

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра Электрофизических установок и ускорителей (ЭФУиУ)

ОТЧЕТ
по практике
тема «Исследование усиления в различных газах для дрейфовых камер»

03.03.02 Физика
Физико-технический

Вид практики: производственная практика

Тип практики: научно-исследовательская работа

За 5 семестр

Руководитель от НГТУ

Руководитель от организации

Тодышев К.Ю
Доктор физико-математических наук

Новосибирск – 2020

Содержание

Введение	2
1 Теория	3
1.1 Первичная ионизация	3
1.2 Ударное и фотонное усиление	5
1.3 Формула для определения усиления	10
1.4 Форма импульса в различных режимах	10
1.5 Фотоэлектронная эмиссия	11
1.6 Расчёт усиления с использованием Garfield	14
2 Описание экспериментальной установки	15
2.1 Пропорциональный счётчик	15
2.2 Калибровка ЗЦП	15
2.3 Измерение газового усиления	16
2.4 Контроль высокого напряжения	18
3 Результаты эксперимента	19
3.1 Расчитанные величины	19
3.2 Осциллограммы	21
3.3 Калибровка ЗЦП	24
3.4 Обработка спектров	25
3.5 Графики коэффициентов усиления	29
3.6 Сравнение результатов эксперимента	31
4 Неопределённости измеренных величин	32
4.1 Неопределённости калибровки	32
4.2 Неопределённости измерения коэффициента усиления.	32
4.3 Результаты для величин неопределённостей.	37
Заключение	42

Введение

Большие детекторы элементарных частиц состоят из подсистем. Каждая подсистема представляет собой отдельный детектор, который предназначен для измерения интересующих величин - энергии и координаты. Энергию, чаще всего, измеряют детекторами, которые называются калориметры. А координату измеряют трековые детекторы. По измерениям трекового детектора, восстанавливается траектория движения частиц.

В качестве трековой камеры может быть использована дрейфовая камера. Дрейфовая камера состоит из огромного количества анодных и катодных проволок. Конфигурацию проволок стараются выбирать так, чтобы они формировали ячейки, внутри которых одинаковое электрическое поле. Особенность дрейфовой камеры заключается в том, что эту камеру заполняют специальным газом, в котором выражен эффект газового усиления. Благодаря этому эффекту в газовых камерах возникает "само-ионизация" газа, при которой число ионизированных частиц увеличивается на несколько порядков. Так частица, оказавшаяся в дрейфовой камере, в процессе движения ионизирует огромное число атомов газа, и с помощью зарядо-цифровых преобразователей можно понять как развивалась ионизация, а значит восстановить траекторию частицы.

Эта научная работа посвящена изучению процессов газового усиления на простейшем примере - цилиндрическом счётчике. Цилиндрический счётчик представляет собой трубку, по оси которой натянута проволока. Обычно трубка выполняет роль катода, а проволока - анода. Изучение простейших процессов поможет мне в дальнейшем разобраться в более сложных процессах, происходящих в больших детекторах.

В теоретической части этой работы объясняются механизмы газового усиления. В экспериментальной части приведено описание экспериментальной установки, на которой происходило измерение газового усиления, получены графики коэффициентов газового усиления, приведены осциллограммы с сигналами, записанными при проведении эксперимента. В ходе измерений были набраны амплитудные спектры, которые подгонялись выбранными функциями. В разделе посвящённом неопределённостям, проведена оценка точности определения измеренных величин и проведённых расчётов.

1 Теория

1.1 Первичная ионизация

Ионизация – это явление разделения электрически нейтральных атомов на положительные ионы и отрицательные электроны. Первичной называется ионизация, вызванная частицей, проходящей через вещество. То есть кинетическая энергия каждой частицы, которую при соударении она может передать любой другой частице, должна быть недостаточной для вторичной ионизации.

Ионизация может происходить в камерах с различной геометрией. Среднее число электрон-ионных пар, рождаемых в процессе первичной ионизации, не зависит от геометрии установки. Это число зависит только от газа, которым заполнен конденсатор, и изотопа, и в общем случае для газовой смеси определяется по формуле

$$N = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{E} \cdot k_i}{U_i}, \quad (1)$$

где N - число электрон-ионных пар, \bar{E} - средняя энергия излучения изотопа, U_i - средняя энергия ионизации газа, k_i - доля газа в смеси, а n - число примесей.

Рассмотрим камеру, которая представляет собой цилиндрический конденсатор. Пусть внешняя поверхность заземлена, и является катодом, а внутренняя - анодом. Пусть в конденсаторе находится газообразный диэлектрик. Заряды атомов в газообразном диэлектрике являются связанными зарядами, поэтому поле и потенциал в таком конденсаторе находится из решения уравнения Лапласа. Потенциал цилиндрического конденсатора зависит только от расстояния до центральной оси. Константы, возникающие при решении уравнения прямым интегрированием, используя условие заземления внешней поверхности, выражаются через параметры установки:

$$\frac{\partial(\frac{r \cdot \partial \varphi(r)}{\partial r})}{r \cdot \partial r} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{r \cdot \partial \varphi(r)}{\partial r} = C_1 \quad \rightarrow \quad \varphi = C_1 \ln r - C_1 \ln(C_2),$$
$$\varphi = C_1 \ln \frac{r}{C_2}, \quad \begin{cases} \varphi_K = 0 \rightarrow C_2 = R_K \\ \varphi_A = C_1 \ln \frac{R_A}{R_K} \rightarrow C_1 = \frac{\varphi_A}{\ln \frac{R_A}{R_K}} \end{cases}, \quad \varphi = \frac{\varphi_A}{\ln \frac{R_A}{R_K}} \cdot \ln \frac{r}{R_K}, \quad (2)$$

где φ_A - потенциал анода, R_A - радиус анода, R_K - радиус катода.

Рассмотрим анодное напряжение, при котором вторичные ионизационные процессы отсутствуют. Пусть первичный заряд образовался на некотором расстоянии от центра анода. Картина такой локализованной ионизации изображена на рисунке 1.

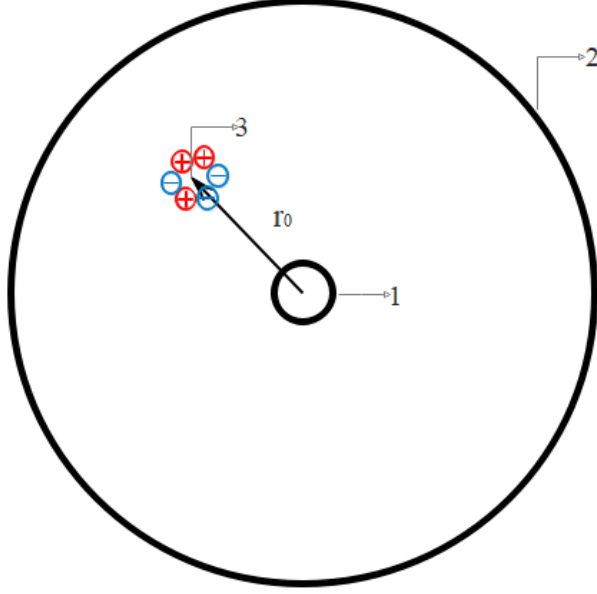


Рис. 1: Локальная ионизация на расстоянии r_0 , где 1 - анод, 2 - катод, 3 - образованные в процессе первичной ионизации электрон-ионные пары.

Ионы начнут двигаться к катоду, а электроны к аноду. В результате конденсатор разрядится. Из закона сохранения энергии и предположения о том, что напряжение будет меняться на конденсаторе незначительно, можно получить следующее выражение для электронной и ионной компоненты приращения напряжения:

$$\frac{C}{2}(U_0^2 - U_+^2) = eN_{nap} \cdot \varphi \Big|_{r_0}^{R_K}, \quad \frac{C}{2}(U_0 + U_+)(U_0 - U_+) = eN_{nap} \varphi_A \cdot \frac{\ln \frac{R_K}{r_0}}{\ln \frac{R_A}{R_K}},$$

$$\frac{C}{2}(U_0^2 - U_-^2) = -eN_{nap} \cdot \varphi \Big|_{r_0}^{R_A}, \quad \frac{C}{2}(U_0 + U_-)(U_0 - U_-) = eN_{nap} \varphi_A \cdot \frac{\ln \frac{r_0}{R_A}}{\ln \frac{R_A}{R_K}},$$

$$\begin{cases} U_0 + U_+ = 2U_0 \\ U_0 - U_- = \Delta U_0 \\ \varphi_A = U_0 \end{cases} \rightarrow \Delta U_+ = eN \frac{\ln \frac{R_K}{r_0}}{C \cdot \ln \frac{R_A}{R_K}}, \quad \Delta U_- = eN \frac{\ln \frac{r_0}{R_A}}{C \cdot \ln \frac{R_A}{R_K}}.$$

где U_+ - напряжение на катоде после дрейфа ионов, U_- - напряжение на аноде после дрейфа электронов, e - модуль заряда электрона,

Коэффициент для подсчёта ионной компоненты можно определить как отношение приращений напряжений:

$$K_U = \frac{\Delta U_+}{\Delta U_-} = \frac{\ln \frac{R_K}{r_0}}{\ln \frac{r_0}{R_A}}, \quad (3)$$

где ΔU_+ - изменение напряжения на катоде после дрейфа ионов, ΔU_- - изменение напряжения на аноде после дрейфа электронов, а $N_{нар}$ - число рождённых электрон-ионных пар.

1.2 Ударное и фотонное усиление

При относительно небольшом напряжении не происходит вторичной ионизации. Но при определённом значении напряжения кинетическая энергия, набранная электроном между двумя столкновениями, превышает энергию, необходимую для ионизации. Условие необходимое для образования вторичной ионизации записано в формуле 4:

$$\Delta E_{кин} = -e \cdot \varphi \Big|_{R_1}^{R_2} = e\varphi_A \ln \frac{R_1}{R_2} > \overline{U_i}. \quad (4)$$

где $\Delta E_{кин}$ - энергия набранная между двумя столкновениями, R_1 и R_2 - расстояния от электрона до центра анода в моменты столкновений, $\overline{U_i}$ - средняя энергия ионизации газа.

Вторичные электроны образуются после соударения электронов и атомов. Процесс образования таких электрон-ионных пар называется ударной ионизацией. Схема ударной ионизации изображена на рисунке 2.

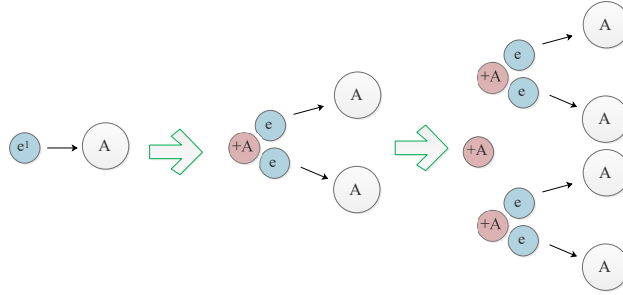


Рис. 2: Ударная ионизация при столкновении электронов с атомами.

Используя сечения столкновения, можно найти число электрон-ионных пар, производимых электроном в процессе ударной ионизации на единицу длины по формуле:

$$\alpha = \sigma_{ион} \frac{N_A}{V_{мол}},$$

где $\sigma_{ион}$ - сечение столкновения, N_A - число Авогадро, а $V_{мол}$ - молярный объём. Эта величина называется первый коэффициент Таунсенда.

Поскольку первичных электронов в газе может образовываться множество, то для каждого из них при выполнении условия, записанного в формуле (4), может быть справедлив ударный механизм. Рождённые электроны образуют электронную лавину. Электронная лавина изображена на рисунке 3.

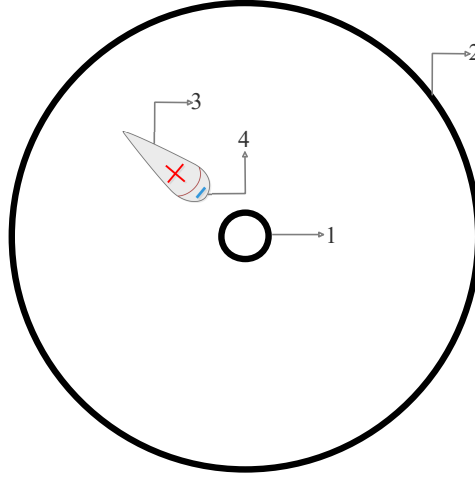


Рис. 3: Электронная лавина, образованная в процессе боковой диффузии после ударной ионизации, здесь 1 - анод, 2 - катод, 3 - ионы, медленно (относительно электронов) движущиеся к катоду, 4 - электроны, быстро движущиеся к аноду.

Используя первый коэффициент Таунсенда, можно выразить число электрон-ионных пар, образованных в процессе всего ударного механизма. Число электрон-ионных пар, производимых всей лавиной на единицу длины, пропорционально $N(x)$, т.е. числу частиц в точке x , и $\alpha(x)$ - числу электрон-ионных пар, производимых электроном на единицу длины.

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} = N(x)\alpha(x) &\rightarrow \int_{N_0}^{N_{y\partial}} dN = N(x)\alpha(x)dx \rightarrow \ln \frac{N_{y\partial}}{N_0} = \int \alpha(x)dx \rightarrow \\ &\rightarrow N_{y\partial} = N_0 e^{\int \alpha(x)dx}, \end{aligned}$$

где N_0 - число изначальных электронов, $N_{y\partial}$ - число электронов на расстоянии x , образованных ударной ионизацией.

Коэффициент усиления за счёт ударной ионизации $A_{y\partial}$ можно определить, как отношение числа частиц, образовавшихся после ионизации, к изначальному количеству частиц:

$$A_{y\partial} = \frac{N_{y\partial}}{N_0} = e^{\int \alpha dx}. \quad (5)$$

При определённом значении напряжения очень большую роль начинают играть фотоны, которые излучают возбуждённые атомы. Фотоны, обладающие достаточной энергией, могут образовывать вторичные лавины. Вторичные лавины содержат ионизированные атомы газа, образованные в результате фотоэффекта. Схема образования вторичных лавин изображена на рисунке 4.

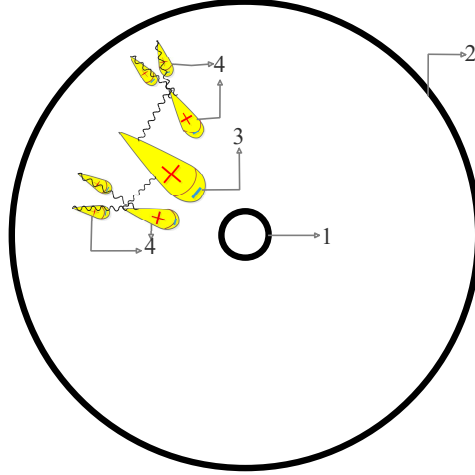


Рис. 4: Ионизация фотонным механизмом, при котором происходит образование вторичных лавин, где 1 - анод, 2 - катод, 3 - первая лавина, образованная в процессе ударной ионизации, 4 - новые поколения лавин.

Пусть γ - вероятность рождения фотоэлектрона, в области с электрическим полем достаточным для вторичной ионизации. Тогда образуется второе поколение вторичных электронов, для которых также будет справедливо усиление, использующее ударный механизм. Усиление фотонным механизмом представляет собой геометрическую прогрессию. Результатом усиления будет являться сумма геометрической прогрессии усиления бесконечного числа поколений (6). Если $\gamma A > 1$, то ряд расходится, а значит его сумма равна бесконечности, но "физически" это невозможно, поэтому в этом случае следует говорить о поляризации. Если $\gamma A < 1$, то ряд сходится, его сумма конечна, и может быть найдена следующим образом:

$$A_\gamma = A_{y\partial} \sum_{i=0}^{\infty} (\gamma A_{y\partial})^i. \quad (6)$$

$$A_\gamma = \frac{A_{y\partial}}{1 - \gamma A_{y\partial}}, \quad (7)$$

где A_γ - коэффициент усиления с учётом фотонной ионизации, γ - второй коэффициент Таусенда, $A_{y\partial}$ - коэффициент усиления за счёт ударной ионизации.

Сумма записанная в формуле (6) включает в себя бесконечное число поколений, но это совсем не означает, что все эти поколения рождаются одновременно. Физический смысл этой формулы заключается в том, что рождения каждого из поколений носит вероятностный характер, причём вероятность рождения последующего поколения, при условии того, что были рождены предыдущие, убывает как $\gamma_n = \gamma^n$.

В результате слияния лавин могут образовываться светящиеся стримеры (5). Стримеры представляют из себя электрически нейтральные каналы, состоящих из ионов и электронов, - плазму, но в "головках" которых сосредоточен избыточный отрицательный или положительный заряд. Стримеры подразделяются на отрицательные и положительные, в зависимости от того, какой избыточный заряд они содержат.

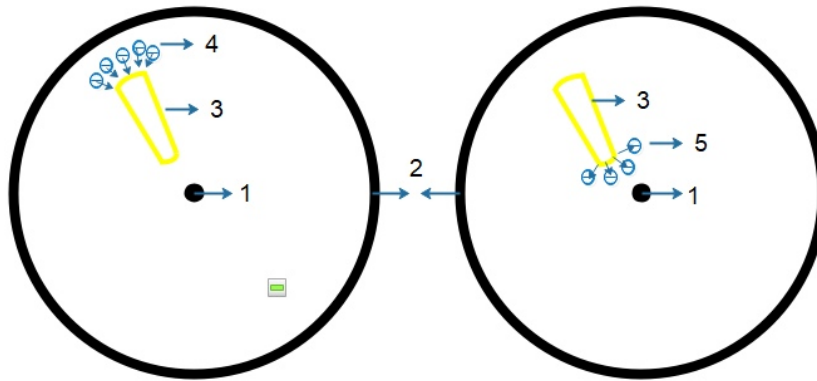


Рис. 5: Распространение стримера. Слева - положительный стример распространяется в сторону катода, справа - отрицательный стример распространяется в сторону анода. 1 - анод, 2 - катод, 3 - канал стримера, 4 - положительный стример притягивает электроны, 5 - отрицательный стример отталкивает электроны фотоионизации.

При образовании отрицательного стримера электроны и ионы перемешиваются, вследствие чего образуется канал, распространяющийся в сторону анода. Скорость фотонов значительно больше скорости электронов и ионов, поэтому за то время, пока ионы достигнут катода, образуется значительное количество вторичных лавин, которые после перемешивания и образуют плазму. На рисунке 6 изображена схема образования отрицательного стримера.

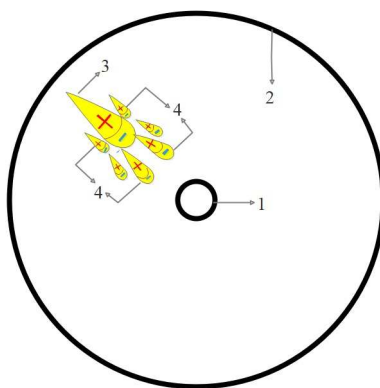


Рис. 6: Схема возникновения отрицательного стримера. 1 - анод, 2 - катод, 3 - первичная лавина, 4 - вторичные лавины.

При образовании положительного стримера электроны и ионы перемещаются, вследствие чего образуется канал, распространяющийся в сторону катода. Вторичные лавины, следуя вдоль линий силового поля и имея в головке отрицательный заряд, втягиваются в область положительного объёмного заряда, оставленного первичной лавиной. Схема образования положительного стримера изображена на рисунке 7.

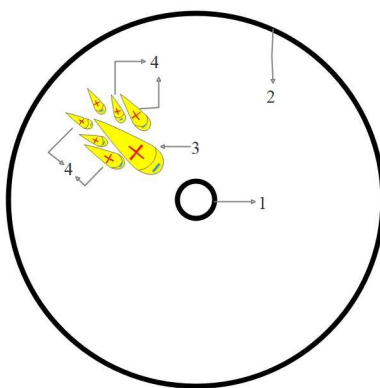


Рис. 7: Схема возникновения положительного стримера. 1 - анод, 2 - катод, 3 - первичная лавина, 4 - вторичные лавины.

Можно выделить три режима, в которых может происходить усиление газа: пропорциональный, ограниченно-пропорциональный, и стримерный. В пропорциональном режиме определяющим механизмом является ударный механизм. Стримерный режим можно охарактеризовать как стадию, на которой определяющим механизмом является фотонный механизм.

1.3 Формула для определения усиления

Количество новых образованных электрон-ионных пар характеризует усиления газа. Компонента коэффициента усиления, определяемая измеренным на аноде зарядом, определяется по формуле (8).

$$K_Q = \frac{Q_A}{N \cdot e}, \quad (8)$$

где Q_A - заряд, измеренный на анодной проволочке, а N - количество электрон-ионных пар, образованных в процессе первичной ионизации, которое определяется по формуле (1).

Ионную компоненту можно определить используя формулу (3), где в качестве начального расстояния r_0 необходимо использовать расстояние начала электронной лавины R_a :

$$K_U = \frac{\Delta U_+}{\Delta U_-} = \frac{\ln \frac{R_K}{R_a}}{\ln \frac{R_a}{R_A}}, \quad (9)$$

где R_a - расстояние начала лавины, R_A - радиус анода, R_K - радиус катода.

Ионная компонента усиления определяется как произведение двух коэффициентов:

$$K = K_Q \cdot K_U, \quad (10)$$

где K_Q - коэффициент, учитывающий заряд, который измеряется на анодной проволочке, K_U - коэффициент, учитывающий ионную компоненту.

1.4 Форма импульса в различных режимах

По форме запечатлённого на осциллограмме импульса можно определить режим, в котором работает установка. Режимы можно подразделить на пропорциональный, ограниченно-пропорциональный и стримерный.

Пропорциональный импульс характеризуется быстрым нарастанием импульса, и более медленным спадом, а так же гладкой вершиной. В пропорциональном режиме наиболее выражен ударный механизм. Известно, что электронная лавина зарождается на расстоянии порядка радиуса анода. В цилиндрических счётчиках используются анодные проволочки, радиус которых очень мал по отношению к радиусу катода. Быстрое время нарастания объясняется близостью начала лавины к аноду. Медленная скорость спада объясняется относительно медленной зарядкой конденсатора.

Стримерный импульс, имеет острую вершину, и примерно равные времена нарастания и спада импульса. В стримерном режиме наиболее выражен фотонный механизм, заряд образуется на больших расстояниях, поэтому время нарастания и спада импульса по значению примерно равны.

1.5 Фотоэлектронная эмиссия

Полезным сигналом при исследовании газа является сигнал, возникший благодаря газовому усилению, т.е заряд, образованный ионизацией газа. Так же заряд может образоваться вследствие фотоэлектронной эмиссии с катода, но такой сигнал не является полезным.

Фотоэлектронная эмиссия - это вырывание электронов с поверхности катода при поглощении атомами катода энергии фотонов. Материал для катода подбирается с минимально выраженной фотоэлектронной эмиссией. В редких случаях на осциллограмме можно заметить относительно небольшие импульсы, от частиц, которые рождаются значительно позже основного сигнала.

В разделе 1.4 было рассказано о форме различных импульсов. Пропорциональный импульс зарождается на расстоянии порядка радиуса анода. Стримерный на больших расстояниях. Позднее время появления импульса на осциллографе может означать, что образованные частицы рождаются именно на катоде. Можно убедиться в том, что эти импульсы образованы вследствие фотоэлектронной эмиссии, если сравнить полученный на осциллограмме результат с рассчитанным временем.

Время дрейфа частиц можно рассчитать, используя напряжённость электрического поля внутри конденсатора. Напряжённость поля в цилиндрическом конденсаторе имеет только радиальную компоненту, а также обратно пропорциональна расстоянию до центра анода, и определяется формулой (11). На рисунке 1.5 изображена графическая зависимость напряжённости электрического поля в цилиндрическом конденсаторе.

$$E_{(r)} = -\nabla_{\varphi} = \frac{\varphi_A}{\ln \frac{R_K}{R_A} r} = E_0 \frac{1}{r}, \quad (11)$$

где φ_A - потенциал анода, R_K - радиус катода, R_A - радиус анода, также в этой формуле введено $E_0 \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\varphi_A}{\ln \frac{R_K}{R_A}}$.

В общем случае скорость дрейфа частиц зависит от напряжённости электрического поля нелинейно. Но для определённых газов, на некотором промежутке эта зависимость с хорошей точностью является линейной.

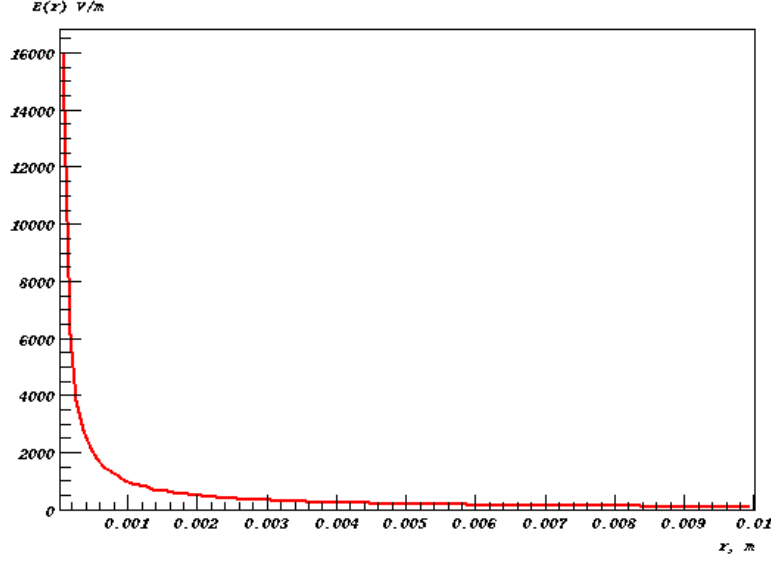


Рис. 8: График нормированной напряжённости электрического поля в цилиндрическом конденсаторе $\overline{E} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{E}{E_0}$.

Очевидно, что напряжённость поля вблизи анода достигает наиболее высоких значений, на которых отсутствует линейная зависимость, но для грубой оценки, можно предположить, что в силу большой величины поля вблизи анода вклад в величину времени дрейфа будет почти не заметен.

Формула для оценки времени дрейфа электронов, образованных в результате фотоэффекта на катоде можно получить следующим образом :

$$V = f\left(\frac{E}{P_0}\right) = k_n \frac{E}{P_0}; \quad \rightarrow \quad \frac{dr(t)}{dt} = \frac{k_n E_0}{P_0} \frac{1}{r} \quad \rightarrow \quad t_{dp} = \int_{R_A}^{R_K} \frac{P_0}{k_n E_0} r dr \quad \rightarrow$$

$$\rightarrow \quad t_{dp} \approx \frac{P_0}{2 \cdot k_n E_0} (R_K^2 - R_A^2), \quad (12)$$

где E - напряженность электрического поля, P_0 - давление в камере, равное постоянной величине, k_n - коэффициент наклона прямой из экспериментальных графиков, t_{dp} - время, за которое электроны перемещаются с катода на анод, R_K - радиус катода.

Пусть $R_K \gg R_A$, тогда формулу (12) можно переписать в виде:

$$t_{dp} \approx \frac{P_0}{2 \cdot k_n E_0} R_K^2. \quad (13)$$

1.6 Расчёт усиления с использованием Garfield

Программа Garfield++ предназначена для моделирования газовых детекторов. Используя данную программу можно моделировать газовое усиление, а также получить теоретические графики коэффициента усиления. Для этого функции Garfield++, отвечающей за создание электронной лавины, необходимо предоставить координату зарождения лавины. Для начала можно определить напряжённость, при которой начинают образовываться первые вторичные электроны, используя график для первого коэффициента Таунсенда, построенный с помощью данной программы.

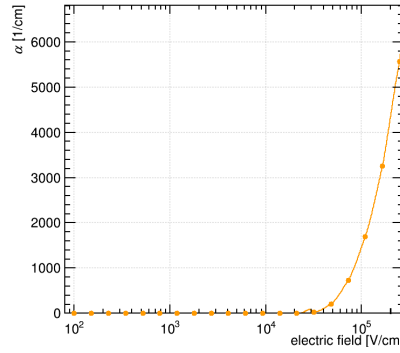


Рис. 9: График первого коэффициента Таунсенда, полученный с помощью моделирования ударной ионизации при использовании DME.

На рисунке 1.6 видно, что до определённого значения напряжённости электрического поля вторичная ионизация с помощью ударного механизма невозможна. Очевидно, что расстояние образования первого вторичного электрона зависит от напряжённости, а значит и от напряжения, подаваемого на анод. Используя напряжённость, найденную с помощью графика первого коэффициента Таунсенда, можно рассчитывать эти расстояния. Эти расстояния можно указать в функции Garfield++, моделирующей усиление в качестве входного параметра начала электронной лавины. Для того чтобы определить наиболее вероятное расстояние начала лавины, можно увеличивать напряжённость и моделировать усиления до тех пор, пока моделирование не совпадёт с экспериментальными данными:

$$E_{(R_{\text{л}})} = \frac{E_0}{R_{\text{л}}} \rightarrow R_{\text{л}} = \frac{E_0}{E_{(R_{\text{л}})}}. \quad (14)$$

где $R_{\text{л}}$ - координата начала лавины, $E_{(R_{\text{л}})}$ - напряжённость электрического поля на расстоянии $R_{\text{л}}$, а $E_0 = \frac{\varphi_A}{\ln \frac{R_K}{R_A}}$.

Так же расстояния зарождения лавины, найденное с помощью моделирования на Garfield++, можно использовать в формуле (9) для определения ионной компоненты.

2 Описание экспериментальной установки

2.1 Пропорциональный счётчик

Для проведения экспериментов был использован пропорциональный счётчик. Пропорциональный счётчик представляет собой цилиндрический конденсатор, особенность которого заключается в том, что в качестве анода используется анодная проволока. Фотография счётчика размещена на рисунке 10. Радиус анода $R_A = 12.5$ мкм, Радиус катода $R_K = 10$ мм.

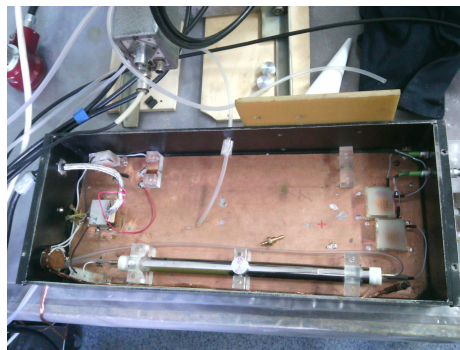


Рис. 10: Пропорциональный счётчик.

2.2 Калибровка ЗЦП

Для того что бы определить электронную компоненту коэффициента усиления необходимо измерить заряд на анодной проволочке. Этот заряд можно измерить после выполнения процедуры калибровки зарядо-цифрового преобразователя (ЗЦП). Калибровка включает в себя установление зависимости между измеряемой величиной и показаниями прибора. В данной работе был использован ЗЦП, изготовленный в стандарте КАМАК. ЗЦП представляет собой аналого-цифровой преобразователь, который определённому значению заряда сопоставляет цифровой код. Использовался двоичный ЗЦП с разрядностью в 12 бит, т.е диапазон от 0 до 4096 дискретных значений. На рисунке 11 изображена схема установки.

Генератор производит прямоугольные импульсы, которые, проходя через калибровочную ёмкость $C^0 = 1\text{ нФ}$, дифференцируются и по форме становятся похожими на импульсы, создающиеся дрейфующими частицами в счётчике. После разрядки конденсатора заряженные частицы поступают на ЗЦП. Формирователь импульсов создаёт логический импульс, с помощью которого в ЗЦП в определённой области, называемой «Ворота», интегрируется аналоговый сигнал. Код из ЗЦП считывается с помощью программы, написанной в стандарте КАМАК. Дискретное значение, измеренное ЗЦП, записывается программой.

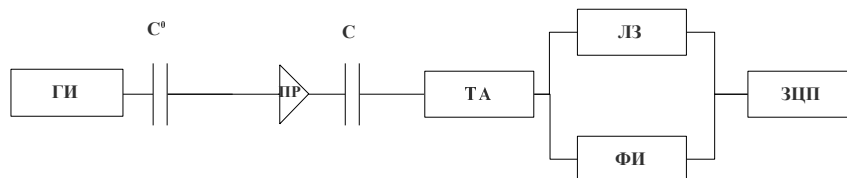


Рис. 11: Схема, собранная для калибровки, где ГИ - генератор импульсов, ПР - предусилитель, ЛЗ - линия задержки, ФИ - формирователь импульсов, ЗЦП - заряда-цифровой преобразователь.

Для набора статистических данных программа повторяет процесс записи. Один заход интегрирования это одно событие в счётчике. Для построения гистограммы записывалось 3000 событий. По результатам измерений можно построить гистограмму и определить наиболее вероятную величину. Этот процесс повторяется для изменения заряда при различном напряжении.

2.3 Измерение газового усиления

Для измерения газового усиления использовался изотоп железа - ^{55}Fe . Особенность данного изотопа заключается в том, что после захвата электрона с внешней оболочки его атом испускает, исключительно рентгеновское излучение. Средняя энергия излучения $W = 5.89 \text{ КэВ}$.

Схема, собранная для измерения газового усиления выглядит аналогично калибровочной схеме. Отличие заключается в том, что для измерения усиления придётся использовать источник высокого напряжения, которое должно подаваться на установку через низко-частотный фильтр, а не через тестовый вход. Кроме того для этого эксперимента ЗЦП имеет ограниченный диапазон измерений, поэтому перед подачей на ЗЦП сигнал ослабляется на аттенуаторе, чтобы он находился в имеющемся диапазоне дискретных значений. В исследовании газового усиления необходимо так же использовать анализатор, для того чтобы задавать и контролировать поток газа поступающий в установку. На рисунке 12 изображена схема установки.

Для подачи газа на установку был рассчитан поток Φ , измеряемый в вольтах. Поток Φ задавался на контроллере ограничителя потока газа. Для того что бы перевести поток $F_{\text{ум}} = 2.5 \text{ л/ч}$ в Φ , был найден коэффициент пересчёта, выраженный через максимальные возможные значения ограничителя:

$$\frac{0.5 \text{ л/мин}}{5B} = 6 \text{ л}/(\text{ч} \cdot B),$$

где 0.5 л/мин - максимальное возможный поток в л/мин, 5B - максимальное возможное напряжение, выставляемое на ограничителе.

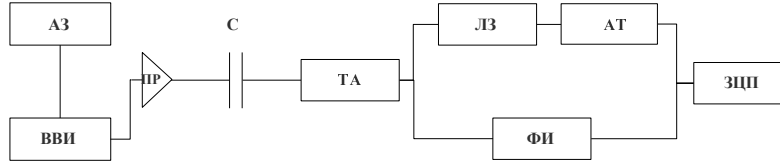


Рис. 12: Схема собранная для калибровки, где ВВИ - Источник высокого напряжения, ПР - Предусилитель, ЛЗ - Линия задержки, АТ - аттенюатор, ФИ -Формирователь импульсов, ЗЦП - Заряда-цифровой преобразователь.

Ограничитель потока имеет два канала откалиброванных на два разных газа: He, CO₂. Поток Φ рассчитывался по формулам (15), (16). Первая формула использовалась для экспериментов на газах, а вторая формула для смесей.

Поскольку контроллер предоставляет возможность выставить поток с точностью до сотых долей, то для смесей, в которых при использовании штатного потока третий знак после запятой потока Φ не был равен 0, была написана программа, перебирающая значения $\tilde{F}_{штат}$, близкие к штатному потоку $F_{шт}$, чтобы для обоих значений Φ_1 и Φ_2 третий знак после запятой был 0.

$$\Phi_{газа} = F_{шт} \frac{1}{C_2}, \quad (15)$$

$$\begin{cases} \Phi_1 = \tilde{F}_{штат} \frac{k_1}{6C_1} \\ \Phi_2 = \tilde{F}_{штат} \frac{k_2}{6C_2} \end{cases}, \quad (16)$$

где Φ_1 - поток для в вольтах для первой компоненты смеси, Φ_2 - поток для в вольтах для второй компоненты смеси, $k_{комп}$ - доля компоненты в смеси, $C_i = \frac{K_i}{K_{калибр}}$ - коэффициент преобразования для газа, на который откалиброван контроллер, K_i -коэффициент преобразования используемого газа.

Число каналов, измеренное на ЗЦП, необходимо домножить на коэффициент аттенюатора. Коэффициент аттенюатора определяется экспериментально (17).

$$A = \frac{X_1 - X_0}{X_2 - X_0}, \quad (17)$$

где X_0 - наиболее вероятное значение, измеренное при нулевом напряжении, X_1 - наиболее вероятное значение, измеренное на определённом значении напряжения без аттенюатора, X_2 - наиболее вероятное значение, измеренное на определённом значении напряжения с включённым аттенюатором.

2.4 Контроль высокого напряжения

При исследовании усиления газа необходимо использовать источник высокого напряжения. Контроль высокого напряжения является важной задачей для обеспечения безопасности эксплуатации установки. Для выполнения поставленной задачи были использованы два модуля Коммутатор аналоговых сигналов (КАС) и Аналого-цифровой преобразователь импульсов (АЦПИ).

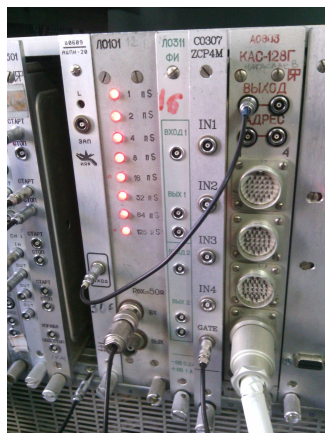


Рис. 13: Фотография используемых для контроля высокого напряжения модулей КАМАК..

Коммутатор нужен для переключения сигналов, непрерывно изменяющихся во времени. Коммутирование сигнала означает его включение, выключение, либо переключение. Включение осуществляется при $U_{вых} = U_{вх}$, а выключение при $U_{вых}$ максимально близком к нулю. Для создания таких условий используется замыкание и размыкание контактов. Коммутирующими элементами в используемом модуле КАС являются герконовые реле. Замыкание или размыкание контактов в герконе осуществляется с помощью магнитного поля. Переключение между сигналами необходимо по той причине, что АЦП имеет всего один вход, в то время как измерялось несколько величин: напряжение, ток и их максимальные значения.

Сигнал с тестового входа высокого напряжения поступает на модуль КАС. После чего коммутатор передаёт сигнал на АЦП. Измеряется сигнал из одного контакта, это измерение занимает некоторое количество времени. После измерения одного сигнала, по прошествии прописанного в программе времени, КАС осуществляет переключение на следующий сигнал. Далее описанный механизм повторяется. Когда АЦП измерит все величины, то их значения выводятся на экран.

3 Результаты эксперимента

3.1 Расчитанные величины

Таблица 1: Средняя энергия ионизации.

Название газа	DME	CO_2	He	C_3H_8	C_2H_6
\bar{U} , эВ	24	33	41	25	27

Таблица 2: Среднее число электрон-ионных пар, образованных в процессе первичной ионизации.

Название газа или смеси	N	σ_N
DME	250	± 10
CO_2	178	± 5
$He/C_3H_8(60 40)$	180	± 4
$He/C_2H_6(50 50)$	181	± 4

Таблица 3: Результаты вычисления коэффициента аттенюатора.

$A_{теор}$	$A_{теор}$	$A_{эксп}$	$\sigma A_{эксп}$	$A_{эксп}$	$\sigma A_{эксп}$
12 дБ	24 дБ	12 дБ	12 дБ	24 дБ	24 дБ
3.98	15.84	3.90	± 0.08	15.2	± 0.4

Таблица 4: Время дрейфа электронов с катода, рождающихся вследствие фотоэлектронной эмиссии на смеси $He/CO_2(40|60)$.

t_{osci} , нс	$t_{рас}$, нс	$\sigma t_{рас}$, нс
960	958	± 9

Таблица 5: Расстояния начала лавины и коэффициенты для определения ионной компоненты усиления для газа DME .

φ_A , кВ	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1
R_{α} , мкм	41	43	45	47	49	50	52	54	56	58
K_U	4.6	4.4	4.2	4.07	3.92	3.79	3.67	3.55	3.45	3.36
σK_U	0.3	0.3	0.28	0.27	0.25	0.23	0.22	0.21	0.19	0.19

Таблица 6: Расстояния начала лавины и коэффициенты для определения ионной компоненты усиления для газа CO_2 .

φ_A , кВ	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2
R_{α} , мкм	56	58	60	62	64	66	68
K_U	3.52	3.37	3.27	3.18	3.09	3.01	2.93
σK_U	0.21	0.19	0.18	0.17	0.17	0.16	0.15

Таблица 7: Расстояния начала лавины и коэффициенты для определения ионной компоненты усиления для смеси $He/C_3H_8(60|40)$

φ_A , кВ	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8	1.85	1.9	1.95	2	2.05	2.1
R_{α} , мкм	80	82	85	87	90	92	95	97	100	102	105
K_U	2.60	2.54	2.49	2.43	2.39	2.34	2.30	2.26	2.22	2.18	2.15
σK_U	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.09	0.10	0.09

Таблица 8: Расстояния начала лавины и коэффициенты для определения ионной компоненты усиления для смеси $He/C_2H_6(50|50)$.

φ_A , кВ	1.55	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8	1.85	1.9	1.95	2	2.05
R_{α} , мкм	77	80	82	85	87	90	92	95	97	100	102
K_U	2.67	2.60	2.55	2.49	2.44	2.39	2.34	2.30	2.26	2.22	2.18
σK_U	0.13	0.13	0.12	0.12	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10	0.10

3.2 Осциллограммы

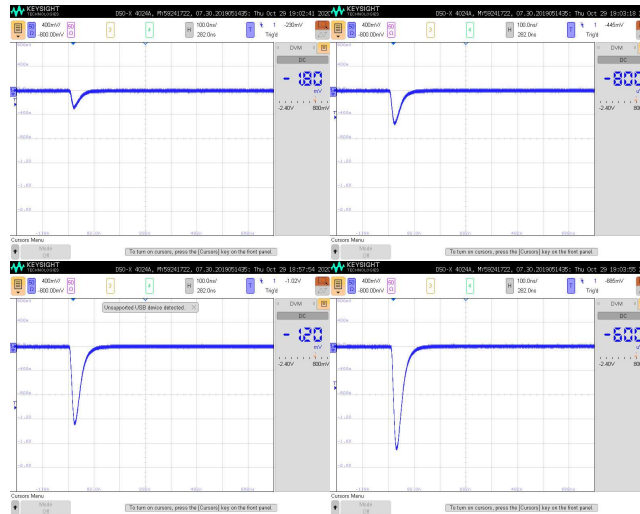


Рис. 14: Записанные на осциллографе аналоговые сигналы. Калибровка.

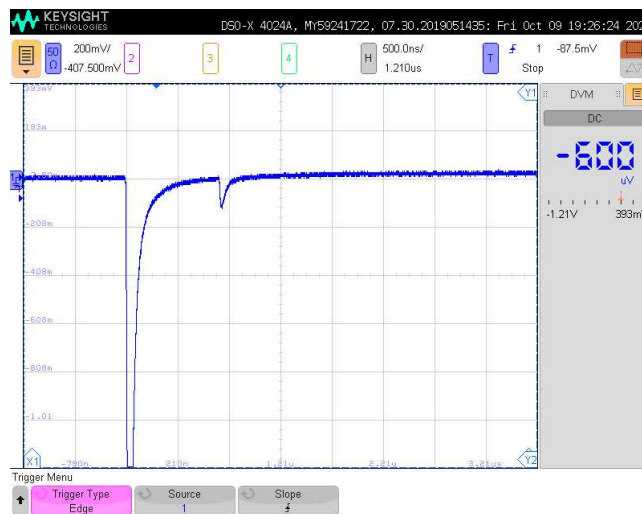


Рис. 15: Записанные на осциллографе импульсы, возникающие вследствие фотоэлектронной эмиссии.

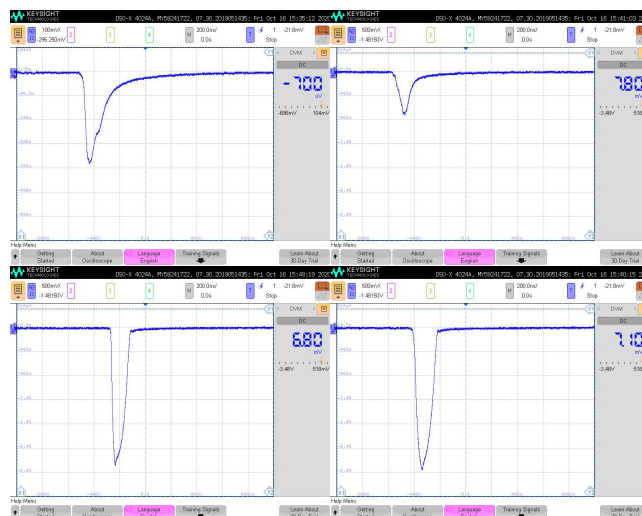


Рис. 16: Записанные на осциллографе аналоговые сигналы. Первый ряд - пропорциональный режим (2800В, 3200В) Второй ряд - стримерный (2800В, 3200В). Используемый газ: DME.

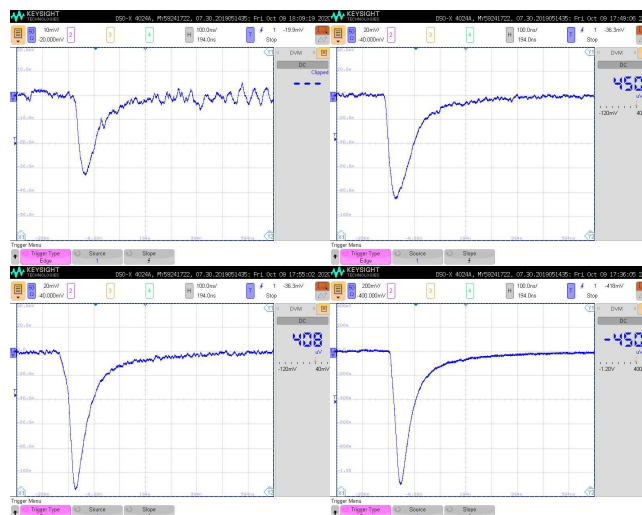


Рис. 17: Записанные на осциллографе аналоговые сигналы. Первый ряд - пропорциональный режим (2600В, 2800В) Второй ряд - стримерный (2800В, 3300В). Используемый газ: CO₂.

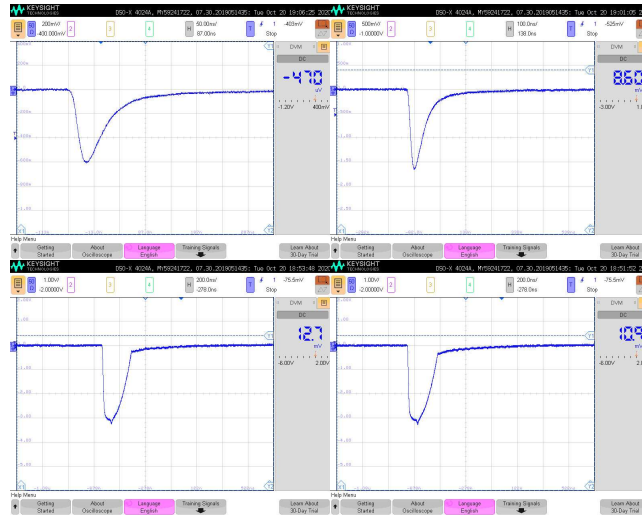


Рис. 18: Записанные на осциллографе аналоговые сигналы. Первый ряд - пропорциональный режим (1850В, 2000В) Второй ряд - стримерный (2300В, 2400В). Используемый газ: $He/C_3H_8(60|40)$.

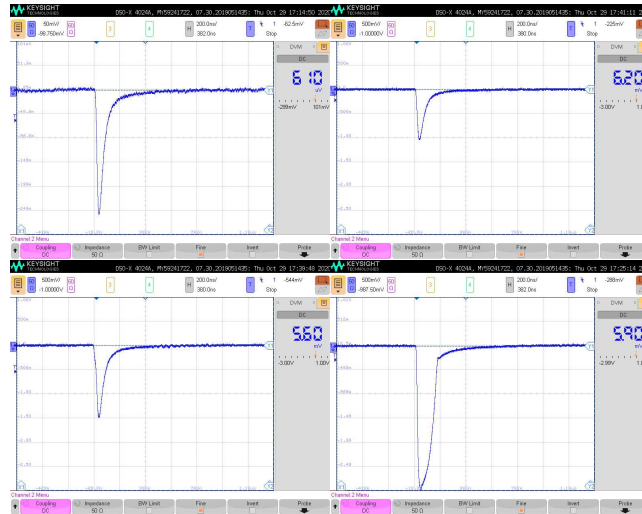


Рис. 19: Записанные на осциллографе аналоговые сигналы. Первый ряд - пропорциональный режим (1750В, 2000В) Второй ряд - стримерный (2000В, 2100В). Используемый газ: $He/C_2H_6(50|50)$.

3.3 Калибровка ЗЦП

Для определения необходимой зависимости была приведена аппроксимация полученных данных двумя способами. В первом способе зависимость считалась линейной. Аппроксимация проводилась линейной функцией, но с учётом интегральной и дифференциальной нелинейности ЗЦП. Дифференциальная и интегральная нелинейности являются погрешностями ЗЦП, следствием физического несовершенства этого прибора. Во втором способе с целью уменьшения погрешности калибровки и установления более точной зависимости была проведена аппроксимация нелинейной функцией.

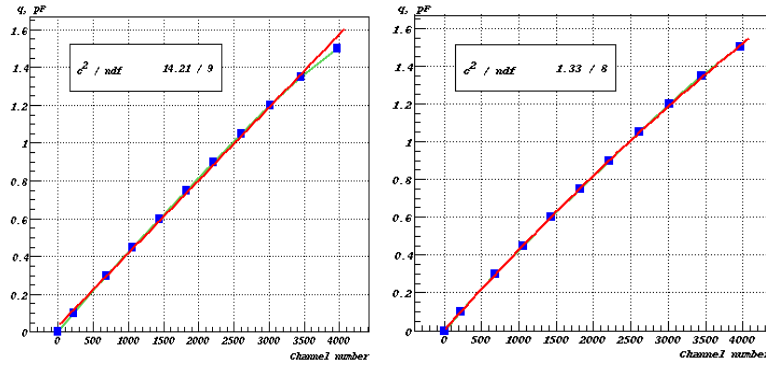


Рис. 20: Калибровка ЗЦП

Функции, которыми осуществлялась подгонка:

$$Q(x) = l_0 + l_1 \cdot x, \quad Q(x) = A \left(p_1 x - \sqrt{(p_1^2 x^2 + p_2)} \right), \quad (18)$$

где l_0, l_1 - параметры линейной калибровочной функции, а p_0, p_1, p_2 - параметры нелинейной калибровочной функции, A - коэффициент ослабления аттенюатора.

В дальнейшем обе эти зависимости использовались для подсчёта коэффициента усиления. Поскольку этот подсчёт представляет собой косвенные измерения, для каждого способа определяется своя погрешность. В подразделе 4.3 проведена оценка возникающих неопределённостей.

На рисунке 20 по оси ординат отложен заряд, поступающий на вход предусилителя, который находится по следующей формуле:

$$q = C \cdot U, \quad (19)$$

где $C = 1n\Phi$ - ёмкость калибровочного конденсатора.

3.4 Обработка спектров

После окончания измерений, проведённых для калибровки, были построены гистограммы. Для определения наиболее вероятных значений гистограммы подгонялись распределением Гаусса.

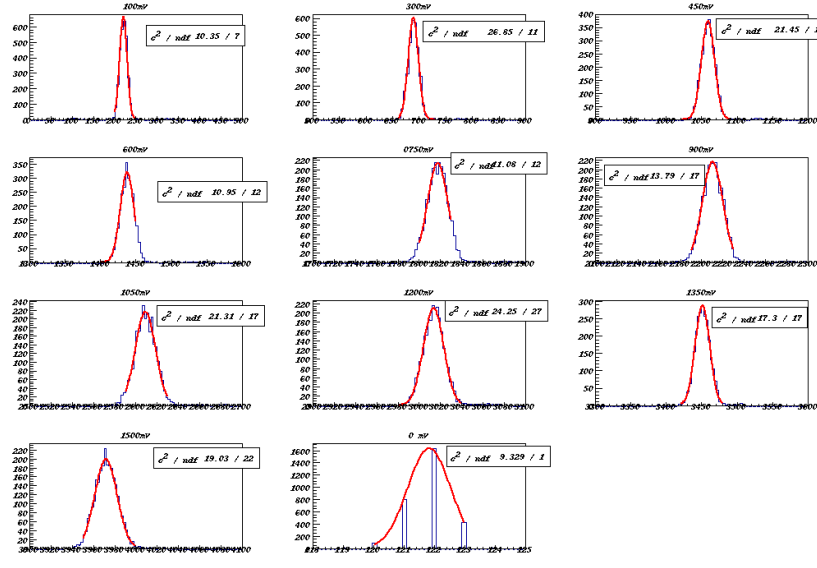


Рис. 21: Подгонка амплитудных спектров для калибровки ЗЦП. Последняя гистограмма соответствует пьедесталу ЗЦП.

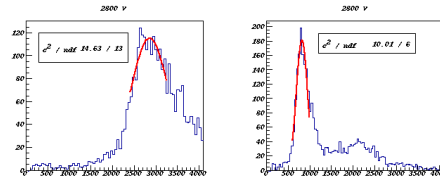


Рис. 22: Подгонка амплитудных спектров, использованных для определения коэффициента аттенюатора.

Обработка спектров при измерении газового усиления осуществлялась подгонкой функцией Гаусса в промежутках $\pm RMS$ (среднеквадратичное отклонение). После появления на спектре второй точки локального максимума, фитирование проводилось суммой двух функций Гаусса. Результаты фитирования изображены на рисунках 23, 24, 25, 26. Пропорциональному режиму соответствует максимум с меньшим дискретным значением, а стримерному - с большим.

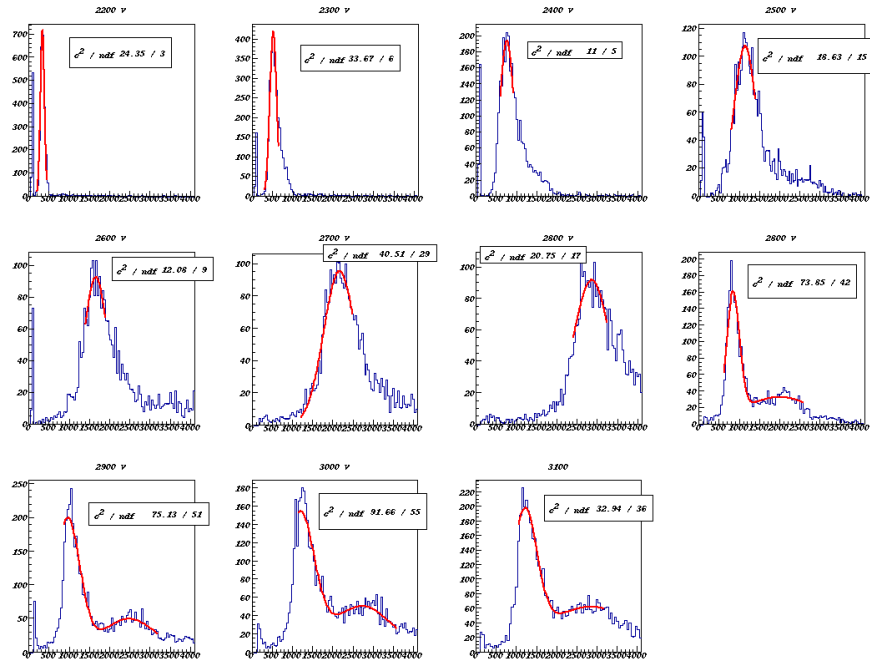


Рис. 23: Подгонка амплитудных спектров при использовании DME .

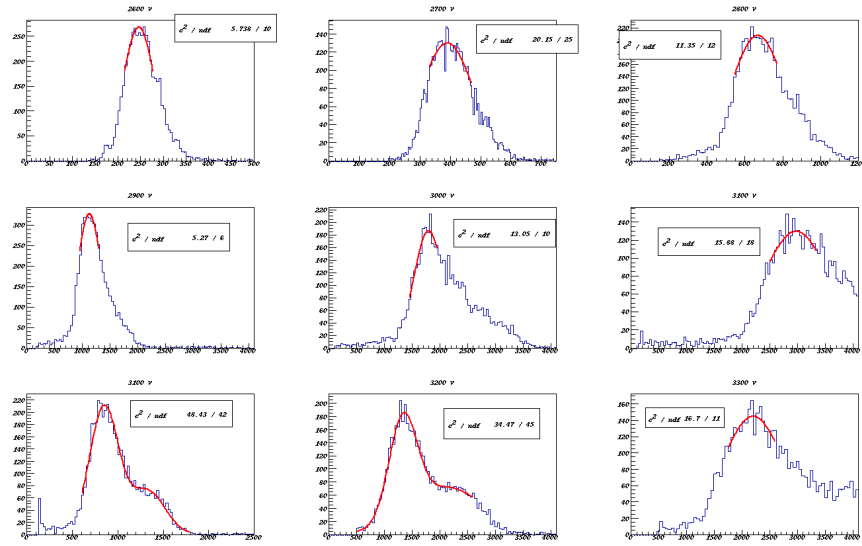


Рис. 24: Подгонка амплитудных спектров при использовании CO_2 .

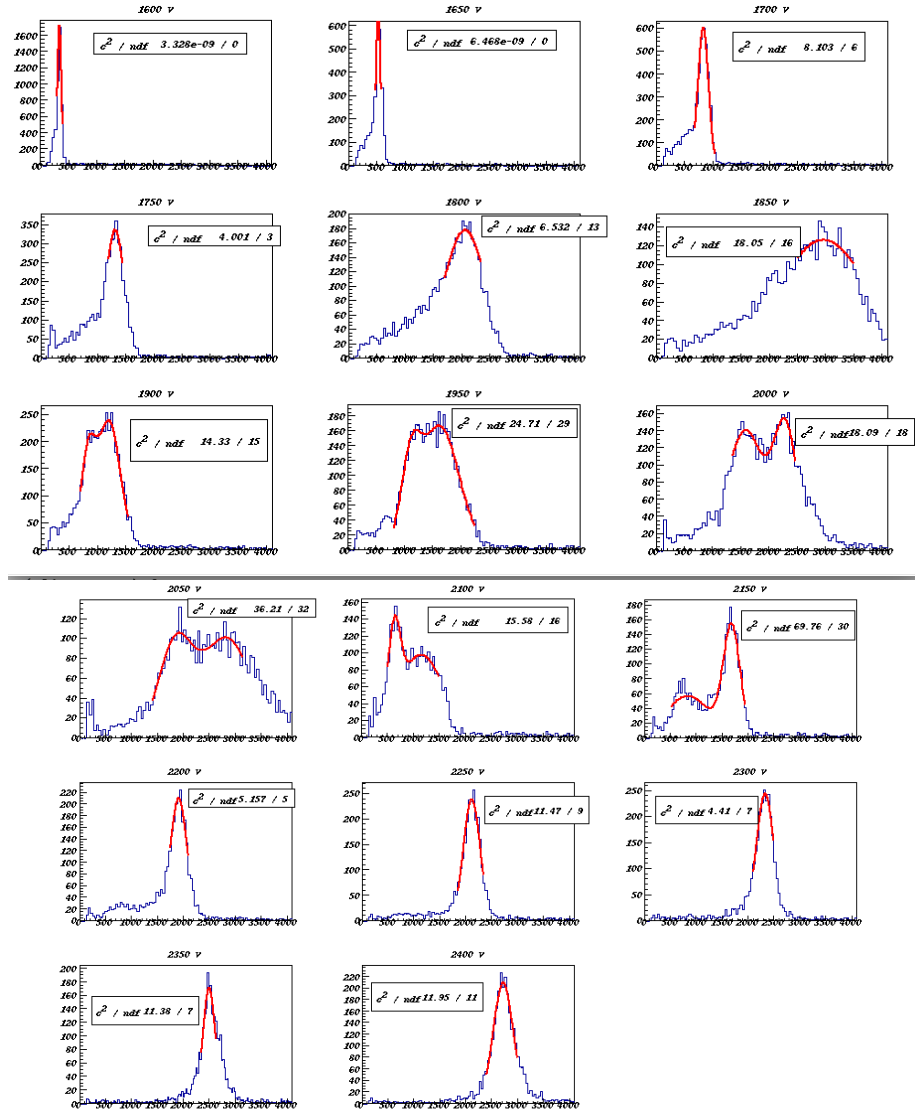


Рис. 25: Подгонка амплитудных спектров при использовании $He/C_3H_8(60|40)$.

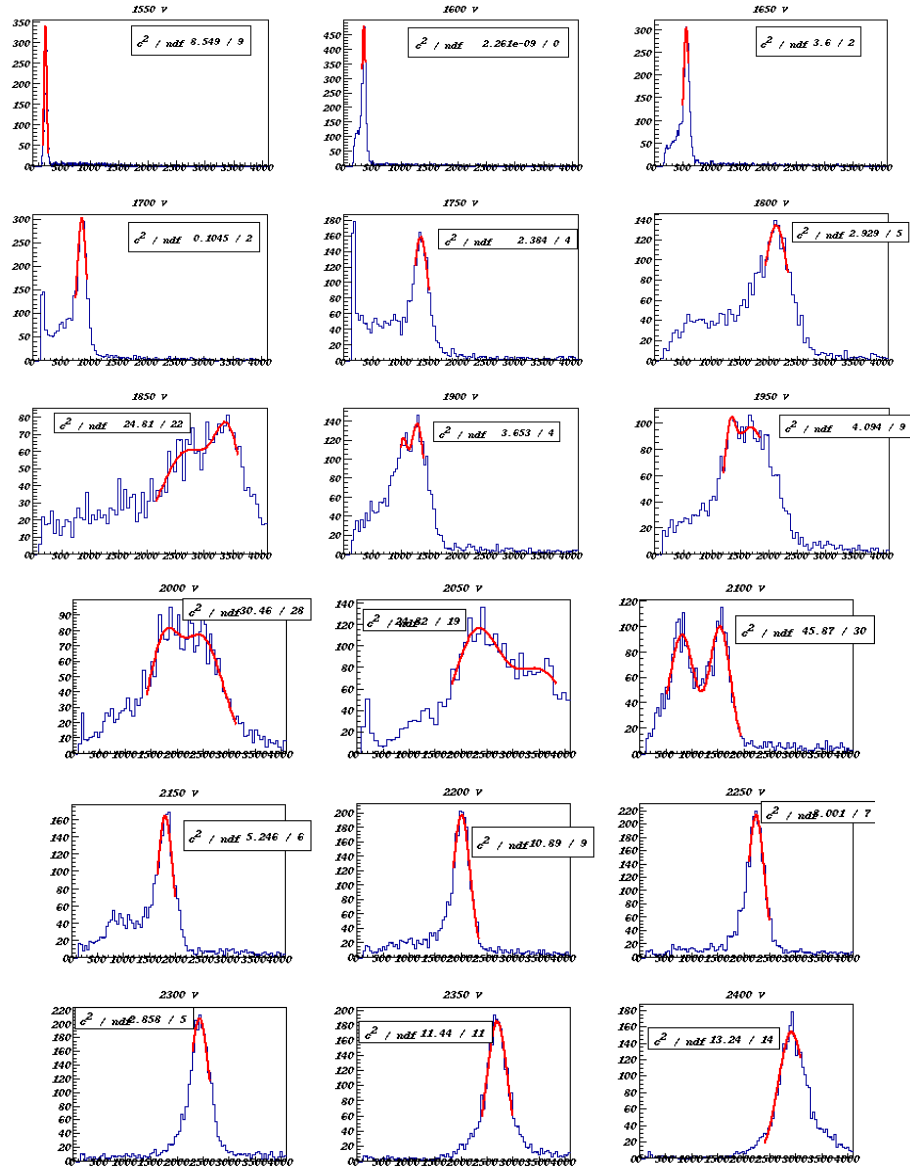


Рис. 26: Подгонка амплитудных спектров при использовании $He/C_2H_6(50|50)$.

3.5 Графики коэффициентов усиления

Локальным максимумам подгоночных функций из спектров, изображённых на рисунках 23, 24, 25, 26, по формуле (18) сопоставлялись значения заряда. Используя заряд измеренный на анодной проволочке, по формуле (10) находилась коэффициент усиления. Затем были построены графические зависимости коэффициента усиления от анодного напряжения.

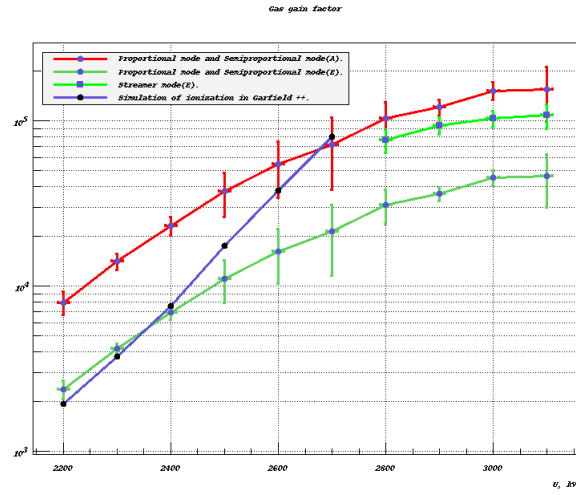


Рис. 27: Коэффициенты газового усиления (Газ DME).

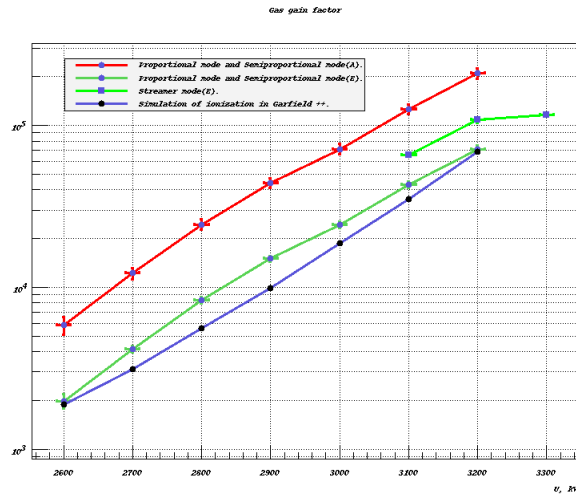


Рис. 28: Коэффициенты газового усиления (Газ CO_2).

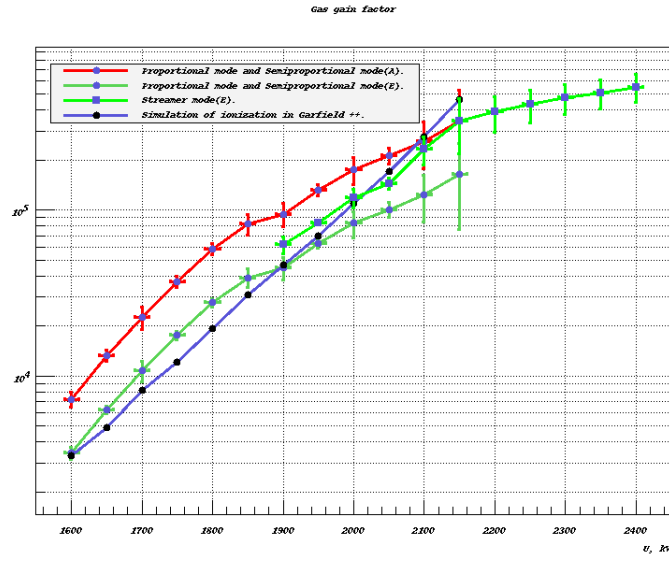


Рис. 29: Коэффициенты газового усиления (Смесь $He/C_3H_8(60|40)$).

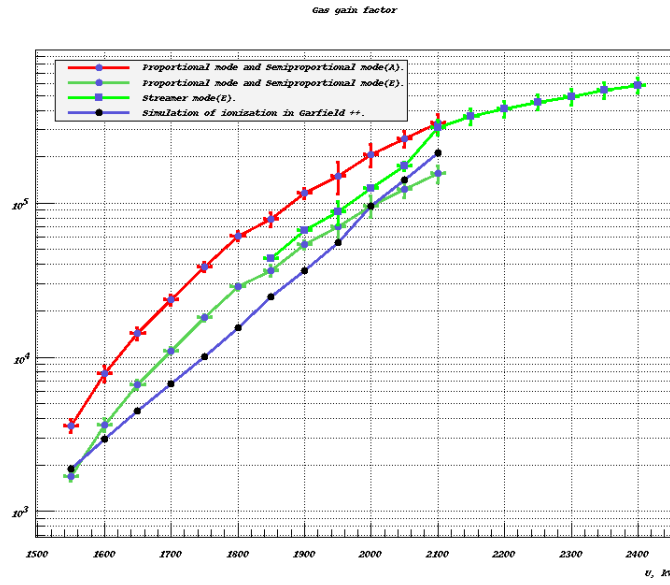


Рис. 30: Коэффициенты газового усиления (Смесь $He/C_2H_6(50|50)$).

3.6 Сравнение результатов эксперимента

Измерение проводилось на установке разработанной в стандарте КА-МАК. Установка представляет из себя цилиндрический счётчик. На другой установке - «Монитор», до написания этой работы, уже проводились измерения коэффициентов газового усиления. Например, Дмитрий Кыштымов измерял коэффициент на смесях $He/C_3H_8(60|40)$ и $He/C_2H_6(50|50)$.

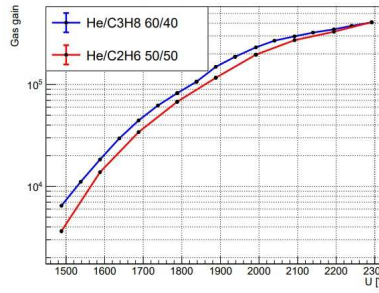


Рис. 31: Коэффициент газового усиления, измеренный в работе [1] на установке «Монитор», с газом $He/C_3H_8(60|40)$ и $He/C_2H_6(50|50)$.

Поскольку радиусы катодов на установках различные, а коэффициент усиления зависит от этой величины, то графики тоже должны отличаться. Из сравнения можно сделать вывод о том, что порядок измеренных величин совпадает.

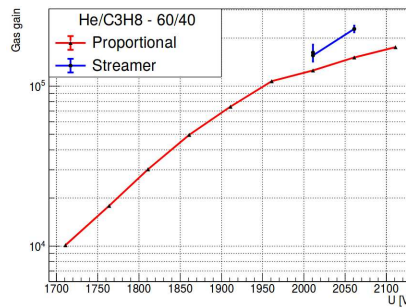


Рис. 32: Коэффициент газового усиления, измеренный на используемой в данной работе установке, с газом $He/C_3H_8(60|40)$.

Из сравнения графика, полученного в этой работе и графика Дмитрия Кыштымова, измеренного на том же самом пропорциональном счётчике можно сделать вывод о том, что измеренные величины совпадают с хорошей точностью. Ключевое отличие заключается в том, что стримерный режим был выделен авторами на разных уровнях напряжённости.

4 Неопределённости измеренных величин

4.1 Неопределённости калибровки

В погрешность измерения заряда входит погрешность определения напряжения, и ёмкости (20). Погрешность дискретного значения определяется как случайная ошибка (21). В случае аппроксимации линейной функцией учитывается дифференциальная и интегральная нелинейность. Для этого используется относительная ошибка, указанная в документации к модулю ЗЦП.

$$q = CU \rightarrow \sigma_q = q \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2} = q \sqrt{\left(\frac{10}{U}\right)^2 + (0.01)^2}, \quad (20)$$

где C - калибровочная ёмкость, U - напряжение задаваемое на генераторе, q - тестовый заряд.

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{Расп.Гаус.} - \text{нелинейная}, \\ \sigma_x = \sqrt{(\sigma_{Расп.Гаус.})^2 + (0.05x)^2 + (0.01x)^2} - \text{линейная}, \end{cases} \quad (21)$$

где $\sigma_{Расп.Гаус.}$ - среднее от среднеквадратичного отклонения из функции Гаусса, которой осуществлялась подгонка, 0.05 - относительная интегральная нелинейность, 0.01 - относительная дифференциальная нелинейность.

В таблице 9 указаны значения погрешностей косвенных измерений заряда на смеси $He/C_2H_6(50|50)$ для линейной и нелинейной аппроксимации калибровочной характеристики. Линейная ошибка записана без учёта интегральной и дифференциальной нелинейности ЗЦП, для того чтобы можно было сравнить неопределённости только косвенных измерений. Полученный результат демонстрирует отсутствие существенной ошибки, возникающей при косвенных измерениях заряда с помощью нелинейной аппроксимации.

В таблице 10 учитывается интегральная и дифференциальная нелинейности ЗЦП. Полученный результат демонстрирует уменьшение ошибки за счёт калибровки с использованием нелинейной функцией.

4.2 Неопределённости измерения коэффициента усиления.

В учёт ошибок определения измеренного заряда были включены погрешности косвенных измерений, произведённых с использованием калибровочной функции, погрешности самой калибровки, случайная ошибка, которая могла возникнуть при обработке данных (23).

Таблица 9:

$\sigma_{Q_{\text{нелин.функ.пр.}}}$	$\sigma_{Q_{\text{лин.функ.пр.}}}$	$\sigma_{Q_{\text{нелин.функ.стр.}}}$	$\sigma_{Q_{\text{лин.функ.стр.}}}$
0.0020	0.0018	0.07	0.06
0.004	0.004	0.07	0.07
0.0013	0.0012	0.4	0.4
0.0019	0.0018	0.12	0.11
0.007	0.007	0.3	0.27
0.012	0.012	0.15	0.15
0.06	0.07	0.06	0.06
0.07	0.07	0.04	0.04
0.4	0.4	0.05	0.05
0.12	0.12	0.11	0.10
0.3	0.3	0.05	0.04
0.15	0.15	0.08	0.07

Таблица 10:

$\sigma_{Q_{\text{нелин.функ.пр.}}}$	$\sigma_{Q_{\text{лин.функ.пр.}}}$	$\sigma_{Q_{\text{нелин.функ.стр.}}}$	$\sigma_{Q_{\text{лин.функ.стр.}}}$
0.0020	0.003	0.07	0.09
0.004	0.006	0.07	0.11
0.0013	0.009	0.4	0.4
0.0019	0.015	0.12	0.21
0.007	0.026	0.3	0.4
0.012	0.043	0.15	0.4
0.06	0.085	0.06	0.0.5
0.07	0.10	0.04	0.6
0.4	0.4	0.05	0.6
0.12	0.18	0.11	0.7
0.3	0.4	0.05	0.8
0.15	0.25	0.08	0.8

Заряд измерялся с помощью калибровочной функции, поэтому необходимо учесть ошибку, которая могла возникнуть при косвенных измерениях заряда.

$$Q(x) = (p_0x - \sqrt{(p_1^2x^2 + p_2)}), \quad (22)$$

$$\frac{\partial Q(x)}{\partial x} = \left(p_1 - \frac{p_1^2 x}{\sqrt{p_1^2 x^2 + p_2}} \right),$$

где $Q(x)$ - заряд, измеренный с помощью калибровочной функции, а p_0, p_1, p_2 - параметры калибровочной функции.

С другой стороны, в неопределённость заряда также должна войти погрешность калибровочной ёмкости:

$$\sigma_{Q_C} = Q(x) \frac{\sigma_C}{C}.$$

С учётом всех неопределённостей, можно найти неопределённость измеренного заряда без учёта коэффициента аттенюатора:

$$\begin{cases} \sigma_{Q(x)} = \frac{\partial Q(x)}{\partial x} \sigma_x \\ \sigma_{Q_C} = Q(x) \frac{\sigma_C}{C} \end{cases} \rightarrow \sigma_Q = \sqrt{\sigma_{Q(x)}^2 + \sigma_{Q_C}^2}, \quad (23)$$

где $\sigma_{Q(x)}$ - неопределённость заряда, возникшая при косвенных измерениях с использованием калибровочной функции, σ_{Q_C} - неопределённость заряда, возникшая за счёт неопределённости в определении калибровочной ёмкости, σ_x - среднее от среднеквадратичного отклонения, которая находится по формуле (24).

$$\begin{cases} \sigma_x = \sigma_{Расп. Гаусс.} & \text{-подгонка одной функцией Гаусса,} \\ \sigma_x = \sqrt{(\sigma_{(1)})^2 + (\sigma_{(2)})^2} & \text{- подгонка двумя функциями,} \end{cases} \quad (24)$$

где $\sigma_{Расп. Гаусс.}$ - среднее от среднеквадратичного отклонения при подгонке

одной функцией Гаусса, $\sigma_{Расп. Гаусс.(1)}$ и $\sigma_{Расп. Гаусс.(2)}$ - среднее от среднеквадратичного отклонения для «первой» и «второй» функций Гаусса, соответственно.

Также была учтена ошибка, которая могла возникнуть при подсчёте количества электрон-ионных пар, рождённых при образовании первичного заряда:

$$\begin{aligned} N &= E_\gamma \left(\frac{k_1}{\overline{U}_1} + \frac{k_2}{\overline{U}_2} \right) \rightarrow \\ \sigma_N &= \sqrt{\left(\frac{\partial N}{\partial E_\gamma} \sigma_{E_\gamma} \right)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial \overline{U}_1} \sigma_{\overline{U}_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial N}{\partial \overline{U}_2} \sigma_{\overline{U}_2} \right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\left(\frac{k_1}{\overline{U}_1} + \frac{k_2}{\overline{U}_2} \right) \sigma_{E_\gamma} \right)^2 + \left(E_\gamma \frac{k_1 \sigma_{\overline{U}_1}}{\overline{U}_1^2} \right)^2 + \left(E_\gamma \frac{k_2 \sigma_{\overline{U}_2}}{\overline{U}_2^2} \right)^2}, \end{aligned} \quad (25)$$

где N - число электрон-ионных пар, рождённых при первичной ионизации, E_γ - средняя энергия излучения изотопа, \bar{U} - средняя энергия ионизации газа, а k - доля газа в смеси.

Также была учтена ошибка, которая могла возникнуть при экспериментальном определении коэффициента усиления аттенюатора, и ошибка указанная в описании аттенюатора:

$$A = \frac{X_1 - X_0}{X_2 - X_0}, \quad \rightarrow$$

$$\sigma_A = \sqrt{\left(\frac{\partial A}{\partial X_1} \sigma_{X_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial X_2} \sigma_{X_2}\right)^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial X_0} \sigma_{X_0}\right)^2 + 0.01 =}$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_{X_1}}{X_2 - X_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{X_2}(X_1 - X_0)}{(X_2 - X_0)^2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{X_0}(X_1 - X_0)}{(X_2 - X_0)^2}\right)^2 + 0.01}, \quad (26)$$

где X_0 - наиболее вероятное значение, измеренное при нулевом напряжении, X_1 - наиболее вероятное значение, измеренное на определённом значении напряжения без аттенюатора, X_2 - наиболее вероятное значение, измеренное на определённом значении напряжения с включённым аттенюатором.

При переключении аттенюатора на с 12 дБ на 24 дБ погрешность коэффициента увеличивается:

$$A_{24} = A_{12} * A_{12} \quad \rightarrow \quad \sigma_{A_{24}} = \sqrt{(A_{12} \sigma_{A_{12}})^2 + (A_{12} \sigma_{A_{12}})^2} = \sqrt{2} A_{12} \sigma_{A_{12}} = .$$

Так же была оценена погрешность коэффициента K_U , измеряемого по формуле (9):

$$K_U = \frac{\ln \frac{R_K}{R_a}}{\ln \frac{R_a}{R_A}}, \quad \rightarrow \quad \sigma_{K_U} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_U}{\partial R_K} \sigma_{R_K}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_U}{\partial R_A} \sigma_{R_A}\right)^2 + \left(\frac{\partial K_U}{\partial R_a} \sigma_{R_a}\right)^2 =}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_K}}{R_K \ln \frac{R_a}{R_A}}\right)^2 + \left(\frac{\ln \frac{R_K}{R_a} \sigma_{R_A}}{R_A \left(\ln \frac{R_a}{R_A}\right)^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \sigma_{R_a}}{R_a \left(\ln \frac{R_a}{R_A}\right)^2}\right)^2}, \quad (27)$$

где R_a - расстояние начала лавины, R_A - радиус анода, R_K - радиус катода.

Также с помощью моделирования при небольшом изменении давления, температуры и концентрации можно найти следующие погрешности:

$$\sigma_{K(cust)} = \sqrt{\Delta_{K_T}^2 + \Delta_{K_P}^2 + \Delta_{K_k}^2}.$$

где $\sigma_{K(cust)}$ - систематическая погрешность электронной компоненты коэффициента усиления, K_T - изменение электронной компоненты коэффициента усиления при изменении температуры, K_P - изменение электронной компоненты коэффициента усиления при изменении давления, K_k - изменение электронной компоненты коэффициента усиления при изменении концентрации.

Тогда погрешность электронная компоненты коэффициента усиления можно оценить как:

$$K = \frac{Q_A}{N \cdot e} = \frac{AQ}{N \cdot e}, \quad \rightarrow$$

$$\sigma_K = K \sqrt{\left(\frac{\sigma_Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 + (\sigma_{K(cust)})^2}, \quad (28)$$

где $Q_A = AQ$ - заряд, измеренный на анодной проволочке, Q - заряд, измеренный с помощью калибровочной функции, которая записана в формуле (22), σ_Q - погрешность Q , которая находится по формуле (23), A - коэффициент аттенуатора, который определяется по формуле (17), σ_A - погрешность A , которая находится по формуле (26), N - количество электрон-ионных пар, образованных в процессе первичной ионизации, которое определяется по формуле (1), σ_N - погрешность N , которая находится по формуле (25).

Погрешность ионной компоненты коэффициента усиления можно оценить как:

$$K_I = K_U \cdot K, \quad \rightarrow$$

$$\sigma_{K_I} = K_I \sqrt{\left(\frac{\sigma_{K_U}}{K_U}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_K}{K}\right)^2}, \quad (29)$$

где σ_{K_U} - погрешность коэффициента измеренного по формуле (27), σ_K - погрешность электронная компоненты коэффициента усиления измеренного по формуле (28).

Погрешность в определении скорости дрейфа:

$$\sigma_{t_{dp}} = t_{dp} \frac{\sigma_{R_K}}{R_A}, \quad (30)$$

где t_{dp} - время дрейфа электронов от катода до анода, R_K - радиус катода, R_A - радиус анодной проволочки.

4.3 Результаты для величин неопределённостей.

Таблица 11: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании газа DME . Пропорциональный и ограниченно-пропорциональный режим.

σK_i U , кВ	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1
σK_Q	260	120	300	230	400	300	7000	2900	4000	1600
σK_A	120	210	300	500	800	1000	600	700	900	900
σK_N	100	180	300	500	700	900	1300	1500	1900	1900
σK_T	80	170	400	2000	5000	9000	9000	9000	9000	9000
σK_P	30	15	40	2500	2200	4000	4000	4000	4000	4000
σK	300	300	700	3300	6000	10000	7000	3000	5000	16000

Таблица 12: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании газа DME . Стримерный режим.

σK_i U , кВ	2.8	2.9	3.0	3.1
σK_Q	8000	2600	5000	2200
σK_A	1500	1900	2000	2200
σK_N	3200	4000	4000	5000
σK_T	9000	89000	9000	9000
σK_P	4000	4000	4000	4000
σK	12000	11000	12000	18000

Таблица 13: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании газа CO_2 . Пропорциональный и ограниченно-пропорциональный режим.

σK_i U , кВ	2.6	2.7	2.8	2.9	3	3.1	3.2
σK_Q	4	130	230	300	400	1000	2500
σK_A	9	200	400	800	1200	900	1400
σK_N	60	120	250	500	700	1300	2100
σK_T	150	50	120	130	600	400	1600
σK_P	100	23	2.3	220	4000	120	900
σK	220	280	500	1000	1600	1900	4000

Таблица 14: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании газа CO_2 . Стримерный режим.

σK_i U , кВ	3.1	3.2	3.3
σK_Q	1400	3000	3000
σK_A	1300	2200	2300
σK_N	1900	3000	4000
σK_T	1600	1600	1600
σK_P	900	900	900
σK	2600	5000	5500

Таблица 15: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании газа $He/C_3H_8(60|40)$. Пропорциональный и ограниченно-пропорциональный режим

σK_i U , кВ	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8	1.85
σK_Q	40	90	110	400	500	2000
σK_A	170	300	500	900	1400	1900
σK_N	82	120	260	400	600	900
σK_T	230	280	1300	700	1200	3700
σK_P	139	40	800	400	400	2900
σK_k	600	400	1500	2200	2700	5000
σK	700	600	2200	2500	3400	7000

Таблица 16: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании газа $He/C_3H_8(60|40)$. Пропорциональный и ограниченно-пропорциональный режим

σK_i U , кВ	1.9	1.95	2	2.05	2.1	2.15
σK_Q	1500	1800	5000	7000	24000	16000
σK_A	900	1300	1700	2000	14000	18000
σK_N	1000	1500	2000	2400	2900	4000
σK_T	4200	2300	12000	7000	27000	76000
σK_P	5000	230	6000	600	3000	40000
σK_k	9000	10000	18000	20000	40000	110000
σK	11000	10000	24000	23000	60000	140000

Таблица 17: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании газа $He/C_3H_8(60|40)$. Стримерный режим

σK_i U , кВ	1.9	1.95	2	2.05	2.1	2.15
σK_Q	700	1100	1200	3300	4400	17000
σK_A :	1300	1700	2400	3000	26000	40000
σK_N	1500	2200	2800	3000	6000	8000
σK_T	4200	2300	12000	7000	27000	76000
σK_P	5000	230	6000	600	3500	35000
σK_k	8700	10000	19000	21000	40000	110000
σK	11000	10000	24000	23000	60000	15000

Таблица 18: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании газа $He/C_3H_8(60|40)$. Стримерный режим

σK_i U , кВ	2.2	2.25	2.3	2.35	2.4
σK_Q	13000	13000	30000	40000	110000
σK_A	40000	50000	50000	60000	60000
σK_N	9000	11000	11000	12000	13000
σK_T	76000	76000	76000	76000	76000
σK_P	35000	35000	35000	35000	35000
σK_k	110000	110000	1110000	1110000	110000
σK	150000	150000	150000	1500005	150000

Таблица 19: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании в газе $He/C_2H_6(50|50)$. Пропорциональный и ограниченно-пропорциональный режим.

σK_i U , кВ	1.55	1.6	1.65	1.7	1.75	1.8
σK_Q	70	160	80	130	300	500
σK_A	90	180	300	500	900	1400
σK_N	40	90	160	270	400	700
σK_T	70	250	160	500	700	700
σK_P	60	190	400	40	27	500
σK_k	600	700	1200	2300	3000	5000
σK	600	800	1300	2400	4000	6000

Таблица 20: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании в газе $He/C_2H_6(50|50)$. Пропорциональный и ограниченно-пропорциональный режим.

σK_i U , кВ	1.85	1.9	1.95	2	2.05	2.1
σK_Q	2100	2700	16000	4000	10000	6000
σK_A	1800	1100	1400	1900	2500	17000
σK_N	900	1400	1700	2400	3000	4000
σK_T	1700	1000	3000	11000	5000	4000
σK_P	1400	400	900	9000	6000	4000
σK_k	9000	16000	28000	30000	50000	110000
σK	10000	17000	30000	34000	50000	110000

Таблица 21: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании в газе $He/C_2H_6(50|50)$. Стримерный режим.

σK_i U , кВ	1.85	1.9	1.95	2	2.05	2.1
σK_Q	1800	3000	1100	1500	2800	5400
σK_A	700	1300	1700	2500	3500	3500
σK_N	1100	1600	2200	3000	4000	8000
σK_T	17000	1090	300	11000	5000	5000
σK_P	1400	400	900	9000	7000	4000
σK_k	9000	16000	28000	30000	50000	110000
σK	9000	17000	30000	35000	50000	110000

Таблица 22: Неопределённости электронной компоненты коэффициента усиления, при использовании в газе $He/C_2H_6(50|50)$. Стримерный режим.

σK_i U , кВ	2.15	2.2	2.25	2.3	2.35	2.4
σK_Q	21000	19000	10100	22000	50000	22000
σK_A	40000	50000	50000	55000	60000	70000
σK_N	9000	10000	11000	12000	13000	14000
σK_T	5000	5000	5000	5000	5000	5000
σK_P	4000	4000	4000	4000	4000	4000
σK_k	9000	16000	28000	30000	50000	110000
σK	110000	120000	120000	120000	120000	130000

Список литературы

- [1] Клаус Групен / Детекторы элементарных частиц - Новосибирск 1999 - 408 с.
- [2] А . П. Онучин/ Экспериментальные методы ядерной физик - Новосибирск 201 - 220 с.
- [3] Н. А. Капцов / Электроника - Москва 1954 - 464 с.
- [4] Д. А. Кыштымов / Выпускная квалификационная работа: "Измерение параметров газовых смесей для дрейфовой камеры Супер Чарм-Тау Фабрики Новосибирск 2020- 40 с.

Заключение

В данной работе были объяснены механизмы газового усиления. Газовое усиление происходит благодаря двум механизмам ударный и фотонный. Ударный механизм образует лавину электронов. Благодаря фотонному механизму могут образоваться новые лавины. И ударный, и фотонный механизм увеличивают коэффициент усиления. Количество частиц образованных в последствии вторичной ионизации может увеличивается более в 10^5 раз, поэтому более качественной оценки коэффициента усиления график удобно строить в логарифмическом масштабе.

Газовое усиление исследовалось в трёх режимах: пропорциональный, стримерный и ограниченно пропорциональный.

В пропорциональном режиме определяющим является ударный механизм. Лавина электронов возникает на расстоянии порядка радиуса анодной проволоки, поэтому использование таких анодных проволочек для измерения координаты частицы, учитывая её малый радиус, будет давать результаты, точности которых будет более чем достаточно, чтобы можно было восстановить траекторию частицы.

Для регистрации высокоэнергетических заряженных частиц применяются камеры работающие в стримерном режиме. В стримерном режиме определяющим является фотонный механизм. Для восстановления траектории частицы могут быть использованы быстрые отрицательные стримеры, и этой точности тоже будет достаточно.

Были изучены процессы происходящие в пропорциональном счётчике, представляющем собой цилиндрический конденсатор наполненный газом. Так же были изучены способы измерения заряда образованного в процессе газового усиления и методы обработки полученных в процессе данных. Была проведена оценка неопределённостей измеренных величин.