

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Физтех-школа радиотехники и компьютерных технологий

## Отчёт о выполнении лабораторной работы №5.1.3

Изучение рассеяния медленных электронов  
на атомах (эффект Рамзауэра)

Автор:  
Козлов Александр Сергеевич  
Б01-109

Долгопрудный  
13 ноября 2023 г.

# 1 Аннотация

В данной работе исследуется энергетическая зависимость вероятности рассеяния электронов атомами инертного газа, определяются энергии электронов, при которых наблюдается «просветление» газа, 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.

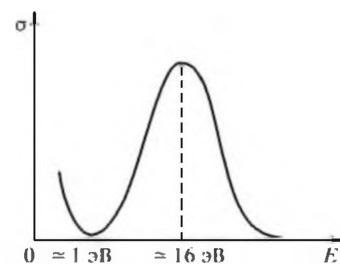


Рис. 1: Качественная картина результатов измерения упругого рассеяния электронов в аргоне

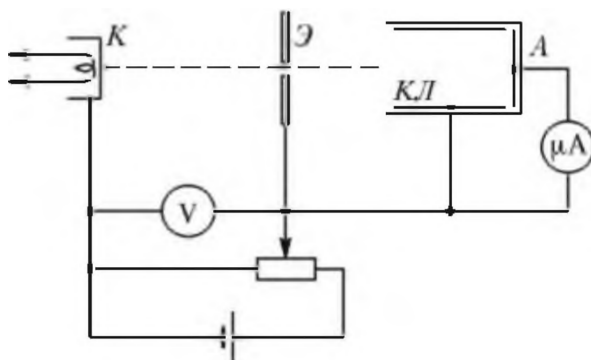


Рис. 2: Схема установки для измерения сечения рассеяния электронов в газах

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  $E \sim 1$  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

$$\sqrt{\frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}}l = \pi n; \quad n \in N_1, \quad (2)$$

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:

$$I = I_0 e^{-C\omega(V)}; \quad C = Ln_{\Delta}, \quad (7)$$

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

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

### 3 Оборудование и инструментальные погрешности

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  $I$ . 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  $X$  у катода (в точке  $x = 0$ ) до некоторого значения  $N$  у анода (в точке  $x = L$ ).

Схема экспериментальной установки отображена на рис. 3.

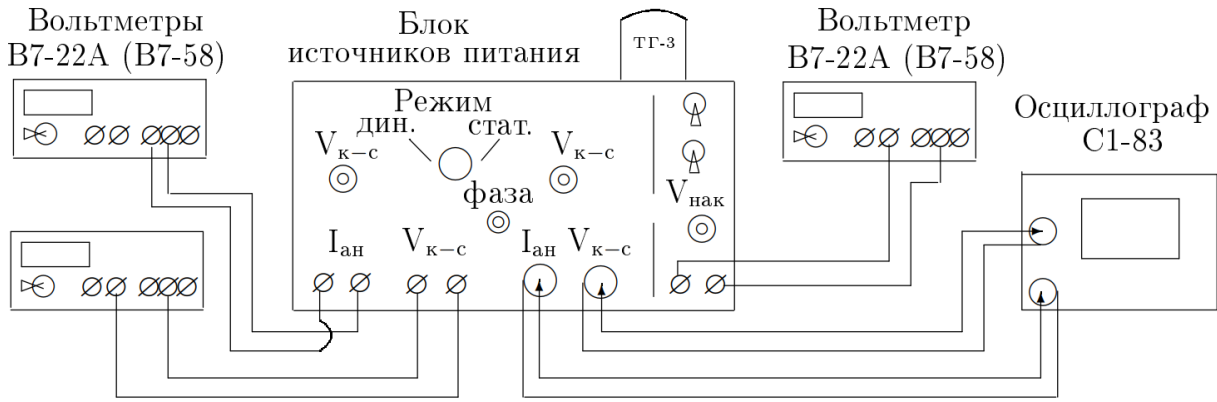


Рис. 3: Схема экспериментальной установки

В работе используются:

Вольтметры 0.01 В Осциллограф 0.2 В по оси X Блок источников питания Тиратрон ТГЗ

### 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).

$$V_{max}^1 \approx 1.8 .$$

$$V_{min}^1 \approx 6 .$$

Далее найдём радиус из формулы (5):

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}} = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(V_{min}^1 - V_{max}^1)e}} \approx 3.35 \text{ \AA}.$$

Эффективная глубина потенциальной ямы равна

$$U_0 = \frac{4}{5} * 6 - \frac{9}{5} * 1.8 = 1.56 .$$

Погрешности не указаны, так как точно определить положения максимума и минимума не удастся, расчёт носит лишь оценочный характер.

Установить напряжение пробоя точно не удалось, так как не наблюдалось достаточно резкого возрастания тока анода, то есть было сложно найти конкретную точку  $V$ . (Я принял напряжение пробоя за 21 В, что далеко от табличных значений для газов).

$V_{nakal}$	$V_{min}$	$V_{max}$	1, Å	$U_0$
2,995	6	1,8	3,35	1,56
2,505	6	1,8		

Таблица 1: Измерения по ВАХ.

## 4.2 Статический метод

Данные, полученные при измерении в статическом режиме, приведены в таблице. Используя графики, можно попытаться уточнить значения эффективного радиуса атома и глубины потенциальной ямы.

Для напряжения накала 2.5 В:

$$V_{max}^1 \approx 1.75 \text{ В.}$$

$$V_{min}^1 \approx 6 \text{ В.}$$

Поэтому

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}} = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(V_{min}^1 - V_{max}^1)e}} \approx (3.33 \pm 0.08) \text{ \AA}.$$
$$U_0 = \frac{4}{5} * 6 - \frac{9}{5} * 1.75 = (1.65 \pm 0.26) .$$

Для напряжения накала 3 В:

$$V_{max}^1 \approx 2.09 \text{ В.}$$

$$V_{min}^1 \approx 5.95 \text{ В.}$$

Поэтому

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}} = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(V_{min}^1 - V_{max}^1)e}} \approx (3.50 \pm 0.10) \text{ \AA}.$$
$$U_0 = \frac{4}{5} * 6 - \frac{9}{5} * 1.75 = (1.00 \pm 0.26) .$$

$V_{\text{накала}} = 2,995$		$V_{\text{накала}} = 2,505$	
$V_{\text{к-с}}, \text{В}$	$V_{\text{а}}$	$V_{\text{к-с}}, \text{В}$	$V_{\text{а}}$
0,14	0,05	0,64	2,49
0,39	2,16	0,852	7,59
0,66	9,8	1,124	19,8
0,87	24,02	1,447	51,1
1,21	68,91	1,75	64
1,42	97,1	1,88	62,3
1,62	115,63	1,931	61,01
1,83	126,96	2,475	41,93
2,09	129,6	3,003	28,04
2,183	128,39	3,998	17,3
2,375	124,13	4,44	15,03
2,5	120,03	5,26	13,03
3	102,03	5,78	12,62
3,53	88,58	6	12,24
4,206	64,81	6,242	12,29
4,964	68,13	6,57	12,35
5,58	65,85		
5,951	65,62		
6,26	67,73		
6,5	68,63		

Таблица 2: Измерения для ВАХ тиратрона.

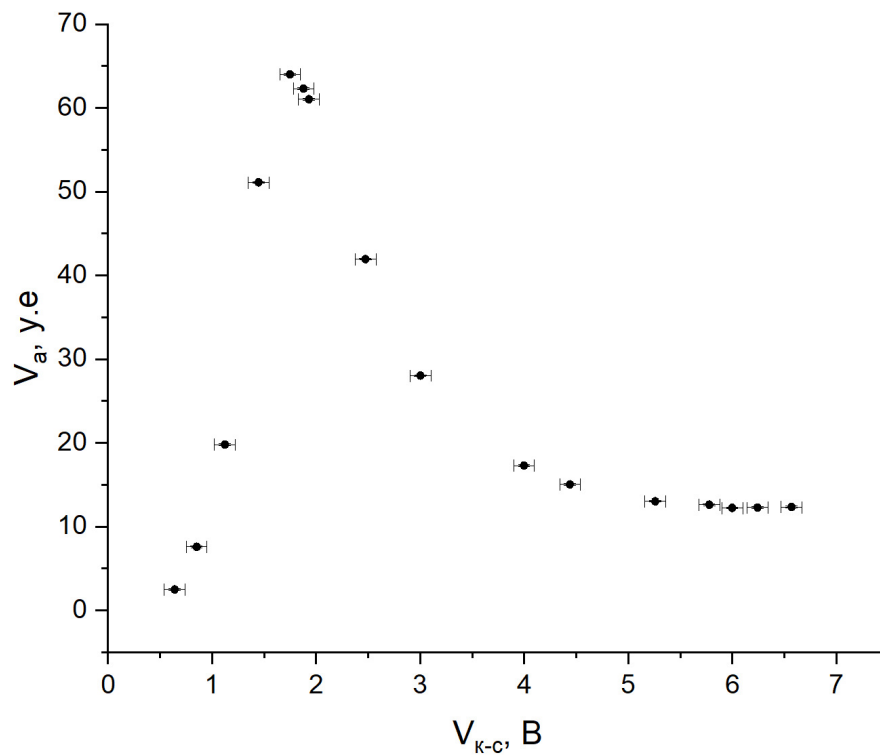


Рис. 4: ВАХ для напряжения накала 2.5 В

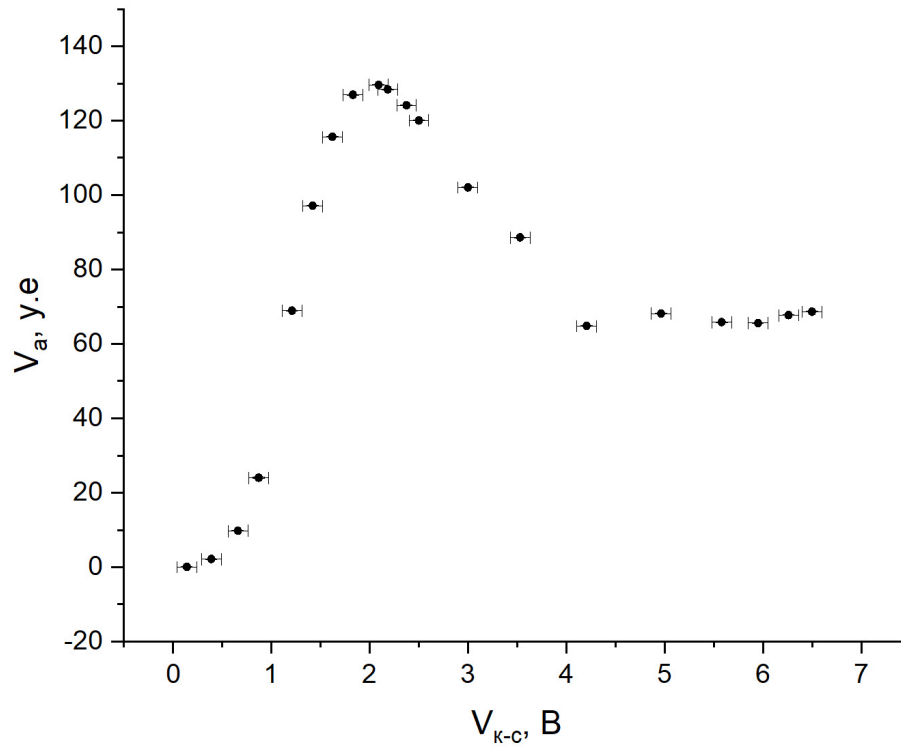


Рис. 5: ВАХ для напряжения накала 3 В

## 5 Вывод

В работе требовалось исследовать зависимость рассеяния электронов атомами интерного газа. Используя эту зависимость, можно определить эффективный размер атома, на котором происходит рассеяние, глубину потенциальной ямы и потенциал ионизации газа. Размеры тиратрона таковы, что этот потенциал практически совпадает с напряжением пробоя, при котором ток между катодом и анодом резко возрастает. На нашей установке не удалось точно определить это напряжение, так напряжения накала оказалось недостаточно, чтобы наблюдать полную картину зависимости напряжения на аноде от напряжения между катодом и сеткой. Полученное значение (21 эВ) не соответствует ни одному из инертных газов, так как даже самый близкий к нему ионизационный потенциал, который имеет аргон, равен 15,8 эВ. Причинами такого большого отклонения могут являться неточные показания вольтметров.