

Работа 5.1.3

Изучение рассеяния медленных электронов на атомах (эффект Рамзауэра)

Валеев Рауф Раушанович
группа 825

Цель работы: Получить ВАХ эффекта на экране ЭО, измерить расстояния между характерными точками в вольтах; снять ВАХ в статическом режиме; по результатам измерений рассчитать размер электронной оболочки атома, оценить глубину потенциальной ямы и потенциал ионизации газа, заполняющего лампу.

Теория

Эффект Рамзауэра

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 это отношение числа таких переходов N в единицу времени к плотности потока nv рассеиваемых частиц, падающих на мишень, т.е. к числу частиц, падающих в единицу времени на единичную площадку, перпендикулярно к их скорости.

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

Эффект Рамзауэра нельзя объяснить с позиции классической теории. С квантовой же точки зрения картина рассеяния выглядит следующим образом: внутри атома потенциальная энергия падающего электрона отлична от нуля, скорость электрона меняется, 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

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

Решение задачи о рассеянии электрона на сферическом потенциале достаточно громоздко. Поэтому рассматривают более простое одномерное приближение: электрон рассеивается на потенциальной яме конечной глубины. После решения соответствующего уравнения Шрёдингера получается выражение для коэффициента прохождения:

$$D = \frac{16k_1^2 k_2^2}{16k_1^2 k_2^2 + 4(k_1^2 - k_2^2)^2 \sin^2(k_2 l)} \quad (3)$$

где $k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$, $k_2^2 = \frac{2m(E+U_0)}{\hbar^2}$.

Как легко видно, это периодическое выражение с максимумами при

$$k_2 l = \pi n = \sqrt{\frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}} l \quad (4)$$

Это же условие можно получить, рассматривая интерференцию двух волн — прошедшей через атом и отраженной от границ атомного потенциала. Тогда получаются следующие выражения для эффективного размера атома l :

$$2l = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} \quad (5)$$

$$2l = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}} \quad (6)$$

Где E_1, E_2 — энергии, соответствующие максимуму и минимуму прохождения электронов соответственно. Исключая U_0 можно найти

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}} \quad (7)$$

А исключая l можно найти эффективную глубину потенциальной ямы атома:

$$U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1 \quad (8)$$

Так же можно вывести теоретически формулу, связывающую зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии:

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

С помощью неё, имея ВАХ тиратрона, можно построить график $w(V)$.

Схема установки

Лампа-тиратрон ТГ301/1.3Б, заполненная инертным газом, расположена непосредственно на корпусе блока источников питания (БИП). Напряжение к электродам лампы подаются от источников питания, находящиеся в корпусе прибора. Регулировка напряжения и выбор режима работы установки производится при помощи ручек управления, выведенных на лицевую панель БИП.

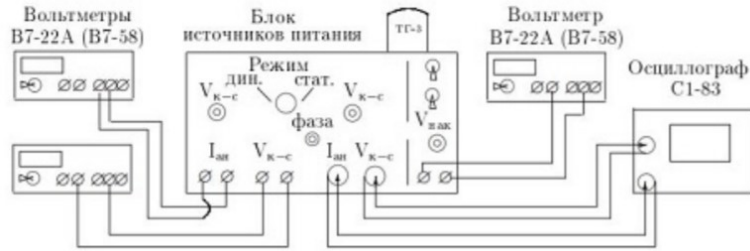


Рис. 1: Блок-схема экспериментальной установки

Ход работы

Снимем с помощью осциллографа ВАХ при двух различных напряжениях, а затем померяем V_{\max} , V_{\min} и $V_{\text{пробоя}}$ в зависимости от $U_{\text{накала}}$. Все данные, в том числе и изображения, занесем в таблицу.

$U_{\text{накала}}, \text{ В}$	$V_{\max}, \text{ В}$	$V_{\min}, \text{ В}$	$V_{\text{пробоя}}, \text{ В}$
3,041	2,8	6,84	12,0
2,75	2,8	6,6	12,0
$\sigma_U = 0,01 \text{ В}$	$\sigma_V = 0,4 \text{ В}$		

Таблица 1: напряжения максимума, минимума и пробоя, в зависимости от накала

Здесь погрешность для накала берем как $\Delta U_{\text{накала}} = 0,0015U + 0,003$. Поскольку у нас немного плавали цифры, то можно погрешность округлить до 0,01 В.

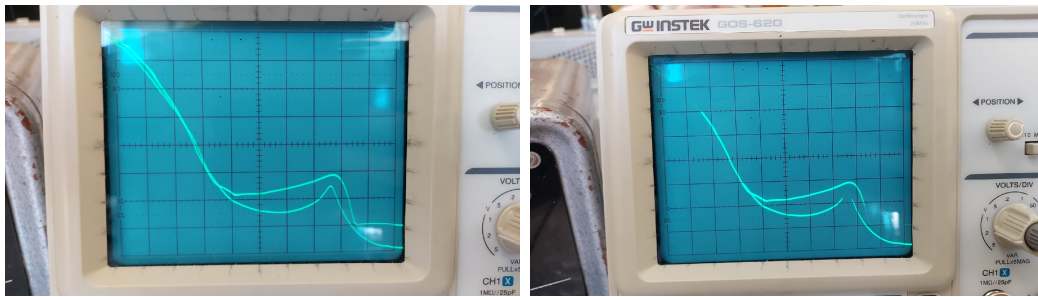


Рис. 2: Изображения кривой на осциллографе (слева для 3,04 В)

В развертке нас интересует только ось Y , по ней цена деления: 0,2 В. Для напряжений увеличиваем погрешность в 2 раза, так как у нас не совпадают две кривые на осциллографе.

Теперь рассчитаем, для приведенных выше данных рассчитаем размер электронной оболочки атома, сделаем мы это из формул (7)(8).

В итоге мы получим систему из 2 уравнений:

$$\begin{cases} 2l = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} \\ 2l = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}} \end{cases} \quad (10)$$

А поскольку мы принимаем $U_0 = 2,5 \text{ В}$, а E_1 и E_2 можно легко получить, домножив соответствующие V , которые мы померяли на e .

К сожалению этот метод не даст нужных результатов, поскольку если посчитать эту систему с предположением, что $U_0 = 2,5 \text{ В}$ для $U_{\text{накала}} = 3,04 \text{ В}$, то получится

$$\begin{cases} 2l = (5,3 \pm 0,5) \text{ В} \\ 2l = (6,04 \pm 0,11) \text{ В} \end{cases}$$

Это связано с тем, что глубина ямы на самом деле намного меньше, мы можем просто ее посчитать по формуле (8) и получить, что

$$U_0 = (0,4 \pm 0,1)eV$$

Здесь, выше и далее мы считаем погрешность, как погрешность сложной функции, то есть через корень суммы частных производных на относительную погрешность в квадрате. Поэтому мы считаем l по формуле (7) и получаем

$$l = (3,4 \pm 0,4)\text{\AA}$$

Во всех наших измерениях, поскольку наши кривые не совпадают, имеет смысл завысить погрешность, поскольку были проблемы.

Приведем таблицу, с итоговыми данными U_0 и l для обоих $U_{\text{накала}}$

$U_{\text{накала}}$	$l, \text{\AA}$	U_0, eV
3,04	$3,4 \pm 0,4$	$0,4 \pm 0,1$
2,75	$3,5 \pm 0,5$	$0,3 \pm 0,1$

Таблица 2: Зависимость l и U_0 от накала

Далее оценим ионизационный потенциал, который получается так:

$$U = U_0 + U_{\text{пробоя}} \approx 12,3 \pm 0,4\text{В}$$

Значит мы имеем дело в данной работе со ксеноном.

Далее сделаем то же самое, только для ВАХа. Далее последуют только графики и таблицы, поскольку порядок действий уже обговорен далее.

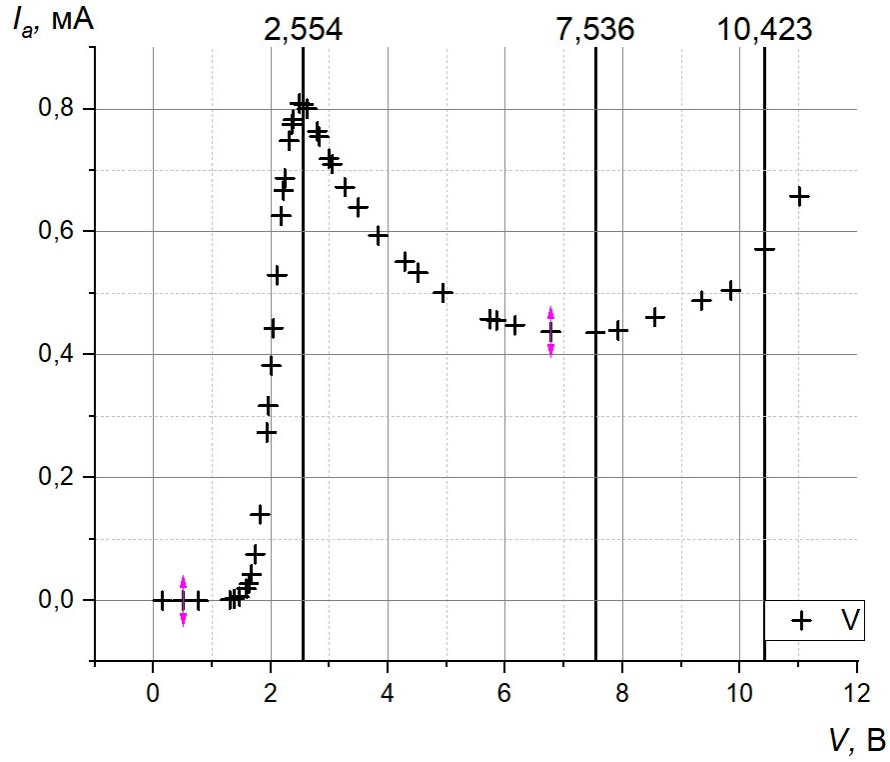


Рис. 3: ВАХ для $U_{\text{накала}} = 3,04 \text{ В}$

$U_{\text{накала}}$	V_{max}	V_{min}	$V_{\text{пробоя}}$
3,04	2,6	7,5	10,4
2,75	2,5	7,3	10,2
$\sigma_U = 0,01 \text{ В}$	$\sigma_V = 0,1 \text{ В}$		

Таблица 3: разные напряжения для статического метода

$U_{\text{накала}}$	$l, \text{ \AA}$	$U_0, \text{ eV}$
3,04	$3,1 \pm 0,2$	$1,32 \pm 0,03$
2,75	$3,1 \pm 0,3$	$1,34 \pm 0,02$

Таблица 4: Финальные данные для статического метода

Найдем зависимость $E_n(E_1, n)$, используя формулу

$$\sqrt{\frac{2m(E_n + U_0)}{\hbar^2}} l = \pi n$$

В итоге получаем, что

$$E_n = n^2(E_1 + U_0) - U_0$$

Отсюда при $E_2 = 14,0 \text{ eV}$, $E_3 = 33,1 \text{ eV}$, $E_4 = 59,8 \text{ eV}$

При таких энергиях электронов происходит ионизация газа, из-за чего наступает пробой и уже второй максимум измерить не удастся.

На основе формулы (9) мы можем построить график зависимости вероятности рассеяния электрона от ускоряющего напряжения.

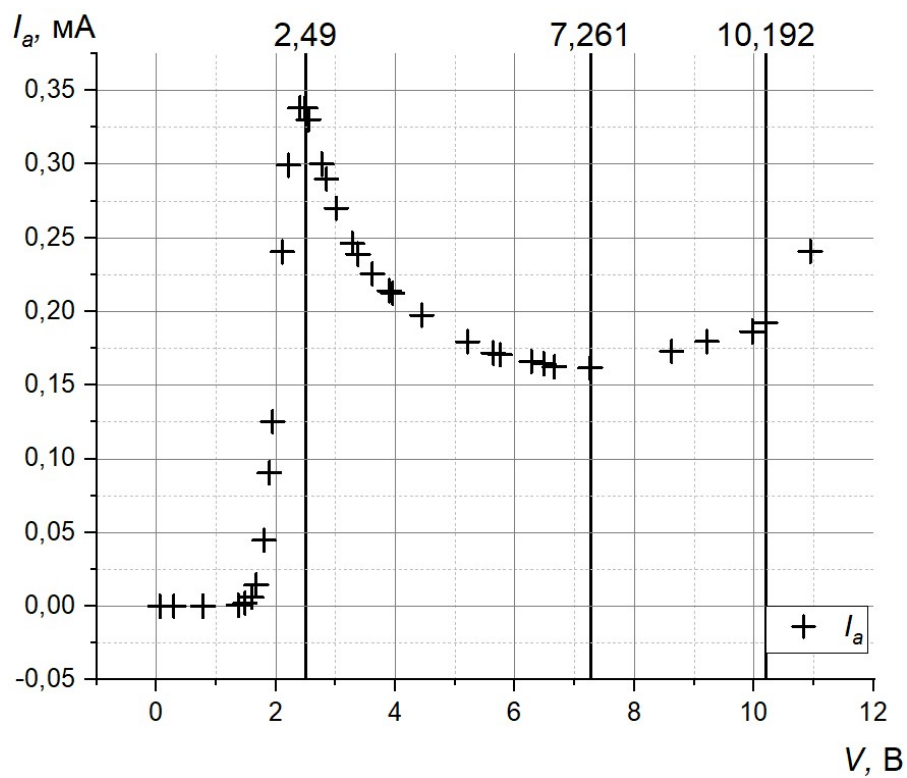


Рис. 4: ВАХ для $U_{\text{накала}} = 2,75$ В

Вывод

Мы провели опыты по изучению рассеяния медленных электронов и получили верные ВАХ динамическим и статическим методами. Так же мы выяснили, что в нашей установке был ксенон.

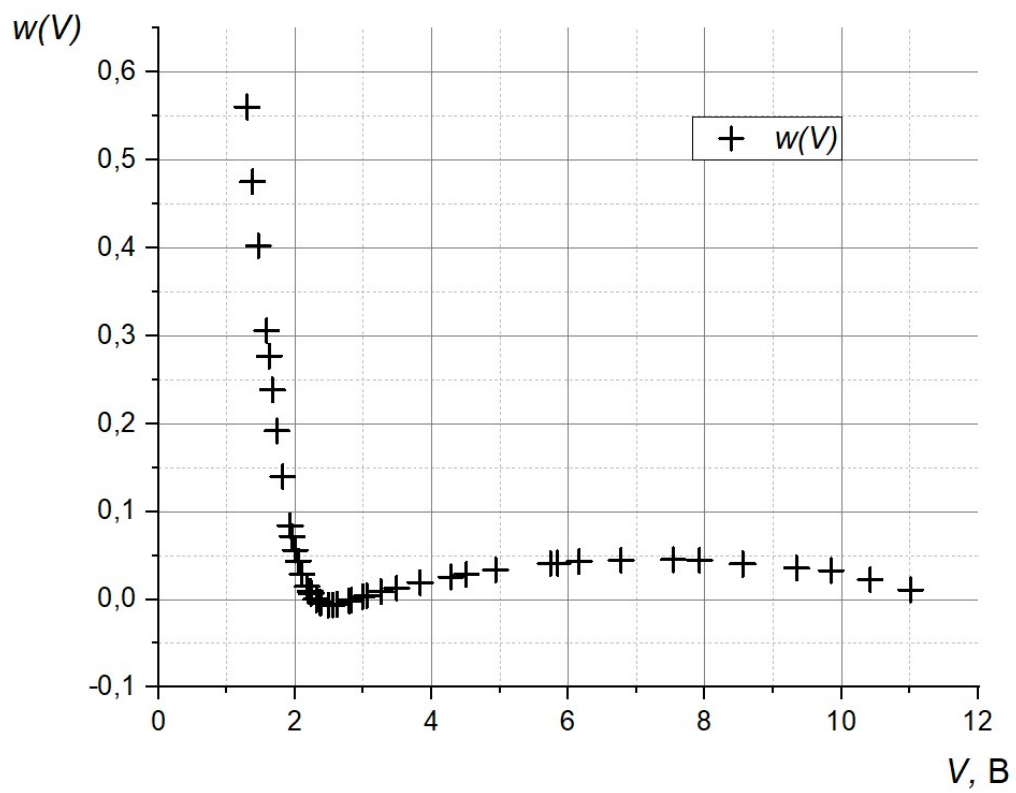


Рис. 5: Зависимость $w(V)$