

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

Иван Сладков

19 февраля 2022 г.

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 σ 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.

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 $E \sim 1$ 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.

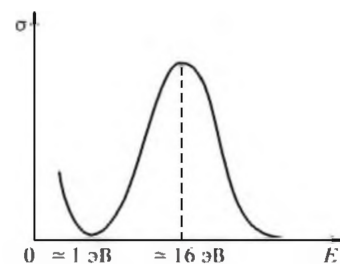


Рис. 1: Качественная картина результатов измерения упругого рассеяния электронов в аргоне

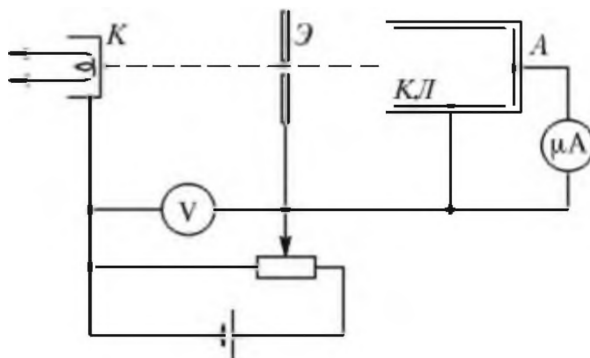


Рис. 2: Схема установки для измерения сечения рассеяния электронов в газах

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:

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

2.1 Расчётные формулы

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 Оборудование и инструментальные погрешности

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 3. 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

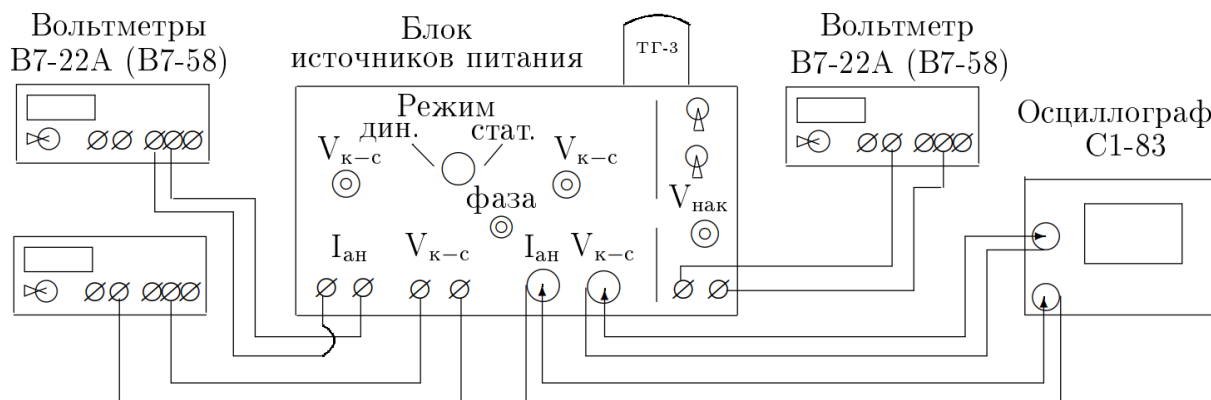


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

$N(x)$ (т. е. число электронов, проходящих через поперечное сечение лампы в точке x в единицу времени) уменьшается с ростом x от начального значения X у катода (в точке $x = 0$) до некоторого значения N_a у анода (в точке $x = L$).

В работе используются:

- **Вольтметры:** $\Delta = \pm 0.01$ В
- **Осциллограф:** $\Delta = \pm 0.2$ В по оси X
- **Блок источников питания**
- **Тиратрон ТГЗ**

4 Результаты измерений и обработка данных

Все измерения и расчёты в СИ.

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.

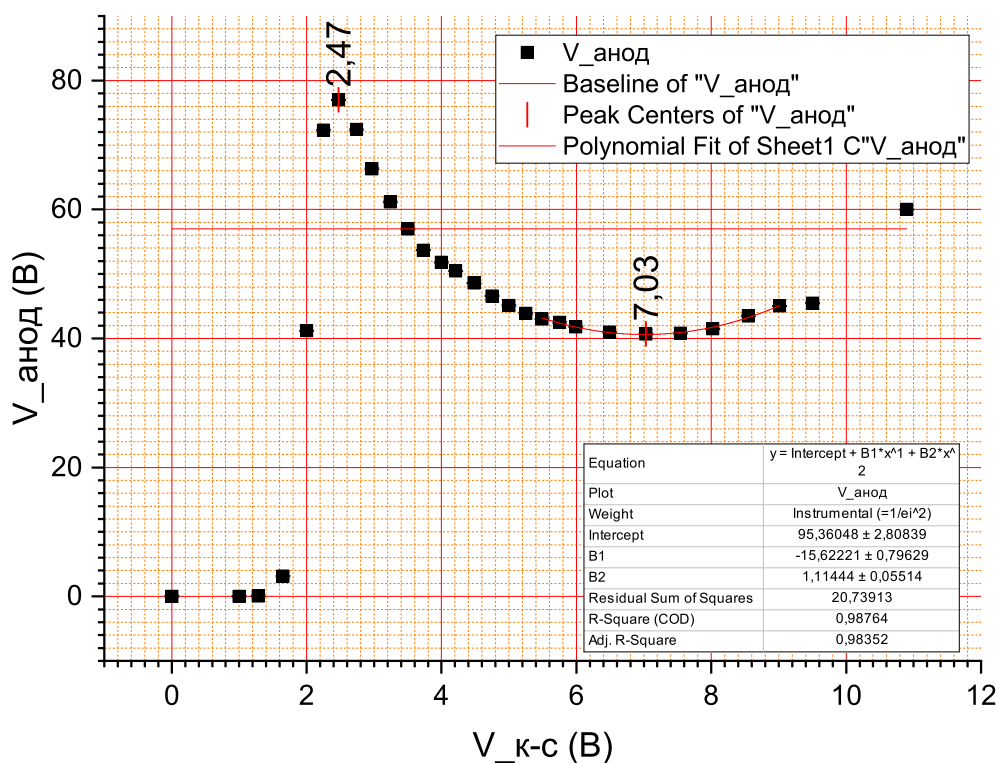
Далее найдём радиус из формулы (5):

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

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 $V_{накала} = 3.3$ В не наблюдалось достаточно резкого возрастания тока анода, то есть было сложно найти конкретную точку $V_{пробоя}$.

Рис. 4: Вольт-амперная характеристика при $V_{\text{накала}} = 2.99$ В

n	V_1	V_2
$V_{\text{накала}} = 3.31$ В	2.3 ± 0.2	7.3 ± 0.6
$V_{\text{накала}} = 2.99$ В	2.5 ± 0.2	7.0 ± 0.6

Таблица 1: Результат опыта в статическом методе

4.2 Статический метод

По результатам статического измерения, получены данные табл. 2. По этим данным построим графики на рис. 4 и 5. Для графика 5 проведём дополнительный анализ на пики.

По результатам, приведённым в табл.1,

$$l = (3.1 \pm 0.3) \cdot 10^{-10} \text{ Å}.$$

Глубина потенциальной ямы

$$U_0 = 1.7 \pm 0.1.$$

Далее по формуле (2) оценим, при каких напряжениях должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов:

$$E = \sqrt{\frac{\pi n \hbar}{l}} \frac{1}{2m} - U_0,$$

$$E_{n=2} = 15 \pm 1 \text{ эВ},$$

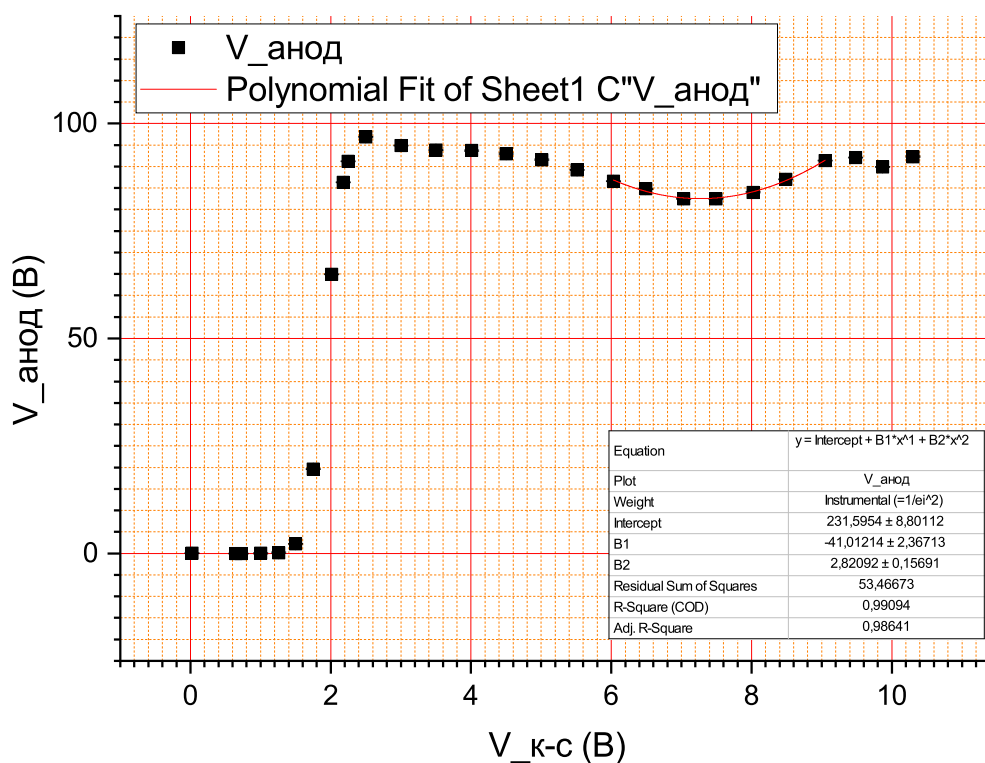
$$E_{n=3} = 31 \pm 2 \text{ эВ}.$$

Эти максимумы никак не отображаются на графике, так как они больше потенциала ионизации, при достижении которого картина кардинально меняется.

Далее, по формуле (8) найдём зависимость вероятности рассеяния от энергии

$$\omega(V) \propto \ln \frac{V_{\text{анод}}}{V_{\text{анод}}^0},$$

где $V_{\text{анод}}^0$ — первый максимум на ВАХ тиратрона. Результат отображён на рис. 6. Заметим, что на рис. отображена зависимость не для $\ln I/I_0$, а для $\ln V/V_0$, что в общем не имеет значения.

Рис. 5: Вольт-амперная характеристика при $V_{\text{накала}} = 3.31 \text{ В}$

5 Вывод

По результатам проведения лабораторной работы установлен приблизительный радиус атома ксенона, эффективная глубина потенциальной ямы для электрона, а также получен график зависимости $\omega = F(E)$ для вероятности рассеяния электрона. Исходя из полученных данных, результат статического измерения точнее. Отчасти это может быть связано с некоторой инерционностью происходящих в тиратроне процессов: например, время установления картины на осциллографе исчисляется секундами, что может говорить об инерционности других процессов.

А Необработанные результаты опытов

«Сырые» данные по результатам опыта представлены в табл. 2.

Список литературы

- [1] Сивухин Д. В. *Общий курс физики. Том 4 Оптика*, 2004
- [2] Кириченко Н. А. *Принципы оптики*, 2014
- [3] *Лабораторный практикум по общей физике. В 3 томах. Том 2. Оптика: учебное пособие* под ред. А. В. Максимычева

$V_{\text{накал}} = 3.31 \text{ В}$		$V_{\text{накал}} = 2.99 \text{ В}$	
$V_{\text{катод}}, \text{ В}$	$V_{\text{анод}}, \text{ В}$	$V_{\text{катод}}, \text{ В}$	$V_{\text{анод}}, \text{ В}$
0,02	0,04	10,9	60
10,3	92,3	9,5	45,5
9,87	89,9	9,01	45,04
9,48	92,1	8,55	43,5
9,05	91,4	8,02	41,5
8,49	87	7,54	40,8
8,02	84	7,03	40,7
7,49	82,5	6,49	41
7,03	82,5	5,99	41,82
6,49	84,8	5,75	42,51
6,03	86,6	5,49	43
5,51	89,2	5,25	43,9
5,01	91,6	5	45,12
4,5	93	4,75	46,6
4,01	93,7	4,48	48,6
3,5	93,8	4,21	50,45
3	94,87	4	51,8
2,5	96,87	3,73	53,7
2,01	64,9	3,5	57
2,18	86,3	3,24	61,2
2,25	91,2	2,97	66,3
1,75	19,6	2,74	72,4
1,5	2,22	2,47	77
1,26	0,18	2,25	72,3
1	0,02	2	41,2
0,723	0	1,65	3,14
0,647	0	1,28	0,06
—	—	1	0,01
—	—	0	0

Таблица 2: Данные по ВАХ тиратрона

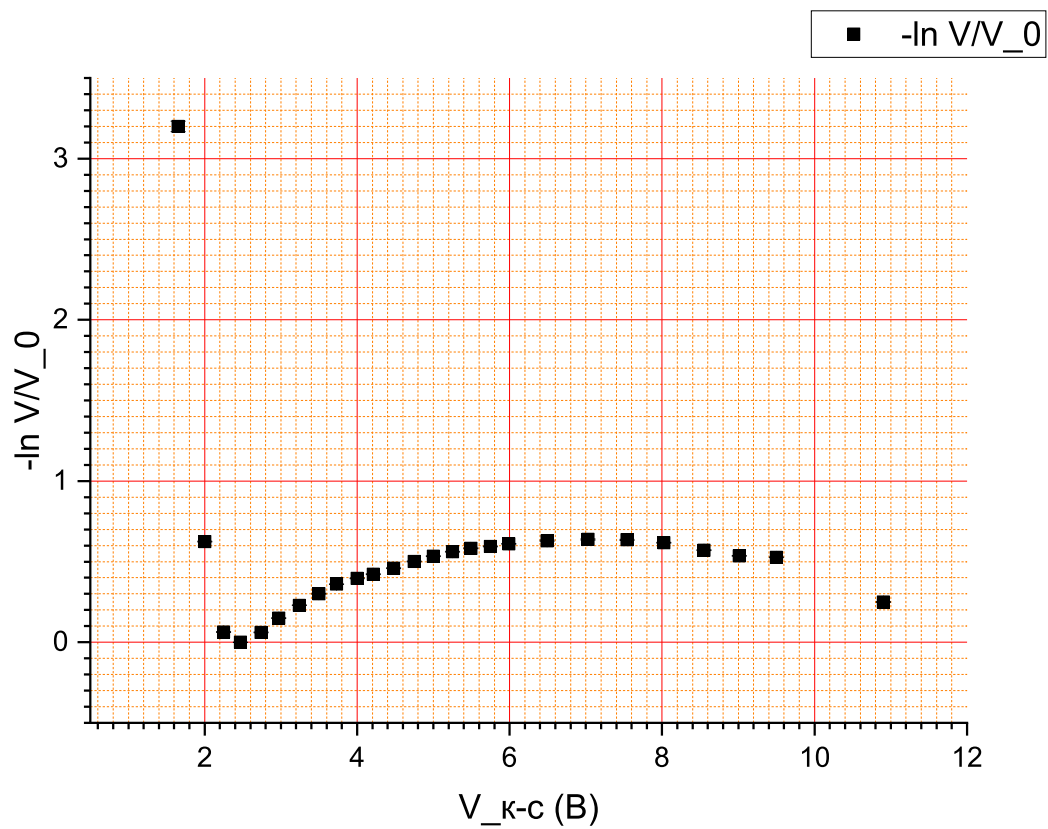


Рис. 6: Качественный график зависимости $\omega \propto -\ln \frac{I}{I_0} = F(V)$