

07.2

Характеристики кремниевого лавинного фотодиода для ближнего ИК-диапазона

© 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

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

[¶] E-mail: sildet@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 22 апреля 2019 г.

В окончательной редакции 22 апреля 2019 г.

Принято к публикации 30 апреля 2019 г.

Проведено исследование чувствительности (в диапазоне длин волн 400–1150 nm), темнового тока и динамических характеристик разработанного кремниевого лавинного фотодиода с активной областью диаметром 1.5 mm. Показано, что разработанный лавинный фотодиод обладает следующей совокупностью характеристик: чувствительность 80–85 A/W в диапазоне длин волн 900–1010 nm, темновой ток 1.5 nA, фронты нарастания и спада менее 2.5 ns при напряжении обратного смещения 350 V.

Ключевые слова: лавинный фотодиод, инфракрасный диапазон, кремний, темновой ток.

DOI: 10.21883/PJTF.2019.15.48086.17851

Высокоточная регистрация слабых сигналов видимого и ближнего инфракрасного (ИК) диапазонов, исследования динамики изменения интенсивности световых процессов с характерными (порядка единиц наносекунд) временами являются крайне востребованной практической задачей как для научных экспериментов, так и для промышленного приборостроения. Например, для диагностики плазмы методом томсоновского рассеяния [1] необходимы фотодиоды с внутренним усилением. Кремниевые лавинные фотодиоды (APD — avalanche photodiode) с внутренним умножением носителей заряда за счет эффекта ударной ионизации [2–4] применяются в тех случаях, когда чувствительность системы *pin*-диод–предусилитель становится недостаточной.

На данный момент в России не существует отечественных коммерчески доступных кремниевых APD с чувствительностью в десятки A/W для регистрации оптического диапазона. Цель настоящей работы — исследовать спектральные характеристики разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе кремниевого APD в диапазоне длин волн 400–1150 nm при рабочем напряжении 350 V, темнового тока, фронтов нарастания и спада на длине волны $\lambda = 1060$ nm.

В рамках кремниевой планарной CVD-технологии (CVD — chemical vapour deposition) был разработан и изготовлен APD с активной областью диаметром 1.5 mm, оптимизированный для регистрации сигналов ИК-диапазона с фронтами нарастания и спада меньше 3 ns. Структура разработанного „reach-through“ APD относится к типу „front-illuminated“ (разделение носителей происходит со стороны облучаемой фотоприемной области структуры, рис. 1).

Измерения характеристик приборов проводились в лабораторных условиях при температуре 20–25°C. Спектральная зависимость фоточувствительности APD ис-

следовалась в диапазоне длин волн 400–1150 nm методом сравнения токовых сигналов APD и рабочего этало-

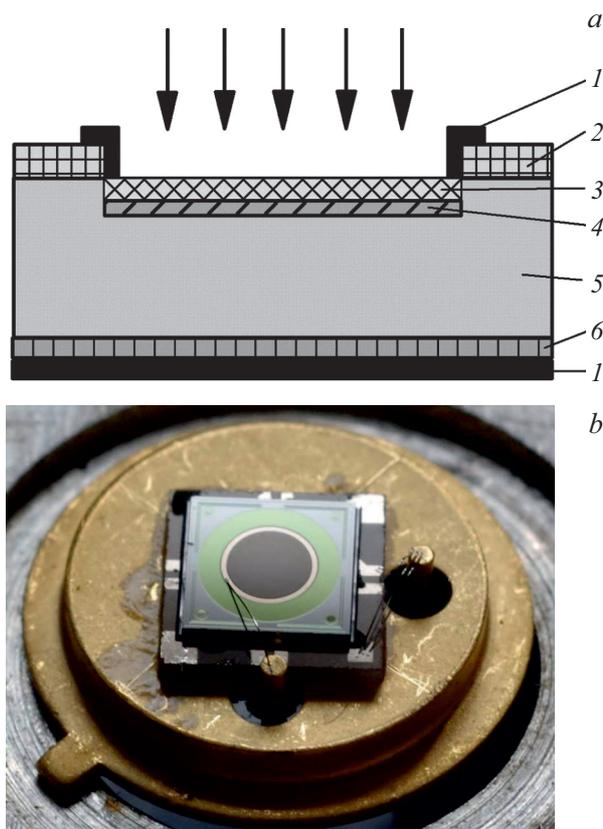


Рис. 1. *a* — структура APD. 1 — металлический контакт, 2 — диоксид кремния, 3 — n⁺⁺-слой кремния толщиной < 1 μm, 4 — область лавинного умножения p-типа (КДБ10), 5 — база, кремний p-типа толщиной ~ 100 μm (КДБ5000), 6 — p⁺⁺-слой кремния толщиной ~ 0.1 μm. *b* — фотография APD в корпусе TO-5.

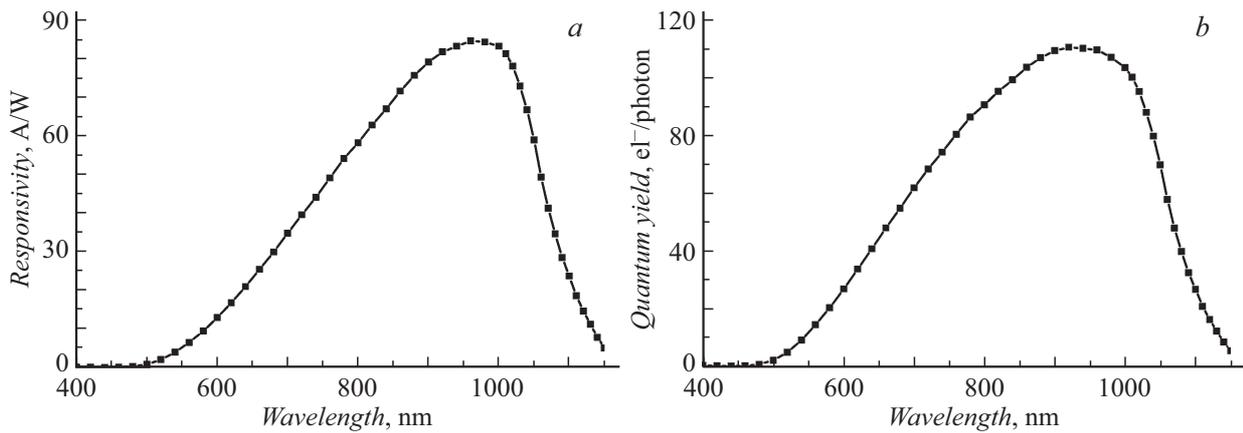


Рис. 2. Спектральные зависимости APD. *a* — чувствительность, *b* — квантовый выход фотоответа.

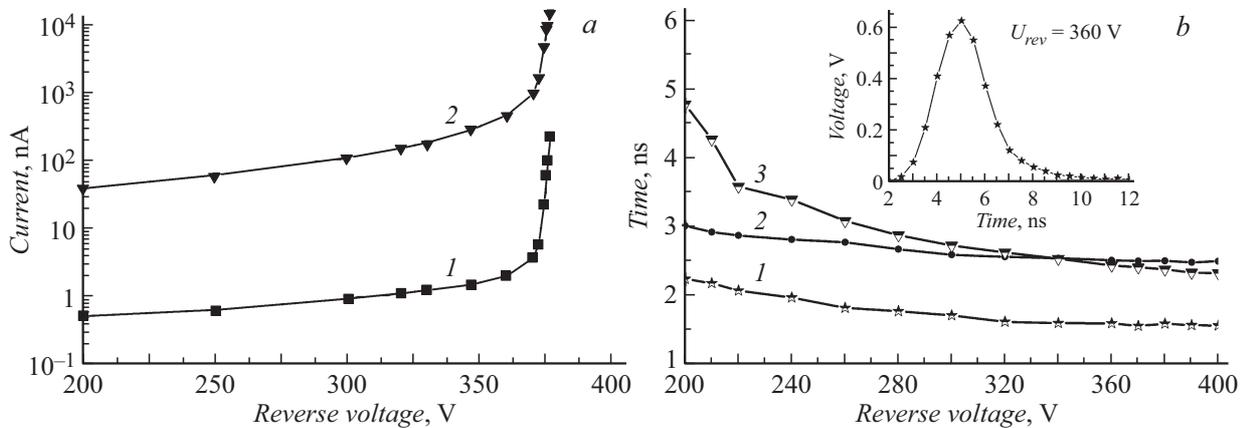


Рис. 3. *a* — зависимости темного тока (1) и фототока (2) от обратного напряжения; *b* — зависимости фронтов нарастания (1), спада (2) и ширины импульса (3) на полувысоте от обратного напряжения.

на (калиброванный кремниевый фотодиод ФДУК-100УТ) с использованием квазистатических пикоамперметров Keithley 6487. Обратное напряжение для исследуемого APD обеспечивалось от встроенного блока питания (на эталонный фотодиод обратного смещения не подавалось).

Абсолютные значения спектральной чувствительности [A/W] APD определялись экспериментально в соответствии с выражением

$$S(\lambda)_{APD} = S(\lambda)_{PD}(I(\lambda)_{APD}/I(\lambda)_{PD}), \quad (1)$$

где λ — длина волны, $I(\lambda)_{APD}$ — фототок APD, $I(\lambda)_{PD}$ — фототок калиброванного фотодиода, $S(\lambda)_{PD}$ — абсолютная чувствительность калиброванного кремниевого фотодиода, $S(\lambda)_{APD}$ — измеренная абсолютная чувствительность APD. Значения квантового выхода фотоответа $EQY(\lambda)_{APD}[e^-/\text{photon}]$ вычислялись по формуле

$$EQY(\lambda)_{APD} = (S(\lambda)_{APD}hc)/(\lambda q), \quad (2)$$

где h — постоянная Планка, c — скорость света, q — заряд электрона.

Спектральные зависимости чувствительности и квантового выхода фотоответа APD при напряжении обратного смещения 350 V представлены на рис. 2.

Для исследования обратной ветви вольт-амперной характеристики использовался пикоамперметр Keithley 6487 со встроенным блоком питания. Зависимости от обратного напряжения темного тока и фототока (на длине волны 1060 nm) APD в диапазоне напряжений 200–380 V представлены на рис. 3, *a*. Зависимости динамических характеристик APD от обратного напряжения строились на основе данных, получаемых с помощью цифрового осциллографа (с полосой пропускания 500 MHz), лазерного диода (длина волны 1060 nm), генератора испытательных импульсов И1-14, блока питания пикоамперметра, трансимпедансного усилителя с коэффициентом усиления 680 V/A и полосой пропускания ~ 400 MHz. Зависимости фронтов нарастания и спада, а также ширины импульса на полувысоте от обратного напряжения представлены на рис. 3, *b*. Пример осциллограммы фотоотклика APD (подключенного к трансимпедансному усилителю) на импульс лазерного диода представлен на вставке к рис. 3, *b*.

Оценка коэффициента умножения APD не является тривиальной экспериментальной задачей, так как формально для этого необходимо знать абсолютное значение фототока APD при коэффициенте усиления (M — multiplication), равном единице, что проблематично в силу конструктивной особенности структуры APD. Данная особенность обусловлена наличием градиента концентрации бора между слоем умножения (10^{15} cm^{-3}) и слоем базы (10^{12} cm^{-3}). В свою очередь градиент концентрации бора формирует встроенное поле изотипного перехода, которое блокирует движение фотоиндуцированных электронов из базы в направлении n – p -перехода через слой умножения. Если регистрировать фототок APD без подачи обратного смещения (именно в этом случае $M = 1$) в ближнем ИК-диапазоне, то измерения будут некорректны, так как вклад в фототок фотоиндуцированных электронов из базы будет близок к нулю. Сбор же неосновных носителей заряда, индуцированных ближним ИК-спектром, будет происходить только из области умножения (электроны) и из поверхностного n^+ -слоя (дырки). По мере увеличения обратного смещения влияние встроенного поля между зоной умножения и базой на движение электронов будет уменьшаться вплоть до полного устранения, что выразится в виде скачкообразного увеличения фототока при освещении ближним ИК-спектром. Последнее может привести к завышению оцениваемого значения M для APD. Здесь рост фототока может быть ошибочно связан повышением M , а не с добавкой из базы носителей, ранее заблокированных встроенным полем между зоной умножения и базой.

Однако при увеличении напряжения обратного смещения параллельно процессу снятия влияния встроенного поля между зоной умножения и базой будет неизбежно происходить увеличение реального значения M за счет роста напряженности поля в области n – p -перехода. Увеличение значения M для n – p -перехода в данной ситуации трудно оценить экспериментально. Это обусловлено тем, что величина фототока (после обеспечения режима сбора носителей со всей базы APD) будет ошибочно присвоена режиму APD с $M = 1$. На самом деле в режиме сбора носителей со всей базы APD значение M для n – p -перехода уже может быть значительно больше единицы. Это в свою очередь приведет к заниженной оценке M для APD в режиме рабочих напряжений. К диапазону рабочих напряжений будем относить значения, при которых ширина импульса на полувысоте (рис. 3, *b*) слабо меняется в зависимости от напряжения обратного смещения. В настоящей работе это напряжение находится в диапазоне 220–400 В.

Абсолютные спектральные измерения в ИК-области позволяют провести оценку значения M для APD с достаточной степенью достоверности, так как в ИК-области отсутствует эффект ударной ионизации горячих электронов, характерный для УФ-спектра [5]. Из значений квантового выхода исследованного APD (рис. 2, *b*) следует, что максимальное значение $M = 110$ для $\lambda = 920 \text{ nm}$ достигается при напряжении обратного

смещения 350 В. Следует отметить, что указанная максимальная величина наблюдается для структуры APD, которая не содержит в себе антиотражающего покрытия. Отражение от кремния в области $\lambda = 920 \text{ nm}$ составляет величину $\sim 30\%$. Исходя из этого можно сделать вывод, что значение M для n – p -перехода (а не для APD) занижено в 1.3 раза относительно вычисленного M для APD. В данном рассуждении мы не учитываем незначительные потери фотоиндуцированных носителей в поверхностном n^+ -слое толщиной меньше $1 \mu\text{m}$, так как глубина поглощения для длины волны $\lambda = 920 \text{ nm}$ в кремнии больше $40 \mu\text{m}$ [6].

Таким образом, в работе представлены результаты исследования чувствительности, темнового тока и динамических характеристик кремниевого APD с активной областью диаметром 1.5 mm, оптимизированного для ближнего ИК-спектра. Показано, что APD обладает совокупностью следующих характеристик: фоточувствительность 80–85 А/Вт в диапазоне длин волн 900–1010 nm, темновой ток 1.5 nА, фронты нарастания и спада менее 2.5 ns ($\lambda = 1060 \text{ nm}$) при напряжении обратного смещения 350 В.

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 и М.Е. Левинштейну за полезное обсуждение результатов работы.

В проведенных исследованиях использовалось оборудование ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), поддерживаемого Минобрнауки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Забродский В.В., Калинина Д.В., Мухин Е.Е., Раздобарин Г.Т., Суханов В.Л., Толстяков С.Ю., Тукачинский А.С. // ЖТФ. 2003. Т. 73. В. 8. С. 118–122.
- [2] Chynoweth A.G. // Semiconductors and Semimetals. V. 4. N.Y.: Academic Press, 1968. Ch. 4. P. 263–325.
- [3] Кузьмин В.А., Крюкова Н.Н., Кюрегян А.С., Мнацаканов Т.Т., Шуман В.Б. // ФТП. 1975. Т. 9. В. 4. С. 735–739.
- [4] Lee C.A., Logan R.A., Batdorf R.L., Kleimack J.J., Wiegmann W. // Phys. Rev. 1964. V. 134. N 3A. P. A761–A773.
- [5] Kolodinski S., Werner J.H., Wittchen T., Queisser H.J. // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. N 17. P. 2405–2407.
- [6] Handbooks of optical constants of solids / Ed. E.D. Palik. San Diego: Academic Press, 1998. 999 p.