

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

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

УДК 539.12, 539.1.07

На правах рукописи

ШАФИКОВА ДИНА РАШИДОВНА

**ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТЕКТОРА И
ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОТКЛИК И РАЗРЕШЕНИЕ ПРОТОТИПА
ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD**

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

Научный руководитель,
к.ф.-м.н.

_____ П. Е. Тетерин

Научный консультант

_____ Ф. А. Дубинин

Москва 2026

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**ВЛИЯНИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕТЕКТОРА И
ЭЛЕКТРОНИКИ НА ОТКЛИК И РАЗРЕШЕНИЕ ПРОТОТИПА
ДЕТЕКТОРА ВВС ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА SPD**

Студент _____ Д. Р. Шафикова

Научный руководитель,
к.ф.-м.н. _____ П. Е. Тетерин

Научный консультант _____ Ф. А. Дубинин

Рецензент,
к.ф.-м.н., _____ М. Г. Коротков

Секретарь ГЭК,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Кириллов

Зав. каф. №40,
д.ф.-м.н., проф. _____ М. Д. Скорохватов

Рук. учеб. прог.,
к.ф.-м.н. _____ А. А. Кириллов

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
1 Эксперимент <i>SPD</i>	6
1.1 Описание экспериментальной установки <i>SPD</i>	6
1.2 Счетчик пучков <i>BBC</i>	8
2 Физические основы регистрации света	10
2.1 Регистрация сигнала в пластиковом сцинтилляторе	10
2.2 Спектросмещающее оптоволокно.....	11
2.3 Факторы, влияющие на светосбор	12
3 Методика эксперимента	14
3.1 Кремниевые фотоумножители.....	14
3.2 Система считывания <i>CAEN FERS-5200</i>	17
3.2.1 Калибровка сигналом внутреннего генератора.....	20
3.2.2 Калибровка сигналом внешнего генератора	22
4 Результаты	26
4.1 Измерение светосбора при различном числе витков <i>WLS</i> -волокна.....	26
4.2 Измерение светосбора с помощью мюонного телескопа	30
4.3 Оценка энергетического разрешения.....	34
Заключение	36
Список литературы	37

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена исследованию светового отклика сцинтилляционных пластин детектора *BBC* в зависимости от различных факторов: количества витков спектросмещающего оптоволокну внутри пластины, изменения общей длины волокна и различной геометрии пластин.

Целью работы является определение оптимальных параметров системы, состоящей из сцинтилляционного тайла и спектросмещающего оптоволокну, обеспечивающих лучший светосбор.

Задачи, поставленные для достижения цели:

1. Провести калибровку многоканальной системы считывание *CAEN FERS-5200* с использованием внутреннего и внешнего генераторов. Для используемых в исследовании кремниевых фотоумножителей провести подбор индивидуальных пробойных напряжений.
2. Измерить зависимость средней амплитуды сигнала от числа витков спектросмещающего оптоволокну внутри сцинтилляционной пластины с использованием импульсного светодиода.
3. Измерить амплитудные спектры сигналов от атмосферных мюонов для тайлов различной конфигурации.
4. Проанализировать полученные данные и получить оценку отклика детектора в фотоэлектронах.

Работа состоит из четырех глав. В главе 1 описывается физическая программа эксперимента *SPD*, а также подробная конструкция счетчика пучков *BBC*.

В главе 2 рассматриваются физические основы регистрации света в сцинтилляционных детекторах, а именно механизм возникновения и транспортировки сцинтилляционных фотонов, принцип работы спектросмещающего оптоволокну и факторы, влияющие на световыход.

В главе 3 рассматриваются приборы, используемые в работе. Описывается принцип работы кремниевых фотоумножителей и методика их калибровки. Описывается методики калибровки многоканальной системы считывания *CAEN FERS-5200*.

В главе 4 подробно излагается методика и результаты экспериментальных работ. Первая серия измерений посвящена зависимости световыхода от числа витков волокна и

длины оптического тракта. Вторая серия проведена с использованием мюонного телескопа для тайлов разного ряда и с различной длиной свободного конца оптоволокна.

1 ЭКСПЕРИМЕНТ *SPD*

Эксперимент *SPD* (*Spin Physics Detector*) планируется к проведению на базе ускорительного комплекса *NICA* (ОИЯИ, Дубна). Он предназначен для исследований спиновой структуры нуклона с использованием поляризованных пучков протонов и дейтронов при энергиях столкновений до 27 ГэВ в системе центра масс, частотой взаимодействий до 4 МГц и максимальной светимостью до $10^{32} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ [1].

Целью эксперимента *SPD* является разрешение загадки «спинового кризиса» – противоречия, открытого в 1987 году и определившего, что суммарный вклад спинов кварков не равен спину протона. Ожидается, что оставшаяся часть спина протона будет объяснена спином глюонов.

В *pp*-столкновениях при энергиях $\sqrt{s} = 27$ ГэВ основным процессом образования пары кварк-антикварк $c\bar{c}$, составляющей J/Ψ -мезон ($M = 3,097$ ГэВ), является слияние двух глюонов. В эксперименте *SPD* вклад глюонной части будет определяться через распад:

$$J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad (1.1)$$

По количеству восстановленных J/Ψ из пар мюонов для разных состояний поляризации пучков будут получены импульсные распределения глюонов (глюонные партонные распределения).

Также эта энергия покрывает промежуток между низкоэнергетическими экспериментами до 10 ГэВ (*ANKE* [2], *SATURNE II* [3]) и высокоэнергетическими экспериментами с энергией 14 ТэВ (*LHC* [4]), что позволяет провести проверку теоретических моделей спиновой структуры нуклона в кинематическом диапазоне, недоступном предыдущим экспериментам.

Помимо точного измерения вклада глюонов в спин протона и дейтрон к задачам эксперимента относятся исследование механизмов рождения чармония, а также изучение спин-зависимых эффектов в столкновениях поляризованных *pp*- и *dd*-пучках [1, 5].

1.1 Описание экспериментальной установки *SPD*

Детекторная система *SPD* находится в магнитном поле сверхпроводящего соленоида. Магнитное поле достигает значений до 1 Тл (Рисунок 1.1) [1].

Вершинный детектор (*Vertex detector*) расположен вокруг точки взаимодействия и представляет собой кремниевый пиксельный детектор, обладающий высокой радиационной стойкостью. Основной задачей детектора является точное определение вершины

столкновений. Его пространственное разрешение <100 мкм, что также достаточно и для реконструкции вторичных вершин короткоживущих частиц (например, D -мезонов, процесс рождения которых также происходит через слияние глюонов) [1].

Внутренняя трековая система представляет собой *straw*-детектор, окружающий вершинный детектор в несколько цилиндрических слоев. Разрешение детектора по поперечному импульсу $\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} \approx 1\%$ для частиц с импульсом $p \sim 1$ ГэВ [1].

Времяпролетная система (*Time-of-flight system*) располагается за трековой системой. *TOF*-детектор используется для идентификации заряженных адронов (π , K , p) при помощи измерения скорости частиц по времени пролета. Детектор обладает временным разрешением ~ 60 пс. *TOF*-система эффективно разделяет частицы при импульсах до 5 ГэВ, а для идентификации частиц с большим импульсом используется аэрогелевый Черенковский детектор [1].

Электромагнитный калориметр (*Electromagnetic calorimeter, ECal*) окружает времяпролетную систему и используется для регистрации электромагнитных ливней. К его задачам относятся измерение энергии фотонов и электронов, а также реконструкция энергии нейтральных мезонов ($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$). Калориметр обладает энергетическим разрешением $\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{5\%}{\sqrt{E}}$ [1].

Мюонная система (*Range system*) – внешняя система *SPD*, следующая за калориметром, которая состоит из чередующихся слоев поглотителя (железа) и координатных детекторов. Используется для регистрации распадов $\rightarrow \mu^+ \mu^-$ [1].

Счетчик пучков (*Beam-Beam Counters, BBC*) представляет собой сцинтилляционный детектор и отвечает за локальную поляризацию (измерение степени поляризации пучков), измерение числа столкновений и их центральности, а также мониторинг светимости [1, 6, 7]. Калориметр нулевого угла (*Zero Degree Calorimeters, ZDC*) используется для регистрации частиц под малым углом [1].

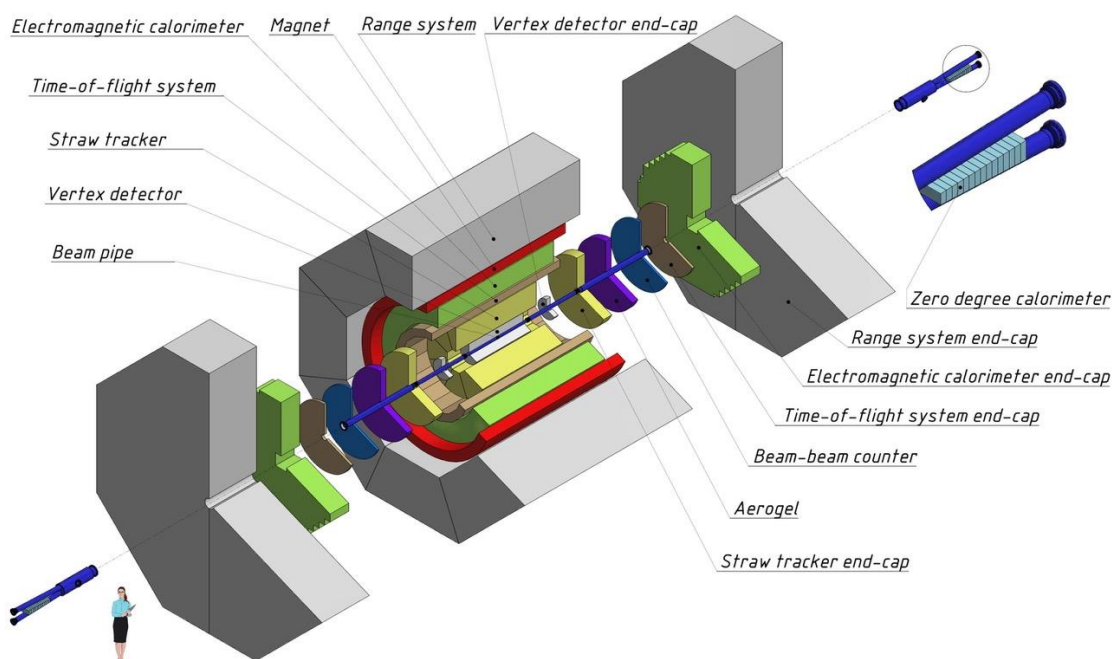


Рисунок 1.1 – Строение детекторной системы *SPD* [1]

1.2 Счетчик пучков *BBC*

Детектор *BBC* состоит из 16 секторов (Рисунок 1.2а), каждый из которых состоит из 26 сцинтилляционных пластин (тайлов). Вместе 16 секторов образуют одно из двух колес (Рисунок 1.2б) [6 – 8]. Один тайл представляет собой пластиковый сцинтиллятор из полистирола трапецевидной формы, покрытый диффузным отражателем, нанесенным при помощи химического травления. Внутри тайла находится спектросмещающее оптоволокно (*wavelength-shifting fibers*, *WLS*-волокно), скрученное в 3 витка. Спектросмещающее волокно вместе с чистым оптоволокном участвуют в сборе света, который далее регистрируется при помощи кремниевых фотоумножителей (*silicon photomultiplier*, *SiPM*) [6, 7].

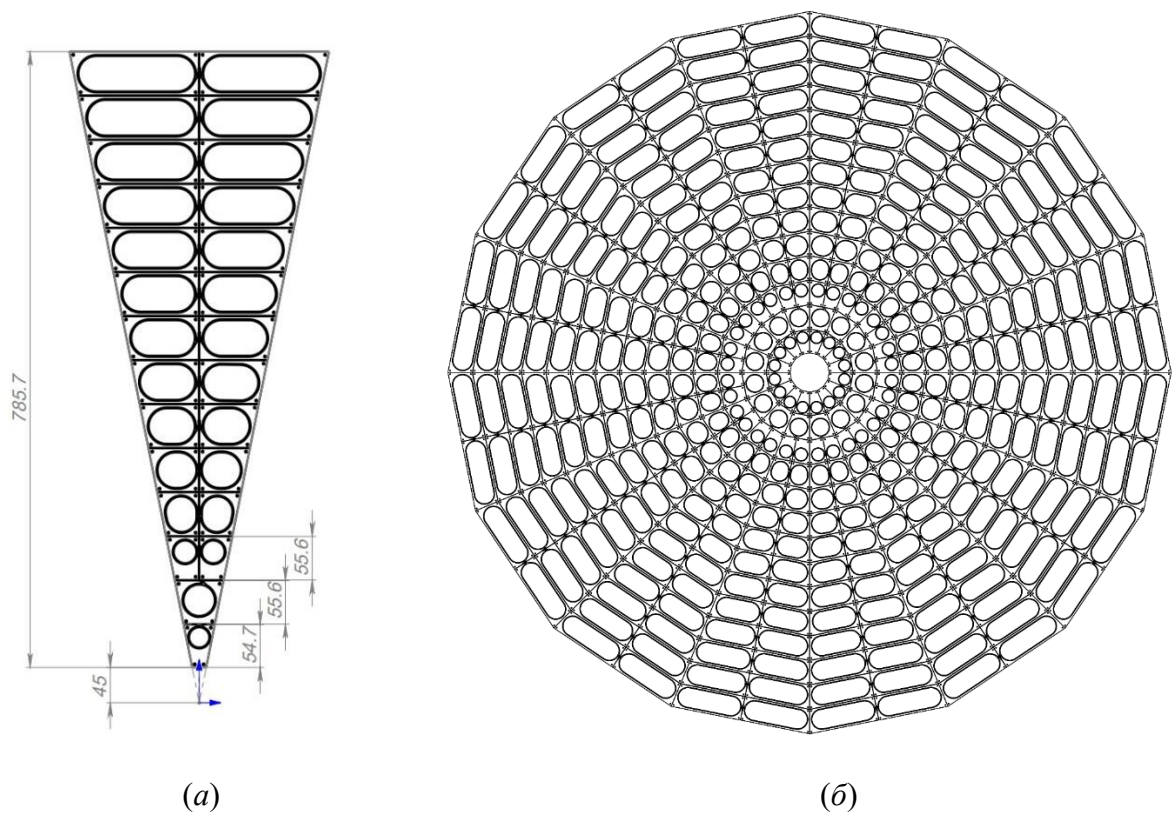


Рисунок 1.2 – Геометрия сектора (а) и колеса (б) детектора *BBC*

Два колеса детектора *BBC* располагаются симметрично по обе стороны от точки взаимодействия на расстоянии 1,7 м. Такое расположение позволяет регистрировать частицы, вылетающие в противоположных направлениях, и использовать разность времен прихода сигналов для реконструкции координат вершины [1].

Одной из задач детектора является формирование триггера на основе регистрации сигналов по совпадению между левым и правым детекторами и пороговой дискриминации по амплитуде [5]. Также, в тяжелоионных столкновениях детектор *BBC* будет использоваться для оценки центральности и множественности событий, определяемых из геометрии столкновения, измеренного сигнала и числа сработавших сегментов колеса.

BBC играет важную роль в программе по исследованию спиновой структуры адронов эксперимента *SPD*. Изучение спин-зависимых эффектов и локальной поляриметрии реализуется за счет измерения азимутальных распределений вылетевших после взаимодействия частиц. Таким образом, *BBC* представляет собой счетчик частиц, использующийся для определения неравномерности распределения частиц по углу φ .

2 ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕГИСТРАЦИИ СВЕТА

2.1 Регистрация сигнала в пластиковом сцинтилляторе

Заряженная частица при прохождении через вещество сцинтиллятора вызывает возбуждение и ионизацию органической среды (полистирола). Возбуждение среды снимается излучением ультрафиолетовых фотонов. Ультрафиолетовое излучение поглощается молекулами сцинтиллятора (1,5% *p-Terphenyl*) и переизлучается в синей области спектра с длиной волны 340 нм, а вторичный сцинтиллятор (0,05% *POPOP* ($C_{24}H_{16}N_2O_2$)) переизлучает полученный спектр в область с длиной волны 410 нм [9 – 11]. Для транспортировки света, повышения эффективности светосбора и предотвращения потери части сигнала за счет рассеяния и многократных отражений в сцинтиллятор помещают *WLS*-волокно, которое захватывает фотоны и передает их к фотоприемнику (Рисунок 2.1). В качестве фотоприемника используются кремниевые фотоумножители, которые представляют собой матрицу микропиксельных фотодиодов, работающих в лавинном (гейгеровском) режиме [11, 12]. Сигнал с *SiPM* обрабатывается многоканальной системой считывания *CAEN FERS-5200*.

Более подробно принцип работы кремниевых фотоумножителей и аналого-цифрового преобразователя (АЦП), используемых в исследовании, описывается в главе 3.

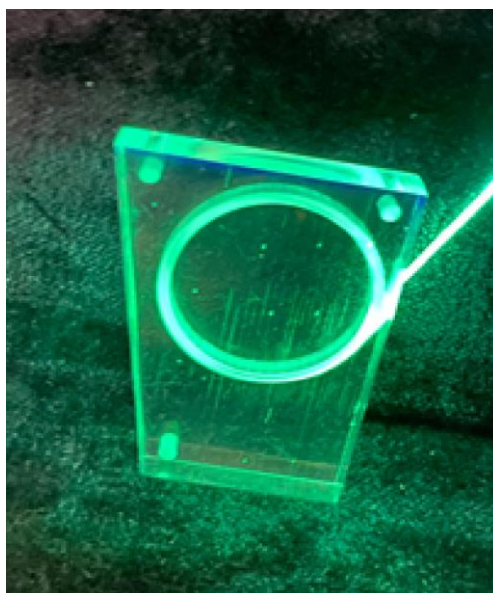


Рисунок 2.1 – Тайл без покрытия краской с *WLS*-волокном

2.2 Спектрсмещающее оптоволокно

Частица вызывает сцинтилляцию по пути своего следования, а излучаемые фотоны распространяются изотропно, поэтому для транспортировки света к фотодетектору используется спектрсмещающее оптоволокно.

Принцип работы *WLS*-волокна основан на поглощении первичных фотонов от пластика сцинтиллятором, содержащимся в волокне, и последующем переизлучении света с большей длиной волны (Рисунок 2.2) [9, 13]. После переизлучения свет удерживается внутри *WLS*-волокна за счет полного внутреннего отражения и распространяется вдоль оси волокна к фотодетектору.

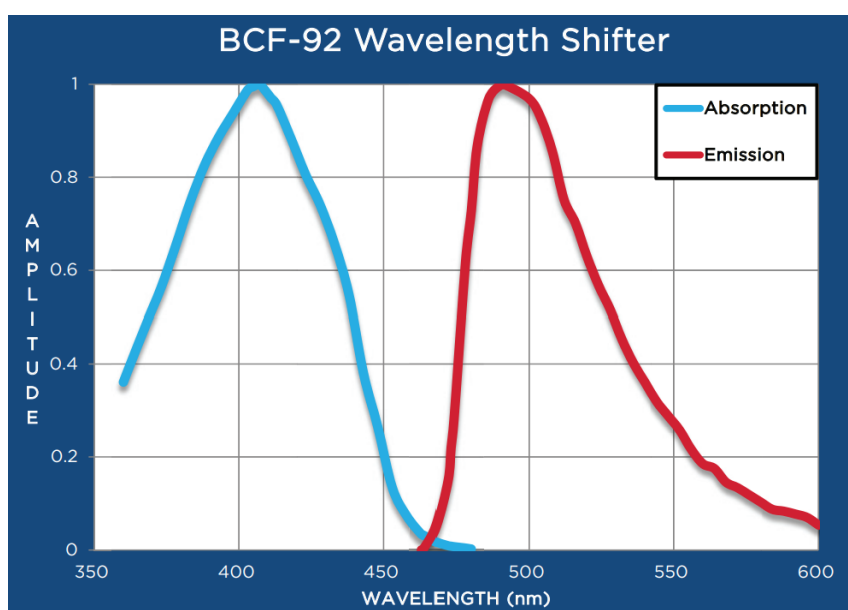


Рисунок 2.2 – Спектр поглощения и излучения *WLS*-волокна марки *SG BCF-92* [14]

Так как чувствительность фотодетекторов отличается для разных длин волн при регистрации сигнала важно согласование спектра высвечивания пластика со спектром поглощения *WLS*-волокна. В исследуемых элементах детектора *BBC* используются *SiPM SenceL Onsemi C-Series* [15], для которых эффективность захвата фотонов (*photon detection efficiency, PDE*) в области 480 нм составляет ~35% при перенапряжении 5 В (Рисунок 2.3).

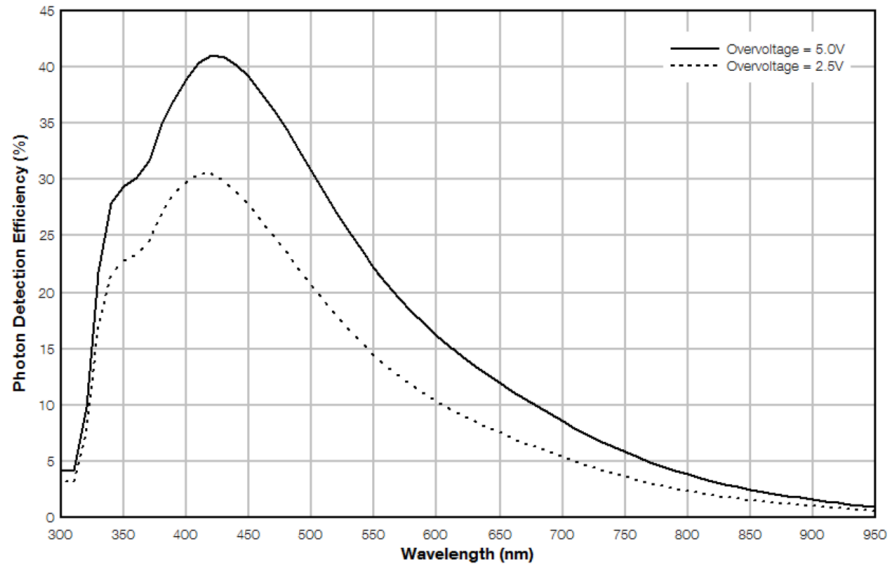


Рисунок 2.3 – Эффективность захвата фотонов для *SiPM Onsemi C-Series* [15]

Внутри тайлов детектора *BBC* волокно укладывается в фрезерованную канавку в три витка. В ряде работ [6, 16, 17] было доказано, что использование нескольких витков волокна увеличивает количество собираемого света за счет повышения вероятности захвата фотонов по всему объему сцинтиллятора.

Интенсивность фотонов после захвата и переизлучения внутри волокна (без скручивания) убывает по закону:

$$I(x) = I_0 \exp\left(-\frac{x}{L_s}\right) + I_0 \exp\left(-\frac{x}{L_l}\right), \quad (2.1)$$

где $\exp\left(-\frac{x}{L_s}\right)$ – быстро затухающая компонента; $\exp\left(-\frac{x}{L_l}\right)$ – медленно затухающая компонента; I_0 – амплитуда двух компонент сигнала при нулевом расстоянии до фотоприемника [10].

2.3 Факторы, влияющие на светосбор

Светосбор пропорционален толщине тайла, но эта пропорциональность нелинейна. Увеличение толщины сцинтиллятора с 1 до 2 см дает прирост отклика на 60% [10]. Из соображений баланса между светосбором и затратами при производстве тайлов, для детектора *BBC* выбрана толщина 1 см.

Различия в размерах тайлов приводят к изменению кривизны окружности канавки, в которую укладывается *WLS*-волокно. Было выявлено, что даже небольшие различия в радиусе скругления могут изменять светосбор на несколько процентов из-за появления

дополнительных потерь на изгибе волокна [6, 7]. Увеличение числа витков волокна внутри тайла также приводит к возрастанию вероятности захвата сцинтилляционных фотонов, однако слишком большая длина может вызывать дополнительные потери из-за самопоглощения и изгибов [7].

Качество отражающего покрытия также влияет на потерю света в сцинтилляторе. Сравнение различных отражающих покрытий показало, что химическое травление поверхности дает лучший результат по сравнению с *Tyvek* [18] и позволяет эффективно сохранять фотоны в объеме сцинтиллятора, увеличивая вероятность их захвата волокном.

Воздушный зазор между *WLS*-волоком и канавкой в тайле приводит к образованию дополнительной границы раздела сред, на которой возникают потери. Так, проклейка волокна в канавке с помощью оптического клея с показателем преломления, близким к показателю преломления сцинтиллятора, может увеличить светосбор в 1,5 – 2 раза [8, 9]. Однако, стоит отметить, что качество оптического клея зависит от температуры и может деградировать со временем [10].

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

3.1 Кремниевые фотоумножители

Кремниевый фотоумножитель представляет собой фотодетектор, основанный на матрице из множества ячеек (пикселей), расположенных на кремниевой подложке (рисунок 3.1).

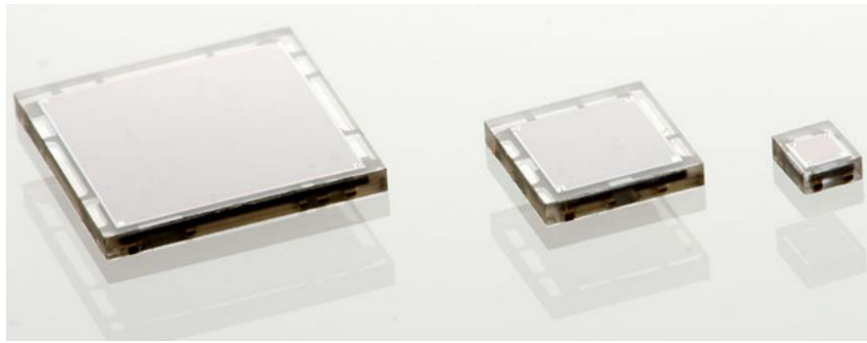


Рисунок 3.1 – *SiPM SenceL Onsemi C-Series* [11]

Каждый пиксель – это лавинный фотодиод, работающий в режиме Гейгера [8, 9]. К матрице прикладывается обратное напряжение смещения (V_{bias}), которое превышает напряжение пробоя ($V_{breakdown}$) на величину перенапряжения ($\Delta V = V_{bias} - V_{breakdown}$). При образовании в ячейке свободных носителей заряда начинается процесс лавинного пробоя. Так как каждый пиксель содержит индивидуальный гасящий резистор, ток лавины создает на нем падение напряжения, что приводит к снижению напряжения на *SiPM* ниже пробойного и прекращению лавины. Заряд на одном сработавшем пикселе определяется выражением:

$$Q_{pixel} = C_{pixel}(V_{bias} - V_{breakdown}), \quad (3.1)$$

где C_{pixel} – ёмкость одной ячейки (50 фФ).

При перенапряжении $\Delta V = 3$ В усиление составляет порядка 10^6 электронов [8], что сопоставимо с усилением фотоэлектронных умножителей (ФЭУ). Амплитуда сигнала одного пикселя не зависит от числа первичных носителей заряда, вызвавших гейгеровскую лавину, а при срабатывании нескольких ячеек сигнал складывается [4, 8].

Калибровку *SiPM* возможно проводить по однофотоэлектронному спектру, который получается при освещении фотодетектора слабым световым импульсом. В этом случае на амплитудном спектре наблюдаются пики от отдельно сработавших ячеек (рисунок 3.2). Первый пик соответствует пьедесталу (он формируется из событий, при которых не

сработала ни одна ячейка *SiPM*, то есть это 0 фотоэлектронов), второй пик соответствует одной сработавшей ячейке *SiPM* (1 фотоэлектрон), третий пик соответствует двум сработавшим ячейкам *SiPM* (2 фотоэлектрона) и т.д. Разница между положениями пиков позволяет определить средний заряд, приходящийся на один пиксель и перевести амплитуду измеренного сигнала в количество зарегистрированных фотоэлектронов.

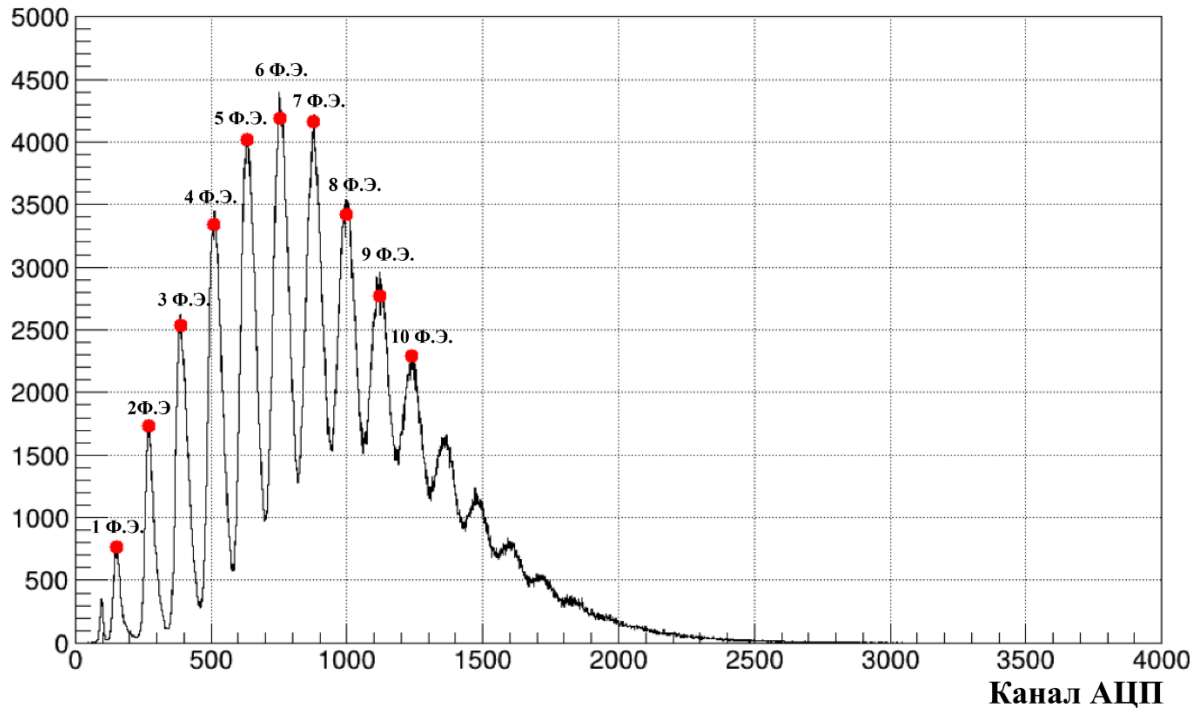


Рисунок 3.2 – Однофотоэлектронный спектр *SiPM*

К основным характеристикам *SiPM* также относятся квантовая эффективность (*quantum efficiency, QE*) и эффективность регистрации фотонов. Квантовая эффективность представляет собой вероятность того, что падающий фотон создаст носитель заряда, способный вызвать гейгеровскую лавину. Эффективность регистрации фотонов – это вероятность того, что *SiPM* в ответ на падающий фотон выдаст выходной сигнал.

В *SiPM* все пиксели имеют квадратную форму и уложены на подложке как плитки. Поэтому, если фотон попадет в пространство между двумя ячейками, он не будет зарегистрирован. Параметр, характеризующий отношение чувствительной площади к общей площади *SiPM*, называется геометрической эффективностью (*fill factor, f*). Значения *f* варьирует от 30% до 80% в зависимости от размеров *SiPM*.

От правильно выбранного значения $V_{breakdown}$ зависит усиление *SiPM*, поэтому перед измерениями необходимо проводить калибровку фотодетектора. Один из методов калибровки осуществляется с помощью линейной экстраполяции зависимости положения

однофотоэлектронного пика от напряжения смещения. Для используемых кремниевых фотоумножителей при значениях напряжения питания от 28 В до 30 В с шагом 0,5 В были получены однофотоэлектронные спектры. Строилась зависимость напряжения смещения от разницы между двумя ближайшими пиками одноэлектронного спектра (то есть, от средней амплитуды однофотоэлектронного сигнала в каналах АЦП). Коэффициент b , полученный при аппроксимации зависимости линейной функцией, определяет значение с нулевым усилением, которое является искомым $V_{breakdown}$ для $SiPM$. Пример калибровки одного $SiPM$ представлен на рисунке 3.3.

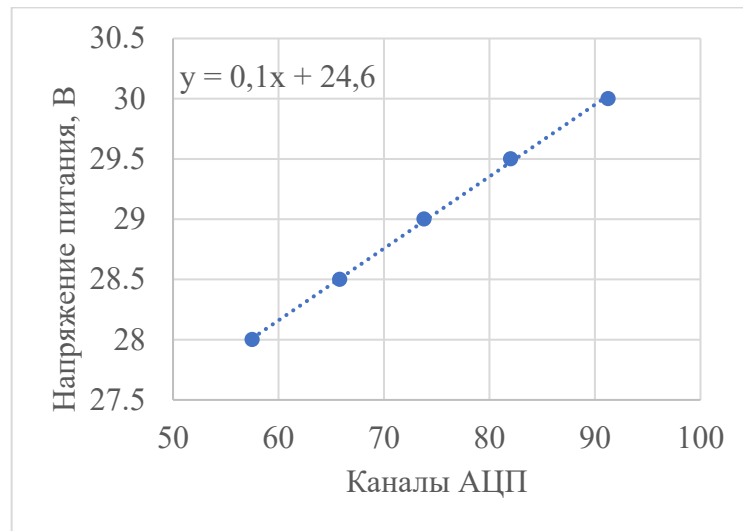


Рисунок 3.3 – Пример калибровки $SiPM$ для подбора пробойного напряжения

К основному недостатку $SiPM$ относится высокий уровень шумов. Существенную роль играют перекрестные помехи (*cross-talk*). Они возникают из-за появления вторичных фотонов в области лавины одного пикселя. Возникший фотон может вызвать лавину в соседней ячейке или создать носитель заряда, который диффундирует в другую ячейку и вызовет в ней вторичную лавину. Среднее число пикселей, возбуждаемых одним фотоэлектроном, описывается выражением:

$$N_{pixel} = \frac{1}{1 - \varepsilon}, \quad (3.1)$$

где ε – вероятность срабатывания соседнего пикселя [11].

Вероятность перекрестных помех зависит от геометрии $SiPM$ и значения перенапряжения (с увеличением ΔV вероятность перекрестных помех возрастает).

Также к шумовым срабатываниям относятся послеимпульсы (*afterpulses*) – ложные сигналы, возникающие после основного сигнала в том же пикселе в отсутствии новых

фотонов. Они возникают из-за захвата части носителей заряда дефектами кристаллической решетки кремния в связи с чем на их высвобождение затрачивается время, а регистрация происходит позже регистрации основной части сигнала.

На рисунке 3.4 представлена осциллограмма шумовых срабатываний *SiPM*.

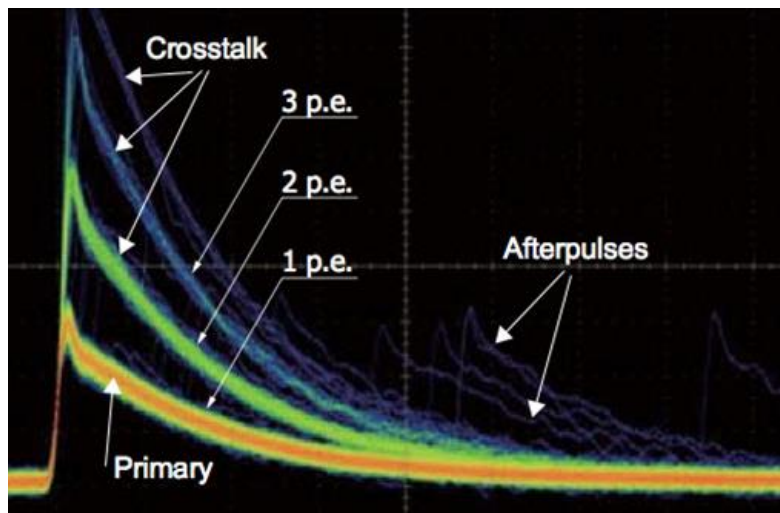


Рисунок 3.4 – Осциллограмма шумовых срабатываний *SiPM* [19]

3.2 Система считывания *CAEN FERS-5200*

Модуль системы *FERS-5200* [20] включает в себя два чипа *Citiroc-1A* (Рисунок 3.5), каждый из которых является 32-канальной интегральной схемой (*ASIC*), предназначенной для питания и считывания сигналов с *SiPM*.

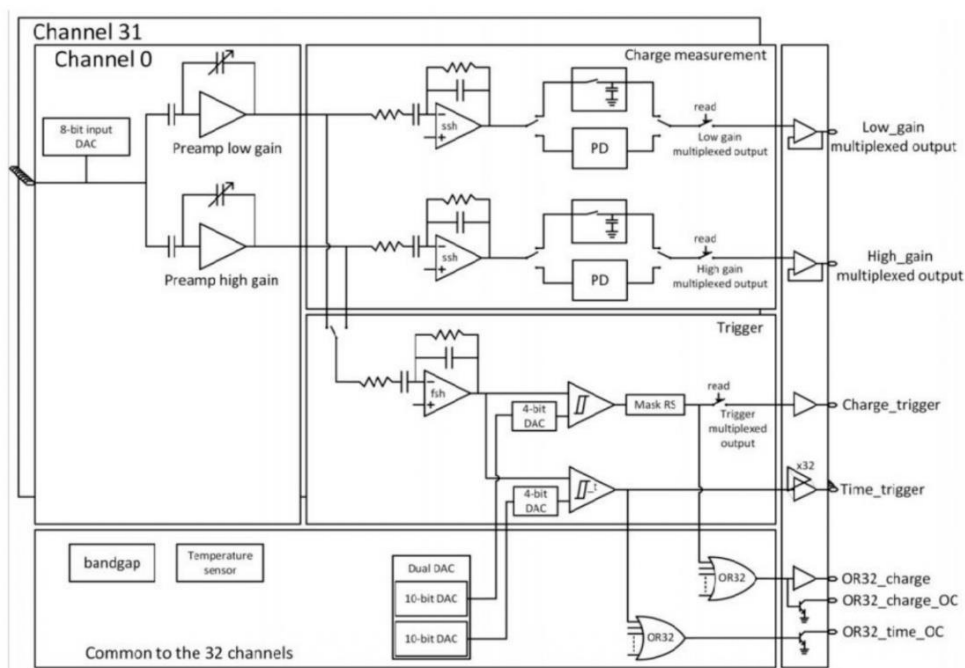


Рисунок 3.5 – Схема чипа *Citiroc-1A* [20]

Каждый из 32 каналов чипа (Рисунок 3.6) включает цепь обработки сигнала, состоящую из:

- предусилителей (*Low Gain, High Gain*);
- быстрого и медленного формирователей (*Slow Shaper, Fast Shaper*);
- пикового детектора;
- дискриминаторов.

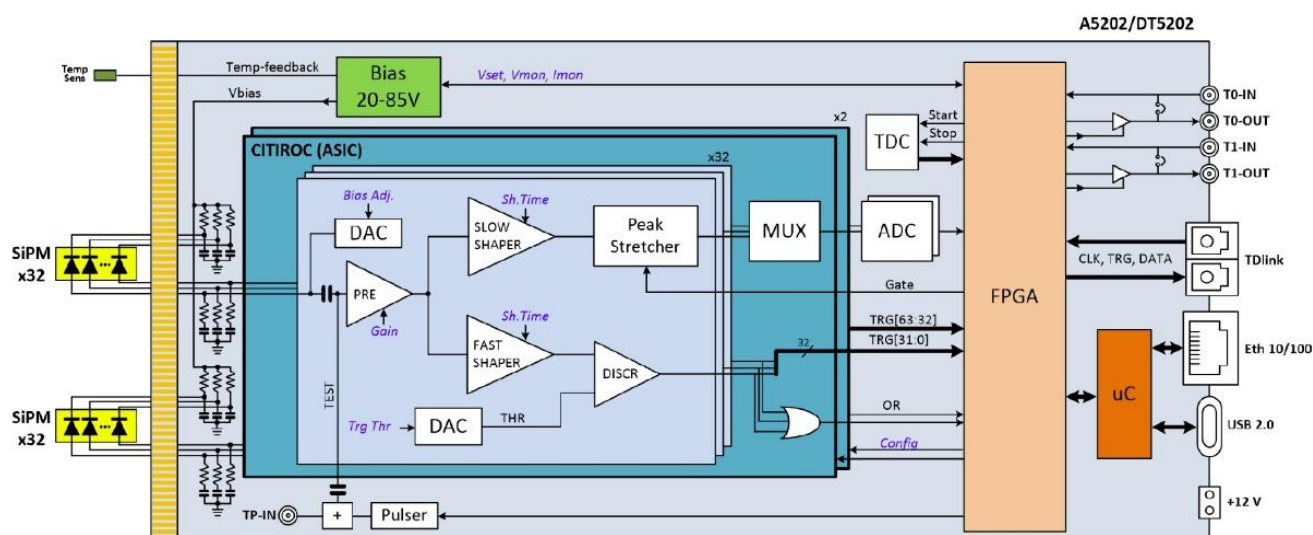


Рисунок 3.6 – Упрощенная схема одного канала *FERS-5200* [20]

Предусилители могут работать в двух режимах: *Low Gain (LG)* – для мощных сигналов и *High Gain (HG)* – для слабых сигналов (при использовании этого режима порог может быть выставлен на уровне 1/3 фотоэлектрона) (Рисунок 3.7). Коэффициент усиления настраивается путём выбора значения обратной связи (C_f) с шагом 25 фФ.

Значение коэффициента усиления в канале может задаваться индивидуально через интерфейс *Janus* (от 1 до 63).

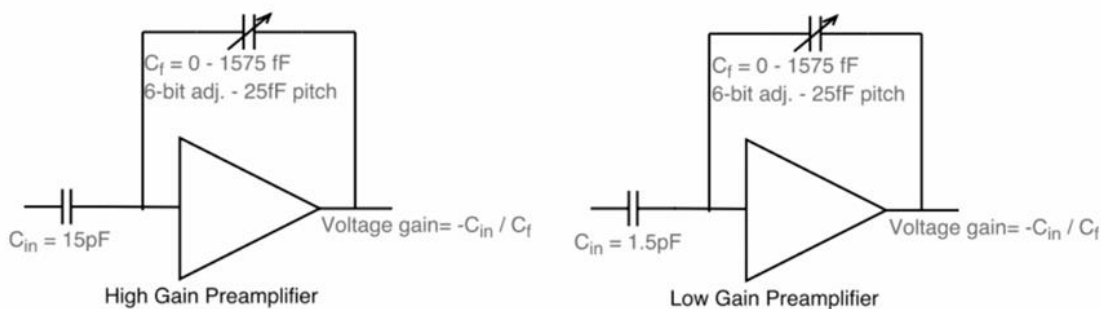


Рисунок 3.7 – Предусилители *HG* и *LG* [20]

Цепь усиления включает два $CR-RC^2$ медленных формирователя, подключенных к выходам предусилителей (Рисунок 3.8).

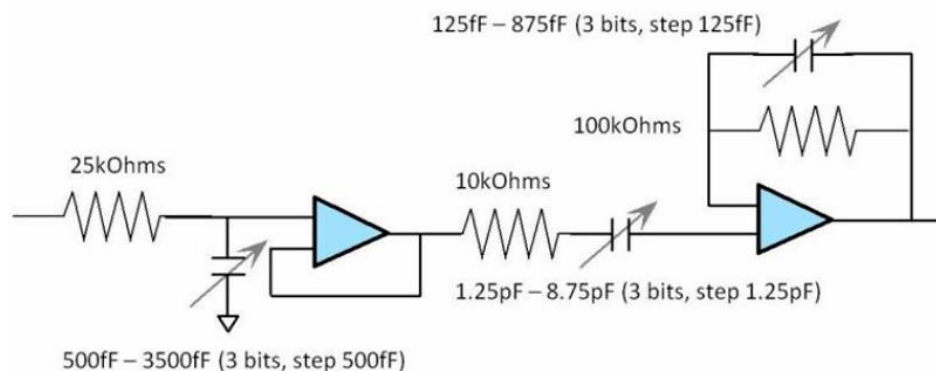


Рисунок 3.8 – Медленный формирователь (*Slow Shaper*) [20]

Амплитуда сигнала с выхода *Slow Shaper* измеряется с помощью системы пикового детектирования, которая автоматически запоминает максимальное значение сигнала после срабатывания триггера.

Работа пикового детектора состоит из трех фаз (Рисунок 3.9):

1. Фаза *OFF*: до поступления триггера пиковый детектор выключен. После срабатывания триггера начинается фаза пикового детектирования.
2. Фаза пикового детектирования: детектор запоминает максимальное значение входного сигнала. Режим сохраняется до появления сигнала *Hold*, после чего начинается фаза удержания. Время между триггером и сигналом *Hold* определяется параметром *Hold Delay*.
3. Фаза удержания (*Hold*): сигнал *Hold* отключает вход пикового детектора от медленного формирователя, а максимальное значение амплитуды удерживается до тех пор, пока не произойдет считывание и преобразование сигнала в цифровую форму АЦП.

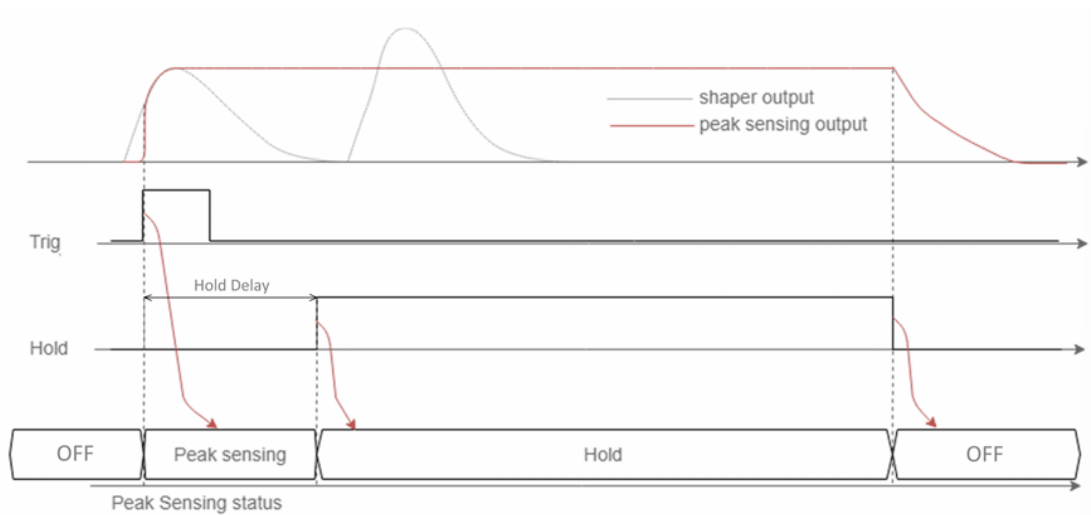


Рисунок 3.9 – Фазы работы пикового детектора [20]

Каждый канал имеет быстрый формирователь (*Fast Shaper*) (Рисунок 3.10) и дискриминатор, предназначенный для генерации самотриггера.

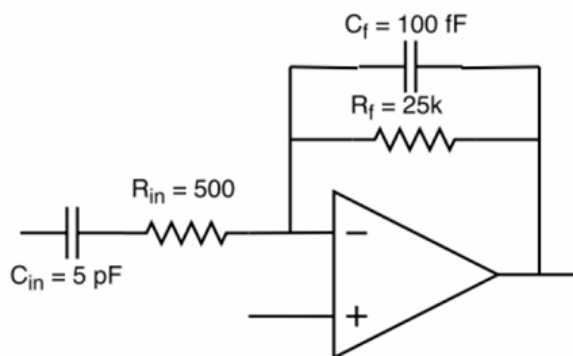


Рисунок 3.10 – Быстрый формирователь (*Fast Shaper*) [20]

Сигнал с выхода *Fast Shaper* подается на два дискриминатора:

1. Зарядовый дискриминатор (*QD*);
2. Временной дискриминатор (*TD*), использующийся для подсчета событий, измерения времени прихода (*ToA*) и времени выше порога (*ToT*).

3.2.1 Калибровка сигналом внутреннего генератора

Для проверки работы системы предусмотрен тестовый генератор (*Test Pulser*) (Рисунок 3.11). При работе с ним можно использовать сигнал от внутреннего генератора с программируемыми параметрами или сигнал от внешнего генератора, подающийся через разъем *Test Input*.

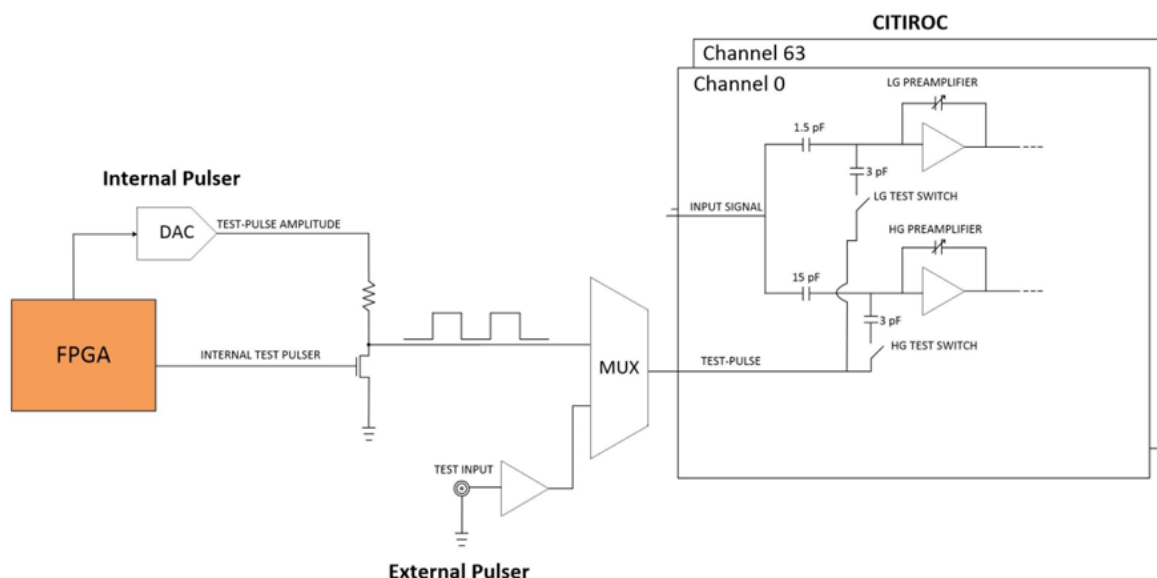


Рисунок 3.11 – Блок-схема сигнала тестового генератора [20]

Тестовый импульс можно подавать на выбранные каналы и на предусилители, задавая амплитуду, длительность и частоту через ПО *Janus*.

Первый этап калибровки проводился импульсом от внутреннего генератора. Сигнал одновременно подавался на все каналы и проходил усиление по *LG* и *HG*. Измерялось среднее значение амплитуды по распределению.

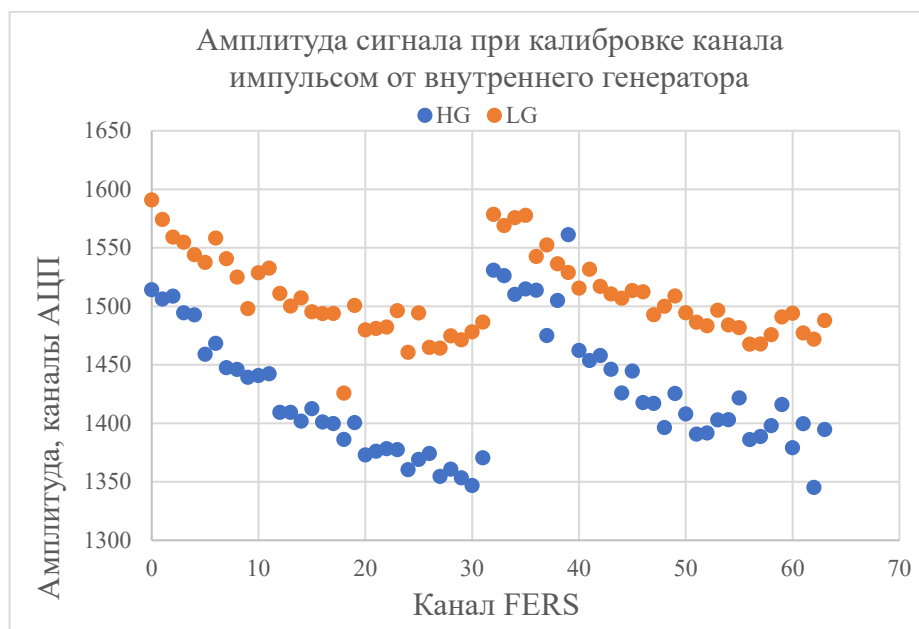


Рисунок 3.12 – Калибровка каналов импульсом от внутреннего генератора

Калибровка по сигналу с внутреннего генератора при одинаковых параметрах импульса показала расхождение в амплитуде между двумя группами каналов, которые соответствуют двум чипам *ASIC Citiroc-1A* (Рисунок 3.12).

В режиме усиления *LG* амплитуда в канале 32 составляет 93% от амплитуды в канале 1, а амплитуда в канале 64 составляет 94% от амплитуды в канале 33.

В режиме усиления *HG* амплитуда в канале 32 составляет 90% от амплитуды в канале 1, а амплитуда в канале 64 составляет 91% от амплитуды в канале 33.

3.2.2 Калибровка сигналом внешнего генератора

Проводилась калибровка каналов внешним генератором, сигнал с которого приходил на аттенюатор для более точного варьирования напряжения, подаваемого на канал. Схема установки представлена на рисунке 3.13.

Методика проведения калибровки импульсом от внешнего генератора состояла из:

1. Уменьшения сигнала генератора на аттенюаторе;
2. Измерения амплитуды уменьшенного сигнала по осциллографу;
3. Подачи выходного сигнала с аттенюатора на канал FERS-5200;
4. Оцифровки сигнала;
5. Фиксирования средней амплитуды в канале при известном напряжении.

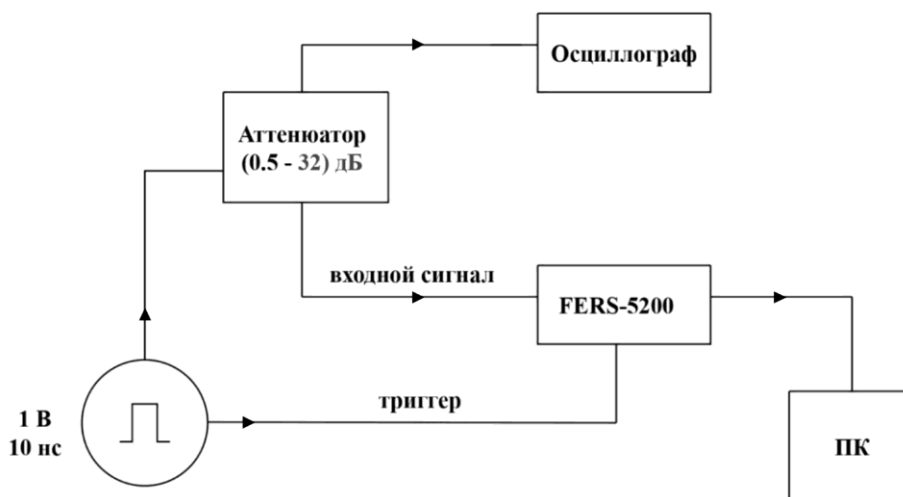


Рисунок 3.13 – Схема установки для калибровки каналов импульсом от внешнего генератора

Используемое оборудование:

- 1) Генератор импульсов Г5-56;
- 2) Caen Dual Attenuator Mod.N858;
- 3) Цифровой осциллограф Tektronix TDS 3032C.

Источником триггера был внешний генератор с форматом сигнала *LvTTL* (3,3 В), подающийся на вход *T0-IN*.

Всего для 64 каналов было снято по 3 точки с напряжениями сигнала 40, 80 и 120 мВ. По полученным точкам были построены графики, линейно аппроксимированные кривой вида $y = kx + b$ (Рисунок 3.14).

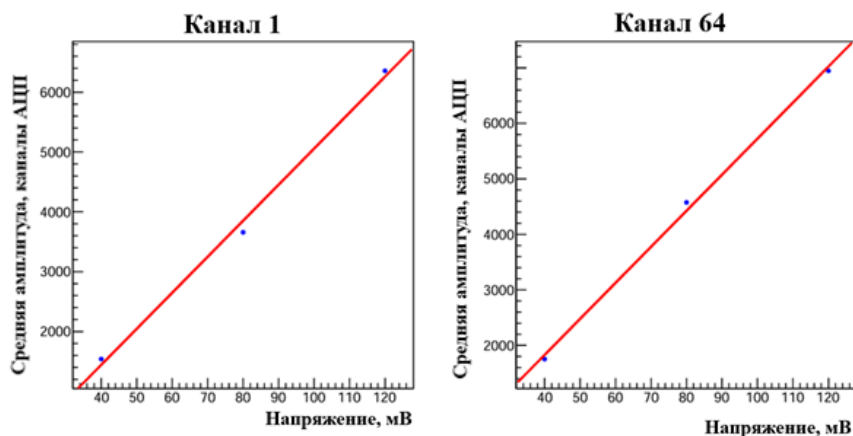


Рисунок 3.14 – Пример аппроксимации по трем точкам

Коэффициент k включает в себя коэффициент усиления и коэффициент преобразования амплитуды в цифровой код после прохождения усилителей.

Коэффициент b показывает точку пересечения прямой с осью y и определяет наличие смещения сигнала по энергетической шкале. Положительное значение b может указывать на смещение в отрицательную область шкалы из-за которого возможно отсечение малых амплитуд сигнала.

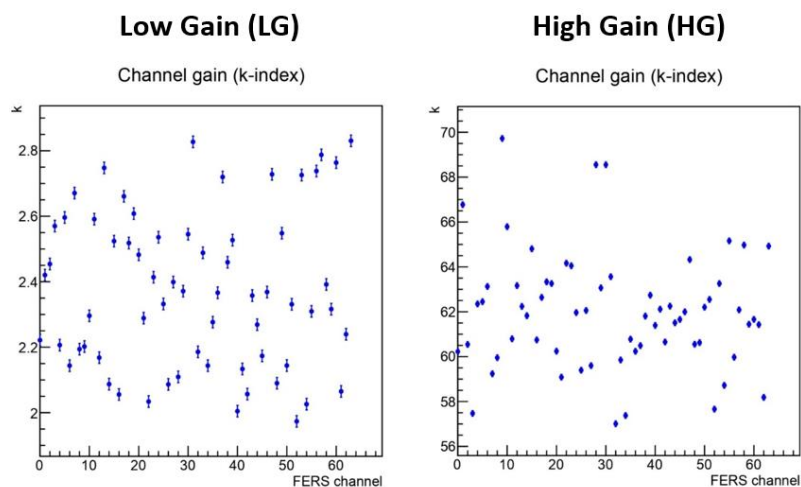


Рисунок 3.15 – Разброс коэффициента k , полученный в результате линейной аппроксимации калибровочных кривых

Калибровка 64 каналов системы *FERS-5200* выявила наличие разброса коэффициента преобразования входного напряжения в цифровой код, особенно заметный в режиме усиления *High Gain* (Таблица 3.1).

Таблица 3.1. Усредненные по каналам характеристики

Режим усиления	<i>High Gain (HG)</i>	<i>Low Gain (LG)</i>
СКО коэффициента k	2,6	0,2
Коэффициент b (пьедестал)	-902,6	96,8
СКО коэффициента b	217,6	9,8

Для одного канала системы были сняты точные калибровочные кривые в двух режимах усиления при максимальном (63) и минимальном (1) коэффициентах усиления.

Используемое оборудование:

- 1) Генератор сигналов *Rigol DG4102*;
- 2) Цифровой осциллограф *Tektronix MSO 2022B*.

Параметры *Janus* при подробной калибровке одного канала остались аналогичными, как и в случае калибровки по трем точкам.

Источником триггера был внешний генератор с форматом сигнала *NIM* (-0,8 В), подающийся на вход *T0-IN*.

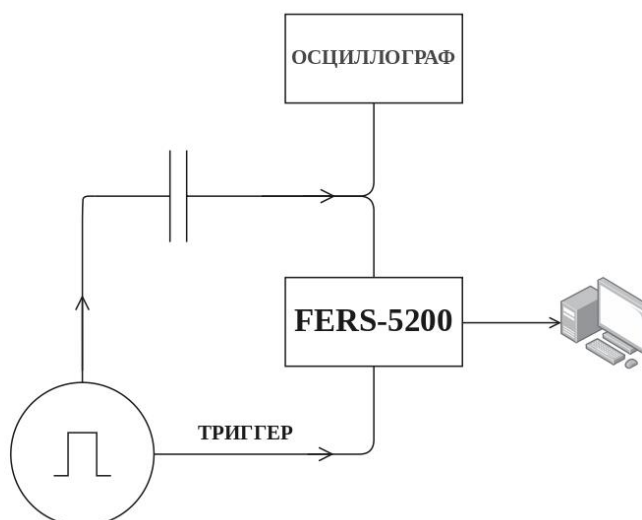


Рисунок 3.16 – Схема установки при подробной калибровке одного канала

При подробной калибровке одного канала была изменена методика измерений. Так как напряжение на сигнальном пине определяется подстроечным ЦАП (цифро-аналоговый преобразователь) и может отличаться от 0, прямое подключение заземленного генератора может привести к появлению тока, направленного от ЦАП на землю. Такой режим работы может вывести ЦАП из строя. В связи с этим, для того чтобы подаваемое с генератора напряжение не влияло на работу усилительного каскада и ЦАП, между генератором и входом канала была добавлена разделительная емкость.

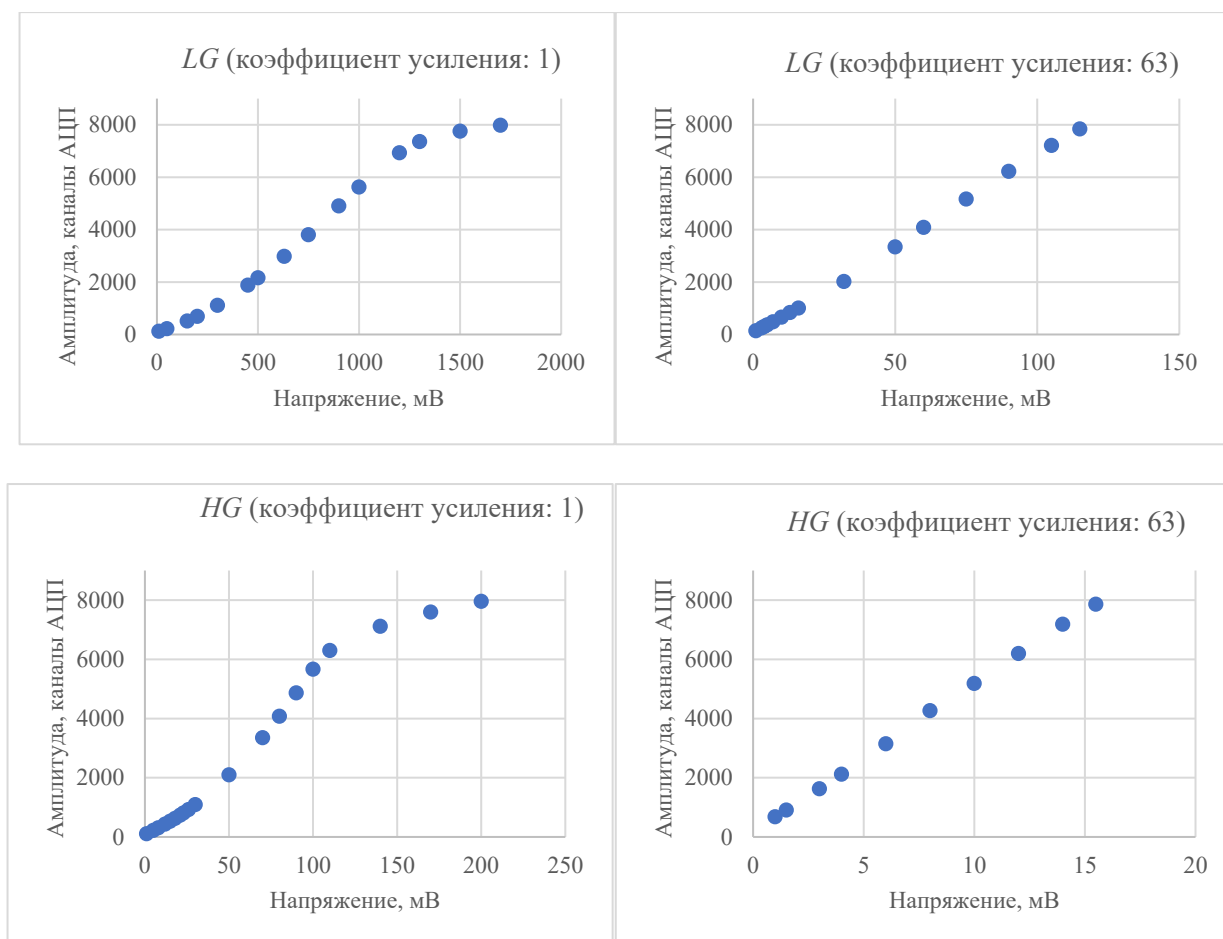


Рисунок 3.17 – Калибровочные кривые для канала №60 в двух режимах усиления при минимальном (1) и максимальном (63) коэффициентах усиления

По результатам подробной калибровки канала была выявлена нелинейность шкалы, особенно заметная при усилении в режиме *Low Gain*, что может быть связано с особенностями работы усилительных каскадов. Так как нелинейность шкалы практически отсутствует при максимальном усилении, дальнейшие измерения проводились с коэффициентом усиления около 60.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки светосбора системы проводились исследования характера зависимости отклика от числа витков *WLS*-волокна внутри сцинтиллятора, а также измерение отклика тайлов разной формы и с разной длиной *WLS*-волокна на космогенных мюонах.

4.1 Измерение светосбора при различном числе витков *WLS*-волокна

Экспериментальная установка включает в себя генератор импульсов *RIGOL DG4102*, осциллограф-измеритель *LeCroy WaveRunner 620Zi*, источник-измеритель *Keithley 2400 SourceMeter*, 2 кремниевых фотоумножителя *Onsemi* $1 \times 1 \text{ мм}^2$ и $3 \times 3 \text{ мм}^2$, *WLS*-волокно *Saint Gobain BCF-92*, тайл из ряда №4 и светодиод. Принципиальная схема и фотография установки представлены на рисунке 4.1.

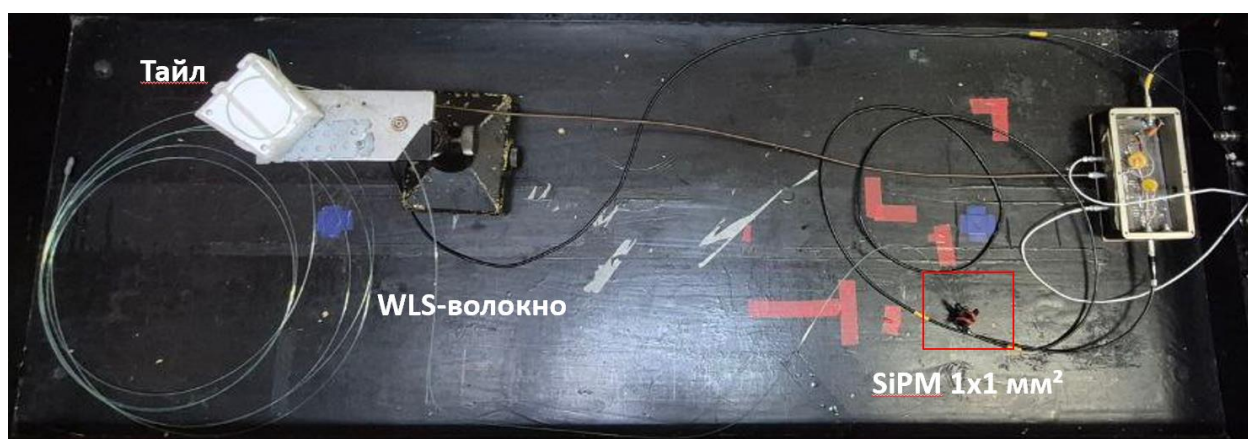
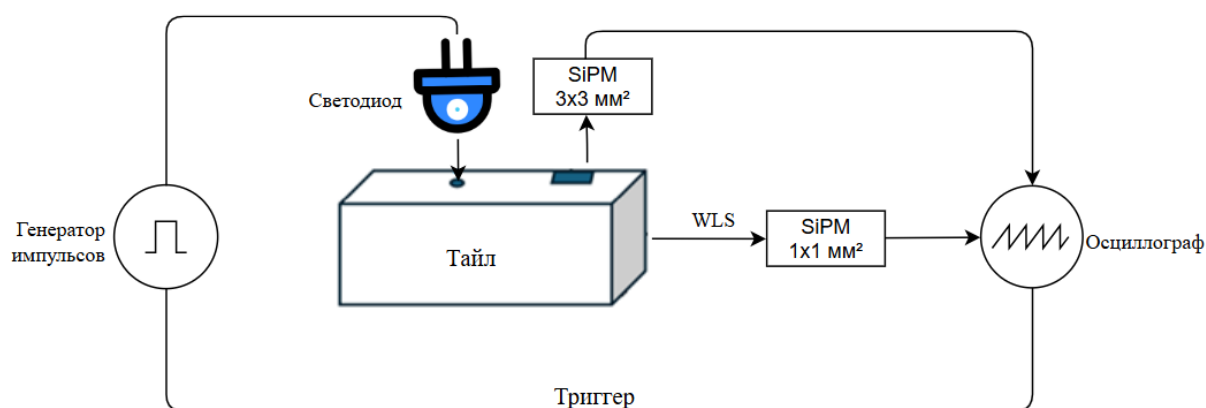


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема и фотография экспериментальной установки

Для имитации сигнала от частицы в тайле просверлено отверстие, в которое вкладывается оптоволокно. При помощи коннектора к волокну крепится светодиод, на который подаются прямоугольные импульсы. Свет в тайле собирается спектросмещающим

оптоволоконном и регистрируется $SiPM$ 1×1 мм². В качестве референсного сигнала используется сигнал от $SiPM$ 3×3 мм², который оптически связан с сцинтиллятором (Рисунок 4.2). Референсный $SiPM$ необходим для контроля распространения света в тайле, а также позволяет наблюдать эффективность захвата фотонов WLS -волоконном.

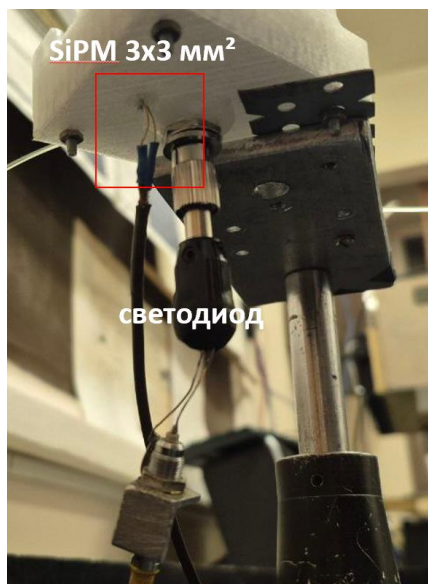


Рисунок 4.2 – Расположение $SiPM$ 3×3 мм² (референсный)

В конструкции экспериментального тайла предусмотрена возможность варьировать число витков WLS -волокна, что позволяет измерить зависимость отклика от числа оборотов волокна внутри сцинтиллятора.

На рисунке 4.3а представлена зависимость зарядового спектра основного сигнала от числа витков WLS -волокна. С увеличением числа витков наблюдается рост отклика, который можно объяснить увеличением эффективности захвата фотонов, возникающим за счет расширения области взаимодействия WLS -волокна с объемом сцинтиллятора.

С увеличением числа витков до 3 – 4 световой отклик увеличивается в 1,2 – 1,9 раз относительно 1 – 2 витков. При дальнейшем увеличении числа витков до 5 – 6 рост сигнала становится менее выраженным (увеличивается в 1,1 – 1,2 раз), что может свидетельствовать о приближении к области насыщения, которая связана с увеличением потерь на изгибах волокна.

На рисунке 4.3б показана зависимость зарядового спектра референсного сигнала от числа витков. Уменьшение отклика, возникающее с увеличением числа витков волокна внутри тайла, показывает эффективность захвата и переноса света спектросмещающим волокном.

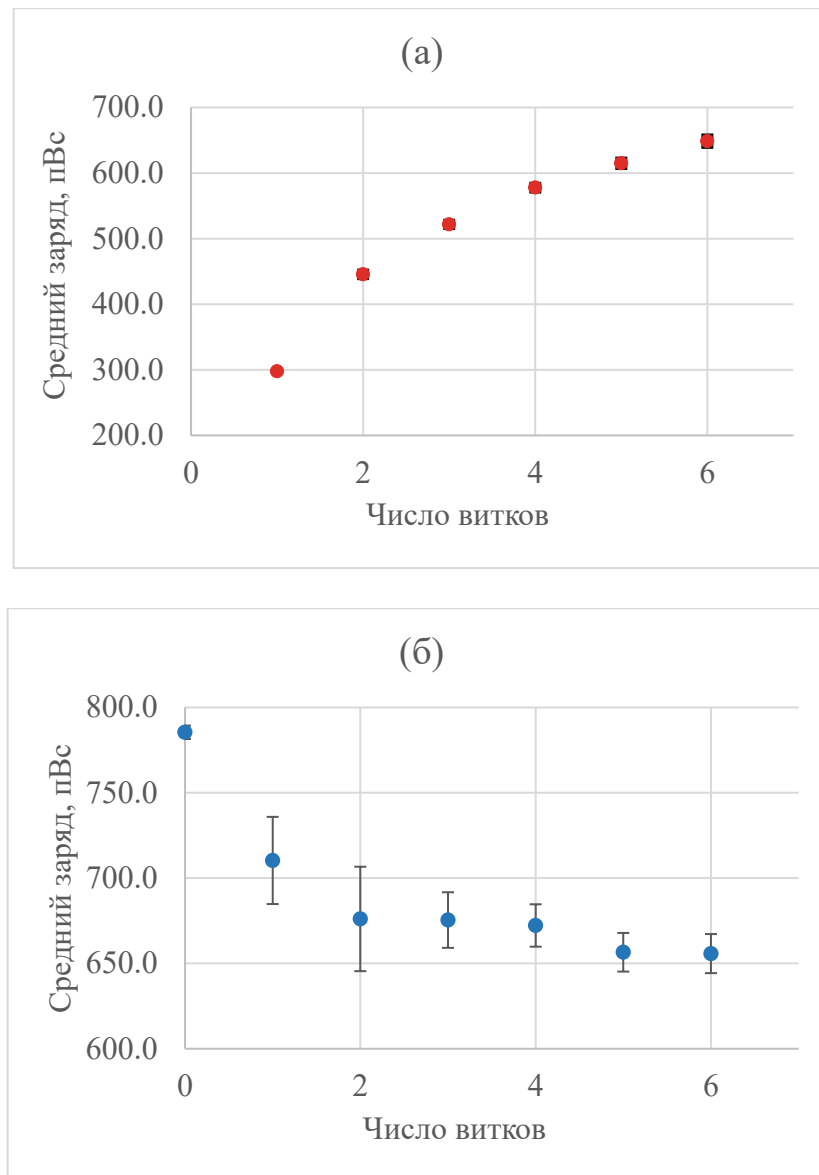


Рисунок 4.3 – Отклик при различном числе витков для основного (а) и референсного (б) сигнала

Для исследования влияния длины *WLS*-волокна на отклик системы проводилась серия измерений при различном удалении *SiPM* 1x1 мм² от сцинтиллятора. Измерения проводились для трех значений длин свободного конца волокна: 5 см, 1 м и 6 м. Полученные результаты представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Световой отклик при различном числе витков и различной длине свободного конца *WLS*-волокна в фотоэлектронах (ф.э.)

Число витков <i>WLS</i> - волокна внутри тайла	Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна		
	5 см	1 м	6 м
1	10 ф.э.	5 ф.э.	2 ф.э.
2	15 ф.э.	7 ф.э.	2 ф.э.
3	18 ф.э.	8 ф.э.	3 ф.э.
4	20 ф.э.	10 ф.э.	3 ф.э.
5	21 ф.э.	11 ф.э.	4 ф.э.
6	22 ф.э.	11 ф.э.	4 ф.э.

Получены кривые для 3-х различных длин свободного конца *WLS*-волокна (Рисунок 4.4). Как можно заметить, характер зависимости практически не меняется с изменением длины оптического тракта.

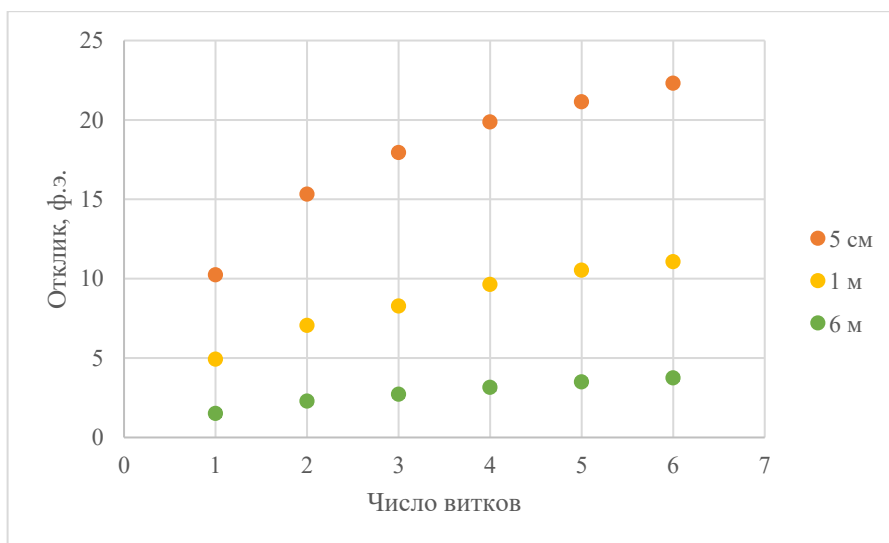


Рисунок 4.4 – Отклик при изменении расстояния между тайлом и *SiPM* 1x1 мм²

Световой отклик для тайла с тремя витками и длиной свободного конца 5 см превосходит отклик для тайла такой же конфигурации, но с длиной *WLS*-волокна 1 м в 2,2 раза, а с длиной 6 м в 6,6 раз.

Временное разрешение определялось как стандартное отклонение распределения разности между сигналом и внешним триггером. Временная привязка дискриминатора

осуществлялась методом следящего порога. Оценка среднего временного разрешения: $\sigma_t = (355 + 3)$ пс.

4.2 Измерение светосбора с помощью мюонного телескопа

Для дальнейшего исследования было выбрано несколько тайлов различной геометрии. Тайлы различаются длиной уложенного внутри волокна и радиусом скругления (Таблица 4.2). Измерения были разделены на 2 серии: в первой длина свободного конца волокна составляла 4 см, а во второй 132 см. Для телескопа с длиной *WLS*-волокна 4 см были подготовлены тайлы из ряда 2, 4, 5 и 14, а для телескопа с длиной волокна 132 см использовались тайлы 1, 5 и 14 (Рисунок 4.5).

Таблица 4.2 – Характеристики тайлов различных рядов

Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна: 4 см			Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна: 132 см		
Номер ряда	Радиус скругления, см	Общая длина волокна, см	Номер ряда	Радиус скругления, см	Общая длина волокна, см
2	2,15	46	1	1,43	159
4	1,94	47,5	5	2,25	181,5
5	2,25	53,5	14	2,25	240
14	2,25	112			

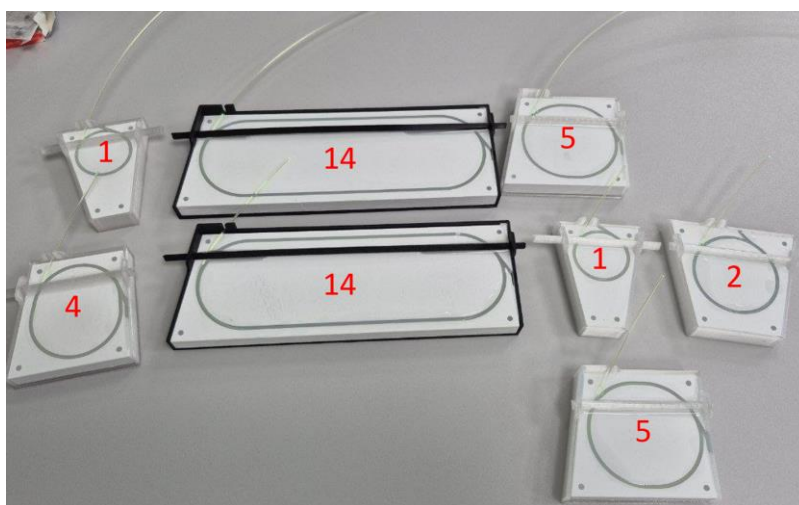
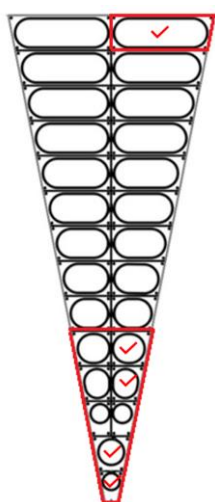


Рисунок 4.5 – Тестовые тайлы для мюонного телескопа

В обоих случаях внутри сцинтиллятора располагалось 3 витка спектросмещающего оптоволокну. В качестве оптического клея использован клей СКТН-Б в пропорции 100:6 с отвердителем. Для улучшения светосбора торцы *WLS*-волокон каждого образца, стыкующиеся с поверхностью кремниевых фотоумножителей, были заполированы. Результат ручной полировки представлен на рисунке 4.6.

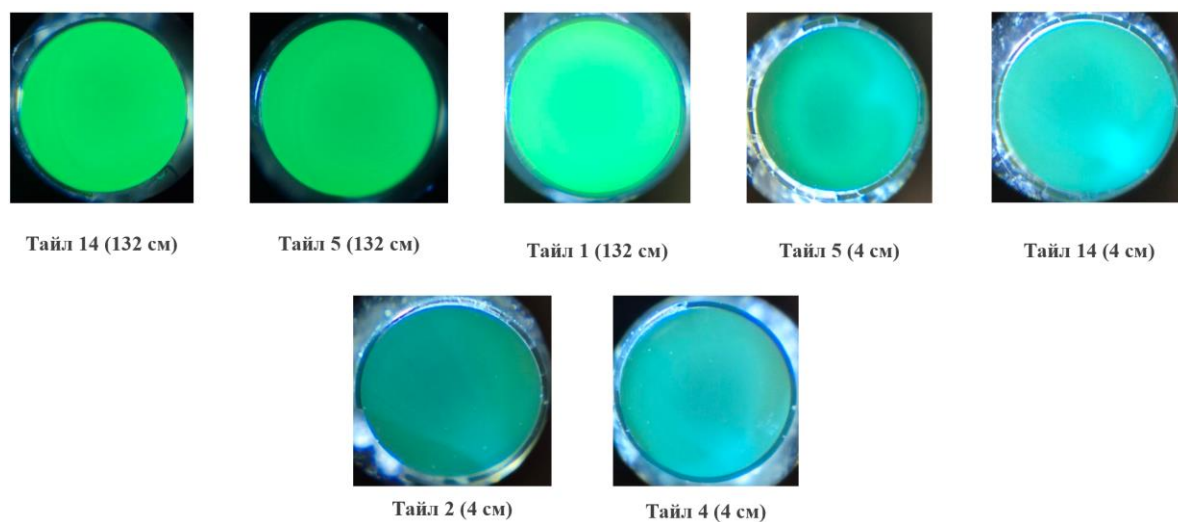
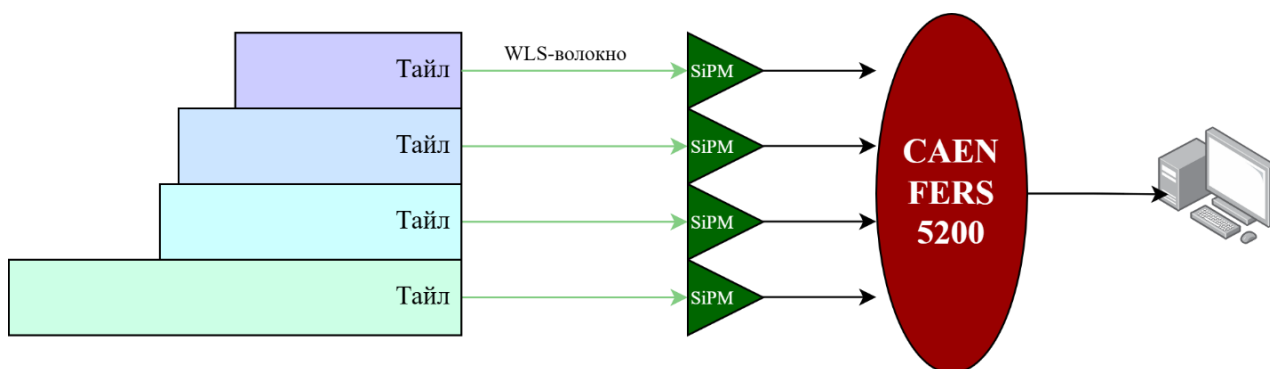


Рисунок 4.6 – Полировка торцов *WLS*-волокну для каждого образца (в скобках приведена длина свободного конца волокна)

Мюонный телескоп представляет собой несколько сцинтилляторов (в данной работе 3 или 4 тайла), использующих схему логических совпадений. Таким образом, отбираются только те события, в которых частица прошла через все тайлы практически одновременно. Принципиальная схема и фотография установки мюонного телескопа представлены на рисунке 4.7.



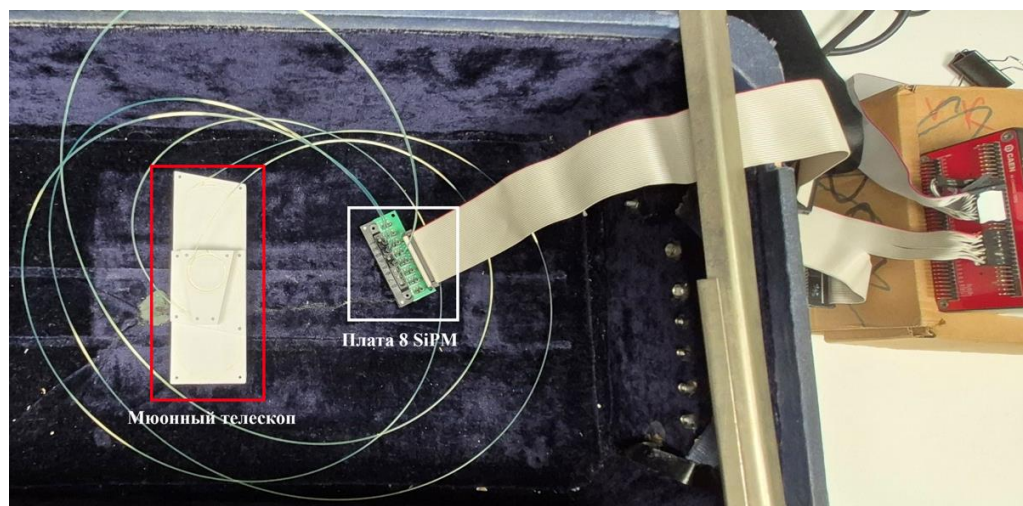


Рисунок 4.7 – Принципиальная схема и фотография экспериментальной установки мюонного телескопа

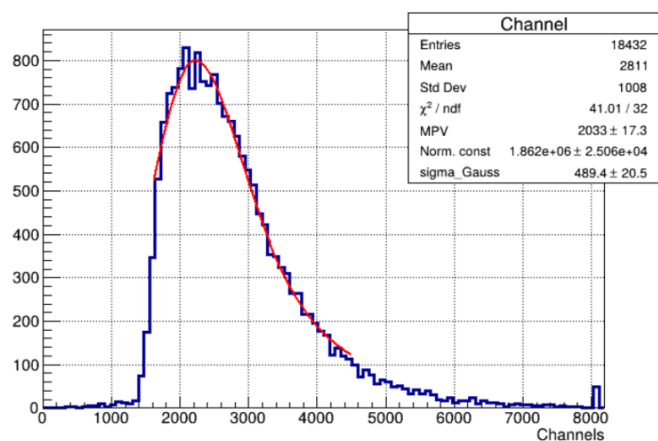
В качестве фотодетектора использовалась печатная плата с восемью кремниевыми фотоумножителями (*SenceL Onsemi C-Series*). Сигнал обрабатывался при помощи системы считывания *CAEN FERS-5200*.

Перед набором данных проводился подбор индивидуальных напряжений смещения для кремниевых фотоумножителей по методике, описанной в главе 3. Результаты подбора представлены в таблице 4.3.

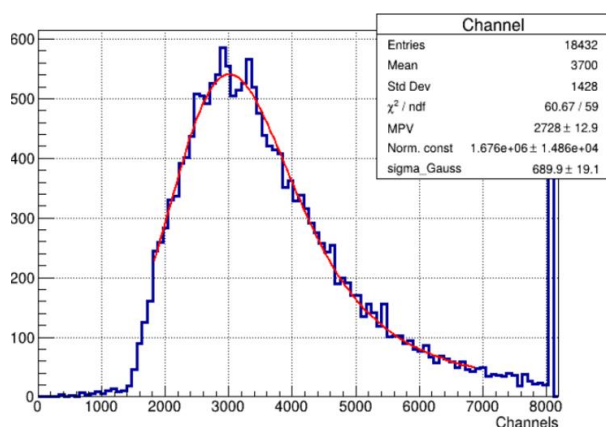
Таблица 4.3 – Индивидуальные напряжения смещения для *SiPM*

№ <i>SiPM</i> на плате	Напряжение смещения, В
1	29,7
2	29,9
3	30,0
4	29,8
5	29,7
6	29,7
7	29,8
8	29,7

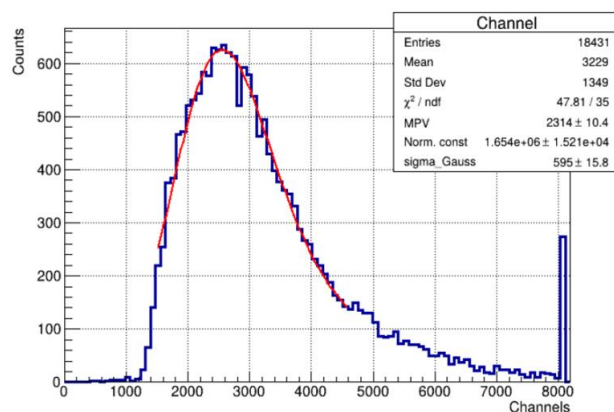
В результате набора данных были получены амплитудные спектры атмосферных мюонов для тайлов разной конфигурации. На рисунке 4.8 изображены спектры образцов с длиной *WLS*-волокна 132 см.



Тайл №1



Тайл №5



Тайл №14

Рисунок 4.8 – Пример спектров космических мюонов для тайлов различной конфигурации с длиной свободного конца *WLS*-волокна 132 см

Обработка спектров проводилась при помощи аппроксимации пика сложной функцией Ландау и Гаусса. Выбор такой свертки обусловлен тем, что сигнал от частицы *MIP*, прошедшей через тонкий сцинтиллятор, будет распределен по Ландау, но большая толщина тайла (1 см), эффекты геометрии и шумы электроники будут «размывать» этот сигнал распределением Гаусса. С помощью моделирования в *GEANT4* идеального распределения свертки Ландау и Гаусса была получена и зафиксирована ширина распределения Ландау (σ_{Landau}) для мюонов, падающих вертикально и под углами до 30° , а параметр ширины распределения Гаусса (σ_{Gauss}) определялся из экспериментально полученных спектров.

В результате аппроксимации пиков спектров космогенных мюонов для каждого образца были получены и переведены в фотоэлектроны наиболее вероятные значения (*most probable value*, *MPV*) распределения (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Световой отклик тайлов различной конфигурации

Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна: 4 см			Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна: 132 см		
Номер ряда тайла	<i>MPV</i> , каналы АЦП	Световой отклик, ф.э.	Номер ряда тайла	<i>MPV</i> , каналы АЦП	Световой отклик, ф.э.
2	2420	42	1	2314	20
4	1656	28	5	2728	23
5	1512	25	14	2033	18
14	1946	34			

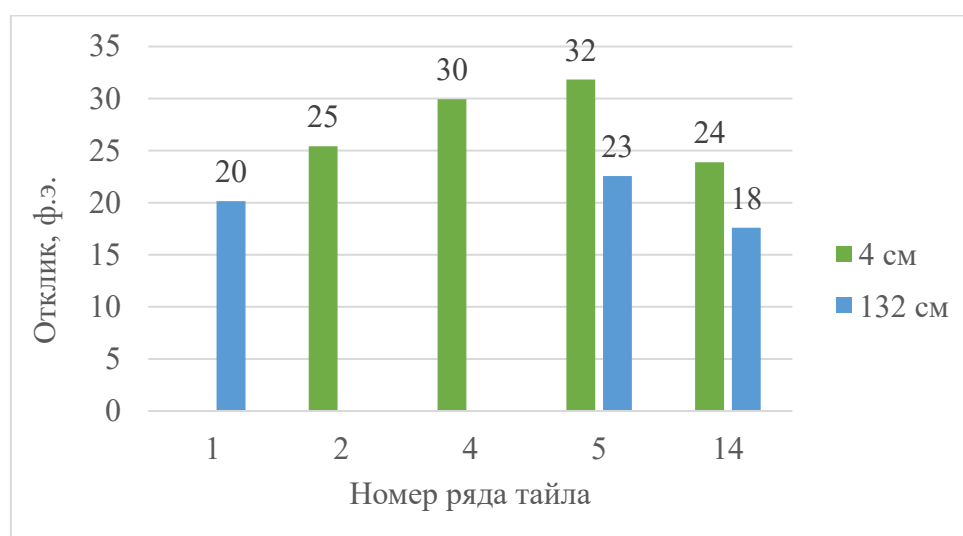


Рисунок 4.9 – Сравнение отклика тайлов различной конфигурации

В результате сравнения дублирующихся образцов (ряд 5 и 14) было выявлено уменьшение отклика на ~28% с увеличением длины свободного конца волокна. Среднее значение отклика для тайлов с длиной свободного конца *WLS*-волокна 4 см равно 28 фотоэлектронам, тогда как для длины волокна 132 см средний отклик равен 20 фотоэлектронам.

4.3 Оценка энергетического разрешения

Энергетическое разрешение рассчитывалось как отношение ширины гауссова пика на половине его высоты (ПШПВ) к наиболее вероятному значению потерь энергии:

$$\sigma_t = \frac{2,35 \cdot \sigma_{Gauss}}{MPV} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 4.4

Таблица 4.4 – Энергетическое разрешение тайлов различной конфигурации

Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна: 4 см		Длина свободного конца <i>WLS</i> -волокна: 132 см	
Номер ряда тайла	Энергетическое разрешение, %	Номер ряда тайла	Энергетическое разрешение, %
2	55	1	57
4	71	5	59
5	62	14	60
14	68		

Для тайлов с минимальной длиной свободного конца *WLS*-волокна энергетическое разрешение изменяется в диапазоне от 55% до 71%, тогда как для тайлов с длиной свободного конца 132 см разрешение ведет себя более стабильно, изменяясь от 57% до 60% (Рисунок 4.10).

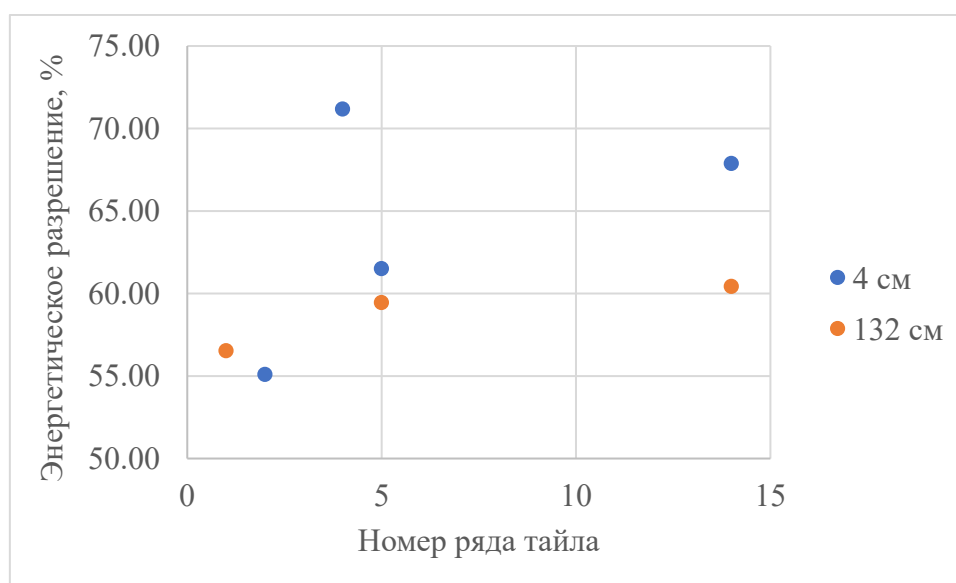


Рисунок 4.10 – Энергетическое разрешение тайлов различной конфигурации

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование светового отклика сцинтилляционных тайлов. По полученным результатам можно заключить следующее:

1. Калибровка многоканальной системы считывания *CAEN FERS-5200* показала, что 64 канала модуля имеют разброс коэффициента преобразования входного напряжения в цифровой код. Также при подробной калибровке одного канала было получено, что нелинейность шкалы практически отсутствует при максимальном коэффициенте усиления, что обусловило выбор режима работы с коэффициентом усиления 60 для дальнейших измерений.
2. Исследование показало, что с увеличением числа витков внутри тайла до 3 – 4 эффективность светового отклика увеличивается в $\sim 1,9$ раз относительно 1 – 2 витков. При дальнейшем увеличении числа витков до 5 – 6 рост сигнала становится менее выраженным (увеличивается в $\sim 1,2$ раз), что может свидетельствовать о приближении к области насыщения и увеличению потерь. Увеличение расстояния *WLS*-волокна между тайлом и *SiPM* не повлияло на характер зависимости. Оценка среднего временного разрешения: $\sigma_t = (355 + 3)$ пс.
3. Измерение с тайлами из разных рядов на мюонном телескопе показало, что с увеличением длины свободного конца волокна с 4 см до 132 см отклик снижается примерно на 28%. Средний отклик для свободного конца 4 см составил ~ 28 фотоэлектронов, а для 132 см 20 фотоэлектронов. В обоих случаях полученные отклики превышают минимально необходимой порог регистрации равный ~ 10 фотоэлектронам.
4. Для тайлов с минимальной длиной свободного конца *WLS*-волокна энергетическое разрешение изменяется в диапазоне от 55% до 71%, тогда как для тайлов с длиной свободного конца 132 см разрешение ведет себя более стабильно, изменяясь от 57% до 60%.

Таким образом, были экспериментально оценены ожидаемые отклики для тайлов детектора *BBC*. Выявлены оптимальные параметры конфигурации тайлов: 3 – 4 витка *WLS*-волокна внутри сцинтиллятора и минимально возможная свободная длина оптоволокна. Полученные результаты подтверждают и обосновывают правильность выбора конфигурации элементов детектора *BBC SPD*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The SPD Collaboration. Technical Design Report of the Spin Physics Detector at NICA. Natural Science Review 1 – 325 (2024).
2. Wilkin C. The legacy of the experimental hadron physics programme at COSY // The European Physical Journal A. – 2017. – Vol. 53, No. 6. – P. 114. – DOI: 10.1140/epja/i2017-12314-8.
3. Lehar F. Nucleon nucleon scattering experiments at SATURNE II // AIP Conference Proceedings. – 1983. – Vol. 95, No. 1. – P. 187–192.
4. The CMS Collaboration. Search for physics beyond the standard model in dilepton mass spectra in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 8$ TeV // Journal of High Energy Physics. – 2015. – Vol. 04. – Art. No. 025. – DOI: 10.1007/JHEP04(2015)025.
5. The SPD Beam-Beam Counter Scintillation Detector Prototype Tests with FERS-5200 Front-End Readout System / A.V. Tishevsky [et al.] // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2024. – Vol. 21, №4. – C. 723–726.
6. Material Selection of the SPD Beam-Beam Counter Scintillation Detector Prototype / A.M. Zakharov [et al.] // Physics of Particles and Nuclei. – 2024. – Vol. 55, №4. – C. 1091–1098.
7. Study of Wave Length Shifters for SPD BBC Scintillation Tiles Readout / F. A. Dubinin [et al.] // Physics of Atomic Nuclei. – 2025. – Vol.88, №2. – C. 312–316.
8. Прототип сцинтилляционного детектора для расширенной версии подсистемы BBC в детекторе SPD / А. В. Тишевский [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. – 2025. – № Т. 22, № 5(262). – С. 1059–1063.
9. High efficiency plastic scintillator detector with wavelength-shifting fiber readout for the GLAST Large Area Telescope / A.A. Moiseev [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2007. – № 583. – C. 372–381.
10. Study of light yield for different configurations of plastic scintillators and wavelength shifting fibers / Z. Zong [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2018. – Vol. 908. – C. 82-90.
11. Study of scintillator strip with wavelength shifting fiber and silicon photomultiplier / V. Balagura [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2006. – №564. – C. 590–596.

12. Detection of Light Pulses Using an Avalanche-Photodiode Array with a Metal–Resistor–Semiconductor Structure / A.V. Akindinov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. – 2005. – Vol. 48, №3. – С. 90–98.
13. The WLS Fiber Time Properties Study [Электронный ресурс] / V. Brekhovskikh [et al.] – Geneva: CERN, 2000. – 9 p. – (LHCb; 2000-039). – URL: <https://cds.cern.ch/record/687443> (дата обращения: 10.05.2026).
14. Fiber Product Sheet [Электронный ресурс]. – Luxium Solutions, 2021. – URL: <https://luxiumsolutions.com/sites/default/files/2021-11/Fiber-Product-Sheet.pdf> (дата обращения: 18.06.2026).
15. Silicon Photomultipliers (SiPM), Low-Noise, Blue-Sensitive C-Series SiPM Sensors: data sheet [Электронный ресурс]. – Phoenix: onsemi, 2022. – 16 p. – (MICROC-SERIES/D). – URL: <https://www.onsemi.com/products/sensors/silicon-photomultipliers-sipm/c-series-sipm-sensors> (дата обращения: 16.05.2026).
16. Prototype of a cosmic muon detection system based on scintillation counters with MRS APD light readout / A. Akindinov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2005. – Vol. 555. – С. 65–71.
17. Scintillation counter with MRS APD light readout / A.V. Akindinov [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2005. – Vol. 539, №1–2. – С. 172–176.
18. Extruded plastic counters with WLS fiber readout / Yu.G.Kudenko [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2001. – №469. – С. 340–346.
19. S. Piatek What is an SiPM and how does it work? [Электронный ресурс]. – Hamamatsu Photonics, 2016. – URL: <https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/what-is-an-SiPM-and-how-does-it-work.html> (дата обращения: 18.06.2026).
20. CAEN.FERS-5200 Front-End Readout System. – Italy. – Accessed: 2023-10 20.