

Лабораторная работа 5.1.3

Эффект Рамзауэра

Симанкович Александр
Б01-108

30.11.2023

Аннотация

В работе экспериментально подтверждается эффект Рамзауэра. Определен поперечный размер атома ксенона $l = (3.1 \pm 0.2) \text{ \AA}$. Определены значения глубины потенциальной ямы атома $U_0 = (1.4 \pm 0.4) \text{ эВ}$, энергии ионизации $I = (12.6 \pm 0.5) \text{ эВ}$.

Теоретическое введение

Эффект Рамзауэра

При изучении зависимости сечения рассеяния электронов σ на атомах инертного газа от энергии электронов можно обнаружить, что сечение рассеяния не подчиняется рассуждениям в рамках классической физики.

При уменьшении энергии налетающих электронов сечение рассеяния должно расти. Однако, при достижении некоторой энергии (для аргона $\sim 16 \text{ эВ}$) наблюдается спад, причем существует энергия (для аргона $\sim 1 \text{ эВ}$), при которой σ доходит почти до нуля. После прохождения этой точки опять наблюдается рост. Данный эффект называется *эффектом Рамзауэра*.

Обоснование этому эффекту дается в рамках квантовой механики. Внутри атома потенциальная энергия электрона U отлична от нуля:

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{mv'^2}{2} + U.$$

Рассматривая в приближении одномерной прямоугольной ямы шириной l получим коэффициент прохождения D :

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

где

$$k_1^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}, \quad k_2^2 = \frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}. \quad (1)$$

Перепишем D :

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

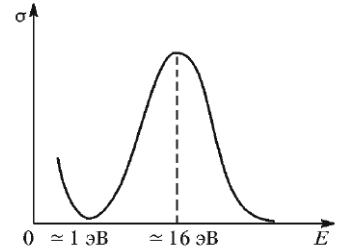


Рис. 1: Результаты измерения сечения рассеяния электронов в аргоне.

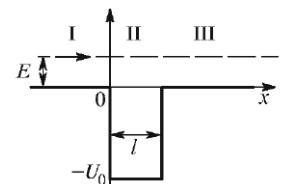


Рис. 2: Модель одномерной потенциальной ямы.

Тогда при $k_2 l = n\pi$ выполнено $D = 1$, то есть отражение отсутствует.

Перепишем условие минимума и запишем аналогичное условие максимума:

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

где E_1 – энергия в минимуме, E_2 – энергия в максимуме.

Из (3) следует:

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}, \quad U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1 \quad (4)$$

ВАХ тиратрона

Для изучения прохождения электронов через инертный газ используется тиратрон (см. рис. 3).

Электроны, подвергаясь термоэлектронной эмиссии, вылетают из катода и ускоряются электродом-сеткой 1. За ним расположены сетки, имеющие потенциалы одинаковые с сеткой 1 и анодом. Соответственно, между сеткой 1 и анодом поле отсутствует. Электроны, рассеянные на атомах, улавливаются сетками. Нерассеянные электроны регистрируются на аноде, создавая ток I_a .

Получим ВАХ тиратрона. Для суммарной поверхности Δ рассеивающих атомов в слое $S \times dx$ получим $\Delta = \Delta_a n_a S dx$, где Δ_a – площадь сечения одного атома. Тогда для количества рассеянных электронов dN выполнено:

$$-\frac{dN}{N(x)} = n_a \Delta_a w(V) dx, \quad (5)$$

где $w(V)$ – вероятность рассеяния при "соударении".

Проинтегрировав и используя $I = Ne$:

$$I_a = I_0 e^{-Cw(V)}, \quad C = L n_a \Delta_a. \quad (6)$$

Графики вероятности рассеяния и ВАХ для классического и квантового случая отображают принципиальное различие (см. рис. 4).

Исходя из (6) получим:

$$w(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a(V)}{I_0} \quad (7)$$

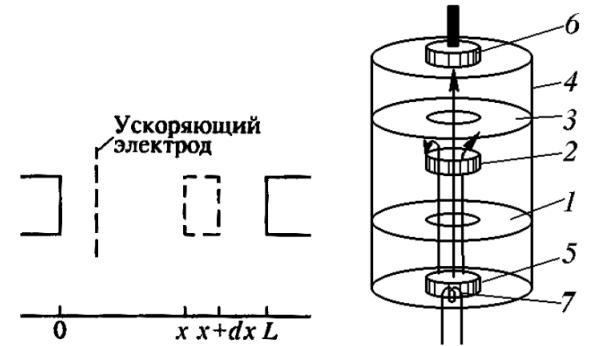


Рис. 3: Принципиальная схема (слева) и конструкция (справа) тиратрона.

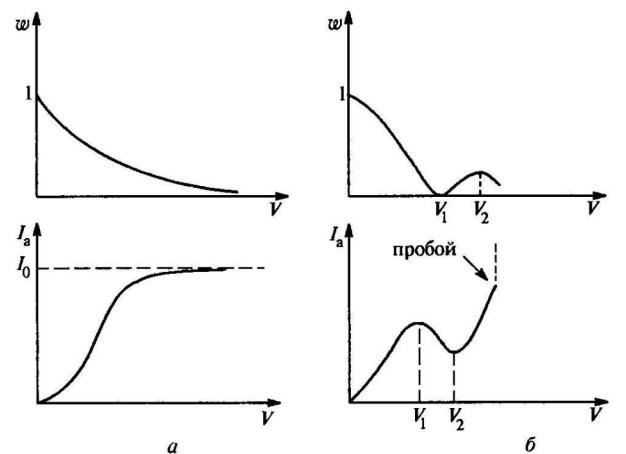


Рис. 4: ВАХ тиратрона по классическому (а) и квантовому (б) представлениям.

Методика эксперимента

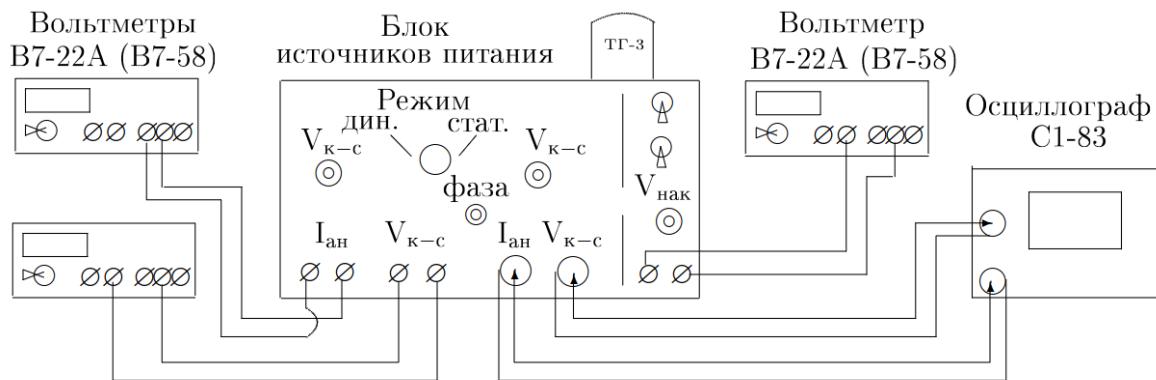


Рис. 5: Схема установки.

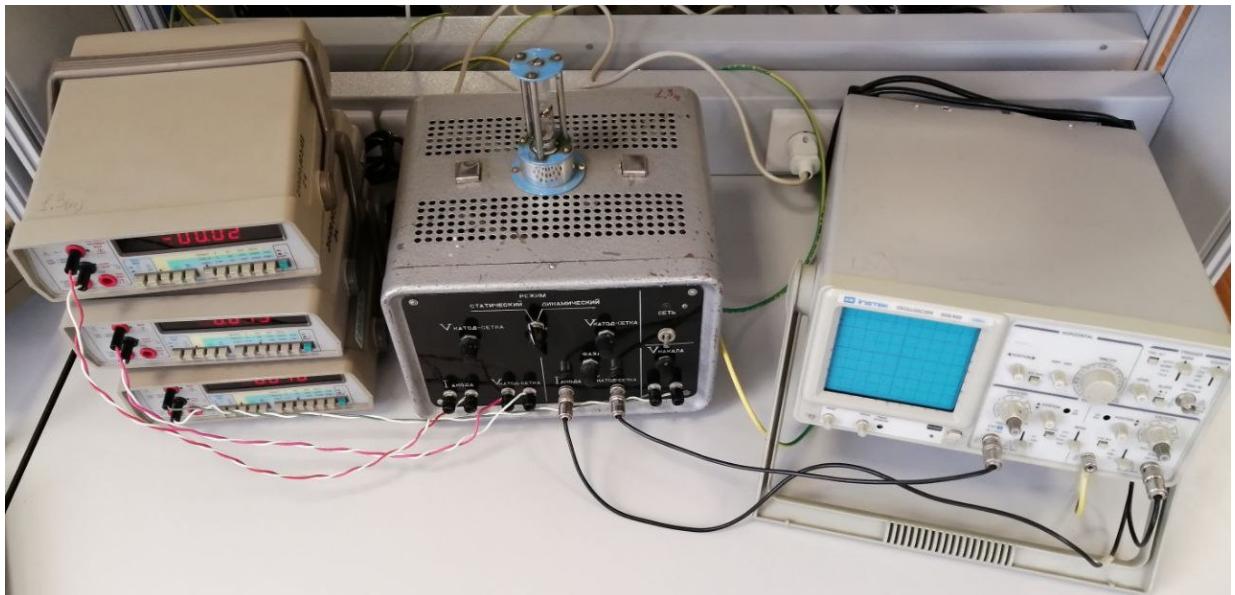


Рис. 6: Фотография установки.

Измерения проводятся с использованием тиаратрона ТГЗ-01/1.3Б.

В первой части работы измерения проводятся с помощью осциллографа. На графиках наблюдается зависимость напряжения $V_{анод}$ от напряжения катод-сетка $V_{катод}$. Напряжение $V_{анод}$ снимается с резистора $R = 100$ кОм, позволяя пересчитать его в ток анода $I_{анод}$.

Во второй части работы измерения проводятся статически, с помощью вольтметров. Данные измерения повышают точность эксперимента, избавляя от инерционных эффектов, которые возникают при использовании осциллографа.

На ВАХ тиаратрона также оказывает влияние магнитное поле, так как приводит к ускорению отклонения рассеянных электронов. Для демонстрации эффекта используется неодимовый магнит.

Результаты

Динамика

В соответствии с вышеописанной методикой получаем осциллограммы ВАХ тиаратрона.

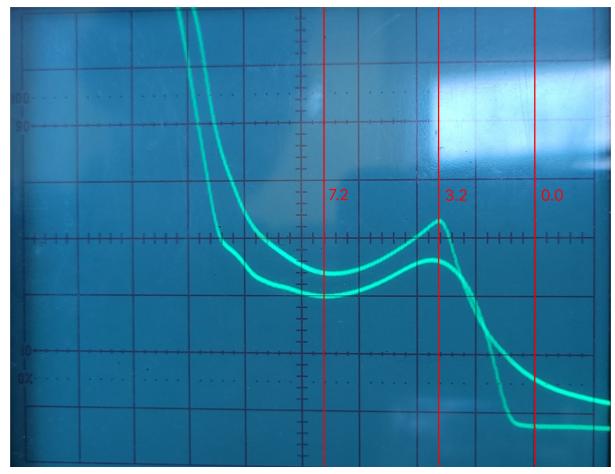
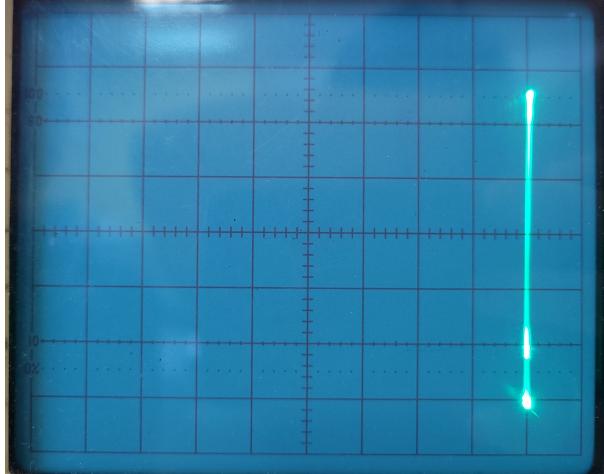


Рис. 7: Ноль (слева) и ВАХ тиаратрона (справа).

Из графиков определим: $V_{max} = (3.2 \pm 0.3)$ В, $V_{min} = (7.2 \pm 0.5)$ В.

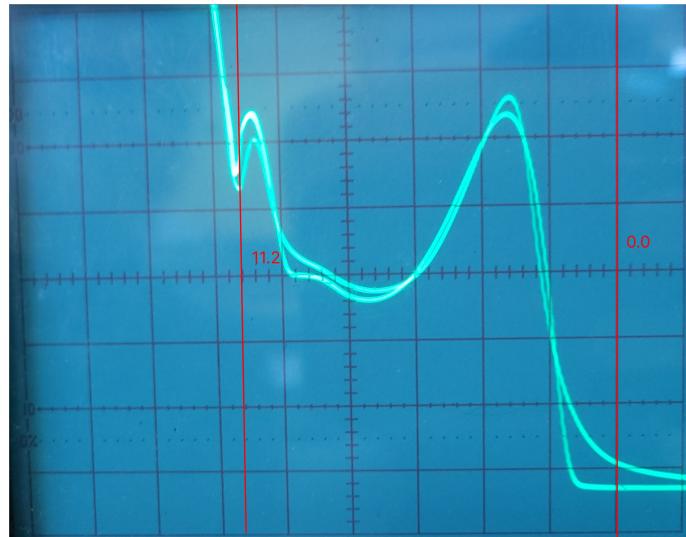


Рис. 8: ВАХ тиаратрона под воздействием магнита.

При поднесении к тиаратрону неодимового магнита особенности ВАХ становятся более выраженнымми. Становится виден второй максимум. Благодаря этому можно найти напряжение пробоя: $V_{break} = (11.2 \pm 0.2)$ В.

Статика

Измерения проводятся при двух значениях тока накала $V_{\text{накала}} = \{2.8 \text{ В}, 3.3 \text{ В}\}$.

$V_{\text{накала}} = 2.8 \text{ В}$			$V_{\text{накала}} = 3.3 \text{ В}$		
$V_{\text{катод}}, \text{ В}$	$V_{\text{анод}}, \text{ мВ}$	$I_{\text{анод}}, \text{ мкА}$	$V_{\text{катод}}, \text{ В}$	$V_{\text{анод}}, \text{ мВ}$	$I_{\text{анод}}, \text{ мкА}$
0.085	0.00	0.0000	0.250	0.00	0.0000
0.503	0.00	0.0000	0.500	0.00	0.0000
0.966	0.00	0.0000	0.756	0.00	0.0000
1.521	0.36	0.0036	0.992	0.00	0.0000
2.009	25.22	0.2522	1.251	0.11	0.0011
2.207	41.70	0.4170	1.507	1.64	0.0164
2.434	45.82	0.4582	1.580	3.37	0.0337
2.546	48.16	0.4816	1.640	5.93	0.0593
2.571	44.07	0.4407	1.718	11.50	0.1150
2.605	43.98	0.4398	1.780	18.55	0.1855
2.797	40.10	0.4010	1.825	25.11	0.2511
2.976	39.22	0.3922	1.892	36.50	0.3650
3.534	33.03	0.3303	1.944	46.10	0.4610
4.023	30.30	0.3030	1.998	55.64	0.5564
4.560	28.11	0.2811	2.109	73.18	0.7318
4.996	26.65	0.2665	2.200	83.60	0.8360
5.497	25.30	0.2530	2.267	89.00	0.8900
5.995	24.36	0.2436	2.350	93.25	0.9325
6.504	23.72	0.2372	2.420	95.40	0.9540
6.998	23.38	0.2338	2.487	96.34	0.9634
7.502	23.35	0.2335	2.563	96.58	0.9658
8.053	23.61	0.2361	2.604	96.57	0.9657
8.542	24.42	0.2442	2.660	96.26	0.9626
9.000	25.17	0.2517	2.707	95.94	0.9594
9.518	25.35	0.2535	2.774	95.37	0.9537
10.000	26.67	0.2667	2.860	94.68	0.9468
11.087	33.69	0.3369	3.211	93.29	0.9329
			3.394	93.11	0.9311
			3.613	93.13	0.9313
			3.811	93.30	0.9330
			4.013	93.52	0.9352
			4.232	93.76	0.9376
			4.411	93.84	0.9384
			4.598	93.82	0.9382
			4.813	93.68	0.9368
			5.023	93.49	0.9349
			5.260	93.70	0.9370
			5.560	93.47	0.9347
			5.756	93.32	0.9332
			5.984	93.23	0.9323
			6.245	93.70	0.9370
			6.535	93.59	0.9359
			6.725	93.81	0.9381
			7.004	94.29	0.9429
			7.250	94.94	0.9494
			7.536	95.95	0.9595
			7.764	97.34	0.9734
			8.036	99.23	0.9923
			8.265	101.37	1.0137
			8.503	104.08	1.0408
			9.035	111.23	1.1123
			10.000	120.84	1.2084

Таблица 1: Данные зависимости анодного тока от напряжения катод-сетка.

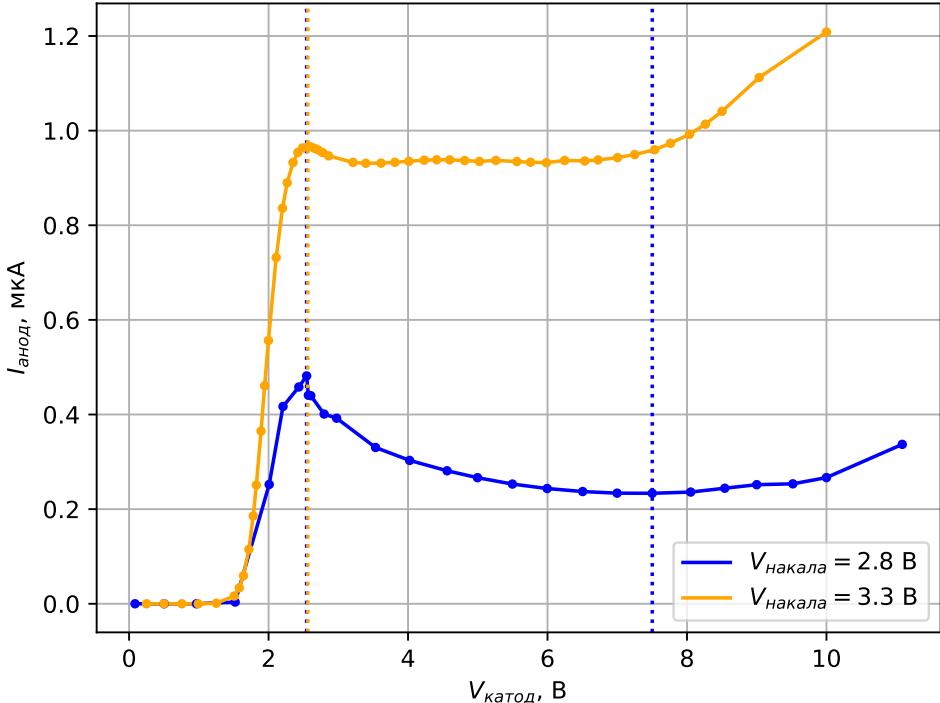


Рис. 9: ВАХ тиратрона.

Из графиков видно, что при высоком напряжении накала $V_{\text{накала}} = 3.3$ В эффект Рамзауэра выражен слабо. Минимум на этом графике определить невозможно, максимум совпадает с графиком $V_{\text{накала}} = 2.8$ В. Из графика определим $V_{\max} = (2.5 \pm 0.1)$ В, $V_{\min} = (7.5 \pm 0.2)$ В.

Также рассчитаем l и U_0 по формулам (4):

$$l = (3.1 \pm 0.2) \text{ \AA}, \quad U_0 = (1.4 \pm 0.4) \text{ эВ} \quad (8)$$

Оценка для U_0 неточна, так как в измерениях есть статистическая погрешность от контактной разности потенциалов.

Оценим также потенциал ионизации:

$$I = U_{\text{break}} + U_0 \approx (12.6 \pm 0.5) \text{ эВ} \quad (9)$$

Исходя из I можем предполагать, что в тиратроне используется ксенон.

Используя (1) получим:

$$E_n = \frac{n^2 h^2}{8ml^2} - U_0 \quad (10)$$

Для второго максимума получим $E_2 \approx 14$ эВ. Данное энергия выше энергии пробоя $E_{\text{break}} = (11.2 \pm 0.2)$ эВ, из чего следует, что наблюдаемый на рис. 8 максимум является иной особенностью ВАХ тиратрона.

В соответствии с (7) построим $w(V)$:

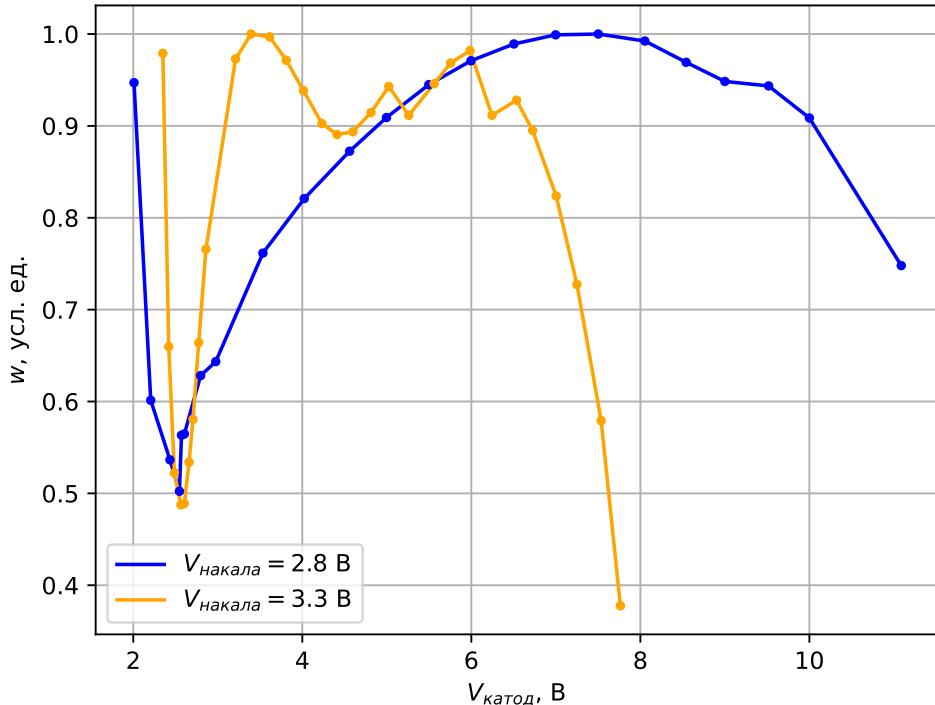


Рис. 10: Зависимость вероятности рассеяния электрона от разгоняющего напряжения.

Как и ожидалось, имеет смысл рассматривать только $V_{\text{накала}} = 2.8 \text{ В}$. На этом графике мы наблюдаем минимум и максимум вероятности рассеяния $w(V)$.

Заключение и выводы

В работе подтверждено существование эффекта Рамзауэра.

Получено оценка размера атома в тиратроне $l = (3.1 \pm 0.2) \text{ \AA}$. Оценены значения глубины потенциальной ямы $U_0 = (1.4 \pm 0.4) \text{ эВ}$ и энергии ионизации $I = (12.6 \pm 0.5) \text{ эВ}$. По энергии ионизации определен инертный газ в тиратроне: ксенон. Табличное значение $l = 2.8 \text{ \AA}$.

Для повышения точности результатов можно провести измерения контактного потенциала, избавившись от статистической погрешности U_0 и I , составляющей $< 0.5 \text{ В}$.