

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение  
высшего образования

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

«МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий

Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

ОТЧЕТ ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**Сравнение характеристик сцинтилляторов LYSO и GAGG для  
применения в гамма-локаторе**

Студент: \_\_\_\_\_ Д. О. Бондаренко

Научный руководитель: \_\_\_\_\_ Ф. А. Дубинин

# Содержание

<b>Введение</b>	<b>3</b>
<b>1 Описание детектора</b>	<b>3</b>
1.1 Сцинтилляторы . . . . .	4
1.2 Кремниевый фотоумножитель . . . . .	5
<b>2 Описание установки</b>	<b>6</b>
<b>3 Экспериментальная часть</b>	<b>7</b>
3.1 Ход работы . . . . .	7
3.2 Результаты и анализ эксперимента . . . . .	7
<b>4 Заключение</b>	<b>11</b>
<b>Список литературы</b>	<b>12</b>

## Введение

В современной радионуклидной диагностике достаточно широко используется медицинский гамма-зонд, позволяющий в режиме реального времени, а именно во время хирургического вмешательства, определить границы злокачественной опухоли для дальнейшего ее удаления.

Гамма-зонд представляет собой портативный прибор для регистрации гамма-излучения в области энергий 60-662 кэВ. В качестве детектирующей части используется сцинтиллятор, где происходит конвертация гамма-квантов в фотоны, и фотоприемник для регистрации излученных фотонов. Детектирующая часть соединена с блоком электроники, смонтированным на печатной плате, индикация результата происходит посредством звукового и светового сигналов, а также при помощи индикации скорости счета на цифровом дисплее.



Рис. 1. Внешний вид гамма-локатора

Одним из возможных вариантов оптимизации работы гамма-зонда является размещение его детектирующей части на гибком выносном кабеле - катетере. Преимуществом модернизированного гамма-зонда является возможность более точного определения границ опухоли, залегающей глубоко в тканях.

В начальном варианте гамма-локатора используется кристалл  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ , который является гигроскопичным, вследствие чего его необходимо дополнительно поместить в защитный корпус, но места в катетере для такого размещения будет недостаточно, поэтому необходимо подобрать кристалл, который будет негигроскопичным и при этом не будет сильно уступать по энергетическому разрешению  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ , которое характеризует возможность разделять излучение разной энергии и устанавливать порог дискриминации с целью минимизации доли регистраций рассеянных гамма-квантов или гамма-квантов, испытавших комптоновское рассеяние в мягких тканях пациента. Кристалл  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  обеспечивает энергетическое разрешение 4.9% на линии 662 кэВ. [1]

Целью работы является сравнение энергетического разрешения стинцилляционных кристаллов, которые являются одной из составных частей гамма-зонда, в зависимости от типа покрытия кристалла (окрашенный белой краской или замотанный в тефлоновую ленту), а также от типа самого кристалла (GAGG или LYSO).

## 1 Описание детектора

Сцинтилляционный детектор состоит из сцинтиллятора - особого вещества, которое при поглощении ионизирующего излучения излучает вспышку света и в отличие, например, от люминофора сравнительно быстро высвечивается - в пределах единиц микросекунд. Характерной особенностью сцинтиллятора является его прозрачность к собственному излучению, что приводит к высокому показателю светосбора, а большой световыход позволяет судить о пропорциональной зависимости количества излученных фотонов от поглощенной энергии излучения и, как следствие, получить энергетические спектры излучения по энергии вспышек. К составным частям детектора также относятся фотоумножитель (ФЭУ), который преобразует световую вспышку в импульс тока, и электронная аппаратура, которая регистрирует электрические импульсы.

## 1.1 Сцинтилляторы

Основными характеристиками сцинтилляторов являются световой выход, время затухания свечения и энергетическое разрешение.

**Световым выходом** называется число испущенных сцинтиллятором оптических фотонов при поглощении частицы с энергией 1 МэВ. Наиболее широко используемым сцинтиллятором является NaI:Tl, относительно которого приводят световых выход других сцинтилляторов.

В простейшем случае вспышка света от сцинтиллятора затухает по экспоненциальному закону:

$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau},$$

где  $I_0$  – амплитуда светового импульса, а  $\tau$  – **время высвечивания**, т.е. время, в течение которого интенсивность падает в  $e$  раз.

В энергетическом спектре импульсов особый интерес представляет такой параметр, как ширина пика полного поглощения. В случае идеального детектора пик полного поглощения описывается  $\delta$ -функцией. Но в реальности он имеет конечную ширину. **Энергетическое разрешение** определяется как величина ширины пика полного поглощения на полувысоте, отнесенная к положению максимума пика. Поэтому чем меньше по величине энергетическое разрешение, тем выше разрешающая способность сцинтиллятора.

Важно отметить, что при регистрации гамма-квантов существенный вклад вносит **плотность** вещества и эффективный заряд ядра. С помощью тяжелого сцинтиллятора малого размера можно зарегистрировать больше гамма-квантов.

Стоит упомянуть, что немаловажным ограничивающим фактором является гигроскопичность материала, т.е. способность некоторых веществ поглощать водяные пары из воздуха, что приводит к ухудшению характеристик кристалла или полному его разрушению. [2]

Сравнительные характеристики сцинтилляторов NaI:Tl, GAGG:Ce, LYSO:Ce, а также LaBr3:Ce приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики сцинтилляторов

	LaBr3:Ce	NaI:Tl	LYSO:Ce	GAGG:Ce
Энергетическое разрешение (по линии 662 кэВ), %	2.9	7	7.9	6
Плотность, г/см <sup>3</sup>	5.08	3.67	7.15	6.68
Время высвечивания, нс	16	250	41	92
Световой выход, фотон/кэВ	65	40	32	38
Длина волны излучения (максимальная), нм	365	415	420	520
Гигроскопичность	+	+	-	-
Наличие собственного фона	+	-	+	-

## 1.2 Кремниевый фотоумножитель

Кремниевый фотоумножитель (Si-ФЭУ) представляет собой упорядоченный набор маленьких пикселей лавинных фотодиодов, соединенных параллельно и работающих в гейгеровском режиме, который возникает в случае, если напряжение смещения, приложенное к фотодиоду превышает напряжение пробоя на несколько вольт, тем самым внутреннее электрическое поле становится настолько сильным, что коэффициент усиления фотодиода достигает значений  $10^5 - 10^6$ . Генерируемые носители заряда создают новые электрон-дырочные пары, которые ускоряются высоким внутренним электрическим полем. Вновь созданные носители также ускоряются в приложенном поле, чтобы создать еще больше носителей, и этот процесс повторяется снова и снова [3]. Общий выходной сигнал кремниевого фотоумножителя представляет собой сумму выходных сигналов с каждого пикселя. При значительном световом потоке срабатывает большая часть пикселей и фотоприемник перестает быть пропорциональным прибором. К каждому пикселю присоединен гасящий резистор (добавочное сопротивление), позволяющий выходному току протекать через него и не допускающий заметной зарядки пикселя от источника напряжения за время протекания лавинного процесса.

Следует отметить, что на эффективность регистрации фотона фотоприемником сильное влияние оказывает длина волны излучения, регистрируемая диодом, поэтому для получения наилучших результатов от сцинтиллятора необходимо, чтобы спектральная чувствительность фотодетектора соответствовала спектру излучения сцинтиллятора. На рис. 1 показано строение кремниевого ФЭУ. [4]

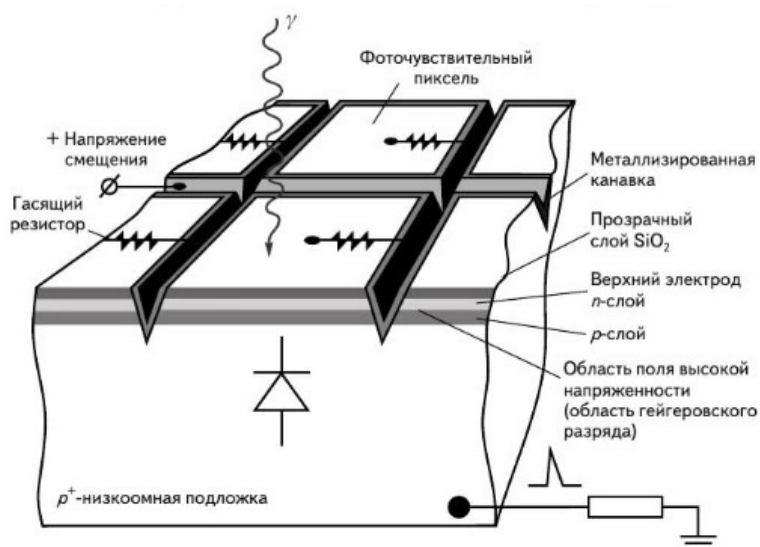


Рис. 2. Многопиксельный лавинный фотодетектор

В данной работе используется Si-ФЭУ типа n-na-p (серия M) – SensL MicroFM-30035, основные параметры которого представлены в таблице ниже.

Таблица 2. Характеристики Sensl MicroFM-30035

Размер пикселя	35×35 мкм <sup>2</sup>
Фоточувствительная площадь	3×3 мм <sup>2</sup>
Число пикселей	4774
Коэффициент заполнения	64%
Напряжение пробоя	27.5В ± 0.5В
Положение максимума на кривой чувствительности	500 нм
Эффективность регистрации	20%
Коэффициент усиления	2.3×10 <sup>6</sup>
Время восстановления пикселя	130 нс

## 2 Описание установки

Сцинтилляционные кристаллы и детектор на основе Si-ФЭУ (SensL MicroFM-30035) состыкованы друг с другом посредством оптической смазки. В качестве источника гамма-квантов выступает <sup>137</sup>Cs, который располагается прямо на кристалле. Посредством источника питания через амперметр на детектор подается напряжение 28.4 В. Сигнал с SIPM поступает на вход осциллографа LeCroy Waverunner 620Zi, на котором предварительно устанавливается входное сопротивление, согласованное с сопротивлением соединительного кабеля, то есть 50 Ом, с целью получения точного и чистого сигнала. Благодаря встроенному в осциллограф анализатору импульсов может быть получен энергетический спектр сигналов.

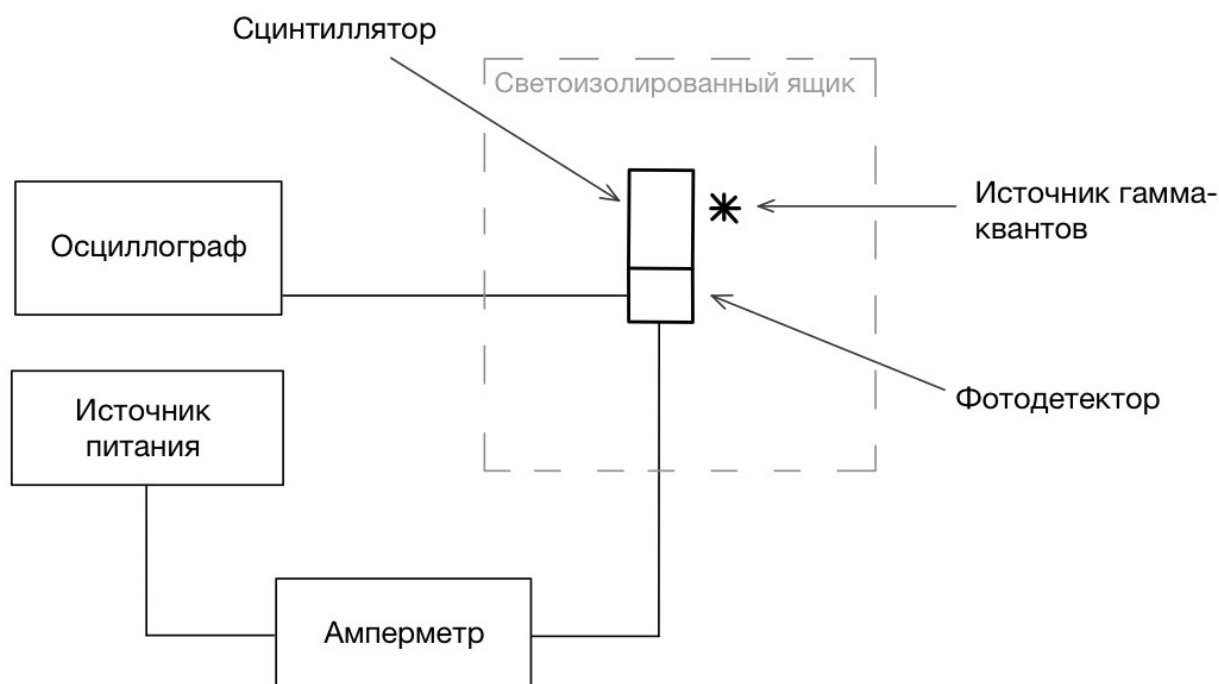


Рис. 3. Схема установки

## 3 Экспериментальная часть

### 3.1 Ход работы

Работа состояла из двух частей. На первом этапе сравнивались энергетические разрешения детектора с кристаллами GAGG  $3 \times 3 \times 10 \text{ мм}^3$ , один из которых был покрашен белой краской (коэф. отражения  $\sim 98\%$ ), другой – замотан тефлоновой лентой (коэф. отражения  $> 90\%$ ). Для данного типа кристалла энергетическое разрешение замотанного кристалла оказалось лучше окрашенного (табл. 3), что предположительно связано с отполированной поверхностью самого кристалла, влияющей на то, каким образом краска ляжет на кристалл. Последующие измерения проводились со сцинтиллятором с тефлоновым покрытием.

На втором этапе проводилось сравнение энергетического разрешения уже разных типов кристаллов: LYSO и GAGG, имеющих размер  $3 \times 3 \times 3 \text{ мм}^3$  и обмотанных тефлоновой лентой.

Спектры с каждого кристалла (рис. 4, 5, 6 и 7) получены с помощью программы OriginPro, используемой также для фитирования характерного пика 662 кэВ функцией Гаусса. Далее, используя полученные данные, произведен расчет относительного энергетического разрешения по формуле:

$$\delta = \frac{2.35 \cdot W/2}{x_c - x_{c_p}},$$

где  $\delta$  – относительное энергетическое разрешение,  $W = 2\sigma$ , где  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение,  $x_c$  – положение максимума пика,  $x_{c_p}$  – положение максимума пьедестала. Пьедестал представляет собой электронный нуль осциллографа, необходимый для калибровки полученных спектров, так как действительное положение нулевой амплитуды сигнала может оказаться смещенным относительно нуля анализатора импульсов.

### 3.2 Результаты и анализ эксперимента

Ниже приводятся графики спектров  $^{137}\text{Cs}$  вместе с пьедесталами и таблицами параметров, используемых для вычисления энергетического разрешения. Также представлен общий график всех полученных спектров.

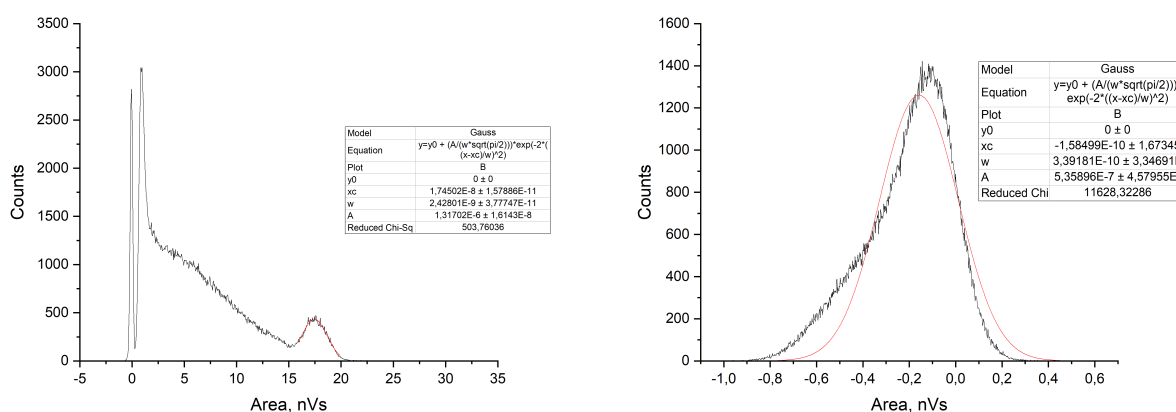


Рис. 4. GAGG  $3 \times 3 \times 10 \text{ мм}^3$

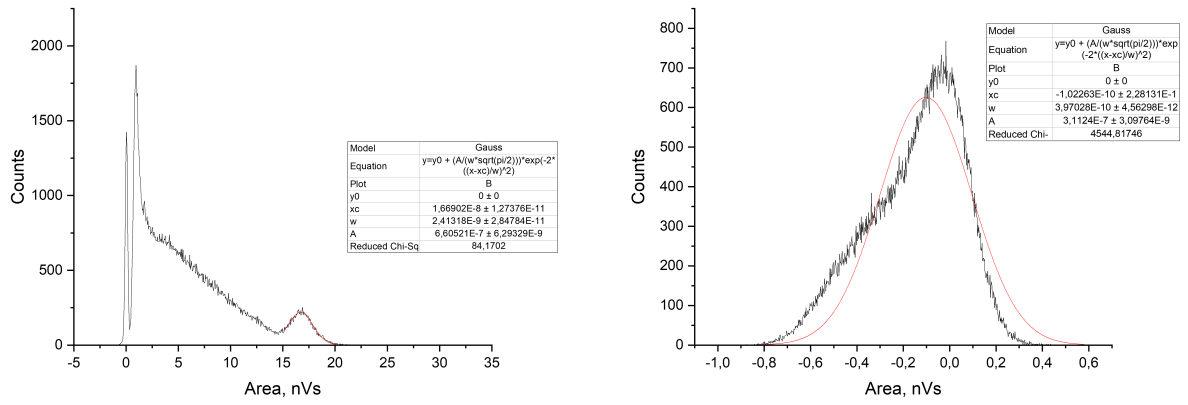


Рис. 5. GAGG 3×3×10 мм<sup>3</sup> окрашенный

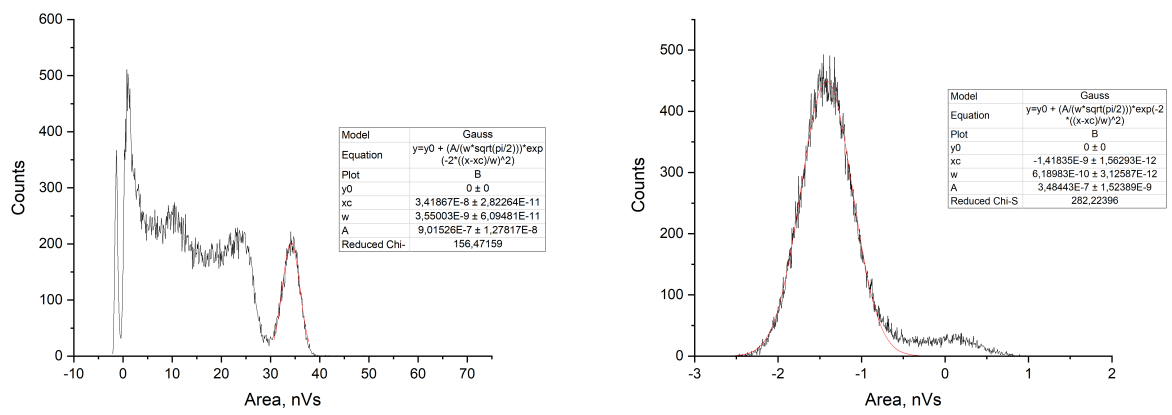


Рис. 6. GAGG 3×3×3 мм<sup>3</sup>

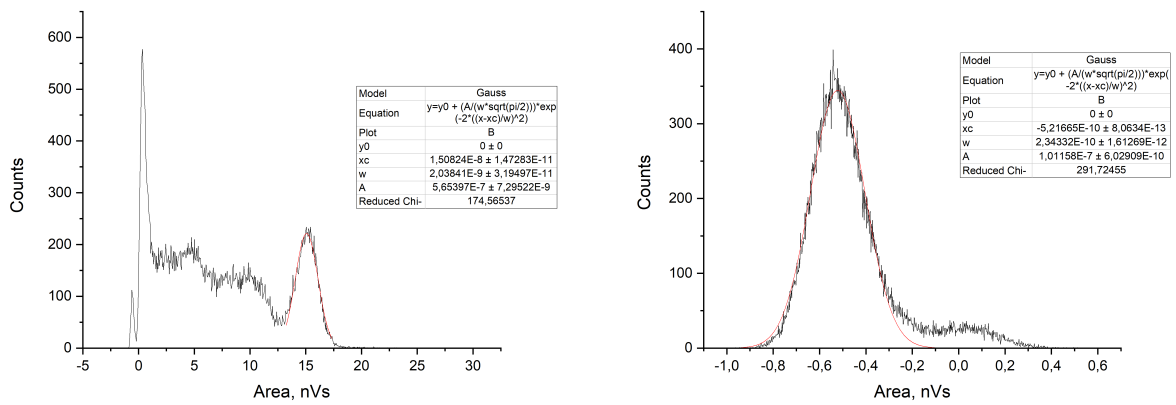


Рис. 7. LYSO 3×3×3 мм<sup>3</sup>



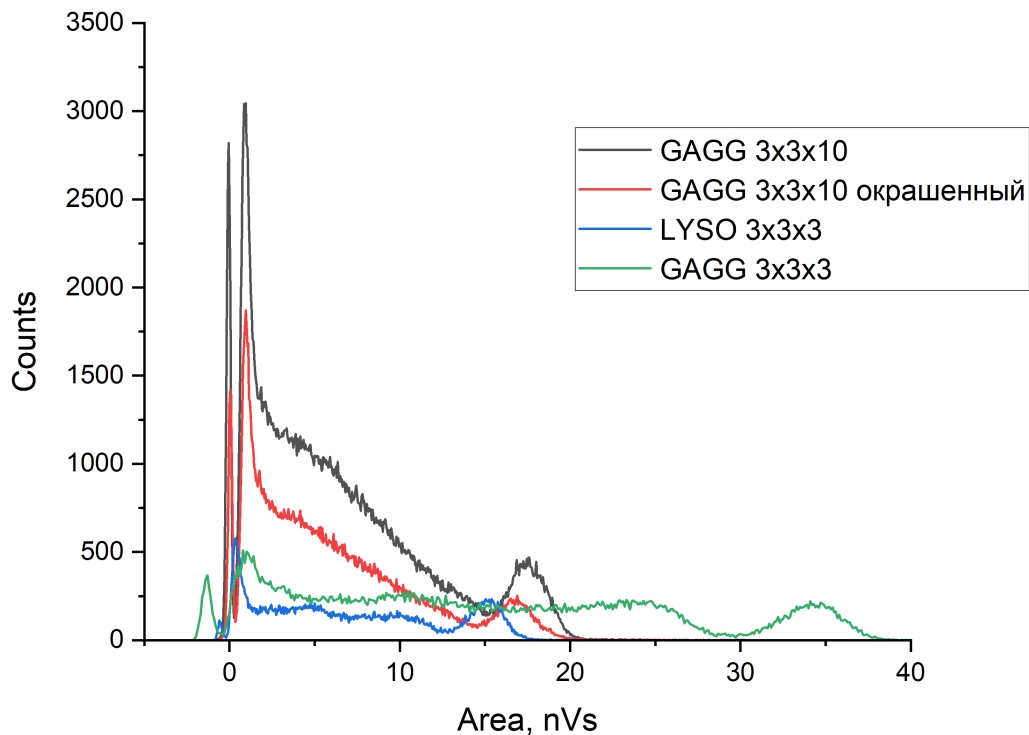


Рис. 8. Общий график всех спектров

Далее в таблице указаны положения максимума пика полного поглощения (с учетом пьедестала) и результаты вычисления энергетических разрешений для каждого из исследуемых кристаллов и покрытий.

Таблица 3. Результаты измерений

	Положение максимума, нВс	Энергетическое разрешение, %
GAGG 3×3×10 мм <sup>3</sup>	17.61 ± 0.02	16
GAGG 3×3×10 мм <sup>3</sup> (окрашенный)	16.79 ± 0.01	17
GAGG 3×3×3 мм <sup>3</sup>	35.61 ± 0.01	12
LYSO 3×3×3 мм <sup>3</sup>	15.60 ± 0.01	15

Анализ таблицы позволяет сделать следующие выводы:

- положение максимума пика обмотанного кристалла оказалось чуть дальше максимума пика окрашенного и разрешение оказалось лучше
- положения же пиков GAGG и LYSO отличаются более, чем в два раза, что связано с лучшей эффективностью регистрации фотонов, излученных GAGG, вследствие наиболее близкого расположения длины волны илучения GAGG к положению максимума на кривой чувствительности Si-ФЭУ, а также по причине более высокого значения световыхода и наиболее близкого располо-

жения значения времени высвечивания для GAGG ко времени восстановления пикселя Si-ФЭУ, позволяющее избежать некоторого количества просчетов

- наилучшим энергетическим разрешением среди исследуемых обладает детектор на основе сцинтиллятора GAGG  $3 \times 3 \times 3$  мм<sup>3</sup>, обмотанный в тефлоновую ленту

## 4 Заключение

В ходе работы исследованы детекторы на основе кремниевого фотоумножителя SiPM SensL MicroFM-30035 и сцинтилляционных кристаллов LYSO и GAGG, обмотанных в тефлоновую ленту или покрашенных белой краской. Результаты исследований показывают, что наилучшее энергетическое разрешение на линии 662 кэВ из исследуемых кристаллов обеспечивает обмотанный тефлоновой лентой GAGG размером  $3 \times 3 \times 3$  мм<sup>3</sup>, и оно составляет 12%.

## Список литературы

- [1] Бердникова А.К. Сцинтилляционный гамма-зонд для радионуклидной диагностики в ядерной медицине. 2016.
- [2] Р. Ю. Шендрик. *Введение в физику сцинтилляторов*. 1. ИГУ, Иркутск, 2013.
- [3] Е. А. Раджабов Р. Ю. Шендрик. *Введение в физику сцинтилляторов*. 2. ИГУ, Иркутск, 2014.
- [4] И. М. Ободовский А. И. Болоздыня. *Детекторы ионизирующих частиц и излучений. Принципы и применения*. Дом Интеллект, Долгопрудный, 2012.