

СКАНИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

Н. В. Анфимов^{а, 1}, В. Воробел^б, Ю. С. Ковалев^а, П. Кодыш^б

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт физики частиц и ядерной физики, Карлов университет, Прага

Кремниевый фотоумножитель (SiPM) — современный полупроводниковый фотодетектор, способный регистрировать одиночные фотоны. Он состоит из множества микроячеек (пикселей), которые работают в так называемом «гейгеровском» режиме. В настоящее время среди таких приборов существуют конструкции с поверхностными пикселями и с глубинной пиксельной структурой. Ячеистая структура уменьшает эффективную фоточувствительную площадь прибора, выражающуюся через геометрический фактор заполнения, что весьма важно учитывать при разработке новых конструкций с большими плотностями пикселей, необходимыми для увеличения динамического диапазона. Считается, что глубинные фотодиоды обладают фактором заполнения, близким к единице. В данной работе приводятся методика и результаты исследований зонального отклика SiPM различных конструкций сканированием (перемещением) лазерного пятна микрометрового размера. Показано, что при регистрации красного света ($\lambda = 632$ нм) глубинный фотодиод имеет геометрический фактор меньше 100 %.

A Silicon Photomultiplier (SiPM) is a novel semiconducting photodetector which can detect single photons. It consists of many micro-cells (pixels) operating in the so-called “Geiger” mode. There are two principal designs of SiPMs: surface pixel and deeply buried pixel (micro-well) structures. The segmentation of an active area brings a reduction of the effective photosensitivity introducing geometrical fill factor. It is important to take that into account for designing new devices with high pixel densities which allow achieving a wider dynamic range. A deep micro-well SiPM is supposed to have fill factor close to one. The methods and results of studying of zonal response by scanning (moving) with micron laser spot for SiPMs of different designs are presented in this paper. It is shown that deep micro-well SiPM has geometrical fill factor less than 100% by registration of red light.

PACS: 29.40.Mc; 29.40.Wl; 29.90.+r

1. КРЕМНИЕВЫЕ ФОТОУМНОЖИТЕЛИ — SiPM

Твердотельные приборы на основе лавинного усиления давно используются в науке и технике. Это и лавинные диоды, и лавинные транзисторы, и приборы, работающие в режиме так называемого «гейгеровского» пробоя. Каждый из них по-своему уникален, но находит ограниченное применение. Например, лавинный фотодиод обладает хорошей линейностью отклика, однако имеет усиление на уровне 10^2 , что не позволяет его

¹E-mail: anphimov@jinr.ru

использовать для регистрации световых потоков на уровне одиночных фотонов. «Гейгеровский» диод, напротив, имеет огромное внутреннее усиление (до 10^8), но работает исключительно как счетчик фотонов в режиме «да/нет». Логичным продолжением развития данных технологий стал лавинный фотодиод, представляющий собой набор «гейгеровских» диодов субмиллиметровых и микрометровых размеров — так называемых ячеек или пикселей. Данный прибор в настоящее время известен под многими коммерческими названиями: кремниевый фотоумножитель (SiPM), многопиксельный счетчик фотонов (MPPC), микропиксельный лавинный фотодиод (MAPD) и др. Наиболее распространенная конструкция SiPM — структура с пикселями, расположенными на поверхности, — схематически представлена на рис. 1. Каждый такой пиксель представляет собой высоколегированный $p^+ - n^+$ -переход, который через высокоомный резистор ($10^5 - 10^7$ Ом) соединяется с металлической шиной, через которую обеспечивается питание пикселей [1–3]. Резистор выполняет роль пассивного гашения развития лавинного процесса, который в противном случае мог бы перейти в искровой пробой и вывести пиксель из строя. Наличие на поверхности фотодиода нечувствительных к свету, непрозрачных или полупрозрачных элементов (металл, резистор и пр.) приводит к тому, что не вся площадь является одинаково фоточувствительной. В пиксельных детекторах используют понятие геометрического фактора заполнения (геометрическая прозрачность) ϵ_g , который представлен отношением эффективной светочувствительной площади к полной рабочей площади фотодетектора. Как правило, с увеличением плотности пикселей растет число элементов, снижающих фоточувствительность, что отражается эффективным уменьшением геометрического фактора ϵ_g и, соответственно, общей эффективности регистрации фотонов PDE, поскольку [4]

$$\text{PDE} \sim \text{QE} \times \epsilon_g, \quad (1)$$

где QE — квантовая эффективность фотодиода.

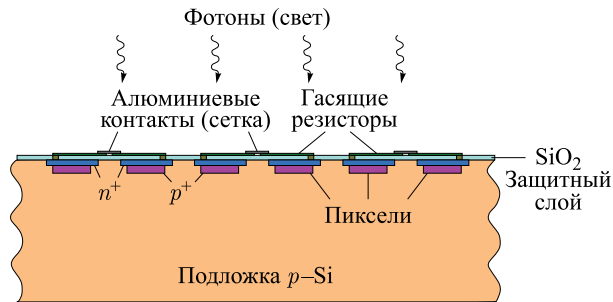


Рис. 1. Схема конструкции поверхностно-пиксельного SiPM

Чтобы исключить влияние геометрического фактора, была разработана конструкция, где пиксели размещаются в глубине кремниевого слоя [3], — так называемый «глубинный» SiPM. Конструктивно глубинный SiPM представлен на рис. 2. Пиксели располагаются в толще полупроводника на глубине порядка нескольких микрометров. В роли гасящего элемента выступает пространственный заряд, который собирается вокруг пикселей в течение лавинного процесса. В такой конструкции фотоны рождают фотоэлектроны

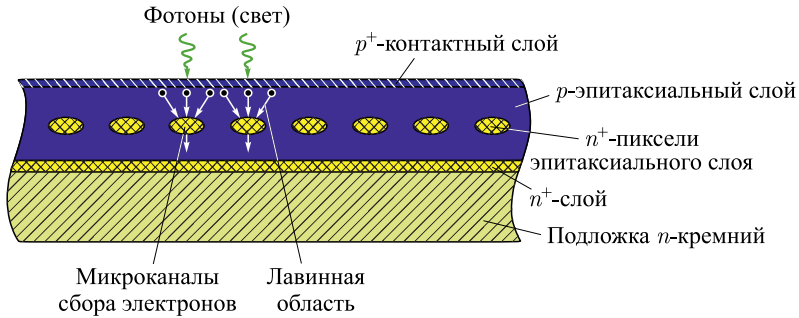


Рис. 2. Схема конструкции глубинного SiPM [3]

в толще однородного фоточувствительного слоя, которые в дальнейшем дрейфуют к пикселям в область сильного электрического поля (вблизи n^+ -области внутри эпитаксии), где лавинно умножаются. Такой фотодиод должен иметь $\epsilon_g \simeq 100\%$ для фотоэлектронов, рождающихся над пиксельной структурой.

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Измерения проводились в Карловом университете (Прага, Чехия), где располагается сканирующая станция (рис. 3). Прежде она применялась для изучения работы стриповых кремниевых детекторов [5]. В наших исследованиях было предложено ее использование для сканирования SiPM. Установка представляет собой светоизолированный ящик, который окрашен внутри в черный матовый цвет для уменьшения попадания на детектор фоновых фотонов.

Блок-схема установки приведена на рис. 4. Источником света является лазер (Laser) с длиной волны 662 нм, работающий в импульсном режиме с минимальной длительностью световой вспышки 1,2 нс. Свет распространяется по прозрачному гибкому оптоволокну, на другом конце которого установлена фокусирующая система линз, позволяющая сфокусировать пятно до 2,8 мкм (среднеквадратичное отклонение распределения светового

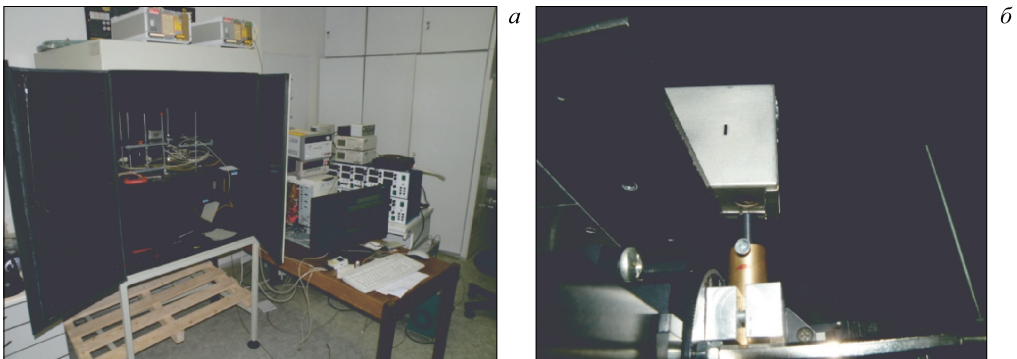


Рис. 3. Сканирующая установка в Карловом университете: а) общий вид; б) перемещающаяся фокусирующая система

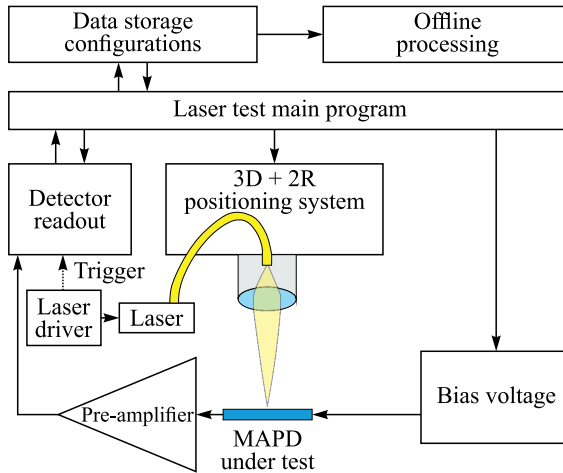


Рис. 4. Блок-схема сканирующей установки в Карловом университете

поля). Фокусирующая система закреплена в системе позиционирования и позволяет перемещаться в трех взаимно-перпендикулярных направлениях (3D) с шагом 1,25 мкм, а также обеспечивает повороты в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях (2R).

Лазер питается и запускается блоком (Laser driver), который также формирует запускающий сигнал (Trigger) для АЦП (Detector readout) DRS4 [6], который подключен к ПК по USB. На ПК установлено ПО (Laser test main program), которое запускает набор данных с DRS4, управляет напряжением питания МФЛД (Bias voltage), сохраняет данные на диск с заданной конфигурацией (Data storage configuration): различное число считываний, формат данных и т. п. Затем данные обрабатываются в режиме офлайн (Offline processing). SiPM (MAPD under test) закреплён неподвижно под перемещающейся фокусирующей системой (3D + 2R positioning system). Сигнал с фотодиода усиливается низкоомным предусилителем (Pre-amplifier) с коэффициентом усиления по заряду $K = 265$. Сырые данные представляют собой набор осциллограмм, оцифрованных с частотой дискретизации 5 ГГц. Сигнал с фотодиода составляет по основанию (0,1–0,9) ~ 10 нс.

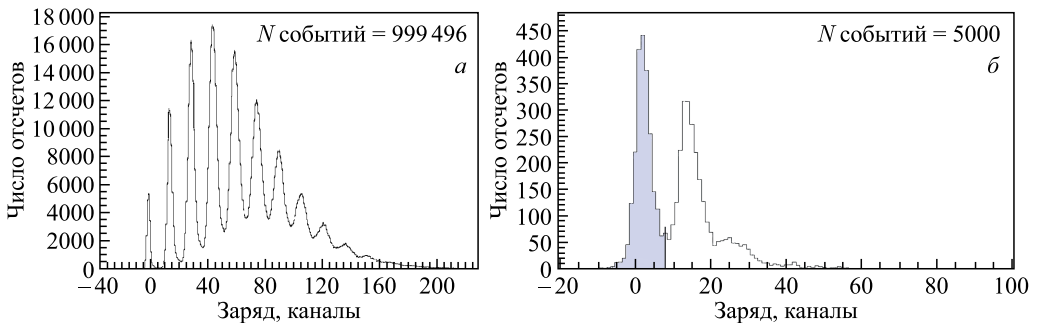


Рис. 5. Зарядовые спектры с фотодиода MAPD-2 при облучении вспышками света малой интенсивности: а) характерный спектр, полученный при освещении всей поверхности фотодиода ($\mu = 2,3$ ф. э.); б) отклик одиночного пикселя $\mu = 0,7$ ф. э.

Для анализа производилось интегрирование сигнала во временном окне 20 нс, значения которого гистаграммировались, — зарядовый спектр (рис. 5).

Фотоны, падающие на поверхность SiPM, подчиняются распределению Пуассона [7]. Характерный спектр от SiPM приведен на рис. 5, а. При облучении одиночного пикселя вероятность срабатывания нескольких пикселей в идеальном случае отсутствует (рис. 5, б). Однако из-за эффекта перекрестных наводок и наличия гало у светового пятна на спектре видны амплитуды большие, чем отклик одиночного пикселя. При этом число событий в пьедестале N_0 также подчиняется распределению Пуассона. Относительная эффективность регистрации света фотодетектором (PDE) пропорциональна среднему числу фотоэлектронов (ф.э.) μ при постоянной средней интенсивности света (число фотонов) γ , поскольку

$$\text{PDE} = \frac{\mu}{\gamma}. \quad (2)$$

Среднее число фотоэлектронов в каждой точке может быть оценено как [7]

$$\hat{\mu} = -\ln \frac{N_0}{N}, \quad (3)$$

где N — полное число событий в спектре. В каждой точке набиралась статистика $N = 5000$. Число событий в пьедестале N_0 определялось как интеграл гистограммы в интервале $(-\infty, V)$, где V — положение так называемой долины, минимума между первыми двумя пиками (см. рис. 5, б). Относительную погрешность $\hat{\mu}$ можно приблизительно оценить по формуле [7]

$$\frac{\hat{\sigma}_{\hat{\mu}}}{\hat{\mu}} = \frac{1}{\sqrt{N\hat{\mu}}} \sqrt{\frac{e^{\hat{\mu}} - 1}{\hat{\mu}}}. \quad (4)$$

Интенсивность света в максимуме (центральная часть пикселя) устанавливалась на уровне 1,0 ф.э., что при $N = 5000$ обеспечивало статистическую точность на уровне 2%. В минимумах, когда луч света попадал между фоточувствительными областями, отклик SiPM падал до уровня 0,1 ф.э., при этом относительная точность ухудшалась до 7%. Количество событий оптимизировалось исходя из длительности набора. Скорость считывания АЦП составляла порядка 100 Гц, каждая точка с $N = 5000$ занимала примерно 1 мин. Например, сканирование области 375×375 мкм с шагом 5 мкм в нашем случае занимает около 4 сут.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНО-ПИКСЕЛЬНОГО SiPM

В нашей работе изучался поверхностно-пиксельный фотодиод MAPD-2 фирмы Zecotek [8]. На рис. 6, а представлен технологический чертеж геометрической упаковки и размеры поверхностных элементов. Диод имеет чувствительную площадь $1,05 \times 1,05$ мм, пиксели скошены с одного края и располагаются с шагом $d = 42$ мкм. Расчетный геометрический фактор заполнения пикселей $\epsilon_g = 62\%$. Рабочее напряжение $U_{\text{op}} = 94$ В. После обработки всех зарядовых спектров (см. рис. 5) строилось двумерное распределение μ . На рис. 6, б представлена интерполированная картина распределения относительной PDE. Относительные значения PDE представлены цветовой шкалой в процентах.

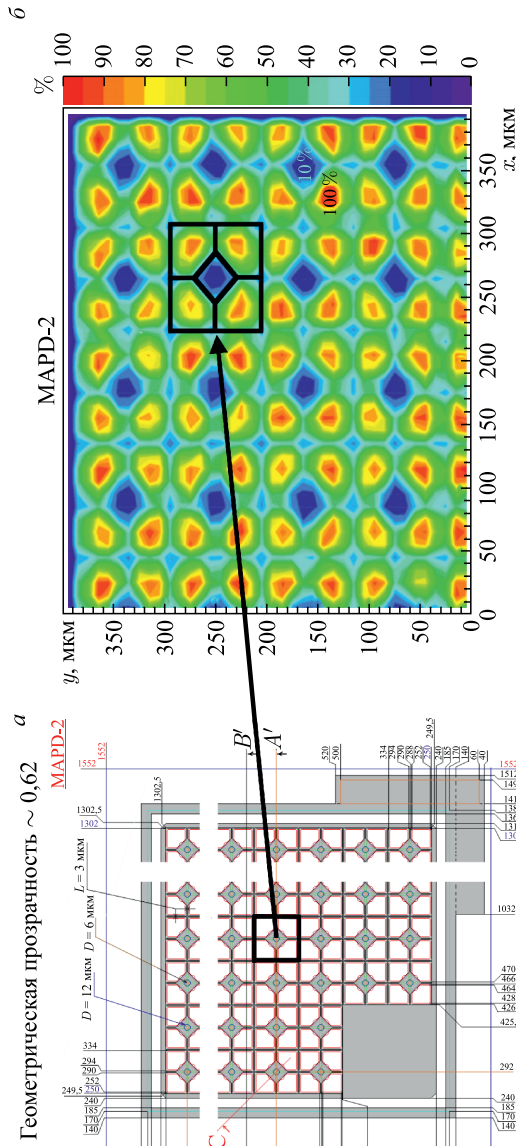


Рис. 6 (цветной в электронной версии). а) Технологический чертеж MAPD-2, геометрический фактор $\epsilon_g = 62\%$; б) результат сканирования 375×375 мкм фотоиода MAPD-2, вычисленный геометрический фактор $\epsilon_g = (58 \pm 7)\%$

Нормировка 100 % производилась на среднее арифметическое значений максимумов амплитуды в предполагаемых центрах пикселей. Для интерполяции использовалась встроенная функция отрисовки контуров «Cont4» в программном пакете ROOT [9].

На рис. 6, б хорошо видна пиксельная структура фотодетектора (красно-желтые кластеры, отмечены как 100 %) — наиболее чувствительные к свету области. Прослеживается скошенность углов пикселей. Видно, что между пикселями располагаются нечувствительные к свету области (фиолетово-синие кластеры, отмечены как 10 %), которые снижают общую эффективность регистрации света. Для определения геометрического фактора использовалось численное интегрирование полученного распределения. Для интегрирования выбиралась симметричная область, где находятся целые «четверки» пикселей (обозначены стрелкой на рис. 6). Полученный результат $\epsilon_g = (58 \pm 7) \%$ хорошо согласуется с расчетным параметром $\epsilon_g = 62 \%$.

4. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБИННОГО SiPM

Мы провели исследование глубинного SiPM MAPD-3N фирмы Zecotek [8]. Фотодиод использовался без защитного эпоксидного слоя, что позволяло обеспечивать лучшую фокусировку светового пятна. Размер фотодиода 3×3 мм. Размер пикселя 5 мкм, шаг между пикселями 8 мкм. Плотность 15 625 шт./мм². Рабочее напряжение $U_{op} = 94$ В. Поскольку пиксели располагаются в глубине, то фокусировку невозможно установить визуально.

С целью получения фокусировки на пикселе нами был разработан метод сканирования фотодиода в токовом режиме: напряжение устанавливалось немного ниже пробойного $U = 90$ В, непрерывный световой поток или большая частота при достаточно большой интенсивности света. При таком напряжении пиксели работают в линейном лавинном режиме с усилением ~ 10 . Наилучшая фокусировка определялась наибольшей разницей изменения фототока, считываемого напрямую с фотодиода при перемещении вдоль поверхности. При попадании пучка света на пиксель фототок усиливался и давал максимальное значение, при попадании между пикселями получалось минимальное значение. В качестве измерителя тока использовался пикоамперметр Keithley 6487/E. Характерная величина токов устанавливалась на уровне нескольких микроампер. Разработка метода фокусировки лазерного пятна на пикселях в глубине производилась с помощью конфокального микроскопа Solar ТП с установленным лазером непрерывного действия и длиной волны 440 нм. Измеренное отнормированное распределение фототоков (сканирование) при оптимальной фокусировке показано на рис. 7, а. Микроскоп располагается в филиале Научно-исследовательского института ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ) в Дубне. Размер пятна 0,8 мкм (среднеквадратичное отклонение), минимальный шаг 100 нм. Этот лазер не имеет возможности работать в импульсном режиме, что не позволяет провести измерения в «гейгеровском» режиме работы фотодиода, так как требуется однофотозлектронный режим с запуском. В дальнейшем этот метод был применен нами на установке в Карловом университете (рис. 7, б) для фокусировки лазерного пятна и последующего сканирования в импульсном режиме, описанном в разд. 2. Видно, что полученное пространственное разрешение несколько лучше на конфокальном микроскопе. Это связано с меньшими размерами светового пятна.

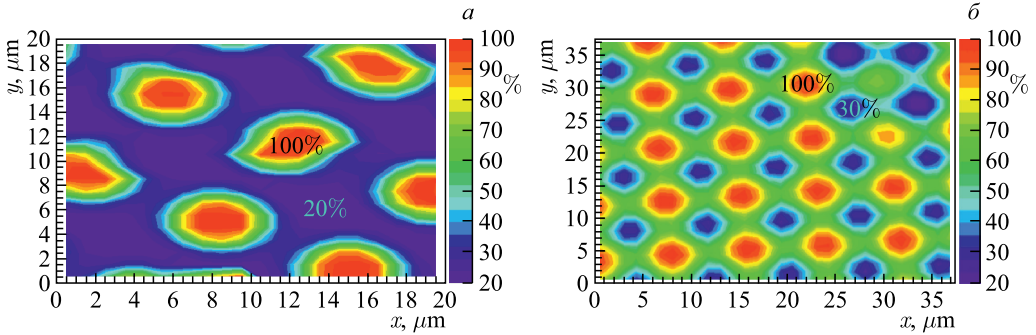


Рис. 7 (цветной в электронной версии). Результаты сканирования глубинного SiPM MAPD-3N в токовом режиме ($U = 90$ В) с помощью: *a*) конфокального микроскопа Solar III; *б*) сканирующей станции (Карлов университет)

После нахождения оптимального фокуса были проведены измерения в рабочем «гейгеровском» режиме работы фотодиода при $U_{op} = 94$ В. Результаты этих измерений приведены на рис. 8. Как и ожидалось, видна несколько лучшая однородность (рис. 8, *a*) по сравнению с поверхностно-пиксельным фотодиодом (см. рис. 6, *б*). Однако это может быть связано с разбросом амплитуд из-за смещения фокусировки (диод может находиться в плоскости, слегка не параллельной плоскости перемещения лазера), а также с грубым размером пятна ($\sigma \sim 2,8$ мкм), сравнимым с размерами пикселя (5 мкм), и зазором между ними (3 мкм). Видно, что только часть пикселей дают максимальные амплитуды (красные кластеры, отмечены как 100%) по сравнению с большинством пикселей (желто-зеленые кластеры, отмечены как 75%). Этот эффект ухудшает пространственное разрешение. При вырезании диапазона шкалы 35–75% (рис. 8, *б*) хорошо прослеживается пиксельная структура. Для нормировки при оценке геометрического фактора мы вычислили среднее значение по максимальным амплитудам кластеров, соответствующих пикселям. Таким образом, оцененный геометрический фактор $\epsilon_g = (65 \pm 12)\%$. Геометрический фактор было бы корректнее назвать коэффициентом сбора электронов. Однако для соответствия мы оставили это название.

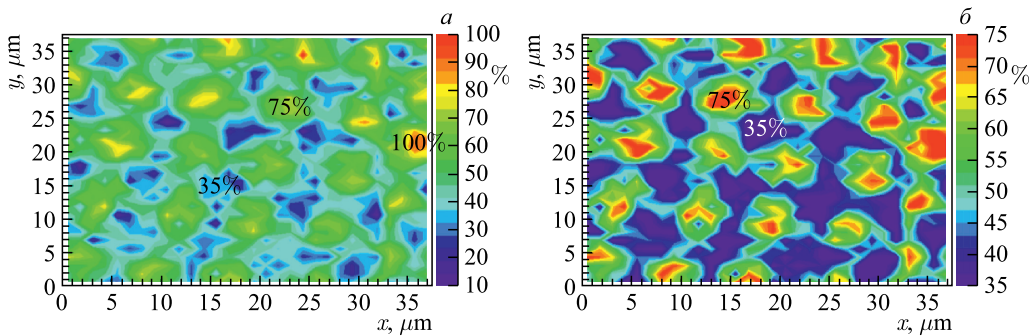


Рис. 8 (цветной в электронной версии). Результат сканирования $37,5 \times 37,5$ мкм фотодиода MAPD-3N при рабочем напряжении $U_{op} = 94$ В («гейгеровский» режим), шаг — 1 мкм: *a*) полная шкала; *б*) выделенный диапазон. Вычисленный геометрический фактор $\epsilon_g = (65 \pm 12)\%$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод сканирования кремниевых фотоумножителей с помощью лазерного луча микрометрового размера. Такой метод продемонстрировал очень хорошее согласие измеренного значения геометрического фактора заполнения $\epsilon_g = (58 \pm 7) \%$ и рассчитанного из маски технологического маршрута $\epsilon_g = 62 \%$ для поверхностно-пиксельного фотодиода MAPD-2. Также предложен метод фокусировки лазерного пучка на пикселях, расположенных в глубине полупроводникового слоя, с помощью сканирования фотодетектора в токовом режиме. Проведены измерения глубинного фотодиода MAPD-3N. Показано, что в «гейгеровском» режиме для красного света ($\lambda = 662$ нм) такой диод обладает геометрическим фактором $\epsilon_g = (65 \pm 12) \%$. Факт того, что $\epsilon_g < 100 \%$, может говорить о том, что не все фотоэлектроны собираются в области лавинного умножения. Возможно, это связано с тем, что красный свет проникает в кремний на глубину нескольких микрометров и часть фотоэлектронов может рождаться между пикселями и не попадать в лавинную область умножения (см. рис. 2). Улучшения геометрического фактора для длинноволнового излучения возможно добиться увеличением толщины верхнего эпитаксиального слоя или изменением структуры на подложке из *p*-кремния и помещением пикселей ближе к поверхности.

Благодарности. Авторы очень признательны ушедшему из жизни З. В. Крумштейну (ОИЯИ) за организацию и огромный вклад в эти исследования. Также благодарим Т. В. Тетереву (филиал НИИЯФ МГУ в Дубне) за предоставленную возможность провести исследования на конфокальном микроскопе. Авторы выражают благодарность проф. А. Г. Ольшевскому, В. В. Чальшеву, И. Е. Чирикову-Зорину (ОИЯИ) за помощь и ценные советы при подготовке настоящей работы. Огромное спасибо проф. З. Я. Садыгову (ОИЯИ) за предоставленные образцы и чертежи, а также А. В. Рыбникову (ОИЯИ) за помощь в подготовке статьи. Данные исследования поддерживались грантами полномочного представителя правительства Чехии в ОИЯИ 2006–2014, а также грантом программы сотрудничества ОИЯИ–Чехия 2006–2014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sadygov Z., Olshevski A., Chirikov-Zorin I., Zheleznykh I., Novikov A. Three Advanced Designs of Micro-Pixel Avalanche Photodiodes: Their Present Status, Maximum Possibilities and Limitations // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 567. P. 70–73.
2. Buzhan P., Dolgoshein B., Filatov L., Ilyin A., Kantzerov V., Kaplin V., Karakash A., Kayumov F., Klemm S., Popova E., Smirnov S. Silicon Photomultiplier and Its Possible Application // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 504. P. 48–52.
3. Sadygov Z., Olshevski A., Anfimov N., Bokova T., Dovlatov A., Zhezher V., Krumshtein Z., Mekhtieva R., Mukhtarov R., Troitskaya M., Chalyshev V., Chirikov-Zorin I., Shukurova V. Microchannel Avalanche Photodiode with Broad Linearity Range // Tech. Phys. Lett. 2010. V. 36. P. 528.
4. Anfimov N., Chirikov-Zorin I., Krumshteyn Z., Leitner R., Olchevski A. Test of Micropixel Avalanche Photodiodes // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 572. P. 413–415.
5. Dolezal Z., Escobar C., Gadomskic S., Garcia C., Gonzalez S., Kodys P., Kubik P., Lacasta C., Marti S., Mitsou V. A., Moorhead G. F., Phillips P. W., Reznicek P., Slavik R. Laser Tests of Silicon Detectors // Nucl. Instr. Meth. A. 2007. V. 573. P. 12–15.

6. *Friederich H., Davatz G., Hartmann U., Howard A., Meyer H., Murer D., Ritt S., Schlumpf N.* A Scalable DAQ System Based on the DRS4 Waveform Digitizing Chip // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2011. V. 58, No. 4. P. 1652–1656.
7. *Anfimov N., Rybnikov A., Sotnikov A.* Optimization of the Light Intensity for Photodetector Calibration // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2019. V. 939. P. 61–65.
8. <http://zecotek.com>
9. *Brun R., Rademakers F.* ROOT — an Object Oriented Data Analysis Frame // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1997. V. 389. P. 81–86.

Получено 15 июня 2019 г.