

УДК 539.1.07+539.1.074.3

СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ ГАЛЛИЙ-ГАДОЛИНИЕВОГО ГРАНАТА Ce:GAGG

Д. Ю. КОЗЛОВ¹⁾, М. В. КОРЖИК¹⁾, А. С. ЛОБКО^{1), 2)},
А. А. ФЕДОРОВ¹⁾, В. А. МЕЧИНСКИЙ¹⁾, В. В. БОГОМОЛОВ^{3), 4)},
А. Ф. ИЮДИН³⁾, С. И. СВЕРТИЛОВ^{3), 4)}, И. В. ЯШИН³⁾

¹⁾Научно-исследовательский институт ядерных проблем

Белорусского государственного университета, ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

³⁾Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына

Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова,

ул. Ленинские горы, 1, строение 2, 119991, г. Москва, Россия

⁴⁾Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

ул. Ленинские горы, 1, строение 2, 119234, г. Москва, Россия

Рассмотрены результаты измерений энергетического разрешения перспективного сцинтилляционного кристалла Ce:GAGG, выращенного в Научно-исследовательском институте ядерных проблем Белорусского государственного университета. Исследования проводились в диапазоне энергий регистрируемых гамма-квантов

Образец цитирования:

Козлов ДЮ, Коржик МВ, Лобко АС, Федоров АА, Мечинский ВА, Богомолов ВВ, Июдин АФ, Свертилов СИ, Яшин ИВ. Спектрометрические характеристики перспективных детекторов на основе кристаллов галлий-гадолиниевого граната Ce:GAGG. Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2019;2:26–35.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-26-35>

For citation:

Kozlov DYu, Korjik MV, Lobko AS, Fedorov AA, Mechin-sky VA, Bogomolov VV, Iyudin AF, Svertilov SI, Yashin IV. Spectroscopic parameters of advanced detectors based on gallium germanium garnet Ce:GAGG. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2019;2:26–35. Russian.
<https://doi.org/10.33581/2520-2243-2019-2-26-35>

Авторы:

Дмитрий Юрьевич Козлов – научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики высоких энергий.

Михаил Васильевич Коржик – доктор физико-математических наук; заведующий лабораторией экспериментальной физики высоких энергий.

Александр Сергеевич Лобко – доктор физико-математических наук, профессор; заведующий лабораторией ядерной спектроскопии и экспертизы радиационной безопасности¹⁾, профессор кафедры ядерной физики физического факультета²⁾.

Андрей Анатольевич Федоров – старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики высоких энергий.

Виталий Александрович Мечинский – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной физики высоких энергий.

Виталий Владимирович Богомолов – кандидат физико-математических наук; старший научный сотрудник лаборатории космической рентгеновской и гамма-астрономии³⁾, преподаватель кафедры физики космоса физического факультета⁴⁾.

Анатолий Федорович Июдин – доктор физико-математических наук; заведующий лабораторией космической рентгеновской и гамма-астрономии.

Сергей Игоревич Свертилов – доктор физико-математических наук, профессор; ведущий научный сотрудник лаборатории космической рентгеновской и гамма-астрономии³⁾, профессор кафедры физики космоса физического факультета⁴⁾.

Иван Васильевич Яшин – кандидат физико-математических наук; ведущий научный сотрудник лаборатории космической рентгеновской и гамма-астрономии.

Authors:

Dmitry Yu. Kozlov, researcher at the laboratory of experimental high energy physics.

kodmur@ya.ru

Mikhail V. Korjik, doctor of science (physics and mathematics); head of the laboratory of experimental high energy physics.

mikhail.korjik@cern.ch

Alexandr S. Lobko, doctor of science (physics and mathematics), full professor; head of the laboratory of nuclear spectroscopy and radiation safety expertise^a, professor at the department of nuclear physics, faculty of physics^b.

lobko@inp.bsu.by

Andrey A. Fedorov, senior researcher at the laboratory of experimental high energy physics.

andrei.fedorov@cern.ch

Vitaly A. Mechin-sky, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the laboratory of experimental high energy physics.

vitaly.mechinsky@cern.ch

Vitaly V. Bogomolov, PhD (physics and mathematics); senior researcher at the X-ray and gamma space astronomy laboratory^c, lecturer at the department of space physics, faculty of physics^d.

bogovit@rambler.ru

Anatoly F. Iyudin, doctor of science (physics and mathematics); head of the X-ray and gamma space astronomy laboratory.

aiyudin@srd.sinp.msu.ru

Sergey I. Svertilov, doctor of science (physics and mathematics), full professor; leading researcher at the X-ray and gamma space astronomy laboratory^c, professor at the department of space physics, faculty of physics^d.

sis@coronas.ru

Ivan V. Yashin, PhD (physics and mathematics); leading researcher at the X-ray and gamma space astronomy laboratory.

ivn@eas.sinp.msu.ru

от 20 кэВ до 3 МэВ. Изучался образец прямоугольной формы размером $12 \times 12 \times 9$ мм. В качестве фотоприемников использовались фотоумножители Hamamatsu R3998-100-02, лавинный фотодиод S8664-1010 и кремниевые матрицы (SiPM) производства фирмы SensL. Энергетическое разрешение на линии ^{137}Cs (662 кэВ) составило порядка 7,5 %, что не уступает разрешению широко используемых сцинтилляторов NaI(Tl), CsI(Tl) аналогичного размера. С учетом того что кристаллы Ce:GAGG не гигроскопичны и по сравнению с NaI(Tl), CsI(Tl) характеризуются существенно более коротким временем высвечивания (~ 80 нс) и более высокой эффективностью, они представляются весьма перспективными для использования в гамма-спектрометрах и в качестве позиционно-разрешаемых элементов пространственно-чувствительных детекторов энергичных частиц и гамма-квантов.

Ключевые слова: сцинтиллятор; кристалл; детектор; изотоп; гамма-квант; импульс; энергетическое разрешение.

Благодарность. Работа выполнена с использованием финансирования по грантам Белорусского государственного фонда фундаментальных исследований № Ф18Р-029/1 и Российского фонда фундаментальных исследований № 18-52-00024.

SPECTROSCOPIC PARAMETERS OF ADVANCED DETECTORS BASED ON GALLIUM GERMANIUM GARNET Ce:GAGG

D. Yu. KOZLOV^a, M. V. KORJIK^a, A. S. LOBKO^{a, b},
A. A. FEDOROV^a, V. A. MECHINSKY^a, V. V. BOGOMOLOV^{c, d},
A. F. IYUDIN^c, S. I. SVERTILOV^{c, d}, I. V. YASHIN^c

^aResearch Institute for Nuclear Problems, Belarusian State University,
11 Babrujskaja Street, Minsk 220030, Belarus

^bBelarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus

^cSkobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University,
1 Leninskie Gory Street, building 2, Moscow 119991, Russia

^dLomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory Street, building 2, Moscow 119234, Russia

Corresponding author: D. Yu. Kozlov (kodmur@ya.ru)

The results of measurements of the energy resolution of advanced scintillation crystal Ce:GAGG grown in the Research Institute for Nuclear Problems of the Belarusian State University are considered. The measurements were carried out in the energy range of detected gamma quanta from 20 keV to 3 MeV. A rectangular sample with size of $12 \times 12 \times 9$ mm was studied. Photomultiplier Hamamatsu R3998-100-02, avalanche photodiode S8664-1010 and silicon matrices (SiPM) manufactured by SensL were used as photodetectors. The measured energy resolution on the ^{137}Cs line (662 keV) was about 7.5 %, which is not inferior to the resolution of the widely used NaI(Tl), CsI(Tl) scintillators of a similar size. Since Ce:GAGG crystals are not hygroscopic and compared to NaI(Tl), CsI(Tl) are characterized by a significantly shorter decay time (~ 80 ns), they seem very promising for use in gamma spectrometers and as position-resolvable elements of spatially sensitive detectors of energetic particles and gamma quanta.

Keywords: scintillator; crystal; detector; isotope; gamma quanta; pulse; energy resolution.

Acknowledgements. The work was supported by the grant No. Ф18Р-029/1 of Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and No. 18-52-00024 of Russian Foundation for Basic Research.

Введение

Дальнейший прогресс в исследовании астрофизических и атмосферных вспышек гамма-излучения возможен путем использования спектрометрической аппаратуры, обеспечивающей пространственную локализацию источника. Одним из наиболее перспективных направлений космической гамма-спектроскопии является разработка и создание детектирующих систем, обладающих позиционной и пространственной чувствительностью. Позиционно-чувствительные детекторы (ПЧД) позволяют локализовать место взаимодействия частицы или кванта и, соответственно, получать информацию о пространственных характеристиках регистрируемых потоков.

В настоящее время основные направления развития методики ПЧД для гамма-спектроскопии связаны с повышением эффективности регистрации излучений и точности их локализации, снижением порога обнаружения источника излучения, а также уменьшением энергопотребления, ослаблением искажающего влияния «мертвого времени» измерения аппаратуры, увеличением временной разрешающей способности.

Принимая во внимание все вышеизложенное, следует сделать вывод о необходимости создания нового поколения гамма-спектрометров высоких разрешения и чувствительности для исследования транзитных явлений на космических аппаратах, высотных аэростатах и в наземных экспериментах. Такие приборы обеспечат уникальную возможность измерять временные профили и спектры быстропротекающих высокоэнергетичных процессов, в том числе взрывного характера, с высоким временным и энергетическим разрешением, а также осуществлять локализацию источников таких процессов.

К детекторам гамма-квантов, обеспечивающим позиционное (пространственное) разрешение, так называемым пикселям, предъявляются особые требования: наряду с указанным разрешением они должны обладать высоким энергетическим и временным разрешением. В этом плане наилучшие характеристики, как известно, имеют полупроводниковые детекторы. Однако вследствие высокой стоимости и технических трудностей в эксплуатации (например, необходимость охлаждения) их применение в сложных детектирующих устройствах, в частности предназначенных для космических исследований, существенно ограничено. Поэтому все больший интерес представляет использование в качестве пикселей ПЧД новых перспективных неорганических сцинтилляторов на основе бромидов лантана и церия, а также галлий-гадолиниевых гранатов, которые по своему энергетическому разрешению приближаются к полупроводниковым детекторам на основе CeBr_3 .

Кристаллы $\text{Ce}:\text{GAGG}$, $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ и CeBr_3 обладают большими световым выходом $((4-6) \cdot 10^4$ фотон/МэВ) и плотностью ($5-7$ г/см³), а также быстроедействием и малым временем высвечивания ($20-80$ нс) [1–3]. Последнее позволяет реализовать повышенные точность временных измерений и пропускную способность измерительного тракта. Относительно высокая плотность указанных кристаллов обеспечивает эффективность регистрации гамма-квантов в широком диапазоне энергий [4; 5]. Благодаря большому световыходу сцинтилляционные кристаллы на основе бромидов лантана и церия, а также галлий-гадолиниевые гранаты дают высокое энергетическое разрешение.

В настоящей работе рассматриваются результаты измерения энергетического разрешения кристалла $\text{Ce}:\text{GAGG}$ прямоугольной формы размером $12 \times 12 \times 9$ мм, выращенного в Научно-исследовательском институте ядерных проблем Белорусского государственного университета.

Схема экспериментальной установки и методика измерений

Экспериментальная установка, использовавшаяся нами для измерений энергетического разрешения кристалла $\text{Ce}:\text{GAGG}$ (рис. 1), включает в себя собственно детекторный узел, состоящий из исследуемого сцинтилляционного кристалла и фотоприемника (ФЭУ Hamamatsu R3998-100-02, лавинный фотодиод (APD) Hamamatsu S8664-1010 и кремниевые матрицы (SiPM) производства фирмы *SensL*, Ирландия), помещенных в светоизолирующую коробку (на схеме не показана), источники питания и измерительную электронику, содержащую многоканальный анализатор (МКА) AmpTek MCA-8000A, а также зарядово-чувствительные усилители и формирователи, разработанные отдельно для каждого из применяемых фотоприемников. Кроме перечисленных устройств, в состав установки входили персональный компьютер, с помощью которого считывались и обрабатывались спектры, собираемые МКА, а также осциллограф Tektronix TDS3012B и генератор импульсов Tektronix AFG3102 для настройки электроники. Исследуемый кристалл широкой гранью устанавливался примерно в центр входного окна фотоприемника, который размещался в светоизолирующей коробке вертикально. При этом обеспечивался оптический контакт между выходным окном упаковки кристалла и входным окном фотоприемника с помощью специальной кремнийорганической смазки.

Для измерений с помощью ФЭУ применялась плата питания на основе высоковольтного DC/DC-конвертера Traco THV 12-1000N и предварительный усилитель на микросхемах AD8039, который обеспечивал интегрирование импульса с анода ФЭУ с постоянной времени ~ 500 нс. В случае лавинного фотодиода в качестве входного элемента был использован зарядово-чувствительный усилитель Cremat CR-110, после которого в цепь включался усилитель-формирователь Cremat CR-200 с постоянной времени 500 нс. На лавинный фотодиод подавалось смещение 380 В от стационарного источника стабилизированного напряжения. Для измерений с кремниевыми фотоумножителями (SiPM) применялась сборка AgayB-30035-144P из 144 пикселей размером 3×3 мм, объединенных в виде матриц 12×12 . Сигналы с этой матрицы снимались с помощью многоканального предусилителя AiT AB424T-ARRAYB144P, с которого поступали на сумматор, выполненный на операционном усилителе AD8039.

Во всех перечисленных выше случаях на выходе входного каскада усиления формировался импульс положительной полярности длительностью ~ 500 нс. Этот импульс поступал на вход многоканального

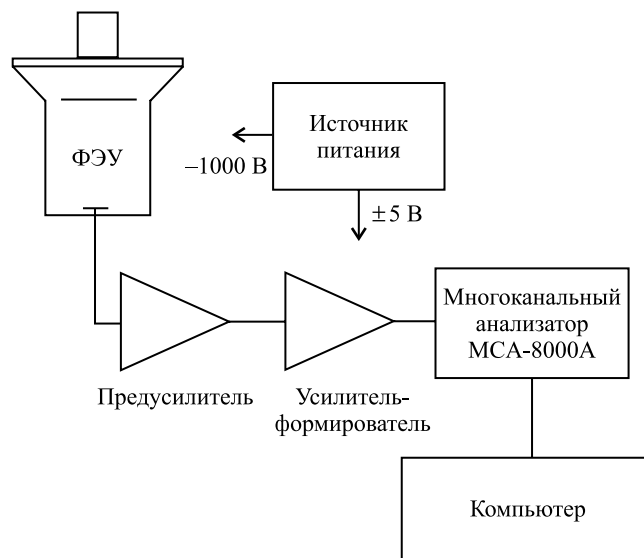


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения энергетического разрешения сцинтилляционных детекторов

Fig. 1. Scheme of an experimental setup for measuring the energy resolution of scintillation detector

анализатора MCA-8000A, соединенного с компьютером по интерфейсу RS-232. Набор спектров осуществлялся с помощью программного обеспечения *ADMCA*, входящего в комплект поставки МКА. Данная программа дает возможность как сбора данных и визуализации спектров, так и определения характеристик пиков на амплитудных спектрах, в том числе измерения их ширины на половине высоты (FWHM) путем вписывания кривой Гаусса методом наименьших квадратов.

Результаты измерений энергетического разрешения

С кристаллом Ce:GAGG проводились три серии измерений, в которых в качестве фотоприемника использовался фотоумножитель типа Hamamatsu R3998-100-02, лавинный фотодиод S8664-1010, а также кремниевые матрицы (SiPM) производства фирмы *SensL*. Для каждой серии выполнялась независимая калибровка посредством спектральных измерений с помощью радиоактивных изотопов из стандартного набора градуировочных источников активностью $\sim 10^5$ Бк (см. таблицу).

Характеристики радиоактивных изотопов из стандартного набора градуировочных источников

Characteristics of radioactive isotopes from a standard set of calibration sources

Энергия, кэВ	Изотоп	Энергия, кэВ	Изотоп
26,34	Am-241	511	Na-22
30,9	Ba-133	569,7	Bi-207
32	Cs-137	661,65	Cs-137
40	Eu-152	778,9	Eu-152
59,54	Am-241	867,38	Eu-152
75	Bi-207	964,1	Eu-152
81	Ba-133	1063,66	Bi-207
101	Am-241	1173,2	Co-60
121,78	Eu-152	1274,5	Na-22
244,7	Eu-152	1332,5	Co-60
344,28	Eu-152	1408	Eu-152
356	Ba-133	1770	Bi-207

Указанные в таблице значения энергии отвечают максимуму в соответствующей спектральной линии. Расстояние между изотопом и детектором подбиралось так, чтобы скорость счета была больше фонового значения не менее чем в 10 раз, но при этом скорость счета не должна была превышать максимально допустимое значение 10^4 с^{-1} .

При измерении энергетического разрешения для каждой линии вычислялось отношение величины FWHM линии в каналах АЦП к номеру канала, соответствующему центру линии, с поправкой на положение нуля. Выделение линий на фоне континуума выполнялось путем обработки спектров АЦП с помощью специальной компьютерной программы, которая осуществляла линейную интерполяцию континуума в области линии, затем вычитала континуум и методом максимального правдоподобия аппроксимировала линию кривой Гаусса с использованием программного обеспечения *ADMCA*. Каждому максимуму на спектре гамма-излучения с энергией E_{max} сопоставлялся номер канала АЦП ($N_{\text{АЦП}}$), соответствующий максимуму этого распределения. В результате были построены зависимости $E_{\text{max}}(N_{\text{АЦП}})$, использовавшиеся в дальнейшем в качестве градуировочных кривых, посредством которых осуществлялся переход от номера канала к величине энергии регистрируемого гамма-кванта.

Пример градуировочного спектра для кристалла Ce:GAGG с фотоумножителем R3998-100-02, полученного с использованием изотопа ^{152}Eu , приведен на рис. 2, а. Аналогичный спектр при измерениях с изотопом ^{22}Na и лавинным фотодиодом в качестве фотоприемника изображен на рис. 2, б. На этих рисунках хорошо видны все спектральные особенности, характерные для указанных изотопов, а именно линии гамма-излучения со значениями энергий линий из таблицы.

На рис. 3 для измерений с ФЭУ (рис. 3, а) и лавинным фотодиодом (рис. 3, б) представлены градуировочные зависимости, показывающие соответствие между номером канала АЦП и энерговыделением в кристалле. Градуировочные кривые для ФЭУ и лавинного фотодиода демонстрируют хорошую линейность во всем диапазоне, поэтому энергетическое разрешение определялось как отношение выраженной числом каналов АЦП величины FWHM соответствующей линии к номеру канала, соответствующему центру линии, с поправкой на положение нуля. FWHM и положение центра определялись путем вписывания кривой Гаусса методом наименьших квадратов с использованием программного обеспечения *ADMCA*, входящего в комплект поставки МКА.

Непосредственно для определения энергетического разрешения были использованы те линии, для которых значения FWHM можно было найти надежно. Полученные экспериментально величины разрешения приведены на рис. 4. Лучшее энергетическое разрешение определено измерениями с фотоумножителем: при энергии 662 кэВ (изотоп ^{137}Cs) оно равно 7,5 %. На том же рисунке приведена аппроксимация степенной зависимостью, параметры которой найдены методом наименьших квадратов. В случае когда определяющим фактором, ограничивающим энергетическое разрешение, являются статистические флуктуации числа фотоэлектронов, следует ожидать степенную зависимость с наклоном $-0,5$, т. е. величина разрешения обратно пропорциональна квадратному корню из энергии. По графикам видно, что при выполнении измерений с помощью ФЭУ, а также лавинного фотодиода экспериментальные точки достаточно хорошо аппроксимируются степенной зависимостью. При этом наклон прямой для ФЭУ близок к $0,5$ и составляет $0,537$, а для лавинного фотодиода равен $\sim 0,3$, что несколько меньше значения, определяемого флуктуациями числа образованных носителей. Следует отметить, что разброс точек на графиках, изображенных на рис. 4, превышает статистическую погрешность, вычисляемую программой *ADMCA*, поскольку такая погрешность во многих случаях значительно меньше систематических отклонений, возникающих из-за отклонения формы линии от кривой Гаусса или вследствие того, что относительно слабая линия располагается на подложке с наклоном.

Также проведены измерения, в которых в качестве фотоприемника использована матрица кремниевых фотоумножителей (SiPM) фирмы *SensL*. В этом случае связь номера канала и энергии гамма-квантов имела нелинейный характер. Для ее описания в настоящей работе была использована кубическая аппроксимация, параметры которой подбирались методом наименьших квадратов.

По-видимому, указанная нелинейность связана с эффектом насыщения SiPM из-за ограниченного числа микроячеек, а также с эффектом «перекрестного влияния» (*cross-talk*) [6].

При определении энергетического разрешения сначала вычислялась ширина линии ΔE в энергетических единицах, для чего находились номера каналов МКА, соответствующие положению кривой Гаусса, вписанной в экспериментальный пик, на половине высоты от максимума со стороны больших и меньших энергий. Величина разрешения принималась равной $\Delta E/E$, где E – энергия гамма-излучения. Зависимость энергетического разрешения от энергии при использовании матрицы SiPM приведена на рис. 5.

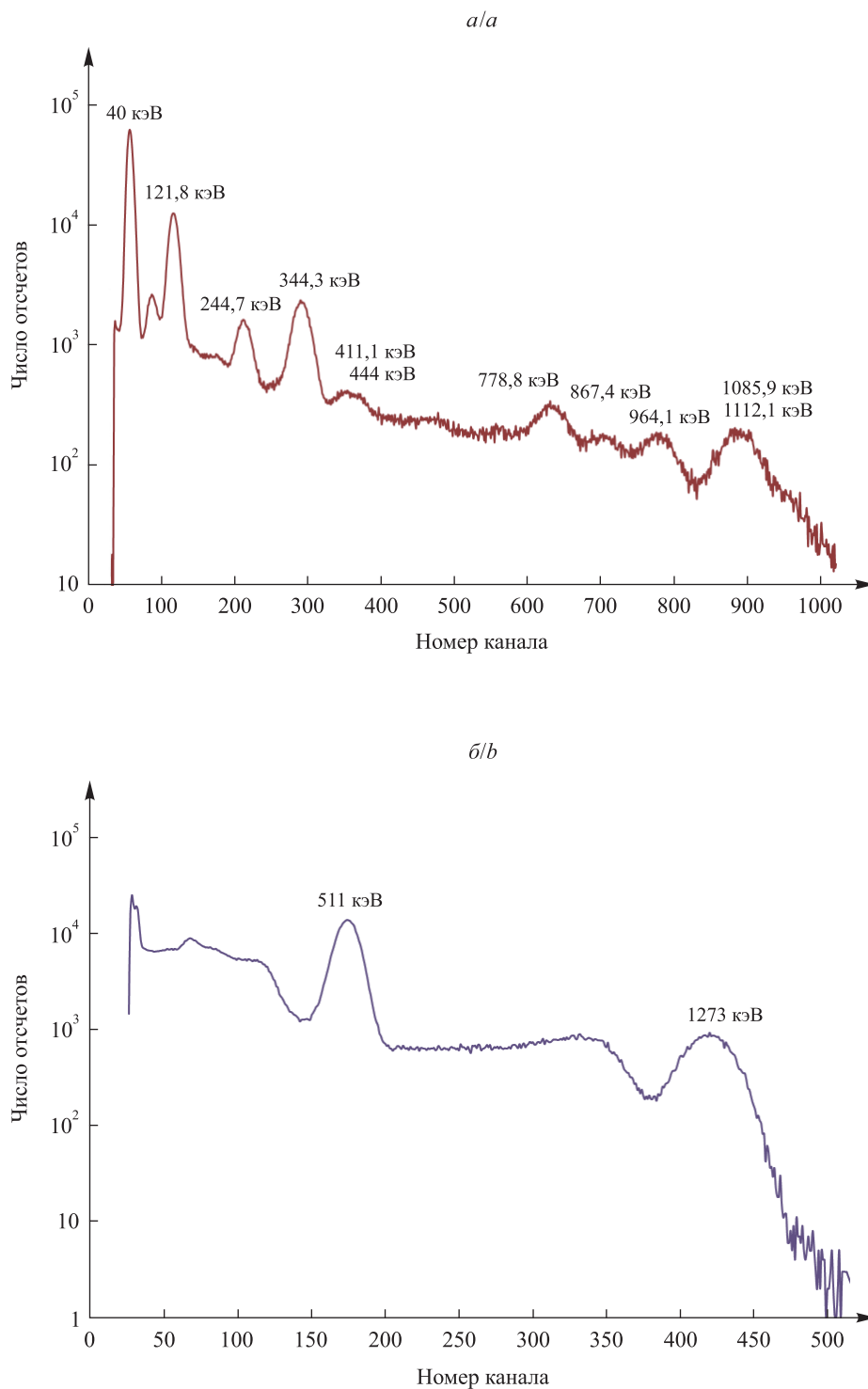


Рис. 2. Спектры гамма-излучения, измеренные с помощью сцинтилляционного кристалла Ce:GAGG:

- a – спектр радиоактивного изотопа ^{152}Eu
(в качестве фотоприемника использован ФЭУ Hamamatsu R3998-100-02);
 b – спектр радиоактивного изотопа ^{22}Na
(в качестве фотоприемника использован лавинный фотодиод S8664-1010)

Fig. 2. Spectra gamma radiation, measured using Ce:GAGG scintillation crystal:
 a – spectrum of the ^{152}Eu isotope, measured using
the Hamamatsu R3998-100-02 photomultiplier as a photodetector;
 b – spectrum of the ^{22}Na isotope, measured using
the avalanche photodiode S8664-1010 as a photodetector

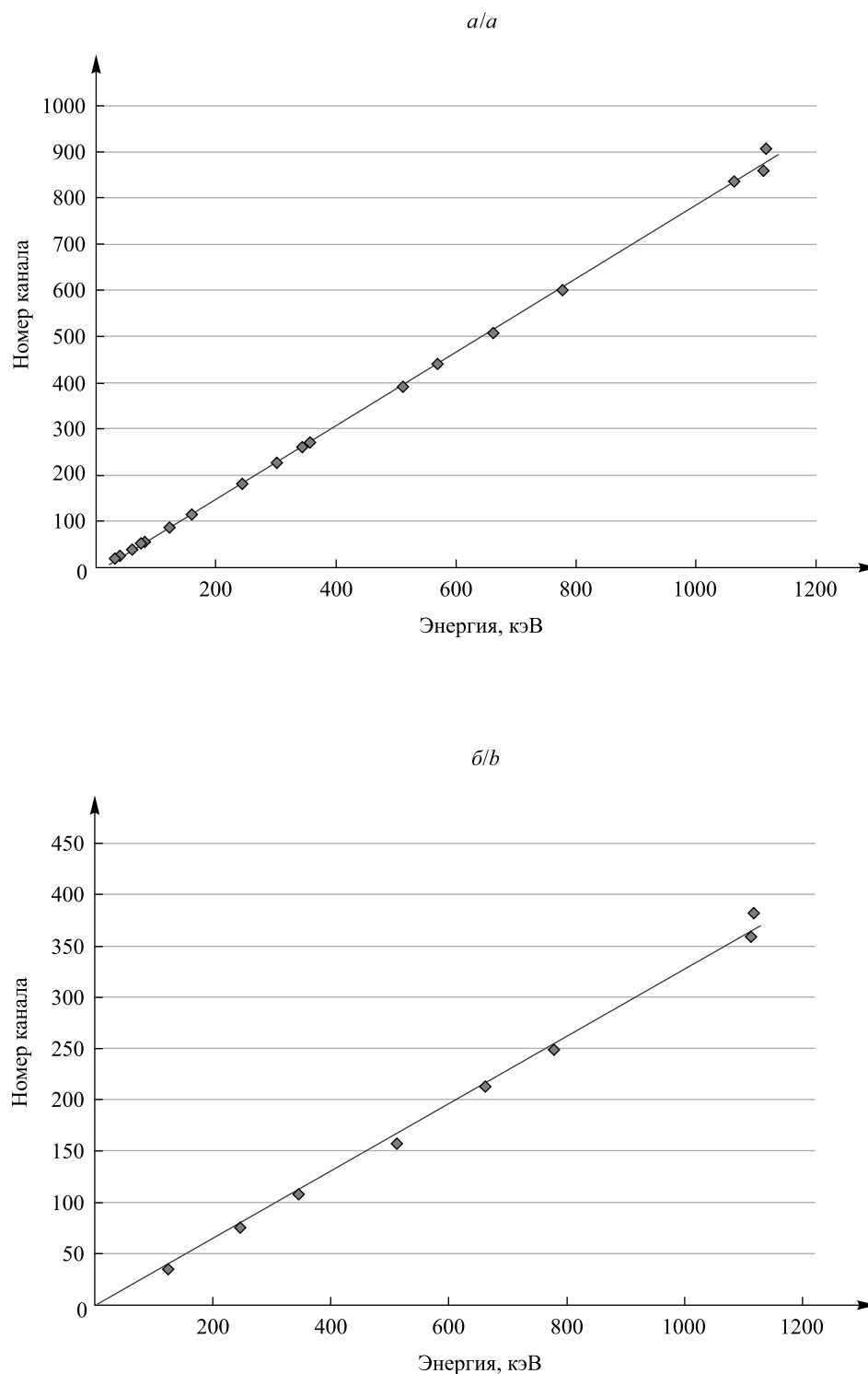


Рис. 3. Градуировочные зависимости номера канала АЦП от энергии гамма-кванта для кристалла Ce:GAGG при измерениях с ФЭУ Hamamatsu R3998-100-02 (а) и лавинным фотодиодом (APD) Hamamatsu S8664-1010 (б)

Fig. 3. Calibration dependencies: gamma-quantum energy – channel number of ADC for Ce:GAGG crystal for measurements with a Hamamatsu R3998-100-02 PMT (a) and with an avalanche photodiode (APD) Hamamatsu S8664-1010 (b)

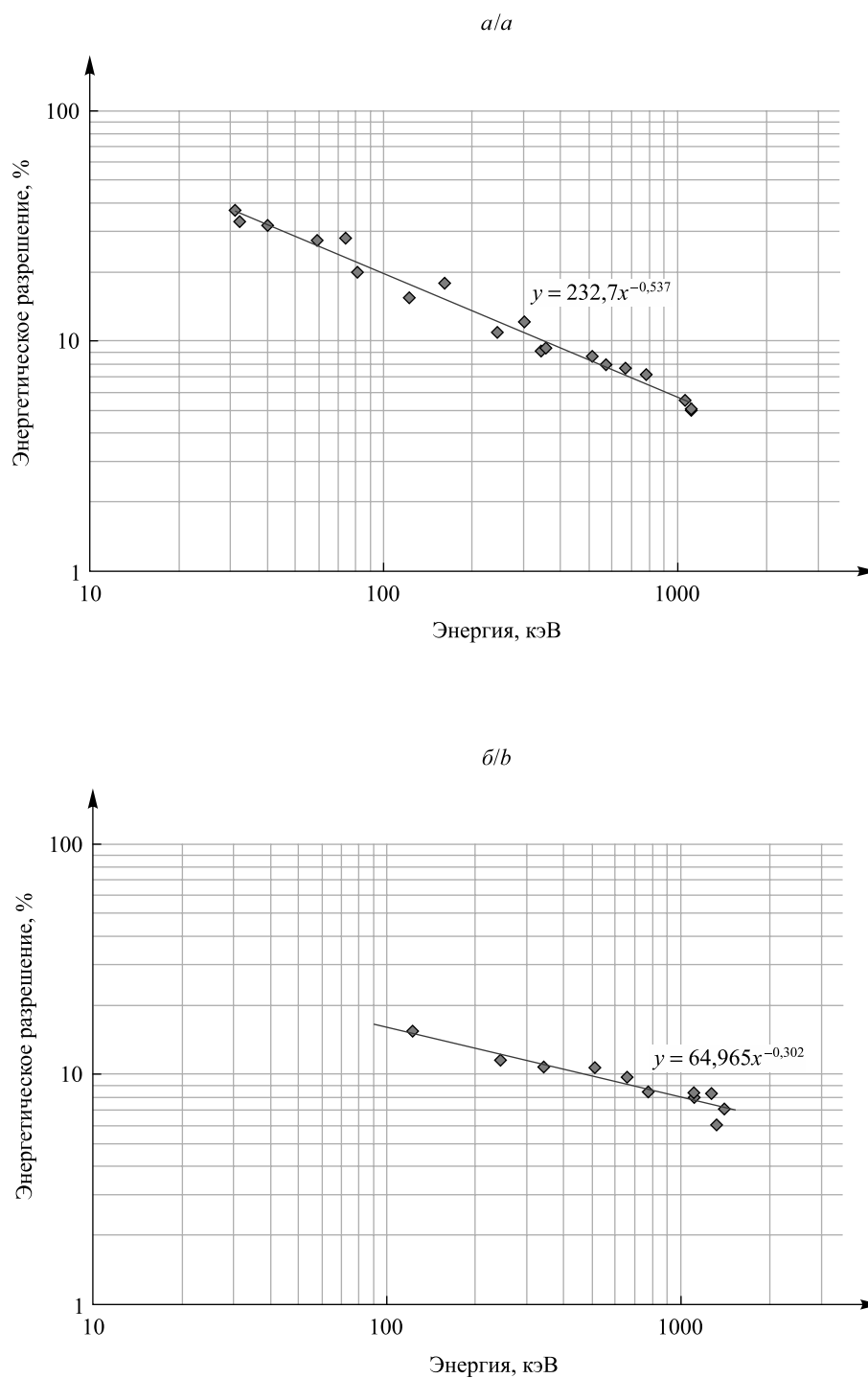


Рис. 4. Зависимость энергетического разрешения кристалла Ce : GAGG от энергии гамма-кванта для ФЭУ Hamamatsu R3998-100-02 (а) и лавинного фотодиода (APD) Hamamatsu S8664-1010 (б)

Fig. 4. Dependence of the energy resolution of a Ce : GAGG crystal on gamma quantum energy for a Hamamatsu R3998-100-02 photomultiplier (a) and an avalanche photodiode (APD) Hamamatsu S8664-1010 (b)

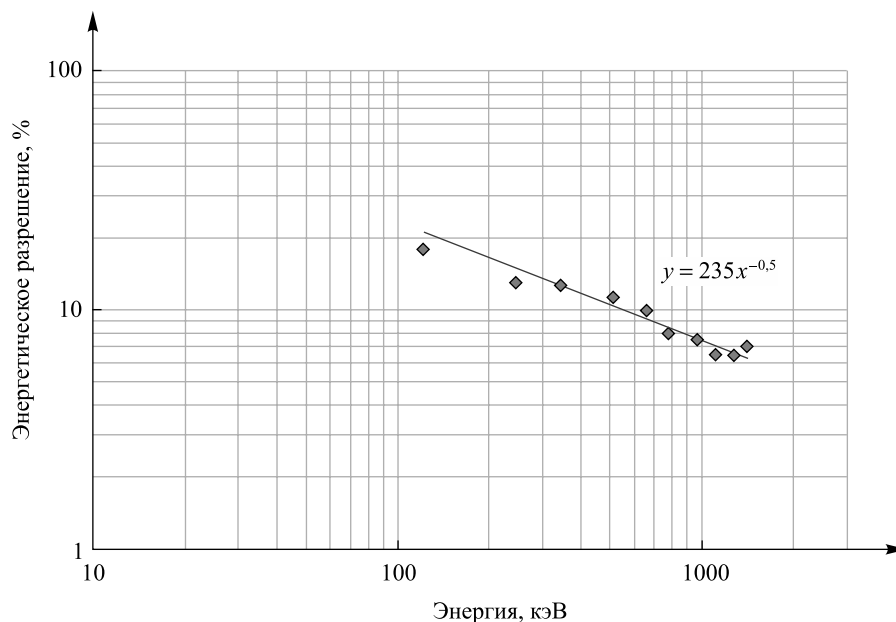


Рис. 5. Зависимость энергетического разрешения кристалла Ce:GAGG от энергии гамма-кванта для измерений с матрицей кремниевых фотоумножителей (SiPM) производства фирмы SensL

Fig. 5. The dependence of the energy resolution of the Ce:GAGG crystal on the gamma quantum energy for measurements with the silicon photomultiplier matrix (SiPM) manufactured by SensL

Из рис. 5 видно, что энергетическое разрешение исследуемого образца сцинтилляционного кристалла Ce:GAGG с матрицей SiPM на линии 662 кэВ составляет 9,8 %. Отличия положения точек на графике от линии аппроксимации степенной функцией в области малых и больших энергий могли дополнительно появиться вследствие недостаточно точного учета нелинейного характера зависимости амплитуды от энергии. Но в целом и в этом случае энергетическая зависимость разрешения неплохо аппроксимируется степенной функцией.

Заключение

В измерениях с рассмотренным образцом кристалла Ce:GAGG на линии ^{137}Cs (662 кэВ) при использовании фотоумножителя, лавинного фотодиода и кремниевого фотоумножителя получено энергетическое разрешение $\sim 7,5$; $\sim 9,7$ и $9,8$ % соответственно. Это несколько хуже, чем известное наилучшее найденное для кристаллов Ce:GAGG значение энергетического разрешения, составляющее ~ 5 % [7]. Следует, однако, отметить, что приведенные в настоящей работе значения энергетического разрешения включают разброс сигналов на выходе фотоприемников, обусловленный флуктуациями их коэффициента усиления, вклад которых сопоставим с разрешением собственно кристалла. Кроме того, нужно учитывать возможную неоднородность светосбора, обусловленную, в частности, прямоугольной формой кристалла. Отличие наклона аппроксимирующей линии от $-0,5$ для лавинного фотодиода может быть связано с неоднородной чувствительностью его поверхности, размер которой близок к размеру кристалла. Кроме того, размер поверхности APD немного меньше размера кристалла, что приводит к потере света. В случае использования сборки SiPM потеря фотонов подсветки на промежутках между светочувствительными пикселями, а также известные нелинейные эффекты SiPM приводят к ухудшению измеряемого энергетического разрешения сборки кристалла и фотоприемника.

Тем не менее полученные значения величины энергетического разрешения сопоставимы с аналогичными характеристиками распространенных сцинтилляторов NaI(Tl), при этом кристаллы Ce:GAGG тех же размеров имеют значительно большую эффективность и примерно в 3 раза меньшее время высвечивания, поэтому их применение в качестве детектирующих элементов гамма-телескопов имеет хорошие перспективы.

Библиографические ссылки / References

1. Pirard B, d'Uston C, Maurice S, Gasnault O. Performance Limits of New Generation Scintillators for Planetary Gamma-Ray Spectroscopy [Internet]. In: *Lunar and Planetary Science XXXVI: papers presented at the 36th Lunar and Planetary Science Conference; 2005 14–18 March; Houston, USA*. Houston: Lunar and Planetary Institute; 2005 [cited 2018 August 23]. p. 1–2. Available from: <https://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2005/pdf/2187.pdf>.

2. Glodo J, Kuhn A, Higgins WM, van Loef EVD, Karp JS, Moses WW, et al. CeBr₃ for Time-of-flight PET. In: *Nuclear Science Symposium: IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record; 2006 October 29 – November 1; San Diego, USA*. Piscataway: IEEE; 2006. p. 1570–1573. DOI: 10.1109/NSSMIC.2006.354198.
3. Quarati F, Bos AJJ, Brandnburg S, Dathy C, Dorenbos P, Kraft S, et al. X-ray and gamma-ray response of 2"×2" LaBr₃(Ce) scintillation detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2007;574(1):115–120. DOI: 10.1016/J.NIMA.2007.01.161.
4. Iyudin AF, Bogomolov VV, Svertilov SI, Yashin IV, Smoot GF, Greiner J, et al. Characteristics of position sensitive detector pixels based on promising inorganic scintillators LaBr₃:Ce and CeBr₃. *Instruments and Experimental Techniques*. 2013;56(6):640–648. DOI: 10.1134/S0020441213050175.
5. Sergey S, Bogomolov V, Iyudin A, Maksimov I, Markelova A, Yashin I. New Advanced Scintillators for Gamma Ray Spectroscopy and Their Application. In: Korzhik M, Gektin A, editors. *Engineering of Scintillation Materials and Radiation Technologies: Proceedings of ISMART 2016. Volume 200*. [Place unknown]: Springer International Publishing; 2017. p. 281–299. DOI: 10.1007/978-3-319-68465-9.
6. Yeom JY, Yamamoto S, Derenzo SE, Spanoudaki VCh, Kamada K, Endo T, et al. First performance results of Ce:GAGG scintillation crystals with silicon photomultipliers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2013;60(2):988–992. DOI: 10.1109/TNS.2012.2233497.
7. Iwanowska J, Swiderski L, Szczesniak T, Sibczynski P, Moszynski M, Grodzicka M, et al. Performance of cerium-doped Gd₃Al₂Ga₃O₁₂ (GAGG:Ce) scintillator in gamma-ray spectrometry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2013;712:34–40. DOI: 10.1016/J.NIMA.2013.01.064.

Статья поступила в редколлегию 01.04.2019.
Received by editorial board 01.04.2019.