

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
Однородность световыхода сцинтилляторов GAGG

Студент: _____ Д. О. Бондаренко

Научный руководитель: _____ Ф. А. Дубинин

Москва, 2023

Содержание

Введение	3
1 Теоретическая часть	4
1.1 Световыход	4
1.2 Светосбор	5
1.3 Кремниевый фотоумножитель	6
2 Описание установки	7
3 Экспериментальная часть	8
4 Заключение	12
Список литературы	13

Введение

Сцинтиллятор GAGG(Ce) является одним из материалов, применяемых в таких областях, как ядерная медицина, физика высоких энергий и обнаружение источников радиации. Энергетическое разрешение является одной из характеристик кристалла, оказывающей влияние на эффективность работы прибора, позволяя разделять излучение разной энергии, поэтому необходимо стремиться к оптимизации данного показателя.

Целью работы является сравнение показателей энергетического разрешения и положения максимума пика полного поглощения двух разных пар одинаковых сцинтилляционных кристаллов GAGG(Ce) размерами ~~333~~ 333мм^3 и $5\times 5\times 5\text{мм}^3$, обмотанных тефлоновой лентой.

1 Теоретическая часть

Энергетическое разрешение определяется как величина ширины пика полного поглощения на полувысоте, отнесенная к положению максимума пика. В свою очередь, положение максимума пика зависит как от величины световыхода, так и от величины светосбора сцинтиллятора, чем больше значения этих показателей, тем выше разрешающая способность сцинтиллятора.

1.1 Световыход

Различия в световыходе между, казалось бы, идентичными кристаллами GAGG(Ce) могут возникать из-за нескольких факторов:

- различия в качестве выращивания кристаллов и производственных процессах, небольшие колебания концентраций примесей, дефектов или кристаллической структуры могут повлиять на сцинтилляционные свойства и световыход кристалла
- концентрация и распределение легирующей примеси внутри кристалла
- дефекты кристаллов, такие как дислокации или вакансии, могут влиять на процесс сцинтилляции, даже незначительные изменения плотности или местоположения дефектов могут повлиять на эффективность передачи энергии и последующее излучение света
- различия в качестве полировки или наличии загрязнений могут изменять количество света, отражаемого или пропускаемого кристаллом, что в конечном итоге влияет на наблюдаемый световой поток
- качество оптического контакта между кристаллом и фотоприемником

Световой выход (LY), который определяется как число испущенных сцинтиллятором фотонов на один поглощенный МэВ энергии равен :

$$LY = 10^6 \frac{SQ}{\beta E_g},$$

где S – эффективность электрон-дырочного переноса на центр свечения, Q – квантовая эффективность люминесценции оптического центра, β – константа, E_g – ширина запрещенной зоны. Максимальное значение для Q и S равно единице. Выражение βE_g имеет смысл средней энергии, которая необходима для образования одной электрон-дырочной пары в кристалле с запрещенной зоной E_g . [1] Очевидно, что важным фактором, который влияет на величину светового выхода сцинтиллятора, является ширина его запрещенной зоны, которая, в частности, зависит от легирования. За счет введения дополнительных энергетических уровней в пределах запрещенной

зоны легирования может либо уменьшить, либо увеличить ширину запрещенной зоны.

Ионы легирующей примеси Ce^{3+} , включенные в кристаллическую решетку, ответственны за процесс сцинтилляции. Ширина запрещенной зоны может влиять на активацию легирующих добавок Ce^{3+} . При поглощении ионизирующего излучения, энергия передается от поглощенного излучения к активному центру, в данном случае, иону Ce^{3+} . Возбужденные электроны рекомбинируют с дырками и переходят в более низкую энергетическую область, осуществляя попутно излучение света – сцинтилляцию.

Подвижность электронов и дырок определяет их способность мигрировать через кристаллическую решетку, чтобы достичь центров сцинтилляции. Более высокая подвижность электронов и дырок способствует эффективному переносу носителей заряда, увеличивая вероятность попадания ионов легирующей примеси Ce^{3+} и получения сцинтилляционного света. И наоборот, меньшая подвижность может препятствовать транспортировке носителей заряда, уменьшая количество вспышек. Наличие дефектов или примесей в кристаллической решетке может задерживать носители заряда. Захваченные носители заряда не способствуют образованию сцинтилляционного света. Однако при определенных условиях захваченные носители могут высвободиться и вносить свой вклад в процесс сцинтилляции. Процессы улавливания и отсоединения могут влиять на количество и время сцинтилляционных вспышек.

Концентрация ионов церия напрямую влияет на количество доступных центров сцинтилляции в кристаллической решетке. При более высокой концентрации легирующих примесей церия больше электронов может быть возбуждено до более высоких энергетических уровней, и впоследствии в процессе снятия возбуждения испускается больше фотонов, световыход увеличивается. Однако существует практический предел концентрации легирующих примесей церия, при превышении которого характеристики сцинтилляции могут начать ухудшаться. Кроме того, более высокие концентрации церия могут привести к усилению рассеяния и поглощения сцинтилляционного света внутри кристалла.

Важно отметить, что достижение идеальной однородности сцинтилляционных материалов является сложной задачей, и все еще могут наблюдаться небольшие различия в световыходе по объему кристалла.

1.2 Светосбор

Сбор света в сцинтилляторе относится к процессу улавливания и направления сцинтилляционного света, создаваемого в материале сцинтиллятора, на фотодетектор для обнаружения. Эффективный сбор света имеет решающее значение для достижения высокой чувствительности обнаружения,

точного измерения энергии и пространственного разрешения в системах обнаружения на основе сцинтилляционного излучения. На эффективность светосбора в сцинтилляторе влияют несколько факторов:

- свойства материала сцинтиллятора: состав, плотность, атомный номер и кристаллическая структура материала сцинтиллятора влияют на генерацию, излучение и передачу сцинтилляционного света
- форма, размер и конфигурация кристалла сцинтиллятора могут влиять на сбор света. Кристаллы с большей площадью поверхности или геометрией, которая максимизирует взаимодействие сцинтилляционных фотонов с поверхностью кристалла, как правило, улучшают сбор света
- хороший оптический контакт между кристаллом и фотодетектором. Это предполагает обеспечение хорошего физического контакта, минимизацию воздушных зазоров или отражений на границе раздела, а также использование оптических материалов или клеев с высоким коэффициентом преломления
- нанесение отражающих покрытий или обработка поверхностей кристалла сцинтиллятора может улучшить сбор света за счет снижения поглощения и рассеяния фотонов
- свойства фотодетектора

Оптимизируя конструкцию сцинтиллятора, геометрию кристалла, оптическую связь и выбор фотоприемника, можно максимизировать эффективность сбора света, что приведет к улучшению эффективности и точности обнаружения в системах на основе сцинтилляции.

1.3 Кремниевый фотоумножитель

Для регистрации излученных сцинтиллятором фотонов использовался кремниевый фотоумножитель (SiPM). SiPM 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 [2]. 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.

Обычно рекомендуется прогреть SiPM перед началом измерений из-за явления, называемого температурно-зависимой скоростью темного счета, которое также вносит вклад в положение максимума пика. Темновая скорость счета относится к генерации ложных электрических сигналов в отсутствие падающих фотонов. Когда SiPM изначально находится при более низкой температуре, скорость темного счета может быть ниже. Однако, когда SiPM нагревается во время работы, темновая скорость счета, как правило, увеличивается. Это может привести к увеличению базового сигнала, что может повлиять на точность и чувствительность измерений. Прогрев SiPM перед началом измерений позволяет стабилизировать темновую скорость счета при рабочей температуре. Это позволяет получить более точную характеристику фактического измеряемого сигнала, поскольку шум базовой линии является постоянным и может быть учтен в анализе.

2 Описание установки

Сцинтилляционные кристаллы и детектор на основе Si-ФЭУ состыкованы друг с другом посредством оптической смазки. В качестве источника гамма-квантов выступает ^{137}Cs . Посредством источника питания через амперметр на детектор подается рабочее напряжение. 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.

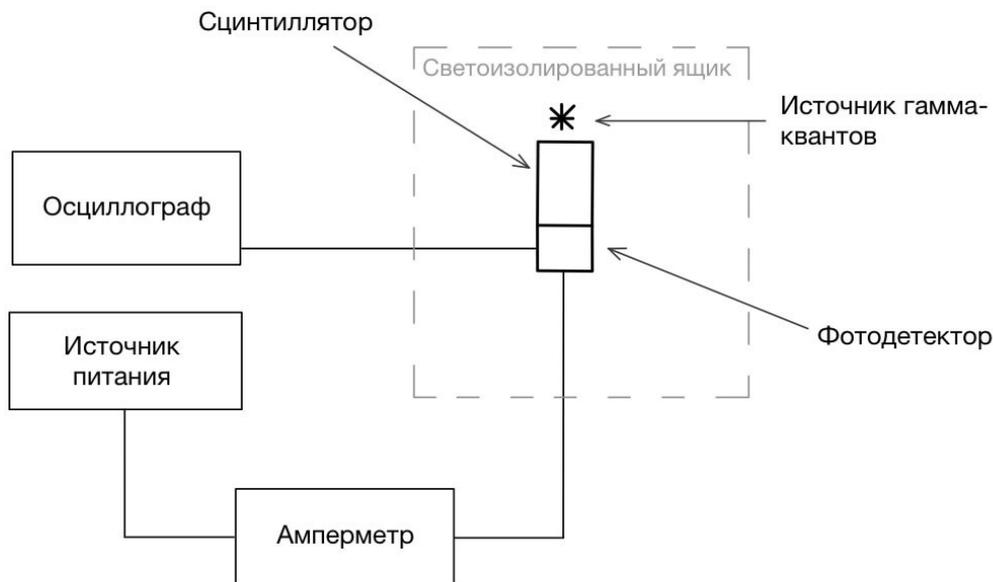


Рис. 1. Схема установки

3 Экспериментальная часть

Было проведено сравнение энергетического разрешения двух пар кристаллов GAGG(Ce), размер первой пары – $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$, второй пары – $3 \times 3 \times 5 \text{ мм}^3$. Также сравнивались показатели одного и того же сцинтиллятора без прогрева SIPM и с учетом прогрева.

Спектры с каждого кристалла (рис. 1,2,3) 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:

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

где δ – относительное энергетическое разрешение, $W = 2\sigma$, где σ – среднеквадратическое отклонение, x_c – положение максимума пика.

Ниже приводятся графики спектров ^{137}Cs с учетом пьедестала и таблицами параметров, используемых для вычисления энергетического разрешения, а также осциллограммы двух одинаковых кристаллов $3 \times 3 \times 3 \text{ мм}^3$.

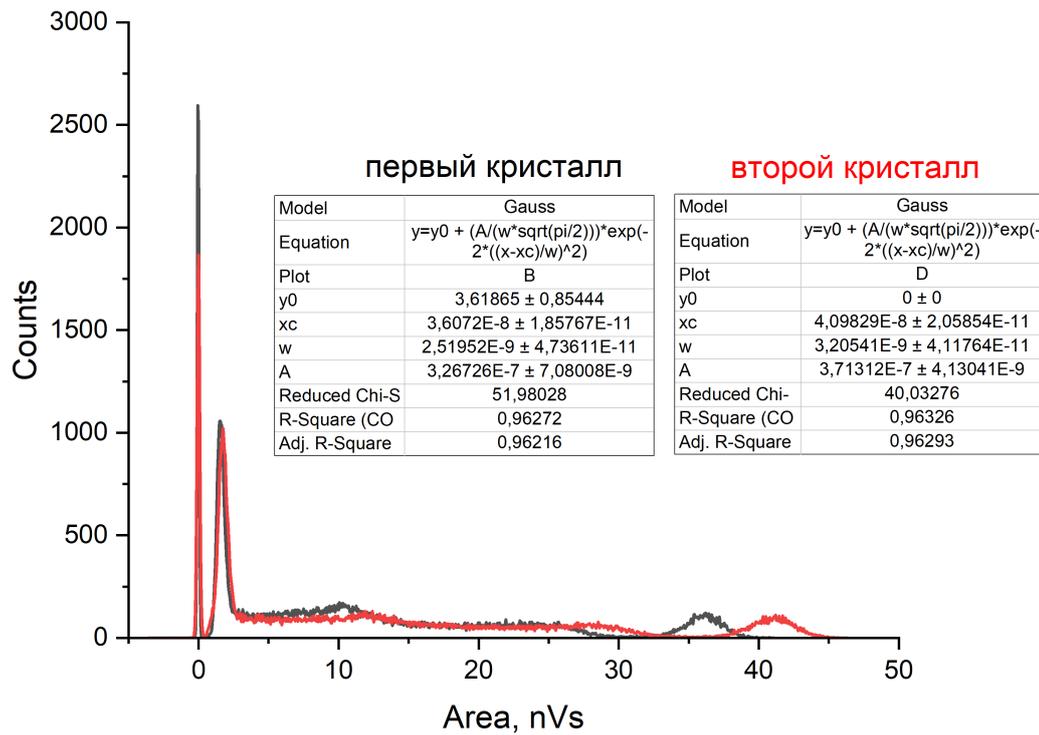


Рис. 2. GAGG 5×5×5 мм³

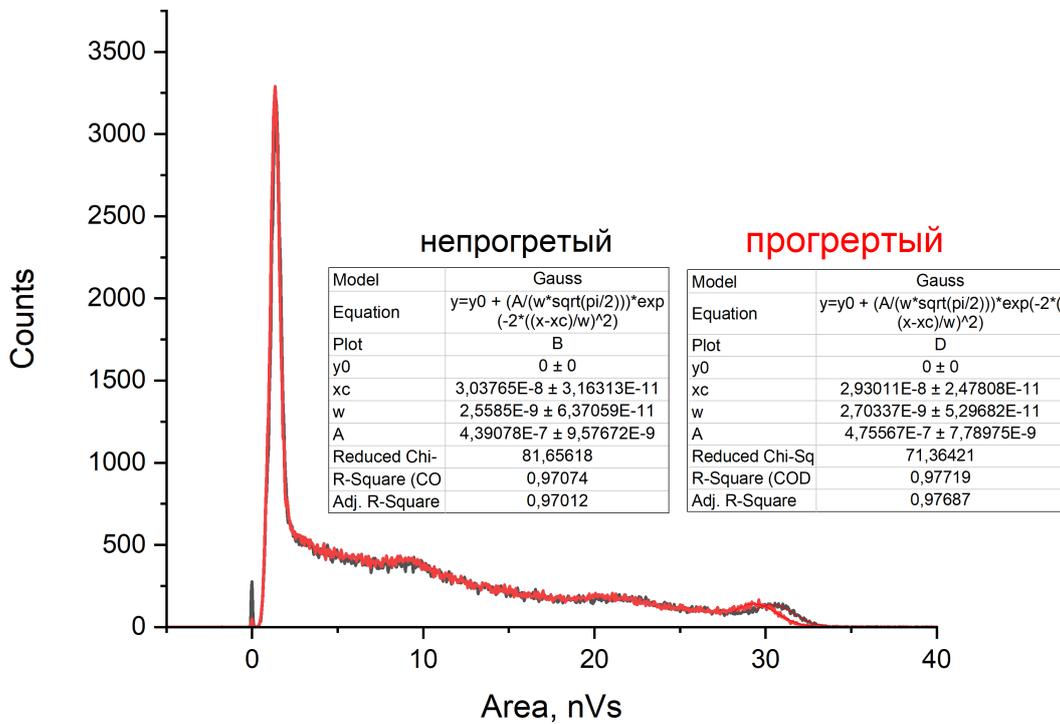


Рис. 3. GAGG 3×3×5 мм³

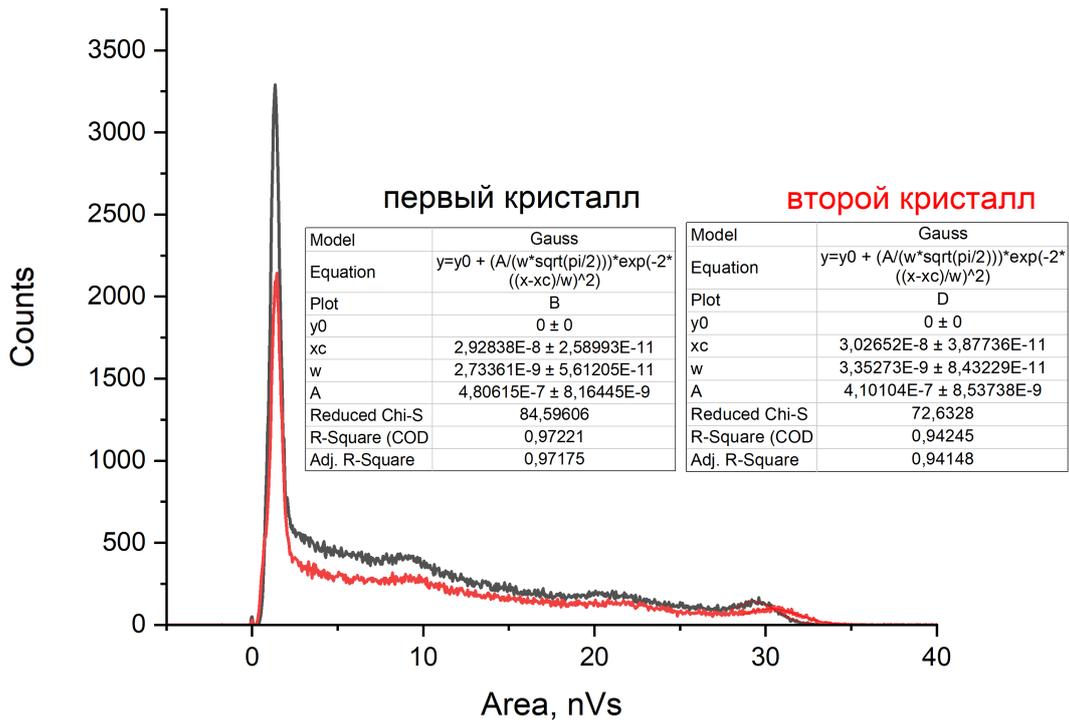


Рис. 4. GAGG 3×3×5 мм³

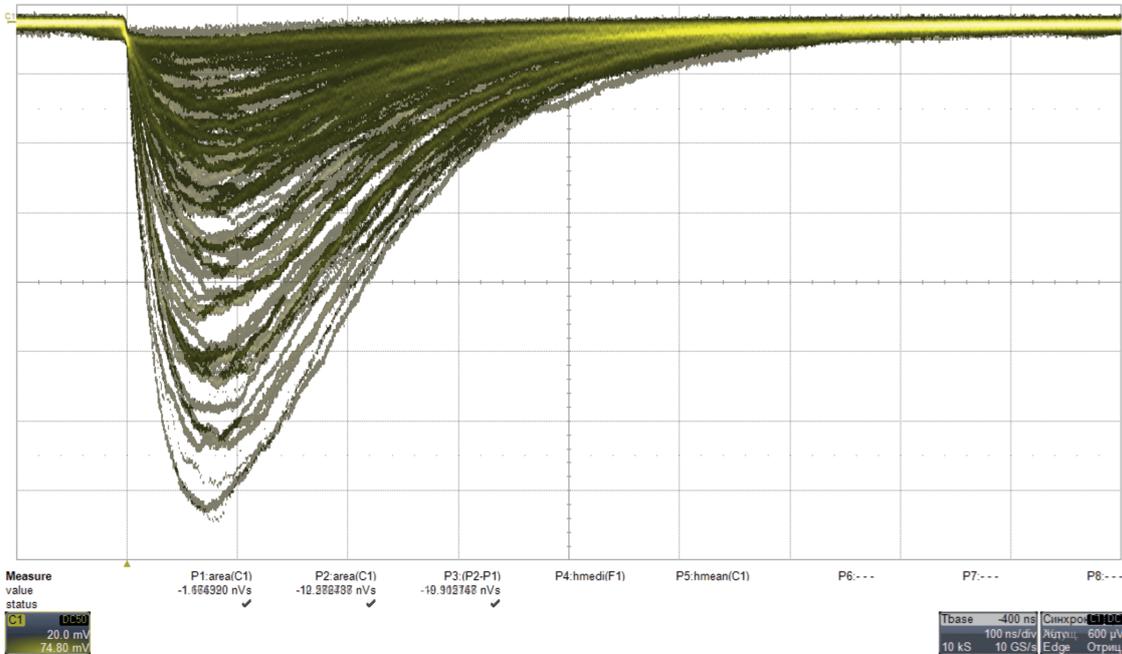


Рис. 5. Осциллограммы GAGG 3×3×5 мм³

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

Таблица 1. Результаты измерений

	Положение максимума, нВс	Энергетическое разрешение, %
GAGG1 5×5×5 мм ³	36.10 ± 0.02	8.6
GAGG2 5×5×5 мм ³	40.98 ± 0.02	9.2
GAGG1 3×3×5 мм ³ (непрогретый)	30.38 ± 0.03	10
GAGG1 3×3×5 мм ³ (прогретый)	29.30 ± 0.02	11
GAGG2 3×3×5 мм ³ (прогретый)	30.27 ± 0.04	13

Анализ таблицы и осциллограмм позволяет сделать следующие выводы:

- кристаллы 5×5×5 мм³: положение максимума пика второго кристалла оказалось дальше максимума пика первого кристалла, оданко разрешение первого оказалось лучше второго
- кристаллы 3×3×5 мм³: положение максимума пика второго кристалла оказалось чуть дальше максимума пика первого кристалла, оданко разрешение первого оказалось лучше второго
- прогревание SiPM не оказало существенного влияния на сравниваемые характеристики
- осциллограммы: величины заднего фронта двух одинаковых кристаллов совпали, поэтому время высвечивания является одинаковым, следовательно, концентрация легирующей примеси также одинакова

Причинами расхождения могут являться качество отражающего покрытия кристаллов, качество оптического контакта между кристаллами и фотодетектором, а также прозрачность кристалла к собственному излучению (в работе не измерялась).

4 Заключение

В ходе работы проведено сравнение показателей положения максимума пика полного поглощения и энергетического разрешения двух разных пар одинаковых сцинтиляционных кристаллов GAGG(Ce) размерами $5 \times 5 \times 5 \text{ мм}^3$ и $3 \times 3 \times 5 \text{ мм}^3$, обмотанных тефлоновой лентой. Максимальное расхождение в энергетическом разрешении у одинаковых кристаллов достигло 2%, а расхождение в положении максимума достигло 12%. Причинами расхождения могут являться качество отражающего покрытия кристаллов, качество оптического контакта между кристаллами и фотодетектором, а также прозрачность кристалла к собственному излучению (в работе не измерялась). Температурные эффекты не объясняют данное расхождение. Предположение о разной концентрации легирующей примеси церия подтвердить не удалось.

Список литературы

- [1] Р. Ю. Шендрик. *Введение в физику сцинтилляторов*. 1. ИГУ, Иркутск, 2013.
- [2] Е. А. Раджабов Р. Ю. Шендрик. *Введение в физику сцинтилляторов*. 2. ИГУ, Иркутск, 2014.