

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ ИМ. В.П. ДЖЕЛЕПОВА

На правах рукописи



Атанов Николай Васильевич

**ФРОНТ-ЭНД ЭЛЕКТРОНИКА И ФОТОСЕНСОРЫ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО КАЛОРИМЕТРА
ЭКСПЕРИМЕНТА MU2E**

Специальность 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Дубна – 2020

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В.П. Джелепова Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна.

- Научный руководитель** – *Глаголев Владимир Викторович*,
доктор физико-математических наук,
Объединенный институт ядерных исследований
(ОИЯИ), заместитель директора ЛЯП ОИЯИ
- Официальные оппоненты** – *Куденко Юрий Григорьевич*, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт ядерных исследований» Российской академии наук (ИЯИ РАН), заведующий отделом
- Семенов Павел Александрович*, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Институт физики высоких энергий» им. А.А.Логонова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ), старший научный сотрудник

С электронной версией диссертацией можно ознакомиться на официальном сайте Объединенного института ядерных исследований в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» по адресу: <https://dissertations.jinr.ru/ru/Councils/NuclearPhysicsCouncil/dissertations>. С печатной версией диссертации можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ОИЯИ (г. Дубна, Московская область, ул. Жолио-Кюри, д. 6).

Ученый секретарь
диссертационного совета
ОИЯИ.03.02.2019.П,
доктор физико-математических наук

Карамышева
Галина Анатольевна

Общая характеристика работы

Актуальность работы

С открытием массы нейтрино и нейтринного смешивания стало известно, что отдельные лептонные числа: электронное число, мюонное число, тау число, могут не сохраняться. Все подобные эффекты нарушения лептонного аромата на сегодняшний день удалось зафиксировать только в нейтральном лептонном секторе через наблюдение нейтринных осцилляций. Нарушения же аромата заряженных лептонов (CLFV) являются предметом интенсивного экспериментального поиска с момента открытия мюона, но до сих пор никаких доказательств этого не было найдено.

В Стандартной модели, дополненной описанием массивных нейтрино для объяснения нейтринных осцилляций, CLFV процессы возможны, но их ожидаемая вероятность крайне мала. Так, например, вероятность процесса $\mu \rightarrow e\gamma$ составляет $O(10^{-50})$ и менее.

Среди теоретических моделей новой физики, способных объяснить процессы с нарушением аромата особое место занимают такие, которые предсказывают вероятность подобных событий на уровне до $O(10^{-16} - 10^{-17})$ и могут быть проверены в ближайшем будущем при достижимом в данный момент уровне экспериментальной чувствительности. К таким моделям относятся ряд супресимметричных SUSY моделей, дополнительные измерения и другие. Поиск редких CLFV распадов на указанном уровне чувствительности (10^{-17}) соответствует продвижению по энергетической шкале до 10^4 ТэВ.

Среди мюонных CLFV каналов рассматривают следующие три редких процесса: $\mu \rightarrow e\gamma$, $\mu \rightarrow eee$ и $\mu \rightarrow e^-$. Мюоны обладают достаточно большим временем жизни $2,197 \cdot 10^{-6}$ с и могут быть получены в достаточно больших количествах, что привлекательно с экспериментальной точки зрения. Текущие эксперименты (коллораации MEG, PSI) установили верхний предел вероятности процесса $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ $4.2 \cdot 10^{-13}$ с уровнем достоверности 90%. Вероятность для $\mu \rightarrow e$ конверсии в титане (SINDRUM II, TRIUMF), нормализованная к вероятности захвата, меньше $4.3 \cdot 10^{-12}$, а вероятность $\mu \rightarrow e$ конверсии в золоте (SINDRUM II) меньше $7 \cdot 10^{-13}$. Конкурентное исследование всех трех процессов крайне важно. Можно сказать, что три процесса «чувствуют» разные типы новой физики различными способами: если CFLV наблюдается в любом одном из этих процессов, результаты из других исследований сыграют фундаментальную роль в выяснении природы новой физики, вызывающей нарушения лептонного аромата. Эксперимент MEG, в настоящее время набирающий данные на PSI, в конечном счете нацелен достигнуть чувствительности к вероятности $\mu \rightarrow e\gamma$ на уровне 10^{-14} , что почти на порядок больше существующего предела. Однако процесс $\mu \rightarrow e$ конверсии, который проверяет выводы более широкого спектра теоретических моделей, с учетом возможности получения достаточно интенсивного источника мюонов может служить более основательным тестом CLFV, превосходящим $\mu \rightarrow e\gamma$.

Одним из таких экспериментов, с которым связана текущая работа, является эксперимент Mu2e (Fermilab, США). Предполагается чувствительность эксперимента $R_{\mu e} \leq 3 \cdot 10^{-17}$, что на несколько порядков превышает текущий экспериментальный предел установленный в эксперименте SINDRUM II. Для этого электромагнитный калориметр в детекторе установки должен обладать достаточно хорошим энергетическим ($\sigma_E/E < 10\%$ при энергии 100 МэВ) и временным разрешением, которое должно быть лучше 500 пс, чтобы обеспечить распознавания треков в строу-детекторе.

Цели и задачи работы

Основные цели работы: создание и всестороннее тестирование фронт-энд электроники электромагнитного калориметра на базе кристаллов чистого CsI для

первой фазы эксперимента Mu2e, тестирование прототипа калориметра на электронном пучке, а также разработка и исследование фотодетектора, который может быть использован для кристаллического BaF₂ калориметра во второй фазе эксперимента Mu2e.

Решаемые задачи:

1. Проанализировать условия работы детектора экспериментальной установки Mu2e, в частности, электромагнитного калориметра, и их влияние на работу считывающей электроники.
2. Предложить методику расчета и реализации системы фронт-энд электроники электромагнитного калориметра для первой фазы эксперимента. Описать проблемные места, возникшие при разработке, с целью дальнейшего улучшения подобных систем и сокращения времени разработки в будущих экспериментах.
3. Разработать методику испытаний фронт-энд электроники и контроля качества, подтверждающую работоспособность системы в условиях проведения эксперимента Mu2e.
4. Предложить фотодетектор для электромагнитного калориметра на кристаллах BaF₂ для второй фазы эксперимента Mu2e, который выделяет быструю компоненту и подавляет медленную компоненту излучения сцинтиллятора BaF₂.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка архитектуры предусилителя и линейного регулятора в электромагнитном калориметре для первой фазы эксперимента Mu2e.
2. Результаты тестирования прототипа электромагнитного калориметра Module0 на электронном пучке.
3. Методика расчета напряжения пробоя в вакууме для сложной конфигурации проводников в платах фронт-энд электроники и результаты эксперимента по его измерению для плат фронт-энд электроники.
4. Разработка и исследование характеристик фотоэлектронного умножителя с микроканальными пластинами и AlGaN фотокатодом, подходящего для выделения быстрой компоненты излучения сцинтиллятора BaF₂, с целью возможного дальнейшего его применения в калориметре второй фазы Mu2e.
5. Создание математической модели и измерение эффективности сцинтилляционного детектора с ФЭУ с AlGaN фотокатодом и кристаллом BaF₂.

Научная новизна и практическая значимость

1. Для работы детектора Mu2e при радиационной нагрузке, в вакууме, постоянном магнитном поле 1 Тл и специализированного матричного фотодетектора электромагнитного калориметра из кристаллов чистого CsI разработана схема радиационно-стойкого предусилителя с входным каскадом на биполярных транзисторах, а также схема линейного регулятора, обеспечивающая точность установки напряжения смещения фотодиодов лучше 50 ppm.
2. Предложена новая методика для расчета напряжения пробоя в реальной системе проводников на печатной плате, проведено экспериментальное исследование и впервые получена оценка минимального напряжения пробоя в вакууме в диапазоне давлений до

- 10^{-3} торр для реальной системы проводников платы фронт-энд электроники электромагнитного калориметра эксперимента Mu2e.
3. Впервые разработан фотоумножитель с микроканальными пластинами и AlGaN фотокатодом, имеющий длинноволновую границу на уровне 260 нм.
 4. Впервые исследован канал сцинтилляционного детектора с сцинтилляционным кристаллом BaF₂ и экспериментальным фотоумножителем с AlGaN фотокатодом с длинноволновой границей 260 нм, использование которого позволило достичь подавления медленной компоненты излучения BaF₂ более чем в 60 раз.
 5. С применением предложенной модели описания сигнала сцинтилляционного детектора на основе кристалла BaF₂ с фотодетектором с длинноволновой границей чувствительности в районе 260-300 нм (или «солнечно-слепым») проведены вычисления необходимой эффективности подавления медленной компоненты для достижения заданных параметров работы электромагнитного калориметра эксперимента Mu2e.

Все основные результаты диссертации получены непосредственно автором или в составе группы с определяющим личным вкладом автора.

Апробация и достоверность результатов

По теме диссертации было опубликовано девять работ, семь из которых изданы в реферируемых журналах, рекомендованных ВАК и входят в базу данных Scopus и Web of Science [2-7, 9]. Результаты были представлены на следующих семинарах и международных конференциях:

1. Результаты исследований многократно докладывались на совещаниях рабочей группы по электромагнитному калориметру коллаборации Mu2e, 2014-2020 (Дубна, Россия и Фраскати, Италия).
2. Mu2e-II Workshop at Northwestern University, 29-30 августа, 2018 (Northwestern University, Эванстон, США). MCP devices with AlGaN photocathodes for BaF₂ fast component detection.
3. Mu2e Calorimeter Front-end Electronics Construction Readiness Review, 18 ноября, 2019 (Fermilab, Батавия, США).
4. Snowmass 2021 Mu2e-II Workshop, 22 сентября 2020, Zoom Meeting. AlGaN photocathodes and Schottky diode for BaF₂ scintillator detectors.
5. IEEE Nuclear Science Symposium (NSS) and Medical Imaging Conference (MIC), 26 октября – 2 ноября, 2019, Манчестер, Великобритания. PMT with AlGaN photocathodes and MCP for BaF₂ scintillator detectors in particle physics.
6. New Trends in High Energy Physics (NTHEP), 2-8 октября, 2016 (Будва, Черногория). Solar-blind photodetectors with AlGaN photocathodes for light registration in UVC range.
7. New Trends in High Energy Physics (NTHEP), 24-30 сентября, 2018 (Будва, Черногория). The front-end electronics of the Mu2e electromagnetic calorimeter.
8. Общелабораторный семинар ЛЯП, 26 апреля, 2019 (ОИЯИ, Дубна). ФЭУ с AlGaN фотокатодом и МКП для сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов BaF₂.
9. XXV Международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения, 24-26 мая, 2018 (Москва, Россия). Фотопреобразователи УФ диапазона на основе эпитаксиальных структур AlGaIn.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 188 страниц, включает 8 таблиц и 154 рисунка. Список литературы содержит 120 наименований.

Содержание работы

Во **введении** описывается актуальность темы исследования, сформулированы основные цели и задачи работы, представлены положения, выносимые на защиту, а также научная новизна, практическая значимость и апробация полученных результатов.

В **первой главе** представлено общее описание эксперимента Mu2e по поиску безнейтринной конверсии мюона в электрон в поле ядра ^{27}Al . Также даны общие сведения о фоновых событиях, структуре установки и детектора и, в частности, об электромагнитном калориметре (рис. 1 и 2).

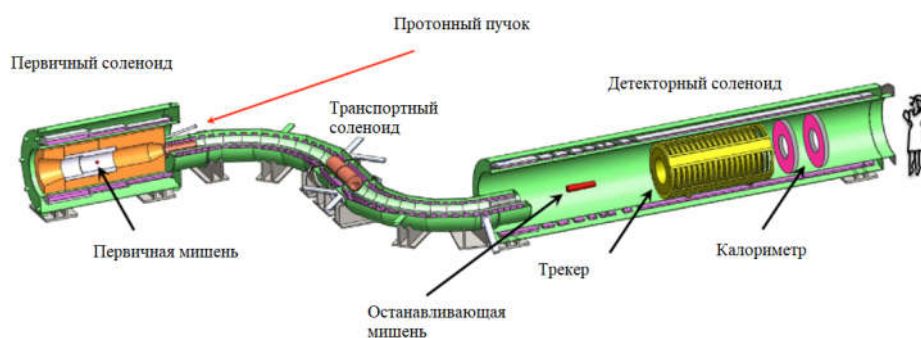


Рисунок 1. Установка эксперимента Mu2e.

Вторая глава посвящена разработке модулей фронт-энд электроники. Общая структурная схема электроники системы сбора данных, установленной непосредственно на калориметре, показана на рис.3. Отклик сцинтилляционного кристалла считывается двумя модулями SiPM, каждый из которых представляет собой массив 2x3 из отдельных улучшенных фотодиодов Hamamatsu 13360-S6050 CS площадью 6x6 мм² с размером элементарной ячейки 50 мкм. Каждый фотодиод подключен непосредственно к плате фронт-энд электроники, выполняющей две основные функции: 1) усиление и формирование сигнала фотоумножителей с последующей передачей по кабелю на дигитайзер через плату концентратора; 2) установка напряжения смещения для матрицы фотодиодов при помощи специально разработанного линейного регулятора напряжения.

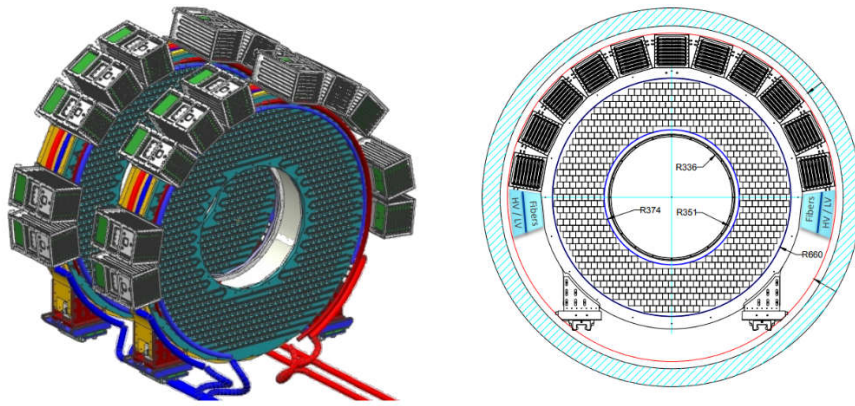


Рисунок. 2. Текущая конфигурация CsI калориметра: два диска радиусом 64см с выемкой посередине, заполненные прямоугольными кристаллами CsI, расстояние между дисками 70 см. Платы фронт-энд электроники крепятся с торца каждого кристалла, стойки с платами концентраторов и дигитайзеров расположены по периферии дисков.

Сформированный в усилителе сигнал по высокочастотному кабелю передается в концентратор, всего к концентратору подключены 20 усилителей. Далее сигнал поступает в плату дигитайзера, также рассчитанную на 20 каналов. Во входном каскаде платы дигитайзера предусмотрен аналоговый блок, выполняющий частотную и амплитудную корректировку сигнала после прохождения по кабелю и аналоговым трактам. Платы дигитайзеров и концентраторов собираются в крейтах, в каждом по 8 штук.

Для работы платы предусилителя и линейного регулятора, необходимо подавать низковольтное (8В) и высоковольтное (200В) напряжения. Это функцию также осуществляет плата концентратора, передавая по кабелю малошумящее низкое и высокое напряжения на входной разъем усилителя.

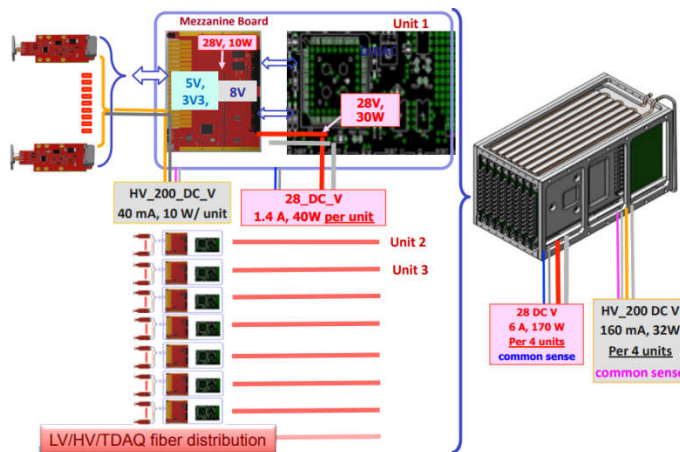


Рисунок 3. Общая структурная схема системы считывания данных с кристаллов электромагнитного калориметра.

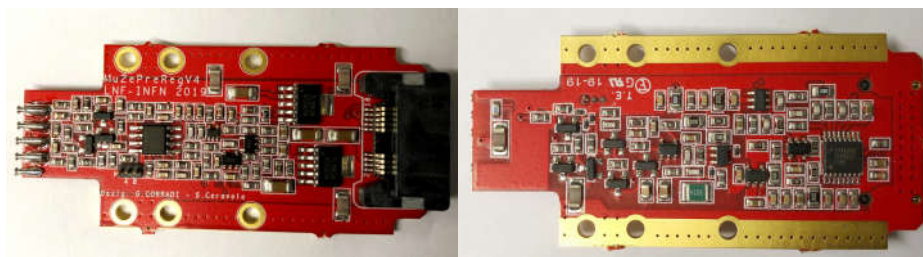


Рисунок 4. Внешний вид платы FEE v.3. На одной стороне платы расположен предусилитель (слева), на другой стороне - линейный регулятор (справа).

Модули фронт-энд электроники выполнены в виде двухсторонней многослойной печатной платы, на одной стороне которой размещен предусилитель, а на другой стороне находится линейный регулятор (рис.4). Кроме того, на плате присутствуют несколько вспомогательных систем. Упрощенная структурная схема всей платы FEE показана на рис. 5 и линейного регулятора отдельно на рис.6. Мы выделяем:

- основные узлы предусилителя: входной каскад, усилительный, формирователь, выходной дифференциальный драйвер;
- узлы линейного регулятора: регулирующий транзистор, аналоговая обратная связь, АЦП и ЦАП цифровой обратной связи;
- вспомогательные системы: датчик температуры и АЦП датчика температуры, мониторинг тока детектора, декодер шины цифрового управления.

Усилители спроектированы со следующими заданными характеристиками:

- входное сопротивление 33 Ом;
- выходное сопротивление 100 Ом;
- выходной динамический диапазон 2В;
- коэффициент усиления по току 4-8;
- полоса пропускания 40 МГц;
- спектральная плотность шума 2 нВ/√Гц;
- потребляемая мощность 45 мВт;
- передний/задний фронт сигнала 25/120 нс.

Схема высоковольтного линейного регулятора расположена на другой стороне платы фронт-энд электроники. Его задачей является преобразование входящего высокого напряжения 200 В в напряжение смещения фотодетектора, которое для массива из трех последовательно включенных одинаковых диодов находится в районе $55 \text{ В} * 3 = 165 \text{ В}$. К точности установки напряжения предъявляются высокие требования: до второго знака после запятой. При этом шумы на линии должны быть меньше точности установки напряжения, что для наших условий означает, что шумы должны быть на уровне 50 ppm или меньше 8 мВ. В зависимости от загрузки калориметра предполагается широкий диапазон токовых нагрузок от 2 мкА до 2 мА, в котором должно обеспечиваться стабильное DC/DC преобразование, в том числе и при импульсном увеличении тока за время меньше 1 мс.

Кроме того, в соответствии с условиями проведения эксперимента Mu2e [1] к разработанным предусилителям предъявляются дополнительные требования:

- радиационная стойкость к гамма-излучению, максимальная поглощенная доза без ущерба работоспособности 100 кРад;
- устойчивость к интегральному потоку нейтронов 10^{12} н/см² за 3 года;
- сохранение работоспособности в вакууме в диапазоне давлений 10^{-2} - 10^{-4} торр;
- устойчивость к постоянному аксиальному магнитному полю 1Т;
- линейность отклика в широком диапазоне входных токов 2 мкА-2 мА.

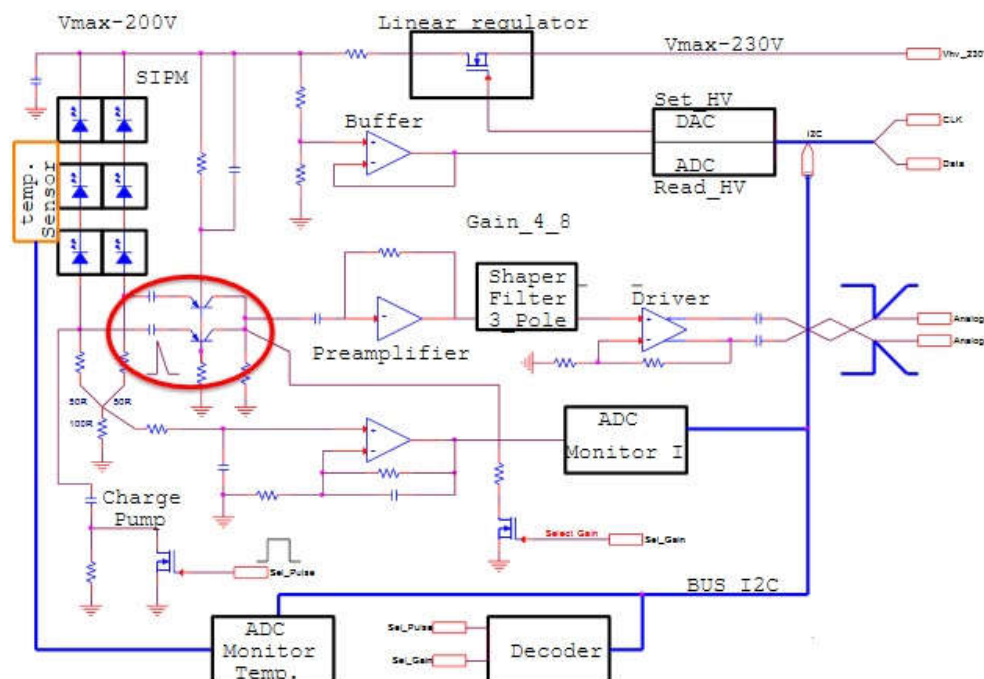


Рисунок 5. Упрощенная структурная схема платы фронт-энд электроники.

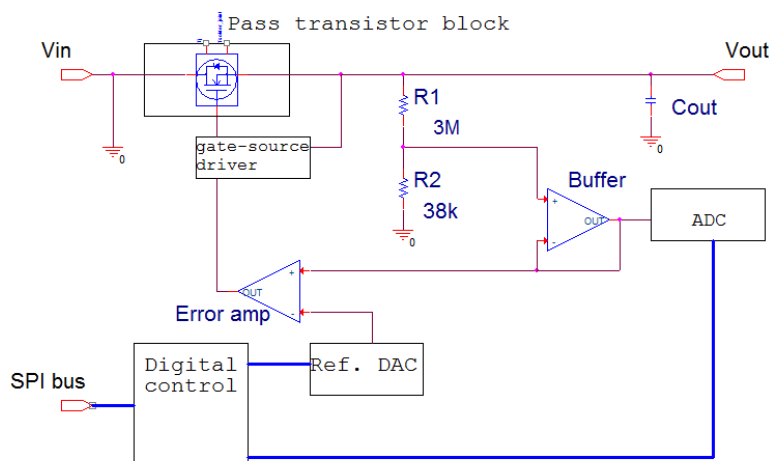


Рисунок 6. Базовая структурная схема высоковольтного линейного регулятора.

В работе описана методика расчета характеристик разработанной схемы радиационно-стойкого предусилителя с входным каскадом на биполярных транзисторах и схемы линейного регулятора, задающего напряжение смещения матрицы фотосенсоров в постоянном магнитном поле до 1 Тл для первой фазы эксперимента Mu2e. Автором проведен подробный теоретический анализ характеристик модулей FEE. Параметры схемы проверены автором при помощи PSpice моделирования и в лабораторных измерениях. Так,

например, на рис. 7 приведено сравнение моделированного сигнала на выходе предусилителя с реальным сигналом, измеренным на стенде.

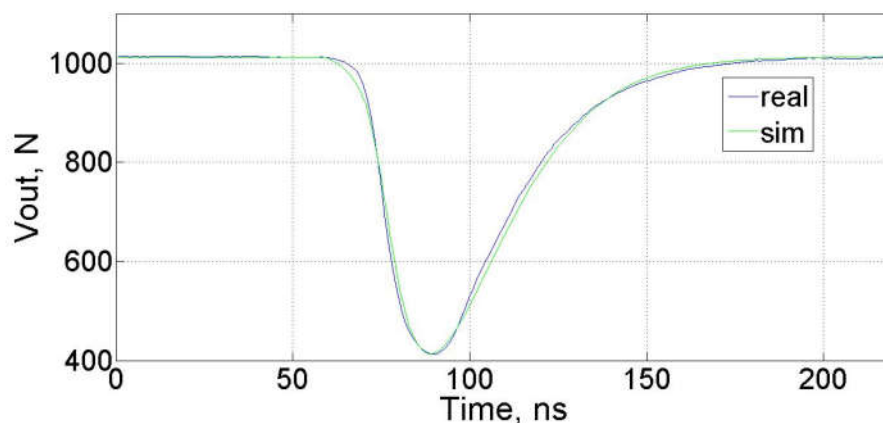


Рисунок 7. Сигнал на выходе предусилителя реального предусилителя в сравнении с симуляцией в PSpice.

В третьей главе приведены результаты серии тестов разработанных модулей фронт-энд электроники при воздействии ионизирующим излучением на установке CALLIOPE (ENEA, Италия), интенсивным потоком нейтронов на установке FNG (ENEA, Италия), исследования работоспособности электронных устройств в вакууме. Также обсуждены испытания на электронном пучке прототипа электромагнитного калориметра из 50 кристаллов, использующего разработанные электронные модули.

Испытания плат фронт-энд электроники на устойчивость к воздействию интенсивного гамма-излучения были проведены в несколько этапов на установке CALLIOPE с интенсивным источником ^{60}Co (ENEA, Италия). В облучаемой зоне на стойке зафиксированы модернизированные платы FEE v1: с опорным напряжением для линейного регулятора, задаваемым при помощи внешнего источника питания и при помощи ЦАП. Плата концентратора находилась в защищенной свинцовыми кирпичами зоне. Суммарная доза облучения для модулей FEE составила около 100 кРад при мощности дозы 7 Гр/ч.

Аналогичные измерения проведены и для нейтронных фонов. Тестирование модулей электроники на устойчивость к воздействию потока нейтронов было проведено на установке FNG (ENEA, Фраскати, Италия). Это компактный ускорительный источник нейтронов, работающий на основе ядерных реакций дейтрон-дейтрон и дейтрон-третий и производящий монохроматические нейтроны с энергиями 2,5 МэВ и 14 МэВ соответственно с максимальной интенсивностью нейтронного потока 10^9с^{-1} и 10^{11}с^{-1} .

Как и в случае с гамма-излучением, проверяли платы FEE, опорное напряжение для линейного регулятора в которых задавалось либо с помощью внешнего источника напряжения, либо при помощи ЦАП. Суммарный поток нейтронов через испытываемые образцы составил $10^{12}\text{ н}_{1\text{МэВ}}/\text{см}^2$ за время сеанса около 260 минут.

Для доработанных электронных модулей была подтверждена устойчивость к таким воздействиям в пределах доз до 100 кРад для гамма-излучения и до $10^{12}\text{ н}_{1\text{МэВ}}/\text{см}^2$ для нейтронов, обозначенных в требованиях эксперимента Mu2e [9].

Одно из условий эксперимента Mu2e для калориметра - работа в вакууме порядка 10^{-4} торр. Кроме проблем, связанных с отводом тепла, это также накладывает дополнительные ограничения на дизайн фронт-энд электроники из-за повышения вероятности электрического пробоя для высоковольтных участков плат, вызванного эффектом Пашена. В диссертации описывается разработанная автором аналитическая методика оценки минимального напряжения пробоя в вакууме для проводников на

поверхности печатной платы, использованная при проектировании модулей фронт-энд электроники электромагнитного калориметра Mu2e [8]. Методика основана на оценке профиля электрического поля и линейной плотности распределения заряда на отдельном, критичном участке, где наиболее вероятно появление пробоя. Далее для оценки значений напряжения пробоя с применением рассчитанных значений параметров решается соответствующее уравнение, записанное для рассматриваемого участка с использованием критерия Таунсенда.

Так для воздуха в случае неоднородного электрического поля для проводников платы FEE вероятность пробоя снижается, и оцененное минимальное напряжение пробоя составляет 630 В, против 327 В в случае однородного поля, что почти в два раза выше.

Также было проведено экспериментальное исследование значений напряжения пробоя для платы FEE в вакуумной камере в диапазоне давлений до 10^{-3} торр, соответствующем условиям работы детектора в эксперименте Mu2e [8]. В процессе откачки форвакуумным насосом в нескольких точках откачка приостанавливалась и измерялось напряжение пробоя: повышалось входное напряжение и отмечалась точка возникновения пробоя. Для обнаружения пробоя мы использовали регистрацию при помощи специально разработанного щупа и осциллографа, и путем наблюдения сигнала защитной цепи высоковольтного источника. Результат сканирования по различным значениям давления в камере приведен на рис.8.

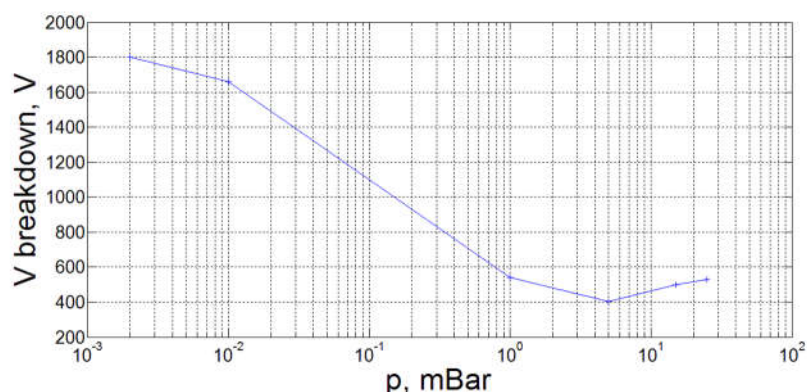


Рисунок 8. Зависимость напряжения пробоя на плате FEE от давления в вакуумной камере. Минимальное значение пробоя $V_{br} = 405$ В наблюдается при давлении 5 мБар, что соответствует эквивалентному расстоянию 1,5 мм, рассчитанному по критерию пробоя в воздухе $pd = 7,5$ мБар*мм.

Можно видеть, что минимальное значение $V_{br} = 405$ В достигается в точке 5 мБар. Это значение для платы FEE выше, чем известный минимум в воздухе для системы двух плоских электродов $V_{air} = 327$ В при $pd = 7,5$ мБар*мм. Из графика также видно, что в области рабочих значений давлений для калориметра Mu2e $p = 10^{-3} - 10^{-2}$ мБар напряжение пробоя выше, чем 1600 В, что обеспечивает запас надежности для напряжения 200 В в 8 раз.

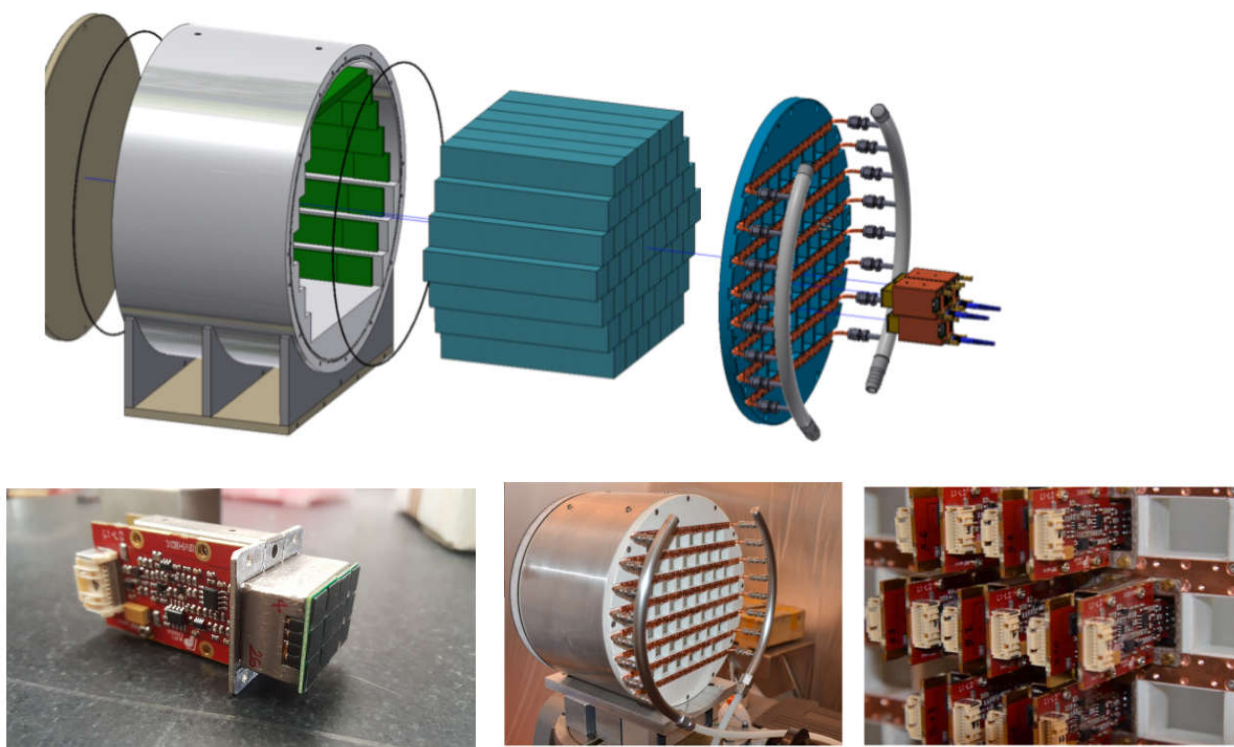


Рисунок 9. Модель конструкции прототипа калориметра Module0 в разобранном виде (сверху), модуль фронт-энд электроники FEE v1 и массив SiPM для прототипа калориметра (снизу слева); собранный прототип Module0 с установленной электроникой, вид сзади (по центру), приближенный вид подключенных модулей электроники (справа).

С участием автора проведены испытания многоканального прототипа Module0 электромагнитного калориметра (рис.9), разработанного с применением опытных образцов модулей фронт-энд электроники [2-6, 9]. В работе представлены результаты его исследования на электронном пучке ускорителя DAFNE (LNF, Фраскати, Италия). Получены экспериментальные зависимости временного и энергетического разрешений (рис. 10,11) от энергии электронов в пучке, которые удовлетворяют требованиям эксперимента Mu2e: временное разрешение менее 500 пс, энергетическое разрешение $\sigma E/E < 10\%$ при значениях E около 100 МэВ.

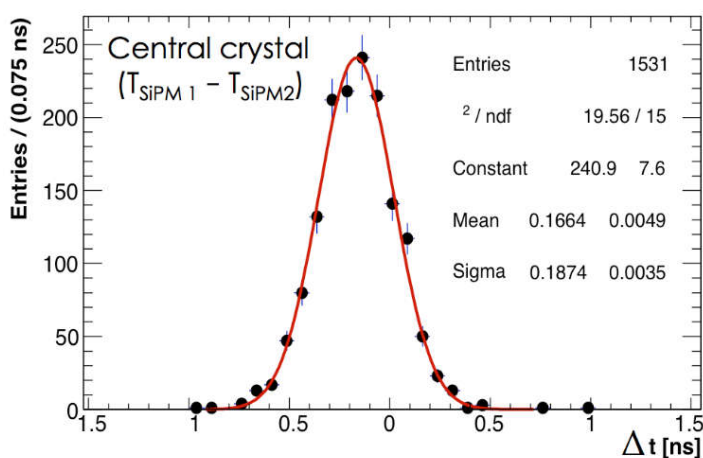


Рисунок 10. Временное разрешение для ортогонально падающего электронного пучка с энергией около 100 МэВ, измеренное по данным двух фотосенсоров центрального кристалла прототипа калориметра Module0.

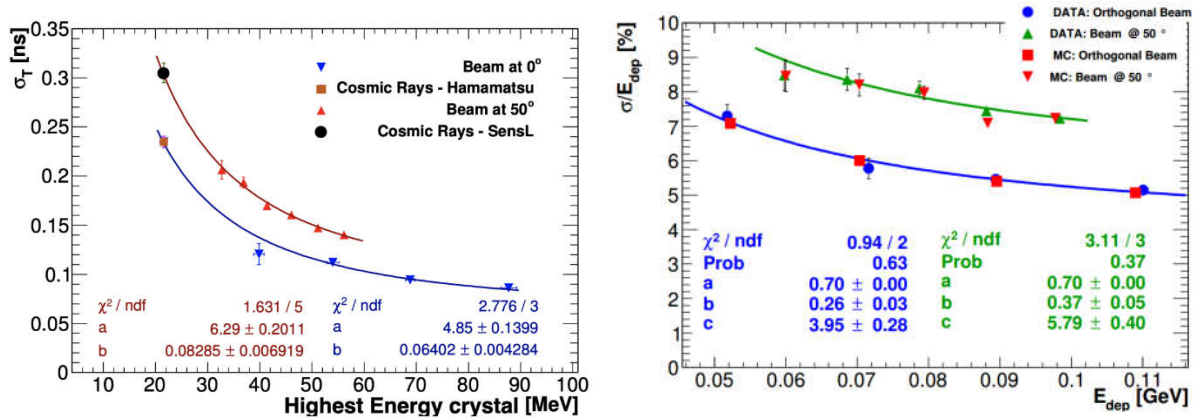


Рисунок 11. Временное и энергетическое разрешение прототипа калориметра Module0 для перпендикулярного и наклоненного под углом 50° пучка, полученные в тестовом сеансе, в сравнении с результатами Монте-Карло моделирования, выполненного в пакете Geant4. Данные временного разрешения для точки 22 МэВ получены при калибровке на космическом излучении. Временное разрешение описывается как $\sigma_t = \frac{a}{E[\text{ГэВ}]} \oplus b$; энергетическое разрешение описывается как $\sigma_E/E = a/\sqrt{E} \oplus b/E \oplus c$.

Таким образом, разработанные с участием автора платы фронт-энд электроники успешно прошли испытания, что отмечено комиссией Construction Readiness Review (CRR), и рекомендованы коллаборацией для применения в установке электромагнитного калориметра эксперимента Mu2e [9].

В четвертой главе приведены результаты работы по разработке и исследованию фотосенсора для второй фазы эксперимента Mu2e.

Во второй фазе эксперимента Mu2e (Mu2e-II) предполагается использовать протонный пучок более низкой энергии, чем в первой фазе, но с увеличенной в 12 раз интенсивностью: энергия протонов будет уменьшена с 8 ГэВ до 800 МэВ, интенсивность вырастет с 8 кВт до около 100 кВт. Для калориметра Mu2e-II накопленная кристаллами и фронт-энд электроникой за три года доза радиации составит до 1,3 Мрад, суммарный поток нейтронов 6×10^{13} . Предполагается, что электромагнитный калориметр будет сделан из кристаллов BaF_2 , которые более стойкие к радиационному воздействию, чем используемые в первой фазе эксперимента в калориметре кристаллы чистого CsI. При работе с сцинтилляционными кристаллами BaF_2 возникают проблемы с уровнем и диапазоном медленной и быстрой компонент излучения, требующих проведения специальных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по разработке фотодетектора. Один перспективный вариант для фотосенсора, рассматриваемый коллаборацией – ФЭУ с МКП и солнечно-слепым фотокатодом из сплава AlGaIn , который представлен в диссертации [7]. Используя фотокатод из AlGaIn соединений с массовой долей алюминия до 0,8 в слоях р-типа, с участием автора удалось создать опытный образец ФЭУ, имеющий длинноволновую границу на уровне 260 нм, который подходит для эффективной регистрации быстрой компоненты эмиссии сцинтилляционного кристалла BaF_2 и существенного подавления медленной (рис. 12).

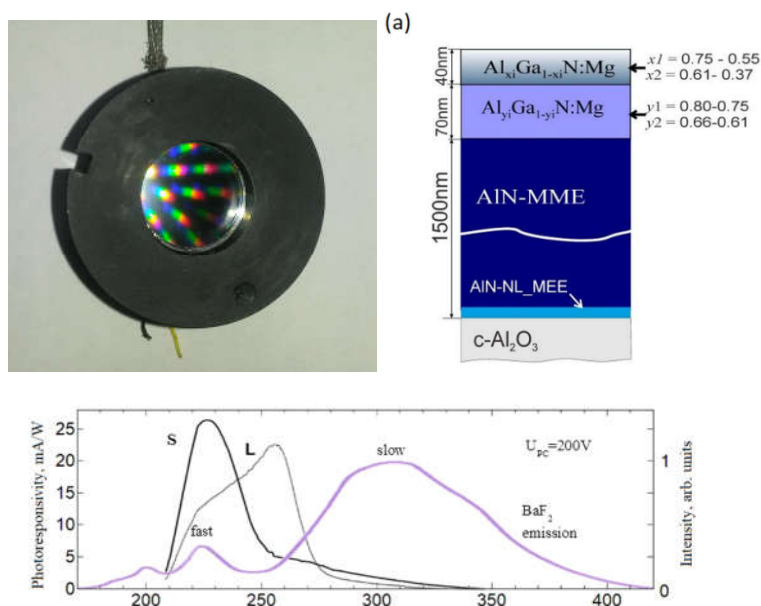


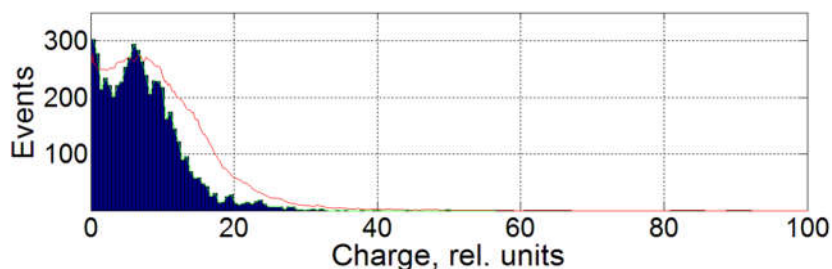
Рисунок 12. ФЭУ с микроканальными пластинами, использующий AlGaIn фотокаод, схематическое представление гетероструктуры фотокаода и спектр чувствительности фотокаодов на фоне спектра эмиссии BaF₂.

Для изготовления фотокаодов для ФЭУ в ФТИ имени Иоффе (Россия, Санкт-Петербург) с помощью плазменно-активированной молекулярно-пучковой эпитаксии (ПАМПЭ) были выращены две AlGaIn гетероструктуры на подложках с-сапфира с использованием различных методов подавления зарождения и распространения прорастающих дислокаций через буферные слои AlN. После анализа оптических свойств гетероструктур из них были изготовлены фотокаоды диаметром 20 мм. Далее полученные фотокаоды были использованы для изготовления на производстве ОАО «Катод» (Новосибирск) фотоумножителей с микроканальными пластинами (диаметр пластин 30 мкм, коэффициент усиления $\sim 10^6$). Один такой прибор был затем доработан в ЛЯП ОИЯИ: была изменена схема подачи напряжения, чтобы использовать вместо внутреннего DC\DC преобразователя внешний малошумящий источник питания.

Созданный экспериментальный фотоумножитель был использован, чтобы создать сцинтилляционный детектор с применением кристаллов BaF₂. Детектор применен для регистрации космических мюонов. Для сравнения результатов использован коммерчески доступный ФЭУ УФК-4Г-4 производства ОАО «Катод», Новосибирск. Этот ФЭУ имеет такие же размеры и конфигурацию микроканальных пластин, но катод выполнен из сплава AlGaIn со значительно меньшим содержанием Al.

Результат расчета спектра энергетических потерь в кристалле представлен на рис.13. Чтобы оценить соотношение быстрой и медленной компоненты излучения кристаллов BaF₂, сравниваются спектры для различных пределов интегрирования. На основе данных, полученных при наблюдении космического излучения, автором показано, что эффективность подавления медленной компоненты возрастает при увеличении массовой доли содержания алюминия в верхних слоях гетероструктуры фотокаода, и можно достичь уровня ее подавления в 60 раз.

а)



б)

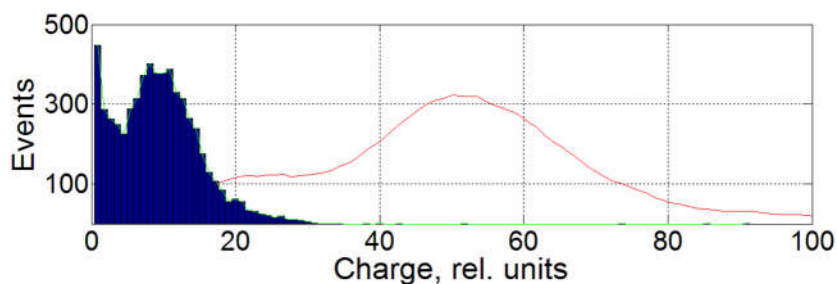


Рисунок 13. Спектр энергетических потерь для космических мюонов, приходящих с зенита, в кристаллах BaF_2 при времени интегрирования 15 нс (синяя гистограмма с зеленым краем) и 400 нс (красный график). Для а) спектр получен при помощи измерений с экспериментальным ФЭУ с $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{N}$ фотокатодом; б) спектр измерен с ФЭУ УФК-4Г-4 («Катод», Новосибирск). На обоих графиках значения по оси X рассчитаны как площадь под оцифрованным импульсом. Для верхнего графика увеличение времени интегрирования приводит к незначительному увеличению рассчитанных энергий, т.е. $E_{\text{slow}} \ll E_{\text{fast}}$.

Для оценки производительности разрабатываемого детектора автором разработана математическая модель сигнала канала детектора с сцинтилляционным кристаллом BaF_2 , учитывающая частотную характеристику детектора. Модель была описана на языке Matlab. При помощи этой модели оценены оптимальные значения эффективности подавления медленной компоненты излучения BaF_2 фотодетектором для различных значений ширины полосы пропускания, необходимые для выполнения требований эксперимента Mu2e по энергетическому и временному разрешению. Из проведенного анализа сделан вывод, что для достижения поставленной точности нужно использовать фотодетектор, обеспечивающий подавление медленной компоненты до уровня быстрой и меньшего. Так описанный нами фотодетектор с AlGaIn фотокатодом обеспечивает достаточный запас надежности по этому показателю.

В заключении диссертации представлены основные выводы и результаты работы:

1. Разработана схема радиационно-стойкого предусилителя с входным каскадом на биполярных транзисторах и схема линейного регулятора, задающего напряжение смещения матрицы фотосенсоров в условиях радиационного воздействия, вакууме и в

- постоянном магнитном поле до 1 Тл для первой фазы эксперимента Mu2e. Параметры схемы проверены при помощи PSpice моделирования и в лабораторных измерениях.
2. На основе данной схемы реализована опытная партия устройств, успешно прошедших серию испытаний на радиационную стойкость при воздействии ионизирующим излучением и потоком нейтронов, испытания в вакуумной камере. Разработанные платы фронт-энд электроники прошли комиссию Construction Readiness Review (CRR) и рекомендованы коллаборацией для применения в установке электромагнитного калориметра эксперимента Mu2e.
 3. Проведено успешное испытание прототипа Module0 электромагнитного калориметра с разработанной фронт-энд электроникой на электронном пучке в LNF (INFN, Фраскати, Италия), в котором достигнуты требуемые значения временного (менее 500 пс) и энергетического ($\sigma_E/E < 10\%$ при $E \approx 100$ МэВ) разрешений.
 4. Разработана методика расчета минимального напряжения пробоя в вакууме для проводников на поверхности печатной платы, использованная при проектировании модулей фронт-энд электроники электромагнитного калориметра Mu2e. Методика опробована в измерениях минимального напряжения пробоя в вакуумной камере в диапазоне давлений $20 \cdot 10^{-3}$ торр, соответствующем условиям работы детектора в эксперименте Mu2e.
 5. Создан экспериментальный стенд для тестирования всех плат фронт-энд электроники электромагнитного калориметра Mu2e в Лаборатории Ядерных Проблем (ОИЯИ, Дубна), на котором проводится контроль основных характеристик плат и настройка перед установкой их в калориметр.
 6. В результате проведенных нами расчетов и исследований образцов гетероструктуры AlGaIn, по нашему техническому заданию, создан опытный образец фотоумножителя с микроканальными пластинами и AlGaIn-фотокатодом, имеющий длинноволновую границу на уровне 260 нм.
 7. Проведено моделирование сигнала калориметра на кристаллах BaF₂ с учетом частотной характеристики фотодетектора, определяемой емкостью фотодетектора и делителем. Получены оптимальные значения полосы пропускания для разных значений уровня подавления медленной компоненты излучения кристаллов BaF₂ при условии обеспечения необходимого энергетического и временного разрешения калориметра Mu2e.
 8. Создан стенд и проведено изучение на космических мюонах сцинтилляционного детектора с кристаллом BaF₂ и образцами фотодетекторов, подавляющих медленную компоненту излучения кристаллов BaF₂. Показано, что опытный образец с AlGaIn-фотокатодом с длинноволновой границей 260 нм позволяет подавить медленную компоненту более чем в 60 раз, что с запасом обеспечивает выполнение требований электромагнитного калориметра установки Mu2e. По результатам проведенных измерений фотоумножитель с AlGaIn фотокатодом предложен в качестве возможного варианта фотодетектора для электромагнитного калориметра из кристаллов BaF₂ второй фазы эксперимента Mu2e.

Список публикаций по теме диссертации

1. N. Atanov, V. Baranov, J. Budagov et al., “The Mu2e Calorimeter Final Technical Design Report”, arXiv:1802.06341 [physics.ins-det], Feb. 2018.
2. N. Atanov, V. Baranov, F. Colao et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 812, 104(2016), doi:10.1016/j.nima.2015.12.055.

3. N. Atanov, V. Baranov, J. Budagov et al., “Electron beam test of the large area Mu2e calorimeter prototype”, J. Phys.: Conf. Ser. 1162 012027 (2018), doi: 10.1088/1742-6596/1162/1/012027.
4. N. Atanov, V. Baranov, J. Budagov et al., ”The Mu2e undoped CsI crystal calorimeter”, JINST 13, C02037 (2018), doi: 10.1088/1748-0221/13/02/C02037.
5. N. Atanov, J. Budagov, F. Cervelli et al., ”The Mu2e crystal calorimeter”, JINST 12, P09017 (2018), doi: 10.1088/1748-0221/12/09/P09017.
6. N. Atanov, V. Baranov, J. Budagov et al., “Design and status of the Mu2e electromagnetic calorimeter”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 824, 695(2016), doi: 10.1016/j.nima.2015.09.074
7. N.V. Atanov, Yu.I. Davydov, V.V. Glagolev et al., “A Photomultiplier with an AlGaN Photocathode and Microchannel Plates for BaF₂ Scintillator Detectors in Particle Physics”, Trans. on Nucl. Sc., 2020, vol.67, no.7, pp. 1760-1764, Jul. 2020, doi: 10.1109/TNS.2020.2998433.
8. N. Atanov, S. Bini, G. Corradi, S. Ceravolo, R. Donghia, “Paschen curve for a PCB trace in low vacuum”, arXiv:2010.06570 [physics.ins-det], Oct. 2020.
9. N. Atanov, V. Baranov, C. Bloise et al., “Construction status of the Mu2e crystal calorimeter”, Journ. Inst., vol.15, no.9, C09035, Sept. 2020, DOI: 10.1088/1748-0221/15/09/C09035.