

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет  
Кафедра общей физики

А.А.Дорошкин, О.А. Брагин

Лабораторная работа 1.2  
Измерение энергии образования ион-электронной пары  $\alpha$ -частицами в воздухе

Новосибирск  
2016

А.А.Дорошкин, Брагин О.А.

Лабораторная работа 1.2. Измерение энергии образования ион-электронной пары  $\alpha$ -частицами в воздухе. Методические указания по выполнению лабораторной работы/ Новосибир. гос. ун-т. Новосибирск, 2016 – 9с.

Целью лабораторной работы является определение средней энергии, затраченной на образование одной ион-электронной пары в воздухе.

По окончании выполнения лабораторной работы, студент должен уметь оценивать технические возможности установки, уметь оценивать погрешность эксперимента и знать теоретические основы исследуемого процесса.

В методическом указании изложены лишь физические основы процессов ионизации, детальное описание имеется в рекомендованной литературе.

Условия проведения лабораторных работ максимально приближены к обстановке современных физических лабораторий.

Методическое указание к лабораторной работе предназначено для студентов 1-го курса физического факультета НГУ.

Методические указания по выполнению лабораторной работы подготовлены в рамках реализации Программы развития НИУ на 2009 – 2018 гг.

© Новосибирский государственный  
университет, 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ .....	4
2. ЗАДАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.....	6
3. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЕ.....	7
4. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	9
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	9

**Цель работы:** определение средней энергии образования ион-электронной пары при торможении  $\alpha$  - частиц в воздухе.

**Оборудование:**

- Ионизационная камера.
- Источник  $\alpha$ -частиц.
- Источник питания (0-400 В).
- Вольтметр.
- Измеритель малых токов

## 1. Общие сведения. Теоретические основы

Альфа-частицы, образующиеся в результате радиоактивного распада ядер  $^{239}\text{Pu}$ , имеют кинетическую энергию около  $5\text{ МэВ}$ . Альфа-частицы тормозятся в воздухе и теряют свою энергию. Эта энергия тратится, в основном, на возбуждение, диссоциацию и ионизацию молекул воздуха. При ионизации образуется электрон-ионная пара – свободный электрон и положительно заряженный ион. Энергия, необходимая для отрыва электрона, называется энергией ионизации и обычно измеряется в электрон-вольтах ( $\text{эВ}$ ). Ниже приведены значения энергии ионизации для основных компонент воздуха.

Молекула	$\text{N}_2$	$\text{O}_2$	$\text{CO}_2$	$\text{H}_2$	He
Энергия однократной ионизации газов (на молекулу), $\text{эВ}$	15,5	12,1	13,8	15,4	24,5
Средняя энергия ( $\text{эВ}$ ), расходуемая на образование одной пары ионов альфа-частицами с энергией $5\text{МэВ}$	36,3	32,1	34,1	36,6	44,4

Поскольку воздух примерно на 78% состоит из молекул азота  $\text{N}_2$  и на 21% из молекул кислорода  $\text{O}_2$ ; то, согласно приведенным выше данным, средняя энергия ионизации молекул воздуха  $W \approx 14\text{ эВ}$ . Таким образом, альфа-частица энергией  $E_\alpha \approx 5\text{ МэВ}$  при своем полном торможении в воздухе могла бы образовать порядка

$$n_0 \approx E_\alpha / W \approx 5 \cdot 10^6 / 14 \approx 3 \cdot 10^5 \text{ ион-электронных пар.}$$

В действительности число образующихся пар меньше, так как часть энергий идет на возбуждение и диссоциацию молекул.

**Ионизационная камера.** В данной работе для регистрации образуемых ион-электронных пар используется ионизационная камера, состоящая из двух плоских электродов к которым прикладывается напряжение и от источника питания (рис. 1.)

Камера установлена в экранирующем кожухе, предохраняющем чувствительные цепи измерительной схемы от электрических наводок. Источник  $\alpha$ -частиц, который вы использовали в работе 1.1, размещается в центре нижнего электрода камеры излучающей поверхностью вверх.

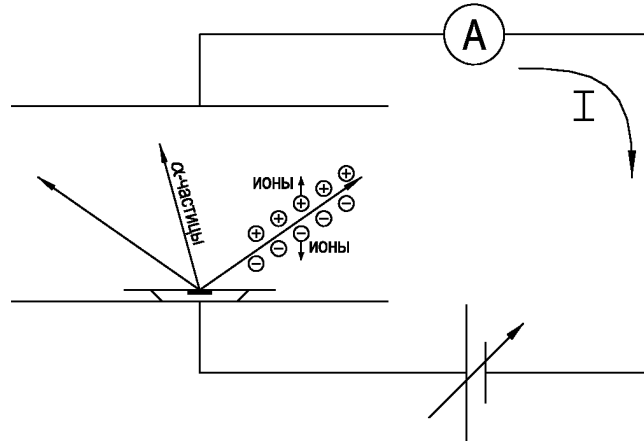


Рис. 1. Схема эксперимента

При торможении  $\alpha$ -частицы в воздушном зазоре между электродами происходит ионизация молекул воздуха, которого измеряется измерителем малых токов (прибором В7-30). Зависимость тока от напряжения имеет характерный вид, показанный на рис. 2. При малых напряжениях между электродами ток увеличивается примерно пропорционально напряжению, так как возрастает скорость движения ионов и уменьшается их рекомбинация. Рекомбинация – обратный процесс, когда при столкновении заряженных частиц снова образуются нейтральные молекулы.

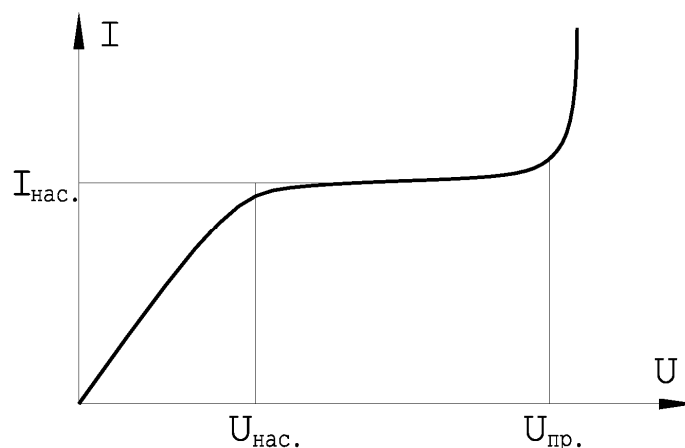


Рис. 2. Счетная характеристика детектора

При  $U > U_{нас.}$  существует широкая область напряжений, где величина тока практически не зависит от напряжения. Большая часть заряженных частиц, которые образуются вдоль траектории  $\alpha$ -частицы, собирается на электродах камеры. При  $U > U_{пр.}$  начинаются пробойные явления и ток возрастает.

Величина тока насыщения равна  $I_{нас.} = e \cdot n$ , где  $e$  – заряд электрона, а  $n$  – число ион-электронных пар, образуемых в зазоре камеры за 1 сек. Расстояние между электродами камеры (5 см) больше длины полного поглощения  $\alpha$ -частиц в воздухе, которая примерно равна 3,5 см. Поэтому  $\alpha$ -частицы теряют всю свою энергию в воздушном промежутке камеры. Это обстоятельство позволяет вычислить предельный ток насыщения.

Энергия, выделяемая в камере за 1 сек за счет торможения  $\alpha$ -частицы, равна

$$E = N \cdot E_{cp},$$

где  $N$  – интенсивность  $\alpha$ -источника, а  $E_{cp}$  – средняя энергия  $\alpha$ -частиц. Если считать, что вся выделяемая энергия расходуется на образование ион-электронных пар, то средняя энергия, потраченная на образование ион-электронной пары  $Q$  может быть определена из:

$$Q = \frac{e \cdot N \cdot E_{cp}}{I_{нас.}},$$

где  $N$  – интенсивность  $\alpha$ -источника, определенная в работе 1.1,  $e$  – заряд электрона,  $I_{нас.}$  – ток насыщения, определенный для одного и того же  $\alpha$ -источника.

В работе используется  $\alpha$ -источник, имеющий три энергетических линии излучения  $\alpha$ -частиц: 5,157 МэВ (75,3%), 5,145 МэВ (15,2%), 5,107 МэВ (9,5%). В формулу следует подставлять средневзвешенное значение  $E_{cp}$ .

## 2. Задание и порядок выполнения работы

1. Включите прибор В7-30 и дайте ему прогреться минимум 10 минут. Установите  $\alpha$ -источник на нижний выдвижной электрод камеры. Меняя напряжение источника питания с шагом 20 В, измерьте величину тока ионизационной камеры (прибором В7-30). Результаты измерения запишите в виде таблицы, и постройте по ним график  $I=I(U)$ .

2. Уберите  $\alpha$ -источник и повторите измерения для определения тока утечки ионизационной камеры.

3. Проанализируйте источники методических погрешностей и оцените их (см. приложение 1 "методы обработки результатов измерений").

4. Рассчитайте величину  $Q$  и оцените погрешность. Представьте результат в интервальной форме.

5. Типовой отчет о работе должен содержать:

- графики вольтамперной характеристики ионизационной камеры;
- расчетное значение  $Q$  в интервальной форме;
- сравнение полученного значения  $Q$  с потенциалом ионизации.

### 3. Физические процессы в ионизационной камере

**Длина свободного пробега.** Проходя через вещество,  $\alpha$  – частицы теряют энергию, ионизуя и возбуждая встречные атомы. Зависимость  $dE/dx=f(x)$  (потери энергии от пути), пройденного частицей в веществе, называется кривой Брэгга. В расчётную формулу потери энергии от пути входят только скорость и заряд частицы, причём с уменьшением скорости потери энергии возрастают. Удельные потери энергии пропорциональны числу электронов вещества и квадрату заряда частицы, теряющей энергию на ионизацию. Удельные потери энергии не зависят от массы  $m$  проходящей через вещество частицы (при условии  $m \gg m_e$ ,  $m_e$  – масса электрона), но существенно зависят от скорости частицы.

Потери энергии пропорциональны произведению плотности электронов в веществе на длину пути (при данной скорости). В веществе плотность электронов пропорциональна плотности среды, потому энергия, теряемая  $\alpha$ -частицей, определяется произведением плотности вещества на толщину пройденного слоя.

Тяжёлые заряженные частицы взаимодействуют в основном с электронами атомных оболочек и поэтому мало отклоняются от направления своего первоначального движения. Вследствие этого, пробег тяжёлой частицы  $R$  измеряют расстоянием по прямой от источника частиц до точки их остановки. Обычно пробег измеряется в единицах длины ( $m, cm, mkm$ ), а также поверхностной плотности материала (или, что равнозначно, длины пробега, умноженной на плотность) ( $g/cm^2$ ). Выражение пробега в единицах длины имеет смысл для фиксированной плотности среды (например, часто в качестве среды выбирается сухой воздух при нормальных условиях). Физический смысл пробега в терминах поверхностной плотности – масса единицы площади слоя, достаточного для остановки частицы.

Примеры пробега альфа-частиц в некоторых средах				
Энергия $\alpha$ -частиц, МэВ	4	6	8	10
Воздух при нормальных условиях, см	2,5	4,6	7,4	10,6
Биологическая ткань, мкм	31	56	96	130
Алюминий, мкм	16	30	48	69

**Упругое столкновение.** Если при столкновениях не меняется внутреннее состояние частиц, то такие столкновения называются упругими. При упругих столкновениях общая кинетическая энергия сталкивающихся частиц остается неизменной. При низких энергиях сталкивающихся атомов и молекул происходят в основном упругие столкновения.

**Неупругие столкновения.** При повышении энергии сталкивающихся частиц начинаются процессы диссоциации (распад молекул на составные части), возбуждения и ионизации. В таких столкновениях кинетическая энергия сталкивающихся частиц уменьшается. Эта энергия тратится на разрыв связей между атомами в молекулах

возбуждение самих атомов, отрыв электронов. При возбуждении атомов электроны переходят на более высокие энергетические уровни, поглощая кванты энергии. Возбужденные атомы снова переходят в основное (невозбужденное) состояние, излучая один или несколько квантов энергии. В отличие от атомов, у молекул могут возбуждаться вращательные и колебательные степени свободы. При повышении энергии сталкивающихся частиц преобладающим процессом становится ионизация (при энергии электронов - десятки эВ, тяжелых частиц - десятки КэВ). В таких столкновениях образуется пара заряженных частиц - положительный ион и электрон.

**Образование отрицательных ионов.** Электроны, образовавшиеся в результате ионизации, в электроотрицательном газе (кислород, галогены,  $SF_6$ ) быстро присоединяются к нейтральным молекулам, имеющим высокое сродство к электронам, образуя отрицательные ионы. Таким образом, носителями зарядов в зазоре камеры, заполненной воздухом, являются в основном, положительные и отрицательные ионы.

**Электрический ток в ионизационной камере.** Альфа частицы при торможении образуют вдоль своей траектории заряженные частицы. Под действием электрического поля в камере положительные и отрицательные ионы начинают двигаться (дрейфовать) в противоположных направлениях к электродам камеры. В процессе движения ионы испытывают многократные столкновения с молекулами воздуха. Поэтому, несмотря на действие постоянной электрической силы ионы дрейфуют с постоянной средней скоростью  $v_{др}$ . Величина скорости дрейфа пропорциональна напряженности электрического поля  $E$  и коэффициенту подвижности ионов:

$$v_{др} = \mu E.$$

Для положительных ионов воздуха коэффициент подвижности  $\mu^+$  примерно равен  $3 \times 10^{-4} \text{ мВ}^{-1} \text{ с}^{-1}$ . Подвижность отрицательных ионов  $\mu^-$  меньше  $\mu^+$  приблизительно на 20 %. Полный ток в камере является суммой токов положительных и отрицательных ионов:

$$I = I^+ + I^- = \int (e^+ n^+ v^+ - e^- n^- v^-) \cdot dS = e \cdot (\mu^+ + \mu^-) \cdot E \cdot \int dS$$

где  $n^+ = n^- = n$  – средняя плотность заряженных пар,  $S$  – поперечное сечение области ионизации в зазоре камеры.

Таким образом, измерив величину тока, можно рассчитать количество ион-электронных пар, образующихся в единицу времени:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \frac{e \cdot dN}{dt},$$

где  $e$  – заряд электрона,  $dN/dt$  – количество пар в единицу времени.

При малом электрическом поле число пар достигающих электродов много меньше их начального количества из-за рекомбинации положительных и отрицательных ионов. Однако с увеличением электрического поля  $E$  и скорости ионов вероятность рекомбинации быстро уменьшается. При определенном поле  $U_{нас}$  все заряженные пары ионов собираются на противоположных электродах камеры. При дальнейшем увеличении электрического поля ток в камере не возрастает и достигает



своего предельного значения тока насыщения. В этом случае вклад в полный ток каждой пары одинаков и не зависит от геометрического места их образования в зазоре камеры.

Токовые импульсы от проходящих через камеру альфа частиц имеют разную величину. Происходит это из-за того, что  $\alpha$ -частицы вылетают не только с внешней стороны подложки в сторону зазора камеры. Часть  $\alpha$ -частиц из глубинных слоёв затрачивают часть энергии до достижения поверхности. В результате этого в камере возникает целый спектр импульсов. Кроме того, интенсивность  $\alpha$ -источника, как видно из работы 1.1, имеет собственное распределение. В результате влияния этих факторов измеритель регистрирует значительные колебания тока.

#### 4. Контрольные вопросы

1. Как изменится величина тока насыщения, если увеличить (уменьшить) в 2 раза зазор ионизационной камеры.
2. Приведите качественные аргументы, объясняющие наличие тока в камере.
3. Докажите, что вклад в ток ионной пары не зависит от геометрического места их образования в зазоре.
4. Качественно оцените, как отражаются на результатах измерения приближения, сделанные при выводе расчетной формулы, попробуйте сделать численную оценку.
5. Какие, на Ваш взгляд, следует внести изменения в установку, чтобы уменьшить методические погрешности.
6. Зная период полураспада  $^{239}\text{Pu}$  ( $2.44 \cdot 10^4$  лет) и число испускаемых источником  $\alpha$ -частиц, рассчитайте число имеющихся в источнике атомов плутония. Какую площадь займут эти атомы, если их расположить в виде монослоя?

Число распавшихся атомов за интервал  $t_2 - t_1$  есть  $n = K \cdot N \cdot (t_2 - t_1)$

где  $K$  – постоянная распада и равна  $0,693/T_{0,5}$  ( $T_{0,5}$  – период полураспада)

**Внимание!** Результаты измерений должны быть представлены в форме  $A_{cp} \pm \Delta A$  с указанием размерности.

#### Список литературы

- Лабораторные занятия по физике / под ред. Л. Гольдина М.: Наука 1983. С. 537-548
- Дорошкин А.А., Фролов В.В., Измерение энергии образования ион электронной пары в воздухе. Лаб. работа. Новосибирск, (Препр.) Новосибирск: НГУ, 1993.
- Ховатсон А.М. Введение в теорию газового разряда. М. Атомиздат, 1980, С. 17-32
- Энгель А. Ионизированные газы. М., 1959.
- Гапонов В.И. Электроника. М., 1960 Ч. 2.

Интернет версия подготовлена на основе издания: Описание лабораторных работ по физике. Измерительный практикум. Часть 1. Новосибирск: Изд-во, НГУ, 1999

© Физический факультет НГУ, 2000

© Лаборатория методов измерений НГУ, 2000, <http://www.phys.nsu.ru/measuring/>