

УДК 538.915

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ДЕТЕКТОРОВ С ОРГАНИЧЕСКИМ СВЕТОВОДОМ

© 2023 г. Д. Н. Трунов<sup>a, b, \*</sup>, В. Н. Марин<sup>a, b</sup>, Р. А. Садыков<sup>b</sup>,  
Е. В. Алтынбаев<sup>a</sup>, Т. И. Глушкова<sup>a</sup>

<sup>a</sup>НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, Гатчина, 188300 Россия

<sup>b</sup>Институт ядерных исследований РАН, Москва, Троицк, 108840 Россия

\*e-mail: dtrunov@inr.ru

Поступила в редакцию 12.08.2022 г.

После доработки 27.10.2022 г.

Принята к публикации 27.10.2022 г.

Описан новый метод определения координаты в позиционно-чувствительных детекторах с органическим световодом и кремниевыми фотоумножителями. Этот метод отличается от использовавшихся ранее смешивающих спектр волокон или матрицы из светочувствительных элементов. Он основан на поглощении фотонов в объеме световода и уменьшении количества фотонов. В зависимости от длины пробега меняется количество фотонов, падающих на поверхность кремниевого фотоумножителя. Проведено моделирование оптических параметров одномерного позиционно-чувствительного детектора и показано влияние покрытия световода на количество света. Также проведено моделирование двумерного позиционно-чувствительного детектора двух видов, определены оптические параметры и соотношения интенсивностей излучения различных концов световода. Описана методика получения карт соотношений интенсивностей и особенности их использования для определения координаты. Обозначены основные особенности изготовления детекторов данного типа и их влияние на разрешение итогового детектора.

**Ключевые слова:** нейтроны, детекторы, кремниевые фотоумножители, сцинтиллятор, гейгеровские лавинные фотодиоды, сцинтилляционный детектор, органический световод, спектросмещающие волокна, световод, позиционно-чувствительный детектор, моделирование, оптические параметры.

**DOI:** 10.31857/S1028096023040209, **EDN:** JIJXYR

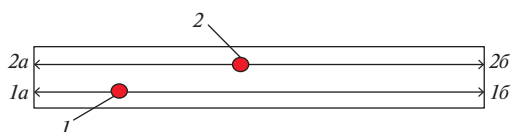
### ВВЕДЕНИЕ

В настоящий момент во всем мире ведется активная разработка детекторов нейтронов на основе различных сцинтилляторов [1]. Связано это в первую очередь с относительной дешевизной подобных детекторов и нарастающим дефицитом газа гелий-3 [2], на основе которого можно создавать самые высокоэффективные детекторы. Помимо создания одиночных детекторов нейтронов ведется разработка позиционно-чувствительных сцинтилляционных детекторов [3–5].

Первые позиционно-чувствительные детекторы на основе сцинтилляторов создавали для физики высоких энергий. Например, в 1988 г. был описан большой детектор установки CDF [6]. Принцип работы подобных детекторов основан на создании двух массивов смещающих спектр волокон (WLS-волокон, WLS – Wave-Length Shifting), расположенных перпендикулярно друг другу, между

которыми расположен чувствительный к нейтронам сцинтиллятор, например, ZnS(Ag):LiF. Для определения координаты необходимо независимое усиление и регистрация фотонов в каждом волокне. Разрешение подобных детекторов определяется в первую очередь размером WLS-волокон, которые на данный момент составляют от 0.2 и до 2 [7].

Для регистрации фотонов долгое время использовали фотоэлектронный умножитель, который характеризуется крайне низким уровнем шума и высоким коэффициентом усиления ( $10^7$  и более) [8, 9]. В настоящий момент при создании детекторов подобных типов все активней стали применять вместо фотоэлектронного умножителя кремниевый фотоумножитель [10], который на данный момент по рабочим параметрам приблизился к фотоэлектронным умножителям, но не имеет недостатков, присущих им (высокое напряжение питания и габариты) [9].



**Рис. 1.** Траектории фотонов при различном расположении сцинтилляционной вспышки: 1 – смещена от центра; 2 – расположена по центру; 1а, 2а и 1б, 2б – расстояния от вспышки до левого и правого кремниевых фотоумножителей соответственно.

Одна из особенностей кремниевых фотоумножителей – достаточно низкое максимальное напряжение питания (не более 40–70 В) и высокая квантовая эффективность (до 45%) [11]. Основной минус по сравнению с фотоэлектронным умножителем – это высокий тепловой шум (около 30 кГц/мм<sup>2</sup>) [11], который связан с тепловой генерацией электронов в активной области кремния и сбратыванием одиночных ячеек.

С появлением кремниевых фотоумножителей появился новый тип позиционно-чувствительных сцинтилляционных детекторов на их основе [12], который регистрирует фотоны, возникающие непосредственно на поверхности сцинтиллятора. Данные детекторы достаточно дороги, так как для их создания требуется большое количество кремниевых фотоумножителей с независимыми предусилителями, и имеют ограниченное разрешение, связанное с размерами самого фотоумножителя.

В настоящей работе стояла задача исследовать возможность создания позиционно-чувствительного детектора по иному принципу. За основу были взяты разработанные ранее [13, 14] сцинтилляционные детекторы на базе кремниевого фотоумножителя и органического световода. В детекторе вместо WLS-волокна используется прозрачный органический световод, с помощью которого напрямую невозможно определять координату события. В отличие от WLS-волокна, в котором основные потери фотонов связаны с первичным захватом фотонов сцинтиллятора, в данном методе, где передача фотонов происходит с помощью органического стекла, потери возникают в самом световоде. Предложенный метод определения основан как раз на затухании света в световоде.

Основная идея заключается в следующем: фотоны, испускаемые при конверсии нейтронов, проходят разное расстояние. Так как световод неидеальный, в нем затухает первоначальная вспышка, соответственно, при регистрации будет различная амплитуда, связанная с различным ко-

личеством фотонов. На рис. 1 показана схема метода. В точках 1а и 1б будут различные амплитуды из-за разной длины пробега фотонов в световоде, а в точках 2а и 2б будут близкие амплитуды, так как пробеги приблизительно равны. В работе проведено моделирование как однокоординатного, так и двухкоординатного детекторов, основанных на данном методе.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для оценки параметров пропускания света и количества фотонов, падающих на кремниевый фотоумножитель, было проведено моделирование с помощью программы TracePro [15]. Это программа оптического моделирования рассеяния, отражения и поглощения фотонов различными средами методом Монте-Карло [16]. В отличие от более универсального программного пакета GEANT4 [17] она не позволяет моделировать взаимодействие частиц с веществом, но дает возможность достаточно легко и быстро смоделировать оптические параметры детекторов, что показано в ряде работ [18, 19]. Программа позволяет оценить заданную модель и ее оптические параметры.

Моделирование по программе TracePro разделено на несколько этапов. Первый этап работы – синтез геометрической модели оптической системы собственными средствами программы или импорт файлов в форматах SAT, IGES или STEP.

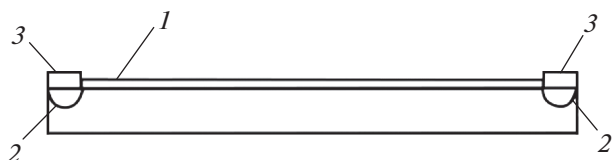
На втором этапе требуется определение источников света на сетке лучей или придание поверхностям свойств источников. Для всех смоделированных детекторов в качестве источника света использовали конус радиусом и высотой 0.0001 мм, расположенный на поверхности сцинтиллятора. Мощность, задаваемую для поверхности сферы, определяли как:

$$n = \frac{E}{E_f} = \frac{Pt\lambda}{hc},$$

где  $n$  – количество фотонов,  $t$  – время,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $P$  – мощность [Вт],  $\lambda$  – длина волны.

Полагали  $t = 1$  с,  $\lambda = 460$  нм. Количество фотонов  $1.6 \times 10^5$  [20], что соответствует количеству фотонов при захвате нейтрона сцинтиллятором ZnS(Ag):LiF. Мощность источника составила  $6.9 \times 10^{-12}$  Вт, количество лучей для расчета приняли равным 10000.

Далее осуществляли ввод параметров оптических свойств материала детектора. В качестве материала сцинтиллятора из базы программы был выбран ZnS, световода – полиметакриловая кис-



**Рис. 2.** Внешний вид детектора: 1 — сцинтиллятор; 2 — линза типа “рыбий глаз”; 3 — кремниевый фотоумножитель.

лота. Для упрощения моделирования было принято, что все фотоны, падающие на кремниевый фотоумножитель, полностью поглощаются.

В первую очередь было проведено моделирование одиночного детектора (рис. 2). Размеры детектора: 5 мм — ширина, 50 мм — общая длина, 40 мм длина — сцинтиллятора и 5 мм — толщина. Целью данной модели было оценить, возможно ли определение координаты данным методом, и сравнить два покрытия детектора — зеркальное типа Al-anod Miro [21] и диффузионный отражатель.

Для оценки этих параметров измеряли поток фотонов, падающих на фотоумножители при изменении положения источника фотонов в диапазоне от 0 до 40 мм с шагом 5 мм. На рис. 3 показан процент зарегистрированных фотонов на фотоумножителе в зависимости от расстояния. Как видно из результатов моделирования, зеркальное покрытие типа Alanod Miro дает меньшее отражение, и, соответственно, до фотоумножителей доходит примерно 34% от общего количества фотонов. В отличие от него покрытие типа диффузионный отражатель крайне слабо поглощает, и

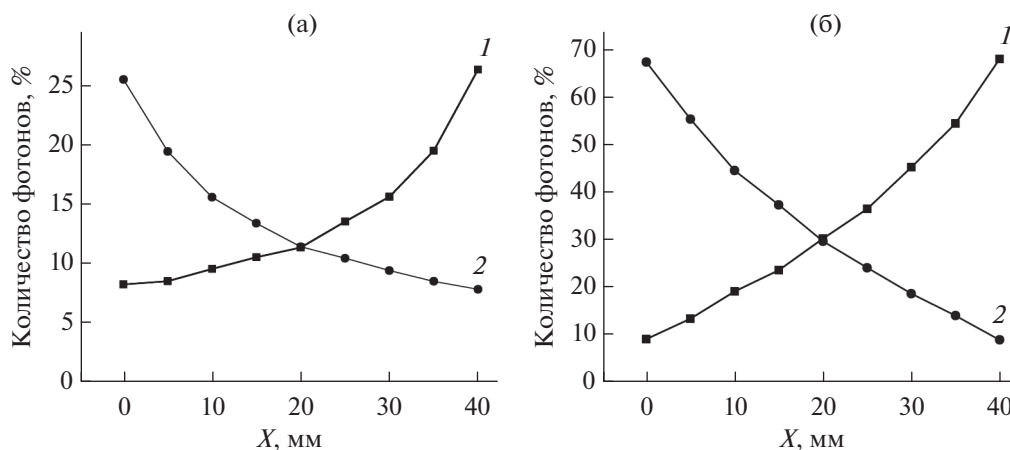
до кремниевого фотоумножителя доходит примерно 77% от общего количества фотонов.

Из этих измерений можно сделать вывод, что в случае органического световода подобной конфигурации оптимально использовать именно диффузионный отражатель, а не зеркальный. В реальном детекторе диффузионный белый отражатель можно изготовить, покрывая его белой фторопластовой лентой либо белой краской с диоксидом титана, например, EJ-510 [22].

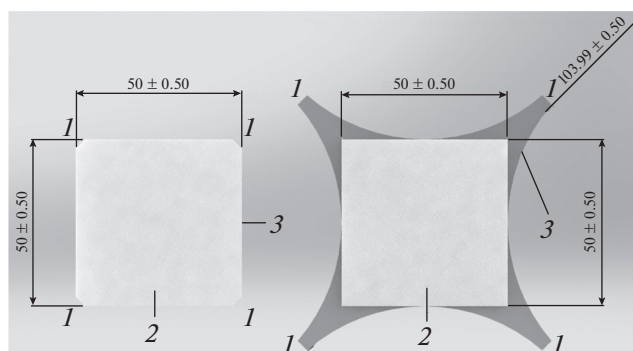
### ДВУХКООРДИНАТНЫЙ ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ДЕТЕКТОР

На втором этапе были оценены оптические параметры двухкоординатных позиционно-чувствительных детекторов, для которых определение координат основано на затухании света в световоде. Для реализации были выбраны две модели с активной областью 50 × 50 мм и различной геометрией (рис. 4). В детекторах используется один слой сцинтиллятора. В основе первой формы детектора лежит квадрат, где сделаны скосы для крепления кремниевого фотоумножителя. Вторая форма — это квадрат с дополнительными линзами для разделения фотонов, поступающих с квадрата сцинтиллятора. Сделано это для более высокого разделения фотонов и более точного определения координаты.

Моделирование оптических параметров, как и ранее, заключалось в движении источника света и получении количества фотонов, падающих на фотоумножители. На рис. 5 показано относительное количество фотонов на двух противоположных кремниевых фотоумножителях. Как видно, в крайних позициях эффективность сильно воз-



**Рис. 3.** Относительное количество зарегистрированных фотонов с помощью левого (1) и правого (2) фотоумножителей с покрытиями типа: а — Alanod Miro; б — диффузионный отражатель.



**Рис. 4.** Геометрия моделируемых детекторов: 1 – место расположения кремниевого фотоумножителя; 2 – сцинтиллятор, 3 – световод.

растает. Связано это с расстоянием от источника фотонов до кремниевого фотоумножителя. Это показано на рис. 6, где представлено отношение количества фотонов на противоположных кремниевых фотоумножителях. Видно, что при приближении источника фотонов к кремниевому фотоумножителю растет соотношение интенсивностей.

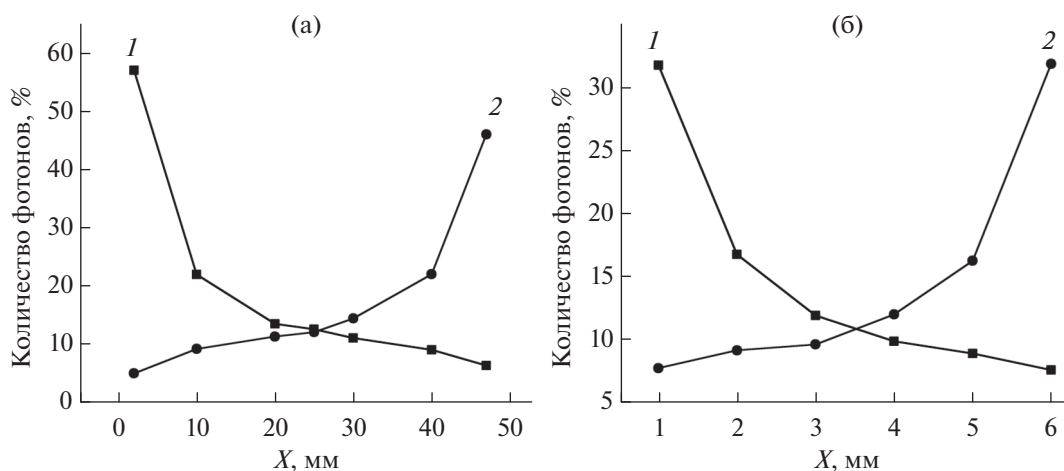
### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ

Определение координаты в детекторах подобного типа сводится к анализу амплитуд либо заряда после попадания фотонов на кремниевые фотоумножители. Для определения одной координаты нужны минимум два кремниевых фотоумножителя. Количество фотонов, выделяемых при регистрации нейтрона и дошедших до объема сцинтиллятора, связано с неоднородностями со-

става в объеме сцинтиллятора, различной длиной пробега вторичных частиц, а также сильно зависит от толщины сцинтиллятора. Поэтому необходимо учитывать, что информацию о координате можно получить, только регистрируя фотоны на двух кремниевых фотоумножителях, так как параметры световода и затухания постоянные.

Для определения координаты необходима предварительная калибровка детектора для получения карты отношений амплитуд в зависимости от расположения точки регистрации нейтронов. На рис. 7 показана подобная карта, смоделированная для второго варианта детектора и для двух противоположных фотоумножителей. Необходимо измерение амплитуд фотоумножителей, после становится возможным получение координаты из зависимости амплитуд детектора.

Подобные карты можно получить моделированием, но таким способом вряд ли можно добиться высокого разрешения (более 10 мм). Связано это в первую очередь со способом изготовления, в котором возможны неоднородности при склеивании кремниевых фотоумножителей и сцинтиллятора, нанесением краски, а также отличиями в электронной части детектора. Поэтому конечное разрешение по многим параметрам зависит от ошибки измерения, шумов электроники и качественно проведенной калибровки. Учитывая опыт создания электроники и детекторов подобных типов [13, 14], можно предположить, что пространственное разрешение готового детектора будет не хуже 1–3 мм. В продолжение этой работы планируется спроектировать и провести тестирование детектора подобного типа.



**Рис. 5.** Относительное количество зарегистрированных фотонов с помощью первого (1) и второго (2) фотоумножителей: а – первая модель; б – вторая модель.

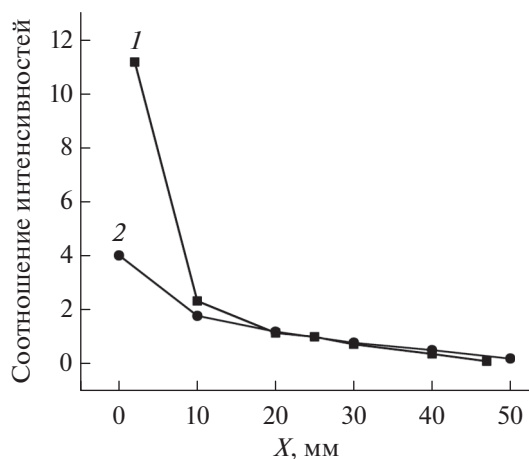


Рис. 6. Соотношение интенсивностей излучения на фотоумножителях первой (1) и второй (2) формы.

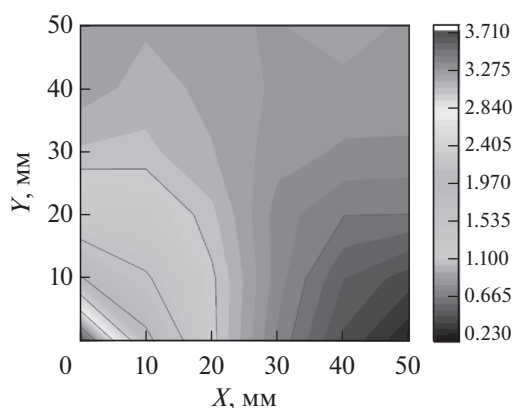


Рис. 7. Карта соотношения интенсивностей, рассчитанная для двух противоположных кремниевых фотоумножителей в зависимости от места регистрации нейтрона.

## ВЫВОДЫ

По результатам моделирования можно сделать вывод, что описанный метод определения координаты можно реализовать в детекторах нейтронов. В качестве покрытия детектора рекомендуется использовать диффузионный отражатель, так как он позволяет значительно увеличить сбор света. При проектировании детекторов одним из важных параметров является расстояние между кремниевыми фотоумножителями: чем оно меньше, тем больше света, и большее соотношение интенсивностей позволяет получить лучшее разрешение.

При использовании данного метода один из важных параметров — это качество электроники для усиления сигнала и регистрации фотонов. Оно оказывает сильное влияние на пространственное разрешение детектора.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Результаты получены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-10-2021-115 от 13 октября 2021 г., внутренний номер 15.СИН.21.0021).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cieślak M.J., Gamage K.A.A., Glover R. // Crystals. 2019. V. 9. P. 480. <https://doi.org/10.3390/cryst9090480>
2. Kouzes R., Lintereur A., Siciliano E. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2015. V. 784. P. 172. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.10.046>
3. Berkowitz E.H. // Nucl. Instrum. Methods. 1969. V. 73. Iss. 2. P. 225. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(69\)90213-4](https://doi.org/10.1016/0029-554X(69)90213-4)
4. Stoykov A., Mosset J., Hildebrandt M. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2016. V. 63. № 4. P. 2271.
5. Stave S., Bliss M., Kouzes R., Lintereur A., Robinson S., Siciliano E., Wood L. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 2015. V. 784. P. 208. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.01.039>
6. Abe F., Amidei D., Apollinari G. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A. 1988. V. 271. Iss. 3. P. 387.
7. [https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150\\_psf01.pdf](https://www.kuraray.com/uploads/5a717515df6f5/PR0150_psf01.pdf). Дата обращения 15.05.2022.
8. Nakamura T., Toh K., Honda K. et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. V. 528. P. 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/528/1/012042>
9. Xu C., Garutti E., Mandai S., Charbon E. // 2013 IEEE Nucl. Sci. Symp. and Medical Imaging Conf. (2013 NSS/MIC), Seoul, 27 October–02 November, 2013. P. 6829585. <https://doi.org/10.1109/NSSMIC.2013.6829585>
10. Yu Q., Tang B., Huang C. et al. // Nucl. Engin. Technol. 2022. V. 54. Iss. 3. P. 1030. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.09.014>
11. <https://www.sensl.com/downloads/ds/TN%20-%20Intro%20to%20SPM%20Tech.pdf>. Дата обращения 15.05.2022.
12. Tang M., Yu Q., Huang C. et al. // Rev. Sci. Instrum. 2022. V. 93. P. 033305. Doi <https://doi.org/10.1063/5.0078183>
13. Марин В.Н., Садыков Р.А., Трунов Д.Н., Литвин В.С., Аксенов С.Н., Столяров А.А. // Письма в журн. технической физики. 2015. Т. 41. № 18. С. 96.
14. Литвин В.С., Марин В.Н., Караевский С.Х., Трунов Д.Н., Аксенов С.Н., Столяров А.А., Садыков Р.А. // Кристаллография. 2016. Т. 61. № 1. С. 115.
15. <https://lambdare.com/tracepro/> Дата обращения 15.05.2022.
16. Zhu C., Liu Q. // J. Biomed. Opt. 2013. V. 18. Iss. 5. P. 50902. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.5.050902>. PMID: 23698318

17. <http://geant4.cern.ch/>. Дата обращения 15.05.2022.
18. Xie S., Zhu Z., Zhang X., Xie Q., Yu H., Zhang Y., Xu J., Peng Q. // *Sensors*. 2021. V. 21. P. 4681. <https://doi.org/10.3390/s21144681>
19. Schuemann J. // *Med. Phys.* 2014. V. 41. P. 047302. <https://doi.org/10.1118/1.4869177>
20. Бушама Л., Громушкин Д.М., Дмитриева А.Н. // *Ученые записки физ. фак-та Моск. ун-та*. 2018. № 4. С. 1840202.
21. <http://xn--80aam0alg.xn--p1ai/>. Дата обращения 15.05.2022.
22. <https://eljentechnology.com/products/accessories/ej-510>. Дата обращения 15.05.2022.

## Simulation of Optical Parameters of Scintillation Position-Sensitive Detectors with Organic Light Guide

D. N. Trunov<sup>1, 2, \*</sup>, V. N. Marin<sup>1, 2</sup>, R. A. Sadykov<sup>2</sup>, E. V. Altynbaev<sup>1</sup>, T. I. Glushkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*NRC "Kurchatov Institute" – PNPI, Gatchina, 188300 Russia*

<sup>2</sup>*Institute for Nuclear Research RAS, Moscow, Troitsk, 108840 Russia*

\**e-mail: dtrunov@inr.ru*

A new method for determining the coordinates in position-sensitive detectors with an organic fiber and silicon photomultipliers is described. This method differs from previously used spectrum-shifting fibers or an array of light-sensitive elements. It is based on the absorption of photons in the volume of the fiber and the reduction in the number of photons. Depending on the path length, the number of photons incident on the surface of the silicon photomultiplier varies. The optical parameters of a one-dimensional position-sensitive detector are simulated and the effect of the fiber coating on the amount of light is shown. Simulation of a two-dimensional position-sensitive detector of two types has been also carried out, optical parameters and intensity ratios from different ends of the fiber have been determined. A technique for obtaining maps of intensity ratios and features of their use for determining the coordinates are described. The main features of the manufacture of this type detectors and their influence on the resolution of the final detector are outlined.

**Keywords:** neutrons, detectors, silicon photomultipliers, scintillator, Geiger avalanche photodiodes, scintillation detector, organic light guide, spectral shifting fibers, light guide, position-sensitive detector, simulation, optical parameters.