

# Лабораторная работа 5.2.1 + 5.1.3

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

Павлов Матвей

20 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.

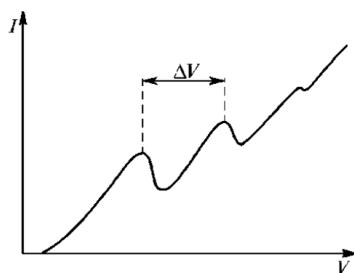


Рис. 1: Характер зависимости  $I(U)$

Кинетическая энергия электрона 1 уровня равна:

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

где  $\Delta V$  – 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  $\sigma$  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.

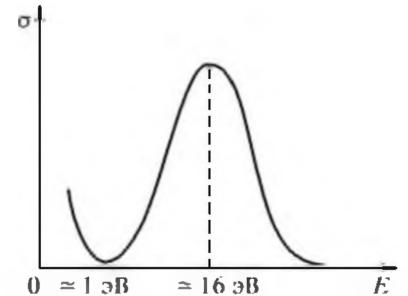


Рис. 2: Качественная картина результатов измерения упругого рассеяния электронов в аргоне

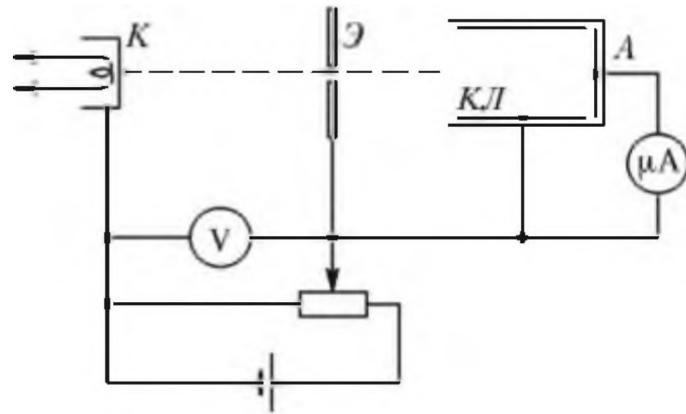


Рис. 3: Схема установки для измерения сечения рассеяния электронов в газах

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 тиатрона:

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

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:

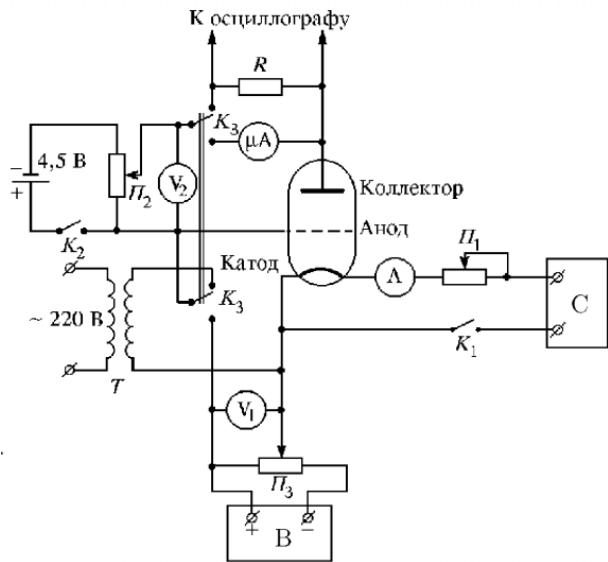


Рис. 4: Принципиальная схема установки

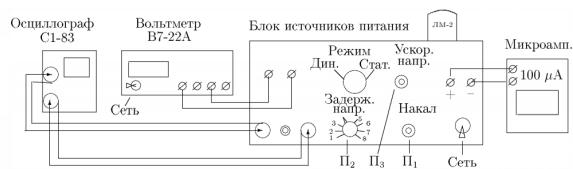


Рис. 5: Блок-схема экспериментальной установки

- Вольтметры:  $\Delta = \pm 0.1$
- Осциллограф:  $\Delta = \pm 0.4$
- Миллиамперметр:  $\Delta = \pm 0.5$
- Блок источников питания
- Газонаполненная лампа (гелий)

## Эффект Рамзауэра

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

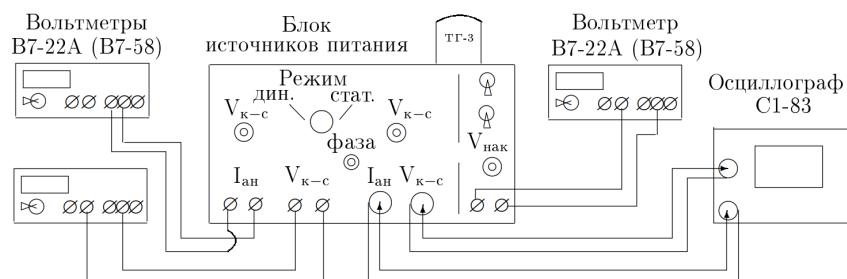


Рис. 6: Схема экспериментальной установки

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 потенциальному 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:**  $\Delta = \pm 0.01$
- **Осциллограф:**  $\Delta = \pm 0.2$  по оси X
- **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	$\Delta U$ , В	$E$ , эВ
2	$22 \pm 2$	$17.5 \pm 2$	$38.5 \pm 2$	$32.5 \pm 2$	$15 \pm 4$	$15 \pm 4$
4	$23 \pm 2$	$18 \pm 2$	$41 \pm 2$	$34 \pm 2$	$16 \pm 4$	$16 \pm 4$
6	$24.5 \pm 2$	$19 \pm 2$	$42.5 \pm 2$	$35 \pm 2$	$16 \pm 4$	$16 \pm 4$

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.

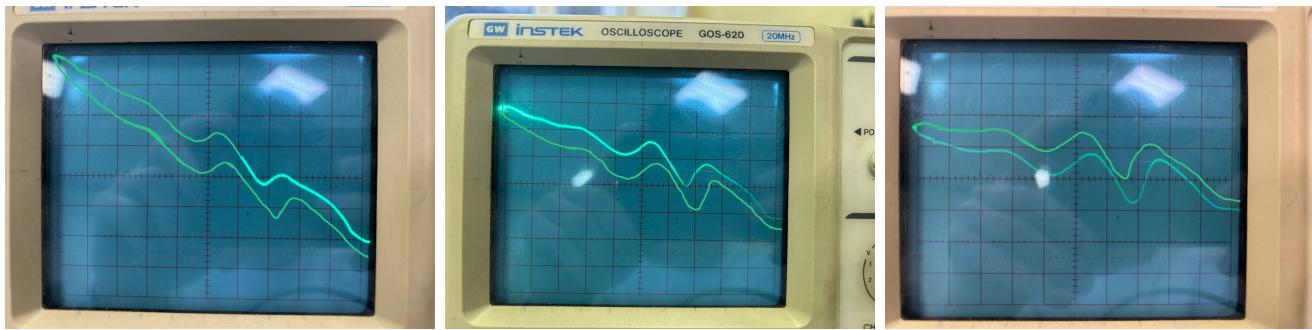


Рис. 7: Осциллограммы для  $U_3 = 2, 4, 6$  В

### 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.

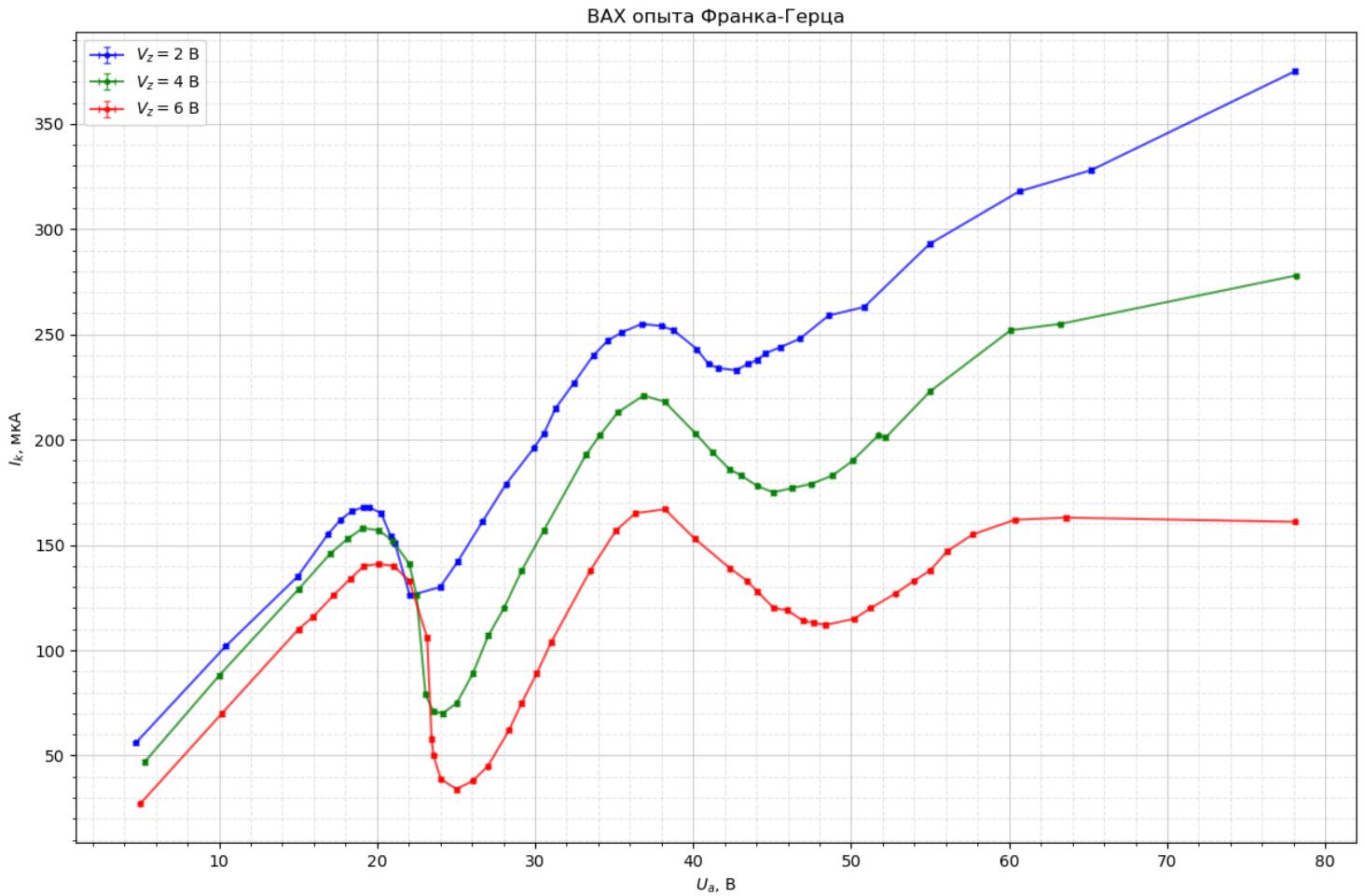


Рис. 8: Вольт-амперные характеристики трёхэлектродной вакуумной лампы при разных значениях запирающего напряжения

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

Таблица 5: Результаты статического измерения

После усреднения получаем:

$$E = 17.83 \pm 0.35 \text{ эВ}$$

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  $V_{\max}$ ,  $V_{\min}$  и  $V_{\text{пробой}}$  (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	$U_{\min_1}$ , В	$U_{\max_1}$ , В	$U_{\text{пробой}}$ , В	$l_1$ , Å	$l_2$ , Å	$l_3$ , Å	$U_0$ , В
$2.946 \pm 0.1$	$6.7 \pm 0.8$	$1.8 \pm 0.8$	$11.4 \pm 0.8$	$2.96 \pm 0.3$	$3.03 \pm 0.2$	$3.10 \pm 0.4$	$2.1 \pm 1.6$
$2.598 \pm 0.1$	$6.8 \pm 0.8$	$1.8 \pm 0.8$	$11.8 \pm 0.8$	$2.96 \pm 0.3$	$3.02 \pm 0.2$	$3.06 \pm 0.4$	$2.2 \pm 1.6$

Таблица 6: Результаты динамического измерения

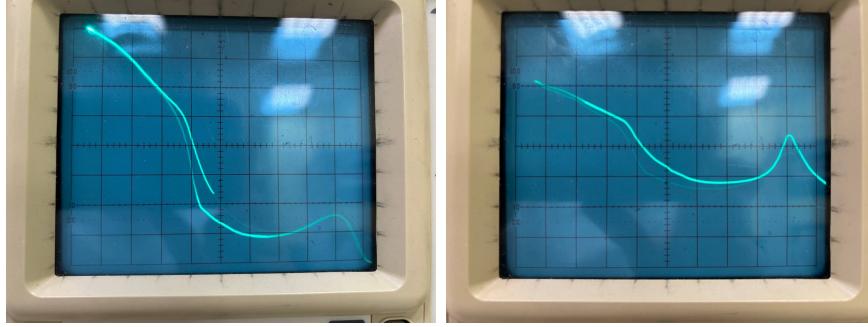


Рис. 9: Осциллограммы для  $U_{\text{накала}} = 2.946, 2.598$  В

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.

Оценим ионизационный потенциал как

$$U = U_0 + U_{\text{пробой}} = \text{эВ.}$$

Сравнивая с потенциалами ионизации, приведёнными в описании работы, видим, что полученный потенциал в пределах погрешности совпадает с ионизационным потенциалом ксенона  $U = 12.1$  эВ.

## Статический режим

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

$U$ , 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

## Вывод

Таким образом, в ходе работы были получены следующие результаты:

•