

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 ТГ3-01/1.3Б, 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. Рамзаэр исследовал зависимость поперечных сечений упрогого 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 выполн-

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 Броиля 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 Г34, БНС - стабилизированный блок накала лампы; исследуемый сигнал подаётся на электронный осциллограф (ЭО); цифрами обозначены номера ножек лампы.

Реально на экране ЭО удаётся 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.

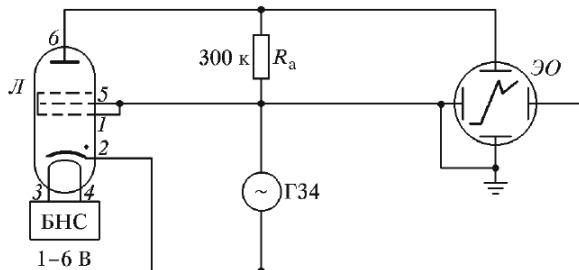


Рис. 1: Схема включения тиратрона (Л), модулирующего переменного напряжения и осциллографа (ЭО) для изучения эффекта Рамзауэра. БНС – стабилизированный блок накала электрода; цифрами обозначены номера ножек лампы

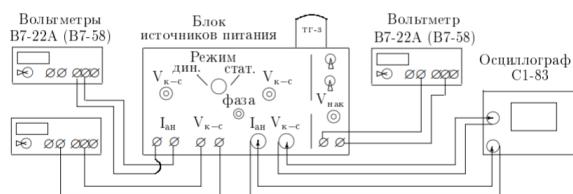


Рис. 2: Блок-схема экспериментальной установки

В данной работе для изучения эффекта Рамзауэра используется тиратрон Т 3-01/1.3Б, 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 рассеиваются

на атомах инертного газа (ксенона). Все сетки 1, 2, 3 соединены между собой и имеют одинаковый потенциал, примерно равный потенциальному 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 $x = L$).

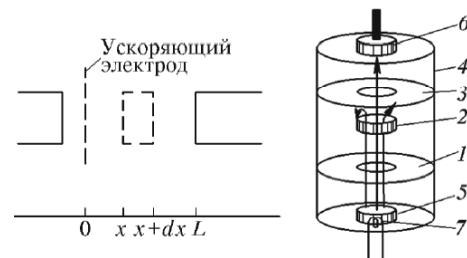


Рис. 3: Схематическое изображение тиратрона (слева) и его конструкция (справа): 1, 2, 3 – сетки; 4 – внешний металлический цилиндр; 5 – катод; 6 – анод; 7 – накаливаемая спираль

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 $U_h = 2.63$ В и красного $U_h = 2.89$ В и зависимость вероятности рассеивания от напряжения. Определяем по напряжению пробоя $U_p = 12.1$ В, что лампа заполнена ксеноном. Определим глубину потенциальной ямы $U_y = 2.64 \pm 0,05$ эВ.

V. Заключение.

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

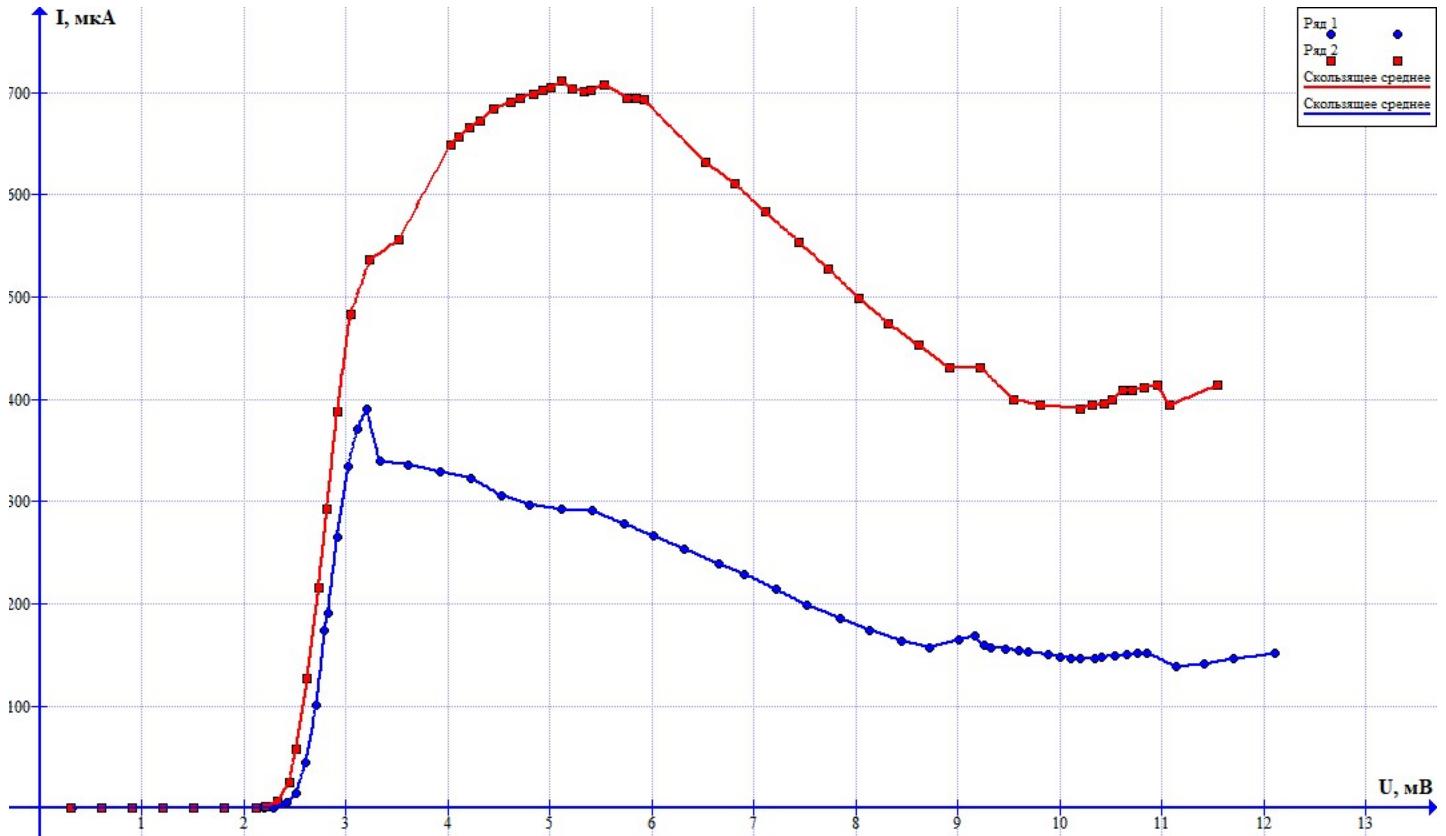


Рис. 4: ВАХ при $U_n = 2.63$ В (красный) и при $U_n = 2.89$ В (синий)

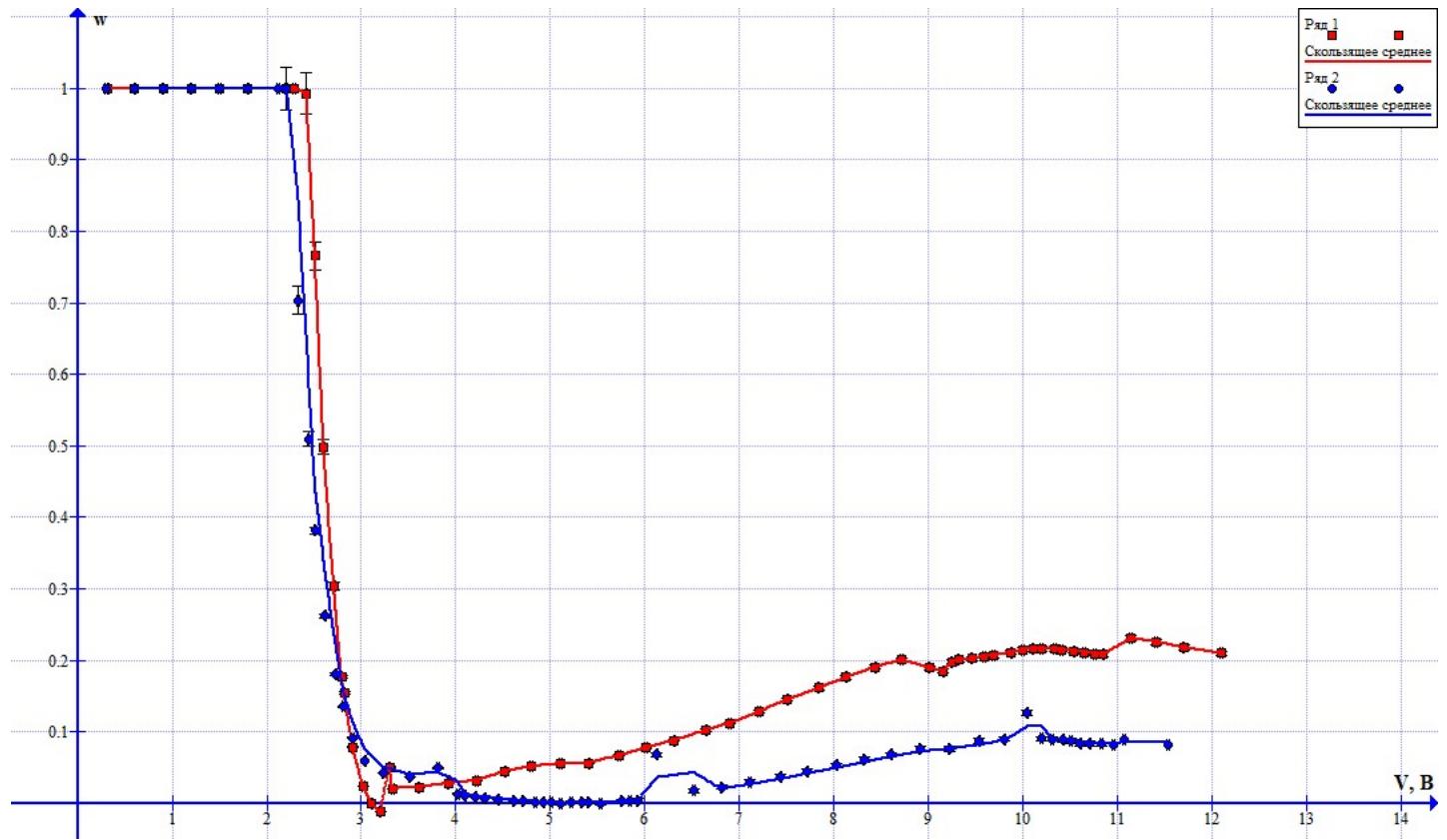


Рис. 5: Зависимость вероятности рассеяния
электрона от напряжения анода ω при $U_h = 2.63$ В
(красный) и при $U_h = 2.89$ В (синий)

BAX и ω при $U_h = 2.63$ В					BAX и ω при $U_h = 2.89$ В				
Vi, мВ	V, В	I, мкА	ω	$\Delta\omega$	Vi, мВ	V, В	I, мкА	ω	$\Delta\omega$
0	0,32	0	1	0	0	0,3	0	1	0
0	0,6	0	1	0	0	0,6	0	1	0
0	0,9	0	1	0	0	0,9	0	1	0
0	1,2	0	1	0	0	1,2	0	1	0
0	1,5	0	1	0	0	1,5	0	1	0
0	1,8	0	1	0	0	1,8	0	1	0
0	2,2	0	1	0	0	2,12	0	1	0
0	2,29	0	1	0	0,1	2,21	1	0,999494	0,029633
0,53	2,42	5,3	0,992639	0,029633	0,7	2,33	7	0,703312	0,019382
1,4	2,51	14	0,765688	0,019382	2,5	2,44	25	0,509558	0,009944
4,4	2,6	44	0,498134	0,009944	5,8	2,51	58	0,381466	0,004888
10,1	2,71	101	0,303991	0,004888	12,7	2,62	127	0,262174	0,002395
17,4	2,79	174	0,176903	0,002395	21,6	2,73	216	0,181339	0,002033
19,1	2,82	191	0,155124	0,002033	29,2	2,81	292	0,135452	0,00091
26,5	2,91	265	0,078615	0,00091	38,8	2,91	388	0,092187	0,00025
33,5	3,02	335	0,023848	0,00025	48,3	3,04	483	0,058852	0
37,1	3,11	371	0	0	53,6	3,23	536	0,043004	-0,00011
39	3,2	390	-0,01167	-0,00011	55,6	3,51	556	0,037428	0,000564
29,8	3,3	298	0,051194	0,000564	51,4	3,81	514	0,049383	0,00022
33,9	3,33	339	0,021075	0,00022	64,9	4,02	649	0,013887	0,000242
33,6	3,61	336	0,023152	0,000242	65,7	4,1	657	0,012023	0,000296
32,9	3,92	329	0,028071	0,000296	66,6	4,21	666	0,009952	0,000345
32,3	4,22	323	0,032371	0,000345	67,3	4,31	673	0,00836	0,000491
30,6	4,52	306	0,045004	0,000491	68,4	4,45	684	0,005893	0,000574
29,7	4,8	297	0,051979	0,000574	69,1	4,61	691	0,004343	0,000622
29,2	5,11	292	0,055946	0,000622	69,5	4,71	695	0,003464	0,000632
29,1	5,41	291	0,056747	0,000632	69,9	4,84	699	0,002591	0,000765
27,8	5,73	278	0,067425	0,000765	70,2	4,93	702	0,001939	0,000898
26,6	6,01	266	0,077735	0,000898	70,5	5,01	705	0,00129	0,001042
25,4	6,31	254	0,088521	0,001042	71,1	5,11	711	0	0,001239
23,9	6,65	239	0,102743	0,001239	70,4	5,22	704	0,001506	0,001381
22,9	6,9	229	0,112729	0,001381	70,1	5,33	701	0,002156	0,001616
21,4	7,21	214	0,128557	0,001616	70,2	5,4	702	0,001939	0,001879
19,9	7,51	199	0,145537	0,001879	70,8	5,53	708	0,000644	0,002134
18,6	7,84	186	0,161321	0,002134	69,5	5,75	695	0,003464	0,002388
17,43	8,13	174,3	0,176501	0,002388	69,4	5,84	694	0,003683	0,002635
16,4	8,44	164	0,190733	0,002635	69,3	5,92	693	0,003903	0,002817
15,7	8,72	157	0,200924	0,002817	45,3	6,13	453	0,068612	0,00261
16,5	9,01	165	0,189312	0,00261	63,2	6,52	632	0,017927	0,002536
16,8	9,16	168	0,185102	0,002536	61,1	6,81	611	0,023071	0,002763
15,9	9,25	159	0,197967	0,002763	58,3	7,11	583	0,030211	0,002817
15,7	9,32	157	0,200924	0,002817	55,4	7,44	554	0,037977	0,002844
15,6	9,46	156	0,202417	0,002844	52,8	7,72	528	0,045293	0,002898
15,4	9,59	154	0,205432	0,002898	49,9	8,03	499	0,053891	0,002926
15,3	9,69	153	0,206954	0,002926	47,4	8,32	474	0,061715	0,003011
15	9,88	150	0,211581	0,003011	45,3	8,61	453	0,068612	0,003069
14,8	10	148	0,214717	0,003069	43,1	8,91	431	0,076189	0,003099
14,7	10,11	147	0,216301	0,003099	43,1	9,22	431	0,076189	0,003099
14,7	10,2	147	0,216301	0,003099	40	9,54	400	0,087551	0,003099
14,7	10,34	147	0,216301	0,003099	39,4	9,81	394	0,089851	0,003069
14,8	10,41	148	0,214717	0,003069	30,9	10,05	309	0,126839	0,00304
14,9	10,54	149	0,213144	0,00304	39,1	10,2	391	0,091014	0,003011
15	10,65	150	0,211581	0,003011	39,4	10,31	394	0,089851	0,002968
15,15	10,76	151,5	0,209256	0,002968	39,6	10,43	396	0,08908	0,002954
15,2	10,85	152	0,208486	0,002954	39,9	10,51	399	0,087932	0,003378
13,8	11,14	138	0,231063	0,003378	40,9	10,61	409	0,084164	0,003282
14,1	11,41	141	0,226038	0,003282	40,9	10,71	409	0,084164	0,003135
14,58	11,7	145,8	0,218216	0,003135	41,2	10,83	412	0,083052	0,002983
15,1	12,1	151	0,210029	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