

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 531.3, 539.1.05

На правах рукописи

ЖУРКИНА АНАСТАСИЯ ОЛЕГОВНА

**СИСТЕМА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АННИГИЛЯЦИОННЫХ
ГАММА-КВАНТОВ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЯТОРОВ
GAGG В СОЧЕТАНИИ С МАТРИЦАМИ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ**

Направление подготовки 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»
Диссертация на соискание степени магистра

Научный руководитель,
к.ф.-м.н.

_____ П. Е. Тетерин

Научный консультант

_____ Ф. А. Дубинин

Москва 2024

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**СИСТЕМА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ АННИГИЛЯЦИОННЫХ
ГАММА-КВАНТОВ НА ОСНОВЕ СЦИНТИЛЛЯТОРОВ
GAGG В СОЧЕТАНИИ С МАТРИЦАМИ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ**

Студент	_____ А. О. Журкина
Научный руководитель, к.ф.-м.н.	_____ П. Е. Тетерин
Научный консультант	_____ Ф. А. Дубинин
Рецензент, к.ф.-м.н.	_____ А. В. Шакиров
Секретарь ГЭК, к.ф.-м.н.	_____ А. А. Кириллов
Зав. каф. №40, д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов
Рук. учеб. прог., д.ф.-м.н., проф.	_____ М. Д. Скорохватов

Содержание

Введение	4
1 Основные сведения	5
1.1 ПЭТ-сканер	5
1.2 Сцинтилляционные детекторы	7
1.3 Кремниевые фотоэлектронные умножители	8
1.4 Многоканальная электроника	10
1.4.1 Petiros-2A	11
1.4.2 Citiros-1A	13
2 Исследуемые детекторы	16
2.1 Экспериментальная установка для исследования матрицы SiPM SensL SPMArray4	16
2.2 Экспериментальная установка для исследования матрицы SiPM Onsemi ARRAYJ-30035-16P	18
2.3 Экспериментальная установка для исследования матрицы SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08	19
3 Оценка коэффициентов усиления SiPM	21
4 Измерение напряжения пробоя матрицы	25
5 Измерение энергетического разрешения	32
6 Восстановление координаты XY-взаимодействия	37
7 Измерение временного разрешения	42
8 Оценка загрузки детектора	44

Заключение	47
Список использованных источников	48

Введение

Позитронно-эмиссионная томография – эффективный и современный метод диагностики онкологических заболеваний. В современных ПЭТ-сканерах для регистрации аннигиляционных гамма-квантов от радиофармпрепарата, вводимого пациенту, используются тысячи сцинтилляционных элементов, от размера которых зависит пространственное разрешение и, в конечном итоге, четкость изображения изучаемого органа. Альтернативой большому количеству элементов ПЭТ является использование кристаллических пластин (monolithic detectors) с матрицами кремниевых фотоумножителей в качестве фотодетекторов [1].

Целью данной дипломной работы является изучение характеристик позиционно-чувствительных детекторов на основе монокристаллов GAGG и матриц кремниевых фотоэлектронных умножителей.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 ПЭТ-сканер

Позитронно-эмиссионная томография – активно развивающийся эффективный и современный метод диагностики онкологических заболеваний в ядерной медицине. В основе этого метода лежит возможность при помощи специального детектирующего оборудования (ПЭТ-сканера) отслеживать распределение в организме биологически активных соединений, меченных позитрон-излучающими радиоизотопами. Метод основан на регистрации пары гамма-квантов, возникающих при аннигиляции позитронов, испускаемых при бета-распаде радионуклида, входящего в состав радиофармпрепарата, который вводят в организм обследуемого, с электронами. При аннигиляции позитрона, остановившегося в ткани организма, с одним из электронов среды рождается два гамма-кванта с одинаковой энергией, которые разлетаются под углом 180° . Принцип работы ПЭТ схематично представлен на рисунке 1.

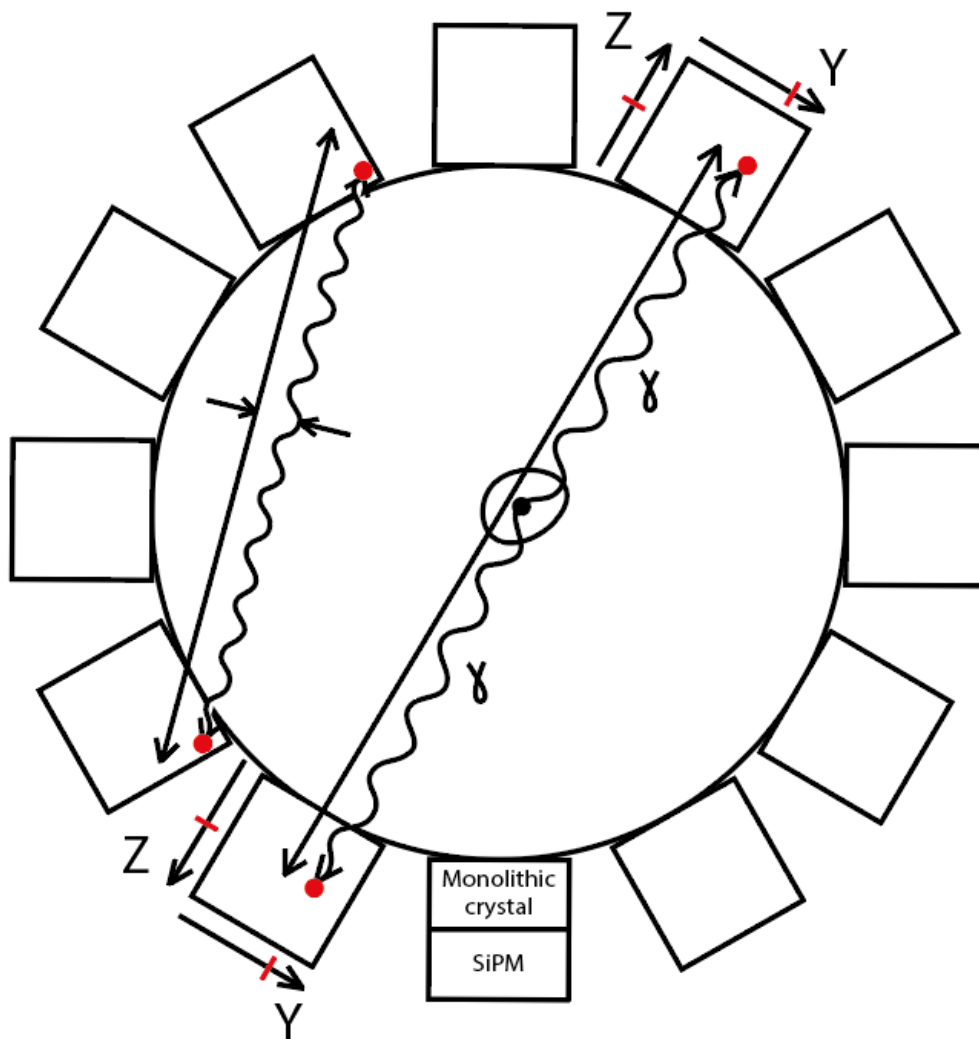


Рисунок 1 – Схематичное изображение принципа работы ПЭТ-сканера

Большой набор детекторов, расположенных вокруг исследуемого объекта, и компьютерная обработка сигналов с них позволяет выполнить трёхмерную реконструкцию распределения радионуклида в исследуемом объекте. ПЭТ-сканирование с использованием фтордезоксиглюкозы широко используется в клинической онкологии [2]. В качестве примера на рисунке 2 представлен ПЭТ-сканер для исследования внутренних органов маленьких животных, состоящий из восьми съёмных одинаковых модулей, образующих восьмиугольник.

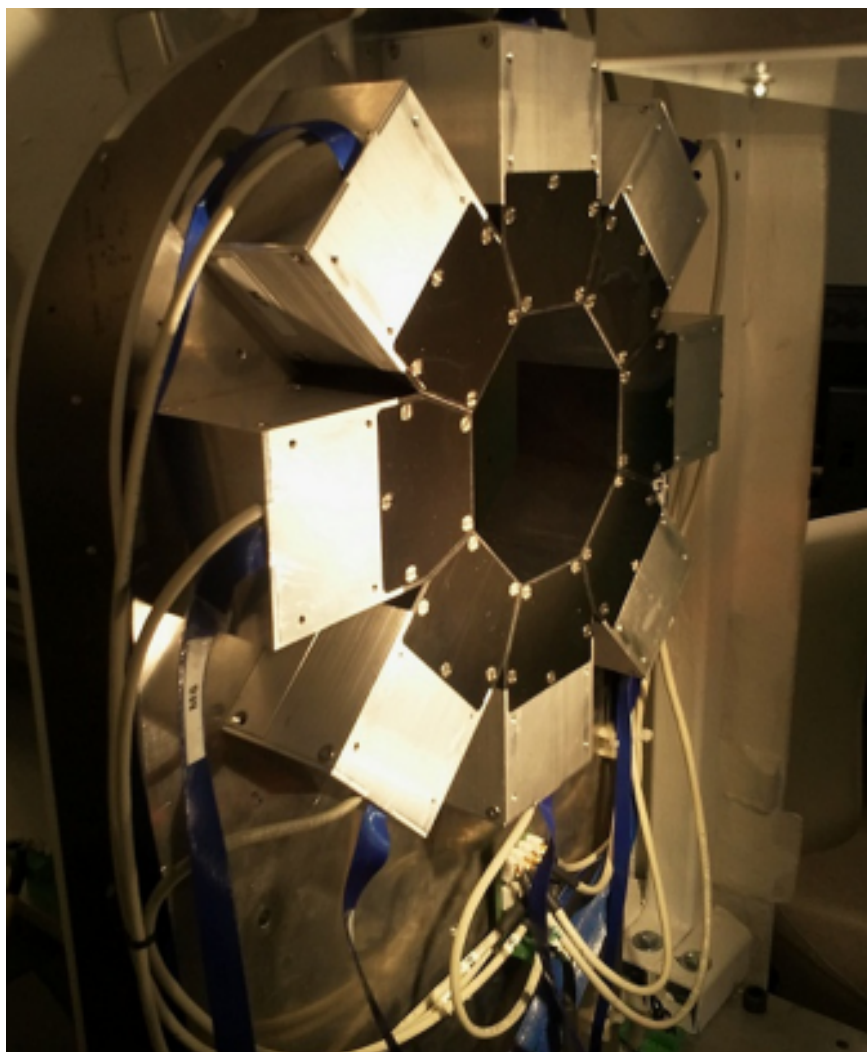


Рисунок 2 – ПЭТ-сканер для исследования внутренних органов маленького животного [3]

1.2 Сцинтилляционные детекторы

Сцинтилляционный метод основан на регистрации коротких вспышек света – сцинтилляций, возникающих в некоторых веществах в результате прохождения через них заряженных частиц. Каждая такая вспышка вызвана отдельной заряженной частицей и состоит из большого количества (10^3 – 10^6) фотонов с энергией в несколько эВ. Сцинтилляции отличаются от других видов свечения, образующихся при взаимодействии частиц с веществом тем, что они возникают вследствие электронных переходов внутри центров свечения. Центром свечения может быть атом, молекула, ион или более сложное образование. Сцинтилляционный процесс можно разделить на три этапа:

1 – генерационный: возбуждение заряженными частицами основного вещества, находящегося в твердой, жидкой или газообразной фазе;
 2 – миграционный: перенос энергии, потерянной заряженной частицей в веществе к центрам свечения;
 3 – внутрицентральной этап: возбуждение и высвечивание центров свечения. Для регистрации возникающих под действием отдельных ионизирующих частиц сцинтилляций обычно используются фотоэлектронные умножители – ФЭУ, в частности, кремниевые ФЭУ [4].

В данной работе использованы различные образцы монокристаллических сцинтилляционных кристаллов GAGG(Ce) ($Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$). Гадолиний-галлиевые алюмогранаты [5] являются недавно разработанными сцинтилляционными кристаллами, обеспечивающими хорошую тормозную способность, физическую прочность, а также широкий спектр применимости. GAGG(Ce) – один из самых ярких доступных сцинтилляторов с максимумом излучения на 520 нм. Для сравнения в таблице 1 представлены основные характеристики для трех различных сцинтилляционных кристаллов: GAGG, LYSO, $LaBr_3(Ce)$.

Таблица 1 – Основные характеристики сцинтилляционных кристаллов

Параметр	GAGG	LYSO	$LaBr_3(Ce)$
$Z_{эфф}$	51	63	45
Плотность, г/см ³	6,6	7,1	5,1
Время затухания, нс	30–100	41	16
Энергетическое разрешение (662 кэВ), %	6	7	3
Длина волны (макс. эмиссия), нм	520	420	365
Гигроскопичность	-	-	+
Собственная радиоактивность	-	+	+
Световыход (фотонов/кэВ)	35–55	30	65

1.3 Кремниевые фотоэлектронные умножители

Кремниевый фотоэлектронный умножитель (SiPM) – это фотоприемник на основе упорядоченного набора (матрицы) p-n-переходов (пиксе-

лей), выполненных на общей подложке. Характерный размер пикселя составляет порядка 30–100 мкм [6]. Каждый пиксель состоит из лавинного фотодиода, работающего в гейгеровском режиме, к которому последовательно подключен токоограничивающий резистор (добавочное сопротивление). Лавинные фотодиоды представляют собой высокоскоростные фотодиоды, усиливающие внутренний фототок при приложенном обратном напряжении. В случае если обратное напряжение, приложенное к лавинному фотодиоду, превышает напряжение пробоя, внутреннее электрическое поле становится настолько сильным, что позволяет получить высокий коэффициент усиления фотодиода (10^5 – 10^7). Такой режим работы лавинного фотодиода называется «режим Гейгера». Генерируемые носители заряда создают новые электрон-дырочные пары, которые ускоряются высоким внутренним электрическим полем. Вновь созданные носители также ускоряются в приложенном поле, чтобы создать еще больше носителей, и этот процесс повторяется снова и снова (лавинное умножение) – коэффициент усиления становится пропорциональным приложенному напряжению. При работе фотодиода в режиме Гейгера возникает очень большой импульс, вызванный инжекцией в лавинный слой носителя заряда созданного фотоном, падающим на активную поверхность фотодиода. Обнаружение этого импульса позволяет обнаружить единичные фотоны [7]. Число отдельных пикселей-фотодиодов в матрице каждого SiPM варьируется в пределах 10^3 – 10^5 . Все пиксели одинаковы и объединены в общей точке токопроводящими шинами. Сигнал каждого отдельного пикселя – логический и не зависит от числа первоначальных носителей, вызвавших срабатывание пикселя. Однако сам SiPM как целое представляет собой аналоговый детектор, так как его выходной сигнал равен сумме одинаковых сигналов p-n-переходов, сработавших при поглощении ими фотонов [6]. Благодаря высокому коэффициенту усиления кремниевые фотоумножители обладают высокой обнаружительной способностью необходимой для детектирования слабых световых сигналов на уровне единичных фотонов. К многочисленным преимуществам SiPM также относятся компактность, возможность работы в магнитном поле и другие. Однако при эксплуатации SiPM необходимо учитывать ряд недостатков, таких как неоднородность, высокую чувствительность к напряжению питания, температурную зависимость и

другие. В рамках данной работы изучаются характеристики и свойства различных матриц SiPM (SensL SPMArray4, Onsemi ARRAYJ-30035-16P, Hamamatsu S13361-3050AE-08).

1.4 Многоканальная электроника

Зачастую фронт-энд электроника играет фундаментальную роль в системе обнаружения на основе SiPM. Ее основными задачами являются усиление и обработка сигналов, получаемых от детектора посредством преобразования аналоговых сигналов в цифровой формат, а также фильтрация и подавление шумов. В некоторых случаях фронтальная электроника может послужить причиной ограничения производительности работы системы. Например, временные измерения сильно зависят от вклада электронных шумов, которые вызывают статистические флуктуации в момент, когда выходной сигнал преодолевает выбранный порог. При энергетических измерениях из-за большого коэффициента усиления детектора часто основной проблемой является не электронный шум, а собственный шум детектора, связанный с темновым счетом, эффектами кросс-ток, послепериодами и флуктуациями усиления пикселей. Таким образом, в целях устранения неоднородностей, при этом максимально увеличив производительность SiPM, требуется наличие подходящих решений для фронтальной электроники, хорошо настроенной на специфические характеристики кремниевых фотоумножителей. Важнейшими функциями считывающей электроники для работы с SiPM являются подавление фонового шума, управление временными характеристиками сигнала и высокая скорость считывания данных.

Для обработки сигналов кремниевых фотоумножителей часто используют электронные модули на основе микросхем общего применения. При этом удастся получить относительно высокий уровень параметров системы фотоприемник – считывающая электроника за исключением потребляемой мощности и габаритов [8]. Специфическими особенностями считывающей электроники (СЭ) кремниевых детекторов, используемой для регистрации ионизирующих излучений в экспериментальных установках, работающих на ускорителях и в космических аппаратах, являются многоканальность

и высокая плотность расположения измерительных каналов [9]. В данной работе для считывания сигналов с различных матриц кремниевых фотоумножителей использовались микросхемы Petiroc-2A и Citiroc-1A.

1.4.1 Petiroc-2A

Petiroc-2A – это 32-канальный ASIC (application-specific integrated circuit, «интегральная схема для конкретного применения»), предназначенный для считывания данных с кремниевых фотоумножителей. Petiroc 2A сочетает в себе возможность точных измерений заряда и времени. Каждый из 32 каналов Petiroc состоит из входного цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) с очень низким энергопотреблением для регулировки высокого напряжения SiPM в диапазоне 800 мВ. Это позволяет точно регулировать усиление SiPM и темновой счет. Энергия и время оцифровываются внутри прибора с помощью 10-битных аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и время-цифрового преобразователя (ВЦП). Концепция ASIC заключается в объединении двух отдельных линий для измерения времени первого падающего фотона и интегрирования заряда, собранного со всего кристалла. Потребляемая мощность составляет 6 мВт на канал, без учета буферов, используемых для вывода аналоговых сигналов [10]. Основные характеристики и электронная схема представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

Detector Read-Out	SiPM, SiPM array
Number of Channels	32
Signal Polarity	Positive or Negative
Sensitivity	Trigger on first photo-electron
Timing Resolution	~ 35 ps FWHM in analogue mode (2pe injected) - ~ 100 ps FWHM with internal TDC
Dynamic Range	3000 photo-electrons (10^6 SiPM gain), Integral Non Linearity: 1% up to 2500 ph-e
Packaging & Dimension	TQFP208 – TFBGA353
Power Consumption	Power supply: 3.3V 192mW Analogue core (excluding analogue outing buffer), 6mW/ch
Inputs	32 voltage inputs with DC adjustment for SiPM HV tuning
Outputs	Digital output (energy on 10 bit, time on 10 bit - 40ps bin) 32 trigger outputs 1 multiplexed charge output, 1 multiplexed hit register 2 ASIC trigger outputs (Trigger OR on 32 channels, 2 levels)
Internal Programmable Features	32 HV adjustment for SiPM (32x8b), trigger threshold adjustment (10b), charge measurement tuning, 32 trigger masks, internal temperature sensor, trigger latch

Рисунок 3 – Характеристики Petiroc-2A

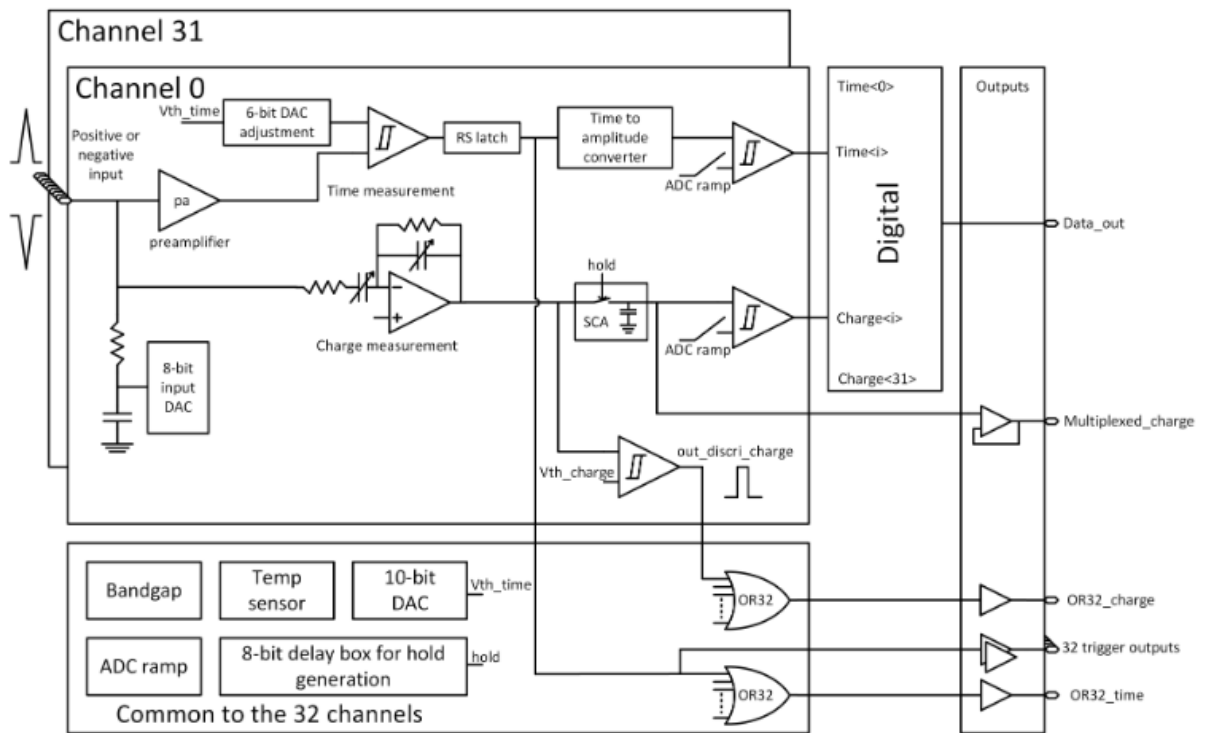


Рисунок 4 – Электронная схема Petiros-2A

Основное применение Petiros-2A – прототипирование ПЭТ, основанных на томографах по времени пролета, но он также может быть использован для любых задач, требующих точного временного разрешения и точного измерения энергии. На рисунке 5 представлена считывающая система на основе чипа Petiros-2A в виде платы, работа с которой осуществляется с помощью специального программного обеспечения, разработанного на языке C++ компанией Weeros.

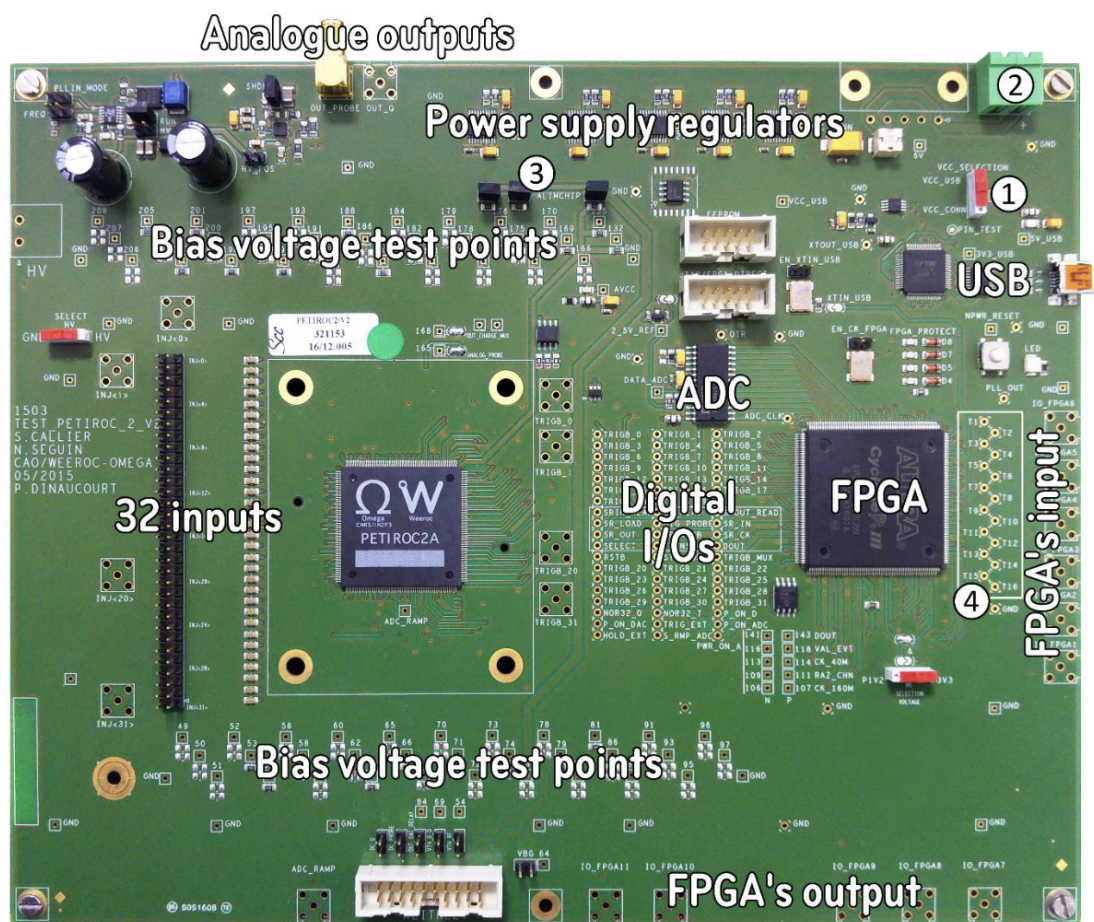


Рисунок 5 – Считывающая система на основе чипа Petiroc-2A

1.4.2 Citiroc-1A

Citiroc-1A – это еще один 32-канальный ASIC, предназначенный для считывания сигналов с кремниевых фотоумножителей. Citiroc 1A может обеспечить срабатывание триггера от 1/3 фотоэлектрона и обеспечивает измерение заряда с хорошим уровнем шумоподавления. Кроме того, Citiroc 1A позволяет проводить временные измерения с точностью свыше 100 пс. Регулировка высокого напряжения SiPM реализуется также как и в Petiroc-2A с помощью поканального ЦАП, подключенного к входам ASIC. Это позволяет осуществлять тонкую регулировку усиления SiPM и темного счета на системном уровне для коррекции неоднородности SiPM. Также Citiroc-1A позволяет проводить калибровку с помощью внешнего калибровочного сигнала. Потребляемая мощность 225 мВт при всех включенных каскадах [11]. Основные характеристики и электронная схема представлены на рисунках 6 и 7 соответственно.

Detector Read-Out	SiPM, SiPM array
Number of Channels	32
Signal Polarity	Positive
Sensitivity	Trigger on 1/3 of photo-electron
Timing Resolution	Better than 100 ps RMS on single photo-electron
Dynamic Range	0-400 pC i.e. 2500 photo-electrons @ 10^6 SiPM gain
Packaging & Dimension	TQFP 160 – TFBGA353
Power Consumption	225mW – Supply voltage : 3.3V
Inputs	32 voltage inputs with independent SiPM HV adjustments
Outputs	32 trigger outputs 2 multiplexed charge output, 1 multiplexed hit register 2 ASIC trigger output (Trigger OR)
Internal Programmable Features	32 HV adjustment for SiPM (32x8bits), Trigger Threshold Adjustment (10bits), channel by channel gain tuning, 32 Trigger Masks, Trigger Latch, internal temperature sensor

Рисунок 6 – Характеристики Citiroc-1A

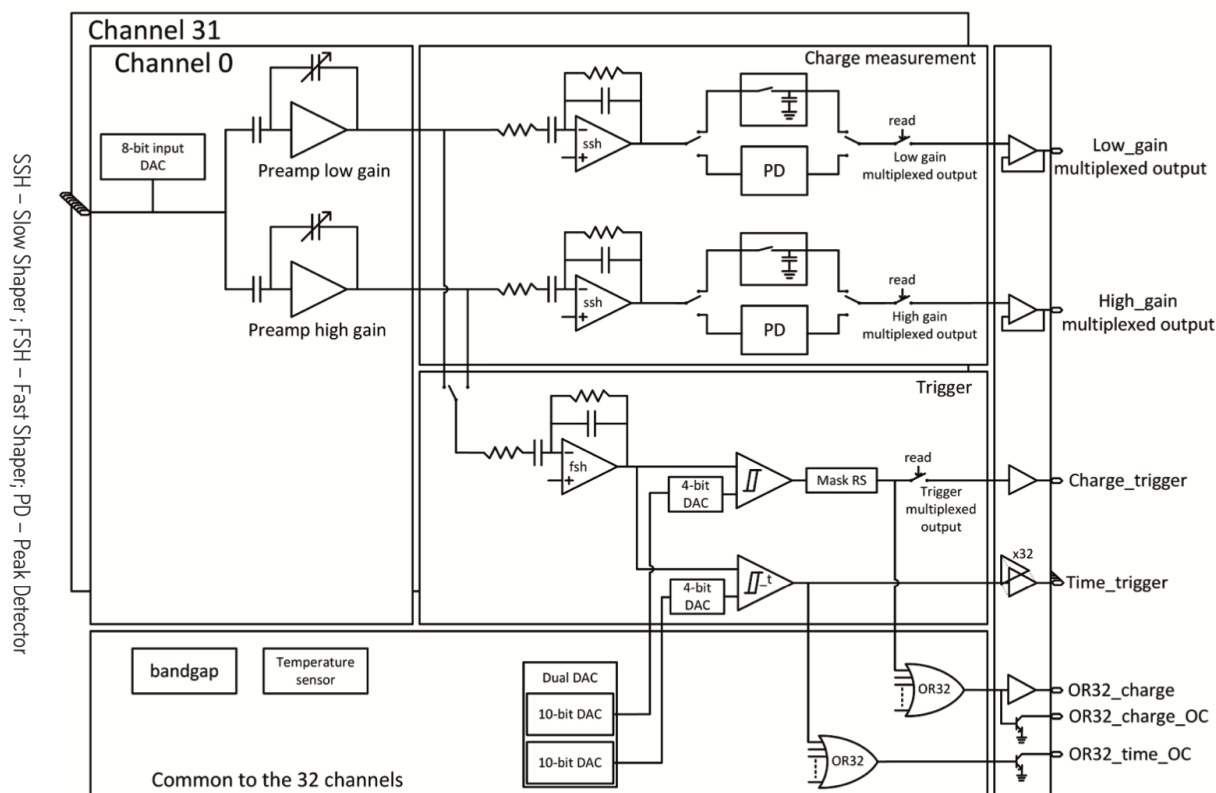
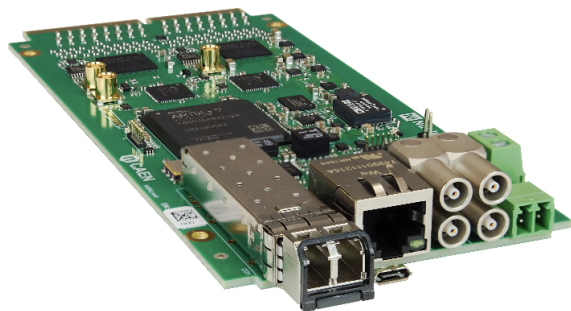


Рисунок 7 – Электронная схема Citiroc-1A

В данной работе используется считывающая система CAEN FERS-5200 на основе двух чипов Citiroc-1A. Многоканальная система FERS-5200 сочетает в себе собственное питание, фронт-энд электронику, АЦП, триггерную логику, синхронизацию, локальную память и интерфейс считывания. FERS может быть представлен в виде отдельной платы (A5202), а

также в корпусе (DT5202), служащим для внешней защиты и обеспечивающим более удобное хранение и использование системы (подробнее см. [12]). Версии A5202 и DT5202 представлены на рисунках 8а и 8б соответственно.



(а) A5202



(б) DT5202

Рисунок 8 – CAEN FERS-5200

В рамках данной работы используется версия DT5202. Работа со считывающей системой FERS-5200 осуществляется посредством специального программного обеспечения Janus, разработанного компанией CAEN и реализованного в консольном и GUI режимах (подробнее см. [13]).

Глава 2

Исследуемые детекторы

В рамках данной работы проводились изучение характеристик трех различных позиционно-чувствительных детекторов на основе различных матриц SiPM (SensL SPMArray4, Onsemi ARRAYJ-30035-16P, Hamamatsu S13361-3050AE-08).

2.1 Экспериментальная установка для исследования матрицы SiPM SensL SPMArray4

Для изучения характеристик матрицы SiPM SensL SPMArray4 на ее основе в сочетании с монокристаллом GAGG 15x12x10 мм собран позиционно-чувствительный детектор. Экспериментальная установка состоит из следующих элементов:

1. монокристалл сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce) 15x12x10 мм;
2. матрица SiPM 4x4 (SensL SPMArray4);
3. считывающая плата на 16 каналов, обеспечивающая усиление сигналов с матрицы;
4. источник питания (x2) для подачи напряжения на матрицу и плату;
5. осциллограф для снятия осциллограмм и спектров.

Сцинтилляционный кристалл и матрица представлены на рисунке 9. В таблице 2 приведены основные сведения о матрице SiPM (SensL SPMArray4). Считывающая плата с установленной матрицей и сцинтилляционным кристаллом представлена на рисунке 10.

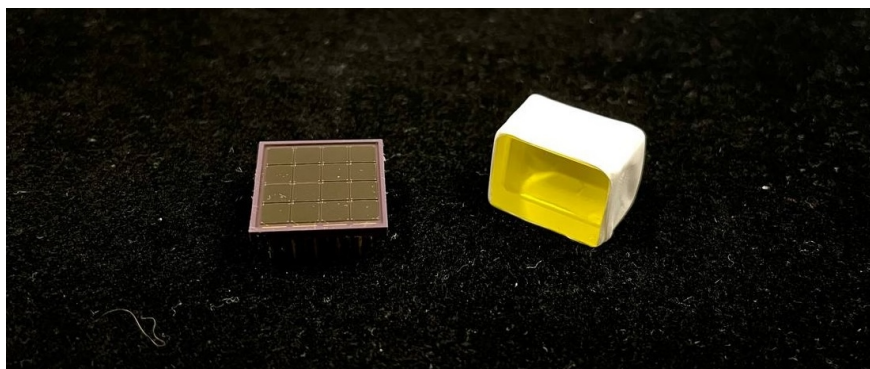


Рисунок 9 – Монолитный сцинтиляционный кристалл GAGG(Ce) и матрица SiPM (SensL SPMArray4)

Таблица 2 – Основные характеристики матрицы SiPM (SensL SPMArray4)

Параметр	Величина
Размерность матрицы, ячейки	4 x 4
Общая эффективная площадь матрицы, мм ²	13,4 x 13,4
Площадь ячейки, мм ²	3,16 x 3,16

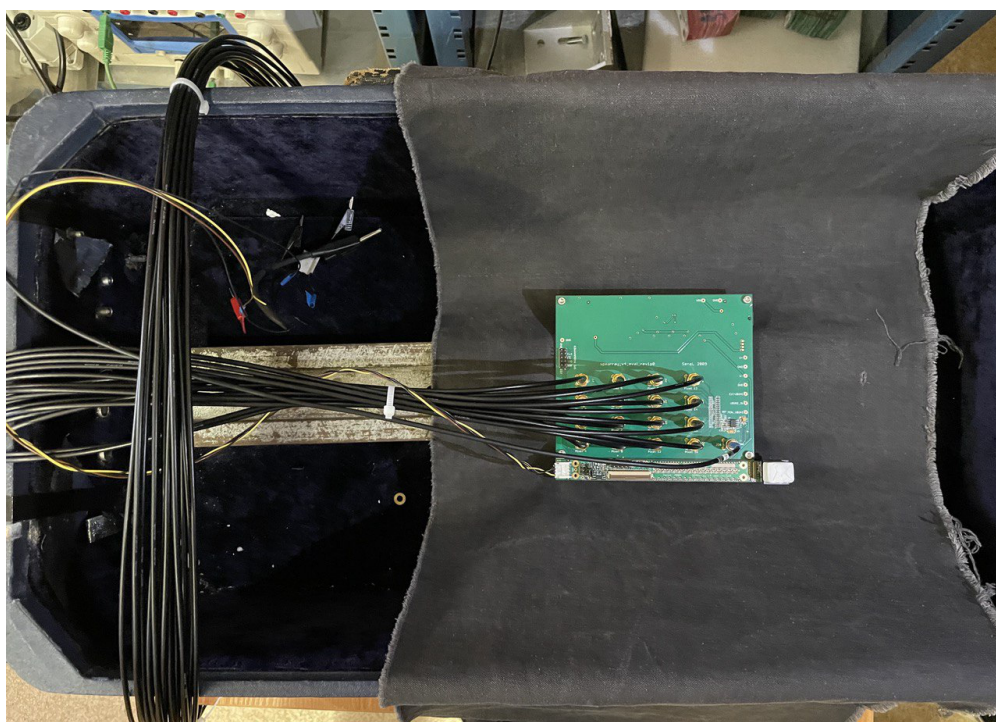


Рисунок 10 – Считывающая плата с установленной матрицей SiPM (SensL SPMArray4) и монолитным сцинтиляционным кристаллом GAGG

2.2 Экспериментальная установка для исследования матрицы SiPM Onsemi ARRAYJ-30035-16P

Экспериментальная установка для исследования детектора на основе сцинтилляционного кристалла GAGG(Ce) 12x12x12 мм и матрицы кремниевых фотоумножителей Onsemi ARRAYJ-30035-16P состоит из следующих элементов:

1. монолитный сцинтилляционный кристалл GAGG(Ce) 12x12x12;
2. матрица SiPM 4x4 (Onsemi ARRAYJ-30035-16P);
3. считывающая плата AiT Instruments AB16VB-ARRAYJ16P на 16 каналов, обеспечивающая усиление сигналов с матрицы;
4. источник питания (x2) для подачи напряжения на матрицу и плату;
5. считывающая плата на основе чипа Petiros-2A.

Матрица и чертеж с габаритными размерами представлены на рисунках 11а, 11б соответственно. Считывающая плата и электронная схема подключения представлены на рисунках 12а и 12б соответственно.

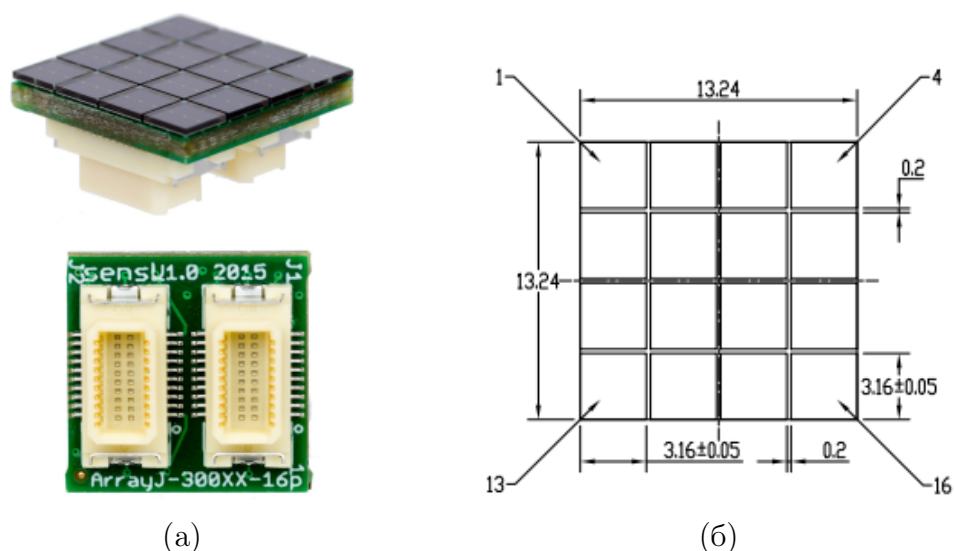
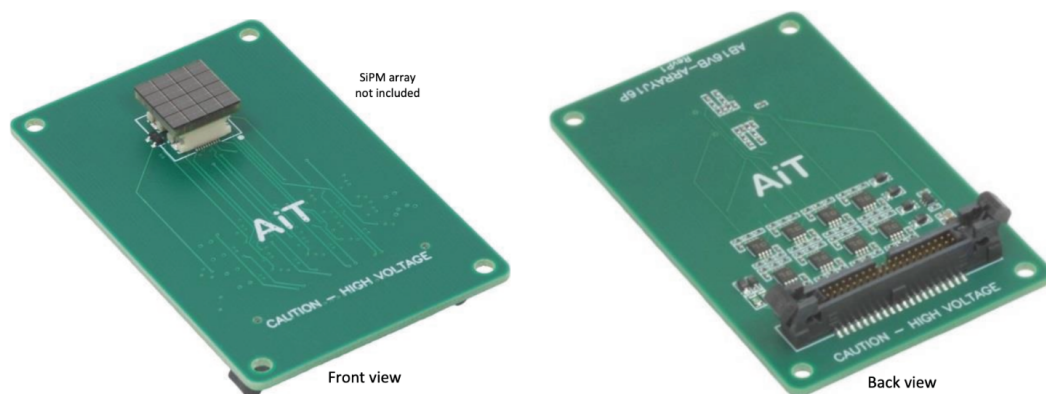
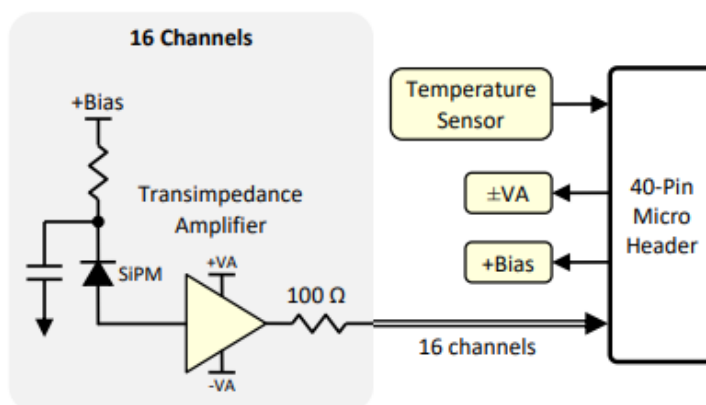


Рисунок 11 – Общие сведения о матрице Onsemi ARRAYJ-30035-16P: а - матрица; б - чертеж матрицы с габаритными размерами



(a)



(б)

Рисунок 12 – Общие сведения о считывающей плате AiT Instruments AB16VB-ARRAYJ16P: а - считывающая плата; б - электронная схема подключения

2.3 Экспериментальная установка для исследования матрицы SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08

Матрица SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08 поставляется в комплекте считывающей системы CAEN FERS-5200 (DT-5202). Экспериментальная установка для исследования данной матрицы состоит из следующих элементов:

1. матрица SiPM 8x8 (Hamamatsu S13361-3050AE-08);
2. считывающая плата A5251 на 64 канала для обеспечения усиления сигналов с матрицы;
3. считывающая система CAEN FERS-5200 (DT-5202) на основе двух чипов

Citiroc-1A.

Матрица, установленная на считывающую плату A5251 и чертеж с габаритными размерами представлены на рисунках 13 и 14 соответственно.

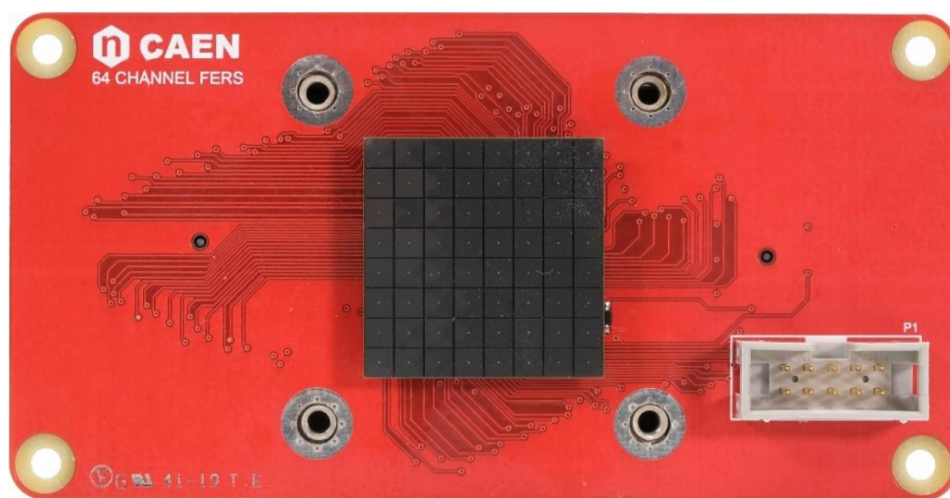


Рисунок 13 – Матрица SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08, установленная на считывающую плату A5251

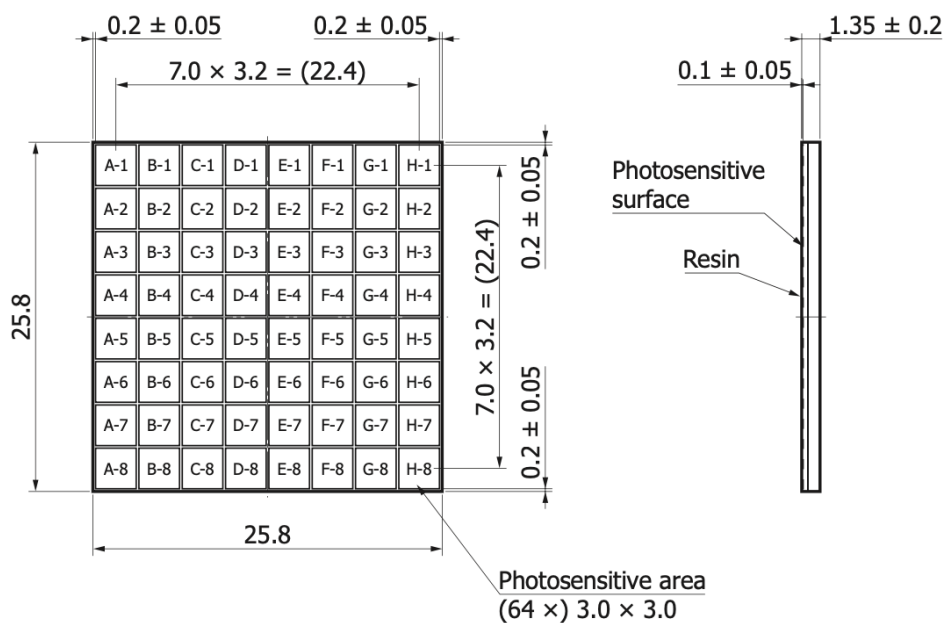


Рисунок 14 – Чертеж матрицы SiPM Hamamatsu S13361-3050AE-08 с габаритными размерами

Глава 3

Оценка коэффициентов усиления SiPM

Каждый отдельный пиксель SiPM представляет собой лавинный фотодиод, работающий в режиме Гейгера. Если носитель заряда вызывает разряд в ячейке, то в результате через SiPM протекает импульс тока с общим зарядом Q . Коэффициент усиления μ определяется как отношение Q к основному заряду $e = 1,6 \cdot 10^{19}$ К. Типичные значения μ находятся в диапазоне 10^5 – 10^7 . Коэффициент усиления является одной из основных характеристик SiPM, определяющей его работу и, как следствие, влияющей на другой важнейший параметр – эффективность детектирования излучения.

Для оценки коэффициента усиления получены зарядовые спектры с каждого канала двух 16-канальных матриц Onsemi ARRAYJ-30035-16P. Принципиальная схема установки для калибровки коэффициента усиления каналов матриц представлена на рисунке 15. Выходные данные с Petiros записываются в автоматически создающийся текстовый файл и имеют следующий вид (см. рисунок 16).

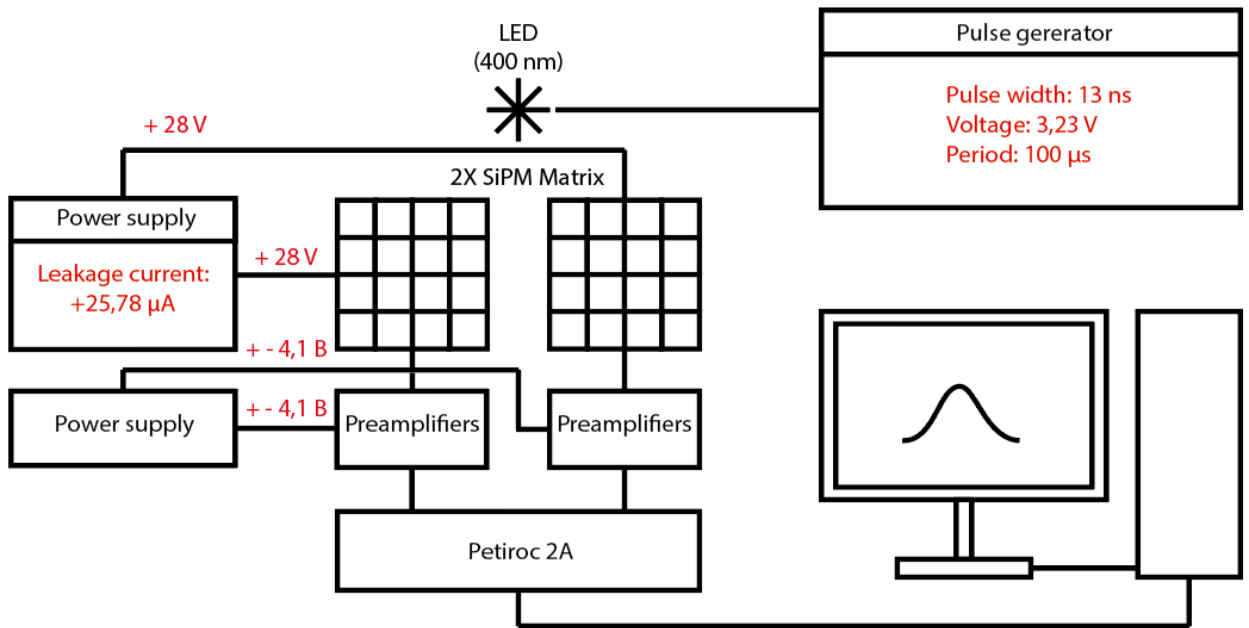


Рисунок 15 – Принципиальная схема установки для калибровки коэффициента усиления

```

FineTime0 Charge0 FineTime1 Charge1 FineTime2 Charge2 FineTime3 Charge3 FineTime4 Charge4 FineTime5 Charge5 FineTime6 Charge6
FineTime7 Charge7 FineTime8 Charge8 FineTime9 Charge9 FineTime10 Charge10 FineTime11 Charge11 FineTime12 Charge12 FineTime13
Charge13 FineTime14 Charge14 FineTime15 Charge15 FineTime16 Charge16 FineTime17 Charge17 FineTime18 Charge18 FineTime19
Charge19 FineTime20 Charge20 FineTime21 Charge21 FineTime22 Charge22 FineTime23 Charge23 FineTime24 Charge24 FineTime25
Charge25 FineTime26 Charge26 FineTime27 Charge27 FineTime28 Charge28 FineTime29 Charge29 FineTime30 Charge30 FineTime31
Charge31 CoarseTime0 Hit0 CoarseTime1 Hit1 CoarseTime2 Hit2 CoarseTime3 Hit3 CoarseTime4 Hit4 CoarseTime5 Hit5 CoarseTime6
Hit6 CoarseTime7 Hit7 CoarseTime8 Hit8 CoarseTime9 Hit9 CoarseTime10 Hit10 CoarseTime11 Hit11 CoarseTime12 Hit12 CoarseTime13
Hit13 CoarseTime14 Hit14 CoarseTime15 Hit15 CoarseTime16 Hit16 CoarseTime17 Hit17 CoarseTime18 Hit18 CoarseTime19 Hit19
CoarseTime20 Hit20 CoarseTime21 Hit21 CoarseTime22 Hit22 CoarseTime23 Hit23 CoarseTime24 Hit24 CoarseTime25 Hit25 CoarseTime26
Hit26 CoarseTime27 Hit27 CoarseTime28 Hit28 CoarseTime29 Hit29 CoarseTime30 Hit30 CoarseTime31 Hit31
4 67 4 96 561 157 4 83 4 84 4 124 4 126 4 89 4 54 4 99 4 136 4 77 4 64 4 82 4 61 4 90 4 22 4 24 4 23 4 25 4 22 4 23 4 22
4 25 4 23 4 24 4 21 4 21 4 21 4 23 4 26 211 0 274 0 298 1 68 0 211 0 275 0 210 0 211 0 211 0 211 0 211 0 68 0 211 0 211
0 69 0 115 0 119 0 143 0 145 0 147 0 143 0 145 0 147 0 145 0 147 0 119 0 121 0 143 0 164 0 147 0 149 0
4 118 186 462 4 113 4 108 4 109 4 162 4 127 4 151 4 81 4 113 4 113 4 96 4 118 4 127 4 125 4 100 4 22 4 23 4 22 4 24 4 21 4 22
4 23 4 21 4 24 4 23 4 23 4 21 4 20 4 23 4 23 4 26 211 0 413 1 298 0 68 0 211 0 275 0 210 0 211 0 211 0 211 0 211 0 68 0
211 0 211 0 69 0 115 0 119 0 143 0 145 0 147 0 143 0 145 0 147 0 145 0 147 0 119 0 121 0 143 0 164 0 147 0 149 0
460 347 462 462 279 462 471 370 337 308 377 400 508 573 337 424 269 231 422 368 432 446 323 394 678 193 186 292 454 309 766
241 4 22 4 22 4 22 4 25 4 21 4 22 4 22 4 21 4 23 4 23 4 23 4 21 4 21 4 20 4 23 4 25 243 1 243 1 243 1 243 1 243 1 243 1
243 1 243 1 243 1 243 1 244 1 243 1 243 1 244 1 115 0 119 0 143 0 145 0 147 0 143 0 145 0 147 0 145 0 147 0 119 0 121 0
143 0 164 0 147 0 149 0
656 222 320 304 786 320 4 222 480 201 370 363 244 310 657 185 635 168 170 265 819 232 623 249 4 122 4 166 4 206 4 180 4 21 4
21 4 20 4 23 4 20 4 21 4 21 4 23 4 21 4 23 4 21 4 20 4 19 4 20 4 22 4 25 15 1 14 1 15 1 243 0 15 1 14 1 14 1 15 1 15 1 14 1 15
1 15 1 244 0 243 0 243 0 244 0 115 0 119 0 143 0 145 0 147 0 143 0 145 0 147 0 145 0 147 0 119 0 121 0 143 0 164 0 147 0 149 0
549 400 740 525 787 579 701 429 651 473 763 724 725 595 698 480 651 494 629 654 748 523 664 512 669 333 638 435 744 510 645
356 4 23 4 23 4 22 4 26 4 21 4 22 4 23 4 21 4 24 4 24 4 24 4 22 4 21 4 20 4 23 4 26 257 1 257 1 257 1 257 1 257 1 257 1
257 1 257 1 257 1 257 1 257 1 257 1 115 0 119 0 143 0 145 0 147 0 143 0 145 0 147 0 145 0 147 0 145 0 147 0 119 0 121 0
143 0 164 0 147 0 149 0
4 130 488 308 654 385 460 266 4 153 468 238 4 281 425 289 4 178 4 173 4 192 544 236 4 116 4 198 4 208 4 191 4 23 4 23 4 23 4
26 4 22 4 23 4 23 4 23 4 24 4 24 4 24 4 22 4 21 4 22 4 24 4 27 257 0 511 1 511 1 511 1 257 0 511 1 257 0 511 1 257 0 257 0 257
0 511 1 257 0 257 0 257 0 257 0 115 0 119 0 143 0 145 0 147 0 143 0 145 0 147 0 145 0 147 0 119 0 121 0 143 0 164 0 147 0 149
0
4 73 387 173 4 160 4 70 4 144 173 181 4 144 4 87 4 100 771 129 353 172 4 112 4 57 4 139 4 106 4 96 4 22 4 22 4 21 4 23 4 21 4
22 4 22 4 20 4 23 4 21 4 23 4 20 4 19 4 22 4 22 4 24 257 0 394 1 511 0 511 0 257 0 394 1 257 0 511 0 257 0 395 1 395 1 511 0
257 0 257 0 257 0 257 0 115 0 119 0 143 0 145 0 147 0 143 0 145 0 147 0 145 0 147 0 119 0 121 0 143 0 164 0 147 0 149 0
406 396 491 547 448 613 456 453 498 455 573 662 484 593 417 510 344 520 551 647 568 723 528 507 530 447 537 569 424 443 420
397 4 23 4 23 4 22 4 24 4 21 4 23 4 22 4 21 4 24 4 23 4 24 4 22 4 20 4 20 4 23 4 25 151 1 151 1 151 1 151 1 151 1 151 1 151 1
151 1 151 1 151 1 151 1 151 1 151 1 115 0 119 0 143 0 145 0 147 0 143 0 145 0 147 0 145 0 147 0 145 0 147 0 119 0 121 0
143 0 164 0 147 0 149 0

```

Рисунок 16 – Выходной файл с Petiroc

Для дальнейшей обработки полученных результатов и построения спектров предварительно написана программа для считывания соответствующих data-файлов. Пример одного из построенных спектров представлен на рисунке 17. Как видно, кривая распределения представлена в виде отдельных пиков. Начиная с левой стороны: пьедестал, 1 э.ф. (эквивалент

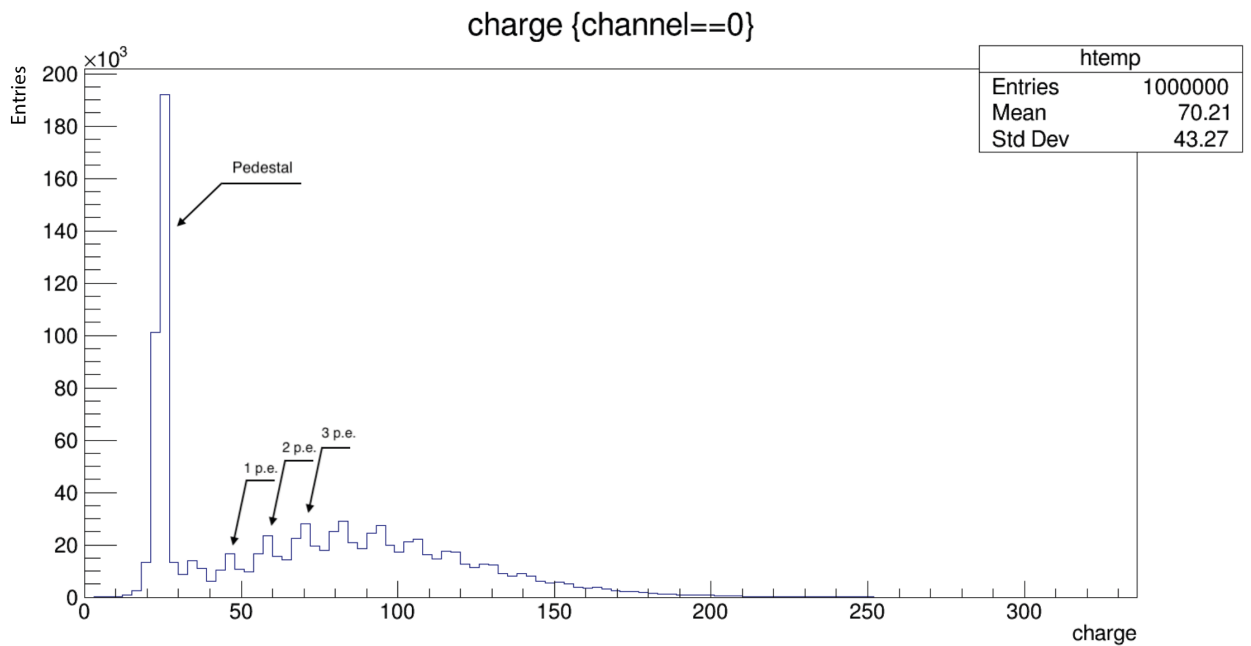


Рисунок 17 – Одноэлектронный зарядовый спектр 0-го канала матрицы фотона), 2 э.ф., 3 э.ф. и т.д. Расстояние между соседними пиками соответствует выходному заряду единичного детектируемого фотона [7]. В данном примере максимум спектра наблюдается на уровне четырех фотоэлектронов. Если учесть эффективность регистрации PDE (Photon Detection Efficiency), показывающую, какое количество падающих фотонов регистрируется SiPM [7], то можно оценить, что на данный SiPM в среднем падает 15-20 фотонов за вспышку.

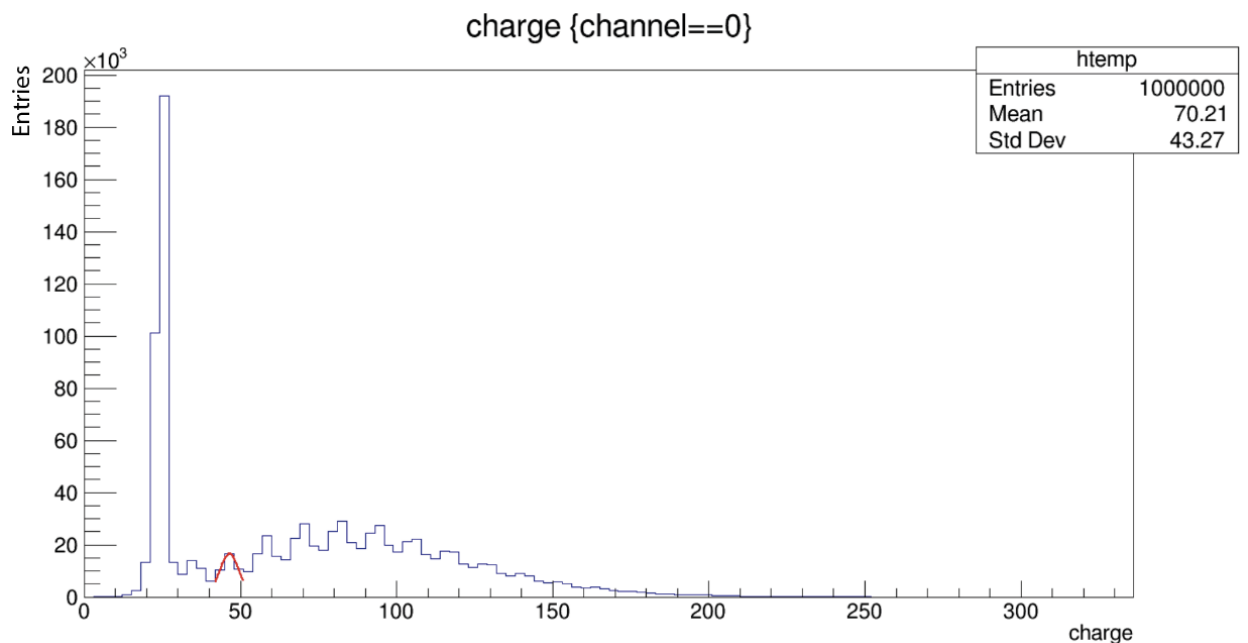


Рисунок 18 – Одноэлектронный зарядовый спектр 0-го канала матрицы

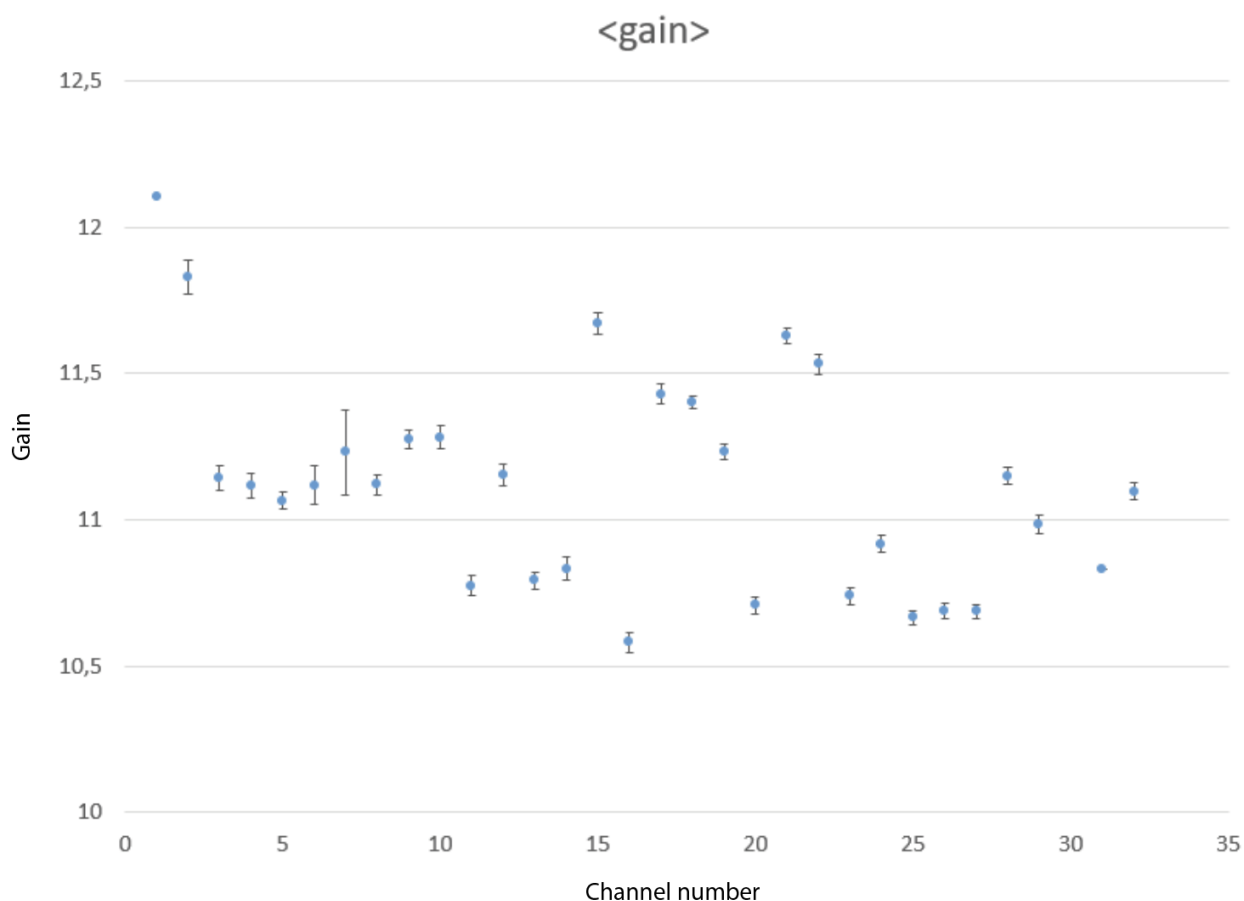


Рисунок 19 – График зависимости коэффициентов усиления от номеров каналов матриц

Анализ отдельных пиков, как показано на рисунке 18, позволил определить, с точностью до коэффициента, усиление каждого отдельного SiPM матриц. На рисунке 19 представлен график зависимости коэффициентов усиления от номеров каналов матриц. Максимальный разброс относительно среднего составил 0,98, что допустимо в первом приближении, но может потребовать коррекции для увеличения точности.

Глава 4

Измерение напряжения пробоя матрицы

Напряжение пробоя SiPM ($V_{пр}$) является ключевой величиной, лежащей в основе его работы и оказывающей влияние на подавляющее большинство других характеристик фотоприемника. Напряжение пробоя – это точка смещения, при которой напряженность электрического поля, генерируемая в обедненном слое SiPM, является достаточной, чтобы создать гейгеровский разряд. Напряжение смещения оказывает влияние на две основные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей – коэффициент усиления и эффективность регистрации фотонов. Кроме того, от величины перенапряжения зависят скорость темнового счета, эффекты кросс-ток и послеимпульсы, которые являются основными источниками шума в SiPM.

Типовое напряжение пробоя в кремниевых фотоумножителях SensL составляет около 25 В. Рекомендуемая величина перенапряжения ($V_{смещ}$) составляет 1–5 В. Поэтому для SensL SiPM напряжение смещения $V_{смещ}$ составляет <30 В, контрастирующее с некоторыми SiPM других производителей, например, Hamamatsu, которые имеют $V_{смещ}$ в пределах 50–100 В [14]. Различие SiPM производства SensL и Hamamatsu заключается также в разбросе величин пробойного напряжения сенсоров, составляющих матрицу. SiPM SensL имеют слабое различие $V_{смещ}$, поэтому есть возможность проводить измерение пробоя для всей матрицы, пренебрегая разбросом напряжений отдельных ячеек. Величина напряжения пробоя для матрицы

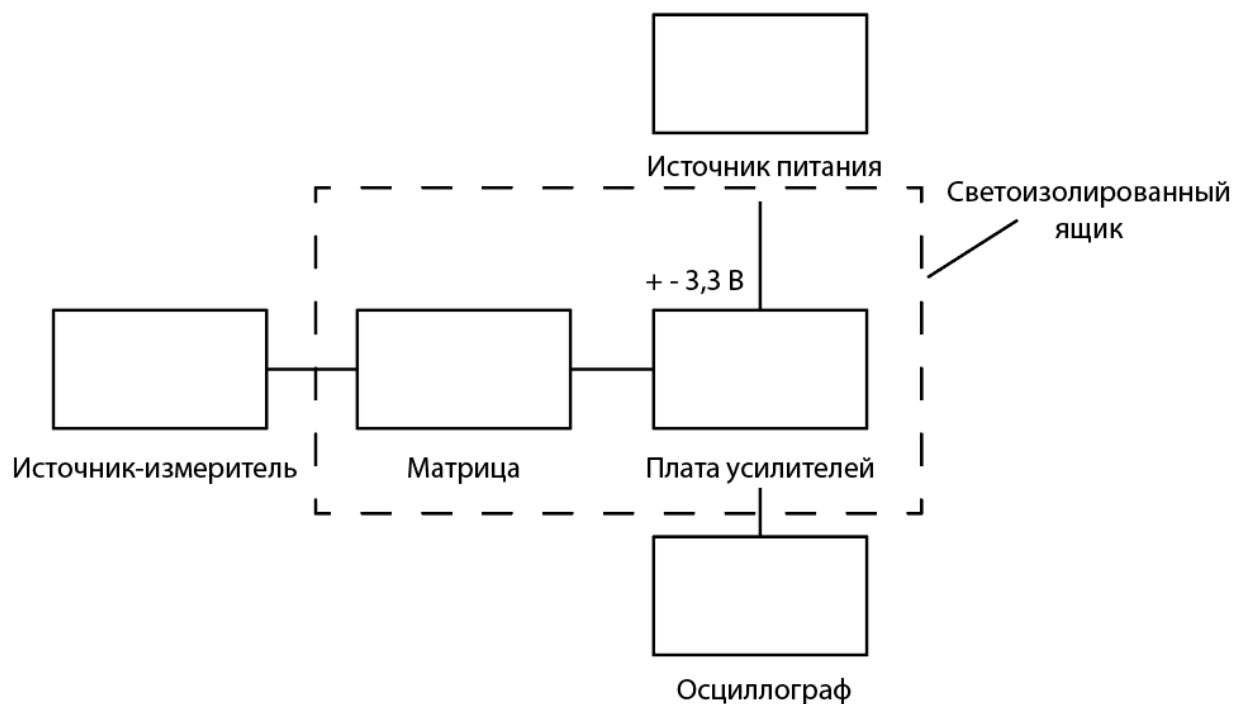


Рисунок 20 – Принципиальная схема установки

SensL SPMArray4 получена посредством снятия вольт-амперной характеристики (ВАХ) при использовании источника-измерителя Keithley. На рисунке 20 представлена принципиальная схема установки. На рисунках 21 и 22 представлены полученные ВАХ, из которых видно, что величина пробоя составила 26,3 В. Полученное значение пробоя матрицы является одной из важнейших характеристик и позволяет точно определить величину рабочего перенапряжения (2,3 В).

SiPM производства Hamamatsu в отличие от SensL имеют значительный разброс напряжений пробоя, в связи с чем возникает необходимость измерения $V_{пр}$ каждой отдельной ячейки матрицы. Различие величин пробойного напряжения несет за собой различие в эффективности регистрации и уровне шумов каждого отдельного SiPM, что делает невозможным получение корректных результатов энергетических, координатных и временных измерений без предварительной калибровки. В связи с этим для измерения напряжений пробоя и проведения калибровки матрицы Hamamatsu S13361-3050AE-08 с каждого канала получены одноэлектронные спектры при различных значениях напряжения смещения. Подробнее про одноэлектронные спектры описано в главе 3. Принципиальная схема установки, с помощью которой проводились измерения, представлена на рисунке 23.

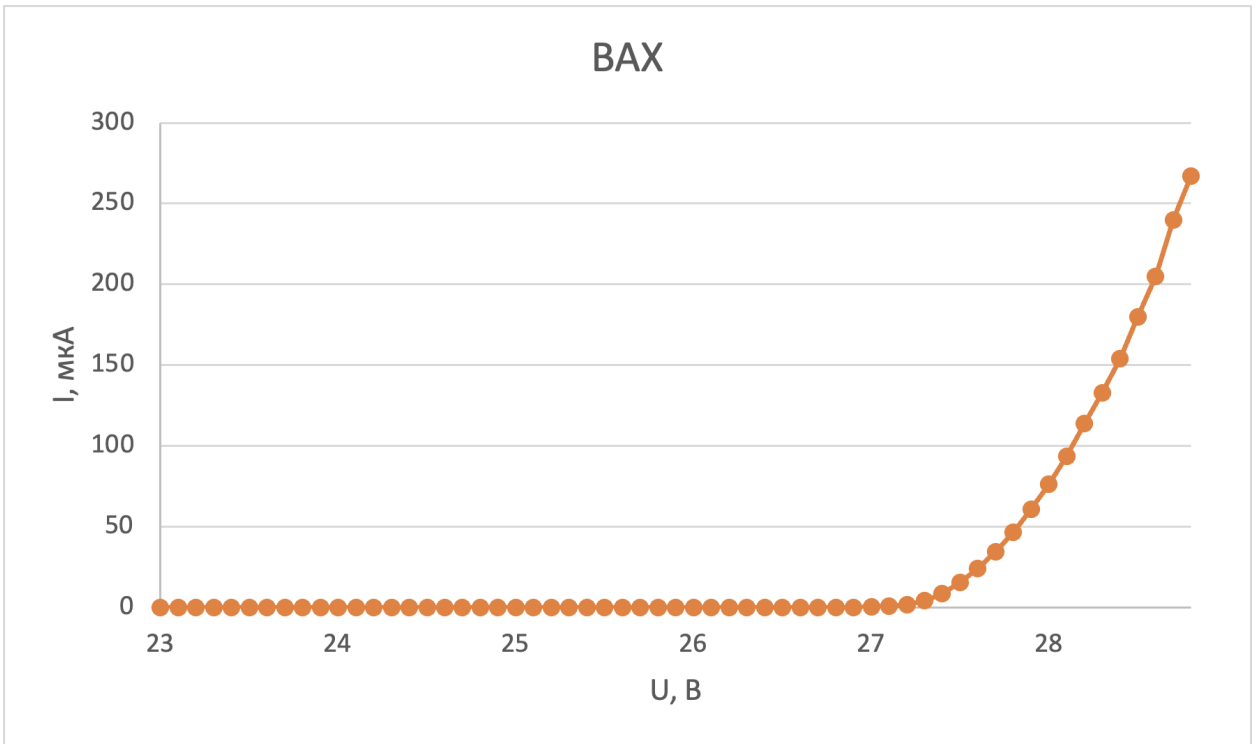


Рисунок 21 – Вольт-амперная характеристика

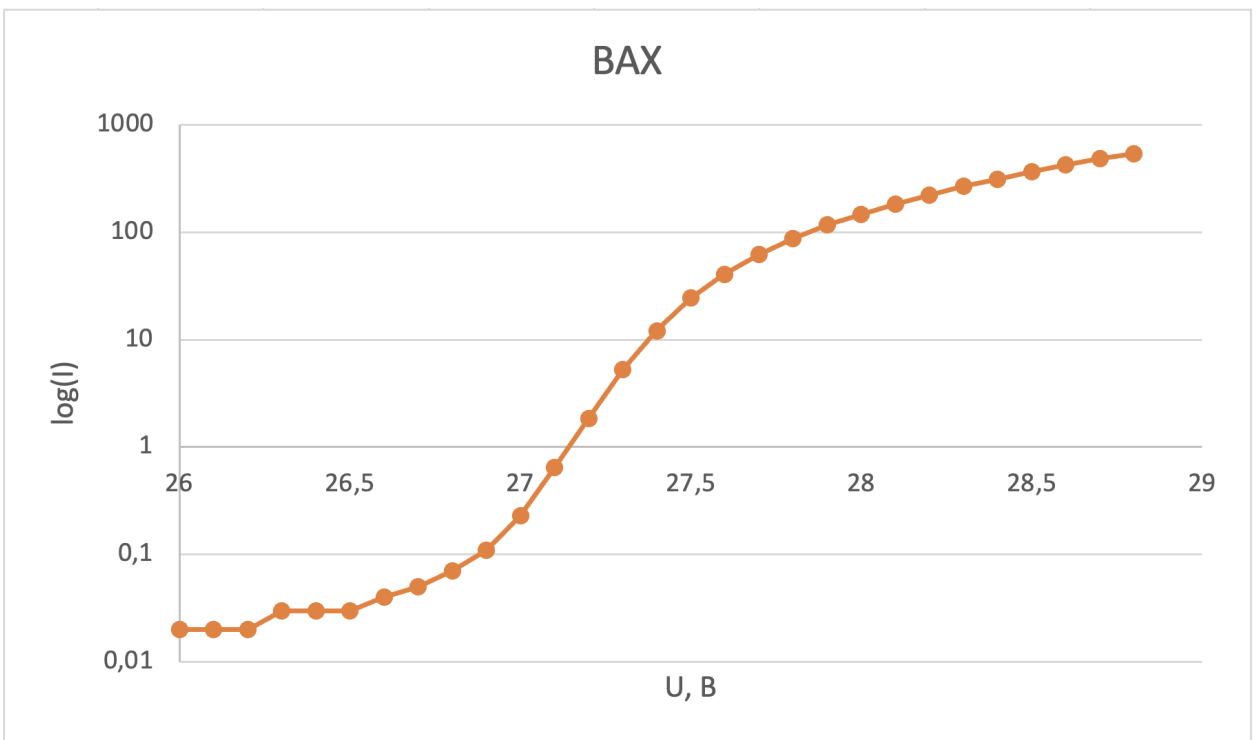


Рисунок 22 – Вольт-амперная характеристика в логарифмическом масштабе

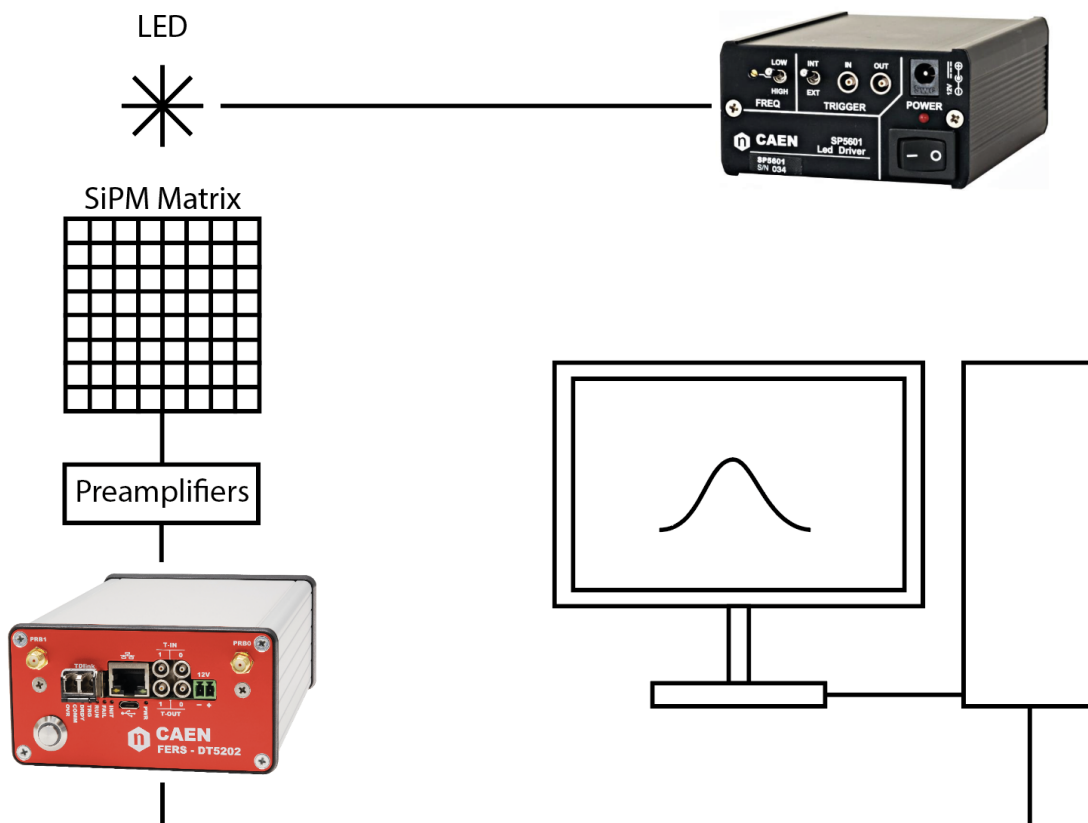


Рисунок 23 – Принципиальная схема установки для снятия одноэлектронных спектров

В качестве светодиода использовался CAEN SP5601 LED driver с максимумом высвечивания на 405 нм. Для автоматизации обработки большого массива данных написана программа, на вход которой поступают файлы, автоматически создаваемые в рамках программного обеспечения Janus, в процессе проведения измерений с FERS-5200. Формат выходных файлов с Janus представлен на рисунке 24.

```

//*****
// File Format Version 3.2
// Janus Release 3.2.4
// Acquisition Mode: Spectroscopy
// Energy Histogram Channels: 8192
// ToA/ToT LSB: 0.5 ns
// Run start time: Fri May 3 13:58:51 2024 UTC
//*****
Timestamp_us      TrgID  Brd  Ch      LG      HG
1060.488          0      00  00      8044    7775
                  00  01      8182    8045
                  00  02      8005    8132
                  00  03      8132    8156
                  00  04      8121    5807
                  00  05      5990    7469
                  00  06      8078    8090
                  00  07      7826    4384
                  00  08      8117    8101
                  00  09      6098    4827
                  00  10      2270    8120
                  00  11      1261    8075
                  00  12      8047    3620
                  00  13      8111    8025
                  00  14      8126    8085
                  00  15      6597    8089
                  00  16      4115    8140
                  00  17      8074    7422
                  00  18      8067    8129
                  00  19      8065    7420
                  00  20      8082    4713
                  00  21      6431    6908
                  00  22      7394    8129
                  00  23      8114    8142
                  00  24      8137    8097
                  00  25      6537    2381
                  00  26      8179    7503
                  00  27      8064    8032
                  00  28      8012    8134
                  00  29      8083    8105
                  00  30      8120    7396
                  00  31      7564    8081
                  00  32      8053    8117

```

Рисунок 24 – Выходной файл FERS-5200

Алгоритм для обработки позволяет находить максимумы исследуемых одноэлектронных спектров, после чего они сортируются по высоте и для заданного числа максимальных по высоте пиков вычисляются положения. Далее находятся разности между положениями пиков и вычисляется среднее значение разностей, с точностью до коэффициента равное коэффициенту усиления соответствующей ячейки. Анализ проводится для нескольких различных значений напряжения смещения. Затем строится зависимость коэффициентов усиления от напряжений смещения для каждого отдельного канала. После чего полученная зависимость экстраполируется и вычисляется точка пересечения с осью абсцисс. Полученная величина в вольтах и есть искомое напряжение пробоя ячейки. На рисунках 25 и 26 представлены результаты работы программы на примере первого канала. В таблице 3 приведены рассчитанные напряжения пробоя для 64 ячеек матрицы Hamamatsu S13361-3050AE-08.

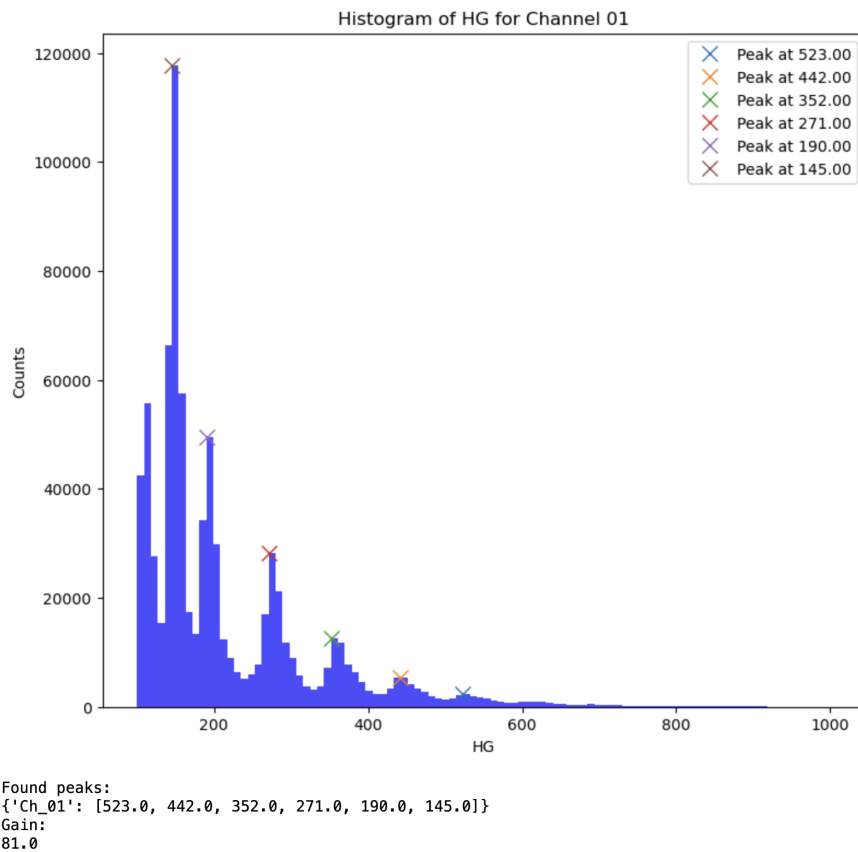


Рисунок 25 – Результат работы программы по нахождению пиков одно-электронного спектра и вычислению положений максимумов

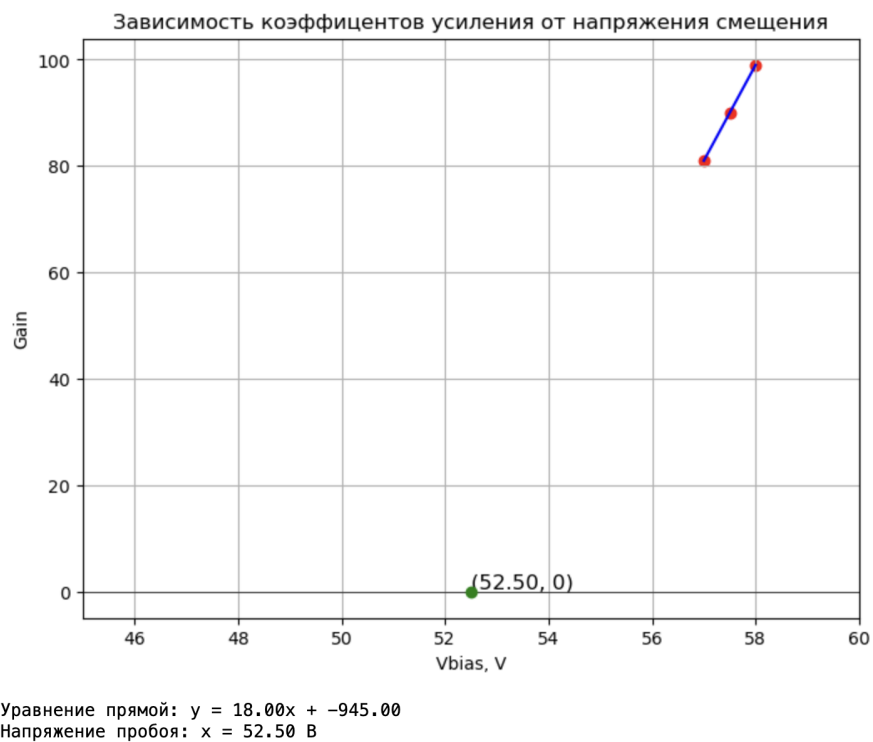


Рисунок 26 – Результат работы программы по определению напряжения пробоя

Таблица 3 – Напряжения пробоя для 64 каналов матрицы Hamamatsu S13361-3050AE-08

№ _{канала}	V _{пр} , В	№ _{канала}	V _{пр} , В	№ _{канала}	V _{пр} , В	№ _{канала}	V _{пр} , В
0	49,7	16	54,7	32	51,1	48	55,2
1	52,5	17	53,6	33	47,7	49	50,0
2	53,9	18	50,9	34	49,0	50	55,2
3	50,9	19	54,9	35	52,2	51	52,1
4	52,9	20	49,9	36	52,3	52	55,2
5	54,5	21	55,0	37	52,8	53	50,0
6	51,7	22	48,0	38	51,7	54	54,6
7	49,7	23	54,6	39	48,0	55	49,5
8	50,6	24	52,4	40	53,5	56	51,3
9	53,6	25	49,5	41	51,9	57	52,3
10	49,6	26	52,7	42	54,1	58	49,5
11	51,6	27	54,3	43	52,0	59	52,5
12	52,8	28	52,4	44	46,3	60	51,4
13	56,0	29	52,1	45	51,9	61	55,4
14	54,4	30	52,3	46	54,3	62	50,7
15	55,1	31	52,6	47	52,3	63	52,0

Разброс по напряжениям составляет 7,7 В. По полученным значениям напряжений пробоя в дальнейшем можно осуществлять подстройку в Janus. Разработанный алгоритм не только позволяет определять две ключевые характеристики SiPM, но и помогает обеспечить однородный отклик со всех каналов матрицы и является методом контроля стабильности детектора.

Глава 5

Измерение энергетического разрешения

Энергетическое разрешение – очень важный параметр, определяющий общую производительность детектора, поскольку именно этот параметр позволяет различать первичные фотоны и комптоновские рассеянные фотоны. Это, в конечном итоге, определяет пространственное разрешение системы.

Принципиальная схема установки, которая использовалась для снятия спектров и определения энергетического разрешения детектора на основе матрицы SiPM SensL SPMArray4 и сцинтилляционного кристалла GAGG 15x12x10 мм представлена на рисунке 27.

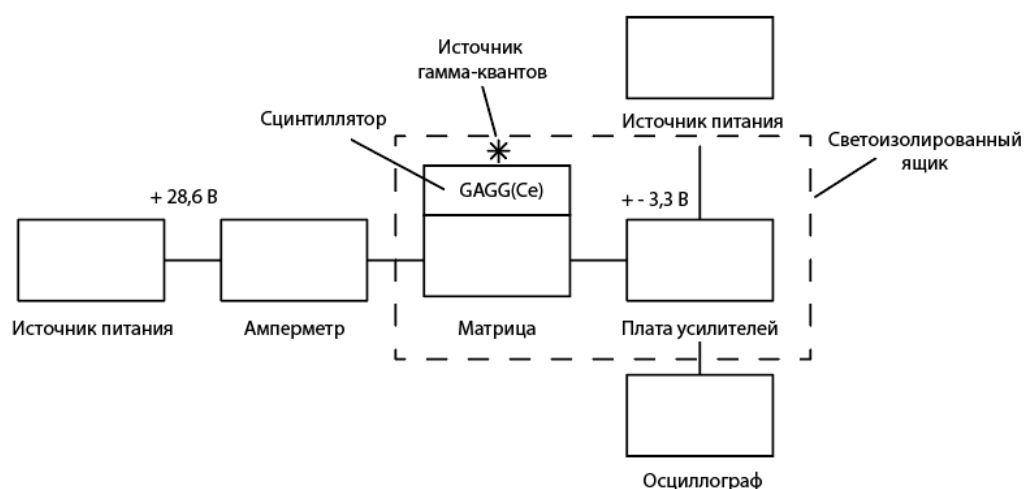
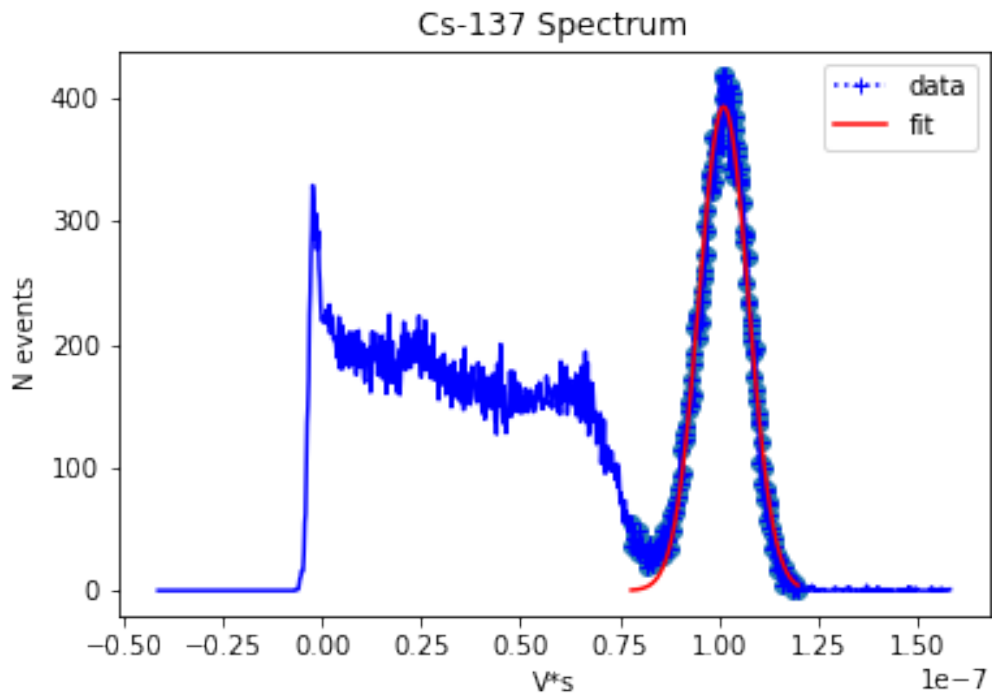
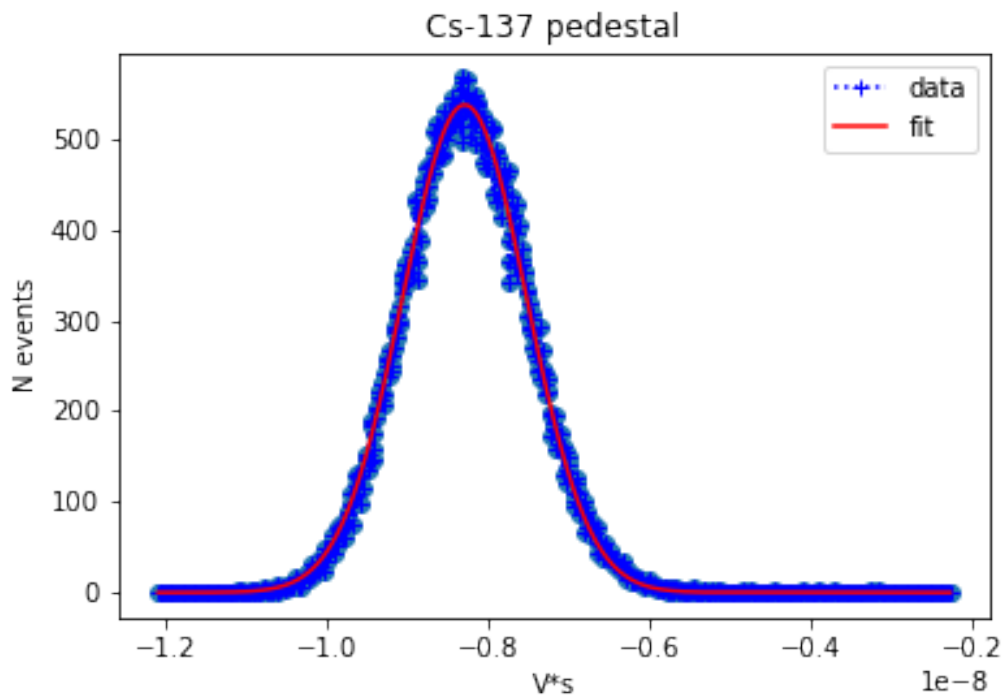


Рисунок 27 – Схема установки

Полученный спектр Цезия-137 с суммарного канала матрицы и пьедестал представлены на рисунках 28а, 28б соответственно.



(а) Спектр



(б) Пьедестал

Рисунок 28 – Спектр Цезия-137 и соответствующий пьедестал снятый с суммарного канала матрицы

Фотопик спектра и пьедестал аппроксимированы распределением Гаус-

са. С помощью полученных параметров аппроксимации рассчитано относительное разрешение детектора по следующей формуле:

$$\delta = \frac{FWHM}{(N - N_p)}$$

где $FWHM = 2,35\sigma$, N - положение максимума фотопика N_p - положение пика пьедестала.

Относительное энергетическое разрешение детектора составило 14 %. Полученное разрешение значительно хуже собственного разрешения кристалла GAGG ($\delta = 6\%$ (662 кэВ) [15]), причиной чему могли послужить потери фотонов, вызванные различием габаритных размеров используемых кристалла и матрицы. Еще одной причиной ухудшения служит различие отдельных SiPM в матрице.

Для оценки энергетического разрешения детектора на основе матрицы SiPM Onsemi ARRAYJ-30035-16P в сочетании со сцинтилляционным кристаллом GAGG 12x12x12 мм с помощью установки (см. рисунок 29) получены зарядовые спектры Цезия-137 и Титана-44, представленные на рисунках 30 и 31 соответственно.

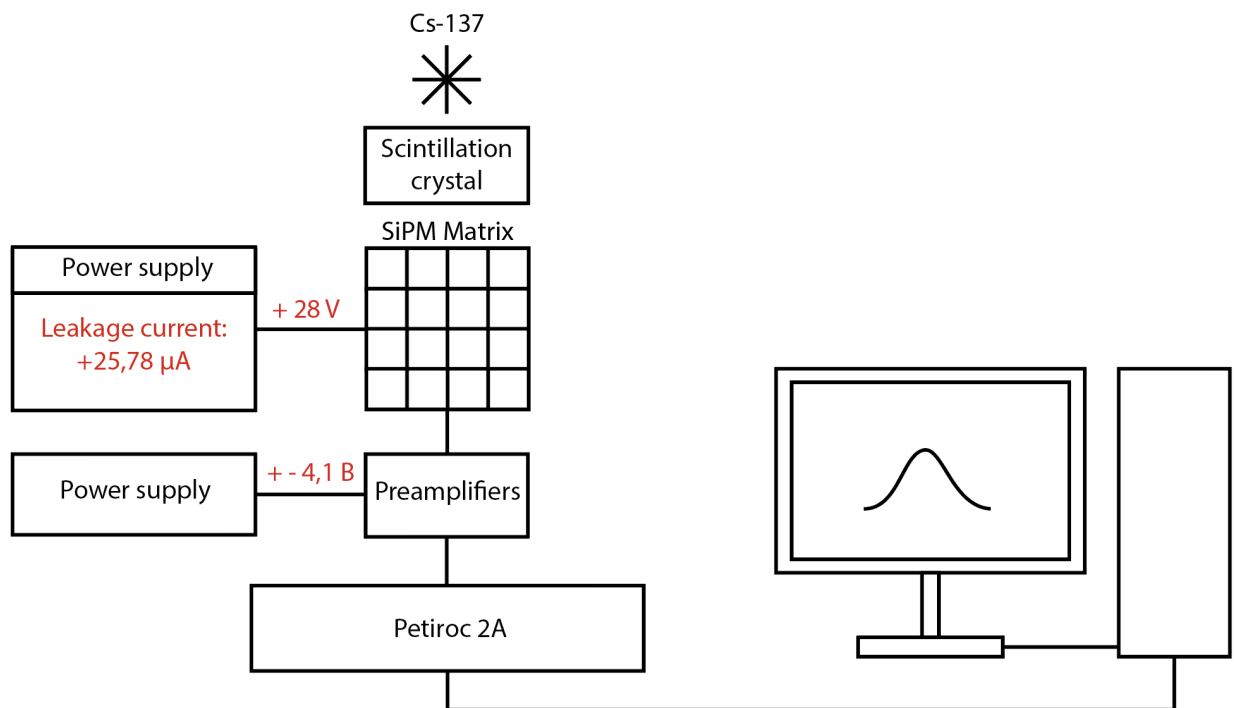


Рисунок 29 – Принципиальная схема установки для проведения энергетических и координатных измерений

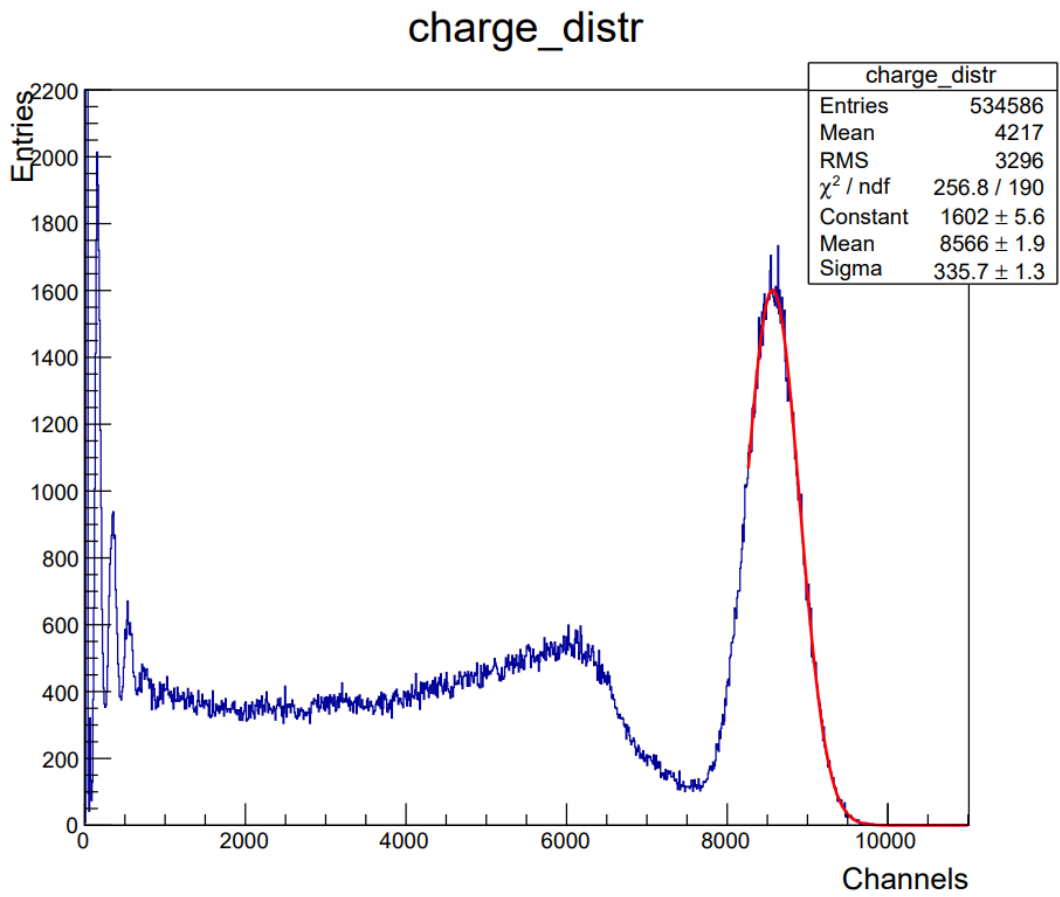


Рисунок 30 – Суммарный зарядовый спектр Цезия-137

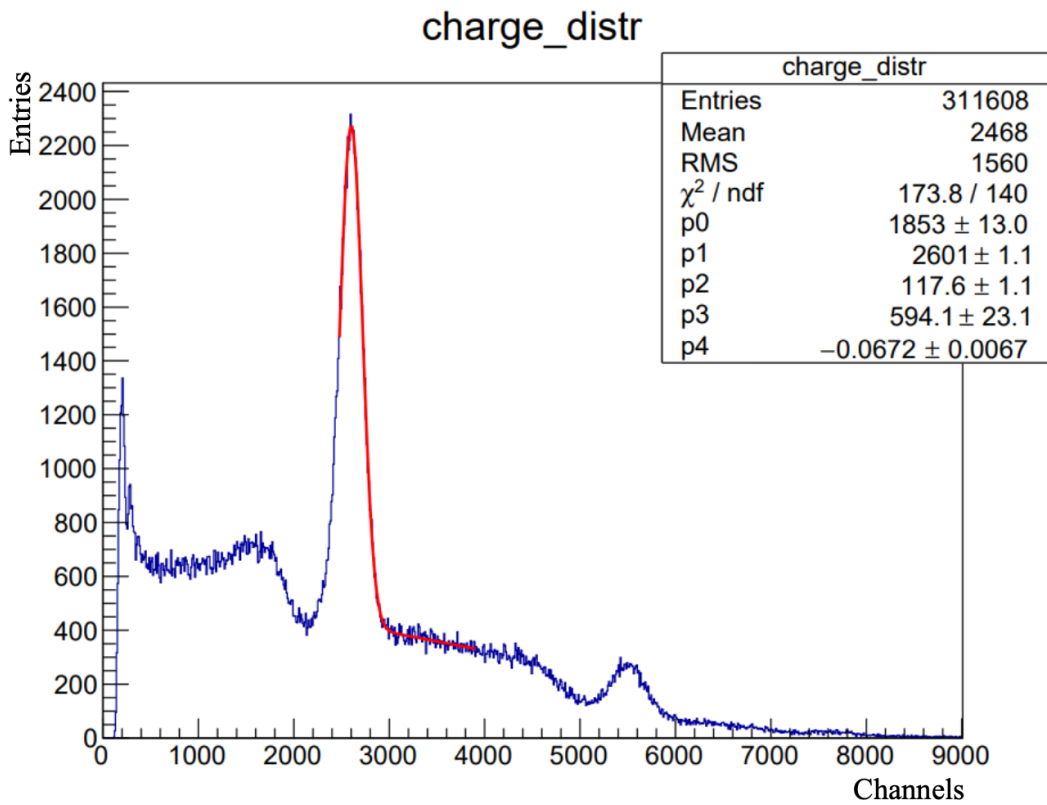


Рисунок 31 – Суммарный зарядовый спектр Титана-44

Фотопик спектра Цезия-137 аппроксимирован распределением Гаусса, относительное энергетическое разрешение при энергии 662 кэВ составило $\delta \sim 9 \%$, что является довольно высоким показателем. Еще одной демонстрацией высокого разрешения и однородности исследуемого детектора является наличие одноэлектронных пиков в начале спектра.

Для возможности сравнения полученных результатов в таблице 4 приведены рассчитанные относительные разрешения двух исследуемых детекторов на основе различных сцинтилляционных кристаллов GAGG и матриц SiPM и собственное разрешение.

Таблица 4 – Сравнение относительных энергетических разрешений

Детектор	δ (662 кэВ)
SensL SPMArray4 + 15x12x10 мм GAGG	14 %
Onsemi ARRAYJ-30035-16P + 12x12x12 мм GAGG	9 %
Собственное разрешение	6 %

Фотопик спектра Титана-44 аппроксимирован суммой распределения Гаусса и полинома первой степени. Такой выбор аппроксимирующей функции обусловлен тем, что фотопик лежит на подложке из событий, обусловленных комптон-эффектом. Относительное разрешение при энергии 511 кэВ составило $\delta \sim 11 \%$. Полученного разрешения достаточно для уверенного разделения фотопика (511 кэВ) и соответствующих комтоновских квантов. Собственное разрешение: $\delta = 8\%$ (511 кэВ).

Глава 6

Восстановление координаты XY-взаимодействия

Координатное разрешение является одной из важнейших характеристик позиционно-чувствительного детектора. А применительно к ПЭТ-томографии, координатные измерения играют ключевую роль. Точное восстановление координат X, Y позволит повысить точность восстановления координаты Z и впоследствии улучшить периферийную картину, получаемую в ПЭТ-сканере.

Для восстановления координаты XY-взаимодействия и, впоследствии, оценки координатного разрешения детектора на основе 16-канальной матрицы SiPM Onsemi ArrayJ-30035-16P и различных сцинтилляционных кристаллов (GAGG, LYSO) с помощью схемы, представленной на рисунке 29, получены зарядовые спектры Цезия-137 и написана программа, получающая на вход данные, представленные на рисунке 16. В основе алгоритма программы лежит ангерова логика, принцип которой описывается следующим образом:

$$X = \frac{\sum_i x_i \cdot \omega_i}{\sum_i \omega_i} \quad Y = \frac{\sum_i y_i \cdot \omega_i}{\sum_i \omega_i} \quad (6.1)$$

где x_i – координата центра i -ой ячейки матрицы в миллиметрах, ω_i – вес i -ой ячейки в каналах [16]. Работа программы проверялась на двух сцинтил-

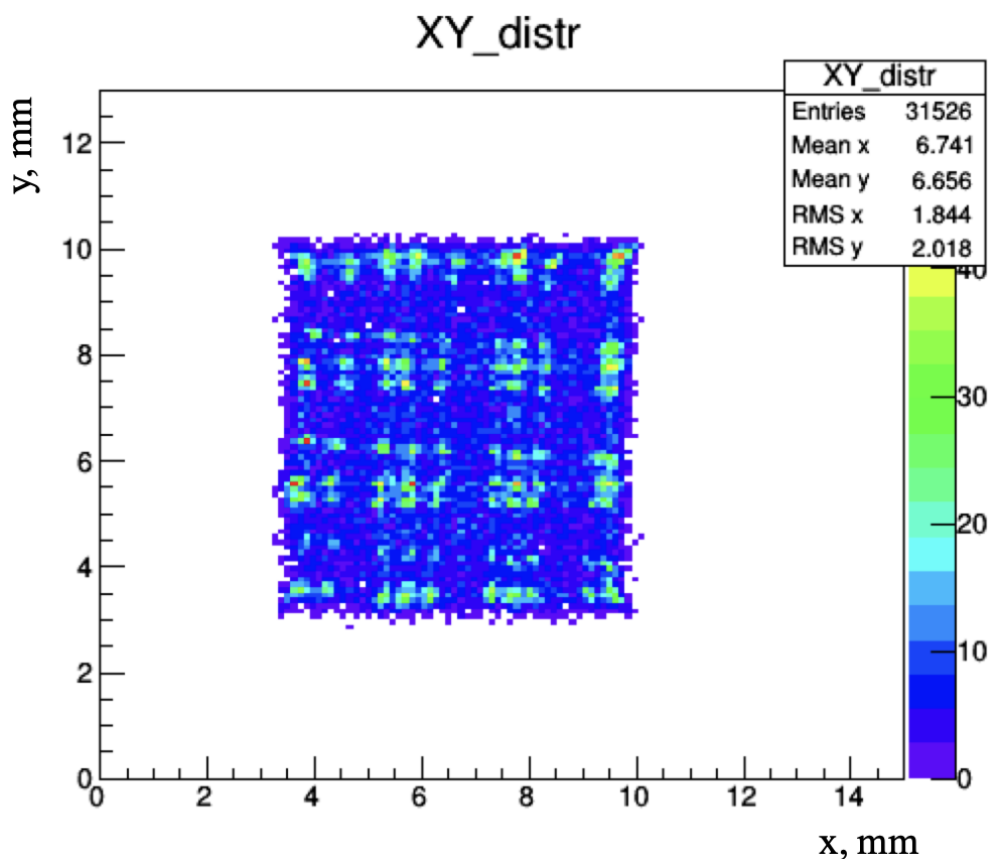


Рисунок 32 – Двумерное распределение плоскости XY для кристалла LYSO

ляционных кристаллах LYSO и GAGG. В качестве результатов восстановления координаты с кристаллом LYSO построены двумерное распределение плоскости XY и одномерные распределения по каждой из координат. Полученные зависимости представлены на рисунках 32, 33 и 34 соответственно.

Для кристалла GAGG также построены координатные распределения по осям X (см. рисунок 35) и Y (см. рисунок 36). Предварительным критерием отбора данных было выставление порогов на заряды для выделения событий, составляющих фотопик и исключения событий, обусловленных комптон-эффектом. Однако, в отличие от результатов, полученных с кристаллом LYSO, на спектрах наблюдается равномерная засветка (см. рисунок 37). Причиной равномерной засветки может служить большое послесвечение кристалла GAGG. В качестве примера на рисунке 38 приведена зависимость отношения тока после отключения светодиода к току во время облучения кристалла светодиодом от времени для различных сцинтилляционных кристаллов, где видно, что даже спустя час после облучения послесвечение GAGG значительно больше, чем у других кристаллов [17].

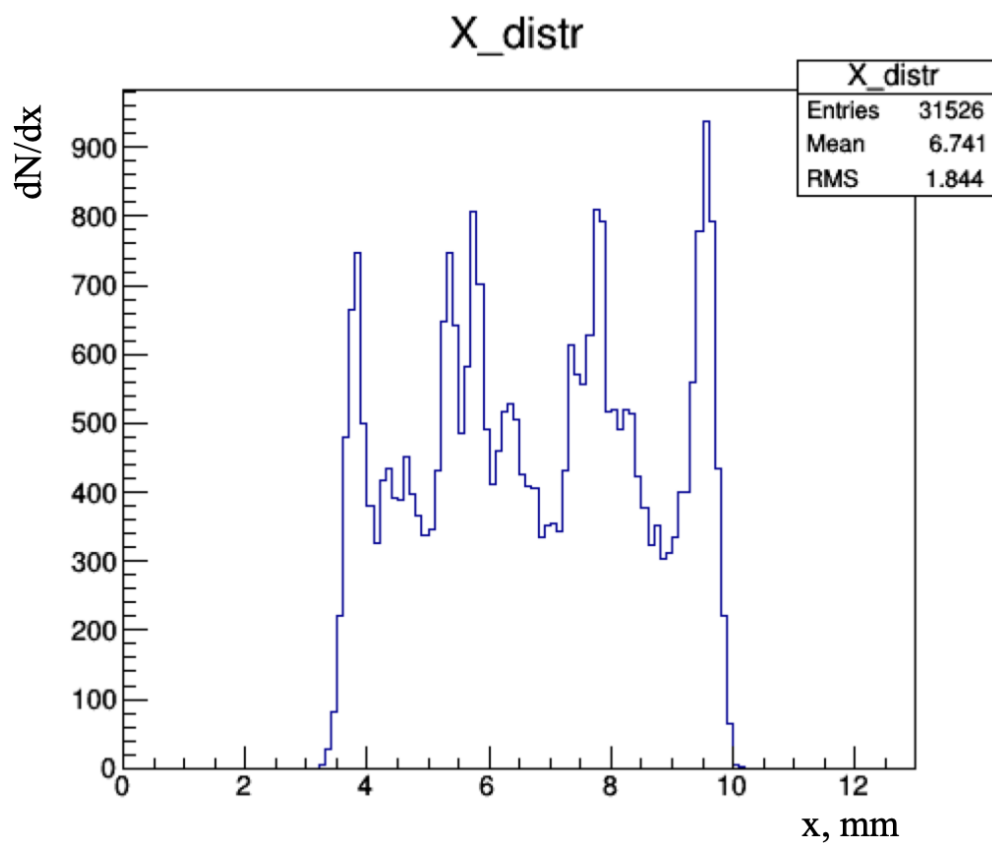


Рисунок 33 – Распределение по координате X для кристалла LYSO

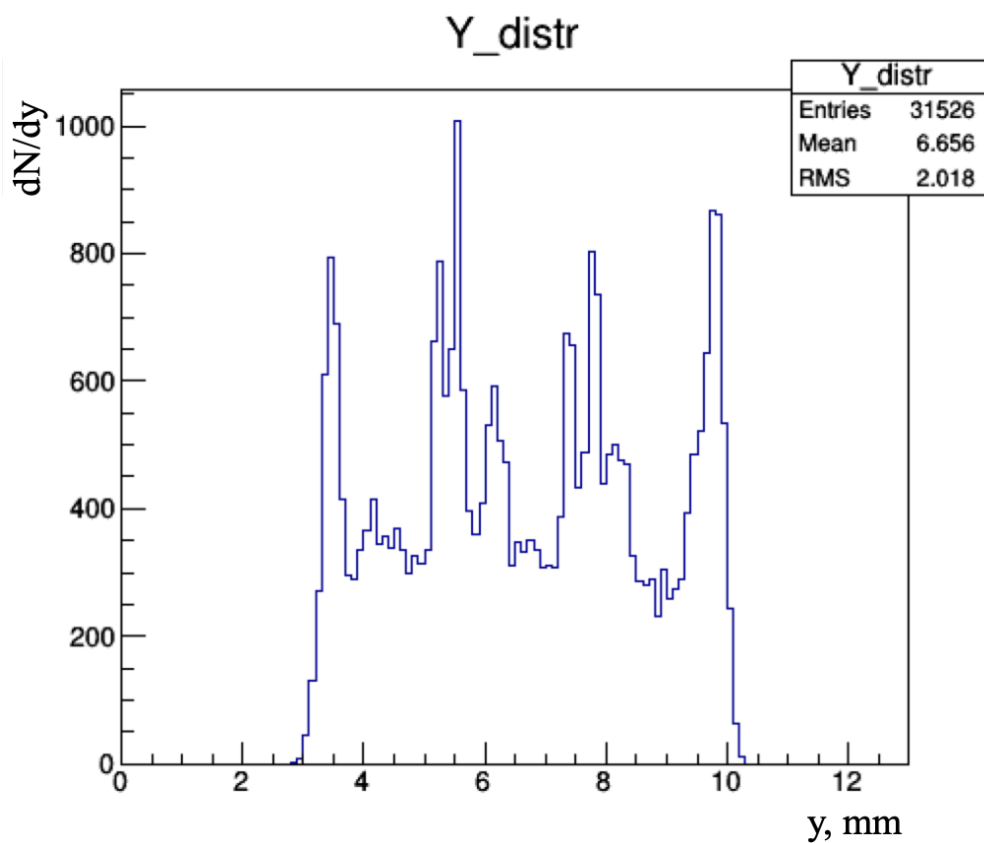


Рисунок 34 – Распределение по координате Y для кристалла LYSO

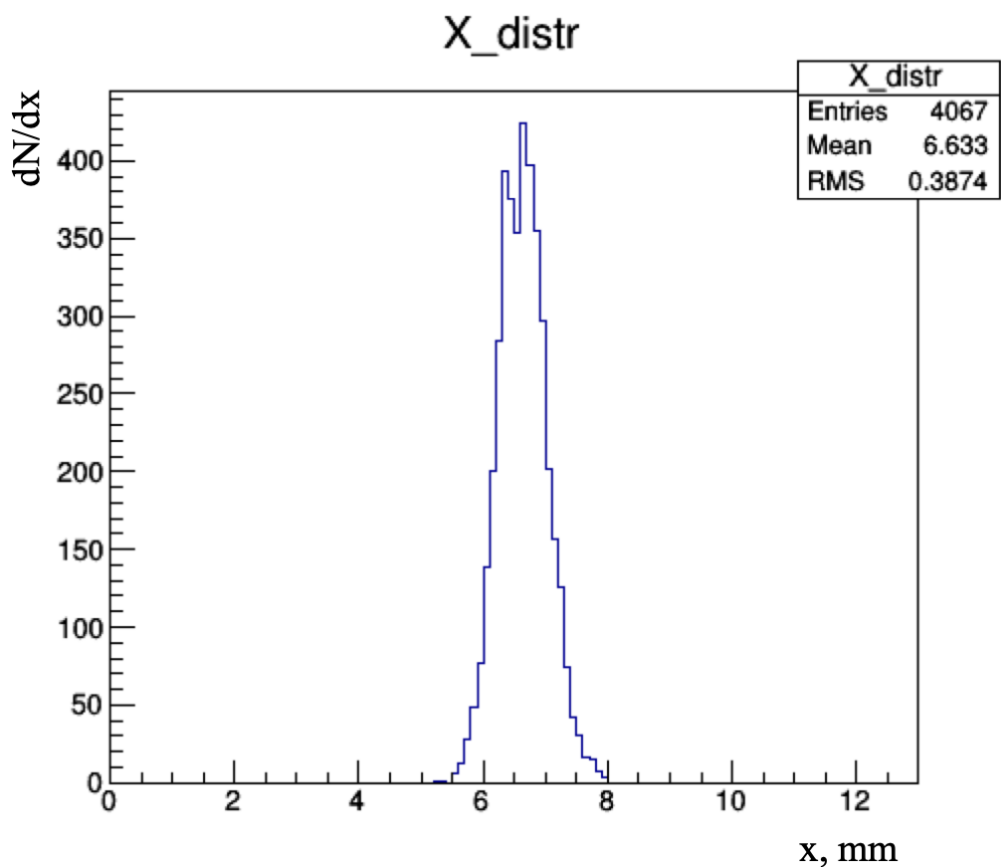


Рисунок 35 – Распределение по координате X для кристалла GAGG

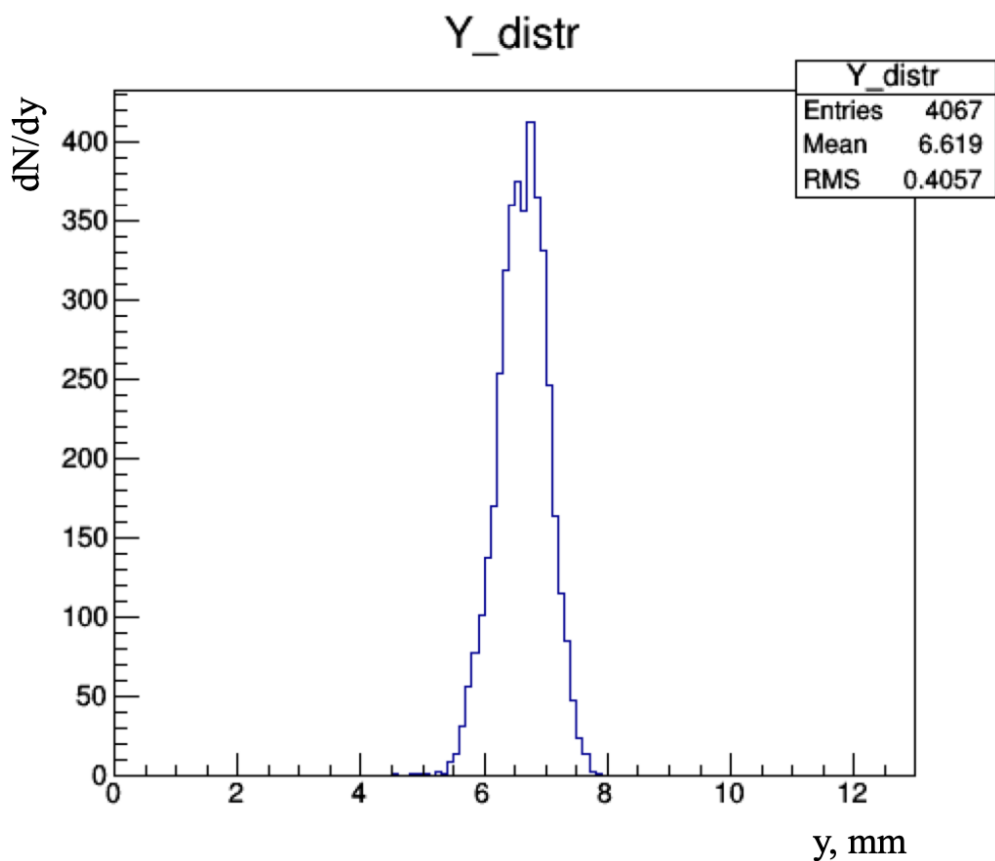


Рисунок 36 – Распределение по координате Y для кристалла GAGG

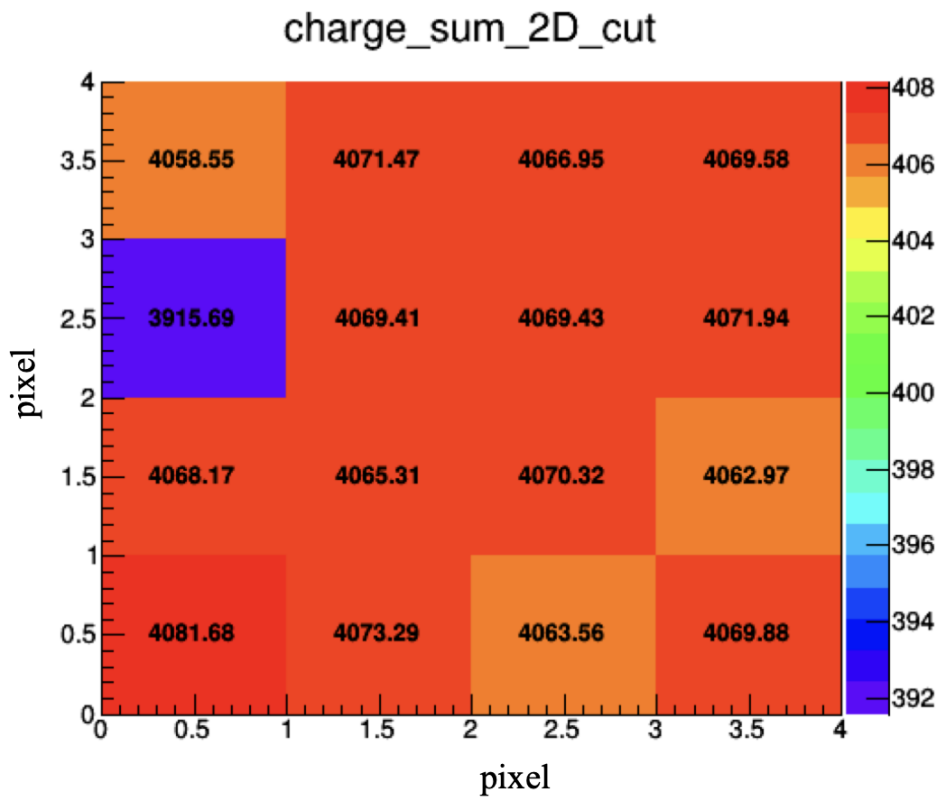


Рисунок 37 – Распределение зарядов по пикселям матрицы

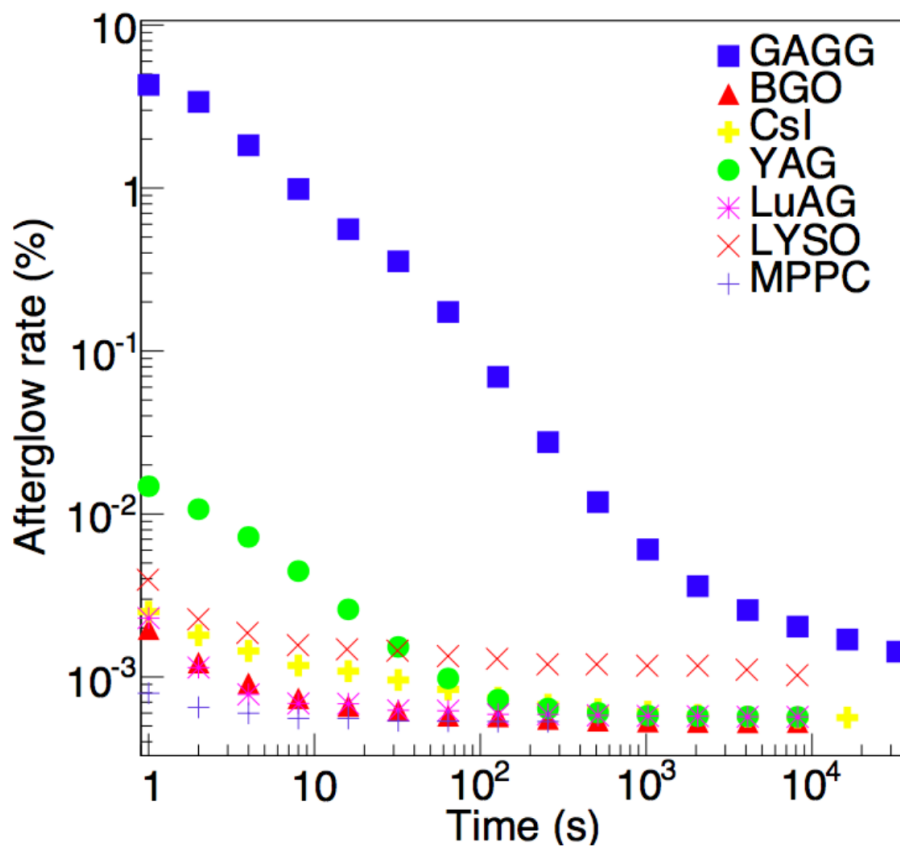


Рисунок 38 – Послесвечение GAGG по сравнению с послесвечением других сцинтилляторов [17]

Глава 7

Измерение временного разрешения

Для измерения временного разрешения использовались 2 матрицы Onsemi ARRAYJ-30035-16P и два сцинтилляционных кристалла GAGG(Ce) 12x12x12 мм. Принципиальная схема установки представлена на рисунке 39. Временные спектры получены двумя различными способами. Первый основан на вычислении разности усредненных времен срабатывания ячеек различных матриц, второй – на подсчете разности времен первых сработавших ячеек. Перед реализацией каждого из алгоритмов данные предварительно подвергаются отбору на число сработавших ячеек, а также исключаются события, содержащие ложные срабатывания. На рисунках 40 и 41 представлены временные распределения, полученные первым и вторым способом соответственно. Распределение разности усредненных времен аппроксимировано Гауссом. Временное разрешение с учетом цены деления канала ВЦП – 36 пс составило ~ 8 нс, что является достаточным для работы с ПЭТ (не в режиме времени пролета – time of flight (ToF)). Распределение разности времен первых срабатываний в отличие от разностей усредненных времен аппроксимировано распределением Коши. Произведена оценка ширины полученного распределения, с учетом цены деления канала ВЦП временное разрешение в этом случае составило ~ 4 нс. Полученная величина является высоким показателем и близка к величине разрешения, полученной с парой одиночных SiPM в сочетании с кристаллами GAGG (2,5 нс).

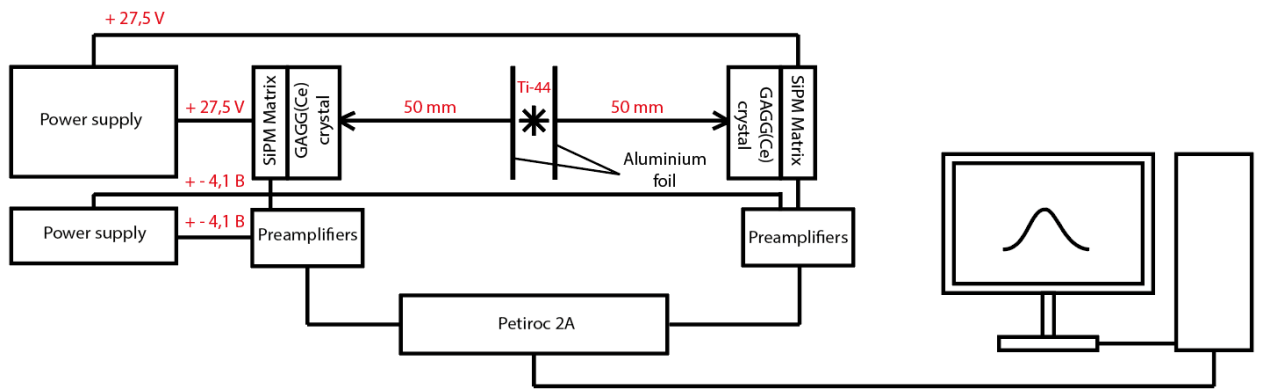


Рисунок 39 – Принципиальная схема установки для измерения временного разрешения

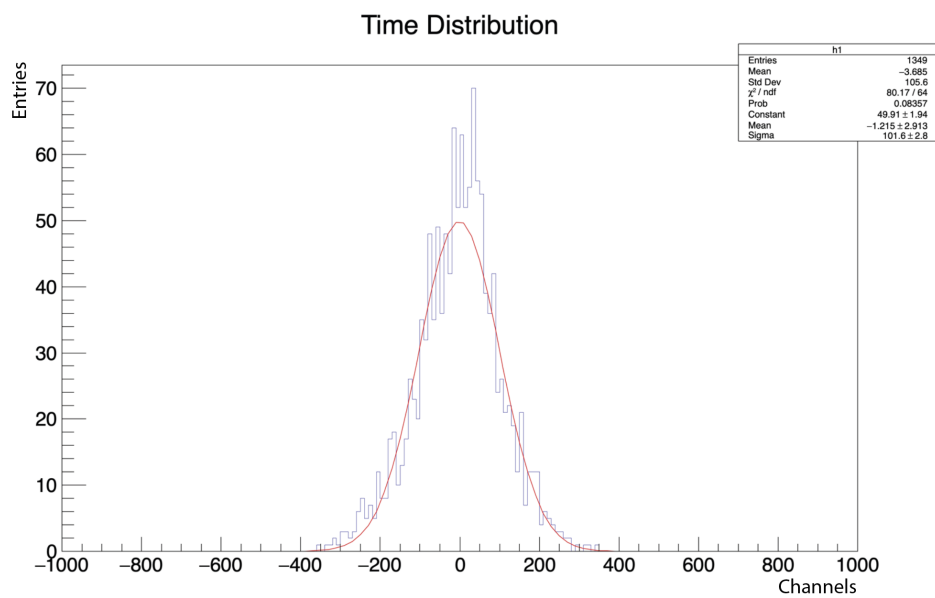


Рисунок 40 – Распределение разности усредненных времен

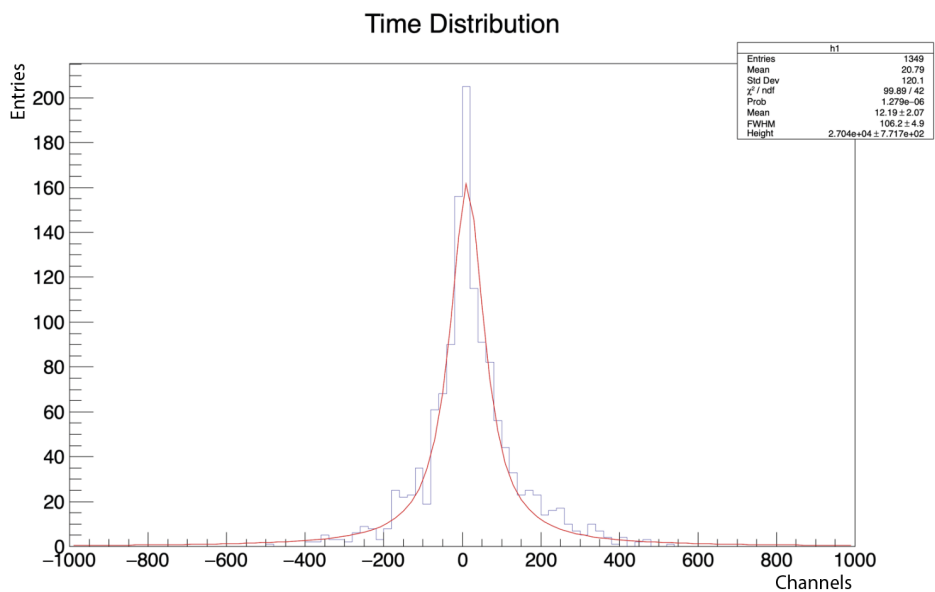


Рисунок 41 – Распределение разности времен первых срабатываний

Глава 8

Оценка загрузки детектора

При работе с позиционного-чувствительными детекторами в рамках ПЭТ томографии и в других областях применения важно оценивать загрузку и учитывать сопутствующие большим нагрузкам нежелательные эффекты, такие как наложение импульсов и т.д. При наложении импульсов величина суммарного напряжения превышает допустимые амплитудные ограничения, рассчитанные на одиночные сигналы, вследствие чего могут возникнуть перегрузки и, в результате, некорректное считывание сигнала или его потеря [18]. Поэтому перед работой с детектором необходимо проводить расчет вероятности возникновения наложений и в случае их наличия применять различные схемные решения для предупреждения данного явления.

Максимально допустимой активностью источников излучения, используемых в ПЭТ томографии для крыс, является 5,2 МБк, для мышей - 0,3 МБк [19]. При средней активности используемого источника в 1 МБк загрузка детектора на основе сцинтилляционной пластины 5x5 см составляет 0,1 МГц. Для оценки числа наложений импульсов на примере матрицы SiPM SensL SPMArray4 и сцинтилляционного кристалла GAGG 14x12x8 мм получены осциллограммы для одиночного и суммарного каналов. Принципиальная схема установки, которая использовалась для снятия осциллограмм представлена на рисунке 42. На рисунке 43а приведена осциллограмма снятая с одного из каналов матрицы, амплитуда сигнала – 110 мВ. На рисунке 43б – с суммарного канала матрицы, амплитуда сигнала – 580 мВ. Развертка осциллографа - 100 нс.

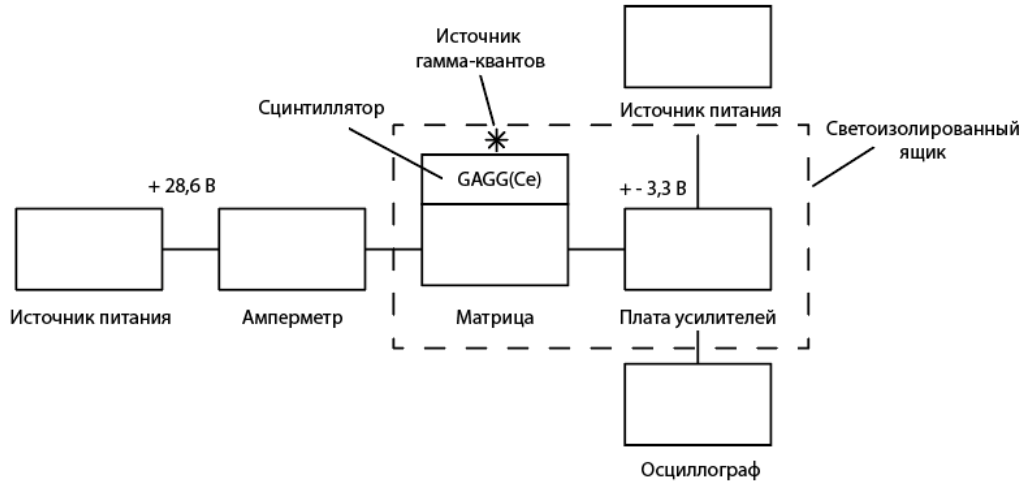
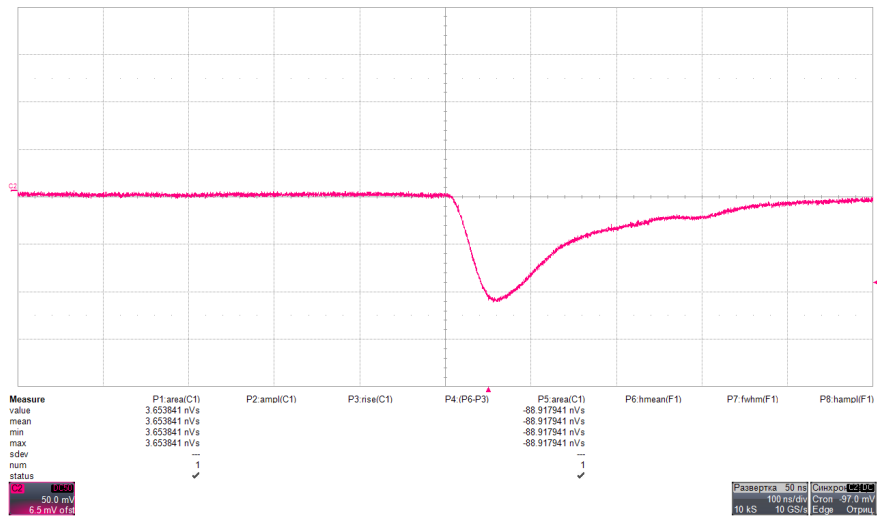
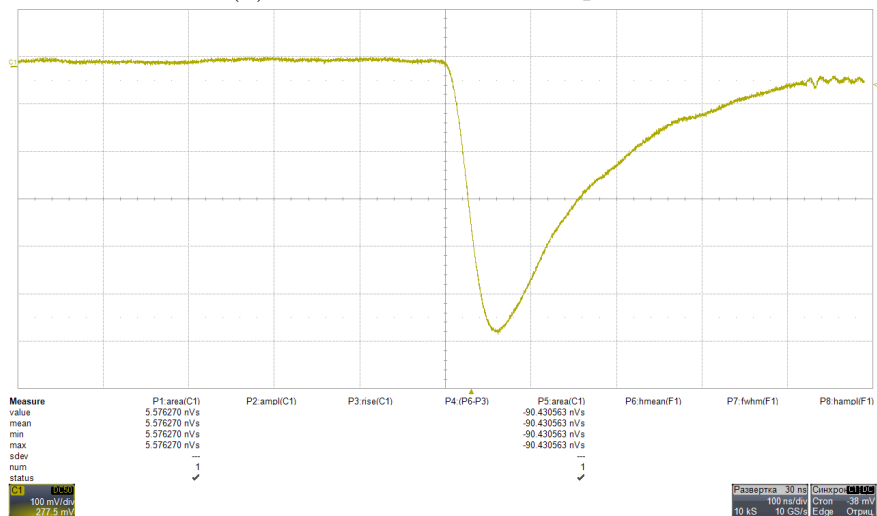


Рисунок 42 – Схема установки



(а) Один из каналов матрицы



(б) Суммарный канал матрицы

Рисунок 43 – Осциллограммы сигнала с одного из каналов матрицы и суммарного канала матрицы

Вероятность возникновения наложений импульсов рассчитана следующим образом:

$$\eta \cong n_0 t, \quad (8.1)$$

где n_0 - интенсивность источника, t - длительность импульсов [18].

Рассчитанная величина составила 4 %. Полученное значение демонстрирует, что при использовании детектора на основе матрицы SiPM SensL SPMArray4 и сцинтилляционного кристалла GAGG 15x12x10 мм при предполагаемой загрузке детектора в 0,1 МГц и длительности сигналов в 400 нс с вероятностью 4 % будут наблюдаться наложения импульсов. Из данного результата следует вывод о том, что при работе с данным детектором при увеличении активности применяемого источника излучения, например, до 10 МБк или 100 МБк, вероятности наложений будут составлять 40 % и 400 % соответственно. Однако снизить загрузки детектора при высокой активности используемого источника излучения можно путем разработки алгоритма кластеризации для локализации вспышки, произошедшей в кристалле 5x5 см, тем самым уменьшив площадь засветки матрицы. При уменьшении площади засветки до 2x2 см и использовании источника активностью 10 МБк вероятность наложений составит % 4. Путем модернизации электроники для записи данных только от сработавших SiPM в матрице и введения кластеризации в процесс обработки полученных результатов появится возможность работы с детектором на основе матрицы SiPM SensL SPMArray4 и при использовании источников активностью в 10 МБк и выше.

Заключение

В данной научной работе проводилось изучение характеристик позиционно-чувствительных детекторов на основе монокристаллических сцинтилляционных кристаллов GAGG и матриц кремниевых фотоэлектронных умножителей.

Разработан алгоритм, позволяющий определять напряжения пробоя и коэффициенты усиления ячеек матриц. Кроме того, данный метод помогает обеспечить однородный отклик со всех каналов матрицы и является методом контроля стабильности детектора. Работа алгоритма проверялась на примере матрицы Hamamatsu S13361-3050AE-08.

Получены различные характеристики (напряжения пробоя, коэффициенты усиления, энергетические разрешения и т.д.) для трех различных матриц SiPM (SensL SPMArray4, Onsemi ARRAYJ-30035-16P, Hamamatsu S13361-3050AE-08). Относительное энергетическое разрешение детектора на основе матрицы Onsemi ARRAYJ-30035-16P составило 9 % (662 кэВ) и 11 % (511 кэВ). Также проведены временные измерения и оценка временного разрешения двумя различными способами: по времени первых сработавших SiPM матрицы и по среднему времени срабатывания всех SiPM матрицы. Временное разрешение составило 4 нс и 8 нс для каждого из случаев соответственно.

Разработан алгоритм для восстановления координаты XY-взаимодействия. Работоспособность программы показана на примере многопиксельного сцинтилляционного кристалла LYSO. Для монокристаллического сцинтилляционного кристалла GAGG удовлетворительный результат получить не удалось ввиду наличия источника равномерной засветки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Расчеты пространственного разрешения элемента позитронно-эмиссионного томографа на основе сцинтилляционной пластины с использованием нейронных сетей / М. В. Белов [и др.] // Краткие сообщения по физике ФИАН. — 2022. — № 8. — С. 20–26.
2. Позитронно эмиссионный томограф (ПЭТ/КТ или ПЭТ/МРТ). — URL: <https://medpribor.pro/pt/pet-ct/> (дата обр. 30.06.2023).
3. Small animal PET scanner based on monolithic LYSO crystals: Performance evaluation / F. Sánchez [et al.] // Medical Physics. — 2012. — Vol. 39, no. 2. — P. 643–653.
4. Сцинтилляционный детектор. — URL: <https://studfile.net/preview/4421061/> (дата обр. 01.03.2024).
5. *Веневцев И. Д.* Температурно-зависимые сцинтилляционные процессы в многокомпонентных алюмогранатах, легированных церием. — СПбПУ, 2021. — 18 с.
6. Кремниевый фотоэлектронный умножитель. Новые возможности / С. Клемин [и др.] // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2007. — № 8. — С. 80–86.
7. Кремниевые фотоумножители. — URL: <https://azimp.ru/articles/tech/100/> (дата обр. 10.05.2024).
8. *Дворников О. В., Чеховский В. А., Дятлов В. Л.* Средства регистрации импульсного видимого излучения малой интенсивности. Часть 2. Предварительная обработка сигналов кремниевых фотоэлектронных

- умножителей. Обзор. // Приборы и методы измерений. — 2013. — С. 5—13.
9. *Воронин А.* Головные каскады считывающей электроники кремниевых детекторов: входной усилитель и шейпер // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. — 2021. — № 1. — С. 138—158.
 10. Weeroc Read-Out Chip Catalog-6345 – Petiroc-2A Datasheet.
 11. Weeroc Read-Out Chip Catalog-6345 – Citiroc-1A Datasheet.
 12. UM7945 – FERS-5200 A5202/DT5202 User Manual.
 13. UM7946 – Janus User Manual.
 14. *Иванов И.* Методика оценки и сравнения кремниевых фотоумножителей // Фотоника. — 2015. — № 6. — С. 70—79.
 15. Performance evaluation of GAGG(Ce)/LFS scintillator MPPC array readout with ASIC / D. Nobashi [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2021. — Vol. 986. — P. 164811.
 16. *Peterson T. E., Furenlid L. R.* SPECT detectors: the Anger Camera and beyond // Physics in Medicine & Biology. — 2011. — Vol. 56, no. 17. — R145.
 17. Evaluation of GAGG:Ce scintillators for future space applications / M. Yoneyama [et al.] // Journal of Instrumentation. — 2018. — Vol. 13. — P02023–P02023.
 18. *Цитович А. П.* Ядерная электроника. — М. : Энергоатомиздат, 1984. — 408 с.
 19. *Hume S., Gunn R., T. J.* Pharmacological constraints associated with positron emission tomographic scanning of small laboratory animals // European Journal of Nuclear Medicine. — 1998. — Vol. 25. — P. 173–176.