

На правах рукописи

ШЕХТМАН Лев Исаевич

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ
КООРДИНАТНЫЕ ГАЗОВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

01.04.01 – приборы и методы
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

НОВОСИБИРСК – 2012

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

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

- ПЕШЕХОНОВ
Владимир Дмитриевич – доктор физико-математических наук,
профессор, Объединенный институт ядерных
исследований, г. Дубна, главный научный
сотрудник.
- Терехов
Александр Сергеевич – доктор физико-математических наук,
профессор, Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Институт
физики им. А.В. Ржанова Сибирского
отделения РАН, Новосибирск, заведующий
лабораторией.
- Хазин
Борис Исаакович – доктор физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера Сибирского отделения РАН,
Новосибирск, заведующий лабораторией.
- ВЕДУЩАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ – ГНЦ РФ «Институт теоретической
экспериментальной физики», г. Москва.

Защита диссертации состоится «_____» _____ 2012 г.
в «_____» часов на заседании диссертационного совета Д 003.016.03
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института
ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН.

Адрес: 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 СО РАН.

Автореферат разослан «_____» _____ 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физ.-мат. наук

А.А. Иванов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Координатные детекторы, измеряющие траектории заряженных частиц, играют существенную роль практически в каждом эксперименте в физике элементарных частиц. Значительный прогресс в развитии технологий координатных детекторов в последние десятилетия был обусловлен возрастающими требованиями со стороны физики элементарных частиц к пространственному разрешению, способности работать в условиях значительных фоновых потоков (быстродействию), стабильной работе при высоких интегральных дозах облучения (радиационная стойкость) и невысокой стоимости, позволяющей создавать системы с площадью чувствительной поверхности в сотни квадратных метров.

В конце 80-х годов прошлого века основным типом координатных детекторов, применявшихся в экспериментах в физике элементарных частиц, были многопроволочные пропорциональные камеры (МПК) и их модификации. Начавшееся во второй половине 80-х годов проектирование Большого Адронного Коллайдера (БАК) в Европейском центре ядерных исследований (ЦЕРН) сразу же привело к пониманию того, что технология проволочных камер должна быть существенно улучшена, чтобы будущие детекторы смогли работать в условиях высоких потоков частиц и высоких доз облучения вокруг места встречи в будущем коллайдере.

Другой областью, в которой координатные детекторы играют существенную роль, является регистрация рентгеновского излучения. Быстрое развитие методов регистрации рентгеновского излучения происходит, прежде всего, в медицинской рентгенографии, а также в кристаллографии, материаловедении и других областях науки и технологии, где используется синхротронное излучение (СИ).

Синхротронное излучение является эффективным инструментом изучения строения вещества в биологии, химии и физике. В 70-х гг. прошлого века, когда появились первые источники СИ, основным координатным детектором для регистрации изображений была фотопленка. После изобретения МПК в 1968 г., детекторы на основе проволочных камер стали широко использоваться для дифракционных исследований на пучках СИ. Однако по мере строительства новых источников СИ с большей яркостью, потоки излучения в экспериментах росли, и быстродействие детекторов на основе МПК стало недостаточным. Газовые микро-структурные технологии дают возможность реализовать детекторы с пространственным разрешением до ~ 100 мкм и высоким быстродействием. Такие детекторы могут применяться для экспериментов по порошковой дифракции и для решения ряда задач визуализации на пучках СИ.

Кроме развития координатных детекторов заряженных частиц для физики высоких энергий и детекторов для регистрации рентгеновского излучения прогресс в разработке микроструктурных газовых технологий стимулировал развитие газовых фотодетекторов, – устройств, регистрирующих отдельные фотоны видимого и ультрафиолетового диапазонов. Интерес к таким устройствам не ослабевает в течение последних десятилетий. Изобретение Газовых электронных умножителей (ГЭУ) и обнаружение свойства ГЭУ работать в каскаде стимулировало разработку практичных и сравнительно дешевых газовых фотодетекторов на основе каскадов ГЭУ.

Цель диссертационной работы

Настоящая работа посвящена разработке новых координатных детекторов, основанных на газовой микроструктурной технологии, для экспериментов в физике элементарных частиц и регистрации рентгеновского излучения в экспериментах на пучках СИ.

В работе предложены и исследованы микрополосковые газовые камеры (МПК) на подложках с электронной проводимостью. Показано, что такие детекторы, обладая пространственным разрешением существенно лучше 100 мкм для релятивистских заряженных частиц, способны эффективно работать при потоках до $10^6 \text{ с}^{-1}\text{мм}^{-2}$, что, по крайней мере, на 2 порядка превышает быстродействие МПК.

Значительная часть работы посвящена исследованию свойств каскадов ГЭУ. В частности, изучена зависимость газового усиления и условий возникновения пробоя при облучении адронами от количества ГЭУ в каскаде, от распределения потенциалов между электродами ГЭУ в каскаде, а также от газовой смеси.

С использованием опыта разработки и исследования газовых микроструктурных детекторов в настоящей работе был создан ряд детекторов рентгеновского излучения для экспериментов на пучке СИ. В настоящей работе впервые был разработан детектор УФ-фотонов большой площади на основе тройного каскада ГЭУ с отражающим CsI фотокатодом, работающий в чистом CF_4 . Этот фотодетектор использован в черенковском детекторе НВД в эксперименте RHENIX. Опыт, приобретенный при исследовании каскадов ГЭУ, был применен при разработке и создании детекторов на основе тройных ГЭУ для системы регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) эксперимента КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М.

Личный вклад автора

Личное участие автора в получении результатов, составляющих основу диссертации, является определяющим. Автор лично проводил измерения с МПК и с детекторами на основе каскадов ГЭУ, результаты которых составили основу первой части диссертации. Разработка и создание

детекторов для экспериментов с СИ – микрополосковой ионизационной камеры (МИК), детектора для экспериментов по дифракции на большие углы, а также детектора для изучения взрывных процессов, DIMEX, проводилась лично автором и под его непосредственным руководством. Разработка фотодетектора большого размера для HBD эксперимента PHENIX проводилась с определяющим участием автора, а результаты, вошедшие в диссертацию, были получены автором лично. Разработка и создание системы детекторов на основе каскада ГЭУ для системы регистрации рассеянных электронов проводилась автором лично и под его непосредственным руководством.

Научная новизна

Большинство результатов, представленных в диссертации, получены впервые. Впервые в мире получено быстроедействие, превышающее 10^6 частиц/мм²с, в МПГК на подложке из стекла с электронной проводимостью, а также показано, что МПГК могут стабильно работать в газовой смеси высокого давления. Кроме того, впервые найдены условия, при которых МПГК может устойчиво работать до интегральных потоков заряда ~ 100 мКл/см. Также впервые изучены зависимости коэффициента газового усиления от количества ГЭУ в каскаде в различных газовых смесях. Получены результаты по зависимости пробойного предела в присутствии адронов от количества ГЭУ в каскаде и от газовой смеси. Впервые в мире созданы прецизионные газовые детекторы для регистрации СИ: МИК, обладающая рекордным пространственным разрешением и эффективностью в широком диапазоне энергий, детектор для экспериментов по широкоугольной дифракции ОД-4, обладающий существенно криволинейной геометрией и высоким быстроедействием, и детектор для изучения взрывных процессов, DIMEX, способный измерять эволюцию распределения плотности в объекте, движущемся со скоростью до 10 км/с. Впервые в мире разработан фотодетектор большого размера на основе каскада ГЭУ, работающий в чистом CF₄, который был успешно применен в эксперименте PHENIX. Также впервые в мире разработана система из детекторов на основе каскадов ГЭУ для системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР, позволяющая регистрировать с высокой эффективностью многотрековые события, благодаря специальной считывающей структуре.

Научная и практическая ценность

Полученный при разработке микроструктурных детекторов опыт может быть применен при реализации других крупных научных проектов. Детектор для широкоугольной дифракции ОД-4 с угловой апертурой 67 градусов после изготовления будет установлен на одном из каналов СИ Сибирского Центра СИ. Детектор для изучения взрывных процессов DIMEX, успешно работающий на канале СИ накопителя ВЭПП-3, будет применен на новом

канале СИ на накопителе ВЭПП-4М, а также может быть использован для исследований в других центрах СИ в России и за рубежом. Фотодетектор большого размера работает в НВД в составе эксперимента PHENIX, который в настоящее время набирает статистику для изучения новых физических эффектов в столкновениях релятивистских тяжелых ионов. Детекторы на основе ГЭУ в составе СРРЭ эксперимента КЕДР дадут возможность повысить энергетическое разрешение системы и улучшить подавление фона, что открывает новые перспективы в получении новых знаний о физике фотон-фотонных столкновений.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработка МПГК на подложках с электронной проводимостью с быстродействием свыше 10^6 частиц·с⁻¹·мм⁻², способных устойчиво работать при высоких давлениях и обладающих высокой радиационной стойкостью в отсутствии потоков адронов.

2. Исследование и оптимизация свойств каскадов ГЭУ. В частности, изучение зависимости газового усиления и условий возникновения пробоя при облучении адронами от количества ГЭУ в каскаде, от распределения потенциалов между электродами ГЭУ в каскаде, а также от газовой смеси.

3. Разработка и создание уникальных прецизионных быстродействующих детекторов для экспериментов с СИ, обладающих пространственным разрешением ~100 мкм и быстродействием в диапазоне от $\sim 10^6$ фотонов/мм²·с до $\sim 10^{12}$ фотонов/мм²·с: микрополосковой ионизационной камеры, детектора для экспериментов по широкоугольной дифракции ОД-4 и детектора для изучения взрывных процессов DIMEX.

4. Разработка уникального детектора УФ-фотонов большой площади на основе тройного каскада ГЭУ с отражающим CsI фотокатодом, работающего в чистом CF₄, для черенковского детектора НВД в эксперименте PHENIX.

5. Разработка и создание детекторов на основе каскада из трех ГЭУ для системы регистрации рассеянных электронов эксперимента КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М, обладающих пространственным разрешением ~70 мкм и позволяющих эффективно регистрировать многотрековые события.

Апробация работы

Основные результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на следующих конференциях и рабочих совещаниях:

Европейское рабочее совещание по рентгеновским детекторам для источников СИ (Ассуа, Франция, 1991 г.), Международное рабочее совещание по МПГК (Лениаро, Италия, 1994 г., Лион, Франция, 1997 г.), Instrumentation for Colliding Beam Physics (Новосибирск, 1996, 2002, 2008), Международная конференция по микроструктурным газовым детекторам (Орсэ, Франция, 1999 г., Кобэ, Япония, 2010 г.), Национальная конференция

по использованию СИ (Новосибирск, 2002, 2004, 2006, 2008, 2010), International Conference on Position Sensitive Detectors (Brunel, 1993, Manchester, 1996, Leicester, 2002, UK), Vienna Conference on Instrumentation (Вена, Австрия, 1995), Frontier Detectors for Frontier Physics (о.Эльба, Италия, 1994), Technology and Instrumentation for Particle Physics (Цукуба, Япония, 2009), 8-я Национальная конференция по СИ РСНЭ-2011 (Москва, 2011 г.).

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, объединенных в три части, и заключения. Материал работы изложен на 207 страницах, включает 122 рисунка и список литературы, содержащий 176 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая часть диссертации объединяет две первых главы и посвящена исследованию и оптимизации характеристик микроструктурных газовых детекторов.

В первой главе представлены микрополосковые газовые камеры (МППК), описаны исследования их основных параметров, таких как коэффициент газового усиления, быстродействие и долговременная стабильность. Микрополосковая газовая камера представляет собой тонкие параллельные металлические полоски, нанесенные на изолирующую подложку и присоединенные через одну к положительному и отрицательному полюсам источника высокого напряжения. Схематичное изображение МППК в разрезе показано на рис. 1, на рисунке показаны также силовые линии и эквипотенциали электрического поля, рассчитанные для потенциала задней плоскости (back plane) равного потенциалу анодов. Точная, но достаточно простая технология фотолитографии, может обеспечить изготовление структуры с расстоянием между полосками до 100 мкм, что на порядок меньше характерных расстояний в проволочных камерах. Высокий коэффициент газового усиления был продемонстрирован в МППК для различных газовых смесей, геометрии электродов и типов подложки.

Кроме того, в настоящей работе было показано, что МППК устойчиво работает при высоком давлении газовой смеси, что делает ее подходящим кандидатом для применения в качестве детектора рентгеновских фотонов, работающего в счетном режиме с высоким быстродействием и пространственным разрешением, что необходимо, например, для экспериментов на пучке синхротронного излучения (СИ) или в медицинской рентгенографии.

Самые первые наблюдения за стабильностью газового усиления в МПГК показали, что детекторы, изготовленные на подложках с относительно высоким удельным сопротивлением, таких как различные виды стекол с ионной проводимостью, а также различные типы пластиковых пленок, демонстрируют изменения коэффициента газового усиления при облучении их относительно умеренными или высокими потоками излучения. Этот эффект можно практически полностью подавить, если применить в качестве подложки МПГК материал с электронной проводимостью. При этом быстродействие такого детектора зависит от удельного сопротивления подложки и может достигать $10^7 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

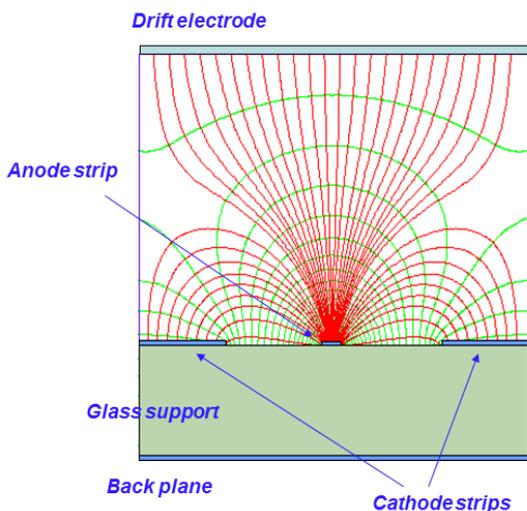


Рис. 1. Схематичное изображение МПГК с эквипотенциалами и силовыми линиями электрического поля.

Другим аспектом, который был подробно изучен в настоящей работе, является долговременная стабильность детектора при облучении или, так называемое, старение. Было показано, что для подавления старения МПГК нужно использовать подложки из материала с электронной проводимостью и тщательно отбирать материалы газовой системы и корпуса детектора, чтобы минимизировать концентрацию неконтролируемых загрязнений, поступающих в газовую смесь. При этом можно добиться стабильной работы МПГК до интегральных зарядов $\sim 100 \text{ мКл/см}$ полоски, что соответствует примерно 10 годам работы в условиях центрального детектора БАК на расстоянии около 1 м от места встречи.

В 1996 г. во время испытаний прототипов МПГК для HERA-B на пучке пионов с импульсом 150 МэВ/с в Институте им. Поля Шерера (Paul Scherrer Institute (PSI), Швейцария) группа IT HERA-B обнаружила, что в детекторах

непрерывно регистрируются пробои, уже в течение первого дня облучения потоком частиц $\sim 3000 \text{ мм}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ возникли множественные разрывы анодных и повреждения катодных полосок, а в некоторых случаях и выход из строя предусилителей, подключенных к полоскам. После первого свидетельства того, что МПГК подвержены быстрому разрушению при облучении адронами, этот эффект был подробно изучен и стало понятно, что преодолеть эту проблему можно, разделив газовое усиление между несколькими каскадами. Такой детектор возможно построить только используя газовый электронный умножитель. Несмотря на проблему пробоев в условиях облучения адронами, МПГК остается детектором, обладающим высоким пространственным разрешением, высоким быстродействием и устойчиво работающим при регистрации фотонов и электронов.

Во второй главе диссертации описаны работы по изучению свойств каскадов ГЭУ и оптимизации характеристик таких детекторов при работе в потоке адронов.

Газовый электронный умножитель был изобретен Ф. Саули в 1996 г. в ЦЕРНе. ГЭУ представляет собой тонкую изолирующую полимерную пленку, покрытую с обеих сторон слоями меди, в которой сделана регулярная структура из отверстий с очень высокой плотностью $\sim 100 \text{ мм}^{-2}$ (рис. 2). Толщина изолирующей полимерной пленки, как правило, составляет 50 мкм, толщина меднения равна $5 \div 15$ мкм. В качестве полимерной пленки в стандартном ГЭУ используется каптон.

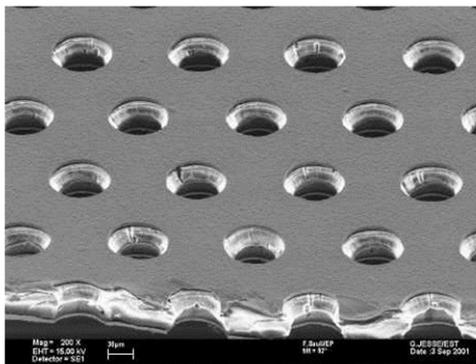


Рис. 2. Изображение ГЭУ на электронном микроскопе. Расстояние между центрами отверстий 140 мкм, диаметр отверстий в меди ~ 80 мкм.

Если приложить разность потенциалов между верхним и нижним слоями меди в ГЭУ, то внутри отверстий образуются области высокого электрического поля, где может происходить газовое усиление. При правильном выборе полей над ГЭУ и под ГЭУ можно обеспечить полный сбор электронов из верхнего газового промежутка и передачу значительной части усиленного заряда в нижний газовый промежуток. Таким образом, ГЭУ

представляет собой распределенный усилитель электронов в газе, который «транспортирует» первоначальное распределение ионизации из газового промежутка над собой в газовый промежуток под собой с минимальными изменениями, обусловленными диффузией электронов.

Уникальным свойством ГЭУ является его способность работать в каскаде. Добавление дополнительного ГЭУ в каскад приводит к повышению эффективного коэффициента усиления детектора более, чем на порядок для фиксированного напряжения на одиночном ГЭУ. Каскад из трех ГЭУ в смеси Ar+30%CO₂ позволяет достичь усиления $\sim 10^5$. Для инициации пробоев в детекторе в настоящей работе применялись альфа-частицы от ²⁴¹Am. Зависимость вероятности пробоев от газового усиления для различного количества ГЭУ в каскаде показана на рис. 3.

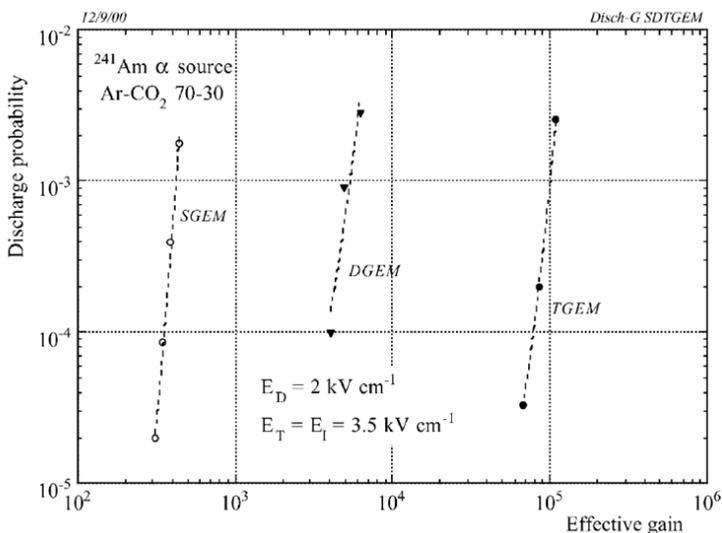


Рис.3. Вероятность пробоя в зависимости от эффективного коэффициента усиления в одиночном ГЭУ и в каскаде из двух и трех ГЭУ.

Видно, что добавление каждого следующего ГЭУ приводит к увеличению максимального коэффициента усиления примерно в 10 раз. Увеличение пробойного предела при разделении усиления между несколькими каскадами свидетельствует о том, что значение предела Рейтера, при котором происходит развитие стримера, инициирующего последующий пробой, зависит от величины напряженности электрического поля.

В работе также показано, что при изменении соотношения напряжений на различных ГЭУ в каскаде, можно повысить пробойный предел примерно в два раза. Кроме того в диссертации исследованы условия возникновения

пробоев, инициированных адронами в каскадах ГЭУ, работающих в смесях аргона и неона с изобутаном. Показано, что добавка 10% изобутана в неон позволяет достичь усиления в 10^5 даже в двойном каскаде ГЭУ.

Вторая часть диссертации объединяет три главы и посвящена описанию установок на основе микроструктурной газовой технологии, разработанных и созданных автором для экспериментов на пучках СИ.

В третьей главе описана микрополосковая ионизационная камера (МИК) для визуализации на пучке СИ. МИК была разработана для рентгенографии на пучке СИ в широком диапазоне энергий от 15 кэВ до 70 кэВ с высоким пространственным разрешением (рис. 4). Цилиндрический корпус камеры изготовлен из дюралюминия с толщиной 1 мм в области входного окна (1). Рентгеновские фотоны проходят через входное окно, затем через вставку из оргстекла толщиной 3 мм (2), которая замещает рабочий газ (ксенон) и обеспечивает изоляцию между высоковольтным анодом (3) и считывающими полосками (4). Внутренняя часть плексигласовой вставки расположена в чувствительном объеме, толщиной 20 мм в направлении пучка. Камера наполнена чистым ксеноном под давлением 20 атм. Полоски катодной структуры расположены с шагом 100 мкм параллельно друг другу, поскольку этот детектор изготовлен для канала в Canadian Light Source (CLS), где источник расположен на расстоянии 26 м от детектора. Каждая полоска присоединена ко входу чипа интеграторов (6) с эквивалентным шумом ~ 1000 электронов (около 1 фотона 60 кэВ). Камера содержит 2560 каналов с полной апертурой 256 мм.

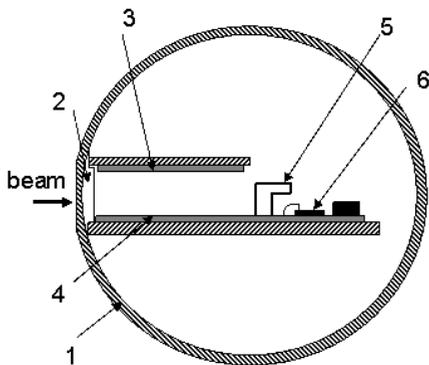


Рис. 4. Схема устройства МИК. 1 – дюралюминиевый корпус, 2 – вставка из оргстекла, 3 – высоковольтный анод, 4 – микрополосковая структура, 5 – защита электроники, 6 – чипы интеграторов.

Высокое давление ксенона и малый шаг считывающей структуры позволяют реализовать предельное пространственное разрешение, которое составляет 100-130 мкм (ШПВ аппаратной функции) в диапазоне энергий

20 – 60 кэВ. Кроме того геометрия детектора оптимизирована таким образом, что эффективность (DQE) МИК составляет не менее 50% в этом диапазоне энергий.

В четвертой главе описан детектор для экспериментов по широкоугольной дифракции ОД-4. Детектор для экспериментов по дифракции на большие углы должен иметь существенно искривленную геометрию, со структурой усиливающих и считывающих электродов, окружающей рассеивающий объект. ОД-4 представляет собой каскад ГЭУ со считывающей полосковой структурой, изготовленные в виде сектора дуги.

Устройство детектора ОД-4 схематично показано на рис. 5. Рентгеновские фотоны, рассеянные объектом, попадают в газовый объем через входное окно из бериллиевой фольги толщиной 0.1 мм и поглощаются в дрейфовом зазоре высотой 5.5 мм между катодом и верхним ГЭУ. Каскад из трех ГЭУ с зазорами 1.5 мм закреплен над полосковой структурой на расстоянии 2.5 мм. Катодная пластина, ГЭУ и считывающая полосковая структура имеют форму сектора дуги с центром в точке расположения рассеивающего объекта. Полоски считывающей структуры указывают на ту же точку. Полосковая структура содержит 2048 полосок с шагом 0.2 мм на внутренней стороне. Длина полосок – 30 мм.

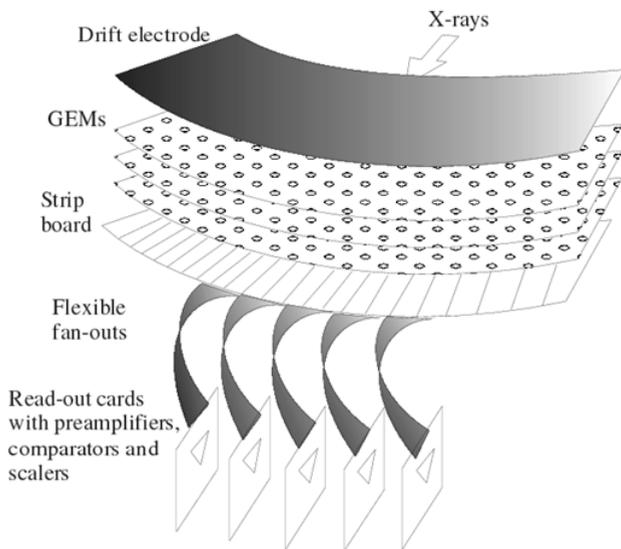


Рис. 5. Схема устройства детектора ОД4.

Детектор предназначен для регистрации фотонов низких энергий в диапазоне 5 – 15 кэВ и работает со смесью $Ag-25\%CO_2$ при атмосферном давлении. Регистрация фотонов в ОД-4 происходит методом прямого счета,

при этом координата зарегистрированного кванта соответствует номеру сработавшего канала.

Основные характеристики ОД-4 были измерены на пучке СИ после монохроматора с энергией 8.3 кэВ. Пространственное разрешение составило 470 мкм (ШПВ) при эффективности регистрации электроники считывания 90% и коэффициенте газового усиления 3000. Максимальный коэффициент усиления, достигнутый в этом детекторе, составил 60000. Быстродействие ОД-4 при коэффициенте газового усиления близком к 3000 составляет не менее 150 кГц/кан.

В пятой главе описан детектор для изучения взрывных процессов на пучке СИ, DIMEX (Detector for IMaging of EXplosions). DIMEX регистрирует синхротронное излучение от отдельных сгустков и при этом не смешивает сигналы от последовательных сгустков. Детектор способен зарегистрировать 32 изображения (кадра), каждое из которых представляет собой массив из $256 \div 512$ координатных каналов (различные версии детектора имеют различное число каналов). Детектор DIMEX представляет собой ионизационную камеру высокого давления со считывающей структурой из полосок с шагом 0.1 мм. Сколламированный по вертикали пучок СИ попадает в чувствительный объем детектора через входное окно из углепластика или бериллия толщиной 1 мм (в различных версиях детектора применялись различные материалы входного окна). В зависимости от типа эксперимента пучок имеет размер по вертикали от 0.1 мм до 1 мм и по горизонтали до 14 мм. Пучок СИ попадает в газовый объем между двумя параллельными электродами (рис. 6): высоковольтным дрейфовым электродом, на который подается отрицательный потенциал, и полосковой считывающей плоскостью, полоски которой направлены параллельно направлению пучка.

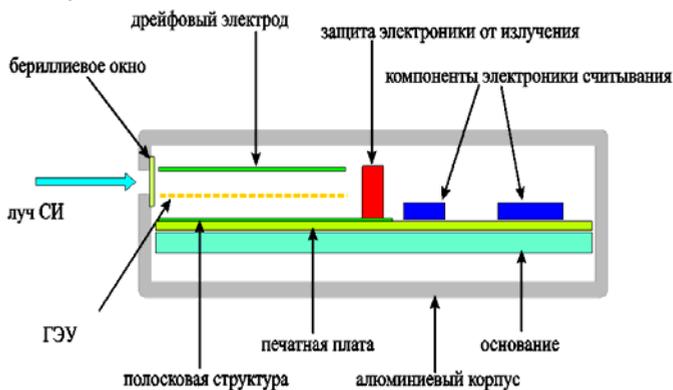


Рис. 6. Схема устройства детектора DIMEX.

Детектор наполнен смесью Хе-СО₂ (3-1) при абсолютном давлении 7 атм., глубина чувствительного объема в направлении пучка составляет 30 мм. Фотоны синхротронного излучения поглощаются в рабочем газе, образуя первичную ионизацию. Электроны первичной ионизации дрейфуют в сторону считывающей полосковой структуры, а положительные ионы, – в сторону дрейфового электрода. На пути дрейфа электронов на расстоянии 1.5 мм от полосковой структуры расположен газовый электронный умножитель, который экранирует считывающую структуру от поля положительных ионов.

В детекторе DIMEX выбран режим работы ГЭУ, при котором не происходит газового усиления, а, напротив, количество электронов при дрейфе сквозь ГЭУ уменьшается. Это сделано для того, чтобы увеличить максимальный поток фотонов, который может быть зарегистрирован этим детектором. После проникновения сквозь ГЭУ часть электронов продолжает дрейф в сторону полосковой структуры. При этом на полоски наводится заряд, который поступает на входы малошумящих интеграторов, подключенных к каждой полоске. Поле положительных ионов полностью экранируется обкладками ГЭУ и не влияет на заряд, наводимый на полоски считывающей структуры.

Характеристики детектора DIMEX были измерены на пучке СИ в накопителе ВЭПП-3 из вигглера с полем 2 Т при энергии электронного пучка 2 ГэВ. Средняя энергия в пучке СИ при этом составляет около 20 кэВ (с учетом всего материала на пути пучка до детектора). Пространственное разрешение детектора составило ~210 мкм (ШПВ), коэффициент смешивания сигнала от соседних сгустков составляет 2.5×10^{-4} (период следования сгустков в накопителе ВЭПП-3 – 250 нс). Максимальное отношение измеряемого сигнала к шуму достигает 100. При этом поток фотонов превышает 10^{12} фотонов/мм²с.

Третья часть диссертации объединяет в себе две главы и посвящена описанию разработок для экспериментов в физике элементарных частиц.

В шестой главе описываются исследования, проведенные в процессе разработки детектора для подавления адронов (Hadron Blind Detector, HBD), который был создан для модернизации детектора PHENIX на Релятивистском коллайдере тяжелых ионов (RHIC) в Брукхэйвенской национальной лаборатории (BNL) в США. Основной задачей HBD является выделение и подавление конверсий и e^+e^- пар от Далиц-распадов π^0 , используя информацию о малом угле разлета электрона и позитрона. Размер HBD ограничен доступным объемом, начинающимся от вакуумной камеры ($r \sim 5$ см) и заканчивающимся внутренней обмоткой ($r \sim 55$ см). HBD представляет собой безоконный черенковский детектор, работающий с чистым CF₄ в конфигурации, окружающей место встречи, с CsI фотокатодом и трехкаскадным ГЭУ с пэдовым считыванием. Схема детектора показана на рис. 7.

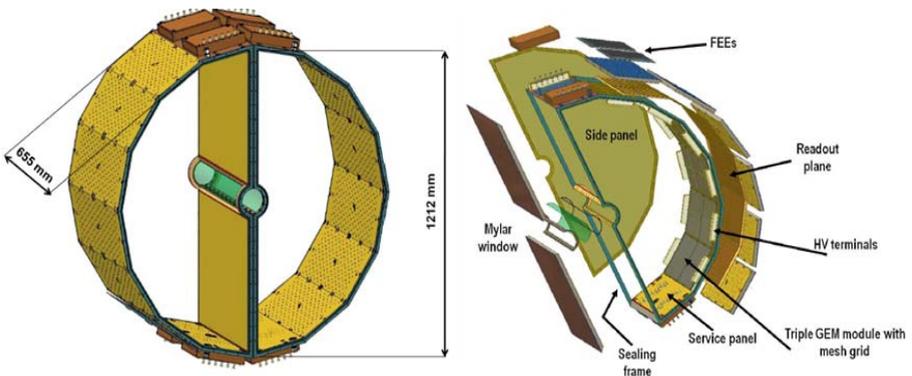


Рис. 7. Схематичное изображение конструкции НВД. Левая сторона: два плеча в сборе; правая сторона: трехмерное изображение одного плеча с указанием основных элементов конструкции.

В диссертации представлены результаты работ по изучению возможности реализации описанной выше концепции НВД. Эти работы посвящены получению устойчивой работы каскадного ГЭУ больших размеров в чистом CF_4 с отражающим CsI фотокатодом и без него, изучению возможности работы в чистом CF_4 при наличии фонового облучения сильно ионизирующими частицами, а также изучению старения детектора с отражающим CsI фотокатодом в чистом CF_4 .

Коэффициент усиления в каскаде из трех ГЭУ в чистом CF_4 может достигать величины 10^5 , несмотря на очень высокое рабочее напряжение. Другое свойство CF_4 , которое было обнаружено при измерениях, - сильное отклонение от экспоненциального роста усиления при высоких коэффициентах усиления при облучении альфа-частицами. Зависимость сигнала от напряжения отклоняется от экспоненциальной при величинах сигнала выше $\sim 4 \times 10^6$ e и полностью насыщается при $\sim 2 \times 10^7$ e, т.е. ниже предела Рейтера, что приводит к значительному снижению вероятности инициирования пробоя. При этом поведение каскадов ГЭУ с нанесенным отражающим фотокатодом и без него не отличается друг от друга.

Изучение старения фотокатода и ГЭУ при длительной работе детектора в условиях облучения непрерывным потоком частиц показало, что элементы детектора не деградируют вплоть до величины интегрального потока заряда ~ 150 мкКл/см², что соответствует 10 годам работы в условиях PHENIX.

Проведенные исследования показали принципиальную возможность реализации проекта НВД. После этого в течение 2006-2009 годов детектор был сконструирован и изготовлен. НВД успешно работал в составе PHENIX в течение сезонов 2009 г и 2010 г, когда проводились эксперименты с p+p и Au+Au столкновениями соответственно.

В седьмой главе описывается разработка двухкоординатных детекторов высокого разрешения на основе каскада из трех ГЭУ для системы регистрации рассеянных электронов (СРРЭ) эксперимента КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М, предназначенной для изучения двухфотонных процессов. Кинематические параметры таких процессов определяются конечными электроном и позитроном, потерявшими часть энергии при двухфотонном взаимодействии (рассеянные электроны (РЭ)). Регистрация обоих РЭ позволяет полностью определить параметры двухфотонной системы. СРРЭ использует магнитную систему накопителя в качестве спектрометра, как показано на рис.8. Дипольные магниты позволяют регистрировать РЭ, покидающие точку взаимодействия под нулевым углом. РЭ, обладающие более низкой энергией, выводятся магнитным полем с равновесной орбиты и затем регистрируются в одной из 4-х координатных станций системы TS_1 — TS_4 .

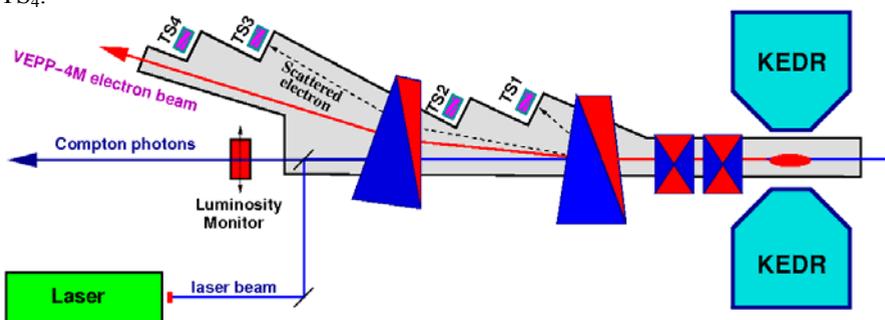


Рис. 8. Схема одного плеча системы регистрации рассеянных электронов детектора КЕДР.

Исходная СРРЭ состояла из 8 станций на основе дрейфовых трубок, которые позволяли измерять координату трека РЭ в плоскости орбиты пучка со средней точностью ~ 300 мкм. Для того чтобы улучшить пространственное разрешение и добавить возможность подавления фона от однократного тормозного излучения (ОТИ) было проведено усовершенствование системы. Каждая станция СРРЭ была дополнена двухкоординатным детектором высокого разрешения на основе каскада Газовых Электронных Умножителей, расположенным перед годоскопом из дрейфовых трубок. Всего было изготовлено 12 детекторов. 3 детектора для станций TS_4 (Рис. 8) имеют размер чувствительной области 256×100 мм². 9 детекторов для станций TS_1 - TS_3 имеют размер чувствительной области 128×100 мм². Большие детекторы имеют по 512 каналов в слое с прямыми полосками и в стерео слое. Малые детекторы имеют по 256 каналов в слое. 8 детекторов установлены в СРРЭ. Комплект из 4-х детекторов является запасным и использовался в тестах с космическими частицами.

Изучение основных параметров детекторов на основе ГЭУ проводилось в серии измерений с космическими частицами. Детекторы работали со смесью Ar-25%CO₂. Плато эффективности у исследуемого детектора начиналось при усилении ~25000, а величина эффективности на плато составила ~98%. Пространственное разрешение при усилении 30000 было близко к 73 мкм для координаты в плоскости орбиты ускорителя и равно ~219 мкм в перпендикулярном направлении.

В Заключении приводятся основные результаты и выводы диссертации.

Основные результаты работы

1. Предложены и исследованы МПГК на подложках с электронной проводимостью.

- Показано, что такие детекторы способны эффективно работать при потоках более $10^6 \text{ с}^{-1}\text{мм}^{-2}$, что, по крайней мере, на 2 порядка превышает быстродействие МПК.
- Изучено влияние сопротивления подложки на быстродействие МПГК.
- Показано, что МПГК работают с высоким коэффициентом газового усиления в газовых смесях высокого давления, что дает возможность использовать их для регистрации рентгеновского излучения высокой энергии.
- Исследован процесс старения МПГК и показано, что существуют условия, при которых МПГК может работать без существенной деградации характеристик в течение нескольких лет в условиях, эквивалентных по интегральной дозе условиям работы в зоне центрального детектора на БАК.

2. Исследованы свойства каскадов ГЭУ. В частности, изучена зависимость газового усиления и условий возникновения пробоя при облучении адронами от количества ГЭУ в каскаде, от распределения потенциалов между электродами ГЭУ в каскаде, а также от газовой смеси.

3. Разработана и создана микрополосковая ионизационная камера, в которой микроструктура использована для считывания сигнала и продемонстрировано предельное для газового детектора пространственное разрешение ~100 мкм при высокой эффективности для фотонов в широком диапазоне энергий от 15 кэВ до 60 кэВ. Этот детектор в настоящее время работает в лаборатории Canadian Light Source, Саскатун, Канада.

4. На основе каскада ГЭУ с существенно криволинейной структурой впервые разработан детектор мягкого рентгеновского излучения ОД-4 с веерной геометрией, работающий в режиме прямого счета фотонов. Детектор обладает пространственным разрешением ~200 мкм (стандартное

отклонение) и быстродействием более 150 кГц/кан. Создан полноформатный прототип этого детектора с угловой апертурой 67° . Этот детектор предполагается использовать для экспериментов по широкоугольной дифракции.

5. Разработан и создан уникальный детектор для изучения взрывных процессов на пучке СИ, DIMEX, в котором газовый электронный умножитель использован в режиме ослабления сигнала, что позволило увеличить динамический диапазон этого прибора и достичь рекордных значений максимального регистрируемого потока до 10^{12} фотонов/мм²с со средней энергией 20 кэВ. Детектор обладает пространственным разрешением лучше 100 мкм (стандартное отклонение) и временным разрешением лучше 100 нс, обеспечивающим коэффициент смешивания сигналов от последовательных сгустков не более $\sim 2.5 \times 10^{-4}$. DIMEX позволяет измерять эволюцию плотности вещества в процессе взрыва, а также наблюдать процесс образования наночастиц в процессе взрыва. Этот детектор успешно применяется в экспериментах на пучке СИ на накопителе ВЭПП-3 в течение последних 10 лет.

6. Впервые разработан детектор УФ-фотонов большой площади на основе тройного каскада ГЭУ с отражающим CsI фотокатодом, работающий в чистом CF₄. Этот фотодетектор использован в черенковском детекторе HBD в эксперименте PHENIX. В процессе этой разработки впервые было исследовано влияние сильно ионизирующих частиц на пробой в фотодетекторе на основе тройного каскада ГЭУ, и обнаружен эффект ограничения максимального заряда в лавине в чистом CF₄ ниже предела Рейтера, что полностью исключает пробой, инициированные адронами, в этом газе. Кроме того было исследовано старение такого детектора и показано, что каскад ГЭУ и отражающий CsI фотокатод стабильно работают при интегральном потоке заряда через детектор, соответствующем условиям работы в центральной части эксперимента PHENIX в течение 10 лет. В настоящее время HBD установлен и работает в эксперименте. Получены первые физические результаты с этим детектором.

7. Разработана и создана система из детекторов на основе каскада из трех ГЭУ для системы регистрации рассеянных электронов эксперимента КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М. Система включает в себя 8 детекторов различного размера с уникальной двухкоординатной считывающей структурой, позволяющей эффективно регистрировать многотрековые события с пространственным разрешением около 70 мкм и двухтрековым разрешением ~ 1 мм. В настоящее время эта система успешно работает в эксперименте.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. L.I. Shekhtman. Tracking with micro-strip gas chambers. // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. A379. P. 380-383.

2. R. Bouclier, J.J. Florent, J. Gaudaen, F. Sauli, L. Shekhtman. Development of microstrip gas chambers on thin plastic supports. // Nucl. Instrum. and Methods. 1992. V. A315. P. 521.

3. R. Bouclier, J.J. Florent, J. Gaudaen, G. Million, F. Sauli, L. Shekhtman. Microstrip Gas Chambers on thin plastic supports // Proc. Joint. Inter. Lepton-Photon Symp. and Europhysics Conf. on High En. Physics. Geneva. Switzerland. July-August 1991. V. 1. P. 242.

4. T. Beckers, R. Bouclier, Ch. Garabatos, ..., L.I. Shekhtman, et al. Optimization of microstrip gas chamber design and operating conditions. // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. V. A346. P. 95.

5. L. Allunni, R. Bouclier, G. Fara, ..., L.I. Shekhtman, et al. Performance of MSGC on electronically and ionically conductive substrata in various operational conditions. // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. V. A348. P. 344.

6. R. Bouclier, M. Capeans, C. Garabatos, ..., L. Shekhtman, et al. Microstrip gas chambers with thin electron-conducting layers. // Proc. Int. Workshop on MSGC. Legnaro. 13-14 October 1994. P. 39.

7. R. Bouclier, M. Capeans, J. Evans, ..., L. Shekhtman, et al. Optimization of design and beam-test of micro-strip gas chambers. // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. V. A367. P. 163-167.

8. R. Bouclier, J.J. Florent, J. Gaudaen, ..., L. Shekhtman, et al. High-rate performance of Microstrip gas chambers on glass and plastic supports. // Nucl. Instrum. and Methods. 1992. V. A323. P. 240.

9. G.D. Minakov, Yu.N. Pestov, V.S. Prokopenko, L. Shekhtman. Performance of gas microstrip chambers on glass substrata with ionic and electronic conductivity. // Nucl. Instrum. and Methods. 1993. V. A326. P. 566.

10. R. Bouclier, G. Million, L. Ropelewski, F. Sauli, Yu.N. Pestov, L. Shekhtman. Performance of gas microstrip chambers on glass substrata with electronic conductivity. // Nucl. Instrum. and Methods. 1993. V. A332. P. 100.

11. Yu.N. Pestov, L.I. Shekhtman. Influence of the bulk resistivity of glass with electronic conductivity on the performance of microstrip gas chamber. // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. V. A338. P. 368.

12. J. Bohm, R. Bouclier, M. Capeans, ..., L. Shekhtman, et al. High rate operation and life-time studies with micro-strip chambers. // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. V. A360. P. 34-41.

13. R. Bouclier, C. Garabatos, G. Manzin, ..., L. Shekhtman, et al. Ageing studies with micro-strip gas chambers. // Nucl. Instrum. and Methods. 1994. V. A348. P. 109.

14. R. Bouclier, M. Capeans, C. Garabatos, ..., L. Shekhtman, et al. Ageing studies with micro-strip gas chambers. // Proc. Int. Workshop on MSGC. Legnaro. 13-14 October 1994. P. 48.
15. J.E. Bateman, J.F. Connolly, Yu.N. Pestov, L.I. Shekhtman, et al. Some lifetime characteristics of gas microstrip detectors fabricated on semiconductive glass. // Proc.Int.Workshop on MSGC. Legnaro. 13-14 October 1994. P. 22.
16. R. Bouclier, M. Capeans, C. Garabatos, ..., L. Shekhtman, et al. Ageing studies with micro-strip gas chambers. // Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.). 1995. V. 44. P. 557-566.
17. R. Bouclier, M. Capeans, C. Garabatos, ..., L. Shekhtman, et al. Ageing of microstrip gas chambers: problems and solutions. // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. A381. P. 289.
18. B. Boimska, R. Bouclier, M. Capeans, ..., L. Shekhtman, et al. Study of ageing and gain limits of Microstrip Gas Chambers at high rates. // Proceedings supplements Nuclear Physics B. 1998. V. 61B. P. 498-503.
19. O. Adriani, F. Angelini, N. Bacchetta, ..., L. Shekhtman, et al. Performance of a prototype of the CMS central detector. // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. V. A367. P. 189-192.
20. V. Nagaslaev, B. Baiboussinov, A. Bondar, L. Shekhtman, A. Sokolov. Performance of MSGC in high longitudinal magnetic field. // Proc. of the Int. Workshop on MSGC. Lyon, France. November 1995. Editors: D. Contardo, F. Sauli. P. 115.
21. F. Angelini, N. Bacchetta, R. Bellazzini, ..., L. Shekhtman, et al. Study of the bunch crossing identification at LHC using microstrip gas chambers. // Nucl. Instrum. and Methods. 1996. V. A368. P. 345.
22. M. Ackermann, S. Atz, V. Aulchenko, ..., L. Shekhtman, et al. Large scale test of wedge shaped micro strip gas counters. // Nucl. Instrum. and Methods. 1999. V. A436. P. 313-325.
23. R. Bouclier, M. Capeans, C. Garabatos, ..., L. Shekhtman, et al. On some factors affecting discharge conditions in micro-strip gas chambers. // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. V. A365. P. 65-69.
24. L. Shekhtman. Micro-pattern gaseous detectors. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A494. P. 128-141.
25. A. Bondar, A. Buzulutskov, L. Shekhtman, A. Sokolov, A. Tatarinov. Experience with wedge MSGC-GEM and wedge micro-groove/GEM structures in high intensity hadron beam. // International Workshop on MICRO-PATTERN GAS DETECTORS. June 28-30, 1999. Orsay, France. P. 65-68.
26. M. Ageron, A. Albert, T. Barvich, ..., L. Shekhtman, et al. Robustness test of a system of MSGC + GEM detectors at the Cyclotron facility of the Paul Scherrer Institute. // Nucl. Instrum. and Methods. 2001. V. A471. P. 380.

27. M. Ageron, A. Albert, T. Barvich, ..., L. Shekhtman, et al. Experimental and simulation study of the behaviour and operation modes of MSGC+GEM detectors. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A489. P. 121-139.
28. B. Ketzer, S. Bachmann, M. Capeans, ..., L. Shekhtman, et al. GEM detectors for COMPASS. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 2001. V. 48. №4. P. 1065.
29. S. Bachmann, A. Bressan, B. Ketzer, ..., L. Shekhtman, et al. Performance of GEM detectors in high intensity particle beams. // Nucl. Instrum. and Methods. 2001. V. A470. P. 548-561.
30. S. Bachmann, A. Bressan, M. Capeans, ..., L. Shekhtman, et al. Discharge studies and prevention in the gas electron multiplier (GEM). // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A479. P. 294-308.
31. Z. Fraenkel, A. Kozlov, M. Naglis, I. Ravinovich, L. Shekhtman, et al. A hadron blind detector for the PHENIX experiment at RHIC. // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A546. P. 466-480.
32. V.M Aulchenko, O.L. Beloborodova, A.V. Bobrov, ..., L.I. Shekhtman, et al. Operation of the triple-GEM detectors in the tagging system of the KEDR experiment on the VEPP-4M collider. // J. of Instrum. 2011. V. 6. P07001.
33. A. Bondar, A. Buzulutskov, R. de Oliveira, ..., L. Shekhtman, et al. Light multi-GEM detector for high-resolution tracking systems. // Nucl. Instrum. and Methods. 2006. V. A556. P. 495-497.
34. L.I. Shekhtman. High pressure gas avalanche chambers for medical radiography. // Phys. Med. 1993. V. IX. №2-3. P. 117.
35. E.A. Babichev, S.E. Baru, A.G. Khabakhpashev, ..., L.I. Shekhtman, et al. High pressure multiwire proportional and gas microstrip chambers for medical radiology. // Nucl. Instrum. and Methods. 1995. V. A360. P. 271.
36. E.A. Babichev, S.E. Baru, V.R. Groshev, ..., L.I. Shekhtman, et al. Photon counting and integrating analog gaseous detectors for digital scanning radiography. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A419. P. 290-294.
37. V.R. Groshev, V.R. Kozak, V.I. Nifontov, ..., L.I. Shekhtman, et al. Digital mammography with multi-electrode ionization chamber. // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. V. A454. P. 130.
38. E.A. Babichev, S.E. Baru, V.R. Groshev, ..., L.I. Shekhtman, et al. Usage of two types of high pressure Xenon chambers for medical radiography. // Nucl. Instr. and Methods. 2001. V. A461. P. 430-434.
39. E.A. Babichev, S.E. Baru, V.R. Groshev, ..., L.I. Shekhtman, et al. The new effective detector for digital scanning radiography. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. A513. P. 57-60.
40. E.A. Babichev, S.E. Baru, V.R. Groshev, ..., L.I. Shekhtman, et al. Comparison of Xe and Kr filled ionization chambers for application in digital

scanning radiography. // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A525. P. 352-355.

41. V.M. Aulchenko, S.E. Baru, O.V. Evdokov, ..., L.I. Shekhtman, et al. Fast high resolution gaseous detectors for diffraction experiments and imaging at synchrotron radiation beam. // Nucl. Instrum. and Methods. 2010. V. A623. P. 600-602.

42. E.A. Babichev, S.E. Baru, D.N. Grigoriev, ..., L.I. Shekhtman, et al. High-resolution detectors for medical applications and synchrotron radiation research // Nucl. Instrum. and Methods. 2011. V. A628. P. 440-443.

43. V.M. Aulchenko, S.E. Baru, M.S. Dubrovin, G.A. Savinov, L.I. Shekhtman, et al. One- and Two-coordinate detectors in BINP. // J. Synchrotron Rad. 1998. V. 5. P. 263-267.

44. L. Shekhtman. Novel position-sensitive gaseous detectors for X-ray imaging // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A522. P. 85.

45. A. Breskin, A. Buzulutskov, R. Chechik, G. Garty, F. Sauli, L. Shekhtman. The CsI Multi-GEM Photomultiplier. // Intern. Workshop on MICRO-PATTERN GAS DETECTORS. June 28-30, 1999. Orsay, France. P. 107-110.

46. A. Buzulutskov, A. Breskin, R. Chechik, G. Garty, F. Sauli, L. Shekhtman. Further studies of the GEM photomultiplier. // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. V. A442. P. 68.

47. A. Buzulutskov, A. Breskin, R. Chechik, G. Garty, F. Sauli, L. Shekhtman. The GEM photomultiplier operated with noble gas mixtures. // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. V. A443. P. 164.

48. A. Breskin, A. Buzulutskov, R. Chechik, ..., L. Shekhtman, et al. Sealed GEM photomultiplier with a CsI photocathode: Ion feedback and ageing. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A478. P. 225-229.

49. A. Kozlov, I. Ravinovich, L. Shekhtman, et al. Development of a triple GEM UV-photon detector operated in pure CF₄ for the PHENIX experiment. // Nucl. Instrum. and Methods. 2004. V. A523. P. 345.

50. F. Angelini, R. Bellazzini, A. Brez, M.M. Massai, G. Spandre, M. Torquati, L.I. Shekhtman. Performance of Gas microstrip chambers at high pressure. // Proc. Eur. Workshop on X-ray detectors for SR sources, Assois, France, September-October 1991. P. 96.

51. S.E. Baru, V.V. Neustroev, A. Papanestis, G.A. Savinov, L.I. Shekhtman. One Dimensional X-ray MSGC detector. // Proc. of the Intern. Workshop on MSGC. Lyon, France. November 1995. Editors: D.Contardo, F.Sauli. P. 27.

52. S.E. Baru, V.V. Neustroev, A. Papanestis, ..., L.I. Shekhtman, et al. One dimensional X-ray MSGC detector for synchrotron radiation experiments and medical imaging. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. A405. P. 274-278.

53. Aulchenko V.M., Bukin M.A., Grebenkin S.S., Papushev P.A., Shekhtman L.I., et al. A new one-coordinate gaseous detector for WAXS experiments (OD4). // Nucl. Instrum. and Methods. 2007. V. A575. P. 251.

54. V.M. Aulchenko, P.A. Papushev, M.R. Sharafutdinov, L.I. Shekhtman, et al. Development of a one-coordinate gaseous detector for wide angle diffraction studies // J. of Instrum. 2008. V. 3. P04008.

55. V.M. Aulchenko, P.A. Papushev, M.R. Sharafutdinov, L.I. Shekhtman, et al. Progress with one-coordinate detector for WAXS. // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A603. P. 69-72.

56. Аульченко В.М., Жуланов В.В., Шехтман Л.И. Однокоординатный рентгеновский детектор с быстрой записью изображения. // Поверхность. 2002. №11. С. 10-12.

57. V. Aulchenko, P. Papushev, S. Ponomarev, L. Shekhtman, V. Zhulanov. Development of a one-dimensional detector for the study of explosions with a synchrotron radiation beam. // J. Synchrotron Rad. 2003. №10. P. 361-365.

58. V. Aulchenko, O. Evdokov, S. Ponomarev, L. Shekhtman, et al. Development of fast one-dimensional X-ray detector for imaging of explosions. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. A513. P. 388-393.

59. A. Aulchenko, V. Zhulanov, L. Shekhtman, et al. One-dimensional detector for study of detonation processes with synchrotron radiation beam. // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. A543. P. 350-356.

60. V.M. Aulchenko, M.A. Bukin, P.A. Papushev, L.I. Shekhtman, et al. Detectors for Time-resolved Studies at SR Beam. // Proc. of the SNIC Symposium. 2006. Stanford, California. Edited by V. Luth. eConf C0604032. 0195.

61. V.M. Aulchenko, O.V. Evdokov, L.I. Shekhtman, et al. Detector for imaging of explosions: present status and future prospects with higher energy X-rays. // J. of Instrum. 2008. V. 3. P05005.

62. V.M. Aulchenko, O.V. Evdokov, L.I. Shekhtman, et al. Current status and further improvements of the detector for imaging of explosions. // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A603. P. 73-75.

63. В.М. Аульченко, О.В. Евдоков, И.Л. Жогин, ..., Л.И. Шехтман и др. Детектор для изучения взрывных процессов на пучке синхротронного излучения. // Приб. и техн. exper. 2010. №3. С. 20-35.

64. V.M. Aulchenko, A.E. Bondar, A.F. Buzulutskov, ..., L.I. Shekhtman, et al. Upgrade of the KEDR tagging system. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. A494. P. 241-245.

65. V.M. Aulchenko, A.V. Bobrov, A.E. Bondar, L.I. Shekhtman, et al. Triple-GEM detectors for KEDR tagging system. // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A598. P. 112-115.

66. Поросев В.В., Шехтман Л.И., Зеликман М.И., Блинов Н.Н.(мл.). Влияние корреляции шумов в каналах цифрового рентгеновского приёмника-

преобразователя на оценку квантовой эффективности регистрации. // Медицинская техника. 2004. Т. 38. №5. С. 233-236.

67. K.A. Ten, E.R. Prueel, L.A. Merzhievsky, ..., L.I. Shekhtman, et al. Tomography of the flow field of detonation product using SR. // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A603. P. 160–163.

68. K.A. Ten, V.M. Aulchenko, L.A. Lukjanchikov, E.R. Prueel, L.I. Shekhtman, et al. Application of introduced nano-diamonds for the study of carbon condensation during detonation of condensed explosives. // Nucl. Instrum. and Methods. 2009. V. A603. P. 102-104.

69. В.М. Титов, Э.Р. Прууэл, К.А. Тен, ..., Л.И. Шехтман и др. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов. // Физика горения и взрыва. 2011. №6. С. 3-16.

ШЕХТМАН Лев Исаевич

Быстродействующие
координатные газовые детекторы
высокого разрешения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Сдано в набор 19.09. 2012 г.

Подписано в печать 20.09. 2012 г.

Формат 60x90 1/16 Объем 1.5 печ.л., 1.2 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 21

Обработано на РС и отпечатано
на ротапинтере ИЯФ СО РАН,

Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11