

УДК 59.14.27

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕТЕКТОРА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КРИСТАЛЛА И КРЕМНИЕВОГО ФОТОУМНОЖИТЕЛЯ

И.О. Бокатый^a, Г.Э. Романова^a, В.М. Денисов^b, А.Б. Титов^c, В.А. Рыжова^a,
А.В. Радилов^{b,d}

^a Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^b ООО «Флагман Гео», Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

^c Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

^d Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук (ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

Адрес для переписки: Vokatyi.ilia@bk.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 28.07.18, принята к печати 10.09.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-932-938

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Бокатый И.О., Романова Г.Э., Денисов В.М., Титов А.Б., Рыжова В.А., Радилов А.В. Компьютерное моделирование детектора гамма-излучения на основе сцинтилляционного кристалла и кремниевого фотоумножителя // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 932–938. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-932-938

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены принципы построения детектора гамма-излучения на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя и сцинтилляционного кристалла с использованием оптической схемы согласования элементов. **Метод.** Для исследования возможных схем построения детектора в среде ZEMAX Software созданы компьютерные модели, описывающие процесс распространения излучения сцинтилляционной вспышки в объеме кристалла с учетом основных процессов, протекающих в сцинтилляционном детекторе. При создании модели учитывались оптические характеристики материала, идентичные характеристикам йодида цезия (CsI). **Основные результаты.** Получены количественные параметры сигнала и потерь излучения в моделируемых системах, а также информация о распределении излучения в плоскости фотоприемника. Установлена оптимальная с точки зрения эффективности регистрации схема построения детектора, определены геометрические параметры ее оптических элементов. **Практическая значимость.** Развитие такого подхода позволяет создавать высокоэффективные миниатюрные сцинтилляционные детекторы за счет нового класса фотоприемников – кремниевых фотоэлектронных умножителей. Результаты исследования будут полезны при разработке сцинтилляционных гамма-спектрометров и других приборов, принцип действия которых базируется на методах сцинтилляционной спектрометрии и радиометрии.

Ключевые слова

кремниевый фотоэлектронный умножитель, сцинтилляционный кристалл, гамма-спектрометр, спектрометрия, компьютерная модель, световод

COMPUTER SIMULATION OF GAMMA-RAY DETECTOR BASED ON SCINTILLATION CRYSTALS AND SILICON PHOTOMULTIPLIERS

I.O. Vokatyi^a, G.E. Romanova^a, V.M. Denisov^b, A.B. Titov^c, V.A. Ryzhova^a, A.V. Radilov^{b,d}

^aITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^bFlagman Geo Ltd, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation

^cPeter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Polytech), Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

^dSaint Petersburg Branch of Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radiowaves Propagation RAS (IZMIRAS), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation

Corresponding author: Vokatyi.ilia@bk.ru

Article info

Received 28.07.18, accepted 10.09.18

doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-932-938

Article in Russian

For citation: Vokatyi I.O., Romanova G.E., Denisov V.M., Titov A.B., Ryzhova V.A., Radilov A.V. Computer simulation of gamma-ray detector based on scintillation crystals and silicon photomultipliers. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2018, vol. 18, no. 6, pp. 932–938 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-6-932-938

Abstract

Subject of Research. The paper considers the principles of realization of the gamma-radiation detector based on a silicon photoelectron multiplier and a scintillation crystal with the use of an optical matching scheme. **Method.** For studying the possible variants of detector creation, computer models were developed in the ZEMAX Software environment, describing radiation propagation process of scintillation in the crystal volume in view of the main processes taking place in the scintillation detector. The model has the same optical characteristics as cesium iodide (CsI). **Main Results.** Quantitative parameters of the signal and radiation losses in modeled systems were obtained. The information on radiation distribution in the photodetector plane was obtained as well. The optimal scheme for detector creation from the registration effectiveness point of view was established and its geometric parameters were determined. **Practical Relevance.** The development of the approach gives the possibility to solve the problem of creating highly efficient and miniature scintillation detectors at the expense of a new class of photodetectors - silicon photoelectric multipliers. The results of the research will be useful in the development of scintillation gamma spectrometers and other devices with operating principles based on the methods of scintillation spectrometry and radiometry.

Keywords

silicon photoelectron multipliers, SiPM, scintillation crystal, gamma spectrometer, spectrometry, optical model, optical fiber

Введение

Сцинтилляционные детекторы широко применяются для регистрации гамма-излучения в таких областях, как экспериментальная физика, радиационный мониторинг, промышленность, радиобиология и медицина [1–3]. Традиционная схема построения детектора включает сцинтилляционный кристалл и вакуумный фотоэлектронный умножитель. Такая схема обеспечивает высокую чувствительность, но не всегда подходит для использования в полевых условиях, так как устройство должно быть устойчивым к механическим воздействиям, однако вакуумные фотоэлектронные умножители хрупки. Кроме того, приемники данного класса имеют относительно большие габариты.

Замена вакуумных фотоумножителей твердотельными позволяет преодолеть обе проблемы, так как приемники нового класса имеют небольшие размеры и высокую механическую прочность [4, 5]. Кремниевые фотоумножители широко распространены благодаря высокому внутреннему усилению (порядка 10^6 крат); малому отклонению коэффициента усиления (около 10 %); низкой чувствительности к изменению температуры и напряжения питания; высокой эффективности регистрации излучения видимого диапазона (около 6 %); возможности работы в режиме счета фотонов и спектрометра, высокому временному разрешению (около 1 нс).

Однако при использовании кремниевых фотоумножителей необходимо учитывать особенности их работы. Фоточувствительная площадка приемника представляет собой упорядоченный набор $p-n$ -переходов с приложенным к ним напряжением обратного смещения. После регистрации фотона оптического излучения одним элементом матрицы фотоумножителя этот элемент становится нечувствительным на время восстановления – примерно $1,5 \cdot 10^{-7}$ с. При больших значениях потока оптического излучения фотоны, достигшие элемента приемника во время его восстановления, не регистрируются, что отрицательно сказывается на точности измерений. Поэтому необходимо добиться равномерного распределения потока оптического излучения на фоточувствительной площадке. С этой целью используют оптическую систему согласования сцинтилляционного кристалла и фотоэлектронного умножителя на основе оптического волокна [6–8] или световода [9].

В представленной работе рассмотрены варианты использования оптических световодов различных конфигураций и проанализирован сигнал с кремниевого фотоумножителя с матрицей формата 2×2 ; описаны используемые модели и результаты расчетов.

Основы построения компьютерной модели сцинтилляционного детектора

Одним из методов поиска оптимального способа согласования фотоумножителя и кристалла является моделирование вспышек сцинтиллятора внутри детектора. В рамках настоящей работы моделированием процесса образования вспышки можно пренебречь и рассматривать только результирующее излучение. Модель оптического пути излучения от точки сцинтилляции до фоточувствительной площадки фотоумножителя может создаваться с помощью традиционного программного обеспечения, например ZEMAX [10], в котором для трассировки лучей используются статистические методы, аналогичные тем, что применяют для моделирования приборов на основе сцинтилляционных детекторов [6, 11]. При выборе модели источника во внимание принимались следующие условия: сцинтилляционная вспышка с одинаковой вероятностью возникает в любой точке объема кристалла; гамма-квант провоцирует люминесценцию отдельной малой области, и от этой области излучение распространяется по всем направлениям, а спектральный диапазон соответствует спектру высвечивания кристалла йодида цезия с максимумом спектра на длине волны 550 нм. В работе используется кристалл йодида цезия размером $14 \times 14 \times 28$ мм, в качестве модели оптического материала – оптическое стекло с близкими к йодиду цезия показателем преломления и числом Аббе. Такая замена материала обусловлена отсутствием йодида цезия в каталоге программы.

Для удобства оценки и интерпретации последующих результатов энергия сцинтилляционной вспышки была выбрана равной 100 условным единицам. В программе ZEMAX эта величина задавалась как поток точечного источника.

Существует несколько методов повышения эффективности передачи энергии от точки сцинтилляции до фотоприемника: использование дополнительного покрытия, полировка и шлифовка поверхности [12, 13]. Наиболее эффективно использование полированной поверхности с диффузным отражением [6, 13]. На практике для достижения результата, близкого к оптимальному, кристалл оборачивается в специальную ленту, это моделировалось с учетом свойств граней кристалла – рассматривалось ламбертовское отражение от всех граней, за исключением выходной.

Для более наглядного представления результатов оценки сигнала на кремниевом фотоумножителе в компьютерную модель были введены четыре площадки-детектора, разделенные небольшим зазором. При моделировании оценивался пропорциональный световому потоку на детекторах суммарный сигнал на каждой площадке, который условно исчислялся в люменах. При моделировании площадок кремниевого фотоумножителя не были учтены апертурные характеристики, т.е. модель не учитывает угол падения луча на фотоприемник. Кроме того, в модели не учитываются слепые зоны матрицы приемника излучения (промежутки между элементами и неактивные зоны самих элементов).

В процессе моделирования оптико-электронного устройства необходимо выбрать модель источника излучения. В данном случае можно выбрать одну из простейших моделей, встроенных в ZEMAX, среди которых: объемный источник, объем которого содержит случайную координату излучения со случайным направлением лучей; излучающая площадка (плоскость) – прямоугольная или эллиптическая, которая испускает лучи в соответствии с определенным законом, но всегда не более чем в полусфере; точечный источник, способный испускать лучи внутри конуса с углом от 0 (параллельный пучок лучей) до 4π стерадиан (полная сфера). Модель объемного источника может быть использована, когда регистрируется мощный поток гамма-излучения и внутри кристалла происходит множество сцинтилляций, при достаточном количестве лучей такая модель может дать адекватную оценку светового потока на выходе. Однако такая модель не дает информации о координате сцинтилляции и, в частности, о зависимости сигнала на выходе от координаты вспышки. Модель источника-плоскости также может быть полезна, когда в условиях исследования не важен характер распространения излучения внутри кристалла и необходимо оценивать только излучение на выходной грани кристалла. Таким образом, наиболее подходящий вариант для данной задачи – использование модели точечного источника. Для расчета в каждом случае от одной вспышки трассируется 100 000 лучей.

Моделирование простейшей схемы сцинтилляционного детектора

В простейшем случае фотоумножитель и сцинтилляционный кристалл соединяют без какой-либо дополнительной оптической системы. На рис. 1, а, показан кристалл с системой координат. На рис. 1, б – модель кристалла с четырьмя фоточувствительными площадками. Как было сказано выше, все грани кристалла, кроме общей грани с фотоумножителем, обладают свойством диффузного отражения. Цифры на рис. 1, б, соответствуют номерам площадок детекторов (отдельные области фотоумножителя).

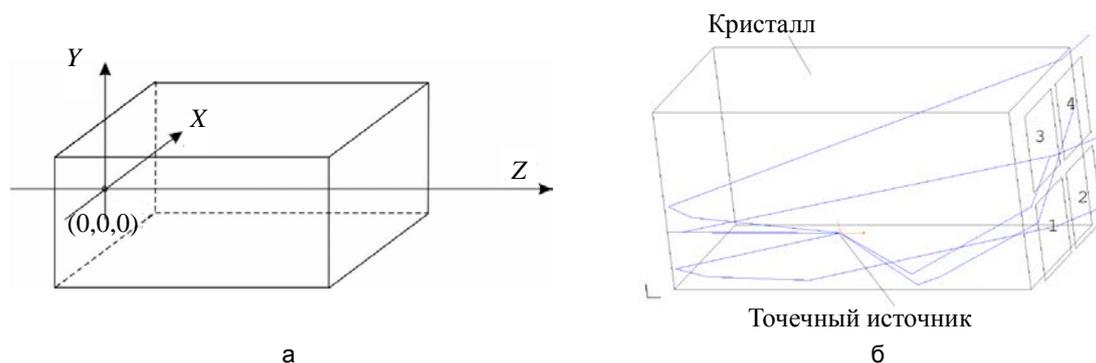


Рис. 1. Простая модель, используемая для расчетов: система координат (а); модель детектора в среде компьютерной программы ZEMAX (б)

Рассмотрено 50 вариантов расположения источников света (сцинтилляции), каждый соответствует разным значениям координат вдоль осей X, Y, Z. Координаты генерировались случайным образом.

На рис. 2 представлены результаты трассировки. Как видно, в большинстве случаев сигналы на четырех площадках (детекторах) достаточно близки, но есть случаи, когда сигнал на одном из детекторов значительно превышает остальные (сцинтилляционная вспышка расположена вблизи выходной грани кристалла и близко к одной из площадок).

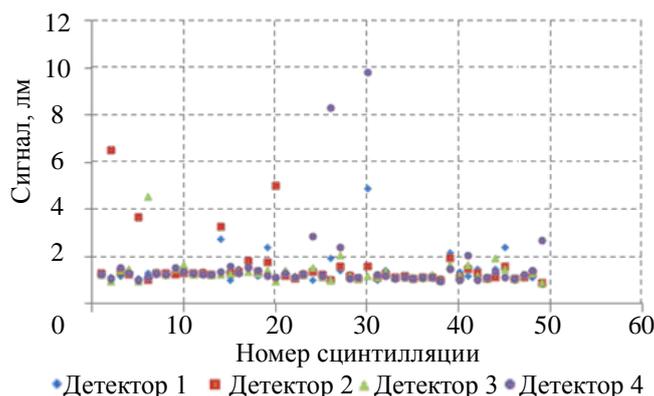


Рис. 2. Результаты расчета для 50 вариантов положения источника света

Для оценки сигналов используется стандартное отклонение σ , среднеквадратичное отклонение в абсолютных величинах δ и в процентах $\delta_{отн}$:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n-1}}; \delta = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{n}}; \delta_{отн} = \frac{\delta}{\bar{x}} \cdot 100 \%,$$

где x – значение сигнала в отдельной трассировке; \bar{x} – среднее значение сигнала; n – число трассировок.

При исследовании простейшей модели были получены значения, приведенные в табл. 1.

Характеристика	Детектор 1	Детектор 2	Детектор 3	Детектор 4
\bar{x}	1,426	1,554	1,36	1,663
σ	0,634	1,008	0,517	1,588
δ	0,627	0,998	0,512	1,572
$\delta_{отн}, \%$	44,025	64,196	37,572	94,531

Таблица 1. Результаты расчета для простейшей модели

Из полученных результатов видно, что различие сигналов с детекторов велико, что объясняется возникновением сцинтилляционной вспышки вблизи плоскости детектора.

Моделирование сцинтилляционного детектора с оптическим световодом

Для эффективного переноса энергии и получения равномерного распределения потока излучения в осветительной оптике используют световоды. Кроме того, световоды применяются при переносе света в сцинтилляционных детекторах, а также концентрации света [14, 15]. Геометрические параметры световодов зависят от формы и размеров кристалла и детектора, а также от назначения устройства. В рассматриваемом случае размер выходной поверхности кристалла сцинтиллятора близок к размеру приемника. Полный световод квадратного сечения с отражающей внутренней поверхностью в составе детектора представлен на рис. 3, а.

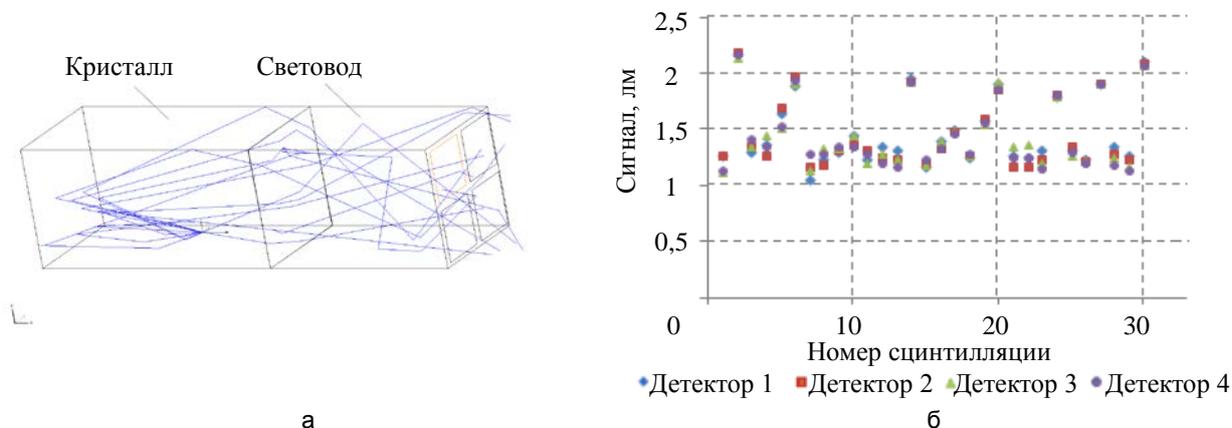


Рис. 3. Модель системы с полным световодом (а); рассчитанные сигналы с четырех площадок фотоумножителя (б)

Полый световод задавался в программе как зеркальная ловушка (Rectangular Pipe) [10], стенки которой выполнены из материала с отражающим покрытием.

Возможной практической реализацией представленной системы является стеклянный

параллелепипед (стеклянная призма) с отражающим покрытием или полый световод, изготовленный из материала с высокой отражательной способностью, который используется для отражателей в осветительной оптике.

В рамках работы проведен расчет как для полого световода, так и для световода с квадратным сечением из стекла. Вследствие снижения коэффициента пропускания при использовании стекла К8 сигнал уменьшился на 15–20 % по сравнению с полым световодом. Результаты расчета для кристалла с полым световодом показаны на рис. 3, б. Очевидно, что в этом случае разница сигналов на площадках меньше: можно сравнить результаты на рис. 2 и на рис. 3, б, обратив внимание на масштаб по вертикальной оси. Оценка однородности приведена в табл. 2.

Характеристика	Детектор 1	Детектор 2	Детектор 3	Детектор 4
\bar{x}	1,453	1,438	1,445	1,431
σ	0,306	0,314	0,300	0,307
δ	0,300	0,310	0,300	0,30
$\delta_{\text{отн}}, \%$	20,70	21,52	20,42	21,11

Таблица 2. Результаты расчета для модели со световодом

В настоящей статье рассматривается световод длиной 22 мм. Чем больше длина световода, тем более равномерно распределен сигнал в плоскости приемника, с другой стороны, с увеличением длины растут потери светового потока, обусловленные поглощением излучения в материале и потерями при отражении от его стенок.

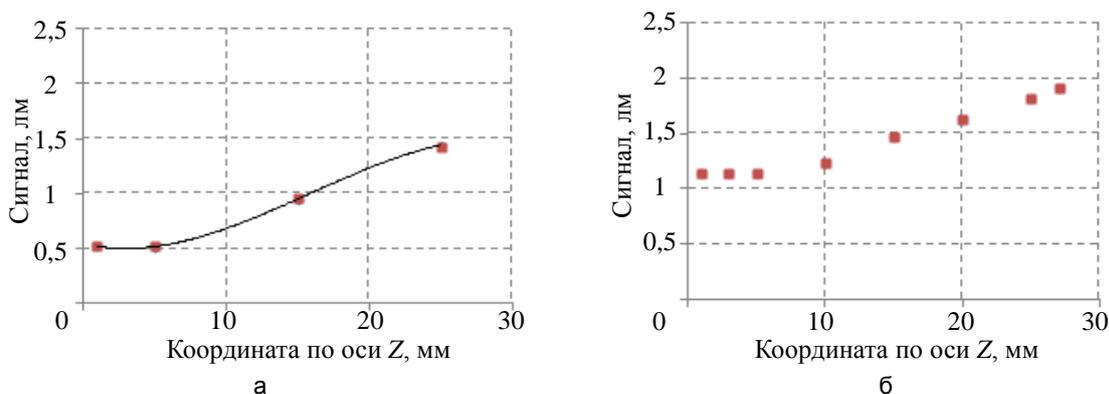


Рис. 4. Зависимость сигнала на детекторах от положения источника света

Анализ показал, что остаточная неравномерность сигнала относительно велика и определяется поглощением внутри кристалла. С целью подтверждения этой гипотезы было рассмотрено разное положение вспышки света вдоль оси Z кристалла (рис. 4). На рис. 4, а представлены результаты для модельного материала толщиной 25 мм, который имеет высокое пропускание (около 98 % в диапазоне видимого спектра), на рис. 4, б – для материала толщиной 6 мм, пропускание 87,5 %. Очевидно, что характер зависимости тот же, но уровень сигнала ниже для материала с более высоким показателем поглощения (такая же закономерность была установлена в работах [5, 14]).

Заключение

В ходе исследования рассмотрено несколько конфигураций световодов. Суммарные характеристики по четырем площадкам (детекторам) приведены в табл. 3.

Система	Потери излучения, %	Средний сигнал, лм	$\delta_{\text{отн}}, \%$
Кристалл без световода	14,94	1,5	60,1
Кристалл двойной длины без световода	16,32	0,80	88,6
Кристалл с полым световодом прямоугольной формы (длина световода 22 мм)	14,08	1,44	20,93

Таблица 3. Расчет для систем с различными вариантами согласования элементов

На основе полученных данных можно установить, что вариантом исполнения, оптимальным по равномерности сигнала с четырех площадок фотоумножителя в случае эквивалентных размеров выходной плоскости кристалла и светочувствительной поверхности, является кристалл со световодом

квадратного сечения. Остаточная неравномерность сигнала зависит от свойств кристалла (поглощения света внутри кристалла).

Таким образом, для достижения равномерного сигнала на чувствительной площадке фотоумножителя можно использовать световоды квадратного сечения, однако практический результат зависит от многих факторов, включая доступность материалов, их отражательную и пропускную способность, а также условия эксплуатации прибора.

Литература

1. Tolstukhin I.A., Somov A.S., Somov S.V., Bolozdynya A.I. Recording of relativistic particles in thin scintillators // *Instruments and Experimental Techniques*. 2014. V. 57. N 6. P. 658–661. doi: 10.1134/s0020441214060153
2. Bloser P.F., Legere J., Bancroft C., McConnell M.L., Ryan J.M., Schwadron N. Scintillator gamma-ray detectors with silicon photomultiplier readouts for high-energy astronomy // *Proc. SPIE*. 2013. V. 8859. doi: 10.1117/12.2024411
3. Uhov A.A., Gerasimov V.A., Kostrin D.K., Selivanov L.M. Use of compact spectrometer for plasma emission qualitative analysis // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. V. 567. N 012039. doi: 10.1088/1742-6596/567/1/012039
4. Qiang Yi, Smith E., Tolstukhin I., Brooks W., Hakobyan H., Kuleshov S., Soto O., Toro A., Lolos G., Papandreou Z., Semenov A. Characteristics of S12045X photon sensor for GlueX // *Bulletin of American Physical Society*. 2013. V. 58. P. 13.
5. Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л., Бужан П., Долгошеин Б., Ильин А., Попова Е. Кремниевый фотоэлектронный умножитель: новые возможности // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2007. № 8. С. 80–86.
6. Levin C.S., MacDonald L.R., Tornai M.P., Hoffman E.J., Park J. Optimizing light collection from thin scintillators used in beta-ray camera for surgical // *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record*. 1995. P. 1796–1800. doi: 10.1109/NSSMIC.1995.501933
7. Barbarino G., de Asmundis R., De Rosa G., Russo S., Vivolo D., Mollo C.M. Light concentrators for silicon photomultipliers // *Physics Procedia*. 2012. V. 37. P. 709–714. doi: 10.1016/j.phpro.2012.02.420
8. Elsey J., McKenzie D.R., Lambert J., Suchowerska N., Law S.L., Flaming S.C. Optimal coupling of light from a cylindrical scintillator into an optical fiber // *Applied Optics*. 2007. V. 46. N 3. P. 397–404. doi: 10.1364/ao.46.000397
9. Fujita T., Kataoka J., Nishiyama T., Ohsuka S., Nakamura S., Yamamoto S. Two-dimensional diced scintillator array for innovative, fine-resolution gamma camera // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2014. V. 765. P. 262–268. doi: 10.1016/j.nima.2014.04.060
10. ZEMAX 13 SP4 Optical Design Program. User's Manual. Radiant Zemax LLC, 2015. 859 p.
11. Ghal-Eh N., Etaati G.R. On the necessity of light transport simulation in scintillators // *Journal of Luminescence*. 2009. V. 129. P. 95–99. doi: 10.1016/j.jlumin.2008.09.001
12. Struth J. Muon detection with scintillation detectors using indirect SiPM readout. Bachelor Thesis. Aachen, Tech. Hochsch, 2010. P. 4–19.
13. Wagner A., Tan W.P., Chalut K., Charity R.J., Davin B., Laroche Y., Lennek M.D., Liu T.X., Liu X.D., Lynch W.G., Ramos A.M., Shomin R., Sobotka L.G., de Souza R.T., Tsang M.B., Verde G., Xu H.S. Energy resolution and energy-light response of CsI(Tl) scintillators for charged particle detection // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2001. V. 456. P. 290–299. doi: 10.1016/S0168-9002(00)00542-8
14. Kinney E.R., Matthews J.L., Sapp W.W., Schumacher R.A., Owens R.O. A simple light guide for coupling to thin scintillator sheets // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 1981. V. 185. P. 189–193. doi: 10.1016/0029-554X(81)91211-8
15. Galloway R.B., Vass D.G. A light guide design for uniform sensitivity over a large diameter scintillator coupled to a single photomultiplier // *Nuclear Instruments and Methods*. 1970. V. 83. P. 35–38. doi: 10.1016/0029-554X(70)90530-6

References

1. Tolstukhin I.A., Somov A.S., Somov S.V., Bolozdynya A.I. Recording of relativistic particles in thin scintillators. *Instruments and Experimental Techniques*, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 658–661. doi: 10.1134/s0020441214060153
2. Bloser P.F., Legere J., Bancroft C., McConnell M.L., Ryan J.M., Schwadron N. Scintillator gamma-ray detectors with silicon photomultiplier readouts for high-energy astronomy. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8859. doi: 10.1117/12.2024411
3. Uhov A.A., Gerasimov V.A., Kostrin D.K., Selivanov L.M. Use of compact spectrometer for plasma emission qualitative analysis. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, vol. 567, no. 012039. doi: 10.1088/1742-6596/567/1/012039
4. Qiang Yi, Smith E., Tolstukhin I., Brooks W., Hakobyan H., Kuleshov S., Soto O., Toro A., Lolos G., Papandreou Z., Semenov A. Characteristics of S12045X photon sensor for GlueX. *Bulletin of American Physical Society*, 2013, vol. 58, p. 13.
5. Klemen S., Kuznetsov Yu., Filatov L., Buzhan P., Dolgoshein B., Il'in A., Popova E. Silicon photoelectronic multiplier. New opportunity. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2007, no. 8, pp. 80–86.
6. Levin C.S., MacDonald L.R., Tornai M.P., Hoffman E.J., Park J. Optimizing light collection from thin scintillators used in beta-ray camera for surgical. *Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference Record*, 1995, pp. 1796–1800. doi: 10.1109/NSSMIC.1995.501933
7. Barbarino G., de Asmundis R., De Rosa G., Russo S., Vivolo D., Mollo C.M. Light concentrators for silicon photomultipliers. *Physics Procedia*, 2012, vol. 37, pp. 709–714. doi: 10.1016/j.phpro.2012.02.420
8. Elsey J., McKenzie D.R., Lambert J., Suchowerska N., Law S.L., Flaming S.C. Optimal coupling of light from a cylindrical scintillator into an optical fiber. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 3, pp. 397–404. doi: 10.1364/ao.46.000397
9. Fujita T., Kataoka J., Nishiyama T., Ohsuka S., Nakamura S., Yamamoto S. Two-dimensional diced scintillator array for innovative, fine-resolution gamma camera. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2014, vol. 765, pp. 262–268. doi: 10.1016/j.nima.2014.04.060
10. ZEMAX 13 SP4 Optical Design Program. User's Manual. Radiant Zemax LLC, 2015, 859 p.
11. Ghal-Eh N., Etaati G.R. On the necessity of light transport simulation in scintillators. *Journal of Luminescence*, 2009, vol. 129, pp. 95–99. doi: 10.1016/j.jlumin.2008.09.001
12. Struth J. *Muon detection with scintillation detectors using indirect SiPM readout*. Bachelor Thesis. Aachen, Tech. Hochsch, 2010, pp. 4–19.
13. Wagner A., Tan W.P., Chalut K., Charity R.J., Davin B., Laroche Y., Lennek M.D., Liu T.X., Liu X.D., Lynch W.G., Ramos A.M., Shomin R., Sobotka L.G., de Souza R.T., Tsang M.B., Verde G., Xu H.S. Energy resolution and energy-light response of CsI(Tl) scintillators for charged particle detection. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 2001, vol. 456, pp. 290–299. doi: 10.1016/S0168-9002(00)00542-8
14. Kinney E.R., Matthews J.L., Sapp W.W., Schumacher R.A., Owens R.O. A simple light guide for coupling to thin scintillator sheets. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 1981, vol. 185, pp. 189–193. doi: 10.1016/0029-554X(81)91211-8
15. Galloway R.B., Vass D.G. A light guide design for uniform sensitivity over a large diameter scintillator coupled to a single photomultiplier. *Nuclear Instruments and Methods*, 1970, vol. 83, pp. 35–38. doi: 10.1016/0029-554X(70)90530-6

Авторы

Бокатый Илья Олегович – студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0002-0983-8745, Bokaty_i.ilia@bk.ru

Романова Галина Эдуардовна – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0001-9348-8540, geromanova@corp.ifmo.ru

Денисов Виктор Маевич – доктор технических наук, доцент, генеральный директор, ООО «Флагман Гео», Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация; Scopus ID: 56689367600, ORCID ID: 0000-0002-1907-5198, 070255@gmail.com

Титов Александр Борисович – кандидат экономических наук, доцент, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация, Scopus ID: 57195249402, ORCID ID: 0000-0002-9014-2541, titov_ab@spbstu.ru

Рыжова Виктория Александровна – кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 56556742000, ORCID ID: 0000-0003-2142-1894, victoria_ryz@corp.ifmo.ru

Радилов Андрей Владимирович – ведущий программист, Санкт-Петербургский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Российской академии наук (ИЗМИРАН), Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация; ООО «Флагман Гео», первый заместитель генерального директора, Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация, ORCID ID: 0000-0003-0776-7434, andrad@mail.ru

Authors

Ilya O. Bokaty – student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0002-0983-8745, Bokaty_i.ilia@bk.ru

Galina E. Romanova – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0001-9348-8540, geromanova@corp.ifmo.ru

Victor M. Denisov – D.Sc., Associate Professor, CEO, Flagman Geo Ltd, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation; Scopus ID: 56689367600, ORCID ID: 0000-0002-1907-5198, 070255@gmail.com

Alexander B. Titov – PhD, Associate Professor, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation, Scopus ID: 57195249402, ORCID ID: 0000-0002-9014-2541, titov_ab@spbstu.ru

Victoria A. Ryzhova – PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 56556742000, ORCID ID: 0000-0003-2142-1894, victoria_ryz@corp.ifmo.ru

Andrey V. Radilov – Leading programmer, Saint Petersburg Branch of Institute of Earth Magnetism, Ionosphere and Radiowaves Propagation RAS (IZMIRAS), Saint Petersburg, 199034, Russian Federation; First Deputy General Director, Flagman Geo Ltd, Saint Petersburg, 197376, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-0776-7434, andrad@mail.ru