

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 ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК VaF_2

Научный руководитель:

к.ф.-м.н., доц.

_____ А. В. Гробов

Научный консультант:

_____ Г. Д. Долганов

Выполнил:

_____ Д. Д. Кандыбин

Москва 2020

Содержание

Содержание	1
Введение	2
1 Литературный обзор	4
1.1 Сцинтилляторы	4
1.2 SIPM	8
1.3 xTDC4	13
2 Выполнение	16
2.1 Моделирование	16
2.2 Выполнение эксперимента	18
3 Заключение	21
Список использованных источников	22

Цель работы

Целью работы является подготовка установки для измерения временных характеристик сцинтиллятора BaF_2 с помощью платы xTDC4, а также Монте-Карло моделирование.

Введение

Физика элементарных частиц в наши дни - одно из ключевых направлений в исследованиях, ведь область их применения безумно широка. Одной из этих 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 – реальная задача.

Для регистрации гамма-квантов в ПЭТ могут использоваться различные сцинтилляторы. Для определения оптимального материала сцинтиллятора необходимы правильно поставленные эксперименты, а также оборудование обладающие определенными параметрами.

Актуальной сферой исследований являются времяпролетные ПЭТ (ТОФ-ПЭТ) которые еще 2-3 десятка лет назад не могли конкурировать с ПЭТ-сканерами на основе германата 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 ТОФ-ПЭТ-системы.

Целью проведения данной работы являлось получение навыков по ра-

боте с платой xTDC4 и измерение, с ее помощью, временных характеристик сцинтиллятора BaF_2 , который в дальнейшем может использоваться в ПЭТ. На первом этапе работы, в связи с отработкой методики временных измерений с использованием данной платы и отсутствием позитронного источника в свободном доступе, была произведена попытка моделирования установки с сцинтиллятором, а также процессов, которые происходят с ним, используя Geant4[1].

1 Литературный обзор

1.1 Сцинтилляторы

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

Основным применением этих веществ является использование их в сцинтилляционных детекторах ядерных излучений. В таких 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.

Характеристики сцинтилляторов

Сцинтилляторы обладают рядом характеристик [3] [4], таких как:

1. Плотность;

Вероятность детектирования гамма-квантов меняется в зависимости от расположения атомов и молекул в сцинтилляторе, по этой причине необходимо учитывать плотности сцинтилляторов.

2. Световыход;

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 в статистически накопленном энергетическом спектре линия (которая для идеального детектора представляла бы дельта-функцию) оказывается размытой, 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:

$$I = A \exp -t/\tau,$$

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 вещества становится неоднородной, меняются его характеристики и, как следствие, ухудшается энергетическое разрешение детектора.

Использование в ПЭТ

В первых ПЭТ-сканерах в качестве детектора γ -излучения использовался $NaI(Tl)$, однако в настоящее время из-за гигроскопичности, низкой плотности и длительного времени высвечивания он применяется редко.

В большинстве ПЭТ-сканеров используются кристаллы BGO ($Bi_4Ge_3O_{12}$ – ортогерманат висмута) и LSO ($Lu_2SiO_5(Ce)$ – ортосиликат лютетция)[5].

Эти кристаллы не гигроскопичны, и поэтому им не требуется герметичная упаковка. Оба сцинтиллятора имеют высокие плотность и коэффициент линейного ослабления, но LSO обладает более коротким временем высвечивания (40 нс), чем BGO (300 нс) и более высоким выходом световых фотонов на единицу поглощенной энергии (29 фотонов против 6). Поэтому кристаллы LSO в настоящее время являются предпочтительными для использования в ПЭТ.

Однако энергетическое разрешение у кристалла LSO хуже, чем у BGO. Кроме того, он содержит природный радиоактивный изотоп ^{176}Lu в количестве 2.6 %.

Некоторые производители используют в ПЭТ-сканерах сцинтиллятор GSO ($Gd_2SiO_5(Ce)$ – ортосиликат гадолиния), несмотря на его низкий световой выход и меньшую тормозную способность, чем у LSO. Эти кристаллы достаточно хрупкие и поэтому требуют большой осторожности при их изготовлении.

Также используется GAGG(Ce) ($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$ – Гадолиний-алюминий-галлиевый гранат активированный ионами церия), который немного медленнее, чем аналогичный LSO, но имеет почти вдвое больший световыход (56 фотонов на кЭв), из-за чего GAGG дороже, и по этой причине крайним критерием выбора становится цена.

Кристалл BaF_2 обладает рекордным временем высвечивания (78 пс и 747 пс для быстрых компонент [4]), но сцинтиллирует на очень малой длине волны (195 нм и 220 нм), а SiPM, чувствительные к таким длинам волн появились недавно, поэтому фторид бария в ПЭТ пока не применяется, но является перспективным для использования в TOF-ПЭТ.

Так как световой выход кристалла BaF_2 для быстрой компоненты достаточно мал, критически важным становится соотношение сигнал-шум, а значит высокая чувствительность фотоумножителей на рабочей длине волны

1.2 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 (SiPM) представляет собой микропиксельный лавинный фотодиод, работающий в гейгеровском режиме и предназначенный для счета фотонов. Каждый пиксель SiPMа создает импульсный выходной сигнал при обнаружении единичного фотона. Характерный размер ячейки составляет порядка 30–100 мкм. Плотность упаковки матрицы — 100–1000 ячеек/мм²[6]. 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 применениях, в которых требуется детектирование очень слабых световых сигналов на уровне единичных фотонов.

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 3). Тот факт, что отдельные пики четко выражены и различимы друг от друга говорит о том, что существует минимальная вариация между коэффициентами усиления отдельных пикселей, из которых состоит кремниевый фотоумножитель.

При попадании фотона на активную область фотодиода выходной сигнал с каждого пикселя постоянен и не зависит от числа падающих фо-

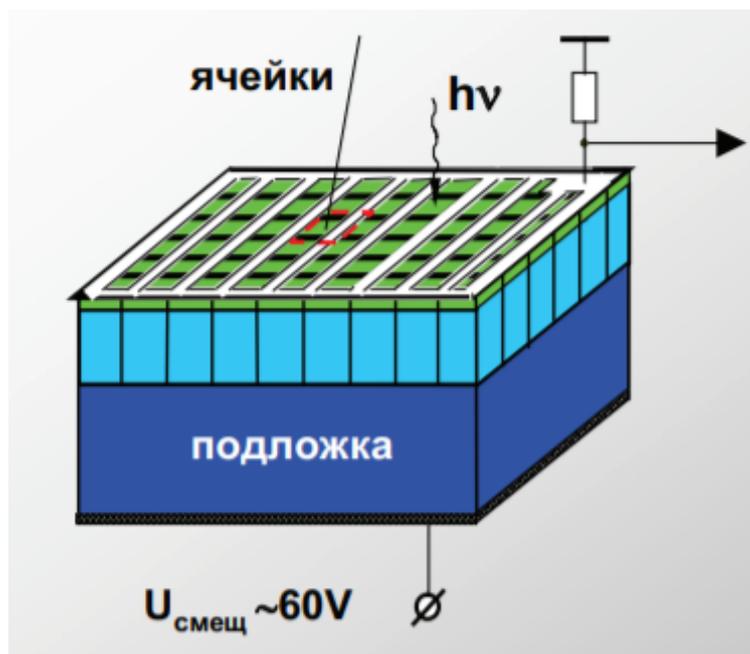


Рисунок 1 – Схема SiPM

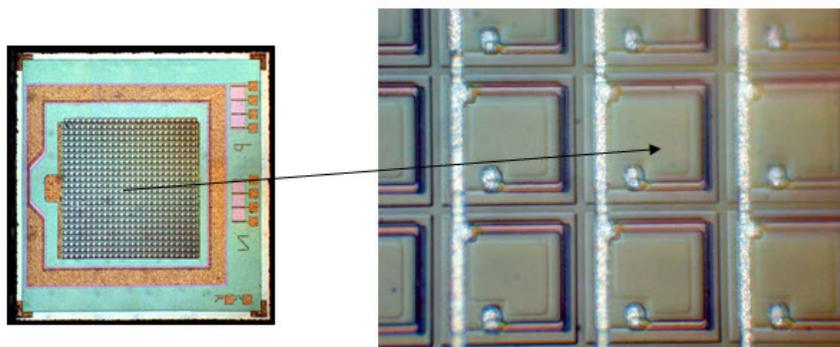


Рисунок 2 – Ячейки SiPM

тонов. 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 суммируют друг друга, создавая большой импульс. Измеряя высоту или электрический заряд этого импульса Q_{out} , можно определить количество фотонов детектируемых кремниевым ФЭУ. [7]

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

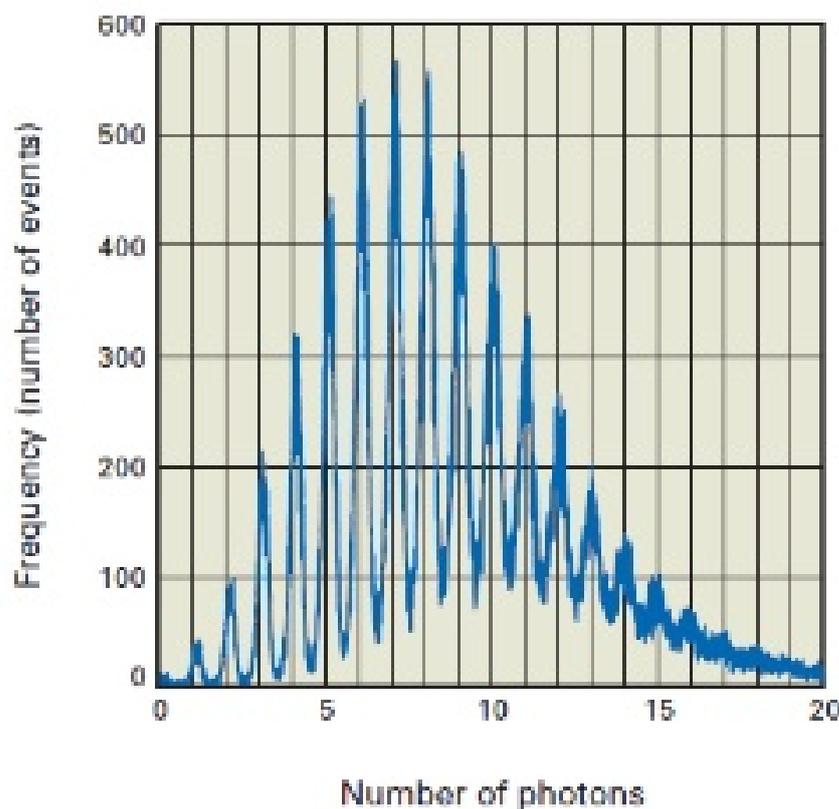


Рисунок 3 – Осциллограмма

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

Характеристики SiPMов

Эффективность регистрации фотонов ε (основная характеристика фотоприемника) — это вероятность того, что падающий на фотоприемную площадку SiPM фотон будет зарегистрирован. Эту величину можно определить, как [6]:

$$\varepsilon = \frac{\langle N_{\text{ячеек}} \rangle}{\langle N_{\text{фотонов}} \rangle},$$

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 [6]:

$$\varepsilon = QE \cdot A \cdot G,$$

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 SiPMa.

Одной из важнейших характеристик SiPMов является **Коэффициент усиления** (K), который зависит от значения накопленной емкостью ячейки заряда:

$$K = \frac{C_{\text{я}}(U - U_{\text{пр}})}{e}, \quad (1)$$

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 (ЛФД) зависимость коэффициента усиления SiPMa от перенапряжения является линейной, поэтому требования к стабильности напряжения питания для этих приборов гораздо ниже, чем для ЛФД.

Также необходимо отметить присутствие 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 ко-

торого носители могут попадать в область умножения. Типичные значения в рабочем режиме при комнатной температуре составляют 0,5–2 МГц/мм².

Стоит отметить наличие эффектов afterpulse (послеимпульсы) и кросстоки, которые вызывают возникновение нежелательных шумов [8]. Первый заключается в освобождении носителей, захваченных ловушками в запрещенной зоне при прохождении предыдущих разрядов, а второй «схлопыванием» электрон-дырочной пары в процессе высвечивания, и, как следствие, образование «шумового» фотона.

До недавнего времени чувствительность SiPMов к коротковолновому излучению была очень низкая, что не позволяло использовать с кристаллами BaF_2 . При этом использование сместителя не позволит реализовать малые времена высвечивания.

В данной работе используются SiPMы, для которых значение эффективности регистрации фотонов с длиной волны в области ниже 200 нм порядка 25%, что предположительно позволит реализовать малые времена высвечивания кристалла BaF_2 .

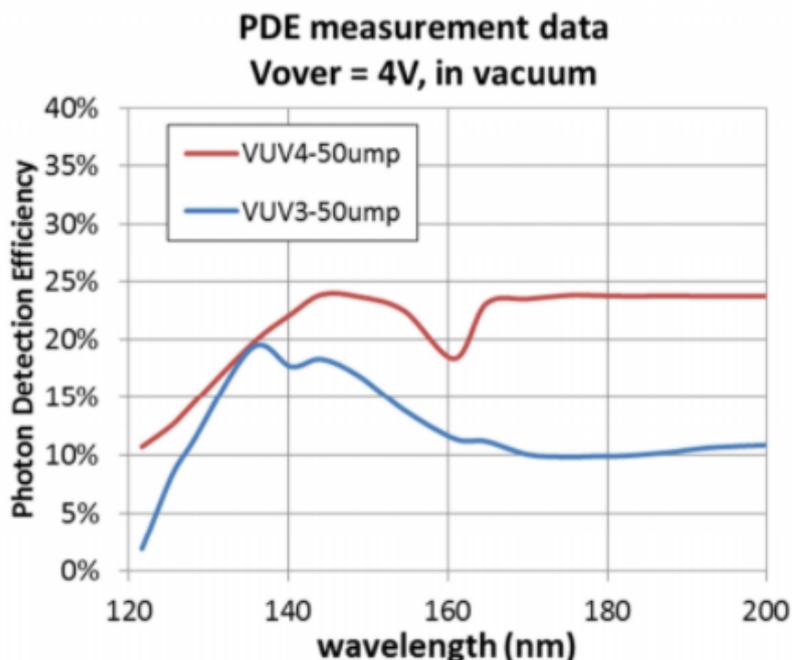


Рисунок 4 – Эффективность регистрации фотонов

1.3 xTDC4

xTDC4 – это обычный time-to-digital преобразователь, в котором записываются временные метки переднего или заднего фронтов цифровых импульсов.[9] xTDC4 производит поток выходных пакетов, каждый из ко-



Рисунок 5 – xTDC4

торых содержит данные из события одиночного запуска, то есть относительные временные метки всех стоп-импульсов, которые происходят в пределах заданного пользователем диапазона.

Свойства платы[9]

- 4 канала с разрешением 8 пс;
- Стандартный диапазон – 218 мкс;
- Расширенный диапазон – 14 мс;
- Размер бина ≈ 13 пс;
- Отсутствует мертвое время между группами
- Максимальная начальная частота – 4 МГц;

- PCIe 1.1 x1 с пропускной способностью 200 Мбит/с.

Входы и разъемы платы

Плата может быть установлена в любой слот X1 PCIe. Входы платы изображены на Рисунке 6. Для входного подключения используются соединительные кабели Lemo-00. Входы подключены к переменному току и имеют сопротивление в 50 Ом (схема изображена на Рисунке 7. Активная нагрузка может быть использовано для генерации импульсов постоянного тока для автоматического внутреннего срабатывания и управления внешними устройствами.

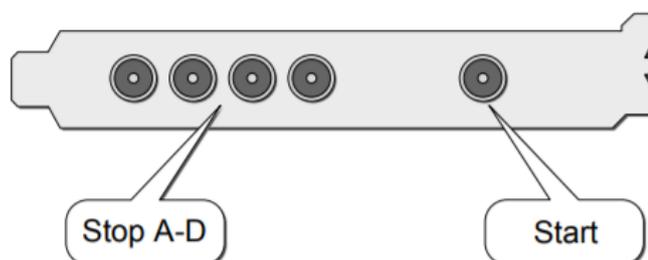


Рисунок 6 – Входные разъемы xTDC4

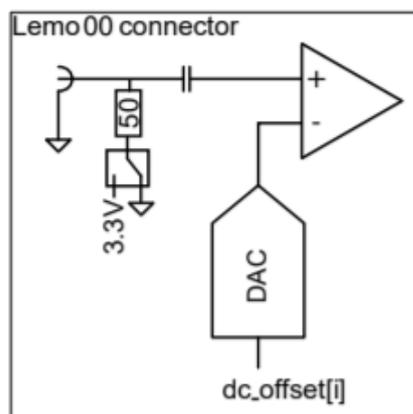


Рисунок 7 – Входная схема для каждого из пяти входных каналов

Функционал платы

xTDC4 – это «классический» TDC (time-to-digital converter), то есть формально он определяет временной интервал между событиями. xTDC4

записывает разницу во времени между входом «Start» и стоп-входами («А»-«D»). Каждый стоп-канал «А»-«D» может быть включен индивидуально. Точность полученных временных меток составляет около 8 пс. Для надежного обнаружения «попаданий» сигнал должен быть стабильным в течение не менее 500 пс до и после фронта. Между несколькими попаданиями по стоп-каналу мертвое время составляет около 5 нс. В течение этого мертвого времени дальнейшие хиты на стоп-канале сообщаются только с грубой временной меткой. Максимальная частота срабатывания на стартовом канале составляет 4 МГц.

2 Выполнение

2.1 Моделирование

Для моделирования установки, с помощью которой в дальнейшем будут проводиться измерения, был использован Geant4 – инструментарий для моделирования прохождения частиц через материю.

Геометрия детектора

Конструкция представляет собой два кристалла BaF_2 размерами 5 мм × 5 мм × 15 мм. К концам кристаллов вплотную прилегают кремниевые фотомножители (SiPMы). Кристаллы также обернуты майларом. Все необходимые свойства материалов учтены (например, коэффициенты отражения, эффективность SiPM, быстрая и медленная константы для фторида бария). В дальнейшем планируется узнать можно ли улучшить временное разрешение добавлением второго SiPMа с внутренней стороны кристалла.

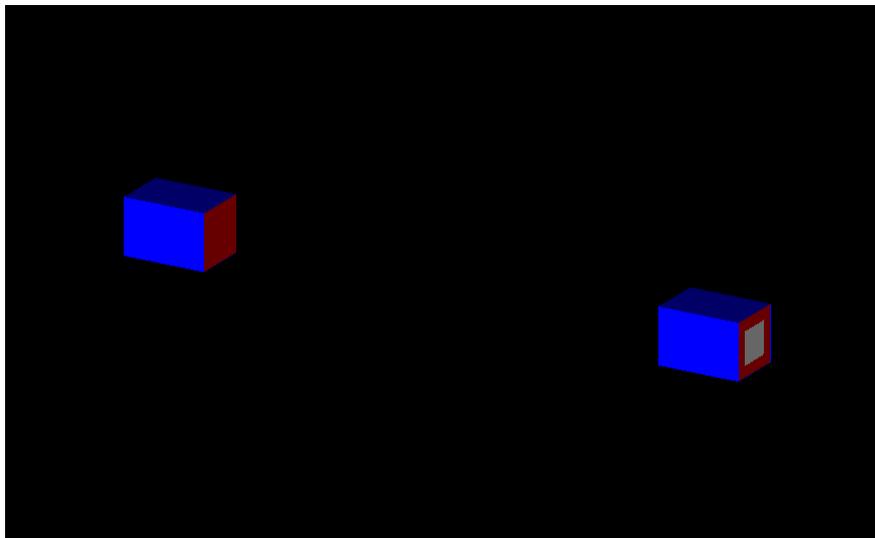


Рисунок 8 – Детектор

Генерация частиц

Источник частиц изначально располагался в центре между кристаллами. Далее его положение менялось - сначала двигался к одному кристаллу, затем к другому.

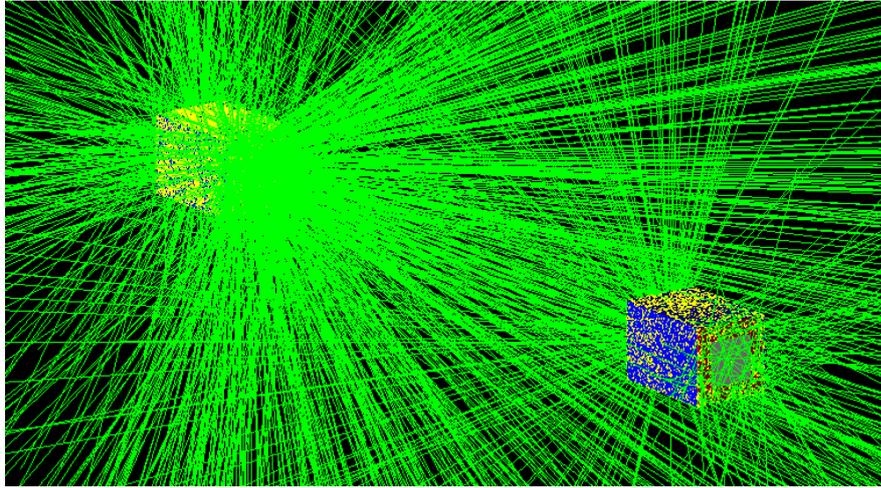


Рисунок 9 – Запуск частиц

На основе полученных данных построены распределения разницы времени между приходами частиц на SiPMы для различных положений источника.

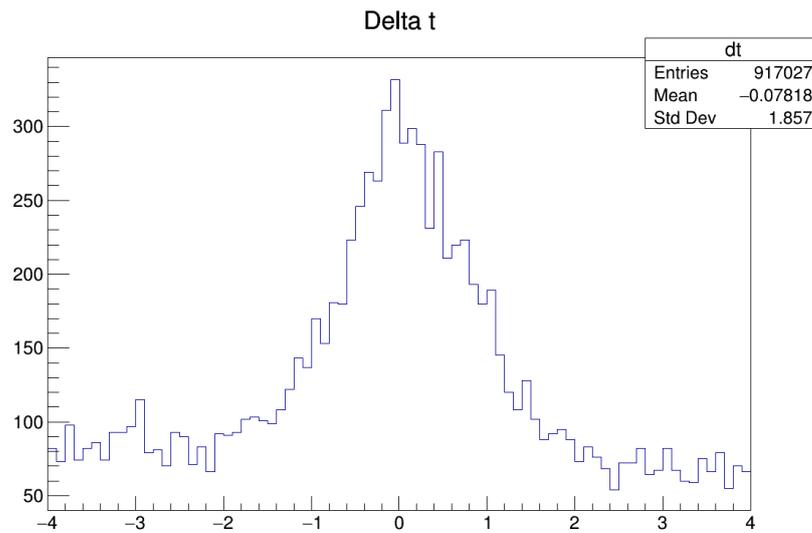


Рисунок 10 – Запуск частиц

Полученные результаты, очевидно, имеют существенные ошибки. Конечные данные никак не сопоставимы с ожидаемыми.

В дальнейшем планируется доработать модель и сравнить временное разрешение полученное на основе моделирования с измеренным экспериментально. Это позволит оценить, какая часть разброса обусловлена геометрическими размерами кристалла, а что является следствием размытия

сигнала предусилителем и внешними наводками.

2.2 Выполнение эксперимента

User interface

Для временных измерений используется плата xTDC4. Используемый функционал платы - измерение разницы времен между событиями по различным каналам.

Была проведена работа по оптимизации и настройке имеющегося кода для работы платы в наших целях. Также для упрощенной работы с платой xTDC4 был разработан простой интерфейс, где вводятся необходимые основные данные. Для разработки использовался интерфейс Windows Forms [10], отвечающий за графический интерфейс пользователя и являющийся частью Microsoft .NET Framework.

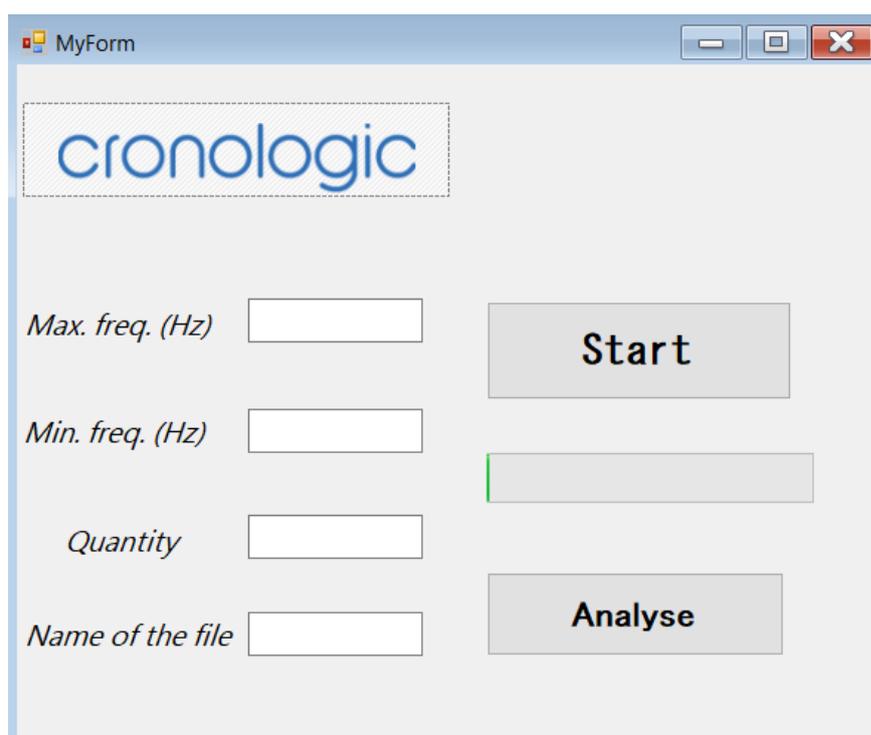


Рисунок 11 – User interface

Для работы необходимо ввести диапазон ожидаемых платой частот, количество записываемых событий, а также имя файла, который будет создан и в который будут записаны итоговые данные.

Кнопка «Analyse» недоступна для нажатия, пока не будет записан файл. После нажатия происходит запись в рут-файл и построение гистограмм.

Сборка установки

Установка представлена на рисунке 12. Два смоделированных и распе-

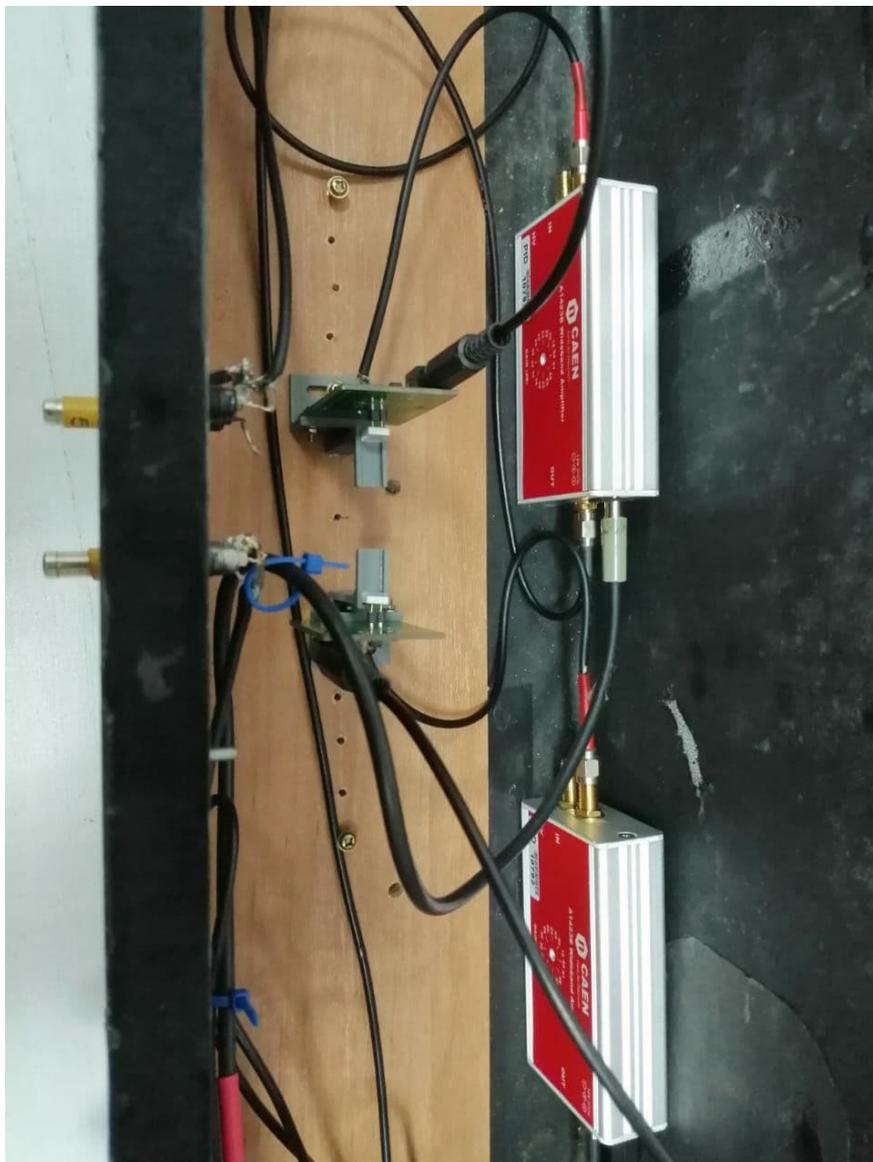


Рисунок 12 – Установка

чатанных на 3D принтере «уголка», к которым крепятся платы с SiPM, прикручиваются к доске. В «пазах» располагаются кристаллы BaF_2 . Исходное расстояние между ними 5 см. На доске имеются отверстия с шагом в 1.5 см, для дальнейшего изменения расстояния между кристаллами. Начальное небольшое расстояние обусловлено тем, что позитронный

источник, с которым планируется проводить измерения, будет обладать достаточно низкой активностью.

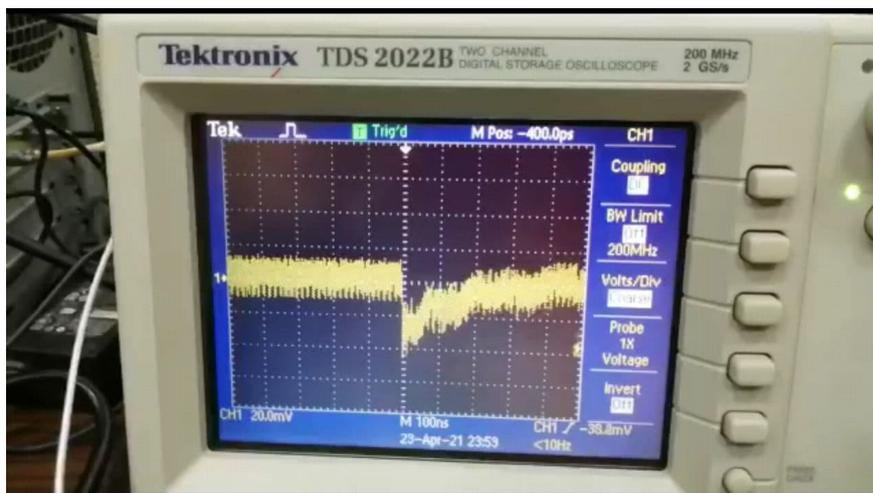


Рисунок 13 – Сигнал с одной из плат

На рисунке 13 представлен сигнал с одной из плат, полученный при первичных измерениях. Видны сильные наводки, сигнал со второй платы отсутствовал.

В дальнейшем планируется доработать установку, выяснив причины шумов, с целью избежания систематических ошибок в дальнейших временных измерениях.

3 Заключение

В ходе работы проведено Монте-Карло моделирование и получены данные, которые в дальнейшем могут быть сопоставимы с полученными экспериментально. В дальнейшем планируется доработать модель и получить большую статистику данных.

Также проведен ряд действий для подготовки экспериментальных измерений. Проведена работа по доработке программы для измерения с помощью платы xTDC4 и разработан простой User Interface для нее. Собрана установка для проведения временных измерений сцинтиллятора BaF_2 . В дальнейшем планируется провести измерения и сопоставить их с данными моделирования.

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. *Gundacker Stefan T. R. M.* Experimental time resolution limits of modern SiPMs and TOF-PET detectors exploring different scintillators and Cherenkov emission // *Physics in Medicine & Biology*. — 2020.
5. *Климанов В. А.* Ядерная медицина. Радионуклидная диагностика// Учебное пособие для академического бакалавриата. т. 307. — Юрайт, 2019.
6. *Клемин С. Кузнецов Ю. Ф. Л.* Кремниевый фотоэлектронный умножитель // *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. — 2007. — авг. — с. 80—86.
7. Кремниевые фотоумножители, url:<http://www.azimp.ru/articles/tech/100/>.
8. *SensL.* Introduction to SiPM : tech. rep.
9. *GmbH & Co. KG cronologic.* xTDC4 User Guide : tech. rep. — 11/2019. — P. 29.
10. Windows Forms, url:<https://docs.microsoft.com/>.