

Московский физико-технический институт  
(государственный университет)

Лабораторная работа по квантовой физике

**Изучение рассеяния медленных электронов на  
атомах (эффект Рамзауэра) [1.3]**

Талашкевич Даниил Александрович  
Группа Б01-009

Долгопрудный  
2022

# Содержание

<b>1</b>	<b>Аннотация</b>	<b>1</b>
1.1	Теория . . . . .	1
1.2	Описание установки . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Ход работы</b>	<b>4</b>
2.1	Данные . . . . .	4
2.2	Обработка данных . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Вывод</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Литература</b>	<b>9</b>

# 1 Аннотация

**Цель работы:** исследовать энергетическую зависимость вероятности рассеяния электронов атомами инертного газа, определить энергию электронов при которых наблюдается «просветление» инертного газа и оценить размер его внешней электронной оболочки.

**Оборудование:** тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, экспериментальная блок-схема, осциллограф, вольтметры, амперметры.

## 1.1 Теория

Рассеяние электрона на атоме можно приближённо рассматривать как рассеяние частицы энергии  $E$  на потенциальной яме длины  $\ell$  и глубины  $U_0$ . Уравнение Шрёдингера имеет вид

$$\Psi'' + k^2\Psi = 0,$$

где вне ямы

$$k^2 = k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2},$$

а внутри

$$k^2 = k_2^2 = \frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}.$$

Коэффициент прохождения в таком случае равен

$$D = \frac{16k_1^2k_2^2}{16k_1^2k_2^2 + 4(k_1^2 - k_2^2)^2 \sin^2(k_2\ell)}.$$

Заметим, что коэффициент прохождения имеет ряд максимумов и минимумов. Он максимальном при

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

Качественно эффект Рамзауэра можно объяснить, рассмотрев интерференцию прошедшей и дважды отразившейся от оболочки волн де Бройля. Длины волн вне и внутри атома:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}, \quad \lambda_1 = \frac{h}{\sqrt{2m(E + U_0)}}.$$

Соответственно условия на первые интерференционные максимум и минимум

$$2\ell = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}}, \quad 2\ell = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}}, \quad (2)$$

где  $E_1, E_2$  - энергии, соответствующие максимуму и минимуму прохождения электронов соответственно.

Исключая из этих соотношений глубину ямы, получим

$$\ell = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}. \quad (3)$$

Глубина ямы при этом равна

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

## 1.2 Описание установки

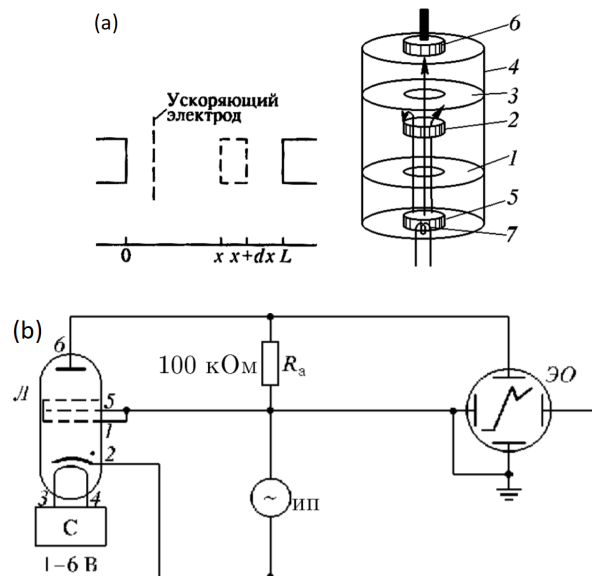


Рис. 1: (а) Схема тиратрона (слева) и его конструкция (справа): 1,2,3 – сетки, 4 – внешний металлический цилиндр, 5 – катод, 6 – анод, 7 – накаливаемая спираль. (б) Схема включения тиратрона.

Для изучения эффекта используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом (Рис. 1а). Электроны эмитируются катодом, ускоряются напряжением  $V$  и рассеиваются на атомах газа. Сетки соединены между собой и имеют один потенциал, примерно равный потенциалу анода. Рассеянные электроны отклоняются и уходят на сетку, а оставшиеся достигают анода, создавая ток  $I_a$ . Таким образом, поток электронов на расстоянии  $x$  от ускоряющей сетки уменьшается с ростом

х. ВАХ анода должна быть

$$I_a = I_0 \exp(-Cw(V)), \quad (5)$$

где  $I_0 = eN_0$  – ток катода,  $I_a = eN_a$  – ток анода,  $C = Ln_a\Delta_a$  ( $L$  – расстояние между катодом и анодом,  $\Delta_a$  – площадь поперечного сечения атома,  $n_a$  – концентрация газа в лампе),  $w(V)$  – вероятность рассеяния на атоме. Формулу (5) можно переписать в виде

$$w(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a(V)}{I_0}. \quad (5a)$$

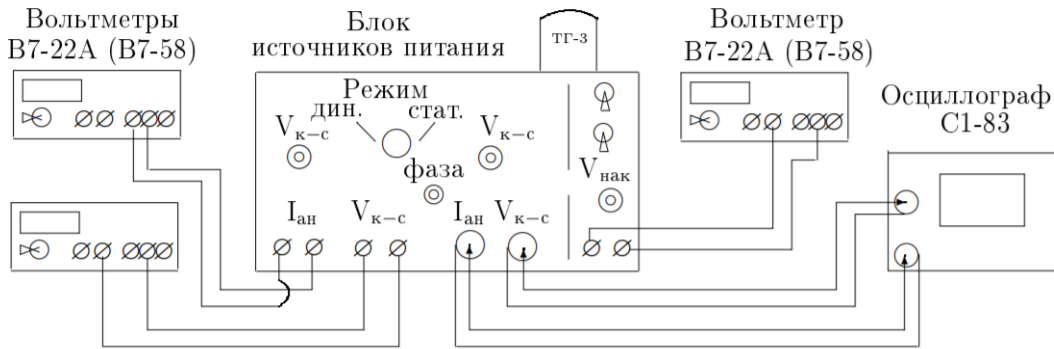


Рис. 2: Схема установки.

Схема экспериментальной установки, изображенная на Рис. 1б, в нашей работе конструктивно осуществлена следующим образом (Рис. 2): лампа-тиратрон расположена непосредственно на корпусе блока источников питания (БПИ), напряжение к электродам лампы подаётся от источников питания, находящихся в корпусе прибора. Регулировка напряжения и выбор режима работы установки производится при помощи ручек управления, выведенных на лицевую панель БПИ.

## 2 Ход работы

### 2.1 Данные

	$U_{\text{накала}} = 2.61 \text{ В}$									
$U, \text{ В}$	2.639	3.162	3.566	4.111	4.502	5.299	4.737	6.325	6.802	7.095
$I_a, \text{ А}$	0.0295	0.18	0.216	0.227	0.228	0.212	0.229	0.187	0.172	0.162
$U, \text{ В}$	8.232	9.488	10.625	11.006	11.588	11.528	12.197	12.193	7.503	
$I_a, \text{ mA}$	0.126	0.103	0.099	0.1012	0.106	0.105	0.110	0.110	0.147	

	$U_{\text{накала}} = 2.97 \text{ В}$										
$U, \text{ В}$	2.979	3.261	3.514	3.858	4.045	4.435	5.028	5.252	5.424	6.032	6.248
$I_a, \text{ А}$	0.383	0.474	0.537	0.600	0.629	0.675	0.709	0.715	0.717	0.712	0.707
$U, \text{ В}$	6.557	6.730	7.047	7.472	7.856	8.712	9.515	10.394	10.701	11.28	10.713
$I_a, \text{ mA}$	0.693	0.683	0.659	0.621	0.586	0.518	0.468	0.459	0.465	0.484	0.469

Таблица 1: Результаты измерений в статическом режиме

$V_{\text{накала}}, \text{ В}$	$V_{\text{min}}, \text{ В}$	$V_{\text{max}}, \text{ В}$	$V_{\text{пробоя}}, \text{ В}$	расст. до мин, В
2,97	8,2	3,2	16,4	10,0
2,61	7,0	3,0	17,2	5,8

Таблица 2: Результаты измерений в динамическом режиме

## 2.2 Обработка данных

1. Используя формулы 2 рассчитаем размер электронной оболочки атома инертного газа ( $V_{min} = 8.2B$ ,  $V_{max} = 3.2B$ ,  $V_0 = 1,28B$ ):

$$2\ell = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} = 580 \pm 55 \text{ пм}, \quad 2\ell = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}} = 598 \pm 58 \text{ пм},$$

Теперь рассчитаем по формуле 3 :

$$\ell = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}} = 388 \pm 35 \text{ пм}.$$

2. Оценим глубину потенциальной ямы по формуле 4 :

$$U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1 = 1.28 \pm 0.29 \text{ эВ}.$$

3. По результатам измерений напряжения пробоя оценим потенциал ионизации инертного газа:

Получили что тиратрон наполнен аргоном.

4. Построим графики  $I_a = f(V_c)$  (для статического режима):

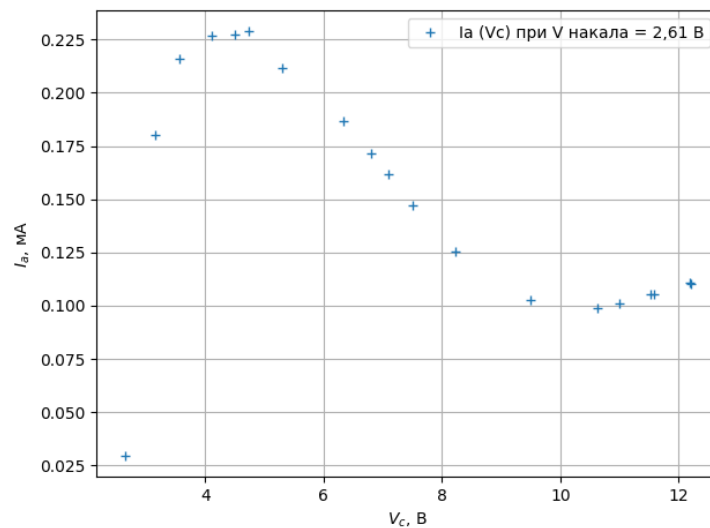
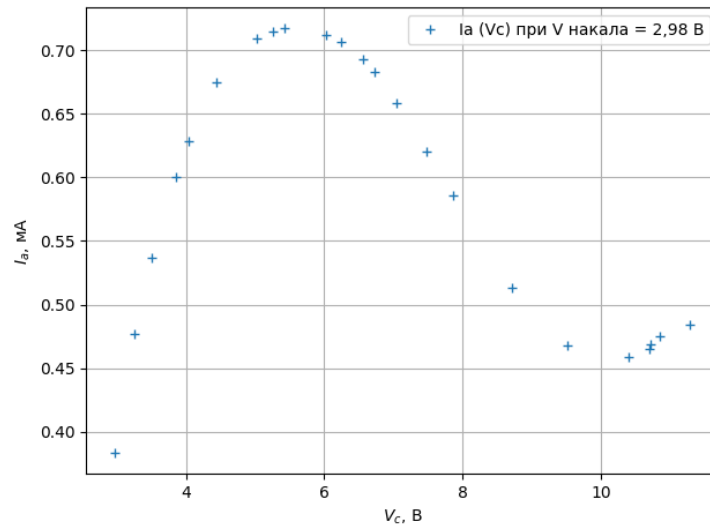


Рис. 3:  $V_{\text{накала}} = 2.61 \text{ В}$

Рис. 4:  $V_{\text{накала}} = 2.98 \text{ В}$ 

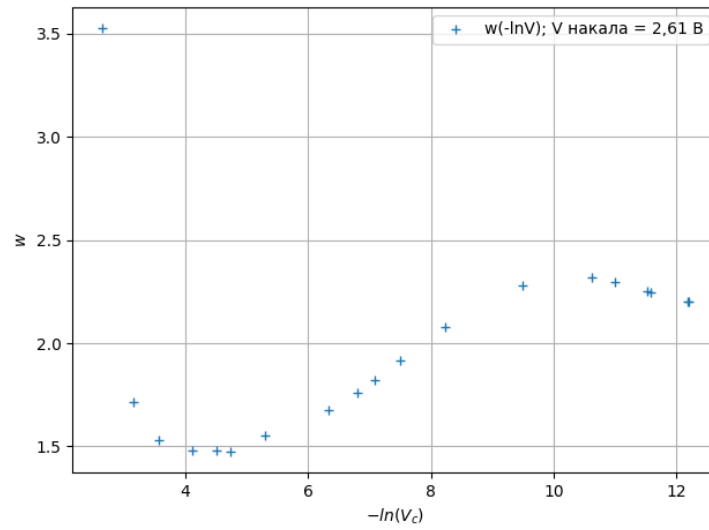
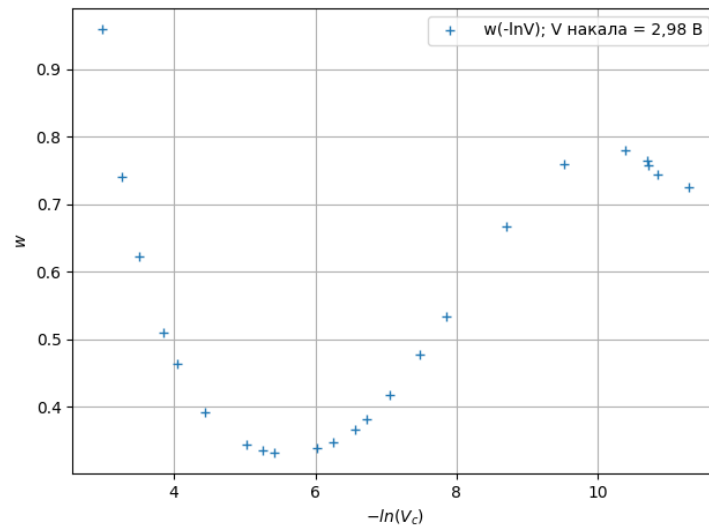
5. Оценим, используя ф-лу:

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

определим, при каких напряжениях должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов для  $n = 2, 3$ . Сравним полученные величины с наблюдаемыми особенностями на ВАХ тиратрона.

6. На основе формулы 5a найдем зависимость вероятности рассеяния электронов (с точностью до константы) от энергии и построим соответствующие графики:



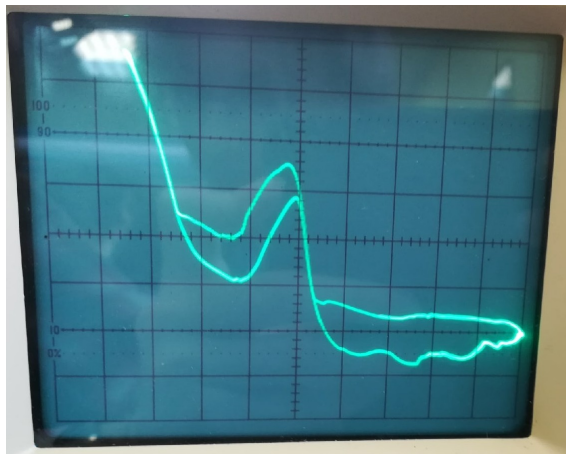
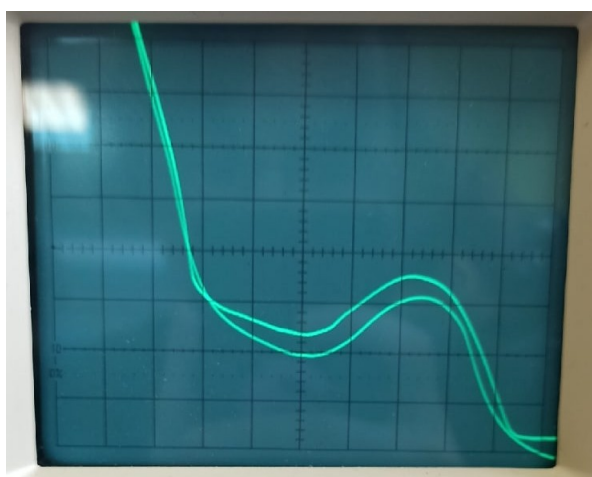
Рис. 5:  $V_{\text{накала}} = 2.61 \text{ В}$ Рис. 6:  $V_{\text{накала}} = 2.98 \text{ В}$ 

Из линейного участка графика по МНК найдем  $k$  – коэф. наклона, где  $k = \frac{1}{C}$ :

$$k_1 = 0.105 \pm 0.012; \quad k_2 = 0.090 \pm 0.007$$

$$C_1 = 9.52 \pm 1,088; \quad C_2 = 11.11 \pm 0.864; \quad \Delta C = \frac{1}{k^2} \cdot \Delta k$$

## 7. ВАХ тиратрона в динамическом режиме:

Рис. 7:  $V_{\text{накала}} = 2.61 \text{ В}$ Рис. 8:  $V_{\text{накала}} = 2.97 \text{ В}$ 

## 8. Погрешности оценим по формулам:

$$\sigma_{l_1} = l_1 \frac{\sigma_{E_1}}{E_1}, \quad \sigma_{l_2} = l_2 \frac{\sigma_{E_2}}{E_2}, \quad \sigma_{l_3} = l_3 \frac{\sigma_{E_1} + \sigma_{E_2}}{E_2 - E_1}.$$

Погрешность определения константы  $C$  в [5a](#) находилась из МНК.

### 3 Вывод

В ходе лабораторной работы мы наблюдали ВАХ тиратрона в динамическом режиме (рис. 3, 8) при различных напряжениях накала, причем по напряжению пробоя определили, что используемый в эксперименте инертный газ состоит из атомов ксенона. Действительно, энергия ионизации ксенона – 16,4 эВ, а  $E_{\text{пробоя}} = (16,2 \pm 0,5)$  эВ.

Вольт-амперная характеристика тиратрона в статическом режиме (рис. 3, 4) имеет вид, который находится в согласии с квантовой теорией. Электрон, обладая волновыми свойствами, способен «интерферировать сам с собой» при рассеянии на атоме, тем самым усиливая или ослабевая анодный ток. Энергии электрона (напряжения на катоде) при которых наблюдаются максимумы или минимумы в статическом режиме примерно совпадают со значениями, полученными при измерениях в динамическом режиме.

Проанализируем вид зависимости  $w = w(U)$ , представленной на рис. (5, 6), при напряжении накала  $V = 2,62$  В с точностью до константы  $C$ . На графике в диапазоне от 1В до 12В отчетливо видны максимум и минимум, что подтверждает справедливость эффекта Рамзауэра – эффективное сечение реакции сильно зависит от энергии электрона. Однако видно, что при достаточно малых энергиях электрона погрешность вероятности сильно возрастает, что неудивительно, ведь из формулы (5a) видно, что  $w \rightarrow +\infty$  при  $U \rightarrow 0$  (этот предел не зависит от нормировочной константы  $C$ ), что противоречит физической реальности. Можно сделать вывод, что формула (5a) имеет границы применимости: энергия электрона  $E \geq 1$  эВ. При меньших энергиях электрон может испытывать другие квантовые эффекты: рассеяние медленных частиц, резонансное рассеяние при малых энергиях.

### 4 Литература

1. Лабораторный практикум по общей физике. Квантовая физика.
2. МНК – <http://mathhelpplanet.com/static.php?p=onlayn-mnk-i-regressionniy-analiz>