

Лабораторная работа 5.1.3. Изучение рассеяния медленных электронов на атомах (эффект Рамзауэра).

Вязовцев Андрей, Б01-009

19.10.22

Цель работы: Исследуется энергетическая зависимость вероятности рассеяния электронов атомами ксенона, определяются энергии электронов, при которых наблюдается «просветление» ксенона, и оценивается размер его внешней электронной оболочки.

В работе используются: тиратрон ТГЗ-01/1.3Б

Теоретическая справка:

Эффективное сечение реакции — величина, характеризующая вероятность перехода системы двух сталкивающихся частиц в результате их рассеяния в определённое конечное состояние.

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

Если построить зависимость $\sigma(E)$, то получится график как на рис. 1.

Отсюда видно, что при энергии 1 эВ есть «прозрачное окно», т.е. электроны свободно проходят через среду аргона. Такое явление нельзя объяснить с помощью классической физики. По отношению к электронной волне атом ведёт себя как преломляющая волна:

$$n = \frac{\lambda}{\lambda'} = \sqrt{1 - \frac{U}{E}} \quad (2)$$

Решение задачи о рассеянии электрона на сферической потенциальной яме достаточно громоздко, поэтому в нашей модели будем считать,

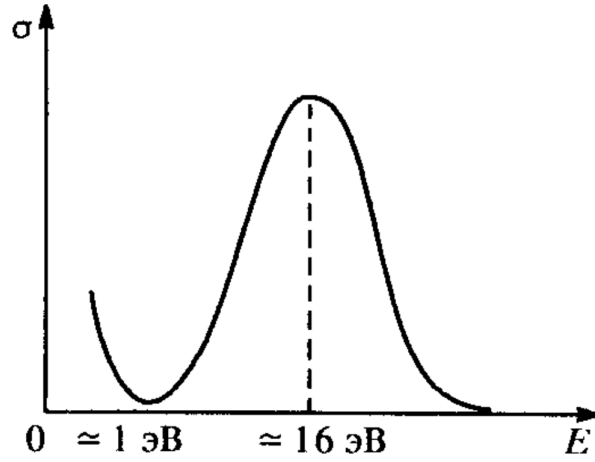


Рис. 1. Качественная картина результатов измерения упругого рассеяния электронов в аргоне

что яма является одномерной конечной глубины U_0 шириной l . Используя уравнение Шрёдингера и вычисляя коэффициент прохождения, получаем условие на его максимумы:

$$k_2 l = \sqrt{\frac{2m(E + U)}{\hbar^2}} l = \pi n, \quad n \in \mathbb{N} \quad (3)$$

Для качественного объяснения эффекта Рамзауэра достаточно использовать соотношение де Бройля и рассмотреть интерференцию волн де Бройля в атоме. Условие максимума: разность хода равна длине волны в атоме:

$$2l = \lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} \quad (4)$$

Здесь E_1 — энергия, соответствующая данному условию. С другой стороны, можно таким же образом найти минимум:

$$2l = \frac{3}{2}\lambda_2 = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}} \quad (5)$$

Решив эти уравнения, исключаем U_0 и получаем:

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}} \quad (6)$$

Понятно, что энергии E_1 и E_2 соответствуют энергиям электронов, прошедших разность потенциалов, т. е. $E_1 = eV_1$, $E_2 = eV_2$. Из уравнений (4) и (5) можно получить глубину ямы:

$$U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1 \quad (7)$$

Экспериментальная установка:

В данной работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б (см. рис. 2). В нём:

- 1, 2, 3 — сетки
- 4 — внешний металлический цилиндр
- 5 — катод
- 6 — анод
- 7 — накаливаемая спираль

Уравнение ВАХ выражается так:

$$I_a = I_0 e^{-C\omega(V)} \quad (8)$$

где $I_0 = eN_0$ — ток катода, $I_a = eN_a$ — анодный ток, $C = Ln_a\Delta_a$, L — расстояние от катода до анода, n_a — концентрация атомов газа в лампе, Δ_a — площадь поперечного сечения атома, $\omega(V)$ — вероятность рассеяния на атоме. Отсюда вероятность выражается так:

$$\omega(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a(V)}{I_0} \quad (9)$$

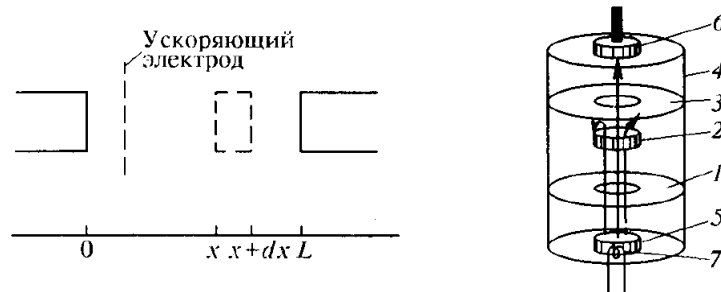


Рис. 2. Схема тиратрона (слева) и его конструкция (справа)

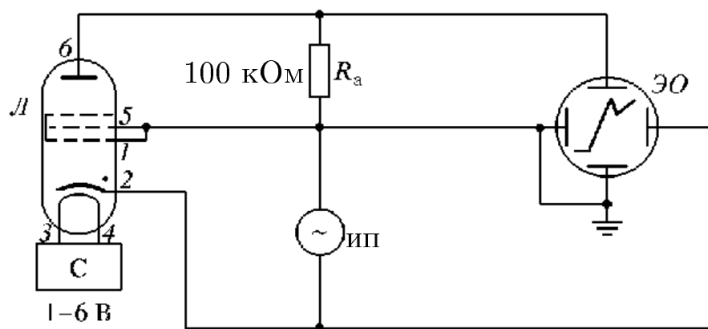


Рис. 3. Схема включения тиратрона

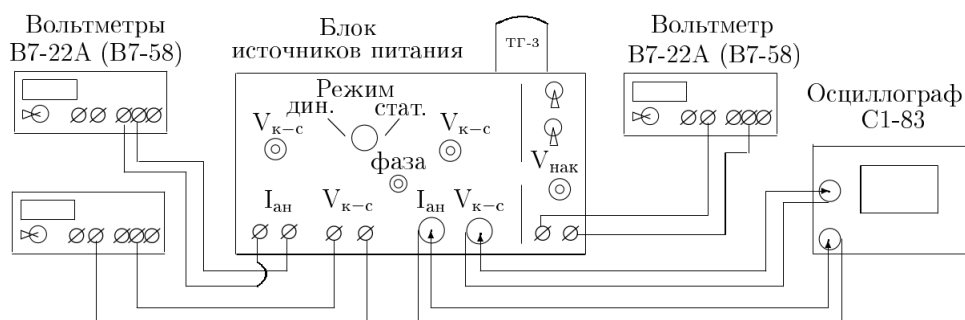


Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки

Ход работы:

1. Подготовим осциллограф к работе, затем включим в сеть.
2. Поставим переключатель в динамический режим. Измерим с помощью осциллографа напряжение в точках максимума, минимума и пробоя. Результаты представлены в таблице 1, а осциллограммы — на рисунках 5 и 6.

| $U_{\text{нак}}, \text{В}$ | $V_{\text{max}}, \text{В}$ | $V_{\text{min}}, \text{В}$ | $V_{\text{пр}}, \text{В}$ |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 2.839 | 1.3 ± 0.1 | 2.8 ± 0.2 | 5.4 ± 0.4 |
| 3.125 | 1.5 ± 0.1 | 3.2 ± 0.2 | 5.1 ± 0.1 |

Таблица 1. Данные с осциллограммы

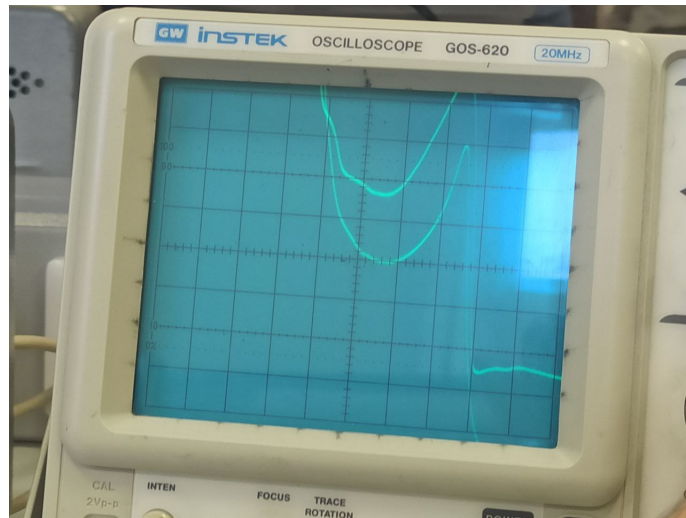


Рис. 5

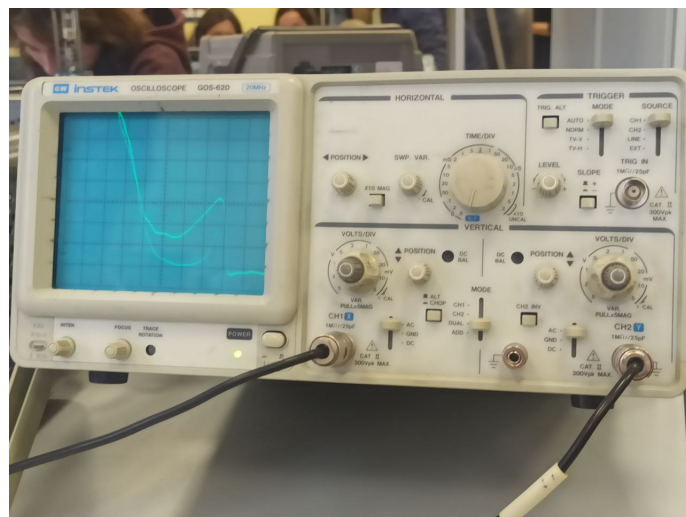


Рис. 6

3. Теперь переключим в статический режим. Измерим ток анода, изменяя катода с промежутком 0.5 В при тех же $U_{\text{нак}}$. Результаты для $U_{\text{нак}} = 2.844$ В представлены в таблице 2, а для $U_{\text{нак}} = 3.169$ — в таблице 3.

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| $V_{\text{кат}}, \text{В}$ | 1.000 | 1.500 | 2.000 | 2.553 | 3.097 | 3.602 | 4.030 | 4.509 | 5.019 | 5.498 |
| $V_{\text{ан}}, \text{В}$ | 0.00 | 0.38 | 30.80 | 50.50 | 37.23 | 32.50 | 30.33 | 28.52 | 26.83 | 25.58 |
| $V_{\text{кат}}, \text{В}$ | 6.027 | 6.521 | 7.046 | 7.515 | 8.007 | 8.499 | 9.024 | 9.516 | 10.078 | 2.200 |
| $V_{\text{ан}}, \text{В}$ | 24.66 | 24.11 | 23.79 | 23.78 | 24.1 | 25.02 | 26.22 | 26.71 | 28.18 | 49.10 |
| $V_{\text{кат}}, \text{В}$ | 2.298 | 2.400 | 2.488 | 2.821 | 7.215 | 7.408 | | | | |
| $V_{\text{ан}}, \text{В}$ | 52.56 | 52.90 | 51.92 | 43.83 | 24.12 | 23.91 | | | | |

Таблица 2. Измерения для $U_{\text{нак}} = 2.844$

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| $V_{\text{кат}}, \text{В}$ | 1.000 | 1.500 | 2.077 | 2.516 | 3.036 | 3.501 | 4.026 | 4.511 | 5.037 | 5.507 |
| $V_{\text{ан}}, \text{В}$ | 0.00 | 1.10 | 66.77 | 98.07 | 91.69 | 86.95 | 82.52 | 78.47 | 74.28 | 70.87 |
| $V_{\text{кат}}, \text{В}$ | 6.047 | 6.497 | 7.014 | 7.539 | 8.016 | 8.511 | 9.014 | 9.500 | 10.048 | 2.207 |
| $V_{\text{ан}}, \text{В}$ | 68.81 | 67.74 | 67.15 | 67.52 | 68.99 | 71.66 | 75.45 | 77.99 | 82.00 | 84.42 |
| $V_{\text{кат}}, \text{В}$ | 2.293 | 2.427 | 2.600 | 2.785 | 7.214 | 7.415 | 7.717 | 7.923 | | |
| $V_{\text{ан}}, \text{В}$ | 90.93 | 95.57 | 95.90 | 94.17 | 70.19 | 70.94 | 72.05 | 72.85 | | |

Таблица 3. Измерения для $U_{\text{нак}} = 3.169$

Обработка результатов:

4. Примем $U_0 = 2.5$ эВ и найдём размер электронной оболочки атома по результатам измерений в динамическом режиме по формулам (4) и (5). Получаем:

| $U_{\text{нак}}$ | 1 по формуле (4) | 1 по формуле (5) |
|------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 2.829 | $1.00 \pm 0.08 \text{ \AA}$ | $1.26 \pm 0.09 \text{ \AA}$ |
| 3.125 | $0.97 \pm 0.06 \text{ \AA}$ | $1.22 \pm 0.08 \text{ \AA}$ |

Теперь вычислим данный размер по формуле (6). Получаем:

$$l = 1.77 \pm 0.18 \text{ \AA}, \text{ при } U_{\text{нак}} = 2.829$$

$$l = 1.66 \pm 0.15 \text{ \AA}, \text{ при } U_{\text{нак}} = 3.125$$

5. Найдём глубину потенциальной ямы по формуле (7):

$$U_0 = -0.1 \pm 0.3 \text{ эВ}, \text{ при } U_{\text{нак}} = 2.829$$

$$U_0 = -0.1 \pm 0.3 \text{ эВ}, \text{ при } U_{\text{нак}} = 3.125$$

Комментировать данные результаты мы не будем. Это какой-то волшебный газ.

6. Построим графики $I_a = f(V_c)$ для статического режима. Учтём, что $I_a = V_a/R_a$, где $R_a = 100$ кОм. Теперь вычислим все величины, которые вычисляли для динамического режима:

| $U_{\text{нак}}$ | U_{max} | U_{min} | 1 по формуле (4) | 1 по формуле (5) |
|------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| 2.829 | 2.3 ± 0.1 В | 7.3 ± 0.1 В | 0.89 ± 0.04 А | 0.93 ± 0.01 А |
| 3.125 | 2.5 ± 0.1 В | 7.2 ± 0.2 В | 0.87 ± 0.03 А | 0.93 ± 0.03 А |

| $U_{\text{нак}}$ | 1 по формуле (6) | U_0 |
|------------------|-------------------|------------------|
| 2.829 | 0.97 ± 0.04 А | 1.7 ± 0.3 эВ |
| 3.125 | 1.00 ± 0.05 А | 1.3 ± 0.4 эВ |

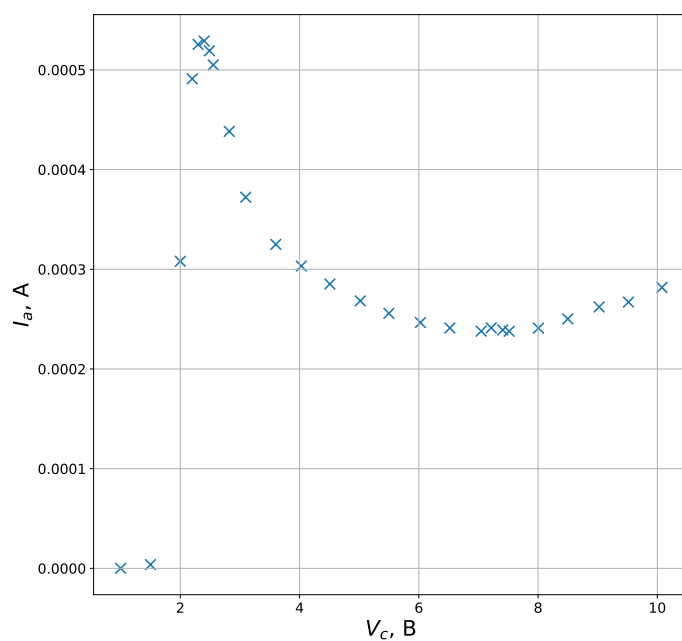


Рис. 7. $U_{\text{нак}} = 2.829$

7. На основе формулы (9) найдём вероятности рассеяния электронов и построим соответствующий график.

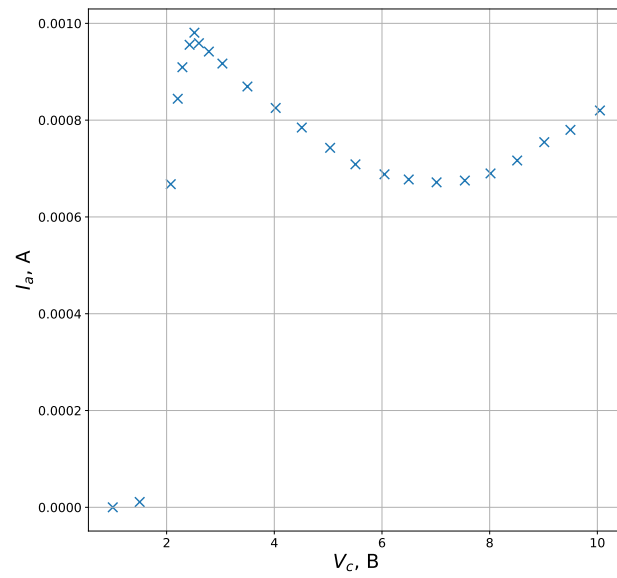


Рис. 8. $U_{\text{нак}} = 3.125$

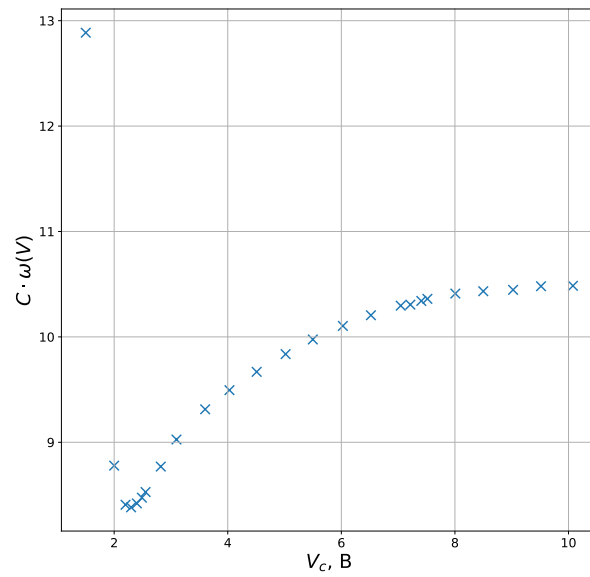


Рис. 9. $U_{\text{нак}} = 2.829$

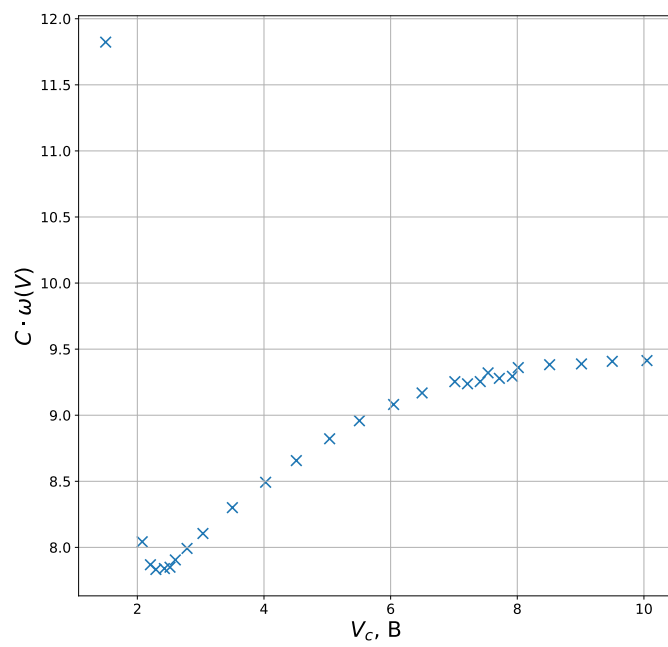


Рис. 10. $U_{\text{нак}} = 3.125$