

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ДЕМОСТРАЦИОННОГО И УЧЕБНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 53.07:53.082.77:53.082.77

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ГАЗООБРАЗНОМ КСЕНОНЕ

© 2022 г. Д. Ю. Акимов^{а,*}, А. И. Болоздыня^а,
Д. М. Архангельский^а, А. В. Пинчук^а

^а *Национальный исследовательский ядерный университет “Московский инженерно-физический институт”
Россия, 129337, Москва, Каширское ш., 31*

**e-mail: DYakimov@mephi.ru*

Поступила в редакцию 11.04.2022 г.

После доработки 02.05.2022 г.

Принята к публикации 04.05.2022 г.

Описана лабораторная экспериментальная установка на основе электролюминесцентной камеры с газообразным ксеноном при комнатной температуре и давлении 6 атм, которая используется в учебном процессе для изучения электролюминесценции, применяемой в качестве метода регистрации ионизационного сигнала. На примере α -частиц исследованы формирование электролюминесцентного сигнала, образуемого при движении в сильном электрическом поле заряда, произведенного в процессе ионизации, и его зависимость от величины поля. Наглядно показано, что временные профили светового и электрического сигналов практически полностью совпадают друг с другом.

DOI: 10.31857/S0032816222050147

1. ВВЕДЕНИЕ

Благородные газы (как правило, аргон и ксенон в газообразном и конденсированном состояниях) широко используются для регистрации ионизирующих частиц. Среди них ксенон имеет наибольшую плотность и заряд атомного ядра, в связи с чем он используется в γ -спектрометрах [1–3], хотя и уступающих полупроводниковым детекторам по энергетическому разрешению и эффективности регистрации, однако значительно превосходящих их по удобству работы. В фундаментальной физике ксенон в качестве рабочей среды применяют в основном в электромагнитных калориметрах и в эмиссионных двухфазных детекторах для регистрации частиц темной материи (WIMP – Weakly Interacting Massive Particles) и нейтрино [4, 5]. В последних для измерения величины выделившегося заряда используют процесс электролюминесценции – испускания световых фотонов электронами, движущимися в газообразном ксеноне (газовой фазе такого детектора) в сильном электрическом поле. Применение регистрации электролюминесценции обеспечивает беспрецедентную чувствительность двухфазных эмиссионных детекторов к величине регистрируемого электрического заряда вследствие большого числа фотонов, испускаемых каждым движущимся электроном. Благодаря этому обеспечивается рекордно низкий энергетический порог детектора, практически соответству-

ющий эффективной энергии, затраченной на образование одного регистрируемого электрона. И это происходит даже при очень большой массе детектора (до нескольких и даже десятков тонн), обеспечиваемой за счет заполнения рабочего объема детектора конденсированным газом.

Лабораторная установка, описанная в данной работе, создана для наглядной демонстрации студентам процесса регистрации электрического заряда, выделившегося в рабочем объеме ксеноновой камеры, путем детектирования световых фотонов фотоумножителем. Установка полностью воспроизводит принцип работы регистрирующей системы двухфазного эмиссионного детектора. Единственным принципиальным отличием ее от двухфазного эмиссионного детектора является заполнение рабочего объема газообразным ксеноном при комнатной температуре, а не конденсированным (жидким), который может существовать только при криогенных температурах. В двухфазном эмиссионном детекторе электроны, образованные в жидкой фазе, попадают в газовую фазу в результате процесса эмиссии под действием приложенного электрического поля. В остальном процессы регистрации частиц в таком детекторе и камере описываемой лабораторной установки практически идентичны.

2. ПРОЦЕССЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В УСТАНОВКЕ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ИОНИЗАЦИИ

Сцинтилляция. При взаимодействии заряженной частицы с благородным газом происходит возбуждение атомов (образование Xe^*) и их ионизация (образование электрон-ионных пар $e^- + \text{Xe}^+$). Частичная рекомбинация электронов и ионов в приложенном электрическом поле также приводит к образованию возбужденных атомов. В процессе столкновений с другими атомами происходит образование возбужденных молекул Xe_2^* — димеров в двух состояниях: синглетном и триплетном с соответствующими временами жизни 3 и 27 нс. Их распад происходит с испусканием фотонов с длиной волны 173 нм (область вакуумного ультрафиолета (ВУФ)). Форма сцинтилляционного сигнала определяется соотношением вклада компонент распада синглетного и триплетного состояний, а также скоростью процесса рекомбинации, которые, в свою очередь, зависят от плотности газа и плотности ионизации.

Электролюминесценция. Электроны, избежавшие рекомбинации, ускоряясь под действием электрического поля между столкновениями с атомами, производят возбужденные атомы Xe^* , которые, как и в описанном выше процессе сцинтилляции, образуют возбужденные молекулы ксенона Xe_2^* , распад которых приводит к образованию ВУФ-фотонов. Для процесса электролюминесценции характерны следующие свойства: количество образовавшихся фотонов пропорционально длине пути, проходимого электронами, и, очевидно, количеству электронов. В связи с этим в литературе (преимущественно иностранной) встречается также другое название процесса электролюминесценции — пропорциональная сцинтилляция. Также другим, довольно часто употребляемым названием является вторичная сцинтилляция.

Число фотонов электролюминесценции, испускаемых одним электроном в электрическом поле напряженностью E в зазоре d между электродами, может быть описано следующей эмпирической формулой:

$$N_{\phi} = ax(E/n) + bx, \quad (1)$$

где n — объемная концентрация атомов, $x = nd$ — число атомов на единицу площади в электролюминесцентном зазоре толщиной d ; коэффициенты a и b , согласно работе [6], равны: $a = 0.140 \text{ В}^{-1}$, $b = -4.74 \cdot 10^{-18} \text{ см}^2/\text{атом}$.

Выражение (1) также может быть записано в виде:

$$N_{\phi} = 140(E/p - 0.83) \text{ см}^{-1}, \quad (2)$$

где p , атм — давление газа; E , кВ/см — напряженность электрического поля.

Необходимо отметить, что приведенные коэффициенты получены экспериментально для ксенона с высокой степенью очистки от различных газообразных примесей. При наличии молекулярных примесей абсолютный световой выход электролюминесценции снижается, а пороговое значение E/p (приведенное поле) увеличивается вследствие того, что столкновения электронов с ними приводят к потерям энергии за счет возбуждения вращательных и колебательных молекулярных состояний примесей, де-возбуждение которых происходит без излучения света. При регистрации света фотоприемниками необходимо учитывать коэффициент светосбора на поверхность фотоприемника и квантовую эффективность фотоприемника для фотонов с данной длиной волны.

Оба световых сигнала, сцинтилляционный и электролюминесцентный, регистрируются при помощи фотоприемника, в нашем случае — фотоэлектронного умножителя.

Образование наведенного электрического заряда. При движении в промежутке между электродами электронов, образованных при ионизации рабочей среды, на рассматриваемом электроде образуется наведенный электрический ток, который в каждый конкретный момент времени пропорционален, согласно теореме Шокли—Рамо [7], заряду, находящемуся между электродами, и скалярному произведению векторов скорости движения заряда и напряженности приведенного электрического поля, полученной при условии, что данный заряд в рассматриваемой точке отсутствует, а все остальные электроды заземлены. Полный собранный наведенный заряд измеряется при помощи зарядочувствительного преусилителя (ЗЧПУ), подсоединенного к аноду.

3. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Экспериментальная установка для изучения электролюминесценции в газообразном ксеноне состоит из следующих элементов (рис. 1): электролюминесцентной камеры с фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), источников высоковольтного питания, а также сглаживающих пульсации фильтров для подачи высоковольтных потенциалов на электроды камеры, источника высоковольтного питания ФЭУ, вольтметра для измерений напряжений питания и цифрового осциллографа.

Электролюминесцентная камера (рис. 2) представляет собой толстостенный цилиндрический сосуд из нержавеющей стали, рассчитанный на высокое давление газа (до 30 атм), с оптическим окном из плавленого кварца, прозрачным в области ВУФ. В камере расположены электроды: сетчатые оптически прозрачные анод и земляной

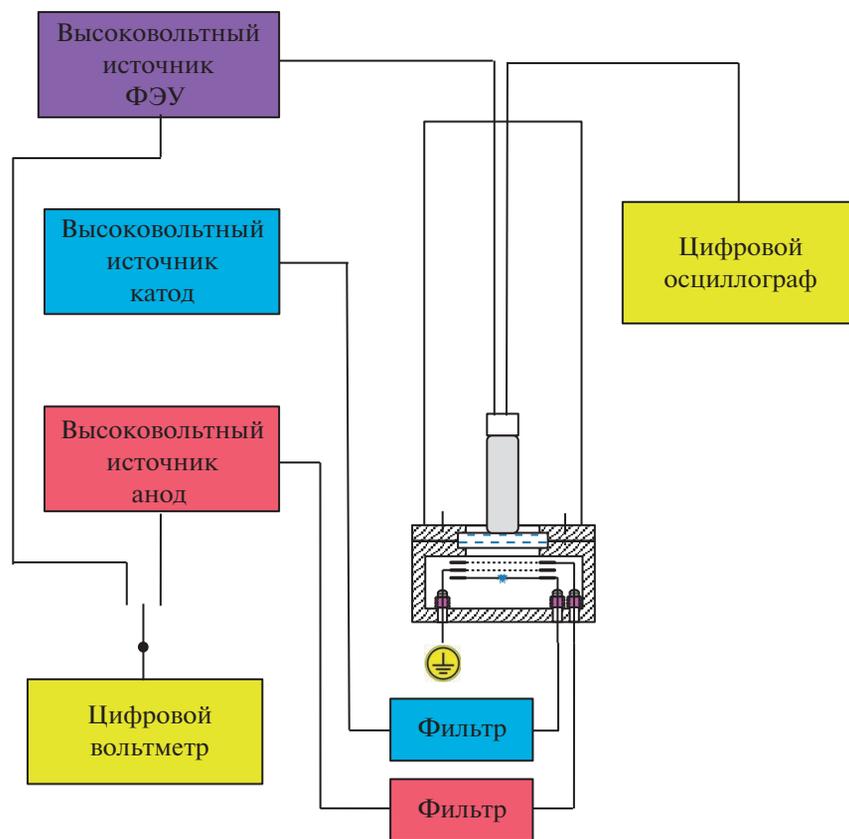


Рис. 1. Схема лабораторной экспериментальной установки для изучения электролюминесценции газообразного ксенона (вариант без ЗЧПУ).

электрод (последний будем называть далее сеткой), а также сплошной катод. Сетчатые электроды намотаны нержавеющей проволокой диаметром 0.1 мм с шагом 1 мм. Расстояние между анодом и заземленной сеткой – 5 мм, между сеткой и катодом – 5 мм. На анод и катод подаются потенциалы величиной до +5 и –5 кВ соответственно. Объем между катодом и сеткой обычно называют дрейфовым или рабочим объемом. На поверхность катода в его центральной части методом химического осаждения нанесен изотоп ^{239}Pu , испускающий α -частицы с энергией 5.15 МэВ; источник закрыт защитной пленкой из MgF_2 . Пробег α -частиц с такой энергией в ксеноне (около 3 мм при давлении 6 атм) полностью укладывается между катодом и заземленной сеткой. Образованные в процессе ионизации газа α -частицей электроны движутся в электрическом поле по направлению к сетке и, далее, попадают в зазор между сеткой и анодом. Если напряженность электрического поля выше порогового значения (см. выше), то наблюдается электролюминесценция в газе. Фотоны электролюминесценции, а также сцинтилляции регистрируются через оптическое окно фотоэлектронным умножителем (ФЭУ-181), имеющим входное окно из MgF_2 ,

прозрачное в области ВУФ. Фотоэлектронный умножитель изолирован от внешнего света светонепроницаемым кожухом.

4. ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ ГАЗООБРАЗНОГО КСЕНОНА

4.1. Изучение формы электролюминесцентного сигнала

Данная часть работы является ознакомительной. В ней демонстрируется, как происходит образование электролюминесцентного сигнала, как получается наблюдаемая форма импульса и как она зависит от ориентации трека α -частицы в пространстве.

Форма импульса, показанная на рис. 3, является характерной для электролюминесцентных камер, в которых имеются две области: дрейфовая (рабочая) область (объем, промежуток) между катодом и сеткой, в которой происходит взаимодействие частиц и дрейф электронов, и электролюминесцентная (между сеткой и анодом), в которой происходит электролюминесценция, регистрируемая фотоприемниками. В данном примере на катод и анод камеры поданы потенциалы –1.0

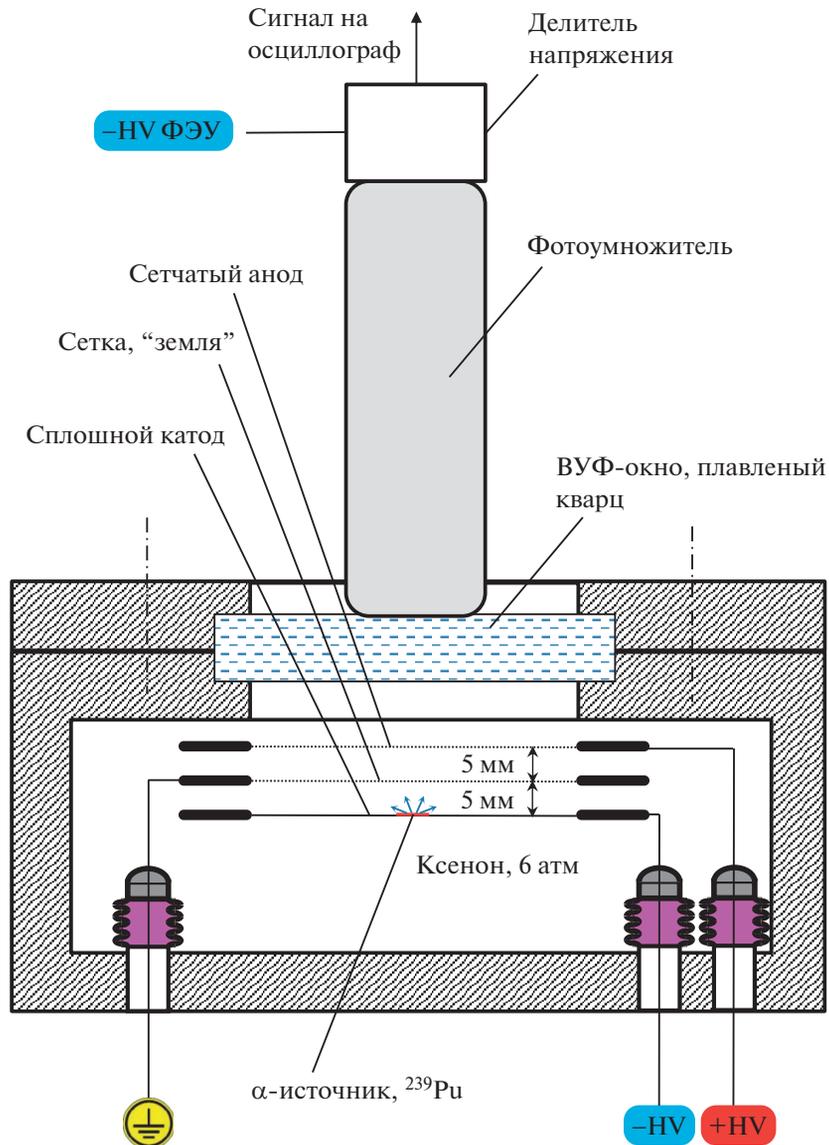


Рис. 2. Схема электролюминесцентной камеры.

и +5.0 кВ соответственно, что определяет значения приведенного поля E/p : 0.33 и 1.67 кВ · см⁻¹ · атм⁻¹ в промежутках катод–сетка и сетка–анод соответственно. На осциллограмме видна сцинтилляция (значительно меньшая по величине, чем электролюминесценция), момент появления которой практически совпадает с моментом взаимодействия α-частицы с ксеноном, и электролюминесценция, образованная движущимся облаком электронов в промежутке сетка–анод. При движении электронов в более слабом электрическом поле между катодом и сеткой электролюминесценция практически отсутствует. В газообразном ксеноне при давлении 6 атм α-частица с энергией ~5 МэВ имеет пробег около 3 мм (см. выше), а ее трек практически прямолинеен. Эти характери-

стики трека определяют наблюдаемую форму импульса электролюминесценции. Форма импульса зависит также от направления вылета α-частицы. В случае вертикального трека временной интервал между сцинтилляцией и началом электролюминесценции, соответствующим появлению первых электронов в электролюминесцентном промежутке, минимален, и электролюминесцентный сигнал имеет максимальную продолжительность по времени.

В случае, показанном на рис. 3, угол между направлением вылета α-частицы и вертикалью значителен (направление вылета ближе к горизонтальному), и импульс более приближен по форме к импульсу, характерному для точечного заряда, образованного вблизи катода. Для такого точеч-

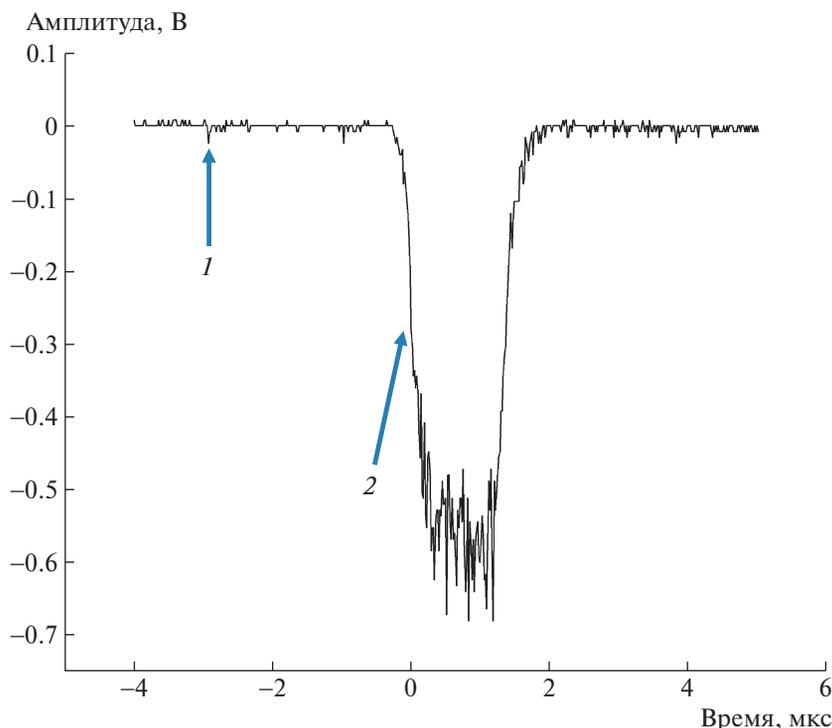


Рис. 3. Характерный сигнал с фотоумножителя при напряжениях на аноде и катоде +5 и –1 кВ соответственно. 1 – сцинтилляция, 2 – электролюминесценция.

ного заряда временной интервал между сцинтилляцией и началом электролюминесцентного импульса максимален, а форма импульса в идеальном случае (без учета расплывания облака электронов в процессе дрейфа) является прямоугольной. Размытие облака электронов приводит к “трапецевидной” форме импульса. “Дребезг” в нижней части сигнала обусловлен флуктуацией количества фотоэлектронов, образованных на фотокатоде ФЭУ. Небольшой наклон “плоской” части сигнала обусловлен увеличением телесного угла светосбора от светящейся области по мере приближения облака электронов к фотокатоду ФЭУ. Следует отметить, что временной интервал от начала сцинтилляции до конца электролюминесцентного сигнала для всех углов вылета α -частицы практически одинаков (~4.5 мкс) и определяется временем дрейфа от катода до анода электронов, образовавшихся в непосредственной близости к катоду.

4.2. Изучение зависимости световыхода электролюминесценции от напряженности электрического поля

Исследование зависимости величины электролюминесцентного сигнала от напряженности электрического поля проводится в двух независимых промежутках – между сеткой и анодом и между катодом и сеткой.

Для исследования зависимости величины электролюминесцентного сигнала от напряженности электрического поля в промежутке между сеткой и анодом на анод подается потенциал в интервале значений 3.5–5.0 кВ с шагом 0.25 кВ; при этом на катод подан потенциал –1 кВ. В этом интервале величина сигнала является достаточной, чтобы триггер осциллографа однозначно срабатывал по нарастающей части сигнала. Это дает возможность с хорошей точностью определить величину сигнала методом усреднения большого числа отдельных осциллограмм и измерения амплитуды усредненного сигнала при помощи курсора на экране осциллографа либо путем математического анализа записанного усредненного сигнала. Аналогичным образом осуществляется измерение зависимости величины электролюминесцентного сигнала от напряженности электрического поля в промежутке между катодом и сеткой (в интервале значений от –3.5 до –5.0 кВ с шагом 0.25 кВ); при этом потенциал на аноде может иметь любое значение, поскольку измеряемая электролюминесценция начнется сразу после образования ионизационных электронов.

Для измерения величины электролюминесцентного сигнала от напряженности электрического поля в промежутке между катодом и сеткой при разности потенциалов менее 3.5 кВ необходимо поменять режим триггера осциллографа. Это связано с трудностями в выработке триггера,

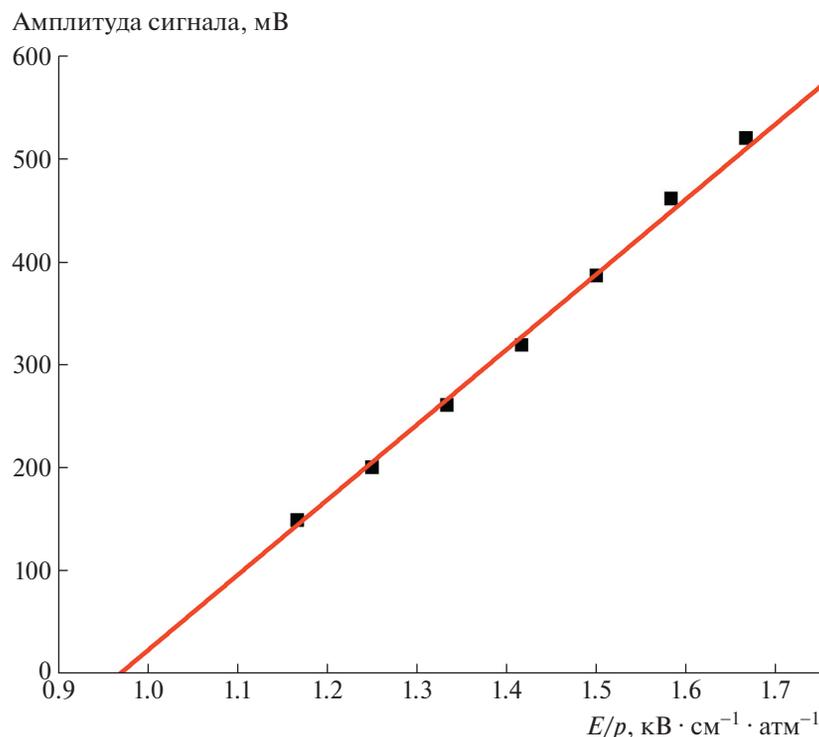


Рис. 4. Зависимость величины электролюминесцентного сигнала от E/p в промежутке сетка–анод.

привязанного к началу сигнала, вследствие значительных статистических флуктуаций формы сигнала при меньшем количестве света. Для этого на анод подается +5.0 кВ для получения большого электролюминесцентного сигнала в промежутке сетка–анод, по которому будет удобно вырабатывать триггер осциллографа. На катод подается потенциал в интервале значений от –2.0 до –3.75 кВ с шагом 0.25 кВ. Начальный участок сигнала будет соответствовать электролюминесценции в промежутке катод–сетка. Уровень триггера не принципиален, но он должен превышать отдельные статистические “выбросы” сигнала в промежутке катод–сетка. При усреднении сигналов будет наблюдаться ступенька, величина которой соответствует величине электролюминесценции в промежутке катод–сетка. Данные в диапазоне от –2.0 до –3.75 кВ необходимо “сшить” по двум точкам (при –3.5 кВ и –3.75 кВ) с данными, полученными в предыдущем режиме измерения.

В каждом из указанных диапазонов измерений ошибки измеренных величин оцениваются выборочно для нескольких точек, исходя из разброса значений, полученных для нескольких последовательных усреднений сигналов при одних и тех же потенциалах на электродах.

По полученным экспериментальным данным строятся зависимости величины электролюминесцентного сигнала от значения приведенного электрического поля E/p и проводится аппрокси-

мация экспериментальных точек линейной зависимостью (формула (2)) в области значений приведенного поля $E/p > 1.15$ кВ · см⁻¹ · атм⁻¹ (см. в качестве примера рис. 4, 5). Ошибки измерений в приведенных примерах не превышают размеры точек на графиках.

Аппроксимация экспериментальных точек линейной зависимостью в приведенных примерах дает следующие пороговые значения E/p :

$E/p = 1.02 \pm 0.09$ кВ · см⁻¹ · атм⁻¹ для промежутка катод–сетка,

$E/p = 0.97 \pm 0.06$ кВ · см⁻¹ · атм⁻¹ для промежутка сетка–анод.

Полученные значения несколько превышают пороговое значение $E/p = 0.83$, приведенное в разделе 1. Причиной расхождения, по всей видимости, может быть наличие примесей легких газов (например, водорода или азота) вследствие того, что камера находится в заполненном состоянии в течение нескольких лет без дополнительной очистки ксенона. Такие примеси могут перехватывать энергию электронов в процессе их ускорения в электрическом поле в межатомных промежутках и, как следствие, увеличивать пороговое значение E/p .

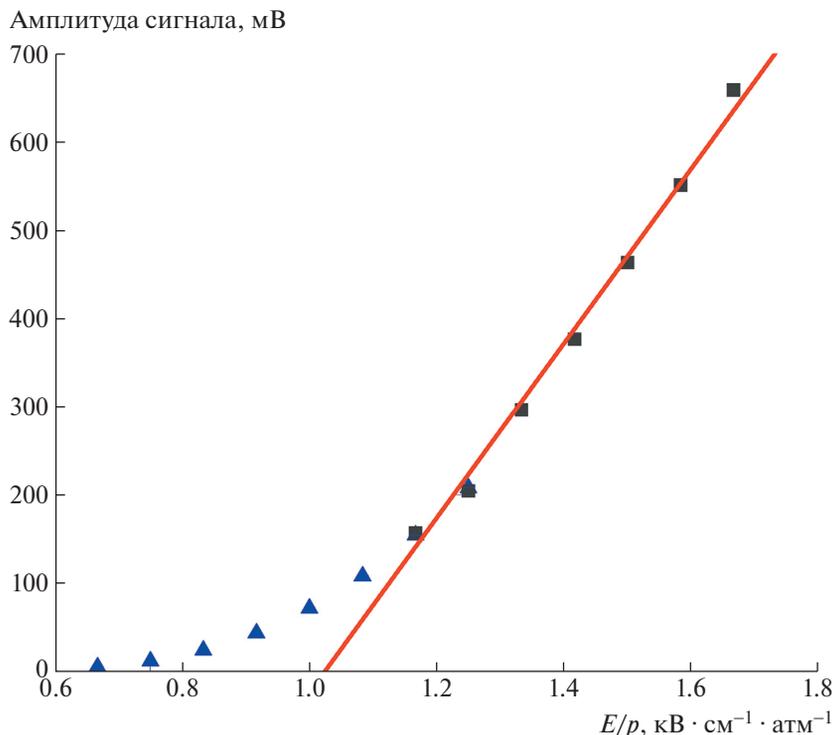


Рис. 5. Зависимость величины электролюминесцентного сигнала от E/p в промежутке катод–сетка при различных режимах измерения (см. текст).

4.3. Изучение соответствия электролюминесцентного и электрического сигналов

В данной части лабораторной работы будет показано, что электролюминесцентный и электрический (токовый) сигналы практически полностью идентичны друг другу. Поскольку ЗЧПУ удобнее и безопаснее использовать при подключении к электроду с нулевым потенциалом, он подключается непосредственно к аноду камеры, а источники высоковольтного питания переподключаются к электродам камеры в соответствии со схемой, представленной на рис. 6. При этом высоковольтный источник, питающий сетку, должен иметь отрицательную полярность. На катод и сетку подаются потенциалы -4.0 и -1.0 кВ соответственно. Сигналы с ФЭУ и ЗЧПУ подаются на два разных канала цифрового осциллографа. Запуск осциллографа можно осуществлять как по тому, так и по другому сигналу.

В приведенном ниже примере запуск осуществлялся по сигналу с ЗЧПУ. На рис. 7 кривая 1 соответствует усредненному по 512 запускам сигналу с ЗЧПУ. В связи с тем что ЗЧПУ имеет цепь разряда с постоянной времени ~ 70 мкс, для получения истинного зарядового сигнала с анода (кривая 2 на рис. 7) осуществляется математическая коррекция сигнала с применением алгоритма, описанного, например, в [8]. Форма импульса

тока на аноде камеры получается дифференцированием скорректированного сигнала. Она показана на рис. 8 (кривая 1). На этом же рисунке показана усредненная форма электролюминесцентного импульса (кривая 2) в промежутке между электродами сетка–анод. Токковый сигнал дан в относительных единицах и нормирован в пиковом значении к амплитуде электролюминесцентного сигнала с ФЭУ, измеренной в милливольтках.

Данный пример наглядно демонстрирует, что формы электролюминесцентного и токового сигналов с камеры практически идентичны друг другу.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Электролюминесцентную камеру можно рассматривать как упрощенный однофазный аналог современных двухфазных эмиссионных детекторов, используемых для поиска темной материи и регистрации нейтрино [2]. Существенным отличием двухфазного эмиссионного детектора от исследуемой камеры является заполнение его рабочего объема конденсированным (жидким) благородным газом, находящимся при криогенных температурах. Это дает увеличение плотности вещества в рабочем объеме в несколько сотен раз. Электроны, образованные в жидкой фазе, попадают в газовую фазу в результате процесса эмиссии под действием приложенного электрического

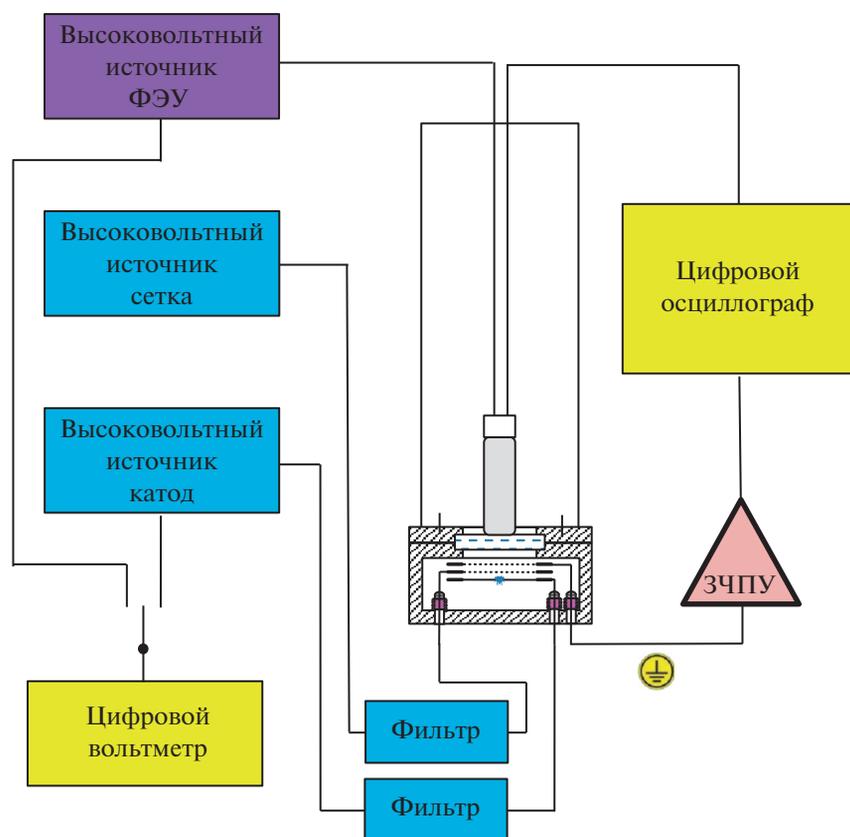


Рис. 6. Схема лабораторной экспериментальной установки для изучения электролюминесценции газообразного ксенона (вариант с ЗЧПУ).

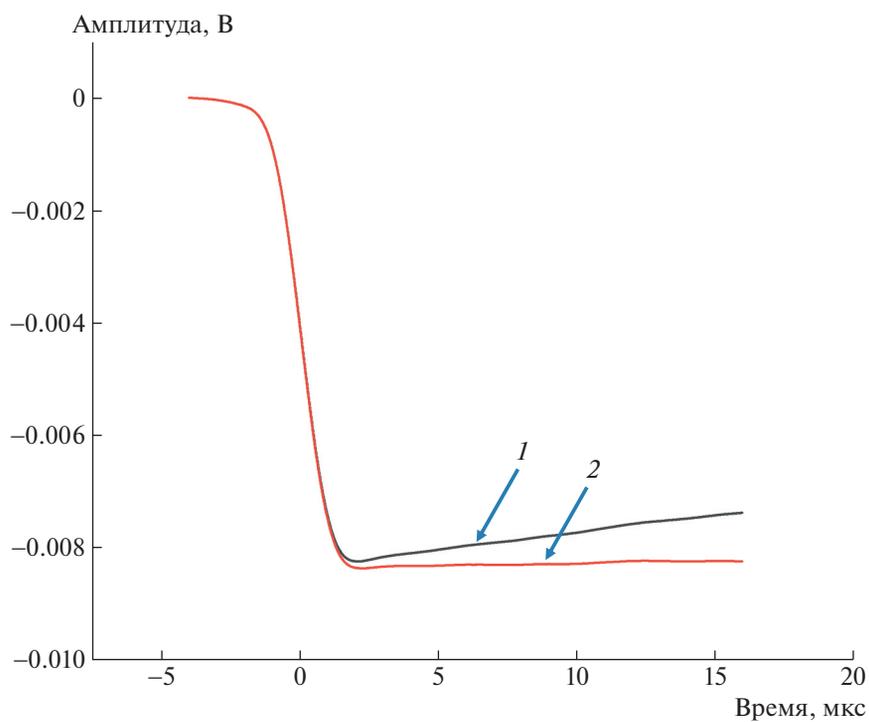


Рис. 7. Усредненный сигнал с ЗЧПУ: 1 – до и 2 – после математической коррекции.

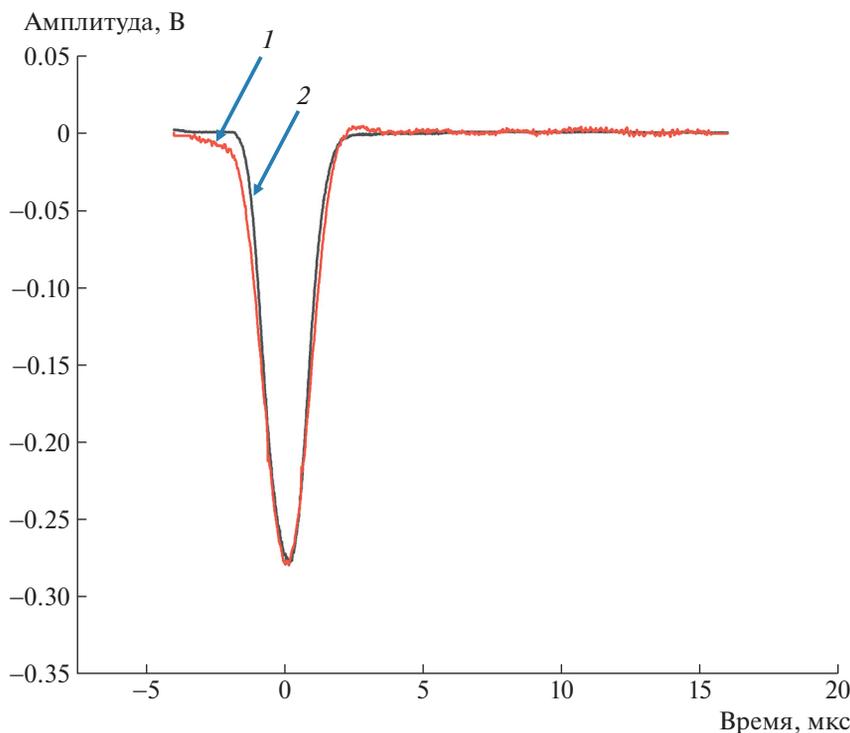


Рис. 8. Токковый (1, см. текст) и усредненный электролюминесцентный (2) сигналы.

поля. В остальном процессы регистрации электролюминесценции в таком детекторе и исследуемой камере практически идентичны.

В приведенной лабораторной работе запись и исследование сигналов с электролюминесцентной камеры осуществляются при помощи цифрового осциллографа. Изучается форма электролюминесцентного сигнала и исследуется зависимость его величины от напряженности электрического поля. Показано, что формы токового сигнала, измеренного при помощи зарядочувствительного предусилителя, и электролюминесцентного сигнала практически совпадают.

Описанную установку можно использовать для изучения электролюминесценции как в чистом ксеноне, так и в смесях различных благородных газов. В настоящее время установка используется в НИЯУ МИФИ для проведения лабораторных работ в сопровождение магистерских курсов по направлению “Ядерные физика и технологии”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РФ (проект “Фундаментальные свойства элементарных частиц и космология” № 0723-2020-0041) за поддержку данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bourguille B., Garcia Soto A., Gil-Botella I., Lux T., Palomares C., Sanchez F., Santorelli R. // JINST. 2015. V. 10. C12016. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/12/C12016>
2. Manzo G., Giarrusso S., Santangelo A., Ciralli F., Fazio G., Piraino S. and Segreto A. // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1997. V. 122. P. 341. <https://doi.org/10.1051/aas:1997139>
3. Улин С.Е., Дмитренко В.В., Грачев В.М. // ПТЭ. 1995. № 4. С. 46.
4. Aprile E., Bolotnikov A., Bolozdynya A., Doke T. Noble Gas Detectors. Weinheim: GmbH Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
5. Akimov D. Yu., Bolozdynya A. I., Buzulutskov A. F., Chepel V. I. Two-Phase Emission Detectors. World Scientific Publishing Company, 2021.
6. Monteiro C.M.B., Fernandes L.M.P., Lopes J.A.M., Coelho L.C.C., Veloso J.F.C.A., dos Santos J.M.F., Giboni K., Aprile E. // JINST. 2007. V. 2. P05001. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/2/05/P05001>
7. Теорема Шокли–Рамо. Википедия. https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шокли_-_Рамо
8. Зейналова О.В., Зейналов Ш.С., Хамби Ф.Й., Оберстедт С. // Известия РАН. Серия физическая 2009. Т. 73. № 4. С. 533.