

ВОЛОКОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ РАЗВЕТВИТЕЛЬ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ФОТОДЕТЕКТОРОВ

*А. В. Рыбников¹, Н. В. Анфимов,
С. А. Соколов, А. П. Сотников, Д. В. Федосеев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлена конструкция и результаты исследования волоконного оптического разветвителя с однородностью распределения света лучше 10%. Основная идея заключается в расположении волокон, равноудаленных от центра, что обеспечивает простоту изготовления и лучшую однородность интенсивности света по сравнению с пучковым разветвителем. Такой разветвитель удобно использовать при массовой калибровке фотодетекторов в однофотонном режиме, поскольку обеспечивается одинаковая статистическая точность при одновременном испытании.

The design and study of an optical fiber splitter with uniformity of light distribution of better than 10% are presented. The main idea is to place the fibers equidistantly from the center, simplifying manufacturing and providing better uniformity of the light intensity compared to a beam splitter. Such a splitter is convenient to use for the mass characterization of photodetectors in single-photon mode since the same statistical accuracy is ensured during simultaneous testing.

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

1. МАССОВОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ФОТОДЕТЕКТОРОВ

При изучении характеристик фотодетекторов часто используется метод вспышек малой интенсивности [1], когда интенсивность падающего света настолько мала, что наблюдается существенная вероятность недетектирования фотонов — так называемый пьедестал. Обычно источником света выступает светодиод или лазер, работающий в импульсном режиме со стабильной световой амплитудой, обеспечивая при этом практически пуассоновское распределение числа фотонов. В таком случае удобно оценить среднее число фотоэлектронов μ в спектре с полным числом событий N , используя вероятность нулевого исхода p_0 в распределении Пуассона:

$$p_0 = e^{-\mu}, \quad (1)$$

которая определяется числом событий в пьедестале N_0 :

$$\hat{p}_0 = N_0/N, \quad (2)$$

¹E-mail: arv@jinr.ru, тел.: +7 49621-64-124

откуда легко получить оценку среднего числа фотоэлектронов

$$\hat{\mu} = -\ln N_0/N, \tag{3}$$

где символ $\hat{\mu}$ означает оценку параметра. Статистическая точность оценки параметра $\hat{\mu}$ определяется как [2]

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

На рис. 1, *а* приведен спектр кремниевого фотоумножителя, облучаемого вспышками света малой интенсивности, а на рис. 1, *б* показана зависимость статистической точности [2] от интенсивности падающего света в единицах фотоэлектронов μ . Видно, что оптимум достигается в точке $\mu \approx 1,6$ фотоэлектронов и незначительно изменяется в ближайшей окрестности. В случае шумов оптимум сдвигается, но характер зависимости остается прежним [2]. Таким образом, при одновременной калибровке нескольких фотодетекторов для обеспечения схожей статистической погрешности необходимо приблизительно с одинаковой интенсивностью засвечивать их поверхности. Учитывая, что в партии фотодетекторов, как правило, имеется собственный разброс эффективности регистрации света *PDE*, то это требование только ужесточается. Такая же тенденция наблюдается и при уменьшении количества измеряемых вспышек (см. рис. 1, *б*, верхняя кривая).

В таком случае правильно использовать несколько источников света, отрегулированных оптимальным образом, однако у такого способа могут быть и недостатки: более высокая стоимость или схематическая сложность применения большого количества источников света, различные систематические ошибки, связанные со стабильностью световой амплитуды у разных источников, а также сложность использования световых источников при низких или криогенных температурах и др. Удобнее использовать один источник света, находящийся в подходящих для его работы условиях, и волоконную оптику, которая доставляет свет к поверхности фотодетекторов.

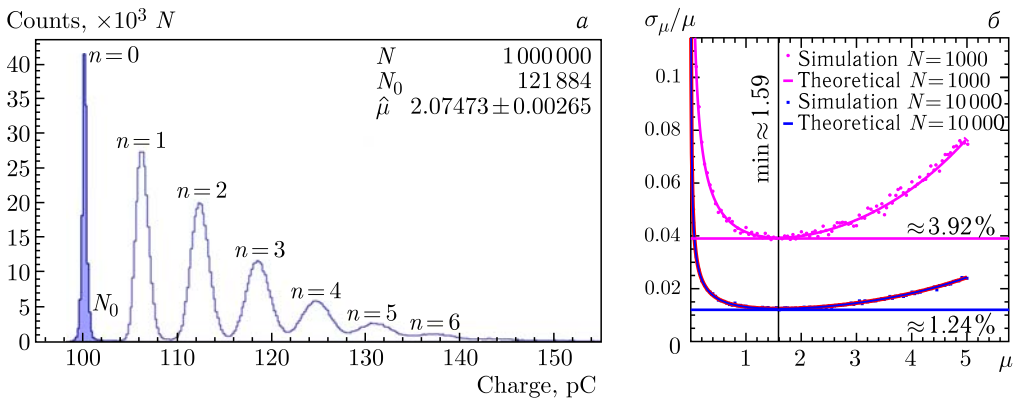


Рис. 1. *а*) Спектр кремниевого фотоумножителя; *б*) зависимость статистической точности от интенсивности падающего света в единицах фотоэлектронов [2]: верхняя кривая $N = 1000$, нижняя — $N = 10\,000$

Однако в таком случае необходимо максимально однородно распределить свет между волокнами.

В настоящей работе представлена конструкция (разд. 2) и результаты тестирования (разд. 3) волоконного оптического разветвителя, который разработан для массового тестирования матриц кремниевых фотоумножителей. В разд. 4 приводятся выводы.

2. ОПТИЧЕСКИЙ РАЗВЕТВИТЕЛЬ. КОНСТРУКЦИЯ

Конструкция оптического разветвителя представлена на рис. 2. Разветвитель состоит из двух алюминиевых трубок: основной 1 и внутренней 2. С левого торца основная трубка имеет сквозное входное отверстие с резьбой, в которое вкручивается источник света — самостабилизирующийся светодиодный источник света (см. рис. 5, а) производства компании HVSys [3]. В отверстии имеется небольшой зазор, предназначенный для установки ослабителя 3, который в свою очередь служит также рассеивателем 3, выполненным из фторопласта толщиной 0,5 мм. Рассеиватель улучшает однородность падающего на оптические волокна света. Внутри основной трубки располагается вторая трубка меньшего диаметра — внутренняя 2, которая может свободно перемещаться в пределах 100 мм вдоль основной трубки. Такая регулировка положения внутренней трубки дает дополнительную возможность настройки требуемой интенсивности и однородности света. С обоих концов внутренней трубки установлены держатели оптических волокон 4. Каждый держатель (рис. 3) представляет собой небольшой цилиндр с двумя кольцами отверстий — внешним и внутренним, предназначенных для 16 и 9 оптических волокон соответственно. Несмотря на наличие ослабителя-рассеивателя, радиально-симметричная диаграмма направленности DIP-светодиода¹ частично сохраняется, что приводит к разности интенсивностей света вдоль диаметра. В настоящей конструкции, в отличие от пучковых разветвителей, отверстия расположены равноудаленно от центра цилиндра. Такое расположение отверстий позволяет получить минимальный разброс интенсивности света среди волокон одного и того же кольца. Для данного образца оптического разветвителя были использованы пластиковые прозрачные оптические волокна 5 марки PFU-CD1001-22E длиной 1,5 м и диаметром волокна 1 мм (2,2 мм с защитной оплеткой) производства фирмы TORAY [4].

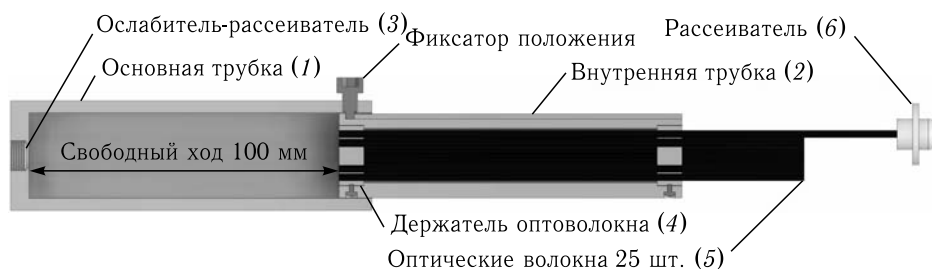


Рис. 2. Схема оптического разветвителя в разрезе

¹DIP — Direct In-line Package. Конструкция окна такого светодиода представляет собой миниатюрную стеклянную или пластиковую колбу, выполняющую функцию своеобразной линзы, способной фокусировать и направлять свет в конкретном направлении.

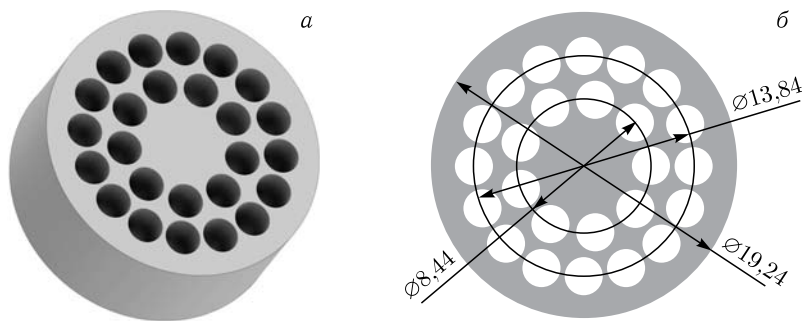


Рис. 3. Вид держателя оптических волокон, расположенного во внутренней трубке разветвителя: а) 3D-модель; б) эскиз

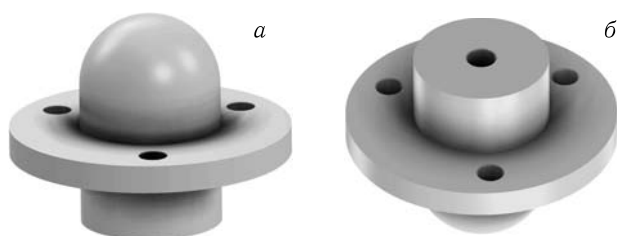


Рис. 4. Вид полусферического рассеивателя: а) вид сверху; б) вид снизу

Располагая волокна равноудаленно от центра, удается достичь максимальной однородности распределения интенсивности света между этими волокнами. При этом не требуется подгонка интенсивности (как это делается в пучковых разветвителях) — различное матирование торцов волокон для выравнивания интенсивности света. Количество волокон в группе определяется задачей и может зависеть от диаметра, на котором располагаются волокна. В нашем случае мы тестируем 16 матриц кремниевых фотоумножителей одновременно. Группа из 9 волокон по внутреннему диаметру была изготовлена для изучения и является запасной в случае поломки волокон из основной группы. Вид оптического разветвителя в сборке с источником света представлен на рис. 5, а.

На противоположных концах оптические волокна заканчиваются полусферическими рассеивателями из фторопласта (рис. 4), которые предназначены для равномерной засветки матрицы фотодиодов размером 50×50 мм. Сферическое закругление на конце рассеивателя должно обеспечивать более однородное распределение интенсивности света внутри светового пятна за счет выравнивания путей прохождения фотонов внутри материала рассеивателя.

3. ОПТИЧЕСКИЙ РАЗВЕТВИТЕЛЬ. ИЗУЧЕНИЕ ОДНОРОДНОСТИ

Изучение однородности проводилось в светоизолированной камере (рис. 5, б). В камере располагался фотоумножитель НАМАМАТСУ R1355 (ФЭУ). Перед окном ФЭУ было установлено крепление с отверстием в центре, позволяющее неподвижно зафикс-



Рис. 5. а) Вид оптического разветвителя в сборе с источником света; б) вид измерительного стенда

сировать одиночное волокно. Оптический разветвитель располагался на столе рядом с камерой. Пучок волокон от разветвителя протягивался через технологическое отверстие, расположенное в стенке камеры. В процессе измерения испытываемое волокно устанавливалось в держатель вплотную к окну ФЭУ, включался источник света, который также предоставлял синхроимпульс для запуска АЦП DRS4 [5], и производилась оцифровка импульсов с ФЭУ. Далее операция повторялась для каждого из 25 волокон оптического разветвителя.

В результате были получены распределения значений интенсивностей света среди волокон, которые представлены на рис. 6, а также карты однородности относительно положения в держателе волокон (рис. 7). Из распределений (рис. 6) отчетливо видно разделение на две группы значений с разными интенсивностями по свету, соответствующее разным кольцам — внешнему и внутреннему, имеющим в среднем на $\sim 30\%$ большую интенсивность света. Распределения, показанные на рис. 6, а, позволяют оценить величину разброса значений интенсивности света в каждом из колец, которая составила 7% для внешнего и 6% для внутреннего (одно стандартное отклонение).

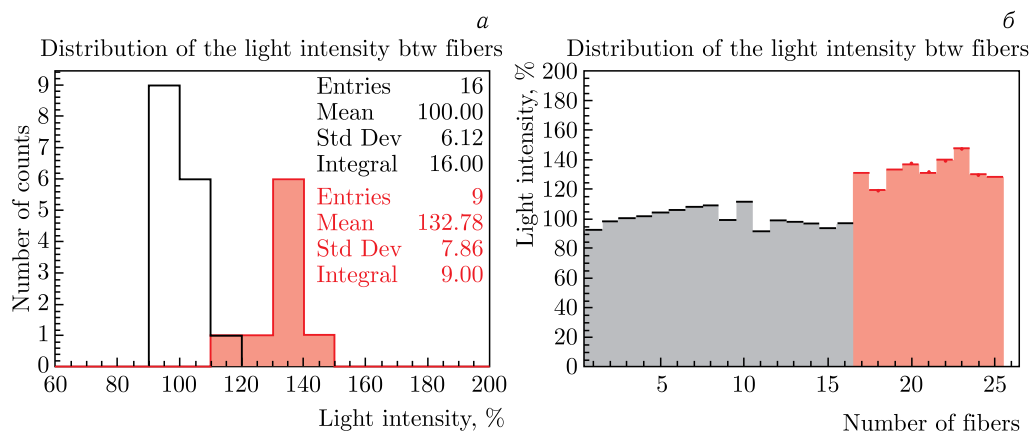


Рис. 6. Распределение интенсивности света среди всех волокон: а) гистограмма; б) профиль

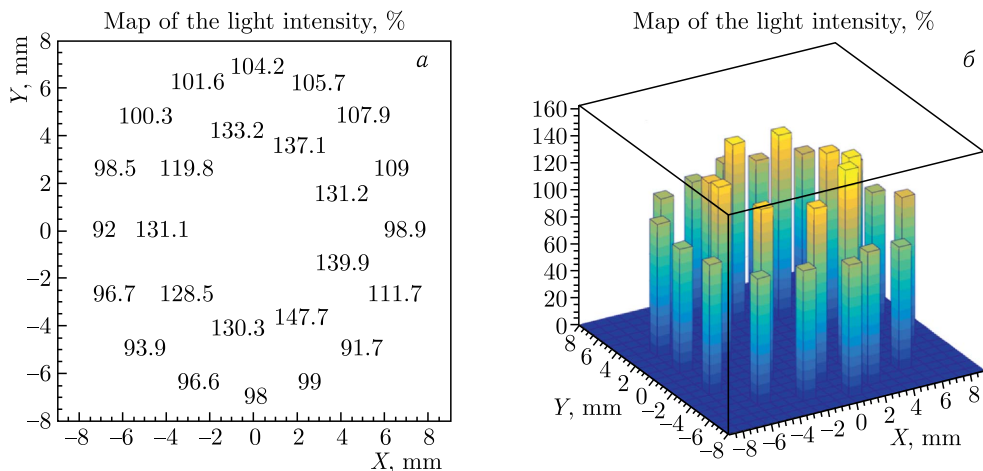


Рис. 7. Карты распределения интенсивности света среди всех волокон относительно их положения в держателе волокон: а) двухмерная; б) трехмерная

Изучение однородности ослабления рассеивателей. Оптический разветвитель предназначен для массовой калибровки кремниевых фотоумножителей — 32-элементные матрицы фотодиодов размером 50×50 мм. Это требует равномерной засветки всей чувствительной области регистрации фотодетектора, а также минимального разброса ослабления света среди разных рассеивателей, которые устанавливаются на концах волокон (см. рис. 4). Измерения однородности ослабления среди разных рассеивателей были проведены на том же стенде (см. рис. 5, б) за тем исключением, что в процессе измерений использовалось одно и то же волокно, а в качестве держателя волокон, расположенного перед окном ФЭУ, поочередно использовались разные рассеиватели. Всего испытания прошли 27 рассеивателей; результаты представлены на рис. 8. Разброс интенсивности света среди 26 рассеивателей составил около 10% за исключением № 21, поверхность которого была повреждена.

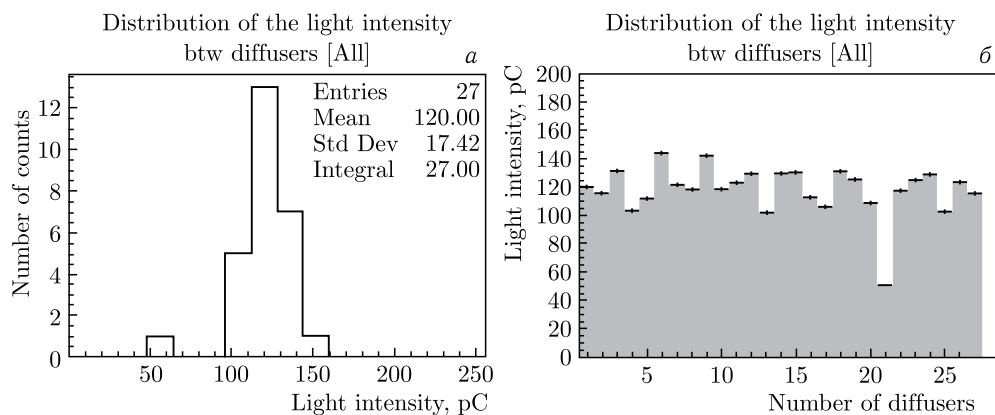


Рис. 8. Распределения интенсивности света среди разных рассеивателей: а) гистограмма; б) профиль

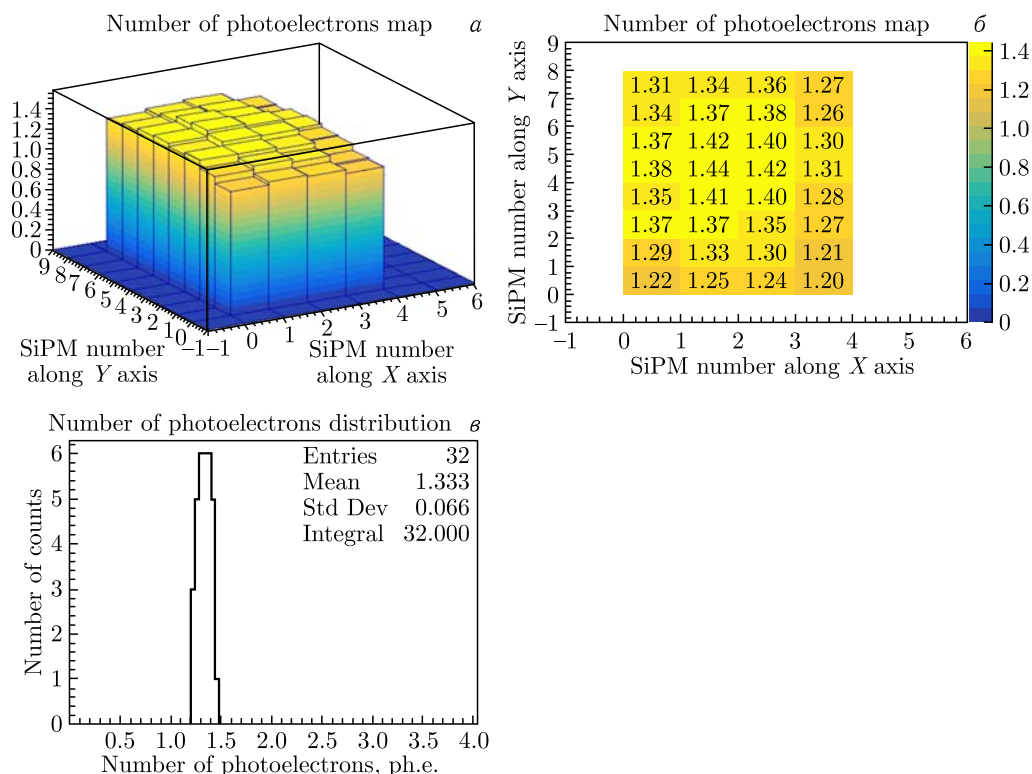


Рис. 9. Пространственное распределение интенсивности света на поверхности матрицы: а) трехмерное; б) двухмерное; в) одномерная гистограмма

Однородность светового пятна, получаемая на выходе из рассеивателя, была оценена на откалиброванной матрице фотодиодов, где отклики элементов были выравнены на уровне 1–2%. Результаты пространственного распределения света по поверхности фотодетектора можно оценить из распределения, представленного на рис. 9. Разброс значений интенсивности света по поверхности размером 50×50 мм составил $\sim 5\%$. Зная это распределение, можно его учесть при калибровке других матриц. Главное, чтобы общий разброс интенсивностей света не различался настолько, что может привести к существенной разности в точности измеряемых параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе показана конструкция волоконного разветвителя, обеспечивающая однородность распределения света между волокнами лучше 10%. Основная идея расположить волокна равноудаленно от центра симметрии обеспечивает наилучшую однородность света в случае источника с радиально-симметричной диаграммой направленности, каковыми, в частности, являются цилиндрические DIP-светодиоды. В нашем случае разница интенсивностей света вдоль диаметра превышает 30%, что подтверждается измерениями для различных колец волокон.

Конструкция рассеивателя полусферической формы обеспечивает однородность света в пятне, засвечивающем матрицу из кремниевых фотоумножителей размерами 50×50 мм на уровне 5%. Точно зная распределение интенсивностей света на выходе из волокон и рассеивателей, можно улучшить общее распределение окончательной интенсивности, подбирая соответствующим образом волокно и рассеиватель.

Такая конструкция может быть применена не только для задач калибровки кремниевых фотоумножителей, но и для калибровки других фотодетекторов, а также для мониторинга параметров их работы в составе многоканальных установок. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 21-42-00023.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bellamy E. H., Bellettini G., Gervelli F., Incagli M., Lucchesi D., Pagliarone C., Zetti F., Budagov Y., Chirikov-Zorin I., Tokar S.* Absolute Calibration and Monitoring of a Spectrometric Channel Using a Photomultiplier // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 1994. V. 339. P. 468–476; doi:10.1016/0168-9002(94)90183-X.
2. *Anfimov N., Rybnikov A., Sotnikov A.* Optimization of the Light Intensity for Photodetector Calibration // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2018. V. 939. P. 61–65; doi: 10.1016/j.nima.2019.05.070.
3. <http://hvsys.ru>
4. https://www.electronics.toray/en/products/raytela/rayt_04.html
5. <https://www.psi.ch/en/drs>

Получено 11 августа 2022 г.