

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

# **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

*Комплекс лабораторных работ*

Учебное пособие

*Под редакцией А.И. Болоздыни*

Москва 2023

УДК 539.1.07  
ББК 22.38  
Э41

**Экспериментальные методы ядерной физики. Комплекс лабораторных работ:** Учебное пособие / Под ред. А.И. Болоздыни. – М.: НИЯУ МИФИ, 2023. – 104 с.

*Авторы:* Д.Ю. Акимов, Д.М. Архангельский, В.А. Белов, А.И. Болоздыня, А.В. Галаванов, И.Г. Григорьева, В.А. Каплин, Е.С. Козлова, А.М. Коновалов, А.В. Кумпан, Ю.А. Меликян, П.Ю. Наумов, А.В. Пинчук, Д.Г. Рудик, Г.Х. Салахутдинов, В.В. Сосновцев, А.В. Хромов, А.В. Шакиров

Комплекс лабораторных работ по экспериментальным методам ядерной физики основан на материально-технической базе и поддержке персонала межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики ИЯФит НИЯУ МИФИ.

Пособие предназначено для магистерских курсов по направлению 14.04.02 «Ядерные физика и технологии».

Рецензент д-р физ.-мат. наук, проф. *А.С. Савёлов*

ISBN 978-5-7262-2908-9

© *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023*

Редактор М.В. Макарова

Подписано в печать 14.12.2022. Формат 60x84 1/16.

Уч.-изд. л. 6,5. Печ. л. 6,5. Тираж 50 экз.

Изд. № 025-1. Заказ № 73.

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Типография НИЯУ МИФИ  
115409, Москва, Каширское ш., 31.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	4
<b>ЧАСТЬ 1. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ</b> .....	5
1.1. Амплитудный анализ сигналов, считываемых с детекторов ядерных излучений.....	5
1.2. Использование цифрового осциллографа для амплитудных и временных измерений .....	23
<b>ЧАСТЬ 2. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ</b> .....	34
2.1. Измерение основных характеристик ФЭУ .....	34
2.2. Измерение временных параметров ФЭУ .....	40
<b>ЧАСТЬ 3. ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ КСЕНОНА</b> .....	55
3.1. Электролюминесцентная камера на газообразном ксеноне.	55
3.2. Компьютерное моделирование ионизационных сигналов в жидкоксеноновом детекторе с помощью пакета программ NOBLE ELEMENT SIMULATION TECHNIQUE (NEST) .....	79
<b>ЧАСТЬ 4. ГАЗОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ</b> .....	89
4.1. Спектрометрические характеристики трёхкаскадного газового электронного усилителя .....	89

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

Предлагаемый комплекс лабораторных работ основан на материально-технической базе и поддержке персонала межкафедральной лаборатории экспериментальной ядерной физики ИЯФиТ НИЯУ МИФИ и разработан для сопровождения магистерских курсов по направлению 14.04.02 «Ядерная физика и технологии»:

- 1) «Физика элементарных частиц»;
- 2) «Экспериментальные методы ядерной физики»;
- 3) «Физика мюонов космических лучей и мюонная диагностика»;
- 4) «Детекторы и электроника для временных измерений»;
- 5) «Детекторы излучений в ядерно-физических экспериментах»;
- 6) «Методология обработки результатов экспериментов»;
- 7) «Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом»;
- 8) «Применение детекторов с кремниевыми фотоумножителями»;
- 9) «Введение в цифровую электронику физического эксперимента»;
- 10) «Обработка информации, полученной с помощью детекторов ядерных излучений».

При проведении работ каждый раздел предлагаемого комплекса предваряется вводной лекцией с описанием целей и задач проводимых работ и их связи с современной научно-технологической базой экспериментальной ядерной физики, физики высоких энергий, физики элементарных частиц и астрофизики, а также с современными технологиями атомной промышленности и энергетики. Технически возможно проведение указанных лабораторных работ в режиме с удаленным доступом обучающихся.

Описание лабораторных работ доступно на сайте лаборатории экспериментальной ядерной физики: <https://enpl.mephi.ru/>

Авторы выражают благодарность Российскому научному фонду за материальную поддержку научных проектов, проводимых лабораторией экспериментальной ядерной физики, включая обеспечение лаборатории современным оборудованием.

# ЧАСТЬ 1. МЕТОДЫ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

## 1.1. АМПЛИТУДНЫЙ АНАЛИЗ СИГНАЛОВ, СЧИТЫВАЕМЫХ С ДЕТЕКТОРОВ ЯДЕРНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

*Цель работы* – изучение особенности применения амплитудно-цифровых преобразователей разного типа (преобразования во временной интервал, последовательного преобразования, параллельный), дифференциальная нелинейность АЦП разного типа, метод Гатти для уменьшения дифференциальной нелинейности.

Лабораторная установка включает фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) с блоком питания, светодиод с импульсным генератором, электронные блоки амплитудно-цифрового преобразования (АЦП), система считывания в стандарте VME или SAMAC, персональный компьютер. Параллельно в качестве АЦП может быть использован цифровой осциллограф.

В данной работе изучается принцип работы АЦП, измеряются амплитудные спектры от ФЭУ, полученные с АЦП разного типа, определяются их возможности и сферы применения.

### ВВЕДЕНИЕ

**Спектрометрический тракт.** В экспериментах по определению энергетического состава исследуемого ионизирующего излучения обычно используют детекторы, амплитуда сигнала на выходе которых пропорциональна энергии регистрируемых частиц. Если определить амплитудное распределение импульсов на выходе детектора, то можно после соответствующей калибровки определить и энергетический спектр излучения. Типичный спектрометрический тракт

(спектрометр) включает в себя детектор излучения, предусилитель, усилитель, анализатор амплитуд импульсов (рис. 1.1).

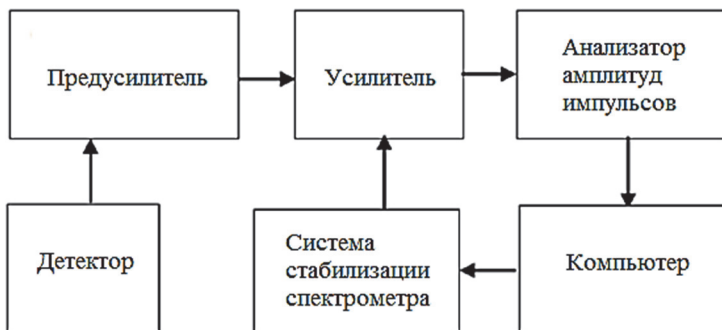


Рис. 1.1. Функциональная схема спектрометрической установки

Один из самых распространенных в настоящее время детекторов – полупроводниковый (ППД), отличающийся высоким энергетическим разрешением. Для такого детектора справедливо соотношение

$$q = \frac{E}{\omega} e,$$

где  $q$  – заряд, протекающий в выходной цепи детектора;  $E$  – энергия, потерянная частицей в детекторе;  $e$  – заряд электрона;  $\omega$  – средняя энергия, расходуемая на образование одной пары носителей элементарного заряда в детекторе, которая для кремниевого и германиевого детекторов равна, соответственно, 3,5 и 2,8 эВ. Таким образом, для определения энергии частицы необходимо измерить заряд, образованный ею в детекторе при взаимодействии с рабочим веществом детектора.

Наиболее распространенным способом измерения заряда является интегрирование импульса тока по времени. Действительно,

$$q = \int_0^t i(t) dt,$$

и, проинтегрировав с помощью какого-либо интегрирующего устройства выходной ток детектора в пределах длительности импульса тока  $t_i$ , получим величину  $q$ , пропорциональную энергии частицы.

В простейшем случае интегрирование производится на эквивалентной емкости детектора  $C$ , включающей емкость самого детектора, входной емкости усилителя сигналов и монтажной емкости проводов и деталей, формирующий электронный тракт считывания сигналов с детектора. Если сопротивление нагрузки детектора  $R$  достаточно велико, т.е.  $RC \gg t_i$ , то напряжение на выходе детектора будет связано с током, протекающим в его выходной цепи, следующим образом:

$$U(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t') dt'.$$

При этом максимальное значение напряжения, т.е. амплитуда импульса напряжения  $A$ , окажется пропорциональным заряду  $A = q/C$  и, следовательно, энергии частицы  $E$ .

Для уменьшения емкости  $C$  и повышения ее стабильности первые каскады усилителя располагают обычно в непосредственной близости к детектору, часто в одном блоке с детектором или рядом с ним. Эта часть усилителя носит название *предусилителя* и служит, в частности, для согласования детектора с кабелем, по которому сигнал подается на основной усилитель, часто удаленный от детектора на значительное расстояние. Низкое выходное сопротивление предусилителя позволяет подключать к его выходу длинный кабель без заметного искажения формы сигнала, а малая входная емкость способствует увеличению амплитуды импульса.

Недостатком такого способа съема сигнала с детектора является неопределенность интегрирующей емкости. Этот недостаток становится особенно существенным при работе с ППД, емкость которого зависит от приложенного напряжения смещения. Это обстоятельство приводит к неоднозначности коэффициента преобразования энергии частицы в амплитуду импульса. Поэтому при работе с ППД применяются специальные зарядочувствительные предусилители (ЗЧУ), в которых интегрирование тока производится не на эквивалентной емкости детектора, а на емкости, входящей в схему усилителя (рис. 1.2). В этом случае устраняется зависимость коэффициента преобразования заряда в амплитуду импульса от емкости детектора и существенно повышается точность преобразования. Изучению особенностей ЗЧУ посвящена лабораторная работа «Спектрометрический усилитель» по курсу «Экспериментальные методы ядерной физики».

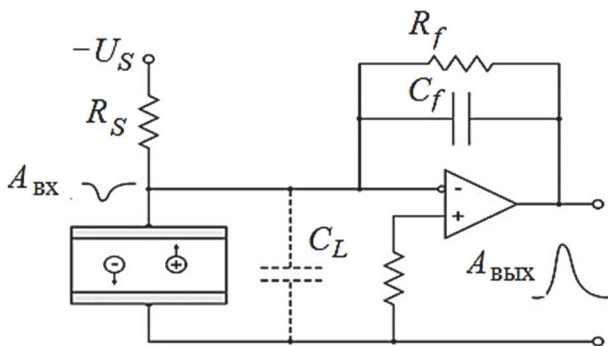


Рис. 1.2. Схема подключения зарядочувствительного предусилителя к ионизационному детектору

Зарядочувствительные предусилители используются для детекторов без внутреннего усиления, величина сигнала которых очень мала. Типичное значение коэффициента преобразования ЗЧУ  $10^{12}$  В/Кл, собственный уровень шумов 100–1000 электронов. Из-за необходимости обеспечить низкий уровень шумов резисторы в нагрузке и обратной связи должны быть достаточно большими, что значительно увеличивает время интегрирования. Это приводит к дополнительной ошибке при измерении сигналов с большой частотой собственных шумов или при высокой загрузке. Поэтому для детекторов с внутренним усилением (например, фотоумножителей) применяется другая схема преобразования заряд-амплитуда.

**Зарядово-цифровое преобразование.** При использовании черенковских или быстрых сцинтилляционных детекторов можно использовать схему измерения, представленную на рис. 1.3. Она представляет собой быструю токовую схему пропускания, которая открывается на время, определяемое длительностью логического управляющего импульса. Если импульс от детектора поступает в это время, он проходит на выход схемы пропускания, и заряд интегрируется на емкости. Таким образом, происходит преобразование заряд-амплитуда. Амплитуда этого сигнала может быть измерена с помощью амплитудно-цифрового преобразователя. В целом такое устройство часто используется и называется зарядово-цифровым преобразователем (ЗЦП).

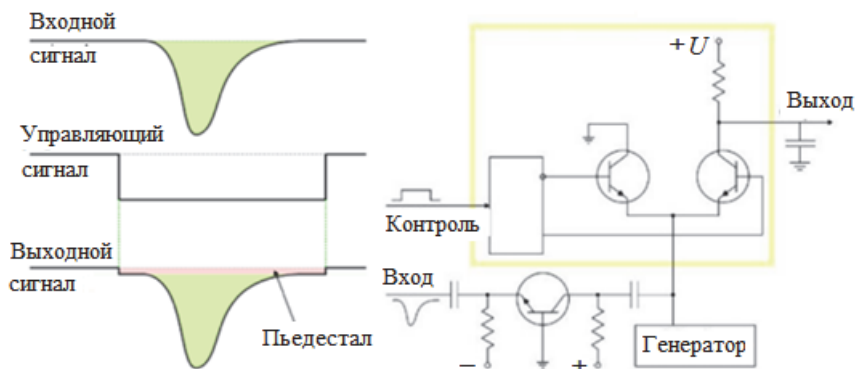


Рис. 1.3. Преобразователь «заряд – амплитуда», основанный на токовой схеме пропускания

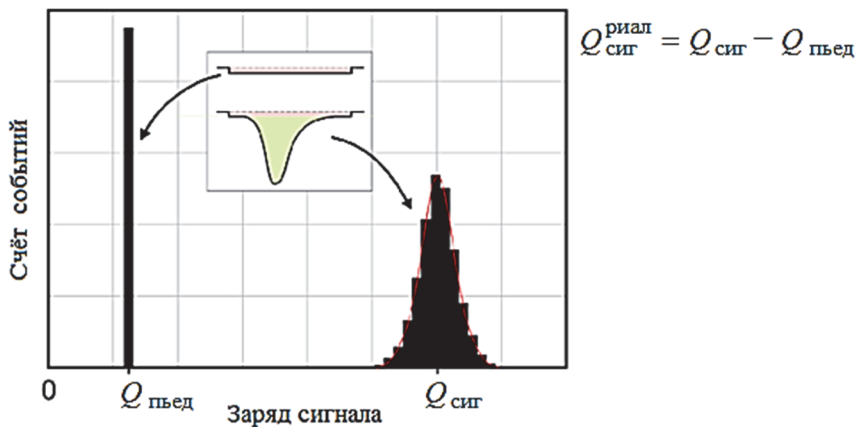


Рис. 1.4. Амплитудный спектр сигналов на выходе ЗЦП

Особенностью применения данного устройства является наличие пьедестала (Pedestal, рис. 1.4). В том случае, когда на вход ЗЦП приходит только управляющий сигнал, небольшой ток от генератора тока, задающего режим работы токового ключа, поступает на интегрирующую емкость, преобразуется в амплитуду и измеряется. Эта величина постоянная с точностью до шумов, при измерении амплитудного спектра наблюдается узкий пик, который является фактически нулевой от-

меткой на шкале анализатора. Существуют схемы, позволяющие компенсировать пьедестал, однако информация, которую содержит пьедестал, важна при проведении длительных экспериментов:

- положение пьедестала определяет фактический «0» шкалы анализатора и позволяет отслеживать его стабильность;
- ширина спектра позволяет находить шумы, т.е. собственное разрешение спектрометра.

**Амплитудно-цифровые преобразователи (АЦП).** Методы амплитудного анализа импульсов широко применяются в экспериментальной ядерной физике. Это связано с тем, что сигналы большинства современных детекторов несут информацию об энергии зарегистрированной частицы или кванта. Поэтому, исследуя распределение амплитуд импульсов, нетрудно получить энергетический спектр излучения. Кроме того, многие методы временного анализа, методы измерения координат, методы идентификации частиц по форме импульса и т.д. в качестве промежуточного этапа процесса измерения используют преобразование измеряемой величины в амплитуду сигнала с последующим амплитудным анализом.

Одним из основных электронных устройств при проведении таких измерений является преобразователь амплитуды импульса в код: амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП). В настоящее время применяются три типа АЦП, обладающие существенно различными характеристиками: параллельный, вилкинсоновский и поразрядного взвешивания.

АЦП должен представить в соответствие аналоговой величине (например, напряжению  $U$ ) цифровое значение  $k$ . Величина  $c = \Delta k / \Delta U$  называется *коэффициентом преобразования*. Коэффициент преобразования не должен зависеть от напряжения, т.е. преобразование должно осуществляться линейно (если это не специальное устройство с нелинейным преобразованием, например с логарифмическим). Отклонение от линейности характеризуется двумя величинами: интегральной нелинейностью и дифференциальной нелинейностью.

Интегральная нелинейность определяется как максимальное относительное отклонение кривой преобразования от прямой  $L_n = \max(\Delta U / U_{\max})$  и характеризует погрешность энергетической шкалы всего спектрометра. Обычно (для спектрометрических АЦП) эта величина составляет  $1/n$ , где  $n$  – число каналов АЦП, большее

влияние на интегральную нелинейность спектрометра оказывают детектор и усилитель.

Дифференциальная нелинейность  $L_d$  характеризует локальные отклонения кривой от идеальной, определяет неоднородность каналов анализатора по ширине. Величина  $L_d = \max(\Delta U_j / \langle \Delta U \rangle)$  представляет собой отношение ширины канала  $j$  к средней ширине канала  $\langle \Delta U \rangle$ . Дифференциальная нелинейность преобразователя является дискретной функцией номера канала. Как и статистическая погрешность  $\varepsilon_{ст} = (N_j)^{1/2}$ , где  $N_j$  – число отсчетов в канале анализатора, она характеризует достоверность количества отсчетов в том или ином канале, т.е. дифференциальная нелинейность влияет на точность измерения интенсивности излучения в зависимости от его энергии. Хорошим (для спектрометрических измерений в ядерной физике) считается значение  $\sim 1\%$ .

Существенное влияние на выбор типа АЦП для той или иной работы имеет его мертвое время. Одно из проявлений мертвого времени – просчеты событий, вызываемые тем, что часть сигналов приходит на вход АЦП во время обработки им предыдущего события. При проведении измерений в течение времени  $T$  и при регистрации за это время  $N$  событий суммарное мертвое время  $T_m = \tau \cdot N$ , где  $\tau$  – мертвое время АЦП. За это время будет просчитано  $N_{пр} = \tau \cdot N \cdot n_0$  событий, где  $n_0$  – интенсивность счета измеряемого излучения.

Рассмотрим типы АЦП, наиболее распространенные в ядерной физике, принцип их построения и основные характеристики.

**Параллельный АЦП (flash ADC).** Параллельный АЦП (рис. 1.5) на  $n$  каналов представляет собой  $n$  компараторов, пороги срабатывания которых равномерно увеличиваются на постоянную величину (определяющую ширину канала АЦП).

Кодируемый импульс поступает одновременно на входы всех компараторов. При этом компараторы с порогами ниже амплитуды входного сигнала изменяют свое состояние. Сигналы с выходов компараторов (соответственно, 0 или 1) поступают на дешифратор, с помощью которого число, соответствующее количеству сработавших компараторов, преобразуется в двоичный код.

Этот вид АЦП обладает высоким быстродействием (тактовая частота до 1,5 ГГц). Дифференциальная нелинейность – невысокая, в спектрометрических измерениях обычно не применяется. Число каналов не может быть очень большим, так как оно определяется числом

быстродействующих компараторов, которые потребляют довольно большой ток, и ограничивается рассеиваемой мощностью кристалла. АЦП такого типа имеют высокую стоимость, тем не менее в последнее время они находят все более широкое применение в ядерно-физических экспериментах на ускорителях. Этому способствует также разработка новой модификации параллельного АЦП: конвейерного АЦП, стоимость которого ниже, а разрядность может быть выше. Параллельные АЦП применяются в цифровых осциллографах.

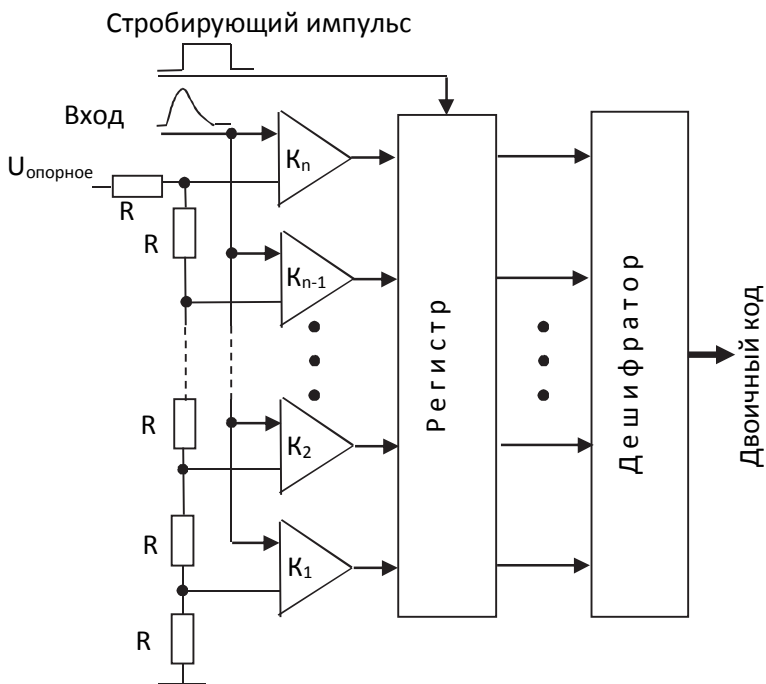
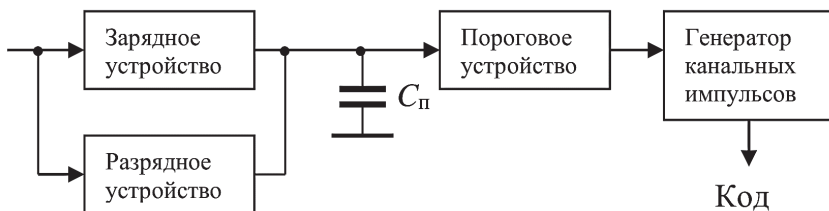
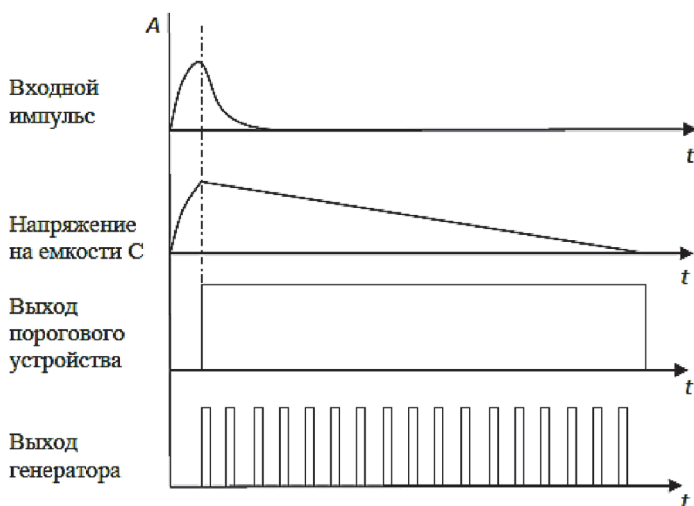


Рис. 1.5. Блок-схема параллельного АЦП

**АЦП вилкинсоновского типа (Wilkinson' ADC).** В амплитудных анализаторах, применяющихся для ядерной спектроскопии (в частности, во всех анализаторах данной лаборатории), в основном применяются АЦП, преобразующие амплитуду импульса в интервал времени с последующим измерением этого интервала (рис. 1.6, а).



*a*



*б*

Рис. 1.6. Блок-схема (*a*) и временные диаграммы (*б*) работы вилкинсоновского АЦП

Величина временного интервала определяется по числу импульсов, генерируемых с тактовой частотой  $f_{\text{такт}}$  специальным генератором и заполняющих этот временной интервал. Соответствующие временные диаграммы представлены на рис. 1.6, *б*.

Обычно АЦП, в котором применяется описанная методика измерения амплитуды, называется по имени его разработчика – вилкинсоновским. Дифференциальная нелинейность этого АЦП, в основном, определяется точностью регистрации момента конца разряда емкости, сложность связана с малой крутизной импульса разряда и

возможной наводкой от импульсов тактовой частоты. Тем не менее эти сложности успешно преодолеваются для АЦП с разрядностью  $m = 12-13$  (4096–8192 канала). Дифференциальная нелинейность вилкинсоновского АЦП может достигать 1 %.

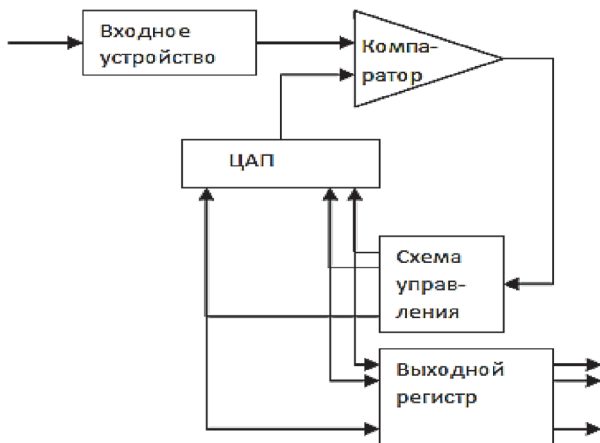
Время преобразования АЦП (а значит, и мертвое время спектрометра) зависит от амплитуды:  $t_{\text{преобр}} = t_0 + n(1/f_{\text{такт}})$ , где  $t_0$  – постоянное время в диапазоне нескольких микросекунд;  $n$  – номер канала АЦП, и может достигать 100 мкс.

**АЦП поразрядного взвешивания (Successive-Approximation ADC).** В этом методе построения АЦП амплитуда входного сигнала запоминается с помощью расширителя импульсов и последовательно сравнивается с эталонными напряжениями (рис. 1.7).

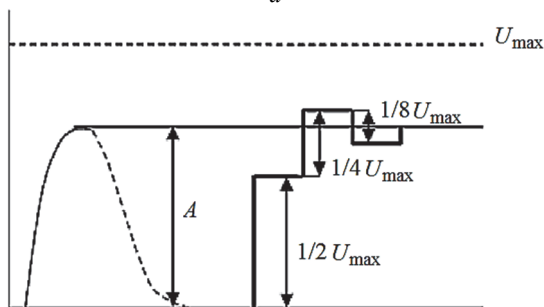
Эталонные напряжения генерируются цифроаналоговым преобразователем (ЦАП) из соответствующих двоичных чисел. Сравнение осуществляется с помощью компаратора (этот метод аналогичен процессу взвешивания на весах с помощью гирь, отсюда и его название).

Преобразование начинается с того, что старший двоичный разряд на входе ЦАП переводится в состояние логической «1», при этом на выходе ЦАП устанавливается напряжение, соответствующее 1/2 измеряемого диапазона амплитуд. Компаратор напряжений определяет, больше или меньше входного сигнала данная аналоговая величина. Если входной сигнал больше, то старший разряд ЦАП остается в состоянии «1», а в выходной регистр (в бит старшего разряда) записывается «1» (если входной сигнал меньше, то, соответственно, будет состояние «0», а напряжение на выходе ЦАП будет равно нулю).

В следующем цикле в состоянии «1» переводится второй по старшинству разряд ЦАП, т.е. к предыдущему напряжению добавляется напряжение, соответствующее 1/4 измеряемого диапазона амплитуд. В этом цикле входная амплитуда будет сравниваться с напряжением, соответствующим  $1/2 + 1/4 = 3/4$  измеряемого диапазона амплитуд (или с напряжением 1/4 диапазона). В результате сравнения в следующий по старшинству разряд добавится «1» или «0». В следующем состоянии входная амплитуда будет сравниваться с напряжением, соответствующим напряжению в предыдущем цикле плюс 1/8 измеряемого диапазона амплитуд. Этот ступенчатый процесс продолжается вплоть до самых младших разрядов ЦАП, т.е. до тех пор, пока входное напряжение не будет определено с максимальным разрешением.



a



б

Рис. 1.7. Блок-схема (a) и временные диаграммы работы АЦП поразрядного взвешивания (б)

Время преобразования  $t_{\text{преобр}} = t_0 + m \cdot t_a$ , где  $t_a$  – длительность шага аппроксимации, которое обычно составляет несколько микросекунд, т.е. на 1–2 порядка меньше, чем у вилкинсоновского АЦП. Дифференциальная нелинейность АЦП поразрядного взвешивания не высокая, обычно не лучше 50 %. В основном это связано со сложностью изготовления точных резистивных цепей ЦАП.

**Метод статистического разравнивания.** Значительно улучшить однородность ширины каналов в преобразователях с поразрядным взвешиванием позволяет метод статистического разравнивания (иногда он называется *методом скользящей шкалы*, или, по имени

автора, *методом Гатти*). Метод заключается в усреднении ширины каналов по всему множеству каналов (или обычно по его части). Для практической реализации метода (рис. 1.8–1.9) в АЦП входные сигналы суммируются с напряжением от дополнительного ЦАП (цена канала которого равна средней цене канала АЦП), связанного с регистром (обычно таким регистром служит счетчик с коэффициентом пересчета  $D_{\max}$ ), состояние которого  $D$  изменяется определенным или случайным образом.

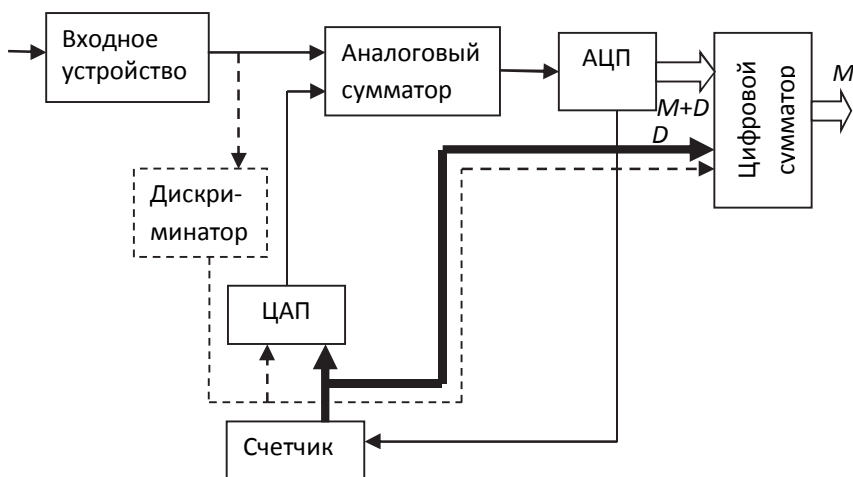


Рис. 1.8. Функциональная схема устройства для реализации метода статистического разравнивания

После преобразования амплитуды в код на выходе АЦП образуется число  $M + D$ , из которого вычитается число  $D$ , в результате чего образуется код выходного сигнала  $M$ . Поскольку состояние  $D$  дополнительного регистра изменяется, то преобразование входных сигналов с одной и той же амплитудой происходит в преобразователе «амплитуда – код» при переменной суммарной амплитуде сигналов, т.е. в разных областях шкалы АЦП, что и приводит к статистическому усреднению по множеству каналов. Оценка улучшения однородности эффективной ширины канала показывает, что дифференциальная нелинейность снижается в  $D_{\max} + 1$  раз. Таким образом, имея исходный АЦП с дифференциальной нелинейностью 50 % и используя

схему разравнивания с дополнительным ЦАП на 64 канала, можно получить в результате достаточно быстрый АЦП с дифференциальной нелинейностью менее 1 %.

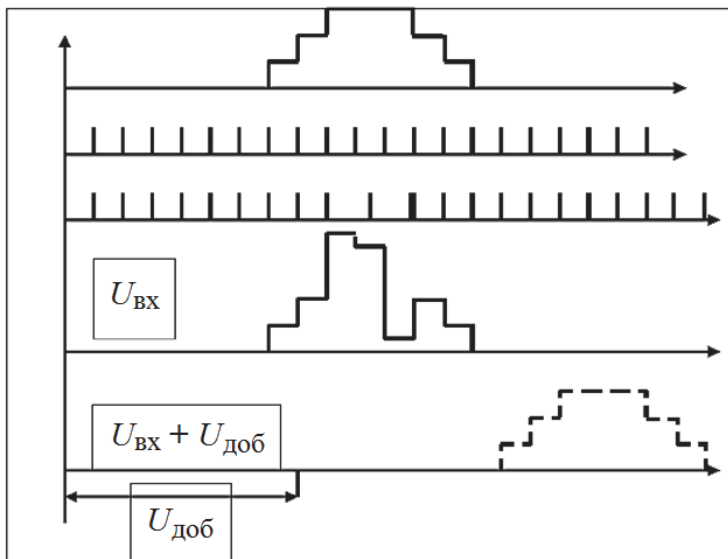
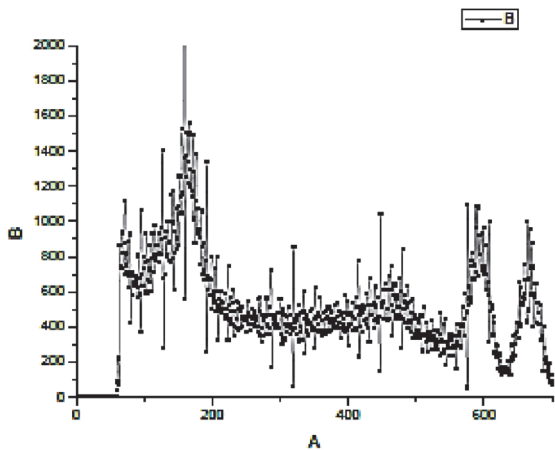


Рис. 1.9. Иллюстрация работы схемы разравнивания

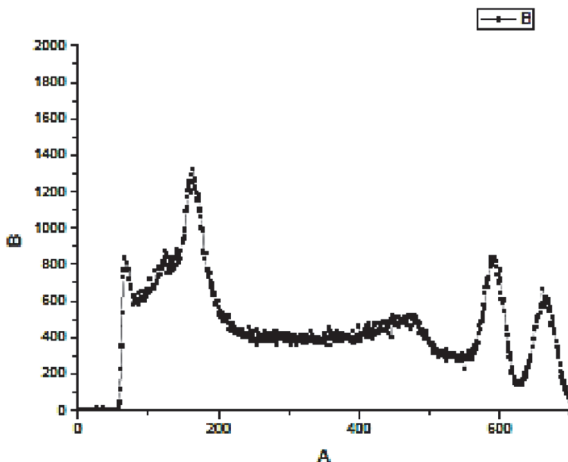
Когда схема разравнивания выключена, импульсы с одной и той же амплитудой (например, от генератора) фиксируются в одном канале. При включении разравнивания происходит некоторое уширение спектрального пика, что может повлиять на результаты измерений узких спектральных линий.

При применении схемы разравнивания не используются либо первые  $D_{\max}$  каналов, либо последние  $D_{\max}$  (в зависимости от того, сигнал от ЦАП вычитается или складывается с измеряемым). Для устранения этого эффекта может применяться схема (показана пунктиром на рис. 1.8), с помощью которой код на ЦАП дополнен еще одним разрядом. С помощью этой цепи амплитуда сигналов, поступающих на вход АЦП, не выходит за пределы его работы.

На рис. 1.10 представлены спектры, полученные с АЦП поразрядного взвешивания без схемы разравнивания и со схемой разравнивания.



*a*



*б*

Рис. 1.10. Амплитудные спектры со сцинтиляционного детектора от источника  $^{60}\text{Co}$  без схемы разравнивания (*a*) и со схемой разравнивания (*б*)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 1.11 представлена схема универсальной установки для исследования амплитудных и временных параметров фотоумножителя.

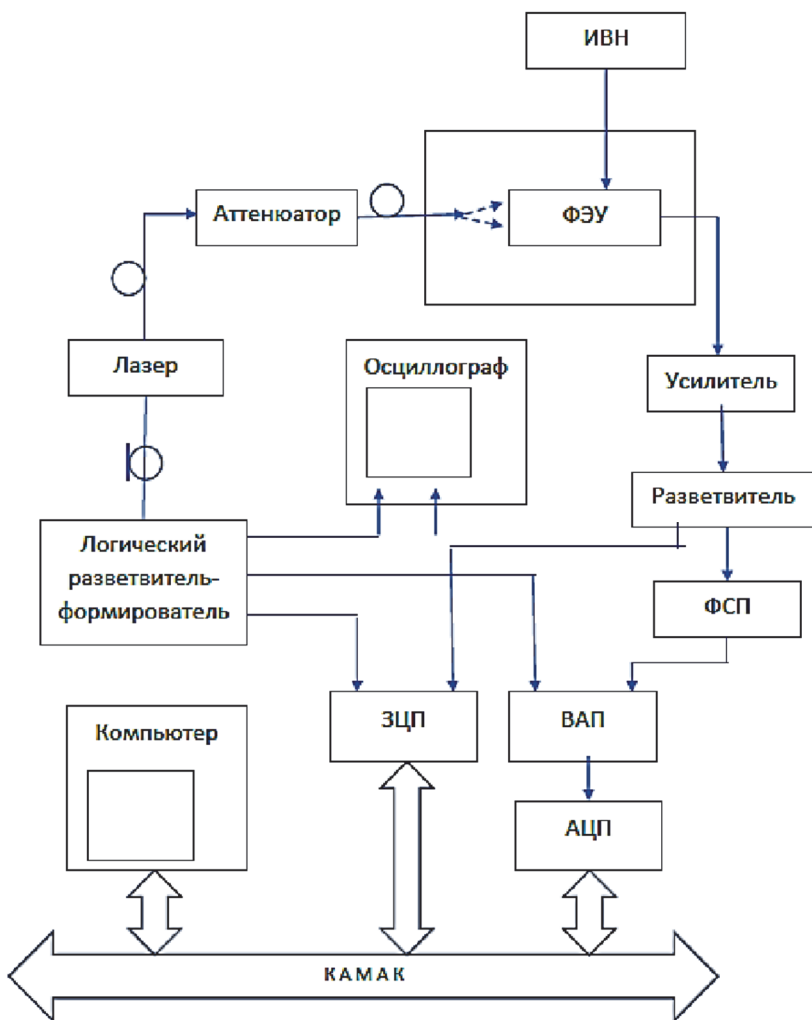


Рис. 1.11. Блок-схема экспериментальной установки

Основными элементами установки являются:

- 1) исследуемый фотоумножитель с блоком питания (ФЭУ);
- 2) импульсный источник света – пикосекундный лазер с аттенюатором;

3) электронный комплекс для измерения амплитудных и временных характеристик ФЭУ;

4) осциллограф, предназначенный для настройки и контроля работы установки (при применении современного цифрового осциллографа в значительной части измерений параметров ФЭУ он может заменить электронный комплекс);

5) светонепроницаемый кожух для размещения ФЭУ, куда подводится оптический сигнал от лазера.

**Электронный комплекс.** Электронный комплекс состоит из модулей блочных систем КАМАК и NIM, связь с компьютером осуществляется через систему КАМАК (см. рис. 1.11).

Оптический сигнал лазера поступает на аттенуатор и далее в светонепроницаемый кожух к ФЭУ, электрический сигнал от лазера, синхронизованный с оптическим с высокой точностью ( $\approx 5$  пс), поступает на электронную систему для формирования временного сигнала и вспомогательных импульсов для работы измерительного тракта.

Сигнал с ФЭУ поступает на усилитель ( $K_{ус} = 10$ ), после которого он разветвляется и поступает на формирователь со следящим порогом (ФСП), и на зарядово-цифровой преобразователь (ЗЦП).

Электрический сигнал с импульсного лазера через задержку подается на вход СТАРТ время-амплитудного преобразователя (ВАП), на вход СТОП которого подается импульс с ФСП. Выходной сигнал ВАП подается на амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП).

Линии задержки используются для обеспечения необходимых временных соотношений входных импульсов.

Сигналы с ЗЦП и с АЦП поступают на шину КАМАК, предназначенную для связи измерительных устройств с цифровой аппаратурой обработки данных в системах сбора данных.

#### **Технические характеристики элементов установки.**

1. ЗЦП (зарядово-цифровой преобразователь) – модель *LeCroy 2249A CHAN ADC*, количество АЦП в модуле: 12; цена канала 0,25 пКл.

2. Лазер – длина волны светового импульса 405 нм, длительность импульса 30 пс.

3. Оптический аттенуатор – модель *804 Quad Rotary Attenuator*, ослабление до 1:10000 на длине волны 405 нм.

4. ВАП (время-амплитудный преобразователь) – модель *2145 Time-to-Amplitude Converter/SCA*; диапазон измерений от 20 нс до 5 мс.

5. ФСП *Canberra 454* (в одном модуле содержится четыре ФСП) – максимальная скорость счета 200 МГц, что в динамическом диапазоне входных амплитуд 1:100 обеспечивает «гуляние» выходного импульса на более чем на 30 пс.

## РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

### **1. Ознакомление с лабораторной установкой.**

1. Включить установку на измерение амплитудных спектров с ЗЦП. Подать на ЗЦП только управляющий импульс. Наблюдать набор пьедестала на анализаторе импульсов. Снять зависимость положения пьедестала от ширины управляющего импульса.

2. Включить установку на измерение амплитудного спектра от генератора. С помощью осциллографа выставить правильное соотношение времени поступления сигналов на входе ЗЦП. Наблюдать искажение спектра при неполном совпадении импульсов.

3. Снять зависимость номера канала ЗЦП от амплитуды импульса.

4. Оценить цену канала ЗЦП, определив заряд в импульсе с помощью осциллографа.

5. Провести аналогичные измерения со спектрометрическим усилителем и АЦП вилкинсоновского типа.

### **2. Дифференциальная нелинейность. Метод статистического разравнивания.**

1. Установить небольшую амплитуду, чтобы спектр занимал не менее 100 каналов. Провести набор спектров в разных местах шкалы анализатора.

2. В процессе набора спектра наблюдать отклонения значений в некоторых каналах (провалы или выбросы значений в отдельных каналах), связанных с неравномерностью ширины каналов (с плохой дифференциальной нелинейностью).

3. Определить номера каналов с максимальными выбросами, обратить внимание на их периодичность.

4. Включить схему разравнивания. Провести аналогичные предыдущему заданию наблюдения и измерения при включенной схеме разравнивания.

### **3. Измерение зависимости дифференциальной нелинейности АЦП от статистики при выключенной и включенной схеме разравнивания.**

1. Используя данные, полученные на установке, представленной в приложении, провести измерения дифференциальной нелинейности (ДН) и среднеквадратичного отклонения (СКО) при примерном среднем значении в канале  $N = 20, 50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000$ .

2. На одном графике построить зависимости ДН, СКО и  $N^{-1/2}$  от  $N$ .

3. Провести аналогичные измерения для данных при включенной схеме разравнивания.

### **4. Исследование влияния схемы разравнивания на разрешение АЦП.**

Подать на вход ЗЦП импульс от генератора, наблюдать узкий спектр, в основном в одном канале. Сравнить спектры, полученные при выключенной и включенной схеме разравнивания. Сделать выводы о влиянии схемы разравнивания на собственное разрешение АЦП.

### **5. Определение интегральной нелинейности спектрометра.**

1. Определить интегральную нелинейность спектрометра, используя два пика от гамма-квантов источника Со-60 и пик от их одновременной регистрации. Построить график зависимости номера канала спектрометра от энергии гамма-квантов.

2. Определить энергию пика обратного рассеяния, используя программу и полученный график.

## **ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое описание и схема экспериментальной установки;
- 3) зависимость номера канала ЗЦП от амплитуды импульса;
- 4) оценку цены канала ЗЦП при определении заряда в импульсе по осциллограмме;
- 5) амплитудные спектры с характерными выбросами для АЦП поразрядного времени с выключенной и включенной схемой разравнивания;
- 6) зависимости значений дифференциальной нелинейности, среднеквадратичного значения и статистической ошибки измерения  $N^{-1/2}$

от  $N$  (три кривых на одном графике) при выключенной схеме разравнивания, аналогичные зависимости при включенной схеме разравнивания;

7) график зависимости номера канала спектрометра от энергии гамма-квантов (с обозначением на графике энергии пика обратного рассеяния).

## **1.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОГО ОСЦИЛЛОГРАФА ДЛЯ АМПЛИТУДНЫХ И ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

*Цель работы* – ознакомление с современным цифровым осциллографом, позволяющим проводить широкий спектр исследовательских работ без использования специализированных электронных блоков для амплитудных и временных измерений.

Лабораторная установка включает цифровой осциллограф с возможностями обработки информации, фотоэлектронный умножитель с блоком питания, светодиод с импульсным генератором.

В данной работе приобретается навык работы с современным цифровым осциллографом для проведения широкого спектра измерений: параметров импульса, амплитудных и временных спектров. На входы осциллографа подаются импульсы от импульсного источника света (логический импульс) и импульс от фотоумножителя. С помощью осциллографа осуществляется набор амплитудных спектров (в том числе и спектров заряда (площади импульса)), временных спектров, осуществляется моделирование работы формирователя со следящим порогом для улучшения временного разрешения.

### **ВВЕДЕНИЕ**

При проведении лабораторных исследований чаще всего применяются электронные устройства в виде модульных блочных систем в стандарте САМАС, VME, NIM. Для проведения даже не очень сложных исследований, например измерение амплитудных и временных характеристик фотоумножителей, необходима установка из десяти-пятнадцати модулей, расположенных в двух крейтах. Долгое время это было основным способом создания исследовательских установок.

В настоящее время появились новые устройства – цифровые осциллографы, которые могут для большой серии измерений заменить сложные установки.

*Цифровым осциллографом (ЦО)* будем называть прибор, содержащее входное устройство, амплитудно-цифровой преобразователь, запоминающее устройство, компьютер, дисплей для представления визуальной информации. Первые цифровые осциллографы, называемые цифровыми запоминающими осциллографами (ЦЗО), отличаются отсутствием компьютера, и поэтому имеющими фактически функции только осциллографа, т.е. представление только осциллограмм.



Рис. 1.12. Цифровой осциллограф LeCroy WR640Zi

Основными характеристиками цифрового осциллографа – полоса пропускания, разрядность АЦП, частота отсчетов (дискретизации) и объем памяти. Отметим, что первая из этих четырех характеристик определяется, в основном, аналоговой частью ЦО, находящейся на входе осциллографа, т.е. до АЦП; вторая и третья – аналого-цифровым преобразователем; четвертая – запоминающим устройством. Внешний вид цифрового осциллографа LeCroy WR640Zi, используемого в этой работе, представлен на рис. 1.12.

## МЕТОДЫ ОЦИФРОВКИ ИМПУЛЬСОВ

**Параллельный АЦП.** Большинство высокоскоростных осциллографов и некоторые высокочастотные измерительные приборы используют параллельные АЦП из-за их высокой скорости преобра-

зования, которая может достигать  $5\Gamma$  ( $5 \times 10^9$ ) отсчетов/с для стандартных устройств и  $20\Gamma$  отсчетов/с для оригинальных разработок. Обычно параллельные АЦП имеют разрешение до восьми разрядов, но встречаются также 10–12-разрядные версии.

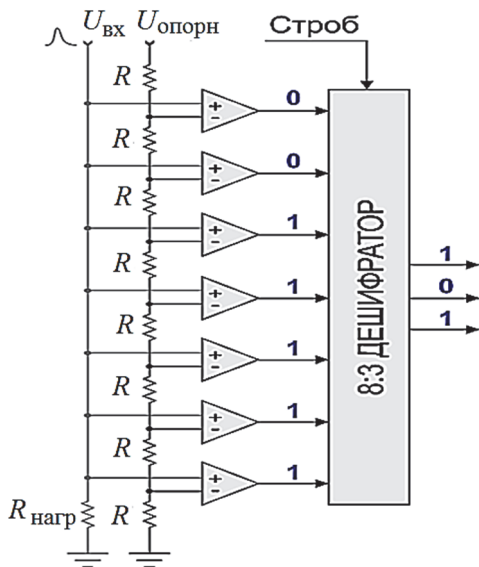
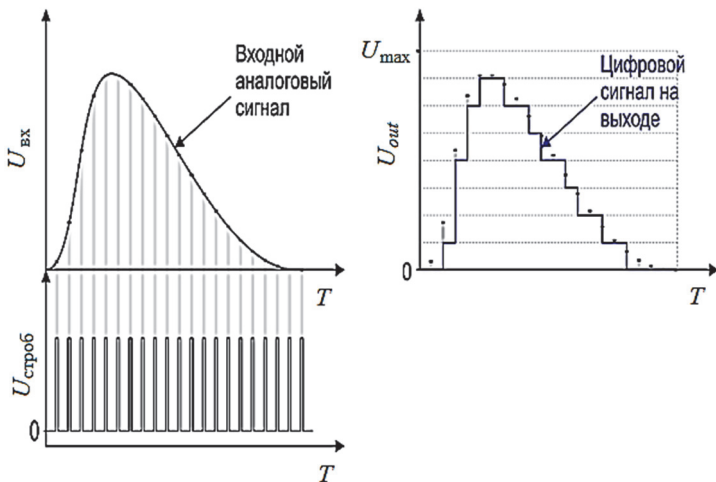


Рис. 1.13. Принцип работы цифрового осциллографа

Рис. 1.13 иллюстрирует принцип работы ЦО. Входной сигнал поступает на параллельный АЦП, который стробируется с высокой частотой и код с АЦП поступает в запоминающее устройство.

Для обеспечения требуемой частоты преобразования применяется параллельно до 100 АЦП, которые обеспечивают требуемую частоту дискретизации.

В настоящее время лидер среди цифровых осциллографов обеспечивает полосу пропускания 30 ГГц, частоту дискретизации 80 Гвыб./с, длину памяти до 512 Мбайт. Такие параметры получаются с монолитным однокристалльным АЦП специальной разработки по кремний-германиевой (SiGe) технологии.

Высокая стоимость ЦО, в первую очередь, определяется именно стоимостью АЦП. Для создания более дешевых устройств оцифровки импульсов в настоящее время часто применяется другой метод.

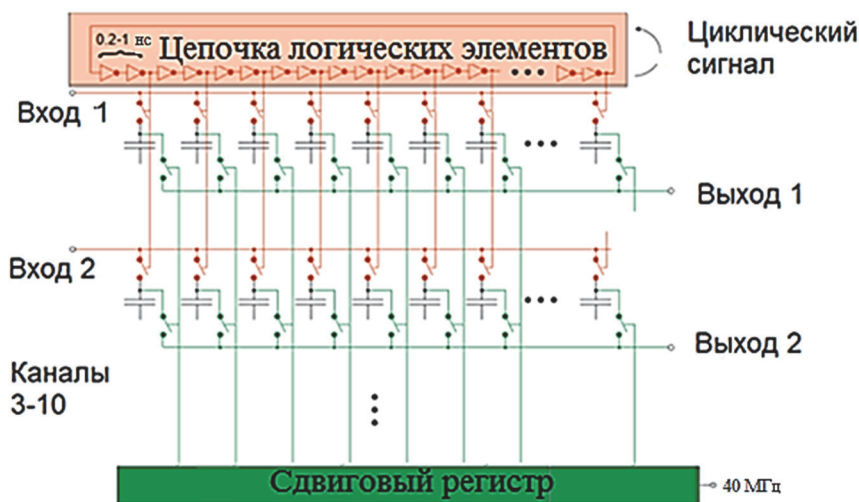


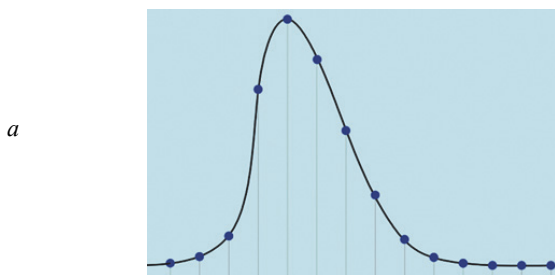
Рис. 1.14. Принцип действия оцифровки типа «Домино»

**Измеритель формы импульса. Принцип «Домино».** На рис. 1.14 представлена функциональная схема двухканального устройства, работающего по принципу оцифровки «Домино», основанном на применении микросхемы DRS4. Входной сигнал поступает на емкости (обычно в количестве 1000), на которых повторяется входной сигнал. С помощью цепочки логических элементов с

задержкой, например 200 пс, друг за другом емкости отключаются, и на них фиксируется мгновенное значение, соответствующее амплитуде входного импульса на момент отключения.

После окончания цикла аналогового запоминания формы импульса последовательно к каждой емкости подключается достаточно медленный и экономичный АЦП, в результате чего получается серия из 1000 кодов, которая описывает форму импульса с шагом 200 пс, аналогично ЦО до представления на дисплее. Эта информация считывается в компьютер и обрабатывается в зависимости от задачи.

Это устройство уступает по многим параметрам ЦО, однако благодаря меньшей стоимости используется в ряде работ. На рис. 1.15 представлена фотография устройства.



*б*

Рис. 1.15. Шестнадцатиканальное устройство для оцифровки импульсов CAEN DT5742 (*a*) и иллюстрация принципа оцифровки сигнала сложной формы (*б*)

**Возможности современного цифрового осциллографа.** ЦО, кроме возможности представления осциллограмм на экране, позволяет проводить много видов измерений и представления результатов измерений как в числовом виде, так и в виде гистограмм (рис. 1.16).

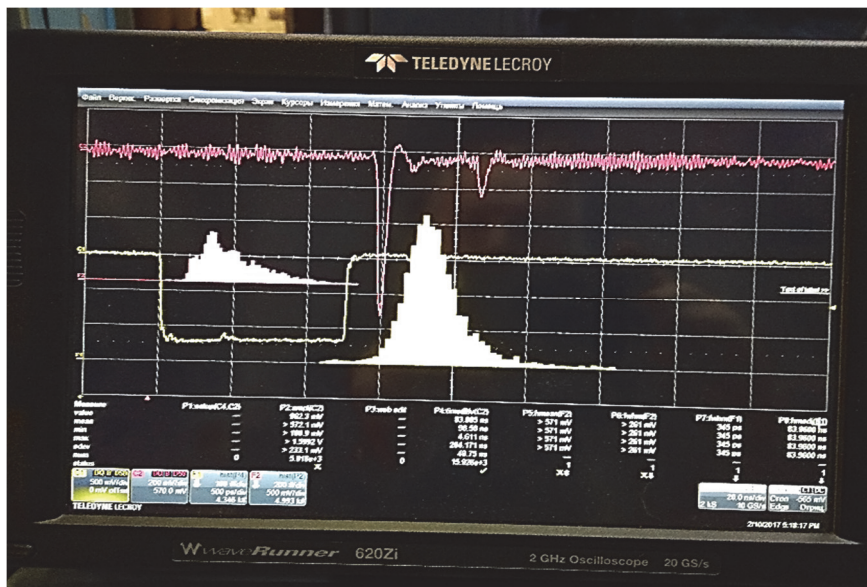


Рис. 1.16. Пример дисплея ЦО с результатами измерений, представленными в виде осциллограмм, гистограмм амплитудного и временного распределений и численных параметров

ЦО может представлять осциллограмму в виде точек и это будет единственный достоверный способ представления сигналов, зафиксированных в виде отсчётов. Но вид такой осциллограммы неудобен для визуального восприятия, да и яркость осциллограммы кажется низкой.

Чтобы на экране ЦО получить изображение процесса не в виде отдельных точек, а в виде непрерывных линий, нужно использовать тот или иной вид интерполяции. (Напомним, что математически интерполяция является вычислением значений некоторой функции, заданной отдельными узловыми точками, в промежутках между узлами.)

Простейшей является *линейная интерполяция*, которая сводится к соединению узловых точек отрезками прямых. Она легко реализуется математически и потому часто применяется как в системах компьютерной математики, так и в программах для цифровых осциллографов, «рисующих» осциллограммы на экране осциллографа.

В большинстве случаев (но не всегда) желательно применять более сложную интерполяцию, обеспечивающую плавность осциллограмм. Наиболее распространена *интерполяция вида  $\sin(t)/t$* .

По результатам, полученным после считывания и интерполяции, можно определить параметры импульсов (амплитуду, площадь, длительность импульса на разном уровне, длительность фронта, спада), временное соотношение между двумя импульсами на разном уровне. В осциллографе защиты программы для десятков типов измерений.

Необходимо отметить, что измерения, проводимые с ЦО, фактически идут с обработкой *off-line*. Если реально, например, временные измерения, проводимые с помощью электронных систем, осуществляются по одной точке (точке пересечения порога), то в ЦО для определения времени регистрации используются несколько точек оцифровки на фронте и проводится усреднение по этим точкам, уменьшая таким образом влияние шумов. Таким образом, для измерения каких-то физических процессов лучше использовать ЦО, так как уменьшается влияние электроники. Однако если надо определить характеристики детектора, который должен работать в режиме регистрации событий (например, как стартовый импульс для время-пролетной системы), то с ЦО можно получить параметры детектора лучше, чем в реальном эксперименте.

Цель многих исследований – представление результатов в виде гистограмм. В математической статистике *гистограмма* – функция плотности вероятности распределения случайного события или случайной величины, построенная на основе выборок из этого распределения. В случае цифрового осциллографа массивом выступает массив данных измерения выбранного параметра. Возможности построения, анализа и измерения гистограмм превращают любой ЦО в мощный аналитический инструмент.

Реальный массив измерений в графическом виде в цифровых осциллографах может быть представлен и так называемым «трендом».

*Тренд* – график, представляющий собой функцию, в которой горизонтальная ось (ось  $X$ ) представляет ось номера измерения – 1, 2, 3, 4, ...  $n$ , (эта ось не связана с временную осью развертки осциллографа), а по оси  $Y$  (вертикальной оси) располагаются значения результата измерения выбранного параметра.

Тренд состоит только из реальных точек значений результатов измерений и представляет собой развернутый массив данных результатов измерений. Число точек тренда задается пользователем и может составлять от единицы до нескольких миллионов (в зависимости от типа осциллографа и установленных опций). При сохранении тренда в файл сохраняется весь выбранный массив результатов измерений с указанием номера измерения. Далее эти данные можно использовать для обработки внешними средствами.

**Достоинства и недостатки цифровых осциллографов.** *Цифровые осциллографы* – новый класс цифровых измерительных устройств, имеющих как серьезные достоинства, так и некоторые недостатки. Отметим только самые важные из них.

Основные достоинства ЦО вытекают из возможностей обработки информации в цифровом виде: неограниченное время хранения информации; широкие диапазоны скорости ее считывания; возможность замедленного воспроизведения отдельных участков запомненного сигнала; получение ярких и четких осциллограмм; вывод информации на персональный компьютер или на внешние устройства (принтер, память и т.п.); применение сложных алгоритмов обработки данных внутри осциллографа с помощью встроенного процессора, возможность отображения сигнала до момента запуска (при «отрицательном» времени).

Наличие в цифровых осциллографах процессоров позволяет для любого вида сигнала определять и отображать на экране различные значения напряжения сигнала, а также результаты различных преобразований (например, преобразования Фурье).

Практически любой ЦО может подключаться к персональному компьютеру через стандартные порты – параллельный PRT и последовательные COM и USB или давно известный приборный порт GPIB.

Основные недостатки ЦО – более высокая стоимость, более сложное управление, а также недостатки, связанные с применением АЦП и ЦАП. Аналого-цифровое (АЦП) и цифроаналоговое (ЦАП)

преобразования сигнала в тракте  $Y$  всегда выполняются с конечной разрядностью, что ведет к появлению характерных шумов квантования, принципиально отсутствующих у аналоговых осциллографов. Шум квантования виден на осциллограммах ряда цифровых осциллографов, особенно – дешёвых, имеющих малую разрядность АЦП и ЦАП.

Вообще говоря, экран современных цифровых осциллографов перенасыщен информацией: на нем имеется меню операций, значения различных цифровых установок и результатов вычислений. Поэтому для полноценного использования этой информации нужно внимательно изучить инструкцию по конкретному прибору и правильно использовать возможности прибора в части предоставления информации.

**Большинство ЦО имеют кнопку «Autoset»** для автоматической установки параметров, обеспечивающих правильное (но не всегда оптимальное) наблюдение сигнала. Эту функцию можно использовать при случайном использовании незнакомого режима, когда не знаете, как вернуться в знакомый режим.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для знакомства с простейшими функциями ЦО используется генератор импульсов с двумя выходами, которые подключаются к входам осциллографа. Однако для изучения работы осциллографа при наличии временного и амплитудного разбросов используются импульсы от фотоумножителя, который засвечивается световыми импульсами, генерируемыми лазером или светодиодом.

## РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Выставить выходные импульсы генератора с амплитудой 1 В и длительностью 10 нс.
2. Подключить выходы генератора к двум входам осциллографа. Максимальная амплитуда сигнала, подаваемого на вход осциллографа с входным сопротивлением 50 Ом, не должна превышать 5 В!
3. Наблюдать импульсы на двух входах. Записать осциллограммы в память осциллографа или на флэш-память для последующей распечатки.

4. Установить режим измерения амплитуды сигнала на одном и другом входах. Сравнить с наблюдаемым на осциллографе. Сделать измерение для импульсов разной амплитуды и полярности.

5. Установить режим измерения заряда (площади импульса). Провести измерение, сравнить результат с наблюдаемым на осциллографе.

6. Выставить измерение временного интервала между триггером (импульсом, по которому осуществляется запуск) и импульсом по второму входу. Учитывать полярность фронта. Провести измерение для разной задержки импульсов, устанавливаемой на генераторе.

7. Вместо импульсов от генератора импульсов подключить импульсы от генератора световых импульсов: на один вход (импульс запуска) подать синхрои́мпульс, на второй вход – импульс от ФЭУ. Наблюдать импульсы.

8. Провести измерения аналогичные пп. 4 и 5 с импульсами от ФЭУ.

9. Провести измерение амплитудного разрешения от амплитуды сигнала ФЭУ:

1) амплитуда сигнала изменяется интенсивностью светового импульса;

2) амплитуда изменяется напряжением на ФЭУ.

10. Провести временные измерения, аналогичные п. 6.

11. Установить разный порог привязки к импульсам с ФЭУ:

1) постоянный 10 мВ, провести измерение временного разрешения от амплитуды в диапазоне входных импульсов от 20 до 1000 мВ;

2) 50 мВ, провести измерение временного разрешения для амплитуды от 100 до 1000 мВ;

3) следящий порог – 20 % относительно амплитуды, провести измерение временного разрешения от амплитуды в диапазоне от 20 до 1000 мВ.

12. Сравнить полученные в п. 10 результаты.

## ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1) осциллограммы импульсов;

2) зависимость амплитудного разрешения от амплитуды импульса:

- амплитуда меняется изменением интенсивности светового импульса;
  - амплитуда изменяется напряжением на ФЭУ;
- 3) зависимость временного разрешения от амплитуды импульса:
- амплитуда меняется изменением интенсивности светового импульса;
  - амплитуда изменяется напряжением на ФЭУ;
- 4) зависимость временного разрешения ФЭУ от амплитуды импульса для различного типа временной привязки: постоянный порог, следящий порог.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. Терешков В.В., Цветков Ф.А., Лабынцев А.В. Цифровые осциллографы: теоретические основы применения: Учебное пособие / Под ред. В.В. Терешкова. – Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2013. – 84 с.

## ЧАСТЬ 2. ФОТОЭЛЕКТРОННЫЙ УМНОЖИТЕЛЬ

---

### 2.1. ИЗМЕРЕНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЭУ

*Цель работы* – изучение методов исследования характеристик фотоприемников и изучение характеристик фотоэлектронного умножителя (ФЭУ).

Лабораторная установка включает фотоэлектронный умножитель с блоком питания, светодиод с импульсным генератором, цифровой осциллограф с возможностями обработки информации. В работе изучаются однофотонный режим, усиление ФЭУ от напряжения, амплитудное и временное разрешения, временное разрешение от площади засветки фотокатода.

### ВВЕДЕНИЕ

*Вакуумный фотоэлектронный умножитель* (ФЭУ) – один из основных приборов в экспериментальной ядерной физике, используемых в ядерной спектроскопии, физике высоких энергий, в установках для изучения кратковременных процессов – обладающий высокой чувствительностью к электромагнитному излучению низких энергий (фотонам). ФЭУ используют также в оптической аппаратуре, устройствах телевизионной и лазерной техники. ФЭУ – электровакуумный прибор, в котором поток электронов, эмитируемый фотокатодом под действием оптического излучения (фототок), усиливается в многокаскадной диодной умножительной системе в результате вторичной электронной эмиссии; ток в цепи анода (коллектора вторичных электронов) значительно превышает первоначальный фототок (как правило, в  $10^5$  раз и выше). Впервые ФЭУ такого типа был разработан советским физиком Л.А. Кубецким в 1930–34 гг. и внедрён в массовое производство американским физиком русского происхождения изобретателем цветного телевидения В.К. Зворыкиным в 1936 г. в компании *RCA (Radio Corporation of America)*.

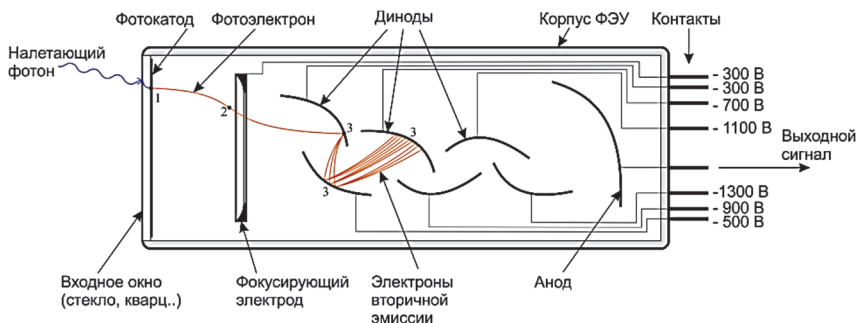


Рис. 2.1. Схема устройства классического вакуумного ФЭУ

Наибольшее распространение получили ФЭУ, в которых регистрируемый фотон проходит сквозь прозрачное входное окно ФЭУ, попадает на фотокаатод, вызывает эмиссию фотоэлектрона из фотокаатода в вакуумированный объем ФЭУ. Вероятность преобразования регистрируемого фотона («налетающего фотона» на рис. 2.1) в фотоэлектрон называют *квантовой эффективностью* фотокаатода (Quantum Efficiency, Q.E.). В современных ФЭУ эта величина достигает 55 %. Для того чтобы усилить инициированный регистрируемым фотоном сигнал, между фотокаатодом и анодом создается электрическое поле напряженностью порядка 200 В/см, которое ускоряет фотоэлектрон в направлении первого динода. Дальнейшее усиление электронного потока осуществляется при помощи системы дискретных динодов – электродов корытообразной, коробчатой или жалюзийной формы с линейным (см. рис. 2.1) или (реже) с круговым расположением динодов, обладающих коэффициентом вторичной эмиссии  $> 1$ . Для ускорения и фокусировки электронов в катодной камере (собирающей электроны, вылетевшие с фотокаатода, в пучок и направляющей этот пучок на вход динодной системы), динодам и аноду сообщают определённые потенциалы относительно фотокаатода при помощи высоковольтного источника (напряжением 600–3000 В). Кроме электростатической фокусировки, в ФЭУ иногда применяют магнитную фокусировку и фокусировку в скрещенных электрическом и магнитном полях.

Существуют также ФЭУ с умножительной системой, представляющей собой непрерывный (распределённый) динод – одноканальный, в виде трубки (канала) с активным (коэффициент вторичной

эмиссии электронов  $> 1$ ) слоем на её внутренней поверхности, обладающим распределённым электрическим сопротивлением, или многоканальный, выполненный на базе микроканальной пластины. При подключении канала к источнику высокого напряжения в нём создаётся электрическое поле, ускоряющее вторичные электроны, которые многократно соударяются с внутренними стенками канала, вызывая при каждом столкновении вторичную электронную эмиссию с поверхности активного слоя.

Фотокатоды ФЭУ выполняют из полупроводников на основе соединений элементов I или III группы периодической системы Д.И. Менделеева с элементами V группы (CsSb, GaAs и др.). Полупрозрачные фотокатоды обычно наносят на внутреннюю поверхность входного окна стеклянного баллона ФЭУ. Для изготовления дискретных динодов используют следующие материалы: Cs<sub>3</sub>Sb, наносимый в виде слоя на металлическую подложку; сплавы CuBe, CuAlMg; эпитаксиальные слои GaP на Mo, обработанные O<sub>2</sub> и др. Каналы непрерывных динодов изготавливают из стекла с высоким содержанием свинца (такие каналы после термообработки в H<sub>2</sub> имеют удельное сопротивление поверхностного слоя 10<sup>7</sup>–10<sup>10</sup> Ом·м).

Основные параметры ФЭУ: световая анодная чувствительность (отношение анодного фототока к вызывающему его световому потоку при номинальных потенциалах электродов), составляет 1–10<sup>4</sup> А/лм; спектральная чувствительность (равная спектральной чувствительности фотокатода, умноженной на коэффициент усиления умножительной системы, лежащий обычно в пределах 10<sup>3</sup>–10<sup>8</sup>); темновой ток (ток в анодной цепи в отсутствие светового потока), который, как правило, не превышает 10<sup>-9</sup>–10<sup>-10</sup> А.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 2.2. Основными элементами экспериментальной установки являются:

- исследуемый фотоумножитель ФЭУ с блоком питания ИВН;
- импульсный источник света ИВН – пикосекундный лазер PLS-405;
- оптический аттенюатор;

- цифровой осциллограф, предназначенный для настройки и контроля работы установки;
- светоизолированный кожух для размещения ФЭУ, куда подводится оптический сигнал от лазера.

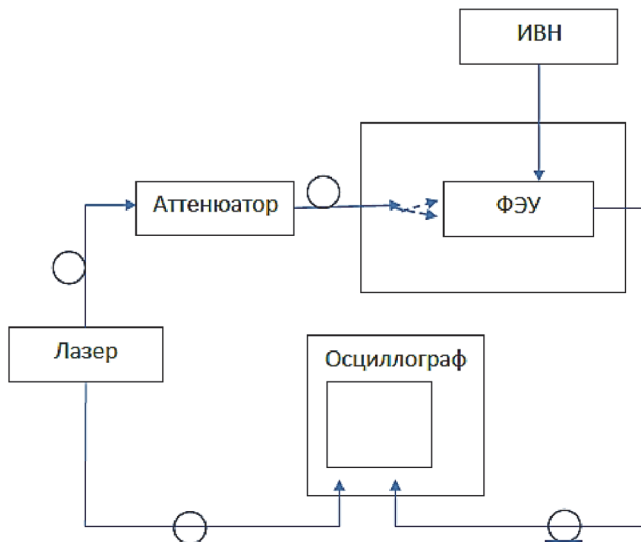


Рис. 2.2. Функциональная схема лабораторной установки

**ВНИМАНИЕ!** На вход осциллографа (при 50-Ом входе) нельзя подавать более 5 В! Для первичной настройки (при возможности появления сигналов выше 5 В) можно использовать более простой осциллограф, далее переключить сигналы на цифровой. *Следуйте указаниям преподавателя!*

### Порядок работы.

1. Подключить электрический сигнал от лазера к входу осциллографа, запуск осциллографа сделать от этого импульса, наблюдать осциллограмму.
2. Подключить выход осциллографа к другому входу осциллографа, включить этот канал.
3. Постепенно увеличивая напряжение на ФЭУ, наблюдать импульс от ФЭУ.
4. Для задания режима измерения использовать меню.

5. После установки режима измерения можно построить гистограмму получаемых данных.

6. Осциллограммы и гистограммы (а также последовательность измерений) можно записать на «флэшку» и далее проводить обработку на компьютере со стандартными программами.

## РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

Современный цифровой осциллограф позволяет проводить многие измерения автономно, без дополнительных электронных блоков. В нем уже есть быстрый АЦП, позволяющий измерять амплитуду и заряд, временные измерения проводятся автоматически, так как есть временная развертка. При наличии встроенного компьютера с помощью такого осциллографа можно получать спектры: как амплитудные, так и временные.

1. Наблюдать импульсы с лазера (запуск осциллографа сделать от электрического импульса лазера), фотоумножителя. Запомнить форму импульсов для последующей печати. Провести измерение амплитуды импульсов, получить амплитудный спектр на экране осциллографа, провести измерение заряда. Получить спектр на экране.

2. Записать информацию, полученную на осциллографе, на цифровой носитель (USB флеш-накопитель). Перенести информацию в компьютер, построить спектры амплитуд и заряда.

3. Провести измерение зависимости амплитуды сигнала от значения коэффициента ослабления оптического аттенюатора. С помощью осциллографа снять зависимость амплитуды сигнала с ФЭУ после аттенюатора от значения аттенюатора.  $U = 1800 \text{ V}$ ,  $Att = 0 \dots 20 \text{ dB}$ .

4. Провести измерение усиления ФЭУ от напряжения питания. Измерения проводить в однофотонном режиме. Провести измерение спектров заряда (с запоминанием спектров в памяти) при нескольких напряжениях питания ФЭУ:

- 1) подключить усилитель с  $K_{yc} = 10$ ;
- 2) установить положение аттенюатора  $Att = 30 \text{ dB}$ , напряжение на ФЭУ  $U = 2400 \text{ V}$ ;
- 3) получить однофотонный режим;
- 4) провести измерение заряда (набор однофотонных спектров) при  $U = 2500, 2400, 2300, 2200 \text{ V}$ ;

5) определить усиление ФЭУ для каждого напряжения питания, построить зависимость усиления ФЭУ от напряжения питания, учесть наличие в схеме усилителя.

5. Временные измерения заключаются в измерении временного интервала, поэтому необходимы два импульса: в простейшем случае импульс запуска осциллографа (например, электрический импульс от лазера) и импульс с фотоумножителя. Провести соответствующие измерения, получить временной спектр на экране осциллографа и далее на компьютере.

6. Провести измерения задержки ФЭУ от напряжения питания, наблюдая смещение импульса с ФЭУ при изменении напряжения питания.

## **ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет должен содержать:

- 1) форму импульса;
- 2) амплитудный спектр;
- 3) зависимость амплитуды импульса от значения аттенюатора (или коэффициент ослабления от значения шкалы);
- 4) однофотонные спектры для разного напряжения;
- 5) зависимость усиления ФЭУ от напряжения на ФЭУ;
- 6) временной спектр, аппроксимировав его нормальным распределением, временное разрешение;
- 7) график изменения задержки ФЭУ от напряжения на ФЭУ.

## **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Каково устройство вакуумного фотоэлектронного умножителя с диодной системой?
2. Какие известны основные параметры ФЭУ?
3. Что такое «усиление» ФЭУ?
4. Что такое «однофотонный режим» работы фотоэлектронного умножителя?
5. Как работает цифровой осциллограф?
6. Что означают основные параметры цифрового осциллографа: полоса пропускания, частота дискретизации?

## 2.2. ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ФЭУ

Лабораторная работа посвящена измерениям основных временных параметров ФЭУ на экспериментальной установке, созданной на основе современного цифрового осциллографа с широкими возможностями измерений амплитудных и временных параметров импульсов, которая входит в комплекс лабораторных работ по курсу «Детекторы и электроника для временных измерений».

*Цель работы* – приобретение навыков работы с вакуумным фотоэлектронным множителем; изучение методов исследования временных характеристик фотоприемников; приобретение навыков работы с цифровым осциллографом; измерение основных амплитудных и временных параметров ФЭУ.

Выполнение данной лабораторной работы возможно в удалённом режиме.

### ВВЕДЕНИЕ

Точная регистрация временных параметров взаимодействия частицы с рабочим веществом детектора крайне важна при использовании методики идентификации частиц по времени пролёта, при создании триггерных детекторов для исследования быстрых взаимодействий, и при определении точного положения источника коррелированных частиц.

Наиболее распространённой методикой регистрации частиц с наилучшими временными параметрами является использование сцинтилляционных или черенковских детекторов. Применение сцинтилляционных и черенковских детекторов предполагает регистрацию световых сигналов, вызванных взаимодействием частицы с рабочей средой детектора (сцинтиллятор, черенковский радиатор). Это позволит получить информацию о регистрируемом событии: определить заряд, скорость, полную энергию или время прохождения частицы. Однако точность и полнота полученной информации во многом будет зависеть от типа используемого фотоприёмника, преобразующего световую вспышку в электрический сигнал.

Данная работа посвящена изучению временных параметров фотоэлектронных умножителей, поскольку приборы именно такого типа наиболее подходят для регистрации сцинтилляционных и черенковских фотонов в экспериментах в области физики высоких энергий.

**Типы вакуумных фотоэлектронных умножителей для временных измерений.** Вакуумный фотоэлектронный умножитель представляет собой вакуумированную колбу, имеющую в своём составе входное окно с нанесённым на него полупрозрачным фотокатодом, фокусирующий электрод (как правило), систему динодов и анод. Схематическое изображение типичного устройства классического вакуумного ФЭУ приведено на рис. 2.3.

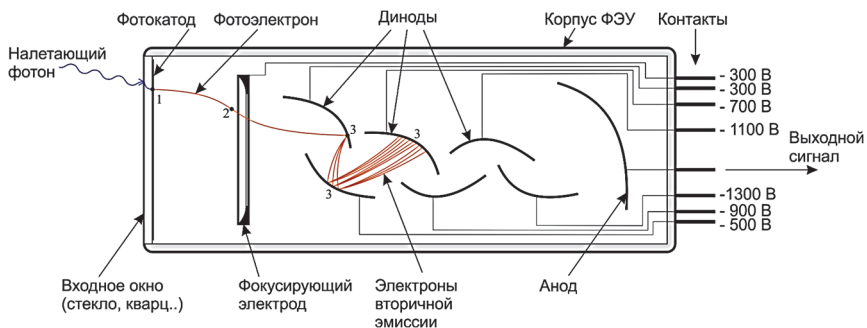


Рис. 2.3. Схема устройства классического вакуумного ФЭУ

Фотон, проходя сквозь прозрачное входное окно ФЭУ, попадает на фотокатод, что с некоторой вероятностью приводит к вылету электрона в вакуумированную область трубки (именно этот электрон называют *фотоэлектроном*). Вероятность преобразования фотона в фотоэлектрон называют *квантовой эффективностью фотокатода* (Quantum Efficiency, Q.E.). В современных ФЭУ эта величина достигает 55 %.

Для того чтобы фотоэлектрон, имеющий кинетическую энергию всего несколько электронвольт, породил электронную лавину, между фотокатодом и анодом создаётся сильный градиент электрического поля (напряжённостью порядка 200 В/см), который ускоряет фотоэлектрон в направлении первого динода. Во-вторых, в

трубке создаётся достаточно глубокий вакуум ( $\sim 10^{-7}$  Торр), что минимизирует вероятность взаимодействия фотоэлектрона, а также электронов лавины с молекулами остаточного газа.

Как было отмечено, выходные сигналы амплитудой менее тысячи электронов не превышают уровня шумов. Усиление сигнала достигается за счёт эффекта вторичной эмиссии электронов при взаимодействии фотоэлектрона с покрытием первого динода и далее лавинообразно. Расположение динодов подобрано таким образом, чтобы электроны лавины обязательно налетали на каждый из них по мере распространения лавины к аноду. С этой же целью на каждый из динодов подводят некоторое значение потенциала, снижающееся по мере приближения динода к аноду.

Как правило, один электрон с энергией  $\sim 250$  эВ выбивает с поверхности динода  $\alpha = 4$  новых электрона. При типичном для ФЭУ числе динодов  $N = 11$  это приводит к коэффициенту усиления

$$G = \alpha^N \approx 4,2 \cdot 10^6$$

и регистрации на аноде сигнала с зарядом

$$Q = e \cdot G = 6,7 \cdot 10^{-13} \text{ Кл.}$$

При длительности сигнала с ФЭУ  $\approx 10$  нс это соответствует анодному току величиной

$$I_a = \frac{dQ}{d\tau} = 67 \text{ мкА,}$$

что существенно превышает величину шумового тока как электронного тракта, так и самого ФЭУ.

Также нужно не забывать, что в большинстве применений ФЭУ регистрируется не один фотон, а как минимум несколько десятков, но при этом в ФЭУ происходит лишь набор одинаковых процессов, абсолютно аналогичных описанному выше процессу регистрации единичного фотона.

Вообще говоря, коэффициент умножения, а также ряд других важных параметров ФЭУ (однофотонное и временное разрешение, линейность и стабильность сигнала, и т.п.) во многом зависят от того, насколько хорошо и чётко электронная лавина переходит от динода к диноду – чем меньше доля электронов, миновавших столкновение с каким-либо из динодов, тем выше временное и амплитуд-

ное разрешение ФЭУ. Для улучшения данного параметра в классических ФЭУ используется *электростатическая фокусировка электронов лавины* – многопараметрический подбор условий (размеры, форма и расположение динодов, подаваемые потенциалы), обуславливающий максимально точный и полный переход силовых электростатических линий последовательно от динода к диноду. Кроме того, для минимизации разброса времени распространения фотоэлектронов от фотокатода до первого динода, внутренней поверхности входного окна ФЭУ для временных применений придают вогнутую сферическую поверхность.

Однако стоит отметить, что классическая фокусировка электронов лавины полностью лишает выходные сигналы линейно-сфокусированных ФЭУ какой-либо координатной информации, а также делает невозможным работу ФЭУ в условиях сколько-нибудь значимого магнитного поля.

В ходе попыток исправить эти недостатки классических ФЭУ, а также улучшить достижимое временное разрешение были разработаны ФЭУ с альтернативными типами динодных структур: ФЭУ с сетчатыми динодами, с металлоканальной динодной структурой и с микроканальными пластинами (рис. 2.4). Хотя существуют и другие типы динодных структур, только перечисленные ФЭУ характеризуются временным разрешением лучше 0,5 нс. При этом стоит отметить, что только ФЭУ с сетчатыми и микроканальными динодными системами способны корректно работать в условиях магнитных полей индукцией более 100 мТл без дополнительной громоздкой магнитной экранировки.

Современные версии фотоумножителей с сетчатыми динодами содержат 15–19 динодов, расположенных с шагом  $\sim 1$  мм. Каждый динод имеет тонкую структуру сетки (см. рис. 2.4, в), образующие волокна которой имеют шаг  $\sim 13$  мкм и диаметр  $\sim 4$  мкм. Планарная фокусировка электронов в области большой площади (типичный диаметр фотокатода и динодов  $\sim 2,5 \dots 6,5$  см) и малое расстояние между динодами и фотокатодом позволяет данным фотоумножителям работать с высоким временным разрешением в магнитных полях до 1,9 Тл, а также существенно увеличивает предел по токовой линейности, определяемый пространственным насыщением заряда в области последних динодов.

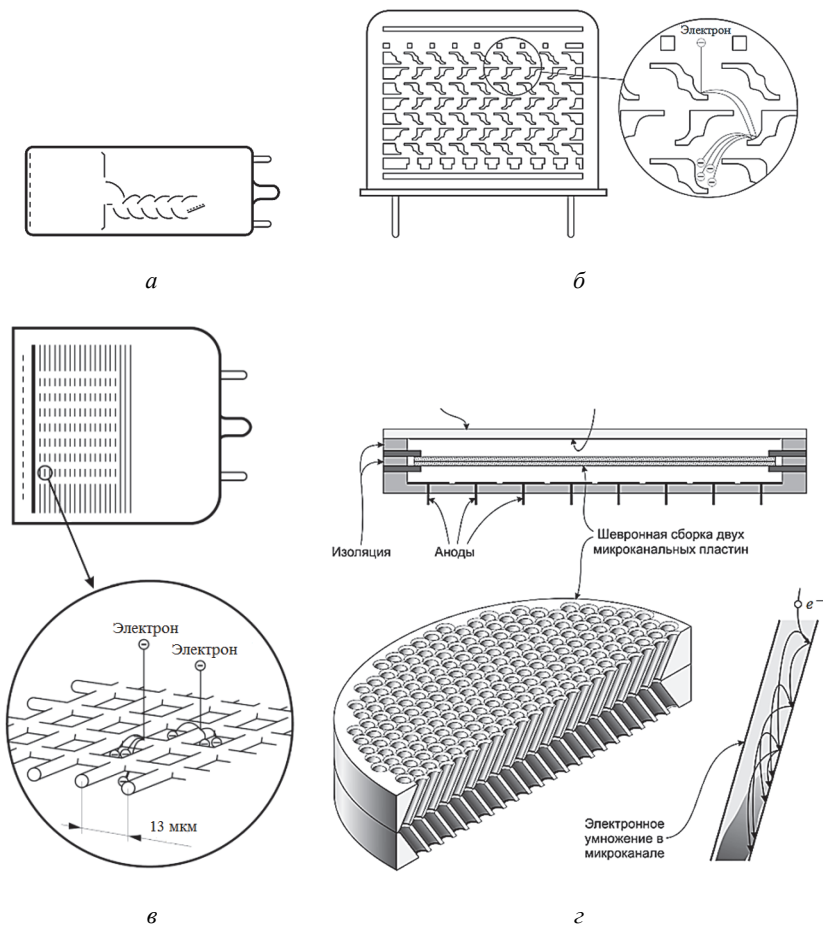


Рис. 2.4. Схематические изображения устройства ФЭУ с различными динодными структурами:  
*a* – с линейно-сфокусированными динодами;  
*б* – с металлоканальной динодной системой;  
*в* – с динодами из тонких сеток;  
*z* – на основе микроканальных пластин

Динодная система фотоумножителей на микроканальных пластинах (МКП-ФЭУ) изготовлена на основе трубок из свинцового стекла

с растворимым в кислоте наполнителем. Несколько сотен таких трубок вытягиваются при высокой температуре, существенно уменьшаясь в диаметре, и спаиваются друг с другом, образуя шестигранник с трубчатой структурой. Затем аналогичная процедура повторяется для нескольких сотен подобных шестигранников, образуя микроструктурированный объём, сечение которого имеет желаемую форму МКП. Нанесение на этот объём стеклянной оболочки, его нарезка на слои толщиной не более 1 мм и последующее их травление в кислоте образует микроканальные пластины из свинцового стекла, а их последующий водородный отжиг приводит к появлению на стенках микроканалов полупроводящей поверхности толщиной в несколько десятков атомарных слоёв.

Готовые микроканальные пластины имеют коэффициент умножения не более  $10^4$ , однако можно достичь и большего усиления при использовании двух или трёх пластин, составленных подряд. Зачастую используют шевронные сборки из двух МКП, микроканалы в которых расположены зеркально друг другу под небольшим углом к нормали – благодаря этому, достигаются более высокие значения коэффициента умножения и подавляется ионная обратная связь<sup>1</sup>.

Серийно производимые МКП-ФЭУ имеют микроканалы диаметром от 2 до 25 мкм и чувствительной площадью вплоть до  $80 \text{ см}^2$  и более. Основные преимущества МКП-ФЭУ заключаются в высокой стойкости к магнитным полям (вплоть до 4 Тл для моделей с минимальным диаметром микроканалов) и отличных временных параметрах (достижимое временное разрешение – лучше 10 пс). Ограниченность применения МКП-ФЭУ в современных экспериментах связана с небольшим ресурсом работы большинства моделей (до недавнего времени – не более  $1 \text{ Кл/см}^2$  в терминах интегрального анодного заряда, что на 2–3 порядка меньше, чем у классических ФЭУ) и особенностями конструкции МКП (дискретность каналов и отрицательный температурный коэффициент их сопротивления), которые до некоторой степени ограничивают токовый динамический диапазон и максимальную квантовую эффективность МКП-ФЭУ.

---

<sup>1</sup> Ионизация электронами лавины молекул остаточного газа, которая приводит к образованию положительно заряженных ионов, дрейфующих в направлении фотокатода, что приводит к снижению его квантовой эффективности и образованию шумовых сигналов (послеимпульсов).

**Основные характеристики фотоприемников для временных измерений.** *Время распространения лавины.* В данной работе будет использоваться ФЭУ с линейно-сфокусированной диодной структурой. Длина колбы подобных ФЭУ составляет, как правило, 10–15 см, диаметр – 3–6 см, т.е. с учётом ломаной траектории распространения лавины, её длина – не менее 20 см. Электроны выбиваются с диодов с минимальной кинетической энергией в несколько электронвольт, ускоряясь до 100–300 эВ в каждом каскаде. С учётом массы электрона  $m_e = 511$  кэВ, общее время распространения лавины может составлять 10–50 нс, и это время тем меньше, чем выше напряжение питания ФЭУ, а значит, и средняя кинетическая энергия электронов лавины. При слишком низких напряжениях питания время распространения лавины растягивается экспоненциально, и ФЭУ перестаёт работать в штатном режиме.

Определить время распространения лавины можно при засветке входного окна ФЭУ короткими сигналами пикосекундного лазера путём измерения разницы во времени прихода строб-сигнала с лазера и анодного импульса ФЭУ при заданном напряжении питания. Данные измерения требуют также учёта времени распространения светового сигнала по световоду и времени распространения анодного импульса ФЭУ и строб-сигнала лазера по коаксиальным кабелям до измерительной электроники.

*Разброс времени регистрации (Transit time spread).* Лавинное умножение электронов в ФЭУ – статистический процесс, подчинённый распределению Пуассона как с точки зрения количества электронов, рождаемых на каждом каскаде, так и с точки зрения энергии каждого электрона. Первая неопределённость имеет прямое влияние на амплитудное разрешение ФЭУ – способность различить с его помощью вспышки от двух источников света постоянной, но различной интенсивности. Вторая неопределённость сказывается на временном разрешении ФЭУ, а точнее на разбросе времени регистрации одиночных электронов.

Расстояние  $S$ , пройденное фотоэлектронами за время  $t_1$  от фотокатода до первого диода имеет следующую зависимость от начальной кинетической энергии  $T$  фотоэлектрона:

$$S = \frac{eEt_1^2}{2m} + t_1 \sqrt{\frac{2T}{m}}.$$

При этом разброс времени регистрации лавины, вызванной фотоэлектроном со средней энергией  $T$  относительно фотоэлектрона с нулевой кинетической энергией, будет составлять:

$$\delta e = \frac{\sqrt{2mT}}{eE}.$$

Это выражение справедливо только в случае точечной засветки фотокатода, так как определить аналитически разброс времени пролёта фотоэлектронов при равномерной засветке фотокатода для ФЭУ различных моделей крайне затруднительно.

Таким образом, для оценки разброса времени регистрации однофотозлектронных сигналов необходимо обеспечить равномерную засветку всей поверхности фотокатода ФЭУ в однофотозлектронном режиме и провести измерения, аналогичные описанным ранее. Данный режим подразумевает генерацию световых вспышек малой интенсивности таким образом, чтобы только в 10 % событий происходила регистрация одного фотоэлектрона. Для проверки корректности режима засветки необходимо измерить однофотозлектронный спектр вспышек, пример которого представлен на рис. 2.5, и соотнести число событий в зарядовом пьедестале к общему числу зарегистрированных событий.

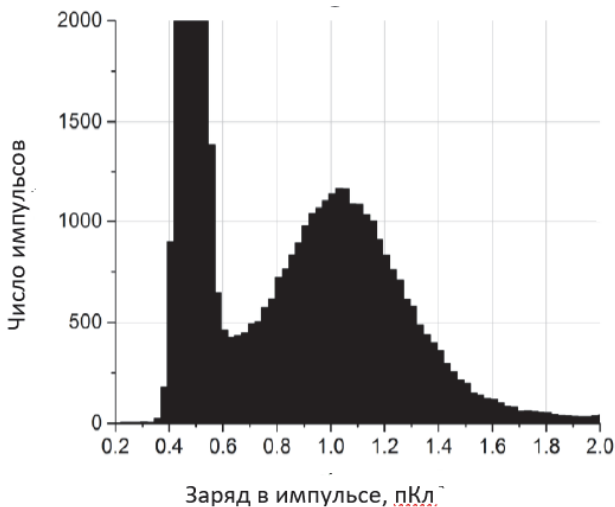


Рис. 2.5. Пример одно-фотозлектронного спектра, измеренного с помощью ФЭУ

**Временное разрешение при регистрации многофотонных событий.** Следует иметь в виду, что временное разрешение ФЭУ, в отличие от амплитудного, не определяется его способностью раздельной регистрации двух вспышек, следующих с минимальным интервалом, поскольку данная величина зависит от ширины импульса ФЭУ, которая составляет, как правило,  $\sim 10$  нс и определяется параметрами, описанными в предыдущем пункте, а также ёмкостью анода ФЭУ. Под временным разрешением ФЭУ следует понимать точность, с которой с помощью ФЭУ можно определить момент попадания фотонов вспышки на его фотокатод. При этом следует различать временное разрешение сцинтилляционного детектора и ФЭУ, поскольку время высвечивания большинства сцинтиллятора (за исключением наиболее быстрых образцов) превышает типичную длительность сигнала ФЭУ.

При этом ввиду статистической природы высвечивания сцинтиллятора и регистрации сцинтилляционных фотонов в ФЭУ временное разрешение улучшается с количеством зарегистрированных фотонов:

$$\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{N_{\text{ф.э}}}}.$$

Проверка данного утверждения возможна при увеличении интенсивности вспышки, предварительно ослабленной с помощью оптического аттенюатора, и измерении временного разрешения регистрируемых сигналов. Калибровка по числу фотоэлектронов возможна с помощью измеренного однофотоэлектронного спектра.

**Влияние используемого дискриминатора на временные параметры измерений.** Описанные выше измерения предполагают определение точной временной отметки возникновения сигнала. Важно понимать, что при использовании неподходящей электроники, результаты измерений будут содержать вклад её временного разрешения. Например, при измерении времени прихода аналоговых сигналов переменной амплитуды с помощью интегрального дискриминатора, измеренная величина временного разрешения может достигать длительности фронта импульса (рис. 2.6).

Поэтому основной методикой прецизионного формирования временной отметки является использование формирователя со следя-

щим порогом (ФСП). В отличие от интегрально дискриминатора порог ФСП задаётся не в абсолютных величинах, а в относительных (например, привязка фронту сигнала по уровню, соответствующему 20 % от амплитуды сигнала). В результате такая методика позволяет измерить собственное временное разрешение детектора вплоть до 20–30 пс (сигма) в широком диапазоне амплитуд сигналов (как правило, 1:100), рис. 2.7.

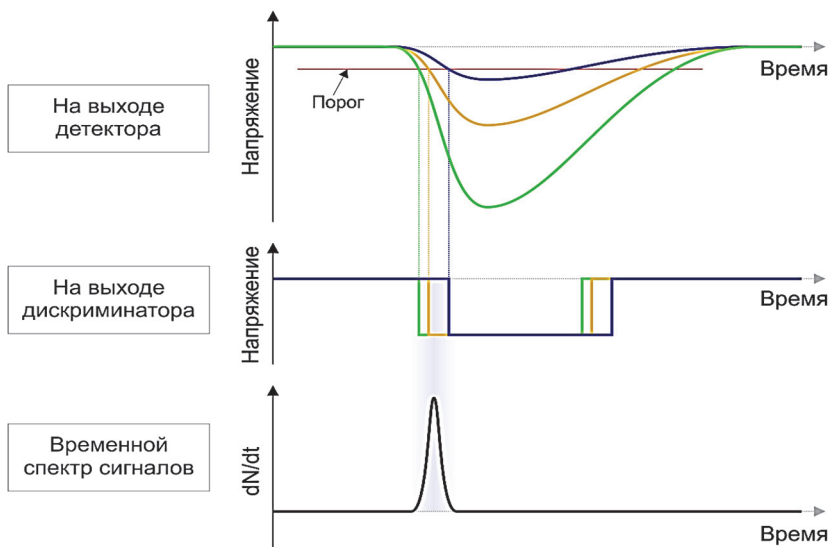


Рис. 2.6. Использование формирователя с постоянным порогом (интегрального дискриминатора) во временных измерениях

Сравнение смещения временной отметки при использовании интегрального дискриминатора и ФСП представлено на рис. 2.8. Основные ограничения для использования данной методики происходят из возможной нестабильности формы фронта сигналов и ограничений работы компаратора.

Следует отметить, что ввиду более сложной процедуры настройки и более высокой стоимости ФСП для некоторых многоканальных систем, не требующих высокого временного разрешения в режиме онлайн, может быть более целесообразно использование интегральных дискриминаторов совместно с время-амплитудной

оффлайн коррекцией, проводимой в соответствии с измеренными калибровочными кривыми.

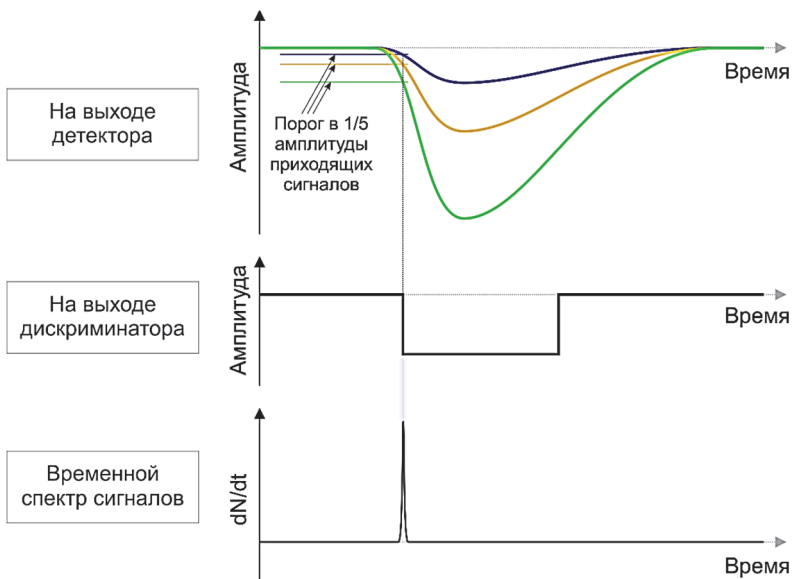


Рис. 2.7. Использование формирователя со следящим порогом во временных измерениях

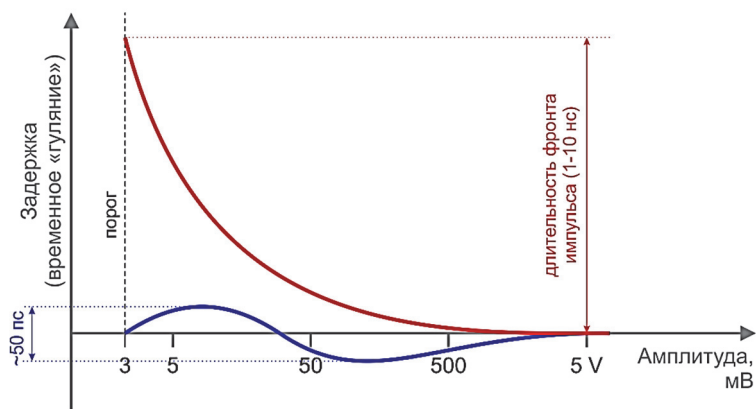


Рис. 2.8. Сравнение смещения временной отметки при использовании интегрального дискриминатора и ФСП

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Основными элементами экспериментальной установки (рис. 2.9) являются:

- 1) исследуемый фотоумножитель (ФЭУ) с блоком питания (ИВН);
- 2) импульсный источник света – пикосекундный лазер PLS-405;
- 3) оптический attenuator;
- 4) осциллограф WaveRunner 640Zi, предназначенный для настройки и контроля работы установки, при применении современного цифрового осциллографа в значительной части измерений параметров ФЭУ он может заменить электронный комплекс;
- 5) светонепроницаемый кожух для размещения ФЭУ, куда подводится оптический сигнал от лазера.

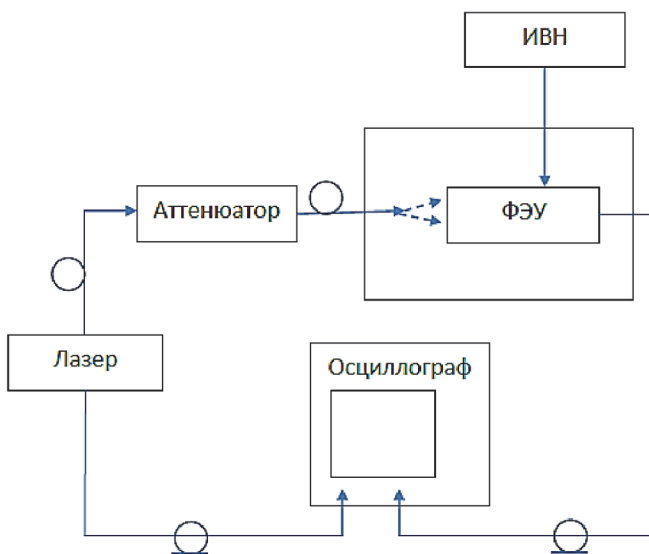


Рис. 2.9. Функциональная схема экспериментальной установки

**ВНИМАНИЕ!** На вход осциллографа (при 50-Ом входе) нельзя подавать более 5 В! Для настройки можно использовать более простой осциллограф, далее переключить сигналы на цифровой. Следуйте указаниям преподавателя!

### **Порядок выполнения работы.**

1. Подать электрический сигнал лазера на вход осциллографа, запуск осциллографа сделать от этого же импульса, наблюдать осциллограмму.

2. Подать сигнал с ФЭУ на другой вход осциллографа.

3. Постепенно увеличивая напряжение на ФЭУ, наблюдать импульс от ФЭУ.

4. Для задания режима измерения использовать меню.

5. После установки режима измерения можно построить гистограмму получаемых данных.

6. Осциллограммы и гистограммы (а также последовательность измерений) можно записать на «флешку» и далее проводить обработку на компьютере со стандартными программами.

### **РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ**

Современный цифровой осциллограф позволяет проводить многие измерения автономно, без дополнительных электронных блоков. В нем уже есть быстрый АЦП, позволяющий измерять амплитуду и заряд, временные измерения проводятся автоматически, так как есть временная развертка. При наличии встроенного компьютера с помощью такого осциллографа можно получать спектры: как амплитудные, так и временные.

1. Наблюдать импульсы с лазера (запуск осциллографа сделать от электрического импульса лазера), фотоумножителя. Ввести в один из каналов отрезок кабеля, определить, насколько изменилась задержка, оценить удельную задержку кабеля (размерность – нс/м). Провести измерение амплитуды импульсов, построить амплитудный спектр.

2. Временные измерения заключаются в измерении временного интервала, поэтому необходимы два импульса: в простейшем случае импульс запуска осциллографа (например, электрический импульс от лазера) и импульс с фотоумножителя. Провести соответствующие измерения, построить временной спектр.

3. Провести измерение временного разрешения от амплитуды (крутизны фронта) импульсов, обратить внимание, что временное разрешение зависит от этого параметра.

4. Провести измерения с временной привязкой к постоянной доле амплитуды. Установить импульсы на выходе ФЭУ (с помощью ослабления амплитуды вспышки) так, чтобы их амплитуда имела заметный разброс. Измерить временное разрешение. Установить привязку к импульсу с ФЭУ на постоянном уровне от амплитуды (аналогично работе ФСП), провести временные измерения, сравнить с режимом измерения с постоянным порогом.

5. Провести измерение временного разрешения ФЭУ от напряжения питания. Установить амплитуду 200 мВ примерно в половинку шкалы на экране осциллографа. Начинать с  $U = 2500$  В, снижать до 2100 В, сохраняя примерно амплитуду на экране, изменяя шкалу чувствительности. Измерить временные спектры, получить зависимость временного разрешения от напряжения питания ФЭУ.

6. Используя данные (временные спектры), полученные в предыдущем пункте, определить зависимость изменения задержки ФЭУ от напряжения питания.

7. Измерить временное разрешение (получить временные спектры) от окна на фотокатоде (полное окно, край фотокатода, центр фотокатода).

8. Провести измерение временного разрешения ФЭУ XR2020 в зависимости от амплитуды световой вспышки (для диаметра окна  $\approx 1$  см). Менять амплитуду световой вспышки от однофотонного до максимально возможного. Для каждой амплитуды измерять временной спектр. Получить зависимость временного разрешения ФЭУ от амплитуды световой вспышки в фотоэлектронах.

9. Для всех амплитуд сравнить число фотоэлектронов, полученное по калибровке и оценке из ширины амплитудного спектра. Оценить точность такой оценки

## ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) форму импульса, импульс после задержки, задержку между импульсами и удельную задержку кабеля (размерность нс/м);
- 2) амплитудный спектр импульсов от лазера;
- 3) временной спектр интервалов времени от электрического импульса от лазера до импульса с ФЭУ (постоянный порог), временное разрешение;

- 4) временной спектр интервалов времени от электрического импульса от лазера до импульса с ФЭУ (следающий порог), временное разрешение;
- 5) график зависимости временного разрешения ФЭУ от напряжения питания;
- 6) график зависимости задержки ФЭУ от напряжения питания;
- 7) данные по временному разрешению и положению максимума временного распределения, полученные при засветке всего фотокаатода, центральной его части и периферической части фотокаатода;
- 8) зависимость временного разрешения от амплитуды световой вспышки (числа фотоэлектронов в импульсе).

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Что такое временное разрешение?
2. Какие временные параметры вы знаете?
3. Каково устройство вакуумного фотоумножителя с диодной системой.
4. Перечислите факторы, влияющие на временные параметры фотоумножителя.
5. Как параметры цифрового осциллографа (полоса пропускания, частота дискретизации) влияют на точность временных измерений?
6. Нарисуйте (качественно) зависимости:
  - а) временного разрешения ФЭУ от числа фотонов во вспышке;
  - б) задержки ФЭУ от напряжения.

## **ЧАСТЬ 3. ДЕТЕКТОРЫ НА ОСНОВЕ КСЕНОНА**

---

### **3.1. ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНАЯ КАМЕРА НА ГАЗООБРАЗНОМ КСЕНОНЕ**

*Цель работы* – изучение процесса электролюминесценции (ЭЛ) в благородном газе ксеноне как способа регистрации ионизационного сигнала от заряженных частиц в камере, заполненной газообразным ксеноном.

Лабораторная установка включает в себя ионизационную камеру с тремя электродами – катодом с внедренным в него альфа-источником, заземленной сеткой и сетчатым анодом, установленными внутри цилиндрического корпуса, имеющего ультрафиолетовое окно и наполненного газообразным ксеноном под давлением 6 атм, а также фотоумножителем, чувствительным в ультрафиолетовой области спектра. Сигнал с фотоумножителя регистрируется при помощи цифрового осциллографа. В установку также входят лабораторные источники высокого напряжения с *RC*-фильтрами для уменьшения пульсаций напряжения и цифровой вольтметр.

В данной работе изучаются основные характеристики электролюминесцентной ионизационной камеры и процесс формирования ЭЛ сигнала от альфа-частицы с известной энергией в конкретной геометрии расположения электродов.

### **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  $Z$ , в связи с чем он используется в гамма-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) и нейтрино [4, 5]. В них для измерения величины выделившегося заряда используют процесс *электролюминесценции* – испускания световых фотонов электронами, движущимися в газообразном ксеноне (в 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 соответствующий 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, предназначена для изучения процесса измерения электрического заряда, выделившегося в рабочем объеме ксенонового детектора, путем регистрации световых фотонов фотоумножителем. Она воспроизводит принцип работы регистрирующей системы двухфазного эмиссионного детектора на основе сжиженного благородного газа (аргона или ксенона). Принципиальным отличием ее от двухфазного эмиссионного детектора является заполнение рабочего объема газообразным ксеноном вместо конденсированного (жидкого), находящегося 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.

**Сцинтилляция.** При взаимодействии заряженной частицы с благородным газом происходит возбуждение атомов (образование  $\text{Xe}^*$ ) и их ионизация (образование электрон-ионных пар  $e^- + \text{Xe}^+$ ). Частиц-

ная рекомбинация электронов и ионов в приложенном электрическом поле также приводит к образованию возбужденных атомов. В процессе столкновений с другими атомами происходит образование возбужденных молекул  $\text{Xe}_2^*$  – 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  $\text{Xe}^*$ , которые, как и в описанном ранее процессе сцинтилляции, образуют возбужденные молекулы ксенона  $\text{Xe}_2^*$ , распад которых приводит к образованию ВУФ фотонов. Для процесса электролюминесценции характерны следующие свойства: количество образовавшихся фотонов пропорционально длине пути, проходимого электронами, и, очевидно, пропорционально 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, испускаемое одним электроном в электрическом поле напряженностью  $E$  в зазоре  $d$  между электродами, может быть описано следующей эмпирической формулой:

$$N_{\phi} = a \cdot x \cdot (E/n) + b \cdot x, \quad (3.1)$$

где  $n$  – объемная концентрация атомов;  $x = n \cdot d$  – 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 (3.1) также может быть записано в виде:

$$N_{\phi} = 140 \cdot (E/p - 0,83) [\text{фотонов электрон}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}], \quad (3.2)$$

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

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, девозбуждение 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 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 преобразователя (ЗЧПУ), подсоединенного к аноду.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Экспериментальная установка для исследования электролюминесценции в газообразном ксеноне состоит из следующих элементов (рис. 3.1): электролюминесцентной камеры (рис. 3.2), просматриваемой через окно из плавленого кварца фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), чувствительным в ВУФ области спектра, источников высоковольтного питания, а также сглаживающих пульсации фильтров для подачи высоковольтных потенциалов на электроды камеры

(катод и анод), источника высоковольтного питания ФЭУ, вольтметра для измерения напряжений питания и цифрового осциллографа.

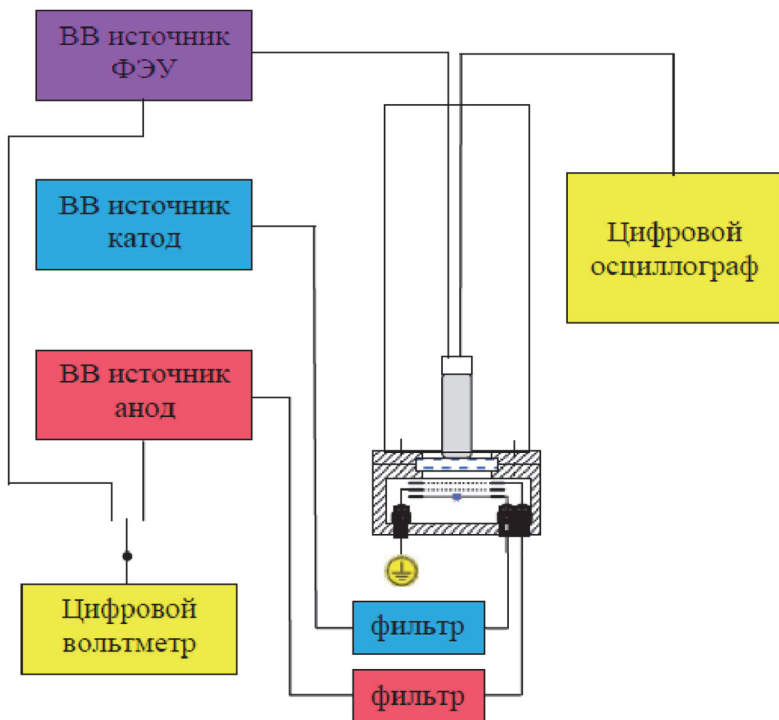


Рис. 3.1. Принципиальная схема экспериментальной установки для изучения электролюминесценции газообразного ксенона

Электролюминесцентная камера (рис. 3.3) представляет собой цилиндрический сосуд из нержавеющей стали, рассчитанный на высокое давление газа (до 30 атм), в котором расположены: сетчатые оптически прозрачные анод и земляной электрод (последний будем называть далее сеткой), а также сплошной катод. Камера заполнена чистым ксеноном под давлением 6 атм. Сетчатые электроды выполнены из нержавеющей проволоки диаметром 0,1 мм с шагом 1 мм.

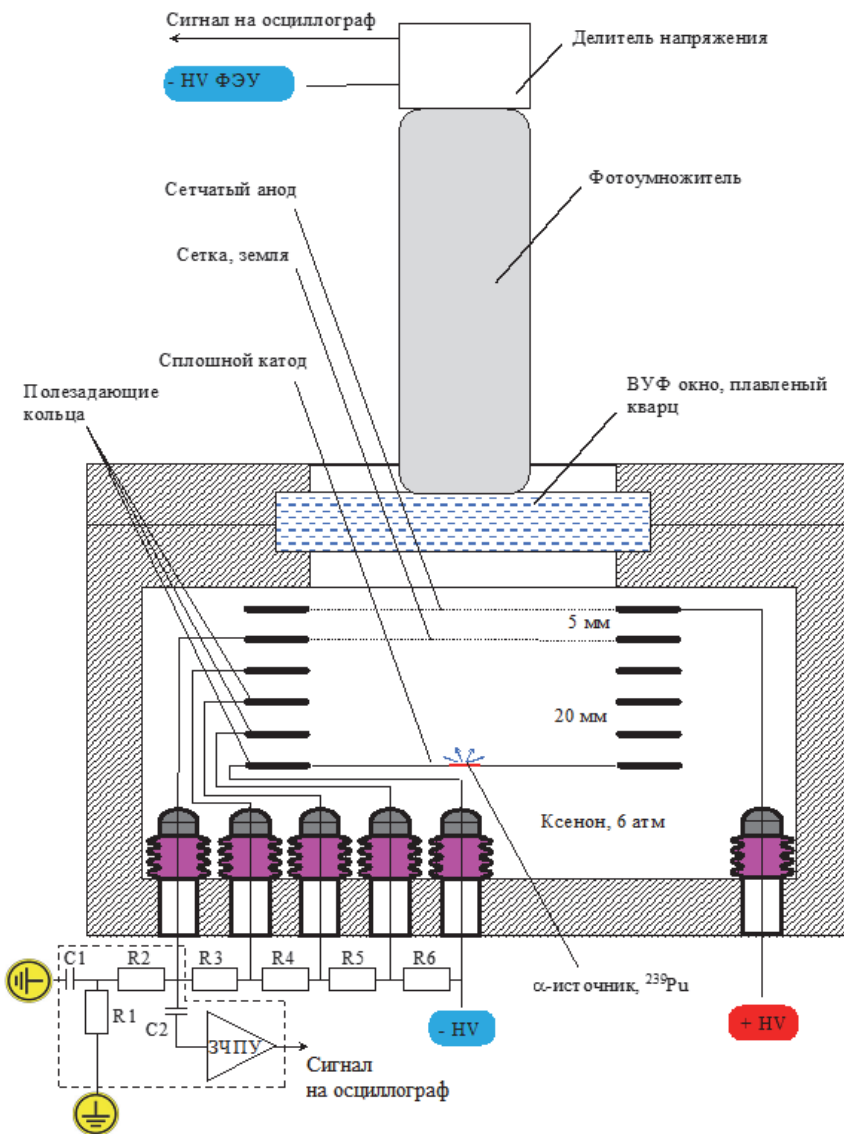


Рис. 3.2. Схема устройства электролюминесцентной камеры:  
 $R1 = 7,6 \text{ МОм}$ ,  $R1 = 3,8 \text{ МОм}$ ,  $R3 - R6 = 10 \text{ МОм}$ ,  $C1 = 2,2 \text{ нФ}$ ,  $C2 = 7,5 \text{ нФ}$ ;  
 пунктирным контуром показан корпус предусилителя

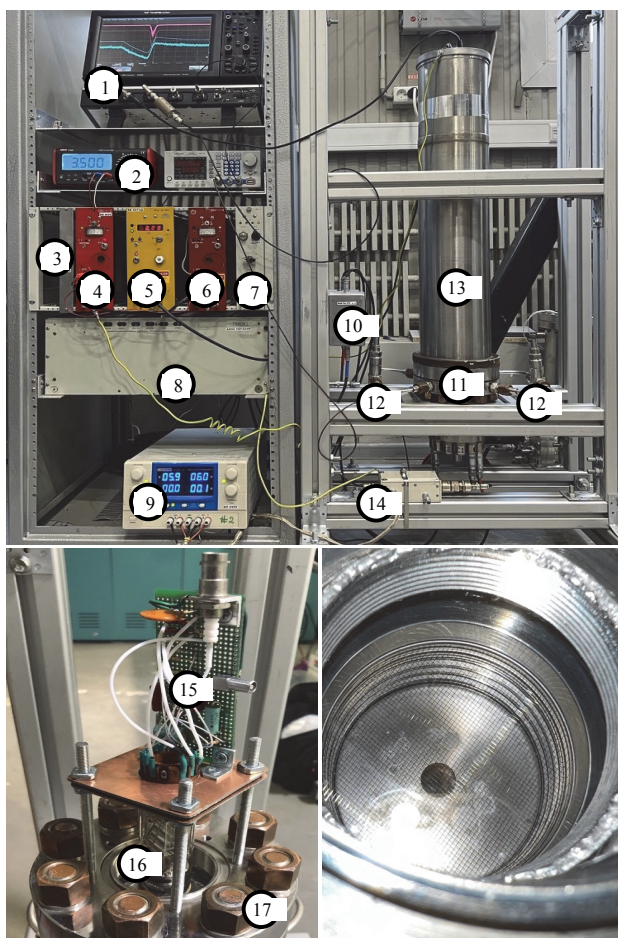


Рис. 3.3. Общий вид установки (фото сверху), верхняя часть камеры без кожуха (фото внизу слева) и вид сверху электродной системы через кварцевое окно (фото внизу справа): 1 – цифровой осциллограф; 2 – цифровой вольтметр для измерения напряжения на ФЭУ и аноде; 3 – переключатель режима измерения напряжения (анод/ФЭУ); 4 – ВВ источник питания ФЭУ; 5 – ВВ источник питания катода; 6 – ВВ источник питания анода; 7 – блок включения и контроля низковольтного питания ВВ источников; 8 – блок низковольтного питания ВВ источников; 9 – блок питания ЗЧПУ; 10 – фильтры высокого напряжения; 11 – корпус ЭЛ камеры; 12 – газовые вводы; 13 – светонепроницаемый кожух; 14 – ЗЧПУ; 15 – делитель напряжения ФЭУ; 16 – ФЭУ; 17 – верхний фланец камеры

На поверхность катода в его центральной части методом химического осаждения нанесен изотоп  $^{239}\text{Pu}$ , испускающий альфа-частицы с энергией 5,15 МэВ; источник закрыт  $\text{MgF}_2$  защитной пленкой. Расстояние между анодом и заземленной сеткой – 5 мм, между сеткой и катодом – 5 мм. Объем между катодом и сеткой обычно называют *дрейфовым*, или *рабочим объемом*. Пробег альфа-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 альфа-частицей электроны движутся в электрическом поле по направлению к сетке и далее попадают в зазор между сеткой и анодом. Если приложено достаточно большое электрическое поле (см. ранее), то наблюдается ЭЛ в газе. Ультрафиолетовые световые фотоны ЭЛ регистрируются через окно из плавленного кварца фотоэлектронным умножителем (ФЭУ-181), имеющим входное окно из кристаллического материала  $\text{MgF}_2$ , который прозрачен для ВУФ излучения от ЭЛ в ксеноне. Фотоэлектронный умножитель изолирован от внешнего света светонепроницаемым кожухом 6 (см. рис. 3.3).

Схема съема сигналов и подачи электрических потенциалов показаны на рис. 3.2. При подаче на катод потенциала  $U_c$  потенциал на сетке  $U_g$  вычисляется исходя из номиналов резисторов делителя напряжения и резисторов внутри предусилителя, являющихся элементами фильтра высокого напряжения, подаваемого через ЗЧПУ:

$$U_g = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + \dots + R_6} \cdot U_c. \quad (3.3)$$

### **Включение установки.**

ШАГ 1. Включить цифровой осциллограф, вольтметр и блок низковольтного питания 8 тумблером 7 (см. рис. 3.3).

ШАГ 2. Убедиться, что лимб на ВВ источнике питания ФЭУ 4 (см. рис. 3.3) выкручен до упора против часовой стрелки, затем включить на нем тумблер «ВКЛ», при этом должен загореться красный светодиод над тумблером. Плавно крутить лимб по часовой стрелке и наблюдать за увеличением напряжения по показаниям вольтметра (коэффициент деления 1:1000!). На ФЭУ установить рабочее напряжение 1900 В. На осциллографе (на развертке по горизонтали 50 нс/дел. и чувствительности по вертикали 2 мВ/дел.) будут наблюдаться срабатывания от отдельных однофотоэлектронных (шумовых) сигналов ФЭУ, а также сигналы сцинтилляции от альфа-частиц в ксеноне в виде групп сигналов, состоящих из отдельных однофотоэлектронных сигналов.

ШАГ 3. Убедиться, что ручка на ВВ источнике питания катода 5 (см. рис. 3.3) выкручена до упора против часовой стрелки, затем включить на нем тумблер питания слева – должен загореться зеленый светодиод «ON». Плавно крутить ручку по часовой стрелке до установления напряжения 1000 В. На осциллографе будет видно заметное увеличение частоты однофотоэлектронных сигналов после сцинтилляций, вызванное отдельными ЭЛ фотонами в промежутке между катодом и сеткой.

ШАГ 4. Убедиться, что лимб на ВВ источнике питания анода 6 (см. рис. 3.3) выкручен до упора против часовой стрелки, затем включить на нем тумблер «ВКЛ» – должен загореться красный светодиод над тумблером. Плавно крутить лимб по часовой стрелке и наблюдать за увеличением напряжения по показаниям вольтметра (коэффициент деления 1:1000!). Установить рабочее напряжение на аноде 5000 В. На осциллографе (на развертке по горизонтали 1 мкс/дел. и чувствительности по вертикали 10 мВ/дел.) наблюдать электролюминесцентные сигналы (рис. 3.4).

**ВНИМАНИЕ!** Максимальное напряжение, которое можно подавать на катод и анод, – 5000 В!

**Сцинтилляционный сигнал.** При взаимодействии с газообразным ксеноном происходит, как было уже описано, возбуждение атомов ксенона с образованием возбужденных молекул ксенона и ионизация атомов. В отсутствие электрического поля процесс рекомбинации электронов и ионов также будет приводить к образованию возбужденных молекул, таким образом фотоумножитель будет регистрировать только сцинтилляционный сигнал. Осциллограмма характерного сцинтилляционного сигнала ФЭУ показана на рис. 3.5 (наблюдение производится при временной развертке 100 нс). Сигнал состоит из быстрой компоненты, за которую отвечает распад короткоживущих синглетных состояний возбужденных молекул (см. ранее), и медленной, в которую вносят вклад триплетные состояния и процесс рекомбинации электронов и ионов. Вследствие того, что эффективность светосбора фотоумножителем сцинтилляционного света невелика (из-за значительной удаленности источника света от фотокатода фотоумножителя и отсутствия светоотражающих поверхностей), сигнал в спадающей части представлен отдельными импульсами, характерными для одиночных фотоэлектронов, выбитых с фотокатода.

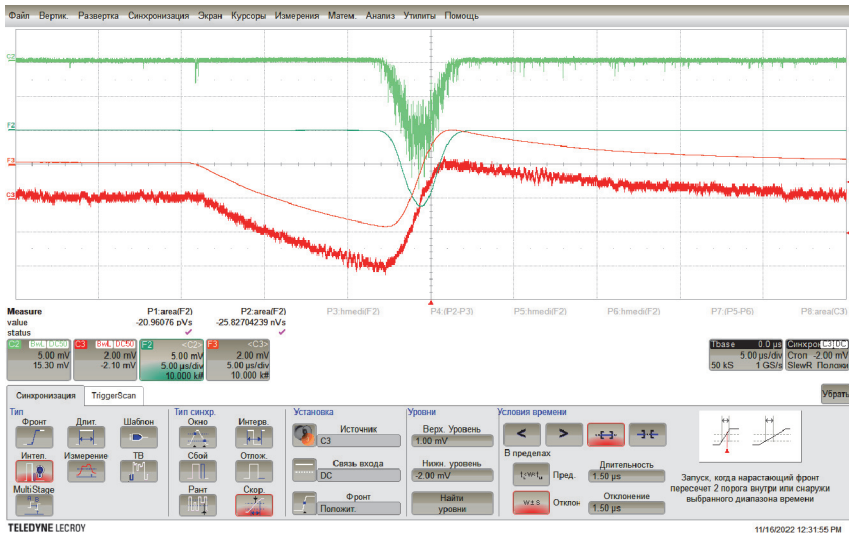


Рис. 3.4. Осциллограммы зарядового (канал C3), сцинтиляционного и электролюминесцентного (канал C2) сигналов; F2 и F3 – усредненные по 10000 событиям сигналы каналов C2 и C3, соответственно;  $U_c = -2$  кВ,  $U_a = +3,25$  кВ; показана панель настройки триггера по каналу C3

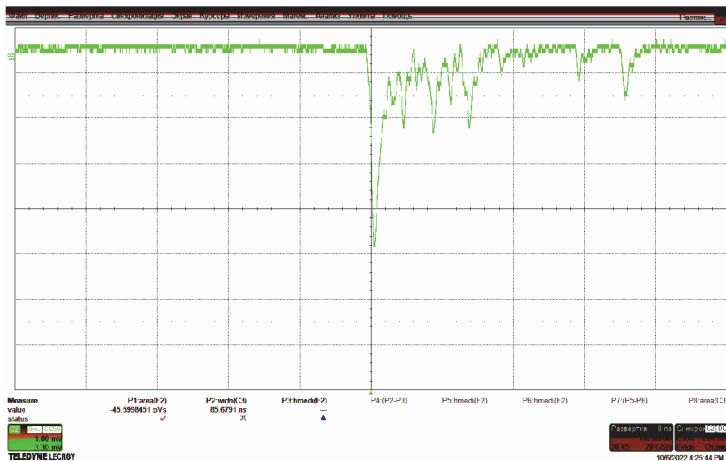


Рис. 3.5. Осциллограмма сцинтиляционного сигнала с ФЭУ

### **Зарядовый сигнал и выработка триггера для осциллографа.**

В настоящей работе зарядовый сигнал используется для надежного запуска цифрового осциллографа. Запуск осциллографа по зарядовому сигналу выбран в связи с тем, что его форма и величина слабо зависят от величин приложенных электрических полей в тех пределах, в которых исследуется работа камеры, а запуск осциллографа с однозначным срабатыванием от светового сигнала только одного типа – сцинтилляционного или электролюминесцентного, затруднителен при малых величинах электролюминесцентного сигнала вследствие больших флуктуаций числа фотоэлектронов, образованных в ФЭУ под действием света. Подключение к сетке, находящейся под небольшим потенциалом, выбрано для обеспечения безопасной работы ЗЧПУ.

Зарядовый сигнал с ЗЧПУ показан на рис. 3.4. На катод подан потенциал  $-2$  кВ. Согласно формуле (3.3), потенциал на сетке при этом будет составлять 440 В. Таким образом, при нулевом потенциале на аноде в промежутке между сеткой и анодом будет электрическое поле напряженностью 0,88 кВ/см, и электроны будут продолжать свое движение к аноду после прохождения сетки. Форма импульса с ЗЧПУ определяется накоплением наведенного заряда, вызванного приближением облака электронов к сетке (участок с отрицательной производной), в дрейфовом промежутке и последующим его удалением от сетки (участок с положительной производной) в промежутке между сеткой и анодом. В идеальном случае участки с положительной и отрицательной производными должны быть линейными и равными между собой. В нашем случае положительный участок сигнала по величине превышает отрицательный, а отрицательный обладает заметной нелинейностью, поскольку выходной сигнал с ЗЧПУ пропускается через емкостной фильтр, который служит для уменьшения низкочастотной наводки (акустика, сеть 50 Гц и др.).

Для выработки триггера цифрового осциллографа LeCroy по сигналу с ЗЧПУ используется режим «смарт-триггера» (см. панель выработки триггерного сигнала на рис. 3.5). Запуск осциллографа осуществляется по результату анализа длительности положительного фронта сигнала. Заданы два пороговых значения  $-2,5$  и  $+0,5$  мВ (на рис. 3.5 показаны маркерами справа), время нарастания между которыми не должно превышать 3 мкс (задано как  $1,5 \pm 1,5$  мкс). Такой триггер позволяет практически полностью избавиться от ложных

срабатываний от высокочастотных сигналов электромагнитной наводки.

**Электролюминесцентный сигнал.** При нулевом потенциале на аноде, начального потенциала 0,44 кВ на сетке еще недостаточно для возникновения электролюминесценции в промежутке между сеткой и анодом – приведенное электрическое поле составляет  $0,147 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$ , что значительно меньше порогового значения  $0,83 \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}$  (см. формулу (3.2)). При увеличении положительного потенциала анода на осциллограмме в том месте, где сигнал с ЗЧПУ имеет положительную производную, начинают появляться отдельные однофотоэлектронные сигналы, которые по мере увеличения потенциала на аноде складываются в электролюминесцентный сигнал, намного превышающий по величине сцинтилляционный. Сигнал, приведенный на рис. 3.4, получен при напряжении на аноде +3,25 кВ. Электролюминесцентный сигнал совпадает по времени с участком сигнала с ЗЧПУ, имеющим положительную производную, фактически, его форма должна совпадать с формой импульса тока.

**Изучение зависимости световыхода ЭЛ от напряженности электрического поля.** Для получения данной зависимости величина ЭЛ сигнала измеряется при различных значениях положительного потенциала, поданного на анод камеры. Поскольку имеется слабая зависимость скорости дрейфа электронов от напряженности электрического поля, то для получения величины ЭЛ сигнала наиболее корректно измерять его площадь, а не амплитуду. Процедура измерения величины площади сигнала и оценки ее ошибки подробно описана в прил. 3.2. По полученным значениям строится зависимость площади ЭЛ сигнала от величины приведенного электрического поля, которое вычисляется как:

$$\frac{E}{p} = \frac{U_{a-g}}{d \cdot p}, \text{ кВ}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{атм}^{-1}, \quad (3.4)$$

где  $U_{a-g}$  – разность потенциалов между анодом и сеткой, кВ;  $d$  – зазор между анодом и сеткой, см;  $p$  – давление, атм. При вычислении величины  $U_{a-g}$  необходимо учесть смещение сетки на  $-0,44$  кВ (т.е. необходимо добавлять  $+0,44$  кВ к напряжению на аноде) при подаче

на катод напряжения  $-2$  кВ, определяемое отношением сопротивления  $R1 + R2$  к полному сопротивлению делителя  $R1 + R2 + \dots + R6$  (см. схему включения на рис. 3.2). Затем проводится аппроксимация экспериментальных точек (с учетом полученных ошибок измерений) линейной зависимостью (3.4) в области значений приведенного поля  $E/p > 1,15$  кВ·см<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>. В качестве примера – зависимость на рис. 3.6 вверху, полученная с использованием данной процедуры измерений. Ошибки измерений показаны на рис. 3.6 внизу (в более крупном масштабе по вертикальной оси). Аппроксимация экспериментальных точек линейной зависимостью дает пороговое значения  $E/p = 1,02 \pm 0,09$  кВ·см<sup>-1</sup>·атм<sup>-1</sup>.

Полученное значение  $E/p$  несколько превышает пороговое  $0,83$ , приведенное ранее. Причиной расхождения 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  $E/p$ .

## РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

### 1. Ознакомление с лабораторной установкой.

Ознакомиться с общей схемой установки, схемой электролюминесцентной камеры и принципами ее работы.

Включить электропитание основных элементов установки.

Ознакомиться с инструкцией по работе с цифровым осциллографом (см. п. 1, прил. 3.1).

### 2. Изучение сцинтилляционного сигнала.

Загрузить на осциллографе рабочую конфигурацию D:\Waveforms\Gas test chamber\trigl.lss.

Подать напряжение питания на ФЭУ (см. п. 2, прил. 3.1).

Наблюдать сцинтилляционный сигнал от альфа-частиц в газообразном ксеноне (см. рис. 3.4), объяснить регистрируемые формы сигналов.

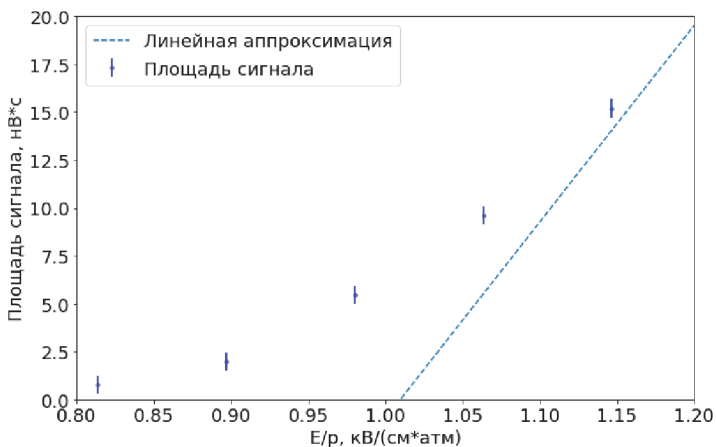
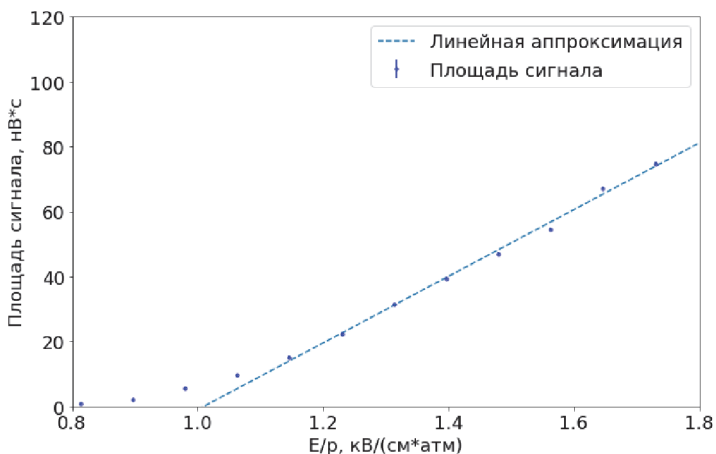


Рис. 3.6. Зависимость величины ЭЛ сигнала от  $E/p$  в промежутке сетка-анод в диапазоне  $0,8-1,8 \text{ кВ см}^{-1} \text{ атм}^{-1}$  (вверху) и  $0,8-1,2 \text{ кВ см}^{-1} \text{ атм}^{-1}$  (внизу)

### 3. Изучение зарядового и сцинтилляционного сигналов.

Загрузить на осциллографе рабочую конфигурацию D:\Waveforms\Gas test chamber\trig2.lss.

Подать напряжение питания  $-2 \text{ кВ}$  на катод (см. п. 3, прил. 3.1).

Наблюдать зарядовый сигнал по каналу С3 и сцинтилляционный сигнал по каналу С2 (см. примечание, сигнал сцинтилляции на раз-

вертке канала C2 в данной рабочей конфигурации более «компактный» из-за того, что амплитудная и временная шкалы более грубые, чем в конфигурации D:\Waveforms\Gas test chamber\trigl.lss – цена деления 5 мВ и 5 мкс, соответственно).

Объяснить регистрируемую форму и длительность зарядового сигнала и принцип работы выбранного режима триггера осциллографа.

Объяснить момент появления сцинтилляционного сигнала по отношению к зарядовому и причину его разброса по времени («временного джиттера»).

#### 4. Изучение электролюминесценции.

Включить источник питания анода и начать увеличивать напряжение в соответствии с инструкцией выше (см. п. 4, прил. 3.1).

Наблюдать по мере увеличения напряжения появление отдельных однофотозлектронных импульсов на участке, где зарядовый сигнал имеет положительную производную.

Снять зависимость величины площади усредненного ЭЛ сигнала от напряжения на аноде (см. прил. 3.2). Измерения провести с шагом 0,25 кВ в интервале напряжений на аноде от 2 до 5 кВ. Также измерить значение площади при нулевом значении напряжения для получения пьедестала. Произвести многократные измерения (по 10 раз) для ТРЕХ выбранных значений напряжения, например для начала (2 кВ), середины (3.5 кВ) и конца (5 кВ) диапазона измерений с целью оценки ошибки измерения. Результаты занести в таблицу для дальнейшей обработки (см. прил. 3.3).

**ПРИМЕЧАНИЕ.** Не забыть, что для получения истинной разности потенциалов между сеткой и анодом необходимо к показаниям вольтметра прибавить 0,44 кВ.

Произвести обработку полученных результатов: сделать оценку стандартного отклонения точек, используя формулу для несмещённой оценки дисперсии, и построить зависимость величины электролюминесцентного сигнала от  $E/p$  (см. рис. 3.5). Аппроксимировать экспериментальные точки с полученными ошибками линейной зависимостью (3.4) в области значений приведенного поля  $E/p > 1,15 \text{ кВ см}^{-1} \text{ атм}^{-1}$  по методу наименьших квадратов и получить

пороговое значение  $E/p$  и его ошибку. Сравнить полученное значение со значением в формуле (3.4). Объяснить расхождение, если оно выходит за пределы ошибок.

## ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) цель работы;
- 2) краткое описание и схему экспериментальной установки;
- 3) примеры записанных в ходе настоящей работы форм сигналов и их объяснение;
- 4) журнал измерений в виде таблиц значений напряжений на электродах и соответствующих величин сигналов;
- 5) пояснительную записку к обработке результатов измерений с графиком зависимости величины ЭЛ сигнала от значения приведенного поля  $E/p$  и аппроксимацией зависимости линейной функцией от  $E/p$ , а также с экспериментально полученным значением  $E/p$ ;
- 6) заключение.

## ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКИ

1. A Noble Gas Detector with Electroluminescence Readout based on an Array of APDs / B. Bourguille, A. Garcia Soto, I. Gil-Botella, T. Lux, C. Palomares, F. Sanchez, R. Santorelli // JINST 2015. V. 10. C12016. DOI: 10.1088/1748-0221/10/12/C12016.

2. The high pressure gas scintillation proportional counter on-board the BeppoSAX X-ray astronomy satellite. Astron / G. Manzo, S. Giarrusso, A. Santangelo, F. Ciralli, G. Fazio, S. Piraino, A. Segreto // Astrophys. Suppl. Ser. 1997. V. 122. P. 341. DOI: <https://doi.org/10.1051/aas:1997139>.

3. Улин С.Е., Дмитренко В.В., Грачев В.М. Цилиндрическая ионизационная камера с экранирующей сеткой, заполненная ксеноном до давления 50 атм // Приборы и техника эксперимента 1995. № 4. С. 46.

4. Noble Gas Detectors, GmbH 2006 Wiley-VCH Verlag GmbH & Co / E. Aprile, A. Bolotnikov, A. Bolozdynya, T. Doke // KGaA, Weinheim. 345 p.

5. Two-Phase Emission Detectors / D.Yu. Akimov, A.I. Bolozdynya, A.F. Buzulutskov, V.I. Chepel // World Scientific Publishing Company. August 2, 2021. 250 p.

6. Secondary Scintillation Yield in Pure Xenon / C.M.B. Monteiro, L.M.P. Fernandes, J.A.M. Lopes, L.C.C. Coelho, J.F.C.A. Veloso, J.M.F. dos Santos, K. Giboni, E. Aprile // JINST 2007. V. 2. P05001. DOI: 10.1088/1748-0221/2/05/P05001.

7. Теорема Шокли–Рамо, Википедия. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема\\_Шокли\\_—\\_Рамо](https://ru.wikipedia.org/wiki/Теорема_Шокли_—_Рамо) (дата обращения 14.12.2022).

## КРАТКАЯ ИНСТРУКЦИЯ ПО ВКЛЮЧЕНИЮ УСТАНОВКИ

### 1. Включение основных приборов.

Включить цифровой осциллограф 1 (см. рис. 3.3; инструкцию по работе с осциллографом\*), вольтметр 2, блок низковольтного питания 8 тумблером 7 и блок питания ЗЧПУ 9 (см. рис. 3.3; кнопка OUTPUT должна быть переведена в положение ON, после этого индикаторы должны показать выставленные напряжения питания ЗЧПУ –  $\pm 6$  В).

### 2. Подача высокого напряжения на ФЭУ.

Переключить тумблер выбора измеряемого напряжения 3 в положение «ФЭУ» и убедиться, что лимб (вращающийся круглый диск с углублением для пальца) на ВВ источнике питания ФЭУ 4 выкручен до упора против часовой стрелки. Затем включить на нем тумблер «ВКЛ» – должен загореться красный светодиод над тумблером. Плавно крутить лимб по часовой стрелке и наблюдать за увеличением напряжения по показаниям вольтметра. Установить на ФЭУ рабочее напряжение 1900 В.

**Примечание.** На вольтметр выводится напряжение с учетом коэффициента деления 1:1000! Таким образом, напряжению 1900 В будет соответствовать показание вольтметра 1,900 В.

### 3. Подача высокого напряжения на катод.

Убедиться, что ручка регулировки на ВВ источнике питания катода 5 выкручена до упора против часовой стрелки, затем включить на нем тумблер питания слева – должен загореться зеленый светодиод «ON». Плавно крутить ручку по часовой стрелке и установить требуемое напряжение по индикатору на блоке питания.

---

\* В текущей версии лабораторной работы используется цифровой осциллограф LeCroy WaveRunner 640Zi; загружаются рабочие конфигурации из конфигурационных файлов D:\Waveforms\Gas test chamber\trig1.lss и D:\Waveforms\Gas test chamber\trig2.lss.

#### **4. Подача высокого напряжения на анод.**

Переключить тумблер выбора измеряемого напряжения 3 в положение «АНОД» и убедиться, что лимб на ВВ источнике питания анода 6 выкручен до упора против часовой стрелки, затем включить на нем тумблер «ВКЛ» – должен загореться красный светодиод над тумблером. Плавно крутить ручку по часовой стрелке и установить требуемое напряжение.

**ВНИМАНИЕ!** Максимальное напряжение, подаваемое на катод и анод, – 5,0 кВ!

## ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОЩАДИ ЭЛЕКТРОЛЮМИНЕСЦЕНТНОГО СИГНАЛА

Процедура измерения площади ЭЛ сигнала при помощи цифрового осциллографа показана на рис. ПЗ.1. С целью увеличения точности измерений ЭЛ сигнал усредняется (канал F3) по 10000 запускам осциллографа. Измерения проводятся от +2 до +5 кВ на аноде с шагом 0,25 кВ. Площадь усредненного сигнала ( $S_{P2}$  в нВ·с) измеряется между курсорами, показанными вертикальными штриховыми линиями (в приведенном примере на рис. ПЗ.1 вверху они выставлены на 4,2 и 5,6 делений горизонтальной шкалы осциллографа). Для получения корректных значений из измеряемых величин необходимо вычесть площадь «нулевой» линии ( $S_{P1}$ ; «offset» или называют еще «пьедестал») в таком же временном интервале в другом месте осциллограммы, где нет сигналов сцинтилляции и электролюминесценции (в приведенном примере на рис. ПЗ.1 внизу они выставлены на 0,1 и 1,5 делений горизонтальной шкалы осциллографа). Для оценки среднеквадратических ошибок измерений необходимо в начале, середине и конце диапазона произвести при одном и том же значении потенциала на аноде многократные (например, по 10 раз) измерения величины площади сигнала и величины пьедестала. Ошибки величин  $S_{P1}$  и  $S_{P2}$  вычисляются по формуле для несмещенной оценки стандартного среднеквадратичного отклонения:

$$\sigma S_{P1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_{P1i} - \langle S_{P1} \rangle)^2}{n-1}}, \quad \sigma S_{P2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_{P2i} - \langle S_{P2} \rangle)^2}{n-1}},$$

где  $n$  – число измерений. Результирующая ошибка величины площади электролюминесценции определяется как

$$\sigma S_{\text{эл}} = \sqrt{(\sigma S_{P1})^2 + (\sigma S_{P2})^2}.$$



За ошибку измерений величины  $S_{эл}$  принять среднее значение  $\sigma S_{эл}$  по измерениям в начале, середине и конце диапазона.

**ВНИМАНИЕ!** При измерениях в различных диапазонах напряжений на аноде на канале С3 используется разная цена деления вертикальной шкалы:

2,0–3,25 кВ – 5 мВ/дел.;

3,5–4,25 кВ – 10 мВ/дел.;

4,5–5,0 кВ – 20 мВ/дел.

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ЖУРНАЛ

Таблица ПЗ.1

Измерение зависимости площади ЭЛ сигнала от  $E/p$ 

№ п/п	$U_a$ , кВ	P1, нВ·с	P2, нВ·с	$ P2 - P1 $ , нВ·с	$E/p$ , кВ·см <sup>-1</sup> ·атм <sup>-1</sup>	Примечание
1	2,00					5 мВ/дел.
2	2,25					– « –
3	2,50					– « –
4	2,75					– « –
5	3,00					– « –
6	3,25					– « –
7	3,50					10 мВ/дел.
8	3,75					– « –
9	4,00					– « –
10	4,25					– « –
11	4,50					20 мВ/дел.
12	4,75					– « –
13	5,00					– « –

Таблица ПЗ.2а

Определение среднеквадратического отклонения в начале диапазона ( $U_a =$  кВ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	среднее	$\sigma$	Примечание
$M_{\text{изм}}$													
SP1													
SP2													

Таблица ПЗ.2б

Определение среднеквадратического отклонения в середине диапазона ( $U_a =$  кВ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	среднее	$\sigma$	Примечание
$M_{\text{изм}}$													
SP1													
SP2													

Таблица ПЗ.2в

Определение среднеквадратического отклонения в конце диапазона ( $U_a =$  кВ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	среднее	$\sigma$	Примечание
$M_{\text{изм}}$													
SP1													
SP2													

## **3.2. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНИЗАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ЖИДКОКСЕНОНОВОМ ДЕТЕКТОРЕ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ПРОГРАММ NOBLE ELEMENT SIMULATION TECHNIQUE (NEST)**

*Цель работы* – компьютерное моделирование ионизационных сигналов в жидкоксеноновом детекторе при помощи пакета программ Noble Element Simulation Technique (NEST).

Моделируется процесс возникновения сигнала в жидкоксеноновых детекторах, его зависимость от типа ионизирующей частицы и её энергии, а также от напряжённости электрического поля в детекторе. Подобные исследования требуют сверхвысокой точности, и для корректной постановки эксперимента и анализа его данных необходимо предварительное компьютерное моделирование. Из-за большого количества точных данных в жидком ксеноне большинство теоретических моделей в NEST были заменены простыми, хорошо понятными эмпирическими формулами. NESTv2.0 также использует эмпирическую модель рекомбинационных флуктуаций. Кроме того, NESTv2.0 имитирует сцинтилляционные сигналы S1 и S2 с правильными энергетическими разрешениями в время-проекционных камерах с жидким ксеноном. Это делается без использования внешнего пакета, позволяя NESTv2.0 быть полностью автономным средством.

Лабораторная установка включает настольный персональный компьютер.

Выполнение данной лабораторной работы возможно в удалённом режиме.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Благородные газы часто являются рабочей средой детекторов, рассчитанных на редкие и низкоэнергетические события. Подобные исследования требуют сверхвысокой точности, и для корректной постановки эксперимента и анализа его данных необходимо предвари-

тельное моделирование. Большая часть теоретических и полуэмпирических моделей поведения частиц в благородных элементах (например, модель Линдхарда [1] или модель Ванга и Мэя [2]) не всегда согласуется с реальными новейшими результатами и может быть сложной для описания их в программном продукте и включения их в анализ.

С целью более простого и точного моделирования процессов в низкофоновых экспериментах на жидких благородных газах был разработан пакет NEST (Noble Element Simulation Technique). Из-за большого количества точных данных о жидком ксеноне большинство теоретических моделей в NEST заменены простыми, хорошо понятными эмпирическими формулами. Версия NESTv2.0 также использует эмпирическую модель рекомбинационных флуктуаций. Кроме того, NESTv2.0 имитирует сцинтилляционные сигналы  $S1$  и  $S2$  с правильными энергетическими разрешениями в время-проекционных камерах с жидким ксеноном. Также NEST учитывает параметры детектора – например, ожидаемое количество фотоэлектронов (photoelectrons, PE) от изначального фотона ( $g_1$ ) или электрона ионизации ( $g_2$ ) для сцинтилляционного ( $S1$ ) или электролюминесцентного ( $S2$ ) сигнала:

$$\begin{aligned}\langle S1 \rangle &= g_1^* \langle N_{ph} \rangle, \\ \langle S2 \rangle &= g_2^* \langle N_e \rangle.\end{aligned}$$

Это делается без использования внешнего пакета, позволяя NESTv2.0 быть полностью автономным средством (однако существует интеграция с GEANT4, если требуется интеграция с уже существующей моделью детектора).

В данной лабораторной работе при помощи NEST будет исследован и смоделирован процесс возникновения сигнала в жидкоксенонных детекторах (рис. 3.7), его зависимость от типа частицы и её энергии, а также от электрического поля детектора.

**Принцип работы двухфазного эмиссионного детектора.** Современная физика элементарных частиц нуждается во всё более и более сложных исследованиях, как, например, изучение редких или труднонаблюдаемых событий (поиск небарионной тёмной материи, безнейтринный двойной бета-распад, упругое когерентное рассеяние нейтрино на ядре). Для развития данной области исследований, в первую очередь, требуется развитие методов детектирования.

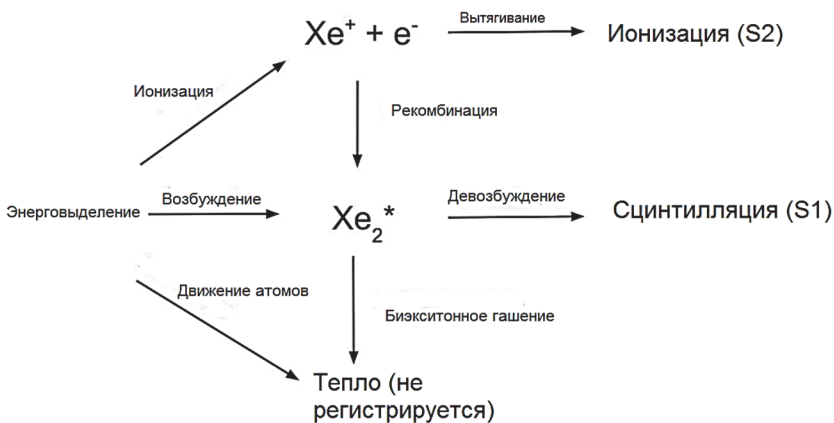


Рис. 3.7. Схема процессов в двухфазном жидкоксеноновом детекторе

*Двухфазный эмиссионный метод* – один из способов, разработанный для таких целей. Его принцип заключается в регистрации электронов на массивных мишенях из жидкого благородного газа (ксенона или аргона) путем вытягивания их электрическим полем из жидкости и регистрации сигнала, усиленного в газе. Данный метод регистрации был предложен [3] более 50 лет назад на кафедре экспериментальной ядерной физики МИФИ. Адаптация этого подхода для низкофоновых экспериментов была предложена около 20 лет назад [4].

В наше время эмиссионные детекторы такого типа используются в наиболее успешных экспериментах по поиску холодной темной материи во вселенной, включая идущие в настоящий момент эксперименты LZ, PandaX, XENON1t, DarkSide50 и эксперименты следующего поколения, находящиеся в процессе подготовки – XENONnT, DARWIN и др.

Регистрация частиц в двухфазном детекторе (рис. 3.8) основана на следующих процессах:

1) частица возбуждает и ионизирует среду, в результате чего появляется сцинтилляционный сигнал, который может использоваться в качестве триггера для регистрации события;

2) электроны ионизации под действием сильного электрического поля дрейфуют к поверхности раздела фаз и выходят через поверхностный потенциальный барьер в газовую фазу, где генерируют электролюминесцентный сигнал.

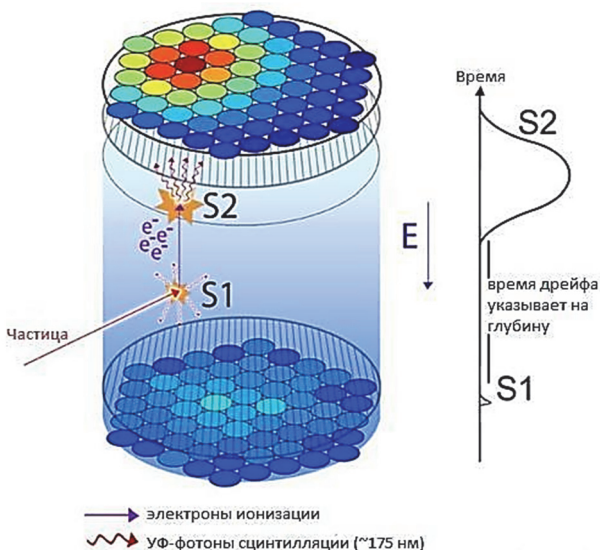


Рис. 3.8. Общий принцип работы двухфазных детекторов:  
 S1 – сцинтилляция в жидкой фазе детектора;  
 S2 – электролюминесценция в газовой фазе [5]

В эмиссионном двухфазном детекторе можно получить все координаты исходного события: матрицы фотоумножителей регистрируют  $x$ - $y$  координаты исходного события, а по времени задержки электролюминесцентного сигнала от сцинтилляционного можно определить координату  $z$  [6].

Двухфазный эмиссионный метод используется для регистрации низкоэнергетических и редких событий [7, 8]. Такой детектор сочетает в себе два важных качества: возможность точного восстановления координат (до миллиметра) и времени, а также возможность создания большого чувствительного объема (тем самым увеличивая статистику регистрации событий).

## NOBLE ELEMENT SIMULATION TECHNIQUE (NEST)

Благородные газы часто являются рабочей средой детекторов, рассчитанных на редкие и низкоэнергетические события, а точная модель сравнения имеет решающее значение для понимания и прогнозирования нежелательных фонов. NEST v2.0 в значительной степени базируется на эмпирических данных, принимая во внимание большинство существующих данных ионизации и сцинтилляции для твердого, жидкого и газообразного ксенона.

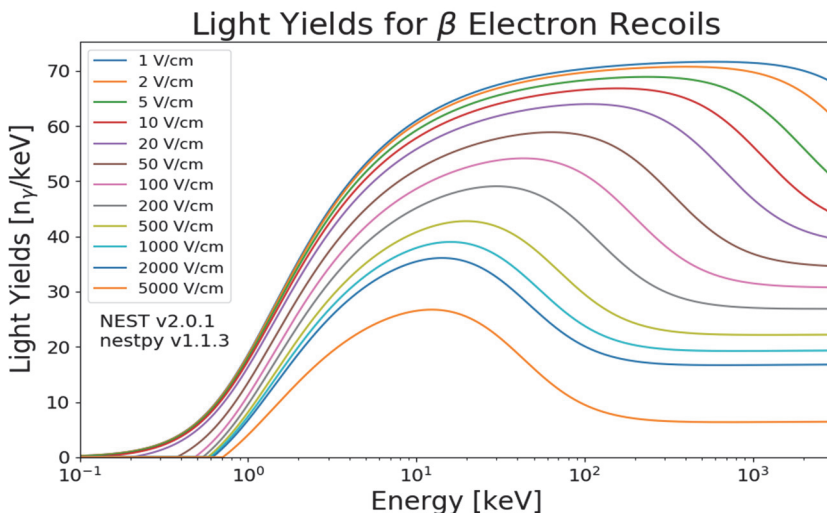


Рис. 3.9. Зависимость световыхода от энергии и поля для электронов отдачи

NEST позволяет не только моделировать процессы в детекторе (рис. 3.9), но и производить симуляции событий с учётом свойств конкретного детектора (размер, расположение сеток, количество ФЭУ, температура ксенона в рабочем объёме и т.д.). Подобное моделирование доступно без дополнительных программных продуктов, но для более точного учёта всех внутренних процессов и взаимодействий в детекторе (например, с материалами детектора) рекомендуется использовать связку NEST с GEANT4.

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

В лабораторной работе используется компьютер с предустановленной ОС Linux и NEST, который доступен по ссылке:

<https://github.com/NESTCollaboration/nest>

Установка программного обеспечения производится следующим образом.

1. Загрузите NEST по ссылке (git clone или через браузер) и распакуйте архив, переименуйте папку в nestsource.
2. Создайте отдельные директории nestbuild и nestinstall, зайдите в build (cd ../nestbuild).
3. Начните сборку командой (сборка происходит с rootNEST, дополнительным расширением для NEST):

```
cmake -DBUILD_ROOT=ON -DCMAKE_INSTALL_PREFIX=[path to install directory] ../relative/path/nest make && make install
```

В случае успешной сборки на экране должен появиться подобный ВЫВОД:

```
[ 168] Building CXX object CMakeFiles/NEST_core.dir/src/testSpectra.cpp.o
[ 226] Building CXX object CMakeFiles/NEST_core.dir/src/Vdetector.cpp.o
[ 276] Building CXX object CMakeFiles/NEST_core.dir/src/testNEST.cpp.o
[ 333] Linking CXX static library LibNEST_core.a
[ 333] Built target NEST_core
Scanning dependencies of target testNEST
[ 388] Building CXX object CMakeFiles/testNEST.dir/src/testNEST.cpp.o
[ 446] Linking CXX executable testNEST
[ 446] Built target testNEST
Scanning dependencies of target rootNEST
[ 506] Building CXX object CMakeFiles/rootNEST.dir/examples/rootNEST.cpp.o
[ 558] Linking CXX executable rootNEST
[ 558] Built target rootNEST
Scanning dependencies of target bareNEST
[ 618] Building CXX object CMakeFiles/bareNEST.dir/examples/bareNEST.cpp.o
[ 666] Linking CXX executable bareNEST
[ 666] Built target bareNEST
Scanning dependencies of target NEST
[ 728] Building CXX object CMakeFiles/NEST.dir/src/NEST.cpp.o
[ 778] Building CXX object CMakeFiles/NEST.dir/src/RandomGen.cpp.o
[ 836] Building CXX object CMakeFiles/NEST.dir/src/TestSpectra.cpp.o
[ 888] Building CXX object CMakeFiles/NEST.dir/src/Vdetector.cpp.o
[ 946] Building CXX object CMakeFiles/NEST.dir/src/testNEST.cpp.o
[1008] Linking CXX shared library LibNEST.so
[1008] Built target NEST
[ 333] Built target NEST_core
[ 446] Built target testNEST
[ 558] Built target rootNEST
[ 666] Built target bareNEST
[1008] Built target NEST
Install the project...
-- Install configuration: ""
-- Installing: /home/aspelene/nestinstall14apr/rootNEST
-- Set runtime path of "/home/aspelene/nestinstall14apr/rootNEST" to ""
-- Installing: /home/aspelene/nestinstall14apr/lib/LibNEST.so
-- Installing: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/DetectorExample_XENDW19.hh
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/LUX_Random3.hh
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/Vdetector.hh
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/NEST.hh
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/RandomGen.hh
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/testSpectra.hh
-- Installing: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/analysis.hh
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/testNEST.hh
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/include/xoroshiro.hh
-- Installing: /home/aspelene/nestinstall14apr/testNEST
-- Installing: /home/aspelene/nestinstall14apr/bareNEST
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/NESTConfigVersion.cmake
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/NESTConfig.cmake
-- Up-to-date: /home/aspelene/nestinstall14apr/NESTConfig-noconfig.cmake
(my_env) aspelene@aspelene:~/nestbuild14apr$ |
```

## РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Откройте файл src/NEST.cpp и замените

```
#include "LUX_Run03.hh" and auto* detector =  
new DetectorExample_LUX_RUN03()
```

на

```
#include "DetectorExample_XENON10.hh" and auto* detector =  
new DetectorExample_XENON10.()
```

2. Откройте файл include/analysis.hh и замените minS1 на 5, max S1 на 165 и numBins на 32. После этого пересоберите NEST.

3. Откройте терминал в директории build. Смоделируйте 10000 событий от ядер отдачи в диапазоне от 0 до 120 кэВ при поле 730 В/см командой: ./execNEST 10000 NR 0 120 -1 -1 >> NR.txt. Первая -1 означает использование поля из файла с детектором (в качестве базового детектора используется детектор XENON10), вторая – случайную генерацию координат взаимодействия в детекторе:

```
(my_env) aspelene@aspelene:~/nestbuild14apr$ ./testNEST 10000 NR 0 120 -1 -1>>NR.txt  
*** Detector definition message ***  
You are currently using the default XENON10 template detector.
```

Bin Center	Bin Actual	Hist Mean	Mean Error	Hist Sigma	Skewness	Eff[%>thr]
7.500000	7.423344	2.363574	0.008005	0.168496	-0.524152	100.000000
12.500000	12.419707	2.232424	0.006517	0.129323	-0.246782	100.000000
17.500000	17.477866	2.163132	0.005298	0.107792	-0.163468	100.000000
22.500000	22.528177	2.102014	0.005619	0.103605	-0.362907	100.000000
27.500000	27.486694	2.059209	0.004630	0.089658	-0.440761	100.000000
32.500000	32.374627	2.031518	0.004568	0.084102	-0.302558	100.000000
37.500000	37.512404	2.005012	0.004461	0.083583	-0.245385	100.000000
42.500000	42.490668	1.959686	0.004633	0.083265	-0.585494	100.000000
47.500000	47.494780	1.942950	0.004676	0.078252	-0.601656	100.000000
52.500000	52.548975	1.927155	0.003631	0.064743	-0.374583	100.000000
57.500000	57.499910	1.897830	0.003675	0.064290	-0.074524	100.000000
62.500000	62.414758	1.883388	0.003780	0.066125	-0.377642	100.000000
67.500000	67.417212	1.867924	0.004051	0.069814	-0.587025	100.000000
72.500000	72.483021	1.852017	0.003800	0.062675	-0.272160	100.000000
77.500000	77.559118	1.837783	0.003650	0.062371	-0.243524	100.000000
82.500000	82.600856	1.816977	0.003701	0.060134	-0.220569	100.000000
87.500000	87.440255	1.808205	0.003454	0.058206	-0.313026	100.000000
92.500000	92.510883	1.794152	0.003298	0.056639	0.006583	100.000000
97.500000	97.456887	1.783103	0.002910	0.050232	-0.028872	100.000000
102.500000	102.594941	1.772497	0.003724	0.061758	-0.095546	100.000000
107.500000	107.449626	1.760665	0.003594	0.059713	-0.010728	100.000000
112.500000	112.314659	1.751484	0.003468	0.052367	-0.025595	100.000000
117.500000	117.596268	1.738618	0.003069	0.049301	-0.453244	100.000000
122.500000	122.368281	1.731659	0.003181	0.054363	-0.341951	100.000000
127.500000	127.622192	1.723187	0.003185	0.058758	-0.285799	100.000000
132.500000	132.582926	1.701870	0.003505	0.053954	-0.320122	100.000000
137.500000	137.388866	1.696188	0.003746	0.054920	-0.241781	100.000000
142.500000	142.462656	1.685179	0.003567	0.050947	0.052007	100.000000
147.500000	147.299679	1.673714	0.003606	0.050489	0.063860	100.000000
152.500000	152.375442	1.652519	0.003975	0.048519	-0.144433	100.000000
157.500000	157.354004	1.656993	0.003980	0.047922	-0.123460	100.000000
162.500000	162.789499	1.636621	0.005051	0.051010	-0.544674	100.000000

4. Сгенерируйте таким же образом события с электронами отдачи (/execNEST 10000 ER 0 120 -1 -1 >> ER.txt).

5. Сравните получившиеся распределения с экспериментальными результатами для XENON10 при помощи rootNEST:

./examples/rootNEST NR.txt Xe10\_NRBand\_Luiz.txt

./examples/rootNEST ER.txt Xe10\_ERBand\_Luiz.txt

Запишите получившиеся хи-квадраты, сохраните значения выведенных гистограмм в отдельные текстовые документы:

```
(my_env) aspelene@aspelene:~/nestbuild14apr$ ./rootNEST NR.txt Xe10_NRBand_Luiz.txt
Info In <TCanvas:MakeDefCanvas>: created default TCanvas with name c1
Bin Center      Bin Actual      Gaus Mean      Mean Error      Gaus Sigma      Stg Error      X^2/DOF
7.500000        7.423344        7.368902       0.008755        0.157312        0.000450       1.650259
12.500000       12.419797       12.236009      0.006792       0.128040        0.000371       0.958866
17.500000       17.477866       17.165946      0.005268       0.105877        0.000356       0.709832
22.500000       22.528177       21.107502      0.005446       0.097472        0.003902       1.146877
27.500000       27.486694       27.062786      0.005067       0.092984        0.004292       1.025169
32.500000       32.374627       32.033694      0.004885       0.088492        0.003267       2.246961
37.500000       37.512404       37.610850      0.004760      0.085629        0.003588       1.774643
42.500000       42.490668      42.196137      0.004772       0.077964        0.003377       1.643261
47.500000       47.494780      47.946003      0.005572       0.069458        0.003692       3.716289
52.500000       52.548975      52.928259      0.003710       0.064366        0.002757       0.973093
57.500000       57.499910      57.900566      0.003778       0.064550        0.002998       1.976536
62.500000       62.414758      62.880233      0.004068       0.067143        0.003424       1.526688
67.500000       67.417212      67.870376      0.005153       0.069744        0.004257       4.455532
72.500000       72.483021      72.854100      0.004030       0.063319        0.003319       1.347632
77.500000       77.559118      77.836241      0.004044       0.064377        0.003026       0.572402
82.500000       82.600856      81.818013      0.003934      0.062745        0.003119       0.216035
87.500000       87.440255      87.807221      0.003743      0.058655        0.002440       2.438242
92.500000       92.510883      92.791556      0.003605      0.061111        0.002717       0.011536
97.500000       97.456887      97.782594      0.003048       0.051538        0.002157       1.466017
102.500000      102.594941     102.771828     0.004034     0.065837     0.003081     0.557703
107.500000     107.449626     107.644448     0.003643     0.058115     0.002698     1.750994
112.500000     112.314659     112.752243     0.003680     0.054948     0.002365     0.552345
117.500000     117.506268     117.401152     0.003608     0.055098     0.002940     1.898940
122.500000     122.360281     122.732962     0.003739     0.060127     0.003210     0.141179
127.500000     127.622192     127.251332     0.003461     0.054033     0.002683     0.317040
132.500000     132.502926     132.704454     0.003713     0.055802     0.003528     1.681619
137.500000     137.388866     137.697550     0.003866     0.055158     0.003284     1.362704
142.500000     142.426256     142.680605     0.004063     0.055752     0.003141     0.228145
147.500000     147.299679     147.676813     0.004212     0.053875     0.002728     1.172357
152.500000     152.375442     152.653250     0.004171     0.049406     0.002617     1.284406
157.500000     157.354004     157.656896     0.004386     0.051976     0.003435     0.082800
162.500000     162.709499     162.421211     0.007078     0.053668     0.004977     3.132692

The reduced chi^2 = 14.782 for mean, and 6.50128 for width. Arithmetic average= 10.6416 and geo. mean 9.80315 (mean*width, mean*width)
%-errors of the form (1/N)*sum((data-NEST)/data) for mean and width are -1.35224 and -28.9523 (averages)
```

6. Измените в файле

nestsource/include/DetectorExample\_XENON10.hh g1

на 0,03 в любую сторону, а g1\_gas (параметр, отвечающий за величину поля в газовом зазоре и влияющий на эффективность экстракции электронов из жидкой фазы) на 0,02 в любую сторону. Пересоберите NEST (make clean && make && make install в папке nestbuild) и повторите пп. 1–4. Сравните хи-квадраты, запишите новые значения g2 и e-EE (эффективности экстракции электронов).

7. Постройте получившиеся гистограммы, сохраните их (BinActual:GausMean).

8. Измените в файле analysis.hh mode на 1 и пересоберите NEST:

```

1
2 // Verbosity flag (for limiting output to yields; no timing)
3 bool verbosity = true;
4
5 // General parameters of importance changing the global behavior
6 bool MctruthE = false; // false means reconstructed energy
7 bool MctruthPos = false; // false means reconstructed position
8
9 int useTiming = 0; // photon arrival times + pulse shapes (2=ETrains)
10 // if 1 or 2 but verb off, then timing only saved as vectors
11 // if -1 it means a special extra-fast mode for higher energies
12
13 // 0 means PE, 1 means phd (PE/-1.2), 2 means spike count
14 int usePD = 0;
15 // band style: log(S2) with 1, while 0 means log(S2/S1)
16 int useS2 = 0; // xtra feature: 2 means S2 x-axis energy scale
17
18 double minS1 = 5; //units are controlled by the usePE flag
19 // this is separate from S1 thresholds controlled by detector
20 double maxS1 = 165;
21 int numBins = 32; //for DD, change these to 1.7,110.6,99
22
23 // for efficiency calculation
24 // minS2 need not match S2 threshold in detector,hh
25 // you can treat as trigger vs. analysis thresholds
26 double minS2 = 42;
27 double maxS2 = 1e5; //5e3 for DD
28
29 // log(S2/S1) or log(S2) admitted into analysis incl. limit
30 double logMax = 3.6;
31 double logMin = 0.6;
32
33 // some numbers for fine-tuning the speed vs. the accuracy
34 double z_step = 0.1; // mm, for integrating non-uniform field
35 double E_step = 5.0; // keV, for integrating WIMP spectrum
36
37 // Set the rootNEST options
38 int freeParam = 2; // #free param for calculating DoF in X^2
39 int mode = 0;
40 //0 default is to provide the ER BG discrimination & leakage frac
41 //1 outputs the goodness of fit for one band (Gaussian centroids of histogram in S1 slices)
42 //2 outputs wimp masses and cross-sections for given efficiency
43

```

## 9. Проведите сравнение величин утечки («пересечения») распределений для яндр и электронов отдачи) для обоих случаев:

./examples/rootNEST NR.txt ER.txt

Min Center	Bin Actual	#Counts	Leak Frac Gauss	+ error	- error	Discrim(N)	Lower Half	+ error	- error	Upper(N)	Ignore column
7.50	7.46256	2.60345	3.50308e-03	6.03e-03	2.56e-03	99.646308	6.437072e-01	5.86e-02	5.31e-02	55.722383	6.442256e-01
12.50	12.32948	2.87649	1.894473e-02	1.87e-02	1.13e-02	98.105527	5.978980e-01	6.77e-02	6.11e-02	47.120419	5.098531e-01
17.50	17.55642	2.24283	9.509202e-03	1.11e-02	6.86e-03	99.043978	5.338166e-01	6.54e-02	5.92e-02	46.818357	5.244472e-01
22.50	22.48747	3.20373	1.016036e-02	1.17e-02	6.43e-03	98.983964	4.970588e-01	6.89e-02	6.18e-02	50.294118	4.888985e-01
27.50	27.50734	3.659825	1.107332e-02	2.26e-02	8.45e-04	99.889267	5.253333e-01	6.81e-02	6.14e-02	47.466667	5.242208e-01
32.50	32.48189	2.629483	4.227451e-03	6.66e-03	3.85e-03	99.374264	4.582773e-01	6.48e-02	5.81e-02	54.572721	4.580915e-01
37.50	37.40745	3.869557	1.071883e-03	2.96e-03	8.99e-04	99.892812	4.387646e-01	6.21e-02	5.58e-02	50.125356	4.376746e-01
42.50	42.43933	2.881316	1.618582e-03	2.78e-03	1.89e-03	99.854949	4.094509e-01	7.10e-02	6.35e-02	50.154799	4.978179e-01
47.50	47.49103	3.584448	1.929514e-04	6.09e-04	1.67e-04	99.980265	4.697431e-01	7.24e-02	6.43e-02	53.928259	4.602495e-01
52.50	52.468858	2.489233	7.993049e-03	1.13e-02	5.62e-03	99.288696	4.528372e-01	6.69e-02	5.98e-02	45.710981	4.448371e-01
57.50	57.430212	2.283885	2.264131e-03	4.52e-03	1.76e-03	99.773586	5.302337e-01	7.72e-02	6.88e-02	46.076833	5.309351e-01
62.50	62.398032	2.965887	1.589059e-03	2.78e-03	1.12e-03	99.848994	4.991951e-01	7.22e-02	6.44e-02	50.980392	4.888479e-01
67.50	67.422410	3.920485	4.418558e-05	1.64e-04	3.80e-05	99.995581	5.612756e-01	7.83e-02	6.23e-02	53.872054	4.612336e-01
72.50	72.531192	2.80775	2.237179e-03	6.19e-03	1.72e-03	99.702823	5.110244e-01	7.91e-02	7.01e-02	48.407059	4.687926e-01
77.50	77.535669	3.449704	2.886066e-04	6.49e-04	2.19e-04	99.971940	4.965733e-01	7.47e-02	6.64e-02	50.342466	4.962974e-01
82.50	82.587174	3.416167	3.135466e-04	8.30e-04	2.58e-04	99.968445	5.348099e-01	8.30e-02	7.33e-02	46.939089	4.337746e-01
87.50	87.342193	3.639983	1.363755e-04	4.64e-04	1.17e-04	99.986362	5.080080e-01	7.61e-02	6.76e-02	50.000000	4.998636e-01
92.50	92.513386	4.028807	2.812544e-05	1.88e-04	2.43e-05	99.997187	5.437627e-01	7.94e-02	7.07e-02	45.423729	5.437366e-01
97.50	97.476033	4.295165	3.603313e-06	4.12e-05	7.75e-06	99.999131	4.832515e-01	8.25e-02	6.95e-02	51.077685	4.832515e-01
102.50	102.531305	4.394093	5.546688e-06	3.29e-05	5.10e-06	99.999445	5.127773e-01	7.89e-02	6.99e-02	48.727273	5.127273e-01
107.50	107.534883	4.644093	1.789316e-06	9.12e-05	1.53e-06	99.999820	5.181159e-01	7.92e-02	7.03e-02	48.188465	5.181159e-01
112.50	112.401204	3.877935	5.679488e-05	1.32e-04	4.12e-05	99.994733	5.043800e-01	8.61e-02	7.54e-02	49.551044	4.943333e-01
117.50	117.405938	4.840798	2.663478e-05	7.66e-05	2.16e-05	99.997337	4.889922e-01	7.66e-02	6.76e-02	53.100775	4.889556e-01
122.50	122.450720	4.653119	1.650171e-06	8.17e-05	1.52e-06	99.999335	5.142144e-01	7.34e-02	6.35e-02	53.424166	5.142144e-01
127.50	127.550847	4.162888	1.571785e-05	6.97e-05	1.39e-05	99.998428	4.499490e-01	7.40e-02	6.52e-02	55.995512	4.499929e-01
132.50	132.527282	4.646440	1.763352e-06	6.99e-05	1.47e-06	99.999580	4.978993e-01	8.36e-02	7.34e-02	50.210780	4.978880e-01
137.50	137.429836	4.601860	4.920372e-06	1.30e-05	1.93e-06	99.999791	4.976746e-01	8.10e-02	7.68e-02	50.232558	4.976746e-01
142.50	142.447969	5.699270	6.016882e-09	5.97e-08	5.68e-09	99.999999	5.080080e-01	9.09e-02	7.90e-02	50.000000	5.080080e-01
147.50	147.400935	5.294443	3.436830e-08	3.92e-07	3.30e-08	99.999997	4.809939e-01	9.15e-02	7.93e-02	51.020480	4.809939e-01
152.50	152.438556	5.616654	9.734544e-09	6.89e-08	8.92e-09	99.999999	5.778182e-01	1.19e-01	1.01e-01	42.281879	5.778182e-01
157.50	157.430352	5.588878	1.865637e-08	2.72e-07	1.75e-08	99.999998	4.628096e-01	1.03e-01	8.76e-02	53.973103	4.628096e-01
162.50	162.423200	5.709310	5.966151e-09	5.79e-08	5.79e-09	99.999999	5.469156e-01	1.42e-01	1.11e-01	45.090339	5.469156e-01

OVERALL DISCRIMINATION or ACCEPTANCE between min and maxS1 = 50.25510099293787, total: Gaussian = non-Gaussian ("monoNuls"). Leakage Fraction = 4.94480999709e-01  
Highest possible discrimination value (minus 1-sigma) is 49.8033126146 with corresponding leakage of 4.91569734192e-01  
Lowest possible discrimination value (minus 1-sigma) is 49.2737654483468, with corresponding leakage of 5.07223451556e-01  
OVERALL DISCRIMINATION or ACCEPTANCE between min and maxS1 = 99.795919928212x, Gaussian. Leakage Fraction = 2.448080417876e-03

## 10. Запишите величину утечки.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип работы двухфазных детекторов?
2. Почему изменение  $g_1$  и  $g_2$  привело к ухудшению моделирования?

## ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-ИСТОЧНИКИ

1. Lindhard, J., Scharff M., Schiott H.E. Range Concepts and Heavy Ion Ranges (Notes on Atomic Collisions II). 1963.
2. Wang L., Mei D.-M. A Comprehensive Study of Low-Energy Response for Xenon-Based Dark Matter Experiments, [<https://arxiv.org/abs/1604.01083>] (дата обращения 14.12.2022).
3. Долгошеин Б.А., Лебеденко В.Н., Родионов Б.У. Новый метод регистрации следов ионизирующих частиц в конденсированном веществе // Письма в ЖЭТФ. 1970. 11. С. 513.
4. Bolozdynya A.I. et al. An Electroluminescence Emission Detector to Search for Double-beta Positron Decays of  $^{124}\text{Xe}$  and of  $^{78}\text{Kr}$  // IEEE Transactions on Nuclear Science. June 1997. Vol. 44. № 3.
5. LUX collaboration, Large Underground Xenon (LUX) experiment // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A704. 2013. P. 111–126.
6. Barabash A.S. et al. Results of the experiment on the search for double beta decay of  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{134}\text{Xe}$  and  $^{124}\text{Xe}$  // Phys. Let. B. 1989. Vol. 223. № 2.
7. Aprile E. et al. The XENON1T Dark Matter Experiment. <https://arxiv.org/abs/1708.07051>.
8. Panda-X collaboration. Dark Matter Results From 54-Ton-Day Exposure of PandaX-II Experiment // Phys. Rev. Lett. October 2017. 119. 181302.

## **ЧАСТЬ 4. ГАЗОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ УМНОЖИТЕЛИ**

---

### **4.1. СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХКАСКАДНОГО ГАЗОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО УСИЛИТЕЛЯ**

*Цель работы* – исследование спектрометрических характеристик трехкаскадного газового электронного усилителя (ГЭУ).

Лабораторная установка включает трехкаскадный ГЭУ, автоматизированную систему обеспечения детектора газовой смесью, аналоговую и цифровую электронику обработки ионизационных сигналов в стандарте VME. Выполнение данной лабораторной работы возможно в удалённом режиме.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Интерес к детекторам на основе каскадных газовых электронных умножителей (ГЭУ) постоянно растет. В частности, каскадные ГЭУ находят применение в трековых детекторах, быстрых детекторах для триггерных систем, торцевых детекторах для время-проекционных камер, черенковских детекторах, нейтронных детекторах, детекторах синхротронного излучения, газовых фотодетекторах. Криогенные лавинные детекторы на основе каскадных ГЭУ предполагается применить для регистрации нейтрино, темной материи и когерентного рассеяния нейтрино на ядрах.

В лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ планируется использование данного вида детекторов в экспериментах по научной программе проекта NICA (международные эксперименты «Многоцелевой детектор для изучения плотной барионной материи» (MPD) и «Барионная материя на нуклотроне» (BM@N)).

**Устройство ГЭУ.** ГЭУ, или Gas Electron Multiplier (GEM) был изобретен Ф. Саули в 1996 г., в нём используется газовое усиление

в отверстиях. ГЭУ представляет собой тонкую диэлектрическую каптоновую<sup>1</sup> пленку толщиной  $\sim 20\text{--}50$  мкм, покрытую с обеих сторон медной фольгой толщиной  $\sim 5\text{--}20$  мкм, с регулярной структурой отверстий диаметром от нескольких десятков до нескольких сотен микрометров. На рис. 4.1, *а* представлено увеличенное изображение среза такой пленки.

Отверстия имеют форму двойного конуса и расположены друг от друга на расстоянии от сотни до тысячи микрометров. При подаче разности потенциалов между металлическими электродами в отверстиях образуется сильное электрическое поле – порядка десятков кВ/см. Типичная картина электрического поля показана на рис. 4.1, *б*. Первичные электроны, рожденные излучением в газовом промежутке перед ГЭУ, дрейфуют вдоль силовых линий и фокусируются в отверстия, в которых под действием сильного электрического поля развиваются электронные лавины. Таким образом, каждое отверстие представляет собой независимый пропорциональный счетчик.

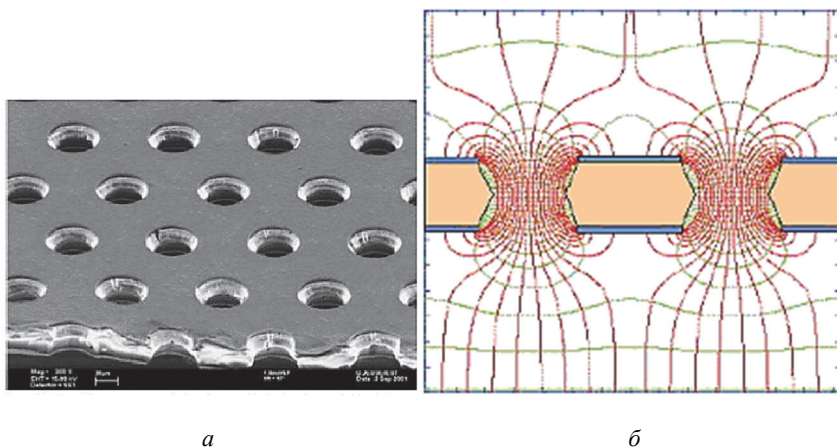


Рис. 4.1. ГЭУ из полиимидной пленки Каптон с отверстиями и медным покрытием (*а*) и распределение электрического поля в отверстиях, которые используются для размножения электронов (*б*)

<sup>1</sup> *Каптон* – полиимидная пленка. Каптон остается стабильным в широком диапазоне температур. У него хорошие диэлектрические свойства, низкий уровень дегазации, высокая радиационная стойкость.

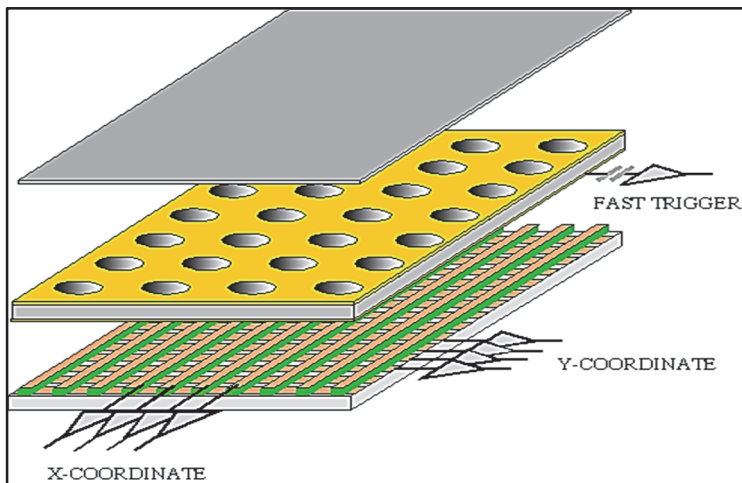


Рис. 4.2. Схема устройства съёма сигналов в однокаскадном ГЭУ, электродная система которого состоит катода (верхний плоский электрод), самого ГЭУ, с которого снимается стартовый сигнал, и многоэлектродного анода с двумерным считыванием (эксперимент COMPASS CERN)

На рис. 4.2 показана схема однокаскадного ГЭУ. В верхней части рисунка изображен катод, за ним следует дрейфовый промежуток, далее – ГЭУ. После ГЭУ возникшие в нем электронные лавины проходят индукционный промежуток и попадают на секционированный анод.

### **Характерные особенности ГЭУ.**

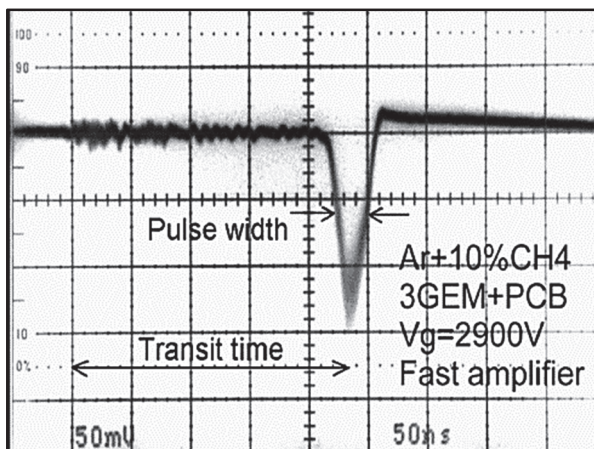
1. Быстрый сигнал (рис. 4.3, а), формируемый при дрейфе электронов в индукционном промежутке, и отсутствие ионных хвостов позволяет работать в потоках частиц интенсивностью  $\sim 10^4$  Гц/мм<sup>2</sup>.

2. Возможность двухкоординатного съёма информации, как показано на рис. 4.2.

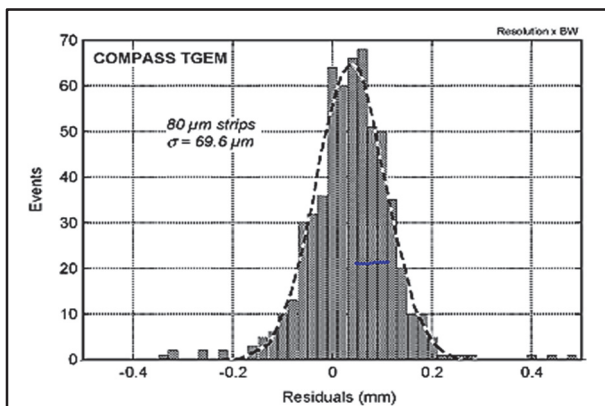
3. Высокое пространственное разрешение – до 40 мкм (RMS), рис. 4.3, б.

При исследованиях характеристик газовых детекторов на основе таких пленок были обнаружены проблемы – при коэффициентах размножения электронов более  $10^3$  попадание в детектор частиц с высокой удельной ионизацией (например, альфа-частиц) приводило к пробоям, которые с высокой вероятностью вызывали образование проводящих дорожек в отверстиях пленок, а это давало появление

утечек по высокому напряжению. Для повышения устойчивости детекторов к пробоям при больших напряжениях было решено использовать несколько каскадов усиления, что позволило снизить рабочее напряжение на каждом ГЭУ. Наибольшее распространение получили трехкаскадные ГЭУ (рис. 4.4).



*a*



*b*

Рис. 4.3. Характерные сигналы, считываемые с ГЭУ: триггерный сигнал (*a*) и распределение анодных сигналов по плоскости анода (*b*)

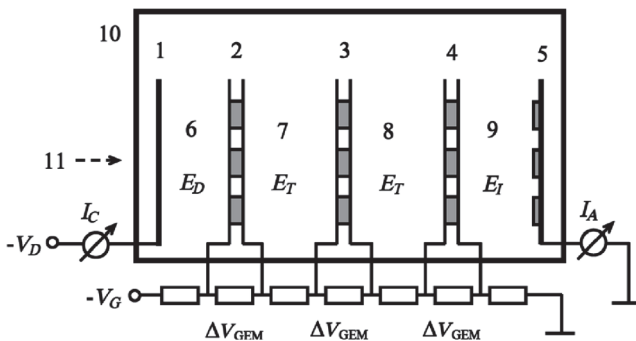


Рис. 4.4. Типичная схема трехкаскадного ГЭУ [2]:

- 1 – катод; 2 – первый ГЭУ; 3 – второй ГЭУ; 4 – третий ГЭУ;
- 5 – анод (считывающий электрод); 6 – дрейфовый промежуток;
- 7, 8 – транспортные промежутки; 9 – индукционный промежуток;
- 10 – корпус детектора; 11 – излучение;  $\Delta V_{GEM}$  – напряжение на одном ГЭУ;
- $E_D$  – дрейфовое поле;  $E_T$  – транспортное поле;  $E_I$  – индукционное поле;
- $V_G$  – напряжение на делителе;  $V_D$  – напряжение на катоде;
- $I_C$  – катодный ток;  $I_A$  – анодный ток

Трехкаскадный ГЭУ работает следующим образом: излучение входит через катод 1 в дрейфовый промежуток 6 и производит там ионизацию газа. Освобожденные при этом электроны попадают в первый ГЭУ 2, где и далее во втором 3 и третьем 4 ГЭУ их количество размножается. Вышедшие из последнего ГЭУ электроны направляются электрическим полем в сторону анода 5 и индуцируют на нем электрический заряд. Анод предназначен только для сбора заряда – усиления заряда после 3 ГЭУ не происходит. Типичная длительность сигнала, которая получается на аноде ГЭУ – 30 – 50 нс. ГЭУ в каскадной конфигурации позволяет достичь газового усиления до  $10^6$ .

Уникальная особенность ГЭУ – возможность работы с газовыми смесями, состав которых может широко меняться, при этом ГЭУ способны работать с чистыми благородными газами. Важным параметром ГЭУ является коэффициент газового усиления  $M_{max}$ . На рис. 4.5 показан график зависимости коэффициента газового усиления трехкаскадного GEM от приложенного напряжения для разных смесей с аргоном. Как видим, меняя концентрацию того или иного газа в составе газовой смеси, можно добиваться различных необходимых коэффициентов усиления для различных значений напряжения.

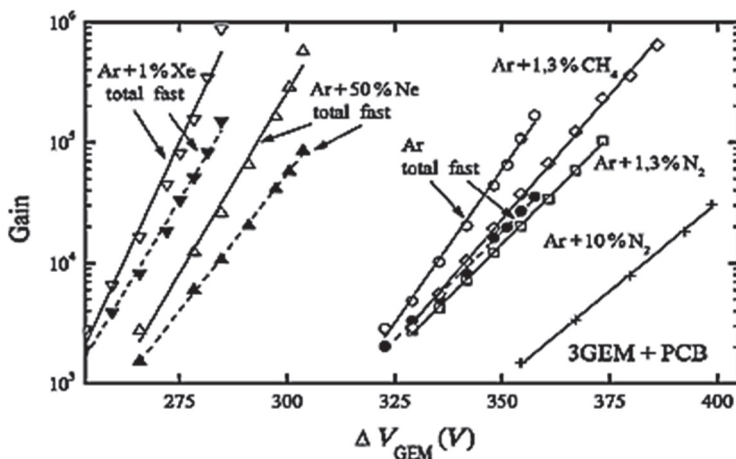


Рис. 4.5. Зависимость усиления трёхкаскадного ГЭУ от напряжения на одном ГЭУ в различных газовых смесях на основе аргона при атмосферном давлении

Пример использования ГЭУ в современном эксперименте в физике высоких энергий – эксперимент BM&N – ОИЯИ, Дубна (см. слайд на рис. 4.6).

**ЭКСПЕРИМЕНТ BM@N**

Эксперимент **BM@N** является первым экспериментом в составе комплекса **NICA** по изучению свойств **барионной материи в экстремальных условиях**. Полномасштабный тестовый физический запуск установки состоялся весной 2018 г.

**Установка BM@N включает в себя:**

- 1) Детекторы для формирования триггеров TO, T1 и мониторы пучка;
- 2) Центральный трекер (Si + GEM) внутри анализирующего магнита для восстановления взаимодействий AA;
- 3) Внешний трекер (CSC, DCH) за магнитом для соединения центральных треков с TOF-детекторами;
- 4) Времепролетная система (ToF) на основе детекторов mRPC (ToF 400 и ToF 700) и TO для идентификации адронов и легких ядер;
- 5) Калориметр ZDC для измерения центральности столкновений AA;
- 6) Электромагнитный калориметр для  $\gamma$ ,  $e^+$  и  $e^-$ .

**Параметры пучка НУКЛОТРОНА:**

- ядра от p до Au
- энергия от 1 до 6 ГэВ/н
- интенсивность до  $10^7$ /сек Au

Сезон весной 2018. Три пучка: C (4 ГэВ/н), Ar (3.2 ГэВ/н), Kr (2.3 ГэВ/н)

**Программа:**

- Неупругие реакции Ar(Kr) + мишень  $\rightarrow$  X; мишени: Al, Cu, Sn, Pb;
- Рождение гиперонов в центральном трекаре;
- Идентификация заряженных частиц и фрагментов ядер в ToF;
- Идентификация гамма-квантов в ECal

Рис. 4.6. Применение ГЭУ в эксперименте BM@N (ОИЯИ, Дубна)

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

ГЭУ 10x10 см. Характеристики ГЭУ – внешние размеры 230x230x30 мм; объем газа 157x157x12 мм (~ 300 мм<sup>3</sup>). Есть возможность двухкоординатного считывания, однако в лабораторной работе каналы объединены и подключены к одному предусилителю.

Внешний вид используемого в данной работе ГЭУ представлен на рис. 4.7, схема питания – на рис. 4.8.

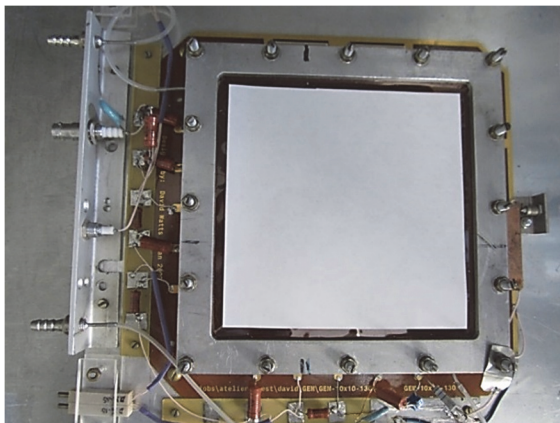


Рис. 4.7. Трехкаскадный ГЭУ с коэффициентом газового усиления до  $10^6$

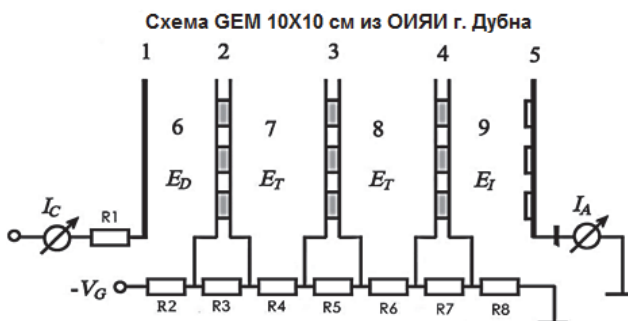


Рис. 4.8. Схема питания трехкаскадного ГЭУ, используемого в данной работе:  
 $R_1 = 20$  кОм;  $R_2 = 0,710$  МОм;  $R_3 = 0,820$  МОм;  $R_4 = 1,31$  МОм;  $R_5 = 0,78$  МОм;  
 $R_6 = 1,50$  МОм;  $R_7 = 0,74$  МОм;  $R_8 = 1,80$  МОм

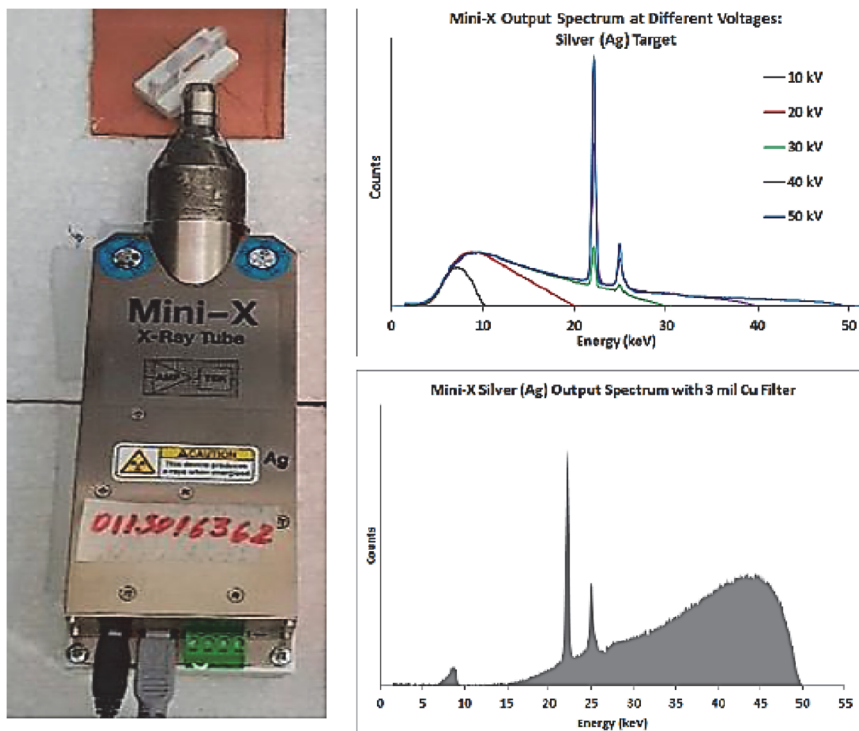


Рис. 4.9. Рентгеновая трубка АМРТЕК (слева), генерирующая рентгеновое излучение на серебряной мишени (справа сверху) и при использовании медного фильтра (справа снизу) при напряжении на аноде 50 кВ

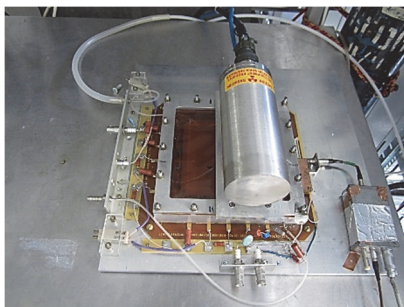
**Источники ионизации.** В качестве источника ионизации при исследовании характеристик ГЭУ может быть использовано следующее.

1. Рентгеновая трубка АМРТЕК Mini-X (рис. 4.9) со следующими характеристиками: выходная мощность – 4 Вт; напряжение на трубке – до 50 кВ; ток – до 80 мкА; катод (мишень) – серебро (Ag); выходное окно – бериллий (Be). На рис. 4.9 также представлен спектр излучения трубки при напряжении 50 кВ.

2. Рентгеновая трубка Oxford Instruments с характеристиками: напряжение на трубке до 50 кВ, ток – до 100 мкА, мишень – медь (Cu), выходное окно – бериллий (Be). Внешний вид трубки показан на рис. 4.10.



*a*



*б*

Рис. 4.10. Рентгеновская трубка Oxford Instruments с медным фильтром на коллиматоре (а) и трехкаскадный газовый усилитель с установленной рентгеновской трубкой и расположенным рядом предусилителем (б)

3. Гамма-источник  $^{55}\text{Fe}$ , имеющий в своем спектре излучения монолинию с энергией гамма-квантов 5,98 кэВ.

**Газовая система.** Схема установки автоматизированной газовой системы, подающей газовую смесь в ГЭУ, представлена на рис. 4.11. Общий вид (фотография) представлен на рис. 4.12.

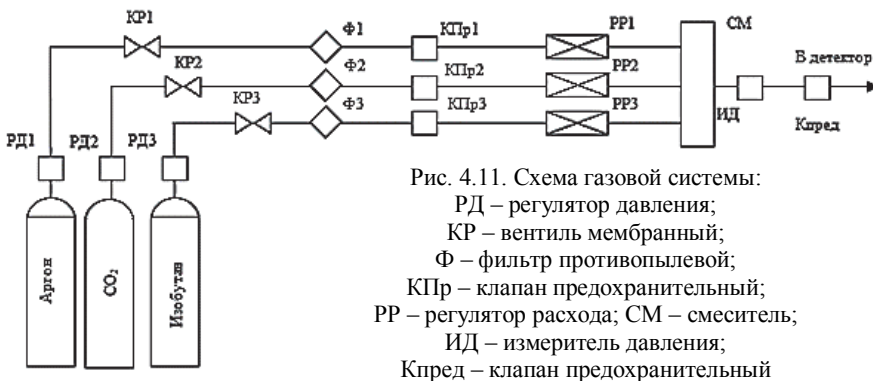


Рис. 4.11. Схема газовой системы:

- РД – регулятор давления;
- КР – вентиль мембранный;
- Ф – фильтр противопоылевой;
- КПр – клапан предохранительный;
- РР – регулятор расхода; СМ – смеситель;
- ИД – измеритель давления;
- Кпред – клапан предохранительный

Лабораторная работа предоставляет возможность контроля состава смеси, используемой для работы газового усилителя. Измерение состава смеси проводится при помощи газового анализатора – хроматографа SRI 8610C (рис. 4.13).



Рис. 4.12. Внешний вид газовой системы



Рис. 4.13. Газовый анализатор SRI 8610C

Контроль работы газоанализатора проводится с помощью специальной программы, работающей на подключенном к анализатору компьютере. На рис. 4.14 представлена выдача программы контроля анализатора, позволяющая рассчитать состав газовой смеси.

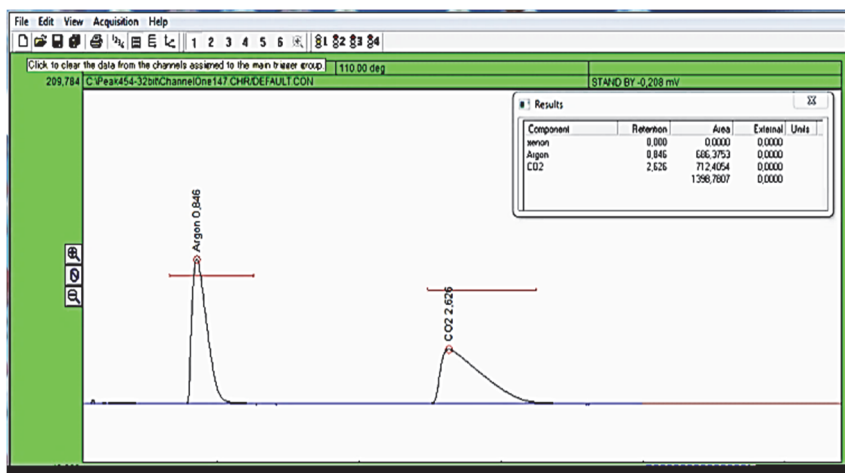


Рис. 4.14. Выдача программы контроля анализатора

**Электронный тракт.** На рис. 4.15 представлена схема электронного тракта, используемого для исследования характеристик ГЭУ.

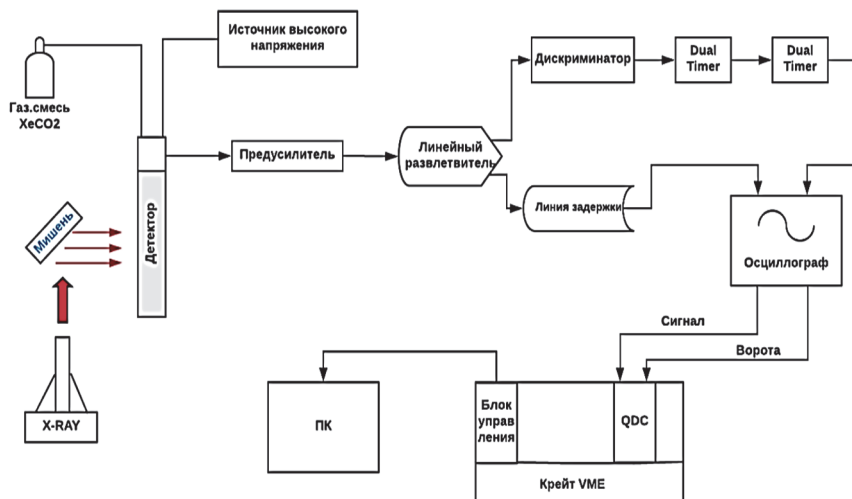


Рис. 4.15. Схема электронного тракта

Сигнал после токового предусилителя на основе чипа HML HDX 81 поступает на вход активного разветвителя FAN IN/FAN OUT. С выхода разветвителя один сигнал направляется на вход дискриминатора для формирования ворот (Gate) для зарядового оцифровщика (QDC), второй аналоговый сигнал через линию задержки подается на вход зарядового оцифровщика (QDC) в стандарте VME. Далее в блоке VME информация оцифровывается и считывается в персональный компьютер для обработки и представления.

Пример сигнала, наблюдаемого на осциллографе, показан на рис. 4.16. Внешний вид электронного тракта в виде крейтов NIM и VME представлен на рис. 4.17.

На рис. 4.18 представлен пример амплитудного распределения сигналов с ГЭУ, отображаемого при помощи персонального компьютера. Шкала зарядового оцифровщика откалибрована в единицах заряда, что позволяет рассчитать значение коэффициента газоусиления. Пример экспериментальной зависимости коэффициента газоусиления от тока в делителе GEM для смеси Ar + 30 % CO<sub>2</sub> представлен на рис. 4.19.



Рис. 4.16. Сигналы с электронного тракта установки, подготовленные для зарядового оцифровщика (аналоговый и цифровой – Gate)



Рис. 4.17. Внешний вид электронного тракта

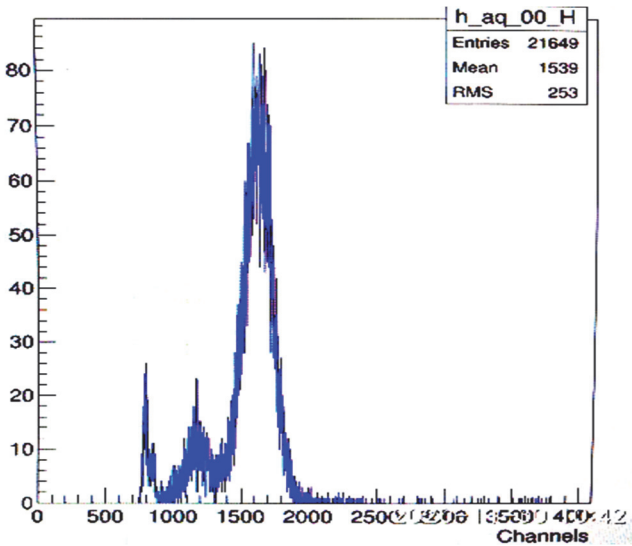


Рис. 4.18. Амплитудный спектр сигналов с ГЭУ

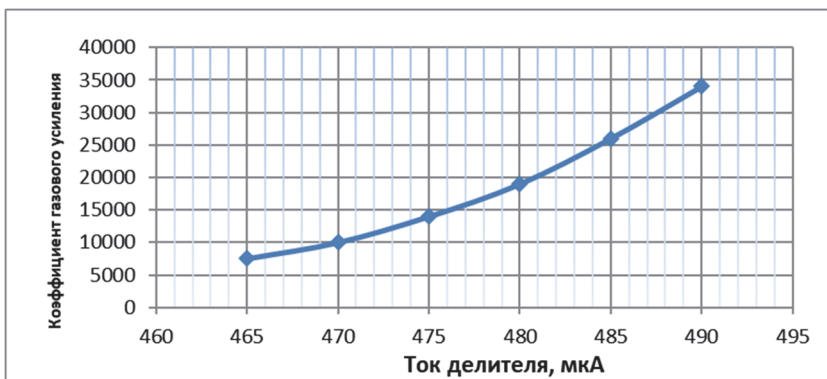


Рис. 4.19. Зависимость коэффициента газового усиления от тока делителя для GEM, заполненного газовой смесью Ar + 30 % CO<sub>2</sub>

## РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

**ВНИМАНИЕ!** Все переключения на установке осуществляются только под руководством и с одобрения преподавателя и учебного инженера.

1. Убедитесь по показанию приборов, что давление в рабочей камере ГЭУ соответствует рабочему.
2. С помощью преподавателя подать заданное рабочее напряжение на камеру; включить источник рентгеновского излучения, зафиксировать величину рабочего напряжения рентгеновской трубки.
3. Убедиться в работоспособности и готовности измерительной техники.
4. Зафиксировать состав рабочей смеси по показаниям газового хроматографа.
5. Снять зависимость амплитуды выходного сигнала (среднее в амплитудном спектре зарядового оцифровщика) от высокого напряжения на ГЭУ (тока делителя), выставляя заданные преподавателем значения рабочих напряжений.
6. Зафиксировать калибровку шкалы зарядового оцифровщика.
7. Оформить отчёт.

## ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 1) описание ГЭУ;
- 2) краткое описание использованной установки, газовой системы и электронного тракта детектора;
- 3) расчет средней энергии на пару (электрон + ион) в использованной смеси;
- 4) зависимость полученного экспериментально коэффициента газоусиления от высокого напряжения на ГЭУ (тока делителя), полученную с учетом шкалы тракта VME (см. прил. 4.1) и средней энергии на пару (электрон + ион);
- 5) заключение.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип работы ГЭУ?
2. Назовите характерные особенности ГЭУ.
3. Перечислите области использования ГЭУ, современные эксперименты, использующие ГЭУ в качестве трековых и иных детекторов.
4. Назовите характерные особенности газовой системы для питания ГЭУ, принцип работы газового хроматографа.
5. Каковы особенности рентгеновской трубки как источника облучения ГЭУ

## ЛИТЕРАТУРА

1. Sauli F. A new concept for electron amplification in gas detectors // Nucl. Instrum. and Methods. 1997. Vol. A386.
2. Bondar A., Buzulutskov A., Shekhtman L., Vasiljev A. Study of ion feedback in multi-GEM structures // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. Vol. A496.
3. Bencivenni G., Felici G., Murtas F. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. 488. P. 493.
4. Breskin A., Buzulutskov A., Chechik R. // Nucl. Instrum. and Methods. 2002. V. 483. P. 670.

5. Bondar A., Buzulutskov A., Sauli F. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 1998. V. 419. P. 418.
6. Orthen A., Warner H., Besch H. J. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2003. V. 512. P. 476.
7. Buzulutskov A., Dodd J., Galea R. et al. // Nucl. Instrum. and Methods. 2005. V. 548. P. 487.
8. Бузулуцков А.Ф. Детекторы излучений на основе газовых электронных умножителей // Вестник НГУ. 2008.
9. Buzulutskov A., Breskin A., Chechik R. et al. Further studies of the GEM photomultiplier // Nucl. Instrum. and Methods. 2000. Vol. A442. P. 68–73.

## Приложение 4.1

### Пример расчета коэффициента газоусиления ГЭУ в случае работы без использования VME

Для проведения расчета коэффициента газоусиления  $K$  в случае отсутствия VME необходимо знать среднюю энергию гамма-квантов излучения рентгеновской трубки  $E_r$ , а также частоту срабатывания ГЭУ  $\nu$  и величину тока  $I$ , протекающего через индукционный промежуток ГЭУ.

Качественно формула выглядит следующим образом:

$$K \sim I / (E_r \times \nu), \text{ или } K = I / (N_e \times e \times \nu), \quad (\text{П4.1})$$

где  $N_e$  – среднее количество электронов ионизации, образованных в газе при поглощении гамма-кванта от рентгеновской трубки;  $e$  – заряд одного электрона.  $N_e$  считается по формуле

$$N_e = E_r / E_0, \quad (\text{П4.2})$$

где  $E_0$  – средняя энергия на образование пары электрон-ион в данной газовой смеси. Для смесей на основе аргона с небольшими добавками молекулярных газов  $E_0 = 29$  эВ. Таким образом, при поглощении одного гамма-кванта с энергией 10 кэВ в газе образуется  $10^4/29 = 345$  пар электрон + ион.

*Коэффициент газоусиления* – безразмерная величина, прямо пропорциональная току, текущему через ГЭУ, и обратно пропорциональная произведению средней энергии гамма-квантов, излучаемых рентгеновской трубкой на частоту срабатывания детектора. Для вычисления все величины в формуле (П4.1) нужно представить в одной системе единиц. Для системы СИ, средней энергии гамма-квантов 10 кэВ, частоты 10 кГц и тока через ГЭУ 10 нА имеем:

$$K = 10^{-8} \text{ А} / (10^4 \text{ Гц} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл} \times (10^4 \text{ эВ} / 29 \text{ эВ})) = 1,818 \times 10^4.$$