

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 η_{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 (SiO_2 , MgF_2 , LiF, Si_3N_4) является неприемлемым для длин волн $\lambda < 130$ nm ввиду резкого уменьшения глубины поглощения квантов до значения ~ 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 η_{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°C . В случае диапазона $\lambda = 114\text{--}170$ nm размер выходной щели вакуумного монохроматора в настоящей работе был уменьшен с 0.3×0.3 до 0.15×0.15 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 η_{ASPD} определялось выражением

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

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

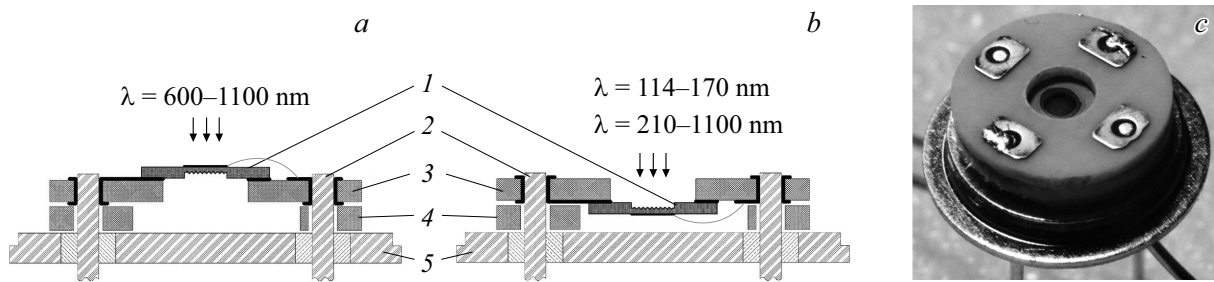


Рис. 1. ASPD в корпусе TO-5. *a* — режим „front illuminated“, *b* — режим „back illuminated“ (*1* — кристалл ASPD, *2* — электрически изолированные выводы корпуса, *3* — подкристалльная диэлектрическая плата с металлизацией, *4* — диэлектрическая плата, *5* — основание металлостеклянного корпуса TO-5),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

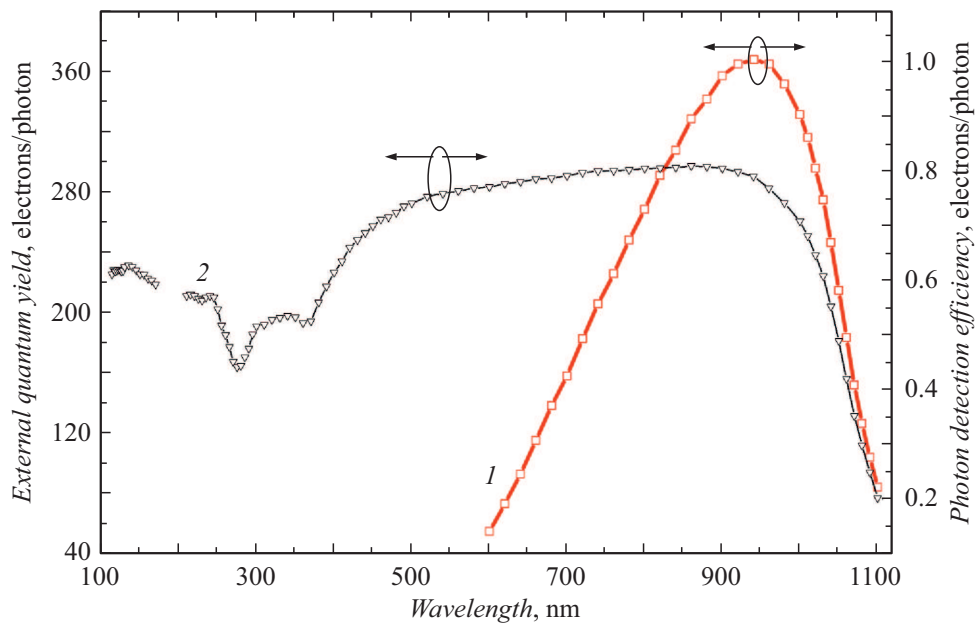


Рис. 2. Спектральные зависимости внешнего квантового выхода ASPD и эффективности регистрации фотонов ASPD в режимах „front illuminated“ (*1*) и „back illuminated“ (*2*).

Методологическое отличие настоящей работы от [1] заключалось в определении коэффициента умножения ASPD (M_{ASPD}). Чтобы определить M_{ASPD} , была использована спектральная зависимость η_{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 π -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 π -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_{ASPD} совпадает с η_{ASPD} на 99%:

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

где η_{ASPD} — внешний квантовый выход ASPD, вычисленный по формуле (1). В настоящей работе значение M_{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_{ASPD} считаем характеристикой

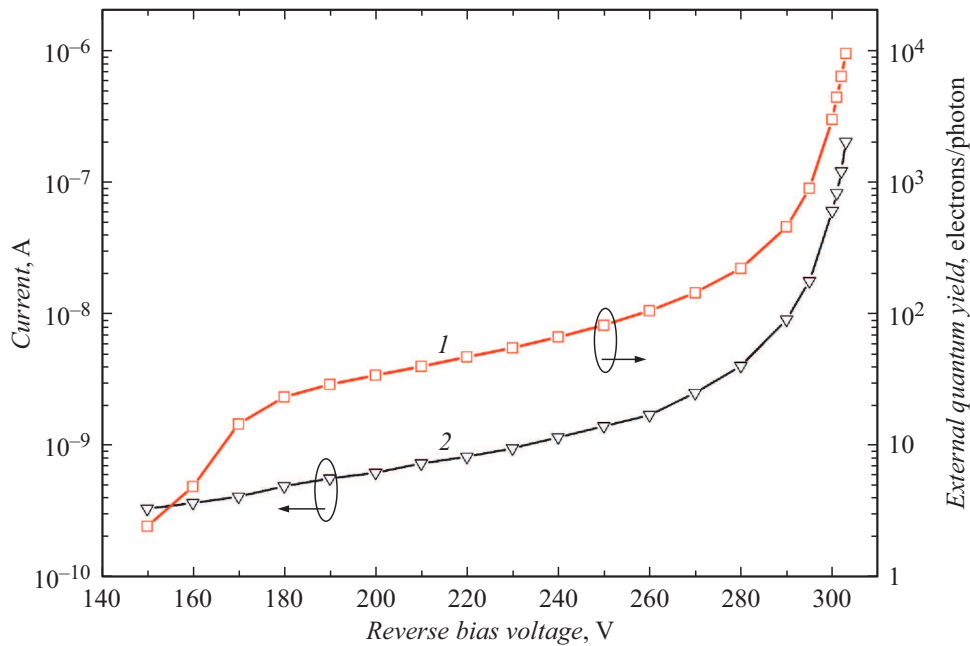


Рис. 3. Зависимости характеристик ASPD в режиме „back illuminated“ от напряжения обратного смещения. 1 — внешний квантовый выход ($\lambda = 160$ nm), 2 — темновой ток.

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 η_{ASPD} и M_{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 η_{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 η_{ASPD} определялась по формуле (1). На рис. 3 представлены зависимости η_{ASPD} и темнового тока ASPD от напряжения обратного смещения.

Из экспериментальных данных видно, что изотипный p^{++} – π -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^{++} – π -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).