

07

## Исследование фотоответа кремниевого мультипиксельного счетчика фотонов в вакуумном ультрафиолете

© В.В. Забродский, П.Н. Аруев, В.П. Белик,  
Б.Я. Бер, С.В. Бобашев, М.В. Петренко,  
Н.А. Соболев, В.В. Филимонов, М.З. Шварц

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

Поступило в Редакцию 3 декабря 2013 г.

Исследован фотоответ кремниевого мультипиксельного счетчика фотонов, работающего в режиме гейгеровского пробоя на длинах волн  $\lambda = 115, 121, 128, 160$  и  $175$  nm. Продемонстрирована возможность регистрации излучения в режиме счета фотонов при комнатной температуре на исследованных длинах волн с эффективностью порядка 2%.

В последнее десятилетие идет активная работа по созданию мультипиксельных счетчиков фотонов (multi-pixel photon counter — МРРС), работающих в режиме гейгеровского пробоя и способных регистрировать излучение в режиме счета фотонов [1–3]. МРРС являются альтернативой традиционным вакуумным фотоумножителям (ФЭУ) и изготавливаются по планарной кремниевой технологии в виде матрицы ячеек, включенных параллельно. Ячейки матрицы представляют собой обратносмещенные фотодиоды, работающие при напряжении, превышающем напряжение пробоя ячейки. Каждая ячейка МРРС снабжена индивидуальной системой гашения лавины. Лавина вызывается носителем заряда, сгенерированным при поглощении фотона или возникшим вследствие генерационно-рекомбинационных процессов в зоне умножения, процессов диффузии носителей из нейтральных областей, а также в результате освобождения носителей, захваченных на ловушки в запрещенной зоне при прохождении предыдущих разрядов [4]. МРРС разрабатывают как на основе кремния, так и с использованием других полупроводниковых соединений [5,6]. Традиционно спектральная чувствительность кремниевых МРРС находится в диапазоне длин

Изменение частоты импульсов ( $\Delta F_{\text{МРРС}}$ ) при облучении в вакууме и на воздухе для двух разработанных структур МРРС, а также глубина поглощения излучения в кремнии и диоксиде кремния

Длина волны, nm	$\Delta F_{\text{МРРС}}$ , MHz в вакууме		$\Delta F_{\text{МРРС}}$ , MHz в атмосфере		Глубина поглощения, nm [8]	
	структура I	структура II	структура I	структура II	Si	SiO <sub>2</sub>
175	-0.02	+0.76	+0.01	+0.01	~ 5.8	—
160	+0.05	+2.46	+0.01	+0.01	~ 6.1	~ 3 · 10 <sup>6</sup>
128	-0.04	+0.3	0	+0.01	~ 6.9	~ 73
121	-0.03	+0.24	0	0	~ 7.3	~ 12
115	-0.01	+0.04	-0.01	+0.01	~ 7.6	~ 15

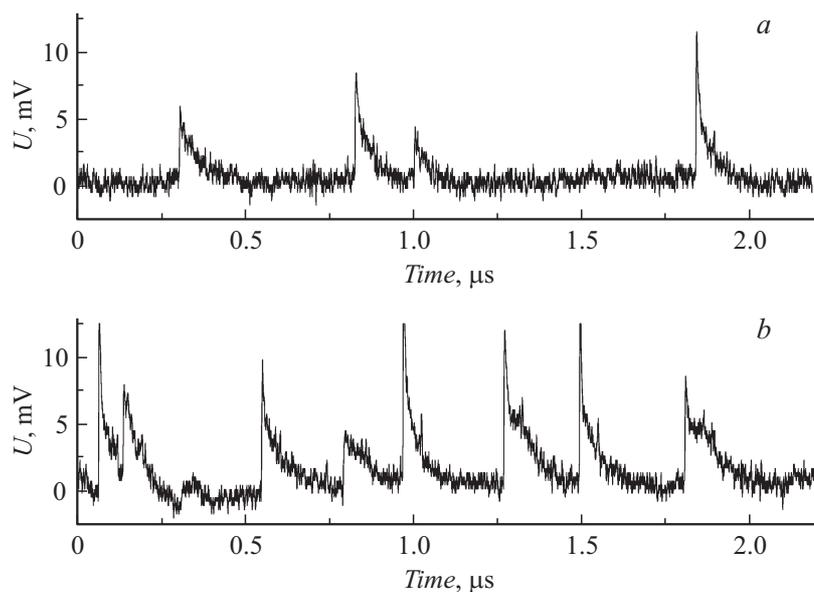
волн  $\lambda = 300\text{--}900\text{ nm}$  [3]. Возможность счета фотонов в диапазоне  $\lambda = 130\text{--}260\text{ nm}$  с помощью кремниевых МРРС продемонстрирована недавно в работе [7]. Последние работы по оптимизации структуры МРРС для областей ближнего (200–400 nm) ультрафиолета (УФ) и вакуумного (10–200 nm) ультрафиолета (ВУФ) вызваны необходимостью регистрации черенковского излучения в астрофизике и люминесценции сжиженных ксенона ( $\lambda = 173\text{ nm}$ ) и аргона ( $\lambda = 128\text{ nm}$ ) в рамках экспериментов по поиску частиц темной материи [7].

Возможность регистрации излучения в режиме счета фотонов с помощью кремниевых МРРС в спектральном диапазоне  $\lambda = 115\text{--}130\text{ nm}$  вызывала большие сомнения. Это связано с рядом обстоятельств. Характерные глубины залегания  $p\text{--}n$ -переходов в традиционных структурах МРРС составляют несколько сотен nm, в то время как глубина поглощения излучения (расстояние, на котором энергия падающего излучения уменьшается в  $e$  раз) в кремнии составляет величину меньше 8 nm (см. таблицу) [8]. Кроме того, материалы, используемые в качестве просветляющих и пассивирующих покрытий для активной области ячеек, активно поглощают ВУФ. К примеру, прозрачность диоксида кремния резко уменьшается в ВУФ для длин волн короче  $\lambda = 160\text{ nm}$  (см. таблицу) [8]. В отличие от обычных фотодиодов или лавинных фотодиодов активная зона МРРС представляет собой тонкую область  $p\text{--}n$ -перехода с напряженностью поля свыше  $10^5\text{ V/cm}$ , необходимой для реализации режима гейгеровского пробоя. Поскольку глубина поглощения излучения в кремнии для диапазона  $\lambda = 115\text{--}130\text{ nm}$

меньше 8 nm, то и глубина  $p$ - $n$ -перехода должна быть порядка этой величины. При этом поверхностный слой активной области кремниевого МРРС должен быть проводимости  $p$ -типа, поскольку коэффициент ударной ионизации для электронов больше этого коэффициента для дырок [9]. Кроме того, для эффективной регистрации фотонов в диапазоне ВУФ необходимо сформировать  $p$ - $n$ -структуру, у которой активная область гейгеровского пробоя будет максимально приближена к поверхности, а толщина просветляющего и пассивирующего покрытий будет минимальна, например на уровне единиц nm.

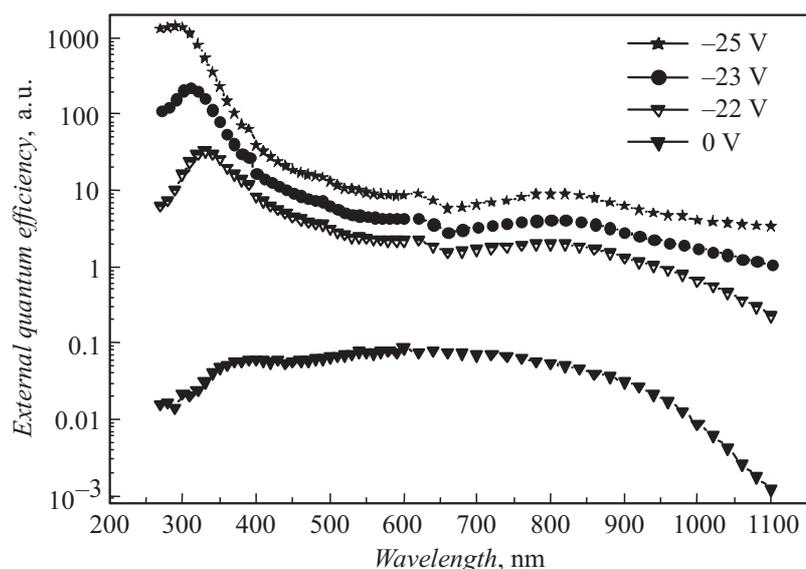
В данной работе приводятся результаты по созданию кремниевых МРРС на диапазон длин волн  $\lambda = 115$ – $130$  nm. С помощью технологии, разработанной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе [10,11], были изготовлены структуры МРРС с размерностью  $2 \times 10$  ячеек. Диаметр каждой ячейки был равен  $100 \mu\text{m}$ . Коэффициент заполнения активной области структуры МРРС был равен 50%. Ячейки имели гасящие сопротивления номиналом  $500 \text{ k}\Omega$ . Были изготовлены два типа структур МРРС на основе  $p^+$ - $n$ -перехода. В дальнейшем исследованные структуры МРРС будут обозначаться номерами I и II. Глубина залегания  $p^+$ - $n$ -перехода структуры I была порядка 40 nm. Глубина залегания  $p^+$ - $n$ -перехода структуры II была порядка 30 nm. Толщина пассивирующего и одновременно просветляющего покрытия была порядка 10 nm для всех исследованных структур. Измерения проводились при комнатной температуре, рабочее напряжение структур МРРС составляло величину 25 V для режима счета фотонов и от 0 до 25 V для измерений в токовом режиме.

Измерения внешней квантовой эффективности в токовом режиме (в качестве сигнала регистрировался фототок, а не частота импульсов) для диапазона длин волн  $\lambda = 280$ – $1100$  nm проводились с использованием комплекса для тестирования спектральных характеристик солнечных элементов, описанного в работе [12]. В области длин волн  $\lambda = 115, 121, 128, 160, 175$  nm использовался разработанный в ФТИ им. А.Ф. Иоффе вакуумный монохроматор, реализующий схему Сейя–Намиока [11]. Источником света в монохроматоре служила водородная лампа низкого давления с окном из фтористого магния, излучающая в спектральном диапазоне  $\lambda = 115$ – $175$  nm. Размер пучка регистрируемого излучения превышал размеры активной области исследованных структур МРРС. Для оценки плотности потока излучения использовался калиброванный кремниевый фотодиод с известной чувствительностью в ВУФ. Регистрация импульсов в режиме счета фотонов



**Рис. 1.** Осциллограммы сигнала структуры II, полученные в темновом режиме (a) и при облучении ВУФ (b) на длине волны 160 nm.

проводилась с помощью предусилителя (на основе операционного усилителя AD8009) и осциллографа DSO7054B Agilent Technologies с полосой пропускания 500 MHz. Частота импульсов структур МРРС измерялась счетчиком импульсов осциллографа. Регистрировались все импульсы, включая так называемые послеимпульсы (after-pulse). Измерялись частоты появления импульсов в темновом режиме ( $F_{dark}$ ) и при облучении квантами монохроматического излучения ( $F_{irrad}$ ). Значения ( $F_{irrad}$ ) измерялись для длин волн  $\lambda = 115, 121, 128, 160$  и  $175$  nm. Темновой режим обеспечивался металлической пластиной, которая помещалась между выходной щелью монохроматора и структурой МРРС. В таблице приведены значения изменения частоты импульсов ( $\Delta F_{МРРС}$ ) при измерении в вакууме и на воздухе для различных длин волн [13]. Значения ( $\Delta F_{МРРС}$ ) определялись по формуле  $\Delta F_{МРРС} = F_{irrad} - F_{dark}$ . Значение ( $F_{dark}$ ) регистрировалось до и после облучения структуры МРРС для каждой длины волны, в расчетах использовалось среднее



**Рис. 2.** Внешняя квантовая эффективность структуры II в токовом режиме при различных напряжениях обратного смещения.

значение. На рис. 1 показаны примеры осциллограмм импульсов гейгеровского пробоя для структуры II, снятые в темновом режиме и при облучении ВУФ на длине волны  $\lambda = 160$  nm. На рис. 2 приведены спектральные зависимости внешней квантовой эффективности структуры II. Спектральные зависимости на рис. 2 получены в токовом режиме при различных напряжениях.

Из экспериментальных данных видно, что исследованные структуры МРРС демонстрируют режим счета фотонов в ВУФ при комнатной температуре. Однако режим счета фотонов наблюдается на всех исследованных длинах волн у структуры II, в то время как режим счета фотонов зарегистрирован у структуры I только на длине волны  $\lambda = 160$  nm. Кроме того, структура I обладает меньшей эффективностью в режиме счета фотонов, что, скорее всего, связано с большей глубиной залегания  $p$ - $n$ -перехода. Предварительная оценка эффективности в режиме счета фотонов для структуры II дает величину порядка 2% (с учетом эффекта послеимпульсов). Особо стоит отметить факт уменьшения частоты

темновых импульсов структуры I при облучении ВУФ. При облучении структуры I на длинах волн  $\lambda = 115, 121$  и  $175$  nm зафиксировано уменьшение частоты темновых импульсов. Также для всех структур наблюдалось незначительное уменьшение частоты темновых импульсов в процессе откачки вакуумного монохроматора. Для оценки вклада рассеянного излучения („нулевого“ порядка) вакуумный монохроматор заполняли воздухом, который поглощает длины волн  $\lambda = 115, 121, 128, 160$  и  $175$  nm. При облучении структур в отсутствие вакуума не было зарегистрировано приращения или уменьшения частоты импульсов у всех исследованных структур МРРС. Из этого можно сделать вывод, что в эксперименте продемонстрирована регистрация излучения ВУФ, а меры по борьбе с рассеянным излучением в монохроматоре были эффективны.

Для оценки спектральной эффективности области лавинного умножения структуры II была измерена зависимость внешней квантовой эффективности от обратного напряжения, результат представлен на рис. 2. Уровень максимальных зарегистрированных фототоков был порядка десятков  $\mu\text{A}$ . Максимум внешней квантовой эффективности структуры II в режиме гейгеровского пробоя ( $25$  V) находится на длине волны  $\lambda = 290$  nm. Из этого следует, что область лавинного умножения структуры II оптимизирована для регистрации фотонов с глубиной поглощения в кремнии порядка  $4-5$  nm [7].

Таким образом, в работе показано, что разработанный технологический подход позволяет формировать кремниевые МРРС для регистрации УФ- и ВУФ-диапазонов. Полученные результаты превосходят данные, приведенные в работе [7]. Впервые изготовлены структуры кремниевых МРРС, в которых реализован режим счета фотонов для длин волн  $\lambda = 115, 121$  и  $128$  nm.

Авторы благодарны коллегам из ФТИ им. А.Ф. Иоффе: Н.В. Забродской, М.С. Лазеевой, М.В. Дроздовой, В.В. Васильевой за помощь в изготовлении структур МРРС, И.Т. Серенкову, Н.Х. Тимошиной, Л.А. Шмаенку и Северо-Западному региональному ЦКП „Материаловедение и диагностика в передовых технологиях“ (ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия) за техническую помощь в исследовании, Е.В. Поповой (МИФИ) за обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ ОФИ-м 13-02-12017.

## Список литературы

- [1] *Sadygov Z. et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2006. V. 567. P. 70.
- [2] *Collazuol et al.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2007. V. 581 P. 461.
- [3] *Musienko Y.* // Nucl. Instr. and Meth. A. 2009. V. 598. P. 213–216.
- [4] *Haitz R.H.* // J. Appl. Phys. 1965. V. 36. N 10.
- [5] *Mahdi Aminia et al.* // Proc. SPIE. 2012. V. 8375. P. 837 50Q.
- [6] *Xin X. et al.* // IEE Electronics Lett. 2005. V. 41 (4). P. 212.
- [7] *Sato K et al.* // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research. A. 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2013.06.054i>.
- [8] *Handbooks of Optical Constants of Solids I / E.D. Palik (ed.).* USA: Academic Press, 1998.
- [9] *Sze S.M.* Physics of Semiconductor Devices (3rd ed.). New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [10] *Goldberg Yu.A. et al.* // Semiconductors. 1999. V. 33. P. 343.
- [11] *Zabrodsky V.V. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2012. V. 38. N 9. P. 812–815.
- [12] *Shvarts M.Z. et al.* // Proc. 20th EU PVSEC. Barcelona, 2005. P. 278–281.
- [13] *Aruev P. et al.* // 273 PTB-Seminar VUV and EUV Metrology. Berlin, 2013.