

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Отчет о выполнении лабораторной работы №3.3.2

Исследование вольт-амперной характеристики вакуумного диода

Выполнил студент группы Б03-405
Тимохин Даниил

15 сентября 2025 г.

1. Аннотация

В данной работе проверяется закон "трёх вторых" а также по нему оценивается удельный заряд электрона.

2. Теоретическая справка

В данной работе используются цилиндрический вакуумный диод. Тогда добавив наши ограничения $r_K \ll r_A$. А также будем считать, что длина диода гораздо больше его радиального размера т.е. $l \gg r_A$.

Тогда т.к. $\Delta\varphi = -r\rho/\varepsilon_0$ в СИ, где ρ - объёмная плотность заряда. Перепишем в координатном виде

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{d\varphi}{dr} \right) = -r\rho/\varepsilon_0 \quad (1)$$

За граничные условия примем

$$\varphi(r_K) = 0 \quad \varphi(r_A) = U$$

В стационарном режиме ток, пересекающий цилиндрическую поверхность постоянный

$$I = -2\pi r \rho v l = \text{const} \quad (2)$$

Так как разность потенциалов разгоняет электрон очень сильно, поэтому мы можем написать такое равенство

$$\frac{mv^2}{2} = e(\varphi(r) - \varphi(r_K)) \quad (3)$$

Подставляя полученные выражения получим

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{d\varphi}{dr} \right) = \frac{I}{2\pi\varepsilon_0 l} \sqrt{\frac{m}{2e\varphi}} \quad (4)$$

В качестве ещё одного граничного условия примем, что

$$E(r_K) = \left. \frac{d\varphi}{dr} \right|_{r=r_K} = 0 \quad (5)$$

То есть мы не ограничиваем эмиссионную способность катода. Решая это уравнение, получим, что

$$I = I_0 \left(\frac{U}{U_0} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (6)$$

или

$$I = \alpha A_0 U^{\frac{3}{2}}, \quad A_0 = \frac{4}{9} \varepsilon_0 \frac{2\pi l}{r_A} \sqrt{\frac{2e}{m}} \quad (7)$$

где α - функция отношения r_A/r_K .

Схема экспериментальной установки

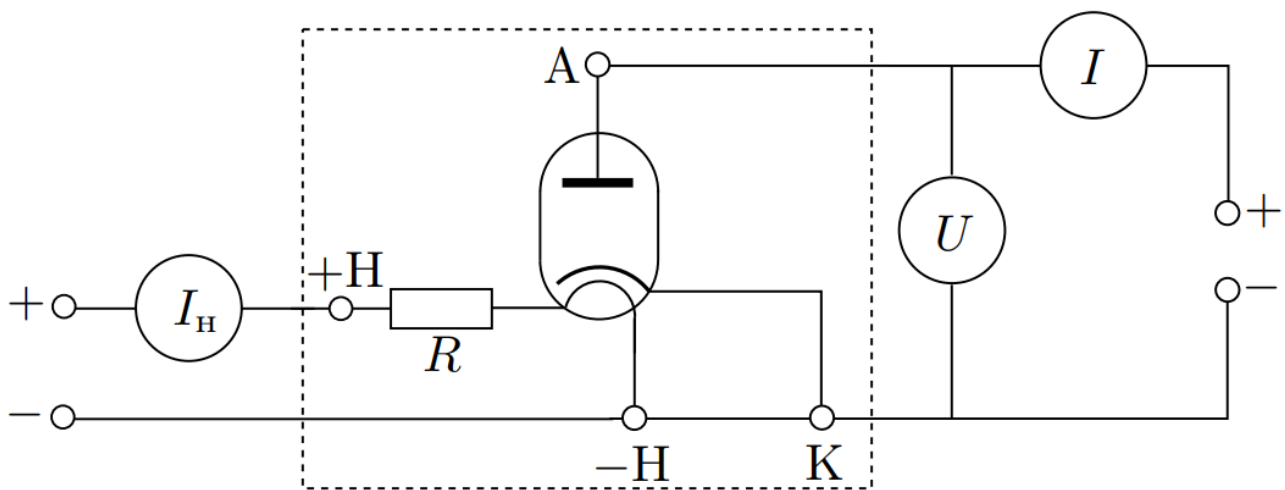


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

3. Оборудование

Вакуумный диод

Блок питания x 2

Цифровой амперметр

4. Проведение эксперимента и обработка результатов

Сначала рассмотрим, где на двойном логарифмическом графике есть прямые.

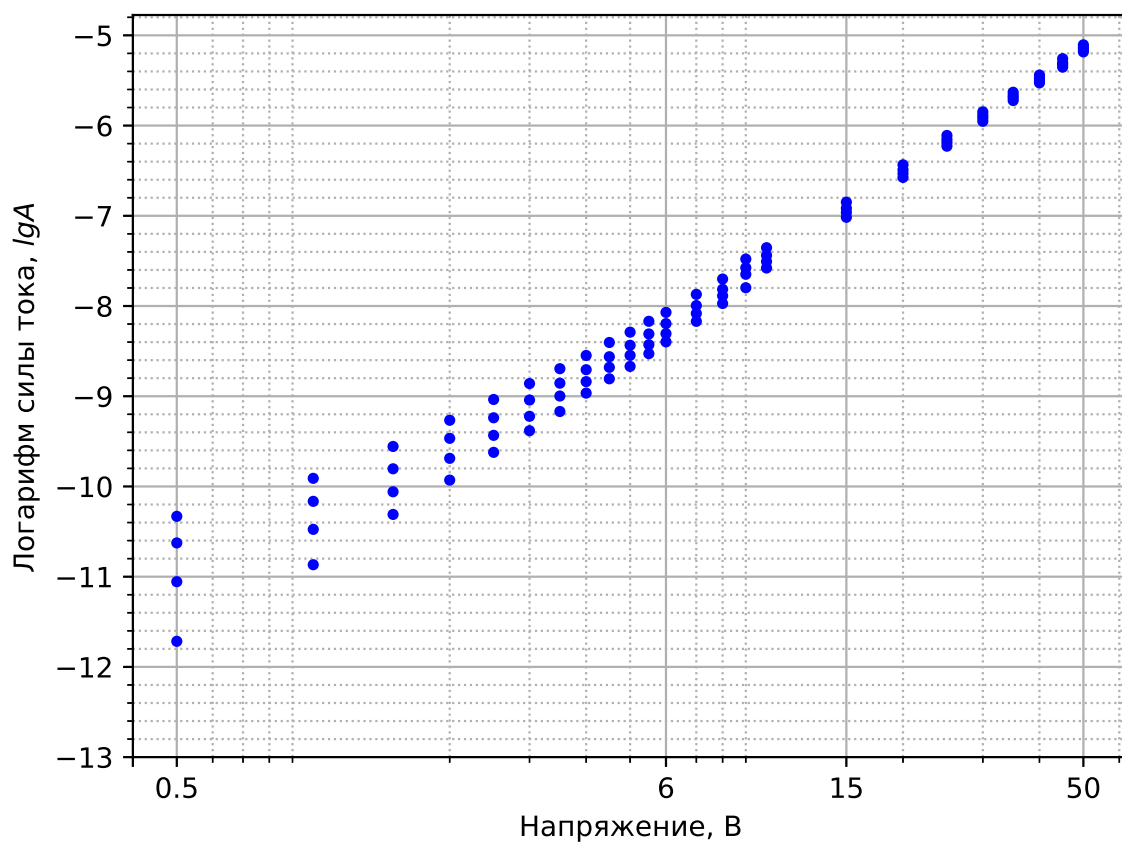


Рис. 2. График $\ln I(\ln U)$

Нелинейность в начале некоторых участков связана с тем, что мы при выводе формул не учитывали начальную скорость электронов в силу её малости на основном участке работы. Заметим, что начиная с 6 вольт он приобретает линейный характер. Построим его. (Рис.3)

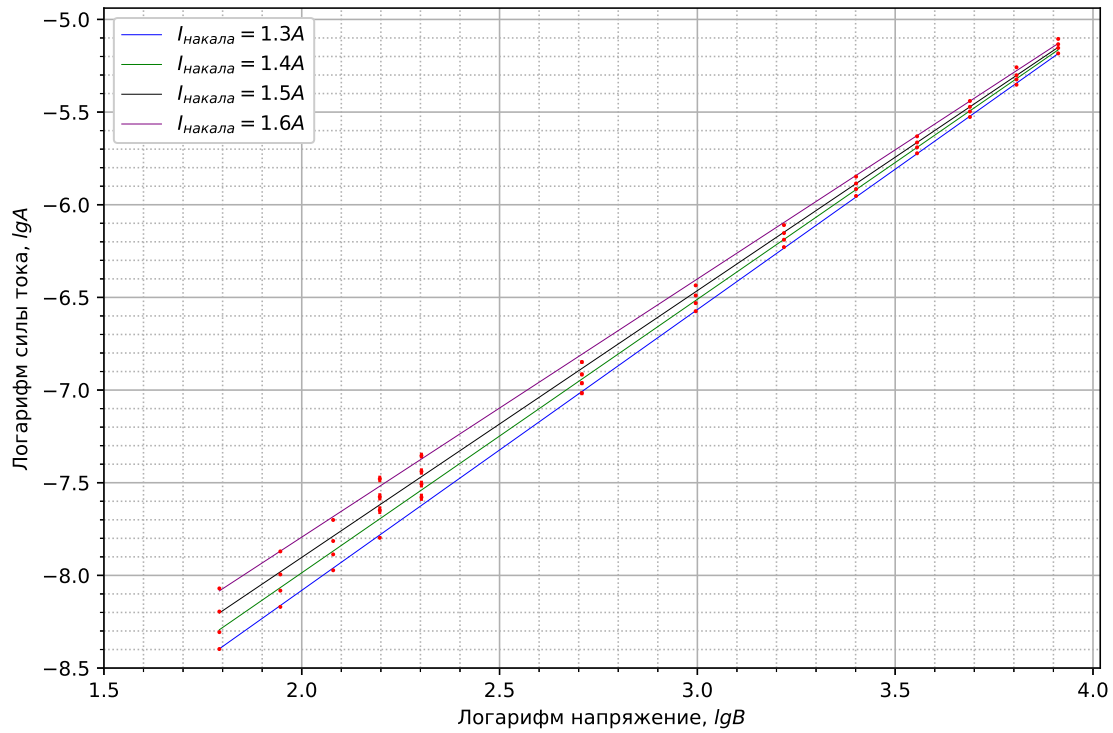


Рис. 3. График $\ln I(\ln U)$ с вычислением зависимости

Получаем результаты аппроксимации $\ln I = \beta \ln U + b$

Таблица 2. Результаты аппроксимации 1

$I_{нак}, A$	β	ε_β	b	ε_b
1.3	1.51	0.003	-11.11	0.0004
1.4	1.48	0.004	-10.94	0.0005
1.5	1.44	0.005	-10.78	0.0005
1.6	1.39	0.005	-10.58	0.0006

Мы можем видеть, что коэффициент β в районе $\frac{3}{2}$. Это подтверждает наш закон. Падение степени связано с тем, что мы не успеваем достичь уровня, когда эффект диода становится наиболее значимым и возможными краевыми эффектами.

Теперь найдем αA_0 через $I = \alpha A_0 U^{\frac{3}{2}} + b$.

Таблица 3. Результаты аппроксимации 2

$I_{нак}, A$	$\alpha A_0, 10^{-5}$	$\varepsilon_{\alpha A_0}$	$b, 10^{-5}$	ε_b
1.3	1.58	0.002	-1	0.39
1.4	1.62	0.003	2	0.27
1.5	1.65	0.003	5	0.11
1.6	1.69	0.002	9	0.05

И тогда из формулы 7

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{9A_0 r_A}{8\varepsilon_0 \pi l} \right)^2 / 2 \quad (8)$$

Подставляя значения $\alpha A_0 = 1.58$, $\alpha^2 = 0.98$, $l = 9\text{мм}$, $r_A = 9.5\text{мм}$. Получим $\frac{e}{m} = 232 \cdot 10^9 \text{ Кл/кг}$

Книжное значение $\frac{e}{m} = 175 \cdot 10^9 \text{ Кл/кг}$ и $\varepsilon = 0.32$, что является хорошей точностью.

5. Обсуждение результатов и выводы

По итогам работы был подтвержден "закон 3/2" и с хорошей точностью найден удельный заряд электрона.

Таблица 1. Данные измерений

$I_{\text{нак}}, \text{ A}$	$U_{\text{анод}}, \text{ В}$	$I_{\text{анод}}, \text{ A}$	МНОЖ
1.3	0.5	8.16	10^{-6}
1.3	1	19.07	10^{-6}
1.3	1.5	33.3	10^{-6}
1.3	2	48.72	10^{-6}
1.3	2.5	66.27	10^{-6}
1.3	3	84.2	10^{-6}
1.3	3.5	104.2	10^{-6}
1.3	4	127.77	10^{-6}
1.3	4.5	149.7	10^{-6}
1.3	5	171.8	10^{-6}
1.3	5.5	197.83	10^{-6}
1.3	6	225.45	10^{-6}
1.3	7	283.05	10^{-6}
1.3	8	344.85	10^{-6}
1.3	9	410.9	10^{-6}
1.3	10	0.5113	10^{-3}
1.3	15	0.897	10^{-3}
1.3	20	1.3955	10^{-3}
1.3	25	1.9725	10^{-3}
1.3	30	2.5993	10^{-3}
1.3	35	3.272	10^{-3}
1.3	40	3.9796	10^{-3}
1.3	45	4.7368	10^{-3}
1.3	50	5.609	10^{-3}
1.4	0.5	15.8	10^{-6}
1.4	1	28.22	10^{-6}
1.4	1.5	42.8	10^{-6}
1.4	2	62.01	10^{-6}
1.4	2.5	80	10^{-6}
1.4	3	98.82	10^{-6}
1.4	3.5	123.7	10^{-6}
1.4	4	145.1	10^{-6}
1.4	4.5	170.01	10^{-6}
1.4	5	194.1	10^{-6}
1.4	5.5	218.5	10^{-6}
1.4	6	247	10^{-6}
1.4	7	309	10^{-6}
1.4	8	375.7	10^{-6}
1.4	9	0.4769	10^{-3}
1.4	10	0.5491	10^{-3}
1.4	15	0.9464	10^{-3}
1.4	20	1.458	10^{-3}
1.4	25	2.0523	10^{-3}
1.4	30	2.6976	10^{-3}
1.4	35	3.3786	10^{-3}
1.4	40	4.099	10^{-3}
1.4	45	4.8745	10^{-3}
1.4	50	5.777	10^{-3}

$I_{\text{нак}}, \text{ A}$	$U_{\text{анод}}, \text{ В}$	$I_{\text{анод}}, \text{ A}$	МНОЖ
1.5	0.5	24.28	10^{-6}
1.5	1	38.5	10^{-6}
1.5	1.5	55.22	10^{-6}
1.5	2	77.41	10^{-6}
1.5	2.5	97.2	10^{-6}
1.5	3	118.35	10^{-6}
1.5	3.5	142.64	10^{-6}
1.5	4	165.61	10^{-6}
1.5	4.5	191.19	10^{-6}
1.5	5	217.14	10^{-6}
1.5	5.5	246.12	10^{-6}
1.5	6	276	10^{-6}
1.5	7	337.2	10^{-6}
1.5	8	403.83	10^{-6}
1.5	9	0.5125	10^{-3}
1.5	10	0.5877	10^{-3}
1.5	15	0.9922	10^{-3}
1.5	20	1.5193	10^{-3}
1.5	25	2.127	10^{-3}
1.5	30	2.7805	10^{-3}
1.5	35	3.4688	10^{-3}
1.5	40	4.2044	10^{-3}
1.5	45	4.9855	10^{-3}
1.5	50	5.894	10^{-3}
1.6	0.5	32.6	10^{-6}
1.6	1	49.68	10^{-6}
1.6	1.5	70.74	10^{-6}
1.6	2	94.6	10^{-6}
1.6	2.5	119.07	10^{-6}
1.6	3	142.02	10^{-6}
1.6	3.5	167.48	10^{-6}
1.6	4	193.91	10^{-6}
1.6	4.5	223.95	10^{-6}
1.6	5	251.08	10^{-6}
1.6	5.5	283.22	10^{-6}
1.6	6	312.66	10^{-6}
1.6	7	381.78	10^{-6}
1.6	8	452.45	10^{-6}
1.6	9	0.5645	10^{-3}
1.6	10	0.6403	10^{-3}
1.6	15	1.0607	10^{-3}
1.6	20	1.6044	10^{-3}
1.6	25	2.221	10^{-3}
1.6	30	2.8852	10^{-3}
1.6	35	3.5856	10^{-3}
1.6	40	4.339	10^{-3}
1.6	45	5.204	10^{-3}
1.6	50	6.065	10^{-3}