

07.3

Памяти Е.М. Круглова и Филимонова В.В.

## Квантовый выход кремниевого лавинного фотодиода в диапазонах длин волн 114–170 и 210–1100 nm

© П.Н. Аруев, В.П. Белик, А.А. Блохин, В.В. Забродский, А.В. Николаев, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, В.В. Филимонов, Е.В. Шерстнев

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

Поступило в Редакцию 17 сентября 2021 г.  
В окончательной редакции 19 ноября 2021 г.  
Принято к публикации 29 ноября 2021 г.

Разработан кремниевый лавинный фотодиод для регистрации ближнего инфракрасного, видимого, ультрафиолетового и вакуумного ультрафиолетового спектров. Проведено исследование внешнего квантового выхода кремниевого лавинного фотодиода в диапазоне длин волн 114–170 и 210–1100 nm. Показано, что лавинный фотодиод обладает внешним квантовым выходом от 29 до 9300 electrons/photon на длине волны 160 nm при напряжении обратного смещения 190–303 V соответственно.

**Ключевые слова:** лавинный фотодиод, вакуумный ультрафиолет, видимый диапазон, ближний инфракрасный диапазон, кремний.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.05.52146.19026

Ранее нами был представлен  $n^{++}-p-\pi-p^{++}$ -кремниевый лавинный фотодиод (ASPD) с внешним квантовым выходом  $\eta_{\text{ASPD}} = 24\text{--}150$  electrons/photon в спектральном диапазоне 120–170 nm [1]. Для увеличения  $\eta_{\text{ASPD}}$  в вакуумном ультрафиолете нами был разработан и исследован фотодиод ASPD с оптимизированной структурой.

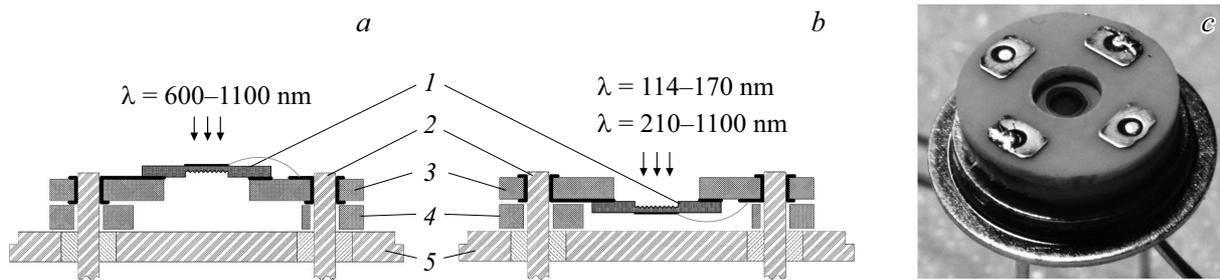
Как показано в [1], применение традиционных антиотражающих покрытий на основе диэлектриков ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgF}_2$ , LiF,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) является неприемлемым для длин волн  $\lambda < 130$  nm ввиду резкого уменьшения глубины поглощения квантов до значения  $\sim 10$  nm. Такая глубина поглощения квантов вакуумного ультрафиолета (ВУФ) делает любые диэлектрические антиотражающие покрытия непрозрачными для  $20 < \lambda < 130$  nm [2]. В качестве альтернативы антиотражающим покрытиям в конструкции нового ASPD был применен известный метод текстурирования поверхности активной области [3]. Это было сделано для уменьшения потерь, связанных с отражением ВУФ. Дополнительно была уменьшена температура диффузии бора при формировании изотипного  $p^{++}$ -слоя на текстурированной поверхности. Это было сделано для увеличения эффективности регистрации ВУФ за счет уменьшения глубины залегания изотипного  $p^{++}-\pi$ -перехода. Кроме того, для снижения темнового тока была уменьшена толщина активной области фотодиода до  $150\ \mu\text{m}$  методом реактивного ионного травления. В остальном конструкция ASPD, оптимизированного для регистрации ВУФ, была аналогична конструкции ASPD из работы [1].

Оптимизированный ASPD в режимах работы „front illuminated“ и „back illuminated“ схематично представлен на рис. 1. В настоящей работе в режиме „front illuminated“ ASPD облучался потоком квантов в спектральном диапазоне  $\lambda = 600\text{--}1100$  nm со стороны  $n^{++}$ -слоя, покрытого нитридом кремния (рис. 1, a). При облучении в режиме „back illuminated“ ASPD облучался потоком квантов в спектральных диапазонах  $\lambda = 114\text{--}170$  и  $210\text{--}1100$  nm со стороны  $p^{++}$ -слоя (рис. 1, b). Смена режимов облучения ASPD достигалась перевертыванием подкристалльной платы и фиксацией ее методом пайки к выводам корпуса ТО-5 (рис. 1, c).

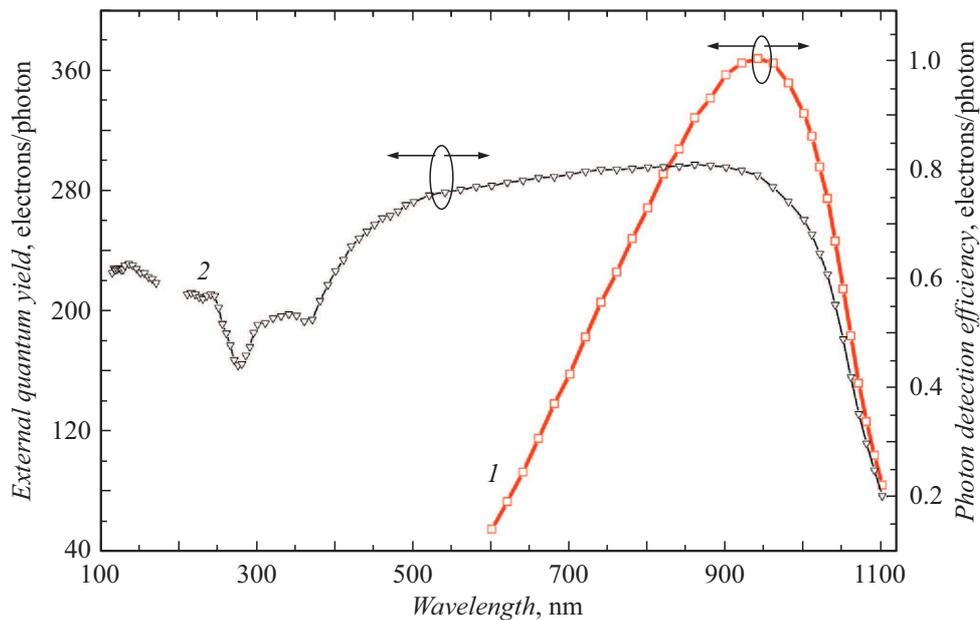
Спектральные зависимости  $\eta_{\text{ASPD}}$  для режимов работы „front illuminated“ и „back illuminated“ исследовались на основе метрологической базы из работы [1] при напряжении обратного смещения 280 V и температуре  $22^\circ\text{C}$ . В случае диапазона  $\lambda = 114\text{--}170$  nm размер выходной щели вакуумного монохроматора в настоящей работе был уменьшен с  $0.3 \times 0.3$  до  $0.15 \times 0.15$  mm. Это было сделано для гарантированного попадания всего пучка ВУФ в активную область ASPD диаметром 1 mm. Данное условие является необходимым при измерении спектральных характеристик методом сравнения. Значение  $\eta_{\text{ASPD}}$  определялось выражением

$$\eta_{\text{ASPD}} = \eta_{\text{SPD}}(I_{\text{ASPD}}/I_{\text{SPD}}), \quad (1)$$

где  $\eta_{\text{SPD}}$  — внешний квантовый выход калиброванного фотодиода,  $I_{\text{ASPD}}$  — фототок ASPD,  $I_{\text{SPD}}$  — фототок калиброванного фотодиода. В качестве калиброванного использовался фотодиод SPD без внутреннего усиления [4]. Результаты представлены на рис. 2.



**Рис. 1.** ASPD в корпусе TO-5. *a* — режим „front illuminated“, *b* — режим „back illuminated“ (*1* — кристалл ASPD, *2* — электрически изолированные выводы корпуса, *3* — подкристалльная диэлектрическая плата с металлизацией, *4* — диэлектрическая плата, *5* — основание металлостеклянного корпуса TO-5), *c* — фотография ASPD в корпусе TO-5 в режиме „back illuminated“.



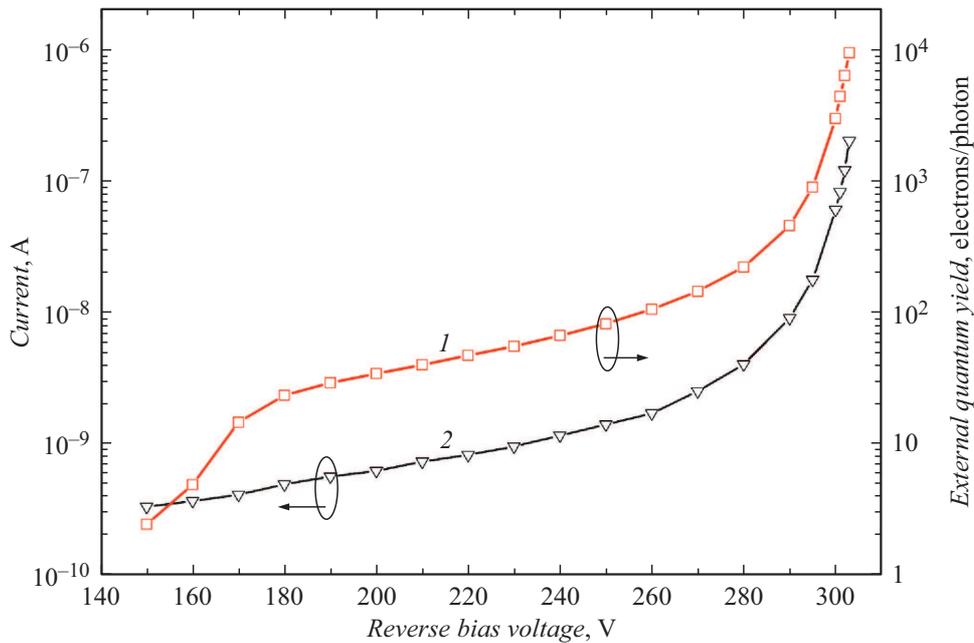
**Рис. 2.** Спектральные зависимости внешнего квантового выхода ASPD и эффективности регистрации фотонов ASPD в режимах „front illuminated“ (*1*) и „back illuminated“ (*2*).

Методологическое отличие настоящей работы от [1] заключалось в определении коэффициента умножения ASPD ( $M_{\text{ASPD}}$ ). Чтобы определить  $M_{\text{ASPD}}$ , была использована спектральная зависимость  $\eta_{\text{ASPD}}$  в режиме „front illuminated“ (рис. 2). В этом режиме облучение ASPD происходило со стороны  $n^{++}$ -слоя, покрытого нитридом кремния толщиной  $0.12 \mu\text{m}$ . Поскольку толщина нитрида кремния на поверхности  $n^{++}$ -слоя известна из технологии изготовления с точностью не меньше 2%, из преобразований Френеля [5] следует, что потери на отражение для  $\lambda = 940 \text{ nm}$  будут меньше 1%, а значит, этими потерями можно пренебречь. Это допущение позволяет в дальнейшем исходить из того, что 100% излучения будет поглощаться в толщине активной области ASPD (для  $\lambda = 940 \text{ nm}$  в случае режима „front illuminated“). Из технологии изготовления ASPD известно, что толщина  $n^{++}$ -слоя  $\sim 0.5 \mu\text{m}$ , суммарная толщина  $p$ - и  $\pi$ -областей  $\sim 150 \mu\text{m}$ , толщина  $p^{++}$ -слоя  $\sim 0.03 \mu\text{m}$ . Поскольку глубина поглощения излучения с  $\lambda = 940 \text{ nm}$  в кремнии

$\sim 40 \mu\text{m}$  [2], не менее 99% этого излучения поглотится в  $p$ - и  $\pi$ -областях. Это обусловлено тем, что потери данного излучения в  $n^{++}$ -слое будут на уровне десятых долей процента, а до  $p^{++}$ -слоя излучение с этой длиной волны дойдет в еще меньшем количестве. Выше было показано, что в случае  $\lambda = 940 \text{ nm}$  потери на отражение близки к нулю, тогда с учетом распределения излучения с этой длиной волны в структуре ASPD можно утверждать, что в случае режима „front illuminated“ при  $\lambda = 940 \text{ nm}$  величина  $M_{\text{ASPD}}$  совпадает с  $\eta_{\text{ASPD}}$  на 99%:

$$M_{\text{ASPD}} = \eta_{\text{ASPD}}, \quad (2)$$

где  $\eta_{\text{ASPD}}$  — внешний квантовый выход ASPD, вычисленный по формуле (1). В настоящей работе значение  $M_{\text{ASPD}}$  было равно 366 (рис. 2) для режима „front illuminated“ при  $\lambda = 940 \text{ nm}$ . Для расчетов в режиме „back illuminated“ использовалось значение  $M_{\text{ASPD}} = 366$ , определенное в режиме „front illuminated“ при  $\lambda = 940 \text{ nm}$ , так как  $M_{\text{ASPD}}$  считаем характеристикой



**Рис. 3.** Зависимости характеристик ASPD в режиме „back illuminated“ от напряжения обратного смещения. 1 — внешний квантовый выход ( $\lambda = 160$  nm), 2 — темновой ток.

$n^{++}-p$ -перехода, а значит, функцией температуры и напряжения обратного смещения на переходе, которые были одинаковы для режимов „front illuminated“ и „back illuminated“. На основе известных значений  $\eta_{\text{ASPD}}$  и  $M_{\text{ASPD}}$  были вычислены спектральные зависимости эффективности регистрации фотонов ASPD ( $\varepsilon_{\text{ASPD}}$ ) для режимов облучения „front illuminated“ и „back illuminated“. Величина  $\varepsilon_{\text{ASPD}}$  определялась выражением

$$\varepsilon_{\text{ASPD}}(\lambda) = \eta_{\text{ASPD}}(\lambda)/M_{\text{ASPD}}. \quad (3)$$

На рис. 2 также приведены значения  $\varepsilon_{\text{ASPD}}$  в режимах „front illuminated“ и „back illuminated“.

Для оценки доступного диапазона значений  $\eta_{\text{ASPD}}$  в режиме „back illuminated“ в области вакуумного ультрафиолета была выбрана длина волны 160 nm. На этой длине волны плотность излучения газоразрядной лампы максимальна, что удобно с метрологической точки зрения. Величина  $\eta_{\text{ASPD}}$  определялась по формуле (1). На рис. 3 представлены зависимости  $\eta_{\text{ASPD}}$  и темнового тока ASPD от напряжения обратного смещения.

Из экспериментальных данных видно, что изотипный  $p^{++}-\pi$ -переход на текстурированной поверхности активной области кремниевого лавинного фотодиода позволяет обеспечить внешний квантовый выход от 29 до 9300 electrons/photon на длине волны 160 nm. Оптимизированный ASPD в режиме „back illuminated“ демонстрирует эффективность регистрации фотонов 0.59–0.63 electrons/photon в диапазоне длин волн 114–170 nm и 0.44–0.81 electrons/photon в диапазоне длин волн 210–1050 nm. Эффективность регистрации фотонов исследованного ASPD в диапазонах длин волн 114–130 и

275–1050 nm превосходит эффективность фотодиода из работы [6].

Таким образом, в работе исследован ASPD, оптимизированный для регистрации вакуумного ультрафиолета. Показано, что за счет уменьшения потерь на отражение методом текстурирования активной области и уменьшения глубины залегания изотипного  $p^{++}-\pi$ -перехода внешний квантовый выход и эффективность регистрации ВУФ фотонов были увеличены более чем в 4.5 раза относительно аналогичных характеристик ASPD из нашей предыдущей работы [1].

### Благодарности

Авторы благодарны коллегам из ФТИ им. А.Ф. Иоффе Н.В. Забродской, М.С. Лазеевой, М.В. Дроздовой, В.И. Маршаловой за помощь в изготовлении фотодиодов.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] П.Н. Аруев, В.П. Белик, В.В. Забродский, Е.М. Круглов, А.В. Николаев, В.И. Сахаров, И.Т. Серенков, В.В. Филимонов, Е.В. Шерстнев, ЖТФ, **90** (8), 1386 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.08.49552.44-20 [P.N. Aruev, V.P. Belik, V.V. Zabrodskii, E.M. Kruglov, A.V. Nikolaev, V.I. Sakharov, I.T. Serenkov, V.V. Filimonov, E.V. Sherstnev, Tech. Phys., **65** (8), 1333 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220080022].

- [2] *Handbook of optical constants of solids*, ed by E.D. Palik (Academic Press, USA, 1998).
- [3] H. Schröder, E. Obermeier, A. Steckenborn, J. Micromech. Microeng., **9** (2), 139 (1999). DOI: 10.1088/0960-1317/9/2/309
- [4] П.Н. Аруев, С.В. Бобашев, А.М. Красильщиков, А.В. Николаев, Д.Ю. Петров, Е.В. Шерстнев, ПТЭ, № 1, 98 (2021). DOI: 10.31857/S003281622006018X [P.N. Aruev, S.V. Bobashev, A.M. Krassilchtchikov, A.V. Nikolaev, D.Yu. Petrov, E.V. Sherstnev, Instrum. Exp. Tech., **64** (1), 93 (2021). DOI: 10.1134/S0020441220060147].
- [5] M. Born, E. Wolf, *Principles of optics*, 7th ed. (Cambridge University Press, 1999). DOI: 10.1017/CBO9781139644181
- [6] R. Chandrasekharan, M. Messina, A. Rubbia, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, **567** (1), 45 (2006).