

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ РФ  
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ)

В.Г. Бондаренко, М.А. Кирсанов, В.В. Кушин,  
Н.А. Миханчук, С.Г. Покачалов

# ИМПУЛЬСНАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА

Лабораторная работа

МОСКВА 2009

# ИМПУЛЬСНАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА

## Лабораторная работа

### Содержание

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Контрольное задание.....</b>	<b>13</b>
<b>Лабораторная установка.....</b>	<b>14</b>
<b>Рабочее задание.....</b>	<b>16</b>
<b>1. Камера с двумя электродами.....</b>	<b>16</b>
1.1. Выбор рабочего напряжения на электродах камеры.....	17
1.2. Измерение времени нарастания импульсов.....	17
1.3. Выбор параметров формирующей цепи усилителя.....	18
1.4. Измерение аппаратурной формы линии ионизационной камеры двумя электродами.....	19
<b>2. Камера с сеткой.....</b>	<b>19</b>
2.1. Измерение аппаратурной формы линии камеры с сет- кой.....	19
<b>3. Калибровка спектрометрического тракта.....</b>	<b>20</b>
<b>Обработка результатов.....</b>	<b>21</b>
Контрольные вопросы.....	23
Список литературы.....	23
<b>Приложение.....</b>	<b>23</b>

# ИМПУЛЬСНАЯ ИОНИЗАЦИОННАЯ КАМЕРА

**Цель работы:** изучение принципа действия и основных характеристик (аппаратурной формы линии, энергетического разрешения) импульсной ионизационной камеры, работающей в режиме электронного собирания.

## ВВЕДЕНИЕ

Импульсная ионизационная камера – это детектор, действие которого основано на измерении заряда, создаваемого заряженными частицами в его рабочем веществе. Газовая ионизационная камера представляет собой замкнутый объем, наполненный рабочим веществом – газом, как правило – электроположительным, с размещенными в нем двумя или несколькими электродами различной конфигурации. Импульсные ионизационные камеры обычно применяются для регистрации сильноионизирующих, короткопробежных частиц.

В данной работе изучаются характеристики импульсной ионизационной камеры с плоскими электродами. Эквивалентная схема включения такой камеры приведена на рис.1.

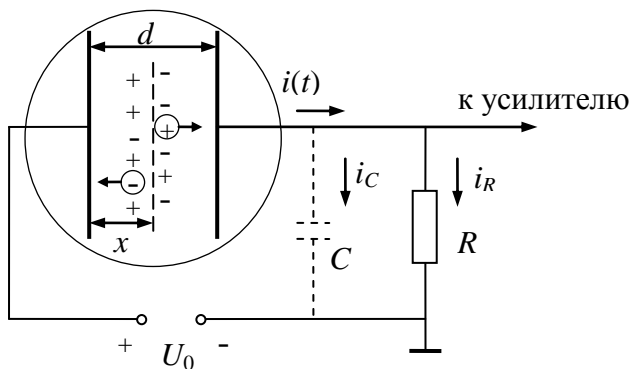


Рис.1. Эквивалентная схема включения импульсной ионизационной камеры.

При прохождении через газ заряженная частица теряет свою энергию на ионизацию и возбуждение атомов среды. Средняя энергия  $\omega$ , которая расходуется на образование одной электронно-ионной пары, практически не зависит от энергии и типа частицы и для большинства газов, используемых в качестве рабочего вещества ионизационных камер, лежит в диапазоне  $\omega = 20 - 40$  эВ. Среднее число пар зарядов, образовавшихся в газе при поглощении энергии  $E_{\text{п}}$ , составляет  $N_0 = E_{\text{п}}/\omega$ . Пока образовавшиеся в результате ионизации заряды  $q_0 = eN_+ = eN_- = eN_0$  под действием приложенного электрического поля движутся к соответствующим электродам, во внешней цепи камеры течет индуцированный электрический ток  $i(t)$ .

Так как при регистрации отдельных частиц ток носит импульсный характер, при формировании сигнала кроме последовательно подключенного активного сопротивления нагрузка  $R$ , необходимо учитывать емкостные параметры цепи камеры – так называемую эквивалентную емкость  $C$ , равную сумме емкостей самой камеры, емкости монтажа и входной емкости усилителя. На рис.1 емкость  $C$  изображена пунктиром.

Индуктированный ток  $i(t)$  разветвляется на две составляющие: ток  $i_C(t)$ , характеризующий изменение заряда  $Q(t)$  на емкости  $C$ :  $i_C = \frac{dQ(t)}{dt}$ ; и ток  $i_R(t)$  через сопротивление  $R$ , определяемый законом Ома:

$$i_R(t) = \frac{U(t)}{R} = \frac{Q(t)}{RC}.$$

В соответствии с законом Кирхгофа:  $i(t) = i_C(t) + i_R(t)$ . Отсюда заряд  $Q(t)$  может быть получен решением дифференциального уравнения:

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{RC}. \quad (1)$$

Учитывая, что движение электронов и ионов не зависят

друг от друга  $i(t) = i_-(t) + i_+(t)$ , решение уравнения (1) с начальным условием  $Q(0) = 0$  можно записать в виде:

$$Q(t) = e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t i_-(t') e^{\frac{t'}{RC}} dt' + e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t i_+(t') e^{\frac{t'}{RC}} dt'. \quad (2)$$

Первый член формулы (2)  $Q_-(t)$  описывает накопление заряда на емкости  $C$  от электронной составляющей тока в интервале времени  $0 \div T^-$ , второй член  $Q_+(t)$  – от ионной составляющей тока в интервале  $0 \div T^+$ , где  $T^-$  и  $T^+$  – время собирания электронов и ионов в камере. Для  $t > T^-$ ,  $i_-(t) = 0$  и первый член в выражении (2) в соответствии с решением уравнения (1) с нулевой левой частью, становится равным

$$Q_-(t) = Q_-(T^-) e^{-\frac{t-T^-}{RC}}. \text{ Аналогично для } t > T^+ \text{ второй член в}$$

формуле (2) преобразуется:  $Q_+(t) = Q_+(T^+) e^{-\frac{t-T^+}{RC}}$ , т.е. оба случая описывают процесс разрядки емкости  $C$  через сопротивление  $R$ . Величины электронной  $i_-(t)$  и ионной  $i_+(t)$  составляющих импульса индуцированного тока устанавливаются формулой Рамо-Шокли [1-3]:

$$i(t) = q(t) \frac{E}{U_0} \cdot \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

где  $q_+(t) = eN_+(t)$  и  $q_-(t) = eN_-(t)$  – значения зарядов, дрейфующих в камере;  $E = U_0/d$  – напряженность электрического поля в камере с расстоянием между электродами  $d$ , на которые подана разность потенциала  $U_0$ ;  $dx/dt = v_{\pm}$  – скорость дрейфа зарядов.

Из формулы (3) видно, что амплитуда и форма тока, его длительность зависят от скорости дрейфа зарядов в камере и от того, где и как в межэлектродном пространстве прошла частица. Действительно, если заряженная частица пролетела параллельно электродам камеры на расстоянии  $x$  от положительного электрода (см. рис.1), то составляющие индуциро-

ванного тока при условии, что число электронов и положительных ионов в процессе дрейфа не меняется, имеют вид:

$$i_{-}(t) = \begin{cases} eN_{-} \frac{v_{-}}{d}, & 0 \leq t \leq \frac{x}{v_{-}}; \\ 0, & t > \frac{x}{v_{-}}, \end{cases} \quad (4)$$

$$i_{+}(t) = \begin{cases} eN_{+} \frac{v_{+}}{d}, & 0 \leq t \leq \frac{d-x}{v_{+}}; \\ 0, & t > \frac{d-x}{v_{+}}, \end{cases} \quad (5)$$

Если частица той же энергии пролетела перпендикулярно электродам, то число электронов и ионов в камере, при условии, что пробег равен межэлектродному расстоянию  $d$ , а плотность ионизации постоянна вдоль трека, убывает линейно со временем и составляющие тока имеют вид:

$$i_{-}(t) = eN_0 \left(1 - \frac{v_{-}}{d} t\right) \cdot \frac{v_{-}}{d}; \quad (6)$$

$$i_{+}(t) = eN_0 \left(1 - \frac{v_{+}}{d} t\right) \cdot \frac{v_{+}}{d} \quad (7)$$

в интервалах времен  $0 \leq t \leq d/v_{-}$  и  $0 \leq t \leq d/v_{+}$  соответственно.

На рис.2 приведены формы электронной и ионной составляющих импульсов индуцированного тока во внешней цепи камеры для треков, ориентированных параллельно (а) и перпендикулярно (б) электродам\*.

---

\* Реальная форма импульсов тока в случае (б) имеет более сложный вид, так как плотность ионизации вдоль трека неравномерна и изменяется в соответствии с кривой Вульфа-Брэгга.

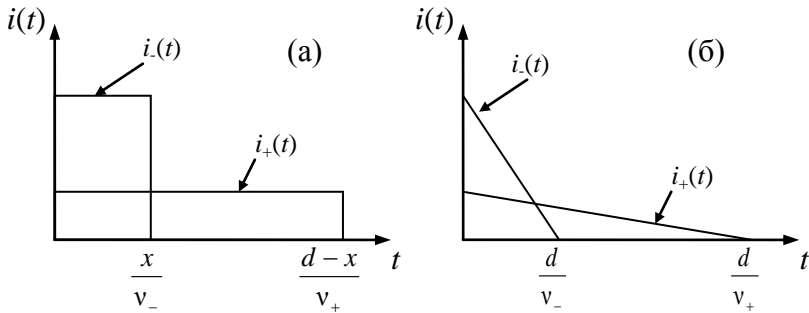


Рис.2. Составляющие импульсов индуцированного тока: а) – трек ориентирован параллельно, б) – перпендикулярно электродам. Масштаб по осям искажен, реально  $i_+(t) \approx 10^{-3}i_-(t)$ , т.к.  $v_+ \approx 10^{-3}v_-$ .

В зависимости от параметров  $R$  и  $C$  и соотношения  $RC$  и времени собирания зарядов в камере  $T^\pm$  величина и форма  $Q(t)$  оказываются пропорциональны току  $i(t)$  или интегралу от тока.

Если выбрать  $RC \ll T^\pm$ , тогда ток в основном будет протекать через сопротивление нагрузки  $R$  и зарядкой емкости, т.е. изменением заряда  $\frac{dQ}{dt}$  на ней в соответствии с уравнением (1) можно пренебречь, и  $Q(t) \approx RC \cdot i(t)$ . Т.к. амплитуда тока  $i_+(t) \approx 10^{-3}i_-(t)$  ( $v_+ \approx 10^{-3}v_-$ ),  $Q(t) = Q_-(t) \approx RC \cdot i_-(t)$ , т.е. в этом режиме сигнал  $Q(t)$  практически пропорционален электронной компоненте тока.

Использование этого режима для измерения энергии частицы имеет два существенных недостатка. Во-первых, индуцированный заряд  $Q$  существенно меньше величины заряда, образованного частицей в камере  $q_0$ . Действительно, если вы-

брать  $RC \approx 0,1 T^-$ , то  $Q_- \approx q_0 \frac{v_-}{d} RC = q_0 \frac{RC}{T^-} = 0,1 q_0$ .

Во-вторых, значение заряда  $Q_-$  зависит не только от заряда  $q_0$ , образованного частицей, но и от скорости дрейфа электронов ( $i_-(t) = q(t) \frac{v_-}{d}$ ).

При выборе  $RC \gg T^\pm$  разрядкой емкости через сопротивление  $R$  за время собирания зарядов можно пренебречь и решение уравнения (1) имеет вид:

$$Q(t) = \int_0^t i_-(t') dt' + \int_0^t i_+(t') dt'. \quad (8)$$

Такой режим работы камеры называется *режимом полного собирания*, при котором максимальный заряд, индуцированный на емкости  $C$  независимо от ориентации трека частицы в камере, определяется только числом зарядов  $N_0$ :

$$Q(T^+) = eN_0.$$

Так, подставляя в уравнение (8) выражения для тока (4) и (5) имеем:

$$Q_{max} = eN_- \frac{x}{d} + eN_+ \frac{d-x}{d} = eN_0.$$

Аналогично, при подстановке в (8) линейно убывающего со временем тока, образованного треком, ориентированным перпендикулярно электродам, получим  $Q_{max} = eN_0$ . Поскольку  $N_0 = E_{\pi}/\omega$ , индуцированный заряд в режиме полного собирания пропорционален энергии  $E_{\pi}$ , поглощенной в камере:  $Q_{max} = eE_{\pi}/\omega$  и не зависит от ориентации трека частицы.

Время собирания зарядов в импульсной камере определяет ее временное разрешение, т.е. тот минимальный временной интервал, который должен разделять две следующие друг за другом частицы для того, чтобы не произошло наложения импульсов во внешней цепи и изменения их амплитуды.

Рассмотренный режим полного собирания имеет существенный недостаток, связанный с наложением импульсов даже



при малой интенсивности облучения  $n_0$  ( $n_0$  – среднее число частиц, попадающих в камеру в единицу времени).

Действительно, амплитуды импульсов от частиц могут быть измерены без искажения только тогда, когда промежуток времени между частицами будет, по крайней мере, не меньше полного времени собирания ионов.

Т.к. скорости дрейфа ионов в газах приблизительно на три порядка меньше скоростей электронов, в камерах с  $d \sim 1$  см время собирания ионов составляет  $\sim 10^{-3}$  с. Тогда, если принять, что вероятность наложения импульсов за время  $\sim 10^{-3}$  с не должна превышать 10 %, максимальная интенсивность для пуассоновского потока частиц, попадающих в камеру, определяется из соотношения  $p(0, 10^{-3}) = e^{-n_0 10^{-3}} = 0,9$ . Отсюда

находим  $n_0 = \frac{10^{-1}}{10^{-3}} = 10^2$  част/с. Ясно, что в режиме полного

собираения камера обладает плохим временным разрешением.

Обеспечить хорошее временное разрешение камеры можно выбирая  $T^- \leq RC \ll T^+$ . В этом случае величиной индуцированного заряда на емкости от дрейфа ионов можно пренебречь, и в выражении (2) остается составляющая, связанная только с электронной компонентой тока:

$$Q_-(t) = e^{-\frac{t}{RC}} \int_0^t i_-(t') e^{\frac{t'}{RC}} dt'.$$

В частном случае, при  $T^- \ll RC \ll T^+$ , это выражение упрощается:

$$Q_-(t) \approx \int_0^t i_-(t') dt'. \quad (9)$$

Камеры с таким режимом работы называются камерами с электронным собиранием.

В режиме электронного собирания, т.к.  $T^- \approx 10^{-3} T^+$ , даже если принять вероятность наложения импульсов  $\sim 1$  %, можно работать при интенсивностях облучения  $n_0 \leq 10^4$  част/с.

На практике требуемый режим работы камеры обеспечивается не изменением  $RC$ , а подбором полосы пропускания усилителя. Существенным недостатком ионизационной камеры с электронным собиранием является зависимость заряда  $Q(t)$  от ориентации трека частицы.

Рассмотрим это на примере изучаемой ионизационной камеры (рис.3). Радиоактивный препарат, испускающий изотропно монохроматические альфа-частицы, размещен в виде тонкого слоя на отрицательном электроде. Пробег альфа-частиц равен расстоянию между электродами. Камера работает в режиме электронного собирания,  $T^- \ll RC \ll T^+$ .

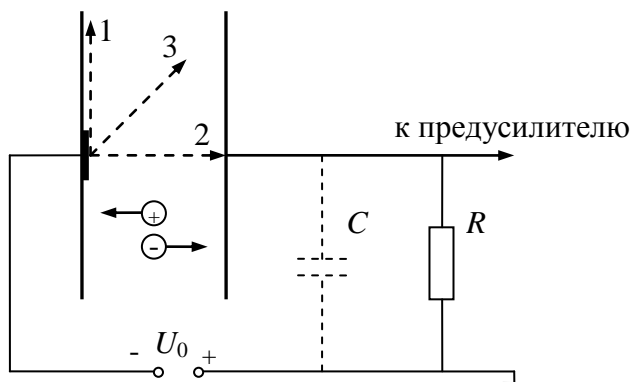


Рис.3. К определению величины заряда в режиме электронного собирания.

Если трек альфа-частицы ориентирован параллельно электродам и расположен в начальный момент времени в непосредственной близости от отрицательного электрода (случай 1 на рис.3), то из соотношений (4) и (9) получаем следующее значение заряда  $Q_1$  на емкости  $C$ :

$$Q_1 = eN_- . \quad (10)$$

Если трек ориентирован перпендикулярно электродами (случай 2 на рис.3), то количество носителей заряда и, следовательно, ток уменьшаются со временем по закону (6) и значение заряда

$$Q_2 = \frac{1}{2} eN_- = \frac{1}{2} Q_1. \quad (11)$$

Очевидно, что при ориентации трека под произвольным углом к электродам (случай 3 на рис.3) величина заряда  $Q_3$  будет находиться в пределах:

$$\frac{1}{2} eN_- < Q_3 < eN_-. \quad (12)$$

Поскольку источник альфа-частиц является изотропным, все значения зарядов в указанных пределах равновероятны. Таким образом, амплитуда импульса в камере с электронным собиранием определяется не только энергией альфа-частиц, но и ориентацией трека относительно электродов.

Рассмотренный эффект существенно усложняет задачу измерения энергии исследуемых частиц. Один из путей его устранения – ведение в камеру третьего электрода – сетки, рис.4. Давление газа в камере с сеткой подбирают так, чтобы пробеги регистрируемых частиц полностью укладывались в промежутке «высоковольтный электрод-сетка» (вспомогательный объем камеры). Образованные на треке частицы-электроны дрейфуют в направлении собирающего электрода, проходят через сетку и индуцируют заряд во внешней цепи только при движении в промежутке «сетка-собирающий электрод» (рабочий объем камеры), так как сетка практически полностью экранирует один объем камеры от другого. Очевидно, что в этом случае максимальная амплитуда заряда, индуцированного во внешней цепи, от ориентации трека не зависит, и равна  $Q_{max} = Q_1$ . Таким образом, камера с сеткой при достаточно высоком временном разрешении может обеспечить хорошее разрешение по энергии.

Энергетическое разрешение камеры с сеткой зависит от

ряда факторов. Нижний предел относительного энергетического разрешения  $\delta_{\text{пред}} = \Delta E_{\text{и}}/E_{\text{п}}$  определяется флуктуациями в числе образованных частиц пар носителей заряда. Вследствие случайного характера взаимодействия частицы с атомом вещества, число образованных пар зарядов  $N$  является случайной величиной. Флуктуации числа пар характеризуются дисперсией  $D(N)$ . Экспериментально установлено, что дисперсия пропорциональна их среднему числу:  $D(N) = F \cdot N_0$ . Коэффициент пропорциональности  $F$  носит название фактора Фано ( $F < 1$ ). Тогда предельное энергетическое разрешение (в предположении, что распределение импульсов по амплитудам подчиняется распределению Гаусса) имеет вид:

$$\delta_{\text{пред}} = \frac{\Delta E_{\text{и}}}{E_{\text{п}}} = \frac{2,36\sqrt{FN_0}}{N_0} = 2,36\sqrt{F/N_0}.$$

Такого разрешения можно было бы достичь, если удалось бы полностью устранить другие факторы, ухудшающие энергетическое разрешение. К ним относятся: входные шумы усилителя; наличие токов утечки по камере; флуктуации в числе собранных электронов, обусловленные неоднородностью сетки и захватом электронов электроотрицательными примесями; неполная экранировка рабочего объема камеры от вспомогательного и связанная с этим некоторая зависимость амплитуды индуцированного заряда от ориентации трека частицы; зависимость формы индуцированного заряда от ориентации частицы во вспомогательном объеме камеры, что приводит к флуктуациям амплитуды импульсов на выходе спектрометрического тракта из-за разных условий их формирования.

## КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ

При подготовке к лабораторной работе выполнить следующие расчеты, используя приложение.

1. Рассчитать давление аргона в камере, при котором пробег альфа-частиц  $^{239}\text{Pu}$  с энергией 5,15 МэВ не будет превы-

шать межэлектродного расстояния  $d = 20$  мм.

2. Зная величину межэлектродного расстояния ( $d = 20$  мм), вид газа (Ar), давление, рабочее напряжение ( $\sim 1000$  В), рассчитать максимальное время собирания зарядов  $T^+$  и  $T^-$  в камере без сетки по формуле  $T^\pm = d/v_\pm$ , где  $v_\pm$  – скорости дрейфа ионов ( $\text{Ar}_2^+$ ) и электронов, которые определяются с помощью таблиц в приложении.

3. Нарисовать ожидаемые амплитудные распределения импульсов в ионизационной камере с электронным собиранием с двумя электродами (рис.3) и в камере с сеткой (рис.4).

## ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

Функциональная схема установки приведена на рис.4. Камера состоит из двух плоских металлических электродов диаметром 60 мм, между которыми находится сетка. Верхний электрод – высоковольтный, нижний, присоединенный к предусилителю, – собирающий. Источник альфа-частиц  $^{239}\text{Pu}$  ( $E_\alpha = 5,15$  МэВ) расположен на высоковольтном отрицательном электроде. Высоковольтный электрод и сетка – съемные. При работе без сетки расстояние между электродами равно 20 мм. В камере с сеткой расстояние между электродами и сеткой также равно 20 мм (на рис.4 – изображен вариант камеры с сеткой). Постоянное напряжение отрицательной полярности на электроды камеры подается от двух независимых выпрямителей  $V_1$  и  $V_2$  типа БНВЗ-05. Собирающий электрод камеры соединен с зарядо-чувствительным предусилителем БУС2-01.

В схему предусилителя после первого каскада усиления введена дифференцирующая цепочка с постоянной времени  $\tau_{д1} \approx 50$  мкс. Постоянная времени дифференцированная обеспечивает условие  $T^- \ll \tau_{д1} \ll T^+$ . В этом случае на выходе усилителя регистрируется практически только электронная составляющая заряда, индуцированного по внешней цепи ка-

меры.

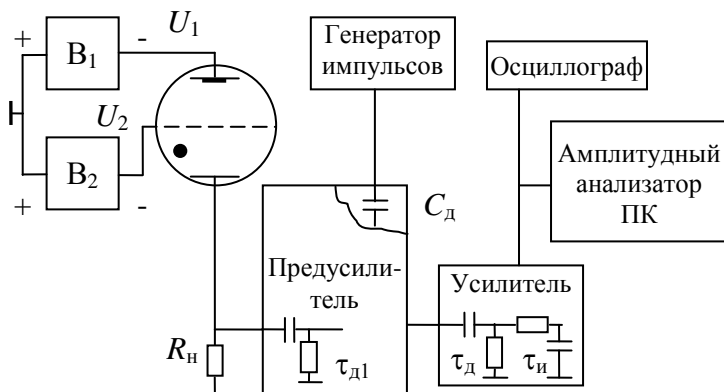


Рис.4. Функциональная схема установки

С выхода предусилителя импульсы напряжения поступают на разъем «вход Б» основного усилителя БУС2-47, коэффициент усиления которого изменяется в пределах от 4 до 2048 с помощью ступенчатого переключателя коэффициента усиления «грубо» и регулятора плавного изменения коэффициента усиления «плавно» от 0,5 до 1 пределах каждой ступени.

В схеме усилителя предусмотрен блок формирования импульсов, состоящий из интегрирующей  $\tau_{и}$  ( $\tau_{и} \geq 0,05$  мкс) и дифференцирующей  $\tau_{д}$  ( $\tau_{д} \leq 12,8$  мкс) цепочек. Параметры формирующих цепей устанавливаются с помощью переключателей «Дифф.мкс» и «Интегр.мкс».

Максимальная амплитуда выходного сигнала БУС2-47 не должна превышать 10 В, так как при амплитудах более 10 В нарушается линейность усиления и наблюдается искажение формы сигнала. Для контроля амплитуды и формы выходного сигнала используется осциллограф.

С выхода усилителя импульсы напряжения подаются на вход многоканального амплитудного анализатора импульсов, выполненного на базе персонального компьютера, в системный блок которого встроена плата амплитудно-цифрового преобразователя импульсов (АЦП) и память для хранения данных.

В схеме установки предусмотрен генератор импульсов ВБ2-07, предназначенный для проведения калибровки спектрометрического тракта в единицах заряда. При проведении калибровочных измерений на вход предусилителя через дозирующую емкость  $C_d = 1$  пФ, размещенную в предусилителе, поступает импульс заряда  $Q_g$ , имитирующий импульс с детектора, величина которого определяется амплитудой импульса генератора  $\Delta U_g$  и величиной дозирующей емкости  $C_d$ :  $Q_g = \Delta U_g \cdot C_d$ .

Камера заключена в герметичный корпус, верхняя часть которого является съемной. Рабочий объем камеры соединен с форвакуумным насосом и баллоном, содержащим чистый аргон. Через систему вентилей можно откачать камеру и наполнить ее аргоном до давления, выбранного экспериментатором. Давление газа в камере измеряется мановакуумметром.

Полученные экспериментальные данные студенты сохраняют в виде файлов на жестком диске персонального компьютера внутри папки «Student» в своей персональной папке.

## **РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ**

Показать преподавателю результаты, полученные при выполнении контрольного задания, и, ответив на дополнительные вопросы, приступить к измерениям.

### **1. Камера с двумя электродами**

1. Собрать камеру с двумя электродами (без сетки). Сбор-

ка камеры выполняется с помощью преподавателя, дежурного инженера или лаборанта.

2. Откачать рабочий объем камеры и наполнить ее аргоном до рассчитанного ранее давления. Откачку и наполнение объема камеры аргоном проводить обязательно под наблюдением либо преподавателя, либо дежурного инженера, либо лаборанта.

3. Включить все приборы в сеть. Дать им прогреться в течение 5 – 10 мин. Инструкция по эксплуатации приборов приведена в отдельном приложении.

**ВНИМАНИЕ!** Высокое напряжение на электроды камеры разрешается подавать только после наполнения камеры аргоном.

### *1.1. Выбор рабочего напряжения на электродах камеры*

При исследовании спектрометрических свойств импульсной ионизационной камеры необходимо обеспечить такой режим ее работы, называемый обычно режимом насыщения, при котором электроны и ионы, образовавшиеся вследствие ионизации, достигают электродов без существенных потерь, связанных с явлениями рекомбинации, диффузии и прилипания носителей зарядов. В этом случае амплитуда импульсов на выходе камеры не зависит от приложенного напряжения.

Выбор рабочего напряжения камеры, соответствующего режиму насыщения, производится следующим образом. Подключить предусилитель к входу «Б» усилителя, а выход усилителя к входу осциллографа. Установить переключатели «Интегр.мкс» и «Дифф.мкс» в положение 0,2 мкс и 12,8 мкс соответственно. Подать на электроды камеры напряжение 500 В. Постепенно повышая напряжение на электродах и наблюдая импульсы на экране осциллографа, найти диапазон напряжений, при котором амплитуды импульсов практически не зависят от напряжения. Выбрать рабочее напряжение в диапазоне режима насыщения, но не более 1000 В. При этом



коэффициент усиления БУС2-47 подобрать таким, чтобы максимальные амплитуды импульсов на выходе усилителя не превышали 8 В.

### *1.2. Измерение времени нарастания импульсов*

Измерить с помощью осциллографа время нарастания импульсов напряжения с выхода усилителя БУС2-47. Сравнить измеренную величину с теоретически рассчитанным временем собирания зарядов. В результате сопоставления установить, в каком режиме работает камера (в режиме электронного или полного собирания).

### *1.3. Выбор параметров формирующей цепи усилителя*

Определив режим работы камеры и используя результаты предыдущего измерения, провести выбор оптимальных параметров формирующей цепи усилителя.

Проведение спектрометрических измерений (анализ энергетического состава излучения) подразумевает исследование распределения импульсов по амплитудам на выходе спектрометрического тракта. Очевидно, что в этом случае нужно стремиться свести к минимуму влияние на амплитудный спектр шумовых импульсов, возникающих во входных цепях усиления. Другими словами, ставится задача получения максимального отношения сигнала с выхода детектора к шумам усилителя. Этого добиваются путем подбора параметров цепей, формирующих полосу пропускания усилителя.

При простом  $RC$  —  $RC$ -формировании, т.е. использовании в качестве формирующих цепей одной дифференцирующей и одной интегрирующей цепочек, максимальное отношение сигнала к шуму обеспечивается при  $\tau_d = \tau_{\text{и}}$  [см. 4, стр. 83]. Кроме того,  $\tau_d$  должна быть по крайней мере в несколько раз больше фронта входного сигнала, определяющего время собирания зарядов в камере. Оказывается также, что отклоне-

ние  $\tau_{\text{и}}$  от  $\tau_{\text{д}}$  почти на порядок слабо влияет на отношение сигнала к шуму.

Исходя из этих соображений рекомендуется самостоятельно выбрать оптимальное значение  $\tau_{\text{д}}$ . Выбрать значение интегрирующей цепочки  $\tau_{\text{и}}$ . Записать величины  $\tau_{\text{д}}$  и  $\tau_{\text{и}}$  в рабочий журнал.

#### *1.4. Измерение аппаратурной формы линии ионизационной камеры с двумя электродами.*

Оценить с помощью осциллографа амплитуду импульсов напряжения с выхода усилителя БУС2-47. Подобрать коэффициент усиления БУС2-47 таким, чтобы максимальная амплитуда импульсов не превышала 8 В. Включить амплитудный анализатор, убедиться в правильности его работы, наблюдая набор спектра на экране монитора. Максимальные значения амплитуд спектра должны располагаться в 500 – 800-х каналах анализатора.

Снять распределение импульсов по амплитудам. Время измерения выбрать так, чтобы относительная погрешность в максимуме распределения не превышала 4 %. Зафиксировать в рабочем журнале время измерения спектра и полное количество зарегистрированных альфа-частиц. Файл с измеренным спектром сохранить в компьютере в своей папке.

## **2. Камера с сеткой**

Выключить высокое напряжение. Собрать камеру с сеткой. Камеру откачать и наполнить аргонем до прежнего давления. Сборка, откачка и наполнение камеры производятся с помощью преподавателя, дежурного инженера или лаборанта.

## *2.1. Измерение аппаратурной формы линии камеры сеткой*

Рассчитать рабочее напряжение  $U_1$  и  $U_2$  на высоковольтном электроде и сетке (см. рис.4). Рабочее напряжение  $U_1$  выбирается таким образом, чтобы напряженность поля  $E_1$  во вспомогательном объеме, равная  $E_1 = \frac{U_1 - U_2}{d}$ , обеспечивала режим насыщения камеры (см. п.1.1). Напряженность электрического поля  $E_2 = U_2/d$  в рабочем объеме камеры рекомендуется выбрать в 1,5 – 2 раза больше. Этим условием будет обеспечена высокая проникаемость сетки для электронов ( $\approx 100\%$ ). Согласовать рассчитанные значения напряжений с преподавателем.

Установить выбранные напряжения на сетке и высоковольтном электроде.

Не меняя параметров спектрометрического тракта, проверить работу камеры: если напряжения на электродах подобраны правильно, на экране осциллографа должны быть видны импульсы. С помощью анализатора снять распределение импульсов по амплитудам. Время измерения выбрать таким же, как в предыдущем задании. Зафиксировать в рабочем журнале полное количество зарегистрированных альфа-частиц. Измеренный спектр сохранить в компьютере в виде файла. Окончив измерение, выключить высокое напряжение на электродах камеры.

## **3. Калибровка спектрометрического тракта**

Калибровка спектрометрического тракта заключается в определении зависимости между величиной заряда, поступающего на вход предусилителя  $Q_{вх}$  и соответствующим ему номером канала анализатора. При проведении калибровочных измерений на вход предусилителя через дозирующую емкость  $C_d = 1$  пФ поступают импульсы генератора с известной

амплитудой, имитирующие импульсы детектора. Заряд на входе предусилителя определяется соотношением  $Q_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{г}} \cdot C_{\text{д}}$ , где  $\Delta U_{\text{г}}$  – амплитуда импульсов генератора.

Калибровка спектрометрического тракта проводится следующим образом. Убедиться, что все параметры спектрометрического тракта (коэффициент усиления усилителя, его формирующие цепи) соответствуют предыдущим измерениям.

Соединить вход предусилителя с выходом генератора ВБ2-07 («выход прямой»). Переключатель «Частота» на генераторе ВБ2-07 установить в положение 140 Нз. Подобрать амплитуду импульсов  $\Delta U_{\text{г}}$  на выходе генератора таким образом, чтобы спектр импульсов записывался приблизительно в 700 – 900-х каналах анализатора. Снять амплитудное распределение, измеренный спектр сохранить в виде файла. Измерить с помощью осциллографа амплитуду импульсов  $\Delta U_{\text{г}}$  на выходе генератора и записать результат измерения в рабочем журнале.

Изменяя амплитуду импульсов генератора  $\Delta U_{\text{г}}$  с помощью лимба «Амплитуда» проделать 3 - 4 аналогичных измерения так, чтобы спектр импульсов располагался в 200-х, 300-х, 400-х, 500-х каналах анализатора. Фиксировать в рабочем журнале все измеренные значения  $\Delta U_{\text{г}}$ , соответствующие спектры сохранять в компьютере в виде файлов.

По окончании измерений выключить все приборы.

## ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Привести результат измерения времени нарастания импульсов в камере без сетки и указать ошибку измерения. Сравнить экспериментальный результат с рассчитанным значением времени собирания электронов  $T^-$ .

2. Построить калибровочную зависимость спектрометрического тракта, т.е. зависимость между  $Q_{\text{вх}}$  и номером канала

анализатора и отложить ошибки измерений.

3. Построить распределение импульсов по амплитудам для камеры с двумя электродами. Отложить на графике статистическую ошибку измерения. С помощью калибровочной зависимости найти отношение значений максимальной и минимальной амплитуд входного заряда в спектре:  $Q_{\text{вх}}^{\text{max}}/Q_{\text{вх}}^{\text{min}}$ . Объяснить полученный результат.

4. По величине площади под распределением определить полное число альфа-частиц, зарегистрированных камерой без сетки. По этим данным оценить активность источника. Привести ошибку результата измерения.

5. Построить распределение импульсов по амплитудам для камеры с сеткой. Отложить на графике статистическую ошибку измерения.

Сравнить форму линии для камеры без сетки и с сеткой. Объяснить полученный результат. Используя калибровочную зависимость, оценить относительное энергетическое разрешение для камеры сеткой.

Сравнить полученный результат с вкладом в энергетическое разрешение флуктуаций ионизации:  $\Delta E_{\text{и}}/E_{\text{п}} = 2,36\sqrt{F/N_0}$ , где  $F = 0,19$  – фактор Фано;  $N_0$  – число пар носителей заряда, образованных в треке альфа-частицы.

6. По величине площади под спектром определить полное число альфа-частиц, зарегистрированных камерой с сеткой. Сравнить с результатом, полученным ранее.

7. Используя данные обработки пп. 2 и 5, вычислить энергию альфа-частиц по формуле:

$$E_{\alpha} = Q_{\text{экс}} \frac{\omega}{e},$$

где  $Q_{\text{экс}}$  – заряд, поступивший от альфа-частицы на вход преусилителя;  $\omega$  – энергия образования одной пары носителей заряда в детекторе ( $\omega = 26,4$  эВ для Ar);  $e$  – заряд электрона, Кл. Вычислить ошибку результата измерений.

8. Сравнить ширину распределения импульсов по амплитудам от альфа-частиц в камере с сеткой и генератора импульсов точной амплитуды. Объяснить полученный результат.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем отличается режим полного собирания зарядов в импульсной ионизационной камере от режима электронного собирания?

2. Почему в режиме электронного собирания амплитуда индуцированного заряда в ионизационной камере зависит от ориентации трека альфа-частицы?

3. Зачем в импульсную ионизационную камеру водят третий электрод-сетку?

### **Список литературы**

1. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Энергоатомиздат, 1985.

2. Ляпидевский В.К., Методы детектирования излучений. М.: Энергоатомиздат, 1987.

3. Ободовский И.М. Современные методы детектирования излучений. М.: МИФИ, 1981.

4. Цитович А.П. Ядерная электроника. М.: Энергоатомиздат, 1984.

### **ПРИЛОЖЕНИЕ**

1. Для расчета пробега альфа-частицы в любой среде можно применить следующую формулу:

$$R = 0,525 R_b \cdot A^{1/3},$$

где  $R_b$  – пробег альфа-частицы той же энергии в воздухе, см;  $A$  – атомный вес среды (аргона);  $R$  – искомый пробег, мг/см<sup>2</sup>.

Пробег альфа-частицы в единицах длины  $R_{\text{Аг}} = R/\rho$ , где

$\rho$  – плотность среды ( $\rho_{\text{Ar}} = 1,78$  г/л).

Таблица 1

Пробег альфа-частиц в воздухе, см

Энергия, МэВ	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
3	1,67	1,75	1,83	1,91	1,99	2,07	2,16	2,24	2,33	2,42
4	2,51	2,61	2,70	2,80	2,90	3,00	3,10	3,20	3,30	3,41
5	3,51	3,62	3,73	3,84	3,96	4,07	4,18	4,30	4,42	4,54
6	4,66	4,78	4,90	5,03	5,15	5,28	5,41	5,54	5,68	5,81

Таблица 2

Скорость дрейфа  $v_e$  - электронов в чистом аргоне для различных значений  $E/p$ ;  $v_e \cdot 10^5$ , см/с\*

$E/p$ , В/(см·мм рт.ст.)	0,25	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5	1,75	2,0	3,0
$v_e$	2,8	3,4	4,0	4,2	4,5	5,0	5,5	6,2	9,5

Таблица 3

Подвижность некоторых ионов  $K_0$  в собственных газах, для нормального давления  $P_0$ , см<sup>2</sup>/(В·с)

Газ	Ион	$K_0^+$	$K_0^-$
Аргон	$\text{Ar}^+$	1,5	-
	$\text{Ar}_2^+$	1,8	-
Кислород	$\text{O}_2^-$	-	2,0

Примечание: подвижность для любого давления  $P$  определяется по формуле:  $K_p = K_0 \cdot \frac{760}{P}$ .

---

\* Следует отметить, что при данных  $E/p$  скорость дрейфа в аргоне (как и в других инертных газах), содержащем незначительные примеси определенных газов (например,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ), может быть значительно больше, чем в чистом аргоне (см., например, [1], с.114).