

Запланированные результаты обучения

Код результата	Результат обучения (Выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
<i>Общекультурные (универсальные) компетенции</i>		
P1	Понимает необходимость самостоятельного обучения и повышения квалификации в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-7), критерий 5 АИОР
P2	Проявляет способность эффективно работать самостоятельно в качестве члена команды по междисциплинарной тематике, быть лидером в команде, консультировать по вопросам проектирования научных исследований, а также быть готовым к педагогической деятельности.	Требования ФГОС (ОК-6, ПК-11), критерий 5 АИОР
P3	Умеет находить зарубежных и отечественных партнеров, владеет иностранным языком, позволяющим работать с зарубежными партнерами с учетом культурных, языковых и социально-экономических условий.	Требования ФГОС (ОК-2, ОК-4), критерий 5 АИОР
P4	Проявляет понимание используемых методов, области их применения, вопросов безопасности и здравоохранения, юридических аспектов, ответственности за профессиональную деятельность и ее влияния на окружающую среду.	Требования ФГОС (ОК-3), критерий 5 АИОР
P5	Следует кодексу профессиональной этики, ответственности и нормам научно-исследовательской деятельности.	Требования ФГОС (ОК-5), критерий 5 АИОР
<i>Профессиональные компетенции</i>		
P6	Проявляет глубокие естественнонаучные, математические профессиональные знания в проведении научных исследований в перспективных областях профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, ПК-1), критерий 5 АИОР
P7	Принимает участие в фундаментальных исследованиях и проектах в области физики низких температур, конденсированного состояния и материаловедения, а также в модернизации современных и создании новых методов изучения механических, электрических, магнитных и тепловых свойств твердых, жидких и газообразных веществ.	Требования ФГОС (ПК-2), критерий 5 АИОР
P8	Способен обрабатывать, анализировать и обобщать научно-техническую информацию, передовой отечественный и зарубежный опыт в профессиональной деятельности, осуществлять презентацию научной деятельности.	Требования ФГОС (ПК-4), критерий 5 АИОР
P9	Способен применять полученные знания для решения нечетко определенных задач, в	Требования ФГОС (ПК-3), критерий 5 АИОР

	нестандартных ситуациях, использует творческий подход для разработки новых оригинальных идей и методов исследования в области физики конденсированного состояния, низких температур и сжижения природного газа.	
P10	Способен планировать проведение аналитических имитационных исследований по профессиональной деятельности с применением современных достижений науки и техники, передового отечественного и зарубежного опыта в области научных исследований, умеет критически оценивать полученные теоретические и экспериментальные данные и делает выводы, знает правовые основы в области интеллектуальной собственности.	Требования ФГОС (ОК-4, ПК-6, ПК-7, ПК-8, ПК-9), критерий 5 АИОР
P11	Умеет интегрировать знания в различных и смежных областях научных исследований и решает задачи, требующие абстрактного и креативного мышления и оригинальности в разработке концептуальных аспектов проектов научных исследований.	Требования ФГОС (ОК-5, ПК-10), критерий 5 АИОР

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа	Инженерная школа ядерных технологий
Направление подготовки	Физика
Отделение школы (НОЦ)	Отделение экспериментальной физики

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП

 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группы	ФИО
ОБМ71	Завазиевой Дарине Тимуровне

Тема работы:

Разработка конфигурации детектора типа Bulk Micromegas для эксперимента COMPASS	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Изготовить прототипы детектора типа Bulk Micromegas различных конфигураций, измерить их базовые характеристики, оценить результаты с учетом требований эксперимента; а также сравнить результаты с литературными данными подтверждения работы технологии производства детекторов типа Micromegas в Объединённом институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия)</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> - Обзор литературы по теме работы; - Изготовление детекторов типа Bulk Micromegas двух конфигураций, различающихся величиной зазора усиления; - Сборка тестовых прототипов, включая схемы подключения и сбора сигнала; - Измерение базовых характеристик прототипов: стабильность работы (т.е. частота разрядов),

	коэффициенты усиления, энергетическое разрешение, - Анализ полученных данных
--	---

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Социальная ответственность	Исаева Елизавета Сергеевна, старший преподаватель
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Меньшикова Екатерина Валентиновна, доцент, к. ф. н.
Иностранный язык	Шайкина Ольга Игоревна, преподаватель

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Глава 1. Введение
Глава 2. Изготовление детекторов типа Micromegas в ОИЯИ
Глава 3. Результаты тестирования прототипов для эксперимента COMPASS
Глава 4. Результаты моделирования
Глава 5. Заключение

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель / консультант (при наличии):

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ ИЯТШ ТПУ	Лидер Андрей Маркович	д. т. н.		
Начальник НЭОВП ЛЯП ОИЯИ	Жемчугов Алексей Сергеевич	к. ф.-м. н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ71	Завазиева Дарина Тимуровна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группы	ФИО
ОБМ71	Завазиевой Дарине Тимуровне

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Физика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Материальные затраты – 291413 руб., амортизационные отчисления – 29372 руб., затраты по основной и дополнительной заработной плате – 297104 руб., отчисления во внебюджетные фонды – 89131 руб., затраты на научные и производственные командировки – 22000 руб.</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Нормы амортизации – от 5 до 20%, затраты на научные и производственные командировки с учетом тарифов транспортных компаний,</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Потенциальные потребители результатов исследования. Выполнение SWOT анализа проекта.</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Составление календарного плана проекта. Определение бюджета НИИ</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Проведение оценки ресурсной и финансовой эффективности исследования.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. <i>Матрица SWOT</i>
2. <i>График проведения НИИ</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Меньшикова Екатерина Валентиновна	Кандидат философских наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБ31	Завазиева Дарина Тимуровна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
ОБМ71	Завазиевой Дарине Тимуровне

Школа	Инженерная школа ядерных технологий	Отделение	Отделение экспериментальной физики
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	Физика

Тема работы	
Разработка конфигурации детектора типа Bulk Micromegas для эксперимента COMPASS	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования – прототипы детектора типа Bulk Micromegas, изготовленные на участке в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия). Рабочая зона – лаборатория Приборы: источники напряжения, электрические измерительные приборы, ПК
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения 1.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<ul style="list-style-type: none"> – вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего; – вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде; – вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера; – вредные производственные факторы, связанные со световой средой; – опасные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей; электрических потенциалов, пожароопасность.
2. Экологическая безопасность: <ul style="list-style-type: none"> – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	В ходе работы были образованы: <ul style="list-style-type: none"> – Полимерные отходы; – Металлические отходы; – Целлюлозные отходы; – Отходы вышедшей из строя электроники. Все отходы сортируются и отправляются на станции приема вторсырья.

<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Возможные ЧС при проведении исследования:</p> <ul style="list-style-type: none"> – пожар; – взрыв; – природный катаклизм. <p>Наиболее вероятной ЧС является пожар.</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; 	<ul style="list-style-type: none"> – ГОСТ 12.0.003-2015 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация – ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования – СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года) – ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения) – ГОСТ Р ИСО 6385-2016 Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Исаева Елизавета Сергеевна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ71	Завазиева Дарина Тимуровна		

Школа Инженерная школа ядерных технологий
 Направление подготовки Физика
 Уровень образования магистратура
 Отделение школы (НОЦ) Отделение экспериментальной физики
 Период выполнения осенний – весенний семестр 2018 /2019 учебного года

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
06.09.2018	Обзор литературы	15
31.10.2018	Отработка технологии изготовления детекторов типа Micromegas в ОИЯИ	20
28.12.2019	Тестирование прототипов для эксперимента COMPASS	20
07.03.2019	Обработка результатов	20
31.05.2019	Социальная ответственность	10
31.05.2019	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	10
31.05.2019	Обязательное приложение на иностранном языке	5

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Начальник НЭОВП ЛЯП ОИЯИ	Жемчугов Алексей Сергеевич	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Руководитель ОЭФ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

ABSTRACT

The Master thesis contains 97 pages, 21 figures, 21 tables, 30 references, 3 appendixes.

Keywords: Micromegas detector, Bulk Micromegas, COMPASS experiment, micro-pattern gaseous detector, gas gain, discharge rate, energy resolution.

The objects of research: prototypes of Bulk Micromegas detectors.

The objective: produce and test prototypes of different configurations in order to find optimal geometry for installation into the setup of COMPASS experiment after its modernization in 2021.

Part of tracking detectors of COMPASS setup needs to be upgraded, and Micromegas detectors are considered for that purpose. MM detectors have some fruitful features such as good time and spatial resolution, low material cost, simplicity in fabrication and maintenance. To upgrade the setup R&D program is planned, design of the detectors and readout electronics needs to be developed.

In the course of the research at the Joint Institute for Nuclear Research prototypes of Bulk Micromegas detectors were fabricated from scratch and tested.

As a result of the research two Bulk Micromegas detectors were produced, they differ by the height of the amplification gap: one is 128 μm , the other one is 192 μm . For the prototypes, basic characteristics such as gas gain, discharge rate, and energy resolution were estimated.

Results of the research were tested at scientific and methodological seminars at the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia) and University of Turin (Italy), and at VIII International Youth Scientific School-Conference "Modern Problems of Physics and Technology" at the National Research Nuclear University MEPhI (Moscow, Russia).

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 97 страниц, 21 рисунок, 21 таблицу, 30 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: Micromegas детектор, Bulk Micromegas, эксперимент COMPASS, микроструктурный газовый детектор, эффективное газовое усиление, частота разрядов, энергетическое разрешение.

Объект исследования – прототипы детектора Bulk Micromegas.

Цель работы – разработка прототипа детектора Bulk Micromegas, отвечающего требованиям эксперимента COMPASS на СуперПротонном Синхротроне (SPS) в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН).

Часть трековых детекторов установки эксперимента COMPASS нуждается в замене на новые чувствительные плоскости, в качестве которых рассматриваются детекторы типа Micromegas. Они обладают хорошими временными и пространственными характеристиками при сравнительно низкой стоимости и просты в изготовлении и эксплуатации. Для осуществления модернизации необходимо проведение работы по выбору конфигурации детекторов, их изготовлению и характеризации.

В ходе работы в Объединенном институте ядерных исследований проводилась работа по отработке технологии изготовления Micromegas детекторов, производству первых прототипов и оценке их характеристик.

В результате работы с нуля были изготовлены детекторы типа Bulk Micromegas двух различных конфигураций – с величиной зазора усиления 128 и 192 мкм; для которых оценена стабильность работы (т.е. частота разрядов); проведены измерения базовых характеристик прототипов: коэффициенты усиления и энергетическое разрешение.

Результаты проведенной работы были апробированы на научно-методических семинарах в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна, Россия) и Университете г. Турина (Италия), на VIII Международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» в НИЯУ МИФИ (г. Москва, Россия).

Определения, обозначения, сокращения и нормативные ссылки

Micromegas (ММ, MICROMEsh Gaseous Structure) детектор – микроструктурный газовый плоский лавинный детектор, работающий на принципе газового усиления

COMPASS (COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) эксперимент – эксперимент на фиксированной мишени на суперпротонном синхротроне в Европейской организации ядерных исследований

SPS (super proton synchrotron) – суперпротонный синхротрон в Европейской организации ядерных исследований

PCB (printed circuit board) – печатная плата

FWHM – full width on high maximum – ширина на полувысоте (для пиков амплитудных распределений)

MIP – minimum ionizing particle – минимально ионизирующие частицы

Оглавление

Глава 1. Введение	15
1.1. Микроструктурные газовые детекторы.....	15
1.1.1. Физические основы работы газовых детекторов	16
1.1.1.1. Ионизация	16
1.1.1.2. Фактор Фано	18
1.1.1.3. Энергетическое разрешение.....	18
1.1.1.4. Диффузия.....	19
1.1.1.5. Дрейф	20
1.1.1.6. Умножение.....	21
1.1.2. Детекторы типа Micromegas.....	22
1.1.2.1. Bulk Micromegas	23
1.1.2.2. Microbulk micromegas	24
1.1.2.3. InGrid	25
1.1.2.4. PiggyBack.....	26
1.2. Эксперимент COMPASS	27
1.2.1. Трековая система эксперимента	28
1.2.2. Замена части детекторов	30
Глава 2. Изготовление детекторов типа Micromegas в ОИЯИ.....	32
2.1. Технология изготовления детекторов ММ	32
2.2. Методика характеристики детекторов ММ и результаты сборки первого тестового прототипа.....	35
Глава 3. Результаты тестирования прототипов для эксперимента COMPASS	39
3.1. Эффективное газовое усиление.....	40
3.2. Стабильность работы прототипов	42
3.3. Энергетическое разрешение	44
3.4. Чувствительность к МIP частицам	45
Глава 4. Заключение.....	47
Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	48
5.1. Предпроектный анализ.....	48
5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования	48
5.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	49
5.2. SWOT-анализ	50

5.3. Инициация проекта	51
5.4. Бюджет научно-технического исследования	53
5.4.1 Расчет материальных затрат	54
5.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование	55
5.4.3. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей работы	56
5.4.4. Расчет затрат на научные командировки	57
5.4.5 Контрагентские расходы	58
5.4.6. Формирование бюджета затрат.....	58
5.5. Определение ресурсной эффективности исследования.....	59
5.6. Выводы	60
Глава 6. Социальная ответственность.....	61
6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	62
6.2. Вредные факторы проектируемой производственной среды.....	63
6.2.1. Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего	64
6.2.2. Вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера.....	66
6.2.3. Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде.....	67
6.2.4. Вредные производственные факторы, связанные со световой средой.....	69
6.3. Опасные факторы проектируемой производственной среды	74
6.3.1. Электробезопасность	74
6.3.2. Пожаровзрывоопасность	75
6.4. Организационные мероприятия для обеспечения безопасности.....	76
6.5. Экологическая безопасность	77
6.6. Защита в чрезвычайных ситуациях.....	77
6.7. Выводы	78
Список литературы	80
Приложение А	83
Приложение Б	96
Приложение В	97

Глава 1. Введение

В первой части настоящей Главы дана краткая историческая справка по микроструктурным газовым детекторам, приведены физические основы их работы и подробно описаны детекторы типа Micromegas.

Во второй части Главы описан эксперимент COMPASS, его система детектирования, обозначена мотивация работы, ее цель и задачи.

1.1. Микроструктурные газовые детекторы

История развития микроструктурных газовых детекторов начинается с описанного Резерфордом и Гейгером (1908г) явления газового усиления заряда вблизи проволоки, вокруг которой создается электрическое поле [1]. В течение века было представлено множество разработок, и проведено множество исследований, способствовавших развитию интереса к газовым детекторам. В 1968г был представлен многопроволочный пропорциональный газовый счетчик (MWPC), за изобретение которого в 1992г Жорж Шарпак получил Нобелевскую премию по физике [2]. В представленном детекторе анодом служило множество параллельных проволок с шагом 2-3 мм, расположенных между двумя металлическими плоскостями – катодами, которые позже также были заменены проволоками или полосками. Благодаря способности многопроволочных камер определять не только положение электронов, но также и с некоторой статистической точностью измерять их количество, были сделаны многие важные открытия в физике частиц. Однако недостатком MWPC камер оставалась малая загрузочная способность, ограниченная ионными зарядовыми эффектами.

Позже был представлен дизайн микрострипового газового счетчика (MSGC), в котором проволоки были заменены на узкие полоски, нанесенные с малым шагом (сотни микрон) на непроводящую подложку [3]. Электрическое поле создавалось в малой области между соседними полосками, что позволило улучшить пространственное разрешение и увеличить загрузочную способность. С разработки MSGC камер началась эра микроструктурных газовых детекторов, в которых размеры зон усиления и считывания уменьшились до субмиллиметровых масштабов.

С тех пор было представлено множество различных структур, позволяющих эффективно регистрировать ионизирующее излучение. Однако на сегодняшний день наиболее распространенными и успешно применяемыми в экспериментах остаются газовые электронные умножители (GEM) [4] и детекторы типа Micromegas [5], на которых мы остановимся более подробно в следующих разделах.

1.1.1. Физические основы работы газовых детекторов

1.1.1.1. Ионизация

Простейшая конфигурация микроструктурного газового детектора состоит из объема с тонким электродом в верхней части и плоскостью считывания в нижней части. Между электродами расположена третья плоскость, разделяющая объем детектора на две области: область дрейфа и область усиления. Весь объем при этом заполнен газом, как правило благородным (чаще всего аргоносодержащим).

Когда фотон (или заряженная частица) попадает в объем газового детектора, теряя энергию с столкновениях с атомами (молекулами) газа, возникают электрон-ионные пары. Среднее число созданных пар пропорционально поглощенной энергии. Образованные электроны дрейфуют в газе (область дрейфа) и умножаются (область усиления), создавая лавину, которая служит детектируемым сигналом.

Электроны образуются в результате протекания двух процессов: первичной ионизации атомов благородного газа и вторичного эффекта, возникающего после снятия возбуждения с фотонов атомами благородного газа в присутствии второго, многоатомного, так называемого газа-гасителя. Поскольку многоатомные молекулы обладают несколькими степенями свободы (т.е. большими коэффициентами фотопоглощения), они могут рассеивать энергию фотонов посредством диссоциации или упругих столкновений (Penning effect) [6].

Среднее число ион-электронных пар, образующихся в газе для начальной энергии E_0 равно:

$$n_e = \frac{E_0}{W}, \quad (1.1.1.1)$$

где W - средняя энергия, необходимая для рождения ион-электронной пары, которая представляет собой сумму потенциала ионизации и энергии, расходуемой на возбуждение. В таблице 1 приведены энергии возбуждения, ионизации и образования ион-электронных пар для различных газов [7].

Количество образованных ион-электронных пар является показателем эффективности работы детектора, однако необходимо учитывать, что не все частицы достигают электродов и могут быть измерены. Двумя основными механизмами, которые протекают наряду с образованием ион-электронных пар, являются рекомбинация атомов и захват электронов электроотрицательными атомами. В отсутствие электрического поля ион-электронные пары будут рекомбинировать под действием силы их электрического притяжения. Присутствие в газе электроотрицательных газов, таких как O_2 , CO_2 или H_2O , может привести к захвату электронов до того, как они достигнут электродов. Благородные газы не являются электроотрицательными; поэтому они наиболее часто используются в газовых детекторах [7].

Таблица 1. Энергии возбуждения, ионизации и рождения ион-электронной пары для различных газов [7].

	$E_{\text{возб}}, \text{эВ}$	$E_{\text{ион}}, \text{эВ}$	$W, \text{эВ}$
H_2	10,8	15,4	37
He	19,8	24,6	41
N_2	8,1	15,5	35
Ne	16,6	21,6	36
Ar	11,6	15,8	26
Kr	10,0	14,0	24
Xe	8,4	12,1	22
CO_2	10,0	13,7	33
CH_4		13,1	28
C_4H_{10}		10,8	23

1.1.1.2. Фактор Фано

Результат столкновения электрона с молекулой газа носит статистический характер, поэтому число первичных электронов (n_e) флуктуирует. Стандартное отклонение (σ) учитывается фактором Фано (F) [8]:

$$\sigma_{n_e}^2 = F \cdot n_e, \quad (1.1.1.2)$$

величина которого варьируется в диапазоне между 0 и 1. Более высокие значения фактора Фано, таким образом, указывают на более широкое распределение в количестве первичных электронов. Теоретический предел, при котором $F = 0$ описал бы случай, в котором протекают только процессы ионизации.

Значения W (из выражения (1.1.1.1)) и F являются характеристиками газа. Они лишь незначительно зависят от вида налетающей частицы и увеличиваются (W до бесконечности, F до 1) по мере того, как начальная энергия электронов уменьшается, приближаясь к потенциалу ионизации газа. Для электронов высоких энергий они приобретают почти постоянные значения.

1.1.1.3. Энергетическое разрешение

Наиболее важной характеристикой детекторов, предназначенных для измерения энергии падающей частицы или излучения, является энергетическое разрешение (способность детектора различать две энергии с близкими значениями). Разрешение измеряется путем облучения детектора моноэнергетическим пучком и оценки спектра. В идеальном случае это будет пик дельта-функции, но в действительности измеряется пик, подобный гауссовскому распределению [9].

Разрешение обычно рассматривается в терминах полной ширины пика на половине его максимума (full width at half maximum – FWHM). Энергии, которые находятся в пределах этой ширины, едва различимы детектором. Общая формула для разрешения может быть выражена как:

$$R (\%) = \frac{\Delta E}{E} \quad (1.1.1.3.1)$$

Из формулы видно, что разрешение детектора зависит от поглощенной энергии. Чем выше энергия падающей частицы, тем лучше разрешение детектора.

Флуктуации числа первичных электронов n_e в уравнении (1.1.1.2), являются первым ограничивающим фактором разрешения газового детектора. Это дает предел энергетическому разрешению обнаружения падающей частицы с энергией E , определяемый выражением:

$$R (\%) = 2,35 \sqrt{\frac{F \cdot W}{E}}, \quad (1.1.1.3.2)$$

где коэффициент, равный 2,35 связывает стандартное отклонение гауссова распределения с его FWHM.

1.1.1.4. Диффузия

Микроскопически ионы и электроны в присутствии электрического поля дрейфуют в объеме, сталкиваясь с молекулами газа. В результате их направление случайно после каждого столкновения. В среднем они принимают скорость u в направлении электрического поля E , которая намного меньше мгновенного значения скорости c , которую они приобретают между столкновениями. Газы, применяемые в детекторах, обычно разбавлены таким образом что расстояние, соответствующее средней длине свободного пробега электронов, намного больше, чем Комптоновская длина волны. Таким образом, их движение может быть описано в соответствии с классическими соображениями [10].

В отсутствие электрического поля электроны и ионы начинают равномерно распространяться из-за многочисленных столкновений с молекулами газа. Предполагая тепловое равновесие, их средняя скорость может быть задана распределением Максвелла:

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (1.1.1.4.1)$$

Из уравнения очевидно, что средняя скорость электронов намного выше, чем скорость ионов, ввиду их гораздо меньшей массы. Распределение зарядов в одном измерении (x) можно описать гауссовым распределением:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}, \quad (1.1.1.4.2)$$

где t - прошедшее время, x – расстояние от точки рождения и D – коэффициент диффузии. Стандартное отклонение вышеуказанного распределения может быть выражено как:

$$\sigma(x) = \sqrt{2Dt}, \quad (1.1.1.4.3)$$

С аналогичными соображениями для трех измерений:

$$\sigma(r) = \sqrt{6Dt}, \quad (1.1.1.4.4)$$

Коэффициент диффузии D можно описать из классической кинетической теории:

$$D = \frac{1}{3} v \lambda, \quad (1.1.1.4.5)$$

где λ - длина свободного пробега электронов или ионов в газе, которая может быть классически выражена как:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{kT}{\sigma_0 P}, \quad (1.1.1.4.6)$$

где σ_0 – полное сечение столкновения с молекулой газа и P – давление газа.

Подставляя выражение (1.1.1.4.6) в (1.1.1.4.5), получаем зависимость коэффициента диффузии от параметров газа:

$$D = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sigma_0 P} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}} \quad (1.1.1.4.7)$$

1.1.1.5. Дрейф

Ионы и электроны при наличии электрического поля пролетают в объеме, сталкиваясь с молекулами газа. Столкновение вызывает уменьшение их скорости и разброс вокруг их средней траектории. Средняя скорость, которую они приобретают, определяется как скорость дрейфа, и она зависит от среднего времени между двумя столкновениями τ , электрического поля E и их массы m . Кроме того, для ионов скорость дрейфа обратно пропорциональна давлению газа [10].

Подвижность электронов и ионов можно определить как:

$$\mu = \frac{u}{E}, \quad (1.1.1.5.1)$$

где u - скорость дрейфа. Для идеальных газов, в которых ионы и электроны постоянно находятся в тепловом равновесии, подвижность и коэффициент диффузии могут быть связаны выражением:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e} \quad (1.1.1.5.2)$$

Из приведенного уравнения видно, что диффузия электронов намного выше, чем у положительных ионов, благодаря их более высокой подвижности.

1.1.1.6. Умножение

Когда электрическое поле достаточно велико, чтобы электроны между двумя столкновениями приобретали достаточную для ионизации энергию, рождается другой электрон – развивается лавина. Поскольку число электронов увеличивается в последующих поколениях, лавина продолжает расти, пока все электроны не будут собраны на аноде. Ввиду более высокой подвижности электронов они собираются как бы на дне капли воды, а ионы, медленно дрейфующие, остаются в хвосте [10].

Расстояние, которое электрон пройдет между двумя актами ионизации, определяется как длина свободного пробега ионизации. Первый коэффициент Таунсенда, a , является обратной величиной этой величины. Он представляет собой количество ион-электронных пар, созданных на единицу длины. Если изначально существует n электронов, то пройдя расстояние dx , количество созданных электронов будет:

$$dn = n a dx, \quad (1.1.1.6.1)$$

Интегрируя приведенную формулу, получим выражение общего числа электронов, рожденных на пути x в однородном электрическом поле E :

$$n = n_0 e^{ax}, \quad (1.1.1.6.2)$$

где n_0 - начальное число электронов. Коэффициент газового усиления газа G is0 определяется как:

$$G = \frac{n}{n_0} = e^{ax} \quad (1.1.1.6.3)$$

Газовое усиление не может увеличиваться после определенного предела, при котором возникают пробой. Наиболее сложной задачей в газовых детекторах

является достижение стабильной работы с максимально возможным усилением. Предел газового усиления называется ограничением Ретера (Raether limit) и определяется как $G < 10^6 - 10^7$ в аргонсодержащих смесях [11].

1.1.2. Детекторы типа Micromegas

Стандартная схема ММ детектора представлена на рисунке 1.1.2.а: газовое усиление создается в узком зазоре (области усиления) около 100 мкм между сеткой и считывающим электродом. Размер зазора зоны усиления задается изоляционными столбиками – пилларами. При создании сильного ($\approx 30-100$ кВ/см) электрического поля в зоне усиления и относительно слабого (≈ 1 кВ/см) поля в дрейфовой зоне (между катодом и сеткой) электроны двигаются по направлению к сетке, и концентрируясь в ее ячейках, умножаются в области усиления (Рисунок 1.1.2.б).

Коэффициент усиления ММ детекторов достигает 10^4 . Энергетическое разрешение (для энергии 5,9 кэВ) – меньше 20%. К преимуществам ММ камер следует отнести высокое временное разрешение – 1-10 нс, а также высокую загрузочную способность – до МГц/см² [12].

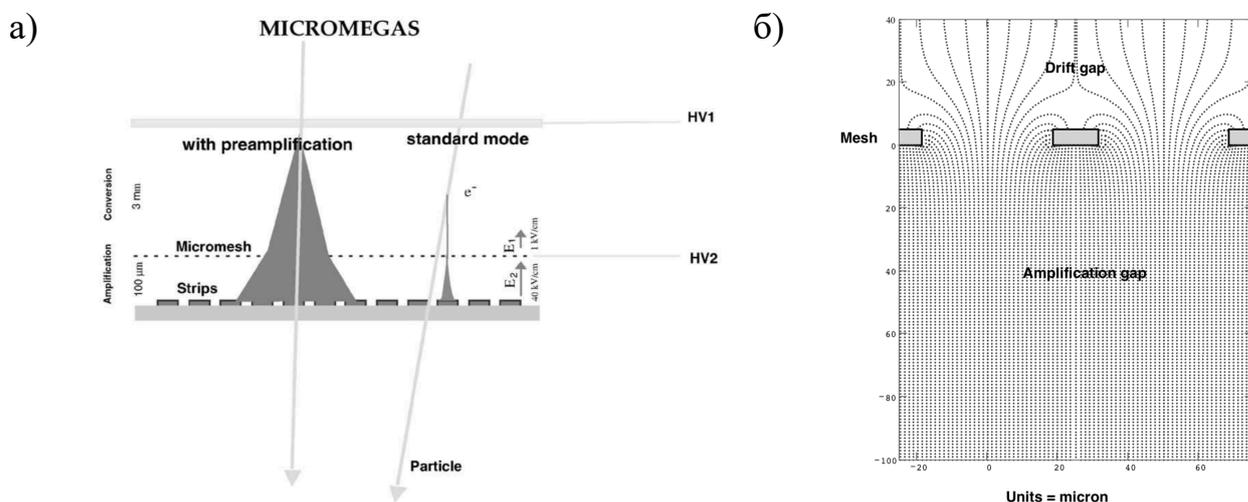


Рисунок 1.1.2. а – схематическое изображение ММ детектора, б – конфигурация электрических полей в ММ детекторе [5].

Первые прототипы ММ состояли из двух прикрученных друг к другу каркасов, на которые были приклеены анодная плоскость и металлическая сетка. Расстояние между анодом и сеткой задавалось размещением между ними

непроводящих пластин или лески. Ввиду посредственной плоскостности и параллельности в таком методе сборки, прототипы характеризовались неравномерностью газового усиления и пространственного разрешения, что привело к разработке новых типов ММ детекторов.

1.1.2.1. Bulk Micromegas

Bulk ММ характеризуется такой конфигурацией, в которой сетка представляет собой одно целое со считывающим электродом [13]. Величина зазора усиления так же, как и в обычных ММ, задается пилларами, которые наращиваются на поверхности печатной платы фотолитографическими методами, и в которые «встраивается» сетка, образуя тем самым одно целое со считывающим электродом. Также возможна конфигурация с «плавающей» сеткой, когда натянутая на каркасе сетка опускается на считывающий анод, на котором расположены пиллары.

Простота изготовления Bulk ММ делает возможным создание детекторов больших площадей по сравнительно низкой стоимости. За счет хорошей параллельности и, соответственно, однородности электрического поля, характеристики детектора, такие как газовое усиление, энергетическое и пространственное разрешения, равномерны по площади. Энергетическое разрешение Bulk ММ достигает 18% на 5,9 кэВ, газовое усиление – $2 \cdot 10^4$.

На сегодняшний день Bulk ММ успешно применяется во многих экспериментах, в том числе:

- во время-проекционной камере эксперимента T2K, направленного на изучение нейтринных осцилляций [14];
- во время-проекционной камере проекта MIMAC, нацеленном на детектирование темной материи [15], где Bulk ММ служат для восстановления треков от слабо взаимодействующих тяжелых частиц (WIMP);
- в центральной трековой системе спектрометра CLAS12, работающего для изучения структуры адронов [16].

Характеристики детектора напрямую зависят от величины зазора усиления и геометрии сетки. Чем сетка тоньше, тем однороднее поле усиления –

тем лучше энергетическое разрешение. Большой зазор усиления обеспечивает более высокое усиление при меньших напряжениях, однако временные характеристики падают. Исследование подобных закономерностей актуально для коллаборации COMPASS. Как правило, в экспериментах зазор усиления детекторов Bulk MM составляет 128 мкм, в рамках данной работы изучаются характеристики прототипа нестандартной конфигурации – с зазором в 192 мкм.

1.1.2.2. *Microbulk micromegas*

Microbulk MM [17] также представляет собой конфигурацию, в которой сетка и анод являются одним целым, однако вместо привычной плетеной сетки, «встраиваемой» в пиллары, в данном случае – структура, полученная травлением особым образом меди и каптона (Kapton® – полиимидный материал).



Рисунок 1.1.2.2. Схема изготовления двух-координатного детектора *Microbulk MM* [2].

В качестве исходного материала для Microbulk MM выступает тонкая (50 мкм) полиимидная пленка с двухсторонним медным покрытием (5 мкм). Пленка приклеивается к жесткой подложке, на которой как правило располагаются считывающие стрипы или пады. Поверх структуры наносится фоторезистивная пленка (25 мкм) и засвечивается ультрафиолетовым светом в соответствии с требуемой геометрией. Медное покрытие под не засвеченными участками удаляется с помощью стандартных литографических методов, образуя сетчатую структуру. Затем частично вытравливается и удаляется каптоновый слой, оставляя под медью пиллары. Таким образом, зазор усиления может составлять

25 – 50 мкм. На рисунке 1.1.2.2 поэтапно показан процесс изготовления двух-координатного Microbulk ММ детектора.

Microbulk ММ имеет наименьшее по сравнению с другими ММ детекторами энергетическое разрешение – 10,5% на 5,9 кэВ, усиление достигает 10^5 [18]. Стоит также отметить малый расход материала. Однако Microbulk детекторы отличаются своей хрупкостью и сравнительно высоким уровнем электронного шума из-за более высокой емкости.

Данный тип ММ детекторов применяется в экспериментах CAST (CERN Axion Solar Telescope) и n_TOF (neutron time-of-flight facility at CERN). Для детектора CAST изготавливается двух-координатный Microbulk ММ, предназначенный для регистрации фотонов, производимых от аксионов в сильном магнитном поле [19]. В эксперименте n_TOF Microbulk ММ служит для исследования пространственных характеристик нейтронного пучка [20].

1.1.2.3. InGrid

Архитектура Ingrid детектора характеризуется алюминиевой сеткой, интегрированной в кремниевую подложку [21]. Сетка строится на этапе постобработки, аналогичной производству Bulk Micromegas и состоит из пилларов из негативного фоторезиста на основе эпоксидной смолы высотой 50 мкм и алюминиевой плоскости толщиной 0,8 мкм с круглыми (GEM-подобными) отверстиями, которые согласуются с пикселями интегральной схемы.

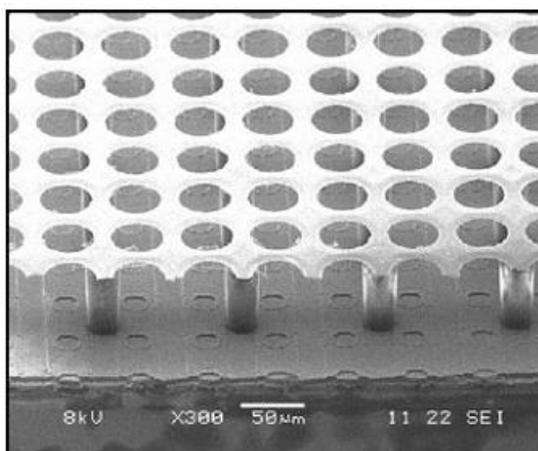


Рисунок 1.1.2.3. Микрофотография детектора InGrid [21].

Процесс изготовления InGrid состоит из следующих этапов: очистка и окисление кремниевой подложки; осаждение и структурирование анода; осаждение и облучение негативного фоторезистивного слоя; осаждение и формирования структуры сетки и, наконец, удаление необлученных участков фоторезиста через отверстия сетки.

Основными достоинствами данного детектора являются высокая чувствительность к одиночным электронам, высокая эффективность восстановления трека частицы, высокое пространственное и угловое разрешение, высокое разрешение по энергии и чрезвычайно высокая радиационная стойкость. Однако изготовление детекторов больших площадей весьма затратно и трудоемко.

В настоящее время InGrid-детекторы с дрейфовым зазором в несколько миллиметров предлагаются для модернизации координатной системы ATLAS на супер-БАК [22].

1.1.2.4. PiggyBack

Piggyback детектор представляет собой конфигурацию, в которой детектирующая часть отделена от считывающей слоем керамики [23]. В таком решении детектор может быть объединен со считывающим пиксельным массивом современных электронных интегральных схем [24]. Сигнал передается посредством емкостной связи на площадки считывания.

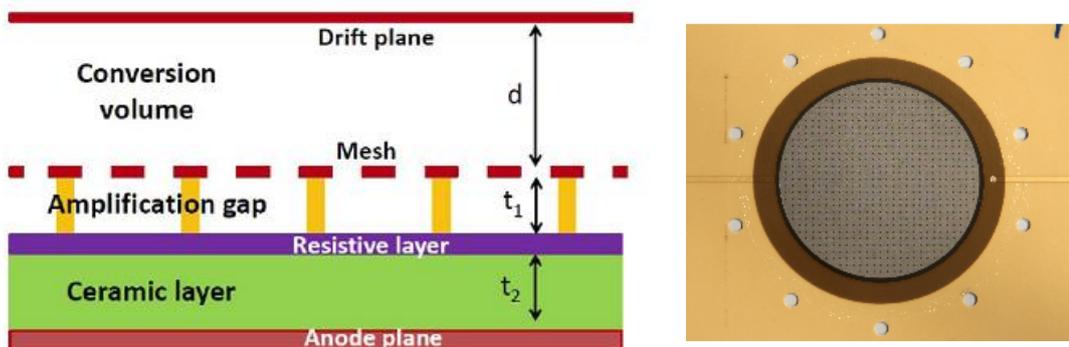


Рисунок 1.1.2.4. Схематичное изображение и (слева) и фотография прототипа (справа) InGrid детектора [24].

С целью оптимизации индуцированного посредством емкостной связи сигнала толщина диэлектрика t_2 должна удовлетворять условию $tt_2 \ll t_1 \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$, где

ϵ_1 является диэлектрической постоянной среды 1 (газ), а ϵ_2 - среды 2 (изолятор). Поскольку изолятор играет одновременно роль стенки контейнера газового детектора, толщина не должна превышать несколько сотен мкм. Для того чтобы соответствовать указанному условию, материал должен иметь как можно большую диэлектрическую проницаемость. Как правило, применяется изолятор из керамики, имеющей диэлектрическую постоянную $\gg 10$. В целях защиты от разрядов на поверхность изолятора наносится резистивный слой –оксид рутения (RuO_2), имеющий удельное сопротивление около $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Коэффициент усиления данного типа детекторов достигает 10^5 , а энергетическое разрешение на $5,9 \text{ кэВ}$ – 21% [23].

Предложенная схема обеспечивает полную защиту электроники от пробоя; также поскольку газовый объем детектора полностью отделен от считывающей плоскости, вариант конструкции считывающей электроники можно выбирать в зависимости от потребностей эксперимента. К тому же, достаточно легко прикладывать напряжение на сетку и анод, а катод тем временем держать заземленным без необходимости схемы развязки высокого напряжения для анодных сигналов.

Детектор типа Piggyback в настоящее время применяется для регистрации мягких ($1 - 15 \text{ кэВ}$) рентгеновских лучей в рамках проекта MM-Caliste [25].

1.2. Эксперимент COMPASS

Установка COMPASS [26] представляет собой универсальный спектрометр, построенный на базе двух спектрометрических магнитов. Условно она может быть разделена на три части: пучковую часть, отвечающую за реконструкцию трека и идентификацию налетающей частицы; спектрометр больших углов (LAS - Large Angle Spectrometer) и спектрометр малых углов (SAS - Small Angle Spectrometer). В состав каждого из спектрометров входят помимо трековых детекторов электромагнитный и адронный калориметр, а также система идентификации мюонов. В состав LAS входит детектор черенковских

колец RICH, обеспечивающий идентификацию вторичных адронов. Третий электромагнитный калориметр ECAL0 расположен непосредственно за мишенью. В различных сеансах использовались различные поляризованные и ядерные мишени, а также жидководородная мишень. Кроме того, вольфрамовый адронный поглотитель, использовавшийся в сеансе по набору данных для изучения процесса Дрелла-Яна, может использоваться в качестве дополнительной мишени для изучения EMC-эффекта. В разных сеансах использовались пучки положительных (160 ГэВ/с и 200 ГэВ/с) и отрицательных (190 ГэВ/с), мюонов, а также пучки адронов с энергией 190 ГэВ, положительных (~75% протонов, ~24% пионов) и отрицательных (~97% пионов, ~2% каонов). Таким образом, большой набор комбинаций «пучок-мишень» позволяет эффективно решать широкий класс задач по изучению свойств адронов, адронных взаимодействий и адронной спектроскопии. На рисунке 1.2 представлена схема установки эксперимента.

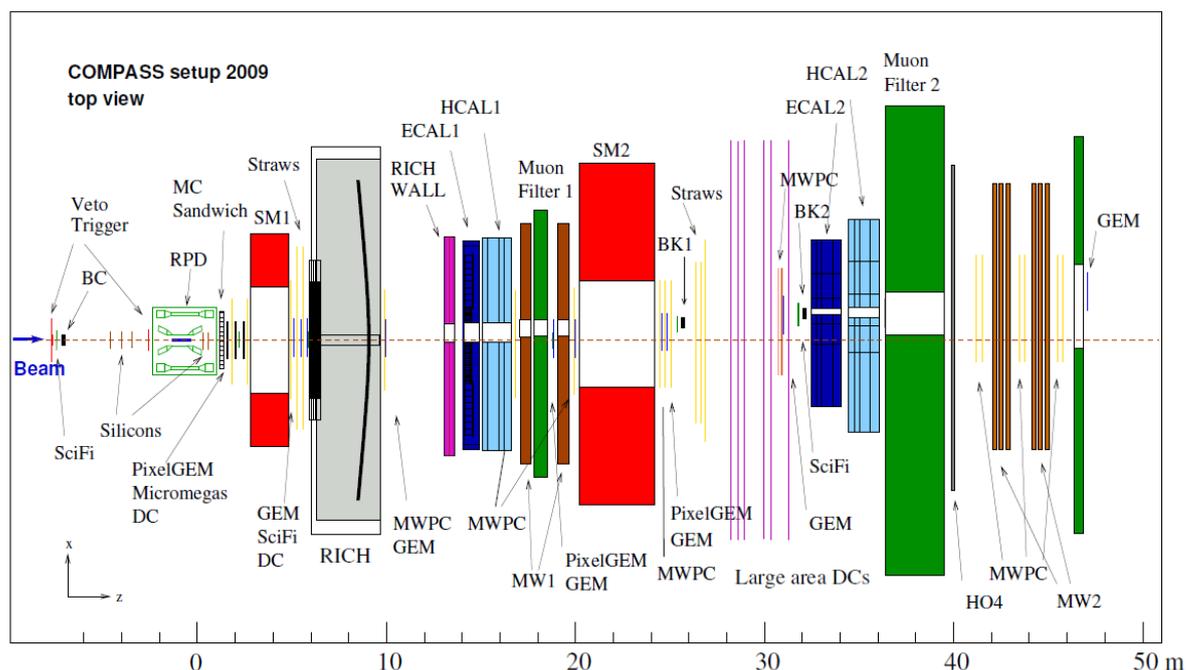


Рисунок 1.2. Схема установки COMPASS [17].

1.2.1. Трековая система эксперимента

Трековая система COMPASS включает в себя множество станций, распределенных по всей длине спектрометра, что в общей сложности составляет

350 чувствительных плоскостей. Каждая станция состоит из набора детекторов одного типа, расположенных примерно на одной и той же z-координате вдоль луча. Область, которая должна быть покрыта детекторами, является большой, и требования к трекингу изменяются с расстоянием от оси пучка. Вблизи пучка детекторы должны обладать высокой загрузочной способностью, обеспечивать хорошую синхронизацию и пространственное разрешение; в области, удаленной от оси пучка, поток частиц менее интенсивен, и требования к детекторам могут быть ослаблены. Таким образом, можно выделить три основных типа детекторов трекинга: трекаеры очень маленькой, малой и большой площади [27].

На очень малой площади (около 3 см) вокруг пучка поток частиц достигает 10^5 Гц/мм², и в качестве трекаеров (VSAT – Very Small Area Trackers) здесь применяются сцинтиллирующие волокна (SciFi), кремниевые микростриповые детекторы и пиксельные микроструктурные газовые детекторы. Для сцинтиллирующих волокон временное разрешение составляет 300 – 450 пс, эффективность регистрации выше 99%. Для кремниевых детекторов временное разрешение около 2,5 нс, пространственное разрешение около 10 мкм.

На расстоянии до 30 – 40 см от пучка располагаются трекаеры малой площади (SAT – Small Area Trackers), в их роли выступают плоскости GEM и Micromegas детекторов со стриповым двумерным считыванием. Пространственное разрешение для GEM детекторов составляет 70 мкм, временное – 12 нс. Для плоскостей Micromegas эффективность регистрации держится на уровне 96 – 98%, пространственное разрешение около 90 мкм, временное – 5 нс.

И наконец наиболее слабый поток в самых удаленных областях, охватываемых трекаерами больших площадей (LAT – Large Area Trackers), позволяет использовать многопроволочные пропорциональные счетчики, дрейфовые и Строу (Straw) камеры. Площадь активной зоны здесь достигает почти 2 м², в центральной части камер мертвые зоны достигают 30 см в диаметре. Для дрейфовых камер пространственное разрешение в разных частях

спектрометра составляет от 190 до 500 мкм. Строу камеры показали разрешение в 200 мкм. Для MWPC разрешение слабее всего – 1,6 мм.

1.2.2. Замена части детекторов

Разделение треков на отдельные площади является нецелесообразным с точки зрения использования пространства для размещения считывающей электроники, затрат на нее и источники высокого напряжения; к тому же применение разных видов детекторов подразумевает применение разных газовых смесей, что также доставляет неудобства. В этой связи с целью оптимизации части трековой системы, и ввиду старения некоторых чувствительных плоскостей, принято решение заменить системы, состоящие из многопроволочных пропорциональных камер и GEM детекторов, расположенных за магнитом SM2, на детекторы, которые отвечали бы требованиям новой физической программы и были бы проще в обслуживании.

Одними из кандидатов на эту роль предложены детекторы типа Micromegas. В случае двумерного считывания стрипами в центральной близкой к оси пучка части детектора предлагается считывать одну полосу в один канал, по мере же удаления от пучка считывающие полосы предложено объединять. Таким образом одна чувствительная плоскость может достигать сравнительно больших площадей и объединять в себе характеристики, требуемые для различных областей, при этом цифровая часть будет также единой для всей плоскости.

После модернизации каждая станция будет иметь активную площадь около $1,5 \text{ м}^2$ с двумя или тремя координатными плоскостями и шагом около 2 мм. Новые детекторы будут оснащены новой регистрирующей электроникой с загрузочной способностью около 1 МГц на канал. Общее количество каналов составит около 28 000 [28].

Основными требованиями, предъявляемыми к детекторам, являются:

- стабильная работа при усилениях $> 10^3$;
- чувствительность к единичным частицам;
- эффективность регистрации заряженных частиц $> 98\%$;

- высокая нагрузочная способность – до МГц/см²;
- временные характеристики < 10 нс;
- пространственное разрешение < 100 мкм в центральной части и < 2 мм в удаленных от оси пучка областях.

Таким образом, коллаборацией запланирована методическая работа по разработке детекторов типа Micromegas для их установки в состав спектрометра эксперимента COMPASS. Работа, проведенная в рамках настоящей магистерской диссертации, является первым этапом запланированной R&D программы.

Целью работы определено изготовить и протестировать конфигурацию детектора типа Bulk Micromegas, которая бы отвечала требованиям эксперимента с точки зрения достигаемых усилений и стабильности работы.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- подобрать оптимальные технологические режимы изготовления детекторов типа Bulk Micromegas на участке в ОИЯИ;
- изготовить образцы двух конфигураций, различающихся величиной зазора усиления;
- собрать тестовые камеры для проведения измерений;
- оценить усиление детекторов;
- оценить стабильность работы прототипов при достигаемых усилении;
- оценить энергетическое разрешение детекторов при достигаемых усилении.

Глава 2. Изготовление детекторов типа Micromegas в ОИЯИ

В Лаборатории ядерных проблем Объединенного института ядерных исследований запущен и введен в эксплуатацию участок для создания детекторов типа Micromegas. Следует отметить, что это третья лаборатория в мире, в которой возможно изготовление детекторов типа Bulk MM (после CEA Saclay, Франция и ЦЕРН, Швейцария). Производственная линия предусматривает полный цикл создания детекторов, за исключением изготовления печатных плат. В приведенной главе подробно описана технология создания детекторов, а также представлены результаты сборки первого тестового прототипа.

2.1. Технология изготовления детекторов MM

Первым этапом создания Bulk MM является нанесение фоторезистивного слоя на печатную плату для дальнейшего формирования пилларов. Для прототипов в рамках данной работы была разработана плата с активной площадью 90×90 мм² и 124 считывающими полосками – стрипами шириной 500 мкм и шагом 650 мкм. В качестве фоторезистивного слоя была выбрана пленка DuPont Pyralux 1025 толщиной 64 мкм. Для создания зазоров усиления величиной 128 мкм и 192 мкм наносилось два и три слоя фоторезистивной пленки, соответственно.

Нанесение фоторезистивного слоя производится на роликовом ламинаторе C SUN CSL–M25E. Для обеспечения равномерного покрытия платы и адгезионной прочности были подобраны оптимальные параметры:

- температура ламинирующего ролика – 100°C;
- температура прижимающего ролика - 50°C;
- давление, создаваемое между роликами – 3 кг/см²;
- скорость ламинации (скорость прохождения платы между роликами)- 1 м/мин.

Кроме того, перед нанесением фоторезиста печатная плата предварительно нагревалась до температуры 50°C.

Вторым этапом изготовления детектора является нанесение предварительно натянутой сетки на плату с фоторезистом. Натяжение создается

с помощью растягивания сетки в двух направлениях с помощью прибора GRÜNIG G–Stretch 215 A1. По достижении силы натяжения 10-15 Н/см сетка накладывается на раму и фиксируется эпоксидным клеем. В нашем случае была выбрана плетеная сетка из нержавеющей стали, диаметр проволоки сетки – 18 мкм, ширина ячеек – 63 мкм (просвет – 45 мкм). После наложения сетки на плату наносится фиксирующий слой фоторезиста.

Следующий этап создания детектора – засветка (инсоляция) платы с нанесенным фоторезистом и сеткой ультрафиолетовым излучением. Засветка производится в полуавтоматическом инсоляторе С SUN UVE–M500 через шаблон с обозначенными отверстиями на местах, где будут сформированы пиллары. Основным параметром работы инсолятора является энергия засветки; для одного слоя фоторезистивной пленки подобрана энергия в 0,2 мДж/см². В качестве источника УФ излучения в инсоляторе используется ртутная лампа мощностью 5кВт (интенсивность - 14-15 мВт/см²).

Поскольку фоторезистивный слой отличается высокой чувствительностью к ультрафиолету, вся работа проводится в помещении с желтым светом. Для прототипов в рамках настоящей работы инсоляция проводилась в соответствии с фотошаблоном с отверстиями, диаметр которых составил 1 мм, а расстояние между ними – 20 мм.

Завершающим этапом работы по изготовлению детектора является травление незасвеченного фоторезистивного слоя. Травление проводится в 1% растворе кальцинированной соды - Na₂CO₃. Температура раствора поддерживается на уровне комнатной температуры (в пределах 23-25°С). Травление осуществляется внутри струйного аппарата химического травления Bungard Elektronik Sprint 6000, в котором задается скорость подачи платы на вращающиеся ролики, в рамках работы скорость варьировалась в пределах от 0,2 до 0,6 м/мин. Плата пропусклась по линии аппарата несколько раз до полного вымывания фоторезистивного слоя.

После травления осуществляется промывка плат деонизированной водой и сушка в печи в течение четырех часов при температуре 140°C для отверждения фоторезистивной пленки.

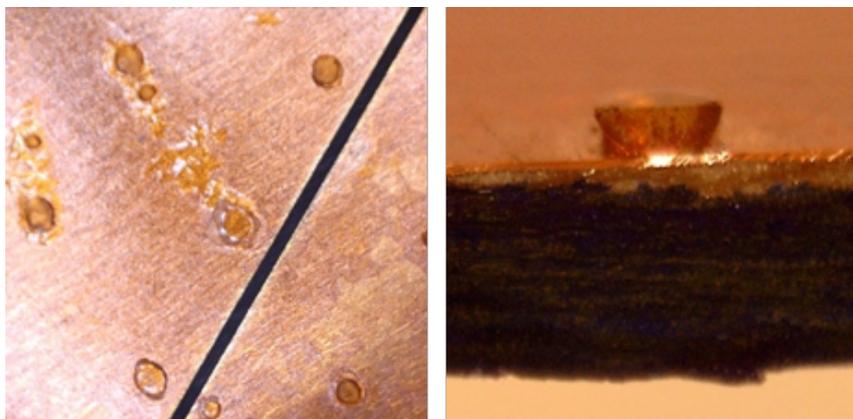


Рисунок 2.1.1. Следы не вытравленного фоторезистивного слоя после спекания – «мертвые» зоны (слева) и вид сбоку на пиляры (справа).

Следует отметить, что качество изготовления детекторов оценивается равномерностью электрического поля в зазоре усиления, иначе говоря, равномерностью его высоты, а значит – высотой пиляров. Кроме того, важную роль в оценке качества играет форма столбиков и чистота поверхности печатной платы: высокая скорость подачи платы, высокая температура, загрязненный раствор при химическом травлении могут приводить к неполному вымыванию фоторезистивного слоя, что может обернуться образованием «мертвых» областей на площади платы; низкая скорость, многократное пропускание платы по линии аппарата напротив приводят к «перетравленным зонам», то есть к неправильной форме пиляров (суженных к основанию), что чревато их отламыванием или образованием загрязнений вокруг них, приводящих к пробоям при подаче разности потенциалов (Рисунок 2.1.1).

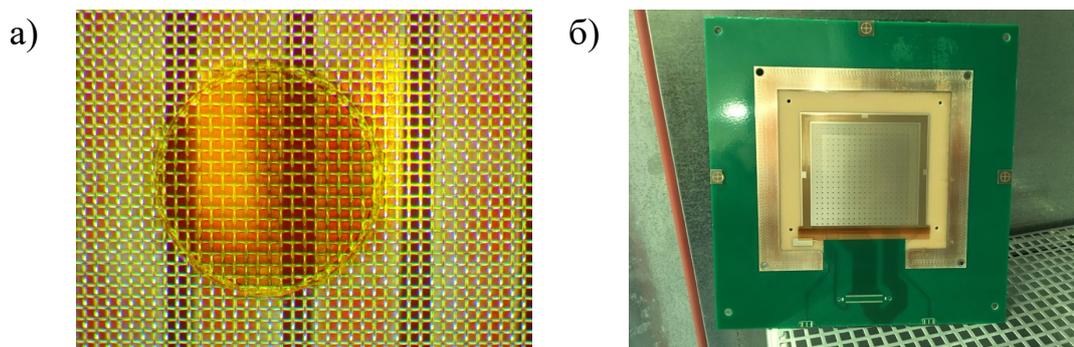


Рисунок 2.1.2. а – увеличенная фотография полученной геометрии детектора, б – печатная плата изготовленного детектора.

2.2. Методика характеристики детекторов ММ и результаты сборки первого тестового прототипа

Для оценки качества изготовления и апробирования технологии сначала была собрана тестовая камера, ее схема представлена на Рисунке 2.2.1. В данном случае в качестве считывающего электрода была выбрана печатная плата с десятью медными полосками шириной 1 см и расстоянием 500 мкм между ними. Ввиду своей доступности для первого прототипа была использована «грубая» сетка из нержавеющей стали: диаметр проволоки – 30 мкм, просвет – 80 мкм. Величина дрейфовой зоны составила 5 мм. На катод подавалось напряжение отрицательной полярности величиной 300 В, на сетку – нулевое напряжение, на анод (стрипы) – напряжение положительной полярности величиной от 450 до 520 В.

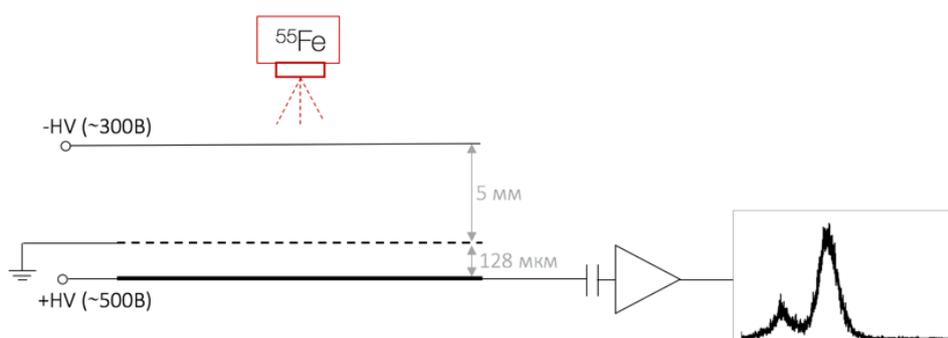


Рисунок 2.2.1. Схема собранной тестовой камеры.

Для оценки работы детектора объем камеры непрерывно поддерживался в потоке газовой смеси ArCO_2 , 93% – аргона, 7% – углекислого газа (поток около одного литра в час). Для измерений использовался источник гамма частиц – изотоп железа – ^{55}Fe . Регистрация сигнала со стрипов проводилась путем непрерывной оцифровки с помощью амплитудного анализатора MCA527 через усилитель NAICAM CB200PC.

В первую очередь было оценено так называемое энергетическое разрешение – FWHM (full width on high maximum) – ширина пика амплитудного распределения сигнала на полувысоте. Оно рассчитывается как отношение ширины к номеру канала (амплитуде); распределение сигнала ^{55}Fe приведено на Рисунке 2.2.2. Для тестовой камеры энергетическое разрешение составило 23%. Оценка данной величины не несет практической значимости и проводится с целью мониторинга равномерности газового усиления. Данный разброс говорит о статистических флуктуациях усиления газа и числа первичных электронов.

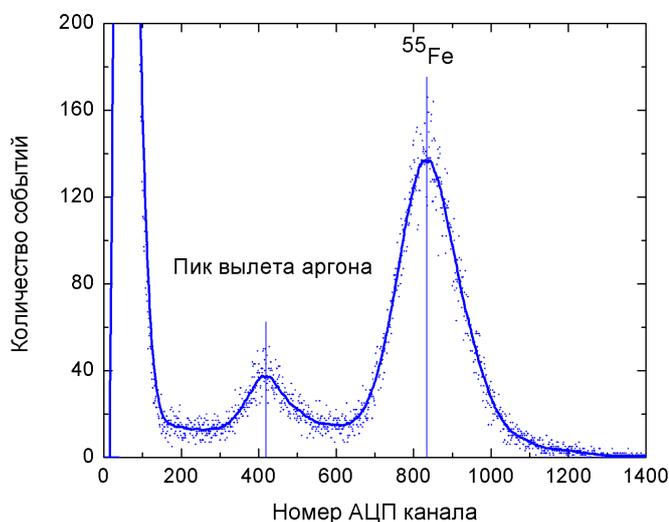


Рисунок 2.2.2. Амплитудное распределение сигнала от ^{55}Fe для тестовой камеры.

Вторым показателем нормальной работы детекторы является достаточное газовое усиление. Оценка его величины сводится к расчету коэффициента эффективного газового усиления, которое на практике представляет собой

отношение количества собранных на аноде электронов к числу первичных электронов. Из расчетов на основе потенциала ионизации для частиц ^{55}Fe энергии 5,9 кэВ в смеси ArCO_2 93:7 количество первичных электронов составляет 224. В проведенных измерениях положение пика амплитудного распределения было преобразовано в заряд с учетом калибровки путем подачи на вход усилителя тестовых сигналов от импульсного генератора с различной степенью ослабления; величина заряда была пересчитана на количество электронов.

Максимальное усиление для тестового прототипа составило около 4200 при напряжении на аноде в 520 В. На Рисунке 2.2.3 представлена зависимость эффективного газового усиления от прилагаемой к зоне усиления разности потенциалов. Дальнейшее увеличение напряженности для получения большего усиления было невозможно ввиду нестабильной работы детектора по причине возникновения искровых разрядов. Факторами, вызывающими пробой, могут

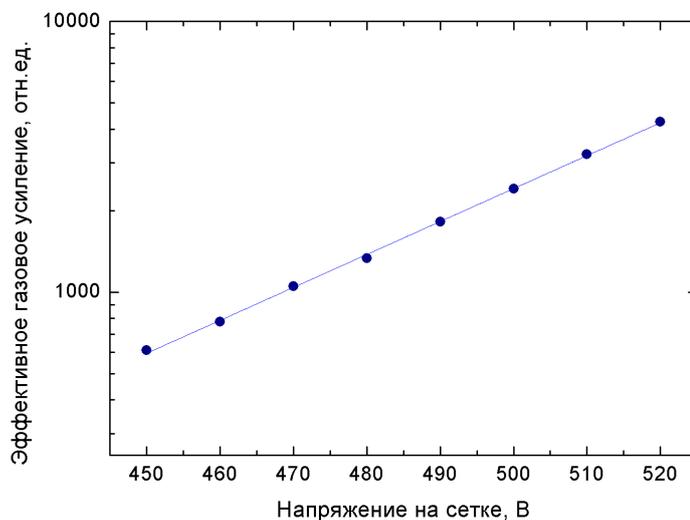


Рисунок 2.2.3. Зависимость усиления от приложенного напряжения.

служить частички пыли, имеющиеся в объеме газового усиления; шероховатость и дефекты на поверхности печатной платы и/или сетки. Обозначенные проблемы могут быть легко устранены на этапе сборки камеры. Однако зачастую разряды возникают и после дополнительно проведенной очистки, в таком случае можно

говорить о недостаточной равномерности электрического поля ввиду геометрии стрипов и сетки, тогда проблема может быть частично устранена заменой сетки на более тонкую, а также пересмотром топографии считывающей поверхности. Необходимо отметить, что решить проблему возникновения пробоев полностью невозможно: высокоэнергетические частицы всегда будут создавать плотные лавинные токи, «просаживающие» прикладываемое напряжение. Для минимизации таких эффектов в экспериментах применяются платы с резистивным покрытием, обеспечивающим стабильную работу детектора [29].

Вдобавок, с помощью камеры был записан сигнал от космических лучей – MIP (minimum ionizing particles) – Рисунок 2.2.4. Распределение сигнала имеет явно выраженную форму функции Ландау, что свидетельствует о чувствительности детектора к единичным частицам.

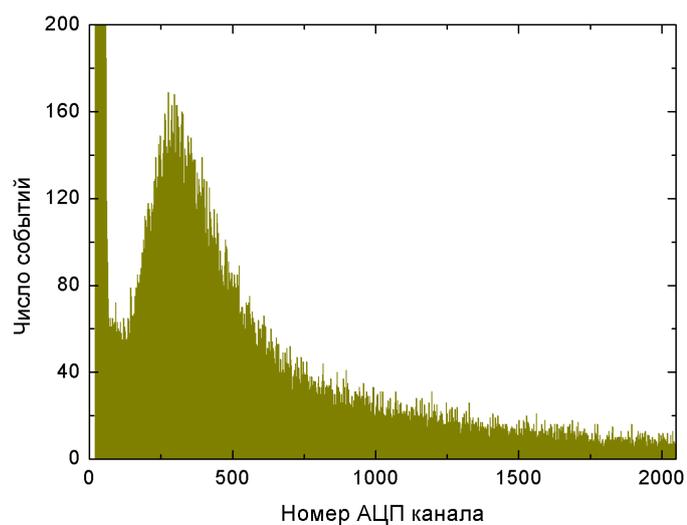


Рисунок 2.2.4. Распределение сигнала от космических частиц.

Глава 3. Результаты тестирования прототипов для эксперимента COMPASS

Как было отмечено в Главе 1 эксперимент COMPASS на SPS в ЦЕРН нуждается в модернизации части его системы детектирования. ММ детекторы являются одними из «кандидатов» на роль новых плоскостей в составе эксперимента. В рамках запланированной методической работы для того, чтобы ответить требованиям эксперимента, необходимо выбрать дизайн (как детектора, так и считывающей электроники) и определить их рабочие параметры. В настоящей Главе представлены результаты сборки и тестирования прототипов двух конфигураций детектора типа Bulk ММ с различной величиной зазора усиления – 128 и 192 мкм. Высота в 128 мкм является «стандартной» для многих экспериментов. Однако для эксперимента COMPASS рассматривается возможность установки детекторов с большим зазором. Ожидается, что достижение достаточного усиления для конфигурации с большим зазором усиления будет возможно с меньшей напряженностью электрического поля, то есть будет обеспечена более стабильная работа детектора.

Схема собранных для измерений камер представлена на Рисунке 3. Величина дрейфовой зоны в обоих случаях составила 5 мм. Все измерения проводились в газовой смеси ArCO_2 , состоящей на 93% из аргона, на 7% из углекислого газа, поток – около двух литров в час в объеме камеры $\approx 1 \text{ дм}^3$. Для измерений использовался источник гамма частиц – ^{55}Fe с энергией фотонов 5,9 кэВ. В отличие от тестовой камеры, в данном случае была изменена схема подключения: на анод и катод подавались напряжение одинаковой полярности, считывающий электрод находился под нулевым потенциалом, такой схемы требует считывающая электроника, которую планируется адаптировать в будущем.

Кроме того, для прототипов была выбрана более тонкая сетка с диаметром проволоки в 18 мкм и просветом 45 мкм, в качестве считывающих плоскостей были выбраны печатные платы с 124 медными посеребренными полосками шириной 500 мкм и шагом 650 мкм.

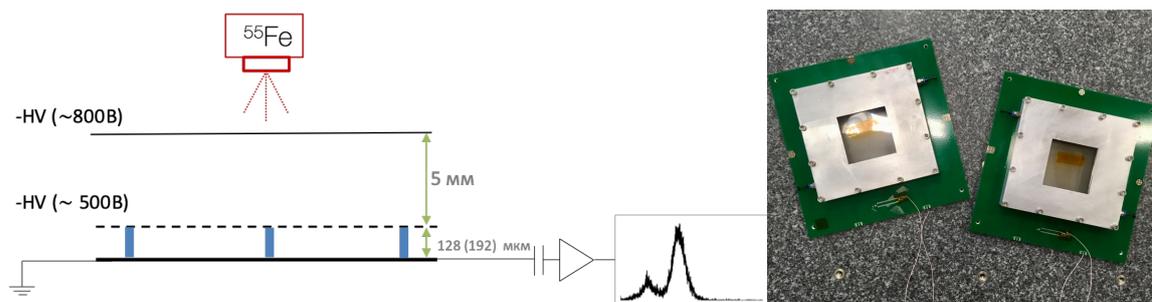


Рисунок 3. Схема прототипов, на которых проводились измерения (слева), внешний вид собранных камер (справа).

Для обоих прототипов были оценены стабильность работы, усиление, энергетическое разрешение, также с обеих камер записано распределение MIP частиц. Ниже приведены результаты проведенных измерений.

3.1. Эффективное газовое усиление

На Рисунке 3.1 представлены зависимости коэффициентов эффективного газового усиления для обоих прототипов от приложенной разности потенциалов и напряженности полей. Для адекватности сравнения результатов напряжения нормализованы с учетом давления, поскольку вероятность ионизации неодинакова при различных параметрах окружающего газа.

Для прототипа с зазором усиления 128 мкм набор данных проводился после дополнительной очистки с применением каустической соды – NaOH. Очистка была проведена с целью удаления загрязнений, вызывающих интенсивные искровые разряды и достижения более высоких коэффициентов усиления.

Максимальные усиления в обоих случаях достигли значений, близких к 10^4 ($7,8 \cdot 10^3$ при 650 В для 192 мкм, $7,4 \cdot 10^3$ при 560 В для 128 мкм). Дальнейшее увеличение рабочих напряжений не представлялось возможным ввиду нестабильности работы прототипов. Необходимо отметить, что полученные значения заметно выше, чем в случае с тестовой камерой (из Главы 2), что подтверждает целесообразность применения менее «грубой» сетки и более «тонкой» топографии считывающих стрипов. Кроме того, полученные значения являются максимальными с точки зрения достижения «ограничения Ретера»

(Raether limit), который для большинства газовых детекторов составляет $10^6 - 10^7$ электронов [30], в нашем случае их число составляет около $1,7 \cdot 10^6$.

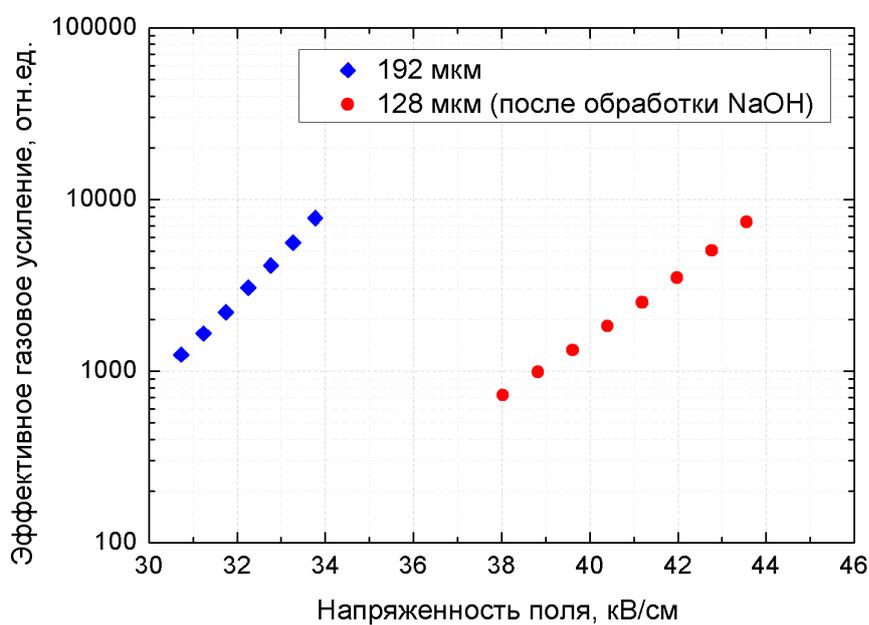
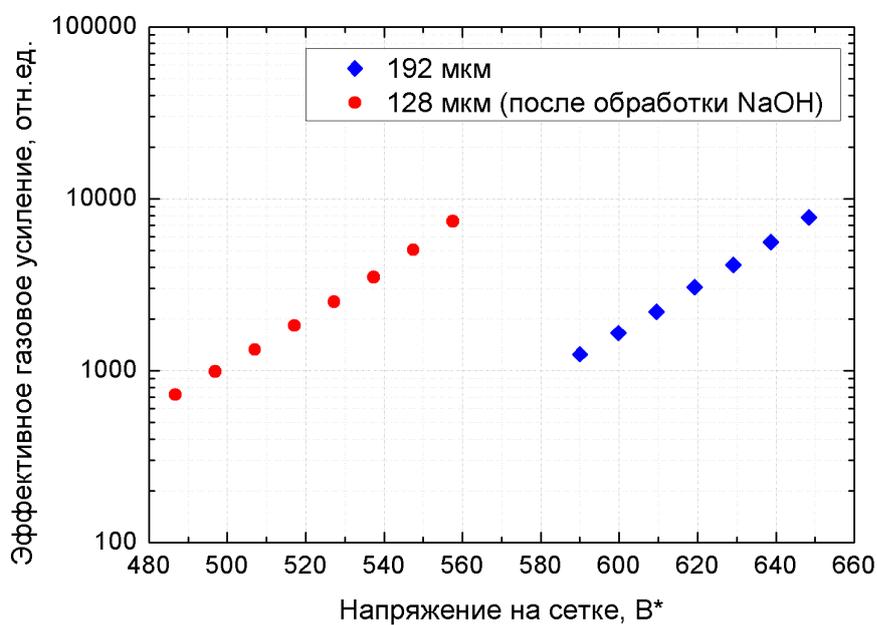


Рисунок 3.1. Зависимость эффективного газового усиления от прикладываемого напряжения (сверху) и создаваемой напряженности поля (снизу).

3.2. Стабильность работы прототипов

Под стабильностью работы детектора обычно понимают частоту разрядов (и их амплитуду) в единицу времени при заданных условиях. На Рисунке 3.2.1 представлен график зависимости тока утечки между электродами для прототипа с зазором усиления в 128 мкм от времени.

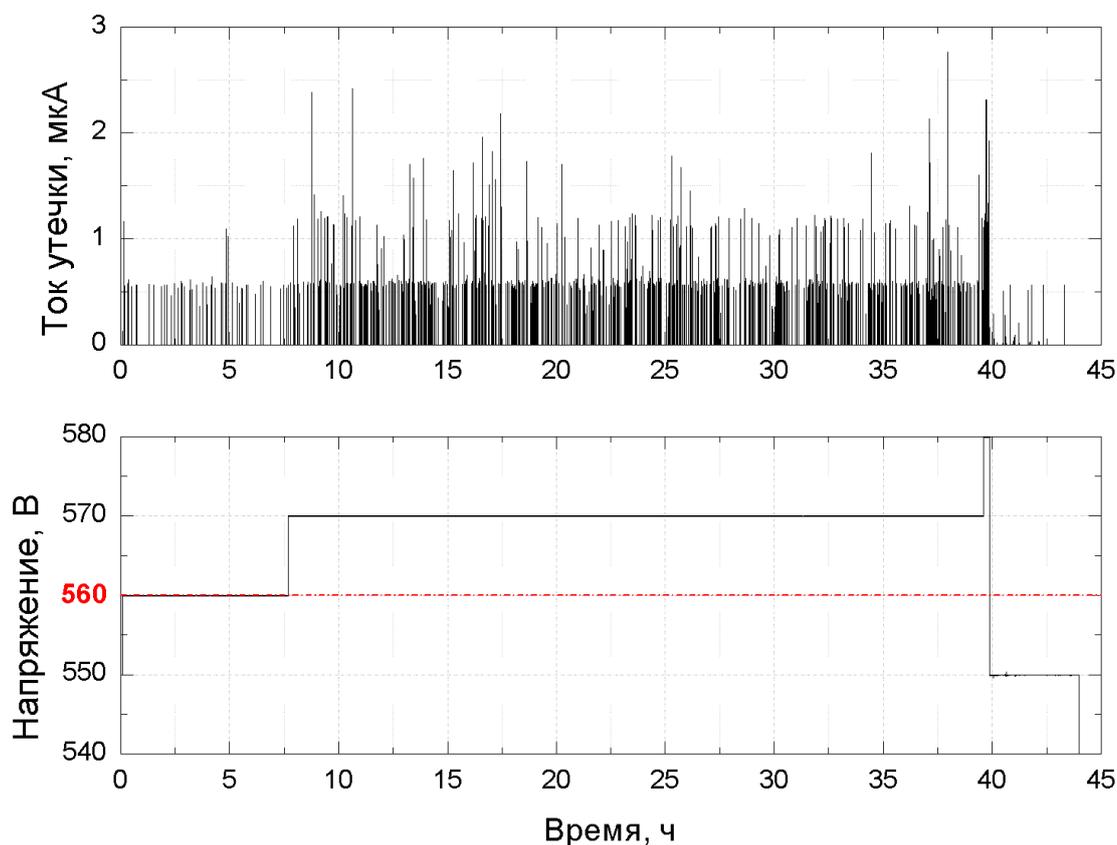


Рисунок 3.2.1. Ток утечки и напряжение в зависимости от времени для прототипа с зазором усиления в 128 мкм.

Скачки в токе говорят о возникновении искры – разряда, их величина свидетельствует об их амплитуде. Так, для зазора в 128 мкм токи относительно низки (в основном <1 мкА); значительного падения напряжения не наблюдается. Частота разрядов <1 мкА около 25 разрядов/час, разрядов >1 мкА около 1 разряда/час при рабочем напряжении в 560 В. С дальнейшим повышением напряжения до 570В частота разрядов возрастает, и детектор работа детектора перестает быть стабильной – не удастся выделить сигнал на фоне пробоев. Дальнейшее повышение напряжения до 580 В приводит к замыканиям.

На Рисунке 3.2.2 представлен график зависимости тока утечки между электродами для прототипа с зазором усиления в 192 мкм. В данном случае при высоких напряжениях (690 – 700В) наблюдаются высокие токи разрядов (>10 мкА), значительное падение напряжения (около ≈ 100 В); длительные замыкания. Однако уже при 670В частота разрядов становится приемлемой: <1 мкА около 18 разрядов/час и >1 мкА около 11 разрядов/час. Особо следует отметить, что при напряжении 660В (по-прежнему выше рабочего в 650В) возникает всего около 5 разрядов в час, причем их амплитуда ниже 500 нА.

Таким образом, для зазора усиления 128 мкм при рабочем напряжении 560 В детектор близок к переходу в стримерный режим работы, тогда как для 192 мкм детектор обладает некоторым «запасом» по напряжению.

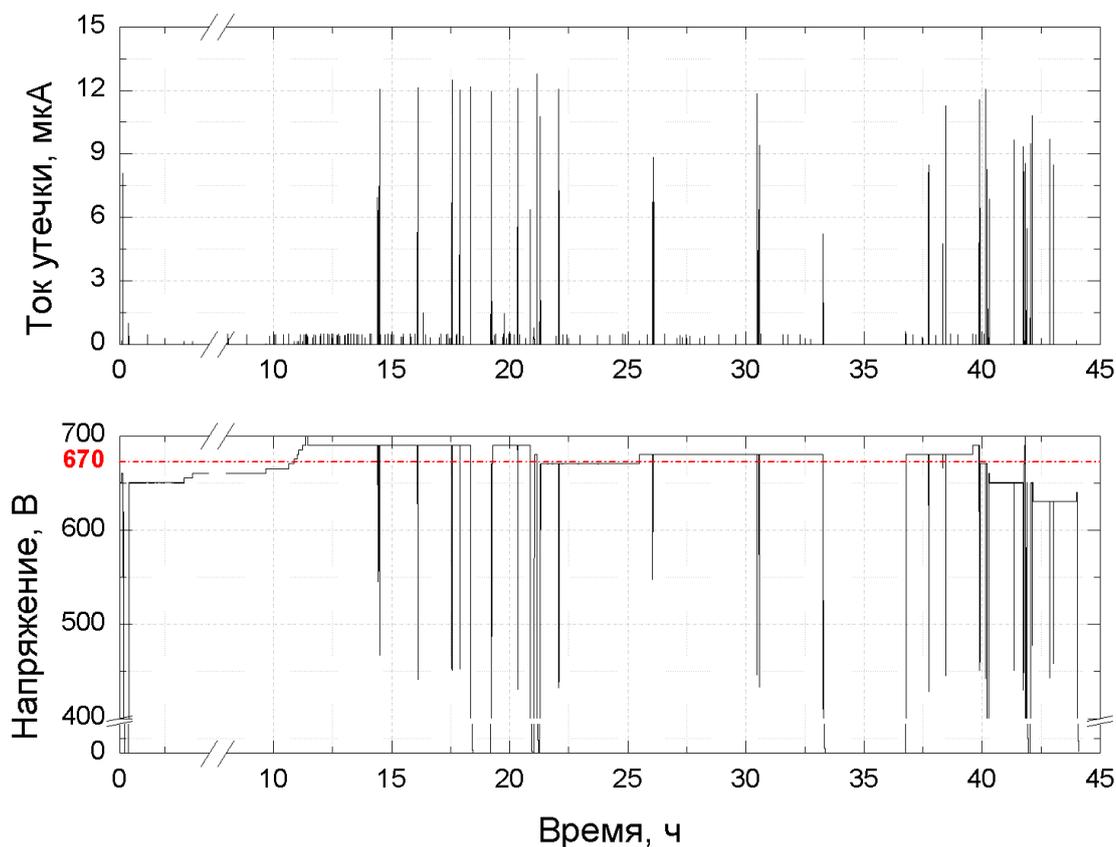


Рисунок 3.2.2. Ток утечки и напряжение в зависимости от времени для прототипа с зазором усиления в 192 мкм.

3.3. Энергетическое разрешение

Как упоминалось выше, в Главе 2, энергетическое разрешение не несет практического значения для экспериментов. Однако, на этапе качественной оценки работы детектора, полезно иметь представление о том, на сколько величина поля может отражаться на виде сигнала и его параметрах. Для собранных прототипов в обоих случаях наблюдалось искажение вида амплитудного распределения сигнала по достижении максимальных напряженностей. На Рисунке 3.3.1 приведены виды амплитудных распределений сигнала ^{55}Fe при различных усилениях.

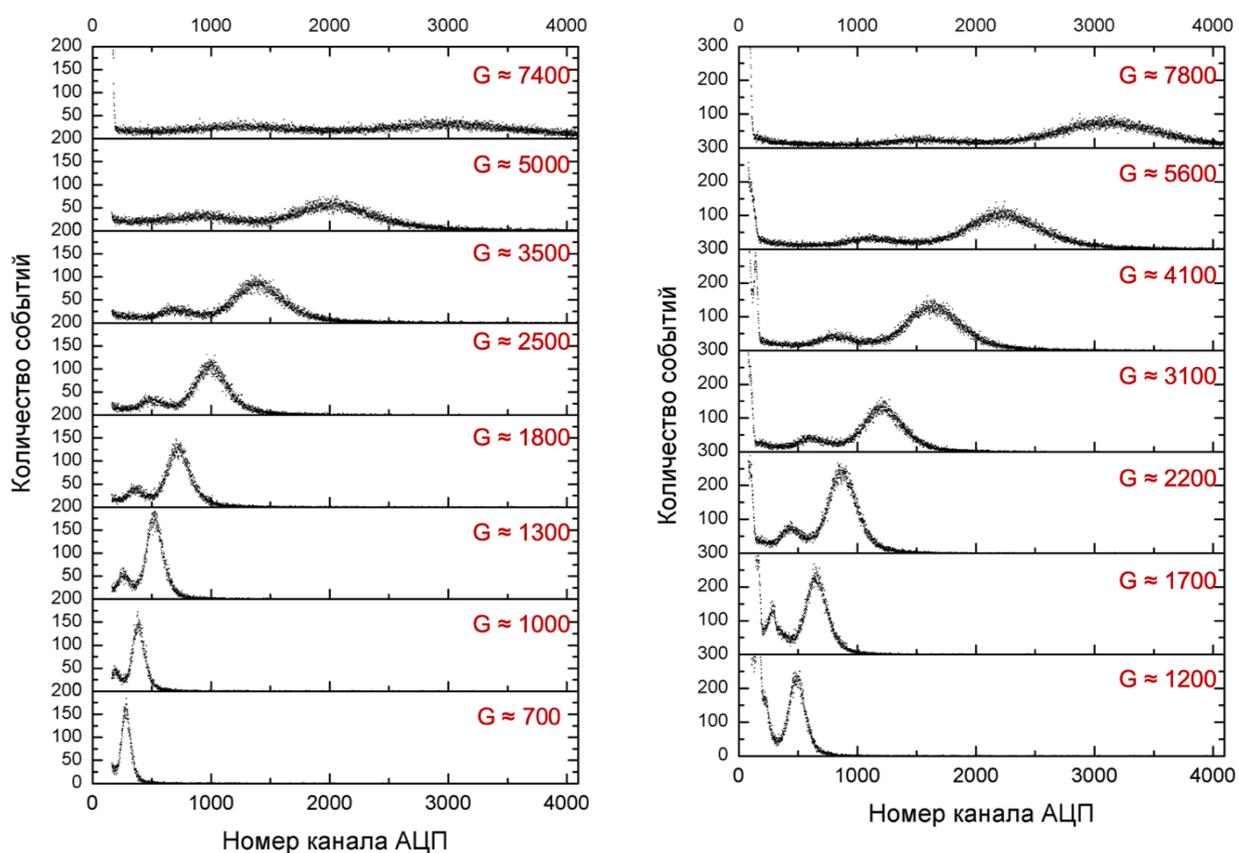


Рисунок 3.3.1. Амплитудные распределения сигнала ^{55}Fe для различных усилений – G для 128 мкм (слева) и 192 мкм (справа).

На Рисунке 3.3.2 приведены результаты расчета FWHM для обоих детекторов при различных усилениях.

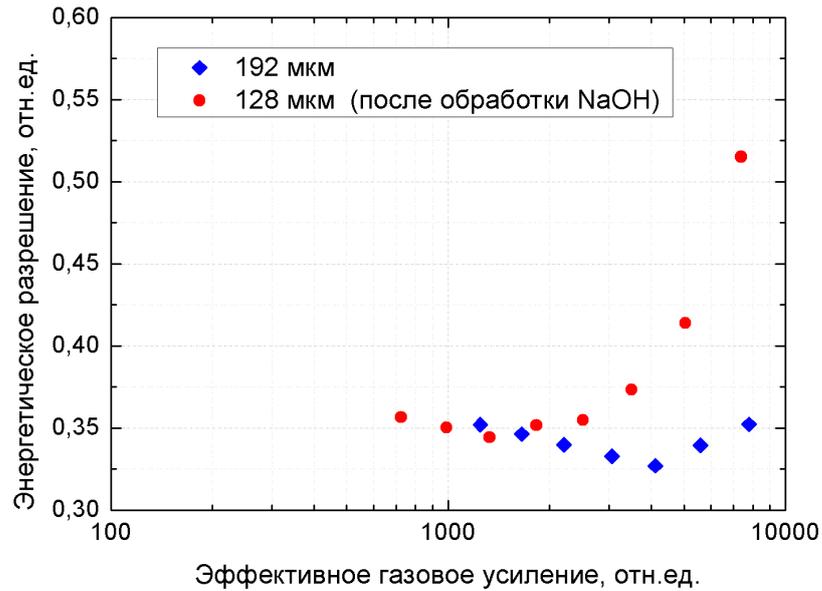


Рисунок 3.3.2. Значения энергетического разрешения для прототипов при различных усилениях.

Из приведенных данных можно судить о том, что оптимальными рабочими усилениями для прототипа с зазором в 128 мкм являются значения около $1 - 3 \cdot 10^3$ (500–520 В), в то время как для прототипа с зазором в 192 мкм – около $4 \cdot 10^3$ (630 В).

Поскольку по достижении максимальных усилений для 128 мкм детектор приближается к стриммерному режиму работы, «полезные» события «гасятся» возникающими разрядами, пик амплитудного распределения трудно выделяем, и значение FWHM высоко.

Для обоих детекторов на распределениях выделяется пик вылета аргона (≈ 3 кэВ).

3.4. Чувствительность к МIP частицам

Для оценки чувствительности детекторов к единичным частицам в обоих случаях были проанализированы амплитудные распределения сигнала от космических частиц. В случае прототипа с зазором усиления в 192 мкм пик отделяется более явно, однако его интенсивность ниже.

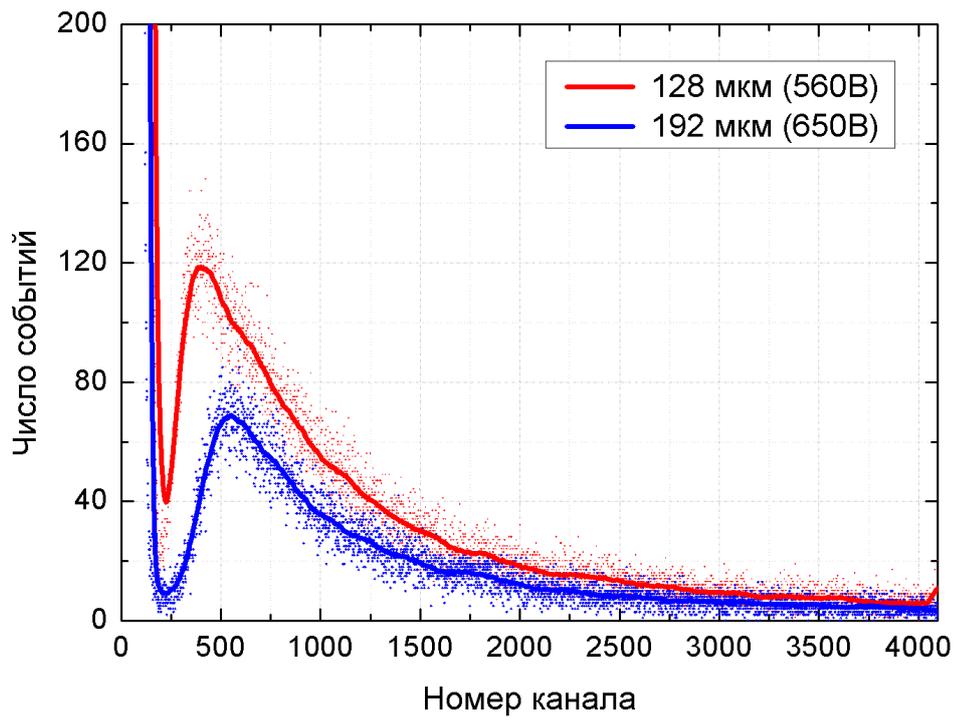


Рисунок 3.4. Амплитудные распределения сигнала MIP частиц.

Глава 4. Заключение

В результате проведенной работы в соответствии с подобранными технологическими режимами были изготовлены и протестированы две конфигурации детектора типа Bulk Micromegas. Конфигурации различаются величиной зазора усиления – одна из них является «стандартной», равной 128 мкм, вторая равна 192 мкм.

Для обеих конфигураций определены коэффициенты эффективного газового усиления и значения энергетического разрешения, также оценена стабильность работы детекторов.

Для прототипа с зазором в 128 мкм максимальное усиление в $\approx 7,4 \cdot 10^3$ достигается при напряжении в 560 В, частота разрядов при этом составляет около 25 разрядов в час.

Для прототипа с зазором в 192 мкм максимальное усиление в $\approx 7,8 \cdot 10^3$ достигается при напряжении в 650 В, частота разрядов при 660В составляет около 5 разрядов в час, таким образом, данная конфигурация обладает некоторым «запасом» по напряжению и для регистрации единичных частиц усиление может быть выше 10^4 (из соображений лимита Ретера, равного $10^6 - 10^7$ электронов).

Оценка энергетического разрешения показала, что оптимальным рабочим напряжением для 128 мкм является значение 520 В с усилением около $1,5 \cdot 10^3$, для 192 мкм – 630 В с усилением $4 \cdot 10^3$.

Полученные распределения сигнала от минимально ионизирующих частиц говорят о способности детекторов регистрировать единичные события.

Глава 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Целесообразность выполнения научного исследования в современном мире определяется коммерческой ценностью работы – ее финансовой выгодностью. Оценка коммерческой ценности (потенциала) исследования является обязательным условием в поиске источников финансирования для проведения научной работы и коммерциализации ее результатов. Это представляет важность для исследовательских организаций, которые должны оценить перспективы проводимых научных исследований. Благодаря такой оценке учёный может рассматривать поиски партнеров для дальнейшего проведения научного исследования, планировать коммерциализацию результатов своих результатов и запуск собственного производства.

Таким образом, целью выполнения финансово-экономической части магистерской диссертации является формирование навыков оценки результата научной работы и поиск источников финансирования для проведения научного исследования.

Для достижения обозначенной цели решены следующие задачи:

- 1) проведен SWOT-анализ данного исследования;
- 2) определена структура работ в рамках научного исследования;
- 3) определена трудоемкость выполнения работ;
- 4) разработан график проведения научного исследования;
- 5) проведена оценка бюджета научно-технического исследования.

5.1. Предпроектный анализ

5.1.1. Потенциальные потребители результатов исследования

В рамках представленной НИР было произведено два прототипа газовых детекторов типа Micromegas, различающихся своей конфигурацией; также проведены оценочные измерения характеристик созданных детекторов. Кроме того, была проведена работа по моделированию физических процессов, протекающих в различных условиях.

Целью НИР стала отработка технологии производства детекторов Micromegas, выявление возможности применения данных детекторов в эксперименте COMPASS на СуперПротонном Синхротроне (SPS) в Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН – CERN) и выбор конфигурации детектора, наиболее подходящей для целей эксперимента.

Результаты проведенной работы представляют ценность для научных групп, применяющих детекторы типа Micromegas в своих экспериментах, в частности – для коллаборации COMPASS, включающей в свой состав около 200 ученых из 13 стран. В течение ближайших двух лет коллаборацией планируется замена части системы детектирования эксперимента на детекторы типа Micromegas. С целью ответить требованиям новой научной программы необходимо проведение методических исследований, которые приведут к выбору дизайна детектора, считывающей электроники и рабочих параметров. Результаты, представленные в рамках данной диссертации, являются первым этапом на пути запланированной научно-технической программы.

Таким образом, актуальность данной работы не оспорима, ее результаты представляют ценность для многих научных групп по всему миру.

Работа проводилась в рамках исследовательской деятельности Лаборатории ядерных проблем в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) в г.Дубне (Россия) при финансировании Института и коллаборации COMPASS.

5.1.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i B_i, \quad (5.1.2)$$

где K – конкурентоспособность научной разработки или конкурента; B_i – вес показателя (в долях единицы); B_i – балл i -го показателя.

Для представленной НИР:

- B_{k1} – балл для детекторов типа Micromegas;

- Б_{к2} – бал для газовых электронных умножителей (GEM детекторы) ;
- К_{к1} – конкурентоспособность детекторов типа Micromegas;
- К_{к2} – конкурентоспособность газовых электронных умножителей.

Таблица 5.1.2. Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Газовое усиление	0,05	4	4	4	0,20	0,20	0,20
Стабильность работы	0,05	5	3	4	0,25	0,15	0,20
Временное разрешение	0,1	5	5	4	0,50	0,50	0,40
Загрузочная способность	0,1	5	5	4	0,50	0,50	0,40
Удобство эксплуатации	0,1	5	5	2	0,50	0,50	0,20
Надежность	0,05	5	4	3	0,25	0,20	0,15
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности							
Количество материала	0,05	4	4	2	0,20	0,20	0,10
Стоимость	0,2	5	5	2	1,00	1,00	0,40
Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	3	3	0,40	0,30	0,30
Наличие инфраструктуры для производства	0,2	3	3	3	0,60	0,60	0,60
ИТОГО	1	47	41	31	4,40	4,15	2,95

5.2. SWOT-анализ

SWOT (Strengths - сильные стороны, Weaknesses - слабые стороны, Opportunities – возможности и Threats – угрозы) анализ представляет собой комплексную оценку НИР. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны характеризуют конкурентоспособную сторону исследований. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с

точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны представляют упущения или ограниченность исследования, которые могут препятствуют достижению его целей. Они определяются недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

SWOT-анализ данной научно-исследовательской работы представлен в приложении Б.

5.3. Инициация проекта

Группа процессов инициации состоит из процессов, которые выполняются для определения нового проекта или новой фазы существующего. В рамках процессов инициации определяются изначальные цели и содержание и фиксируются изначальные финансовые ресурсы. Определяются внутренние и внешние заинтересованные стороны проекта, которые будут взаимодействовать и влиять на общий результат научного проекта. Данная информация закрепляется в Письме о намерениях (letter of intent) к эксперименту COMPASS.

Таблица 5.3.1. Заинтересованные стороны проекта

Заинтересованная сторона проекта	Ожидания заинтересованной стороны
Коллаборация COMPASS (зарегистрирована в Европейской организации по ядерным исследованиям – ЦЕРН)	Рекомендации по разработке детекторов больших площадей для установки в систему детектирования эксперимента COMPASS на суперпротоном синхротроне в ЦЕРН после модернизации в 2021 году.

Таблица 5.3.2. Цели и результаты проекта

Цели проекта	<ul style="list-style-type: none"> - Изготовление прототипов детекторов типа Bulk Micromegas разной геометрии; - Тестирование изготовленных прототипов; - Оценка их базовых характеристик; - Заключение о соответствии характеристик той или иной геометрии требованиям эксперимента COMPASS
Ожидаемые результаты проекта	Данные о базовых характеристиках детекторов (усиление, стабильность работы, энергетическое разрешение)
Критерии приема результатов проекта	Соответствие результатов требованиям эксперимента COMPASS
Требования к результату проекта	<ul style="list-style-type: none"> - Достоверность полученных результатов; - Адекватное сравнение характеристик для разных геометрий; - Соответствие результатов литературным данным

Таблица 5.3.3. Рабочая группа проекта

ФИО, основное место работы, должность	Роль в проекте	Функции	Трудозатраты, час.
Жемчугов Алексей Сергеевич, к.ф.-м.н., начальник отдела лаборатории в ОИЯИ	Руководитель	Координация деятельности проекта	120
Завазиева Дарина Тимуровна, инженер ОИЯИ, магистрант	Исполнитель	Выполнение НИР	1440

Таблица 5.3.4. Календарный план проекта

№	Название	Длительность, дни	Дата начала работ	Дата окончания работ	Состав участников
1	Разработка тех. задания	5	01.08.18	07.08.18	Руководитель
2	Изучение литературы	27	01.08.18	06.09.18	Исполнитель
3	Отработка технологии производства детекторов	54	17.08.18	31.10.18	Исполнитель
4	Подготовка прототипов детекторов	7	23.10.18	31.10.18	Исполнитель
5	Подготовка измерительной системы	6	01.11.18	09.11.18	Руководитель, исполнитель
6	Проведение измерений, обработка результатов	54	19.11.18	28.12.19	Исполнитель
			04.02.19	07.03.19	
7	Моделирование результатов	14	11.03.19	28.03.19	Руководитель, исполнитель
8	Оценка результатов	5	01.04.19	05.04.19	Руководитель, исполнитель
9	Написание пояснительной записки	54	12.03.19	31.05.19	Исполнитель

Календарный план-график проведения НИР по теме магистерской диссертации приведен в приложении В.

5.4. Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НИР должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НИР используется следующая группировка затрат по статьям:

- 1) материальные затраты НИР;
- 2) затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- 3) основная и дополнительная заработная плата исполнителей;
- 4) отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- 5) затраты на научные и производственные командировки;
- 6) контрагентные расходы;
- 7) накладные расходы.

Остановимся более подробно на расчетах основных затрат.

5.4.1 Расчет материальных затрат

Данная статья включает стоимость всех материалов, используемых при разработке проекта. В эту статью входят затраты на сырье, материалы, используемые в процессе НИР, комплектующие изделия и т.д.

В материальные затраты также включаются дополнительно затраты на канцелярские принадлежности, диски, картриджи и т.п. Однако их учет ведется в данной статье только в том случае, если в организации их не включают в расходы на использование оборудования или накладные расходы. В первом случае на них определяются соответствующие нормы расхода от установленной базы. Во втором случае их величина учитывается как некая доля в коэффициенте накладных расходов.

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_M = (1 + k_T) \cdot \sum_{i=1}^m C_i \cdot N_{расxi}, \quad (5.4.1)$$

где m - количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении научного исследования; $N_{расxi}$ - количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при выполнении научного исследования (шт., кг, м, м² и т.д.); C_i - цена приобретения единицы i -го вида потребляемых материальных ресурсов (руб./шт., руб./кг, руб./м, руб./м² и т.д.); k_T - коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

Таблица 5.4.1. Расчет материальных затрат

Наименование	Кол-во	Цена за единицу, руб	Сумма, руб
Печатная плата	5 шт.	1920	9600
Фотошаблон	3 шт.	460	1380
Фоторезистивная пленка	30 м.	2920	87600
Металлическая сетка (крупная)	5 м.	2920	14600
Металлическая сетка (мелкая)	5 м.	32850	164250
Кальцинированная сода	3 кг.	925	2775
Всего за материалы:			280205
Транспортно-заготовительные расходы:			11208
ИТОГО:			291413

5.4.2 Расчет затрат на специальное оборудование

Данная статья включает в себя все затраты, связанные с приобретением специального оборудования (приборов, контрольно-измерительной аппаратуры, стендов, устройств и механизмов), необходимого для проведения работ. В данной работе использовалось уже имеющееся оборудование, и закупка специального оборудования не производилась. В таком случае затраты на специальное оборудование отсутствуют.

Однако в ходе эксплуатации основного оборудования средства были затрачены в соответствии с амортизационными отчислениями.

Так, расчет амортизационных отчислений производился линейным методом, результаты расчетов сведены в таблицу 5.4.2.

Таблица 5.4.2. Амортизационные расходы

Наименование прибора	Стоимость, руб.	Срок полезного использования, лет	Норма амортизации и в год, %	Срок эксплуатации, дней	Амортизационные расходы, руб.
Растяжитель сетки	130000	20	5	12	222
Ламинатор	90000	10	10	6	154
УФ инсолятор	150000	10	10	6	256
Аппарат хим. травления	120000	10	10	6	205
Деионизатор воды	40000	5	20	30	680
Сушильный шкаф	80000	20	5	60	683
Блок питания	114000	10	10	60	1948
Осциллограф	350000	7	14	60	8542
Генератор импульсного сигнала	460000	10	10	5	652
Аттенюатор	5000	-	-	-	5000
Усилитель сигнала	120000	10	10	80	2730
Мультиканальный анализатор	200000	5	20	40	4567
ПК	40000	5	20	120	3733
ИТОГО					29372

5.4.3. Основная и дополнительная заработная плата исполнителей работы

Данная статья включает в себя затраты на оплату труда работников, непосредственно участвующих в выполнении НИР (включая премии, доплаты), и дополнительную заработную плату. В рамках выполненной НИР исполнителями работ являлись сотрудники Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна, Россия), являющегося межправительственной организацией. Для расчета основной заработной платы был сформирован баланс рабочего времени, приведенного в таблице 5.4.3.1.

Таблица 5.4.3.1. Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент-инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней (выходные дни, праздничные дни)	104 + 14	104 + 14
Потери рабочего времени (отпуск, невыходы по болезни)	28	28
Действительный годовой фонд рабочего времени	219	219

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле 5.4.3.1:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_m \cdot M}{F_d}, \quad (5.4.3.1)$$

где Z_m – месячный должностной оклад работника, руб.; M = количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 28 раб. дня $M = 11,2$ месяцев, 5-дневная неделя; F_d – действительный годовой фонд.

Для руководителя – кандидата физико-математических наук, начальника отдела базовый оклад составляет 50000 руб., для студента – инженера – 18000 руб. С учетом премиального коэффициента (равного 0,2) и коэффициента доплат и надбавок (0,1) месячный должностной оклад работника составляет:

$$Z_m = Z_б \cdot (1 + 0,2 + 0,1),$$

Таким образом для руководителя $Z_m = 65000$ р., для студента – 23400 р. Основная заработная плата ($Z_{\text{осн}}$) сотрудников рассчитывается по следующей формуле 5.4.3.2:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (5.4.3.2)$$

где $Z_{он}$ – среднедневная заработная плата работника, руб; $T_{раб}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн. Среднедневная заработная плата для руководителя рассчитывается с учетом неполного рабочего времени, посвященного НИР (в среднем – 4 часа в день).

Таблица 5.4.3.2. Расчёт основной заработной платы

Исполнитель	$Z_б$, руб.	$Z_{дн}$, руб.	T_p , раб. дн.	$Z_м$, руб.	$Z_{осн}$, руб.
Руководитель	50000	1662	30	65000	49863
Студент-инженер	18000	1197	180	23400	215408
ИТОГО					265271

Расчет дополнительной заработной платы производится с учетом коэффициента дополнительной зарплаты, равного 12% от основной заработной платы.

Таблица 5.4.3.3. Заработная плата исполнителей НТИ

Заработная плата	Руководитель	Инженер
Основная зарплата	49863	215408
Дополнительная зарплата	5984	25849
Зарплата исполнителя	55847	241257
ИТОГО по статье $C_{зп}$	297104	

Статья отчислений во внебюджетные фонды включает в себя расходы, отчисляемые в пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр. Для предприятий РФ коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды составляет 30% от заработной платы, таким образом для статьи расходов на уплату средств во внебюджетные фонды составили **89131 руб.**

Кроме того, в расчет бюджета на НТИ включается статья накладных расходов, в которую входят затраты на управление и хозяйственное обслуживание, для представленной НИР они также составили 30% от суммы основной и дополнительной заработной платы (**89131 руб.**).

5.4.4. Расчет затрат на научные командировки

Затраты на научные и производственные командировки исполнителей определяются в соответствии с планом выполнения темы и с учетом действующих норм командировочных расходов различного вида и транспортных

тарифов. Основная часть работ в рамках выполненной НИР проводилась в Объединенном институте ядерных исследований в г. Дубне Московской области. Затраты на командировки для студента предусматривали только транспортные расходы. Прочие расходы были покрыты за счет заработной платы.

Таблица 5.4.4. Затраты на научные и производственные командировки

Виды расходов	Сроки командировки	Сумма, руб.
Авиаперелеты по маршруту Томск – Москва – Томск	август – декабрь 2018 года	12000
Авиаперелеты по маршруту Томск – Москва – Томск	январь – май 2019 года	10000
ИТОГО:		22000

5.4.5 Контрагентские расходы

Контрагентские расходы включают затраты, связанные с выполнением каких-либо работ по теме сторонними организациями (контрагентами, субподрядчиками). Расчет величины этой группы расходов зависит от планируемого объема работ и определяется из условий договоров с контрагентами или субподрядчиками.

В рамках выполненных исследований все работы были выполнены за счет Объединенного института ядерных исследований, и контрагентские затраты составили 0 рублей.

5.4.6. Формирование бюджета затрат

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции. Определение бюджета затрат на научно-исследовательский проект по каждому варианту исполнения приведен в таблице 5.4.6.

Таблица 5.4.6. Расчет бюджета затрат НИИ

Наименование статьи	Сумма, руб.
Материальные затраты	291413

Затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ – амортизационные расходы	29372
Затраты по основной и дополнительной заработной плате исполнителей темы	297104
Затраты на научные и производственные командировки	22000
Отчисления во внебюджетные фонды	89131
Накладные расходы	89131
Бюджет затрат НТИ	818151

5.5. Определение ресурсной эффективности исследования

Интегральный показатель ресурсной эффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.5.1)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности для i -го варианта исполнения разработки; a_i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки; b_i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания; n – число параметров сравнения.

В качестве возможных вариантов исполнения выберем реализованный способ, а также два альтернативных варианта: вариант с закупкой готовых прототипов и комплектующих у сторонних организаций и последующее выполнение работ по их самостоятельному монтажу и использованию в рамках НТИ, а также вариант с закупкой детекторов и заказом на выполнение работ по их монтажу и тестированию у сторонней организации. Основным лимитирующим фактором в представленном НТИ являлась его стоимость. Покупка готовых детекторов у сторонней организации сократила бы рабочее время исполнителей темы, однако, привнесла бы дополнительную статью расхода в размере около 650000 руб. Кроме того, самостоятельное производство детекторов было одним из мотивирующих факторов для Института. Третий представленный вариант является еще более невыгодным в отношении стоимости проекта. В затраты в этом случае войдут основная и дополнительная

заработные платы для нанимаемых специалистов, соответствующие отчисления во внебюджетные фонды, а также затраты на оформление для них производственных командировок.

Таблица 5.5. Сравнительная оценка вариантов исполнения исследования

Критерии	Весовой коэффициент параметра	(Исп. 1) Выполнение работы в рамках НТИ с соответствующими затратами (реализованное исполнение)	(Исп. 2) Покупка оборудования и выполнение остальной работы в рамках НТИ	(Исп. 3) Покупка оборудования и заказ на выполнение работы в сторонней организации
Цена	0,5	4	3	2
Удобство эксплуатации	0,2	5	5	5
Точность	0,2	5	5	4
Надежность	0,1	5	5	3
ИТОГО:	1	24	23	14

Проведем расчет интегрального показателя ресурсоэффективности для каждого варианта исполнения:

$$I_{p-исп1} = 4 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 = 4,5;$$

$$I_{p-исп2} = 3 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,2 + 5 \cdot 0,1 = 4,0;$$

$$I_{p-исп3} = 2 \cdot 0,5 + 5 \cdot 0,2 + 4 \cdot 0,2 + 3 \cdot 0,1 = 2,9;$$

Как видно из рассчитанных значений, вариант исполнения, который был реализован в данной работе, является наиболее ресурсоэффективным.

5.6. Выводы

Из произведенных расчетов следует, что основные затраты на научно-техническое исследование приходятся на материальные затраты (291413 руб.) и заработную плату (297100 руб.). Это связано с высокой стоимостью исходных материалов для производства детекторов и длительностью проведения НТИ. В сумме же весь бюджет научно-технического исследования составил 634889 рублей. Расчет интегрального показателя ресурсной эффективности показал, что вариант исполнения, который был реализован в данной работе, является наиболее ресурсоэффективным.

Глава 6. Социальная ответственность

Условия труда считаются безопасными, если воздействие вредных или опасных производственных факторов не превышает установленные нормативы.

Одно из основных направлений профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда. Охрана труда – система законодательных, социально-экономических, организационных, технологических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Охрана труда и безопасность жизнедеятельности регулируется рядом различных нормативно-правовых, законодательных актов, в том числе Трудовым Кодексом Российской Федерации, Кодексом об административных нарушениях, Уголовным Кодексом и Конституцией РФ.

В рамках данной работы магистранта с применением электронно-вычислительной аппаратуры были оценены базовые характеристики прототипов газовых детекторов типа Bulk Micromegas.

Процесс работы характеризуется такими вредными факторами, как недостаток естественного освещения, недостаточная освещенность рабочего места, возможность короткого замыкания и поражение током, а также возможность получения травм при механической работе с приборами и инструментами.

В данной главе рассмотрены и найдены решения для обеспечения удовлетворительных условий труда. Проведена характеристика производственных процессов, анализ вредных и опасных факторов при данном виде производственной деятельности и решению вопросов безопасности на основе требований действующих нормативно-технических документов.

6.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Представленная магистерская работа заключалась в измерении характеристик газовых детекторов типа Bulk Micromegas. Все измерения проводились с применением электрических приборов, контролируемых с персонального компьютера, в связи с этим рассматриваются эргономические требования для рабочего места оператора, на котором в основном проходит процесс наблюдения дисплея ЭВМ. Для обоснования эргономических требований используются следующие нормативно правовые документы:

ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования

СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 "Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы" (с изменениями на 21 июня 2016 года)

ПНД Ф 12.13.1-03 Методические рекомендации. Техника безопасности при работе в аналитических лабораториях (общие положения)

ГОСТ Р ИСО 6385-2016 Эргономика. Применение эргономических принципов при проектировании производственных систем

ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения

Согласно ПНД Ф 12.13.1-03 к работе в аналитических лабораториях допускаются лица старше 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование, дающее разрешение работы в лаборатории.

Рабочие места должны быть спроектированы таким образом, чтобы способствовать достижению целей производственной системы, в том числе достижению оптимальной общей рабочей нагрузки на сотрудников (ГОСТ Р ИСО 6385-2016). Рабочая среда должна поддерживаться таким образом, чтобы минимизировать неблагоприятные физические, химические, биологические и социальные условия, влияющие на здоровье и безопасность людей, а также на их способность выполнять стоящие перед ними задачи.

Согласно ГОСТ Р 50923-96 рабочее место с дисплеем должно обеспечивать оператору возможность удобного выполнения работ в положении сидя и не создавать перегрузки костно-мышечной системы.

Основными элементами рабочего места оператора являются: рабочий стол, рабочий стул (кресло), дисплей, клавиатура; вспомогательными – пюпитр, подставка для ног. Рабочий стул должен быть подъемно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки от переднего края сиденья. Требования к каждому из этих элементов рабочего места рассмотрены в ГОСТ Р 50923-96. Дисплей на рабочем месте оператора должен располагаться так, чтобы изображение в любой его части было различимо без необходимости поднять или опустить голову.

Дисплей на рабочем месте должен быть установлен ниже уровня глаз оператора. Угол наблюдения экрана оператором относительно горизонтальной линии взгляда не должен превышать 60° , как показано на рисунке 7.1.

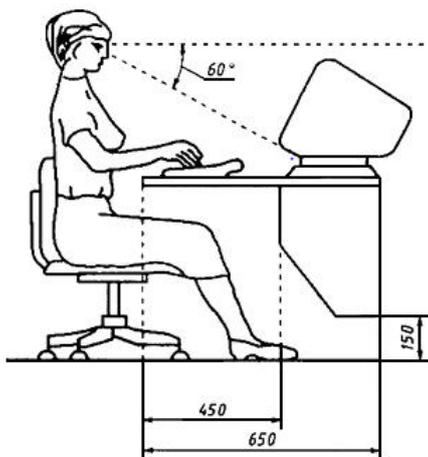


Рисунок 6.1. Слева – схематичное расположение дисплея на столе, справа – снимок рабочего места, занимаемого в ходе выполнения работ в рамках данной диссертации.

6.2. Вредные факторы проектируемой производственной среды

Потенциальные вредные факторы среды рассматриваются с учетом ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы.

Классификация». Перечень опасных и вредных факторов, характерных для проектируемой производственной среды представлены в таблице 6.1.

Таблица 6.2. Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего	+	+	+	ГОСТ 12.1.005-88. СН-245-71
Вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера	+	+	+	СанПиН 2.2.2/2.4.1340– 03
Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде	-	+	-	ГОСТ 12.1.003-83 ГОСТ 12.4.026.
Вредные производственные факторы, связанные со световой средой	+	+	+	ГОСТ 12.4.026-2015
Опасные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов	-	+	+	ГОСТ 12.1.038-82 ГОСТ 12.1.030-81
Пожароопасность	-	-	+	НПБ 105-03

6.2.1. Вредные производственные факторы, связанные с аномальными микроклиматическими параметрами воздушной среды на местонахождении работающего

Микроклимат производственных помещений — метеорологические условия внутренней среды помещений, которые определяются действующими на организм человека сочетаниями температуры, влажности, скорости движения воздуха и теплового излучения; комплекс физических факторов, оказывающих влияние на теплообмен человека с окружающей средой, на тепловое состояние человека и определяющих самочувствие, работоспособность, здоровье и производительность труда. В соответствии с СанПиНом 2.2.2/2.4.1340-03 и СанПиНом 2.2.4.548-96 показатели микроклимата: температура воздуха;

относительная влажность; скорость его движения; мощность теплового излучения.

Для полноценной работы сотрудников необходимо соблюдение нормального физиологических процессов в организме человека. Это возможно при соблюдении условия, если тепло выделяемое в помещении выделялось в окружающую среду. При соблюдении этого условия у сотрудника не возникает каких-либо ощущений термического дискомфорта - холода или перегрева.

Тип работ, выполняемых в рассматриваемом помещении, относится к категории Ia. Эти работы относятся к работам с интенсивностью энергозатрат до 120 ккал/ч (до 139 Вт), которые производятся сидя и сопровождаются незначительным физическим напряжением. Оптимальные величины показателей микроклимата приведены в таблице 6.2.1.1.

Для создания оптимальных параметров микроклимата в производственных помещениях используются системы кондиционирования, а обеспечение допустимых параметров — обычными системами вентиляции и отопления. В лаборатории осуществляется естественная и искусственная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери, а также через специальную систему контроля микроклимата. При такой системе вентиляции приточный воздух, поступающий в помещение через систему контроля микроклимата, проходит предварительную очистку и нагревание/охлаждение. Температура воздуха поддерживается на уровне 23°C, поток воздуха регулируется автоматически в соответствии с встроенным датчиком.

Таблица 6.2.1.1. Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °C	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia	22-24	60-40	0,1
Теплый	Ia	23-25	60-40	0,1

Однако условия работы ограничиваются допустимыми величинами показателей микроклимата, которые приведены в таблице 6.2.1.2.

Таблица 6.2.1.2. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат	Температура воздуха, °С		Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин		Для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин	Для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин
Холодный	Ia	20,0-21,9	24,1-25,0	15-75	0,1	0,1
Теплый	Ia	21,0-22,9	25,1-28,0	15-75	0,1	0,2

6.2.2. Вредные производственные факторы, связанные с электромагнитными полями переменного характера

Электромагнитное поле – это силовое поле, образованное вокруг электрического тока, эквивалентное электрическому полю и магнитному полю, расположенным под прямыми углами друг к другу. Основными источниками электромагнитных полей являются линии электропередач, домашняя электропроводка, инструменты с приводом от двигателя, экраны компьютеров, телекоммуникации и устройства для вещания, мобильные телефоны.

В рассматриваемом помещении, основным источником электромагнитного излучения можно считать ПК, частоты излучения приведены в таблице 6.2.2.1.

Таблица 6.2.2.1. Частоты излучения ПК

Источник	Диапазон частот
Монитор:	
Сетевой трансформатор блока питания	50 Гц
статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания	20 – 100 кГц
блок кадровой развертки и синхронизации	
ускоряющее анодное напряжение монитора (только для мониторов с ЭЛТ)	48 – 160 Гц
Системный блок	50 Гц – 1000 МГц
Устройства ввода/вывода информации	0 Гц, 50 Гц
Источники бесперебойного питания	50 Гц, 20 – 100 кГц

В России система стандартов по электромагнитной безопасности соответствует СанПиН 2.2.2/2.4.1340–0. Предельно допустимые значения плотности потока энергии электромагнитного поля составляют – 25 мкВт/см² в течение 8 часов, 100 мкВт/см² максимальное значение не превышает 1000 мкВт/см².

Электромагнитное поле с частотой от 60 кГц до 300 МГц нормируются отдельно по электрической и по магнитной составляющей, т.к. на этих частотах на человека действуют и электрическое, и магнитное поле. Для полей СВЧ диапазона (300 МГц - 300 ГГц) нормируют предельно-допустимую плотность потока энергии, которая не должна превышать 10 Вт/м². Предельно допустимые уровни электромагнитного поля для ПК приведены в таблице 6.2.2.2.

Таблица 6.2.2.2. Предельно допустимые уровни электромагнитного поля

Источник	Диапазон	Значение ПДУ
Видеодисплейный терминал ПЭВМ	5 Гц – 2 кГц	$E_{пду} = 25 \text{ В/м}$ $B_{пду} = 250 \text{ нТл}$
	2 – 400 кГц	$E_{пду} = 2,5 \text{ В/м}$ $B_{пду} = 25 \text{ нТл}$
	Поверхностный электростатический потенциал	$V = 500 \text{ В}$

6.2.3. Вредные производственные факторы, связанные с акустическими колебаниями в производственной среде

Шум — беспорядочные колебания различной физической природы, отличающиеся сложностью временной и спектральной структуры. Длительное воздействие шума может привести к ухудшению слуха, а в отдельных случаях – к глухоте. Установлено, что шумовое загрязнение среды на рабочем месте негативно влияет на работающих, вследствие чего у них снижается внимание, увеличивается расход энергии при одинаковой физической нагрузке, замедляется скорость психических реакций и т.п. В конечном итоге снижается производительность труда и качество выполняемой работы.

Согласно ГОСТ 12.1.003-83 при разработке технологических процессов, проектировании, изготовлении и эксплуатации машин, производственных

зданий и сооружений, а также при организации рабочих мест следует принимать все необходимые меры по снижению шума, воздействующего на человека, до значений, не превышающих допустимые.

Защита от шума должна обеспечиваться разработкой шумобезопасной техники, применением средств и методов коллективной защиты, в том числе строительно-акустических, применением средств индивидуальной защиты.

В первую очередь следует использовать средства коллективной защиты. По отношению к источнику возбуждения шума коллективные средства защиты подразделяются на средства, снижающие шум в источнике его возникновения, и средства, снижающие шум на пути его распространения от источника до защищаемого объекта. Снижение шума в источнике осуществляется за счет улучшения конструкции машины или изменения технологического процесса. Средства, снижающие шум в источнике его возникновения в зависимости от характера шумообразования подразделяются на средства, снижающие шум механического происхождения, аэродинамического и гидродинамического происхождения, электромагнитного происхождения.

Выбор ширины санитарно-защитной зоны зависит от установленного оборудования, например, ширина санитарно-защитной зоны вокруг крупных ТЭС может составлять несколько километров. Для объектов, находящихся в черте города, создание такой санитарно-защитной зоны порой становится неразрешимой задачей. Сократить ширину санитарно-защитной зоны можно уменьшением шума на путях его распространения.

Уровни шума на рабочих местах пользователей персональных компьютеров не должны превышать значений, установленных СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Рабочая зона соотносится с категорией «Высококвалифицированная работа, требующая сосредоточенности, административно-управленческая деятельность, измерительные и аналитические работы в лаборатории; рабочие места в помещениях цехового управленческого аппарата, в рабочих комнатах конторских помещений, в лабораториях». Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни

звука и эквивалентные уровни звука для этой категории приведены в таблице 6.2.3.1.

Таблица 6.2.3.1. Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами [Гц]									Уровни звука в [дБ]
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	60
93	79	70	68	58	55	52	52	49	

Для расчета уровня шума, возникающего от нескольких источников, используется принцип энергетического суммирования излучений отдельных источников:

Таблица 6.2.3.2. Уровни шума источников в помещении

Источник шума	Уровни звука в [дБ]
Жесткий диск	45
Вентилятор	50
Монитор	15
Клавиатура	10

$$L = 10 \lg \sum_{i=1}^n n \cdot 10^{0,1 \cdot L_i} \quad (6.2.3)$$

$$L = 10 \lg(4 \cdot 10^{0,1 \cdot 45} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 50} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 15} + 4 \cdot 10^{0,1 \cdot 10}) = 57,22 \text{ дБА}$$

где L_i – уровень звукового давления i -го источника шума; n – количество источников шума.

По расчету получено значение звука в помещении ~ 57 дБА, которое не превышает предельно установленную величину в 60 дБА, что говорит о соблюдении уровня шума в рабочей зоне.

6.2.4. Вредные производственные факторы, связанные со световой средой

Качество освещения влияет на работоспособность сотрудника, на его психологическое состояние в процессе выполнения работ. Наиболее благоприятное влияние на состояние сотрудника оказывает преимущественно естественное освещение. Нормы естественного, искусственного и совмещенного освещения зданий и сооружений, мест производства работ вне зданий представлены в СНиПе 23-05-95.

Основными регламентируемыми факторами норм освещения является характер зрительной работы, фон, контраст объекта с фоном, система и вид освещения.

Главной задачей текущего светотехнического расчета является определение необходимой мощности электрической осветительной установки для создания требуемой освещённости.

В расчётном задании должны быть решены следующие вопросы: выбор системы освещения; выбор источников света; выбор светильников и их размещение; выбор нормируемой освещённости; расчёт освещения методом светового потока.

1. Выбор системы освещения. Для производственных помещений всех ПЭВМ назначений применяются системы общего (равномерного или локализованного) и комбинированного (общего и местного) освещения. Система комбинированного освещения принимается в основном для помещений ремонта, регулировки, чистки и пайки аппаратуры и приборов, в прочих случаях следует использовать систему общего (равномерного или локализованного) освещения. Для данной рабочей зоны выбирается расчет общего равномерного освещения.

2. Выбор источников света. Источники света, применяемые для искусственного освещения, делят на две группы – газоразрядные лампы и лампы накаливания. Для выбранного типа освещения, как правило, применяются газоразрядные лампы, так как они энергетически более экономичны и обладают большим сроком службы. Наиболее распространёнными являются люминесцентные лампы.

3. Выбор светильников и их размещение. Светильник – прибор, перераспределяющий свет ламп внутри больших телесных углов и обеспечивающий угловую концентрацию светового потока. Выбор типа светильников основывается на светотехнических требованиях, экономических показателях и условиях среды. Для данной рабочей зоны выбираем светильник накладной ОД, крепящийся на поверхность потолка, мощностью 30Вт. Размеры светильника: 933x204мм.

Пространственное положение светильников в выбранном помещении определяется следующими параметрами:

- $H = 3$ – высота помещения;
- $h_c = 0,2$ – расстояние светильников от перекрытия (м);
- $h_n = H - h_c = 2,8$ – высота подвеса (м);
- $h_p = 0,7$ – высота рабочей поверхности над полом (м);
- $h = h_n - h_p = 2,1$ – расчетная высота (м);
- L – расстояние между соседними светильниками (м);
- l – расстояние от крайних светильников до стены (м).

Оптимальное расстояние l от крайнего ряда светильников до стены рекомендуется принимать равным $L/3$.

Наиболее приемлемым расположением светильников является их расположение в шахматном порядке, либо по сторонам квадрата. В данном случае будет использовано размещение по сторонам квадрата.

Люминесцентные светильники при равномерном расположении обычно располагаются рядами. Основным критерием оптимального расположения светильников является величина $\lambda = L/h$ - наивыгоднейшее расстояние между осветительными приборами, уменьшение которого удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение ведёт к резкой неравномерности освещённости. Данная величина зависит от кривой света светильника. Для выбранного светильника характерна кривая типа Д, где $\lambda = 1,2 - 1,6$. При выполнении расчета принимаем $\lambda = 1,4$.

Расстояние L между светильниками определяется как:

$$L = \lambda \cdot h = 1,4 \cdot 2,1 = 2,94 \text{ м} \quad (6.2.4.1)$$

Расстояние от крайних светильников до стены:

$$l = L/3 = 2,94/3 = 0,98 \text{ м} \quad (6.2.4.2)$$

Произведем расчет числа рядов и количества светильников в ряду. Число рядов светильников в помещении:

$$N_A = \frac{A}{L} = \frac{5,8}{2,94} \approx 2 \quad (6.2.4.3)$$

Число светильников в ряду:

$$N_B = \frac{B}{L} = \frac{5,31}{2,94} \approx 2 \quad (6.2.4.4)$$

Так как помещение имеет прямоугольную форму, то разумнее добавить в каждый ряд по одному дополнительному светильнику, тем самым уменьшив расстояние между светильниками в ряду до 50 см. Это позволит усилить освещенность помещения для более комфортной работы.

Таким образом, общее число светильников в помещении:

$$N = N_a * N_b = 3 * 2 = 6 \quad (6.2.4.5)$$

На рисунке 6.2.4 изображен план кабинета и расположения источников света с люминесцентными лампами.

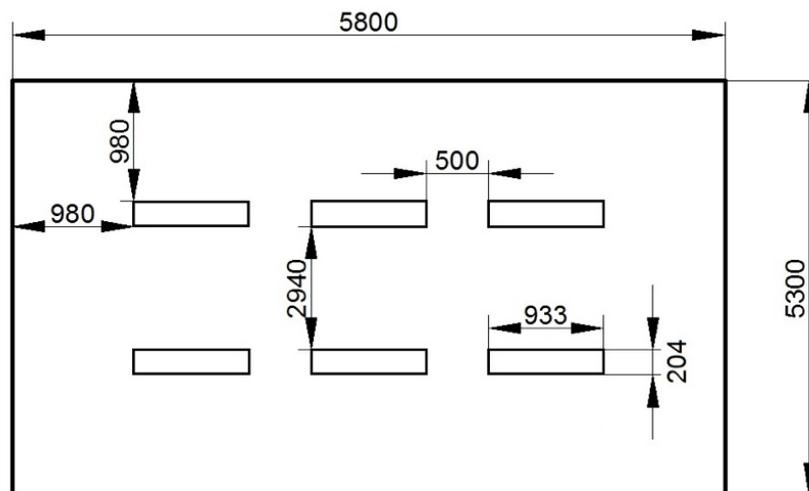


Рисунок 6.2.4. План расположения источников света.

4. Выбор нормируемой освещенности. Основные требования по значениям нормируемой освещенности рабочих поверхностей сформулированы в СНиП 23-05-95. Выбор освещенности основан на таких условиях как размер объема различения (толщина линии, риски, высота буквы), контраста объекта с фоном, характеристики фона.

В соответствии с требованиями по работе с ПК, при работе с экраном в сочетании с работой над документами наиболее оптимальной для работы с экраном является освещенность 200 лк.

5. Расчёт общего равномерного освещения. Для произведения расчёта общего равномерного искусственного освещения горизонтальной рабочей поверхности используется метод коэффициента светового потока, который учитывает световой поток, отражённый от потолка и стен. Расчет общего равномерного уровня искусственного освещения горизонтальной поверхности рабочего места производится способом коэффициента светового потока:

$$\phi_{\text{П}} = \frac{E_{\text{н}} S K_3 Z}{N n} = \frac{200 \cdot 30,8 \cdot 1,5 \cdot 1,1}{12 \cdot 0,53} = 1598 \text{ Лм} \quad (6.2.4.6)$$

где $E_{\text{н}}$ – нормируемая минимальная освещённость по СНиП 23-05- 95, $E_{\text{н}}=200$ Лк (Характеристика зрительной работы VI: Грубая (очень малой точности)); S – площадь освещаемого помещения, м²; K_3 – коэффициент запаса, учитывающий загрязнение светильника (источника света, светотехнической арматуры, стен и пр., т. е. отражающих поверхностей), наличие в атмосфере цеха дыма, пыли, $K_3=1,5$ (Помещения с малым выделением пыли); Z – коэффициент неравномерности освещения, отношение $E_{\text{ср}}/E_{\text{min}}$. Для люминесцентных ламп при расчётах берётся равным 1,1; N – число ламп в помещении, 12; n – коэффициент использования светового потока, 0,53.

Коэффициент использования светового потока показывает, какая часть светового потока ламп попадает на рабочую поверхность. Он зависит от индекса помещения i , типа светильника, высоты светильников над рабочей поверхностью h и коэффициентов отражения стен ρ_c и потолка ρ_n .

Индекс помещения определяется по формуле 19:

$$i = \frac{S}{h(A+B)} = \frac{30,8}{2,1 \cdot 11,11} = 1,3 \quad (6.2.4.7)$$

Коэффициент отражения стен (свежепобеленное состояние стен с окнами без штор): $\rho_c = 50 \%$; коэффициент отражения потолка (свежепобеленное состояние потолка): $\rho_n = 70 \%$;

Делаем проверку выполнения условия:

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{ЛД}} - \Phi_{\text{П}}}{\Phi_{\text{ЛД}}} \cdot 100\% \leq 20\% \quad (6.2.4.8)$$

$$\frac{\Phi_{ЛД} - \Phi_{П}}{\Phi_{ЛД}} \cdot 100\% = \frac{1650 - 1598}{1650} \cdot 100\% = 3,2\%.$$

Таким образом: $-10\% \leq 3,2\% \leq 20\%$, освещенность рассматриваемого помещения находится в диапазоне оптимального освещения. Это означает, что мощность и количество осветительных приборов для данного помещения выбраны правильно.

6.3. Опасные факторы проектируемой производственной среды

Существует два опасных фактора, который имеют места при проведение исследовательских работ:

- опасные производственные факторы, связанные с электрическим током, вызываемым разницей электрических потенциалов;
- пожаровзрывоопасность.

6.3.1. Электробезопасность

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Согласно требованиям электробезопасности (ГОСТ 12.1.019-79 «ССБТ. Электробезопасности. Общие требования и номенклатура видов защиты»). Всё электрооборудование и приборы должны находиться на специально отведенных местах и заземлены. Сопротивление заземления должно быть не более 4 Ом.

В настоящее время большая доля внимания уделена электробезопасности, так как использование в повседневной жизни различного вида электроустановок неуклонно растет. Анализ опасности электрических сетей практически сводится к определению значения тока, протекающего через тело человека в различных условиях, в которых может оказаться человек при эксплуатации электрических сетей. Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50мА, безопасное напряжение 12В.

В используемом помещении применяются установки напряжением до 1 кВ. По электробезопасности помещение относится к первому классу –

помещения без повышенной опасности (сухое, хорошо отапливаемое, помещение с токонепроводящими полами, с температурой 18—20°, с влажностью 40-50%).

Основными техническими мероприятиями по защите персонала от поражения электрическим током, согласно ПУЭ, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения. В рабочей зоне предусмотрены все перечисленные мероприятия. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

6.3.2. Пожаровзрывоопасность

Технический регламент (НПБ 105-03) о требованиях пожарной безопасности регламентирует классификацию зданий по степени огнестойкости, конструктивной и функциональной пожарной опасности. По пожарной опасности помещение и здание возможно отнести к классу Д, т.е. к помещениям, в которых находятся (обращаются) негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Основными видами защиты различных объектов от пожаров, являются средства сигнализации и пожаротушения. В рассматриваемом здании предусмотрена электрическая пожарная сигнализация, позволяющая быстро и точно указать место возникновения пожара. Сигнализация обеспечивает автоматический ввод в действие предусмотренных на объекте средств пожаротушения и дымоудаления.

В здании существуют пожарные краны. В качестве первичных средств пожаротушения используются углекислотные огнетушители ОУ-5. Преимущества углекислотных огнетушителей: эффективность тушения жидких и газообразных веществ и электроустановок под напряжением до 1000 В; отсутствие следов тушения; диапазон рабочих температур от -40 °С до +50 °.

Необходимость разработки плана эвакуации людей в случае пожара, инструкций к нему, а также проектирование системы оповещения людей о пожаре в школах, назначение лиц, имеющих право на её включение

регламентированы п.п.16,17,102 ППБ 01-03. План эвакуации из рассматриваемой лаборатории изображен на рисунке 6.3.2.

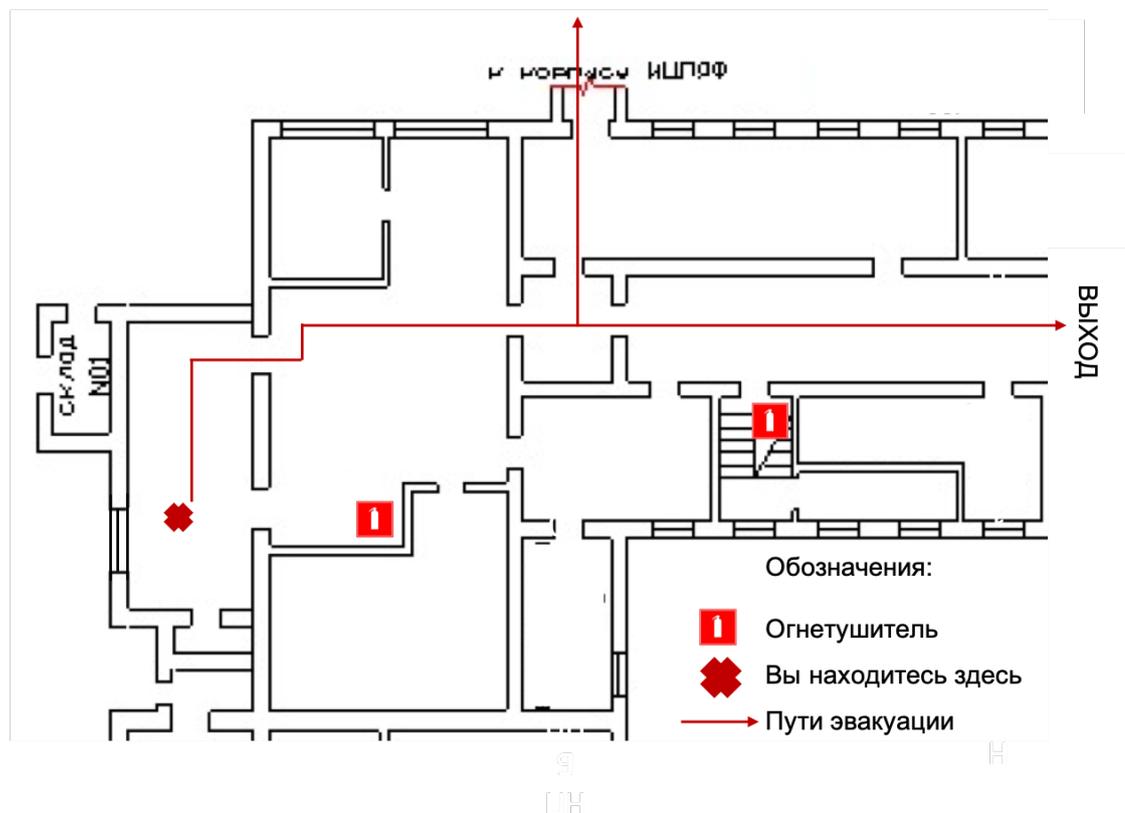


Рисунок 6.3.2. План эвакуации из лаборатории.

6.4. Организационные мероприятия для обеспечения безопасности

Подготовка спецодежды, рабочего стола, инструментов, приспособлений являются первоочередными действиями для обеспечения безопасности.

Проверка оборудования на исправность, отсутствие внешних повреждений является необходимыми мероприятиями. Также необходима проверка исправности контрольных, измерительных, сигнальных приборов, компьютеров, тумблеров, переключателей. Приступать к работе в случае неисправности любого из используемых приборов и установок категорически запрещается. Запрещается также приступать к работе, если человек не прошел аттестацию на знания правил безопасности труда.

Помещение для работы должно содержаться в чистоте и порядке. Недопустимо наличие открытого огня вблизи или на рабочем месте.

По окончании работы в лаборатории необходимо:

- отключить все измерительные приборы и источники питания;
- отключить питание компьютера;
- отключить освещение.

6.5. Экологическая безопасность

Экологическая безопасность в данном случае представляет собой комплекс мер, направленный на ограничение негативного воздействия человеческой деятельности на природу.

Одним из таких факторов является неподобающая утилизация материалов, применяемых в работе: люминесцентных ламп, полимерных клейких лент, проводов, металлической фольги, бумаги и т.д.

В Институте, где проводилась работа, действуют пункты приема вторсырья. Коллективом лаборатории организован самостоятельный сбор и сортировка отходов, отправка которых на утилизацию осуществляется еженедельно.

6.6. Защита в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – состояние, при котором в результате возникновения источника чрезвычайной ситуации на объекте, определенной территории или акватории нарушаются нормальные условия жизни и деятельности людей, возникает угроза их жизни и здоровью, наносится ущерб имуществу населения, народному хозяйству и окружающей природной среде.

Чрезвычайные ситуации бывают техногенные и природные. Техногенные чрезвычайные ситуации вызваны производственной деятельностью человека, в то время как природные ЧС возникают по причине природных явлений и процессов. Так, к техногенным чрезвычайным ситуациям относятся пожары и взрывы на производстве, аварии с выбросом химически опасных или радиоактивных веществ и т.д. Природные ЧС могут возникнуть ввиду наводнения, заморозка, урагана и т.д. Рассмотрим пример ЧС и соответствующие ей действия по обеспечению безопасности.

Предупреждение чрезвычайных ситуаций - это комплекс мероприятий, проводимых заблаговременно и направленных на максимально возможное

уменьшение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также на сохранение здоровья людей, снижение размеров ущерба природной среде и материальных потерь в случае их возникновения. Это понятие характеризуется также как совокупность мероприятий, проводимых федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправления и организационными структурами РСЧС, направленных на предотвращение чрезвычайных ситуаций и уменьшение их масштабов в случае возникновения (ГОСТ Р22.0.02-94).

Одним из наиболее распространенных и опасных видов техногенных ЧС является пожар. Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага. Пожары причиняют значительный материальный ущерб, в ряде случаев вызывают тяжелые травмы и гибель людей. основополагающими законодательными актами в области пожарной безопасности являются Федеральные законы "О пожарной безопасности" и "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности", определяющие общие правовые, экономические и социальные основы обеспечения пожарной безопасности в Российской Федерации.

При возникновении пожара необходимо:

- сообщить о возгорании пожарным службам;
- отключить по возможности все электрические приборы от сети;
- закрыть окна;
- покинуть помещение согласно плану эвакуации.

6.7. Выводы

В результате рассмотрения безопасности работы и гигиены труда при изучении характеристик детекторов типа Vulk Micromegas были выделены опасные и вредные производственные факторы, а также существующие средства и методы защиты; описаны организационные и технические мероприятия, проводимые перед началом работы. Рассмотрены факторы техногенной безопасности. Кроме того, были рассмотрена типичная чрезвычайная ситуация -

пожар и поведение при его возникновении. В целях практической работы был произведен расчет искусственной освещенности рабочей зоны помещения, в котором проводилась работа. В результате расчета искусственного освещения было выявлено, что лампы ЛД типа ОД мощностью 30 Вт, применяемые для освещения рабочего кабинета, соответствуют нормам.

Проведение исследовательской работы не наносит вред окружающей среде с точки зрения производимых отходов, поскольку они перерабатываются.

Для предотвращения техногенной ЧС необходимо соблюдение правил пожарной и электробезопасности.

Список литературы

1. Rutherford E., Geiger H. An electrical method of counting the number of α -particles from radio-active substances //Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. – 1908. – Т. 81. – №. 546. – С. 141-161.
2. Charpak G. et al. The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles //Nuclear Instruments and Methods. – 1968. – Т. 62. – №. 3. – С. 262-268.
3. Oed A. Position-sensitive detector with microstrip anode for electron multiplication with gases //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1988. – Т. 263. – №. 2-3. – С. 351-359.
4. Sauli F. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1997. – Т. 386. – №. 2-3. – С. 531-534.
5. Giomataris Y. et al. MICROMEGAS: a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1996. – Т. 376. – №. 1. – С. 29-35.
6. Şahin Ö. et al. Penning transfer in argon-based gas mixtures //Journal of Instrumentation. – 2010. – Т. 5. – №. 05. – С. P05002.
7. Leo W. R. Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach. – Springer Science & Business Media, 2012.
8. Fano U. Ionization yield of radiations. II. The fluctuations of the number of ions //Physical Review. – 1947. – Т. 72. – №. 1. – С. 26.
9. Knoll G. F. Radiation detection and measurement. – John Wiley & Sons, 2010.
10. Sauli F. Gaseous radiation detectors: fundamentals and applications. – Cambridge University Press, 2014. – №. 36.

11. Ivaniouchenkov Y. et al. Breakdown limit studies in high-rate gaseous detectors //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 1999. – T. 422. – №. 1-3. – C. 300-304.
12. Alexopoulos T. et al. A spark-resistant bulk-micromegas chamber for high-rate applications //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2011. – T. 640. – №. 1. – C. 110-118.
13. Giomataris I. et al. Micromegas in a bulk //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrom
14. Abgrall N. et al. Time projection chambers for the T2K near detectors //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2011. – T. 637. – №. 1. – C. 25-46.
15. Iguaz F. J. et al. Micromegas detector developments for Dark Matter directional detection with MIMAC //Journal of Instrumentation. – 2011. – T. 6. – №. 07. – C. P07002.
16. Charles G. Micromegas detectors for CLAS12 //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2013. – T. 718. – C. 414-415.
17. Andriamonje S. et al. Development and performance of Microbulk Micromegas detectors //Journal of Instrumentation. – 2010. – T. 5. – №. 02. – C. P02001. 2010
18. Iguaz F. J. et al. New developments in Micromegas Microbulk detectors //Physics Procedia. – 2012. – T. 37. – C. 448-455. 2011
19. Galan J. et al. MICROMEGAS detectors in the CAST experiment //Journal of Instrumentation. – 2010. – T. 5. – №. 01. – C. P01009.
20. Andriamonje S. et al. A new 2d-micromegas detector for neutron beam diagnostic at n tof //J. Korean Phys. Soc. – 2011. – T. 59. – C. 1601-4.

21. Chefdeville M. et al. An electron-multiplying ‘Micromegas’ grid made in silicon wafer post-processing technology //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2006. – T. 556. – №. 2. – C. 490-494.
22. Bilevych Y. et al. Angular resolution of the gaseous micro-pixel detector Gossip //Nuclear Physics B-Proceedings Supplements. – 2011. – T. 215. – №. 1. – C. 51-55.
23. Attié D. et al. A piggyback resistive micromegas //Journal of Instrumentation. – 2013. – T. 8. – №. 05. – C. P05019.
24. Galan J. et al. Characterization and simulation of resistive-MPGDs with resistive strip and layer topologies //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2013. – T. 732. – C. 229-232.
25. Serrano P. et al. Caliste-MM: a spectro-polarimeter based on the micromegas concept for soft X-ray astrophysics //Journal of Instrumentation. – 2016. – T. 11. – №. 04. – C. P04016.
26. Abbon P. et al. The COMPASS setup for physics with hadron beams //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2015. – T. 779. – C. 69-115.
27. Quaresma M. Transverse Momentum Dependent Parton Distribution Functions through SIDIS and Drell-Yan at COMPASS : дис. – Lisbon, IST, 2016.
28. Adams B. et al. Letter of Intent: A New QCD facility at the M2 beam line of the CERN SPS (COMPASS++/AMBER) //arXiv preprint arXiv:1808.00848. – 2018.
29. Alexopoulos T. et al. A spark-resistant bulk-micromegas chamber for high-rate applications //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2011. – T. 640. – №. 1. – C. 110-118.
30. Peskov V., Fonte P. Research on discharges in micropattern and small gap gaseous detectors //arXiv preprint arXiv:0911.0463. – 2009.

Приложение А

Глава 1 Введение

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
ОБМ71	Завазиева Дарина Тимуровна		

Консультант школы отделения (НОЦ) – Экспериментальной физики:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ОЭФ ИЯТШ	Лидер Андрей Маркович	д.т.н., доцент		

Консультант – лингвист ОИЯ ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Преподаватель ОИЯ ШБИП	Шайкина Ольга Игоревна			

Chapter 1. Introduction

Within the first part of the Chapter, brief history of Micro-Pattern Gaseous Detectors is given, physical basics of their operation are explained, and Micromegas detectors are detailed.

Within the second part, COMPASS experiment is briefly described, its tracking system is pictured. Motivation of present work, and its objectives are also outlined.

1.1. Micro-Pattern Gaseous Detectors

Development of Micro-Pattern Gaseous Detectors (MPGD) begins with the phenomenon of charge amplification near the wire surrounded by electric field, which has been described by Rutherford and Geiger (1908) [1]. During the last century, many developments in gas detectors have been presented, and many studies related to their physics have been conducted. In 1968, a Multi Wire Proportional Counter (MWPC) was presented by Georges Charpak who was awarded with Nobel Prize in Physics for his invention in 1992 [2]. Within MWPC, set of parallel wires with a step of 2-3 mm was served as an anode, they were located between two metal planes (cathodes). Many important discoveries in Particle Physics have been made using MWPCs due to their ability to determine not only the position of electrons, but also measure their number with some statistical accuracy. However, MWPCs were limited in rate capability, which remained quite low because of ion space-charge effects.

Later, design of Micro Strip Gas Counter (MSGC) was introduced, where wires were replaced with narrow strips coated with small distance (hundreds of microns) on a non-conductive substrate [3]. The potential difference was applied on neighboring strips, which resulted in improvement of the spatial resolution and increased rate capability. Development of MSGCs began the era of Micro-Pattern Gaseous Detectors, where the scale of amplification and readout zones became about submillimeters.

Since then, a variety of different structures have been developed in order to detect ionizing radiation effectively. Up today, the most common and successfully used in experiments are Gas Electron Multipliers (GEM) [4] and Micromegas detectors [5], that we will discuss in more detail in the following sections.

1.1.1. Basic physical principles in gaseous detectors

1.1.1.1. Gas ionization

The simplest configuration of MPGD is two electrodes with the third one dividing the whole volume for drift and amplification gap. The volume is usually filled with noble gases (argon is the most common).

When photon or charged particle traverses the volume of the detector, losing its energy in collisions with gas atoms and molecules, it creates ion-electron pairs. Mean number of the pairs hence is proportional to deposited energy. Electrons then drift in gas (drift gap) and multiply (in amplification gap) creating avalanche which could be read out as a signal.

Electrons are generated by two basic mechanisms: primary ionization of noble gas atoms and secondary effect, which occurs in the presence of the second polyatomic gas so-called “quencher”. After the de-excitation of noble gas atoms, quencher having several degrees of freedom (i.e. large photoabsorption coefficients) dissipate the energy of photons through dissociation or elastic collisions (Penning effect) [6].

The average number of ion-electron pairs produced for initial energy E_0 is:

$$n_e = \frac{E_0}{W}, \quad (1.1.1.1)$$

where W is the mean energy needed for pair creation. W is a sum of ionization potential and the energy of excitation. Within the Table 1, the excitation, ionization and ion-electron pair production energies for various gases are given [7].

Number of produced pairs represents detector efficiency, but it is needed to notice that not all of them could reach readout electrode and be measured. Along with process of pair production there are pair recombination process and the electron attachment. In the absence of an electric field, ion-electron pairs will recombine due to electric attraction. The presence of electronegative gases, such as O_2 , CO_2 or H_2O , might lead to the capture of free electrons before they reach the electrodes. Noble gases are not electronegative; therefore, they are most common in gas detectors [7].

Table 1.1.1.1. The excitation, ionization and ion-electron pair production energies for various gases.

	E_{exc} [eV]	E_{ion} [eV]	W [eV]
H ₂	10,8	15,4	37
He	19,8	24,6	41
N ₂	8,1	15,5	35
Ne	16,6	21,6	36
Ar	11,6	15,8	26
Kr	10,0	14,0	24
Xe	8,4	12,1	22
CO ₂	10,0	13,7	33
CH ₄		13,1	28
C ₄ H ₁₀		10,8	23

1.1.1.2. Fano factor

The process of collision of the electron with gas molecules is pure statistical, so the number of primary electrons (n_e) fluctuates. Its standard deviation (σ) is accounted by Fano factor (F) [8]:

$$\sigma_{n_e}^2 = F \cdot n_e, \quad (1.1.1.2)$$

its value ranges between 0 and 1. Larger value represents broader distribution in n_e . Theoretical minimum $F = 0$ would indicate process, where only ionization occurs.

Both W (see (1.1) expression) and F values are gas characteristics. They slightly depend on the kind of the incident particle, and both increase (W towards infinity, F towards 1) as the electrons initial energy decreases approaching the ionization potential of the gas, for high-energy electrons they remain almost constant.

1.1.1.3. Energy resolution

Energy resolution stands for the ability of detector to distinguish two close lying energy values, and it is one of the most important characteristics of detector. Energy resolution is estimated by the spectrum of monoenergetic beam. The ideal case would be a delta-function peak, but in reality, what one measures is a Gaussian distribution [9].

The resolution is usually given in terms of Full Width at Half maximum (FWHM, %). Energies within this width can hardly be distinguished by the detector. A general formula for the resolution can be expressed as:

$$R (\%) = \frac{\Delta E}{E} \quad (1.1.1.3.1)$$

It is evident that R depends on deposited energy, the higher the energy of the incident particle the better the resolution of the detector.

Fluctuations in the number of primaries (see (2.1.)) are the first limitation in energy resolution. This limit to the energy resolution of detection of an incident particle with energy E can be expressed as:

$$R (\%) = 2,35 \sqrt{\frac{F \cdot W}{E}}, \quad (1.1.1.3.2)$$

where the factor 2.35 relates the standard deviation of a Gaussian distribution to its FWHM.

1.1.1.4. Diffusion

Microscopically, ions and electrons drift in gas in the presence of an electric field, colliding with gas molecules. As a result, their direction randomizes after each collision. On average, they assume speed u in the direction of electric field E , which is much less than the instantaneous value of speed c , which they acquire between collisions. Gases used for the detectors are usually diluted in such a way that the distance corresponding to the average electron mean free path is much longer than Compton wavelength. Thus, their movement can be described in accordance with classical considerations [10].

In the absence of an electric field, electrons and ions begin to spread evenly due to numerous collisions with gas molecules. Assuming thermal equilibrium, their mean speed can be given by the Maxwell distribution:

$$v = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \quad (1.1.1.4.1)$$

It is obvious that the mean electron speed is much higher than it is for ions due to their much smaller mass. Charge distribution in one dimension (x) can be described by the Gaussian distribution:

$$\frac{dN}{dx} = \frac{N_0}{\sqrt{4\pi Dt}} e^{-\frac{x^2}{4Dt}}, \quad (1.1.1.4.2)$$

where t is the elapsed time, x is the distance from the point of creation, and D is the diffusion coefficient. The standard deviation of the above distribution can be expressed as:

$$\sigma(x) = \sqrt{2Dt}, \quad (1.1.1.4.3)$$

With similar considerations for the three dimensions:

$$\sigma(r) = \sqrt{6Dt}, \quad (1.1.1.4.4)$$

The diffusion coefficient D can be described from the classical kinetic theory:

$$D = \frac{1}{3} v \lambda, \quad (1.1.1.4.5)$$

where λ is the mean free path of electrons or ions in gas, which can be classically expressed as:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{kT}{\sigma_0 P}, \quad (1.1.1.4.6)$$

where σ_0 is the total cross section of the collision with the gas molecule and P is the gas pressure.

Substituting expression (4.6) into (4.5), we obtain the dependence of the diffusion coefficient on gas parameters:

$$D = \frac{2}{3\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sigma_0 P} \sqrt{\frac{(kT)^3}{m}} \quad (1.1.1.4.7)$$

1.1.1.5. Drift

Ions and electrons in the presence of an electric field drift through the volume colliding with gas molecules. A collision causes a decrease in their speed and a scattering around their average trajectory. The average velocity they gain is defined as the drift velocity, and it depends on the mean time between two collisions τ , the electric field E and their masses m . In addition, for ions, the drift velocity is inversely proportional to the gas pressure [10].

The mobility of electrons and ions can be defined as:

$$\mu = \frac{u}{E}, \quad (1.1.1.5.1)$$

where u is the drift velocity. For ideal gases, in which ions and electrons are constantly in thermal equilibrium, the mobility and diffusion coefficient are related according to the expression:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{e} \quad (1.1.1.5.2)$$

It is evident that the diffusion of electrons is much higher than that of positive ions, due to their higher mobility.

1.1.1.6. Multiplication

When the electric field is high enough that the electrons between two collisions gain enough energy for ionization, another electron is produced, so an avalanche is developing. As the number of electrons increases in subsequent generations, the avalanche continues to grow until all of electrons are collected on the anode. Due to the higher electron mobility, they are gathered in the front of water drop-like shape, while ions, that drift slowly, remain in its tail [10].

The distance that an electron will travel between two ionizations is defined as the free path of ionization. The first Townsend coefficient, a , is the inverse value of this quantity. It represents the number of ion-electron pairs created per unit length. If there are initially n electrons, then after passing the distance dx , the number of produced electrons will be:

$$dn = n a dx, \quad (1.1.1.6.1)$$

Integrating (6.1), we obtain the expression for the total number of electrons created on the path x in a uniform electric field E :

$$n = n_0 e^{ax}, \quad (1.1.1.6.2)$$

where n_0 is the number of primary electrons. The gas gain G then is defined as:

$$G = \frac{n}{n_0} = e^{ax} \quad (1.1.1.6.3)$$

Gas gain cannot increase after a certain limit, at which breakdowns occur. The most difficult task in gas detectors is to achieve stable operation with the highest possible gain. The gas amplification limit is called Raether limit and its value is about $10^6 - 10^7$ electrons [11].

1.1.2. Micromegas detectors

Standard Micromegas (MM) detector is pictured in figure 1a: gas amplification takes place in a thin gap (about 100 μm) in between readout anode and metallic micromesh. Height of the amplification gap is defined by the height of insulating pillars. Applying high electric field to the amplification gap ($\approx 30 - 100 \text{ kV/cm}$) and relatively low to the drift gap ($\approx 1 \text{ kV/cm}$), electrons drift towards the mesh, focus into its holes and multiply in the amplification gap.

Gain value for MM detectors reaches 10^4 , energy resolution (for 5.9 keV) is below 20%. Micromegas chambers have high time resolution (1 – 10 ns), and high rate capability (up to MHz/cm^2) [12].

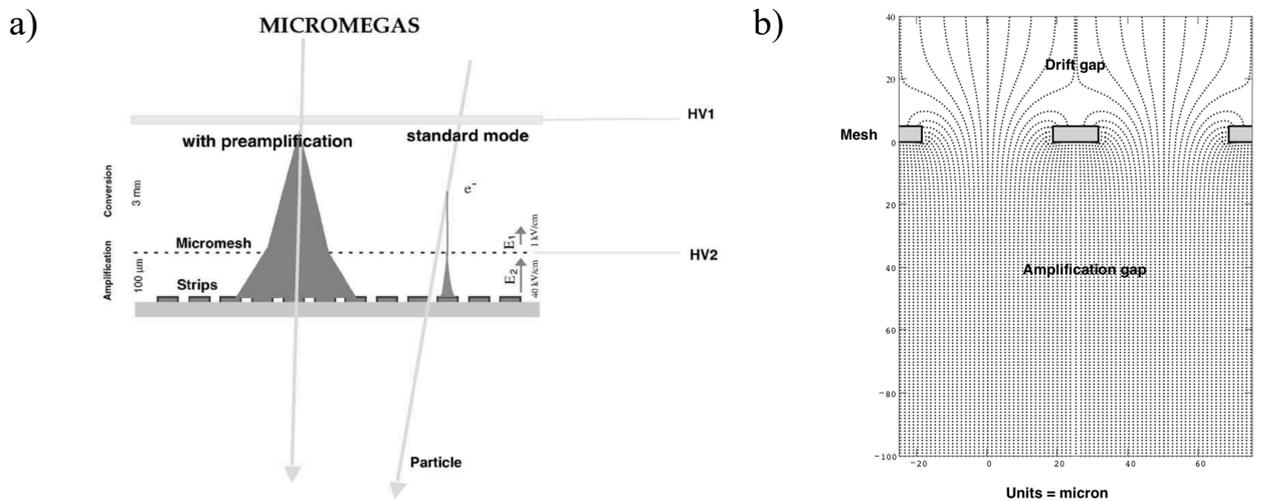


Figure 1.1.2. a – schematic sketch of MM detector, b – electric field lines in MM detector.

The first prototypes of the MM consisted of two frames screwed to one other, anode plane and metallic mesh were glued on those frames. The distance between the anode and the mesh was defined by placing non-conductive plates between them. Due to the poor flatness and parallelism in this assembling, the prototypes were characterized by ununiform gas amplification and spatial resolution, which led to the development of new types of MM detectors.

Bulk MM is characterized by a configuration, where the mesh is “embedded” into readout electrode, so they are a unified whole [13]. The height of the amplification gap, as in classic MM, is determined by pillars, that are created on the surface of the

Printed Circuit Board (PCB) by photolithographic methods, and mesh is literally built into them. A configuration with a “floating” mesh is also possible when it is stretched and fixed on the frame, which is attached onto the readout plane, where pillars are located.

Simplicity of Bulk MM manufacturing and operating makes it possible to produce large area detectors at relatively low cost. Due to the good parallelism and, accordingly, the uniformity of the electric field, characteristics of the detector, such as gas gain, energy and spatial resolution, are uniform on the area as well. The energy resolution of Bulk MM reaches 18% at 5.9 keV, gas gain is about $2 \cdot 10^4$.

Currently, Bulk MM are successfully installed in various experiments, for instance:

- into time projection chamber of T2K experiment, aimed at neutrino oscillations studying [14];
- into time projection chamber of MIMAC project aimed at detecting dark matter, where Bulk MM are used to reconstruct tracks from Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) [15];
- into the central tracking system of CLAS12 spectrometer, which works to study the structure of hadrons [16].

Characteristics of the detector are directly dependent on the size of the amplification gap, and the geometry of the mesh and readout structure. The finer the mesh, the more uniform is amplification field, hence, the better the energy resolution. A larger amplification gap provides higher gains at lower voltages, but time resolution might be worse. Study of such effects is relevant for the COMPASS collaboration. As a general rule, in experiments, the amplification gap of the Bulk MM detectors is 128 μm ; in the framework of present thesis, characteristics of 192 μm of amplification gap are tested.

1.2. COMPASS experiment

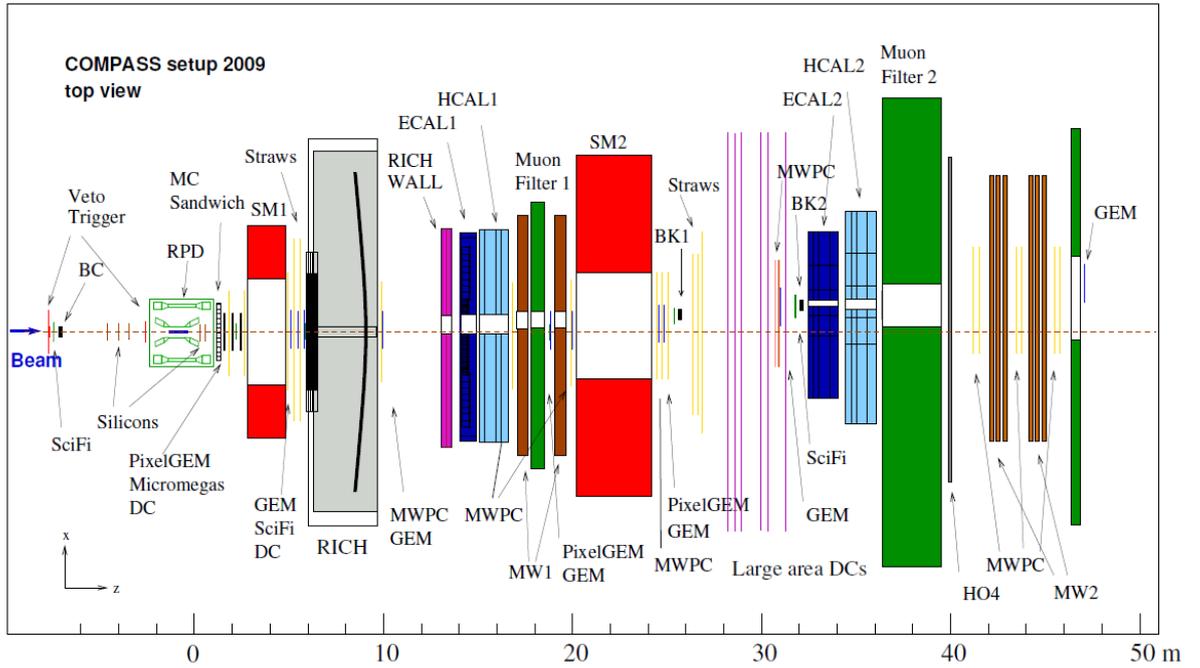


Figure 1.2. COMPASS setup.

COMPASS (COMmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy) is a universal spectrometer built on the basis of two spectrometric magnets at Super Proton Synchrotron (SPS) at European organization for nuclear research (CERN) [17]. Conventionally, it can be divided into three parts: the beam part, which is responsible for track reconstruction and identification of the incident particle, the Large Angle Spectrometer (LAS) and the Small Angle Apectrometer (SAS). Set of each of the spectrometers includes, in addition to track detectors, an electromagnetic and hadron calorimeter, as well as a muon identification system. LAS includes RICH (Radiation Imaging Cherenkov) detector, which identifies secondary hadrons. The third electromagnetic calorimeter ECAL0 is located behind the target. In various sessions, various polarized and nuclear targets, as well as a liquid hydrogen target, were used. In addition, the tungsten hadron absorber used in the data set session to study the Drell-Yang process could be used as an additional target for studying the EMC effect. Beams of positive (160 GeV / s and 200 GeV / s) and negative (190 GeV / s), muons, and also hadron beams with an energy of 190 GeV, positive ($\sim 75\%$ protons, $\sim 24\%$ pions) and negative ($\sim 97\%$ pions, $\sim 2\%$ kaons) were used. Thus, a large set of beam-

target combinations makes it possible to effectively solve a wide class of problems in hadrons and hadron interactions studies. Figure 2 shows the setup of the experiment.

1.2.1. COMPASS tracking system

COMPASS tracking system includes many stations distributed over the entire length of the spectrometer, which in total is 350 sensitive planes. Each station consists of a set of detectors of the same type, located approximately on the same z-coordinate along the beam. The area covered by the detectors is quite large, and the tracking requirements change with distance from the beam axis. Close to the beam, detectors must have high rate capability, ensure good synchronization and spatial resolution; in more remote regions from the beam axis, the particle flux is less intense, and the requirements for the detectors can be weakened. In order to meet requirements for the whole area there are three main types of tracking detectors: trackers of a very small, small and large area [18].

At a very small area (about 3 cm) around the beam, the particle flux reaches 10^5 Hz/mm²; and scintillating fibers (SciFi), silicon microstrip detectors and pixel MPGDs are used here as VSAT (Very Small Area Trackers). For scintillating fibers, time resolution is about 300 – 450 ps, efficiency is above 99%. For silicon detectors, time resolution is about 2.5 ns, and the spatial resolution is about 10 μ m.

At a distance of 30 – 40 cm from the beam, small area trackers (SAT) are located; here GEM and Micromegas planes with stripped two-dimensional readout geometry are operated. The spatial resolution for GEM detectors is about 70 μ m, time resolution is 12 ns. For Micromegas planes, efficiency is about 96 - 98%, spatial resolution is about 90 μ m, and time resolution is 5 ns.

Finally, the lowest rate in the most remote areas covered by large area trackers (LAT) allows the use of MWPCs, drift and Straw chambers. Single plane's area of LATs reaches up to 2 m², in the central part of the chambers dead zones reach 30 cm in diameter. For drift chambers, spatial resolution in different parts of the spectrometer ranges from 190 to 500 μ m. Straw chambers showed a resolution of 200 micrometers. For MWPC spatial resolution is the lowest - 1.6 mm.

1.2.2. Detectors upgrade

Dividing trackers into separate areas is impractical from the point of view of using space to accommodate readout electronics; no need to say it affects the cost of electronics and high voltage power supplies. Plus, the use of different types of detectors implies the use of different gas mixtures, which also causes inconvenience. In this regard, in order to optimize part of the tracking system, and since some sensitive planes are already aged, it was decided to replace the systems consisting of Multi Wire Proportional Counters and GEM detectors located behind the SM2 magnet with detectors that would meet the requirements of the new physical program and would be simpler in operating.

One of the candidates for the upgrade are Micromegas detectors. In the case of two-dimensional readout scheme by strips, in the central part of the detector close to the beam axis, it is proposed to read one strip into one channel to have good spatial resolution; as strips move away from the beam it is proposed to merge few of them in one readout channel. Thus, one sensitive plane can reach relatively large areas and combine the characteristics required for different areas, while the digital part will be the same for the entire plane.

The main requirements for the detectors are:

- stable operation with gas gains higher than 10^3 ;
- sensitivity to single particles;
- efficiency $>98\%$;
- rate capability - up to MHz/cm²;
- time characteristics <10 ns;
- spatial resolution <100 μm in the central part and <2 mm in areas remote from the beam axis.

COMPASS collaboration planned R&D program on Micromegas detectors development for their installation to the experiment. The work carried out in the framework of this Master's thesis, is the first stage of the planned R&D program.

The main purpose of this work is to produce and test a configuration of Bulk MM detector, which would meet the requirements of the experiment in terms of the achieved gas gains and the stability of operation.

To achieve the goal the following tasks were set up:

- produce prototypes of Bulk MM detector of two configurations: “standard” (with amplification gap of 128 μm) and with a larger gap (192 μm);
- assemble test chambers for measurements;
- measure effective gain of the prototypes;
- assess the stability (i.e. discharge rate) of the prototypes’ operation at achieved gains;
- estimate the energy resolution of the detectors at achieved gains;
- assess the sensitivity of prototypes to minimum ionizing particles (MIP) signal.

Conclusion

As a result of presented work two configurations of Bulk MM detectors were produced in accordance with fine-tuned technological settings. The configurations differ in the height of the amplification gap: one of them is “standard” - 128 μm , the second is 192 μm . For both prototypes basic characteristics such as effective gain, discharge rate and energy resolution were measured.

For the prototype with a gap of 128 μm , the maximum gain reached the value of $7.4 \cdot 10^3$ at the applied voltage of 560 V, while the discharge rate is about 25 discharges per hour.

For the prototype with a gap of 192 μm , the maximum gain of $7.8 \cdot 10^3$ is achieved at the applied voltage of 650 V, discharge rate at 660 V is about 5 discharges per hour, so this configuration has some “margin” in voltage and for single particle registration gains may be higher than 10^4 (because of the Raether limit which is equal to $10^6 - 10^7$ electrons in argon containing mixtures).

The estimation of the energy resolution showed that the optimal operating voltage for 128 μm is 520 V with a gain of about $1.5 \cdot 10^3$, for 192 μm it is 630 V with a gain of $4 \cdot 10^3$.

The obtained amplitude distributions from minimum ionizing particles (MIP) indicate the ability of the detectors to record single events.

Приложение Б

Таблица Б1. SWOT-анализ

	<p>Сильные стороны исследования (strengths) С1. Редкость технологии производства детекторов: производственная линия, созданная по ходу работы, является первой в России и третьей в мире, на которой возможно изготовление детекторов типа Micromegas С2. Прикладной характер работы: результаты работы представляют большую ценность для рабочих групп на экспериментах в области физики высоких энергий, рассматриваются перспективы внедрения производимых детекторов в будущие эксперименты (COMPASS/AMBER, NICA MPD) С3. Фундаментальность исследований: физические процессы, изучаемые в ходе работы, являются основой физики частиц, этот факт может быть полезным при планировании дальнейших исследований</p>	<p>Слабые стороны исследования (weaknesses) Сл1. Высокая цена исходных материалов и оборудования: материалы, применяющиеся в изготовлении детекторов, имеют высокую стоимость; кроме того, оборудование, необходимое в ходе измерений, также дорогостоящее Сл2. Сложность выполнения: проведение измерений было осложнено вследствие необходимости контролировать множество параметров, вытекающих из протекания естественных гетерогенных процессов в газах</p>
<p>Возможности исследования (opportunities) В1. Дальнейшее точное производство детекторов больших площадей и партий для экспериментов в физике частиц В2. Использование полученных теоретических знаний в области физики частиц В3. Применение способов измерений, апробированных в работе, в дальнейших исследованиях по характеристике газовых детекторов</p>	<p>В1С1. Для В1 С1 является определяющей, так как сегодня растет потребность экспериментов будущих поколений в микроструктурных трековых детекторах, а лабораторий, занимающихся изготовлением ММ детекторов, крайне мало В2С3. Поскольку область физики частиц является сравнительно молодой, фундаментальность изучаемых процессов играет важную роль В3С2. Для характеристики производимых и внедряемых газовых детекторов С2 является важным фактором с точки зрения подготовки экспериментов и возможности получать достоверные точные результаты</p>	<p>В1Сл1. Крупные затраты на производство детекторов и их дальнейшее обслуживание могут стать серьезным препятствием для В1 В3Сл2. Сложность проведения измерений может отразиться на обработке результатов и их интерпретации, что может послужить ограничением В3</p>
<p>Угрозы проведению исследования (threats) У1. Возможность отказа от внедрения детекторов, изучаемых в работе У2. Наличие конкурентных детекторов схожего назначения</p>	<p>У1С1. Отказ от ММ детекторов в экспериментах можно избежать путем совершенствования их геометрии, т.е. технологии производства У2С2. Оборудование, применяемое в экспериментах в физике частиц в большинстве случаев несовместимо с конкурирующими структурами</p>	<p>У1У2Сл1. В следствие высокой стоимости изученных детекторов и оборудования, применяемого в ходе их эксплуатации, возможен отказ от их применения в области физики высоких энергий и замена на другие аналогичные устройства</p>

Приложение В

Таблица В1. Календарный план-график проведения НИР по теме

Вид работ	Исп.	T _{кл} , дни	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Февраль	Март	Апрель	Май
Составление ТЗ, планирование эксперимента	Р	6,8									
Изучение литературы	С	40,0									
Отработка технологии производства детекторов	С	79,9									
Подготовка прототипов детекторов	С	10,4									
Подготовка измерительной системы	С, Р	8,9									
Проведение измерений, обработка результатов	С	79,9									
Моделирование результатов	С, Р	20,0									
Оценка результатов	Р	5,2									
Написание пояснительной записки	С	79,9									

