

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5.1.3

**Изучение рассеяния медленных электронов на  
атомах (эффект Рамзауэра)**

Гришаев Григорий С01-119

# 1 Аннотация

В данной работе исследуется энергетическая зависимость вероятности рассеяния электронов атомами ксенона, определяются энергии электронов, при которых наблюдается «просветление» ксенона, и оценивается размер его внешней электронной оболочки.

# 2 Теоретические сведения

Эффективное сечение реакции – это величина, характеризующая вероятность перехода системы двух сталкивающихся частиц в результате их рассеяния (упругого или неупругого) в определенное конечное состояние. Сечение  $\sigma$  равно отношению числа  $N$  таких переходов в единицу времени к плотности потока рассеиваемых частиц  $nv$ , падающих на мишень, т. е. к числу частиц, проходящих в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к их скорости  $v$  ( $n$  – плотность числа падающих частиц).

$$\sigma = \frac{N}{nv}. \quad (1)$$

Таким образом, сечение имеет размерность площади.

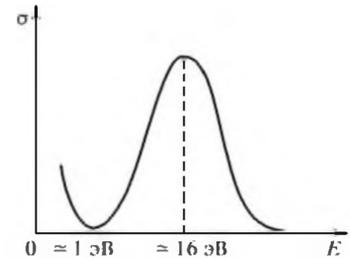


Рис. 1: Качественная картина результатов измерения упругого рассеяния электронов в ар-

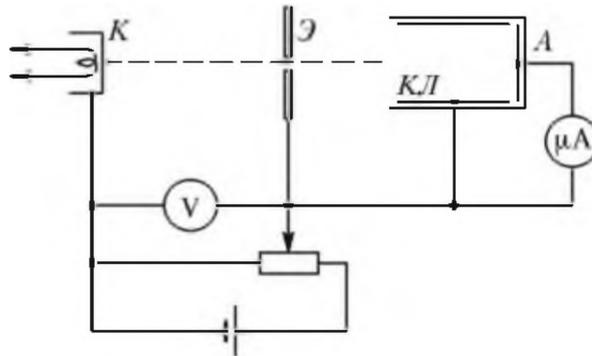


Рис. 2: Схема установки для измерения сечения рассеяния электронов в газах

Качественно результат экспериментов Рамзауэра при энергии электронов порядка десятков эВ показан на рис. 1. По мере уменьшения энергии электрона от нескольких десятков электрон-вольт поперечное сечение его упругого рассеяния растет. Однако при энергиях меньше 16 эВ в случае аргона сечение начинает уменьшаться, а при  $E \sim 1 \text{ эВ}$  практически равно нулю, т. е. аргон становится прозрачным для электронов. При дальнейшем уменьшении энергии электронов сечение рассеяния опять начинает возрастать. Это поведение поперечного сечения свойственно не только атомам аргона, но и атомам всех инертных газов. Такое поведение электронов нельзя объяснить с позиций классической физики. Объяснение этого эффекта потребовало учета волновой природы электронов. Схема эксперимента Рамзауэра показана, на рис. 2.

С точки зрения квантовой теории, внутри атома потенциальная энергия налетающего электрона  $U$  отлична от нуля, скорость электрона изменяется, становясь равной  $v'$  в соответствии с законом сохранения энергии

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv'^2}{2} + U,$$

а значит, изменяется и длина его волны де Бройля. Таким образом, по отношению к электронной волне атом ведет себя как преломляющая среда с относительным показателем преломления

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'} = \sqrt{1 - \frac{U}{E}}.$$

Коэффициент прохождения электронов максимален при условии

$$\sqrt{\frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}} l = \pi n; \quad n \in \mathbb{N}_1, \quad (2)$$

где  $U_0$  – глубина потенциальной ямы.

Это условие легко получить, рассматривая интерференцию электронных волн де Бройля в атоме. Движущемуся электрону соответствует волна де Бройля, длина которой определяется соотношением  $\lambda = h/mv$ . Если кинетическая энергия электрона невелика, то  $E = mv^2/2$  и  $\lambda = h/\sqrt{2mE}$ . При движении электрона через атом длина волны де Бройля становится меньше и равна  $\lambda' = h/\sqrt{2m(E + U_0)}$  где  $U_0$  – глубина атомного потенциала. При этом, волна де Бройля отражается от границ атомного потенциала, т. е. от поверхности атома, и происходит интерференция прошедшей через атом волны 1 и волны 2, отраженной от передней и задней границы атома (эти волны когерентны). Прошедшая волна 1 усилится волной 2, если геометрическая разность хода между ними  $\Delta = 2l = \lambda'$ , что соответствует условию первого интерференционного максимума, т. е. при условии

$$2l = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} \quad (3)$$

Прошедшая волна ослабится при условии

$$2l = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} \quad (4)$$

Из (3) и (4), можно получить

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}. \quad (5)$$

Оттуда же можно найти эффективную глубину потенциальной ямы атома:

$$U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1. \quad (6)$$

Уравнение вольт-амперной характеристики тиратрона:

$$I_a = I_0 \exp(-C\omega(V)); \quad C = Ln_a\Delta_a, \quad (7)$$

где  $I_0 = eN_0$  – ток катода, а  $I_a = eN_a$  – ток анода. Отсюда определяется вероятность рассеяния электрона в зависимости от его энергии:

$$\omega(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a(V)}{I_0}. \quad (8)$$

### 3 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки отображена на рис. 3.

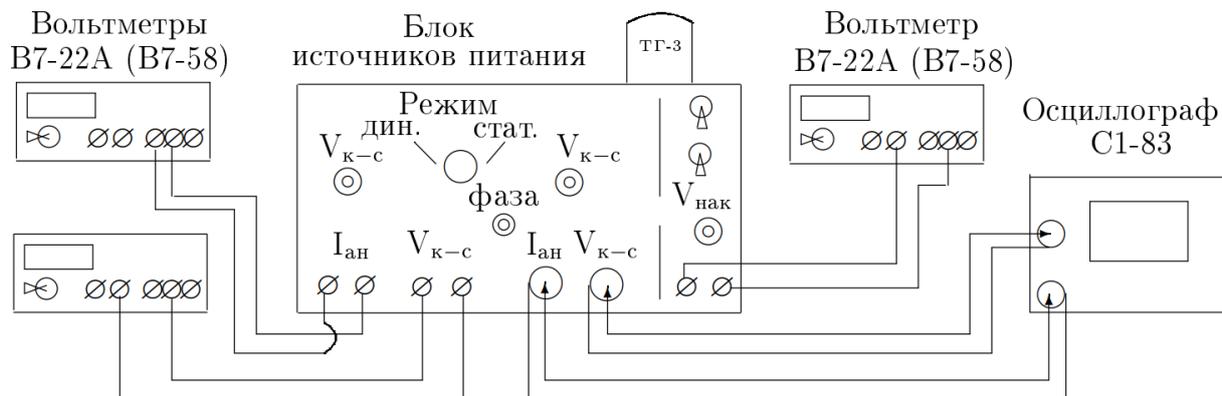


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

В данной работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом. Электроны, эмитируемые катодом тиратрона, ускоряются напряжением  $V$ , приложенным между катодом и ближайшей к нему сеткой. Затем электроны рассеиваются на атомах инертного газа (ксенона). Все сетки соединены между собой и имеют одинаковый потенциал, примерно равный потенциалу анода. Поэтому между первой сеткой и анодом практически нет поля. Рассеянные электроны отклоняются в сторону и уходят на сетку, а оставшаяся часть электронов достигает анода и создаёт анодный ток  $I_a$ . Таким образом, поток электронов  $N(x)$  (т. е. число электронов, проходящих через поперечное сечение лампы в точке  $x$  в единицу времени) уменьшается с ростом  $x$  от начального значения  $N$  у катода (в точке  $x = 0$ ) до некоторого значения  $N_a$  у анода (в точке  $x = L$ ).

## 4 Результаты измерений и обработка данных

### 4.1 Динамический метод

По результатам измерений в динамическом режиме оценим размер электронной оболочки атома инертного газа по формулам (3) и (4). Положение первого максимума

$$V_{max}^1 \approx 2.5 \text{ В.}$$

Положение первого минимума

$$V_{min}^1 \approx 6.5 \text{ В.}$$

Тогда

$$l = \frac{h}{\sqrt{2m_e * 5}} \approx 2.8 \text{ \AA}$$

$$l = \frac{3}{4} \frac{h}{\sqrt{2m_e * 9}} \approx 3 \text{ \AA}$$

В данном случае оценка погрешностей не имеет смысла, так как точка  $V_{max}^1$  указана неточно, а сам расчёт носит оценочный характер.

Далее найдём радиус из формулы (5):

$$l = (3.4 \pm 0.2) * 10^{-10} \text{ \AA}$$

Эффективная глубина потенциальной ямы равна

$$U_0 = \frac{4}{5} * 6.5 - \frac{9}{5} * 2.5 = 1.1 \text{ эВ.}$$

Так как напряжение пробоя примерно равно 12 В, в колбу закачан ксенон. Установить напряжение пробоя более точно не удалось, так как даже при  $V_{накала} = 3.3 \text{ В}$  не наблюдалось достаточно резкого возрастания тока анода, то есть было сложно найти конкретную точку  $V_{пробоя}$ .

### 4.2 Статический метод

## 5 Вывод