

Федеральное государственное автономное учреждение

высшего образования

«Национальный исследовательский ядерный университет

«МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

ОТЧЁТ

**О ВЫПОЛНЕНИИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЫ**

**Измерение зависимостей характеристик кремниевых
фотоумножителей от температуры**

Научный руководитель

_____ Н. С. Бойко

Выполнила

_____ К.А. Талалай

Москва 2025

Оглавление

0. Введение.....	2
1. Теоретическая часть	4
1.1. Общие принципы регистрации элементарных частиц и γ -излучения.....	4
1.2. Основные типы детекторов: газовые, сцинтилляционные, полупроводниковые, черенковские.....	4
1.3. Основные характеристики детекторов.....	6
1.3.1. Временные измерения.....	6
1.3.2. Сцинтилляционные детекторы.....	6
1.3.3. Кремниевые фотоумножители (SiPM).....	6
1.4. Температурная зависимость характеристик SiPM.....	9
1.4.1. Физические причины температурной чувствительности	9
1.4.2. Параметры, зависящие от температуры.....	10
2. Измерение зависимости характеристик SiPM от температуры и напряжения	11
2.1 Схема экспериментальной установки.....	11
2.2 Полученные зарядовые спектры.....	13
2.3 Полученные графики.....	14
3. Заключение.....	18

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.

Для сборки детектора на основе кремниевых фотоумножителей (SiPM), предназначенного для высокоточных временных измерений, необходимо установить ключевые характеристики этих устройств, чтобы оценить их вклад в общее временное разрешение системы. Учитывая хорошо известную чувствительность полупроводниковых детекторов к температурным колебаниям окружающей среды, были проведены систематические исследования температурных зависимостей основных параметров SiPM. Данная работа актуальна в связи с необходимостью точного учета этих эффектов для оптимизации детекторных систем.

Цель: Определение зависимости кремниевых умножителей от температуры в контексте фундаментальных и прикладных задач по созданию детекторов физики элементарных частиц и ядерных излучений.

Задачи:

1. Сбор экспериментальной установки для получения однофотоэлектронных спектров и форм сигналов при различных температурных условиях окружающей среды;
2. Определение точки пробоя, расчет зависимости усиления от напряжения питания SiPM в различных температурных условиях окружающей среды;
3. Сравнение характеристик с и без использования дополнительных усилителей сигналов.

1.1. Общие принципы регистрации элементарных частиц и γ -излучения

Независимо от того, регистрируем ли мы частицы напрямую (заряженные частицы, такие как электроны, позитроны, мюоны и др.) или косвенно (нейтральные частицы, например нейтроны или нейтрино), в газовых или сцинтилляционных детекторах фактически фиксируется свет, генерируемый в результате ионизации или возбуждения среды заряженными частицами. Заряженная частица, двигаясь в нейтральной среде детектора, ионизирует и возбуждает атомы среды за счёт электромагнитного взаимодействия. Вдоль траектории частицы появляются свободные заряды (электроны и ионы) и возбуждённые атомы. При переходе возбуждённых атомов в исходное состояние излучаются фотоны, регистрируемые в виде световой вспышки.

Приборы, применяемые для регистрации частиц, делятся на две группы:

1. Приборы, которые регистрируют энергию частицы (сцинтилляционные, черенковские, газоразрядные счётчики; импульсные ионизационные камеры; полупроводниковые детекторы и др.);
2. Приборы, детектирующие следы (треки) частиц в веществе (камера Вильсона, диффузионная камера, пузырьковая камера, ядерные фотоэмulsionии и др.).

1.2. Основные типы детекторов: газовые, сцинтилляционные, полупроводниковые, черенковские

На регистрации свободных электронов и ионов основаны такие детекторы, как импульсная ионизационная камера, пропорциональный счётчик, газоразрядные счётчики Гейгера, полупроводниковые детекторы. Процесс ионизации применяется в трековых детекторах: камера Вильсона, пузырьковая камера.

На регистрации фотонов, испускаемых возбуждёнными атомами, основаны сцинтилляционные детекторы. В черенковских детекторах заряженная частица испытывает трение о среду, так как движется быстрее скорости света, и за счет трения рождается черенковский свет. Регистрируются световые вспышки, возникающие при прохождении быстрых частиц через

прозрачную среду. На выходе детекторов излучения формируются электрические сигналы, которые чаще всего пропорциональны интенсивности излучения или его спектральному составу.

Самым первым детектором была Камера Вильсона, затем в 1928 году появилась ионизационная камера Гейгера-Мюллера, основанная на измерении тока ионизации. В 1952 году была разработана пузырьковая камера. Эти камеры были мощным инструментом XX века, однако они громоздки и медленны.

Полупроводниковые детекторы — твёрдотельные аналоги ионизационных камер. Сцинтилляционные детекторы — система, состоящая из сцинтиллятора и ФЭУ, где для преобразования света в электрические сигналы применяют фотоприёмники: фотоумножители, фотодиоды и др. Пользуются популярность фотонные детекторы: детекторы, преобразующие свет в электрический сигнал (например, SiPM).

Представители международных экспериментов фундаментальных исследований физики частиц и высоких энергий, в которых применяются крупномасштабные детекторные системы регистрации частиц и излучений:

1. ATLAS – Международный эксперимент, цель которого — изучение протон-протонных взаимодействий. Это детекторная установка Мегасаенс масштаба, который состоит из многослойной системы детекторов для того, чтобы зарегистрировать, как можно больше частиц и с наиболее высокой точности. Находится в европейской организации ядерных исследований ЦЕРН в городе Женева, Швейцария.
2. JUNO – детектор, который работает для прецизионного исследования нейтрино. Расположена в городском уезде Кайпин. Центральным элементом установки является сфера диаметром около 35 метров, которая содержит жидкий сцинтиллятор и окружена 43 212 высокочувствительными фотодетекторами.
3. DUNE - изучает роль нейтрино во Вселенной. проводится в США. Также детекторы γ -излучений применяются в прикладных областях, таких как: PET/СТ, радиационный мониторинг, астрофизика, неразрушающий контроль.

1.3 Основные характеристики детекторов

Для того, чтобы построить качественный детектор необходимо знать характеристики детекторов.

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

1.3.1 Временные измерения

Для того, чтобы собрать детектор для временных разрешений, необходимо вычислить вклад каждой характеристики в разрешение.

Временное разрешение - способность прибора регистрировать световые импульсы с разрешением на уровне одиночных фотонов. На временное разрешение влияет: время нарастания, время восстановления.

1.3.2 Сцинтиляционные детекторы

Сцинтиляционные детекторы система состоящая из сцинтиллятора и ФЭУ/ SiPM.

Принцип работы сцинтиляционного детектора заключается в том, что гамма-квант взаимодействует с веществом посредством комптон-эффекта, образования электрон – дырочных пар или фотоэффекта, выбивая электрон, ионизирующий атомы, которые, впоследствии снятия возбуждения, люминесцируют. Фотоны выбиваются из фотокатода электроны, которые ускоряются в поле, создаваемое между динодами. Затем попадают на анод и происходит скачок напряжения.

Сцинтиляционные детекторы бывают органическими и неорганическими. Органические сцинтилляторы имеют гораздо меньшие времена высвечивания (порядка единиц — десятков наносекунд) по сравнению с неорганическими, но имеют меньший световой выход. Время высвечивания и световой выход, геометрия и прозрачность влияет на временное разрешение установки.

На временное разрешение всей системы влияет коэффициент усиления фототока и температура (SiPM чувствительны к температуре), форма и расположение динодов, материал фотокатода и динодов.

1.3.3. Кремниевые фотоумножители (SiPM)

Кремниевый фотоумножитель (SiPM) - это твердотельное устройство, способное обнаруживать одиночные фотоны благодаря своему очень высокому внутреннему коэффициенту усиления. SiPM представляет собой прямоугольную матрицу из квадратных ячеек (10-100 мкм),

насчитывающую от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч элементов в зависимости от модели. Каждый микроэлемент представляет собой последовательную комбинацию лавинного фотодиода (APD), работающего в режиме Гейгера, и гасящего резистора. Все микроэлементы идентичны и подключены параллельно. При обычной работе SiPM подвергается обратному смещению с напряжением, которое на несколько вольт превышает напряжение пробоя. Напряжение пробоя — это минимальное обратное смещение, при котором возникает самоподдерживающееся лавинное умножение в каждом пикселе SiPM. Напряжение выше напряжения пробоя называется перенапряжением. Такая структура позволяет обнаруживать и работать в условиях низкой освещенности в пропорциональном режиме в диапазоне, ограниченным общим числом пикселей. В ответ на воздействие света или генерируемых внутри него носителей заряда SiPM действует как источник тока — выходной сигнал представляет собой суперпозицию импульсов тока, генерируемых активированными или срабатывающими микроэлементами.

Поглощение фотонов на границе p-n перехода фотодиода индуцирует появление электронно-дырочных пар. При приложении достаточного обратного напряжения смещения возникшие носители заряда перетекают в p и n области фотодиода, приводя к возникновению фототока. При превышении напряжения смещения некоторого критического значения — напряжения пробоя — разлетающиеся под действием электрического поля заряды набирают достаточную кинетическую энергию для порождения вторичных носителей заряда в результате ударной ионизации. Последние также ускоряются полем и могут индуцировать появление еще большего числа новых носителей. Данный процесс называется лавиной — при поглощении единственного фотона через фотодиод начинает течь лавинный ток. На рис.1. приведена схема p-n перехода.

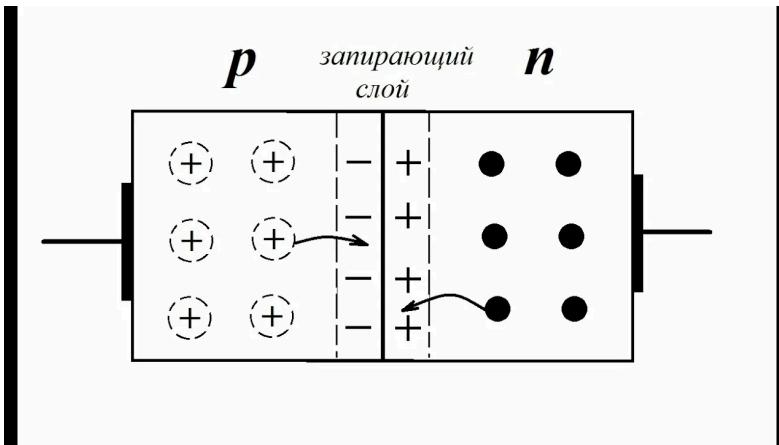


Рис.1 p-n переход

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.

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

Недостатками кремниевых фотоумножителей является: чувствительность к температурным флуктуациям окружающей среды, наличие перекрестных помех, послеимпульсов и малая фоточувствительная площадь. На рис.2 ниже приведены кремниевый фотоумножитель, а справа от него - ячейки, из которых состоит прибор.

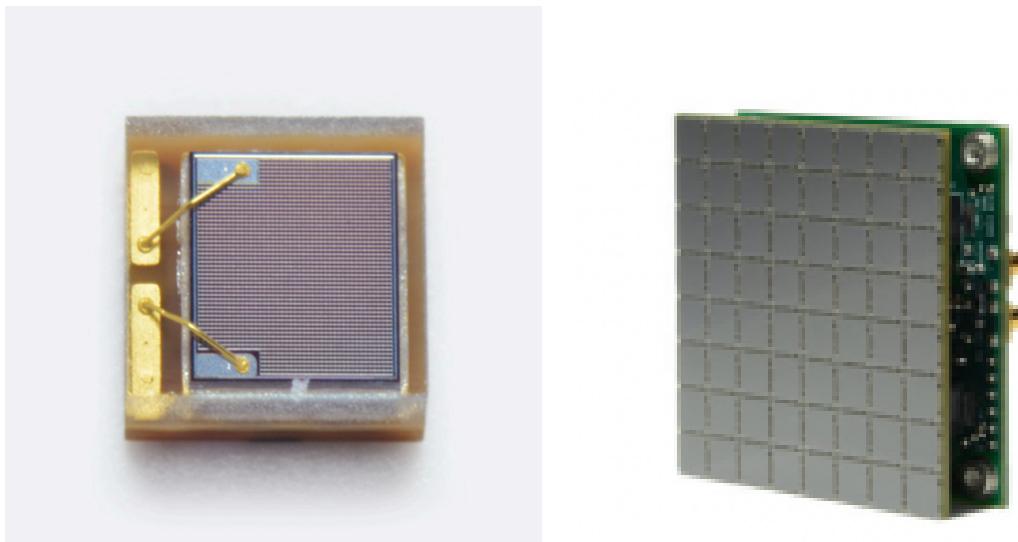


Рис 2. Кремниевый фотоумножитель

1.4. Температурная зависимость характеристик SiPM

Температура играет важную роль в работе всех полупроводниковых устройств, включая SiPM. Его разнообразные эффекты включают в себя влияние на концентрацию носителей заряда в легированных и собственных полупроводниках, тем самым влияя на их удельное сопротивление; управление спектром фононов, тем самым влияя на электрон-фононные взаимодействия; и регулирование скорости тепловой генерации носителей заряда, тем самым влияя на величину выходного темнового тока.

1.4.1. Физические причины температурной чувствительности

При рабочем напряжении, приложенном к SiPMu в отсутствие освещения, выходные импульсы по форме и амплитуде соответствуют сигналам сработавших ячеек. Причины их появления – тепловая генерация свободных носителей, генерация носителей в сильном электрическом поле, являющиеся физическими причинами температурной чувствительности детектора.

Также температура влияет на изменение ударной ионизации(как влияет см 1.4.2). Она связана с процессом лавинного умножения носителей заряда, который происходит в лавинных фотодиодах. Это изменение влияет на характеристики SiPM, например, на эффективность регистрации фотонов (PDE) и напряжение пробоя.

Вольт-амперные характеристики, полученные при различных температурах, дают информацию о том, как RQ изменяется в зависимости от T. Зависимость RQ от температуры носит линейный характер в пределах температуры от -40C – 40C. Отрицательный коэффициент

наклона означает, что RQ изготовлен из полупроводникового материала. Переходная емкость SiPM не изменяется в зависимости от температуры, следовательно, время восстановления импульсов выходного тока при различных температурах зависит только от RQ(T).

1.4.2. Параметры, зависящие от температуры

1. Напряжение пробоя.

Ударная ионизация (образование лавины) атомов кремния в обедненной области является механизмом усиления ячейках SiPM, представляющих собой лавинные фотодиоды (ЛФД, APD). Здесь носитель заряда (электрон или дырка) получает энергию от электрического поля, сталкивается с атомом кремния, ионизируя его, и, таким образом, образуется электронно-дырочная пара. Вероятность ударной ионизации зависит от напряженности электрического поля и температуры. С повышением температуры рассеяние (нагрев решетки) носителей заряда на кристаллической решетке становится более вероятным, что приводит к полной потере энергии носителей, препятствующей ударной ионизации. Можно кратко сформулировать, что вероятность ударной ионизации носителей зависит от температуры следующим образом: уменьшается с увеличением температуры, поскольку для создания ударной ионизации требуется приложить меньшее электрическое поле внутри SiPM.

2. Усиление.

Коэффициент усиления кремниевых фотоумножителей зависит от температуры. Обратное напряжение (напряжение смещения) — это напряжение, которое прикладывают к микроячейкам SiPM, чтобы они работали в лавинном режиме. С повышением температуры при фиксированном обратном напряжении коэффициент усиления снижается. Это связано с тем, что температура влияет на напряжение пробоя кремниевых диодов. Чем больше температура, тем больше колебания кристаллической решетки(см. пункт 1, 1.4.2).

3. Эффективность обнаружения фотонов.

Эффективность обнаружения фотонов (PDE) - это вероятность того, что SiPM выдаст выходной сигнал в ответ на падающий фотон. PDE определяется как произведение геометрического коэффициента заполнения, квантовой эффективности (QE) и вероятности разряда Гейгера

PG(Probability of Geiger discharge). PDE может зависеть от температуры потому что:

1. Энергия запрещенной зоны зависит от температуры, что приводит к $QE = QE(T)$;
2. Подвижность носителей увеличивается с увеличением температуры, таким образом, PG может увеличиваться с увеличением температуры при фиксированном перенапряжении;
3. Концентрация свободных носителей зависит от температуры, что влияет на все параметры, зависящие от концентрации.
4. Темновой счет.

Темновой счет в первую очередь обусловлен наличием свободных носителей заряда, генерируемых в слое обеднения APD, которые проникли в область сильного поля и вызвали разряд Гейгера. Свободные носители заряда появляются из-за того, что существует температура, отличающаяся от абсолютного нуля. Чем ниже температура, тем меньше будет темновой шум.

5. Вероятность перекрестных срабатываний.

Перекрёстные помехи в SiPM возникают из-за оптической связи между микроячейками. Лавина в одной ячейке может оптически активировать соседнюю, усиливая общий сигнал.

2. Измерение зависимости характеристик SiPM от температуры и напряжения

Было принято решение произвести измерение амплитуд от температуры окружающей среды. Температура и напряжение вызывают размытие амплитудных сигналов, что нарушает точность временных измерений. Амплитудный разброс приводит к размытию, связанному с зарядовой чувствительностью дискриминаторов.

2.1 Схема экспериментальной установки

В данной работе проводилось несколько измерений:

1. Измерения при 27В, при разных температурах в диапазоне от 21С до -20С с шагом -10С
2. Измерения при -20С с усилителем и без, при разных напряжениях в диапазоне от 25В до 30В с шагом 1В
3. Измерения при температурах от 0С до -25С с шагом 5С и при напряжениях от 25 В до 30В с шагом 1В с усилителем и без.

Данные измерения были направлены на то, чтобы наглядно понять, как будут меняться зарядовый спектр/ импульсные сигналы при постоянной температуре или постоянном напряжении источника питания. Также усилитель нужен для того, чтобы разрешать пики спектров, так как SiPM не всегда может это сделать.

Ниже приведены две экспериментальные установки: с усилителем и без (рис.3 и рис.4 соответственно).

В работе использовался кремниевый умножитель SiPM_FC-30035 от компании SenseL, размер 3x3 мм.

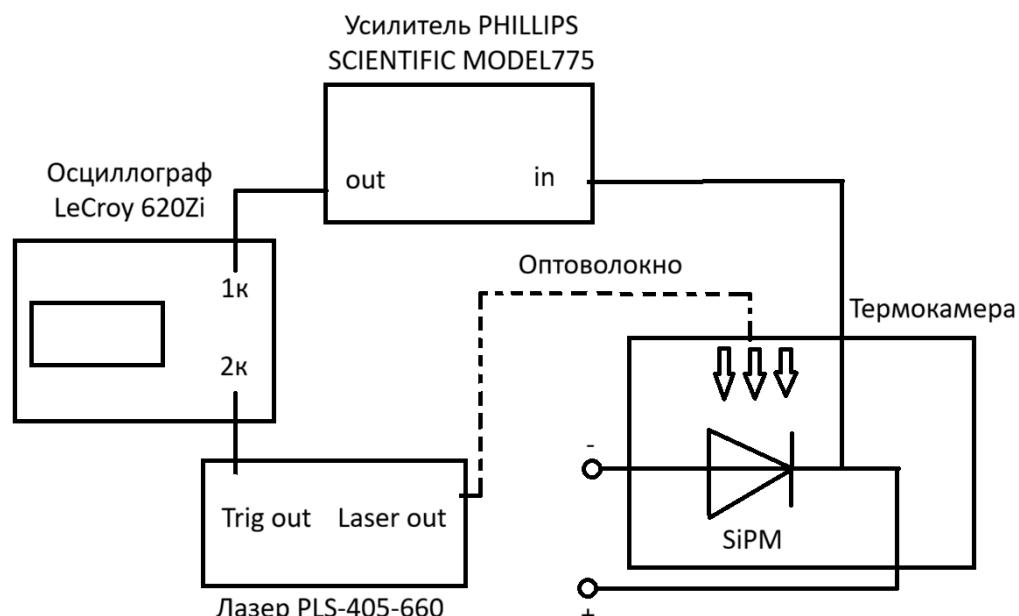


Рис 3. Схема установки с усилителем

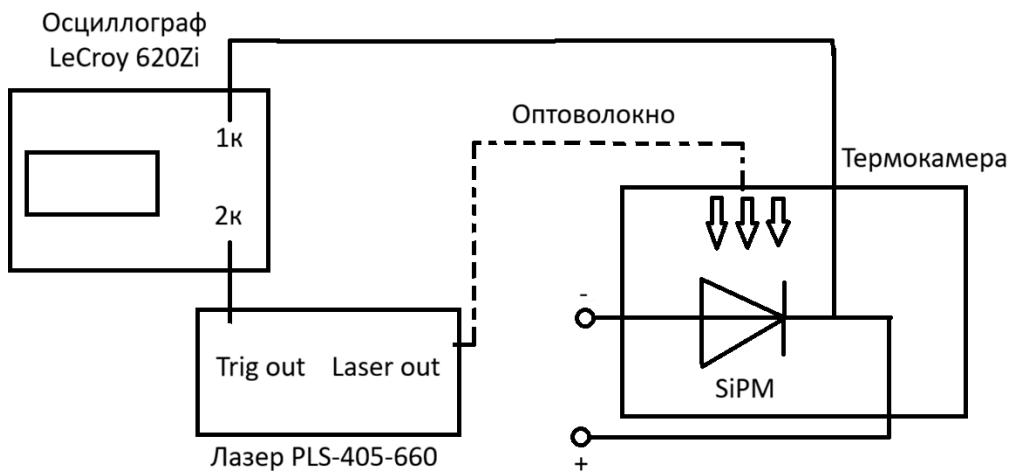


Рис 4. Схема установки без усилителя

Ослабленный, для достижения однофотонного сигнала аттенюаторами, свет от лазера подавался через оптоволокно. Единичные фотоны попадают на чувствительную площадь SiPM и вбивают фотоэлектрон. Контроль температуры осуществляется с помощью термокамеры. Работа SiPM приведена в параграфе 1.3. С лазера также подается триггерный сигнал на осциллограф, на экране которого видны сигналы. Аналоговые сигналы от SiPM, оцифрованные при помощи АЦП (аналого-цифрового преобразователя), встроены в систему осциллографа LeCroy. Данный тип не только позволяет снять данные, но и построить зарядовые и амплитудные спектры.

2.2. Полученные зарядовые спектры

В ходе работы были построены зарядовые спектры, которые измерялись как площадь под сигналом на осциллографе от SiPM при определенных температурах и различных напряжениях источника питания. Для полученных с осциллографа данных были построены зарядовые спектры. Каждый пик соответствует числу сработавших ячеек детектора. По счету пик соответствует событию, когда ни одна ячейка SiPM не сработала, второй по счету пик -- одиночечные срабатывания, третий -- две ячейки и тд. Характерная форма распределения зарядовой формы показаны на рисунке рис 3 (объединить картинки рис 3,4 без усилителя и с усилителем)

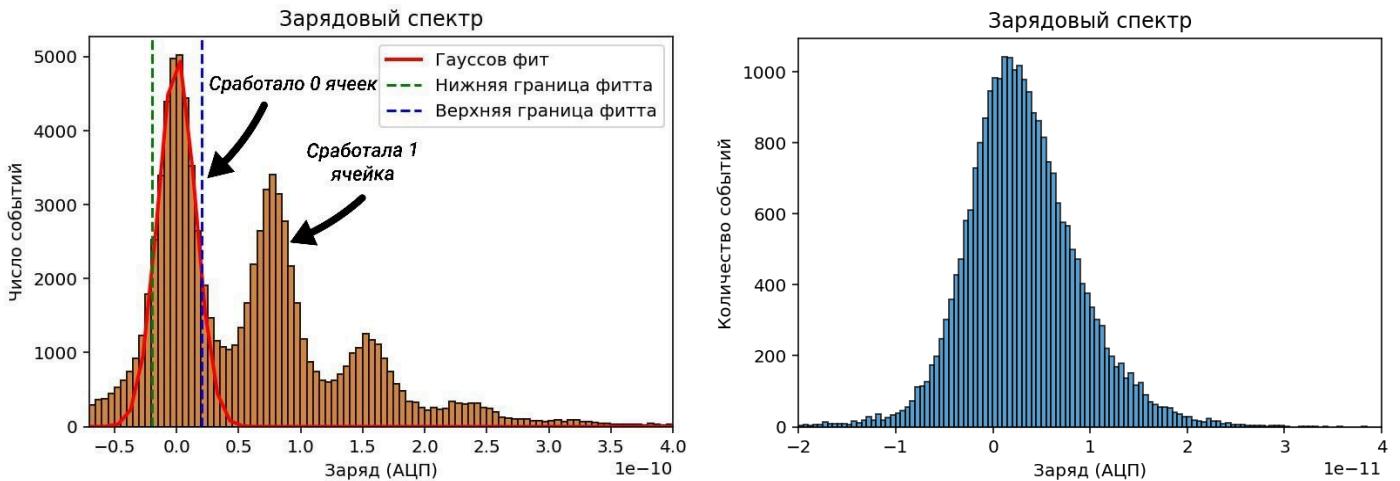


рис 5. Зарядовые спектры с и без усилителя при одинаковых условиях (25В, -20С)

Поскольку расстояние между пиками пропорционально усилению сигнала, то включение в основную схему дополнительного усилителя позволяет лучше разрешить пики. Хорошо видны разрешения отдельных пиков слева, где использовался внешний усилитель. Спектры получены при одинаковых температурных условиях и напряжении источника питания в однофотоэлектронном режиме с и без использования дополнительного усилителя.

Каждый пик гистограммы был фиттируем по Гауссу для нахождения математического ожидания и среднеквадратического отклонения. Ниже приведена формула, по которой производилось фиттирование:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

μ — математическое ожидание;

σ — среднеквадратическое отклонение(сигма);

Математическое ожидание является наиболее вероятным измеренным зарядом, а сигма - ошибка измерения математического ожидания.

Пики фиттируются именно по Гауссу, потому что электронные шумы и тепловые флуктуации размывают сигналы в соответствии с формулой (1).

2.3. Полученные графики

Для каждой температуры при одинаковом напряжении питания были найдены сигмы для первых трех пиков.

Был построен график зависимости сигмы гауссового фитта первых трех пиков от температуры при постоянном напряжении питания 27 В без усилителя (синий - 1 пик, оранжевый - 2 пик, серый - 3 пик).

Наблюдается корреляция между температурой и размером пика по оси X. Сужение вызвано уменьшением температурных флюктуаций. Исходя из исследований в других источниках, можно утверждать что на это влияет темновой счет. Данную зависимость можно увидеть на рис.6

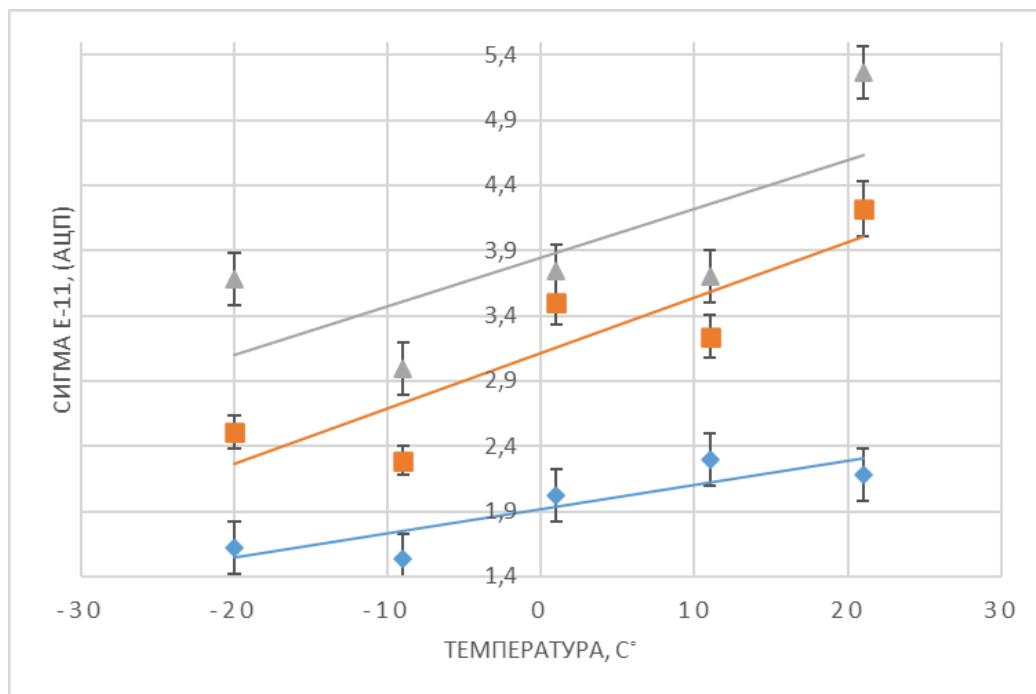


Рис 6. График зависимости среднеквадратичного отклонения пиков зарядовых спектров в одноотоэлектронном режиме от температуры. Синяя прямая соответствует первому пику, оранжевая - второму пику, серая - третьему пику.

Для нахождения усиления была получена разница между математическими ожиданиями соседних пиков. В данной работе, рассматривались три первых пика. Усиление находилось по формуле:

$$G = \mu_i - \mu_j \quad (2)$$

Построен график (рис. 7) зависимости усиления от температуры для разницы значений математического ожидания между первым и вторым пиком (синий), вторым и третьим пиком (оранжевый). При разных температурах с шагом 10С при постоянном напряжении питания SiPM 27В.

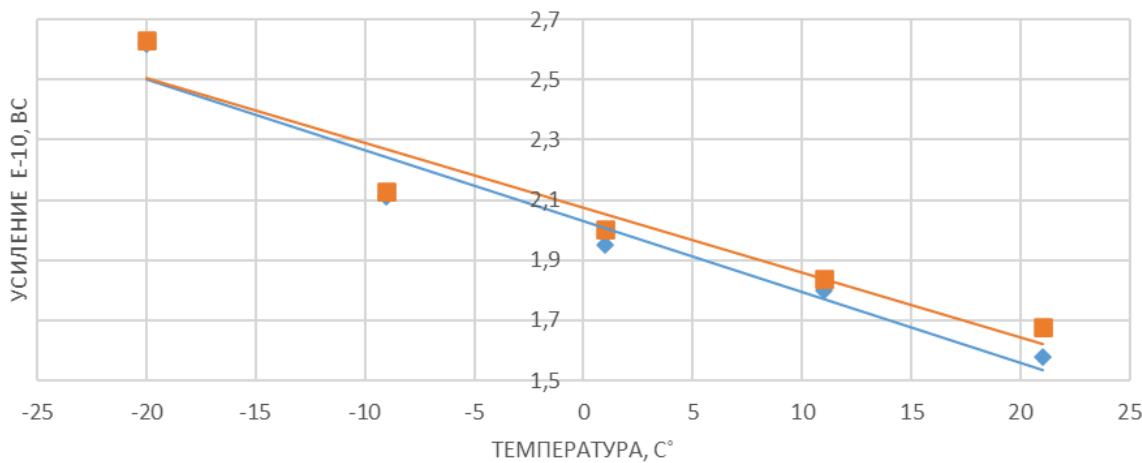


Рис.7. График зависимости усиления от температуры для разницы значений математического ожидания между первым и вторым пиком (соответствует синей прямой), вторым и третьим пиком (соответствует оранжевой прямой). При разных температурах с шагом 10С при постоянном напряжении питания SiPM 27В.

Разница между усилениями не сильно выделяется. Видно, что при уменьшении температуры увеличивается усиление.

Построен график зависимости усиления от напряжения при разных температурах без усилителя. Точка пересечения с осью X являются точкой пробоя по напряжению, начиная с которой SiPM переходит в гейгеровский режим. При данном напряжении смещении начинают образовываться носители заряда. Видно, что чем меньше температура, тем меньше напряжение пробоя. Это связано с тем, что при увеличении температуры кристаллическая решётка фотоумножителя испытывает температурные колебания, вследствие чего уменьшается вероятность преобразования энергии налетающего электрона в рождение новых носителей заряда. В этом случае для создания лавины потребуется большее электрическое поле, то есть высокое значение напряжения пробоя.

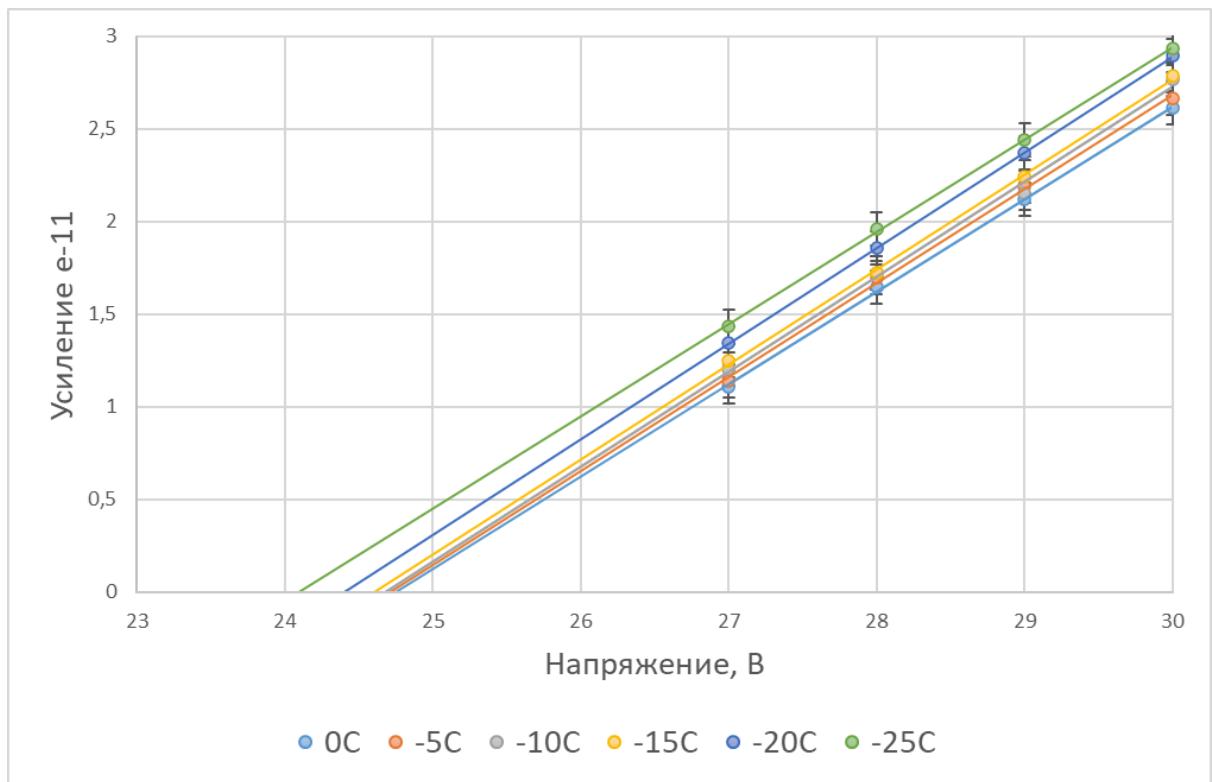


Рис 7. График зависимости усиления от напряжения при разных температурах

Следствие: с уменьшением температуры виден рост усиления, за счет этого можно лучше разрешить пики. (Ошибка параметров сигнала уменьшается и засчет этого временные измерения можно измерить лучше на уровне SiPM)

Напряжение пробоя для каждой температуры:

$$V_{br(0)} = 24,72;$$

$$V_{br(-5)} = 24,71;$$

$$V_{br(-10)} = 24,68;$$

$$V_{br(-15)} = 24,61;$$

$$V_{br(-20)} = 24,4;$$

$$V_{br(-25)} = 24,09.$$

Заключение

В научно-исследовательской работе проведено экспериментальное исследование температурной зависимости характеристик кремниевых фотоумножителей (SiPM) модели SiPM_FC-30035 (SenseL, 3×3 мм). Целью работы являлось определение влияния температуры на ключевые параметры SiPM, такие как усиление, напряжение пробоя, ширина пиков зарядовых спектров, для последующего учёта этих характеристик при проектировании высокоточных детекторных систем, в частности, в экспериментах физики элементарных частиц и ядерной физики.

Для достижения поставленной цели была собрана экспериментальная установка, позволяющая регистрировать однофотоэлектронные спектры и формы сигналов SiPM в контролируемых термокамерой температурных условиях (в диапазоне от +21°C до -25°C) и при различных напряжениях питания (от 25 В до 30 В). Измерения проводились как с использованием внешнего усилителя сигнала, так и без него. Основные полученные результаты:

1. Зависимость ширины пиков зарядовых спектров от температуры.

При постоянном напряжении питания (27 В) было установлено, что сигма гауссовых фитов зарядовых спектров уменьшается с понижением температуры. Это указывает на снижение температурных флуктуаций и, как следствие, уменьшение вклада темнового счета в разброс амплитуд сигналов.

2. Зависимость усиления SiPM от температуры.

Расчёт усиления как разности математических ожиданий соседних пиков зарядовых спектров показал, что коэффициент усиления SiPM возрастает при понижении температуры. При более низких температурах снижаются потери энергии носителей заряда на рассеяние в кристаллической решётке, что повышает вероятность ударной ионизации и эффективность лавинного умножения.

3. Температурная зависимость напряжения пробоя.

По результатам измерений зависимости усиления от напряжения при различных температурах было определено напряжение пробоя SiPM. Установлено, что с понижением температуры напряжение пробоя снижается. Этот результат также объясняется уменьшением энергетических потерь носителей в решётке при низких температурах: для инициирования лавины требуется меньшее электрическое поле.

Сравнение зарядовых спектров, полученных с усилителем и без него, показало, что использование усилителя значительно улучшает разрешение пиков. Это позволяет более точно определять положения пиков и уменьшает значение отклонения от наиболее вероятного измеренного заряда.

Установлено, что охлаждение SiPM в исследуемом диапазоне (до -25°C) приводит к увеличению усиления, смещению точки напряжения пробоя, сужению сигмы.

Был вычислен параметр, определяющий изменения заряда (в единицах $\text{В}^* \text{с}$) при изменении температуры окружающей среды на 1 градус Цельсия:

$$k \approx 23,7 \frac{\text{мВс}}{\text{с}^{\circ}}$$

Рассчитанное значение похоже со значением из документации

$$k = 21,5 \frac{\text{мВс}}{\text{с}^{\circ}}$$

Литература

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/content/public/uploads/files/pdf/fp2.pdf>
3. Slawomir Piatek, How does temperature affect the performance of an SiPM?//January 4, 2017
URL:<https://hub.hamamatsu.com/us/en/technical-notes/mppc-sipms/how-does-temperature-affect-the-performance-of-an-SiPM.html>
4. INSCIENSE[Электронный ресурс].
URL:<https://inscience.ru/science/post/schetchik-odinochnyh-fotonov-bols-hoj-obzor>
5. Азимут Фотоникс[Электронный ресурс].
URL:<https://azimp.ru/articles/tech/100/>
6. Временное разрешение кремниевых фотоумножителей и их возможное применение в TOF измерениях //Долгошайн Б.а., Каракаш А.и., Каплин В.а., Канцеров В.а., Каюмов Ф.ф., Клемин С.н., Кондратьева Н.в., Плешко А.д., Попова Е.в., Бужан П.ж. 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.
URL: https://profbeckman.narod.ru/radiometr.files/L2_1_2.pdf
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. Национальный Исследовательский Ядерный университет «МИФИ».

URL:
<https://indico.cern.ch/event/1012633/contributions/4476747/attachments/2314804/3940192/Собственное%20энергетическое%20разрешение%20сцинтилляционного%20детектора.pdf>

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.

URL: <https://www.medphysics-irk.ru/handbooks/pdf/Shendrik-scint.pdf>

12. А.А. Богданов. Температурная зависимость чувствительности кремниевых фотоумножителей в режиме пофотонной регистрации ультрафиолетового излучения. 2020

URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/50695>

13. Свэнк, Р. К. Характеристики сцинтилляторов. Успехи физических наук, 1956, Т. LVIII, вып. 3.

URL: https://ufn.ru/ufn56/ufn56_3/Russian/r563e.pdf