигационных спутников с помощью лазерного дальномера (satellite laser ranging, SLR) [1,2]. К сожалению, детальная научно-техническая информация о приборах подобного применения ограничивается искусственно, и, что также важно, параметры детекторов, такие как площадь, емкость, быстродействие, варианты корпусирования, необходимо оптимизировать под локальную практическую задачу. Кремниевые детекторы являются оптимальным выбором для данного диапазона, поскольку у приемников на основе материалов с меньшей шириной запрещенной зоны больше величина избыточного шума [3]. Фактически существуют два вида приемников: лавинные и однофотонные, но последние применяются при частоте следования импульсов менее 100 kHz и имеют на несколько порядков меньшую площадь [4]. На данный момент в России не существует отечественных коммерчески доступных кремниевых лавинных фотодиодов (APD) для длины волны $\lambda = 1064$ nm с быстродействием менее 400 ps. Цель настоящей работы состоит в исследовании электрических, спектральных и динамических характеристик разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе кремниевого APD для регистрации $\lambda = 1064$ nm.

Ранее [5] нами был представлен кремниевый APD с диаметром активной области 1500 μm , толщиной активной области ~ 100 μm и фронтом нарастания 1500 ps на длине волны 1060 nm. С целью уменьшения фронта нарастания фотоотклика в рамках настоящей работы спроектирован, изготовлен, а также исследован кремниевый APD с диаметром активной области 350 μm и толщиной активной области ~ 20 μm . Структура разработанного „reach-through“ APD относится к типу „front-illuminated“ (рис. 1, *a*). Термин „reach-through“ означает, что APD работает в режиме полного обеднения подложки. Фотография представленного APD показана на рис. 1, *b*.

Измерения характеристик APD проводились в лабораторных условиях при температуре 22–23°C. Абсолютные значения чувствительности (**R**) и внешнего квантового выхода (EQY) APD определялись по методике, описанной в [5]. Спектральные зависимости **R** и EQY при напряжении обратного смещения 230 V представлены на рис. 2, *a*. Для исследования обратной ветви вольт-амперной характеристики использовался пикоамперметр Keithley 6487 со встроенным блоком питания. Вольт-фарадная характеристика измерялась с помощью Keithley 2400. Результаты приведены на рис. 2, *b*.

Дальнейшие измерения были выполнены для $\lambda = 1064$ nm. Зависимость EQY от напряжения обратного смещения (рис. 3, *a*) определялась на постоянном токе с использованием установки на основе спектрофотометра, описанной в [3]. Зависимость фронта нарастания APD от обратного напряжения (рис. 3, *a*) определялась с помощью цифрового осциллографа, пикосекундного лазерного диода [6], блока питания пикоамперметра Keithley 6487, трансимпедансного усилителя с полосой пропускания 2.8 GHz и усилением 1500 V/A. На вставке

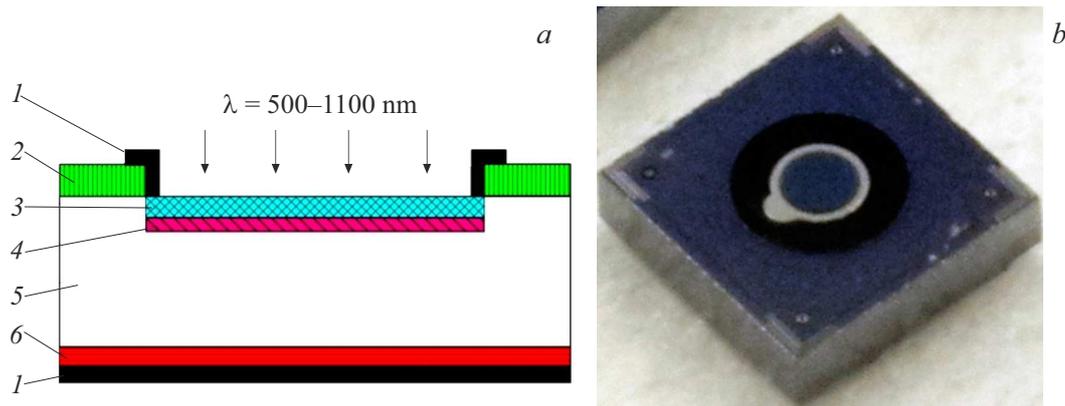


Рис. 1. *a* — структура APD. 1 — металлические контакты, 2 — диоксид кремния, 3 — n^{++} -слой кремния, 4 — область лавинного умножения p -типа, 5 — кремний p -типа, 6 — p^{++} -слой кремния. *b* — фотография кристалла APD.

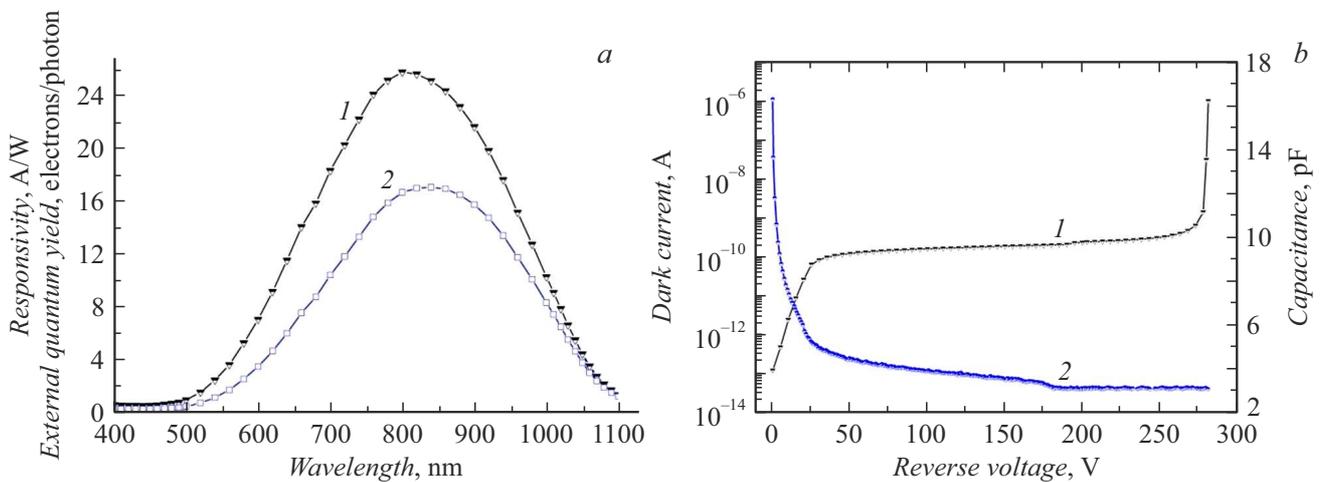


Рис. 2. Характеристики APD. *a* — спектральные зависимости внешнего квантового выхода (1) и чувствительности (2). *b* — зависимости темнового тока (1) и емкости (2) от напряжения обратного смещения.

к рис. 3, *a* приведена осциллограмма отклика APD на импульс лазера при напряжении обратного смещения 240 В. На рис. 3, *b* представлен отклик калиброванного фотодиода с быстродействием 20 ps на импульс лазера.

Рассмотрим спектральную зависимость EQY на рис. 2, *a* (кривая 1). Из приведенных данных следует, что при напряжении обратного смещения 230 В APD демонстрирует значение EQY на уровне 25 electrons/photon для $\lambda = 800$ nm. Поскольку активная область APD не имеет просветляющего покрытия, будем считать величину потерь на отражение $\sim 33\%$, что определяется оптическими свойствами кремния [7]. Потерями в n^{++} -слое можно пренебречь, так как его толщина $\sim 0.5 \mu\text{m}$, в то время как глубина поглощения излучения с $\lambda = 800$ nm в кремнии $\sim 10 \mu\text{m}$. Будем считать, что 67% падающего излучения этой длины волны полностью поглощаются в активной области APD толщиной 20 μm . Для определения коэффициента умножения APD при напряжении обратного смещения 230 В (M_{230}) воспользуемся выра-

жением

$$M_{230} = \text{EQY}(800)_{230} / 0.67, \quad (1)$$

где EQY_{230} — внешний квантовый выход APD для $\lambda = 800$ nm при напряжении обратного смещения 230 В; 0.67 — коэффициент, учитывающий потери на отражение и допущение полного поглощения излучения с $\lambda = 800$ nm в активной области APD. Тогда значение M_{230} будет ~ 37 .

Для определения коэффициента умножения APD при напряжении обратного смещения 274 В (M_{274}) воспользуемся данными для зависимости 1 на рис. 3, *a* и выражением

$$M_{274} = M_{230} \text{EQY}(1064)_{274} / \text{EQY}(1064)_{230}, \quad (2)$$

где $\text{EQY}(1064)_{274}$ — внешний квантовый выход APD для $\lambda = 1064$ nm при напряжении обратного смещения 274 В (215 electrons/photon), $\text{EQY}(1064)_{230}$ — внешний квантовый выход APD для $\lambda = 1064$ nm при напряжении обратного смещения 230 В (3.38 electrons/photon). Таким

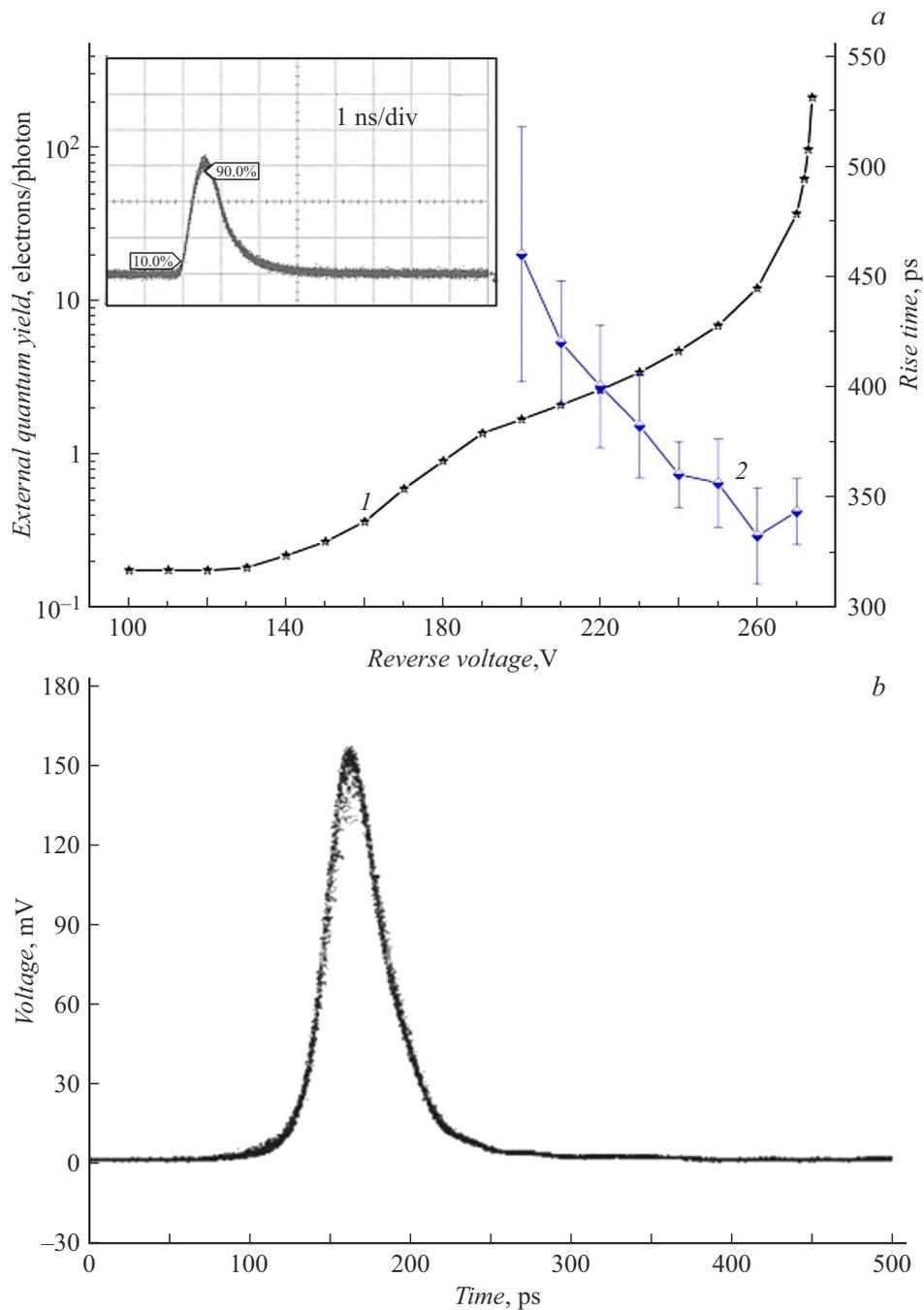


Рис. 3. *a* — зависимости внешнего квантового выхода (1) и фронта нарастания (2) APD от напряжения обратного смещения. *b* — отклик калиброванного фотодиода на импульс лазера.

образом, для исследованного APD значение M_{274} будет ~ 2353 .

Если сравнивать характеристики представленного APD с характеристиками существующих на российском рынке отечественных аналогов, то следует рассмотреть фотодиод SPD-031P [8] с активной областью диаметром $500 \mu\text{m}$, максимумом чувствительности в области 830 nm , емкостью 1 pF и временем нарастания 500 ps (длина волны излучения не указана). По сравнению с SPD-031P представленный в настоящей работе APD

обладает в 2 раза меньшей площадью активной области, в 3 раза большей емкостью, но в 1.4 раза меньшим временем нарастания для $\lambda = 1064 \text{ nm}$. Это, скорее всего, связано с меньшей толщиной активной области представленного APD, чем в случае SPD-031P. К сожалению, отсутствие данных по SPD-031P для $\lambda = 1064 \text{ nm}$ не позволяет провести полностью корректное сравнение.

Таким образом, в настоящей работе представлены результаты исследования оптических, электрических и динамических характеристик разработанного кремние-

вого APD с активной областью диаметром 350 μm . Показано, что при температуре 22–23°C и напряжении обратного смещения 260–274 V APD демонстрирует совокупность следующих характеристик: внешний квантовый выход 12–215 electrons/photon для $\lambda = 1064 \text{ nm}$, темновой ток 0.34–0.77 nA, емкость 3 pF, фронт нарастания менее 350 ps. Отсюда следует, что представленный APD может считаться перспективным кандидатом для LIDAR-приложений, например в области SLR [1,2].

Благодарности

Авторы благодарны коллегам из ФТИ им. А.Ф. Иоффе Н.В. Забродской, М.С. Лазеевой, М.В. Дроздовой, Л.Ф. Антоновой и В.В. Васильевой за помощь в изготовлении фотодиодов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] M. Wilkinson, U. Schreiber, I. Procházka, C. Moore, J. Degnan, G. Kirchner, Z. Zhongping, P. Dunn, V. Shargorodskiy, M. Sadovnikov, C. Courde, H. Kunimori, J. Geod., **93** (11), 2227 (2019). DOI: 10.1007/s00190-018-1196-1
- [2] D. Dequal, C. Agnesi, D. Sarrocco, L. Calderaro, L. Santamaria Amato, M. Siciliani de Cumis, G. Vallone, P. Villoresi, V. Luceri, G. Bianco, J. Geod., **95** (2), 26 (2021). DOI: 10.1007/s00190-020-01469-2
- [3] D. Chen, S.D. March, A.H. Jones, Y. Shen, A.A. Dadey, K. Sun, J.A. McArthur, A.M. Skipper, X. Xue, B. Guo, J. Bai, S.R. Bank, J.C. Campbell, Nat. Photon., **17** (7), 594 (2023). DOI: 10.1038/s41566-023-01208-x
- [4] J. Guo, X. Fei, P. Ge, Z. Li, Y. Lv, L. Sheng, J. Phys.: Conf. Ser., **1983** (1), 012093 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1983/1/012093
- [5] П.Н. Аруев, Б.Я. Бер, А.Н. Горохов, В.В. Забродский, Д.Ю. Казанцев, А.В. Николаев, В.В. Филимонов, М.З. Шварц, Е.В. Шерстнёв, Письма в ЖТФ, **45** (15), 40 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.15.48086.17851 [P.N. Aruev, B.Ya. Ber, A.N. Gorokhov, V.V. Zabrodskii, D.Yu. Kazantsev, A.V. Nikolaev, V.V. Filimonov, M.Z. Shvarts, E.V. Sherstnev, Tech. Phys. Lett., **45**, 780 (2019). DOI: 10.1134/S1063785019080054].
- [6] И.М. Гаджиев, М.С. Буяло, А.С. Паюсов, И.О. Бакшаев, Е.Д. Колыхалова, Е.Л. Портной, Письма в ЖТФ, **46** (7), 12 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.07.49212.18161 [I.M. Gadzhiev, M.S. Buyalo, A.S. Payusov, I.O. Bakshaev, E.D. Kolykhalova, E.L. Portnoi, Tech. Phys. Lett., **46**, 316 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020040069].
- [7] *Handbook of optical constants of solids*, ed. by E.D. Palik (Academic Press, 1998). DOI: 10.1016/C2009-0-20920-2
- [8] https://lasercomponents.ru/wp-content/uploads/2021/09/apd_diodi.pdf