

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
ИЗМЕРЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С
КРИСТАЛЛИЧЕСКИМ СЦИНТИЛЛЯТОРОМ GAGG И
КРЕМНИЕВЫМИ ФОТОУМНОЖИТЕЛЯМИ

Научный руководитель:

доц.

_____ И. Н. Мачулин

Научный консультант:

_____ Г. Д. Долганов

Выполнил:

_____ Д. Д. Кандыбин

Москва 2021

Содержание

Введение	2
1 Литературный обзор	3
1 Сцинтилляторы	3
1.1 Характеристики сцинтилляторов	3
1.2 GAGG	5
2 SiPM	6
2.1 Характеристики SiPMов	9
2 Моделирование	11
1 Описание детектора	11
2 Анализ результатов моделирования	12
3 Эксперимент	14
1 Описание оборудования	14
2 Тестирование каналов	16
3 Определение рабочей точки	17
Заключение	19
Список использованных источников	20

Введение

Физика элементарных частиц в наши дни - одно из ключевых направлений в исследованиях, ведь область их применения широка. Одной из таких областей является медицина, значимость развития которой не требует доказательств.

Классическим примером применения физики элементарных частиц в медицине является позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ). Данное направление является крайне важным, и усовершенствование этого метода исследования внутренних органов человека или животного – актуальная задача современной науки.

Актуальной сферой исследований являются времяпролетные ПЭТ (TOF-ПЭТ) которые еще два-три десятка лет назад не могли конкурировать с ПЭТ-сканерами на основе ортогерманата висмута (BGO) из-за сочетания низкой тормозной способности и ограниченного пространственного разрешения (вызванного ограниченной светоотдачей сцинтилляторов). Однако, на сегодняшний день сочетание быстрых фотоумножителей, быстрых сцинтилляторов с высокой плотностью, современной электроники и больших вычислительных мощностей для реконструкции изображений позволяет внедрять этот принцип в клинические TOF-ПЭТ-системы.

Целью проведения данной работы являлось моделирование с помощью программного пакета Geant4 [1] взаимодействия аннигиляционных гамма-квантов с кристаллами **GAGG**, а также подготовка электроники для отработки методики измерений с помощью платы Petiros2A сигналов с кремниевых фотоумножителей, чтобы в дальнейшем создать прототип ПЭТ-сканера.

Глава 1

Литературный обзор

1 Сцинтилляторы

Сцинтилляторами называют вещества, излучающие свет при поглощении ионизирующего излучения (гамма-квантов, альфа-частиц, электронов, альфа-частиц и т. д.). Как правило, излучаемое количество фотонов для данного типа излучения приближённо пропорционально поглощённой энергии, что позволяет получать энергетические спектры излучения [2].

Основная область применения таких веществ является использование их в сцинтилляционных детекторах ядерных излучений. В подобных детекторах свет, излученный при сцинтилляции, собирается на фотоприёмнике, который, как правило, является фотокатодом фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), преобразуется в импульс тока, усиливается и записывается той или иной регистрирующей системой.

1.1 Характеристики сцинтилляторов

Сцинтилляторы, как правило, характеризуют следующими величинами [3], [4]:

1. *Плотность;*

вероятность детектирования гамма-квантов напрямую зависит от расположения атомов и молекул в сцинтилляторе.

2. Световой выход;

световым выходом называется число испущенных сцинтиллятором оптических фотонов при поглощении частицы с энергией 1 МэВ. Световой выход связан с числом электрон-дырочных пар, образующихся в кристалле при поглощении ионизирующего излучения. Таким образом, световой выход обратно пропорционален ширине запрещенной зоны материала:

$$LY \approx \frac{1}{\beta \cdot E_g},$$

где β – эмпирическая константа, принимающая значение от 2 до 3; E_g – ширина запрещенной зоны.

3. Спектр высвечивания;

спектр высвечивания должен быть по возможности оптимально согласован со спектральной чувствительностью используемого фотоприёмника. Несогласованность по спектру с фотоприёмником негативно сказывается на чувствительности детектора и, как следствие, на его энергетическом разрешении.

4. Энергетическое разрешение;

даже при поглощении частиц с одинаковой энергией амплитуда импульса на выходе фотоприёмника сцинтилляционного детектора меняется от события к событию. Это связано:

- со статистическим характером процессов сбора фотонов на фотоприёмнике и последующего усиления;
- с различной вероятностью доставки фотона к фотоприёмнику из разных точек сцинтиллятора;
- с разбросом высвечиваемого числа фотонов.

В результате энергетический спектр представляет собой размытую линию (которая для идеального детектора выглядела бы как дельта-функция), и насколько эта линия будет размытой и показывает энергетическое разрешение.

5. *Время высвечивания;*

время, в течение которого поглощённая в сцинтилляторе, возбуждённом прохождением быстрой заряженной частицы, энергия преобразуется в световое излучение, называют временем высвечивания, и чем оно меньше - тем лучше. Зависимость интенсивности сцинтилляции от времени с момента поглощения частицы (кривая высвечивания) обычно может быть представлена как убывающая экспонента:

$$I = A \exp -t/\tau, \quad (1.1)$$

где I – интенсивность свечения люминофора, τ – время затухания люминесценции.

В общем случае при наличии нескольких характерных времен интенсивность будет равна сумме экспонент.

6. *Радиационная прочность;*

облучаемые сцинтилляторы постепенно деградируют. Доза облучения, которую может выдержать сцинтиллятор без существенного ухудшения свойств, называется радиационной прочностью.

7. *Гигроскопичность;*

некоторые сцинтилляторы имеют способность поглощать водяные пары из воздуха, из-за чего структура веществ становится неоднородной, меняются их характеристики и, как следствие, ухудшается энергетическое разрешение детектора.

1.2 GAGG

Используемый в работе сцинтиллятор интересен для исследований так как обладает гораздо большим световыходом, в сравнении с аналогами. Однако из-за ряда факторов, например, из-за цены, в настоящее время затруднен процесс внедрения GAGG, например, в ПЭТ-сканеры.

Ниже представлены основные характеристики GAGG и других сцинтилляторов для сравнения, а также спектр высвечивания GAGG.

	Световыход, фот./кэВ	Время высв., нс	Макс. длина волны, нм	Гигроскопичность	Плотность, г/см ³
GAGG	38	92	520	нет	6.68
BGO	8-10	300	480	нет	7.13
GSO	8-10	30-60	430	нет	6.7
LYSO	32	41	410	нет	7.15
NaI	38	250	415	да	3.67
CsI	41	630	420	да	4.51

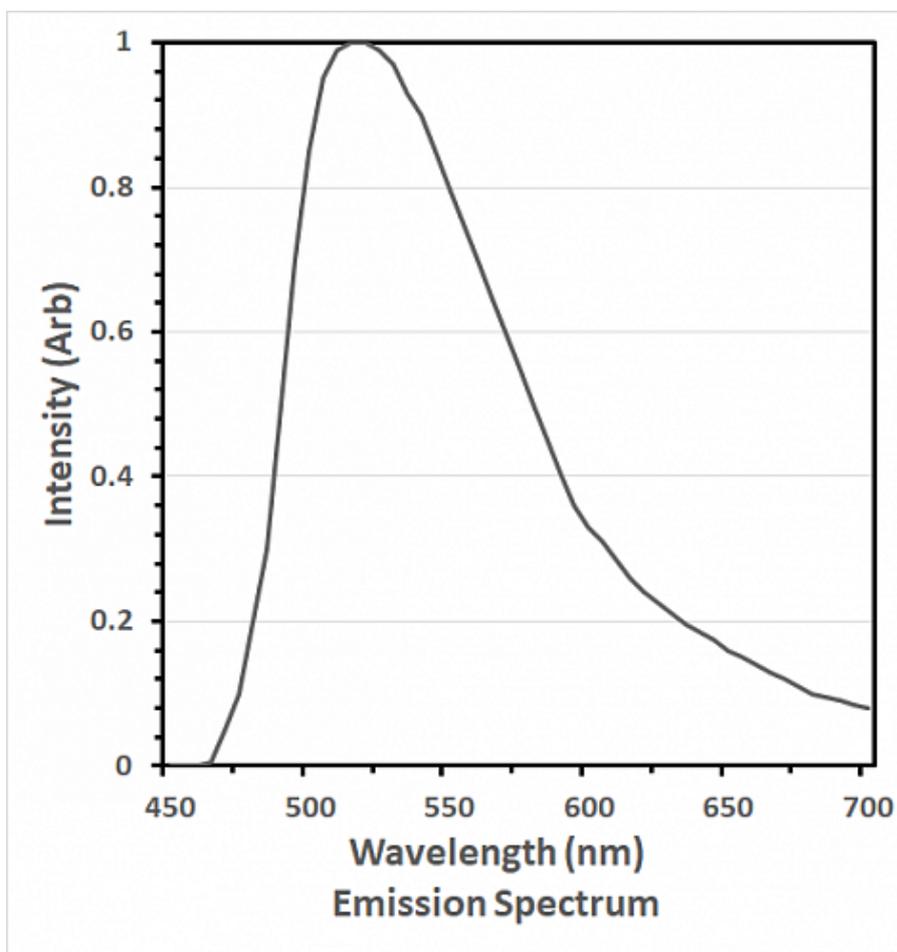


Рисунок 1.1 – Спектр высвечивания GAGG

2 SiPM

Свет, воспринимаемый человеческим глазом, обычно состоит из потока фотонов, которые создают определенную яркость. С уменьшением яркости светового потока фотоны начинают отделяться друг от друга. Метод счета фотонов позволяет измерить световые потоки низкой освещенности путем подсчета числа фотонов. Фотоэлектронные умножители и лавинные фотодиоды являются наиболее распространенными детекторами для счета фотонов.

Кремниевый фотоумножитель представляет собой микропиксельный лавинный фотодиод (ЛФД), работающий в гейгеровском режиме и предназначенный для счета фотонов (рисунок 2.1). Каждый пиксель SiPM создает импульсный выходной сигнал при обнаружении единичного фотона. Характерный размер ячейки составляет порядка 30–100 мкм (рисунок 2.2). Плотность упаковки матрицы — 100–1000 ячеек/мм² [5]. Общий выходной сигнал кремниевого фотоумножителя представляет собой сумму выходных сигналов с каждого пикселя. Кремниевые фотоумножители обладают высокой эффективностью регистрации, необходимой для счета фотонов, и используются в различных областях, которые требуют детектирования очень слабых световых сигналов на уровне единичных фотонов.

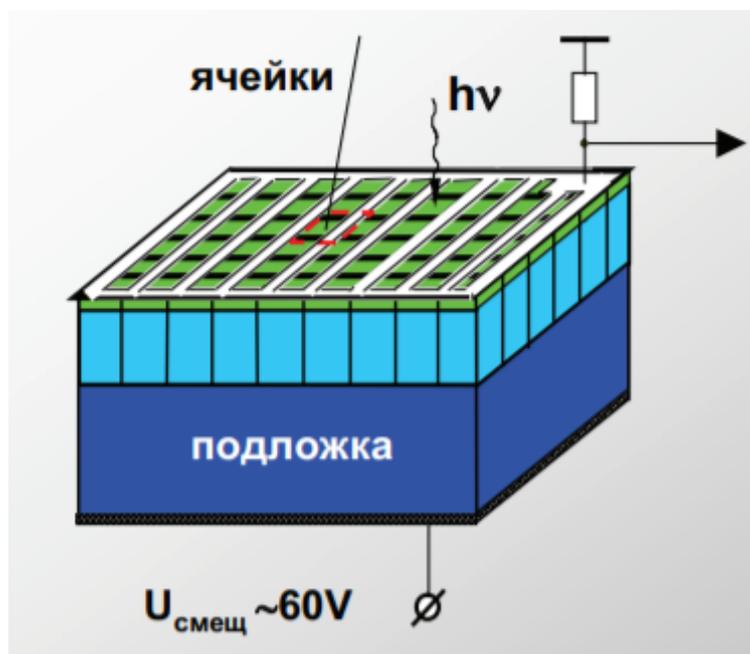


Рисунок 2.1 – Схема SiPM

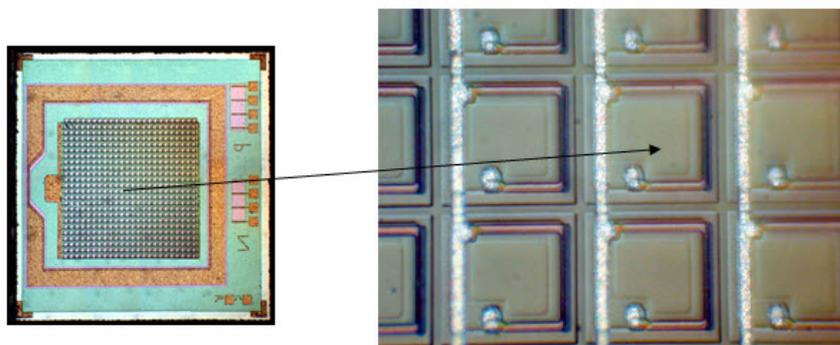


Рисунок 2.2 – Ячейки SiPM

Кремниевые фотоумножители обеспечивают превосходную обнаружительную способность для счета фотонов. Подключив SiPM к усилителю, на экране осциллографа можно увидеть четкие сигналы в зависимости от количества фотонов (рисунок 2.3). Тот факт, что отдельные пики четко выражены и различимы говорит о том, что существует минимальная вариация между коэффициентами усиления отдельных пикселей, из которых состоит кремниевый фотоумножитель.

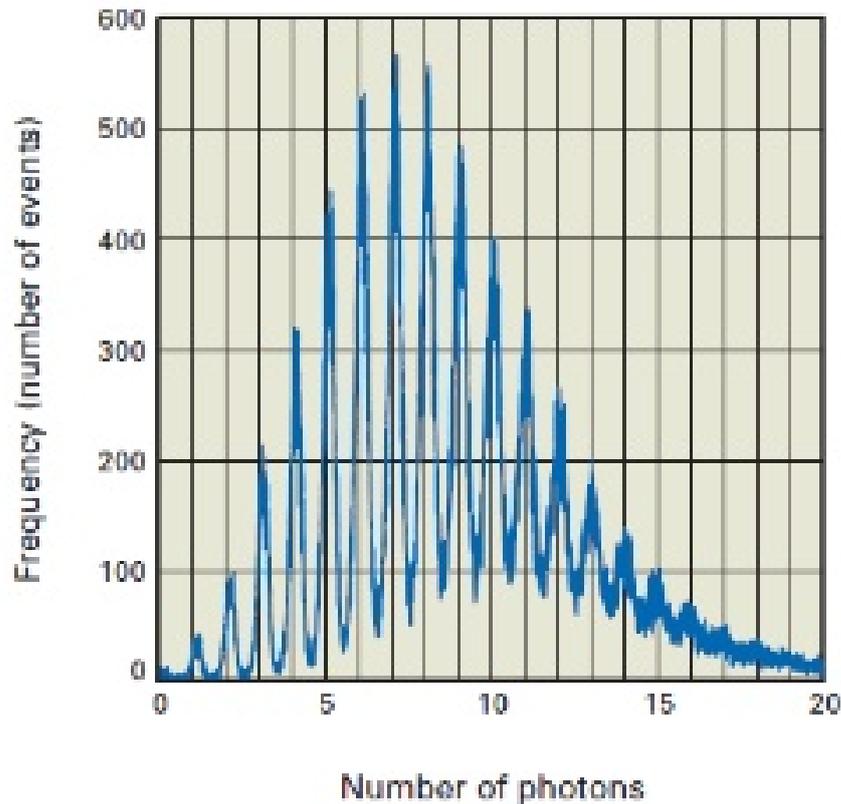


Рисунок 2.3 – Осциллограмма с SiPM

При попадании фотона на активную область фотоумножителя выходной сигнал с каждого пикселя постоянен и не зависит от числа падающих фотонов. Это означает, что каждый пиксель фотодиода позволяет получить информацию о том, попал ли на него фотон. Гасящий резистор (добавочное сопротивление) присоединен к каждому пикселю и позволяет выходному току протекать через него. Поскольку все пиксели фотодиода соединены в один считывающий канал, то выходные импульсы с пикселей суммируются друг с другом, создавая большой импульс. Измеряя высоту или электрический заряд этого импульса Q_{out} , можно определить количе-

ство фотонов детектируемых кремниевым фотоумножителем [6]:

$$Q_{\text{out}} = C \cdot (U_r - U_{\text{br}}) \cdot N_f, \quad (1.2)$$

где C - емкость одного пикселя, U_r - обратное напряжение, U_{br} - напряжение пробоя, N_f - число пикселей фотоумножителя, которые детектируют фотоны.

2.1 Характеристики SiPMов

Эффективность регистрации фотонов ε (основная характеристика фотоприемника) — это вероятность того, что падающий на фотоприемную площадку SiPMа фотон будет зарегистрирован. Эту величину можно определить как [5]

$$\varepsilon = \frac{\langle N_{\text{ячеек}} \rangle}{\langle N_{\text{фотонов}} \rangle}, \quad (1.3)$$

где $\langle N_{\text{фотонов}} \rangle$ – среднее число фотонов во вспышке, падающих на фотоприемную площадку, $\langle N_{\text{ячеек}} \rangle$ – среднее число ячеек SiPM, сработавших от вспышки.

Эффективность регистрации ε можно выразить через произведение трех основных независимых друг от друга составляющих [5]:

$$\varepsilon = QE \cdot A \cdot G, \quad (1.4)$$

где QE – квантовая эффективность р-п-перехода, A – геометрическая эффективность, а G – вероятность возникновения гейгеровского разряда.

Важно отметить, что эффективность регистрации света зависит от длины волны регистрируемого излучения.

Временные характеристики SiPM определяются временем развития гейгеровского разряда в ячейке. Собственной характеристикой детектора является разброс времени срабатывания одиночной ячейки SiPMа.

Одной из важнейших характеристик SiPMов является **коэффициент усиления K** , который зависит от значения накопленной емкостью

ячейки заряда:

$$K = \frac{C_{\text{я}}(U - U_{\text{пр}})}{e}, \quad (1.5)$$

где $C_{\text{я}}$ – емкость ячейки; $(U - U_{\text{пр}})$ – перенапряжение, e – заряд электрона. Значение емкости ячейки определяется ее площадью и шириной области пространственного заряда. Также стоит отметить, что в отличие от обычных лавинных фотодиодов зависимость коэффициента усиления SiPMa от перенапряжения является линейной, поэтому требования к стабильности напряжения питания для этих приборов гораздо ниже, чем для ЛФД.

Отдельно необходимо отметить существование так называемого **темнового счета**. При рабочем напряжении, приложенном к SiPMу в отсутствие светового воздействия, выходные импульсы по форме и амплитуде соответствуют сигналам сработавших ячеек. Причины их появления – тепловая генерация свободных носителей, генерация носителей в сильном электрическом поле. Абсолютное значение скорости темнового счета зависит от качества кремния (времени жизни неосновных носителей) и объема, из которого носители могут попадать в область умножения.

Стоит отметить наличие эффектов **afterpulse** (послеимпульсы) и **кросс-токи**, которые вызывают возникновение нежелательных шумов [7]. Первый заключается в освобождении носителей, захваченных ловушками в запрещенной зоне при прохождении предыдущих разрядов, а второй в срабатывании ячеек от «шумового фотона», образовавшегося из-за «схлопывания» электрон-дырочной пары в процессе высвечивания.

Глава 2

Моделирование

Для моделирования взаимодействия аннигиляционных гамма-квантов с кристаллами **GAGG**, был использован Geant4 – инструментарий для моделирования прохождения частиц через материю.

1 Описание детектора

Модель представляет собой два кристалла **GAGG**, размеры которых 3 мм × 3 мм × 20 мм. К концам кристаллов с двух сторон вплотную прилегают кремниевые фотоумножители. Кристаллы также обернуты майларом (рисунки 1.1 и 1.2) для предотвращения вылета фотонов, образовавшихся в сцинтилляторах, за пределы этих кристаллов и увеличения, таким образом, светосбора. При моделировании конструкции детектора учитывались все необходимые оптические свойства кристаллов и характеристики фотоумножителей, в частности коэффициенты отражения материалов, эффективность регистрации SiPMов, время высвечивания сцинтиллятора.



Рисунок 1.1 – Схематичное изображение моделируемой установки

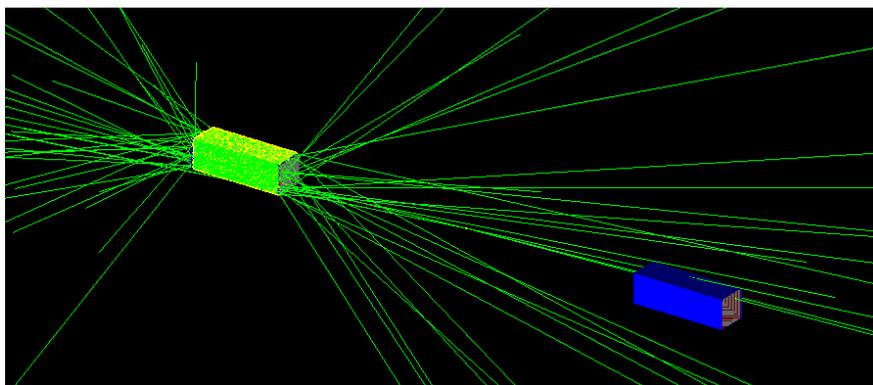


Рисунок 1.2 – Модель кристаллов **GAGG** с SiPMами и генерация частиц

Основная цель моделирования – оценка временного разрешения кристаллов. Поэтому, учитывая также, что аннигиляционные гамма-кванты распространяются вдоль прямой в противоположных направлениях, в качестве модели установки достаточно рассмотреть два соосных кристалла **GAGG**, расположенные на некотором расстоянии друг от друга.

Источник частиц располагался в центре между кристаллами на оси, проходящей через их центры. Гамма-кванты распространялись в пределах небольшого телесного угла, ограниченного размерами кристаллов. SiPMы с обеих сторон, предположительно, улучшат временное разрешение.

2 Анализ результатов моделирования

Для определения разницы времен прилета фотонов в SiPMы и определения значения временного разрешения необходимо было выбрать порог срабатывания SiPMа. В реальном эксперименте порогом является определенная амплитуда сигнала, зависящая от количества зарегистрированных фотонов при каждом воздействии на кристалл излучения. Выбранный порог срабатывания должен быть выше шумовых сигналов, зависящих от множества параметров, таких как температура SiPM, перенапряжение, коэффициент усиления и т.д. В данном случае, в моделировании достаточно выбрать номер фотона, относительно которого и будет проводиться дальнейший анализ данных.

Для наилучшего временного разрешения, необходимо сделать отбор событий по энергии. На рисунке 2.1 представлен амплитудный спектр аннигиляционных фотонов. В рамках моделирования отсечка по энергии эк-

вивалентна определенному количеству зарегистрированных от каждой испущенной частицы оптических фотонов в кристалле. В данном случае порогом выбрано 500 фотонов, тем самым рассматривая только события соответствующие пику полного поглощения. Построено распределение разницы

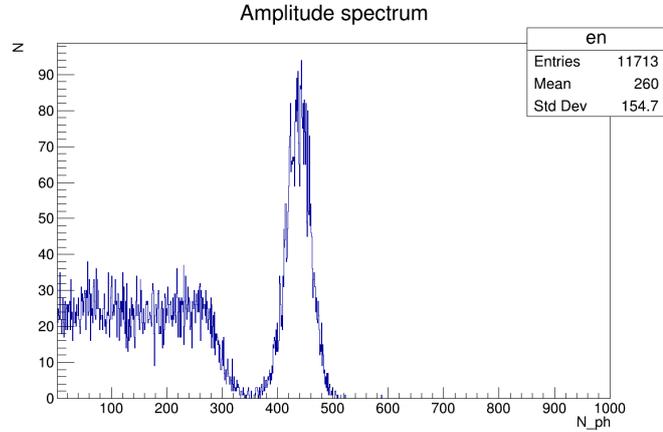


Рисунок 2.1 – Амплитудный спектр аннигиляционных фотонов

между временами прилета фотонов в SiPMы (рисунок 2.2).

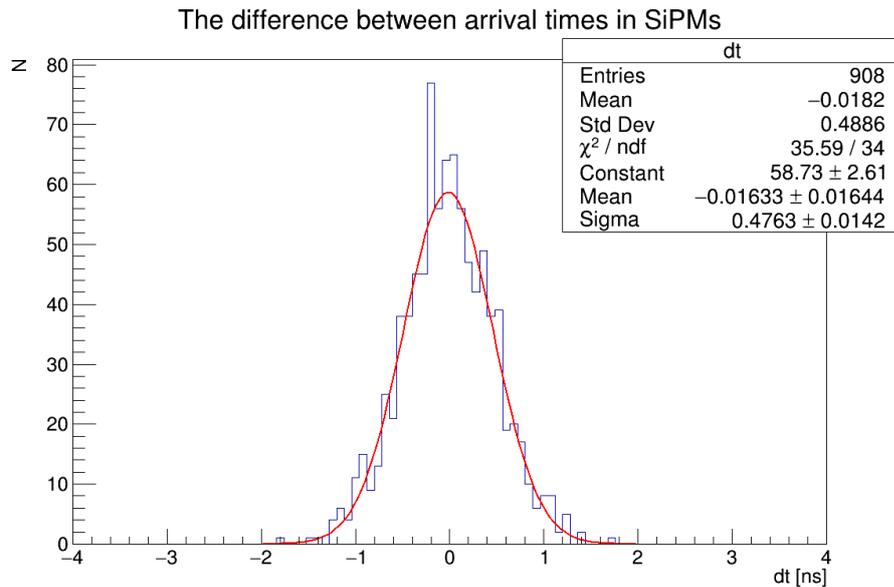


Рисунок 2.2 – Разница времен прилета

Оценено значение временного разрешения, которое с достаточной степенью точности равно ширине распределения на полувысоте:

$$\Delta t = 1.12 \pm 0.03 \text{ нс} \quad (2.1)$$

Глава 3

Эксперимент

1 Описание оборудования

Для считывания сигналов с SiPMов в работе использовалась плата Petiroc2A, имеющая 32 входных канала (рисунок 1.1).

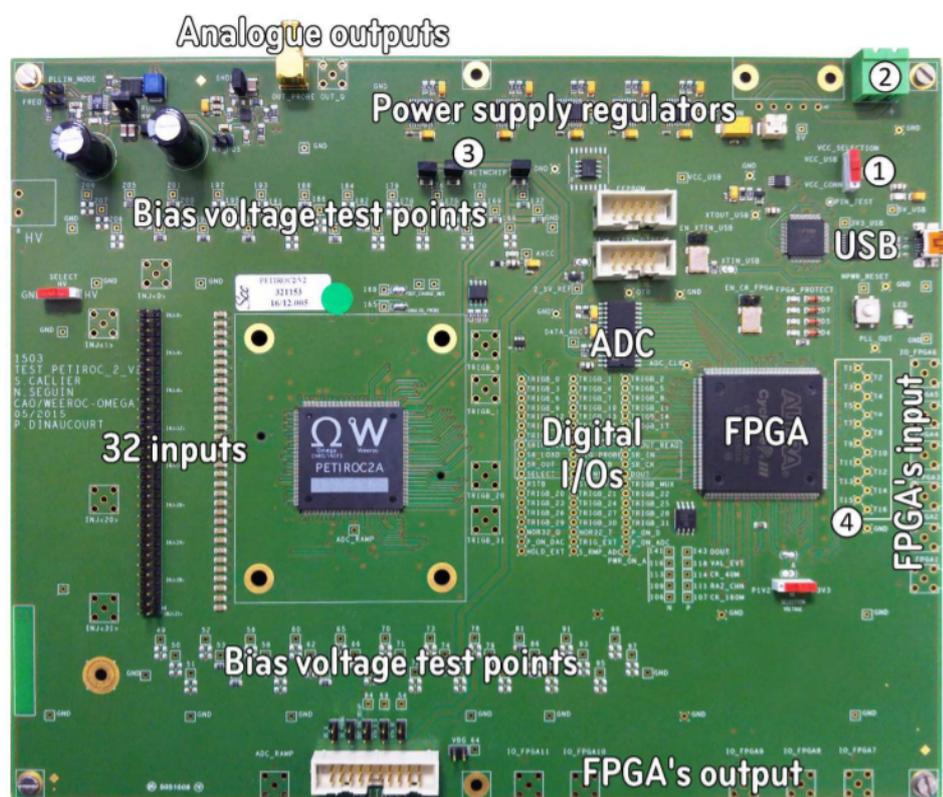


Рисунок 1.1 – Petiroc2A

В данной работе используются SiPMы MicroFC-30035-SMT. Ниже представлены основные необходимые для работы характеристики исполь-

зуемых SiPMов, также на рисунке 1.2 представлена зависимость эффективности регистрации фотонов от длины волны излучения.

Пробойное напряжение, В	Макс. перенапряжение, В	Длина волны максимума спектра, нм
24.5	5	420

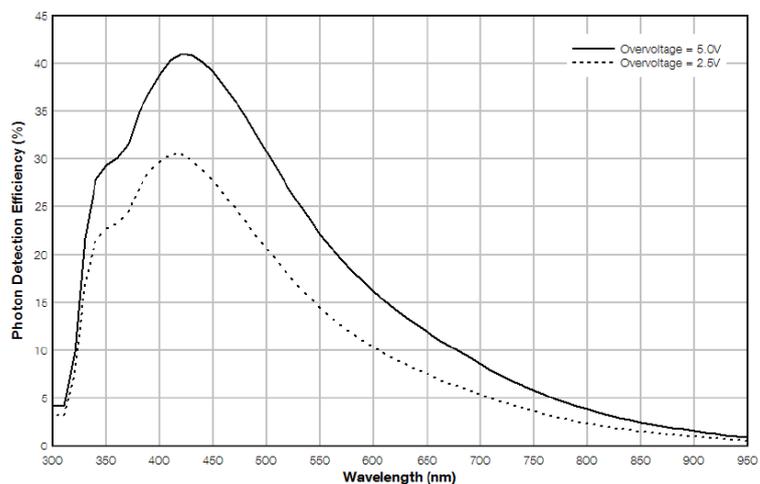
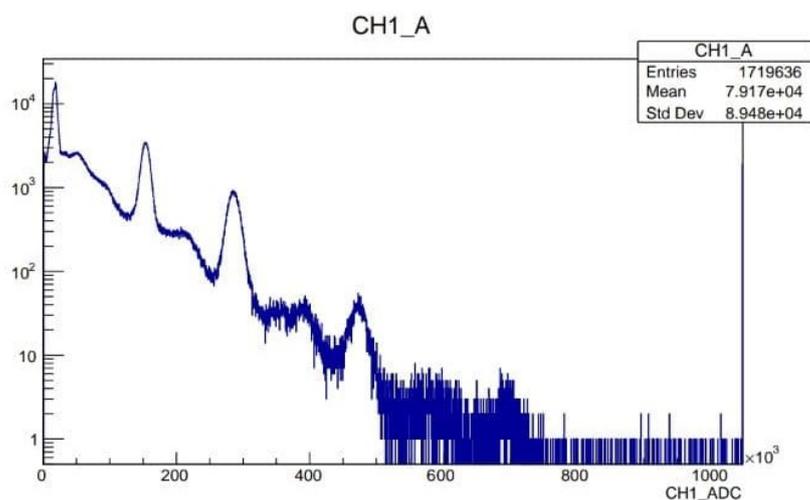


Рисунок 1.2 – Эффективность регистрации SiPM

В качестве источника излучения используется изотоп Bi^{207} , энергетический спектр [8] которого представлен на рисунке 1.3.



The energy values of ^{207}Bi are as follows:

1st Peak: 569.194 KeV, 2nd Peak: 1063.1 KeV, 3rd Peak: 1763.58 KeV

Рисунок 1.3 – Энергетический спектр Bi^{207}

Для дальнейшего анализа интересен пик, соответствующий энергии в 569 кэВ, так как при рассмотрении первого пика критичным будет соотношение сигнал-шум.

2 Тестирование каналов

В прототипе ПЭТ потенциально будут использоваться несколько пар SiPMов, поэтому необходимо было протестировать работоспособность всех каналов. Для этого на два канала подавался сигнал с генератора. В дальнейшем один из каналов заменялся другим каналом, чтобы проанализировать работу в режиме совпадений (рисунки 2.1 и 2.2).

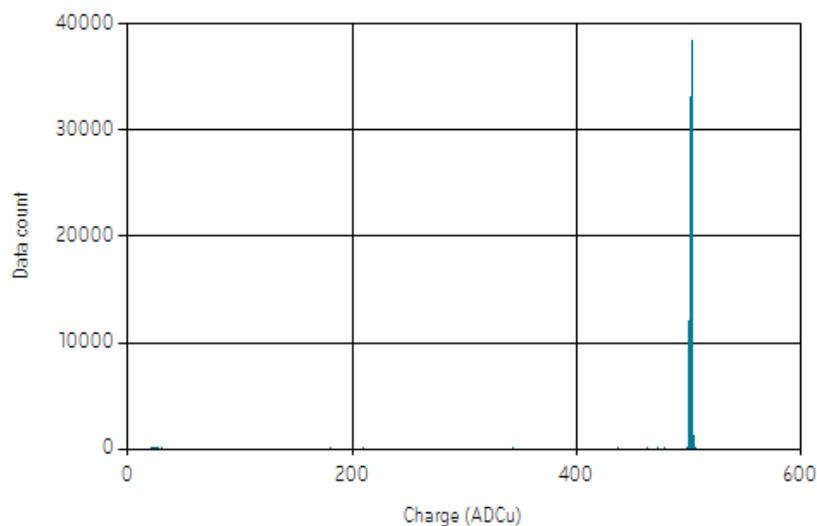


Рисунок 2.1 – Амплитудный спектр генераторного сигнала

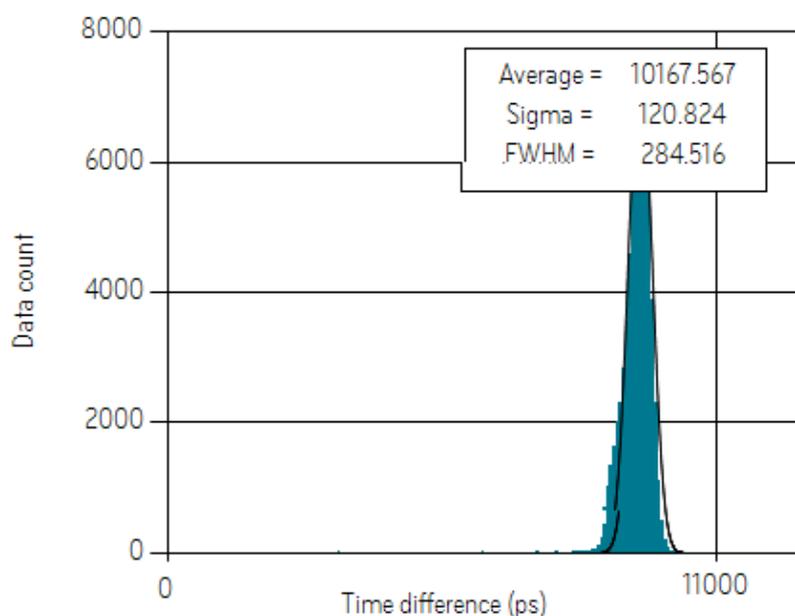


Рисунок 2.2 – Разница времен прихода сигналов на двух каналах

В результате установлено, что каналы разделены на две группы по 16 каналов, и два канала из одной группы не видят друг друга в режиме совпадений. Также на одном из каналов имеет место счет событий в отсутствии сигнала на нем. Предположительно имеются сторонние шумы и в дальнейшем необходимо установить их источник и в конечном счете устранить.

3 Определение рабочей точки

Для проведения измерений необходимо установить оптимальные параметры работы, в частности рабочее напряжение на SiPMax.

Установка для измерений состояла из кристалла GAGG и двух SiPMов, вплотную прилегающие к концам сцинтиллятора. В качестве источника излучения использовался изотоп Bi^{207} , который крепился к кристаллу.

Измерения проводились на напряжениях от 28 В, до 30.5 с шагом в 0.5 В. При напряжении меньше 28 В отсутствовал сигнал с SiPMов, а напряжение больше 30.5 сильно больше максимального рекомендуемого перенапряжения.

Для каждого из напряжений получен спектр Bi^{207} (рисунки 3.1 и 3.2). Пик соответствующий 269 кэВ фитировался суммой распределений Гаусса и двух экспоненциальных распределений.

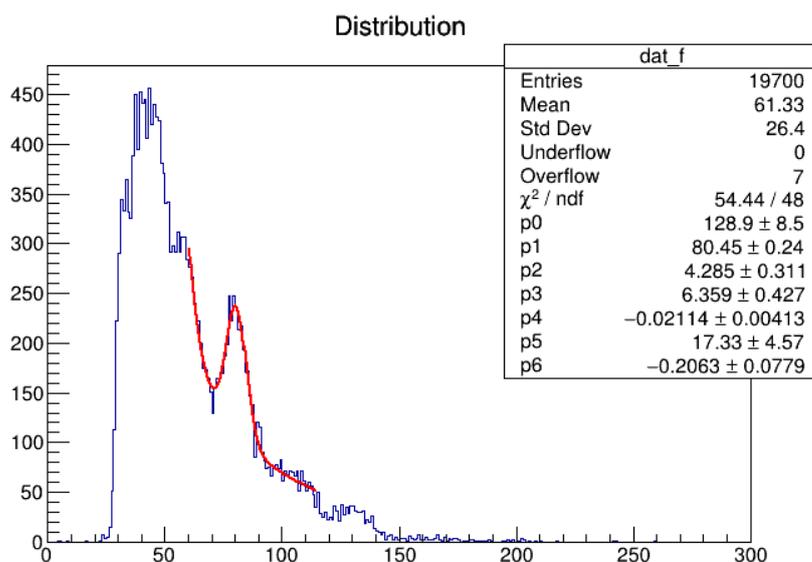


Рисунок 3.1 – Спектр висмута при напряжении 28.5 В

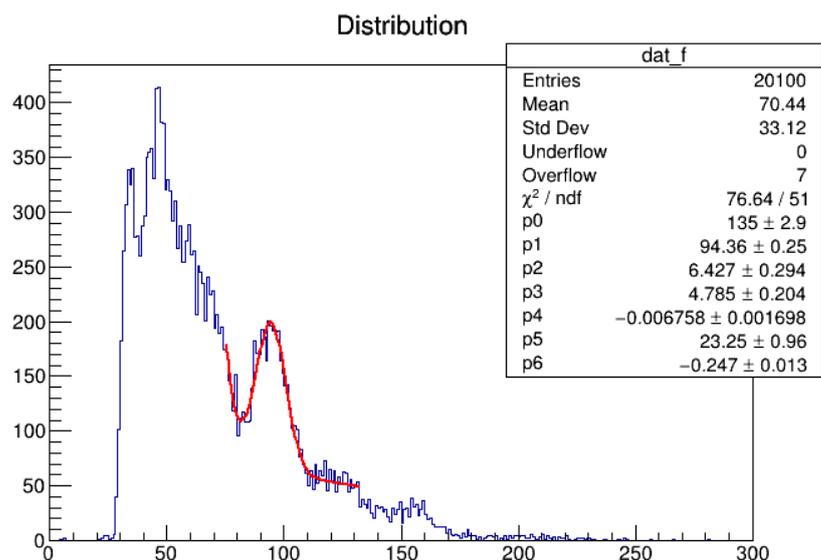


Рисунок 3.2 – Спектр висмута при напряжении 29 В

Определялось относительное энергетическое разрешение, как отношения ширины на полувысоте пика к положению пика. На рисунке 3.3 представлена зависимость энергетического разрешения от напряжения на SiPMax. Полученная зависимость не сопоставима с ожидаемым результатом. Предположительно, имеются глобальные проблемы в электронном оборудовании, что не позволяет проводить корректные экспериментальные измерения.

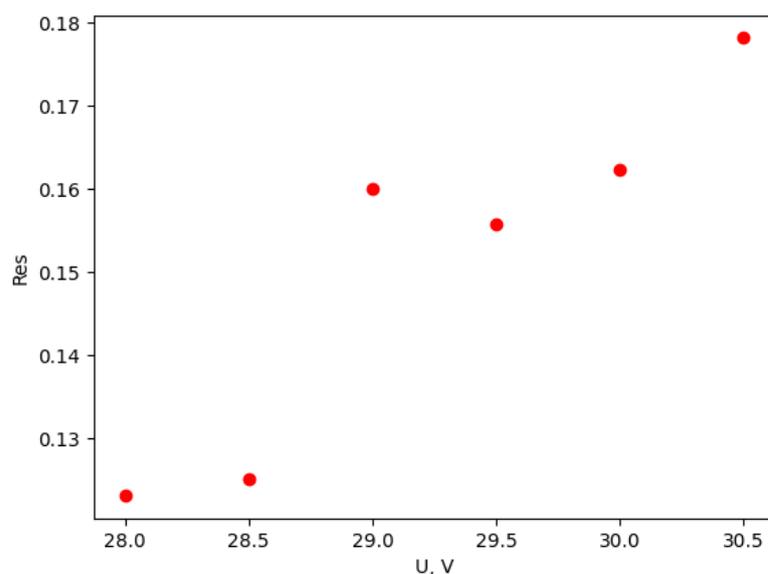


Рисунок 3.3 – Зависимость относительного энергетического разрешения от напряжения на SiPMax

Заключение

В рамках работы проведено Монте-Карло моделирование с помощью программного пакета Geant4. Главной составляющей модели являлись кристаллы **GAGG**. В результате моделирования получены распределения разницы времен прилета оптических фотонов, рожденных в кристаллах при их взаимодействии с аннигиляционными гамма-квантами. Основываясь на этих распределениях был выбран порог модели, который составляет 5 фотонов, и с его учетом оценено временное разрешение кристаллов:

$$\Delta t = 1.12 \pm 0.03 \text{ нс} \quad (3.1)$$

Также необходимо было подготовить электронику для отработки измерений сигналов с SiPMов с помощью платы Petiros2A. В результате установлено разбиение каналов платы на две группы, внутри которых невозможно проведение измерения в режиме совпадений.

Произведена попытка определения рабочего напряжения на SiPMах, для чего построен график зависимости относительного энергетического разрешения от напряжения. Однако результат не совпадает с ожидаемым распределением.

В дальнейшем необходимо определить проблемные места в имеющемся электронном оборудовании, провести корректные измерения и в конечном счете собрать прототип ПЭТ-сканера.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Geant4: a simulation toolkit., url:<https://geant4.web.cern.ch/>.
2. Шендрик Р. Ю. Введение в физику высоких энергий. Введение в физику сцинтиляторов. т. 105. — Мир, 2013.
3. Перкинс Д. Введение в физику высоких энергий. — Мир, 1975. — с. 71—73.
4. Experimental time resolution limits of modern SiPMs and TOF-PET detectors exploring different scintillators and Cherenkov emission / S. Gundacker [и др.] // Physics in Medicine & Biology. — 2020.
5. Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л. Кремниевый фотоэлектронный умножитель // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. — 2007. — авг. — с. 80—86.
6. Иванов И. Методика оценки и сравнения кремниевых фотоумножителей // Photonics. — 2015. — т. 54, № 6. — с. 70—79.
7. SensL. Introduction to SiPM. — 02/2017.
8. Shatat A., Millo F. $\gamma - \beta$ Spectrometry of ^{207}Bi . — 2019. — дек.