

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

Институт Ядерной Физики и Технологий
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

ОТЧЁТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
**СИСТЕМА ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ
ФОТОУМНОЖИТЕЛЕЙ ДЕТЕКТОРА ВВС
УСТАНОВКИ SPD NICA**

Научный руководитель,
старший преподаватель

Ф. А. Дубинин

Студент

К. В. Кривохин

Москва, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	3
1	Эксперимент SPD BBC	4
1.1	Beam-Beam Counter	4
1.2	Кремниевый фотоумножитель	5
1.3	CAEN FERS	6
1.4	Цель работы и постановка задачи	7
2	Представление результатов	8
2.1	LED-драйвер: разработка	8
2.2	Установка	10
2.3	LED-драйвер: выходящий сигнал	11
2.4	Частота генератора	11
2.5	Спектры с SiPM	12
2.6	Напряжение пробоя	13
	Заключение	16
	Список литературы	17

ВВЕДЕНИЕ

NICA (Nuclotron based Ion Collider fAcility) – ускорительный комплекс, создаваемый в Объединенном институте ядерных исследований. Назначение комплекса – изучение спиновой структуры протона и дейтрона, а также плотной барионной материи.

В одной из двух точек столкновения пучков будет построен детектор SPD (Spin Physics Detector). Современные представления связывают спин нуклона (протона или нейтрона) с коллективным вкладом от кварков и глюонов. Хотя кварковая составляющая была измерена с высокой точностью в таких экспериментах, как HERMES и COMPASS, данные о роли глюонов остаются неопределенными. Основная задача проекта SPD – изучить спиновую структуру протона и нейтрона (нуклонов) и точно измерить вклад глюонной компоненты в их спин.

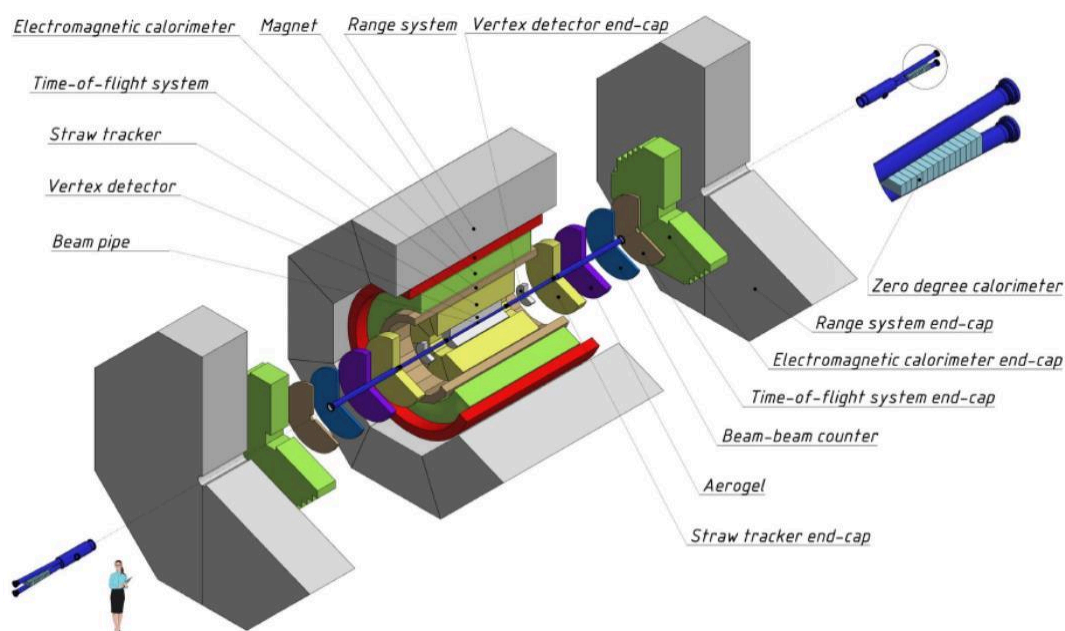


Рис.1 – Установка SPD

Работу планируется вести в два основных этапа: Первая фаза (продолжительностью 2 года) будет посвящена отладке систем, сбору первых данных и изучению как процессов с поляризованными, так и неполяризованными частицами, включая упругое рассеяние. Вторая, основная фаза (ориентировочно с 2030 года), сосредоточится на комплексном исследовании поляризованных глюонов в протонах и дейтронах. [1]

1.1 Beam-Beam Counter

Для контроля поляризации пучков и измерения светимости в эксперименте SPD будет использоваться специальная система мониторинга на основе сцинтилляционных детекторов – Beam-Beam Counter (BBC). Детектор имеет кольцевую секторную структуру. Кольцо формируется из 16 секторов, каждый из которых состоит из 26 отдельных модулей (тайлов).

Каждый тайл представляет собой трапецевидную пластину из сцинтилляционного материала (polystyrene Styrolution 124N – 98.0-98.5%, p-Terphenyl (CAS 92-94-4) – 1.5-2.0%, POPOP (CAS 1806-34-4) – 0.01-0.04%). Для лучшего сбора возникающего в сцинтилляторе светового сигнала поверхности тайлов покрыты белым светоотражающим составом.

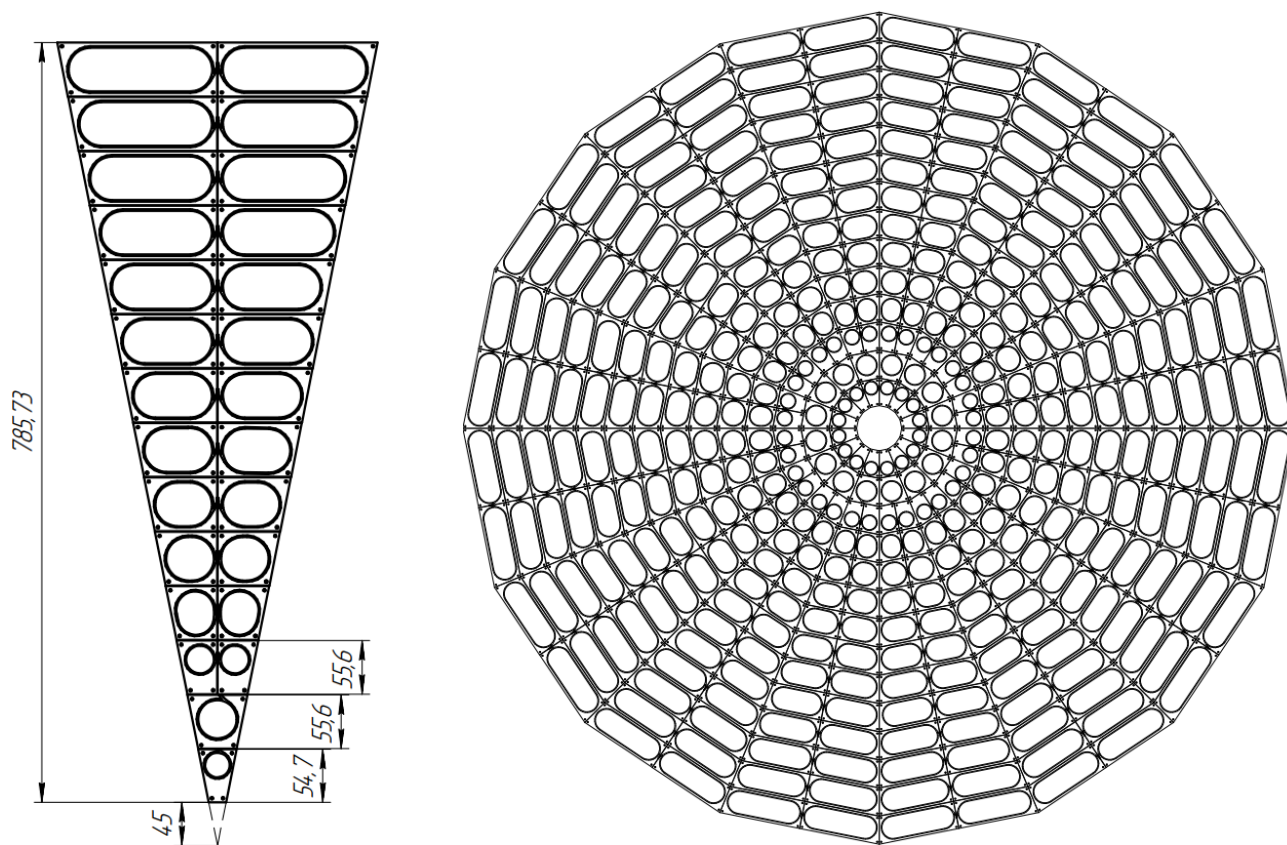


Рис.2 – Beam-Beam Counter

Световой импульс от сцинтиллятора передается на плату с кремниевыми фотоумножителями через спектросмещающее волокно (WLS). Оно необходимо для эффективного сбора и передачи светового сигнала от пластикового сцинтиллятора к кремниевому фотоумножителю (SiPM). Оно преобразует ультрафиолетовое и синее

свечение сцинтиллятора в зелёный свет, который меньше поглощается материалом и может передаваться на расстояние с минимальными потерями. Внутри каждого тайла это волокно уложено в виде нескольких витков для увеличения эффективности сбора света. [2]

1.2 Кремниевый фотоумножитель

Кремниевый фотоумножитель (Silicon photomultiplier, SiPM) представляет собой матрицу из большого количества ячеек, соединенных параллельно на общей подложке. Каждая ячейка – это лавинный фотодиод, работающий в режиме ограниченного лавинного разряда (Geiger mode).

Энергия попавших на ячейку SiPM фотонов передается атомам кремния, в результате чего рождается электрон-дырочная пара, и под действием электрического поля рожденные электроны и дырки ускоряются и набирают достаточную энергию, чтобы ионизировать атомы кристалла при столкновении, создавая вторичные пары. Этот процесс нарастает лавинообразно, порождая в ячейке кратковременный ток.

Всплеск тока вызывает падение напряжения на токоограничивающем резисторе, что позволяет остановить разряд и подготовить ячейку к регистрации следующих фотонов. Амплитуда просадки напряжения пропорциональна количеству поглощенных фотонов. [3]

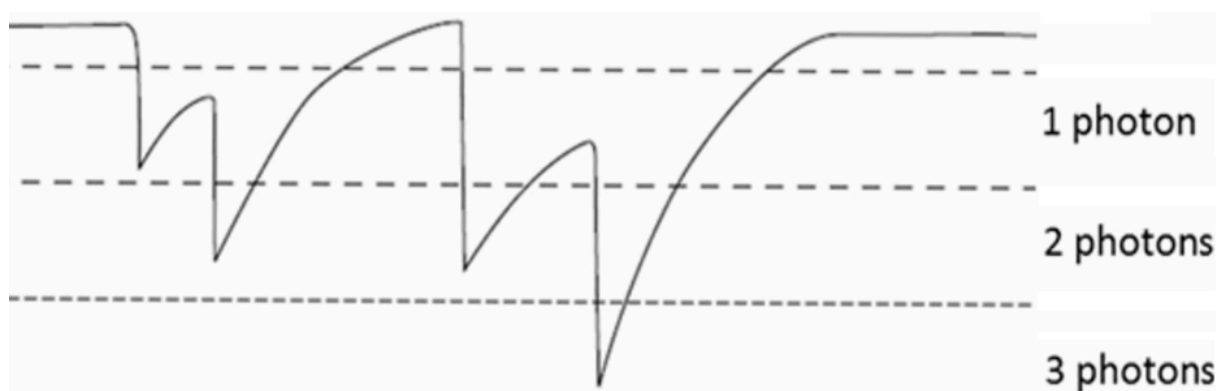


Рис.3 – Просадки напряжения на SiPM

В системе ВВС будут использоваться платы с 8 или 12 независимыми фотоумножителями. К каждому SiPM будет подведено оптоволокно с одного из тайлов.

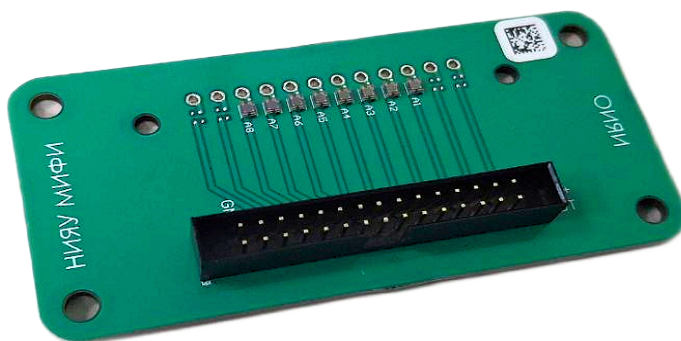


Рис.4 – Печатная плата с 8 SiPM

1.3 CAEN FERS

Для обработки сигналов с кремниевых фотоумножителей в эксперименте SPD будет использоваться CAEN FERS-5200. Ключевой элемент FERS-5200 – плата A5202 на базе Citiros-1A, с поддержкой 64 независимых каналов. Каждый канал оснащён предусилителем, дискриминатором и детектором максимума сигнала. Плата также включает АЦП, источники питания для SiPM и интерфейсы (USB, Ethernet, TLink).

Один модуль FERS можно использовать как автономно, так и в составе древовидной сети для считывания больших массивов детекторов с возможностью подключения до 8192 каналов. Это критически важно для финальной установки BBC SPD, которая будет состоять из множества каналов. [4]

Система поддерживает несколько режимов сбора данных, что делает её гибким инструментом для R&D:

- Спектроскопический режим (PHA): Измерение амплитуды.
- Временной режим (Timing): Измерение времени прихода (ToA) и времени над порогом (ToT).
- Гибридный режим (Hybrid): Одновременное получение амплитудной и временной информации.

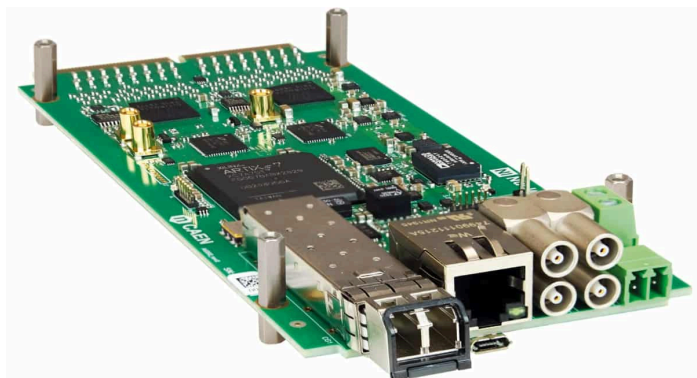


Рис.5 – CAEN FERS-5200

1.4 Цель и задачи

Цель работы – проверка работоспособности печатных плат с SiPM для эксперимента SPD: получение однофотозлектронных спектров с каждого кристалла SiPM и нахождение их напряжения пробоя.

Задачи:

1. создать подходящий LED-драйвер
2. разработать установку для тестирования плат с SiPM
3. получить спектр с каждого кристалла SiPM
4. найти напряжение пробоя для каждого SiPM
5. разработать программу для автоматизации процесса тестирования плат

Требования к LED-драйверу: Возможность генерировать импульсы напряжения с амплитудой 3 - 5V и длительностью порядка нескольких наносекунд; возможность точной настройки для повторяемости получаемых результатов.

Требования к установке: Жёсткая конструкция, позволяющая надёжно фиксировать тестируемую плату и светодиод напротив неё на заданном расстоянии.

Требования к программе: Визуализация обработки полученных спектров для выявления ошибок, которые может вызвать неправильная настройка оборудования.

2 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

2.1 LED-драйвер: разработка

Для получения однофотонных спектров было необходимо создать прибор, способный создавать сверхкороткие импульсы света (подавая на светодиод короткие импульсы напряжения). Нужный импульс напряжения можно получить из квадратного сигнала любой частоты, если разделить его на 2 части, замедлить одну из частей, и потом подать обе части на логический вентиль “исключающее ИЛИ”, или “XOR”. Для этого использована микросхема 74AC86 с 4 независимыми вентилями XOR на ней. 3 из них используются для задержки части сигнала генератора, а один для их преобразования в выходной сигнал.

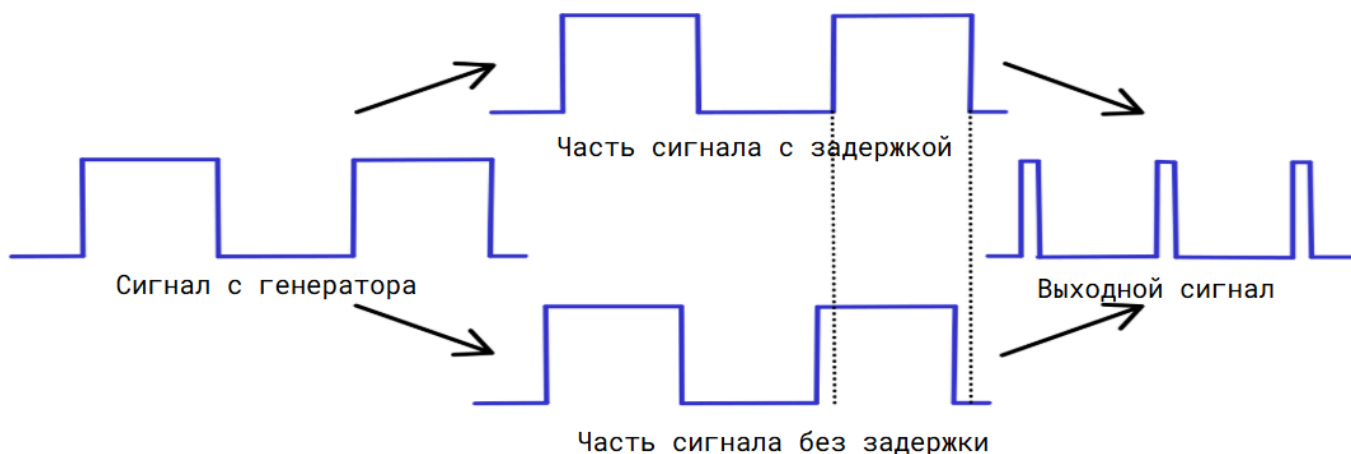


Рис.6 – Принцип формирования сигнала

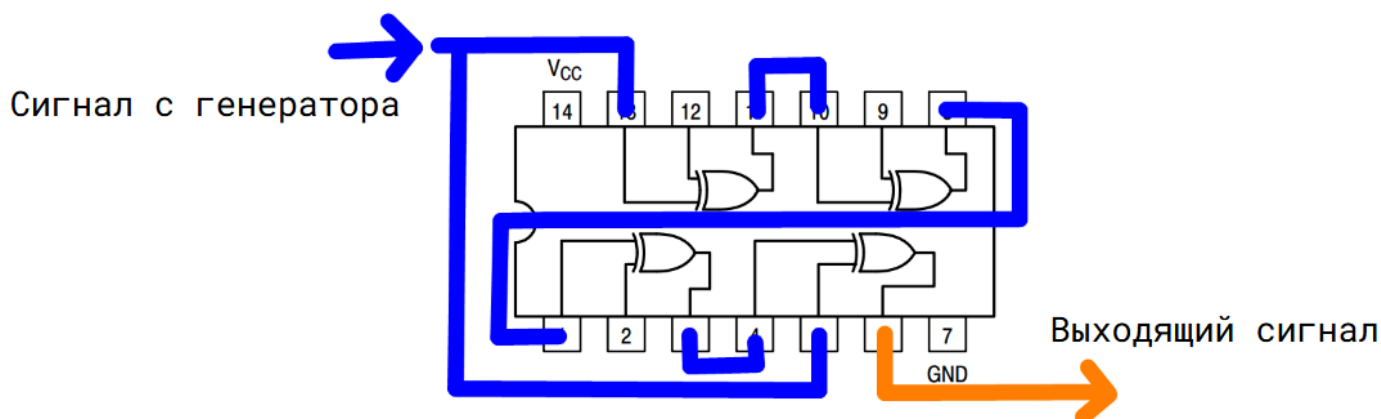


Рис.7 – Подключение микросхемы 74AC86

После тестирования прототипа была разведена печатная плата с более широким функционалом: добавлен переменный резистор для настройки яркости светодиода, а также переключатели, позволяющие изменять задержку. В качестве генератора был использован микроконтроллер ATmega328 (Arduino Nano), умеющий создавать квадратный сигнал с частотой до 150 кГц и напряжением 5V.

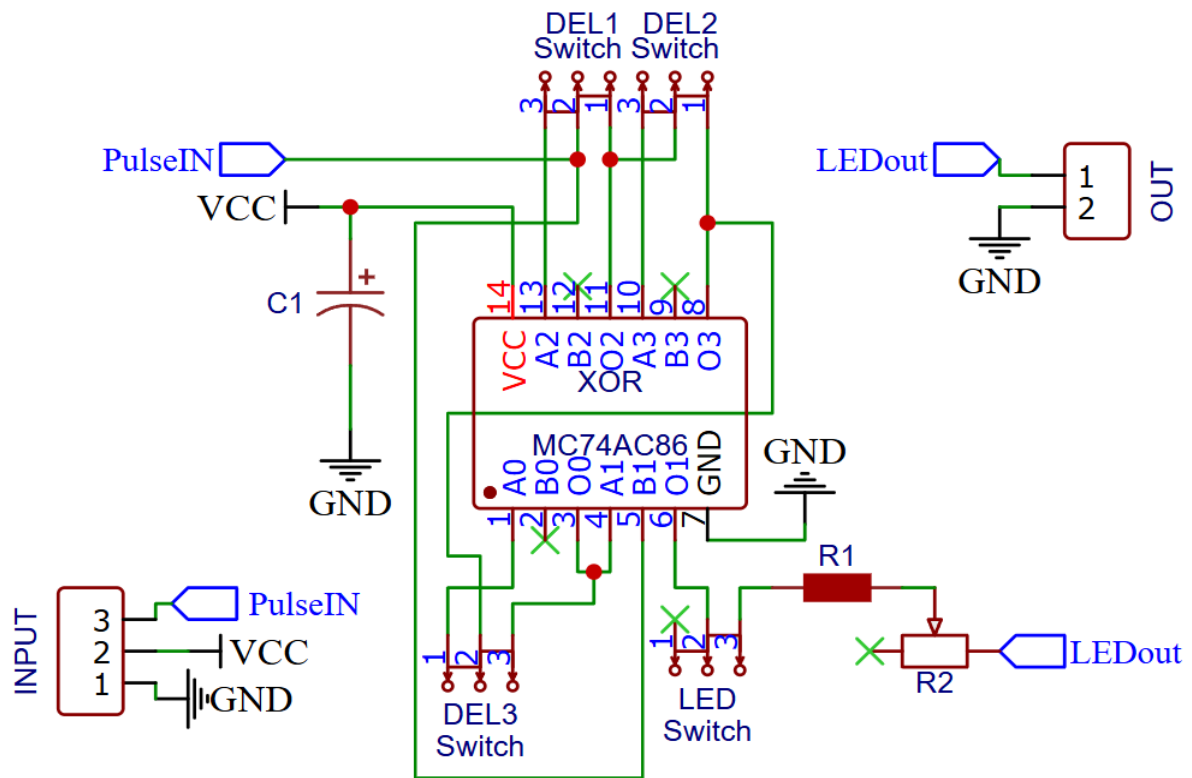


Рис.8 – Схема разводки печатной платы

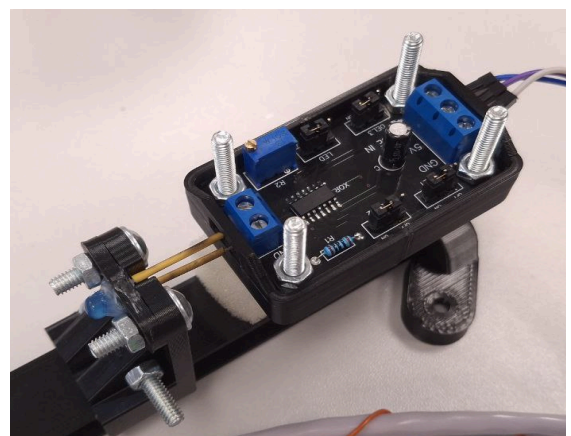
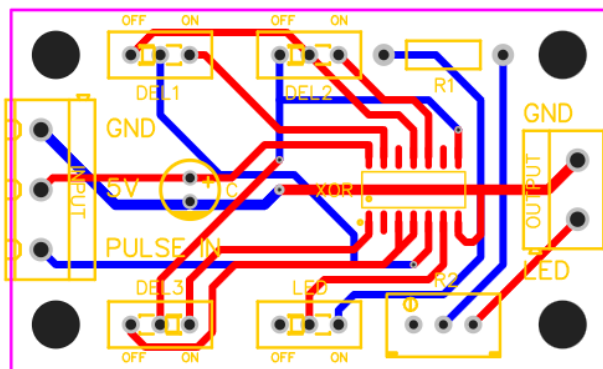


Рис.9 – Печатная плата драйвера

2.2 Установка

Была разработана и изготовлена рама для крепления платы с SiPM, а также держатель светодиода. Конструкция позволяет изменять расстояние между ним и SiPM. Максимальное расстояние - 24 см. Материал рамы - пластик PET-G.

Во время тестов рама с SiPM и драйвером помещается внутрь тёмного контейнера, защищающего SiPM от внешнего света.

Генератор прямоугольных сигналов запитывается от 5V DC (белый провод на фотографии ниже), частота сигнала настраивается программно. Также сигнал с генератора подаётся на FERS в качестве триггера (бело-оранжевый кабель).

CAEN FERS подключается к компьютеру по USB и питается от 12V DC (на фото не показаны).

Для подключения платы к FERS была собрана шина передачи данных (со специфического разъёма IDC2-30F с SiPM на входную гребёнку 2.54мм на FERS).

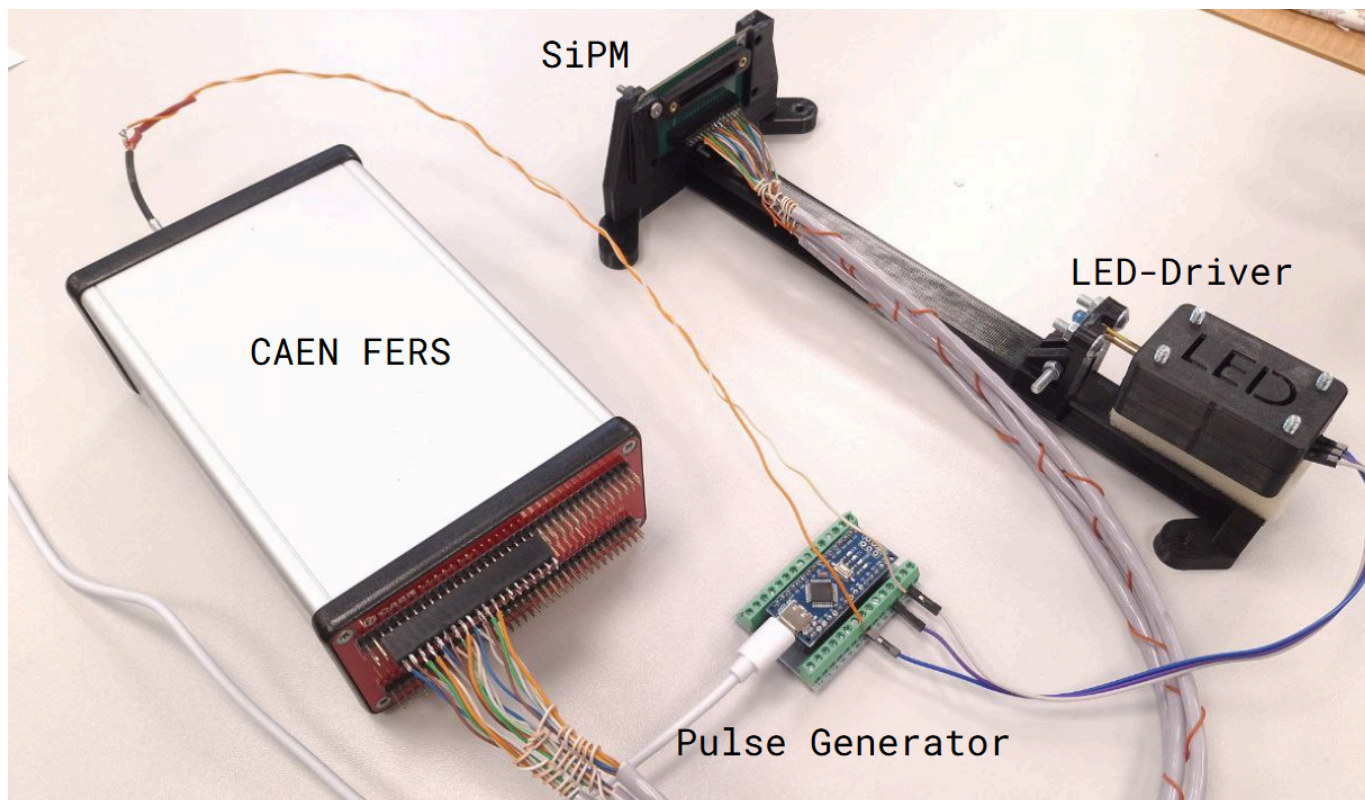


Рис.10 – Установка в сборе

2.3 LED-driver: выходящий сигнал

В отличие от прочих источников света, у светодиодов есть пороговое напряжение, ниже которого они вообще не испускают свет. В установке используется синий светодиод, для которого пороговое напряжение составляет 2.7-2.9 V. Это важно потому, что получить идеальный прямоугольный импульс столь малой длительности довольно сложно: на практике фронт и срез сигнала возрастают и спадают плавно из-за паразитных ёмкостей и индуктивностей в установке.

Ниже представлены импульсы, которые способен генерировать драйвер (установлены пиковые напряжения 4.2V и 3.4V). Полная длительность импульсов на фото составляет около 20нс, но “эффективная” длительность (время, в течение которого напряжение выше порогового) – 5-10 нс. На фотографиях эти интервалы показаны прямоугольниками.



Рис.11 – Сигналы с LED-драйвера

2.4 Частота генератора

Все последующие измерения проводились при частотах генератора порядка 10 кГц. Частота напрямую влияет только на количество вспышек светодиода в секунду, но не на их длительность. Поэтому форма полученных с SiMP спектров от неё не зависит. Линейно зависит от частоты только время их набора.

2.5 Спектры с SiPM

Для тестирования установки и проверки корректности её работы была исследована зависимость вида спектров от яркости светодиода, которая пропорциональна пиковому напряжению сигнала с драйвера. На рисунках ниже показаны спектры с одного из кристаллов SiPM при пиковых напряжениях 3.2V и 2.8V. Каждый пик соответствует числу одновременно зафиксированных фотонов, и видно, что при уменьшении яркости и длительности количество единичных фотонов преобладает.

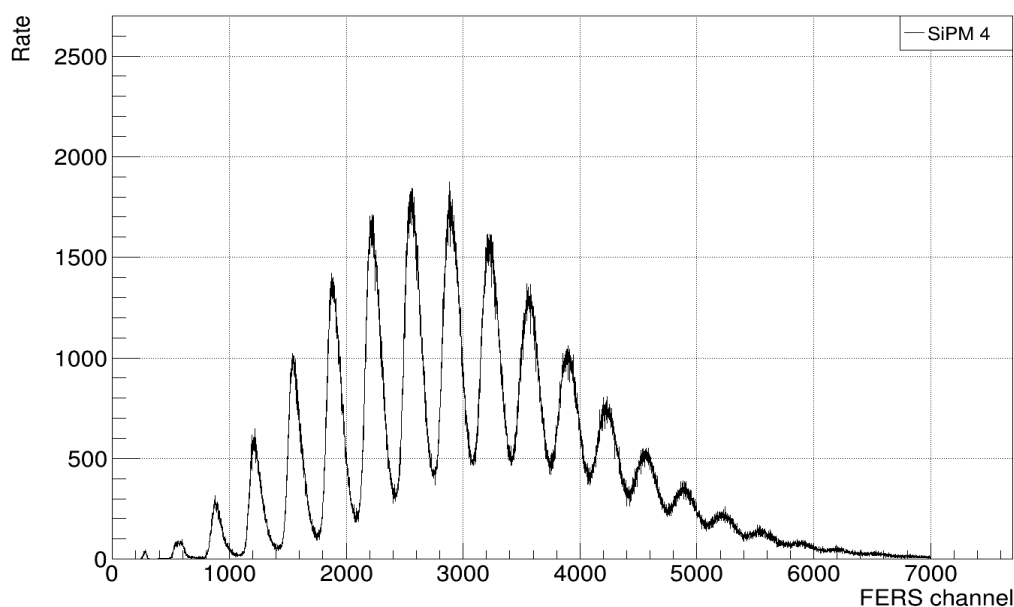


Рис.12 – Спектр при пиковом напряжении 3.2V

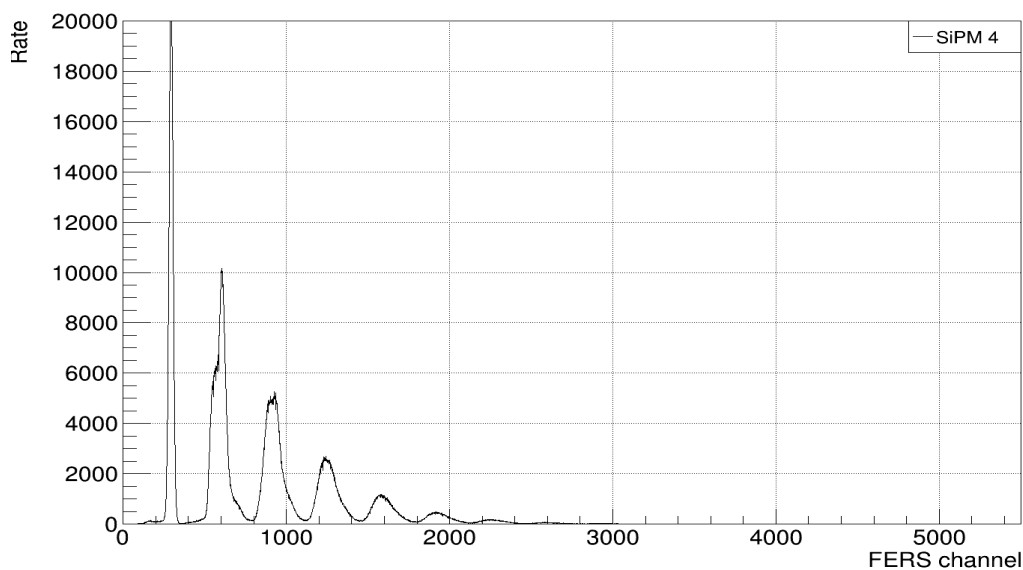


Рис.13 – Спектр при пиковом напряжении 2.8V

Также были сопоставлены спектры всех 12 кристаллов SiPM, распаянных на одной плате. Характеристики всех кристаллов SiPM немного разнятся. Из-за этого и различия пьедесталов и коэффициентов усиления каналов FERS их спектры друг на друга накладываются не идеально.

X12 SiPM, 3.2V, 9.6kHz, 600s, trig

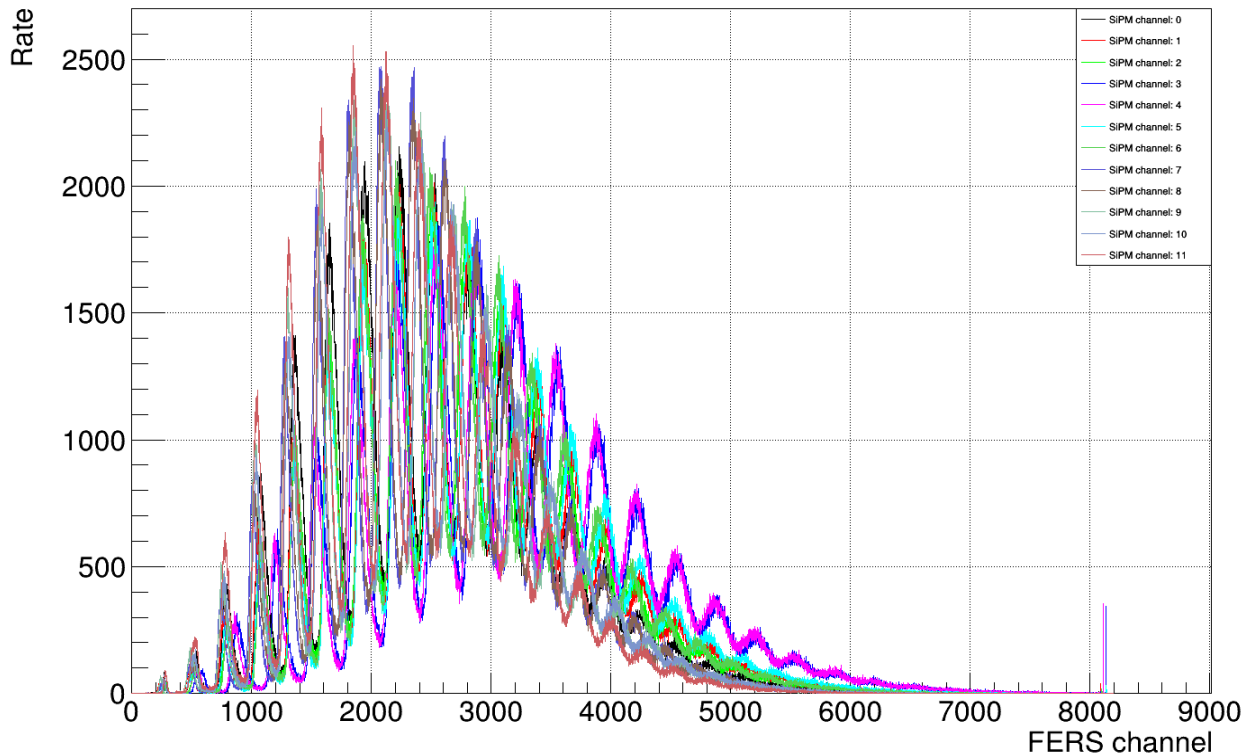


Рис.14 – 12 спектров с SiPM

2.6 Напряжение пробоя

Наиболее важная характеристика SiPM – напряжение пробоя. Это минимальное обратное напряжение на лавинном фотодиоде (APD), при попадании фотона в который может возникнуть лавинный пробой, приводящий к резкому росту тока.

На практике SiPM работают под напряжением, превышающем напряжение пробоя на 2-5V (overvoltage, ΔV). ΔV определяет коэффициент усиления, вероятность срабатывания (Photo-Detection Efficiency, PDE), и время нарастания сигнала.

Напряжение пробоя для каждого кристалла SiPM можно найти следующим образом:

1. Снять спектры при нескольких значениях напряжения на SiPM
2. В каждом спектре найти расстояние между пиками
3. Построить график зависимости напряжения от расстояния и экстраполировать его до пересечения с осью напряжений. Точка пересечения и будет искомым напряжением пробоя.

С каждого кристалла SiPM были сняты спектры при напряжениях на нём в диапазоне от 26 до 29 вольт. Ниже для примера показано нахождение расстояния между пиками и пробойного напряжения для 6-го кристалл. Для анализа спектров использовался класс TSpectrum для CERN ROOT. [5]

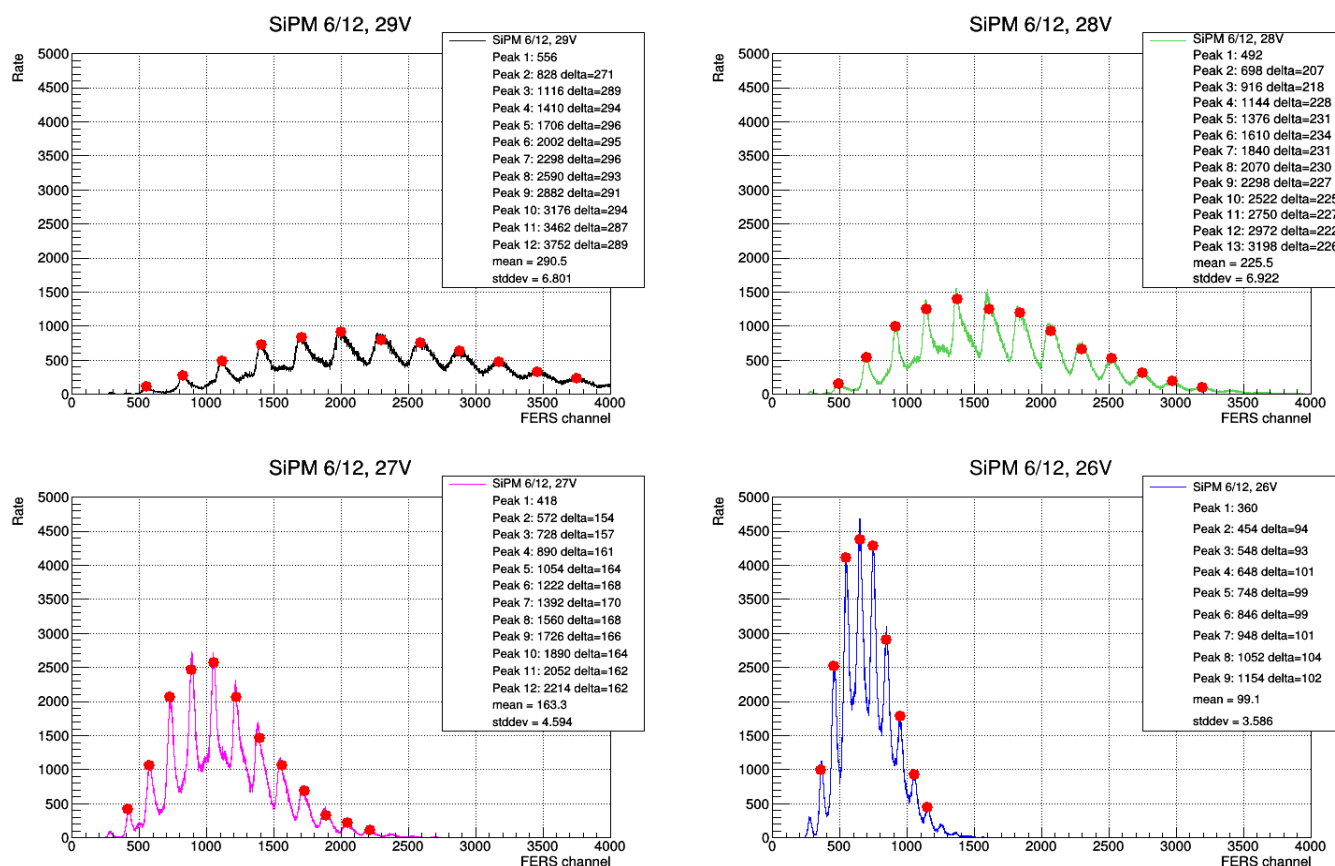


Рис.15 – нахождение расстояний между пиками при разных напряжениях

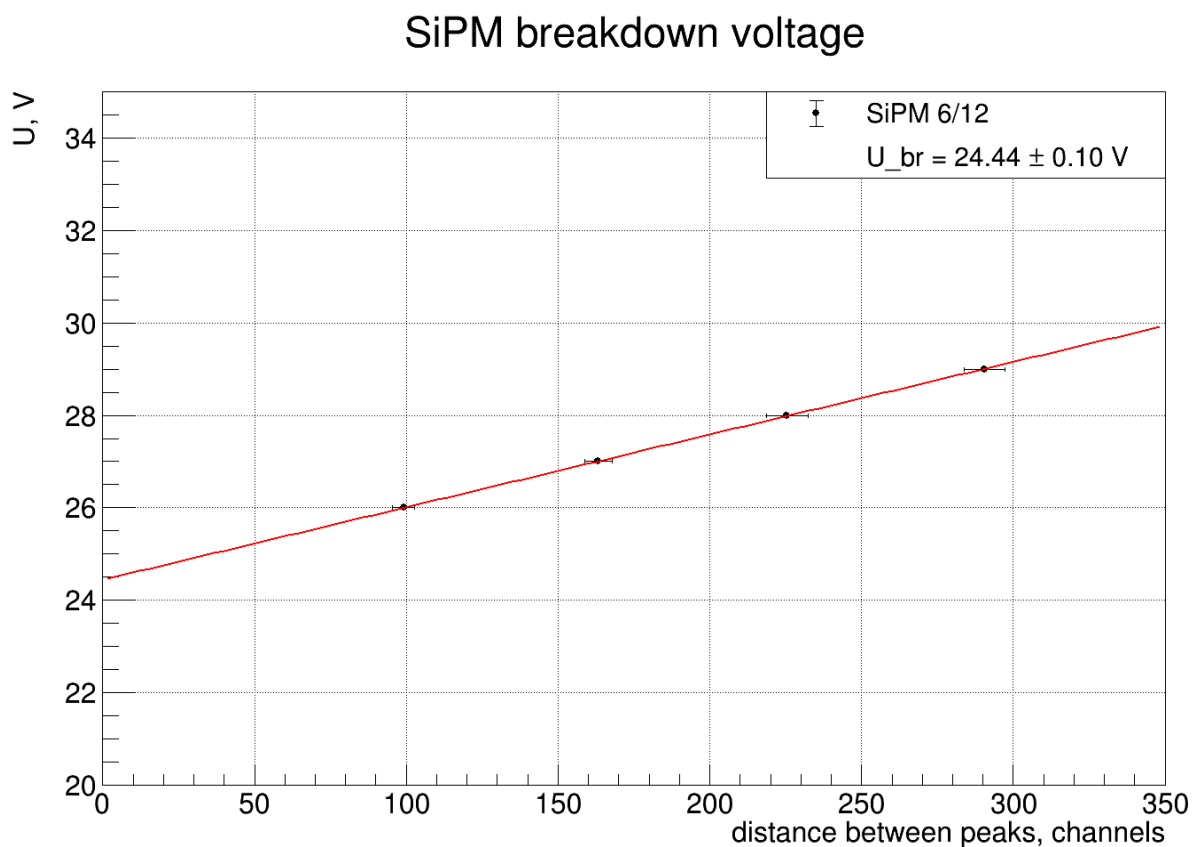


Рис.16 – Нахождение напряжения пробоя для того же SiPM

Этим же способом были найдены U_{br} остальных SiPM с платы. Всего в эксперименте SPD будут использоваться 20 отдельных плат с SiPM. Для каждой из них будет проведено аналогичное тестирование.

Таблица 1. Напряжения пробоя SiPM одной из плат

№ SiPM	1	2	3	4	5	6
U_{br} , V	24.51 ± 0.12	24.44 ± 0.09	24.55 ± 0.11	24.64 ± 0.10	24.62 ± 0.10	24.44 ± 0.10

№ SiPM	7	8	9	10	11	12
U_{br} , V	24.54 ± 0.11	24.62 ± 0.10	24.60 ± 0.08	24.63 ± 0.08	24.60 ± 0.08	24.62 ± 0.08

Таблица 2. Часть спецификации к SiPM [6]

Sensor Size	Microcell Size	Parameter (Note 1)	Overvoltage	Min.	Typ.	Max.	Units
1 mm	10μ, 20μ, 35μ	Breakdown Voltage (Vbr) (Note 3)		24.2		24.7	V
3 mm	20μ, 35μ, 50μ						
6 mm	35μ						

Все найденные напряжения пробоя SiPM попадают в заявленный производителем диапазон. Это говорит как о достаточном качестве самих SiPM, так и о точности разработанного метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы создана система для тестирования кремниевых фотоумножителей (SiPM) печатных плат для детектора BBC. Созданы специализированный LED-драйвер и установка, позволяющие с помощью системы CAEN FERS получать однофотонные спектры. Для предоставленной тестовой платы с 12 SiPM определены напряжения пробоя, необходимые для последующей калибровки детектора. Полученные напряжения соответствуют заявленным производителем. Созданная система и программа для обработки данных протестированы и готовы для массового тестирования SiPM.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *SPD Collaboration*. Spin Physics Detector Project –
<https://spd.jinr.ru/physics-detector/>
2. *Захаров А.М.* ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОТОТИПА
СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО ДЕТЕКТОРА ЛОКАЛЬНОЙ
ПОЛЯРИМЕТРИИ SPD BEAM-BEAM COUNTER –
https://indico.particle.mephi.ru/event/444/contributions/4041/attachments/2399/4479/-_2024.06_-_..pdf
3. *Hamamatsu*. What is MPPC® (SiPM)? –
https://www.hamamatsu.com/us/en/product/optical-sensors/mppc/what_is_mppc.html
4. *CAEN S.p.A.* FERS-5200 System User Manual (UM6867). – 2023.
5. *CERN ROOT*. TSpectrum Class Reference –
<https://root.cern/doc/master/classTSpectrum.html>
6. *ON Semiconductor*. J-Series Silicon Photomultipliers –
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/microc-series-d.pdf>