

Лабораторная работа 5.2.1 + 5.1.3

Опыт Франка-Герца и изучение рассеяния медленных электронов на атомах (эффект Рамзауэра).

Павлов Матвей

21 ноября 2025 г.

Аннотация

Методом электронного возбуждения измерить энергию первого уровня атома гелия в динамическом и статическом состояниях. Исследовать энергетическую зависимость вероятности рассеяния электронов атомами ксенона, определить уровни электронов, при которых наблюдается "просветление" ксенона, и оценить размер его внешней электронной оболочки.

Теоретические сведения

Опыт Франка-Герца

Разреженный одноатомный газ (гелий) заполняет трёхэлектродную лампу. Электроны, испускаемые катодом, ускоряются в электрическом поле между катодом и сетчатым анодом. При движении к аноду электроны сталкиваются с атомами гелия. Если энергия электрона недостаточна для возбуждения атома, происходят упругие соударения, при которых электроны почти не теряют энергии из-за малой массы.

При увеличении разности потенциалов энергия электронов становится достаточной для возбуждения атомов. При неупругих столкновениях кинетическая энергия электрона передаётся атомному электрону, вызывая переход на другой энергетический уровень или ионизацию.

С ростом анодного потенциала ток в лампе сначала увеличивается. Когда энергия электронов достигает порога возбуждения атомов, ток коллектора резко уменьшается, так как электроны теряют энергию при неупругих соударениях и не могут преодолеть задерживающий потенциал. При дальнейшем увеличении потенциала анода ток снова возрастает: электроны после неупругих соударений успевают набрать достаточную энергию для преодоления задерживающего потенциала.

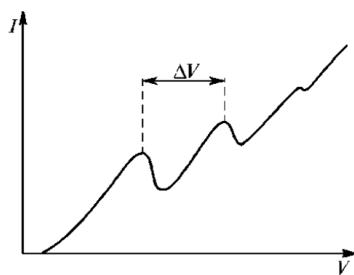


Рис. 1: Характер зависимости $I(U)$

Кинетическая энергия электрона 1 уровня равна:

$$E = \bar{e}\Delta V [\text{эВ}], \quad (1)$$

где ΔV – разность между двумя пиками.

Эффект Рамзауэра

Эффективное сечение реакции – это величина, характеризующая вероятность перехода системы двух сталкивающихся частиц в результате их рассеяния (упругого или неупругого) в определенное конечное состояние. Сечение σ равно отношению числа N таких переходов в единицу времени к плотности потока рассеиваемых частиц nv , падающих на мишень, т. е. к числу частиц, проходящих в единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную к их скорости v (n – плотность числа падающих частиц).

$$\sigma = \frac{N}{nv}. \quad (2)$$

Таким образом, сечение имеет размерность площади.

Качественно результат экспериментов Рамзауэра при энергии электронов порядка десятков эВ показан на рис. 2. По мере уменьшения энергии электрона от нескольких десятков электрон-вольт поперечное сечение его упругого рассеяния растет. Однако при энергиях меньше 16 эВ в случае аргона сечение начинает уменьшаться, а при $E \sim 1$ эВ практически равно нулю, т. е. аргон становится прозрачным для электронов. При дальнейшем уменьшении энергии электронов сечение рассеяния опять начинает возрастать. Это поведение поперечного сечения свойственно не только атомам аргона, но и атомам всех инертных газов. Такое поведение электронов нельзя объяснить с позиций классической физики. Объяснение этого эффекта потребовало учета волновой природы электронов. Схема эксперимента Рамзауэра показана, на рис. 3.

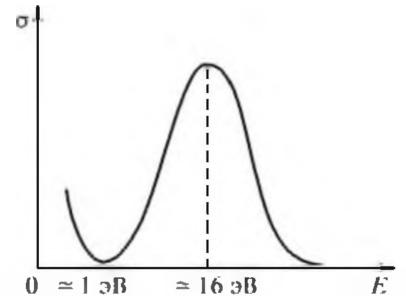


Рис. 2: Качественная картина результатов измерения упругого рассеяния электронов в аргоне

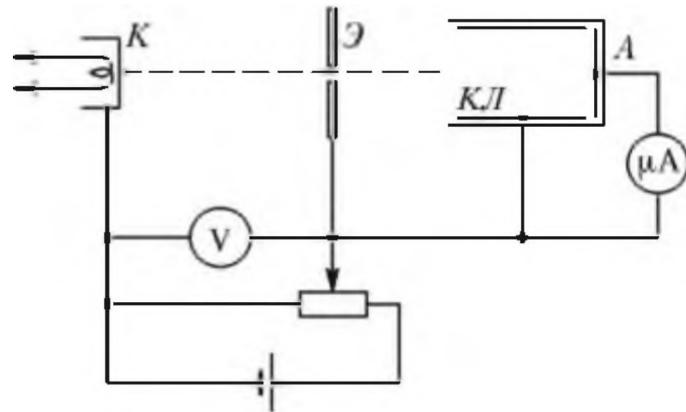


Рис. 3: Схема установки для измерения сечения рассеяния электронов в газах

С точки зрения квантовой теории, внутри атома потенциальная энергия налетающего электрона U отлична от нуля, скорость электрона изменяется, становясь равной v' в соответствии с законом сохранения энергии

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

а значит, изменяется и длина его волны де Бройля. Таким образом, по отношению к электронной волне атом ведет себя как преломляющая среда с относительным показателем преломления

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

Коэффициент прохождения электронов максимальен при условии

$$\sqrt{\frac{2m(E + U_0)}{\hbar^2}}l = \pi n; \quad n \in \mathbb{N}_1, \quad (3)$$

где U_0 – глубина потенциальной ямы.

Это условие легко получить, рассматривая интерференцию электронных волн де Бройля в атоме. Движущемуся электрону соответствует волна де Бройля, длина которой определяется соотношением $\lambda = h/mv$. Если кинетическая энергия электрона невелика, то $E = mv^2/2$ и $\lambda = h/\sqrt{2mE}$. При движении электрона через атом длина волны де Бройля становится меньше и равна $\lambda' = h/\sqrt{2m(E + U_0)}$ где U_0 – глубина атомного потенциала. При этом, волна де Бройля отражается от границ атомного потенциала, т. е. от поверхности атома, и происходит интерференция прошедшей через атом волны 1 и волны 2, отраженной от передней и задней границы атома (эти волны когерентны). Прошедшая волна 1 усилится волной 2, если геометрическая разность хода между ними $\Delta = 2l = \lambda'$, что соответствует условию первого интерференционного максимума, т. е. при условии

$$2l = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} \quad (4)$$

Прошедшая волна ослабится при условии

$$2l = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}} \quad (5)$$

Из (4) и (5), можно получить

$$l = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}. \quad (6)$$

Оттуда же можно найти эффективную глубину потенциальной ямы атома:

$$U_0 = \frac{4}{5}E_2 - \frac{9}{5}E_1. \quad (7)$$

Уравнение вольт-амперной характеристики тиаратрона:

$$I_a = I_0 \exp(-C\omega(V)); \quad C = L n_a \Delta_a, \quad (8)$$

где $I_0 = eN_0$ – ток катода, а $I_a = eN_a$ – ток анода. Отсюда определяется вероятность рассеяния электрона в зависимости от его энергии:

$$\omega(V) = -\frac{1}{C} \ln \frac{I_a(V)}{I_0}. \quad (9)$$

Экспериментальная установка

Опыт Франка-Герца

Схема экспериментальной установки отображена на рис. 4 и 5.

В работе используются:

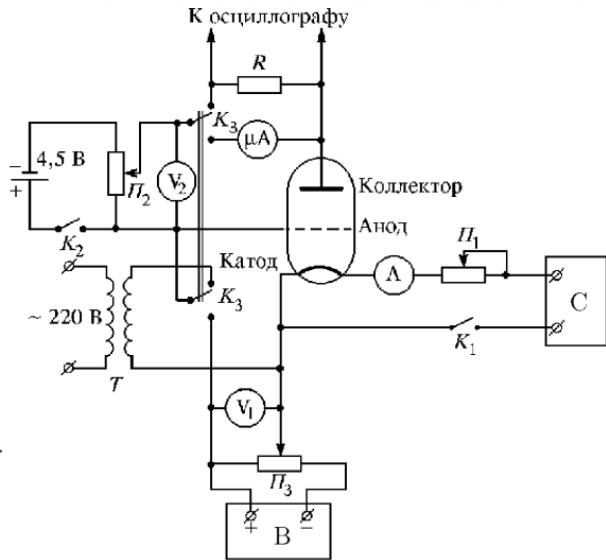


Рис. 4: Принципиальная схема установки

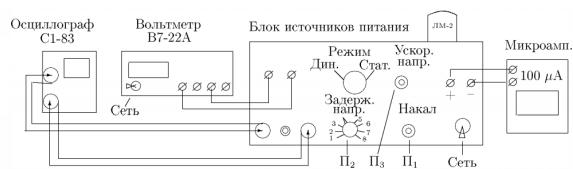


Рис. 5: Блок-схема экспериментальной установки

- Вольтметры
- Осциллограф
- Блок источников питания
- Газонаполненная лампа (гелий)

Эффект Рамзауэра

Схема экспериментальной установки отображена на рис. 6. В данной работе для изучения эффекта

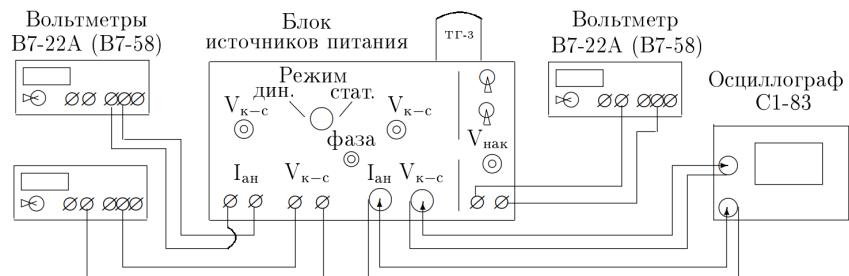


Рис. 6: Схема экспериментальной установки

Рамзауэра используется тиратрон ТГЗ-01/1.3Б, заполненный инертным газом. 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 соединены между собой и имеют одинаковый потенциал, примерно равный потенциалу анода. Поэтому между первой сеткой и анодом практически нет поля. Рассеянные электроны отклоняются в сторону и уходят на сетку, а оставшаяся часть электронов достигает анода и создаёт анодный ток I_a . Таким образом, поток электронов $N(x)$ (т. е. число электронов, проходящих через поперечное сечение лампы в точке x в единицу времени) уменьшается с ростом x от начального значения X у катода (в точке $x = 0$) до некоторого значения N_a у анода (в точке $x = L$).

В работе используются:

- Вольтметры
- Осциллограф
- Блок источников питания
- Тиратрон ТГЗ

Ход работы

Опыт Франка-Герца

Динамический режим

При максимальном ускоряющем напряжении измерим на экране расстояние между максимумами и между минимумами осциллограммы. Измерения проведём при трёх значениях задерживающего напряжения: 2, 4 и 6 В. Результаты измерений занесём в таблицу 1. Фотографии полученных осциллограмм 7.

Погрешность измерения возьмем как половина цены деления, умноженную на 2, так как максимумы и минимумы могли не совпадать идеально:

$$\sigma_U = \frac{5}{5} \cdot 2 = 2 \text{ В}$$

U_3 ,	U_{\min_1} , В	U_{\max_1} , В	U_{\min_2} , В	U_{\max_2} , В	ΔU , В	E , эВ
2	22 ± 2	17.5 ± 2	38.5 ± 2	32.5 ± 2	15 ± 4	15 ± 4
4	23 ± 2	18 ± 2	41 ± 2	34 ± 2	16 ± 4	16 ± 4
6	24.5 ± 2	19 ± 2	42.5 ± 2	35 ± 2	16 ± 4	16 ± 4

Таблица 1: Результаты динамического измерения

После усреднения получаем:

$$E = 15.7 \pm 3.5 \text{ эВ}$$

Погрешность считаем так:

$$\sigma_E = E \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{E1}}{E1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{E2}}{E2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{E3}}{E3}\right)^2}$$

При этом табличное значение данной величины составляет

$$E_{th} = 21.6 \text{ эВ}$$

С учётом погрешности, экспериментальные данные близки к теоретическим.

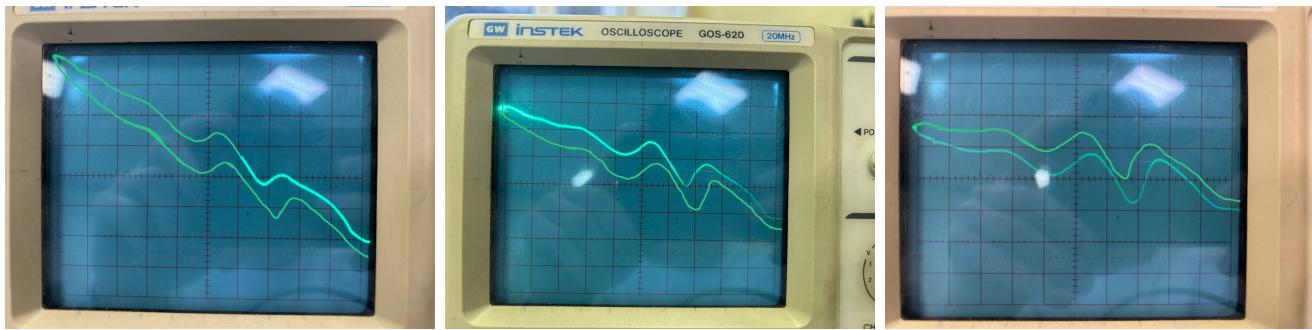


Рис. 7: Осциллограммы для $U_3 = 2, 4, 6$ В

Статический режим

Снимем зависимость коллекторного тока от анодного напряжения $I_k = f(V_a)$ для значений задерживающего напряжения 2, 4 и 6 В. Результаты измерений занесём в таблицы 2-4.

$$\sigma_U = 0.1 \text{ В}$$

$$\sigma_I = 1 \text{ мкА}$$

U , В	78.08	65.18	60.65	54.97	50.82	44.56	40.23	35.48	30.56	25.09	20.87	14.97	10.43	4.73
I , мкА	375	328	318	293	263	241	243	251	203	142	154	135	102	56
U , В	22.07	23.99	26.66	28.17	31.30	29.92	32.46	33.68	34.59	36.75	37.98	38.76	40.97	41.58
I , мкА	126	130	161	179	215	196	227	240	247	255	254	252	236	234
U , В	42.72	43.45	44.08	45.54	46.76	48.58	16.88	17.69	18.39	19.12	19.48	20.27	21.12	
I , мкА	233	236	238	244	248	259	155	162	166	168	168	165	151	

Таблица 2: ВАХ при $V_3 = 2$ В

U , В	78.17	63.25	60.09	55.00	50.09	45.05	40.15	35.23	30.56	25.05	20.10	15.03	10.01	5.30
I , мкА	278	255	252	223	190	175	203	213	157	75	157	129	88	47
U , В	17.05	18.14	19.10	20.99	22.04	23.06	22.50	24.14	23.56	26.06	27.04	28.03	29.16	33.23
I , мкА	146	153	158	152	141	79	126	70	71	89	107	120	138	193
U , В	34.09	36.87	38.20	41.23	42.30	43.03	44.07	46.26	47.47	48.82	51.71	52.18		
I , мкА	202	221	218	194	186	183	178	177	179	183	202	201		

Таблица 3: ВАХ при $V_3 = 4$ В

U , В	78.09	63.61	60.37	55.01	50.20	45.11	40.10	35.13	30.10	25.01	20.10	15.03	10.18	5.00
I , мкА	161	163	162	138	115	120	153	157	89	34	141	110	70	27
U , В	15.97	17.23	18.31	19.16	21.06	22.04	23.17	24.02	23.57	23.45	26.06	27.01	28.35	29.15
I , мкА	116	126	134	140	140	133	106	39	50	58	38	45	62	75
U , В	31.03	33.50	36.34	38.2	42.32	44.05	46.96	48.39	51.23	52.81	53.98	56.07	57.69	47.61
I , мкА	104	138	165	167	139	128	114	112	120	127	133	147	155	113
U , В	45.96	43.41												
I , мкА	119	133												

Таблица 4: ВАХ при $V_3 = 6$ В

Представим графики вольт-амперных характеристик трёхэлектродной лампы при разных задерживающих напряжениях на рис. 8 и определим энергию возбуждения первого уровня атома гелия.

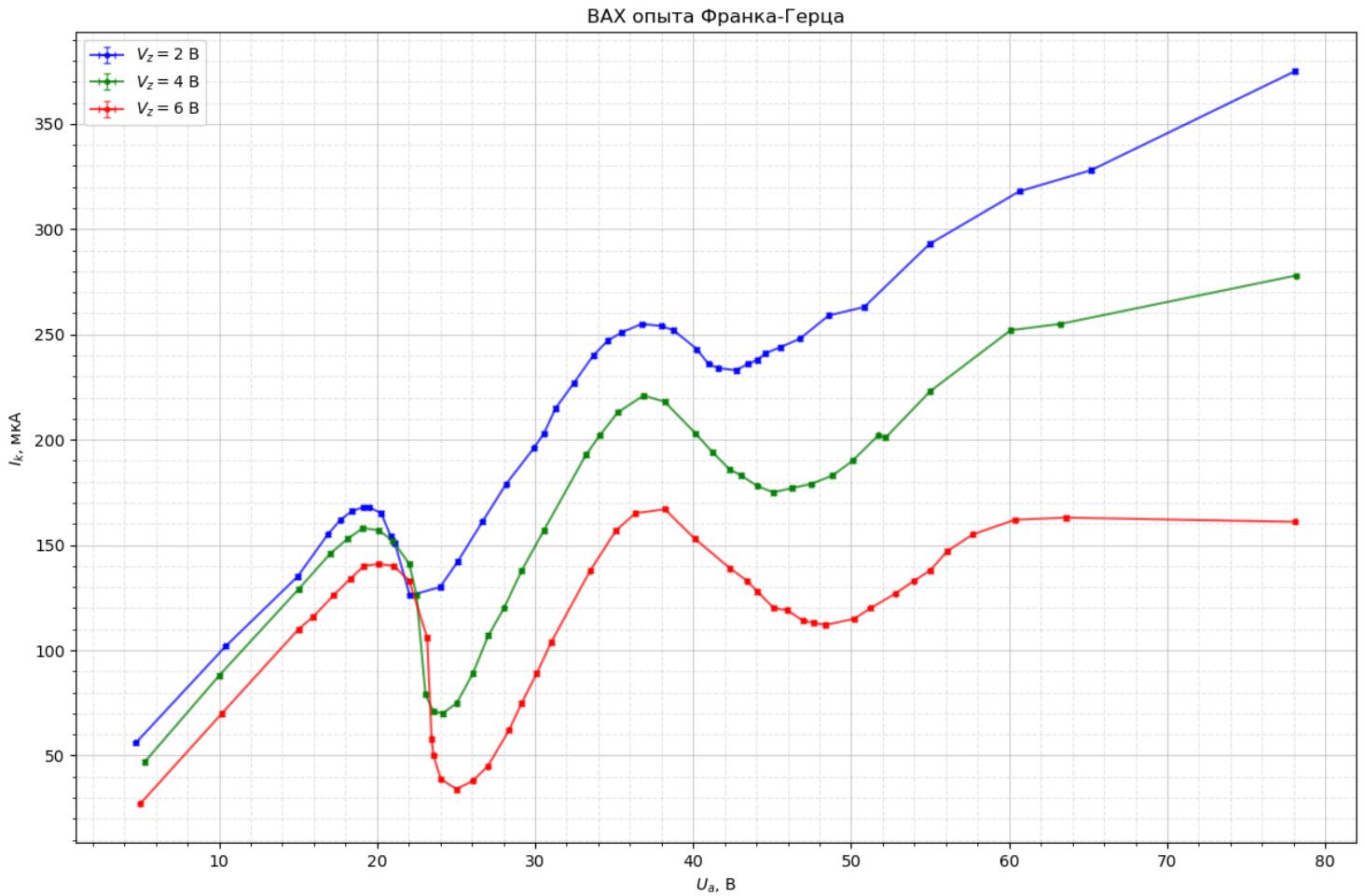


Рис. 8: Вольт-амперная характеристика трёхэлектродной вакуумной лампы при разных значениях запирающего напряжения

U_3 , В	U_{\min_1} , В	U_{\max_1} , В	U_{\min_2} , В	U_{\max_2} , В	ΔU , В	E , эВ
2	22.07 ± 0.10	19.12 ± 0.10	42.72 ± 0.10	36.75 ± 0.10	17.63 ± 0.20	17.63 ± 0.20
4	24.14 ± 0.10	19.10 ± 0.10	45.05 ± 0.10	36.87 ± 0.10	17.77 ± 0.20	17.77 ± 0.20
6	25.01 ± 0.10	20.1 ± 0.10	48.39 ± 0.10	38.20 ± 0.10	18.10 ± 0.20	18.10 ± 0.20

Таблица 5: Результаты статического измерения

После усреднения получаем:

$$E = 17.8 \pm 0.4 \text{ эВ}$$

При этом табличное значение данной величины составляет

$$E_{th} = 21.6 \text{ эВ}$$

С учётом погрешности, экспериментальные данные получаются одного порядка с теоретическими, но не совпадают в пределах погрешности.

Эффект Рамзауэра

Динамический режим

С помощью осциллографа снимаем ВАХ в динамическом режиме при двух различных напряжениях накала, погрешность их измерения берём $\sigma_{U_{\text{накала}}} = 0.01$ В, так как регистрируемое вольтметром значение не было постоянным, а колебалось в последнем знаке. По ВАХ определим U_{\max} , U_{\min} и $U_{\text{пробой}}$ (Таблица 1). Погрешности всех измерений с осциллографом – $\sigma_U = 0.8$ В – цена деления, умноженная на 2, так как точки на двух кривых неточно совпадали по своему положению.

$U_{\text{накала}}$, В	U_{\min} , В	U_{\max} , В	$U_{\text{пробой}}$, В	l_1 , Å	l_2 , Å	l_3 , Å	U_0 , В
2.946 ± 0.1	6.7 ± 0.8	1.8 ± 0.8	11.4 ± 0.8	2.96 ± 0.3	3.03 ± 0.2	3.10 ± 0.4	2.1 ± 1.6
2.598 ± 0.1	6.8 ± 0.8	1.8 ± 0.8	11.8 ± 0.8	2.96 ± 0.3	3.02 ± 0.2	3.06 ± 0.4	2.2 ± 1.6

Таблица 6: Результаты динамического измерения

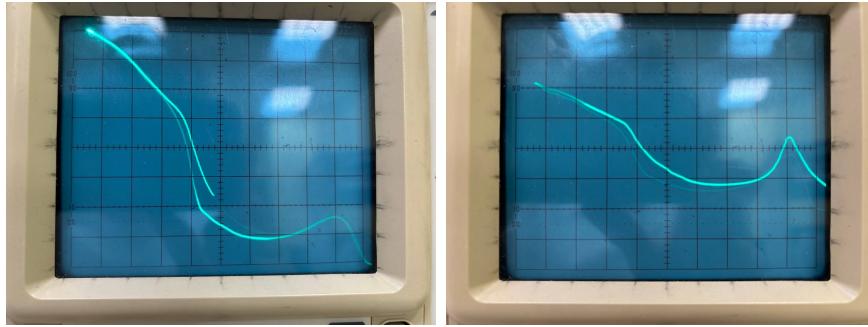


Рис. 9: Осциллограммы для $U_{\text{накала}} = 2.946, 2.598$ В

Приняв $U_0 = 2.5$ В, посчитаем размер электронной оболочки атома инертного газа, заполняющего лампу.

$$2l_1 = \frac{h}{\sqrt{2m(E_1 + U_0)}}$$

$$2l_2 = \frac{3}{2} \frac{h}{\sqrt{2m(E_2 + U_0)}}$$

А теперь, исключив U_0 посчитаем размер электронной оболочки атома.

$$l_3 = \frac{h\sqrt{5}}{\sqrt{32m(E_2 - E_1)}}.$$

Откуда найдем эффективную глубину потенциальной ямы атома:

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

Все погрешности посчитаны по стандартным формулам погрешности сложной величины, то есть корень суммы произведений квадратов частных производных по величине на квадрат её погрешности.

Таким образом:

$$l = 3.08 \pm 0.57 \text{ \AA}$$

$$U_0 = 2.15 \pm 2.26 \text{ В}$$

Оценим ионизационный потенциал. Для этого усредним $U_{\text{пробой}}$ и сложим с U_0 , которое мы посчитали выше:

$$U = U_0 + U_{\text{пробой}} = 13.7 \pm 1.7 \text{ В.}$$

Сравнивая с потенциалами ионизации, приведёнными в описании работы, видим, что полученный потенциал в пределах погрешности совпадает с ионизационным потенциалом криптона: $U = 14$ эВ -, но при том в пределах погрешности мы также должны учесть и ионизационный потенциал ксенона $U = 12.1$ эВ.

Статический режим

Снимем ВАХ тиаратрона в статическом режиме при тех же значениях напряжения накала, данные представлены в таблице 7.

$$\sigma_U = 0.01 \text{ В}$$

$$\sigma_I = 1 \text{ мкА}$$

U , В	8,367	7,632	7,220	7,022	6,866	6,629	8,584	8,721	9,005	9,271	9,403	9,652
I , мкА	107,82	92,20	87,19	84,99	83,29	81,45	111,09	114,45	122,49	128,61	131,68	142,01
U , В	10,283	10,808	8,486	6,467	6,268	6,003	5,780	5,611	5,398	5,180	5,016	4,832
I , мкА	178,03	196,34	111,74	83,07	81,98	80,98	80,53	80,44	80,69	81,25	82,0	83,09
U , В	4,222	4,075	3,753	3,498	3,248	3,013	2,812	2,604	2,447	2,270	2,072	1,842
I , мкА	89,37	91,56	97,47	103,47	110,67	119,02	127,70	138,95	148,98	161,94	178,09	194,76
U , В	0,902	0,517	0,783	0,921	1,062	1,109						
I , мкА	44,07	1,59	20,21	50,30	91,30	105,81						

Таблица 7: Вольт-амперная характеристика для статического режима при $U_{\text{накала}} = 2.946$ В

Построим график $I_a = f(U_c)$ для статического режима на рис. 10. По графику, как и в динамическом режиме определим размер электронной оболочки атома и глубину потенциальной ямы.

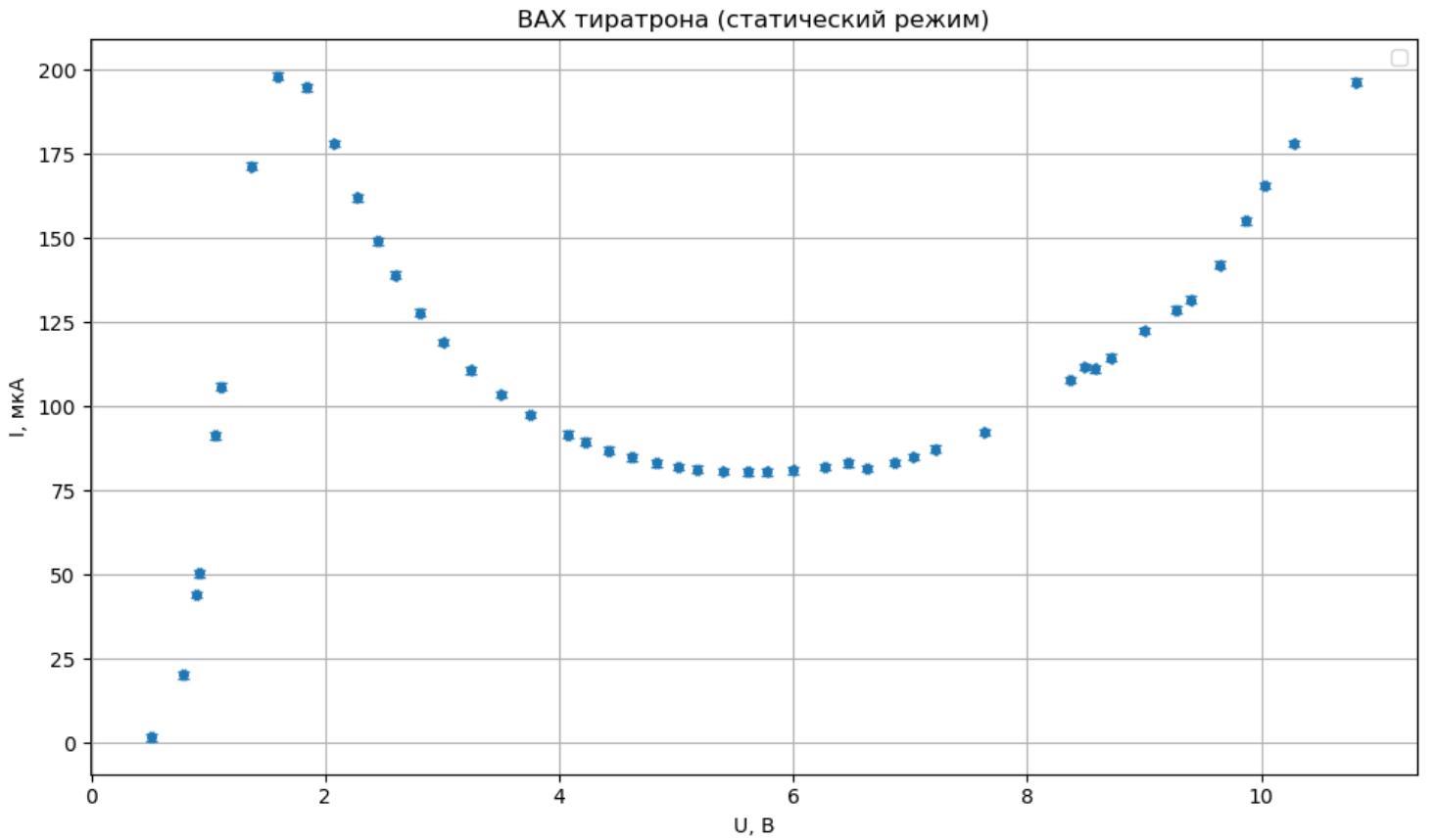


Рис. 10: Вольт-амперная характеристика триатрона при $U_{\text{накала}} = 2.946$ В

$U_{\text{накала}}, \text{ В}$	$U_{\min}, \text{ В}$	$U_{\max}, \text{ В}$	$U_{\text{пробой}}, \text{ В}$	$l_1, \text{ \AA}$	$l_2, \text{ \AA}$	$l_3, \text{ \AA}$	$U_0, \text{ В}$
2.946 ± 0.1	6.63 ± 0.01	1.60 ± 0.01	10.81 ± 0.01	3.03 ± 0.01	3.04 ± 0.01	3.06 ± 0.01	2.42 ± 0.02

Таблица 8: Результаты статического измерения

Таким образом:

$$l = 3.06 \pm 0.01 \text{ \AA}$$

$$U_0 = 2.42 \pm 0.02 \text{ В}$$

$$U = U_0 + U_{\text{пробой}} = 13.2 \pm 0.1 \text{ В.}$$

Данное значение потенциала ионизации также находится ближе к криptonу, нежели к ксенону.

Далее по формуле (3) оценим, при каких напряжениях должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов:

$$E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2ml^2} - U_0.$$

$$E_{n=2} = 13.7 \pm 0.1 \text{ эВ}$$

$$E_{n=3} = 33.8 \pm 0.3 \text{ эВ}$$

Эти максимумы никак не отображаются на графике, так как они больше потенциала ионизации. Далее, по формуле (9) найдём зависимость вероятности рассеяния от энергии

$$\omega(V) \propto \ln \frac{I_a(U)}{I_0},$$

где I_0 – первый максимум на ВАХ тиратрона. Результат отображен на рис. 11.

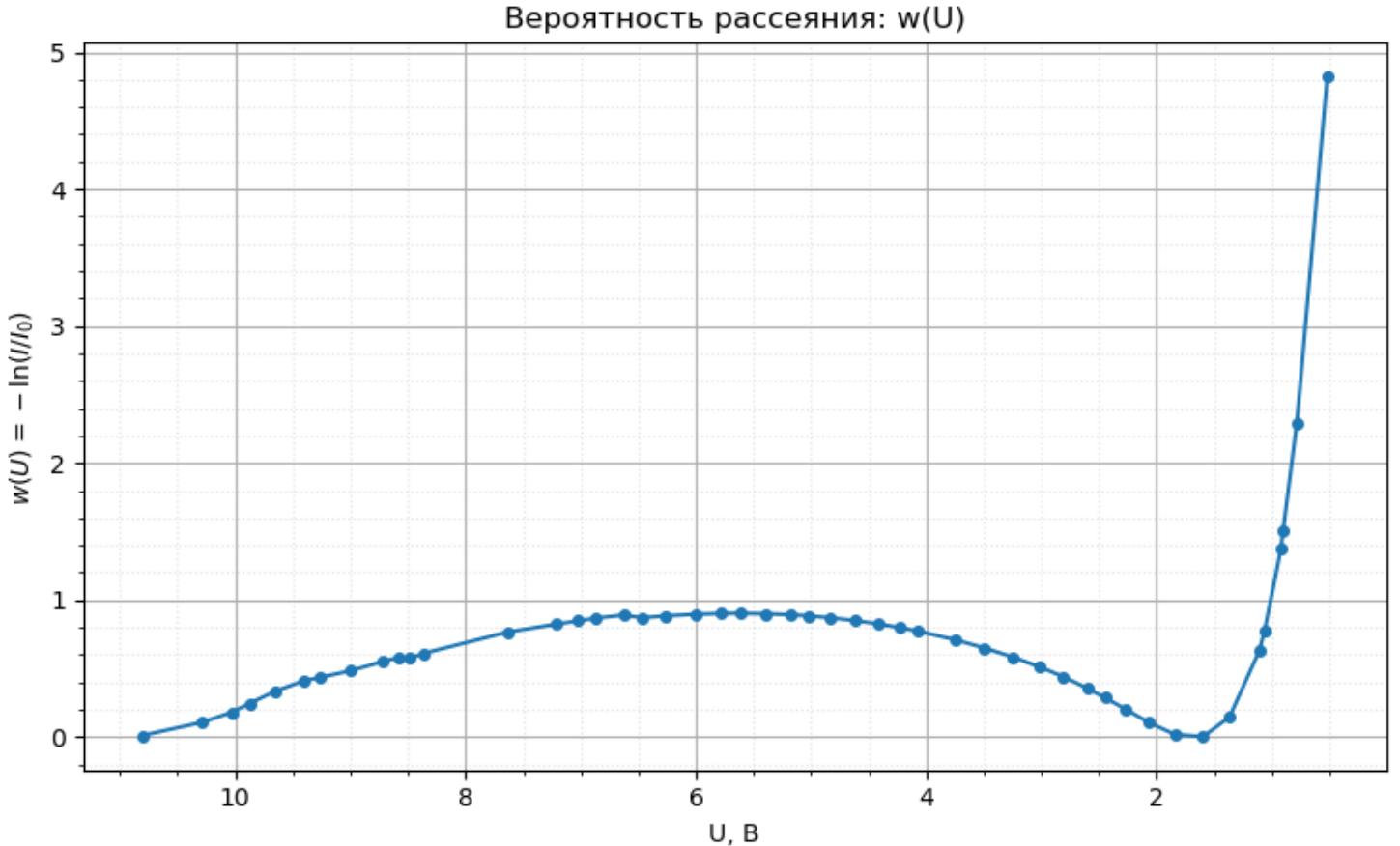


Рис. 11: Качественный график зависимости $\omega \propto -\ln \frac{I}{I_0}$

Вывод

Таким образом, в ходе работы были получены следующие результаты:

- Рассчитаны значения энергии возбуждения первого уровня атома гелия в опыте Франка-Герца при динамическом и статическом режимах:

$$E_{\text{дин}} = 15.7 \pm 3.5 \text{ эВ}$$

$$E_{\text{стат}} = 17.8 \pm 0.4 \text{ эВ}$$

Данные значения с учетом погрешности получаются одного порядка с теоретическим, но все равно не совпадают в пределах погрешности.

$$E_{th} = 21.6 \text{ эВ}$$

- Посчитан размер электронной оболочки атома в эффекте Рамзауэра при динамическом и статическом режимах:

$$l_{\text{дин}} = 3.08 \pm 0.57 \text{ \AA}$$

$$l_{\text{стат}} = 3.06 \pm 0.01 \text{ \AA}$$

- Оценен потенциал ионизации:

$$U_{\text{дин}} = 13.7 \pm 1.7 \text{ В}$$

$$U_{\text{стат}} = 13.2 \pm 0.1 \text{ В}$$

Сравнивая с потенциалами ионизации, приведёнными в описании работы, видим, что полученные потенциалы в пределах погрешности совпадают с ионизационным потенциалом криптона: $U = 14$ эВ -, но при том в пределах погрешности мы также должны учесть и ионизационный потенциал ксенона $U = 12.1$ эВ.

- Оценено при каких напряжениях должны появляться максимумы в коэффициенте прохождения электронов и построена зависимость вероятности рассеяния от энергии.