

Лабораторная работа 1.3

Изучение рассеяния медленных электронов на атомах (эффект Рамзауэра)

Васильев Михаил Владимирович
Студент 3 курса РТ

(Московский физико-технический институт)
(Dated: 25 октября 2021 г.)

Исследуется энергетическая зависимость вероятности рассеяния электронов атомами ксенона, определяются энергии электронов, при которых наблюдается "просветление" ксенона, и оценивается размер его внешней электронной оболочки.

Оборудование: Тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, осциллограф, стабилизированный БНС.

I. Теоретическая часть.

Вводится понятие эффективного сечения реакции $\sigma = \frac{N}{nv}$, характеризующая вероятность перехода системы из двух сталкивающихся частиц в определенное состояние, в результате их рассеяния. Знаменатель равен плотности потока всех рассеиваемых частиц, числитель - число таких переходов. К. Рамзауэр исследовал зависимость поперечных сечений упругого рассеяния электронов (с энергией до 10 ЭВ) на атомах аргона. В результате этих исследований 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

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

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:

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

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

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

Минимум последнего выражения отвечает квантовому аналогу просветления оптики, так как при выпол-

нении условия

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

коэффициент прохождения частицы над ямой становится равным единице, то есть достигает своего максимального значения. Отметим, что условие (*) легко получить, рассматривая интерференцию электронов волн де Бройля в атоме:

- Условие первого интерференционного максимума:

$$2l = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}}. \quad (1)$$

- Условие первого интерференционного минимума:

$$2l = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}}. \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (1, 2) можно получить:

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

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 (1, 2), можно рассчитать эффективную глубину потенциальной ямы атома:

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

Согласно квантовой механике зависимость вероятности рассеяния электрона от его энергии можно определить из соотношения:

$$w(U) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I(U)}{I_0}, \quad (5)$$

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

II. Экспериментальная установка

Принципиальная схема установки для изучения эффекта Рамзауэра приведена на рис.1. На лампу Л подаётся синусоидальное напряжение частоты 50 Гц от источника питания ГЗ4, БНС - стабилизированный блок накала лампы; исследуемый сигнал подаётся на электронный осциллограф (ЭО); цифрами обозначены номера ножек лампы.

Реально на экране ЭО удаётся надёжно наблюдать лишь один минимум в сечении рассеивания электронов и следующий за ним максимум. Дело в том, что уже при $n = 2$ происходит пробой.

Схема экспериментальной установки, изображённой на рис.3 в нашей работе конструктивно осуществлена следующим образом. Лампа-тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполнена инертным газом, расположена на БИП. Напряжение к электродам лампы подаётся от источников питания, находящихся на корпусе прибора. Регулировка напряжения и выбор режима работы установки производится при помощи ручек управления на рис.2.

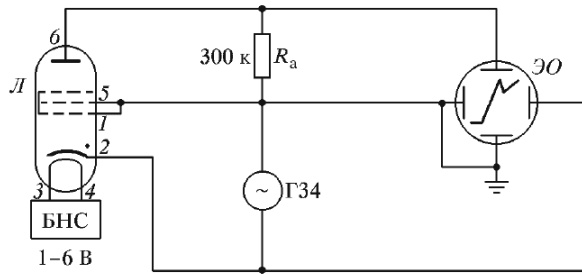


Рис. 1: Схема включения тиратрона (Л), модулирующего переменного напряжения и осциллографа (ЭО) для изучения эффекта Рамзауэра. БНС — стабилизированный блок накала электрода; цифрами обозначены номера ножек лампы

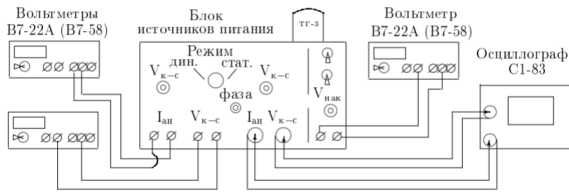


Рис. 2: Блок-схема экспериментальной установки

В данной работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом. Схематическое изображение тиратрона и его конструкция приведены на рис. 3. Электроны, эмитируемые катодом тиратрона, ускоряются напряжением V , приложенным между катодом и ближайшей к нему сеткой. Затем электроны рассеивают-

ся на атомах инертного газа (ксенона). Все сетки 1, 2, 3 соединены между собой и имеют одинаковый потенциал, примерно равный потенциалу анода 6. Поэтому между первой сеткой 1 и анодом практически нет поля. Рассеянные электроны отклоняются в сторону и уходят на сетку, а оставшаяся часть электронов достигает анода и создает анодный ток I_a . Таким образом, поток электронов $N(x)$ на расстоянии x от ускоряющей сетки (т.е. число электронов, проходящих через поперечное сечение лампы в точке в единицу времени) уменьшается с ростом x от начального значения N_0 у катода (в точке $x = 0$) до некоторого значения N_a у анода (в точке $x = L$).

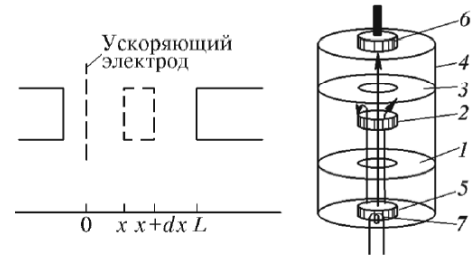


Рис. 3: Схематическое изображение тиратрона (слева) и его конструкция (справа): 1, 2, 3 — сетки; 4 — внешний металлический цилиндр; 5 — катод; 6 — анод; 7 — накаливаемая спираль

III. Методика измерений

В эксперименте будем исследовать ВАХ двумя методами: статическими и динамическим. В статическом методе будем снимать показания напряжения с вольтметра и амперметра при различных значениях напряжения анода, в динамическом методе сразу используем картину на осциллографе.

IV. Основные результаты и их обсуждение.

Имеем 2 таблицы основным результатов. По данным строятся вольт-амперные характеристики для синего $U_n = 2.63$ В и красного $U_n = 2.89$ В и зависимость вероятности рассеивания от напряжения. Определяем по напряжению пробоя $U_p = 12.1$ В, что лампа заполнена ксеноном. Определим глубину потенциальной ямы $U_{я} = 2.64 \pm 0,05$ эВ.

V. Заключение.

Были доказаны доказаны квантовые свойства света на эффекте Рамзауэра, построены ВАХ и зависимость вероятности рассеивания от напряжения, был определён инертный газ в лампе. Выводы хорошо согласуются с теорией.

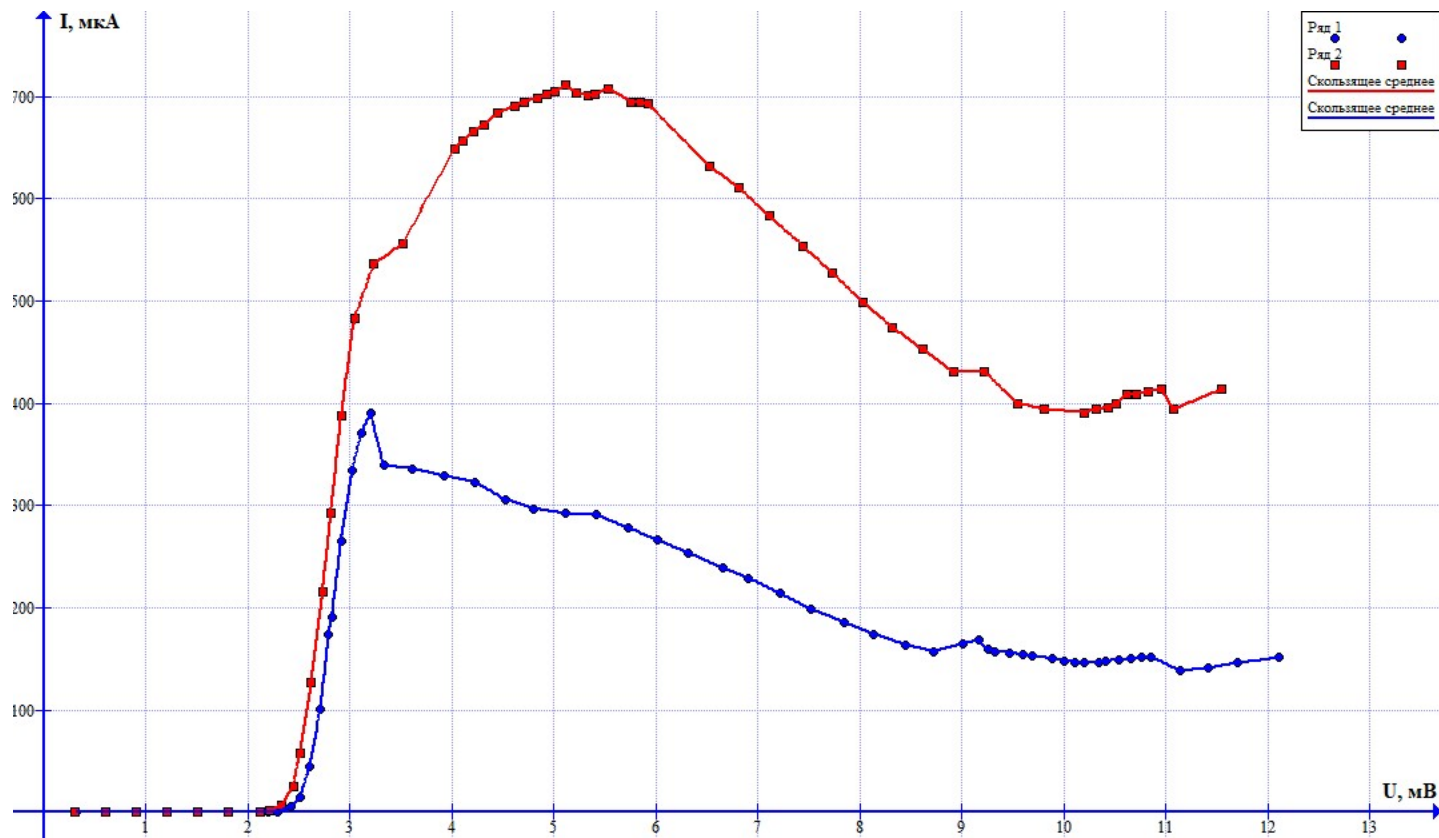


Рис. 4: ВАХ при $U_n = 2.63$ В (красный) и при $U_n = 2.89$ В (синий)

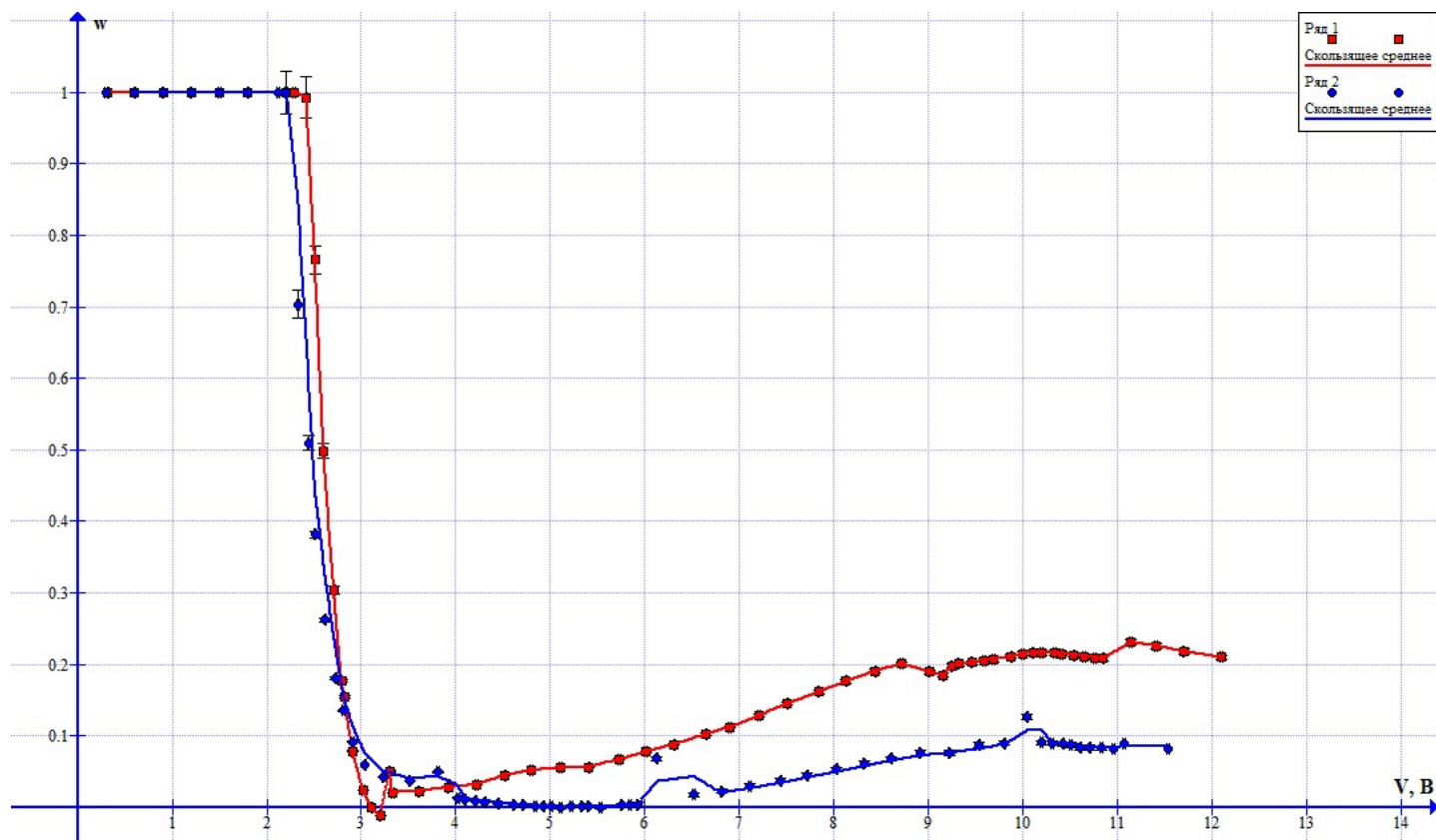


Рис. 5: Зависимость вероятности рассеивания
электрона от напряжения анода ω при $U_n = 2.63$ В
(красный) и при $U_n = 2.89$ В (синий)

ВАХ и ω при $U_H = 2.63$ В				
V_i , мВ	V , В	I , мкА	ω	$\Delta\omega$
0	0,32	0	1	0
0	0,6	0	1	0
0	0,9	0	1	0
0	1,2	0	1	0
0	1,5	0	1	0
0	1,8	0	1	0
0	2,2	0	1	0
0	2,29	0	1	0
0,53	2,42	5,3	0,992639	0,029633
1,4	2,51	14	0,765688	0,019382
4,4	2,6	44	0,498134	0,009944
10,1	2,71	101	0,303991	0,004888
17,4	2,79	174	0,176903	0,002395
19,1	2,82	191	0,155124	0,002033
26,5	2,91	265	0,078615	0,00091
33,5	3,02	335	0,023848	0,00025
37,1	3,11	371	0	0
39	3,2	390	-0,01167	-0,00011
29,8	3,3	298	0,051194	0,000564
33,9	3,33	339	0,021075	0,00022
33,6	3,61	336	0,023152	0,000242
32,9	3,92	329	0,028071	0,000296
32,3	4,22	323	0,032371	0,000345
30,6	4,52	306	0,045004	0,000491
29,7	4,8	297	0,051979	0,000574
29,2	5,11	292	0,055946	0,000622
29,1	5,41	291	0,056747	0,000632
27,8	5,73	278	0,067425	0,000765
26,6	6,01	266	0,077735	0,000898
25,4	6,31	254	0,088521	0,001042
23,9	6,65	239	0,102743	0,001239
22,9	6,9	229	0,112729	0,001381
21,4	7,21	214	0,128557	0,001616
19,9	7,51	199	0,145537	0,001879
18,6	7,84	186	0,161321	0,002134
17,43	8,13	174,3	0,176501	0,002388
16,4	8,44	164	0,190733	0,002635
15,7	8,72	157	0,200924	0,002817
16,5	9,01	165	0,189312	0,00261
16,8	9,16	168	0,185102	0,002536
15,9	9,25	159	0,197967	0,002763
15,7	9,32	157	0,200924	0,002817
15,6	9,46	156	0,202417	0,002844
15,4	9,59	154	0,205432	0,002898
15,3	9,69	153	0,206954	0,002926
15	9,88	150	0,211581	0,003011
14,8	10	148	0,214717	0,003069
14,7	10,11	147	0,216301	0,003099
14,7	10,2	147	0,216301	0,003099
14,7	10,34	147	0,216301	0,003099
14,8	10,41	148	0,214717	0,003069
14,9	10,54	149	0,213144	0,00304
15	10,65	150	0,211581	0,003011
15,15	10,76	151,5	0,209256	0,002968
15,2	10,85	152	0,208486	0,002954
13,8	11,14	138	0,231063	0,003378
14,1	11,41	141	0,226038	0,003282
14,58	11,7	145,8	0,218216	0,003135
15,1	12,1	151	0,210029	0,002983

ВАХ и ω при $U_H = 2.89$ В				
V_i , мВ	V , В	I , мкА	ω	$\Delta\omega$
0	0,3	0	1	0
0	0,6	0	1	0
0	0,9	0	1	0
0	1,2	0	1	0
0	1,5	0	1	0
0	1,8	0	1	0
0	2,12	0	1	0
0,1	2,21	1	0,999494	0,029633
0,7	2,33	7	0,703312	0,019382
2,5	2,44	25	0,509558	0,009944
5,8	2,51	58	0,381466	0,004888
12,7	2,62	127	0,262174	0,002395
21,6	2,73	216	0,181339	0,002033
29,2	2,81	292	0,135452	0,00091
38,8	2,91	388	0,092187	0,00025
48,3	3,04	483	0,058852	0
53,6	3,23	536	0,043004	-0,00011
55,6	3,51	556	0,037428	0,000564
51,4	3,81	514	0,049383	0,00022
64,9	4,02	649	0,013887	0,000242
65,7	4,1	657	0,012023	0,000296
66,6	4,21	666	0,009952	0,000345
67,3	4,31	673	0,00836	0,000491
68,4	4,45	684	0,005893	0,000574
69,1	4,61	691	0,004343	0,000622
69,5	4,71	695	0,003464	0,000632
69,9	4,84	699	0,002591	0,000765
70,2	4,93	702	0,001939	0,000898
70,5	5,01	705	0,00129	0,001042
71,1	5,11	711	0	0,001239
70,4	5,22	704	0,001506	0,001381
70,1	5,33	701	0,002156	0,001616
70,2	5,4	702	0,001939	0,001879
70,8	5,53	708	0,000644	0,002134
69,5	5,75	695	0,003464	0,002388
69,4	5,84	694	0,003683	0,002635
69,3	5,92	693	0,003903	0,002817
45,3	6,13	453	0,068612	0,00261
63,2	6,52	632	0,017927	0,002536
61,1	6,81	611	0,023071	0,002763
58,3	7,11	583	0,030211	0,002817
55,4	7,44	554	0,037977	0,002844
52,8	7,72	528	0,045293	0,002898
49,9	8,03	499	0,053891	0,002926
47,4	8,32	474	0,061715	0,003011
45,3	8,61	453	0,068612	0,003069
43,1	8,91	431	0,076189	0,003099
43,1	9,22	431	0,076189	0,003099
40	9,54	400	0,087551	0,003099
39,4	9,81	394	0,089851	0,003069
30,9	10,05	309	0,126839	0,00304
39,1	10,2	391	0,091014	0,003011
39,4	10,31	394	0,089851	0,002968
39,6	10,43	396	0,08908	0,002954
39,9	10,51	399	0,087932	0,003378
40,9	10,61	409	0,084164	0,003282
40,9	10,71	409	0,084164	0,003135
41,2	10,83	412	0,083052	0,002983
41,4	10,96	414	0,082315	0
39,4	11,07	394	0,089851	0
41,4	11,54	414	0,082315	0