

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»  
(НИЯУ МИФИ)

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА №40 «ФИЗИКА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ»

УДК 539.1.05

**ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
ИЗМЕРЕНИЕ СВЕТОВОХОДА СЦИНТИЛЛЯТОРА  
GAGG(Ce) ПО ОТНОШЕНИЮ К CSI(Tl)**

Студент

\_\_\_\_\_ А. А. Козлов

Научный руководитель,  
старший преподаватель

\_\_\_\_\_ Ф. А. Дубинин

Москва 2024

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>2</b>
<b>1 Теоретические сведения</b>	<b>3</b>
1.1 Сцинтиллятор CsI(Tl) . . . . .	3
1.2 Сцинтиллятор GAGG(Ce) . . . . .	4
<b>2 Определение относительного световыхода GAGG(Ce)</b>	<b>6</b>
2.1 Используемое оборудование и установка . . . . .	6
2.2 Изучение линейности SiPM с сцинтилляционным кристаллом CsI(Tl) . . . . .	7
2.3 Расчёт коэффициента согласования для фотопрёмника и сцинтиллятора . . . . .	8
2.4 Анализ полученных результатов . . . . .	9
<b>3 Заключение</b>	<b>11</b>

# ВВЕДЕНИЕ

В современных экспериментах в области физики элементарных частиц важным рабочим инструментом являются сцинтилляционные кристаллы, позволяющие регистрировать ионизирующее излучение при помощи фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Изучение различных источников излучения предполагает использование множества разновидностей органических и неорганических сцинтилляторов для наиболее точной регистрации событий, возникающих при прохождении через сцинтиллятор частиц с определённой энергией.

Одним из широко используемых неорганических сцинтилляторов, используемых для работы с радиоактивными источниками, является кристалл CsI(Tl), характеристики которого подвергались многократному измерению и изучению. Однако в последние несколько лет активно начал применяться сцинтиллятор GAGG(Ce) [1], имеющий ряд преимуществ в сравнении с остальными неорганическими сцинтилляторами, что делает его интересным материалом для использования в качестве рабочего вещества сцинтилляционных детекторов.

В данной работе исследуется световыход для сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов CsI(Tl) и GAGG при работе в связке с фотодетектором SiPM, определяется относительный световыход сцинтилляционного кристалла GAGG относительно кристалла CsI(Tl).

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

## 1.1. СЦИНТИЛЛЯТОР CsI(Tl)

Кристаллы йодида цезия или CsI(Tl), активированные таллием, являются одним из самых ярких сцинтилляторов. Максимум широкого излучения расположен на длине волны 550 нм, что обеспечивает хорошее считывание с фотодиода. CsI(Tl) гигроскопичен с пластическими механическими свойствами [2].

Характеристики сцинтиллятора	CsI(Tl)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	4.51
Световыход, ф/МэВ	52000
Длина волны с максимумом излучения, нм	560
Время высвечивания, нс	1000
Гигроскопичность	+

Таблица 1.1 — Характеристики сцинтиллятора CsI(Tl)

Одна их ключевых проблем кристаллов CsI(Tl) - их гигроскопичность. Со временем световыход кристалла может измениться под действием внешней среды, что приведёт к ухудшению качества получаемых данных.

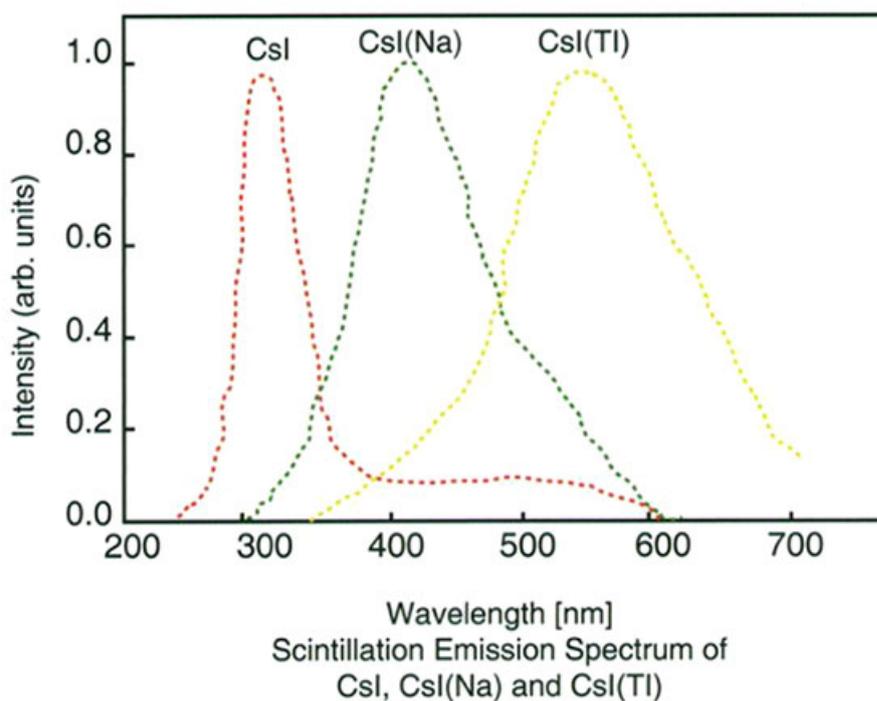


Рисунок 1.1 — Спектр высвечивания кристаллов семейства CsI

## 1.2. СЦИНТИЛЛЯТОР GAGG(Ce)

Сцинтиллятор GAGG(Ce) качественно выделяется на фоне прочих сцинтилляционных кристаллов высоким световыходом, большим энергетическим разрешением, а также сравнительно малым временем высвечивания. Также к преимуществам GAGG(Ce) можно отнести негигроскопичность кристалла и отсутствие собственного радиоактивного фона [3].

Характеристики сцинтиллятора	GAGG(Ce)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	6.63
Световыход, ф/МэВ	38000
Длина волны с максимумом излучения, нм	530
Время высвечивания, нс	92
Гигроскопичность	-

Таблица 1.2 — Характеристики сцинтиллятора GAGG(Ce)

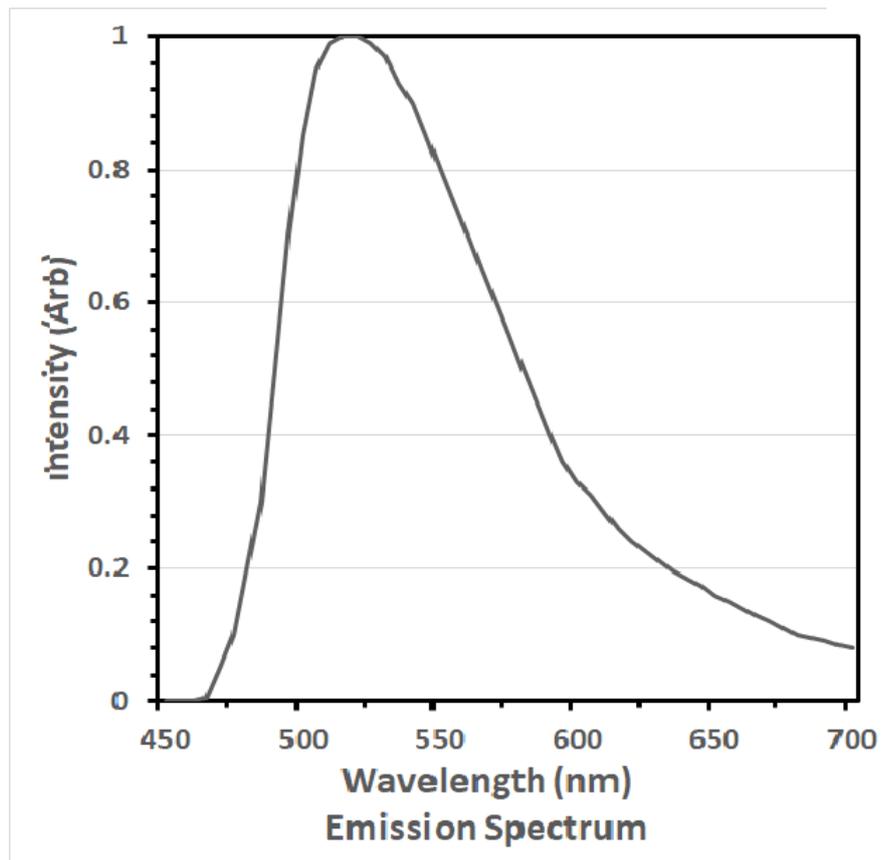


Рисунок 1.2 — Спектр высвечивания сцинтиллятора GAGG(Ce)

Главным же недостатком GAGG(Ce) является его цена в сравнении с конкурентами, обусловленная сложностью выращивания кристалла в лабораторных условиях.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СВЕТОВОХОДА GAGG(CE)

### 2.1. ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И УСТАНОВКА

В ходе исследования относительного световыхода сцинтиллятора GAGG(Ce) использовался кристалл размерами 3x3x12 мм с светоотражающим покрытием на боковых сторонах для улучшения световыхода.

Размеры сцинтилляционного кристалла CsI(Tl) - 3x3x15 мм

В качестве фотоприёмника использовался кремниевый фотоумножитель (SiPM) компании «Onsemi» из линейки C-series, работавший в режиме перенапряжения на 2.5В. Зависимость эффективности регистрации фотонов SiPM данной серии представлена ниже.

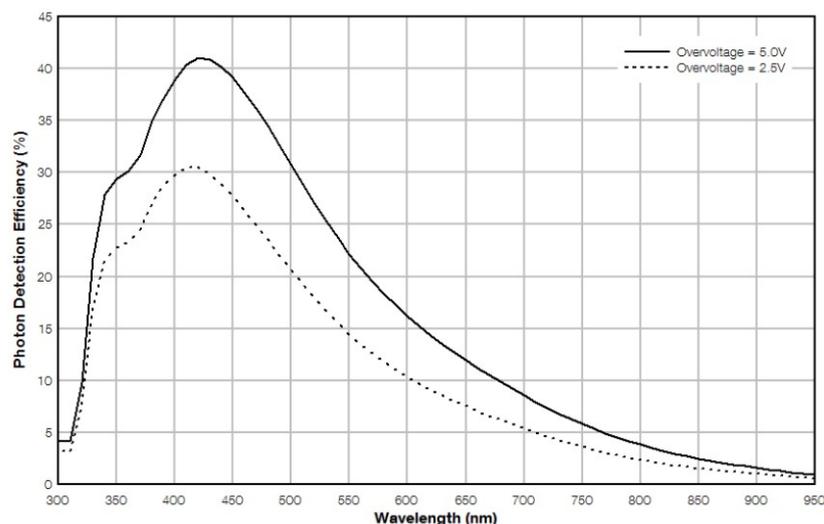


Figure 3. PDE versus Wavelength  
(MicroFC-30035-SMT)

Рисунок 2.1 — Зависимость эффективности регистрации фотонов для SiPM серии MicroFC-30035-SMT

В качестве приёмника сигнала, поступающего с SiPM, использовался осциллограф Teledyne LeCroy 620Zi.

## 2.2. ИЗУЧЕНИЕ ЛИНЕЙНОСТИ SiPM С СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫМ КРИСТАЛЛОМ CsI(Tl)

Первой задачей для определения относительного световыхода сцинтиллятора GAGG(Ce) являлась проверка фотодетектора на линейность выходного сигнала относительно известных энергий излучения радиоактивных источников в связке с конкретным сцинтиллятором. Исследование данного аспекта работы фотоприёмника необходимо для правильного вычисления световыхода сцинтилляционных кристаллов. С этой целью были собраны спектры излучений для таких источников, как Na-22, Co-60, Cs-137, Am-241 при перенапряжении SiPM в 2.5 В.

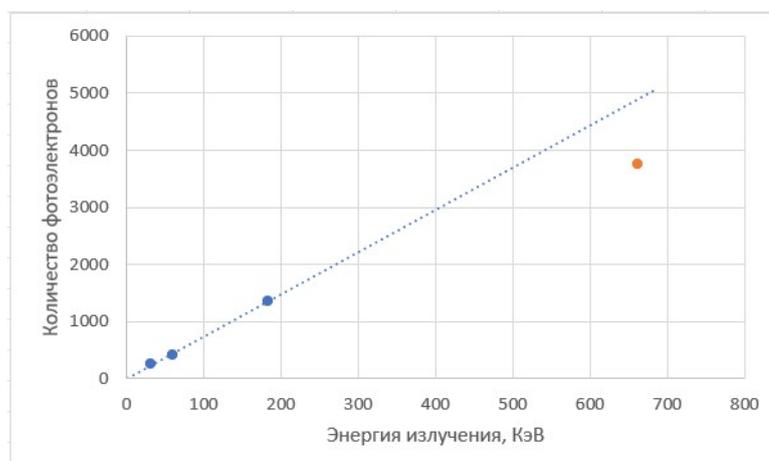


Рисунок 2.2 — График зависимости количества фотоэлектронов от энергии излучения радиоактивного источника для SiPM MicroFC-30035-SMT

На полученном графике видно, что наиболее близкая к ожидаемой линейной зависимости аппроксимация получается при проведении прямой через точки, соответствующие характерному спектру Am-241, 26.3 КэВ и 59.5 КэВ соответственно. Исходя из этого факта, наиболее подходящим набором данных для вычисления световыхода сцинтиллятора CsI(Tl) будет являться спектр Am-241.

## 2.3. РАСЧЁТ КОЭФФИЦИЕНТА СОГЛАСОВАНИЯ ДЛЯ ФОТОПРЁМНИКА И СЦИНТИЛЛЯТОРА

Немаловажным аспектом в определении световыхода сцинтиллятора является согласованность спектра высвечивания материала кристалла и эффективности фотонной регистрации у фотоприёмника. Для учёта этой характеристики вводится коэффициент согласования для пары «сцинтиллятор-фотоприёмник», вычисляющийся по следующей формуле [4]:

$$K = \frac{\int F(\lambda) * \epsilon(\lambda) d\lambda}{\int F(\lambda) d\lambda} \quad (2.1)$$

$F(\lambda)$  - спектр высвечивания сцинтиллятора

$\epsilon(\lambda)$  - спектральная характеристика сцинтиллятора

Необходимость использования данного коэффициента обуславливается неодинаковым диапазоном спектров высвечивания сцинтилляционных кристаллов, а также различным положением пиков высвечивания относительно графика эффективности регистрации фотонов кремниевым фотоприёмником.

Для сцинтиллятора на основе кристалла CsI(Tl) было получено следующее значение коэффициента согласования:

$$K_{CsI(Tl)} = 0.152$$

Для сцинтиллятора на основе кристалла GAGG(Ce) было получено значение коэффициента согласования:

$$K_{GAGG} = 0.150$$

Используя известные значения световыхода сцинтилляционных кристаллов с учётом их корректировки на послеимпульсы (afterpulsing) и кросстоки [5], получим следующие значения истинного световыхода:

$$LY_{CsI(Tl)} = 46882 \frac{photons}{MeV}$$

$$LY_{GAGG(Ce)} = 19000 \frac{photons}{MeV}$$

Тогда относительный световыход сцинтиллятора GAGG(Ce) относительно сцинтиллятора CsI(Tl) будет равен

$$\frac{LY_{GAGG(Ce)}}{LY_{CsI(Tl)}} = 0.405 \quad (2.2)$$

## 2.4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравним полученные значения световыхода для сцинтилляторов CsI(Tl) и GAGG(Ce) с заявленными производителем значениями:

	Расчётное значение	Заявленное значение	$\epsilon$ , %
CsI(Tl)	46882	52000	9.84
GAGG(Ce)	19000	38000	50

Таблица 2.1 — Сравнение расчётного световыхода с заявленным производителем для кристаллов CsI(Tl) и GAGG(Ce)

Таким образом, мы можем наблюдать удовлетворительную точность в измерении световыхода у сцинтилляционного кристалла CsI(Tl) и значительную погрешность при измерении световыхода кристалла GAGG(Ce).

Результаты, полученные для CsI(Tl), позволяют сделать вывод о применимости описанной в работе методики для определения световыхода данного сцинтиллятора. Наблюдаемое расхождение с заявленным производителем значением световыхода может быть обусловлено возникновением дефектов в кристалле из-за его гигроскопичности.

Несовпадение результатов эксперимента, полученных для GAGG(Ce), с ожидаемыми теоретическими значениями требует дополнительного теоретического объяснения. Одной из гипотез, объясняющих наблюдаемые различия, является гипотеза о значительном внутреннем поглощении фотонов сцинтилляционным кристаллом. В качестве инструмента опроверже-

ния или доказательства данной гипотезы может быть использовано компьютерное моделирование.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проводилось исследование относительного световыхода кристалла GAGG(Ce) относительно кристалла CsI(Tl).

Для наиболее точного определения световыхода CsI(Tl) в связке с кремниевым фотоумножителем MicroFC-30035-SMT была проверена линейность зависимости фотоэлектронов от энергии излучения. По результатам измерений было принято решение определять световыход сцинтиллятора с помощью спектра Am-241.

Были найдены коэффициенты согласования для сцинтилляторов GAGG(Ce) и CsI(Tl) с кремниевым фотоумножителем MicroFC-30035-SMT (2.1). Были получены значения световыхода для каждого из кристаллов, посчитан относительный световыход кристалла GAGG(Ce) относительно кристалла CsI(Tl):

$$\frac{LY_{GAGG(Ce)}}{LY_{CsI(Tl)}} = 0.405$$

Полученные значения световыхода для сцинтиллятора GAGG(Ce) значительно отличается от заявленного производителем значения, что требует дополнительного объяснения. Причина расхождений может находиться в физических свойствах кристалла GAGG(Ce) [6].

Дальнейшее развитие данного метода вычисления световыхода сцинтиллятора GAGG(Ce) заключается в разработке модели сцинтилляционного детектора в специализированной среде для моделирования, что позволит понять механизм внутренних потерь фотоэлектронов в корпусе сцинтиллятора. Понимание данного механизма даст возможность учесть все необходимые факторы для точного определения световыхода кристалла GAGG(Ce).

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Yao Zhu, Sen Qian, Zhigang Wang, Hao Guo, Lishuang Ma, Zhile Wang, Qi Wu, Scintillation properties of GAGG:Ce ceramic and single crystal, Optical Materials, Volume 105, 2020,
- [2] <https://www.epic-crystal.com/scintillation-crystals/csi-crystal.html>
- [3] <https://newpiezo.com/knowledgebase/crystals/gagg-ce/>
- [4] Шендрик Р. Ю. Введение в физику высоких энергий. Введение в физику сцинтилляторов. т. 105. — Мир, 2013.
- [5] SensL. Introduction to SiPM. — 02/2017.
- [6] M. Yoneyama and J. Kataoka and M. Arimoto and T. Masuda and M. Yoshino and K. Kamada and A. Yoshikawa and H. Sato and Y. Usuki Evaluation of GAGG:Ce scintillators for future space applications. Journal of Instrumentation, Volume 13, February 2018