

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

УДК 539.1

ОТЧЁТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ  
**ИЗМЕРЕНИЕ ПРОЗРАЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ  
СМАЗОК И КЛЕЕВ ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ  
ДЕТЕКТОРОВ**

Научный руководитель  
старший преподаватель  
старший научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт»

\_\_\_\_\_ И. Н. Мачулин

Студент

\_\_\_\_\_ А. Д. Конотоп

Консультант  
старший преподаватель

\_\_\_\_\_ Ф. А. Дубинин

Москва 2023

# Оглавление

<b>Введение</b>	<b>3</b>
1 Сцинтилляционные детекторы . . . . .	3
1.1 Сцинтилляционные материалы . . . . .	3
1.2 Фотоумножители . . . . .	5
2 Описание установки . . . . .	7
2.1 Аппаратура CAEN . . . . .	9
2.2 Контроль температуры . . . . .	9
3 Экспериментальная часть . . . . .	11
3.1 Исследование зависимостей для каналов ПЭТ . . . . .	11
3.2 Исследование зависимости интенсивности излучения источника от светопроводящего материала . . . . .	14
4 Заключение . . . . .	19
Список используемых источников . . . . .	20

# ВВЕДЕНИЕ

Позитронно-эмиссионная томография (сокр. ПЭТ) – метод исследования биохимических и физиологических процессов при помощи введения в организм человека или животного позитрон-излучающего изотопа с последующим измерением аннигиляционного излучения методом совпадений. [1] С помощью данного метода проводится изучение фармакинетики меченых препаратов, а также влияние этих препаратов на метаболизм. Оценка его отклонений от нормы позволяет получить представление о биологических процессах, ответственных за различные заболевания.

Для детального наблюдения за поведением препарата внутри организма применяются специальные установки – позитронно-эмиссионные томографы. Первые изыскания в этой области начались в конце 50-х годов двадцатого века Дэвидом Кулом. В настоящий момент, согласно данным ВОЗ, в Европе насчитывается около пяти сотен установок, в России – 24. [2]

В рамках лаборатории физики редких процессов отделения физики Нейтрино НИЦ «Курчатовский институт» собран макет позитронно-эмиссионного томографа на базе специализированной тестовой платы Petiros 2A, а позднее для тестирования его каналов – установка для тестирования кремниевых умножителей и сцинтилляционных кристаллов совместно с Н. Бойко. [3]

В данной работе были продолжены исследования характеристик макета позитронно-эмиссионного томографа для уточнения факторов, влияющих на светосбор с каналов установки, а также пути его улучшения.

## 1. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Одним из элементов большинства установок по изучению частиц являются детекторы. Существует огромный спектр подобных приборов, разработанных под определённые задачи: искровые камеры для изучения треков частиц, счётчик Гейгера для подсчёта количества частиц, масс-спектрографы для изучения концентрационного состава веществ.

Для регистрации частиц и  $\gamma$ -квантов активно применяются сцинтилляционные детекторы. Они представляют собой сборку из сцинтилляционного материала, излучающего свет при прохождении через него частиц, и фотоумножителя, реагирующего на световой сигнал, усиливая его.

### 1.1. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сцинтилляционные вещества, как было сказано, реагируют на проходящие через него потоки частиц, излучая некоторое количество фотонов, обычно пропорциональное энергии пролетающей частицы. Благодаря данному

эффекту появляется возможность получать энергетические спектры. Существует большое количество сцинтилляционных материалов: пластиковые сцинтилляторы, характеризующиеся высоким световыходом и малым временем высвечивания, газовые сцинтилляторы из азота и благородных газов, имеющие ещё более короткое время высвечивания. Особое место занимают неорганические сцинтилляционные кристаллы, для которых характерен высокий световыход и отличное энергетическое разрешение, что позволяет говорить о энергетических характеристиках исследуемых частиц и, соответственно, высокоточно разделять их по энергиям. В таблицах 1 и 2 приведены интересные нас характеристики некоторых сцинтилляционных материалов.

Таблица 1 — Характеристики сцинтилляторов [4] \*среднее значение

Сцинтиллятор	плотность $\frac{g}{cm^3}$	Время высвечивания, нс	Световыход, $\frac{ph}{MeV}$
Полистирол	1.05	5	0.1
GAGG(Ce)	6.63	87(90%)255(10%)	56*

В качестве сцинтиллятора применяется сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce)\* (*гадолиний-алюминий-галлиевый гранат, активированный ионами церия*). Одними из главных его особенностей являются: высокая плотность, так как при увеличении этого параметра кристалла кванты эффективнее теряют энергию в материале в силу прямой зависимости этих величин, позволяя детектировать кванты высоких энергий, высоким коэффициентом ослабления излучения, а также с достаточно высоким световыходом ( $\sim 56000 \text{ ph/MeV}$ ,  $T = 293K$ ), что позволяет более точно измерять энергию падающих на него  $\gamma$ -квантов.

Как видно из таблицы 2, в сравнении с более традиционными сцинтилляторами, такими как NaI(Tl), CsI(Tl), или более современным его прямым конкурентом в лице LYSO(Ce), выбранный нами кристалл не только не хуже, но и превосходит аналоги по многим параметрам. Кроме того, GAGG(Ce), как более новый среди остальных, является интересным с точки зрения изучения его характеристик. Отдельно хочется отметить, что технология выращивания не является патентной, что позволяет свободно в полной мере производить и закупать данные кристаллы повсеместно, но вносит свои особенности в разброс характеристик (например, сильный разброс величины световыхода).

Таблица 2 — Сравнительные характеристики распространенных сцинтилляционных кристаллов. [5–8]

	CsI(Tl)	LYSO(Ce)	LaCl <sub>3</sub> (Ce)	NaI(Tl)	<b>GAGG(Ce)</b>
Плотность (г/см <sup>2</sup> )	4.51	7.2	3.85	3.67	6.63
Эффективный $Z_{eff}$ (атомный) номер	54	65	59.5	50	54.4
Длина вол- ны мах поглощения (нм)	550	420	350	415	520
Время вы- свечивания (нс)	1,050	40	28	230	87(90%)255(10%)
Световыход (фото- ны/кэВ)	54	32	49	38	56
Гигроско- пичность	Слегка	НЕТ	ДА	ДА	НЕТ
Собственная радиоактив- ность	НЕТ	ДА	НЕТ	НЕТ	ДА

## 1.2. ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

Вышедших из сцинтиллятора фотонов достаточно мало для прямой обработки аппаратурой. Для устранения этого недостатка применяются особые фотоприёмники, содержащие в своей конструкции умножители попадающих на них фотонов. Одним из подобных устройств являются фотоэлектронные умножители, представленный на рисунке 1.

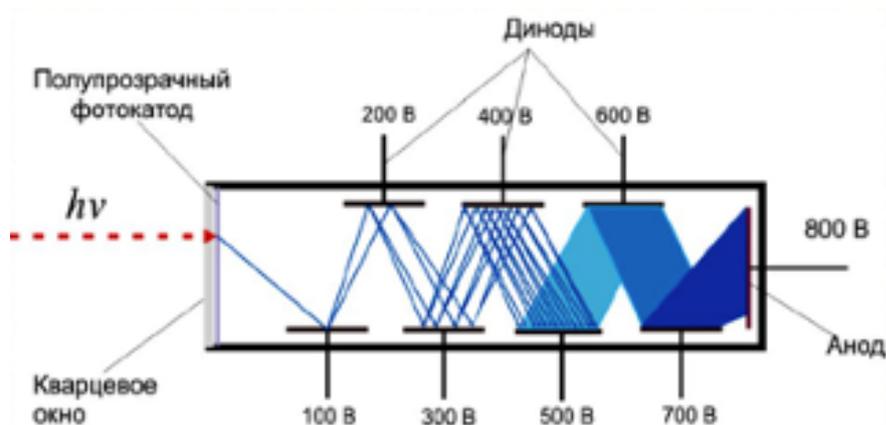
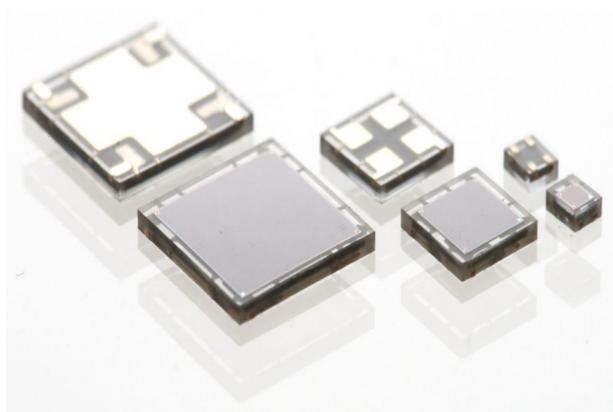


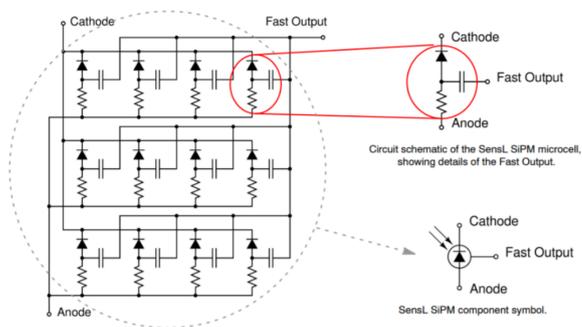
Рисунок 1 — Схема ФЭУ

Фотон проходит через кварцевое окно и, преодолевая полупрозрачный фотокатод, падает на динод, выбивая несколько фотоэлектронов, которые летят к следующему диноду и далее, пока волна фотоэлектронов в сотни тысяч раз большая, чем один фотон, не достигнет анода. Такие фотоприёмники, являются достаточно громоздкими, требуют сложных в изготовлении источников питания, а также являются достаточно хрупкими, из-за чего требуют в эксплуатации особой осторожности.

Современным решением в области детектирования слабых излучений являются кремниевые фотоумножители (SiPM), представленные ниже на рисунке 2.



а



б

Рисунок 2 — Кремниевый фотоумножитель от компании SensL (а) и принципиальная схема кремниевого фотоумножителя (б)

Данный фотоприёмник представляет из себя матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD), работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы Si-ФЭУ представлено на рисунке 2, у разных производителей схемы могут отличаться. В схеме резистивный элемент нужен для пассивного гашения лавины. За счёт своих малых габаритов и высокого коэффициента усиления (порядка  $10^6$ ) SiPM не только

приходит на замену ФЭУ во многих задачах, но и выходит за пределы применимости этого типа фотоприёмников и используется для детектирования различных слабых сигналов. [9]

## 2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Для проверки характеристик каналов макета позитронно-эмиссионного томографа было продолжено применение установки, разработанной в предыдущем семестре совместно с Надеждой Бойко и Филиппом Дубининым, а также для проверки оптических свойств метериалов создана новая на базе электронного такта CAEN.

На рисунке 3 представлена блок-схема установки, изготовленной в прошлом семестре. В подготовленный чёрный ящик помещается исследуемая сборка из сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Питание осуществляется внешним лабораторным источником питания, а в качестве источника сигнала может быть использован как изотоп, так и светодиод.

Сигнал с SiPM передаётся в электронный тракт на основе аппаратуры CAEN [10]. Данное оборудование создано специально для работы с различными кремниевыми фотоумножителями и является наиболее удобным и компактным из существующих решений. Так, сигнал с SiPM передаётся на усилитель, а затем раздваивается и направляется на дискриминатор, формирующий временные ворота, и анализатор импульсов, который также получает данные с дискриминатора. Такая сборка позволяет собирать как дифференциальные, так и интегральные спектры, а с прямым подключением к ЭВМ – отображать их в реальном времени в прилагаемом ПО.

Контроль температуры осуществляется при помощи термодатчика AM2302 на базе микроконтроллера Arduino nano, данные с которого также передаются на ЭВМ. При помощи сторонних пакетов программ производится анализ полученных данных.

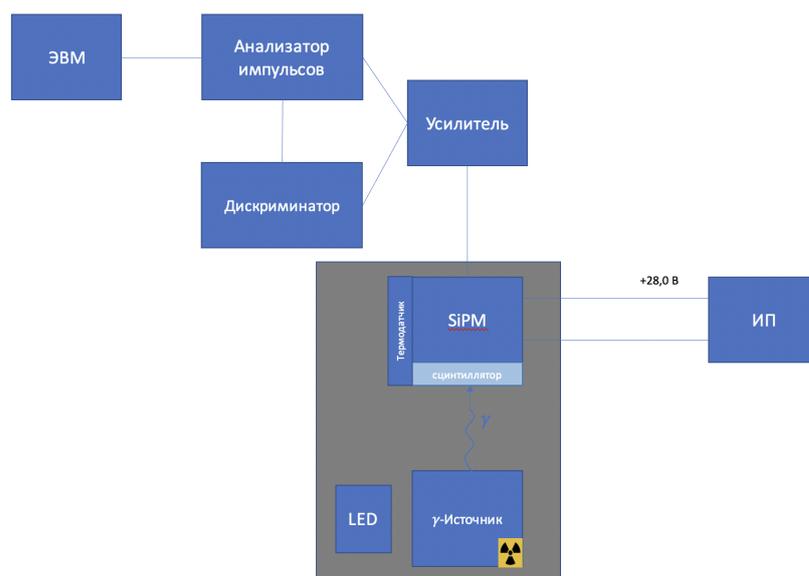


Рисунок 3 — Принципиальная схема установки для тестирования кремниевых фотумножителей и сцинтилляционных кристаллов

На рисунке 4, в свою очередь, представлена схема установки для исследования оптических свойств материалов. В светоизолированную кювету помещается исследуемый образец и облучается светом от светодиода (на схеме LED-driver), прошедшим через оптоволокно. Проходящий через исследуемый образец световой пучок улавливается кремниевым фотумножителем Hamamatsu MPPC S13360-1350CS, конструктивно схожим с аналогом от SensL.

Сигнал с SiPM передаётся на усилитель, а затем на дискриминатор, где формируются временные фотота. В дальнейшем сигнал передаётся на анализатор импульсов, триггером для которого служат сигналы с LED-драйвера. Данные с тракта отправляются в соответствующее ПО на компьютере, где отображается и обрабатывается в реальном времени.

Контроль температуры также осуществляется ранее описанной сборкой на базе микроконтроллера Arduino nano в паре с темодатчиком AM2302.

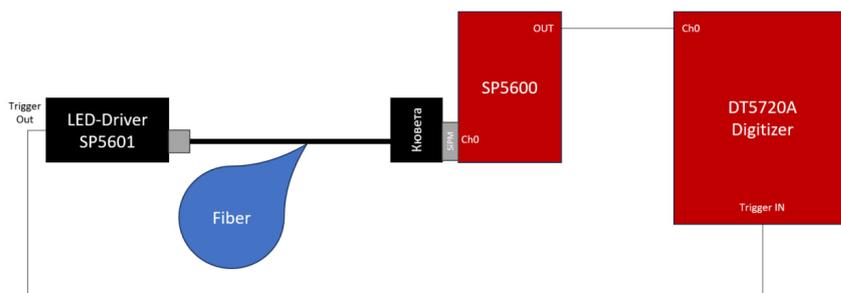


Рисунок 4 — Принципиальная схема установки для исследования оптических свойств материалов

## 2.1. АППАРАТУРА САЕН

### УСИЛИТЕЛЬ SP5600

SP5600 — это блок питания и усиления общего назначения, объединяющий до двух SiPM в материнскую и дочернюю архитектуру, что позволяет легко устанавливать и заменять датчики. Базовая конфигурация имеет два канала с независимой регулировкой усиления до 50 дБ и подает напряжение смещения (до 100 В) на датчики со стабилизацией усиления. Каждый канал может обеспечивать цифровой выходной сигнал, генерируемый быстрыми дискриминаторами переднего фронта. Также возможно совпадение по времени двух каналов. [10]

### АНАЛИЗАТОР ИМПУЛЬСОВ DT5720A

DT5720A — это 2-канальный 12-битный настольный анализатор импульсов формы волны  $250 \text{ MC/s}$  с несимметричным входным динамическим сигналом  $2 V_{pp}$  на коаксиальных разъемах MSX. Регулировка смещения постоянного тока (диапазон  $\pm 1 \text{ В}$ ) с помощью программируемых 16-битных ЦАП (по одному на каждый канал) позволяет правильно выбирать биполярный ( $V_{in} = \pm 1 \text{ В}$ ) вплоть до полного положительного ( $V_{in} = 0 \div +2 \text{ В}$ ) или отрицательного ( $V_{in} = 0 \div -2 \text{ В}$ ) качание аналогового входа без потери динамического разрешения.

Модуль оснащен тактовым входом на передней панели и PLL для синтеза тактового сигнала от внутренних/внешних опорных сигналов. Поток данных непрерывно записывается в кольцевой буфер памяти. Когда возникает срабатывание, FPGA записывает дополнительные N выборок для пост-срабатывания и замораживает буфер, который может быть прочитан через USB или оптический канал. Сбор данных может продолжаться без мертвого времени в новом буфере. [10]

## 2.2. КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

### ARDUINO NANO

Arduino (рисунок 5) представляет собой простейший микроконтроллер, построенный на восьмибитном микропроцессоре ATmega-328P с тактовой частотой 16МГц. За счёт своей простоты, малых размеров и дешевизны данные контроллеры позволяют применять его для простых и некоторых сложных задач. Например, Arduino можно применить в качестве контроллера мониторинга, а на самом деле и регулирования, микроклимата. [11]



Рисунок 5 — Arduino nano

Благодаря гибкости архитектуры данные с контроллера можно транслировать на ЭВМ через 232 интерфейс (COM), сохраняя и обрабатывая при помощи специально разработанного программного обеспечения.

### ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ AM2302

В качестве датчика температуры был использован AM2302 на рисунке 6, зарекомендовавший себя в других различных приборах на протяжении многих лет. Несмотря на отсутствие аккредитации в госреестре измерительных приборов из-за своей дешевизны, модуль является достаточно точным: после прогрева в течение 40–60 минут все приборы, принадлежащие одной партии не только показывают одинаковые параметры температуры и влажности, но и одинаково реагируют на отклонения в микроклимате с погрешностью в несколько раз меньшей, чем заявлено производителем. [12]



Рисунок 6 — Датчик AM2302

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для получения и обработки выходных данных с датчика было разработано специальное программное обеспечение для платформ под управлением операционной системы Windows (поддержка 32- и 64-разрядной версий). После получения сигнала с COM-порта последовательность данных расшифровывается, проверяется соответствие, пересчитывается контрольная сумма, и

подходящие для обработки данные сохраняются в отдельный файл, пригодный для обработки в стороннем программном обеспечении 7.

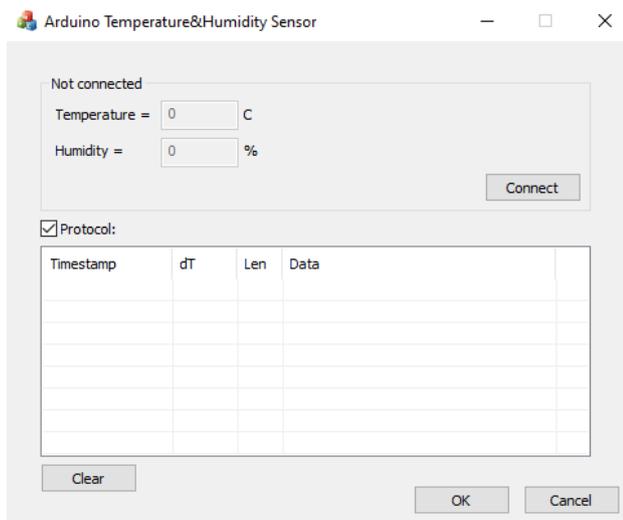


Рисунок 7 — Интерфейс разработанного программного обеспечения

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

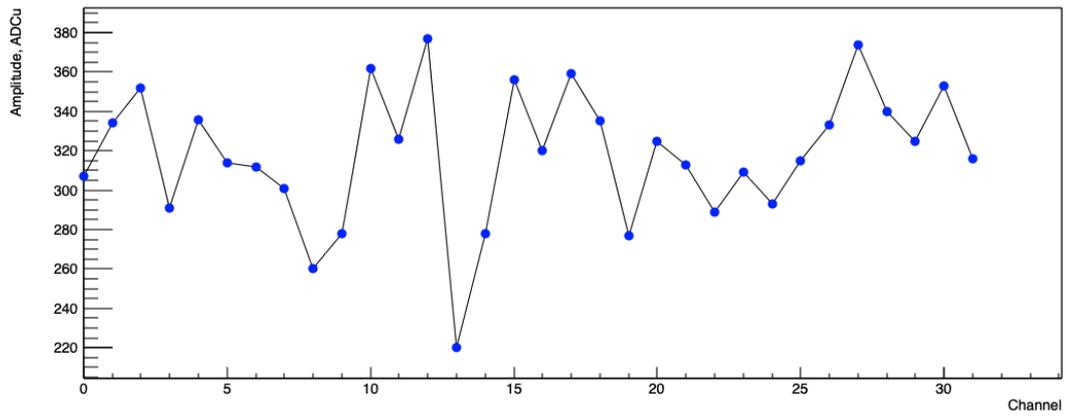
### 3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ КАНАЛОВ ПЭТ

Как было сказано выше, в прошлом семестре совместно с коллегами была разработана и проверена установка для тестирования кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных кристаллов, работа с которой была продолжена для исследования параметров каналов ПЭТ.

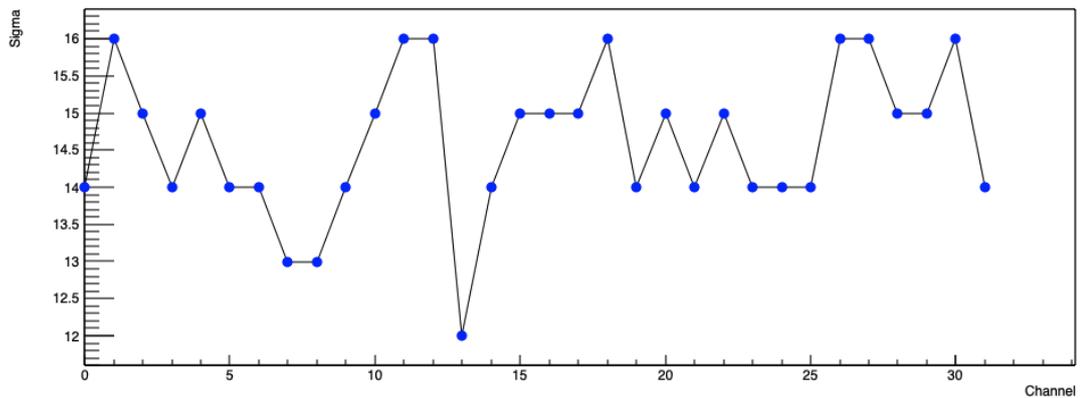
По итогам пятого семестра было получено [13], что распределение амплитуд сигнала и энергетические разрешения его пиков имеют сильные отклонения для некоторых из каналов установки, что отражено на рисунке 8.

В качестве предположений были выдвинуты несколько гипотез:

- Неоднородность SiPMов
- Неоднородность кристаллов
- Неоднородность сборок SiPM + кристалл



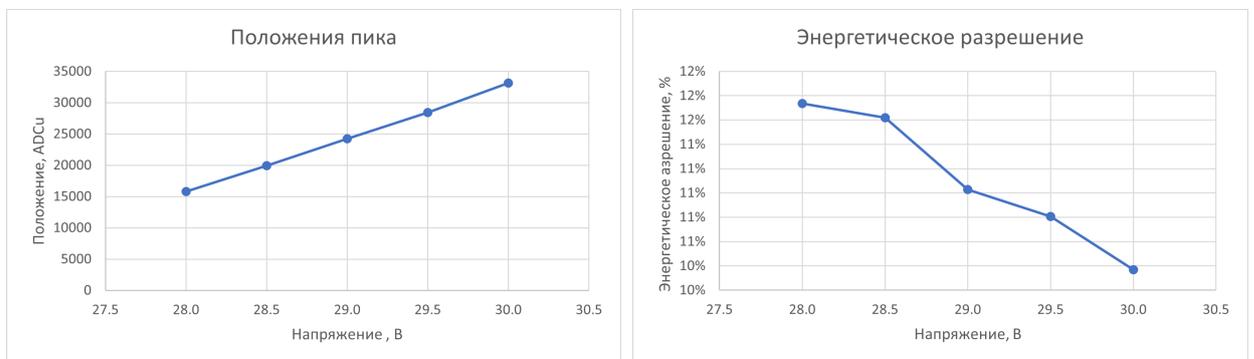
а



б

Рисунок 8 — Зависимость положения (а) и энергетического разрешения (б) пика от канала

Перед началом эксперимента для одной сборки SiPM+GAGG(Ce) было получено распределение величины амплитуды сигнала (положения пика) и энергетического разрешения от подаваемого на каналы напряжения, отражённое на рисунке 9.



а

б

Рисунок 9 — Зависимость положения (а) и энергетического разрешения (б) пика на сборке от подаваемого напряжения

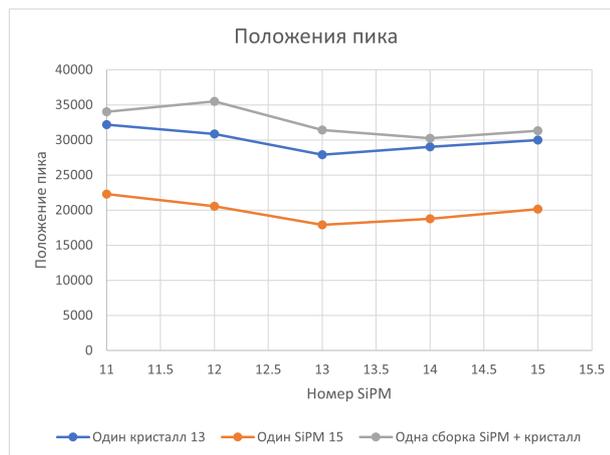
Как видно из полученных результатов, с ростом напряжения на SiPM положение пика линейно возрастает, а разрешение линейно ухудшается, как и ожидалось. Было подобрано оптимальное для работы значение напряжения, на котором и проводились дальнейшие измерения.

Чтобы убедиться в первоисточнике наших проблем были проведены несколько серий измерений. Для проверки предположения о неоднородности кремниевых фотоумножителей, для одного кристалла (с канала номер 13) была снята зависимость величины амплитуды сигнала (положения пика) сигнала и энергетического разрешения детекторной сборки в зависимости от кремниевого фотоумножителя в диапазоне каналов с 11 по 15.

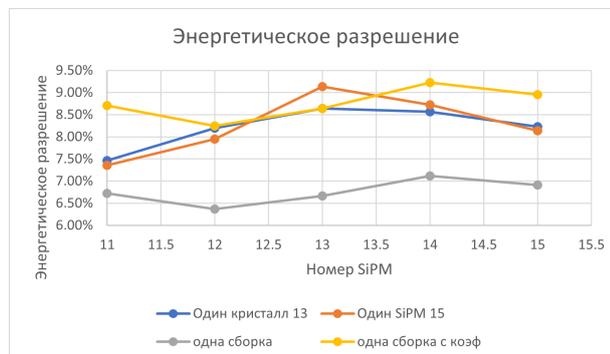
Для проверки предположения о неоднородности кристаллов, для выбранного кремниевого фотоумножителя (с канала №15) были произведены аналогичные измерения на кристаллах с тех же каналов.

Для проверки же вопроса неоднородности самихборок, для каждой из них с тех же каналов с 11 по 15 были проведены аналогичные измерения зависимостей амплитуд и энергетических разрешений отборок.

Результаты измерений отражены на рисунке 10:



а



б

Рисунок 10 — Зависимость положения (а) и энергетического разрешения (б) пика сигнала в зависимости от сборки (обозначены цветами)

Как видно из полученных распределений, для каждого из случаев

положение пика отказывается достаточно однородным, колебания значений могут быть отнесены к флуктуациям и могут быть аппроксимированы прямыми вида  $y = const$ . Аналогичное заключение можно сделать и касательно распределения энергетических разрешений: значения для конкретной серии слабо отклоняются друг от друга и в целом колеблются вокруг одного значения.

На основе собранных данных и проделанных вычислений было установлено, что сделанные нами ранее предположения касательно полученных на экспериментальной установке выбросов по положению пика и энергетическому разрешению каналов, вообще говоря, никак не объясняют таковые и даже напротив являются достаточно стабильными в рамках серии измерений.

### 3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИСТОЧНИКА ОТ СВЕТОПРОВОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛА

Не обнаружив особых отклонений в зависимостях, выбранных в качестве основных гипотез, было сделано предположение, что основной причиной расброса данных, отражённого на рисунке 8, может служить плохой оптический контакт.

Конструкция макета ПЭТ [14] не предусматривает крепкую фиксацию сцинтиллятора в направляющем канале, в связи с чем существует возможность сдвига кристалла относительно чувствительной части фотомножителя и, соответственно, потеря света, необходимого для регистрации частиц и измерения их энергии. Изготовленный же ранее нами стенд позволял точно позиционировать сцинтиллятор на SiPMе благодаря оптической смазке и вертикальной конструкции сборки, в связи с чем проблем с потерей света практически не наблюдалось.

В связи с этим было принято решение соединить кремниевый фотомножитель с сцинтилляционным кристаллом при помощи специального оптического клея, что позволит не только создать крепкую конструкцию с отсутствием вероятного сдвига, но и согласовать коэффициенты преломления. В то же время, необходимо было понять, как само вещество клея или любого другого материала, с помощью которого производится оптический контакт, повлияет на интенсивность света, улавливаемого фотомножителем.

Основные световые потери на границе раздела двух сред обусловлены так называемым *френелевским отражением*, в результате которого часть энергии волны пересекает границу, а другая отражается и идёт в обратном направлении. В условиях нашего эксперимента можно ограничиться

случаем нормального падения волны на поверхность раздела с коэффициентами преломления  $n_1$  и  $n_2$ . На втором курсе в рамках общей физики раздела "Оптика" [15] мы изучали поведение электромагнитной волны на границе раздела двух сред, где для случая нормального падения получали зависимость коэффициента отражения и пропускания от коэффициента преломления двух сред в виде:

$$\rho(n_1, n_2) = \left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (1)$$

$$\tau(n_1, n_2) = n_1 n_2 \left( \frac{2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2)$$

Эта зависимость описывает энергетические потери на одной поверхности раздела, по этому в нашем случае для двух границ интенсивность света, прошедшего через границу будет пропорциональна величине:

$$I \sim \tau^2 = n_1^2 n_2^2 \left( \frac{2}{n_1 + n_2} \right)^4 \quad (3)$$

В качестве исследуемых контактирующих сред были использованы приборные стёкла, изготовленные из силикатного стекла с показателем преломления  $n_1 = 1.52$ , изготавливаемого китайской компанией Yancheng Huida Medical Instruments. В качестве материалов для исследования был предложен воздух ( $n_2 = 1.0004$ ), оптическая смазка Pate7 ( $n_2 = 1.41$ ), оптическая смазка DOWSIL Q2-3067 ( $n_2 = 1.47$ ), оптический клей ОК-72ФТ15 ( $n_2 = 1.55$ ) клей СКТН-Мед ( $n_2 = 1.61$ ). При этом теоретическая зависимость для приборных стёкол отражена на рисунке 11

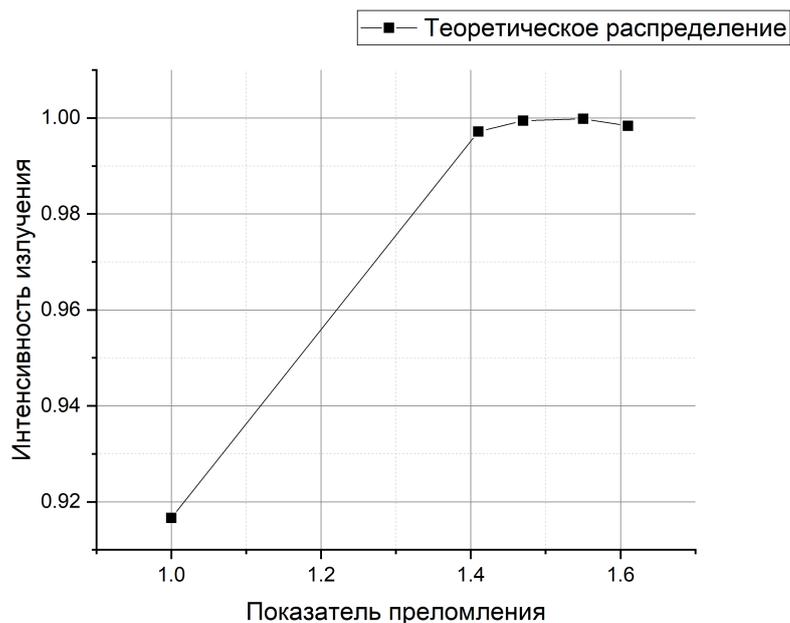
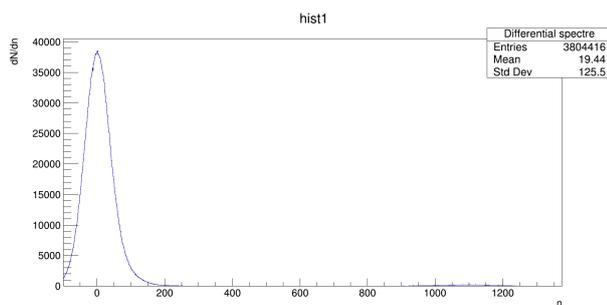


Рисунок 11 — Зависимость интенсивности излучения от показателя преломления среды

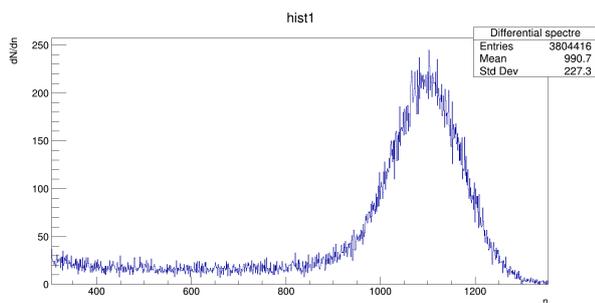
Чтобы проверить совпадает ли наше предположение с реальностью, был создан испытательный стенд, изображённый на рисунке 4, описанный выше.

Для начала необходимо было подготовить недостающие детали для установки, а именно – изготовить кювету, в которую будут помещаться исследуемые образцы. Она представляет собой прямоугольный параллелепипед с двумя отверстиями с разъёмами для светофильтра и кремниевого фотоумножителя, а также фиксирующей части для исследуемого образца. Кювета изготовлена из светонепроницаемого материала и дополнительно укутывается в плотную blackout-ткань, чтобы исключить проникновение нежелательного света.

В первой серии измерений на низкой яркости был произведён набор данных на высокой частоте работы ультрафиолетового светодиода при малой яркости для проверки зависимости интенсивности детектируемого излучения от количества стёкол с воздушной прослойкой, один из спектров представлен на рисунке 12.



а



б

Рисунок 12 — Однофотонный спектр (а) и его исследуемый пик (б) для сборки из трёх стёкол

При данном методе положение пика не меняется, так как длина волны, на которой излучает светодиод остаётся постоянной, а отношение площади под ним к общей будет пропорционально интенсивности детектируемого излучения. Полученная зависимость для разного количества стёкол представлена на рисунке 13.

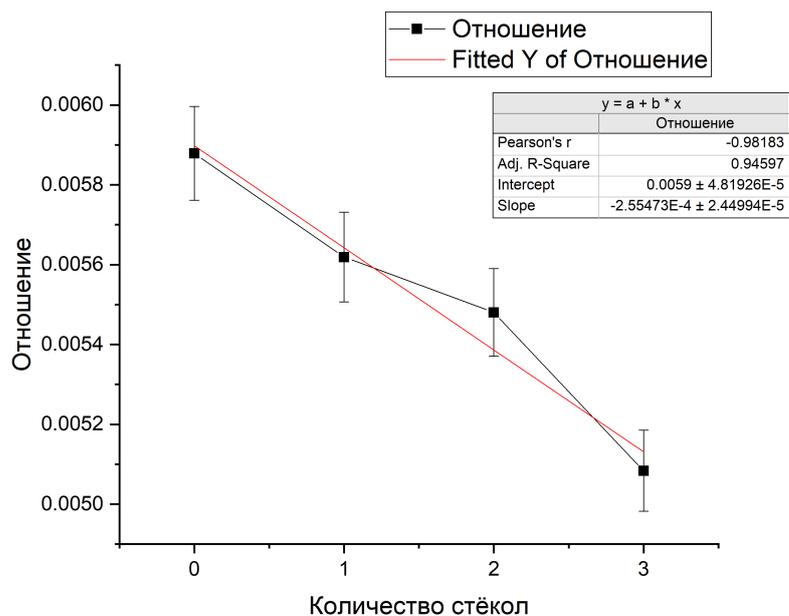


Рисунок 13 — Зависимость интенсивности излучения от количества стёкол

Полученная зависимость аппроксимируется прямой, изображённой на рисунке красным цветом, с параметами, представленными в таблице, что полностью соответствует ожидаемому результату.

Во второй серии измерений на высокой яркости и низкой частоте был произведён набор данных зависимости интенсивности излучения, детектируемого фотоумножителем, от материала, соединяющего два стекла (имитация соединения SiPM и сцинтилляционного кристалла). Характерный спектр представлен на рисунке 14.

с

Для каждого из материалов были подготовлены по четыре образца стёкол, для которых производились измерения с двух противоположных концов, так как конструкция кюветы достаточно широкая, благодаря чему образец можно измерить дважды, просто перевернув его. В результате чего для каждой точки получалось собрать 8-10 измерений, по которым производилось усреднение и расчёт погрешности. Одна из статистик для оптической смазки DOWSIL Q2-3067 показана на рисунке 14

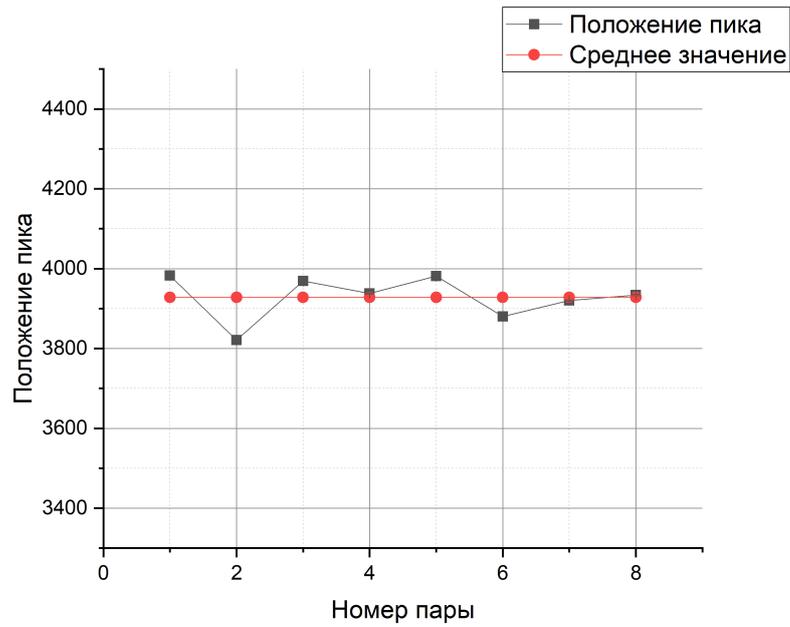


Рисунок 14 — Распределение положений пика для образца со смазкой DOWSIL Q2-3067

Усредняя статистику для каждой из типов пар получили распределение, показанное на рисунке 15.

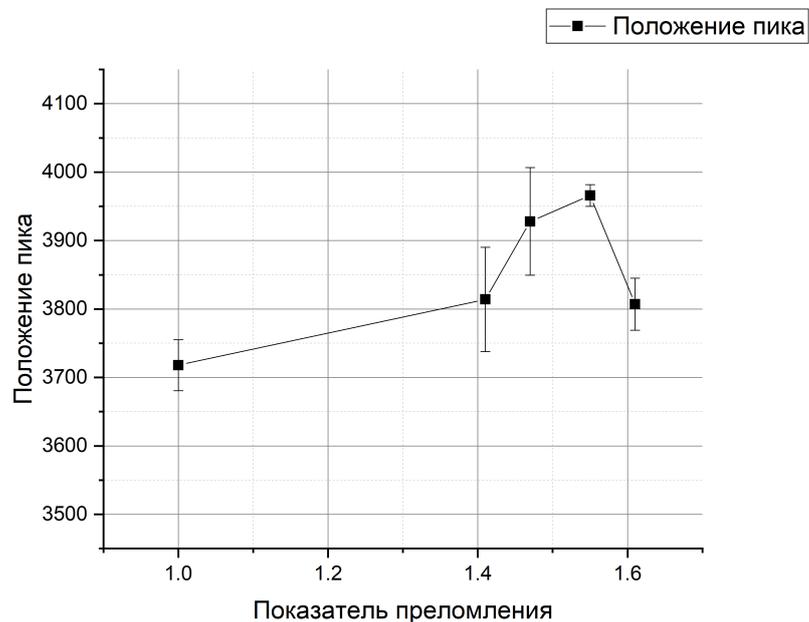


Рисунок 15 — Распределение усреднённых положений пика для различных соединяющих материалов от их показателя преломления

Нормируя экспериментальное значение к теоретическому получаем распределение вида:

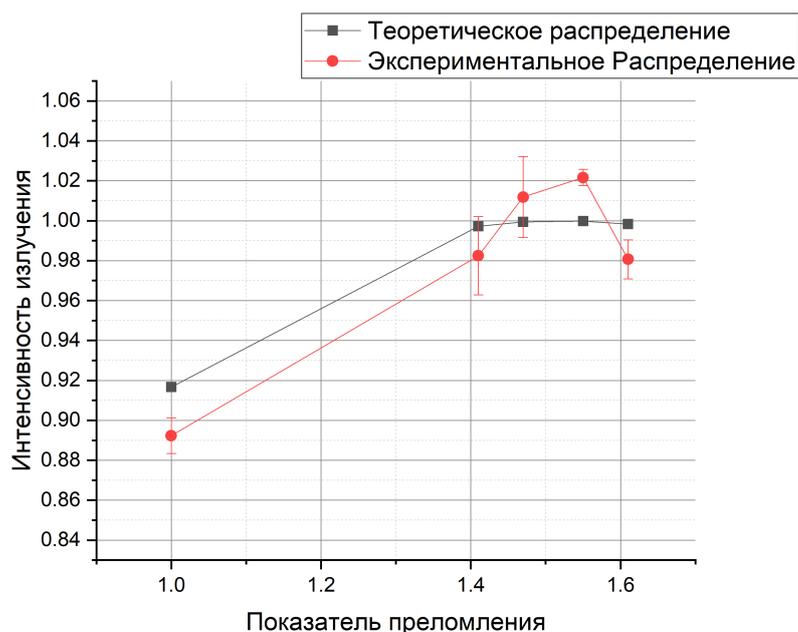


Рисунок 16 — Нормированное распределение усреднённых положений пика для различных соединяющих материалов и теоретическое распределение в зависимости от их показателя преломления

Как видно из полученных распределений, некоторые точки отклоняются от теоретически предположенных в меньшую сторону, что может свидетельствовать о лишней потере света, вызванной особенностями нанесённого материала (например, неоднородным смешиванием компонентов), что ожидалось в ходе исследования. Что касается точек, лежащих выше ожидаемого распределения, подобные выбросы могут быть следствием засветки оборудования, вызванной недостаточной плотностью материала ткани, используемой для измерения данных точек (обычная ткань против blackout-ткани). Несмотря на подобные отклонения, экспериментальное распределение в целом коррелирует с теоретическим, что и ожидалось получить.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам работы в текущем семестре были исследованы и отсеяны различные гипотезы нестабильной работы каналов макета позитронно-эмиссионного томографа. Также исследована теория зависимости интенсивности прошедшего света от показателя преломления материала, для чего был подготовлен испытательный стенд, проведены необходимые измерения и обработки полученных с них данных, а также экспериментальное подтверждение выдвинутого нами предположения. Ожидаемые результаты работы достигнуты.

## Список используемых источников

- [1] A. Paans, *Positron emission tomography*, CERN (2006) 363.
- [2] WHO, *Positron emission tomography scanners statistics*, *Worldwide Health Organization* (2022) .
- [3] A. Konotop and N. Boyko, *Installation for testing silicon photomultiplier and scintillation crystals*, *Vestnik natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta «MIFI»* **12(3)** (2023) 143.
- [4] A. Korneev, *Универсальная модель световых выхода пластмассовых и жидких органических сцинтилляторов для электронов и тяжёлых заряженных частиц*, *Факультет экспериментальной и теоретической физики НИЯУ МИФИ* (2007) 40.
- [5] S.-G. Crystals, *Physical properties of common inorganic scintillators*, *Saint-Gobain Crystals* (2007) .
- [6] T. Frach, G. Prescher, C. Degenhardt, R. de Gruyter, A. Schmitz and R. Ballizany, *The digital silicon photomultiplier – principle of operation and intrinsic detector performance*, in *2009 IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (NSS/MIC)*, pp. 1959–1965, 2009.
- [7] M. Jeong and M. Hammig, *Development of hand-held coded-aperture gamma ray imaging system based on gagg(ce) scintillator coupled with sipm array*, *Nuclear Engineering and Technology* **52** (2020) 2572.
- [8] M. Jeong, B. Van, B.T. Wells, L.J. D'Aries and M.D. Hammig, *Comparison between pixelated scintillators: Csi(tl), lacl 3(ce) and lyso(ce) when coupled to a silicon photomultipliers array*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* **893** (2018) 75.
- [9] Y. Akimov, *Фотонные методы регистрации излучений*, ОИЯИ, Дубна (2014).
- [10] CAEN, *SP5600AN Educational Kit - Premium Version Guide*, CAEN Educational, Italy (2016).

- [11] A. Inc., *Arduino nano Datasheet*, Italy (2023).
- [12] Aosong, *Temperature and humidity module AM2302 Product Manual*, Aosong(Guangzhou) Electronics Co.,Ltd., Guangzhou, China (2015).
- [13] A. Konotop, *Характеристики 32-канального макета ПЭТ на основе сцинтиллятора gagg в сочетании с sipm*, NRNU МЕРФИ (2022) 7.
- [14] F. Dubinin, N. Boyko, A. Konotop, G. Dolganov and A. Zhurkina, *Pet prototype based on scintillation detectors gagg-sipm coupled to 32-channel petiroc2a chip*, JINR AYSS international conference 2023 (2023) 1.
- [15] I. Savelyev, *Курс общей физики. В 5тт. Т. 4. Волны. Оптика.: учебное пособие. 5-е изд., испр.*, Лань, СПб. (2021).