

Оптический журнал

Оптическое приборостроение и метрология
Optical instrument making and metrology

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-07-38-50

УДК 681.78, 343.77

Сцинтилляционный оптико-электронный преобразователь гамма-излучения на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя

Илья Олегович Бокатый¹✉, Валерий Викторович Коротаев²,
Галина Эдуардовна Романова³, Александр Николаевич Тимофеев⁴,
Виктория Александровна Рыжова⁵

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹bokatyi.ilia@bk.ru <https://orcid.org/0000-0002-0983-8745>

²korotaev_v_v@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

³romanova_g_e@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9348-8540>

⁴timofeev@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>

⁵victoria_ryz@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-2682-8311>

Аннотация

Предмет исследования. Сцинтилляционный оптико-электронный преобразователь гамма-излучения на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя. **Цель работы.** Разработка оптико-электронного преобразователя гамма-излучения с увеличенным диапазоном линейности передаточной характеристики и улучшенным относительным энергетическим разрешением для персонального использования и работы в составе распределенных систем радиационного контроля в полевых условиях. **Метод.** Анализ процессов преобразования сигналов в сцинтилляционном оптико-электронном преобразователе гамма-излучения, компьютерное моделирование и экспериментальное исследование преобразователя. **Основные результаты.** Предложена структура и разработан оптико-электронный преобразователь гамма-излучения для персонального использования и работы в составе распределенных систем радиационного контроля в полевых условиях. Разработана методика выбора размеров оптической системы сопряжения сцинтилляционного кристалла и кремниевого фотоэлектронного умножителя, а также вида и параметров ее отражающих поверхностей, которая позволяет увеличить диапазон линейности передаточной характеристики преобразователя за счет повышения равномерности облученности фотоумножителя. Предложен алгоритм оценки вклада потерь сигнала от фотонов, попадающих на микроячейку кремниевого фотоэлектронного умножителя во время восстановления ее чувствительности, в относительное энергетическое разрешение преобразователя при экспериментальных исследованиях равномерности распределения облученности. **Практическая значимость.** Разработан оптико-электронный преобразователь гамма-излучения с увеличенным до двух раз диапазоном линейности передаточной характеристики при интегральной нелинейности энергетической характеристики не более 1% и улучшенным не менее чем на 10% относительным энергетическим разрешением по пику энергии 662 кэВ эталонного источника ^{137}Cs . Оптико-электронный преобразователь предназначен для персонального использования и работы в составе распределенных систем радиационного контроля в полевых условиях.

Ключевые слова: оптико-электронный преобразователь гамма-излучения, гамма-спектрометр, умножитель кремниевый фотоэлектронный, сцинтилляционный кристалл, энергетическое разрешение, радиационный мониторинг

Ссылка для цитирования: Бокатый И.О., Коротаев В.В., Романова Г.Э., Тимофеев А.Н., Рыжова В.А. Сцинтилляционный оптико-электронный преобразователь гамма-излучения на основе кремниевого фотоэлектронного умножителя // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 7. С. 38–50. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-38-50>

Коды OCIS: 120.0280, 230.0250, 290.5930, 040.5250, 300.6350

Scintillation optical-electronic converter of gamma radiation based on silicon photomultiplier

ILYA O. BOKATYI¹✉, VALERY V. KOROTAEV², GALINA E. ROMANOVA³,
ALEXANDR N. TIMOFEEV⁴, VIKTORIA A. RYZHOVA⁵

ITMO University, St. Petersburg, Russia

¹bokatyi.ilia@bk.ru <https://orcid.org/0000-0002-0983-8745>

²korotaev_v_v@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>

³romanova_g_e@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9348-8540>

⁴timofeev@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>

⁵victoria_ryz@itmo.ru <https://orcid.org/0000-0002-2682-8311>

Abstract

Subject of study. Scintillation optical-electronic converter of gamma radiation based on silicon photomultiplier. **Purpose of the work.** Development of an optical-electronic converter of gamma radiation for personal use and operation as part of the distributed radiation monitoring systems with an increased range of linearity of the transfer characteristic and improved relative energy resolution for personal use and work as part of distributed radiation monitoring systems in the field. **Method.** Analysis of signal conversion processes in a scintillation optical-electronic converter of gamma radiation, computer simulation and experimental study of the converter. **Main results.** The optical-electronic gamma-radiation converter for personal use and work as part of the distributed radiation monitoring systems in the field was developed. A method for choosing the dimensions of the optical system for matching of a scintillation crystal and a silicon photomultiplier, as well as the type and parameters of its reflective surfaces was developed, which made it possible to increase the linearity range of the transducer transfer characteristic by increasing the uniformity of the photomultiplier irradiation. An algorithm for estimating the contribution of signal losses from photons arriving at a microcell of a silicon photomultiplier during the restoration of its sensitivity to the relative energy resolution of the converter in experimental studies of the uniformity of irradiation distribution is proposed. **Practical significance.** An optical-electronic converter of gamma radiation has been developed with an increased up to two times the range of linearity of the transfer characteristic with an integral nonlinearity of the energy characteristic of no more than 1% and improved by at least 10% relative energy resolution for the peak energy of 662 keV of the reference ^{137}Cs source. The optical-electronic converter is designed for personal use and operation as part of distributed radiation monitoring systems in the field.

Keywords: optical-electronic converter of gamma radiation, gamma spectrometer, silicon photoelectronic multiplier, scintillation crystal, energy resolution, radiation monitoring

For citation: Bokaty I.O., Korotaev V.V., Romanova G.E., Timofeev A.N., Ryzhova V.A. Scintillation optical-electronic converter of gamma radiation based on silicon photomultiplier [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 7. P. 38–50. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-07-38-50>

OCIS codes: 120.0280, 230.0250, 290.5930, 040.5250, 300.6350

ВВЕДЕНИЕ

Развитие информационных технологий позволяет успешно решать задачи автоматизации обнаружения и мониторинга спектрального со-

става источников ионизирующих излучений в реальном времени на обширной территории [1–3]. Использование кремниевых фотоэлектронных умножителей (КФЭУ) в портативных

сетевых приборах радиационного контроля расширяет возможности их применения [4, 5] по сравнению с аналогичными приборами с большими габаритными размерами на основе вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Однако существующие портативные модели γ -спектрометров на основе КФЭУ обладают меньшим диапазоном регистрируемых значений энергии γ -излучения [6, 7], в то время как аналоги на основе вакуумных ФЭУ обеспечивают контроль энергий до 3000 кэВ. В некоторых областях поиска и контроля радиационных материалов характерные пики ионизирующего излучения источников располагаются за значением 1330 кэВ. Примеры источников такого диапазона представляют изотопы ^{40}K с пиком 1460 кэВ, ^{24}Na с пиком 2754 кэВ и ^{38}Cl с пиком 2167 кэВ, являющиеся объектами поиска геологоразведки, изотоп ^{56}Mn с пиком 2113 кэВ и др.

Оптико-электронные преобразователи γ -излучения с беспроводным интерфейсом (ОЭПГИ) [8] могут быть встроены в структуру мониторинговой сети. Однако противоречивые требования, такие как высокое энергетическое разрешение при минимальном энергопотреблении, обуславливают необходимость комплексных подходов к исследованию и проектированию компактных ОЭПГИ, используемых в качестве первичных преобразователей в полевых условиях. При этом должна совершенствоваться не только аппаратная часть ОЭПГИ, содержащая в своей основе сцинтилляционный кристалл (СК), оптическую систему сопряжения (ОСС) [9] и КФЭУ, но и программная часть, осуществляющая обработку информативных сигналов, получаемых от КФЭУ, и последующую передачу информации в систему мониторинга [10]. Также следует учитывать, что для работы в полевых условиях такой ОЭПГИ должен иметь ударную прочность, слабую подверженность внешним электромагнитным полям, малое низковольтное электропотребление и модульность.

Целью настоящего исследования является создание оптико-электронного преобразователя γ -излучения, обеспечивающего регистрацию энергетического спектра в диапазоне от 60 до 3000 кэВ с интегральной нелинейностью не более 1% при его высокой защищенности от магнитных полей, позволяющего оценивать параметры γ -излучения при малом энергопо-

треблении преобразователя, для персонального использования или работы в составе распределенных систем радиационного контроля в полевых условиях.

ОБОБЩЕННАЯ СТРУКТУРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Процесс получения информации в сцинтилляционной γ -спектрометрии [11] осуществляется в два этапа: в первую очередь происходит преобразование энергии γ -излучения в энергию оптического излучения, затем преобразование ее в электрические сигналы и последующая обработка этих сигналов.

Обобщенная структура современных ОЭПГИ реализована по модульному принципу и представляется как система двух функциональных блоков: блока первичных преобразований (БПП) и блока обработки, управления и связи (рис. 1). Блок первичных преобразований преобразует информацию о γ -излучении среды в аналоговый электрический сигнал, он состоит из СК, ОСС, КФЭУ и первичного аналогового преобразователя, выполняющего функцию предварительного преобразования аналогового сигнала.

Состав блока обработки, управления и связи включает аналого-цифровой преобразователь (АЦП), подсистему первичной обработки информации, модуль управления и обработки информации, модуль позиционирования, модуль связи и модуль автономного питания. Подсистема первичной обработки информации формирует служебные сигналы, необходимые для работы БПП, и преобразует цифровой сигнал с выхода АЦП в информацию об энергии и активности γ -излучения. Модуль управления и обработки информации обеспечивает выполнение требуемых процедур обработки сигнала и запись информации на энергонезависимый носитель в соответствии с задаваемым режимом работы ОЭПГИ. Модуль позиционирования определяет по известным процедурам GPS/GLONASS координаты положения ОЭПГИ. Модуль связи обеспечивает реализацию интерфейсов проводной, беспроводной, сотовой и спутниковой связи. Модуль автономного питания обеспечивает непрерывное энергопитание ОЭПГИ.

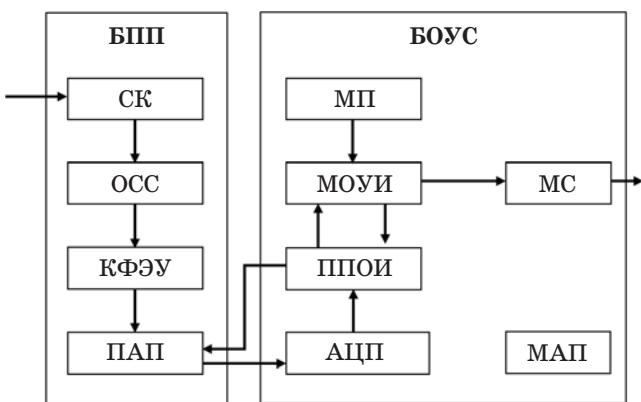


Рис. 1. Структурная схема оптико-электронного преобразователя гамма-излучения с беспроводным интерфейсом. БПП — блок первичных преобразований, СК — сцинтилляционный кристалл, ОСС — оптическая система сопряжения, КФЭУ — кремниевый фотоэлектронный умножитель, ПАП — первичный аналоговый преобразователь, БОУС — блок обработки, управления и связи, АЦП — аналого-цифровой преобразователь, ППОИ — подсистема первичной обработки информации, МУОИ — модуль управления и обработки информации, МП — модуль позиционирования, МС — модуль связи, МАП — модуль автономного питания

Fig. 1. Block diagram of an optical-electronic converter of gamma radiation with a wireless interface. БПП is primary conversion unit, СК is scintillation crystal, ОСС is optical matching system, КФЭУ is silicon photomultiplier, ПАП is primary analog converter, БОУС is processing, control and communication unit, АЦП is analog-to-digital converter, ППОИ is primary processing subsystem information, МУОИ is control and information processing module, МП is positioning module, МС is communication module, МАП is autonomous power supply module

Предложенная модульная структура позволяет реализовывать различные технологические схемы применения ОЭПГИ как в режиме индикации превышения уровня γ -излучения, так и периодического отображения много-параметрической накопленной информации, а также ее передачу в систему мониторинга.

При большом ассортименте КФЭУ [12] их выбор для эффективной регистрации излучения является многопараметрической задачей вследствие необходимости согласовывать временные и габаритные параметры, характеристики спектральной чувствительности и динамического диапазона КФЭУ с аналогичны-

ми параметрами и характеристиками других элементов ОЭПГИ. В случае работы в беспроводной сети с высокой степенью автономности преобразователя обработка и передача информации должны использовать как можно меньший ресурс питания, поэтому передачу информации следует осуществлять в обработанном виде (в виде энергетического спектра) с частотой передачи, необходимой системе.

ВЫБОР ПАРЫ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КРИСТАЛЛА И КРЕМНИЕВОГО ФОТОЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ

Принципиальным условием выбора элементов ОЭПГИ является согласование спектральных характеристик излучения СК и спектральных характеристик чувствительности КФЭУ. При этом необходимо также обеспечивать согласование диапазонов изменений мощности оптического излучения кристалла с динамическим диапазоном линейности передаточной (энергетической) характеристики КФЭУ.

При описании преобразований сигналов в БПП объем полезной информации о количестве фотонов, достигших КФЭУ и зарегистрированных им, характеризуется техническим световым выходом n_{hv}

$$n_{hv} = k\omega, \quad (1)$$

где k — коэффициент использования оптического излучения сцинтиллятора приемником [13], ω — световой выход сцинтиллятора [14], фотон/кэВ.

С учетом спектральных характеристик КФЭУ проведен обзор доступных видов сцинтилляционных материалов [14], который показал, что возможно использование в БПП таких материалов, как монокристаллический йодистый натрий, активированный таллием, $\text{NaI}(\text{Tl})$, йодистый цезий, активированный таллием, $\text{CsI}(\text{Tl})$, оксиортосиликат лютения, легированный церием, $\text{LSO} (\text{Lu}_2\text{SiO}_5)$, оксиортосиликат лютения-иттриевый, легированный церием, LYSO , ортогерманат висмута BGO и вольфрамат свинца PWO . Сравнительный анализ различных сочетаний СК с КФЭУ показал, что технический световой выход $\text{CsI}(\text{Tl})$ почти в полтора раза больше (табл. 1), чем у более распространенного сцинтилляционного материала — кристалла $\text{NaI}(\text{Tl})$, поэтому наиболее эффективным

Таблица 1. Результаты оценок технического световыхода сцинтиляционных материалов, регистрируемых КФЭУ модели ARRAY-C 60035-4Р

Table 1. Results of the technical light output of scintillation materials evaluations recorded by SiPM model ARRAY-C 60035-4P

Материал сцинтилятора	Коэффициент использования	Световыход сцинтилятора, фотон/кэВ	Технический световыход, фотон/кэВ
NaI(Tl)	0,797	38,0	30,3
CsI(Tl)	0,729	54,0	47,4
LSO	0,892	25,0	22,3
LYSO	0,875	32,0	28,0
BGO	0,789	7,6	6,0
PWO	0,794	32,0	25,4

для применения в ОЭПГИ является сочетание СК CsI(Tl) с КФЭУ. Предпочтительным вариантом для использования в БПП ОЭПГИ является КФЭУ ARRAY-C 60035-4Р.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАПАЗОНА ЛИНЕЙНОСТИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВОГО ФОТОЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ

Для обеспечения линейности передаточной характеристики ОЭПГИ каждый фотон, произведенный в СК, должен вызывать срабатывание одной микроячейки КФЭУ. Только в этом случае количество сработавших микроячеек КФЭУ будет пропорционально энергии γ -кванта, поглощенного СК.

Из-за конечного числа микроячеек уровень выходного сигнала КФЭУ достигает насыщения при определенном значении плотности потока фотонов. Уровень насыщения принято оценивать с помощью соотношения

$$N_{\text{fire}} = M \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\text{PDE} N_{\text{ph}} \right) / M \right] \right\}, \quad (2)$$

где N_{fire} — количество сработавших микроячеек, M — общее количество микроячеек на чувствительной площадке приемника, которое определяется выбором его модели, PDE — эффективность регистрации фотонов, учитывающая геометрический фактор заполнения КФЭУ, N_{ph} — количество фотонов, падающих на чувствительную область КФЭУ.

Количество фотонов N_{ph} зависит от энергии поглощенного в веществе сцинтилятора γ -кванта, световыхода используемого СК,

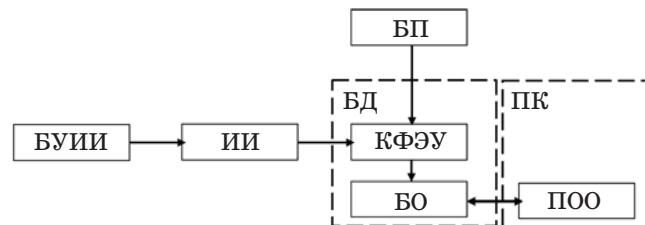


Рис. 2. Структурная схема стенда для исследования диапазона линейности передаточной характеристики кремниевого фотоэлектронного умножителя. БУИИ — блок управления источником излучения, ИИ — источник излучения, БД — блок датчика, КФЭУ — кремниевый фотоэлектронный умножитель, БО — блок обработки, БП — блок питания, ПК — персональный компьютер, ПОО — программное обеспечение обработки

Fig. 2. Block diagram of the stand for studying the range of linearity of the transfer characteristic of SiPM. BUII is radiation source control unit, II is radiation source, BD is sensor unit, KFEU is silicon photomultiplier, BO is processing unit, BP is power supply, PK is personal computer, POO is processing software

а также от потерь фотонов при транспортировке и регистрации.

Минимальное значение динамического диапазона определяется уровнем собственных шумов КФЭУ, к которым относятся шум темнового тока и дробовый шум. Максимальное значение определяется уровнем насыщения КФЭУ и зависит от числа микроячеек M .

На рис. 2 представлена структура стенда для экспериментальных исследований динамического диапазона выбранного КФЭУ. Методика исследований включала 10 серий

измерений сигнала w , регистрируемого КФЭУ, для потока оптического излучения Φ_e в диапазоне от $4,9 \times 10^{-3}$ до $12,8$ мВт. Информативным параметром являлся сигнал w , снимаемый с чувствительных площадок КФЭУ и характеризующий число сработавших ячеек приемника при регистрации фотонов.

На рис. 3 приведена экспериментально полученная, нормированная по максимальному

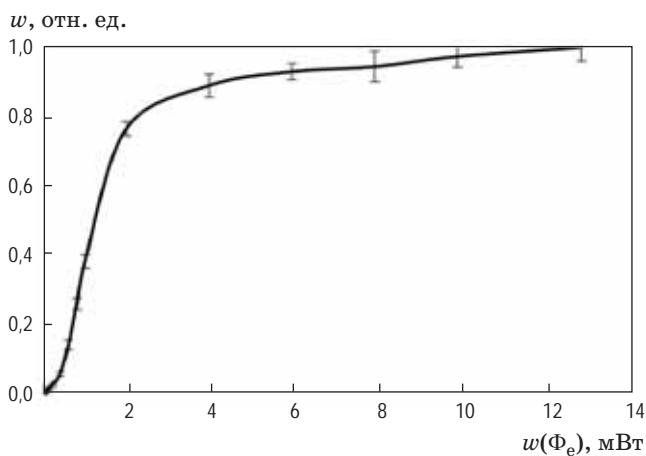


Рис. 3. Экспериментальная нормированная энергетическая характеристика кремниевого фотоэлектронного умножителя $w(\Phi_e)$ модели ARRAY-C 60035-4Р

Fig. 3. Experimental normalized energy characteristic of the SiPM $w(\Phi_e)$ model ARRAY-C 60035-4Р

значению сигнала зависимость $w(\Phi_e)$ КФЭУ модели ARRAY-C 60035-4Р.

Анализ зависимости $w(\Phi_e)$ КФЭУ модели ARRAY-C 60035-4Р (рис. 3) показал, что динамический диапазон линейной энергетической характеристики исследуемого КФЭУ лежит в интервале значений потока оптического излучения Φ_e источника от 0,1 до 2,0 мВт с погрешностью линейности не более 2%, что позволит обеспечить регистрацию оптического излучения, производимого СК CsI(Tl) при регистрации γ -излучения, в заявленном диапазоне от 60 до 3000 кэВ.

СОПРЯЖЕНИЕ СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО КРИСТАЛЛА С КРЕМНИЕВЫМ ФОТОЭЛЕКТРОННЫМ УМНОЖИТЕЛЕМ

Сопряжение СК и КФЭУ возможно двумя способами — непосредственным контактом кристалла и фоточувствительной площадки КФЭУ (рис. 4а) или с помощью ОСС, которая выполняется в форме призмы, усеченного конуса, цилиндра или параллелепипеда [9]. Реже функцию ОСС выполняет волоконный оптический световод.

Включение ОСС в состав ОЭПГИ позволяет решить две задачи. Во-первых, при отличии формы или размеров выходного окна СК от формы или размеров входного окна КФЭУ

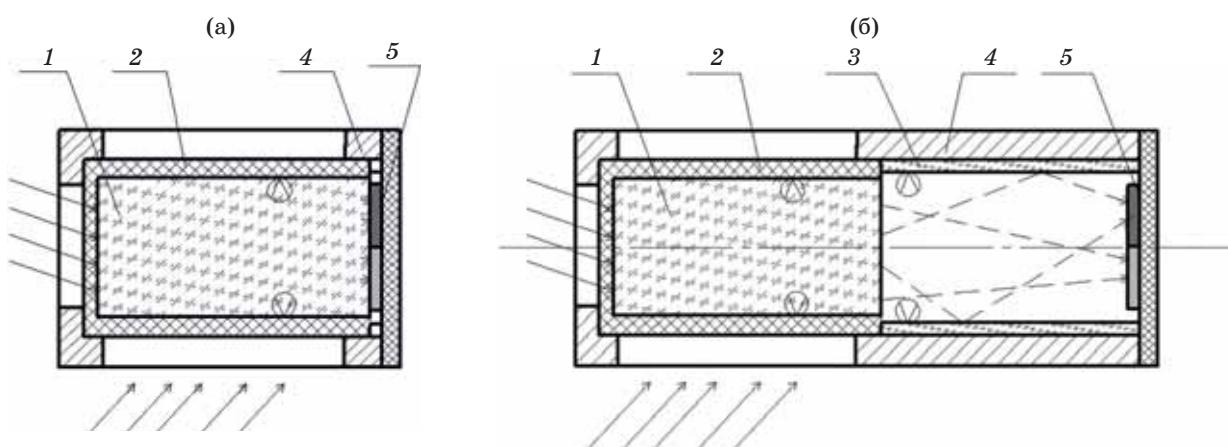


Рис. 4. Конструкции блока первичных преобразований без оптической системы сопряжения (а) и с оптической системой сопряжения формы прямоугольного параллелепипеда (б). 1 — сцинтилляционный кристалл, 2 — рассеиватель, 3 — оптическая система сопряжения, 4 — корпус блока первичных преобразований, 5 — кремниевый фотоэлектронный умножитель

Fig. 4. Designs of the primary conversion unit (a) without an optical matching system and (b) with an optical matching system of the shape of a rectangular parallelepiped. (1) Scintillation crystal, (2) scatterer, (3) optical matching system, (4) housing of the primary conversion unit, (5) silicon photomultiplier

целесообразно обеспечить геометрическое согласование окон с целью уменьшения потерь излучения оптического диапазона. Во-вторых, так как КФЭУ представляет собой упорядоченный набор лавинных фотодиодов (микроячеек), после регистрации фотона микроячейка становится нечувствительной на время восстановления, которое составляет около $1,5 \times 10^{-7}$ с. При попадании двух и более фотонов на одну микроячейку в промежуток времени, равный времени восстановления, сигнал с микроячейки будет свидетельствовать о регистрации только одного фотона. Описанный эффект приводит к потерям полезного сигнала в цикле работы КФЭУ и всего ОЭПГИ. Равномерная облученность в плоскости регистрации КФЭУ позволяет минимизировать вероятность попадания двух и более фотонов на одну микроячейку в течение времени восстановления, а следовательно, уменьшить вероятность пропуска фотонов.

В случае непосредственнойстыковки сцинтиллятора и КФЭУ БПП имеет вид, представленный на рис. 4а. Если ОСС является полым световодом с квадратным сечением, состоящим из зеркал прямоугольной формы, БПП может иметь вид, представленный на рис. 4б.

Работу ОСС предложено оценивать по равномерности распределения излучения в плоскости регистрации КФЭУ. Разработанная методика оценки ее работы основана на результатах анализа компьютерной модели БПП с применением в качестве ОСС световодов различных конфигураций. Компьютерная модель позволяет выполнить трассировку лучей в среде ZEMAX [15] от сцинтилляционных центров с равновероятными координатами возникновения сцинтилляций внутри кристалла и равновероятным направлением распространения оптического излучения по всем направлениям к плоскости регистрации КФЭУ.

В процессе моделирования были исследованы три варианта БПП: без ОСС, с полой ОСС в виде зеркального параллелепипеда со сторонами $14 \times 14 \times 22$ мм и с ОСС в виде полого зеркального цилиндра с размерами полости $\varnothing 19,8 \times 22$ мм.

Результаты моделирования показали, что с точки зрения равномерности распределения оптического сигнала, исходящего от кристалла размером $14 \times 14 \times 22$ мм, на плоскости регистрации КФЭУ форматом 2×2 площадки,

размер каждой из которых 6×6 мм, оптимальным вариантом является световод в виде прямоугольного параллелепипеда размером $14 \times 14 \times 22$ мм.

ОПИСАНИЕ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

По результатам исследований была реализована физическая модель ОЭПГИ. Сцинтилляционный кристалл CsI(Tl) (рис. 5) имеет форму параллелепипеда со сторонами $14 \times 14 \times 28$ мм. Его размер обусловлен значением радиационной длины CsI(Tl). Для улучшения отражающих свойств поверхностей кристаллов на грани наносятся зеркальные или диффузные покрытия. Пять граней кристалла физической модели ОЭПГИ были упакованы в тefлоновую ленту [16]. Шестая грань выполняет функцию выходного окна для оптического излучения. Корпус позволяет устанавливать между кристаллом и КФЭУ различные согласующие оптические системы. Модель КФЭУ ARRAYC-60035-4P-BGA состоит из четырех отдельных площадок, выполненных на общей

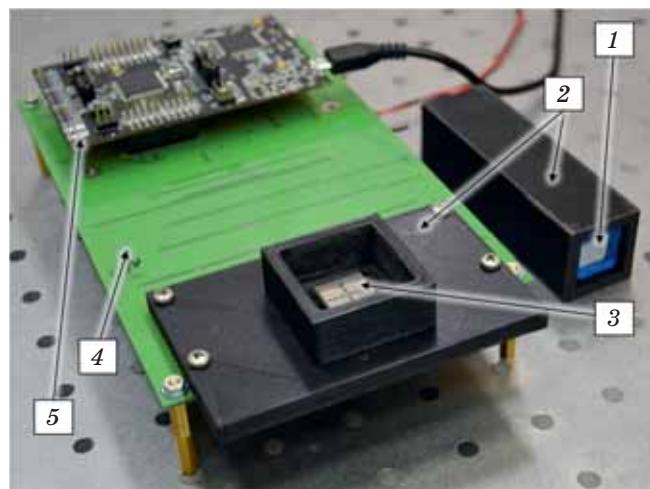


Рис. 5. Общий вид физической модели ОЭПГИ. 1 — СК CsI(Tl), 2 — непрозрачный пластмассовый корпус, 3 — КФЭУ, 4 — плата аналоговых преобразований сигнала КФЭУ, 5 — плата обработки сигнала

Fig. 5. General view of the physical model of the optical-electronic converter of gamma radiation. (1) Scintillation crystal CsI(Tl), (2) opaque plastic case, (3) silicon photomultiplier, (4) analog signal conversion board, (5) signal processing board

подложке, сигнал с каждой из которых считывается и обрабатывается независимыми электрическими трактами, развернутыми на плате.

В рамках эксперимента исследованы следующие конфигурации БПП:

– БПП без ОСС, в котором выходное окно СК находится в непосредственном контакте с КФЭУ (рис. 4а),

– БПП имеет ОСС, изготовленную из попарно параллельных зеркальных пластин с наружным отражающим покрытием 4270AG MIRO-SILVER 27 *High Specular* (коэффициент отражения от поверхности не менее 98%) и имеющую длину 22 мм (рис. 4б),

– БПП имеет ОСС, повторяющую геометрические размеры и форму второй конфигурации ОСС (рис. 4б), но с диффузно отражающим покрытием поверхностей MIRO-SILVER 85/8510 AG (коэффициент отражения от поверхности не менее 97%).

В состав микроконтроллера входит 14-битный АЦП, который формирует выходной сигнал D_{ADC} , пропорциональный количеству сцинтилляционных фотонов, зарегистрированных КФЭУ. Для указанного микроконтроллера значение информативного сигнала D_{ADC} соответствует

$$D_{ADC} = 1024V_{in} / V_{ref}, \quad (3)$$

где V_{in} — напряжение, поданное на вход АЦП, V_{ref} — опорное напряжение АЦП.

Сформировано программное обеспечение ОЭПГИ, которое управляет сбором измерительной информации и формирует файл с результатами измерений для каждой из четырех площадок.

ОПИСАНИЕ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Для оценки параметров и характеристик разработанной и изготовленной физической модели проводился широкий цикл испытаний, из которых особый интерес представляют исследования энергетического разрешения ОЭПГИ и линейности его передаточной характеристики, так как эти параметры позволяют провести сравнительную оценку относительной разрешающей способности других γ -спектрометрических средств.

Исследования разрешающей способности и передаточной характеристики ОЭПГИ проводились на стенде, в качестве эталонных источников γ -излучения которого используются источники ионизирующего излучения ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{60}Co (рис. 6).

Энергетический спектр ионизирующего излучения $\Phi(E)$ является функцией распределения γ -квантов по уровням энергии, попадающим в интервал между E и $E + \Delta E$. Диапазону энергий ионизирующего излучения от 0 до E_{max} соответствуют энергетические каналы с номерами от 1 до n_{max} , поэтому спектр можно представить зависимостью $K(n)$. Указанные величины связаны линейной зависимостью

$$n_{max} = E_{max} / 1024. \quad (4)$$

Измерялись энергетические спектры не только эталонных источников, но и нормального фонового излучения, что использовано при вычислении энергетической разрешающей способности физической модели ОЭПГИ. Продолжительность регистрации каждого энергетического спектра составляла 5 мин.

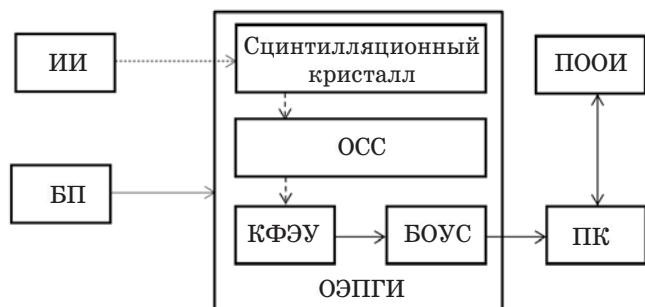


Рис. 6. Структурная схема стенда исследования физической модели ОЭПГИ. ИИ — источник ионизирующего излучения, БП — блок питания, ОЭПГИ — оптоэлектронный преобразователь гамма-излучения, ОСС — оптическая система сопряжения, КФЭУ — кремниевый фотоэлектронный умножитель, БУОС — блок управления и обработки сигнала, ПК — персональный компьютер, ПООИ — программное обеспечение обработки информации GNU Octave

Fig. 6. Block diagram of the stand for research of the optical-electronic converter of gamma radiation. ИИ is source of ionizing radiation, БП is power unit, ОЭПГИ is optoelectronic converter of gamma radiation, ОСС is optical matching system, КФЭУ is silicon photomultiplier, БУОС is control and signal processing unit, ПК is personal computer, ПООИ is information processing software GNU Octave

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Определение линейности передаточной характеристики $n(E)$ ОЭПГИ осуществлялось для каждой конфигурации БПП с различными ОСС по результатам регистрации энергетических спектров эталонных источников ионизирующего излучения ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{152}Eu (рис. 7). В ходе эксперимента было проведено 9 серий измерений для каждой ОСС с каждым источником γ -излучения. На энергетическом спектре ^{137}Cs различим пик полного рассеяния с энергией 661,7 кэВ. На энергетическом спектре ^{60}Co различимы пики энергий 1173,2 и 1332,5 кэВ. На энергетическом спектре ^{152}Eu различимы пики 122, 245, 344, 779, 964, 1112 и 1408 кэВ.

На основании полученных данных построены передаточные характеристики $n(E)$ ОЭПГИ с БПП каждой из исследованных конфигураций. Качество энергетического спектра оценивается интегральной нелинейностью l , которая определяется как

$$l = \Delta n_{\max} / n_{\max}, \quad (5)$$



Рис. 7. Энергетические спектры эталонных источников ионизирующего излучения ^{137}Cs (1), ^{60}Co (2) и ^{152}Eu (3), полученные блоком первичных преобразований с диффузной оптической системой сопряжения. Левая ось ординат на графике — для кривых 1 и 2. Правая ось ординат на графике — для кривой 3

Fig. 7. Energy spectra of reference sources of ionizing radiation (1) ^{137}Cs , (2) ^{60}Co , and (3) ^{152}Eu , obtained by a primary conversion unit with a diffuse optical interface system. The left y -axis on the graph is for curves (1) and (2). The right y -axis is for curve (3)

где n_{\max} — максимальный номер канала, Δn_{\max} — максимальное отклонение реальной кривой от прямой. Значения Δn_{\max} составили: 4,2 — БПП без ОСС, 5,5 — БПП с зеркальной ОСС и 1,87 — БПП с диффузной ОСС.

Установлено, что в диапазоне энергий от 122 до 1408 кэВ интегральная нелинейность передаточной характеристики l конфигураций физической модели ОЭПГИ составляет

— без ОСС $\rightarrow l = 0,008$ при $\Delta n_{\max} = 4,17$ и $n_{\max} = 540$ каналов,

— с ОСС длиной 22 мм с зеркальным покрытием $\rightarrow l = 0,016$ при $\Delta n_{\max} = 5,47$ и $n_{\max} = 349$ каналов,

— с ОСС длиной 22 мм с диффузным покрытием $\rightarrow l = 0,006$ при $\Delta n_{\max} = 1,87$ и $n_{\max} = 318$ каналов.

При экстраполяции передаточной характеристики ОЭПГИ в случае конфигурации физической модели без ОСС максимальное значение диапазона энергетической характеристики будет ограничено 2680 кэВ при использовании матрицы КФЭУ ARRAY-C 60035-4Р с числом ячеек 76×10^3 . При использовании ОСС в физической модели других конфигураций ОЭПГИ максимальное значение диапазона энергетической характеристики соответствует заявленному значению 3000 кэВ.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

Оценка относительного энергетического разрешения η при энергии ионизирующего излучения E определяется выражением

$$\eta = (\Delta E / E)100\%, \quad (6)$$

где ΔE — абсолютное энергетическое разрешение, численно равное ширине соответствующего пика энергии E на половине высоты (эВ).

На энергетическое разрешение оказывают влияние следующие факторы. Во-первых, собственное энергетическое разрешение СК R_{sci} . В случае сцинтилляционного материала $\text{CsI}(\text{TI})$ собственное разрешение, обусловленное флуктуациями при преобразовании ионизирующего излучения в излучение оптического диапазона, $R_{\text{sci}} = 4,9\%$ [17]. Во-вторых, флуктуации при транспортировке и регистрации оптиче-

ского излучения R_{lid} . В-третьих, R_{noise} — шумы КФЭУ и электрического тракта обработки сигнала КФЭУ. Минимальный шумовой вклад КФЭУ, согласно [18], можно достичь за счет охлаждения КФЭУ до температуры 250 К, тогда он составит 1,6% по пику ^{137}Cs . Энергетическое разрешение БПП рассчитывается как [18]

$$\Delta E / E = \sqrt{R_{\text{sci}}^2 + R_{\text{lid}}^2 + R_{\text{noise}}^2}. \quad (7)$$

Таким образом, из трех факторов, оказывающих влияние на общее значение энергетического разрешения физической модели ОЭПГИ, в рамках исследования необходимо оценить вклад составляющей R_{lid} .

Для получения спектра ионизирующего излучения был использован эталонный источник ^{137}Cs с энергией пика полного рассеяния 661,7 кэВ. Полученные в результате экспериментов оценки относительного энергетического разрешения η физической модели ОЭПГИ с различными конфигурациями ОСС находятся в диапазоне от 11,4 до 13,3%. Значения η исследованных конфигураций БПП варьируются незначительно, однако лучшим энергетическим разрешением обладает преобразователь без ОСС (рис. 8).

Таким образом, показано, что основной вклад в энергетическое разрешение физиче-

ской модели ОЭПГИ вносят статистические флуктуации при регистрации оптического излучения R_{lid} , которые составляют около 9,8% в случае ОСС без световода, около 10,6% в случае ОСС длиной 22 мм с зеркальным покрытием и примерно 12,0% — ОСС длиной 22 мм с диффузным покрытием.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПОТОКА В ПЛОСКОСТИ РЕГИСТРАЦИИ КРЕМНИЕВОГО ФОТОЭЛЕКТРОННОГО УМНОЖИТЕЛЯ

Оценка вклада R_{lid} в энергетическое разрешение ОЭПГИ описывается формулой [18]

$$R_{\text{lid}}^2 = 2,35^2 (1 + \varepsilon) / N_{\text{phe}} = \\ = 2,35^2 (1 + \varepsilon) / [n_{h\nu} E (1 - \tau) (1 - r)], \quad (8)$$

где ε — относительная дисперсия коэффициента усиления КФЭУ, E — энергия γ -кванта, $N_{\text{phe}} = n_{h\nu} E (1 - \tau) (1 - r)$ — количество сработавших микроячеек, τ — коэффициент потерь при транспортировке излучения от центра сцинтилляций до чувствительной площадки КФЭУ (τ) и при регистрации фотонов в КФЭУ (r).

Влияние на флуктуации сигнала при регистрации фотонов оказывают относительная дисперсия коэффициента усиления КФЭУ (ε), технический световой выход $n_{h\nu}$, коэффициенты потерь при транспортировке излучения от центра сцинтилляций до чувствительной площадки КФЭУ (τ) и при регистрации фотонов в КФЭУ (r).

Для уменьшения R_{lid} необходимо соблюдать условия, обеспечивающие минимальный вклад в значение погрешности каждого из этапов преобразования сигнала. Для уменьшения влияния дисперсии коэффициента усиления КФЭУ на энергетическое разрешение ОЭПГИ η к КФЭУ должно быть приложено напряжение, превышающее напряжение пробоя, с учетом не только максимального коэффициента умножения заряда, но и минимальной погрешности данного коэффициента. Кроме того, должны быть обеспечены условия с минимальным сторонним тепловым воздействием и/или система теплоотвода. Для увеличения эффективности вывода излучения из кристалла, а следовательно, увеличения коэф-

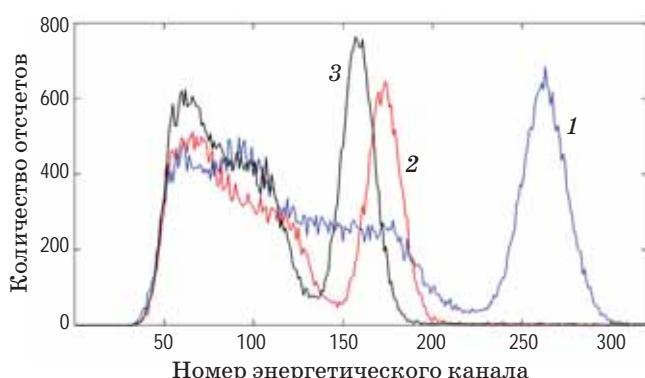


Рис. 8. Энергетический спектр эталонного источника ^{137}Cs , полученный с помощью физической модели ОЭПГИ в конфигурациях без ОСС (1), с ОСС с зеркальным покрытием (2), с ОСС с диффузным покрытием (3)

Fig. 8. Energy spectrum of the ^{137}Cs reference source obtained using an optical-electronic gamma-ray converter of configurations (1) without optical matching system, (2) with optical matching system with a mirror coating, (3) with optical matching system with a diffuse coating

Таблица 2. Результаты оценок равномерности распределения оптического излучения
Table 2. Results of the uniformity of optical radiation distribution estimates

Параметр	Тракт 1	Тракт 2	Тракт 3	Тракт 4	Среднее значение
БПП без ОСС, $n = 267$, $K(n) = 685$					
Среднее значение сигнала	4395	4324	3951	4192	—
СКО	513	534	544	513	—
СКО относительное, %	11,9	13,5	13,0	11,9	12,6
БПП с зеркальным покрытием ОСС, $n = 173$, $K(n) = 637$					
Среднее значение сигнала	2877	2870	2617	2738	—
СКО	236	212	214	236	—
СКО относительное, %	8,2	8,1	7,8	8,2	8,0
БПП с диффузным покрытием ОСС, $n = 157$, $K(n) = 764$					
Среднее значение сигнала	2629	2551	2417	2481	—
СКО	240	201	206	240	—
СКО относительное, %	9,4	8,3	8,3	9,4	8,5

фициента τ , применяют упаковку кристалла в непрозрачную белую рассеивающую ленту.

Для уменьшения потерь фотонов при регистрации оптического излучения КФЭУ, а значит, для увеличения коэффициента r необходимо обеспечить равномерное распределение облученности по площадке КФЭУ.

Исходными массивами данных для анализа равномерности распределения оптического потока излучения в плоскости регистрации являются значения D_{ADC} для каждой из четырех площадок КФЭУ, по которым определялись энергетические спектры ОЭПГИ каждой конфигурации ОСС аналогично методу, примененному при компьютерном моделировании [15].

Расчет среднего значения сигнала \bar{x} проводился для каждого из электрических трактов площадок КФЭУ, в то время как значения относительного среднеквадратического отклонения (СКО) сигнала δ_{rel} , снимаемого с каждой из площадок КФЭУ в составе БПП, определялись выражениями

$$\bar{x} = \sum D_{ADC} / K(n),$$

$$\delta = \sqrt{\sum (D_{ADC} - \bar{x})^2 / K(n)}, \quad (9)$$

$$\delta_{rel} = (\delta / \bar{x}) 100\%,$$

где D_{ADC} — выходной сигнал ОЭПГИ, $K(n)$ — число регистраций в канале n , δ — СКО сиг-

нала, снимаемого с одной площадки КФЭУ, δ_{rel} — относительное значение СКО.

Результаты оценок равномерности распределения облученности в плоскости регистрации для каждого электрического тракта в случае применения 14-разрядного АЦП, соответствующие энергии пика полного рассеяния эталонного источника ^{137}Cs , приведены в табл. 2.

Сравнительный анализ результатов проведенного эксперимента для трех конфигураций ОСС с результатами, полученными ранее в ходе компьютерного моделирования [15], показал эффективность использования ОСС для увеличения равномерности облученности в плоскости регистрации.

Среднее значение относительного СКО сигналов, полученных на выходе четырех электрических трактов, рассчитано для узкой полосы энергий ионизирующего излучения, соответствующей ширине энергетического канала вокруг пика полного рассеяния излучения ^{137}Cs . Из сравнения значений СКО трех конфигураций ОСС ОЭПГИ видно, что минимальное значение относительного СКО (8%) получено в случае ОЭПГИ с зеркальной ОСС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы предложена структура оптико-электронного преобразователя γ -излучения, который позволяет

регистрировать энергетические спектры γ -излучения в двукратно увеличенном диапазоне линейности передаточной характеристики и с улучшенным не менее чем на 11% относительным энергетическим разрешением по пику энергии 662 кэВ эталонного источника ^{137}Cs за счет введения ОСС в виде прямоугольного параллелепипеда с внутренними зеркальными поверхностями и КФЭУ. Преобразователь предназначен для персонального использования и работы в составе распределенных систем радиационного контроля.

Разработана методика выбора размеров оптической системы сопряжения сцинтилляционного кристалла и кремниевого фотоэлектронного умножителя, а также вида и параметров ее отражающих поверхностей при проектировании ОЭПГИ по критерию уменьшения СКО сигнала на каждой из площадок КФЭУ. Она позволяет увеличить диапазон линейности пре-

даточной характеристики ОЭПГИ до 35 дБ при интегральной нелинейности передаточной характеристики не более 1% за счет повышения равномерности облученности фотоумножителя и уменьшения вероятности пропуска фотонов, поступающих на микроячейку КФЭУ во время восстановления ее чувствительности.

Разработан алгоритм оценки вклада потерь сигнала от фотонов, поступающих на микроячейку КФЭУ во время восстановления ее чувствительности, в линейность передаточной характеристики и относительное энергетическое разрешение ОЭПГИ при экспериментальных исследованиях равномерности распределения облученности, что позволяет обеспечить оценку неравномерности распределения облученности с погрешностью не более 1% за счет оценки разности СКО сигналов с каждой из площадок КФЭУ после каждого сцинтилляционного события.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев А.В., Липовский Д.Д., Денисеня Ю.А. Необходимость создания систем непрерывного мониторинга для обеспечения радиационной безопасности // АНРИ. 2009. № 2. С. 68–71.
2. Ullo S.L., Sinha G.R. Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors // Sensors. 2020. V. 20. № 11. P. 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>
3. Репин Л.В., Библин А.М., Ковалев П.Г. и др. Автоматизированная система контроля радиационного воздействия Роспотребнадзора: История создания, назначение и развитие // Радиационная гигиена. 2014. Т. 7. № 3. С. 44–53.
4. Вуколов А.В., Гоголев А.С., Черепенников Ю.М. и др. Портативный гамма-спектрометр // Изв. вузов. Физика. 2016. Т. 57. № 11-2. С. 270–274.
5. Никишkin Т.Г. Разработка модели портативного сцинтилляционного детектора гамма-излучения на основе твердотельных микропиксельных лавинных фотодиодов // Изв. вузов. Физика. 2021. Т. 64. № 2-2 (759). С. 73–77.
6. Grodzicka V., Moszyński M., Szczęśniak T., et al. Energy resolution of small scintillation detectors with SiPM light readout // J. Instrument. 2013. V. 8. № 2. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/P02017>
7. Huang T., Fu O., Lin S., et al. NaI(Tl) scintillator read out with SiPM array for gamma spectrometer // J. NIMA. 2017. V. 851. P. 118–124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.068>
8. Becker E.M. The MiniSpec: A low-cost, compact, FPGA-based gamma spectrometer for mobile applications // Master Thesis. Oregon State University, 2013. 100 p.
9. Chankyu K., Hyoungtaek K., Jongyul K., et al. Replacement of a photomultiplier tube in a 2-inch thallium-doped sodium iodide gamma spectrometer with silicon photomultipliers and a light guide // J. NET. 2015. V. 47. № 4. P. 479–487. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.02.001>
10. Jamil M.S., Jamil M.A., Mazhar A., et al. Smart environment monitoring system by employing wireless

REFERENCES

1. Vasiliev A., Lipovskiy D., Denisenya Y. Necessity of creating continuous monitoring systems to ensure radiation safety [in Russian] // ANRI. 2009. № 2. P. 68–71.
2. Ullo S.L., Sinha G.R. Advances in smart environment monitoring systems using IoT and sensors // Sensors. 2020. V. 20. № 11. P. 3113. <https://doi.org/10.3390/s20113113>
3. Repin L.V., Biblin A.M., Kovalev P.G., et al. The automated system of radiation exposure control (ASCRE) for rospotrebnadzor: Creation history, applicability and development [in Russian] // Radiation Hygiene. 2014. V. 7. № 3. P. 44–53.
4. Vukolov A.V., Gogolev A.S., Cherepennikov Y.M., et al. Portable gamma spectrometer [in Russian] // Izv. Universities. Physics. 2016. V. 57. № 11-2. P. 270–274.
5. Nikishkin T.G. Development of a model of a portable scintillation detector of gamma radiation based on solid-state micropixel avalanche photodiodes [in Russian] // Izv. Universities. Physics. 2021. V. 64. № 2-2 (759). P. 73–77.
6. Grodzicka V., Moszyński M., Szczęśniak T., et al. Energy resolution of small scintillation detectors with SiPM light readout // J. Instrument. 2013. V. 8. № 2. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/8/02/P02017>
7. Huang T., Fu O., Lin S., et al. NaI(Tl) scintillator read out with SiPM array for gamma spectrometer // J. NIMA. 2017. V. 851. P. 118–124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.068>
8. Becker E. M. The MiniSpec: A low-cost, compact, FPGA-based gamma spectrometer for mobile applications // Master Thesis. Oregon State University, 2013. 100 p.
9. Chankyu K., Hyoungtaek K., Jongyul K., et al. Replacement of a photomultiplier tube in a 2-inch thallium-doped sodium iodide gamma spectrometer with silicon photomultipliers and a light guide // J. NET. 2015. V. 47. № 4. P. 479–487. <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.02.001>
10. Jamil M.S., Jamil M.A., Mazhar A., et al. Smart environment monitoring system by employing wireless

- sensor networks on vehicles for pollution free smart cities // Pro. Eng. 2015. V. 107. P. 480–484. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.106>
11. Becker E., Farsoni A., Alhawsawi A., et al. Small prototype gamma spectrometer using CsI(Tl) scintillator coupled to a solid-state photomultiplier // IEEE TNS. 2013. V. 60.2. P. 968–972. <https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2228236>
12. Grodzicka-Kobylka M., Szczesniak T., Moszyński M. Comparison of SensL and Hamamatsu 4×4 channel SiPM arrays in gamma spectrometry with scintillators // J. NIMA. 2017. V. 856. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.03.015>
13. Ишанин Г.Г., Челибанов В.П. Приемники оптического излучения / под ред. профессора Коротаева В.В. СПб.: изд. «Лань», 2014. 304 с. (Учебники для вузов. Специальная литература). ISBN 978-5-8114-1048-4
14. Голашвили Т.В., Чечев В.П., Лбов А.А. и др. Справочник нуклидов-2, Изд. 2-е, дополн. и переработ. / Под ред. Михайлова В.Н. М.: ФГУП «ЦНИИатоминформ», 2002. 348 с. ISBN-87911-077-X
15. Romanova G., Radilov A., Denisov V., et al. Simulation and research of the gamma-ray detectors based on the CsI crystals and silicon photomultipliers // Proc. SPIE 10231, Optical Sensors. 2017. 102311 G. <https://doi.org/10.1117/12.2264921>
16. McElroy D., Sung-Cheng H., Hoffman E. The use of retro-reflective tape for improving spatial resolution of scintillation detectors // IEEE TNS. 2002. V. 49. № 1. P. 165–171. <https://doi.org/10.1109/TNS.2002.998746>
17. Акимов Ю.К. Детекторы ядерных излучений на основе неорганических сцинтилляторов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1994. Т. 25. № 1. С. 229–284.
18. Shah K., Glodo J., Klugerman M., et al. High energy resolution scintillation spectrometers // IEEE TNS. 2004. V. 51. № 5. P. 2395–2399. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.832616>
- sensor networks on vehicles for pollution free smart cities // Pro. Eng. 2015. V. 107. P. 480–484. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.06.106>
11. Becker E., Farsoni A., Alhawsawi A., et al. Small prototype gamma spectrometer using CsI(Tl) scintillator coupled to a solid-state photomultiplier // IEEE TNS. 2013. V. 60.2. P. 968–972. <https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2228236>
12. Grodzicka-Kobylka M., Szczesniak T., Moszyński M. Comparison of SensL and Hamamatsu 4×4 channel SiPM arrays in gamma spectrometry with scintillators // J. NIMA. 2017. V. 856. P. 53–64. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2017.03.015>
13. Ishanin G.G., Chelibanov V.P. Optical photo receivers [in Russian] / Ed. by Professor Korotaev V.V. St. Petersburg: Publishing house "Lan", 2014. 304 p. (Textbooks for universities. Special literature). ISBN 978-5-8114-1048-4
14. Golashvili T.V., Chechov V.P., Lbov A.A., et al. Handbook of Nuclides-2, Ed. 2nd, add. and reworked [in Russian] / Ed. by Mikhailov V.N. Moscow: FSUE "CNI-Iatominform" Publ., 2002. 348 p. ISBN-87911-077-X
15. Romanova G., Radilov A., Denisov V., et al. Simulation and research of the gamma-ray detectors based on the CsI crystals and silicon photomultipliers // Proc. SPIE 10231, Optical Sensors. 2017. 102311 G. <https://doi.org/10.1117/12.2264921>
16. McElroy D., Sung-Cheng H., Hoffman E. The use of retro-reflective tape for improving spatial resolution of scintillation detectors // IEEE TNS. 2002. V. 49. № 1. P. 165–171. <https://doi.org/10.1109/TNS.2002.998746>
17. Akimov Y. Nuclear radiation detectors based on inorganic scintillators [in Russian] // Phys. of Elem. Part. and A. N. 1994. V. 25. № 1. P. 229–284.
18. Shah K., Glodo J., Klugerman M., et al. High energy resolution scintillation spectrometers // IEEE TNS. 2004. V. 51. № 5. P. 2395–2399. <https://doi.org/10.1109/TNS.2004.832616>

АВТОРЫ

Илья Олегович Бокатый — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; <https://orcid.org/0000-0002-0983-8745>, bokatyi.ilia@bk.ru

Валерий Викторович Коротаев — доктор технических наук, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID: 6603855670, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>, korotaev_v_v@mail.ru

Галина Эдуардовна Романова — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия, Scopus ID: 8215289000, <https://orcid.org/0000-0001-9348-8540>, romanova_g_e@mail.ru

Александр Николаевич Тимофеев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия; Scopus ID 57189271286; <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>; timofeev@itmo.ru

Виктория Александровна Рыжова — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Россия, Scopus ID: 57195127229, <https://orcid.org/0000-0002-2682-8311>, victoria_ryz@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 10.04.2023
Одобрена после рецензирования 16.05.2023
Принята к печати 29.05.2023

AUTHORS

Ilya O. Bokatyi — PhD Student, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-0983-8745>, bokatyi.ilia@bk.ru

Valery V. Korotaev — Dr. Sci., Professor, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 6603855670, <https://orcid.org/0000-0001-7102-5967>, korotaev_v_v@mail.ru

Galina E. Romanova — PhD, Associate Professor, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 8215289000, <https://orcid.org/0000-0001-9348-8540>, romanova_g_e@mail.ru

Alexander N. Timofeev — PhD, Senior Researcher, Lead Engineer, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID 57189271286; <https://orcid.org/0000-0002-7344-9832>; timofeev@itmo.ru

Victoria A. Ryzhova — PhD, Associate Professor, ITMO University, St. Petersburg, 197101, Russia; Scopus ID: 57195127229, <https://orcid.org/0000-0002-2682-8311>, victoria_ryz@itmo.ru

The article was submitted to the editorial office 10.04.2023
Approved after review 16.05.2023
Accepted for publication 29.05.2023