

Изучение рассеяния медленных электронов на атомах (эффект Рамзауэра)

Илларионов Владислав
группа Б04-855

ВВЕДЕНИЕ

В ходе данной работы исследуется энергетическая зависимость вероятности рассеяния электронов атомами ксенона, определяются энергии электронов, при которых наблюдается "просветление" газа, и оценивается размер его внешней электронной оболочки.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Качественно результат экспериментов Рамзауэра при энергии электронов порядка десятков электрон-вольт на аргоне показан на рис. 1

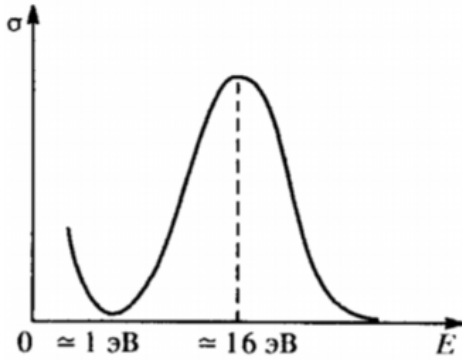


Рис. 1. Качественная картина результатов измерения упругого рассеяния электронов в аргоне

Последующие опыты показали, что это удивительное поведение поперечного сечения свойственно атомам всех инертных газов.

Для качественного анализа и простых выкладок будем считать, что электрон рассеивается на одномерной потенциальной яме конечной глубины (см. рис. 2).

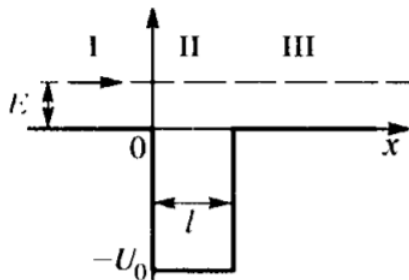


Рис. 2. Схематическое изображение прямоугольной ямы, над которой пролетает частица с энергией E

Уравнение Шредингера в данном случае имеет вид:

$$\psi'' + k^2\psi = 0, \text{ где } k^2 = \begin{cases} k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2} & - \text{ в I и III} \\ k_2^2 = \frac{2m(E+U_0)}{\hbar^2} & - \text{ в II} \end{cases}$$

Коэффициент прохождения равен отношению квадратов амплитуд прошедшей и падающей волн и определяется выражением:

$$D^{-1} = 1 + \frac{U_0^2}{4E(E+U_0)} \sin^2(k_2 l)$$

Коэффициент прохождения частицы над ямой имеет, в зависимости от ее энергии, ряд чередующихся максимумов и минимумов. В частности, если $k_2 l = \pi$, то $\sin(k_2 l) = 0$ и коэффициент прохождения равен единице, электрон беспрепятственно проходит через атом.

Таким образом, коэффициент прохождения электронов максимален при условии:

$$k_2 l = \sqrt{\frac{2m(E+U_0)}{\hbar^2}} l = n\pi, \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

Получим условия на максимум (2) и минимум (3) интерференции:

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

$$2l = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}} \quad (3)$$

здесь $2l$ — разность хода, U_0 — глубина атомного потенциала, E_1 и E_2 — энергии электрона, соответствующие этим условиям. Исключая U_0 , можем найти эффективный размер атома:

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}} \quad (4)$$

Из (2) и (3) можно также рассчитать эффективную глубину потенциальной ямы атома:

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В данной работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом. Схематическое изображение тиратрона и его конструкция приведены на рис. 3:

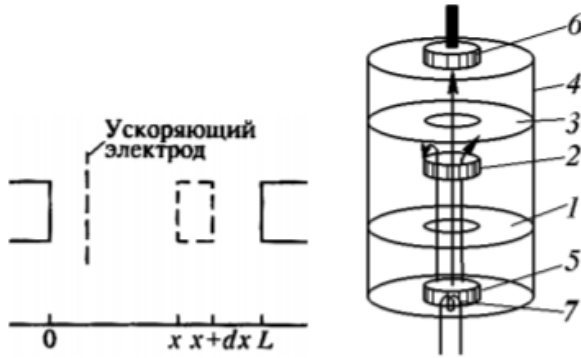


Рис. 3. Схематическое изображение тиратрона

Основные элементы тиратрона:

- Сетки — 1, 2, 3
- Внешний металлический цилиндр — 4
- Катод — 5
- Анод — 6
- Накапливаемая спираль — 7

Электроны, эмитируемые катодом тиратрона, ускоряются напряжением V , приложенным между катодом и ближайшей к нему сеткой. Затем электроны рассеиваются на атомах инертного газа. Все сетки соединены между собой и имеют одинаковый потенциал (примерно равный потенциалу анода). Рассеянные электроны отклоняются в сторону и уходят на сетку, а оставшаяся часть электронов достигает анода и создаёт анодный ток I_a .

Принципиальная схема установки для изучения эффекта Рамзауэра приведена на рис. 4. На лампу Л, расположенную на корпусе БИП подается переменное напряжение частоты 50 Гц, исследуемый сигнал подается на электронный осциллограф.

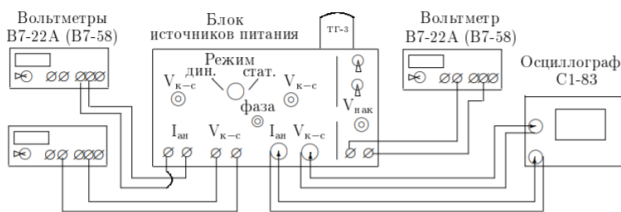


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки

По измеренной ВАХ тиратрона можно определить зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии из соотношения:

$$\omega(V) = -\ln \frac{I_a(V)}{I_0} \quad (6)$$

где I_0 - ток катода, I_a - анодный ток. Ток анода определяется по показаниям вольтметра (сопротивление в цепи 100 кОм).

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

А. Динамический режим

Для двух значений напряжения накала V_n снимем ВАХ на осциллографе, учитывая его цену деления. Из полученных из ВАХ значений U_{min} и U_{max} по формулам (2), (3) и (4) определим размер электронной оболочки атома инертного газа, заполняющего лампу, приняв $U_0 = 2,5В$; по формуле (5) можем также определить значение эффективной глубины потенциальной ямы атома.

В. Статический режим

При нескольких разных значениях V_n снимем зависимость $I_a(V_k)$. Произведем аналогичные расчеты, что и в динамическом режиме. (Погрешность минимального и максимального значения I_a будем определять из разности соседних снятых значений ВАХ)

По данным из статического режима по формуле (1) рассчитаем энергии, при которых должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов для $n = 2, 3$.

На основе формулы (6) найдем зависимость вероятности рассеяния электронов (с точностью до константы) от энергии и построим соответствующий график.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ

По данным динамического режима рассчитаем приблизительный радиус электронной оболочки атома газа по формулам и глубину его потенциальной ямы. Результаты вычислений занесем в таблицу I.

В статическом режиме снимем зависимость $I_a(V_k)$ и построим графики для трех значений V_n (см. рис. 5)

По данным статического режима проведем аналогичные динамическому режиму вычисления и занесем результаты в таблицу II

По данным из статического режима по формуле (1) рассчитаем энергии, при которых должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов для $n = 2, 3$. Результаты занесем в таблицу III.

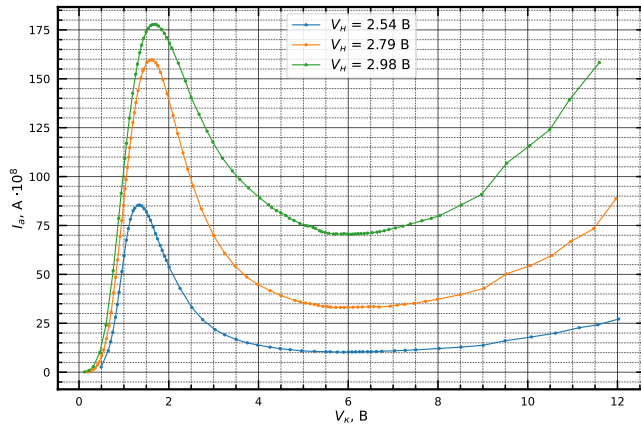


Рис. 5. График зависимости анодного тока от ускоряющего напряжения

Согласно формуле (6) найдем зависимость вероятности рассеяния электронов от энергии электрона (с точностью до константы) и построим соответствующий график (см. рис. 6)

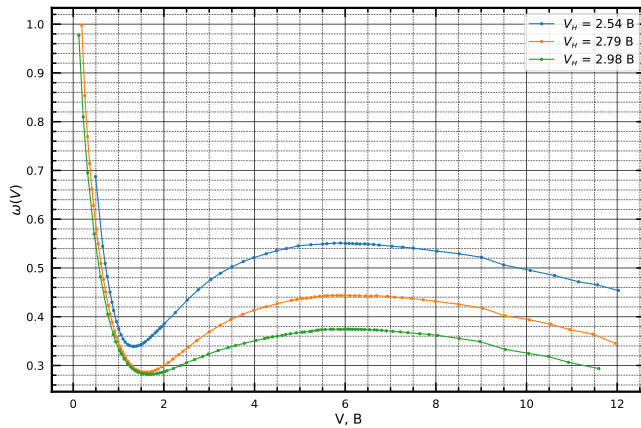


Рис. 6. График зависимости вероятности рассеяния электронов от ускоряющего напряжения с точностью до константы

ВЫВОД

В ходе данной работы был изучен эффект Рамзауэра рассеяния медленных электронов на атомах ксенона. На основе формул, полученных при рассмотрении интерференции электронных волн де Бройля в атоме, были вычислены диаметр электронной оболочки атома и глубина его потенциальной ямы в динамическом и статическом методах измерения.

Погрешности значений l , полученных в динамическом методе (табл. I), обусловлены ценой деления осциллографа 1 В/дел. Неточность в определении U_0 в динамическом режиме может быть связана с неправильным определением минимума анодного тока по осциллографу, т.к. зависимость была пологая.

Значения l , полученные в статическом методе (табл. II) намного точнее и близки к диаметру Ван дер Ваальса ксенона (2.9\AA)

Значения U_0 полученные в статическом методе, не совпадают со значением, данным в учебнике. Неточность определения U_0 может быть связана с грубостью модели одномерной потенциальной ямы.

Приложение А: Таблицы

Таблица I. Динамический режим

| V_n , В | E_{max} , эВ | E_{min} , эВ | $l(2)$, Å | $l(3)$, Å | $l(4)$, Å | U_0 , эВ |
|-----------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2,793 | $2,6 \pm 0,3$ | $5,6 \pm 0,3$ | $2,72 \pm 0,15$ | $3,23 \pm 0,08$ | $3,96 \pm 0,26$ | $-0,2 \pm 0,6$ |
| 2,516 | $3 \pm 0,3$ | $5,8 \pm 0,3$ | $2,62 \pm 0,12$ | $3,19 \pm 0,08$ | $4,1 \pm 0,3$ | $-0,76 \pm 0,6$ |

Таблица II. Статический режим

| V_n , В | E_{max} , эВ | E_{min} , эВ | $l(2)$, Å | $l(3)$, Å | $l(4)$, Å | U_0 , эВ |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 2,540 | $1,33 \pm 0,04$ | $5,83 \pm 0,14$ | $3,14 \pm 0,04$ | $3,19 \pm 0,04$ | $3,23 \pm 0,05$ | $2,27 \pm 0,13$ |
| 2,795 | $1,63 \pm 0,03$ | $5,87 \pm 0,08$ | $3,02 \pm 0,03$ | $3,18 \pm 0,02$ | $3,33 \pm 0,03$ | $1,77 \pm 0,09$ |
| 2,983 | $1,67 \pm 0,05$ | $6,08 \pm 0,05$ | $3,00 \pm 0,05$ | $3,14 \pm 0,01$ | $3,27 \pm 0,03$ | $1,85 \pm 0,11$ |

Таблица III. Энергии для 2 и 3 максимума коэффициента прохождения

| V_n , В | E_2 , эВ | E_3 , эВ |
|-----------|------------------|------------------|
| 2,540 | $15,15 \pm 0,48$ | $33,14 \pm 1,04$ |
| 2,795 | $14,33 \pm 0,29$ | $31,29 \pm 0,62$ |
| 2,983 | $14,86 \pm 0,26$ | $32,48 \pm 0,56$ |

Приложение В: ВАХ в динамическом режиме

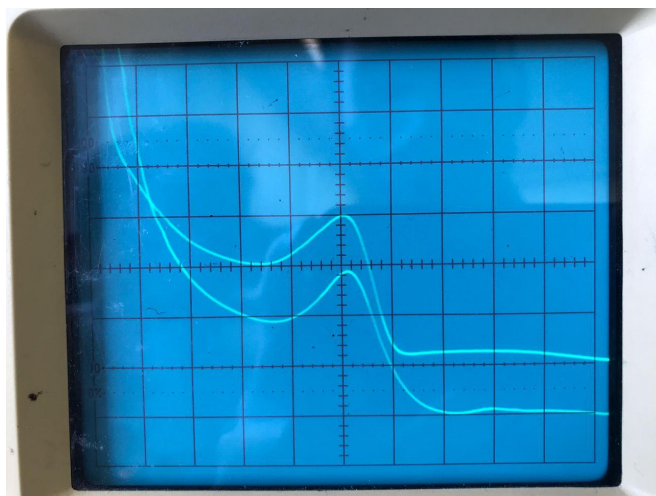


Рис. 7. ВАХ в динамическом режиме для $V_n = 2.793 В$

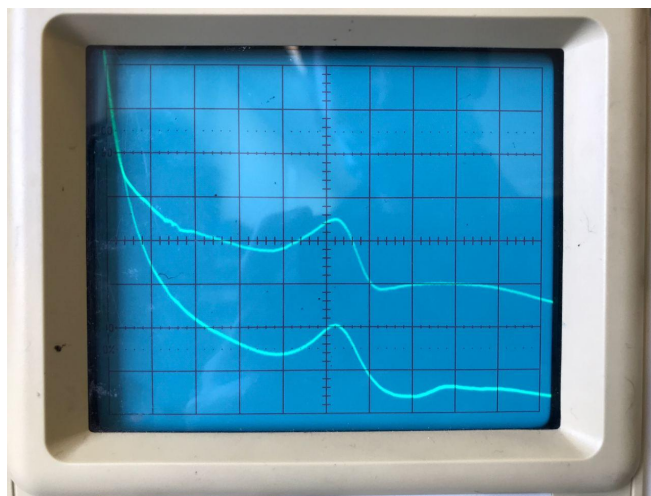


Рис. 8. ВАХ в динамическом режиме для $V_n = 2.516 В$