

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
МИФИ»
(НИЯУ МИФИ)

УДК 53-05

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
Исследование неорганического кристалла GAGG для
применения в ядерной медицине

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доцент

_____ И. Н. Мачулин

Консультант:

Выполнил:

_____ Г. Д. Долганов

_____ М. А. Шадрин

Москва 2021

1 Введение

1.1 Мотивация

В настоящее время физика элементарных частиц активно развивается, технологическое развитие позволяет проводить все более сложные эксперименты, а так же тщательнее анализировать получаемые данные для проверки существующих теоретических гипотез, что в конечном итоге должно приводить к расширению человеческих знаний о фундаментальном устройстве мира. Данное направление является крайне важным и перспективным, но для полноценной проверки любых теоретических предсказаний требуются правильно поставленные эксперименты, детекторы обладающие определенными параметрами, а так же люди которые смогут данные эксперименты проводить и интерпретировать результаты. Все это приводит к необходимости дальнейшего развития экспериментальной физики, улучшению существующих и созданию новых технологий. Но зачастую, технологии созданные для исследований выходят за пределы научных изысканий и проникают в другие сферы человеческой жизни, такие как медицину, анализ данных, приборостроение и др. Все это делает экспериментальную ядерную физику крайне перспективным направлением, без которого невозможно дальнейшее развитие фундаментальной науки, а получение навыков в построении детекторов и проведении эксперимента неотъемлемой частью обучения физиков-экспериментаторов.

1.2 Цель и задачи

Целью данной работы, является исследование характеристик кристалла GAGG, с целью применения их для реализации ПЭТ на неорганических кристаллах и SiPM, а так же для освоения методики обработки данных и восстановления картины распределения источника внутри рабочей зоны детектора. Основной задачей данного семестра была подготовка измерительного оборудования и стендов для проведения измерений. Данная работа необходима для корректного проведения измерений в дальнейшем. Помимо подготовки измерительного стенда проводилась работа по определению геометрии детектора, который можно реализовать с использованием имеющегося измерительного оборудования.

1.3 Устройство SiPM

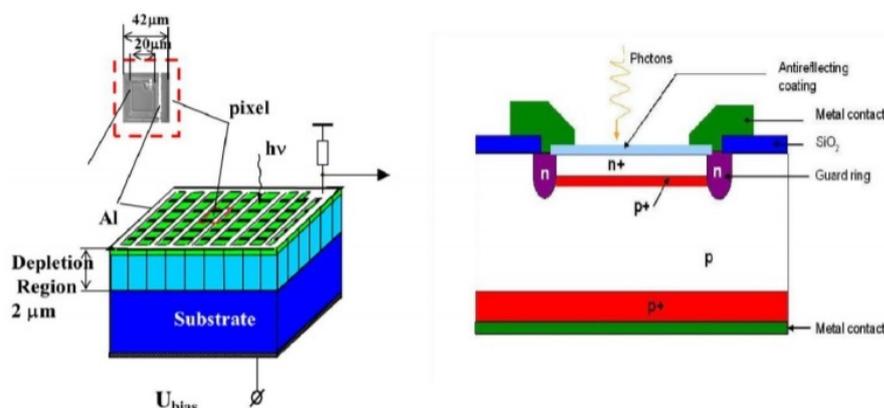


Рисунок 1: устройство SiPM

Кремниевый фотоумножитель (SiPM) (рис.2) представляет собой детектор, чувствительный к единичным фотонам, который сочетает в себе эксплуатационные характеристики, превосходящие традиционные фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Кремниевый фотоумножитель изготовлен на основе множества микроячеек, представляющих собой плотно упакованные лавинные фотодиоды, работающие в гейгеровском режиме (SPAD сенсоры), со встроенными шунтирующими резисторами, которые преобразуют двоичный сигнал с этих микроячеек в единый аналоговый сенсор. Кремниевый фотоэлектронный умножитель SiPM представляет собой фотоприёмник на основе упорядоченного набора (матрицы) p-n-переходов, выполненных на общей кремниевой подложке[1]. Характерный размер одной ячейки составляет 10-100 мкм. Площадь чувствительной поверхности находится в пределах от 1×1 до 6×6 мм².

Для предотвращения зарядовой связи между отдельными ячейками, пиксели располагаются с определенным интервалом. Посредством алюминиевых шин все ячейки объединены и к ним приложено одинаковое напряжение смещения, которое на несколько вольт превышает напряжение пробоя p-n-перехода, что обеспечивает работу в гейгеровском режиме. Каждый пиксель соединен с общей шиной посредством индивидуального пленочного токоограничивающего резистора. При попадании кванта света в активную область ячейки в ней развивается самогасящийся гейгеровский разряд. Гашение, то есть прекращение разряда, происходит из-за падения напряжения на p-n-

переходе ниже пробойного благодаря наличию резистора, который не пропускает заметной зарядки пикселя от источника напряжения за время протекания лавинного процесса. В результате гейгеровский разряд в каждой ячейке ограничен. Площадь ячейки и сопротивление индивидуального резистора выбираются так, чтобы за характерное время электрической релаксации емкости пикселя вероятность темновой генерации носителей заряда в его чувствительной области была значительно меньше единицы.

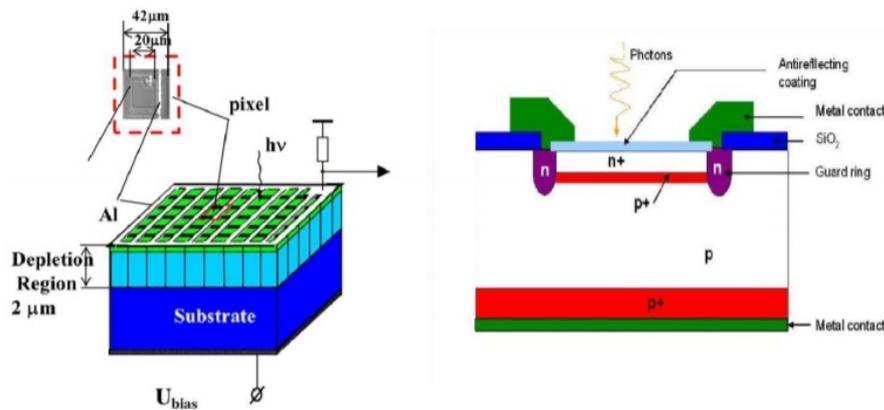


Рисунок 2: устройство SiPM

Весь SiPM представляет собой аналоговый детектор, так как выходной сигнал есть сумма сигналов с каждой ячейки фотодиода, которые суммируются на общей нагрузке (проводящей шине). Сигнал каждого пикселя является логическим и не зависит от числа первоначальных носителей, вызвавших срабатывание ячейки. Отклик детектора на слабые световые вспышки пропорционален их интенсивности. Фотоотклик прибора остается линейным до тех пор, пока вероятность одновременного попадания двух и более фотонов на один пиксель не становится значительной.

Основной характеристикой прибора является эффективность регистрации фотона[1] ϵ , которая является произведением квантовой эффективности р-n-перехода QE , геометрического фактора A и вероятности возникновения гейгеровского разряда G .

$$\epsilon = QE \times A \times G \quad (1)$$

Данную характеристику в литературе часто называют квантовая эффективность.

Квантовая эффективность р-п-перехода — это вероятность генерации фотоном свободного носителя, который достигает области умножения, т.е. той области высокого поля, достаточного для ударной ионизации. Геометрический фактор определяется соотношением активной и общей площади ячейки SiPM и зависит от размера ячейки. Вероятность возникновения гейгеровского разряда при попадании свободного носителя в область высокого поля зависит от разности между приложенным к SiPM напряжением и напряжением пробоя.

Квантовая эффективность сильно зависит от длины волны, регистрируемой диодом. На сегодняшний день типичное значение ϵ в максимуме спектральной чувствительности фотодиода находится в диапазоне 40 — 50%. [do] Так же стоит отметить одну из основных особенностей фотодиодов с гейгеровским усилением, которой является довольно ощутимая частота шумовых импульсов. Это связано с тем, что любой свободный носитель, попавший в зону гейгеровского усиления, может вызвать образование лавины. Частота шумовых импульсов зависит от напряжения питания и температуры

Частота шумовых импульсов гейгеровских фотодиодов при комнатной температуре довольно высока, что ограничивает их применение при регистрации сверхслабых (на уровне одиночных фотонов) потоков света. Однако при охлаждении и повышении порога срабатывания частота шумовых импульсов резко падает, и возможности применения SiPM расширяются.

Одной из важнейших характеристик является коэффициент усиления K кремниевого фотоумножителя, который определяется значением заряда, накопленного ёмкостью ячейки.

$$K = \frac{C_a(U - U_1)}{e} \quad (2)$$

где C_a — ёмкость ячейки; $(U - U_1)$ — перенапряжение, e — заряд электрона. Зависимость коэффициента усиления SiPM от перенапряжения носит линейный характер. При понижении температуры можно достичь большего перенапряжения и, соответственно, большего коэффициента усиления.

Ещё одной важной характеристикой является временное разрешение SiPM. Оно определяется временем развития гейгеровского разряда в ячейке и составляет величину от десятков до сотен пикосекунд в зависимости от размера

ячейки и плотности упаковки матрицы.

1.4 Описание характеристик GAGG

GAGG (Ce) ($Ce : GAGG, Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$) - новый сцинтиллятор для однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ), обнаружения гамма-лучей и комптоновых электронов. GAGG, легированный церием, обладает многими свойствами (отсутствие самостоятельного излучения, не гигроскопичность), которые делают его пригодным для гамма-спектроскопии и медицинских изображений. Высокий выход фотонов (от 30 000 до 54 000 фотонов/МэВ)[2] и пик излучения около 540 нм делают материал хорошо подходящим для считывания с помощью кремниевых фотоумножителей. Небольшое время высвечивания (80 нс) позволяет применять данные кристаллы в медицине, а так же дает потенциальную возможность проводить временные измерения. Так же выбор данного кристалла обусловлен его не гигроскопичностью, что упрощает его использование и возможную плотность размещения кристаллов.

2 Выбор и моделирование геометрии детектора

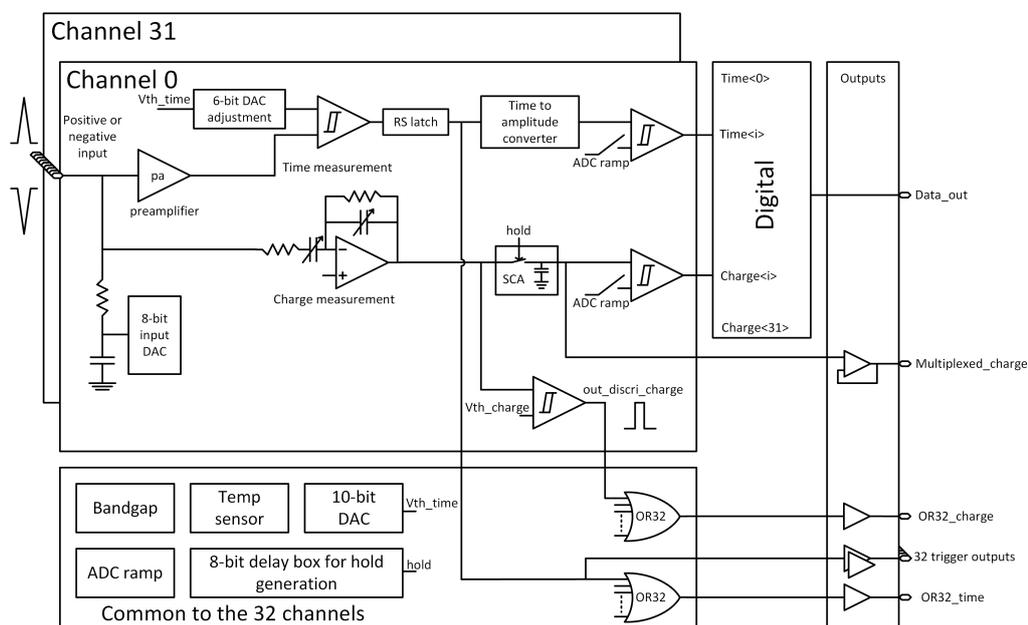


Рисунок 3: схема работы платы Petiros2A

В настоящее время измерения проводились на Petiros2A. Petiros2A - это 32-канальная интерфейсная ASIC, предназначенная для считывания показаний кремниевых фотоумножителей (SiPM) с обеими полярностями для приложений измерения времени пролета частиц.[3] Petiros2A сочетает в себе очень быстрый запуск с точными измерениями заряда и времени. Энергия и время оцифровываются внутри с помощью 10-битного АЦП и ВМТ 40ps бин. На рисунке 3 представлена схема работы платы Petiros2A. Концепция ASIC состоит в том, чтобы объединить две измерительные линии, которые не будут мешать друг другу, чтобы измерить как время первого падающего фотона, так и весь заряд света кристалла. Исходя из технических характеристик платы возникает ограничение на геометрические размеры детектора, поскольку в настоящее время не представляется возможным работать более чем с 32 кристаллами.

На сегодняшний день в классической ПЭТ-томографии используются 4 основных конфигурации [4], приведенные на рисунке 4. Для разрабатываемого макета были выбраны конфигурации А и D, поскольку каждая из них обладает рядом преимуществ. Конфигурация А позволяет добиться боль-

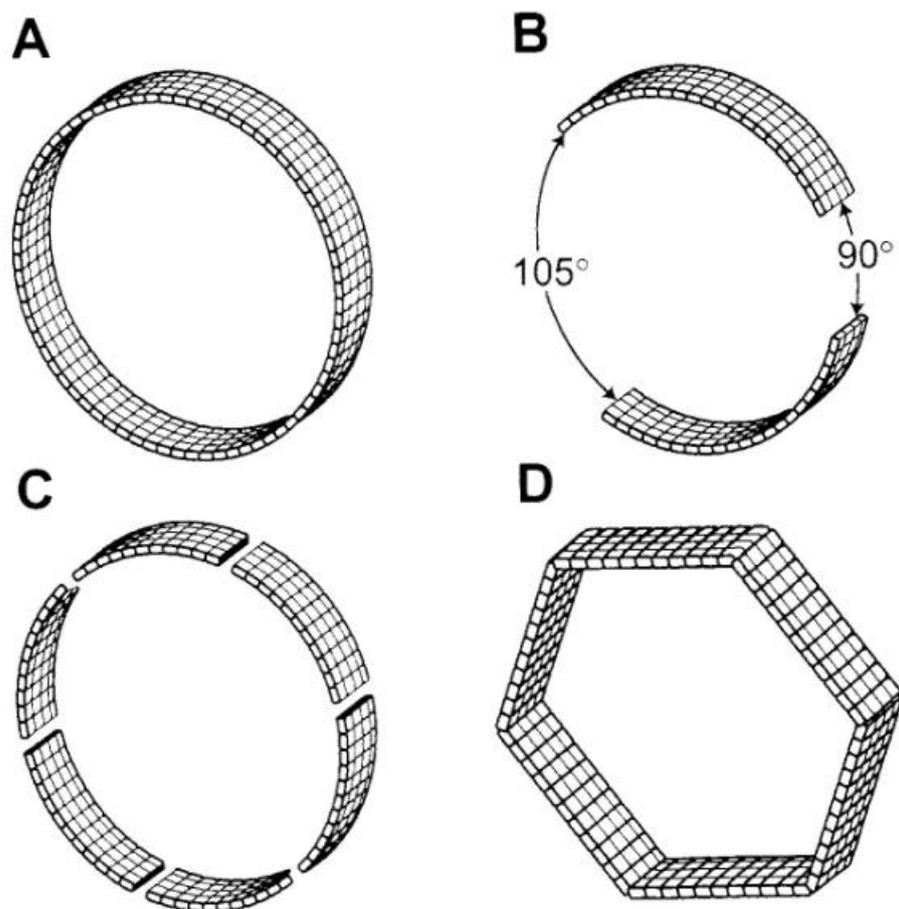


Рисунок 4: Основные существующие конфигурации ПЭТ

шей точности, за счет статичного расположения элементов при проведении измерений, а конфигурация В в свою очередь позволяет увеличить рабочую область внутри детектора, но теряет в точности, и во времени проведения измерений, что не принципиально в макете, но крайне важно в изделии для реального потребителя. Для данных конфигураций были разработаны модели для печати стендов, которые необходимы для проведения первичных измерений. В дальнейшем планируется проведение работ по моделированию полно-размерного детектора, выбору материала корпуса и оценке существующих технологий по изготовлению корпусов. На рисунках 5 и 6 представлен разработанная для печати модель корпуса ПЭТ, в которых учтена специфика печати из фото полимерной смолы.

Так же были разработаны два макета для проведения измерений с кристаллами GAGG, установка представленная на рисунке 7 предназначена для проведения измерений с позитронным источником и двумя кристаллами в

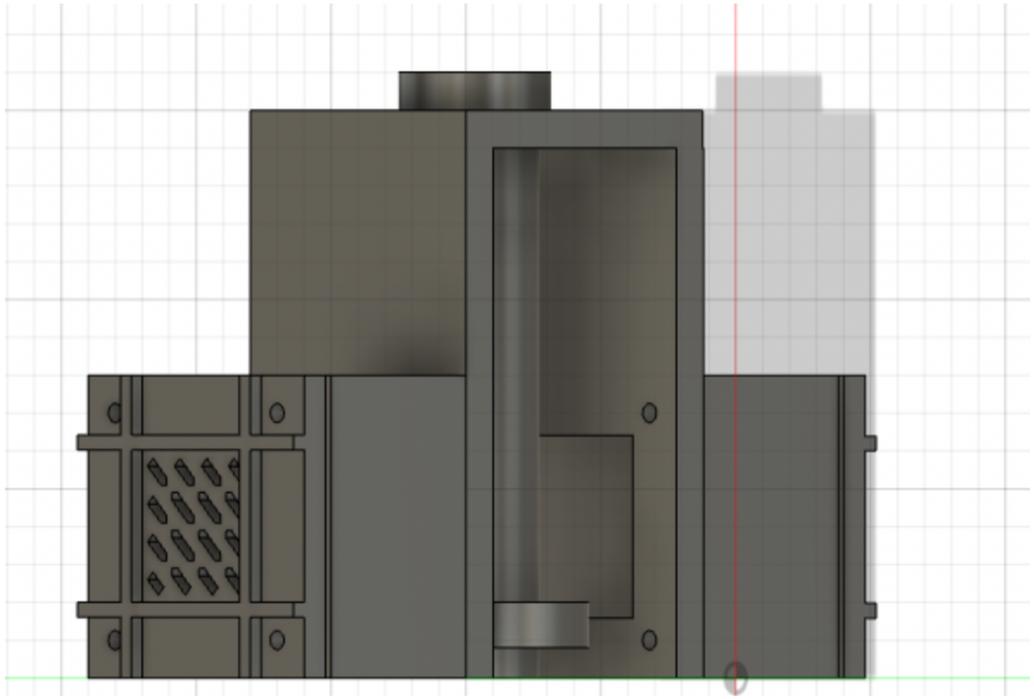


Рисунок 5: Разработанный для фотополимерной печати корпус ПЭТ

сборке с SiPM, в режиме совпадений, на основе полученной в данных измерениях информации будет оценена возможность использования временных измерений для улучшения точности определения положения источника или уменьшению времени набора статистики в исследовании. Установка представлена на рисунке 12 предназначена для изучения характеристик кристалла и позволяет проводить измерения аналогичные измерениям проведенным в предыдущем семестре для полистирола.

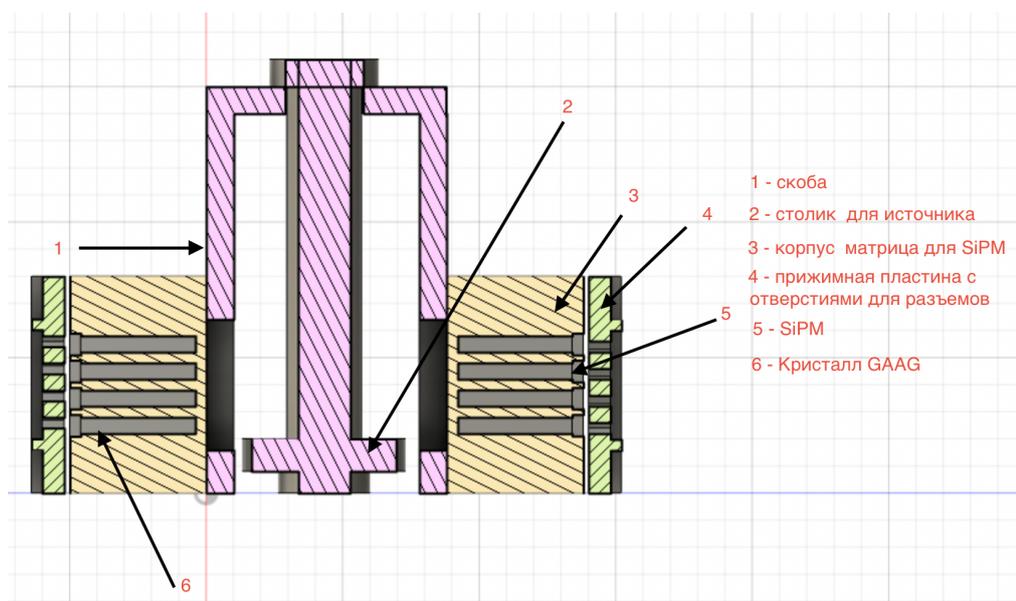


Рисунок 6: Схематическое изображение корпуса ПЭТ с наименованием элементов

3 Изготовление установки и подготовка измерительного оборудования

3.1 Изготовление установки

Для изготовления моделей использовался принтер Wanhao Duplicator 8 работающий по технологии фото полимерной печати, позволяющей производить тестовые изделия с точностью до 0.075 мм. Для освоения данной технологии, была произведена настройка принтера согласно документации и калибровочная печать набора моделей, для выявления особенности печати и внесения корректировок в целевые модели. После этого была проведена печать и последующая обработка моделей, на рисунке 10 представлен один из результатов проведенной работы

3.2 Подготовка кристаллов к работе

Следующим этапом была подготовка кристаллов к работе, для этого на них был нанесен слой диффузного светоотражателя толщиной $\delta \approx 0.3$ мм. На рисунке 9 приведен вид кристаллов до и после подготовки, так же были проведена работа по подготовке SiPM к работе, для этого на имеющемся черном ящике были разведены контакты, через которые подается питание и снимается сигнал.

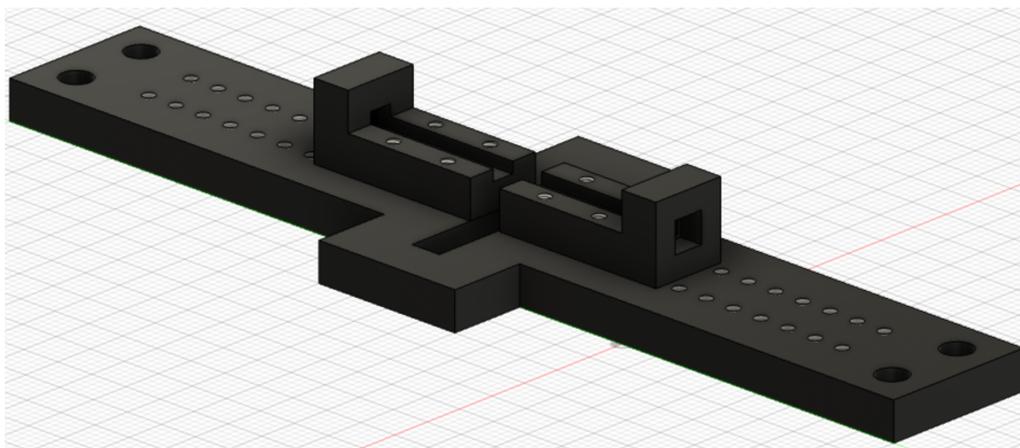


Рисунок 7: Модель станда для проведения измерений с позитронным источником

В работе использовались SiPM *MicroFC* – 30035 – *SMT*.

3.3 Проведение измерений на плате с генератором и сигналом с SiPM и кристаллом GAGG

Для проверки корректности работы платы Petiros2A были проведены измерения с генератором, из которых были определены параметры сигнала необходимые для корректной работы платы в режиме совпадений. Данный уровень составляет 100 мВ, при сигнале ниже данного уровня необходимо использовать зарядовый предусилитель сигнала, который увеличивает шумы и ухудшает точность измерений.

Далее были проведены измерения с сигналом с SiPM. Стоит отметить, что за счет большого световыхода кристалла GAGG амплитуда сигнала составляет порядка 300 мВ, что позволяет напрямую подключать сигнал к плате без предусилителя. Это является существенным преимуществом, поскольку позволяет снизить потенциальную погрешность измерений.

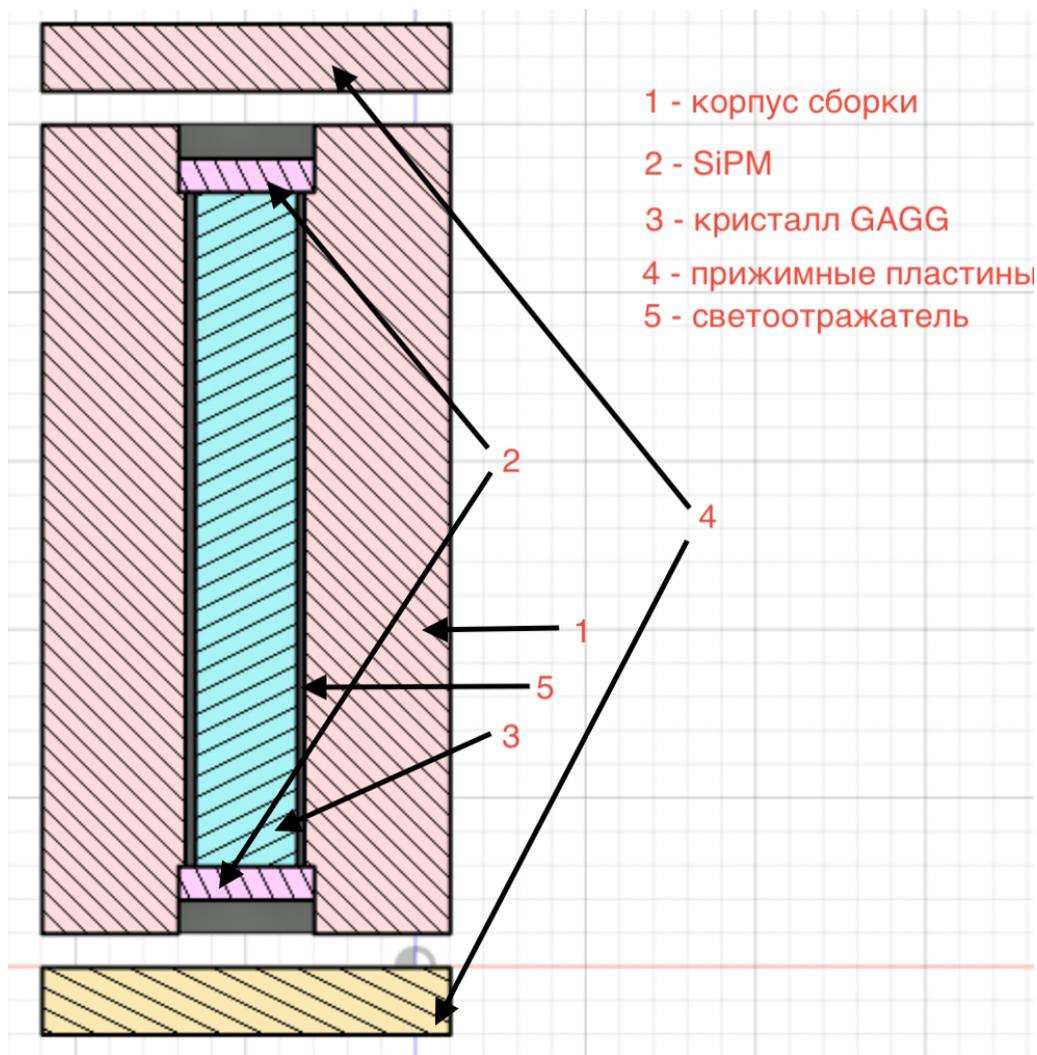


Рисунок 8: Схематичный вид установки для проведения измерений с одним кристаллом

4 Сборка измерительной установки

4.1 Измерительная установка

На рисунке 10 приведен вид измерительной установки, которая размещена в металлическом корпусе с выведенными контактами для сбора сигнала и подачи питания на SiPM. Кристаллы GAGG находятся в корпусах предназначенных для закрепления SiPM на направляющей линии, что дает уверенность в соосности кристаллов, и имеющих углубления для закрепления SiPM.



Рисунок 9: пример внешнего вида кристаллов до(слева) и после(справа) нанесения диффузного светоотражателя

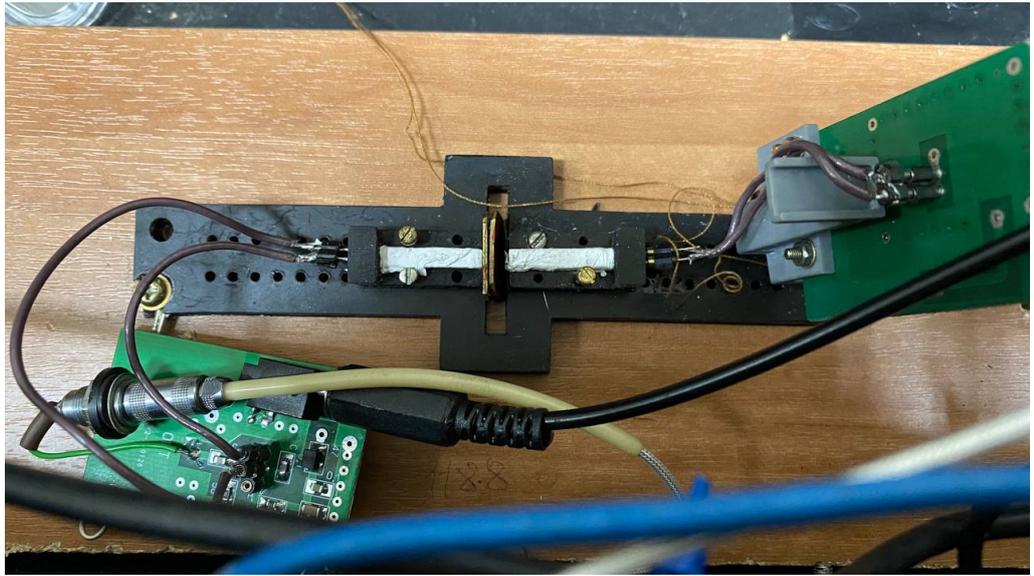


Рисунок 10: Установка для проведения измерений с кристаллами GAGG двумя SiPM и позитронным источником

5 Проведение измерений и анализ данных

5.1 Определение энергетического разрешения кристалла GAGG с Cs^{137} и SiPM Sensl fc30035

На рисунке 11 представлен спектр радиоактивного источника Cs^{137} в кристалле GAGG и SiPM Sensl fc300, при напряжении $V = 28$. Для анализа использовался программный пакет Root. [5] Энергетическое разрешение данной установки составило:

$$\frac{\Delta E}{E_\gamma} = (11,3 \pm 0,7)\%, \quad (3)$$

В данный момент нельзя сказать является ли данное напряжение оп-

тимальным, поскольку не окончена работа по определению оптимального напряжения для данного SiPM.

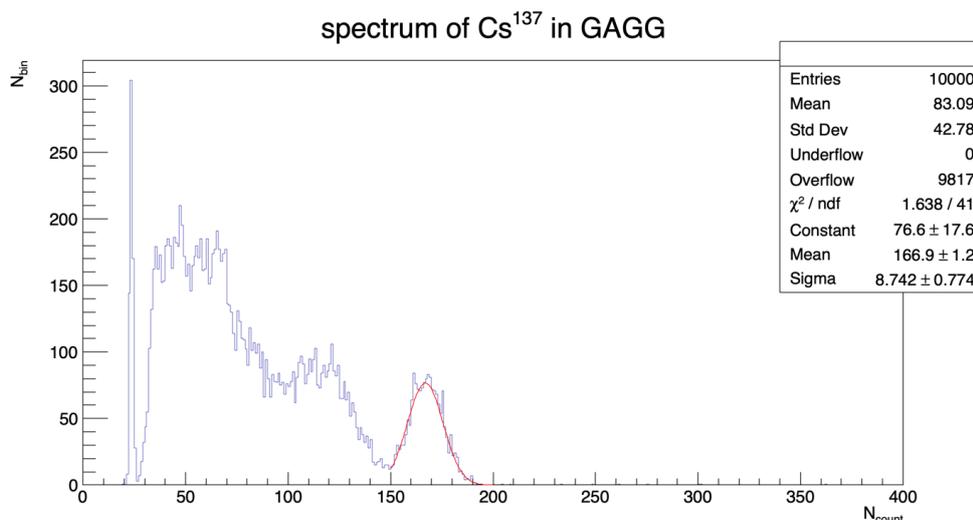


Рисунок 11: Спектр Cs^{137} в кристалле GAGG и SiPM Sensl fc30035

5.2 Измерения в схеме совпадения с одним кристаллом

При работе в схеме совпадений двух SiPM прижатых к торца кристалла GAGG использовалась установка схема которой приведена на рисунке 12. В результате данных измерений удалось получить энергетические спектры приведенные на рисунках 13-а и 13-б, отличие в получившихся спектрах обусловлены наличием различий в оптимальных напряжениях смещения двух SiPM, которые в данном измерении не были подобраны. Так же дополнительный вклад в различие спектров внесено внутренними особенностями каждого фотоумножителя, не одинаковым прижимом, который подбирался по амплитуде сигналов. После было посчитано время между приходами сигналов с 2 SiPM. На рисунках 14 - а и 14 - б представлены распределения числа событий в зависимости от времени между приходом двух сигналов, стоит отметить что источник используемый в данном измерении нельзя считать точечным, поскольку его геометрические размеры сопоставимы с размерами кристалла, и так же отсутствовала коллимация. Но данное приближение было допущено из-за очень низкой активности, что не позволяло удалять источник от кристалла на значительное расстояние. На рисунке 14 - а представлено распределение до проведения зарядовых отборов, на рисунке 14 после, как можно

заметить распределение заметно улучшилось, что говорит о необходимости проведения зарядовых отборов для всех последующих измерений на плате Petiros2A, но вместе с этим можно наблюдать наличие раздвоенного пика, в дальнейшем будет проведен ряд измерений на плате xTDC4, что позволит выдвинуть предположения касательно природы данных результатов. Вместе с тем, данная картина может быть связана с внутренними особенностями платы, поскольку подобные результаты появлялись так же при измерениях с генератором постоянных импульсов.

6 Заключение

В результате проведенной работы были созданы несколько стендов для измерения различных характеристик детекторов на основе кристаллов GAGG, а также проведены измерения энергетического и временного разрешения детектора, которые составили:

$$\frac{\Delta E}{E_\gamma} = (11,3 \pm 0,7)\%,$$

$$M_\tau = 145 \pm 28 \text{ пс},$$

$$\sigma_\tau = 1227 \pm 23 \text{ пс},$$

На основе полученных данных нельзя однозначно сказать о возможности использования информации о временах приходах сигнала в ПЭТ на основе кристаллов GAGG с текущим оборудованием, для этого необходимо проведение измерений на подготовленных стендах с позитронным источником.

Полученные результаты необходимы для дальнейшей работы по изучению возможности использования кристаллов GAGG в позитронной томографии, а полученные навыки необходимы для реализации прототипа ПЭТ.

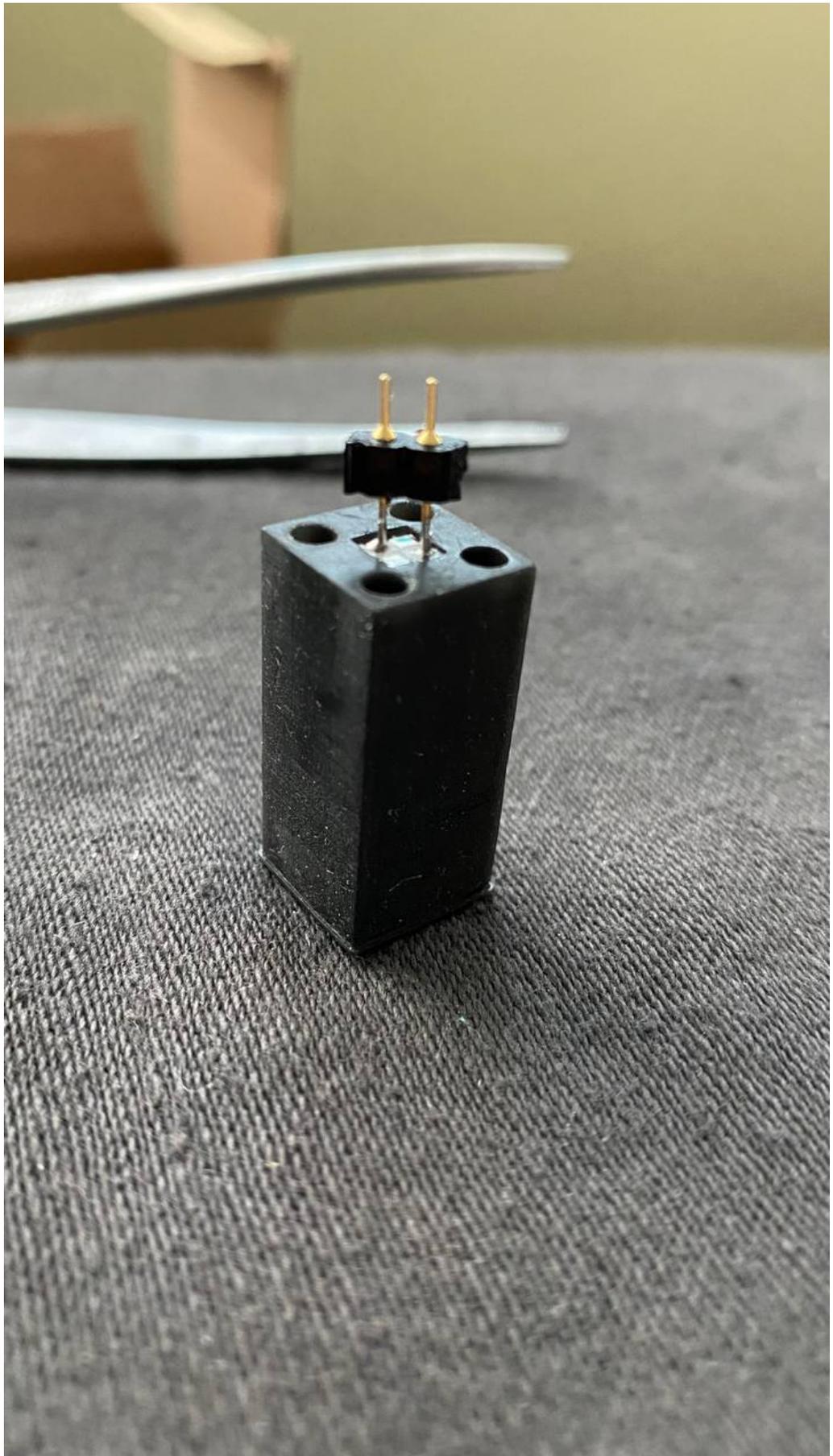


Рисунок 12: Установка для проведения измерений с кристаллом GAGG и двумя SiPM

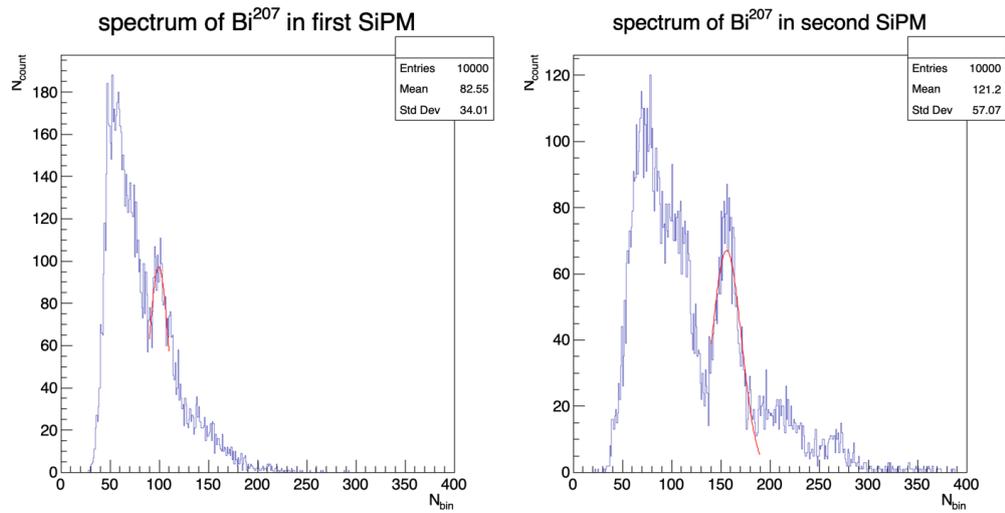


Рисунок 13: Спектры набранные с 2 SiPM в режиме совпадений а) 1 SiPM (слева), б) 2 SiPM (справа)

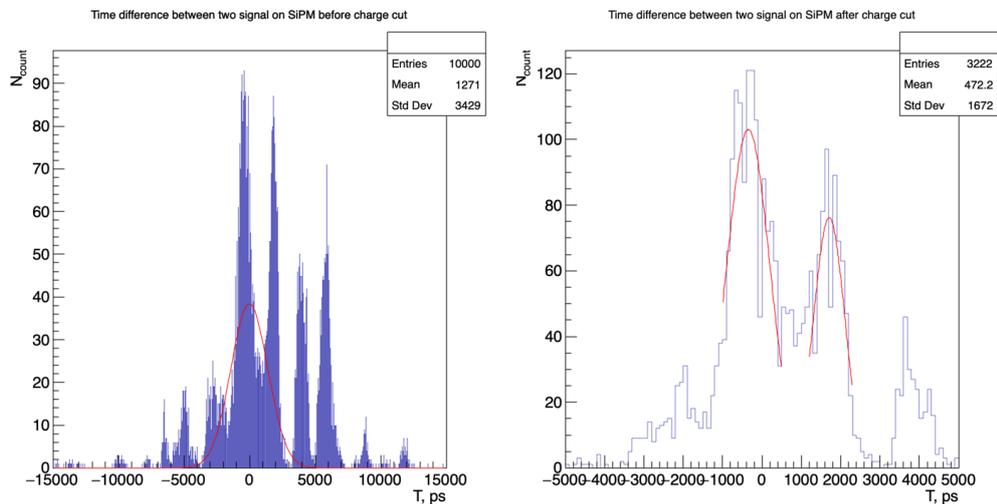


Рисунок 14: Распределение числа событий от разницы времен между приходом сигналов на 2 SiPM а) до проведения зарядовых отборов (слева), б) после проведения зарядовых отборов

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Клемин С. Кузнецов Ю. Ф. Л. Кремниевый фотоэлектронный умножитель // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. — 2007. — авг. — с. 80—86.
2. Epic-crystal <https://www.epic-crystal.com/oxide-scintillators/gagg-ce-scintillator>
SOp5hs2EFuYbW75Y8jaPhDiSzblfG2keXEaAvXnEALw_wcB.
3. PETIROC 2A SiPM read out for time of flight PET. <https://www.weeroc.com/pro/read-out/petiroc-2a>.
4. В.Н.Беляем В. ФИЗИКА ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ часть 2. — 2012. — с. 248.
5. Root - an object oriented data analysis framework. <http://root.cern.ch/>.