

Лабораторная работа №5.1.3  
Изучение рассеяния медленных электронов на атомах  
(эффект Рамзауэра)

Рожков А. В.

16 сентября 2025 г.

**Цель работы:** исследовать энергетическую зависимость вероятности рассеяния электронов атомами ксенона, определить энергии электронов, при которых наблюдается «просветление» ксенона, и оценить размер его внешней электронной оболочки, глубину потенциальной ямы и потенциал ионизации.

**В работе используются:** тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, осциллограф, стабилизированный блок накала электрода.

## 1 Теоретическое введение

В результате исследований зависимости поперечных сечений упругого рассеяния электронов (с энергией до 10 ЭВ) на атомах аргона было обнаружено явление, получившее название *эффекта Рамзауэра*.

С точки зрения квантовой теории атом по отношению к электронной волне ведет себя как преломляющая среда с относительным показателем преломления

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

где  $U$ ,  $E$  – соответственно потенциальная и полная энергии электрона внутри атома.

Будем считать, что электрон рассеивается на одномерной прямоугольной потенциальной яме конечной глубины. Такая модель является хорошим приближением для атомов тяжелых инертных газов, отличающихся наиболее компактной структурой и резкой внешней границей. Решение задачи о прохождении частицы с энергией  $E$  над потенциальной ямой шириной  $l$  и глубиной  $U_0$  не составит труда найти из уравнения Шредингера:

$$\psi'' + k^2\psi = 0, \text{ где } k^2 = \begin{cases} 2mE/\hbar^2 & x < 0, x > l \\ 2m(E + U_0)/\hbar^2 & 0 < x < l \end{cases}. \quad (2)$$

Коэффициент прохождения равен отношению квадратов амплитуд прошедшей и падающей волн и определяется выражением:

$$\frac{1}{D} = 1 + \frac{U_0^2}{4E(E + U_0)} \sin^2(k_2 l). \quad (3)$$

Минимум последнего выражения отвечает квантовому аналогу просветления оптики, так как при выполнении условия

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

коэффициент прохождения частицы над ямой становится равным единице, то есть достигает своего максимального значения.

Отметим, что условие (4) легко получить, рассматривая интерференцию электронов волн де Бройля в атоме:

Условие первого интерференционного максимума:

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

Условие первого интерференционного минимума:

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

Решая совместно уравнения (5, 6) можно получить:

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

Понятно, что энергии  $E_1$  и  $E_2$  соответствуют энергиям электронов, прошедших разность потенциалов  $V_1$  и  $V_2$ , то есть  $E_1 = eV_1$  и  $E_2 = eV_2$ .

По измеренным величинам  $E_1$  и  $E_2$ , используя формулы (5, 6), можно рассчитать эффективную глубину потенциальной ямы атома:

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

## 2 Экспериментальная установка

В нашей работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом. Принципиальная схема установки для изучения эффекта Рамзауэра и схематическое изображение тиратрона и его конструкция приведены на рис. 1.

На лампу Л подаётся синусоидальное напряжение частоты 50 Гц от источника питания ИП, С – стабилизированный блок накала катода; исследуемый сигнал подаётся на электронный осциллограф (ЭО); цифрами обозначены номера ножек лампы.

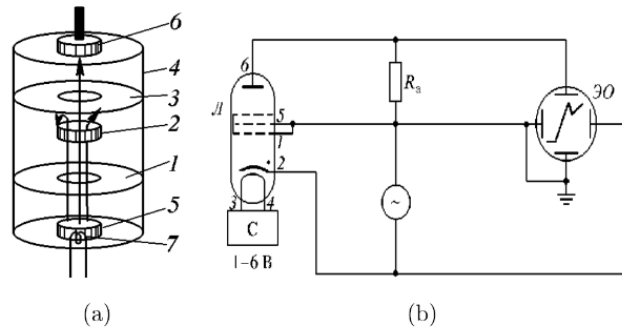


Рис. 1: Схема экспериментальной установки

Лампа-тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненная инертным газом, расположена непосредственно на корпусе блока источника питания (БИП). 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 БИП.

Зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии можно определить, зная ВАХ тиратрона:

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

где  $I_0$  – ток катода, а  $C$  – некоторая постоянная.

По классическим представлениям, сечение рассеяния электрона на атоме должно падать монотонно с ростом  $V$ , как это показано на рисунке 2а. По квантовым соображениям вероятность рассеяния электронов и соответствующая ВАХ должны иметь вид, показанный на рис. 2б.

## 3 Ход работы

### 3.А Динамический режим работы

Включим динамический режим и установим напряжение накала лампы равное  $(3.07 \pm 0.01)$  В.

Подкручивая ручкой фазу, сведём прямой и обратной ход характеристик.

Измерим напряжение между сеткой и катодом, которое соответствует максимуму, минимуму характеристик и пробую тиратрона. Ноль напряжения определяем при заземлении входа.

Повторим измерения для напряжение накала лампы  $(2.88 \pm 0.01)$  В.

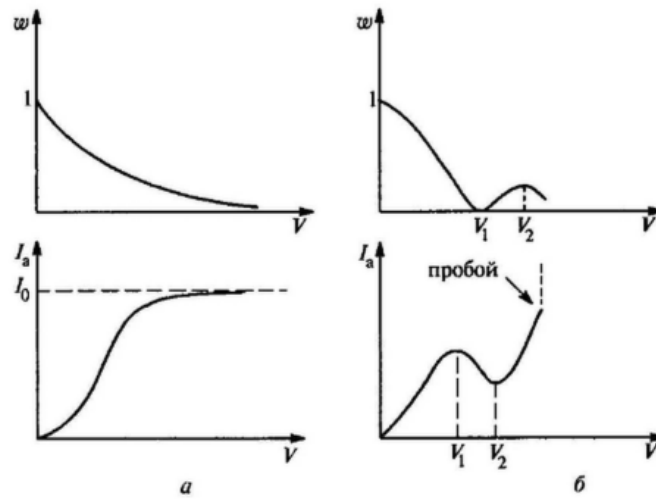
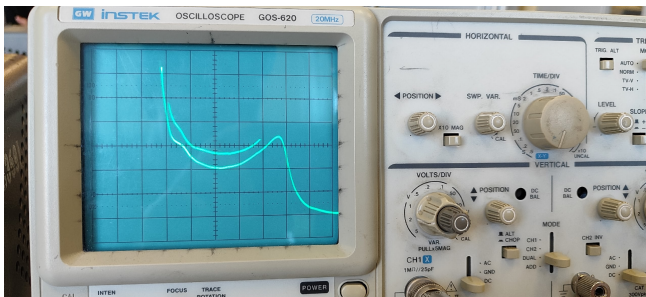
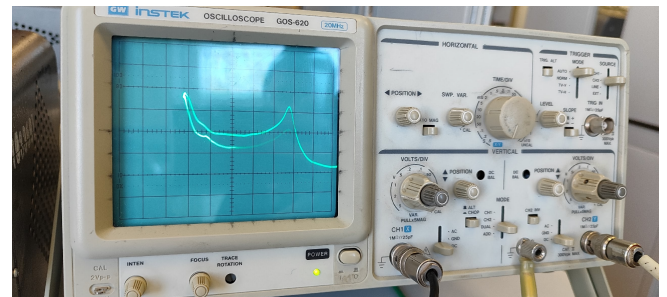


Рис. 2: Вероятность рассеяния электрона атомом инертного газа и ВАХ тиратрона при классическом (а) и квантовом (б) рассмотрении



(a)  $U_{\text{нак}} = (3.07 \pm 0.01) \text{ В}$ .



(b)  $U_{\text{нак}} = (2.88 \pm 0.01) \text{ В}$ .

Рис. 3: ВАХ тиратрона

$U_{\text{накала}}, \text{В}$	$V_{\text{max}}, \text{В}$	$V_{\text{min}}, \text{В}$	$V_{\text{пробоя}}, \text{В}$
$3.07 \pm 0.01$	$3.0 \pm 0.4$	$8 \pm 1$	$11.6 \pm 0.4$
$2.88 \pm 0.03$	$2.4 \pm 0.4$	$8 \pm 2$	$11.6 \pm 0.4$

Таблица 1: Результаты измерений в динамическом режиме

По результатам измерений в динамическом режиме рассчитаем размер электронной оболочки атома инертного газа, заполняющего лампу по формуле (7), исключив  $U_0$ .

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}, \quad \sigma_l = l \frac{\sigma_{E_2} + \sigma_{E_1}}{2(E_2 - E_1)}$$

Оценим глубину потенциальной ямы по формуле (8).

По результатам напряжения пробоя, оценим потенциал ионизации инертного газа. Наиболее близкое значение у ксенона – 12.1 эВ

$U_{\text{нак}}, \text{В}$	$l, \text{Å}$	$U_0, \text{эВ}$	$U_{\text{проб}}, \text{эВ}$
$3.070 \pm 0.010$	$3.2 \pm 0.4$	$-1 \pm 1$	$11.6 \pm 0.4$
$2.88 \pm 0.03$	$3.0 \pm 0.6$	$-2 \pm 2$	$11.6 \pm 0.4$

Таблица 2: Результаты динамического способа

### 3.В Статический режим работы

Перейдем к измерению ВАХа в статическом режиме.

Ток на аноде определяется по показанию вольтметра ( $V_{\text{анод}}$ ), делённому на сопротивление 100 кОм, которое включено в цепь анода.  $\sigma_{V_{\text{анод}}} = 0.01$  мВ.

Построим графики  $V_{\text{анод}} = f(V_{\text{катод}})$ .

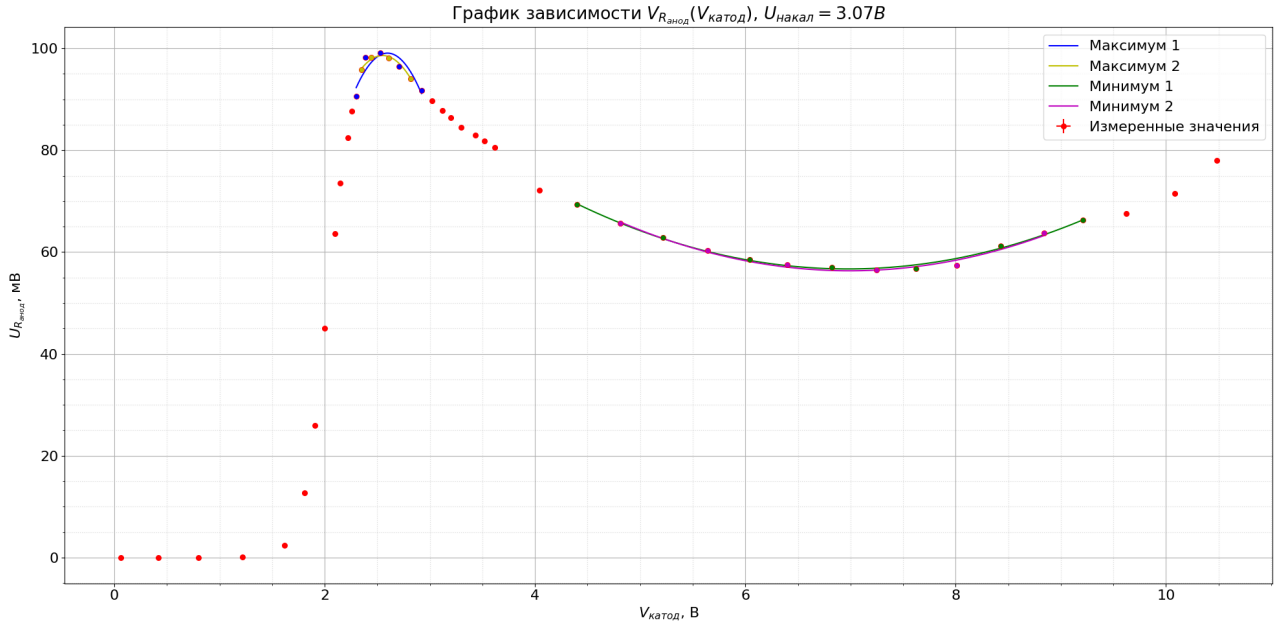


Рис. 4: Результаты статического режима для  $U_{\text{накала}} = 3.07V$

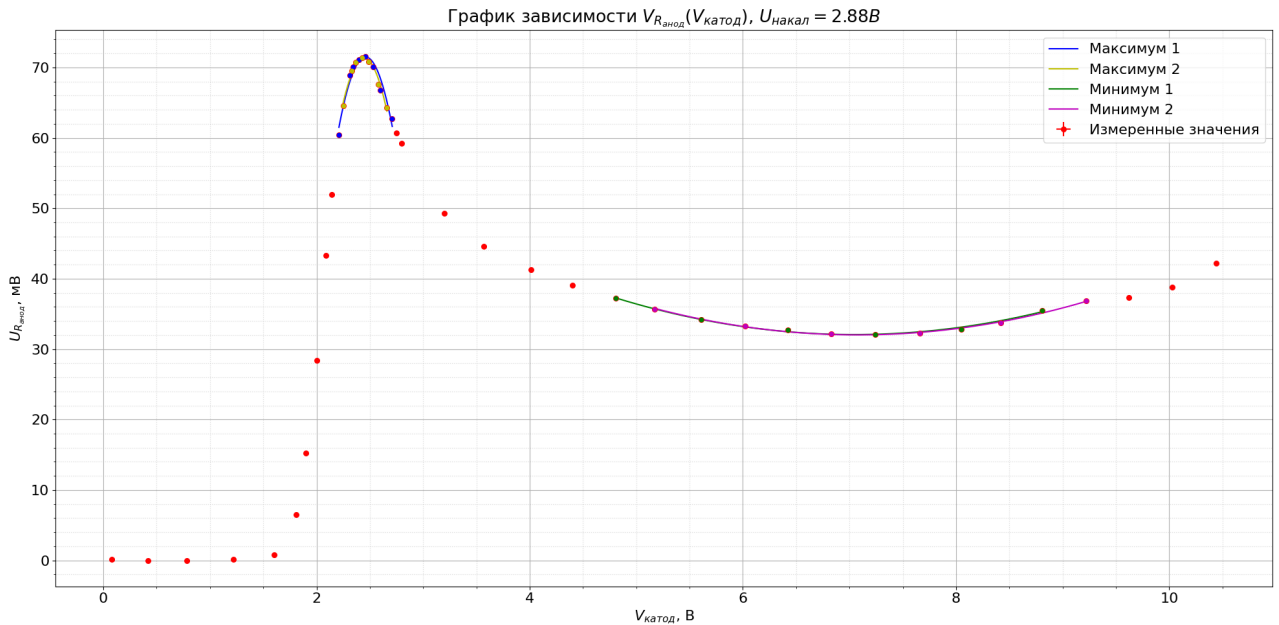


Рис. 5: Результаты статического режима для  $U_{\text{накала}} = 2.88V$

Аппроксимируем пики графиков двумя параблами – по чётным и нечётным точкам пика. За результат определения  $V_{\text{катод}}$  возьмём среднее для двух парабол. Погрешность – разность между двумя результатами.

Оценим при каких напряжениях должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов для  $n = 2, 3$

$$k_2 l = \sqrt{\frac{2m(E_n + U_0)}{\hbar^2}} l = n\pi \Rightarrow E_n = -U_0 + \frac{\hbar^2 n^2}{8ml^2}$$

$U_{\text{накала}}, \text{В}$	$V_{\text{max}}, \text{В}$	$V_{\text{min}}, \text{В}$
$3.07 \pm 0.01$	$2.57 \pm 0.05$	$6.982 \pm 0.012$
$2.88 \pm 0.03$	$2.45 \pm 0.01$	$7.06 \pm 0.04$

Таблица 3: Результаты измерений в статическом режиме

$U_{\text{накала}}, \text{В}$	$l, \text{\AA}$	$U_0, \text{эВ}$
$3.07 \pm 0.01$	$3.27 \pm 0.02$	$0.95 \pm 0.09$
$2.88 \pm 0.03$	$3.20 \pm 0.01$	$1.23 \pm 0.04$

Таблица 4: Результаты статического режима

Для оценки возьмём, как  $U_0 = (-1.1 \pm 0.2) \text{ эВ}$  и  $l = (3.23 \pm 0.04) \text{ \AA}$  – средние значения.

$$E_2 = (13.3 \pm 0.4) \text{ эВ}, \quad E_3 = (31.4 \pm 0.8) \text{ эВ}$$

Следующие максимумы выше потенциала ионизации, поэтому мы не можем их наблюдать.

Найдём зависимость вероятности рассеяния электронов от энергии с точностью до константы  $C$  по формуле (9):

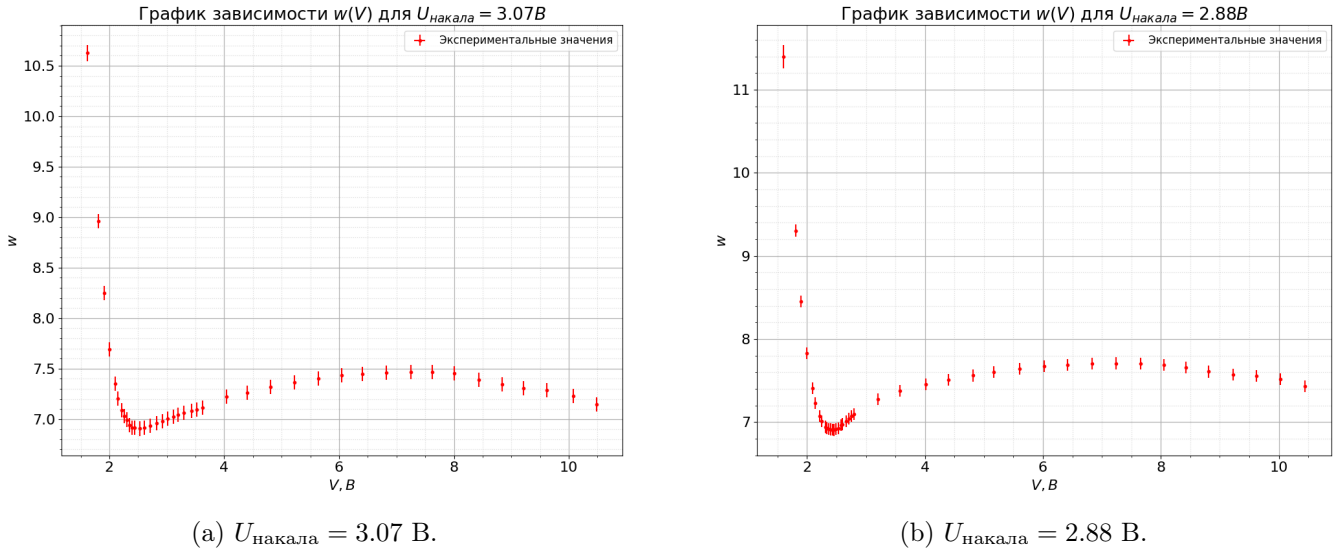


Рис. 6: Зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии

## 4 Заключение

В ходе работы был изучен ВАХ тиратрона в динамическом и статическом режимах при различных напряжениях накала.

С помощью измерений ВАХа тиратрона удалось установить, какой инертный газ использовался в работе: по напряжению пробоя была получена энергия ионизации газа, которая оказалась примерно равна энергии ионизации ксенона - 12.1 эВ.

Также удалось оценить размер электронной оболочки разными методами, в среднем полученный результат  $l = (3.23 \pm 0.04) \text{ \AA}$ , что приблизительно соответствует значению для ксенона  $l = 2.80 \text{ \AA}$ . А также глубину потенциальной ямы  $U_0 = (-1.1 \pm 0.2) \text{ эВ}$ . Полученное значение показывает, что для подсчёта истинного значения требуется применения другой модели.

Определена зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии для разных напряжений накала.

$U_{\text{нак}}, \text{В}$	$l, \text{Å}$	$U_0, \text{эВ}$	$U_{\text{проб}}, \text{эВ}$
$3.070 \pm 0.010$	$3.2 \pm 0.4$	$-1 \pm 1$	$11.6 \pm 0.4$
$2.88 \pm 0.03$	$3.0 \pm 0.6$	$-2 \pm 2$	$11.6 \pm 0.4$

Таблица 5: Результаты динамического способа

$U_{\text{накала}}, \text{В}$	$l, \text{Å}$	$U_0, \text{эВ}$
$3.07 \pm 0.01$	$3.27 \pm 0.02$	$0.95 \pm 0.09$
$2.88 \pm 0.03$	$3.20 \pm 0.01$	$1.23 \pm 0.04$

Таблица 6: Результаты статического режима

## 5 Приложение

$V_{\text{катод}}, \text{В}$	$V_{\text{анод}}, \text{мВ}$
0.06	0.0
0.42	0.0
0.80	0.0
1.22	0.1
1.62	2.4
1.81	12.7
1.91	25.9
2.00	45.1
2.10	63.6
2.15	73.5
2.22	82.5
2.26	87.7
2.30	90.6
2.35	95.8
2.39	98.2
2.44	98.3
2.53	99.1
2.61	98.1
2.71	96.4
2.82	94.1
2.92	91.8
3.02	89.7
3.12	87.8
3.20	86.4
3.30	84.5
3.43	83.0
3.52	81.8
3.62	80.5
4.04	72.1
4.40	69.3
4.81	65.6
5.22	62.8
5.64	60.3
6.04	58.5
6.40	57.5
6.82	57.0
7.25	56.5
7.62	56.7
8.01	57.4
8.43	61.2
8.84	63.8
9.21	66.3
9.62	67.6
10.08	71.5
10.48	78.0

$V_{\text{катод}}, \text{В}$	$V_{\text{анод}}, \text{мВ}$
0.08	0.1
0.42	0.0
0.78	0.0
1.22	0.1
1.60	0.8
1.81	6.5
1.90	15.2
2.00	28.4
2.09	43.3
2.14	52.0
2.21	60.4
2.25	64.6
2.31	68.9
2.33	69.5
2.34	70.1
2.37	70.7
2.40	71.1
2.43	71.4
2.46	71.6
2.49	70.8
2.53	70.1
2.58	67.6
2.60	66.8
2.66	64.3
2.71	62.7
2.75	60.7
2.80	59.2
3.20	49.3
3.57	44.6
4.01	41.3
4.40	39.1
4.81	37.2
5.17	35.7
5.61	34.2
6.02	33.3
6.42	32.7
6.83	32.2
7.24	32.1
7.66	32.3
8.05	32.8
8.42	33.7
8.81	35.5
9.22	36.9
9.62	37.3
10.03	38.8
10.44	42.2

Таблица 7: Результаты измерений для статического метода для  $U_{\text{накала}} = 3.07\text{В}$  и  $U_{\text{накала}} = 2.88\text{В}$