

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

«ВРЕМЕННОЕ РАЗРЕШЕНИЕ 32-КАНАЛЬНОГО МИНИПЭТ НА ОСНОВЕ ДЕТЕКТОРОВ GAGG-SIPM»

Научный руководитель: Дубинин Филипп Андреевич

Студент: Козлов Андрей Александрович Б21-102

Москва 2025

Введение

Позитронно-эмиссионный томограф (ПЭТ) является современной ядерно-физической установкой, применяемой в медицине в диагностических целях. Одним из ключевых параметров ПЭТ является временное разрешение установки, позволяющее локализовать точку аннигиляции.

Для улучшения качества изображения, получаемого с 32-канального макета миниПЭТ, созданного в НИЦ «Курчатовский Институт», необходимо измерение его временного разрешения.

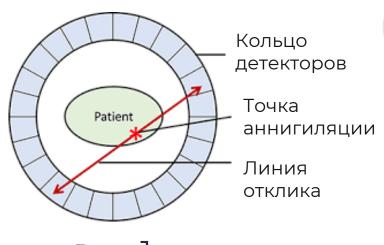


Рис. 1

Цель работы



Измерение временного разрешения макета миниПЭТ на основе детекторов GAGG-SiPM

Задачи:

- Определить оптимальные параметры анализатора PETIROC2A для измерения временного разрешения
- Собрать двухканальную установку для оценки временного разрешения на основе электроники макета миниПЭТ
- Получить значение временного разрешения для 32 каналов миниПЭТ

Макет ПЭТ



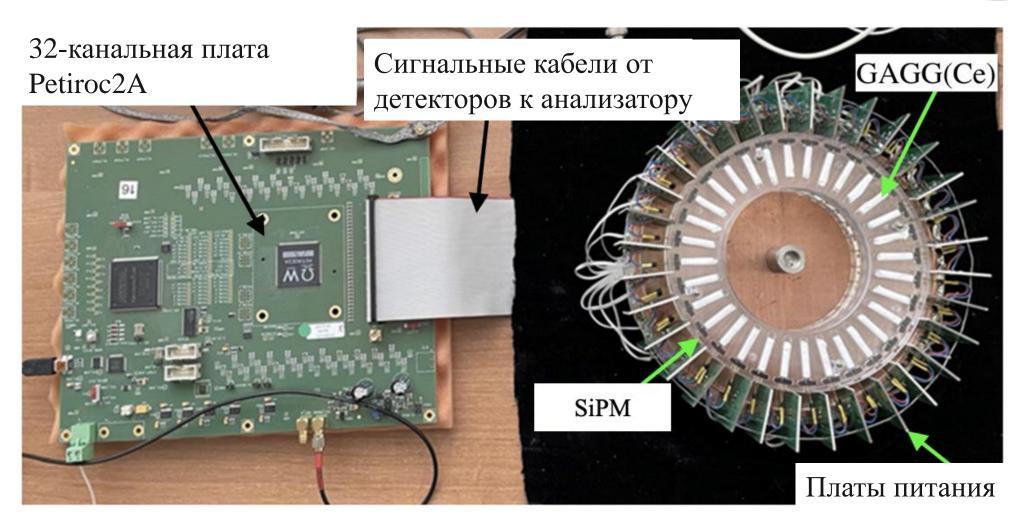


Рис. 2 – Экспериментальная установка

Определение оптимальных параметров анализатора PETIROC2A



Цель: получить наилучшее энергетическое разрешение при изменении параметров платы

К настраиваемым параметрам платы относятся:

- Порог в канале «Time»
- Ёмкости конденсаторов на усилителе-формирователе Cin и Cf
- Персональные пороги для каждого из 32 каналов

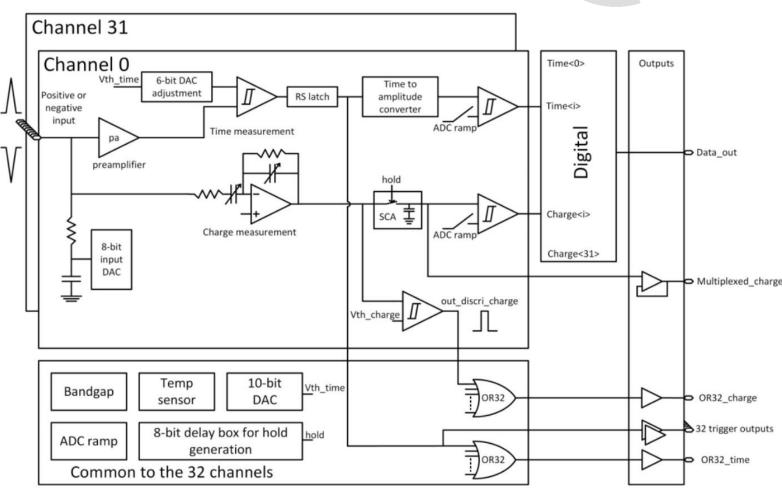


Рис.3 Схематическое изображение элементов тестовой платы Petiroc2A

Определение оптимальных параметров платы для GAGG-SiPM



Варьировались вручную параметры Cin и Cf, влияющие на ёмкости на усилителе-формирователе.

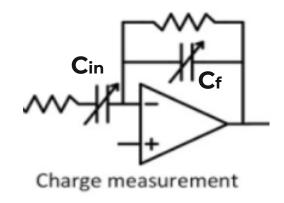


Рис. 4 – усилительформирователь По результатам измерений различных конфигураций Cin и Cf для детекторов GAGG-SiPM были получены следующие оптимальные параметры и наилучшее энергетическое разрешение:

- Cin = 2.5 ⊓Ф
- Cf = 0.4 пФ
- Time Threshold = 470 y.e.
- $\delta E = (13.4 \pm 0.4)\%$ для 511 кэВ

Дальнейшие измерения проходили при данной конфигурации.

Измерение временного разрешения двухканальной установки с детекторами GAGG-SiPM



Цель: определить временное разрешение двухканальной установки

Изучаемая реакция:

$$\begin{array}{c} ^{44}_{22}Ti + e^- \rightarrow ^{44}_{21}Sc + \nu_e \\ \\ ^{44}_{21}Sc \rightarrow ^{44}_{20}Ca + e^+ + \nu_e \\ \\ e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma \end{array}$$

Схема эксперимента

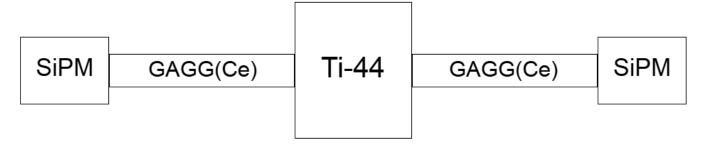


Рис. 5 – схема эксперимента по определению временного разрешения

Необходимо изучить распределение разности времён регистрации гамма-квантов в каналах для определения временного разрешения

Измерение временного разрешения двухканальной установки



Зарядовая гистограмма канала 5 при 29 В

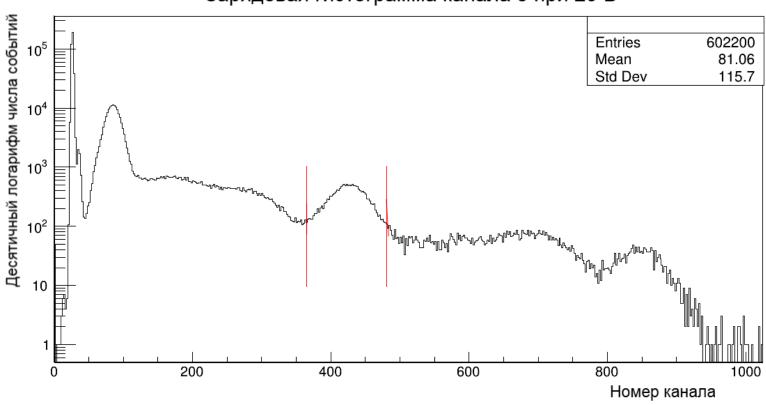


Рис. 6 – зарядовая гистограмма канала 5 при 29 В

Для определения временного разрешения производился отбор событий, отвечающих пику 511 кэВ на зарядовом спектре

Измерение временного разрешения двухканальной установки GAGG-SiPM



Гистограмма разности моментов регистрации в каналах 5 и 30 для 29 В

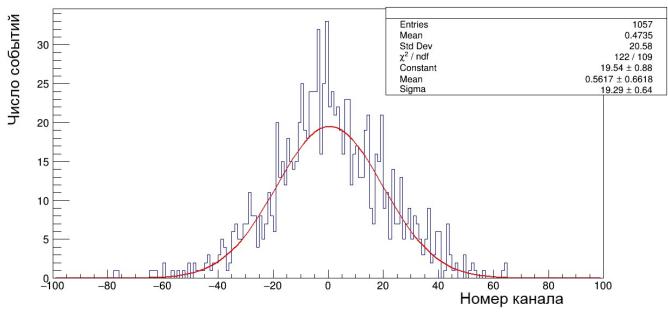


Рис. 7 – гистограмма разности времён регистрации исследуемых каналов для 29 В Цена канала – 37 пс

$$TR = \frac{2.35\sigma * 37 \text{ nc}}{\sqrt{2}}$$

Рабочее напряжение, В	Временное разрешение, нс
30	1.10 ± 0.05
29	1.18 ± 0.04
28	1.50 ± 0.04
27	1.83 ± 0.06

Таблица 1 – зависимость временного разрешения детекторов GAGG-SiPM от рабочего напряжения

Измерение временного разрешения



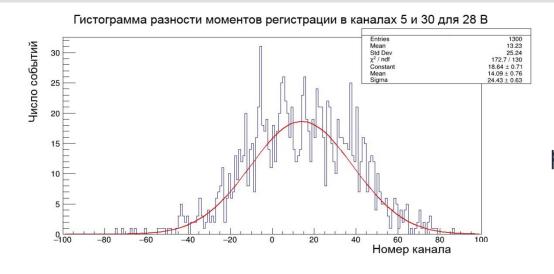
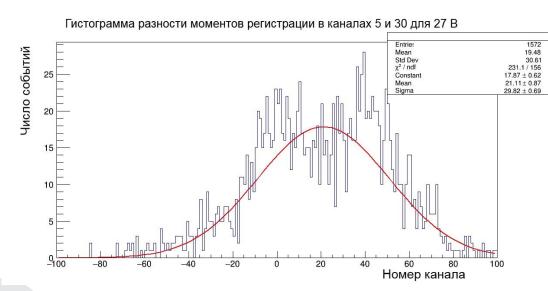


Рис. 8 – гистограмма разности времён регистрации исследуемых каналов для 28 В



При понижении напряжения наблюдается смещение и размытие пика

Рис. 9 – гистограмма разности времён регистрации исследуемых каналов для 27 В

Измерение временного разрешения двухканальной установки с детекторами LYSO-SiPM



Аналогично были определены параметры PETIROC2A, отвечающие наилучшему энергетическому разрешению установки LYSO-SiPM

Результаты подбора параметров:

- Cin = 1.25 пФ
- Cf = 0.3 пФ
- Time Threshold = 470 y.e.
- δE = (11.4 ± 0.5)% для 511 кэВ



Рис. 10 – схема эксперимента по определению временного разрешения для детекторов LYSO-SiPM

Измерение временного разрешения двухканальной установки LYSO-SiPM



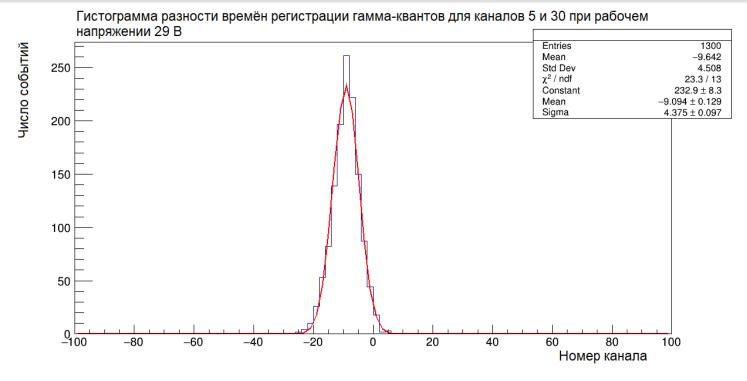


Рис. 11 – гистограмма разности времён регистрации исследуемых каналов для 29 В

$$TR = \frac{2.35\sigma * 37 \text{ nc}}{\sqrt{2}}$$

Рабочее напряжение, В	Временное разрешение, пс
29.5	311 ± 6
29	269 ± 6
28	317 ± 7
27	537 ± 12

Таблица 2 – зависимость временного разрешения детекторов LYSO-SiPM от рабочего напряжения

Измерение временного разрешения 32-канального макет ПЭТ



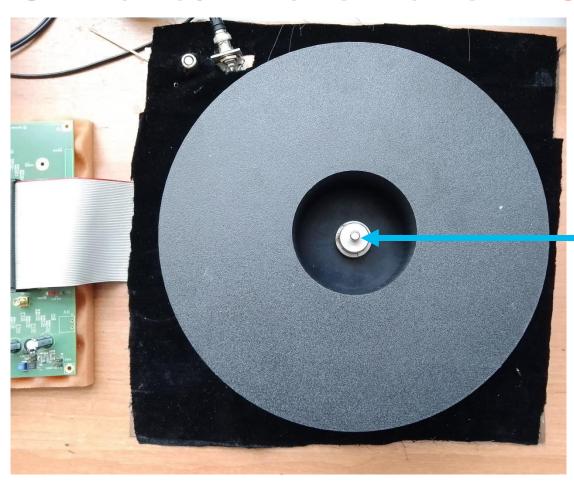


Рис. 12 – макет ПЭТ в светозащитном чехле

Измерения проводились при напряжении 29 В и оптимальных для детектора GAGG-SiPM параметрах PETIROC2A

Источник титан-44 в центре кольца ПЭТ

В ходе обработки результатов измерений учитывались различия в энергетических спектрах каждого из 32 каналов

Измерение временного разрешения макета ПЭТ



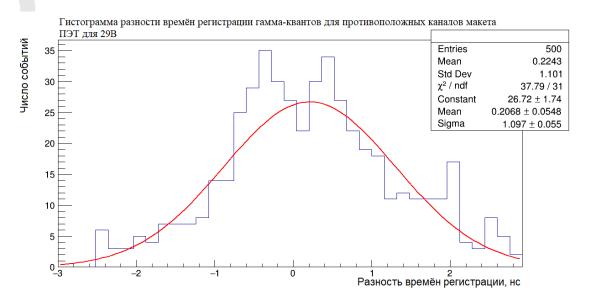


Рис. 13 – гистограмма разности времён регистрации гамма-квантов в противоположных каналах ПЭТ при напряжении 29 В

 $TR = 1.82 \pm 0.09 \text{ HC}$

Наблюдается увеличение ширины гистограммы в сравнении с двухканальной установкой – причиной этому могут являться отклонения в значениях среднего и ширине у разных пар каналов

Заключение



- Для макета ПЭТ были определены оптимальные параметры платы PETIROC2A для детектора GAGG-SiPM Onesemi FC 30035. Наилучшее энергетическое разрешение составило 13.1 ± 0.3 %
- Было определено временное разрешение двухканальной установки с детекторами GAGG-SiPM. Лучшее временное разрешение было достигнуто на напряжении в 30 В и составило:

$$TR_{GAGG} = (1.10 \pm 0.05) HC$$

• Были определены оптимальные параметры PETIROC2A для детекторов LYSO-SiPM. Для двухканальной установки с данными детекторами наилучшее временное разрешение было достигнуто при напряжении 29 В и составило:

$$TR_{LYSO} = (269 \pm 6) \, \Pi C$$

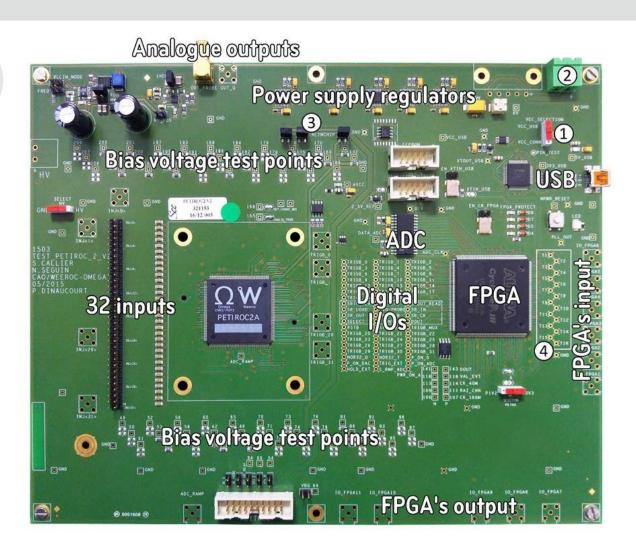
• Для напряжения 29 В было определено временное разрешение 32-канального макета миниПЭТ:

$$TR_{PET} = (1.82 \pm 0.09) HC$$



Спасибо за внимание!





Тестовая плата Petiroc2A (вид сверху)

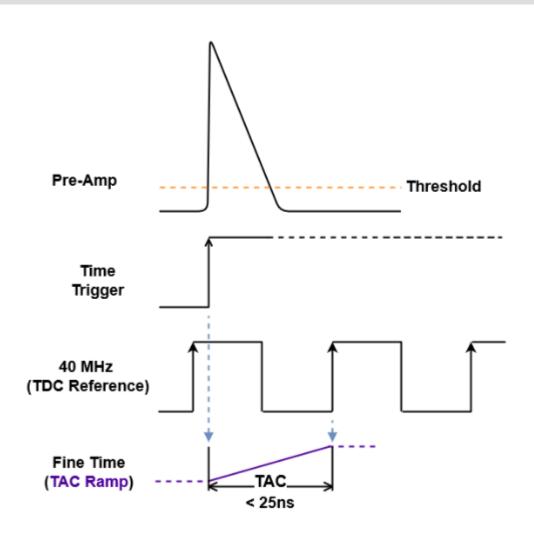
1.VCC_Selection – переключатель режима питания микросхемы

2.Коннектор для подачи питания на плату (6 V)

3.Регуляторы питания

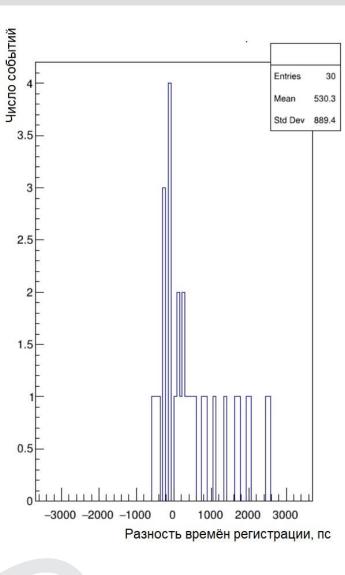
4.Тестовые точки подключения для ПЛИС (программируемой логической интегральной микросхемы)





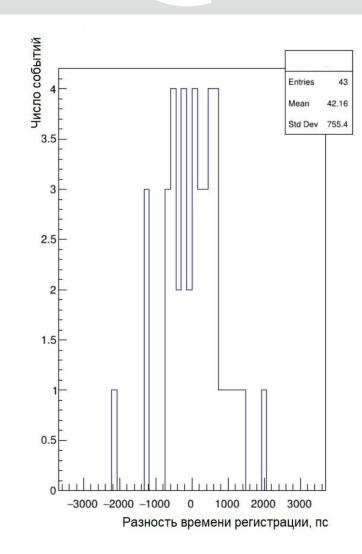
Метод измерения времени анализатором PETIROC2A



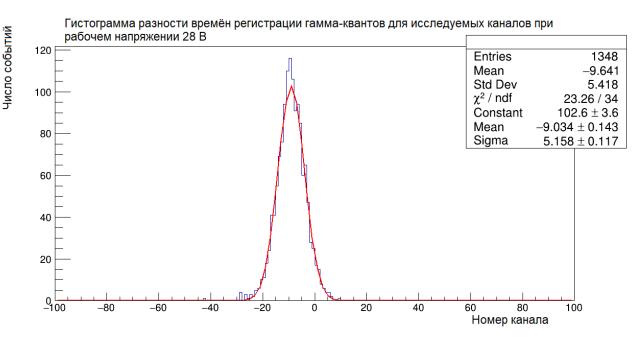


Гистограмма разностей моментов регистрации гамма-квантов для каналов 4 и 20 при 29 В

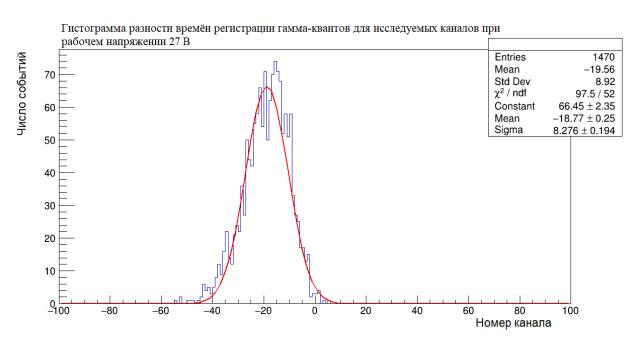
Гистограмма разностей моментов регистрации гамма-квантов для каналов 5 и 21 при 29 В







Гистограмма разности времён регистрации гамма-квантов для детекторов LYSO-SiPM для 28 В



Гистограмма разности времён регистрации гамма-квантов для детекторов LYSO-SiPM для 27 В



	LYSO(Ce)	GAGG(Ce)	LaBr₃(Ce)
Плотность, г/см ³	7.2	6.6	5.1
Эффективный Zeff (атомный номер)	54	54.4	50
Максимум спектра высвечивания, нм	410	530	380
Время высвечивания, нс	40	90 (90%) 255 (10%)	16
Световыход, фотоны/кэВ	32	>50 (заявленное значение)	61
Гигроскопичность	-	-	Значительная
Наличие собственного фона	+	-	+

Основные характеристики сцинтилляторов LYSO(Ce), GAGG(Ce), LaBr3(Ce)



Характеристики SiPM OneSemi FC-30035		
Размер сенсора	3х3 мм	
Размер ячейки	35 мкм	
Напряжение пробоя	24.2-24.7 B	
Длина волны максимума эффективности	420 нм	
Усиление	$3x10^{6}$	
Темновой счёт	300-860 кГц	