

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

УДК 539.1

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

**УСТАНОВКА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ
КРЕМНИЕВЫХ ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ И
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ КРИСТАЛЛОВ**

Научный руководитель
старший преподаватель
старший научный сотрудник
НИЦ «Курчатовский институт»

_____ И. Н. Мачулин

Студент

_____ А. Д. Конотоп

Консультант

_____ Ф. А. Дубинин

Москва 2023

Оглавление

Введение	3
1 Сцинтилляционные детекторы	3
1.1 Сцинтилляционные материалы	3
1.2 Фотоумножители	4
2 Описание установки	5
2.1 Аппаратура CAEN	6
2.2 Контроль температуры	7
3 Экспериментальная часть	9
3.1 Исследование температурных зависимостей	9
3.2 Исследование детекторов ПЭТ	10
3.3 Получение одноэлектронного спектра	12
4 Пути улучшения	13
5 Заключение	14
Список используемых источников	15

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сцинтилляционные детекторы позволяют решать огромный спектр задач. Одним из наиболее удачных решений являются установки на базе кремниевых фотоумножителей (SiPM). Благодаря своим малым габаритам и более высокой чувствительности они получили своё распространение не только как аналог ФЭУ, но и в других приборах, в которых требуется детектирование очень слабых сигналов.

В связи с этим появляется необходимость исследовать различные параметры кремниевых фотоумножителей и сцинтилляторов, а также их сборок. В качестве решения была разработана установка, которая позволяет оценивать широкий спектр параметров: шумовые характеристики, коэффициент усиления и температурную стабильность SiPM, снимать одноэлектронные спектры, изучать энергетическое и временное разрешение, световых выход, а также температурную стабильность различных сцинтилляторов.

1. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ ДЕТЕКТОРЫ

Одним из элементов большинства установок по изучению частиц являются детекторы. Существует огромный спектр подобных приборов, разработанных под определённые задачи: искровые камеры для изучения треков частиц, счётчик Гейгера для подсчёта количества частиц, масс-спектрографы для изучения концентрационного состава веществ.

Для регистрации частиц и γ -квантов активно применяются сцинтилляционные детекторы. Они представляют собой сборку из сцинтилляционного материала, излучающего свет при прохождении через него частиц, и фотоумножителя, реагирующего на световой сигнал, усиливая его.

1.1. СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Сцинтилляционные вещества, как было сказано, реагируют на проходящие через него потоки частиц, излучая некоторое количество фотонов, обычно пропорциональное энергии пролетающей частицы. Благодаря данному эффекту появляется возможность получать энергетические спектры. Существует большое количество сцинтилляционных материалов: пластиковые сцинтилляторы, характеризующиеся высоким световых выходом и малым временем высвечивания, газовые сцинтилляторы из азота и благородных газов, имеющие ещё более короткое время высвечивания. Особое место занимают неорганические сцинтилляционные кристаллы, для которых характерен высокий световых выход и отличное энергетическое разрешение, что позволяет говорить о энергетических характеристиках исследуемых частиц

и, соответственно, высокоточно разделять их по энергиям. В таблице 1 приведены интересующие нас характеристики некоторых сцинтилляционных материалов.

Таблица 1 — Характеристики сцинтилляторов [1] *среднее значение

Сцинтиллятор	плотность $\frac{g}{cm^2}$	Время высвечивания, нс	Световыход, $\frac{ph}{MeV}$
Полистирол	1.05	5	0.1
GAGG(Ce)	6.63	87(90%)255(10%)	56*

1.2. ФОТОУМНОЖИТЕЛИ

Вышедших из сцинтиллятора фотонов достаточно мало для прямой обработки аппаратурой. Для устранения этого недостатка применяются особые фотоприёмники, содержащие в своей конструкции умножители попадающих на них фотонов. Одним из подобных устройств являются фотоэлектронные умножители, представленный на рисунке 1.

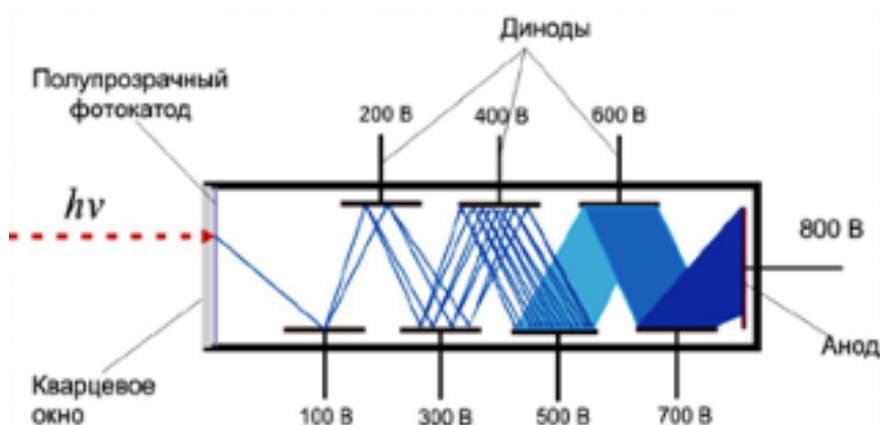


Рисунок 1 — Схема ФЭУ

Фотон проходит через кварцевое окно и, преодолевая полупрозрачный фотокатод, падает на динод, выбивая несколько фотоэлектронов, которые летят к следующему диноду и далее, пока волна фотоэлектронов в сотни тысяч раз большая, чем один фотон, не достигнет анода. Такие фотоприёмники, являются достаточно громоздкими, требуют сложных в изготовлении источников питания, а также являются достаточно хрупкими, из-за чего требуют в эксплуатации особой осторожности.

Современным решением в области детектирования слабых излучений являются кремниевые фотоумножители (SiPM), представленные ниже на рисунке 2.

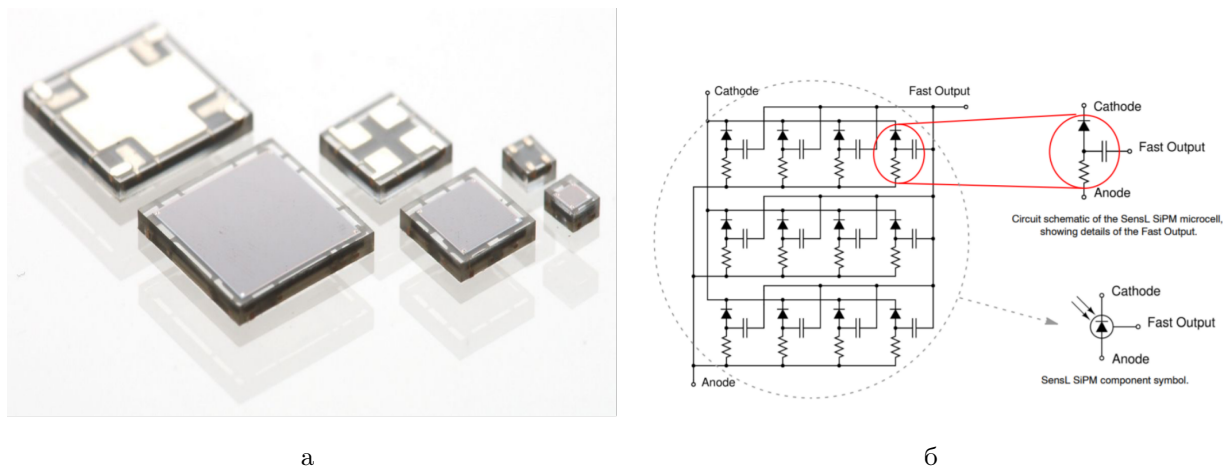


Рисунок 2 — Кремниевый фотоумножитель от компании SensL (а) и принципиальная схема кремниевого фотоумножителя (б)

Данный фотоприёмник представляет из себя матрицу полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД, SPAD), работающих в гейгеровском режиме. Пример принципиальной схемы Si-ФЭУ представлено на рисунке 2, у разных производителей схемы могут отличаться. В схеме резистивный элемент нужен для пассивного гашения лавины. За счёт своих малых габаритов и высокого коэффициента усиления (порядка 10^6) SiPM не только приходит на замену ФЭУ во многих задачах, но и выходит за пределы применимости этого типа фотоприёмников и используется для детектирования различных слабых сигналов. [2]

2. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

В связи с активным применением сборок из кремниевых фотоумножителей и сцинтилляторов появляется необходимость изучать их различные характеристики. В качестве решения была разработана установка, которая позволяет оценивать обширный набор параметров: шумовые характеристики, коэффициент усиления и температурную стабильность SiPM, снимать одноэлектронные спектры, изучать энергетическое и временное разрешение, световой выход, а также температурную стабильность различных сцинтилляторов.

На рисунке 3 представлена блок-схема установки. В подготовленный чёрный ящик помещается исследуемая сборка из сцинтиллятора и кремниевого фотоумножителя. Питание осуществляется внешним лабораторным источником питания, а в качестве источника сигнала может быть использован как изотоп, так и светодиод. Сигнал с SiPM передаётся в электронный

тракт на основе аппаратуры CAEN [3]. Данное оборудование создано специально для работы с различными кремниевыми фотоумножителями и является наиболее удобным и компактным из существующих решений. Так, сигнал с SiPM передаётся на усилитель, а затем раздваивается и направляется на дискриминатор, формирующий временные ворота, и анализатор импульсов, который также получает данные с дискриминатора. Такая сборка позволяет собирать как дифференциальные, так и интегральные спектры, а с прямым подключением к ЭВМ отображать их в реальном времени в прилагаемом ПО. Контроль температуры осуществляется при помощи термодатчика AM2302 на базе микроконтроллера Arduino nano, данные с которого также передаются на ЭВМ. При помощи сторонних пакетов программ производится анализ полученных данных.

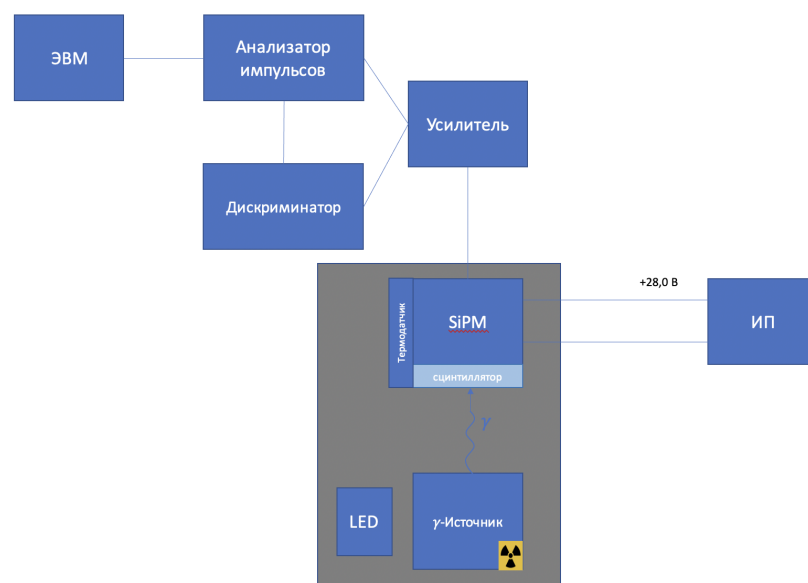


Рисунок 3 — Принципиальная схема установки

2.1. АППАРАТУРА CAEN

УСИЛИТЕЛЬ SP5600

SP5600 — это блок питания и усиления общего назначения, объединяющий до двух SiPM в материнскую и дочернюю архитектуру, что позволяет легко устанавливать и заменять датчики. Базовая конфигурация имеет два канала с независимой регулировкой усиления до 50 дБ и подает напряжение смещения (до 100 В) на датчики со стабилизацией усиления. Каждый канал может обеспечивать цифровой выходной сигнал, генерируемый быстрыми дискриминаторами переднего фронта. Также возможно совпадение по времени двух каналов. [3]

АНАЛИЗАТОР ИМПУЛЬСОВ DT5720A

DT5720A — это 2-канальный 12-битный настольный анализатор импульсов формы волны 250 MC/s с несимметричным входным динамическим сигналом $2 V_{pp}$ на коаксиальных разъемах MCX. Регулировка смещения постоянного тока (диапазон $\pm 1\text{ В}$) с помощью программируемых 16-битных ЦАП (по одному на каждый канал) позволяет правильно выбирать биполярный ($V_{in} = \pm 1\text{ В}$) вплоть до полного положительного ($V_{in} = 0 \div +2\text{ В}$) или отрицательного ($V_{in} = 0 \div -2\text{ В}$) качание аналогового входа без потери динамического разрешения.

Модуль оснащен тактовым входом на передней панели и PLL для синтеза тактового сигнала от внутренних/внешних опорных сигналов. Поток данных непрерывно записывается в кольцевой буфер памяти. Когда возникает срабатывание, FPGA записывает дополнительные N выборки для пост-срабатывания и замораживает буфер, который может быть прочитан через USB или оптический канал. Сбор данных может продолжаться без мертвого времени в новом буфере. [3]

2.2. КОНТРОЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ

ARDUINO NANO

Arduino (рисунок 4) представляет собой простейший микроконтроллер, построенный на восьмибитном микропроцессоре ATmega-328P с тактовой частотой 16МГц. За счёт своей простоты, малых размеров и дешевизны данные контроллеры позволяют применять его для простых и некоторых сложных задач. Например, Arduino можно применить в качестве контроллера мониторинга, а на самом деле и регулирования, микроклимата. [4]



Рисунок 4 — Arduino nano

Благодаря гибкости архитектуры данные с контроллера можно транслировать на ЭВМ через 232 интерфейс (COM), сохраняя и обрабатывая при помощи специально разработанного программного обеспечения.

ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ И ВЛАЖНОСТИ AM2302

В качестве датчика температуры был использован AM2302 на рисунке 5, зарекомендовавший себя в других различных приборах на протяжении многих лет. Несмотря на отсутствие аккредитации в госреестре измерительных приборов из-за своей дешевизны, модуль является достаточно точным: после прогрева в течение 40–60 минут все приборы, принадлежащие одной партии не только показывают одинаковые параметры температуры и влажности, но и одинаково реагируют на отклонения в микроклимате с погрешностью в несколько раз меньшей, чем заявлено производителем. [5]



Рисунок 5 — Датчик AM2302

ПРОГРАМНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для получения и обработки выходных данных с датчика было разработано специальное программное обеспечение. получая сигнал с СОМ-порта, последовательность данных расшифровывается, проверяется соответствие, пересчитывается контрольная сумма и проверенные расшифрованные данные сораниются в отдельный файл, пригодный для обработки в сторонем программном обеспечении.

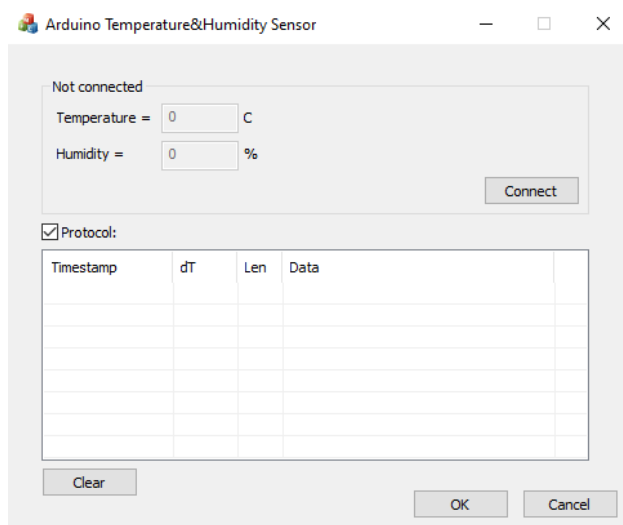


Рисунок 6 — Интерфейс разработанного программного обеспечения

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

3.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Для начало необходимо было проверить, как влияет изменение температуры на результаты набора спектров. Для этого на сборке SiPM + сцинтиллятор при помощи нашей установки были собраны два набора данных: спектр ^{137}Cs без нагрева и с нагревом. Все наборы сопровождались контролем мониторингом температуры. Полученные спектры отображены в виде гистограмм на рисунке 7, а данные по изменению температуры на рисунке 8.

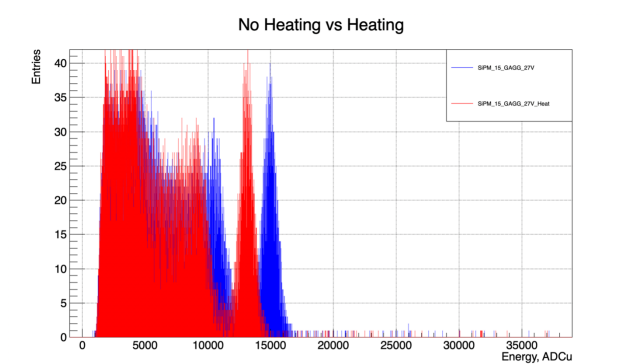
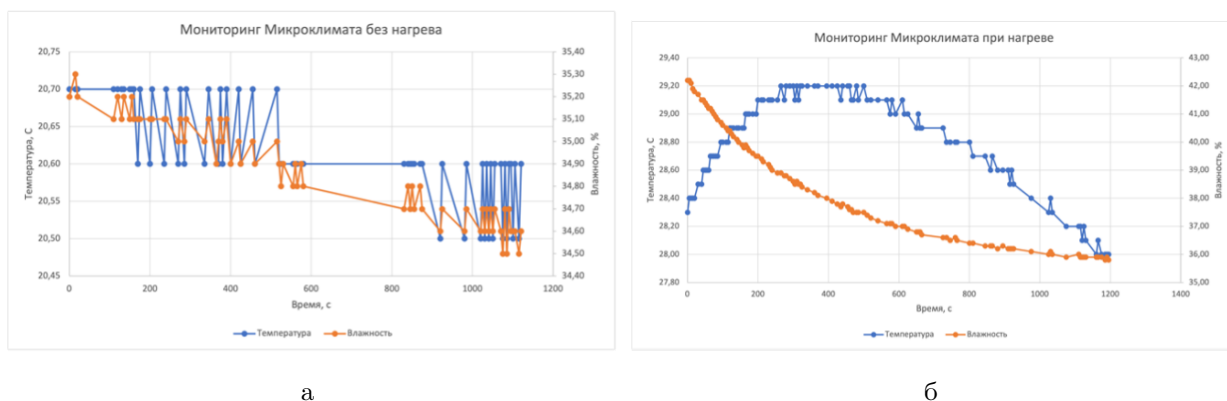


Рисунок 7 — Спектры ^{137}Cs при нагреве (красный) и без нагрева (синий)



а

б

Рисунок 8 — Мониторинг температуры в ходе сборов данных без нагрева (а) и с нагревом (б)

Как видно из результатов эксперимента, положение пика энергии при нагреве смещается в меньшую сторону, что совпадает с теоретическими представлениями. Это связано со световой чувствительностью кремниевого умножителя: при увеличении температуры SiPM пик цветовой чувствительности смещается в сторону большей длины волны и, как следствие, меньшей энергии. [2]

3.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕТЕКТОРОВ ПЭТ

В настоящее время в Курчатовском институте разрабатывается макет 32-канального позитронно-эмиссионного томографа на основе детекторных сборок из кремниевого фотоумножителя 3x3 мм от компании SensL и сцинтилляционного кристалла GAGG(Ce) 3x3x15 мм. [6]

В ходе изучения некоторых его характеристик было выявлено характерное отклонение некоторых каналов от среднего значения по двум из них: энергетического разрешения и амплитуды энергии, что отражено на рисунке 9.

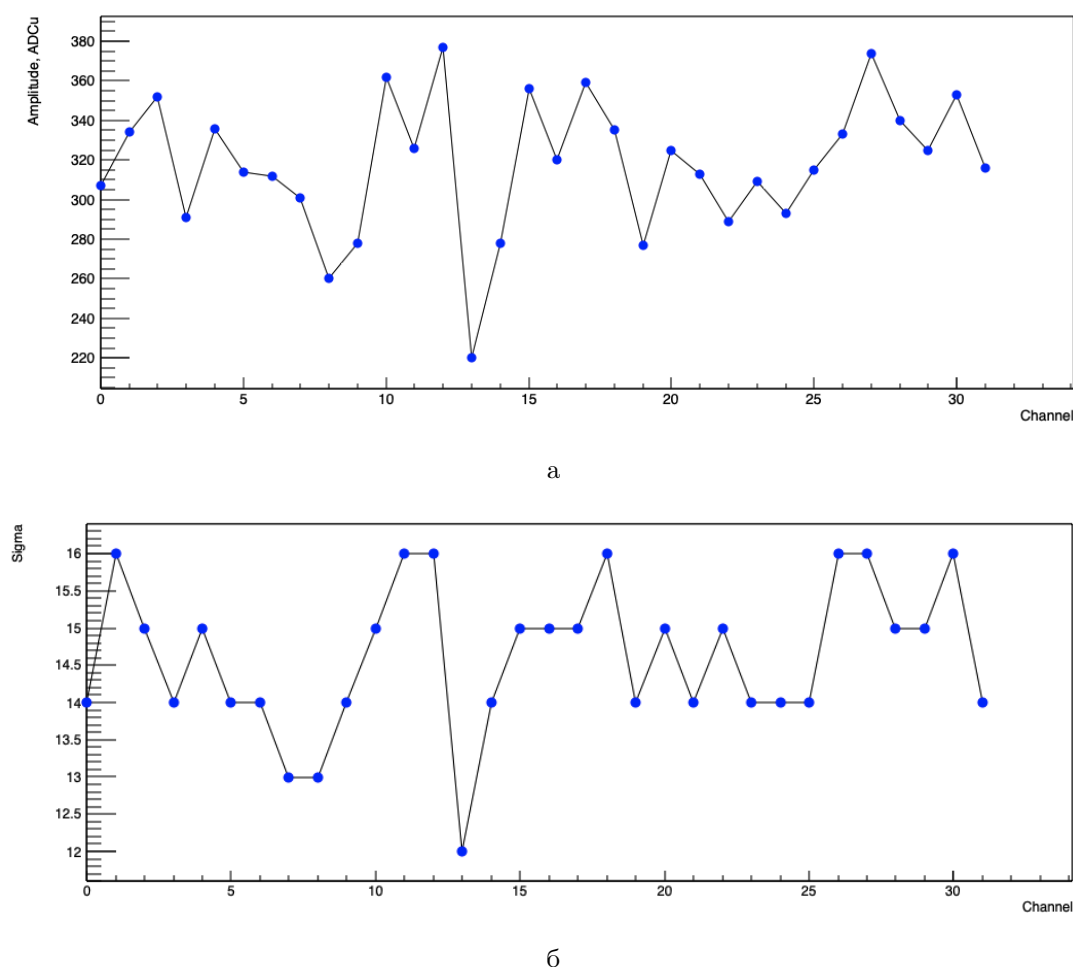


Рисунок 9 — Зависимость амплитуды (а) и энергетического разрешения (б) от номера канала

Как было сказано ранее, созданная установка позволяет изучать различные сборки из кремниевых фотоумножителей и сцинтилляционных материалов. В связи с чем было принято решение провести испытания соответствующих детекторов на собранном оборудовании.

Чтобы выяснить, какая из частей детектора вносит отклонения, необходимо организовать проверку каждой из них: кремниевый фотоумножитель или сцинтилляционный кристалл. Для этого были сняты две серии измерений на одном SiPM для разных сцинтилляторов и наоборот.

Для начала под контролем температуры, чтобы при необходимости внести поправки, а также оценить возможные отклонения и разбросы данных, на выбранном кристалле за одинаковое время были сняты спектры цезия-137 (^{137}Cs), один из которых отображён на рисунке 10.

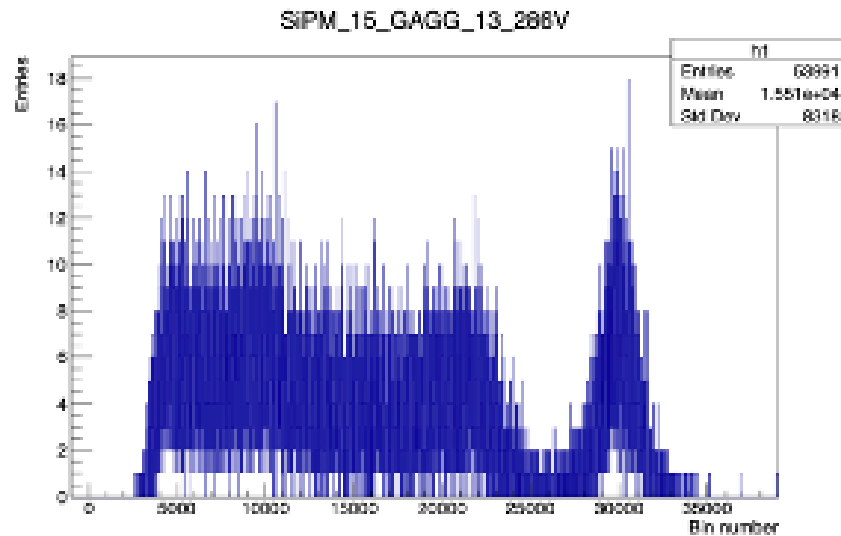


Рисунок 10 — Спектр ^{137}Cs

Полученные данные были обработаны и аппроксимированы гауссом методом Хи-квадрат. Отсюда были получены значения положения пиков и энергетических разрешений, по которым были построены соответствующие зависимости параметров от номера SiPM (рисунок 11).

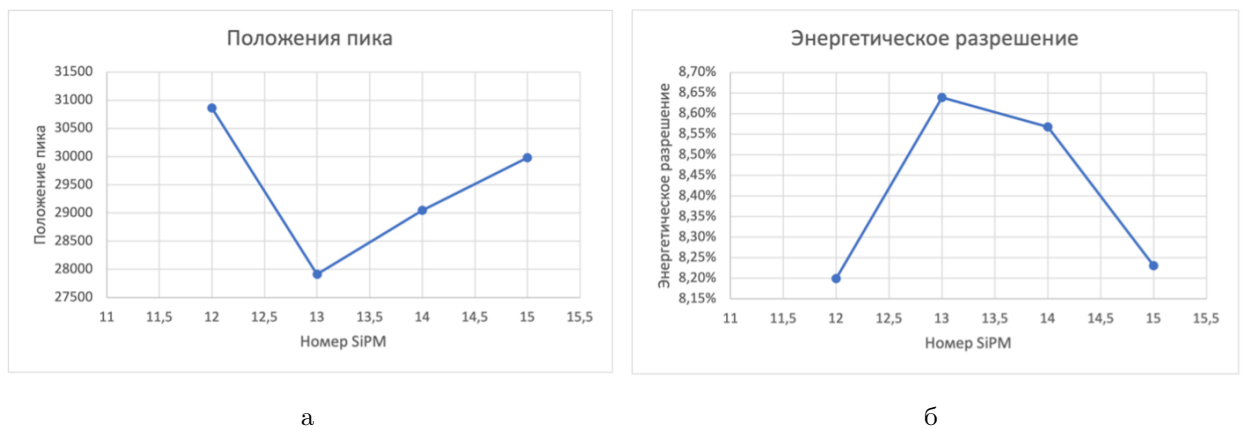


Рисунок 11 — Зависимость положения пика (а) и энергетического разрешения (б) детектора в зависимости от SiPM

Как и ожидалось система находилась при одинаковой температуре, что отражено на рисунке 12, флуктуации температуры в начале измерений могут быть связаны с незначительными отклонениями из-за недостаточного прогрева аппаратуры или допустимой погрешностью измерений.

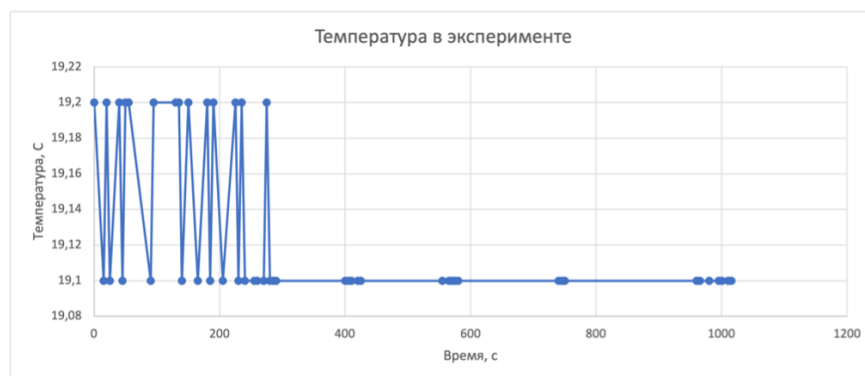


Рисунок 12 — Зависимость температуры в установке от времени в ходе эксперимента

Аналогично для выбранного кремниевого фотоумножителя и разных сцинтилляционных кристаллов были сняты аналогичные зависимости, аппроксимированы, а полученные данные положений пика и энергетических разрешений отражены на графиках, представленных на рисунке 13.

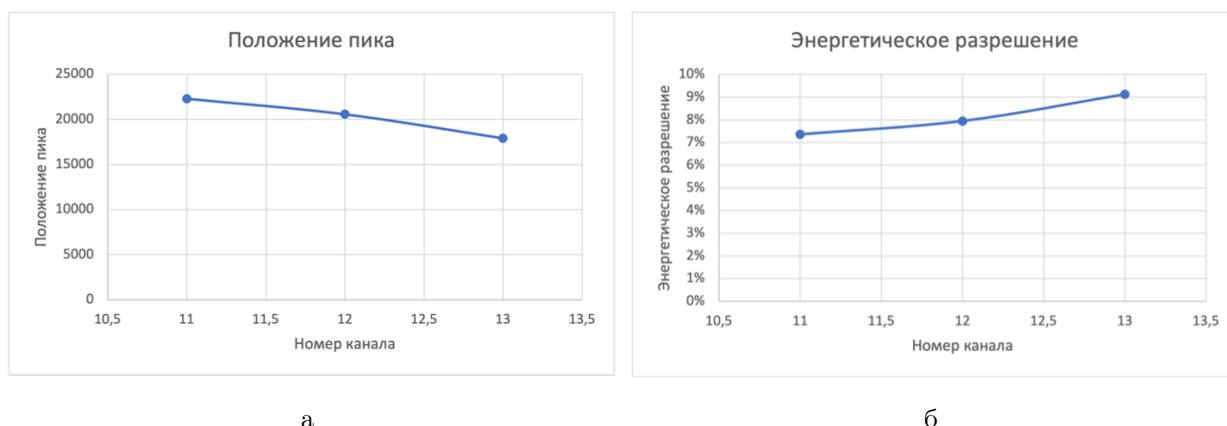


Рисунок 13 — Зависимость положения пика (а) и энергетического разрешения (б) детектора в зависимости от SiPM

3.3. ПОЛУЧЕНИЕ ОДНОЭЛЕКТРОННОГО СПЕКТРА

Как было описано ранее, конструкция позволяет использовать в качестве источника сигнала не только радиоактивные источники, но и светодиод для получения одноэлектронного спектра, изображённого на рисунке 14.

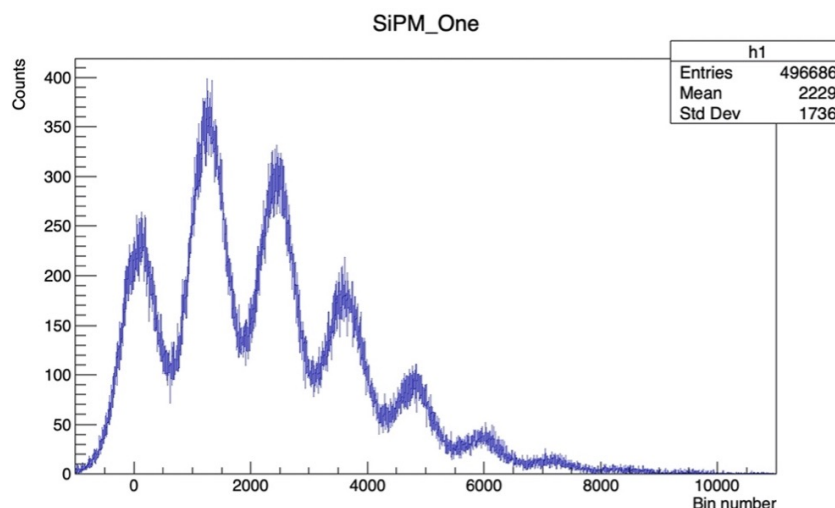


Рисунок 14 — Одноэлектронный спектр

Первый пик отвечает нулю системы (так называемый пьедестал), остальные пики – сработавшие ячейки. С его помощью можно откалибровать шкалу каналов АЦП и в дальнейшем при помощи спектра эталонного сцинтиллятора с известным световыходам получать относительный световыход других сцинтилляторов.

4. ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ

Установка, хотя уже и является целостной рабочей конструкцией, может быть модифицирована.

Для более точных измерений необходимо подготовить каретковую основу для исследуемых сцинтилляционных кристаллов, кремниевых фотоумножителей и источника. В этом случае получится добиться более точного позиционирования исследуемых компонентов, что, несомненно, улучшит результаты наборов данных, так как в нынешнем исполнении оно производится «на глаз».

Чтобы расширить функционал установки, например для определения временных разрешений системы, необходимо добавить ещё один слот для второго фотоумножителя, который и позволит проводить соответствующие измерения в системе.

В ходе проведения испытаний на температурную зависимость была выявлена невозможность долго поддерживать температуру нагрева, а также полное отсутствие возможности охлаждать исследуемую систему. Для решения данной проблемы необходимо разработать и установить систему регулирования микроклимата внутри установки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам работы было создано полноценное рабочее устройство, позволяющее выполнять ряд задач по тестированию сцинтилляционных кристаллов и кремниевых фотоумножителей. Установка была проверена в реальных рабочих задачах, в ходе которых подтвердилась её функциональность, выявлены замечания и недостатки, требующие исправлений и доработок. Под нужды обработки данных были разработаны необходимые макросы для математических пакетов, а также программное обеспечение для сбора, обработки и сохранения данных с датчика температуры в виде МФС-приложения на ОС Windows. Ожидаемые результаты в целом достигнуты, а также поставлены новые задачи по доработке и улучшению установки.

Список используемых источников

- [1] А. Korneev, *Универсальная модель световыхода пластмассовых и жидких органических сцинтилляторов для электронов и тяжёлых заряженных частиц*, Факультет экспериментальной и теоретической физики НИЯУ МИФИ (2007) 40.
- [2] Y. Akimov, *Фотонные методы регистрации излучений*, ОИЯИ, Дубна (2014).
- [3] CAEN, *SP5600AN Educational Kit - Premium Version Guide*, CAEN Educational, Italy (2016).
- [4] A. Inc., *Arduino nano Datasheet*, Italy (2023).
- [5] Aosong, *Temperature and humidity module AM2302 Product Manual*, Aosong(Guangzhou) Electronics Co.,Ltd., Guangzhou, China (2015).
- [6] А. Konotop, *Характеристики 32-канального макета ПЭТ на основе сцинтиллятора gadg в сочетании с sipm*, NRNU MEPhI (2022) 7.