

Федеральное государственное бюджетное учреждение  
«Государственный научный центр Российской Федерации -  
Институт Теоретической и Экспериментальной Физики»  
Национального исследовательского центра «Курчатовский  
институт»

*На правах рукописи*

Александров Иван Сергеевич

Разработка сверхчувствительного метода  
регистрации ионизации в детекторах на  
основе благородных газов

Специальность: 01.04.01 - приборы и методы  
экспериментальной физики

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико - математических наук

Москва 2014

Работа выполнена во ФГБУ ГНЦ РФ - Институт  
Теоретической и Экспериментальной Физики НИЦ «  
Курчатовский институт», г. Москва

**Научный руководитель:**

кандидат физико математических наук Д. Ю. Акимов (ИТЭФ)

**Официальные оппоненты:**

доктор физико – математических наук,  
профессор, зав. лабораторией ИЯИ РАН

Ю.Г. Куденко

доктор физико – математических наук

С.Е. Улин (НИЯУ МИФИ)

старший научный сотрудник кафедры

№7 НИЯУ МИФИ

Ведущая организация:

Институт Ядерной Физики

им. Г.И. Будкера

СО РАН (г. Новосибирск)

Защита диссертации состоится 17 июня 2014 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д.201.002.01 в ФГБУ ГНЦ РФ ИТЭФ по адресу г. Москва, ул. Б. Черемушкинская, д. 25, конференц-зал института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТЭФ.

Автореферат разослан 16 мая 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат физ.-мат.  
наук

В.В. Васильев

## Актуальность темы

В последнее десятилетие в экспериментах по поиску редких процессов нашли широкое применение детекторы на основе благородных газов. Фотоэлектронные умножители в таких детекторах являются наиболее радиоактивными элементами, и актуальной является частичная или полная их замена на полупроводниковые фотодиоды. Одним из вариантов их замены является Многопиксельный Гейгеровский Лавинный Фотодиод (МГЛФД или SiPM, GAPD, MRSAPD и другие названия фотодиода).

В 2008 – 2010 году были проведены исследования работы нового детектора света – МГЛФД в среде жидкого ксенона с целью оценки эффективности регистрации сцинтилляции и электролюминесценции, лежащих в области вакуумного ультрафиолета. Испытание фоторегистрирующей системы на основе МГЛФД и волнового сместителя спектра (спектрсместителя) в жидком ксеноне, а также измерение эффективности регистрации ультрафиолета осуществлено впервые в мировой практике.

Полученные данные о достаточно высокой эффективности регистрации свидетельствуют о перспективности применения дан-

ного типа детектора в системах на основе сжиженных благородных газов.

В дальнейшем увеличение эффективности регистрации системы спектросместитель + система фотодетекторов возможно при использовании МГЛФД с более высокой эффективностью регистрации в области излучения спектросместителя.

С целью практической проверки применимости данного метода был собран прототип регистрирующей системы. Проведены измерения в двухфазном детекторе на основе благородного газа для экспериментов по поиску Темной Материи и поиску редкого процесса когерентного рассеяния реакторного антинейтрино на атомном ядре.

В традиционном считывании с помощью ФЭУ в двухфазном детекторе на основе благородного газа типичное число фотоэлектронов на один ионизационный электрон составляет  $\sim 10 - 20$ . Предлагаемая система позволяет увеличить это число до  $\sim 100$  вследствие дополнительного газового усиления, а также позволит измерить двухмерные координаты одноэлектронных событий с миллиметровой точностью. Данная методика перспективна для экспериментов по регистрации реакторного антинейтрино, когерентно рассеянного на атомном ядре. Миллиметровая точность требуется для дискриминации фоновых многоэлектронных событий, произошедших в различных точках рабочего объема детектора в пределах временного окна интеграции. При-

менение данной методики возможно в медицинской физике для построения изображений. С целью демонстрации возможностей данного метода был собран и испытан эмиссионный двухфазный детектор со считыванием электролюминесценции с помощью системы ТГЭУ + спектросместитель + МГЛФД (ТГЭУ - Толстый Газовый Электронный Умножитель).

## **Цель работы**

Целями диссертационной работы являются:

- Демонстрация возможности регистрации вакуумного ультрафиолета с помощью МГЛФД и волнового сместителя спектра.
- Оценка эффективности регистрации системы МГЛФД + Спектросместитель.
- Демонстрация возможности работы Толстого Газового Электронного Умножителя (ТГЭУ) в парах ксенона.
- Демонстрация возможности работы системы ТГЭУ + МГЛФД + Спектросместитель.

## **Научная новизна и практическая ценность работы**

- Впервые успешно протестирована многоканальная система

регистрации на основе МГЛФД, спектросместителя и ТГЭУ в двухфазном эмиссионном детекторе на жидком ксеноне.

- Получена эффективность порядка 10% для системы спектросместитель + МГЛФД при регистрации сцинтилляции в жидком ксеноне.
- Успешно протестирована защита для р-терфинала, предотвращающая загрязнение жидкого ксенона электроотрицательными примесями.
- Успешно протестирован переизлучатель большой площади с защитным слоем в двухфазном детекторе (время жизни свободных электронов  $\sim 10$  мкс).
- Исследована работа ТГЭУ на основе каптона в ксеноне (электролюминесцентное усиление).

### **Положения, выносимые на защиту**

- Результаты измерения эффективности регистрации фотонов на длине волны 175 нм для системы "спектросместитель + МГЛФД" в жидком ксеноне.
- Результаты, полученные при экспериментальном тестировании системы регистрации ионизации ТГЭУ + спектросместитель + матрица МГЛФД: величина сигнала, приве-

денная к одному электрону, и её оценки для фотоприемника большей площади, величина пространственного разрешения, время жизни свободных электронов при наличии спектросместителя.

## **Апробация работы**

Основные и промежуточные результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, обсуждались на российских и международных научных семинарах и конференциях:

- 11th ICATPP Conference on Astroparticle, Particle, Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications, Como, Italy 2009
- International Workshop on new Photon Detectors, Shinshu university Japan, 24-26 June 2009
- ICHEP Paris, France, 22-28 July, 2010
- ICHEP Melbourne, Australia, 4-11 July, 2012
- NDIP 2011 Lyon, France July 4-8 2012
- International Workshop on new Photon Detectors, Orsay, France, 24-26 June 2009
- VCI 2013, Вена, Австрия 2013 г.

- Сессии-конференции секции ядерной физики ОФН РАН «Физика фундаментальных взаимодействий», г. Москва, Россия, 2010, 2011 гг.
- Научной сессии НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия, 2011 г.

## **Публикации**

Результаты диссертационной работы опубликованы в двух работах из списка публикации автора; все статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Высшей аттестационной комиссией, другие изданы по материалам конференций.

## **Личный вклад диссертанта**

Диссертант самостоятельно проводил сборку (в чистых условиях) системы ТГЭУ + спектросместитель + матрица МГЛФД, предварительное тестирование и измерение характеристик партии МГЛФД для изготовления светочувствительной матрицы, принимал непосредственное участие в эксперименте и получении данных. Диссертант практически полностью обработал результаты измерений. Диссертантом была создана компьютерная модель светосбора фотоприемниками (МГЛФД и ФЭУ) с помощью метода Монте-Карло, которая позволила получить оценки пространственного разрешения матриц фотоприемников.



## Структура диссертации

Работа состоит из **введения**, четырех глав и **заключения**. Объем составляет 95 страниц, включая 40 рисунков и 3 таблицы. Список цитируемой литературы состоит из 91 наименования.

## Содержание работы

Во **Введении** дается краткая характеристика современного состояния двух направлений исследований, посвященных поискам Темной Материи и когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре. Для Темной Материи приведены методики детектирования основных кандидатов на роль частиц Темной Материи — WIMP'ов. Перечислены эксперименты по их поиску прямыми и косвенными методами. Для когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре приводятся основные эксперименты и их краткие характеристики.

В **Главе 1** рассмотрен жидкий ксенон как рабочее вещество детекторов ионизирующего излучения, а также уникальная и важная особенность жидких благородных газов (характерная для этого класса материалов) - возможность одновременной регистрации электронов ионизации и сцинтилляции.

В разделе 1.1 представлены физические свойства жидкого ксенона. Благодаря высокому атомному номеру (54) и большой

плотности ( $\sim 3 \text{ г/см}^3$ ) жидкий ксенон эффективно поглощает  $\gamma$ -излучение. По сравнению с кристаллом NaJ(Tl) или с полупроводником таким как германий (Ge) жидкий ксенон обладает более короткой длиной пробега  $\gamma$ -кванта, к тому же можно создать большой однородный объем в отличие от других материалов.

Для задач поиска WIMP и обнаружения когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре жидкий ксенон обладает наибольшим по сравнению с другими детектирующими средами сечением взаимодействия.

В разделе 1.2 рассмотрены процессы сцинтилляции и образование электрон-ионных пар в жидком ксеноне в результате взаимодействия заряженных частиц со средой. Сцинтилляция (испускание фотонов; длина волны для ксенона - 175 нм) происходит в результате снятия возбуждения димеров (двухатомных возбужденных молекул  $Xe_2^*$ ), образованных в процессе столкновения возбужденных атомов с другими атомами. Важно, что к образованию димеров приводит также рекомбинация электронов и ионов. Как следствие, сцинтилляционный и ионизационный сигналы являются антикоррелирующими при приложенном электрическом поле, а величина этого эффекта зависит от типа взаимодействующей частицы (плотности ионизации). Этот эффект используется для идентификации частиц с целью режекции гамма фона в детекторах Темной Материи.

В разделе 1.3 рассмотрен захват электронов электроотрица-

тельными примесями. Время жизни электронов до захвата является важнейшей технической характеристикой детектора, поскольку оно влияет на спектрометрические характеристики. Время жизни должно быть достаточно большим, чтобы не происходило затухания ионизационного сигнала на протяжении дрейфа электронов в объеме детектора. Жесткие требования к чистоте рабочей среды накладывают серьезные ограничения на выбор конструкционных материалов детектора. Концентрация примесей 1 ppb (один атом на миллиард) в кислородном эквиваленте соответствует длине поглощения около одного метра. Для достижения требуемых концентраций примесей используются специальные методы глубокой очистки ксенона и подготовки элементов детектора в чистых условиях.

В разделе 1.4 рассмотрен процесс электролюминесценции в газообразном ксеноне в двухфазном эмиссионном детекторе. Электролюминесценция (также используется термин пропорциональная сцинтилляция) происходит в газовой фазе (насыщенных парах) над поверхностью жидкого ксенона, в которую попадают электроны ионизации, извлеченные из жидкой фазы детектора электрическим полем. Электролюминесценция происходит в результате снятия возбуждения димеров  $Xe_2^*$ , образованных также, как и в случае сцинтилляции, из возбужденных атомов  $Xe^*$ , которые в свою очередь образуются электронами, ускоренными электрическим полем. Количество фотонов электролюминесцен-

ции, производимых одним электроном, рассчитываются по эмпирической формуле:

$$N_{ph} = a * x * (E/n) + b * x, \quad (1)$$

где  $E$  - электрическое поле в газовой фазе в размерности [В/см],  $n = N_a * \rho/a$  - плотность атомов,  $\rho$ -плотность насыщенного пара,  $x = n * d$ , где  $d$ -величина пути дрейфа электронов в газе[1]. Для детектора, заполненного ксеноном, величины  $a$  и  $b$  принимаются  $a = 0.137 V^{-1}$ ,  $b = -4.7 * 10^{-18} \text{ см}^2/\text{атом}$ . Величина  $N_{ph}$  может достигать значения в несколько сотен.

**Глава 2** посвящена описанию двухфазного эмиссионного детектора на конденсированном благородном газе, а также элементов, использующихся в детекторах Темной Материи. Вследствие уникальной возможности одновременного измерения выделенной частицей энергии по каналам сцинтилляции и ионизации можно идентифицировать сорт частиц. Метод также планируется использовать в эксперименте по обнаружению когерентного рассеяния нейтрино на атомном ядре благодаря возможности иметь рекордно низкий порог ( $\sim 1 \text{кэВ}$ ) по ионизации, вплоть до регистрации единичных ионизационных электронов [2].

Эмиссионный двухфазный детектор представляет собой время-проекционную камеру, в которой стартовым сигналом является сцинтилляция (S1), а стоповым — электролюминесценция (S2) от электронов ионизации, эмитированных в газовую фазу электри-

ческим полем. Традиционно сверху и снизу расположены матрицы фотоумножителей, которые обеспечивают спектрометрию сигналов и восстановление координат событий в горизонтальной плоскости. В данной работе рассматривается конструкция, представленная на рис. 1, аналогичная предлагаемой в работах [3] и [4] для жидкого аргона, в которой верхняя матрица фотоумножителей заменена ТГЭУ и матрицей МГЛФД со спектросместителем. В отверстиях ТГЭУ с высокой напряженностью электрического поля происходит электролюминесценция (при наличии небольшого газового усиления), свет от которой регистрируется матрицей МГЛФД.

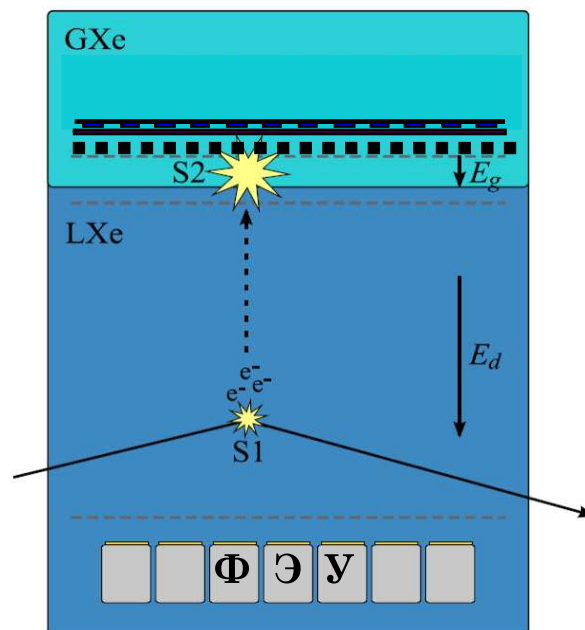


Рис. 1: Схема и принцип работы двухфазного эмиссионного детектора с ТГЭУ и матрицей МГЛФД.

В разделе 2.1 представлены МГЛФД - Многопиксельные Гейгеровские Лавинные Фотодиоды, которые были использованы в настоящей диссертационной работе. МГЛФД — это прибор нового типа для детектирования вспышек света слабой интенсивности (на уровне одиночных фотонов) и длительностью порядка единиц — сотен наносекунд. Он представляет собой фотоприемник на основе упорядоченного набора (матрицы) p- n- переходов (пикселей), выполненного на общей подложке[5]. Эти фотодиоды работают в гейгеровском режиме. Пробой элементарной ячейки (пикселя) вызывает электронная лавина, которая образуется после появления пары электрон-дырка в результате фотоэффекта. В результате пробоя формируется сигнал стандартной амплитуды. При умеренной засветке фотодиода (число сработавших ячеек значительно меньше общего числа ячеек) сигнал фотодиода пропорционален количеству сработавших ячеек. То есть, амплитуда сигнала фотодиода есть сумма амплитуд сигналов каждой сработавшей ячейки. Прогресс в улучшении чувствительности МГЛФД в видимой области света позволил использовать данный прибор во многих областях в качестве замены фотоумножителю.

К другим характеристикам, которые позволяют использовать МГЛФД как альтернативу ФЭУ, относятся следующие:

- малое рабочее напряжение питания — несколько десятков вольт;

- компактность — толщина прибора, установленного в корпус не более нескольких миллиметров;
- возможность работы в сильных магнитных полях;
- рекордное одноэлектронное разрешение;
- высокое внутреннее усиление порядка  $10^6$ , что значительно снижает требования к электронике;
- малый разброс коэффициента усиления (менее 10%);
- эффективность регистрации видимого света на уровне или лучше вакуумных ФЭУ;
- возможность работы, как в режиме счета импульсов, так и в спектрометрическом режиме;
- хорошее временное разрешение (десятки пикосекунд).

К недостаткам по сравнению с ФЭУ можно отнести высокий уровень шума на единицу площади и относительно небольшие размеры.

В разделе 2.2 рассматривается Газовый Электронный Умножитель (ГЭУ)[6]. ГЭУ представляет собой тонкую диэлектрическую пластину, покрытую с обеих сторон металлической фольгой со сквозными отверстиями. Плотность отверстий может составлять от нескольких десятков до нескольких тысяч на квадратный сантиметр. Отверстия расположены в виде гексагональ-

ной матрицы. При подаче разности потенциалов на металлические электроды в отверстиях образуется сильное электрическое поле. Если также было приложено внешнее (дрейфовое) поле, то окончания силовых линий концентрируются в отверстиях, обеспечивая дрейф электронов первичной ионизации в область сильного поля. В настоящей диссертационной работе рассматривается так называемый Толстый Газовый Электронный Умножитель (ТГЭУ)[9], отличающийся от классического ГЭУ большей толщиной (порядка 1 мм) и диаметром отверстий.

Как было показано в работе группы ИТЭФ [7], эффективность регистрации ультрафиолета в жидком ксеноне (с длиной волны 175 нм) с помощью МГЛФД составляет  $\sim 1\%$ , что явно недостаточно для создания сцинтилляционного детектора на основе жидкого ксенона.

**Глава 3** описывает экспериментальную проверку в жидком ксеноне процесса регистрации сцинтилляционного света лавинным Гейгеровским фотодиодом с переизлучателем для промышленных образцов МГЛФД (без защитного слоя). Результатом этого этапа исследования явилась оценка общей эффективности регистрации системы МГЛФД + спектросместитель.

В разделе 3.1 описана постановка задачи.

В разделе 3.2 обосновывается выбор переизлучателя. В качестве переизлучателя было выбрано органическое вещество р-терфенил, которое было нанесено на сапфировое окно методом



вакуумного напыления.

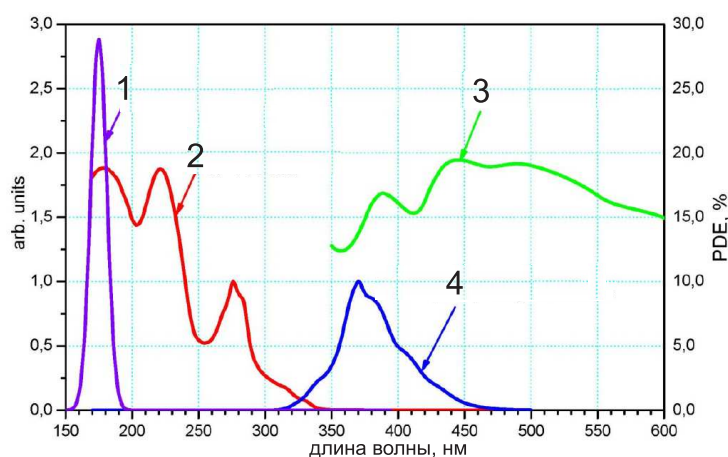


Рис. 2: 1- Спектр излучения жидкого ксенона, 2- спектр поглощения p- терфинала, 3- эффективность регистрации МГЛФД производства ЦПТА [10], 4- спектр излучения p- терфинала

Как видно из рис. 2, в диапазоне эмиссии p- терфинала эффективность регистрации "синего" МГЛФД составляет около 15%.

В разделе 3.3 описаны криостат для испытаний и газовая система а также представлена её схема. Откачка камеры проводилась до вакуума  $\sim 10^{-4}$  Тор, достаточного для обеспечения необходимой чистоты жидкого ксенона. Для обеспечения хорошей теплоизоляции и стабильного состояния рабочей камеры (температура жидкого ксенона  $\sim -100^{\circ}$  C) в вакуумном объеме криостата также был обеспечен вакуум  $\sim 10^{-4}$  Тор.

В разделе 3.4 приводится схема и описание конструкции, использовавшейся в предварительных тестах. Испытания спектро- сместителя были проведены с двумя типами конструкций. Первая конструкция (рис. 3 а) была изготовлена таким образом,

что переизлучатель (4) был напылен на окно из стекла с полосой пропускания  $>200$  нм и изолирован от жидкого ксенона другим окном, выполненным из сапфира. Пространство между окнами было заполнено газообразным аргоном для пропускания ультрафиолета. Конструкция, изображенная на рис. 3 б, отличалась тем, что слой р-терфинила, нанесенный на сапфировое окно для изоляции от жидкого ксенона, был покрыт конформной пленкой из полипараксилилена. Для получения сцинтилляционного света с длиной волны 175 нм был использован источник  $\alpha$ -частиц  $^{241}\text{Am}$ . Были использованы чувствительные к ВУФ ФЭУ Hamamatsu R7400-06 для регистрации переизлученного света обратного направления по отношению к источнику. Запуск считывания осуществлялся по превышению порога дискриминатора сигналом ФЭУ. Все конструкционные материалы были подобраны в соответствии с требованиями вакуумной чистоты.

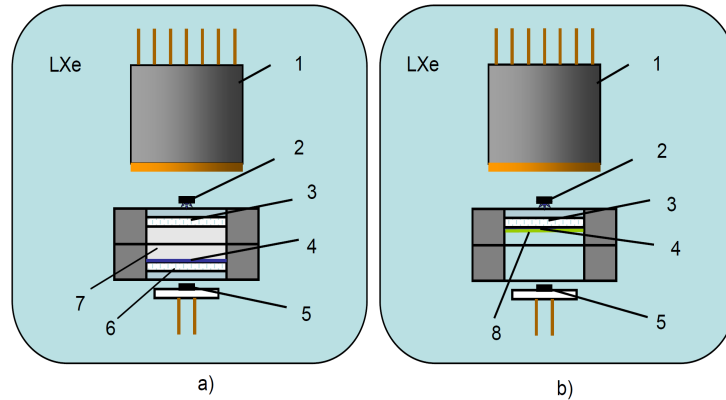


Рис. 3: Схема измерений: 1— ФЭУ Hamamatsu R7400-06, 2—  $\alpha$  источник  $^{241}\text{Am}$ , 3— сапфировое окно, 4— слой р-терфинила, 5— МГЛФД, 6— окно, покрытое р-терфинилом, 7— Ar атмосфера, 8— слой полипараксилилена

Раздел 3.5 посвящен описанию подготовки МГЛФД перед установкой в камеру. После получения приборов от производителей были проведены измерения их характеристик при комнатной температуре и температуре жидкого ксенона. Рабочее напряжение было выбрано на 3.5 - 4 вольта выше точки пробоя[7].

В разделе 3.6 описывается вычисление эффективности регистрации сцинтилляционного сигнала. Важно отметить, что преизлучатель был напылен на сапфировое окно, а не на фотодетектор непосредственно. Поэтому, чтобы получить эффективность регистрации системы МГЛФД + спектросместитель, спектросместитель был виртуально помещен на поверхность фотодетектора. Был произведен расчет на основании полученных данных как аналитически, так и с помощью Монте-Карло модели (детальное описание дано в [8])

В разделе 3.7 подводится итог предварительных тестов МГЛФД с переизлучателем в жидком ксеноне. Эффективность регистрации системы МГЛФД + спектросместитель составила  $\sim 10\%$ , что дало основание перейти к следующему этапу — испытаниям системы ТГЭУ + спектросместитель + матрица МГЛФД, которому посвящена следующая **Глава 4**.

В разделе 4.1 приводится схема, представленная на рис. 4, и описание эмиссионного двухфазного детектора, использовавшегося в тестах. На схеме изображены: система электродов, задающих электрическое поле (5), экранирующий электрод (7), фотоумножители (8) и регистрирующая система ТГЭУ(3,4) + спектросместитель(2) + матрица МГЛФД(1), установленная на верхнем кольце. Камера заполнялась ксеноном до уровня, показанного на рис. 4. Для предварительной очистки ксенона использовались горячие Са ( $700^\circ\text{C}$ ) и Ti ( $900^\circ\text{C}$ ) геттеры собственного изготовления. Перед ожижением ксенон пропускался через геттер Mulkrolis Megaline.

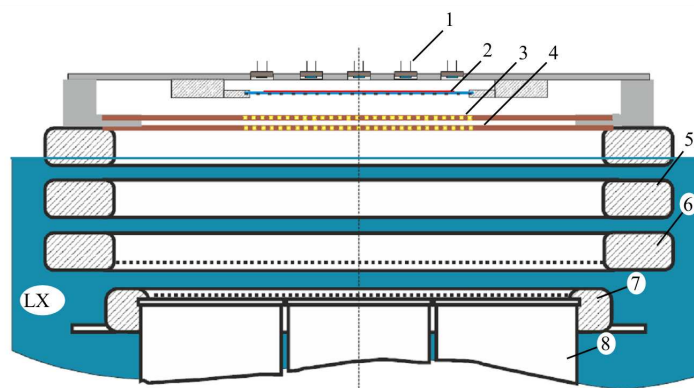


Рис. 4: Схема внутренней структуры двухфазного детектора для изучения отклика схемы ГЭУ + Спектросместитель + матрица МГЛФД: 1 – Матрица из девятнадцати МГЛФД; 2 – спектросместитель напыленный на сапфир, защищенный оптически прозрачной металлической сеткой ; 3, 4 – второй и первый ТГЭУ соответственно; 5 – среднее поле задающее кольцо; 6 – катод; 7 – защитная сетка ФЭУ; 8 – матрица из семи ФЭУ.

В разделе 4.2 описана регистрирующая электроника и триггер. Сигналы с матрицы МГЛФД поступали на каскад усилителей, смонтированных в коммутационном блоке, который был установлен непосредственно на разъем вакуумной рубашки детектора. В этом блоке также был смонтирован блок питания, обеспечивающий подачу необходимого напряжения смещения для каждого МГЛФД. Это было необходимо, поскольку рабочие напряжения смещения МГЛФД различались. Напряжения смещения были установлены приблизительно на 0.7 В выше точки пробоя. Сигналы с 16 усилителей (матрица состояла из 19 МГЛФД) оцифровывались с помощью двух 8-канальных 12-битных модулей VME VX1720 CAEN с частотой 200-мГц. Сигналы с матриц

ФЭУ оцифровывались двумя четырехканальными осциллографами LeCroy (500 мГц) и Tektronix с частотой (625 мГц).

В разделах 4.3 и 4.4 приведены результаты испытаний установки с одним и двумя ТГЭУ. При первом заполнении детектора жидким ксеноном время жизни электрона до захвата примесями составило  $\tau_e = 3.3 \pm 0.9$  мкс при напряженности поля 3.75 кВ/см. Время жизни было измерено усреднением большого числа электролюминесцентных сигналов мюонных событий и экстраполяцией экспоненциальной функцией. Такое низкое значение времени жизни было вполне ожидаемо, учитывая описанные выше потенциально загрязненные элементы детектора. При последующих заполнениях камеры время жизни электронов увеличилось до  $\tau_e = 10.1 \pm 1.3$  мкс.

На рис. 5 представлена осциллограмма суммарных сигналов с матриц ФЭУ и МГЛФД (испытания схемы с каскадом их двух ТГЭУ). Приведенная осциллограмма соответствует  $\gamma$ -кванту с энерговывделением  $\sim 15$  кэВ (480 извлеченных электронов из жидкой в газовую фазу, что соответствует  $\sim 7$  зарегистрированным фотоэлектронам на электрон первичной ионизации для матрицы ФЭУ).

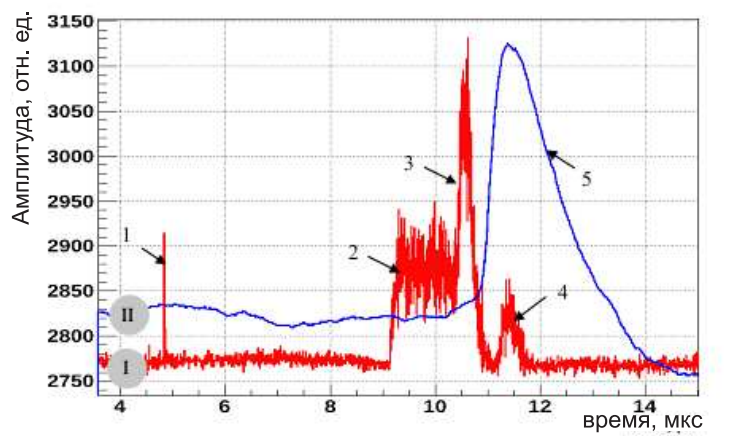


Рис. 5: Формы сигналов: красная линия (I) соответствует суммарному сигналу с матрицы ФЭУ, синяя линия (II) соответствует суммарному сигналу с матрицы МГЛФД. Сигнал (1) соответствует сцинтилляции в жидком ксеноне; сигнал (2) соответствует электролюминесценции в газовой фазе между поверхностью жидкого ксенона и первым ТГЭУ; сигнал (3), электролюминесценция в ТГЭУ1, сигнал (4), электролюминесценция в ТГЭУ2.

Величина электролюминесценции в ТГЭУ 2, зарегистрированной матрицей МГЛФД, в зависимости от напряженности поля показана на рис. 6. Также нанесены зависимости величины сигнала матрицы ФЭУ от электролюминесценции в ТГЭУ 1 и зависимость величины сигнала матрицы ФЭУ от электролюминесценции в ТГЭУ 2. Сигналы нормированы к электролюминесценции в газовой фазе, поскольку в эксперименте не было технической возможности использовать радиоактивный источник в объеме детектора.

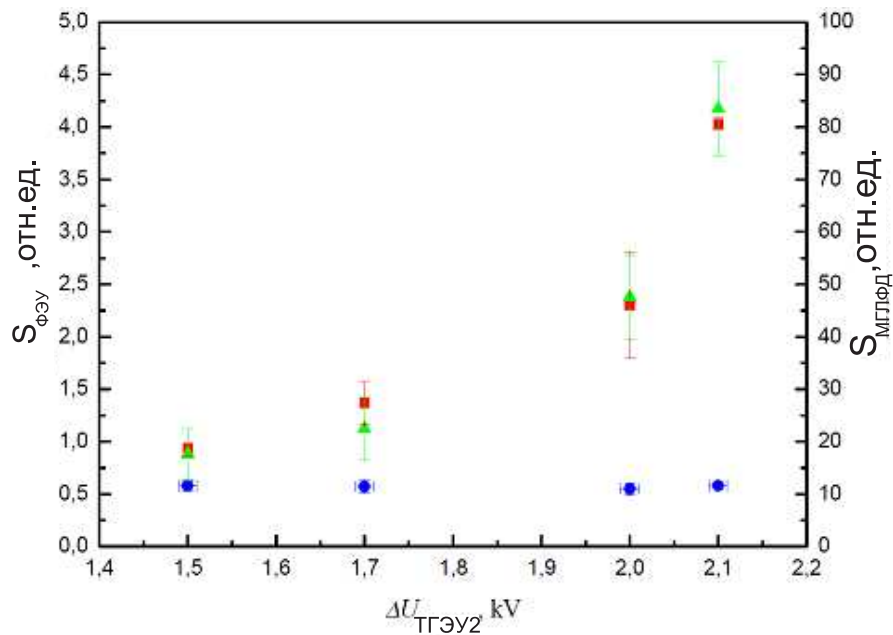


Рис. 6: Зависимость величин(площадей) сигналов с ТГЭУ 1 и ТГЭУ 2 от разности потенциалов на ТГЭУ2. Синие и красные точки – величина сигнала, полученного с матрицы ФЭУ, источники сигнала - 1й ТГЭУ и 2й ТГЭУ (левая шкала); зеленые точки – величина сигнала, полученного с матрицы МГЛФД, источник сигнала - ТГЭУ 2 (правая шкала)

Раздел 4.5 посвящен восстановлению координат методом центра масс, моделированию светосбора фотоприемниками и оценке чувствительности. Важнейшей характеристикой двухфазного детектора является позиционная чувствительность. Вследствие того, что не было технической возможности использовать точечный радиоактивный источник в объеме детектора, координатное разрешение было оценено путем сравнения восстановленных координат для одних и тех же событий, записанных системой ТГЭУ + спектросмеситель + МГЛФД и восстановленных координат с помощью матрицы ФЭУ, а также сравнением экспери-



ментальных данных с данными, полученными моделированием методом Монте – Карло. Моделирование также было необходимо для корректного восстановления координат событий (Метод Центра масс). Энергия модельных событий близка к энергии записанных событий в выделенной для обработки области энергии ( $\sim 15$  кэВ). На рис. 7 представлены распределения разности между исходными и восстановленными координатами (по одной из осей,  $Y$ ) после коррекции [10] для обеих матриц.

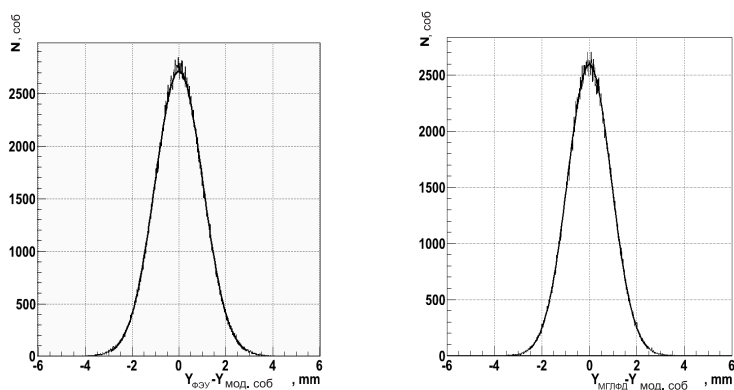


Рис. 7: Распределение разностей координат по оси  $Y$  между событиями, полученными методом Монте–Карло для матрицы ФЭУ (слева) и матрицы МГЛФД (справа)

Координатное разрешение ( $\sigma$ ) соответствует  $1.026 \pm 0.001$  мм и  $0.926 \pm 0.002$  мм соответственно. Распределение разности координат по оси  $Y$  для одних и тех же событий, записанных с помощью матриц ФЭУ и МГЛФД, показано на рис. 8 для модельных и экспериментальных событий (слева и справа соответственно).

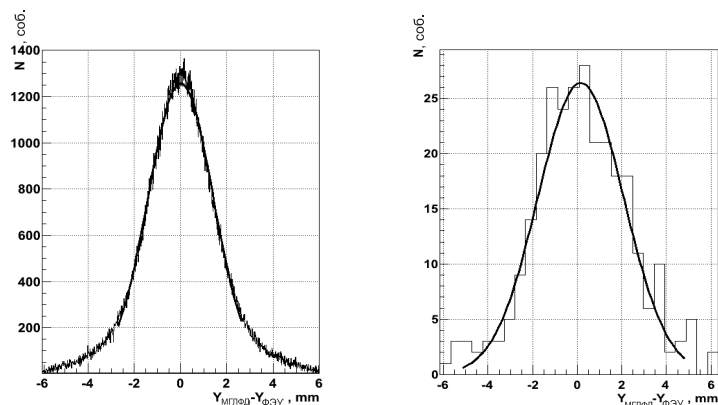


Рис. 8: Моделированное методом Монте-Карло (слева) и экспериментальное (справа) распределение разностей координат, полученных с помощью матриц ФЭУ и МГЛФД

Стандартное среднеквадратичное отклонение для этих величин составило  $1,357 \pm 0,003$  мм и  $1,869 \pm 0,147$  мм для модельных и экспериментальных данных соответственно. Экспериментально полученное значение шире модельного, но несущественно. Из этого можно сделать вывод, что координатное разрешение для матрицы МГЛФД составляет величину, близкую к модельной, т.е.  $\sim 1$  мм.

Из анализа записанных величин сигналов была получена величина чувствительности системы ТГЭУ + спектроместитель + матрица МГЛФД к ионизационному сигналу, которая составила  $0,75 \pm 0,1$  ячеек/электрон (при максимальном усилении ТГЭУ). Данная величина была получена при рабочем напряжении МГЛФД, не являющимся оптимальным для достижения максимальной эффективности регистрации фотонов. Другим факто-

ром, заметно снижающим общую величину чувствительности, является небольшой коэффициент заполнения (геометрический фактор). Учет этих факторов дает оценку достижимой величины чувствительности  $\sim 20$  ячеек/электрон. Эта цифра может быть существенно увеличена (до  $\sim 50$  ячеек/электрон) если использовать последние разработки МГЛФД фирмы КЕТЕК[11].

В **заключении** подведены итоги проделанной работы и суммированы полученные результаты.

- Эффективность регистрации (PDE) для системы "МГЛФД + спектросместитель" составила  $\sim 10\%$ .
- Успешно протестирована защита р-терфинила, предотвращающая загрязнение ксенона электроотрицательными примесями; время жизни электронов составило  $\sim 10$  мкс.
- Успешно протестирован переизлучатель большой площади с защитным слоем в двухфазном детекторе.
- Продемонстрирована работа ТГЭУ в ксеноне (электролюминесцентное усиление).
- Показана работоспособность многоканальной системы лавинных Гейгеровских фотодиодов в криогенном детекторе на благородном газе (впервые в мировой практике).
- Экспериментально оценено координатное разрешение системы ТГЭУ + спектросместитель + МГЛФД, которое соста-

вило  $\sim 1$  мм ( $\sigma$ ).

- Экспериментально оценена чувствительность тестируемой системы ТГЭУ + спектросместитель + МГЛФД к ионизационному сигналу — она составила  $0,75 \pm 0,1$  ячеек/электрон.

## Список публикаций автора по теме диссертации

- [1] D. Yu. Akimov, A.V. Akindinov, I.S. Alexandrov et al. Detection of scintillation light in liquid xenon by multipixel avalanche Geiger photodiode and wavelength shifter. 2010 JINST 5 P04007 doi:10.1088/1748-0221/5/04/P04007
- [2] D.Yu. Akimov, A.V. Akindinov, I.S. Alexandrov et al. Two-phase xenon emission detector with electron multiplier and optical readout by multipixel avalanche Geiger photodiodes. (arXiv:1303.7338) Published in JINST 8 (2013) P05017

## Цитируемая литература

- [1] С.М.В. Monteiro, L.M.P. Fernandes, J.A.M. Lopes et al. Secondary scintillation yield in pure xenon. J. Inst., 2 P05001, 2007
- [2] D.Yu. Akimov, I.S. Alexandrov, V.I. Aleshin et al. Perspectives to measure neutrino-nuclear neutral current coherent scattering with two-phase emission detector. arXiv:1212.1938
- [3] A. Buzulutskov, Advances in Cryogenic Avalanche Detectors, 2012 JINST 7 C02025, [arXiv:1112.6153]
- [4] P.K. Lightfoot, G.J. Barker, K. Mavrokoridis et al., Optical readout tracking detector concept using secondary scintillation from liquid Argon generated by a thick gas electron multiplier, 2009 JINST 4 P04002. [arXiv:0812.2123].
- [5] Гасанов А.Г., Головин В.М., Садыгов З.Я., Юсипов Н.Ю., Патент 1702831 РФ; Садыгов З.Я. Патент 2102820 РФ; Головин В.М., Тарасов М.Л., Бондаренко Г.Б., Патент 2142175 РФ;
- [6] F. Sauli, GEM: A new concept for gas amplification in gas detectors, Nucl. Instrum. Meth. A 386 (1997), 531.
- [7] АКИМОВ Д.Ю., АКИНДИНОВ А.В., БУРЕНКОВ А.А. и др. Тесты многопиксельных гейгеровских фотодиодов в жидком и га-

зообразном ксеноне. Приборы и техника эксперимента, 2009  
№3, с. 1-7

- [8] D.Yu. Akimov, A V Akindinov, I S Alexandrov et al., Detection of scintillation light in liquid xenon by multipixel avalanche Geiger photodiode and wavelength shifter, 2010 JINST 5 P04007
- [9] C. Shalem, R. Chechik, A. Breskin et al. Advances in thick GEM-like gaseous electron multipliers. Part I: Atmospheric pressure operation, Nucl. Instrum. Meth. A 558 (2006), 475
- [10] D.Yu. Akimov, A.V. Akindinov, I.S. Alexandrov et al. Two-phase xenon emission detector with electron multiplier and optical readout by multipixel avalanche Geiger photodiodes. [arXiv:1303.7338] JINST 039P 0313
- [11] KETEK company website, [www.ketek.net](http://www.ketek.net).