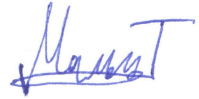


На правах рукописи



Мальцев Тимофей Владимирович

**КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ВЫСОКОГО
РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ**

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук Шехтман Лев Исаевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Фахрутдинов Ринат Макаримович – доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики высоких энергий имени А. А. Логунова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», ведущий научный сотрудник, г. Протвино

Гонгадзе Алекси – кандидат физико-математических наук, Международная межправительственная научно-исследовательская организация Объединенный институт ядерных исследований, начальник сектора №3 Лаборатории ядерных проблем имени В. П. Джелепова, г. Дубна

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт ядерных исследований Российской академии наук, г. Москва

Защита диссертации состоится «03» июля 2026 года в «14:30» часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «13» мая 2026 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



Лотов Константин
Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Координатные газовые детекторы применяются во многих экспериментах физики высоких энергий. Знание траектории элементарных частиц позволяет восстанавливать информацию о физических процессах, происходящих в точке их взаимодействия. В последние десятилетия значительный прогресс в технике регистрации частиц был достигнут благодаря созданию микроструктурных газовых детекторов [1] и, в частности, детекторов на основе газовых электронных умножителей (ГЭУ) [2]. Размеры элементов усиливающей и считывающей структуры таких детекторов находятся в субмиллиметровом диапазоне. ГЭУ внутри детектора могут быть расположены в каскадной схеме, благодаря чему удаётся распределить усиление в пространстве, что позволяет подавлять пробой в интенсивных пучках сильно ионизирующих частиц, подавлять ионные и фотонные обратные связи. Детекторы на основе ГЭУ обладают пространственным разрешением менее 50 мкм [3], загрузочной способностью до 10^7 см⁻² с⁻¹ [4], а также высокой эффективностью на уровне 99% и радиационной стойкостью, характеризующейся сохранением стабильной работы после прохождения через детектор интегрального заряда более 20 мКл/мм². Временное разрешение микроструктурных газовых детекторов находится на уровне 10 нс. Технологии производства позволяют создавать детекторы различной формы с регистрирующей областью в сотни квадратных метров.

В Институте ядерной физики имени Г. И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук (ИЯФ СО РАН) детекторы на основе ГЭУ применяются в следующих экспериментах на ускорительном комплексе ВЭПП-4: в системе регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР; в координатной системе установки ДЕЙТРОН; на установке Тестовый пучок электронов; на установке Лазерный поляриметр. Детекторы на основе газовых микроструктурных технологий предлагаются для модернизации торцов координатной системы детектора КМД-3 ускорительного комплекса ВЭПП-2000. Также разрабатывается проект внутреннего трека детектора будущей Супер Чарм-Тау Фабрики с применением ГЭУ. Таким образом, детекторы на основе ГЭУ представляют собой эффективный инструмент физики элементарных частиц, а изучение характеристик детекторов данного типа является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы исследования

В данной работе измерялись характеристики детекторов на основе ГЭУ для установки ДЕЙТРОН и для установки Тестовый пучок электронов ускорительного комплекса ВЭПП-4. Данные детекторы были собраны в ИЯФ СО РАН и являются уникальными. Среди других детекторов наиболее схожи с ними детекторы на основе ГЭУ для эксперимента COMPASS [3], эффективность регистрации которых по измерениям со-

ставила более 98% при коэффициенте газового усиления на уровне 8000. Также в статье [3] утверждается, что измеренное пространственное разрешение детекторов на основе ГЭУ для эксперимента COMPASS составляет 46 ± 3 мкм, однако в данной статье [3] отсутствует детальное описание расчёта полученного значения.

Для понимания механизмов функционирования детектора проводится численное моделирование его работы. Также моделирование позволяет оптимизировать детектор путём варьирования параметров, от которых зависят его характеристики. Обзор методов моделирования процессов, происходящих при регистрации частиц детекторами на основе ГЭУ, представлен в статье [5], где кратко говорится о разработке программы, позволяющей рассчитывать пространственное и временное разрешение детекторов. Однако в данной статье [5] представлены результаты только для частного случая моделирования пространственного разрешения детектора с одним ГЭУ в своём составе.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью данной работы является теоретическое и экспериментальное изучение основных характеристик детекторов на основе ГЭУ, а также численное моделирование работы внутреннего трекера детектора будущей Супер Чарм-Тау Фабрики.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести измерение эффективности регистрации, коэффициента газового усиления и пространственного разрешения детекторов на основе ГЭУ, собранных в ИЯФ СО РАН.
2. Разработать моделирование процесса диффузии электронов в детекторах на основе ГЭУ и рассчитать коэффициент эффективной поперечной диффузии электронов.
3. Построить моделирование процесса измерения пространственного разрешения детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ и установить физические пределы пространственного разрешения детекторов данного типа.
4. Изучить возможность регистрации пи-мезонов внутренним трекером детектора Супер Чарм-Тау Фабрики на основе различных технологий.
5. Исследовать влияние объёмного заряда положительных ионов внутри время-проекционной камеры на искажение траектории электронов ионизации.

Научная новизна работы

1. Моделирование процесса диффузии и газового усиления электронов в рабочем газе $\text{Ar}(70\%)\text{-CO}_2(30\%)$ детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ продемонстрировало, что коэффициент эффективной поперечной диффузии составляет 300 ± 20 мкм/ $\sqrt{\text{см}}$ при напря-

жённости электрического поля 2,0 кВ/см в дрейфовом промежутке и 3,5 кВ/см в остальных промежутках. При моделировании диффузии электрона в однородном электрическом поле напряжённостью 5 кВ/см был получен коэффициент поперечной диффузии, который находился на уровне 320 – 330 мкм/ $\sqrt{\text{см}}$. Таким образом, было обнаружено, что работа трёхкаскадных ГЭУ эффективно сужает облако электронов ионизации.

2. Экспериментально установлено, что пространственное разрешение детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ находится в диапазоне 15 – 30 мкм. Из моделирования следует, что применение корректировки дифференциальной нелинейности к методу центра тяжести при восстановлении координаты треков позволяет получить пространственное разрешение на уровне 10 мкм, что представляется физическим пределом для детекторов данного типа.
3. Средствами моделирования установлен минимальный импульс пимезонов, при котором их траектории могут быть достоверно реконструированы внутренним трекером детектора будущей Супер Чарм-Тау Фабрики на основе время-проекционной камеры. Данный импульс составляет 55 МэВ/с. Такая величина порогового импульса получена для варианта вакуумной трубы, состоящей из 3 мм бериллия и 0,5 мм парафина. Внутренняя стенка время-проекционной камеры при этом состоит из 50 мкм каптона, 100 мкм тефлона и 5 мкм меди.
4. Обнаружено, что применение внутри время-проекционной камеры газовой смеси Ar(45%)-iC₄H₁₀(15%)-CF₄(40%) обеспечивает минимальные искажения траектории электронов ионизации, составляющие до 2 мм на 30 см дрейфа, что позволяет применять данную газовую смесь во внутреннем трекаре детектора Супер Чарм-Тау Фабрики.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Полученный в детальном моделировании коэффициент эффективной поперечной диффузии электронов в детекторе на основе трёхкаскадных ГЭУ позволяет в дальнейшем проводить параметрическое моделирование для детекторов данного типа.
2. В моделировании установлено, что минимум пространственного разрешения достигается при шаге полосок считывающей структуры 300 мкм, однако зависимость пространственного разрешения от шага полосок является слабой, поэтому пространственное разрешение на уровне 15 – 20 мкм можно получать и при шаге полосок 500 мкм. Такое пространственное разрешение достигается в стандартном режиме работы. Вычисленные значения пространственного разрешения позволяют корректно учитывать погрешно-

сти в экспериментах, где в трековой системе присутствуют детекторы на основе ГЭУ.

3. Установленный в моделировании предел на минимальный импульс пи-мезонов, допускающий их реконструкцию, а также расчёт искажений траекторий электронов ионизации за счёт объёмного заряда важны для формирования и уточнения физической программы Супер Чарм-Тау Фабрики.

Методология и методы исследования

В данной работе применялись методы численного моделирования физических процессов взаимодействия элементарных частиц с применением следующих программ: GEANT4, NEED, Garfield++, ANSYS, DD4HEP, COMSOL. При общем анализе данных применялись методы статистической обработки средствами программы ROOT.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Детекторы на основе ГЭУ для установки ДЕЙТРОН и для Тестового пучка, собранные в ИЯФ СО РАН, способны стабильно работать в пропорциональном режиме при коэффициенте газового усиления до 5×10^4 . Эффективность детекторов находится на уровне 99% для коэффициента усиления, превышающего 2×10^4 .
2. Коэффициент эффективной поперечной диффузии электронов при дрейфе в рабочем газе детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ составляет 300 ± 20 мкм/ $\sqrt{\text{см}}$. Данное значение получено в моделировании для газа Ar(70%)-CO₂(30%) при стандартных условиях, когда в дрейфовом промежутке напряжённость электрического поля равна 2,0 кВ/см, а в остальных промежутках 3,5 кВ/см.
3. Пространственное разрешение детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ для Тестового пучка электронов, собранных в ИЯФ СО РАН, находится на уровне 15 – 30 мкм при регистрации ортогональных треков релятивистских электронов.
4. Минимальный пороговый импульс пи-мезона, допускающий его стабильную регистрацию во внутреннем трекаре детектора Супер Чарм-Тау Фабрики на основе время-проекционной камеры, равен 55 МэВ/с. Такая величина порогового импульса получена для варианта вакуумной трубы, состоящей из 3 мм бериллия и 0,5 мм парафина. Внутренняя стенка время-проекционной камеры при этом состоит из 50 мкм каптона, 100 мкм тефлона и 5 мкм меди.
5. Газовая смесь Ar(45%)-iC₄H₁₀(15%)-CF₄(40%) обеспечивает минимальные искажения траектории электронов ионизации в рабочем газе внутреннего трекара детектора Супер Чарм-Тау Фабрики. Характерная максимальная величина искажений составляет 2 мм на 30 см дрейфа.

Степень достоверности и апробация результатов

Результаты моделирования сравнивались с физическими оценками, а также с известными экспериментальными результатами для средних характеристик моделируемых процессов. Результаты моделирования одних и тех же процессов проверялись в разных программах, таких как GEANT4 и NEED.

Измерения характеристик детекторов проводились многократно и в разных постановках как в лаборатории, так и в сопутствующем режиме во время экспериментов, при этом результаты согласовывались и оставались стабильными с течением времени.

Основные результаты, составляющие материал настоящей работы, докладывались и обсуждались на следующих международных конференциях:

1. Vienna Conference on Instrumentation, Vienna, Austria, 15 – 19 February 2016.
2. CERN-BINP Workshop for Young Scientists in e+e- Colliders, Geneva, Switzerland, 22 – 25 August 2016.
3. Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-2017), Novosibirsk, Russia, 27 February – 3 March 2017.
4. Frontier Detectors for Frontier Physics, Isola d'Elba, Italy, 27 May – 2 June 2018.
5. Joint Workshop on Future Tau-Charm Factory, Orsay, France, 4 – 7 December 2018.
6. International Workshop on e+e- collisions from Phi to Psi (PHIPSI-2019), Novosibirsk, Russia, 25 February – 1 March 2019.
7. Micro Pattern Gaseous Detectors Conference (MPGD-2019), La Rochelle, France, 5 – 10 May 2019.
8. Instrumentation for Colliding Beam Physics (INSTR-2020), Novosibirsk, Russia, 24 – 28 February 2020.
9. RD51 collaboration meeting, Santiago de Compostela, Spain, 5 – 9 October 2020.
10. International Conference on Position Sensitive Detectors (PSD12), Birmingham, UK, 12 – 17 September 2021.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы представлены в 6 публикациях, 6 из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации:

Личный вклад автора диссертации

Изложенные в работе результаты получены автором лично либо при его определяющем вкладе. Автором проведено численное моделирование процесса регистрации электронов детектором на основе трёхкаскадных ГЭУ и получены значения пространственного разрешения. Автор принимал участие в наборе экспериментальных данных на Тестовом пучке элек-

тронов ускорительного комплекса ВЭПП-4 и выполнял статистическую обработку полученных данных для измерения эффективности регистрации, коэффициента газового усиления и пространственного разрешения детекторов на основе ГЭУ. Автор построил моделирование работы внутреннего трекера детектора Супер Чарм-Тау Фабрики и рассчитал минимальный импульс, допускающий реконструкцию траектории пи-мезонов. Автор исследовал искажение траектории электронов ионизации за счёт объёмного заряда положительных ионов внутри время-проекционной камеры и вычислил параметры, обеспечивающие минимальные искажения.

Вклад автора в опубликованные статьи по теме диссертации является определяющим. Авторский вклад диссертанта в статьи [А1 – А4] заключается в построении моделирования регистрации частиц детектором на основе ГЭУ и расчёте пространственного разрешения детекторов данного типа; в обработке экспериментальных данных и определении коэффициента усиления, эффективности регистрации и пространственного разрешения детекторов на основе ГЭУ. Авторский вклад диссертанта в статьи [А5 – А6] заключается в моделировании искажения силовых линий электрического поля внутри время-проекционной камеры за счёт объёмного заряда положительных ионов.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 174 страницы, включая 126 рисунков и 42 таблицы. Список литературы содержит 77 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность исследования, проведено обобщение разработанности выбранной темы, сформулированы цели диссертационной работы и поставлены задачи, указана теоретическая и практическая значимость выполненной работы, перечислены методы исследования.

Первая глава посвящена описанию принципа работы детекторов на основе ГЭУ и перечислению экспериментов ИЯФ, где применяются детекторы данного типа.

В разделе 1.1 приведено описание ГЭУ, представляющего собой диэлектрическую плёнку, покрытую с двух сторон проводящим материалом, в котором проделано множество регулярно расположенных отверстий, как показано на рисунке 1. В наиболее распространённом случае в качестве диэлектрика используется каптон¹ толщиной 50 мкм, а проводящим материалом выступает медь толщиной 5 мкм. Отверстия имеют форму двойного конуса. Расстояние между центрами отверстий ГЭУ составляет 140 мкм,

¹Каптон – торговое название полиимида, разработанного компанией DuPont.

диаметр отверстий в плоскости медной фольги равен 80 мкм, а в плоскости центра каптоновой плёнки – 60 мкм. ГЭУ изготавливаются методом фотолитографии путём химического травления меди и каптона.

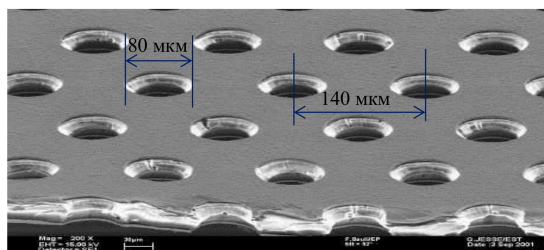


Рисунок 1 — Изображение газового электронного умножителя, полученное на сканирующем электронном микроскопе [6]

На электроды ГЭУ подаётся напряжение 300 – 500 В, при этом в отверстиях формируется электрическое поле напряжённостью 50 – 100 кВ/см. Первичные электроны, возникающие при ионизации в газовом промежутке перед ГЭУ, фокусируются в отверстия в процессе дрейфа вдоль силовых линий. Под действием электрического поля в отверстиях развиваются электронные лавины. Значительная часть электронов лавины может покинуть отверстия и выйти в последующий газовый промежуток, что может быть использовано для размножения электронов в каскадах или для регистрации на считывающем анодном электроде. Увеличивая число каскадов, можно достичь высоких коэффициентов усиления до значений 10^5 . Наибольшее распространение в эксперименте получили детекторы на основе трёхкаскадных ГЭУ.

В разделе 1.2 перечислены установки ИЯФ СО РАН, где применяются детекторы на основе ГЭУ: детектор КЕДР; установка ДЕЙТРОН; Тестовый пучок электронов ВЭПП-4; Лазерный поляриметр ВЭПП-4; детектор КМД-3 (проект модернизации); детектор Супер Чарм-Тау Фабрики (проект создания).

В данной работе изучались характеристики детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ для установки ДЕЙТРОН (DEUTERON) и для Тестового пучка (Test Beam Facility (TBF)), принципиальная схема которых представлена на рисунке 2. Рабочим газом является Ar (75%)-CO₂ (25%) при атмосферном давлении. В детекторах типа DEUTERON толщина дрейфового промежутка была равна 3 мм, толщина каждого транспортного промежутка – 1,5 мм, толщина индукционного промежутка – 2 мм. В детекторах типа TBF толщина дрейфового промежутка была равна 4,5 мм, толщина каждого транспортного промежутка – 1 мм, толщина индукционного промежутка – 2 мм.

Суммарно было собрано четыре детектора для установки ДЕЙТРОН и четыре детектора для Тестового пучка.

Считывающая полосковая структура детекторов расположена на каптоновой фольге толщиной 50 мкм. Толщина меди на каждой стороне каждого ГЭУ и считывающей структуре детектора равна приблизительно 3 мкм. Считывающая структура детектора состоит из двух слоёв: верхнего и нижнего. Конфигурация считывающей структуры обеспечивает равное деление наведённого заряда между слоями. Схема считывающей структуры детекторов представлена на рисунке 3.



Рисунок 2 — Схема детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ

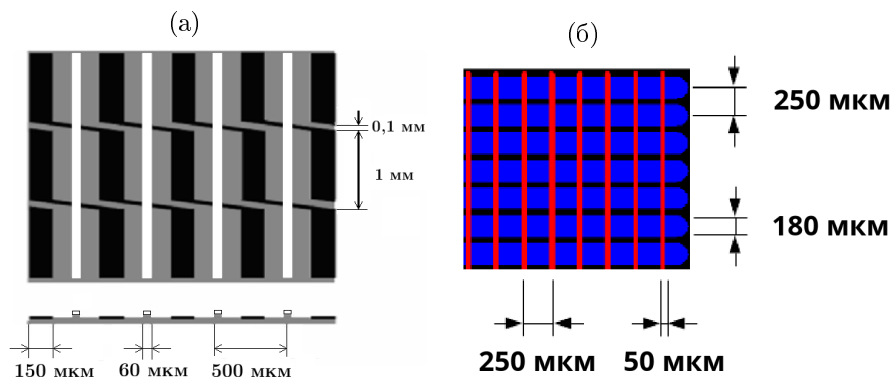


Рисунок 3 — Считывающая структура детекторов на основе ГЭУ: (а) для установки ДЕЙТРОН; (б) для Тестового пучка

Верхний слой считывающей структуры детектора для установки ДЕЙТРОН содержит прямые полосы шириной 60 мкм, шаг которых равен 500 мкм. Нижний слой содержит полосы шириной 150 мкм (стерео-полоски) и наклонные переемычки. Полоски нижнего слоя разделены вдоль на короткие прямые секции, а наклонные переемычки так соединяют ближайшие прямые секции, что в среднем образуются полосы, наклонённые под углом 30° к прямым полоскам верхнего слоя. Считывающая структура де-

тектора для установки ДЕЙТРОН содержит 320 прямых и 320 наклонных полосок, размер регистрирующей области составляет 160 мм × 40 мм.

В случае детектора для Тестового пучка полоски верхнего слоя (X-полоски) перпендикулярны полоскам нижнего слоя (Y-полоскам). Ширина полосок верхнего слоя равна 50 мкм. Полоски нижнего слоя имеют ширину 180 мкм. Полоски расположены с шагом 250 мкм. Каждый слой регистрирует половину суммарного заряда. Считывающая структура детектора для Тестового пучка содержит 512 X-полосок и 256 Y-полосок, размер регистрирующей области составляет 128 мм × 64 мм.

В эксперименте требуется быстрая регистрация сигнала от первичных частиц, поэтому была выбрана схема электроники, при которой сигнал во время эксперимента непрерывно записывается в аналоговую память, а вычитывание и оцифровка данных осуществляется после прихода сигнала триггера.

Каждая полоска считывающей структуры детектора приварена к отдельной входной площадке канала специализированной большой интегральной схемы (СБИС) зарядо-чувствительных усилителей АРС128 (Analog Pipeline Chip), представляющей собой бескорпусной чип, содержащий 128 каналов. Каждый канал состоит из маломощного зарядо-чувствительного усилителя (ЗЧУ) на входе и 32 ячеек аналоговой памяти внутри. Максимальная частота записи и чтения аналоговой памяти составляет 10 МГц, что достаточно для работы детекторов в эксперименте.

В разделе 1.3 представлены выводы к главе 1.

Вторая глава посвящена представлению экспериментальных результатов по измерению коэффициента усиления и эффективности детекторов на основе ГЭУ для установки ДЕЙТРОН и для Тестового пучка. В начале главы описана постановка соответствующих экспериментов.

Детекторы на основе ГЭУ способны регистрировать любые частицы, вызывающие ионизацию в газовом объёме. В настоящей работе регистрируемой частицей в большинстве случаев является электрон. В детекторах на основе ГЭУ распределение событий по величине сигнала может быть описано распределением Ландау.

В разделе 2.1 определяется коэффициент газового усиления детектора и приводятся результаты его измерения. Напряжение на электроды ГЭУ подаётся через высоковольтный делитель, который устроен так, что на каждый ГЭУ в каскаде подаётся одинаковое напряжение, которое приблизительно в 9 раз меньше полного напряжения на делителе. В эксперименте установлено, что изучаемые детекторы способны работать в пропорциональном режиме с коэффициентом усиления до 5×10^4 .

В разделе 2.2 определяется эффективность регистрации частиц детектором и приводятся результаты измерения эффективности. Для измерения эффективности изучаемого детектора применялась схема с двумя трековыми детекторами, расположенными до и после изучаемого детек-

тора. Выход на плато эффективности осуществляется при коэффициенте усиления выше 10^4 в случае детекторов для установки ДЕЙТРОН и выше 2×10^4 в случае детекторов для Тестового пучка. Эффективность регистрации частиц при стандартном режиме находится на уровне 99%.

Примеры экспериментальной зависимости коэффициента усиления от напряжения на делителе и эффективности регистрации частиц от коэффициента усиления для детектора ТВФ-0 представлены на рисунке 4.

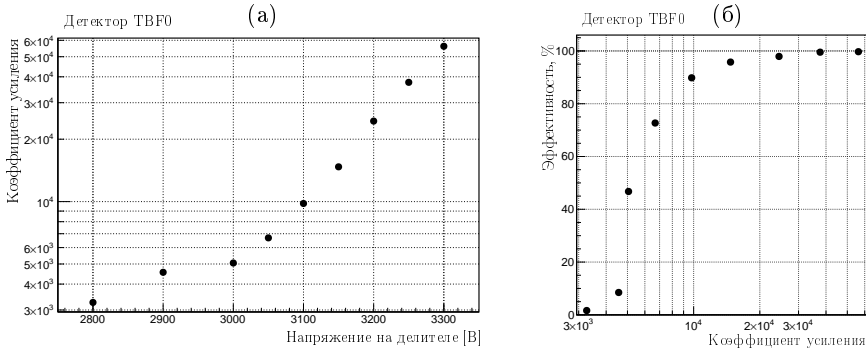


Рисунок 4 — Результаты измерения характеристик детектора ТВФ-0 для Тестового пучка: (а) коэффициент усиления в зависимости от напряжения на делителе; (б) эффективность в зависимости от коэффициента усиления

В разделе 2.3 представлены выводы к главе 2.

Третья глава посвящена построению микроскопического моделирования движения термализовавшихся электронов ионизации в рабочем газе детектора. Данное моделирование проводится для того, чтобы определить коэффициент поперечной диффузии, который является существенным параметром, влияющим на пространственное разрешение детектора.

В программе ANSYS была задана конфигурация электрического поля. Далее полученная конфигурация была импортирована в программу Garfield++, где выполнялось микроскопическое моделирование движения электрона в рабочем газе $\text{Ar}(75\%)\text{-CO}_2(25\%)$, находящемся при атмосферном давлении и температуре 20°C .

Моделирование проводилось для трёх случаев: однородное поле; один каскад ГЭУ; три каскада ГЭУ.

В разделе 3.1 описано моделирование движения термализовавшихся электронов в однородном электрическом поле напряжённостью 5 кВ/см . Установлено, что коэффициент поперечной диффузии электрона находится на уровне $320 - 330 \text{ мкм}/\sqrt{\text{см}}$.

В разделе 3.2 представлены результаты моделирования микроскопического движения электронов в случае, когда на пути дрейфующего электрона находится один каскад ГЭУ. В данном случае процесс диффузии

отличается от случая однородного поля, потому что кроме диффузии происходит фокусировка электронов в отверстия ГЭУ, где количество этих электронов увеличивается. Нормированное на длину дрейфа среднеквадратичное отклонение функции Гаусса, аппроксимирующей координатное распределение электронов на аноде в случае, когда первичный электрон отделён от анода одним или несколькими каскадами ГЭУ, будем называть коэффициентом эффективной поперечной диффузии.

Установлено, что коэффициент эффективной поперечной диффузии для одного каскада ГЭУ находится в диапазоне $240 - 310 \text{ мкм}/\sqrt{\text{см}}$: максимальное значение достигается тогда, когда начальный электрон находится над металлом ГЭУ, а минимальное — когда электрон находится над отверстием ГЭУ. Сравнение результатов для одного каскада со случаем однородного поля показывает, что работа одного каскада ГЭУ может сужать облако электронов ионизации в поперечном направлении на 30%.

В разделе 3.3 проведено моделирование пролёта первичных релятивистских электронов через детектор с последующим расчётом микроскопического движения термализовавшихся электронов ионизации Детектор на основе трёхкаскадных ГЭУ в моделировании был заполнен газом $\text{Ar}(75\%)\text{-CO}_2(25\%)$, при атмосферном давлении и температуре 20°C . Напряжённость электрического поля в дрейфовом промежутке толщиной 3 мм была установлена равной 2 кВ/см. В остальных промежутках, толщина каждого из которых была равна 2 мм, напряжённость электрического поля составляла 3,5 кВ/см.

В результате проведённого моделирования был сделан вывод о том, что коэффициент эффективной поперечной диффузии в изучаемом детекторе составляет $300 \pm 20 \text{ мкм}/\sqrt{\text{см}}$. Таким образом установлено, что работа трёхкаскадных ГЭУ может приводить к сужению регистрируемого облака электронов ионизации на 15% по сравнению со случаем однородного поля. Полученное среднее значение коэффициента поперечной диффузии электронов применялось для последующего моделирования пространственного разрешения детекторов.

В разделе 3.4 представлены выводы к главе 3.

Четвёртая глава посвящена изучению пространственного разрешения детекторов на основе ГЭУ.

В разделе 4.1 вводятся базовые понятия координаты трека и хита, необходимые для построения метода измерения пространственного разрешения детекторов.

В разделе 4.2 описана процедура измерения координаты трека частицы методом центра тяжести в применении к зарядовому кластеру.

В разделе 4.3 дано определение пространственного разрешения детектора. Вначале вводится понятие координатной разности (Δx , *residual*, x_{resid}), представляющей собой отличие измеренной координаты трека x' от истинной координаты того же трека x :

$$\Delta x = x' - x. \quad (1)$$

В данной работе под пространственным (координатным) разрешением детектора ($\sigma_{detector}$) понимается стандартное отклонение функции Гаусса, аппроксимирующей распределение событий по координатной разности.

В разделе 4.4 описан метод измерения пространственного разрешения детектора в схеме с двумя трековыми детекторами, расположенными до и после изучаемого детектора. Вначале сформулирована главная проблема такого измерения, которая состоит в том, что истинная координата трека в эксперименте неизвестна. Поэтому данную неизвестную истинную координату следует заменить на расчётную координату трека, которая обеспечивается показаниями трековых детекторов.

Расчётная координата трека испытывает влияние многократного рассеяния регистрируемых частиц в изучаемом детекторе (σ_{xMS}) и влияние ограниченного пространственного разрешения трековых детекторов (σ_{xTrack}). Стандартное отклонение распределения событий по координатной разности, извлекаемое из эксперимента, будем называть σ_{xresid} . Для величины σ_{xresid} выполняется равенство:

$$\sigma_{xresid}^2 = \sigma_{detector}^2 + \sigma_{xMS}^2 + \sigma_{xTrack}^2. \quad (2)$$

В работе получены общие аналитические выражения для величин σ_{xMS} и σ_{xTrack} , а также приведён вывод формулы для расчёта собственного пространственного разрешения детектора для частного случая, когда детекторы обладают одинаковым пространственным разрешением и расположены на одинаковом расстоянии друг от друга:

$$\sigma_{detector} = \frac{\sqrt{\sigma_{xresid}^2 - \sigma_{xMS}^2}}{\sqrt{3/2}}. \quad (3)$$

В разделе 4.5 построена зависимость пространственного разрешения детектора от угла θ между направлением трека и нормалью к плоскости детектора. Данная зависимость оценивалась по следующей формуле:

$$\sigma_{detector}(\theta) = \sqrt{\sigma_{detector}^2(0) + \left(\frac{d \cdot \tan(\theta)}{\sqrt{12}}\right)^2}. \quad (4)$$

В формуле (4) фигурирует толщина дрейфового промежутка d , так как именно в этом промежутке ионизация усиливается наибольшим образом. Если угол наклона трека θ равен нулю, то такой трек называется ортогональным.

В разделе 4.6 представлен метод юстировки детекторов по трекам, основанный на анализе характеристик распределения событий по координатной разности в зависимости от соотношения расстояний между детекторами и от угла наклона треков θ .

В разделе 4.7 описано моделирование работы детектора на основе ГЭУ и представлено полученное при этом пространственное разрешение.

В подразделе 4.7.1 описано моделирование работы детектора в программе GEANT4. Вначале было проведено моделирование для отдельного детектора, когда истинная координата трека была известна точно. Рабочий объём детектора в моделировании был заполнен газом $\text{Ar}(75\%)\text{-CO}_2(25\%)$, который находился при атмосферном давлении и комнатной температуре.

В моделировании изучалось пространственное разрешение вдоль одной координаты, которая в реальном эксперименте измеряется полосками верхнего слоя считывающей структуры. Моделирование в программе GEANT4 включало ряд последовательных этапов. Вначале первичные электроны с энергией 1 ГэВ и вектором импульса, перпендикулярным плоскости детектора, а также случайным образом распределённой начальной поперечной координатой, транспортировались через модель детектора.

После записи всех энерговыделений в дрейфовом промежутке начинался второй этап, который включал введение флуктуаций коэффициента газового усиления, диффузию электронов в газе, распределение сигнала по полоскам считывающей структуры с учётом шумов электроники, и расчёт положения зарядового кластера методом центра тяжести.

В первой постановке моделирование выполнялось для разного шага полосок при фиксированном отношении сигнала к шуму (Signal-to-Noise Ratio (SNR)), которое было равно 150. Во второй постановке моделирование проводилось при фиксированном шаге полосок 500 мкм, при этом значения SNR варьировались. Соответствующие результаты моделирования пространственного разрешения отдельного детектора в программе GEANT4 представлены на рисунке 5.

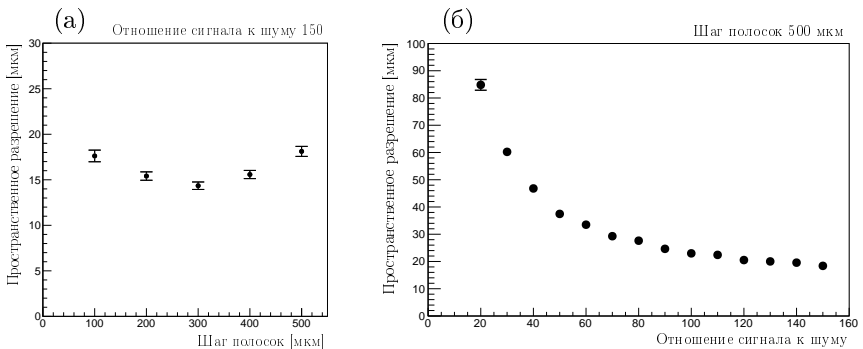


Рисунок 5 — Результаты моделирования отдельного детектора в программе GEANT4. Пространственное разрешение детектора: (а) в зависимости от шага полосок считывающей структуры при $\text{SNR} = 150$; (б) в зависимости от SNR при фиксированном шаге полосок 500 мкм

В подразделе 4.7.2 представлены результаты параметрического моделирования работы детектора на основе ГЭУ. Конкретные значения параметров модели подбирались так, чтобы воспроизвести наблюдаемые в эксперименте распределения. Параметрическое моделирование также обеспечивало дополнительную проверку результатов, полученных при моделировании в программе GEANT4.

Вначале был выполнен анализ экспериментальных данных, набранных в феврале 2020 года на Тестовом пучке электронов. Данный эксперимент ставился для изучения характеристик детектора TBF1, где в качестве трековых детекторов применялись детекторы DEUTERON3 и DEUTERON4. В частности, были построены распределения событий по количеству сработавших полосок, по восстановленной координате и по сигналу на прямых полосках. Экспериментальные данные позволили сформулировать модель, которая затем была применена для расчёта пространственного разрешения детекторов DEUTERON4 и TBF1.

В параметрическом моделировании предполагалось, что первичная частица летит перпендикулярно плоскости детектора, при этом на считывающей структуре регистрировался зарядовый кластер гауссовской формы, центр которого совпадал с истинной координатой кластера x_{true} . Параметры формы кластера разыгрывались из распределения Ландау, характеристики которого воспроизводили экспериментальные распределения.

Восстановленная (измеренная) координата кластера x_{cog} вычислялась методом центра тяжести, применение которого приводит к дифференциальной нелинейности. В параметрическом моделировании были обнаружены поправочные функции, которые корректировали восстановленную координату, как показано на рисунке 6. Применение поправки позволяет улучшить собственное пространственное разрешение детектора до уровня 10 мкм. Далее поправочные функции были применены к экспериментальным данным, что привело к ожидаемому улучшению пространственного разрешения.

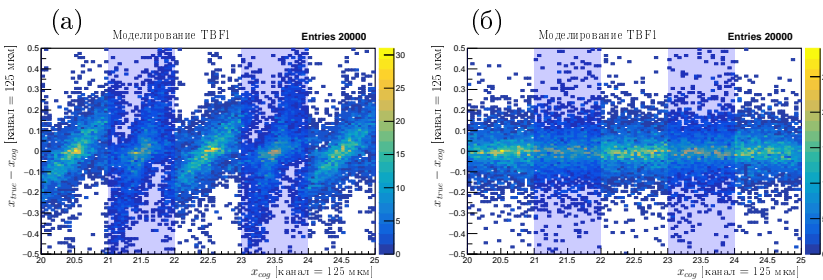


Рисунок 6 — Параметрическое моделирование для детектора TBF1. Корреляция между x_{cog} и x_{resid} : (а) до поправки; (б) после поправки дифференциальной нелинейности

В разделе 4.8 представлены экспериментальные результаты измерения пространственного разрешения детектора TBF1 на основе ГЭУ для Тестового пучка.

Эксперимент проводился на Тестовом пучке электронов с энергией 1 ГэВ, где в качестве трековых детекторов применялись детекторы DEUTERON3 и DEUTERON4.

Для анализа выбирались треки, проходящие через небольшие квадратные области изучаемого детектора со стороной 1,25 мм. Выбор таких небольших областей позволил подавить искажающее влияние относительных поворотов детекторов на измеренную координату треков.

Угол наклона треков в эксперименте находился в диапазоне от -10 мрад до $+10$ мрад. Этот диапазон был разделён на четыре промежутка, для каждого из которых было измерено собственное пространственное разрешение детектора. Систематические погрешности включали неточное знание следующих параметров: количество материала в детекторах, расстояние между детекторами, энергия регистрируемых электронов.

Экспериментальное значение собственного пространственного разрешения детектора на основе трёхкаскадных ГЭУ для Тестового пучка при регистрации ортогональных треков релятивистских электронов равно:

$$\sigma_{detector}^{exp} = 24,1 \pm 2,6(\text{стат.}) \pm 5,5(\text{сист.}) \text{ мкм.} \quad (5)$$

В разделе 4.9 проведено сравнение пространственного разрешения детектора TBF1, полученное в теории, моделировании и эксперименте, как показано на рисунке 7.

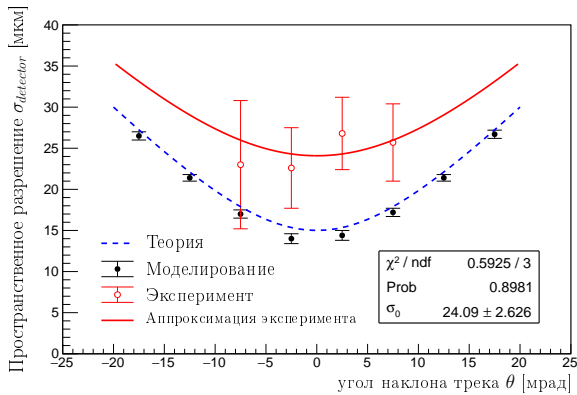


Рисунок 7 — Собственное пространственное разрешение детектора TBF1 на основе ГЭУ для Тестового пучка в теории, моделировании и эксперименте в зависимости от угла наклона регистрируемых треков

В разделе 4.10 выполнен теоретический анализ процедуры вычитания вкладов многократного рассеяния и ограниченного пространственного разрешения трековых детекторов из величины σ_{xresid} для определения собственного пространственного разрешения детектора $\sigma_{detector}$.

В разделе 4.11 представлены выводы к главе 4.

Пятая глава посвящена моделированию работы внутреннего трека детектора будущей Супер Чарм-Тау Фабрики.

В разделе 5.1 изучен вопрос о минимальном импульсе заряженных пи-мезонов, при котором эти пи-мезоны могут быть зарегистрированы и реконструированы внутренним трекером на основе различных технологий.

Внутренний трекер имеет форму полого цилиндра длиной 60 см с внутренним диаметром 3 см и внешним диаметром 40 см. Внутренний объём время-проекционной камеры разделён на две равные части плоским катодом, поэтому время-проекционная камера фактически состоит из двух независимых частей, длина каждой из которых равна 30 см.

Моделирование в программе DD4HEP выполнялось для следующих вариантов внутреннего трекера: цилиндрический четырёхслойный детектор, где каждый слой состоит из кремния толщиной 320 мкм и углерода толщиной 400 мкм; цилиндрический четырёхслойный детектор, где каждый слой представляет собой трёхкаскадный ГЭУ, заполненный газом Ar(75%)-CO₂(25%) при атмосферном давлении; время-проекционная камера, заполненная газом Ar(80%)-CO₂(20%). В случае время-проекционной камеры изучались варианты толстой внутренней стенки (1 мм G10, 100 мкм тефлона, 15 мкм меди) и тонкой внутренней стенки (50 мкм каптона, 100 мкм тефлона, 5 мкм меди).

В каждом случае моделирования вакуумная труба представляла собой цилиндр, состоящий из 3 мм бериллия и 0,5 мм парафина. Детектор находился в магнитном поле 1,5 Тл, направленном вдоль оси пучков. Вектор начального импульса пи-мезона был перпендикулярен оси пучков.

Результаты моделирования демонстрируют, что пи-мезоны с начальным импульсом до 50 МэВ/с не могут пройти через вакуумную трубу и поэтому они не могут быть зарегистрированы. Пи-мезоны с импульсом, превышающим 65 МэВ/с, оставляют энергоследы во всех четырёх слоях внутреннего трекера на основе кремния, и их траектории поэтому могут быть реконструированы. Детектор на основе четырёх слоёв цилиндрических трёхкаскадных ГЭУ даёт возможность восстановить трек по четырём хитам в четырёх слоях для пи-мезонов с импульсом выше 60 МэВ/с. Время-проекционная камера с тонкой внутренней стенкой обеспечивает возможность реконструкции траекторий пи-мезонов с импульсом выше 55 МэВ/с.

В разделе 5.2 выполнена оценка влияния объёмного заряда положительных ионов на траекторию движения электронов ионизации при их дрейфе до считывающей структуры внутри рабочего объёма время-проекционной камеры (Time Projection Chamber (TPC)).

Среди изученных вариантов наименьшие искажения траектории электронов ионизации, составляющие до 2 мм на 30 см дрейфа, достигаются с газом $\text{Ar}(45\%)-\text{iC}_4\text{H}_{10}(15\%)-\text{CF}_4(40\%)$ при внешнем поле 1 кВ/см, обратном ионном токе 1% и коэффициенте газового усиления 10^4 .

В разделе 5.3 представлены выводы к главе 5.

В **заключении** представлены основные результаты работы:

1. Выполнены измерения характеристик детекторов на основе трёхкаскадных ГЭУ, применяемых на установке ДЕЙТРОН и на установке Тестовый пучок электронов ускорительного комплекса ВЭПП-4. Детекторы продемонстрировали стабильную работу в пропорциональном режиме при коэффициенте газового усиления до 5×10^4 . Эффективность детекторов превышает 98% для коэффициента усиления, большего 2×10^4 .
2. Проведено микроскопическое моделирование процесса диффузии и усиления электронов в газе $\text{Ar}(70\%)-\text{CO}_2(30\%)$, находящемся при атмосферном давлении и температуре 20°C . Исследованы три случая: однородное поле, один каскад ГЭУ, три каскада ГЭУ. В однородном электрическом поле напряжённостью 5 кВ/см коэффициент поперечной диффузии находится на уровне $320 - 330 \text{ мкм}/\sqrt{\text{см}}$. При моделировании одного каскада ГЭУ напряжённость электрического поля в дрейфовом промежутке была равна 2,5 кВ/см, а в индукционном промежутке: 3,8 кВ/см. Напряжённость электрического поля в отверстиях ГЭУ составляла $\sim 50 \text{ кВ}/\text{см}$. В моделировании одного каскада ГЭУ установлено, что коэффициент эффективной поперечной диффузии находится в диапазоне $240 - 310 \text{ мкм}/\sqrt{\text{см}}$: максимальное значение достигается тогда, когда начальный электрон находится над металлом ГЭУ, а минимальное — когда электрон находится над отверстием ГЭУ. Коэффициент эффективной поперечной диффузии для трёхкаскадных ГЭУ составляет $300 \pm 20 \text{ мкм}/\sqrt{\text{см}}$. Данное значение получено для напряжённости электрического поля 2,0 кВ/см в дрейфовом промежутке и 3,5 кВ/см в остальных промежутках.
3. Построено моделирование процесса регистрации электронов детектором на основе трёхкаскадных ГЭУ и выполнена оценка пространственного разрешения детектора. Пространственное разрешение детектора в моделировании составляет 15 – 20 мкм для шага полосок от 100 мкм до 500 мкм. Измеренное в эксперименте пространственное разрешение детекторов на основе ГЭУ находится на уровне 15 – 30 мкм.
4. Построено моделирование прохождения пи-мезонов через внутренний трекер детектора Супер Чарм-Тау Фабрики для различных вариантов трекера. Варианты включали внутренний трекер на основе четырёх кремниевых слоёв, на основе четырёх слоёв цилиндри-

ческих ГЭУ, а также на основе время-проекционной камеры. Среди изученных вариантов наименьший пороговый импульс пи-мезона, допускающий реконструкцию трека, был получен для внутреннего трека на основе ТРС с тонкой стенкой и составил 55 МэВ/с. Такая величина порогового импульса получена для варианта вакуумной трубы, состоящей из 3 мм бериллия и 0,5 мм парафина. Внутренняя стенка время-проекционной камеры при этом состоит из 50 мкм каптона, 100 мкм тефлона и 5 мкм меди.

5. Проведено моделирование влияния объёмного заряда положительных ионов внутри время-проекционной камеры на траекторию электронов ионизации в рабочем газе. Исследовались различные газовые смеси, при этом было обнаружено, что газ Ar(45%)-iC₄H₁₀(15%)-CF₄(40%) обеспечивает минимальные искажения траектории, составляющие в максимуме приблизительно 2 мм на 30 см дрейфа во внешнем электрическом поле напряжённостью 1000 В/см, обратном ионном токе 1% и коэффициенте газового усиления 10⁴. Данная величина искажений сопоставима с эффектом поперечной диффузии. Такие искажения могут быть скорректированы при обработке экспериментальных данных.

Список публикаций по теме диссертации

- A1. Kudryavtsev V. N. Spatial resolution of the detectors based on Gas Electron Multipliers / V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman. – Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15, nr. 05. – P. C05018. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/05/C05018>. – Дата публикации: 11.05.2020.
- A2. Kudryavtsev, V. N. Spatial resolution of triple-GEM detectors / V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2019. – Vol. 936. – P. 482-484. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.10.140>. – Дата публикации: 21.08.2019.
- A3. Kudryavtsev, V. N. Limits of a spatial resolution of the cascaded GEM based detectors / V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman. – Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2017. – Vol. 12, nr. 06. – P. C06015. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/06/C06015>. – Дата публикации: 19.06.2017.
- A4. Kudryavtsev, V. N. Study of spatial resolution of coordinate detectors based on Gas Electron Multipliers / V. N. Kudryavtsev, T. V. Maltsev, L. I. Shekhtman. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2017. – Vol. 845. – P. 289-292. – URL:

<https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.66>. – Дата публикации: 15.06.2016

- A5. Time Projection Chamber as Inner Tracker for Super Charm-Tau factory at BINP / V. K. Vadakeppattu, A. V. Sokolov, L. I. Shekhtman, T. V. Maltsev. – Текст: электронный // Journal of Instrumentation. – 2020. – Vol. 15, nr. 07 – P. C07021. – URL: <https://doi.org/10.1088/1748-0221/15/07/C07021>. – Дата публикации: 14.07.2020.
- A6. Development of compact TPC for future Super Charm-Tau Factory detector / A. Sokolov, T. Maltsev, L. Shekhtman, V. K. Vadakeppattu. – Текст: электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A. – 2022. – Vol. 1040. – P. 167225. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2022.167225>. – Дата публикации: 20.07.2022.

Список литературы

1. Sauli, F. Micro-pattern gaseous detectors / F. Sauli, A. Sharma. – Текст : электронный // Annual Review of Nuclear Particle Science. – 1999. – Vol. 49. – P. 341–388. – DOI 10.1146/annurev.nucl.49.1.341. – Дата публикации: 01.12.1999.
2. Sauli, F. GEM: A new concept for electron amplification in gas detectors / F. Sauli. – Текст : электронный // Nucl. Instrum. and Methods A. – 1997. – Vol. 386. – P. 531–534. – DOI 10.1016/S0168-9002(96)01172-2. – Дата публикации: 01.02.1997.
3. Triple-GEM tracking detector for COMPASS / B. Ketzer, M. C. Altunbas, K. Dehmelt, J. Ehlers [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Trans. Nucl. Science. – 2002. – Vol. 49. – P. 2403–2410. – DOI 10.1109/TNS.2002.803891. – Дата публикации: 01.11.2002.
4. Development of the gas electron multiplier (GEM) / J. Benloch, A. Bressan, C. Buettner, M. Carpeans [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Trans. Nucl. Science. – 1998. – Vol. 42. – P. 234–243. – DOI 10.1109/23.682386. – Дата публикации: 01.07.1998.
5. Tikhonov, V. GEM simulation methods development / V. Tikhonov, R. Veenhof. – Текст : электронный // Nucl. Instrum. and Methods A. – 2002. – Vol. 478. – P. 452–459. – DOI 10.1016/S0168-9002(01)01801-0. – Дата публикации: 01.02.2002.
6. Sauli, F. The gas electron multiplier (GEM): Operating principles and applications / F. Sauli. – Текст : электронный // Nucl. Instrum. and Methods A. – 2016. – Vol. 805. – P. 2–24. – DOI 10.1016/j.nima.2015.07.060. – Дата публикации: 01.01.2016.

Мальцев Тимофей Владимирович

**КООРДИНАТНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ВЫСОКОГО
РАЗРЕШЕНИЯ НА ОСНОВЕ ГАЗОВЫХ
ЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 29.04.2026.

Подписано в печать 30.04.2026.

Формат 60×90 1/16 Объём 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 10

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11