

Федеральное государственное автономное учреждение
высшего образования
«Национальный исследовательский ядерный университет
«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

**ОТЧЁТ
О ВЫПОЛНЕНИИ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ**

**Измерение временного разрешения двухканальной сцинтилляционной
детекторной системы на основе кремниевых фотоумножителей.**

Научный руководитель
_____ Н. С. Бойко
Выполнила
_____ К.А. Талалай

Москва 2026

Содержание

1	Введение	2
1.1	Задачи работы	2
2	Теоретическая часть	3
2.1	Ортопозитроний и парапозитроний	3
2.2	Позитронно-аннигиляционная спектроскопия методом регистрации времени жизни позитрония	3
2.3	Основные характеристики детекторов	4
2.3.1	Временные измерения	4
2.3.2	Факторы, определяющие точность временных измерений	5
2.3.3	Кремниевые фотоумножители (SiPM)	6
2.3.4	МКП	7
2.3.5	ФЭУ МКП	7
2.3.6	TDC	8
3	Измерение временного разрешения SiPM и ФЭУ МКП	9
3.1	Схема экспериментальной установки	9
3.2	Анализ результатов	11
4	Заключение	14

1 Введение

Новое поколение полупроводниковых фотодетекторов появилось благодаря исследованиям лавинных процессов в структурах типа металл- диэлектрик-полупроводник (МДП), проводившимся в ФИАНе под руководством В. Шубина с середины 1970-х годов. По базовому принципу работы эти МДП-фотоприемники компактны и обладают большой эффективностью регистрации. Наиболее популярным полупроводниковым фотодетектором нового поколения является разработанный Б. А. Долгошеиным кремниевый фотоумножитель (SiPM). Помимо ключевой возможности регистрации многофотонных световых импульсов с разрешением на уровне отдельных фотонов основными преимуществами SiPM по сравнению с классическим ФЭУ являются:

- небольшое рабочее напряжение
- слабая чувствительность к внешним ЭМ полями
- слабо варьируемый отклик, линейный по отношению к числу зарегистрированных фотонов
- высокое временное разрешение

В настоящее время кремниевые фотоумножители нашли широкое применение в традиционных для ФЭУ сферах - позитронноэмиссионной томографии и калометрии, в частности, сцинтилляционных детекторах, где особенно актуальна необходимость пофотонной регистрации излучения сцинтилляторов.

Детекторная система, над которой мы работаем направлена на изучение состава вещества для измерения времени жизни позитрония методом позитронно-аннигиляционной спектроскопии.

Позитронно-аннигиляционная спектроскопия (ПАС) является одним из наиболее информативных методов исследования электронной структуры и состава вещества. Особый интерес представляет метод регистрации времени жизни позитрония (Ps), который позволяет изучать свойства материалов, включая пористость, концентрацию и характер взаимодействия позитрония с окружающей средой. Ключевым требованием для реализации данного метода является наличие детекторной системы с высоким временным разрешением, необходимой для разделения событий аннигиляции пара- и ортопозитрония, времена жизни которых составляют 125 пс и 142 нс в вакууме соответственно.

1.1 Задачи работы

1. Сборка экспериментальной установки на основе двух кремниевых фотоумножителей и полистирольного сцинтилляционного световода;
2. Проведение калибровки экспериментальной установки и системы регистрации сигналов;
3. Измерение разности времен прихода сигналов с двух фотоприемников и определение временного разрешения системы;
4. Оценка пространственного разрешения координаты взаимодействия частицы по разности времен регистрации сигналов при помощи ВЦП.

2 Теоретическая часть

2.1 Ортопозитроний и парапозитроний

Позитроний — квантовомеханическая система, состоящая из электрона и позитрона. В зависимости от взаимного направления спинов электрона и позитрона различают ортопозитроний (спины сонаправлены, суммарный спин $S = 1$) и парапозитроний (спины противоположно направлены, суммарный спин $S = 0$). Позитроний, как и атом водорода, представляет собой систему двух тел. Он был впервые экспериментально идентифицирован в 1951 году Мартином Дойчем, хотя его существование предсказал ещё в 1934 году Степан Мохорович.

2.2 Позитронно-аннигиляционная спектроскопия методом регистрации времени жизни позитрония

Позитронная аннигиляционная спектроскопия (ПАС) является современным методом изучения структуры вещества. Её суть состоит в имплантации в исследуемый образец позитронов, образующихся в результате β^+ распада источника (как правило, ядер изотопов ^{22}Na , ^{64}Cu , ^{58}Co , ^{44}Tl), и последующей регистрации характеристического аннигиляционного излучения.

Существуют разные методы ПАС:

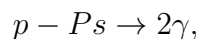
1. Метод временного распределения аннигиляционных фотонов (ВРАФ). Основан на измерении временного интервала между регистрацией «стартового» гамма-кванта, испускаемого радиоактивным ядром и одного из аннигиляционных фотонов с энергией 0,511 МэВ. Метод дает сведения о количестве электронов в месте аннигиляции позитрона.
2. Метод углового распределения аннигиляционных фотонов (УРАФ). Основан на регистрации совпадений от двух гамма-квантов с энергией около 0,511 МэВ, возникающих при аннигиляции электрон-позитронных пар и разлетающихся в противоположные стороны в системе центра масс пары.
3. Метод доплеровского уширения аннигиляционной линии (ДУАЛ). Основан на измерении распределения энергии аннигиляционных фотонов с помощью эффекта Доплера. Из-за эффекта Доплера при увеличении скорости аннигилирующей пары происходит уширение распределения энергий аннигиляционных фотонов. Метод позволяет получить информацию о распределении импульсов электронов в веществе, а также о химическом составе материала.
4. Метод регистрации времени жизни позитрония.

Детекторная система, над которой мы работаем направлена на изучение состава вещества с помощью позитронно-аннигиляционной спектроскопии методом регистрации времени жизни позитрония. Позитроны широко используются для медицинской визуализации, например, в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) для исследования пространственного распределения лекарственных препаратов, меченых позитрон-излучающими изотопами, в теле человека или веществе. Во время ПЭТ-сканирования пациент окружён детекторами гамма-излучения, возникающего при аннигиляции пары позитрон-электрон. Некоторые позитроны аннигилируют после образования позитрония (Ps). Энергичный позитрон испускается изотопом и быстро теряет свою кинетическую энергию в веществе в пределах нескольких миллиметров и нескольких пикосекунд через взаимодействия с окружающими

молекулами. В процессе этого взаимодействия некоторые позитроны захватывают электрон у этих молекул, образуя Ps (позитроний), тогда как другие аннигилируют на лету без образования позитрония, сталкиваясь с электроном.

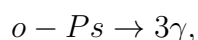
Полный спин (S) системы может быть 1 или 0, так как и позитрон, и электрон имеют спин $1/2$. Состояние с параллельными спинами, $S = 1$, называется ортопозитронием (o-Ps), а состояние с антипараллельными спинами, $S = 0$, — парапозитронием (p-Ps). Соотношение образования p-Ps и o-Ps составляет 1:3. Время жизни o-Ps составляет 142 нс, а p-Ps 125 пкс в вакууме.

p-Ps спонтанно распадается на два фотона:



Энергия излучения распределена в виде линейчатого спектра при 511 кэВ, соответствующего массе покоя позитрона/электрона.

В отличие от этого, o-Ps спонтанно распадается на три фотона:



Энергия распределена в непрерывном спектре от 0 до 511 кэВ. Каждый o-Ps обладает короткой, но важной историей взаимодействия с веществом до аннигиляции, потому что скорость распада достаточно мала, чтобы o-Ps многократно успел провзаимодействовать с окружающими молекулами, и в результате время жизни o-Ps в среде, отличной от вакуума, сокращается. (o-Ps может перейти в p-Ps, следовательно время жизни сократится).

Таким образом, мы можем исследовать структуру и состав исследуемого материала, измеряя время жизни позитрония. Уменьшение времени жизни происходит за счёт двух типов реакций с молекулами:

1. Pick-off аннигиляция – позитрон из Ps аннигилирует с чужим электроном в молекуле (например, с электроном воды).
2. Спин-обменное взаимодействие — только когда окружающие молекулы обладают неспаренным электроном (парамагнитны), например, молекулярный кислород O_2 . В этом случае происходит конверсия o-Ps \rightarrow p-Ps, который затем быстро аннигилирует с испусканием двух фотонов. Скорость спин-обмена примерно на два порядка выше, чем у pick-off аннигиляции. Поэтому o-Ps сильно чувствителен к O_2 .

Для измерения времени жизни o-Ps необходимы два сигнала на каждый акт аннигиляции: стартовый (время испускания позитрона) и стоповый (время аннигиляции). Стартовый сигнал можно получить от «мгновенного» гамма-кванта, испускаемого сразу после $+$ -распада.

2.3 Основные характеристики детекторов

Для того, чтобы измерять времена жизни позитрония, нам нужно собрать детектор с наилучшим временным разрешением (170 пс).

Одним из важных характеристик детекторов является Эффективность регистрации, временное, пространственное и энергетическое разрешение. Также мертвое время и время восстановления

2.3.1 Временные измерения

В экспериментальной ядерной физике и во многих прикладных задачах часто возникает необходимость в нахождении временных корреляций между двумя или многими

событиями. В некоторых исследованиях определяется одновременность появления или не появления нескольких событий. Для этого применяют методы совпадений и антисовпадений, служащих для выделения и регистрации частиц в пространстве и во времени.

2.3.2 Факторы, определяющие точность временных измерений

Точность временных измерений определяется как электронными методами и приборами, так и датчиками временной информации — детекторами. Форма сигналов детекторов зависит от места попадания частицы или кванта в детекторе, типа излучения и т. д. Обратим внимание на рис.1

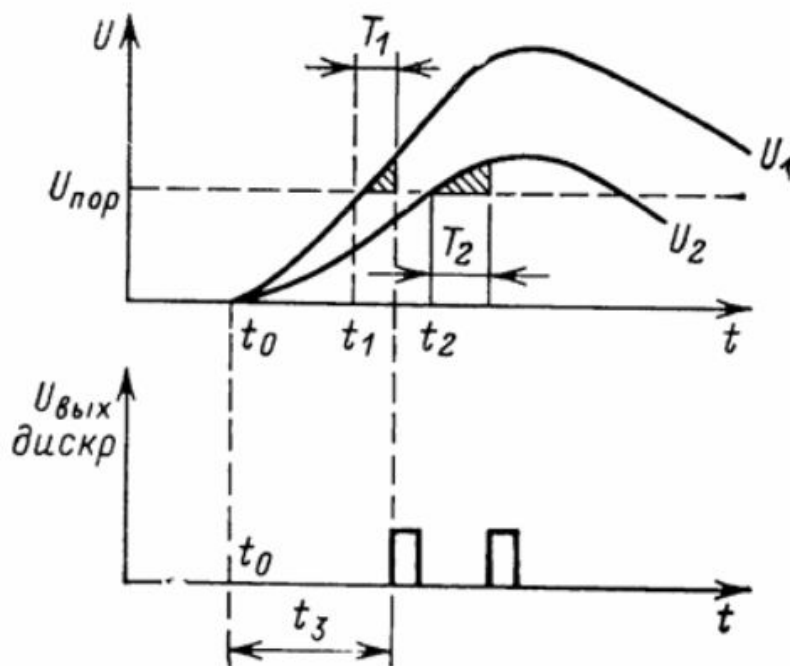


Рис. 1: Форма импульса детектора и срабатывание дискриминатора

Дрейф — это медленное изменение задержки из-за того, что со временем меняются параметры детектора или электроники. Обычно это связано с температурой. Дрейф заметен, когда мы измеряем большие интервалы времени, но для коротких интервалов он не страшен.

Размытие, или «гуляние», возникает из-за того, что сигналы с детектора бывают разной амплитуды. Чем больше амплитуда, тем раньше сигнал переходит через порог и тем раньше сработает дискриминатор. Поэтому от больших импульсов задержка получается короче, чем от маленьких. Влияние амплитудного разброса показано на рис. 1. От импульсов большей амплитуды дискриминатор срабатывает раньше t_1 , чем от импульсов меньшей амплитуды t_2 . Наблюдаемое размытие больше для сигналов, амплитуды которых близки к порогу срабатывания дискриминатора. Амплитудный разброс приводит также к размытию, связанному с зарядовой чувствительностью дискриминаторов. Вызываемая этим эффектом временная задержка больше для импульсов меньших амплитуд ($T_2 > T_1$). Задержки, связанные с амплитудным разбросом и зарядовой чувствительностью дискриминаторов, складываются и определяют момент привязки.

Временной статистический разброс (джиттер) вызывается шумами и процессом образования выходного сигнала. Источник шумов может быть как в самом детекторе, так и в усилительной схеме. Влияние шумов особенно заметно в полупроводниковых детекто-

рах. Шум, приведенный ко входу дискриминатора, создает как бы «уширение» сигнала (рис. 2).

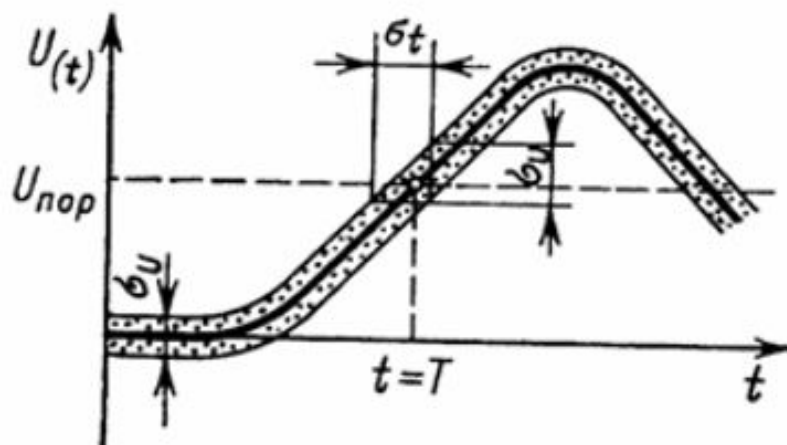


Рис. 2: Уширение сигнала из-за шумов (джиттер)

2.3.3 Кремниевые фотоумножители (SiPM)

Кремниевый фотоумножитель (SiPM) — это твердотельное устройство, способное обнаруживать одиночные фотоны благодаря своему очень высокому внутреннему коэффициенту усиления. На рис.2 ниже приведен кремниевый фотоумножитель.

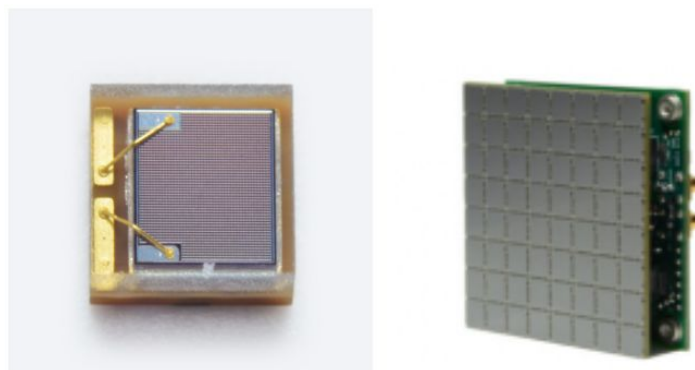


Рис. 3: Кремниевый фотоумножитель

Основные характеристики кремниевого фотоумножителя:

1. PDE (Photon Detection Efficiency) - это мера чувствительности датчика, которая определяет, насколько эффективно прибор фиксирует фотоны.
2. Усиление (gain) - это процесс, при котором энергия фотонов преобразуется в электрический сигнал.
3. Одним из важных параметров SiPM является скорость темнового счета (DCR), понимаемая как количество ложных срабатываний ячеек детектора на единицу эффективной площади. Происходит из-за тепловой генерации электронов в активной области кремния.

4. Перекрёстные срабатывания (crosstalk) - эффект, при котором фотоны, генерируемые в процессе лавинного умножения, распространяются к другим микроячейкам и вызывают дополнительные лавины в них.
5. Послеимпульсы (afterpulsing) - скорректированные по времени случайные срабатывания.

Преимущества кремниевых фотоумножителей в сравнении с вакуумными: возможность регистрации много фотонных световых импульсов с разрешением на уровне отдельных фотонов, небольшое рабочее напряжение, слабая чувствительность к внешним электрическим полям, высокое временное разрешение.

Недостатками кремниевых фотоумножителей является: чувствительность к температурным флуктуациям окружающей среды, наличие перекрестных помех, послеимпульсов и малая фоточувствительная площадь.

2.3.4 МКП

Микроканальные пластины (МКП) — это электронные устройства, предназначенные для детектирования и усиления заряженных частиц и излучений. Они работают на основе принципа лавинного умножения электронов вторичной эмиссии внутри множества микроскопических каналов.

МКП представляет собой сотовую структуру, образованную большим числом стеклянных каналов (трубок) диаметром 5–15 мкм. Внутренняя поверхность каналов покрыта полупроводниковым слоем с определённым электрическим сопротивлением (от 20 до 1000 МОм). МКП покрывают таким слоем для того, чтобы:

1. Обеспечение вторичной эмиссии: При попадании первичного электрона (или фотона) на стенку канала из полупроводникового слоя выбивается несколько вторичных электронов.
2. Создание продольного ускоряющего поля: Чтобы направить электроны вдоль канала и придать им энергию, необходимую для выбивания новых вторичных электронов, между входом и выходом МКП подается высокое напряжение.
3. Восстановление заряда: После того как вторичные электроны покинули стенку, на ней остается положительный заряд. Через полупроводящий слой к стенке МКП постепенно подводится ток от внешнего источника напряжения, нейтрализуя заряд и восстанавливая способность к эмиссии для следующего события.

Когда гамма-квант проходит через фотокатод, он выбивает фотоэлектроны, которые направляются к МКП. К торцам пластины (металлизированным поверхностям) прикладывается высокое напряжение. Это создаёт осевое электрическое поле вдоль каналов. Когда заряженная частица попадает в канал, она сталкивается со стенкой, выбивая при этом один или несколько электронов. Электрическое поле ускоряет выбитые электроны в осевом направлении. Двигаясь одновременно под воздействием начальной скорости, они ударяются о стенки канала, вызывая появление новых вторичных электронов. Процесс повторяется многократно по мере движения вдоль канала. В результате на его выходе формируется электронная лавина.

2.3.5 ФЭУ МКП

ФЭУ с МКП — это фотоэлектронный умножитель (ФЭУ), в котором в качестве умножающего элемента используются микроканальные пластины. Такие устройства при-

меняются для регистрации слабых световых сигналов, счёта фотонов, а также в детекторах в физике высоких энергий, ядерной физике, сцинтилляционных и черенковских детекторах. ФЭУ на МКП в основном состоит из фотокатода, МКП умножения и анода. Система умножения содержит одну или несколько МКП. Усиленный электронный сигнал будет получен анодом и выведен по линии сигнала.

2.3.6 TDC

ВЦП — это время-цифровой преобразователь с общим стартом. Он регистрирует разницу во времени между передним или задним фронтом на входе старта и передними или задними фронтами стоп-входов (называемыми временными метками). TDC формирует поток выходных пакетов, каждый из которых содержит данные об одном событии запуска. Относительные временные метки всех стоп-импульсов, возникающих в пределах настраиваемого диапазона, группируются в один пакет. В эксперименте использовался 4-канальный TDC с временным разрешением 8 пс.

Мертвое время: 250 нс.



Рис. 4: TDC

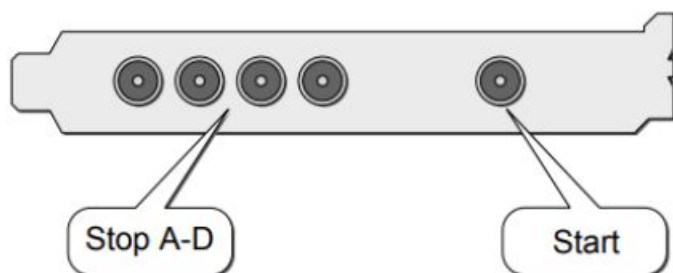


Рис. 5: Каналы TDC, на которые поступают сигналы с SiPM

Чтобы измерять все сигналы с максимальным разрешением, они должны удовлетворять критериям:

1. Короткие импульсы: Для надежного обнаружения срабатываний сигнал должен быть стабильным не менее 900 пс до и после измеряемого фронта.
2. Близкие срабатывания: Для полного разрешения между несколькими срабатываниями на стоп-канале требуется мёртвое время примерно 5 нс.

3 Измерение временного разрешения SiPM и ФЭУ МКП

В данной работе проводились измерения временного и пространственного разрешения SiPM и ФЭУ МКП.

3.1 Схема экспериментальной установки

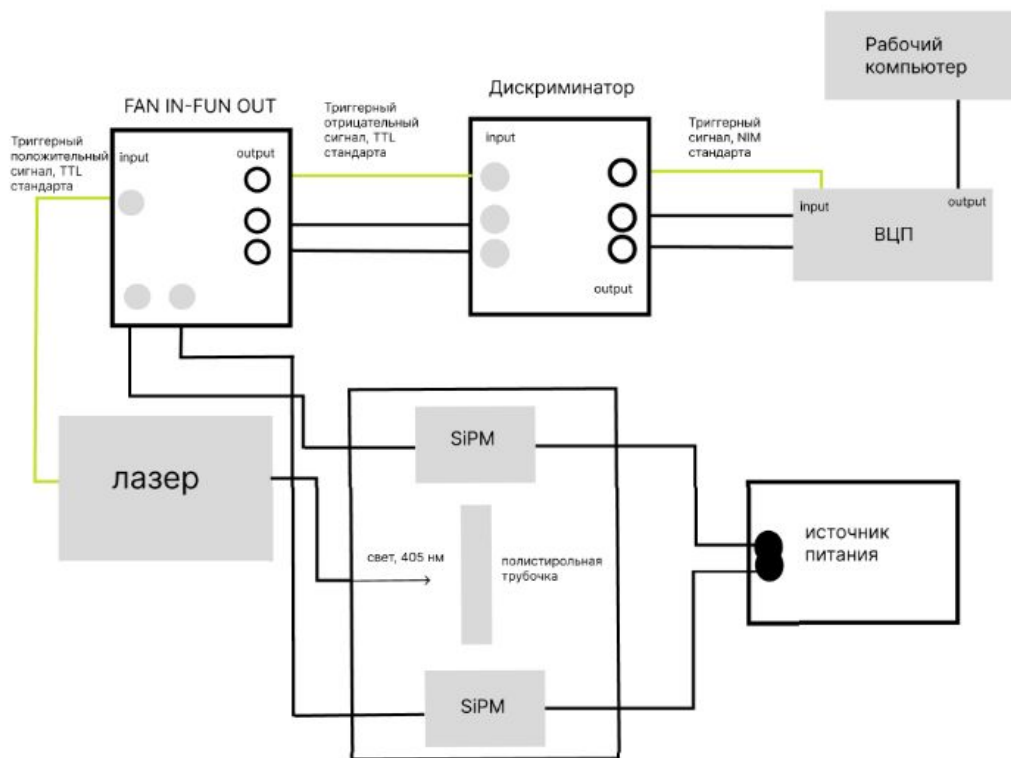


Рис. 6: Схема экспериментальной установки

Триггерный положительный сигнал TTL стандарта поступает с лазера на FAN-IN-FAN-OUT, чтобы инвертировать сигнал, так как дискриминатор принимает только отрицательные сигналы. Далее отрицательный сигнал поступает на дискриминатор и преобразует его в сигнал стандарта NIM, так как ВЦП (TDC) может принимать только сигналы стандарта NIM (отрицательный сигнал). Одновременно с этим лазер по оптоволокну передает свет на полистирольную трубочку. По трубочке свет поступает на SiPM, которые находятся на разных концах от этой трубочки на одном расстоянии друг от друга. Сигналы от SiPM поступают на FAN-IN-FAN-OUT, он их инвертирует, далее сигнал поступает дискриминатору на вход. С выхода дискриминатора сигналы поступают на ВЦП и передаются на рабочий компьютер в определенную программу, которая далее построит и профитирует гистограммы. Из этих данных нам необходимо взять сигму и мю, чтобы посчитать ПШПВ - (полная ширина на половине высоты) — это мера ширины пика в спектре после исключения фоновой составляющей. Её определяют как полную ширину пика, измеренную на уровне, составляющем половину его максимальной высоты - в нашем случае временное разрешение.

Каждое новое измерение делаем с изменением положения лазера. На ВЦП приходит сигнал от двух SiPM и именно разницу времени, за которое пришел свет от места свечения до кремниевых фотоумножителей, можно увидеть на гистограмме.

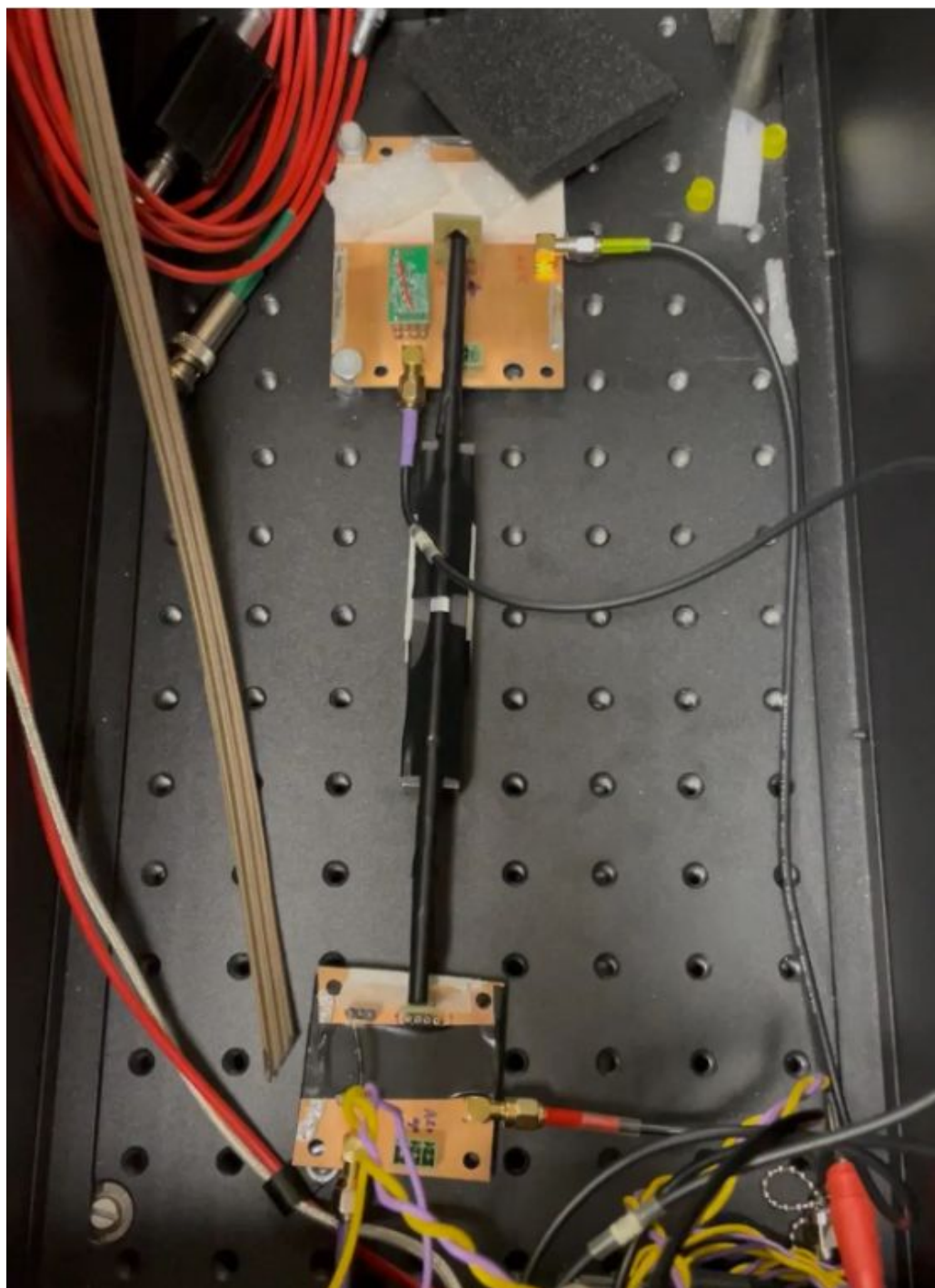


Рис. 7: Детали установки (продолжение)

3.2 Анализ результатов

Временная гистограмма (разница времени двух сигналов). Получившиеся гистограммы фиттируем по Гауссу и получаем математическое ожидание и стандартное отклонение.

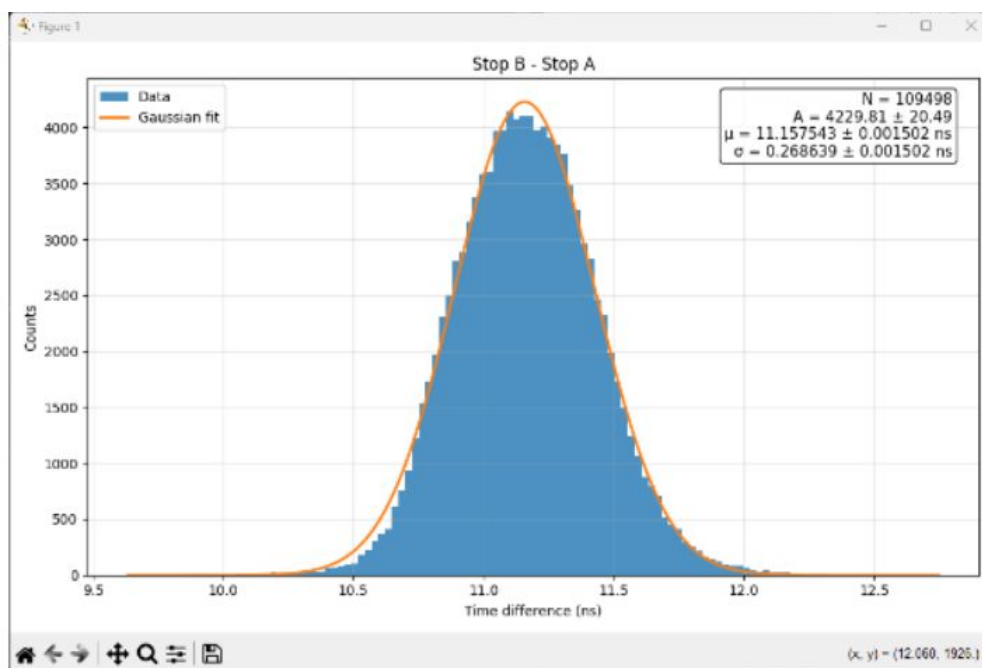


Рис. 8: Временная гистограмма и Гауссов фит

Были построены графики зависимости математического ожидания от положения источника света. Графики построены для SiPM и для ФЭУ МКП. Детектор будет построен на основе SiPM, поэтому проводим эксперименты на них, но так как ФЭУ МКП обладают лучшим временным разрешением можно сравнить результаты. На ВЦП приходило два временных сигнала от SiPM, которые находятся напротив друг друга. Так как скорость в трубочке одинаковая, а расстояние до SiPM изменялось, менялось и время прохождения от положения источника света до SiPM. Следовательно, на ВЦП проходят разные временные сигналы, которые вычитаются. То есть математическое ожидание - разница временных сигналов. То есть, график имеет верную форму. Коэффициент наклона отрицательный на графике с SiPM, так как вычитаются каналы наоборот.

PMT-MCP 30

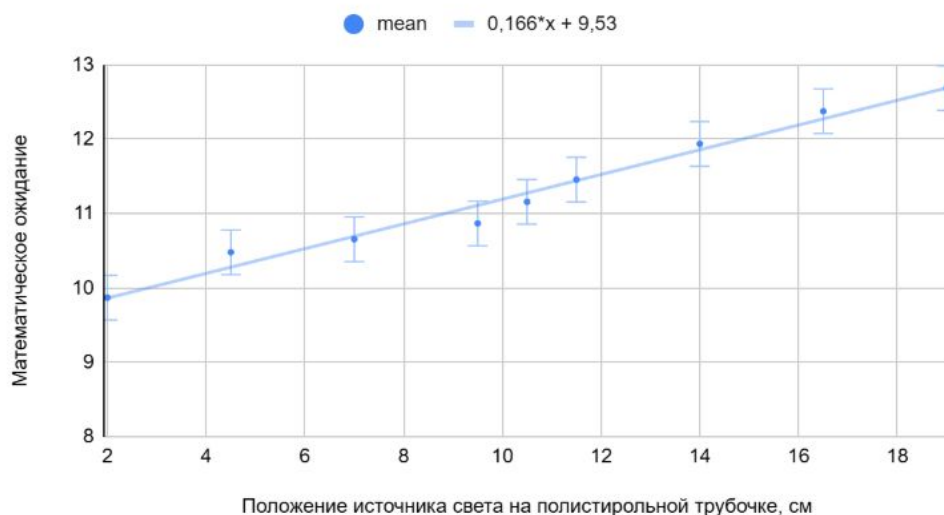


Рис. 9: Зависимость математического ожидания от положения источника света на полистирольной трубке

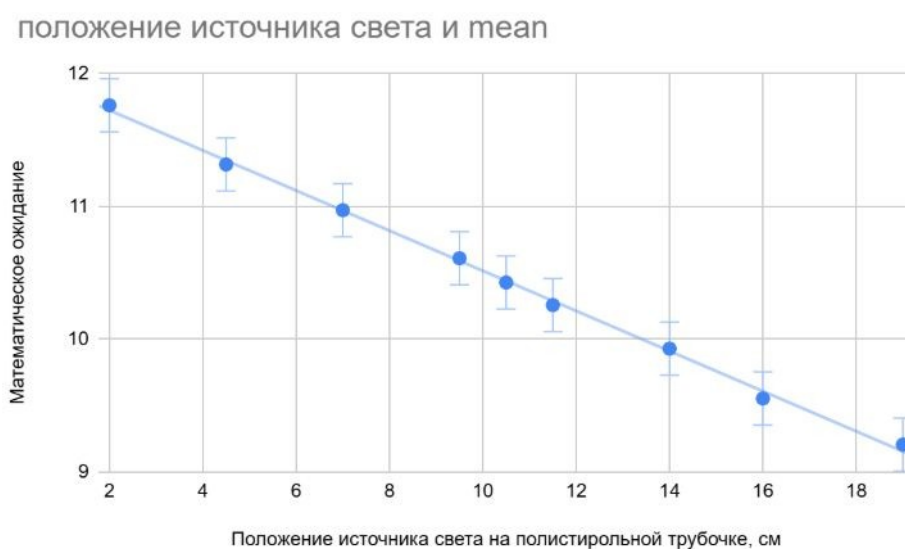


Рис. 10: Зависимость математического ожидания от положения источника света на полистирольной трубке

Также был построен график зависимости временного разрешения от положения источника света. Эксперимент был проведен впервые. На полистирольной трубке неравномерно были открыты сечения, а также установка была неустойчива. Это все внесло большой вклад в пространственное разрешение.

ПШПВ и положение источника света

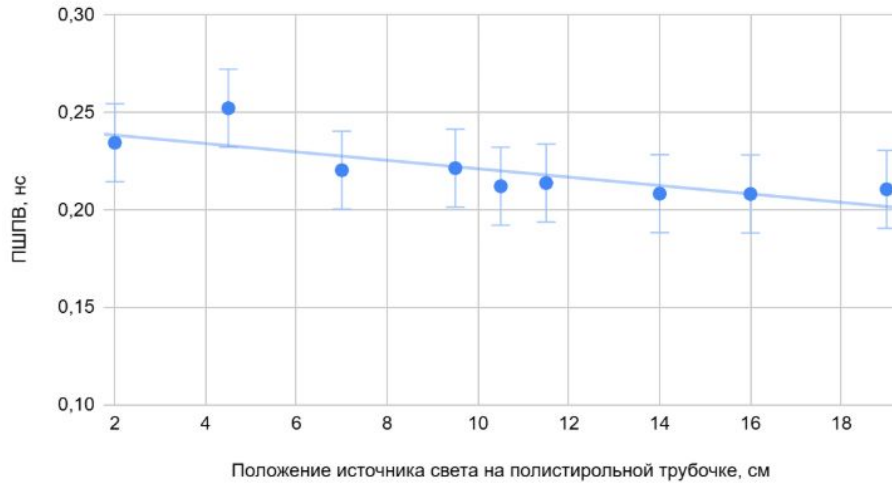


Рис. 11: Зависимость временного разрешения (ПШПВ) от положения источника света на полистирольной трубочке

ПШПВ_{ср} = 220пс,
ПШПВ_{мах.откл} = 252пс,
ПШПВ_{лучш} = 208 пс,
Разлет составляет 44пс
R = 21см
R - пространственное разрешение,
ПШПВ МКП_{лучш} = 100пс

Вклад в ПШПВ внесли:

- Источник света ~ 2%
- ВЦП ~ 4%
- SiPM ~ 45%

4 Заключение

В ходе выполнения работы была собрана и откалибрована экспериментальная установка для измерения временного разрешения двух типов фотодетекторов — кремниевое фотоумножителя (SiPM) и фотоэлектронного умножителя на основе микроканальной пластины (ФЭУ МКП). Эксперимент проводился с использованием полистирольного трубочки, лазера и 4-канального время-цифрового преобразователя (TDC). Все измерения проводились в идентичных условиях регистрации световых импульсов, распространяющихся вдоль трубочки. На основании полученных результатов можно сделать следующие основные выводы:

1. Оценка временного разрешения. Среднее временное разрешение (ПШПВ – полная ширина на половине высоты) для SiPM составило 220 пс, минимальное достигнутое значение – 208 пс, максимальное отклонение – 252 пс. Для ФЭУ МКП наилучшее зафиксированное временное разрешение составило 100 пс, что значительно превосходит характеристики SiPM.
2. Пространственное разрешение. Экспериментально оцененное пространственное разрешение (R) системы на основе SiPM составило 21 см. Большое значение обусловлено, в первую очередь, конструктивными особенностями установки: неравномерным открытием сечений на полистирольной трубочке, недостаточной механической стабильностью.
3. Пространственное разрешение к которому мы стремимся составляет $\sim 1 - 2$ мм. Мы учли ошибки, которые внесли наибольший вклад в измерения.

Список литературы

- [1] Цитович А.П., Ядерная электроника: учебное пособие для вузов/ М.: Энергоатомиздат, 1984-408с.
- [2] Кафедра физики твердого тела и наносистем. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ОСНОВАМ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ. Национальный Исследовательский Ядерный университет «МИФИ», 2022 URL:<https://kaf70.mephi.ru>
- [3] Slawomir Piatek, How does temperature affect the performance of an SiPM?//January 4, 2017
- [4] INSCIENSE[Электронный ресурс]. URL:<https://inscience.ru>
- [5] Азимут Фотоникс[Электронный ресурс]. URL:<https://azimp.ru>
- [6] Долгошеин Б.а., Каракаш А.и., Каплин В.а. и др. Временное разрешение кремниевых фотоумножителей (sipm) и их возможное применение в tof измерениях // Научная сессия МИФИ-2006.
- [7] Степанов, Ю. М. Экспериментальные методы ядерной физики. Часть 1. Учебное пособие. Издательство Томского политехнического университета, 2010.
- [8] Фано, У., Фано, Л. Физика атомов и молекул. Пер. с англ. / Под ред. Пономарева, Л. И. М.: Наука, 1980.

- [9] Самедов, В. В. Собственное энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора. НИЯУ МИФИ.
- [10] Абрамов, А. И., Казанский, Ю. А., Матусевич, Е. С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. 1985.
- [11] Шендрик, Р. Ю. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния. Введение в физику сцинтилляторов. Часть 1. Иркутск, 2013.
- [12] А.А. Богданов. Температурная зависимость чувствительности кремниевых фотоумножителей в режиме пофотонной регистрации ультрафиолетового излучения. 2020.
- [13] Свэнк, Р. К. Характеристики сцинтилляторов. Успехи физических наук, 1956, Т. LVIII, вып. 3.