

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

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

УДК 539.1.05

**ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ
32-КАНАЛЬНОГО МАКЕТА ПЭТ НА ОСНОВЕ
ДЕТЕКТОРОВ GAGG-SIPM**

Студент

_____ А. А. Козлов

Научный руководитель,
старший преподаватель

_____ Ф. А. Дубинин

Москва 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	2
1 Теоретические сведения	3
1.1 Изучаемая реакция распада	3
1.2 Сцинтиллятор GAGG(Ce)	3
1.3 Сведения о тестовой плате Petiros2A	4
2 Измерение временного разрешения макета ПЭТ	6
2.1 Описание макета ПЭТ	6
2.2 Определение оптимальных рабочих параметров платы . . .	7
2.2.1 Постановка задачи	7
2.2.2 Определение параметров C_{in} и C_f	7
2.3 Определение временного разрешения	8
2.4 Анализ полученных результатов	10
3 Заключение	11

ВВЕДЕНИЕ

Одной из ключевых характеристик любого детектора ионизирующего излучения является его временное разрешение - параметр, отвечающий за возможность различать между собой два близких по времени регистрации события.

В современных установках, выполняющих роль позитронно-эмиссионных томографов (ПЭТ), параметр временного разрешения отвечает за качество результата диагностики, а значит, является важнейшей характеристикой устройства. В последнее время активно ведутся работы по улучшению временного разрешения систем ПЭТ КТ [1] [2].

В данной работе проводится измерение временного разрешения для макета 32-канального ПЭТ на основе кристаллов GaGG(Ce) (гадолиний-алюминий-галлиевый гранат, активированный ионами церия) и кремниевых фотоумножителей SiPM. Исследуется зависимость временного разрешения данной установки от напряжения смещения на SiPM, проводится сравнение полученного результата с актуальными данными для современных моделей ПЭТ КТ.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. ИЗУЧАЕМАЯ РЕАКЦИЯ РАСПАДА

Для исследования организма методами позитронно-эмиссионной томографии в фармацевтике применяются радиофармпрепараты (РФП), которые в ходе многоступенчатого радиоактивного распада излучают пару гамма-квантов, регистрируемых детекторами ПЭТ.

В данной работе в качестве источника излучения применяется титан-44, имитирующий РФП, находящийся в теле пациента. Титан-44 испытывает электронный захват, превращаясь в скандий-44, который, в свою очередь, является источником позитронов. Позитроны, излучаемые в ходе β^+ -распада скандия-44, затем аннигилируют с электронами на пару γ -квантов, разлетающихся под углом в 180 градусов и имеющих энергию 511 кэВ:



Макет ПЭТ регистрирует рождающиеся в случайной точке пространства γ -кванты, после чего может производиться отбор одновременных регистраций, отвечающих аннигиляции позитрона с электроном.

1.2. СЦИНТИЛЛЯТОР GAGG(CE)

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

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

Таблица 1.1 — Характеристики сцинтиллятора GAGG(Ce)

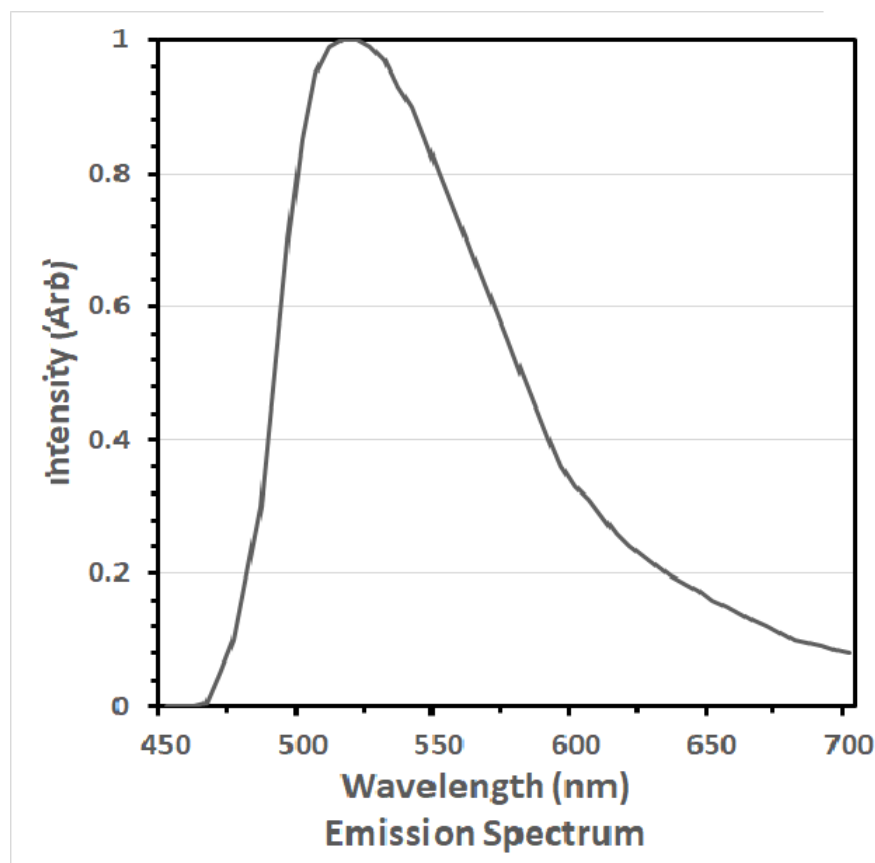


Рисунок 1.1 — Спектр высвечивания сцинтиллятора GAGG(Ce)

1.3. СВЕДЕНИЯ О ТЕСТОВОЙ ПЛАТЕ PETIROC2A

Petiroc2A - это 32-канальный интерфейсный модуль ASIC, предназначенный для считывания показаний кремниевых фотоумножителей (SiPM) обеих полярностей для измерения времени пролета частиц [4]. Petiroc 2A сочетает в себе очень быстрый запуск с низким уровнем дрожания и точные измерения заряда и времени. Энергия и время преобразуются в цифровую

форму с помощью 10-разрядного АЦП и постоянного тока со скоростью 40 бит/с. Концепция ASIC заключается в объединении двух измерительных линий, не создающих друг другу помех при одновременном измерении.

Потребляемая мощность составляет 6 мВт на канал, без учета буферов, используемых для вывода аналоговых сигналов. Основным назначением Petiros 2A является создание прототипов ПЭТ-устройств для определения времени полета, но его также можно использовать для любых задач, требующих как точного разрешения по времени, так и точного измерения энергии [5].

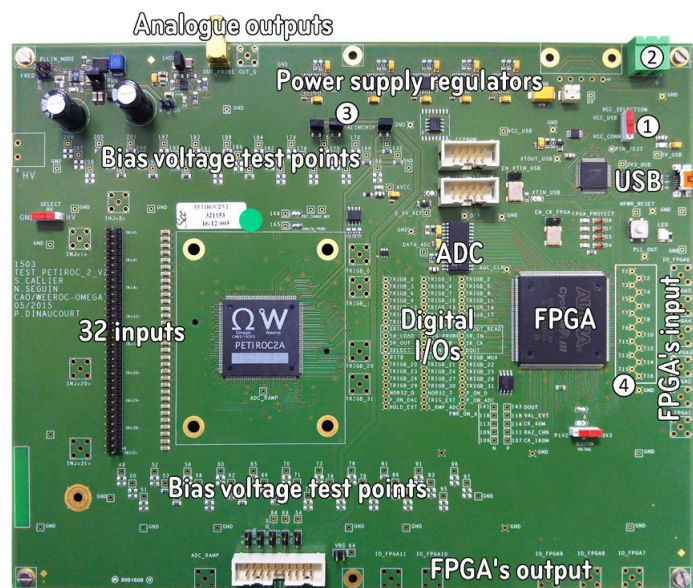


Рисунок 1.2 — Вид на плату PETIROC2A сверху

На схеме обозначены:

1. Переключатель режима питания платы
2. Коннектор для подачи питания на плату (6 V)
3. Регуляторы питания
4. Тестовые точки подключения для ПЛИС (программируемой логической интегральной микросхемы)

На тестовой плате доступны 32 триггерных выхода (триггер $b<0:31>$). Данные входы используются для присоединения к плате кремниевых фотоумножителей (SiPM).

Для работы с данной тестовой платой используется программное обеспечение WEEROC, написанное на языке программирования C#.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ МАКЕТА ПЭТ

2.1. ОПИСАНИЕ МАКЕТА ПЭТ

Макет ПЭТ состоит из платы PETIROC2A, к которой подключаются 32 канала с детекторами на основе кристаллов GAGG(Ce) и кремниевых фотоумножителей SiPM.

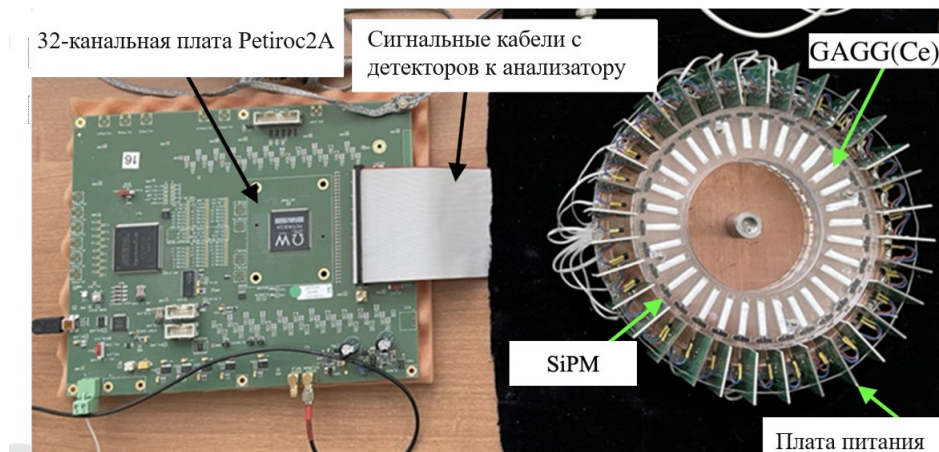


Рисунок 2.1 — Вид на макет ПЭТ сверху

Каждый детектор размещён в специальном пазу на корпусе ПЭТ и подключён к плате питания. Во время проведения измерений ПЭТ накрывается светоизолирующим корпусом. Плата PETIROC2A подключается напрямую к ПК, где и происходит сбор экспериментальных данных.

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАТЫ

2.2.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для получения наилучшего временного разрешения макета ПЭТ необходимо определить оптимальные настраиваемые параметры рабочей платы PETIROC2A.

К настраиваемым параметрам платы относятся:

- Порог в каналах "Time" и "Charge"
- Параметр "Hold Delay" отвечающий формирователю заряда
- Ёмкости конденсаторов на формирователе заряда C_{in} и C_f
- Персональные пороги для каждого из 32 каналов

Результатом исследования различных конфигураций параметров стало нахождение оптимальной конфигурации, обеспечивающей наилучшее среди остальных временное разрешение макета ПЭТ.

Порог в зарядовом канале "Time" в ходе работы выставлялся по нижней границе чувствительности установки к шумам.

Параметр "Hold Delay" выставляется автоматически при калибровке Hold Scan, в рамках которой наблюдаемый сигнал должен повторять аппаратную форму сигнала, приходящего с детектора.

Персональные пороги для каналов выставляются автоматически в ходе калибровки платы по так называемым S-кривым.

Таким образом, поиск оптимальных параметров заключается в подборе подходящих требованиям наилучшего энергетического разрешения параметров C_{in} и C_f для формирователя заряда.

2.2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ C_{in} И C_f

Измерения энергетического разрешения с различными параметрами C_{in} и C_f проводились с радиоактивным источником цезий-137, излучающим в числе прочих γ -кванты с энергией 662 кэВ, отвечающие пику полного поглощения.

Среда работы с платой "WEEROC" предоставляет возможность изменения параметров C_{in} и C_f в четырёх различных номиналах для каждого из параметров. Соответственно, для каждой пары параметров было определено энергетическое разрешение для γ -кванта с энергией 662 кэВ.

Наилучшее энергетическое разрешение было получено при следующей конфигурации:

- $C_{in} = 2.5$ пФ
- $C_f = 400$ фФ
- Time Threshold = 470

Энергетическое разрешение макета ПЭТ при данной конфигурации:

$$\delta E = (13.1 \pm 0.3)\%$$

Дальнейшая работа по определению временного разрешения макета ПЭТ проводилась с данной конфигурацией параметров платы.

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Для определения временного разрешения макета ПЭТ была использована следующая экспериментальная схема:

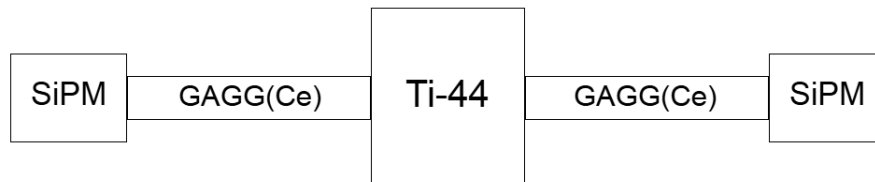


Рисунок 2.2 — Принципиальная схема эксперимента

Детекторы из обёрнутых в светоизоляцию кристаллов GAGG(Ce) и SiPM с двух каналов платы ставились торцевыми сторонами в упор к ис-

точнику излучения титану-44. Такое расположение позволяло значительно увеличить число регистрируемых событий за единицу времени.

Далее в течение обозначенного экспериментального времени проводился набор данных. Среди всех прочих наибольшую ценность для уточнения временного разрешения установки представляют собой данные о поканальном времени регистрации событий в детекторах. Плата PETIROC2A имеет два временных счётчика для создания временной привязки событий: так называемые "Coarse Time" ("Грубое Время") и "Fine Time" ("Точное Время"). Используя данные, полученные с помощью этих счётчиков, вместе с уточнением зарядового порога по интересующим нас событиям, можно получить распределение разности "Точного времени" регистрации событий в изучаемых каналах макета ПЭТ.

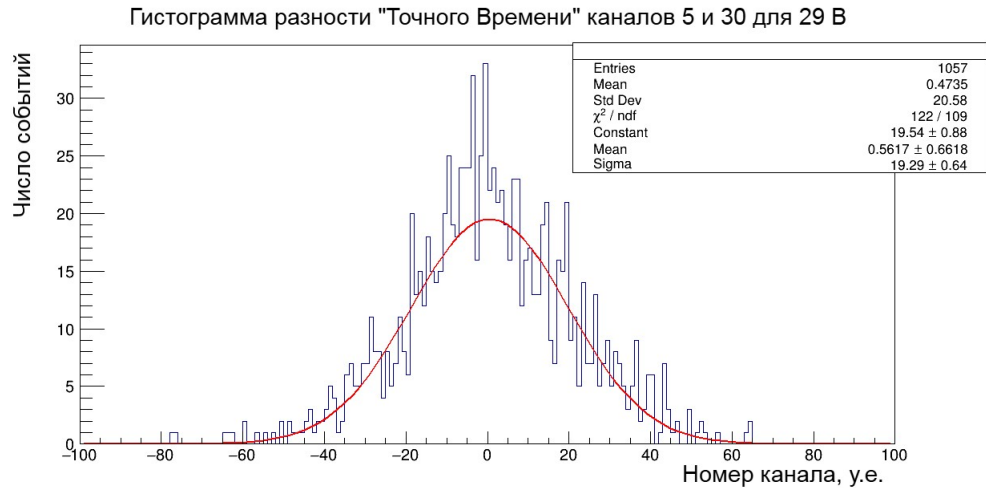


Рисунок 2.3 — Гистограмма разности "Точного Времени" полученная при напряжении на SiPM 29 В

Полученное распределение после фитирования функцией Гаусса позволяет сделать вывод о значении параметра временного разрешения TR для макета ПЭТ:

$$TR = (1.18 \pm 0.04) \text{ нс}$$

2.4. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В ходе эксперимента были получены гистограммы для разности "Точного Времени" при напряжениях 26-29 В. Гистограмма для 29 В достаточно точно определяется функцией Гаусса, что позволяет определить временное разрешение с необходимой достоверностью. Однако же при изучении зависимости аналогичных гистограмм для иных напряжений наблюдаются аномалии, не позволяющие сделать однозначный вывод о нормальном характере распределения данных.

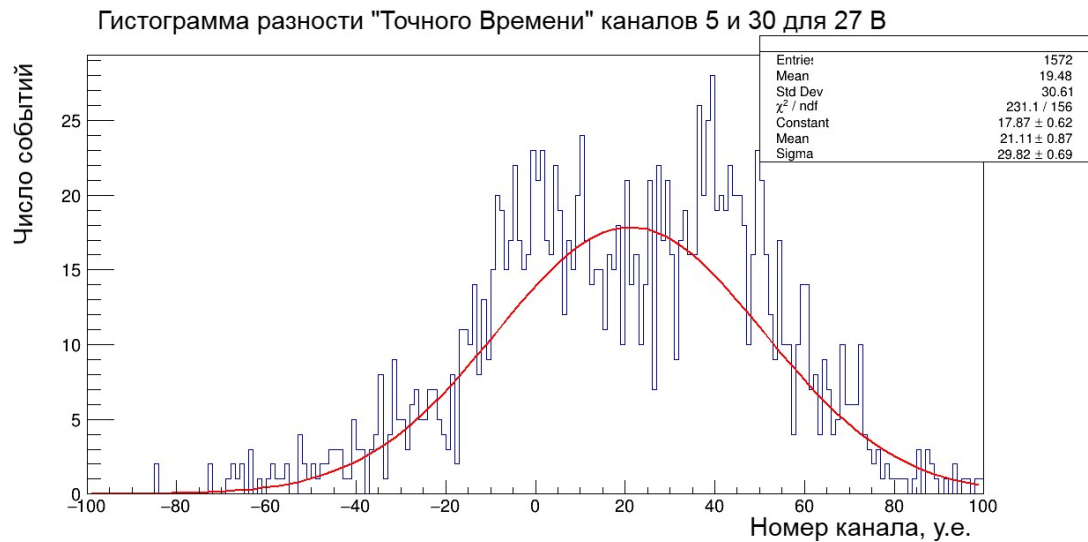


Рисунок 2.4 — Гистограмма разности "Точного Времени" полученная при напряжении на SiPM 27 В

В частности, наблюдается смещение пика разности относительно нуля и появление нескольких вершин в распределении. Данные параметры меняются в зависимости от амплитуды напряжения, поданного на SiPM, что может являться свидетельством их шумовой природы. Вопрос о происхождении и устранении наблюдаемых искажений требует дополнительного изучения.

Полученное значение временного разрешения для макета ПЭТ позволяет сделать вывод о его пригодности для проведения дальнейших экспериментов, связанных с позитронно-эмиссионной томографией, так как оно отвечает современным требованиям к временному разрешению моделей ПЭТ [6]

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена определению временного разрешения TR для макета 32-канального ПЭТ, работающего с платой PETIROC2A и детекторами на основе сцинтиллятора GAGG(Ce) и кремниевого фотоумножителя SiPM.

Были определены оптимальные параметры платы, при которых производилось измерение временного разрешения макета. Полученное значение временного разрешения для двух исследуемых каналов при напряжении на SiPM 29 В:

$$TR = (1.18 \pm 0.04) \text{ нс}$$

При измерении временного разрешения при других напряжениях возникли факторы, не позволяющие точно определить его значение. Природа данных искажений должна быть установлена в будущем для эффективной работы с макетом ПЭТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Guobao Wang. High Temporal-Resolution Dynamic PET Image Reconstruction Using a New Spatiotemporal Kernel Method. IEEE Trans Med Imaging. 2019 Mar;38(3):664-674. doi: 10.1109/TMI.2018.2869868. Epub 2018 Sep 12. PMID: 30222553; PMCID: PMC6422751.
- [2] Maurizio Conti, Improving time resolution in time-of-flight PET, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 648, Supplement 1, 2011, Pages S194-S198, ISSN 0168-9002,
- [3] [https : //newpiezo.com/knowledgebase/crystals/gagg – ce/](https://newpiezo.com/knowledgebase/crystals/gagg-ce/)
- [4] Datasheet Petiroc2A, 2018
- [5] <https://www.caen.it/products/petiroc-2a/>
- [6] Г.Г. Шимчук, С.Г. Кутузов, А.Ю. Сычев, М.Ш. Тилипман, П.А. Полозов. Тенденции развития детекторных систем и моделей ПЭТ-сканеров. Медицинская физика, номер 2, стр. 80-91, 2021, ISSN: 1810-200X