

Отчет о выполненной лабораторной работе по электронике

Воронин Денис, Б04-407

October 9, 2025

Термоэлектронный диод

Цели работы: практическое изучение явления термоэлектронной эмиссии и процессов токопрохождения в вакууме, изготовление вакуумного диода и исследование некоторых его характеристик.

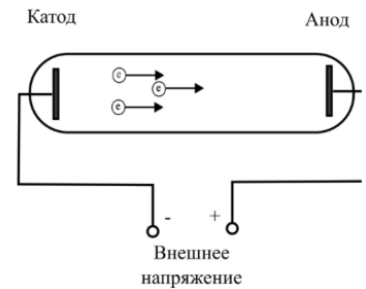
Оборудование: самодельный диод из никелевой пластины и вольфрамовой нити, насос для откачки воздуха, герметичная камера для проведения эксперимента (крепление диода), источник питания, амперметр, вольтметр, соединительные провода.

1 Теоретические сведения

Термоэлектронной эмиссией (ТЭЭ) называется испускание электронов поверхностью нагретых проводящих тел.

Явление термоэлектронной эмиссии и токопрохождение в вакууме являются основными процессами, определяющими работу многих электровакуумных приборов.

Простейший прибор для наблюдения ТЭЭ – термоэлектронный диод, помещенный в объем с низким давлением остаточных газов, состоит из двух металлических электродов (рис. 1). Электрод, эмитирующий электроны, называется *катодом* или *эмиттером*. Получающий электроны электрод обычно называется *анодом* или *коллектором*. При термоэмиссии катод нагрет до высокой температуры T , а анод имеет существенно более низкую температуру. Прикладывая разность потенциалов между катодом и анодом V_A и измеряя ток I_A , протекающий между электродами, получим вольтамперную характеристику (ВАХ) диода, т.е. зависимость $I_A = f(V_A)$.



1.1 Формула Ричардсона-Дешмана

Для прямоугольного потенциального барьера Ричардсон и Дэшман (1928) рассчитали максимальную плотность тока (тока насыщения) термоэлектронной эмиссии, которую может обеспечить при температуре T термокатоде с работой выхода электронов φ (формула Ричардсона–Дэшмана):

$$j = A_0(1 - \bar{r})T^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right), \quad (1)$$

где

$$A_0 = \frac{4\pi l_0 m k^2}{h^3} = 120.14 \text{ А/см}^2\text{К}^2 \quad (2)$$

– термоэмиссионная постоянная Зоммерфельда; T – температура катода по абсолютной шкале Кельвина; \bar{r} – коэффициент отражения электронов на границе металл-вакуум (обычно не превышает 0,07 и при оценочных расчетах им можно пренебречь); φ – работа выхода электронов из катода; $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постоянная Больцмана. Сила тока ТЭЭ определяется выражением $I = jS_k$, где S_k – площадь эмитирующей поверхности катода.

При больших напряжениях проявляется эффект Шоттки – понижение потенциального барьера на границе металл-вакуум при приложении вытягивающего электроны электрического поля напряженностью E . Снижение работы выхода электронов, вызванное искажением барьера, определяется формулой

$$\Delta\varphi = e\sqrt{eE} \text{ (в СГСЭ)} = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{E} [\text{эВ}], \quad (3)$$

где напряженность E измеряется в В/см.

В формуле Ричардсона–Дэшмана учет эффекта Шоттки приводит лишь к умножению тока насыщения на $\exp(\Delta\varphi/kT)$. С учетом (3) выражение (1) для плотности тока насыщения принимает вид

$$j = A_0(1 - \bar{r})T^2 \exp\left(-\frac{\varphi - e\sqrt{eE}}{kT}\right). \quad (4)$$

Для плоскопараллельной геометрии диода и максвелловского распределения по скоростям электронов, вылетевших из катода, зависимость анодного тока определяется формулой

$$I_A = I_0 \exp\left(-\frac{eV_m}{kT}\right), \quad (5)$$

1.2 Параметры термоэлектронных катодов

Применяемые на практике термоэлектронные эмиттеры характеризуются эффективностью. Эффективность катода H определяется отношением плотности тока насыщения к той удельной мощности накала p_H , которую необходимо подводить к единице поверхности катода для поддержания стационарных условий работы. Другими словами, эффективность – это электронный ток, получаемый на единицу мощности накала P_H :

$$H = I/P_H = j/p_H. \quad (6)$$

Подставляя формулу Ричардсона–Дэшмана в (16) и пренебрегая степенной зависимостью H от T , получим

$$H \approx C_1 \exp(-\varphi/kT). \quad (7)$$

Срок службы катода τ определяется в основном скоростью испарения рабочего вещества катода:

$$\tau = C_2 \exp(-q/kT), \quad (8)$$

где q – теплота испарения.

С повышением температуры эмиссионная способность и эффективность термодатода экспоненциально растут, а срок службы экспоненциально уменьшается. Обычно термодатоды имеют эффективность 5–100 мА/Вт, а срок службы – от 5 до 100 тысяч часов. Критерием пригодности вещества для применения в качестве термодатода является условие $\varphi/q < 0,5$.

1.3 Статические характеристики и параметры диода

Крутизна диода в данной точке его характеристики определяется тангенсом наклона касательной к кривой $I_A = f(V_A)$ и приближенно равна отношению приращения тока анода к приращению на аноде:

Дифференцируем уравнение тока I_A (формулу закона “трёх вторых”) по V_A , получим аналитическое выражение крутизны в заданной точке:

$$S = \frac{dI_A}{dV_A} = \frac{3}{2}gV_A^{\frac{1}{2}}. \quad (9)$$

В случае цилиндрической геометрии, как следует из (13), крутизна характеристики данного типа лампы определяется отношением S_A/r_A^2 , т.е. она тем больше, чем длиннее катод и чем меньше расстояние катод-анод.

Внутреннее сопротивление – величина, обратная крутизне. От этого сопротивления необходимо отличать сопротивление лампы постоянному току, которое определяется по закону Ома и равно:

$$R_0 = \frac{V_A}{I_A} = \frac{V_A}{gV_A^{3/2}} = \frac{1}{gV_A^{1/2}}. \quad (10)$$

Пересанс определяется как отношение тока к анодному напряжению в степени трех вторых (12). Пересанс не зависит от анодного напряжения и наиболее полно характеризует электронный поток.

Обратное напряжение $V_{обр}$ характеризует максимальное допустимое напряжение между анодом и катодом, которое выдерживает лампа без пробоя при подаче на анод отрицательного напряжения.

Допустимая мощность. Электроны, падающие на анод, передают свою кинетическую энергию. Температура анода вследствие этого повышается. Энергия, сообщенная аноду электронами на единицу времени, определяется выражением $P_A = I_A V_A$. Кроме того, на анод поступает часть тепла, излучаемого катодом. Полную мощность, выделяемую на аноде, следует подсчитывать по формуле

$$P_A = I_A V_A + \alpha P_H, \quad \text{где } \alpha = 0,2 - 1,0. \quad (11)$$

2 Схема и описание экспериментальной установки

Схема экспериментальной установки выглядит следующим образом:

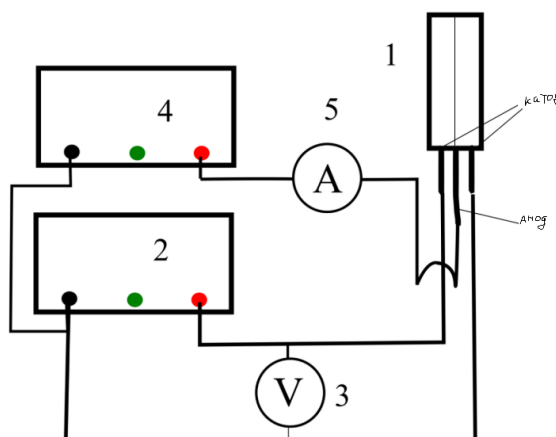


Рисунок 2: Электрическая схема для измерений характеристик диода

где, 1 – исследуемый диод, 2 – регулируемый источник тока накала, 3 – вольтметр, 4 – регулируемый источник напряжения, 5 – амперметр.

3 Порядок выполнения работы

3.1 Изготовление диода

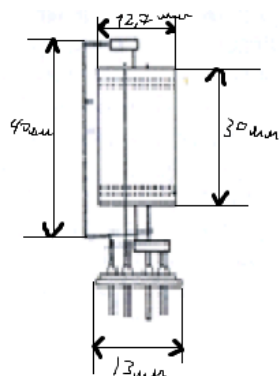


Рисунок 3: Вид диода в сборке

Сначала свернули никелевую пластину в цилиндр, затем при помощи сварки скрепили края цилиндра вместе.

Затем сложили никелевую проволоку по нужной геометрии и припаяли сбоку цилиндра (отвод анода)

Следующим шагом припаяли 'анодную часть' к креплению, с помощью которого диод будет крепиться в установке.

Далее делаем катодную часть с помощью никелевой проволоки и вольфрамовой нити и припаиваем к основной конструкции.

После этого проверяем работоспособность диода и приступаем к измерениям.



Рисунок 4: Электрическая схема для измерений характеристик диода

3.2 Проведение измерений

Перед началом измерим толщину никелевой пластины (0,2 мм) и диаметр вольфрамовой проволоки (0,05 мм)

Перед началом измерений давление в камере было $6 * 10^{-5}$ торр.

Таблица 1: Прогрев катода

$I_{\text{знак}}, \text{ A}$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,00
$U_{\text{знак}}, \text{ MB}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21	43	66	96	132	178	239	317	404	514

$I_{\text{знак}}, \text{ A}$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9
$U_{\text{знак}}, \text{ B}$	0,729	0,906	1,041	1,209	1,452	1,578	1,852	1,991	2,27	2,48	2,74	2,97	3,14	3,41	3,73	4,12	4,34	4,66	5,09

Давление в камере после прогрева $1 * 10^{-4}$ Торр

Измерение вольт-амперных характеристик диода

Таблица 2: $I_{\text{нак}} = 2,4 \text{ A}$, $U_{\text{нак}} = 3,41 \text{ B}$

$U_a, \text{ B}$	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$I_a, \text{ мкА}$	17,00	36,00	46,00	47,00	48,00	51,00	53,00	55,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
σI_a	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 3: $I_{\text{нак}} = 2,5 \text{ A}$, $U_{\text{нак}} = 3,73 \text{ B}$

$U_a, \text{ B}$	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$I_a, \text{ мкА}$	23,00	52,00	79,00	82,00	83,00	86,00	90,00	92,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
σI_a	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 4: $I_{\text{нак}} = 2,6 \text{ A}$, $U_{\text{нак}} = 4,12 \text{ B}$

$U_a, \text{ B}$	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$I_a, \text{ мкА}$	43,00	111,00	203,00	280,00	334,00	350,00	367,00	378,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
σI_a	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 5: $I_{\text{нак}} = 2,7 \text{ A}$, $U_{\text{нак}} = 4,34 \text{ B}$

$U_a, \text{ B}$	1	2	3	4	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$I_a, \text{ мкА}$	70,00	164,00	264,00	437,00	595,00	1273,00	1356,00	1402,00	1455,00	1617,00	-	1700,00	-	1750	1780	-	-	1860	-
σI_a	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	0,03	-	0,03	0,03	-	-	0,03	-

Таблица 6: $I_{\text{нак}} = 2,8 \text{ A}$, $U_{\text{нак}} = 4,66 \text{ B}$

$U_a, \text{ B}$	1	2	3	4	5	10	20	26	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$I_a, \text{ мкА}$	75,00	178	313,00	475,00	660,00	1970,00	3910,00	4070,00	—	4740,00	—	4930,00	-	5230	5360	5550	5660	6170	6210
σI_a	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	-	0,05	-	0,05	-	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Таблица 7: $I_{\text{нак}} = 2,9 \text{ A}$, $U_{\text{нак}} = 5,09 \text{ В}$

$U_a, \text{ В}$	1	2	3	4	5	10	20	26	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
$I_a, \text{ мкА}$	90,00	200,00	330,00	510,00	720,00	2150,00	6170,00	9010,00	13700	14400	14650	14790	14860	14900	14900	—	—	15000	—
σI_a	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	—	—	0,05	—

3.3 Построение графиков

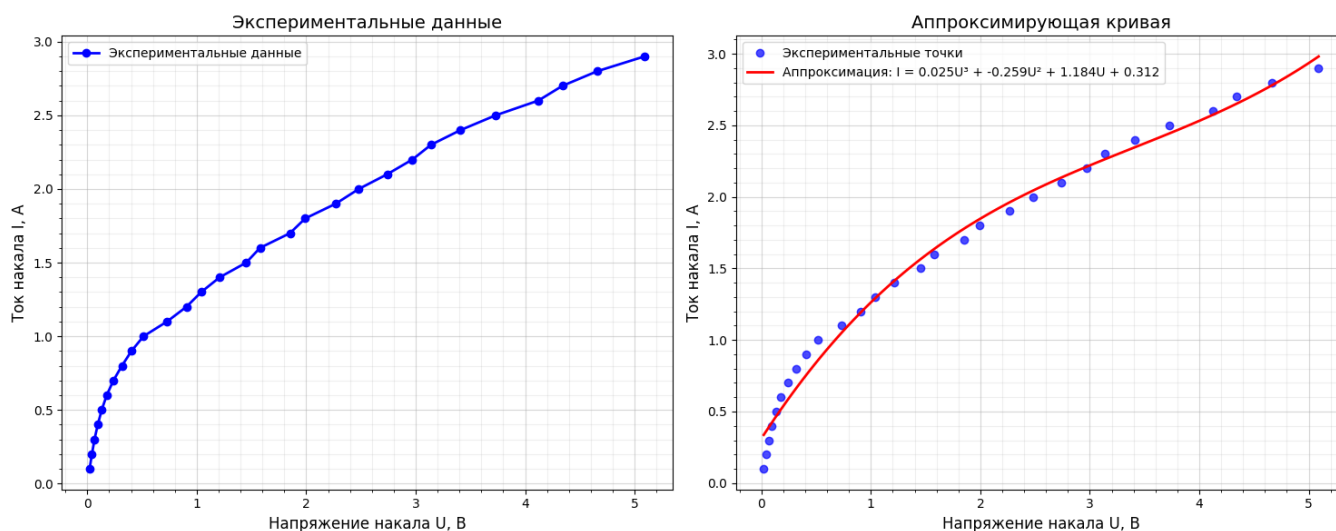


Рисунок 5: График зависимости тока накала от напряжения накала.

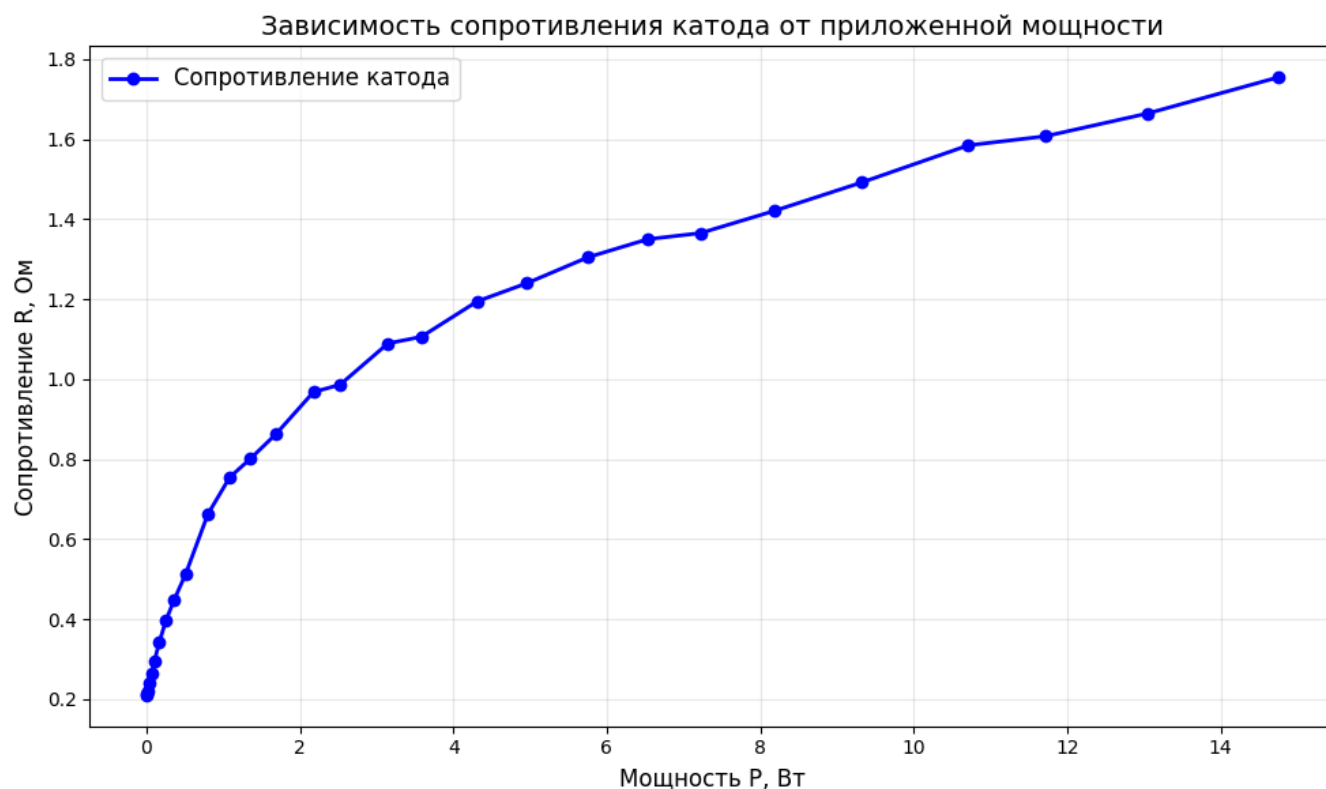


Рисунок 6: График зависимости сопротивления катода от приложенной мощности.

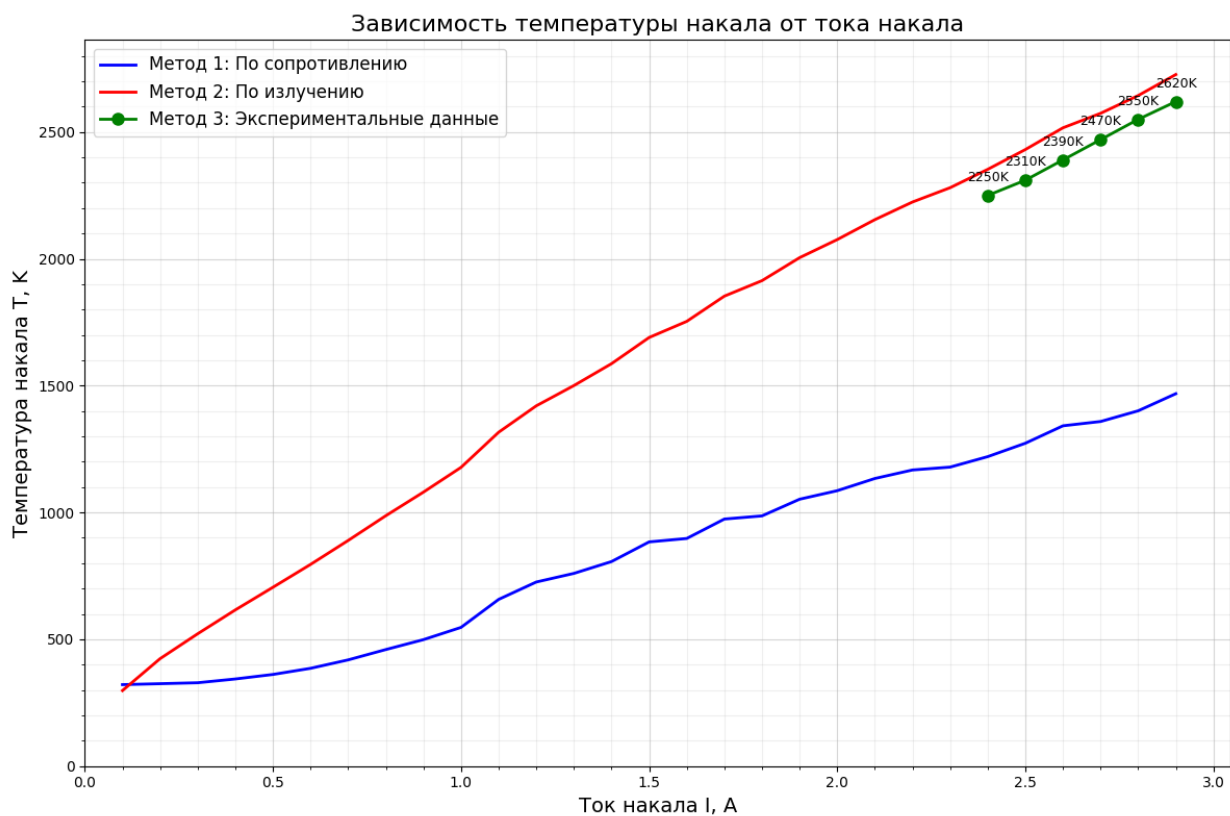


Рисунок 7: График зависимости температуры катода от тока накала через 1 - изменения сопротивления, 2 - на основании расчетов с использованием уравнения энергетического баланса, 3 - на основании расчётов с использованием уравнения Ричардсона– Дэшмана.

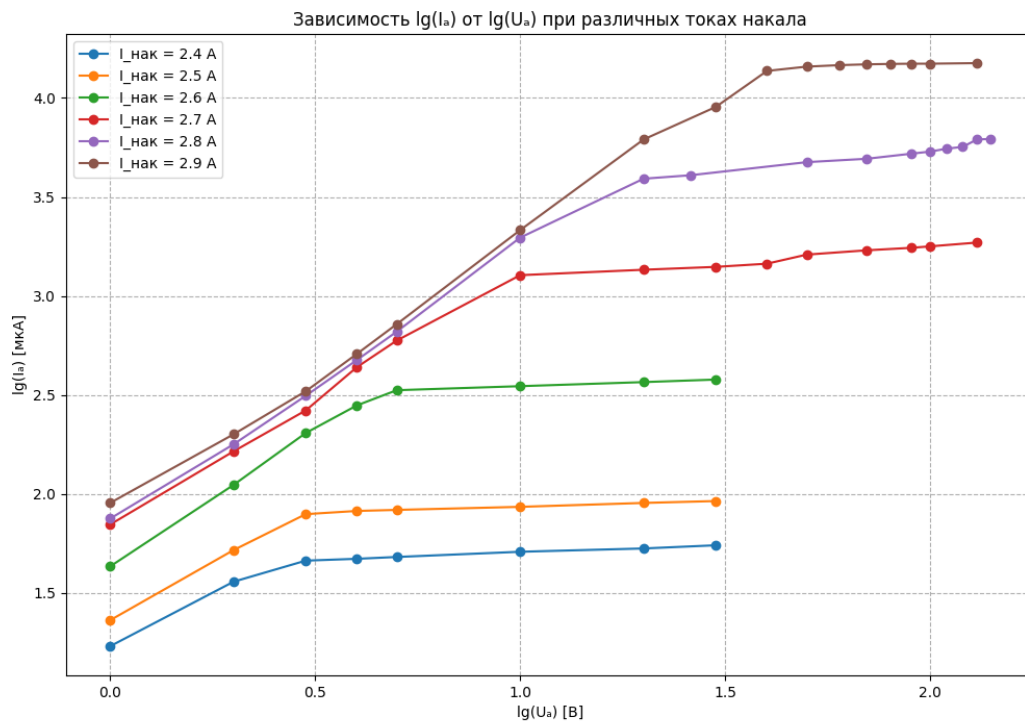


Рисунок 8: График зависимости анодного тока от анодного напряжения при различных значениях тока накала I_H в координатах $\lg(I_A)$ от $\lg(V_A)$.

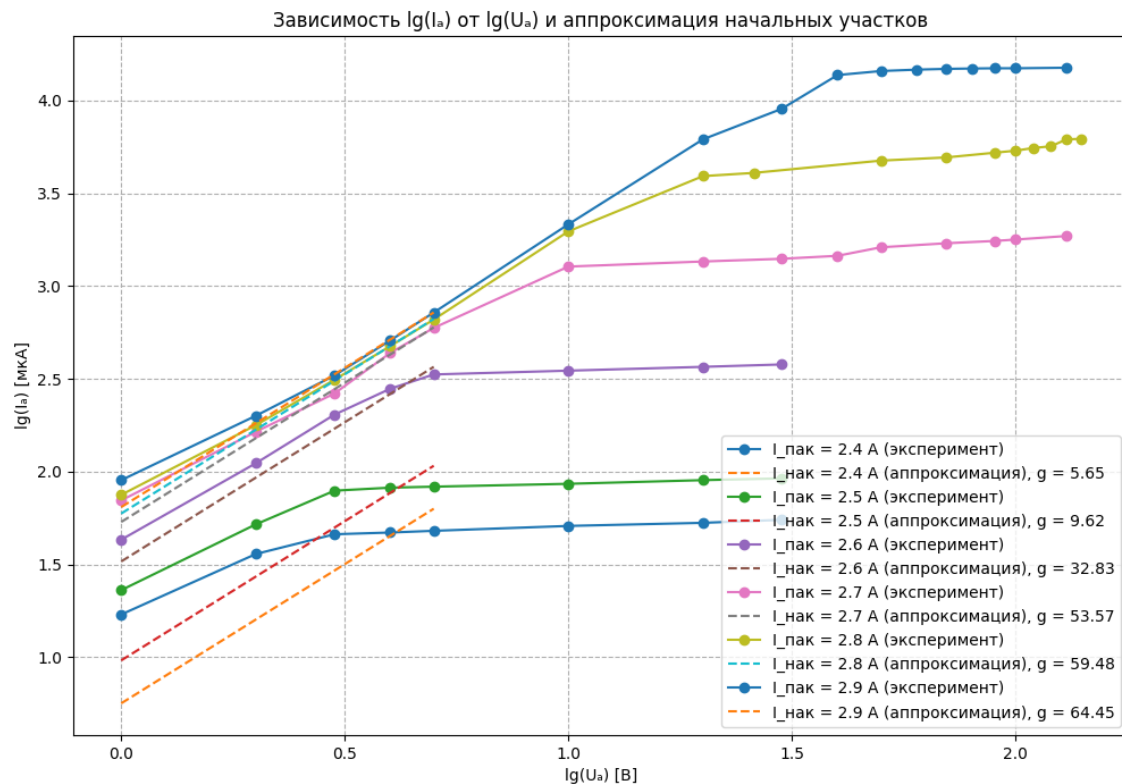


Рисунок 9: График зависимости анодного тока от анодного напряжения при различных значениях тока накала I_H в координатах $\lg(I_A)$ от $\lg(V_A)$ (с аппроксимацией)

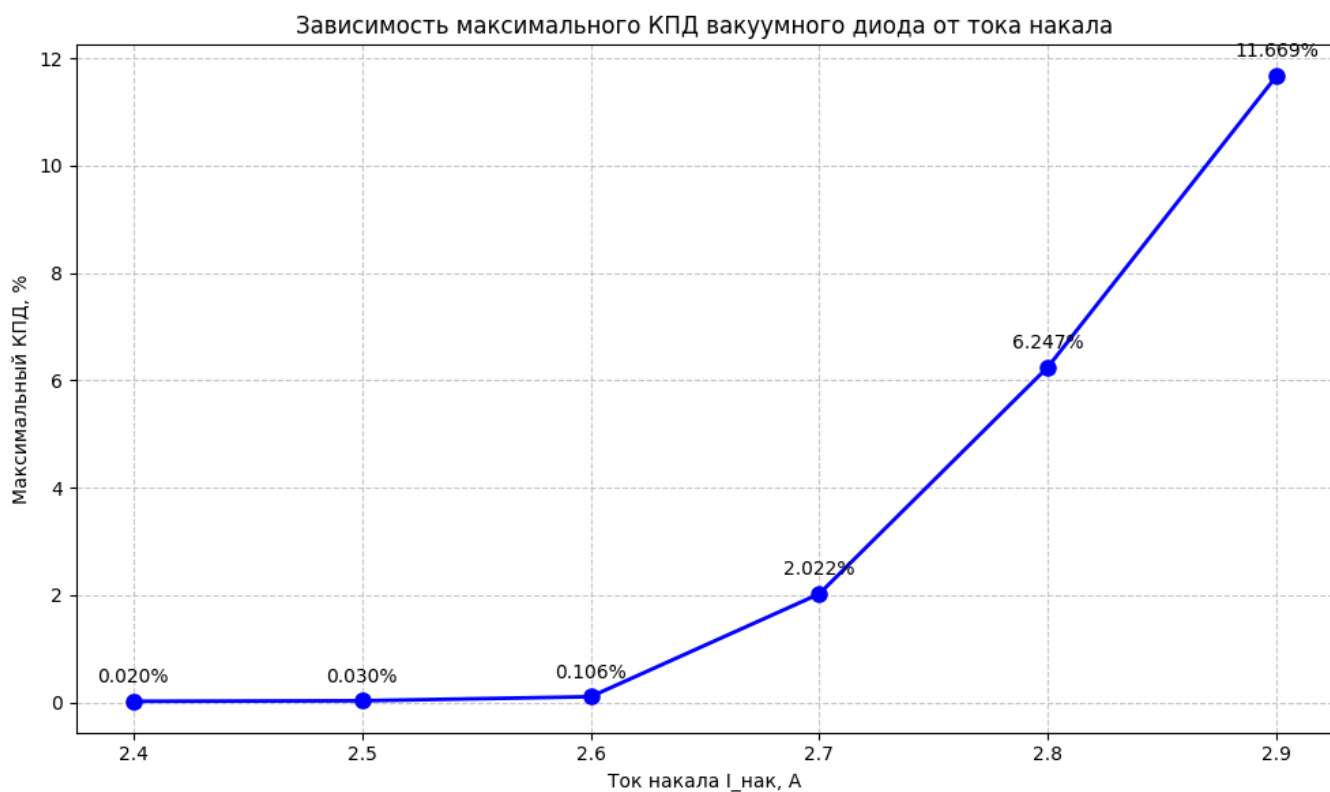


Рисунок 10: Расчет КПД вакуумного диода

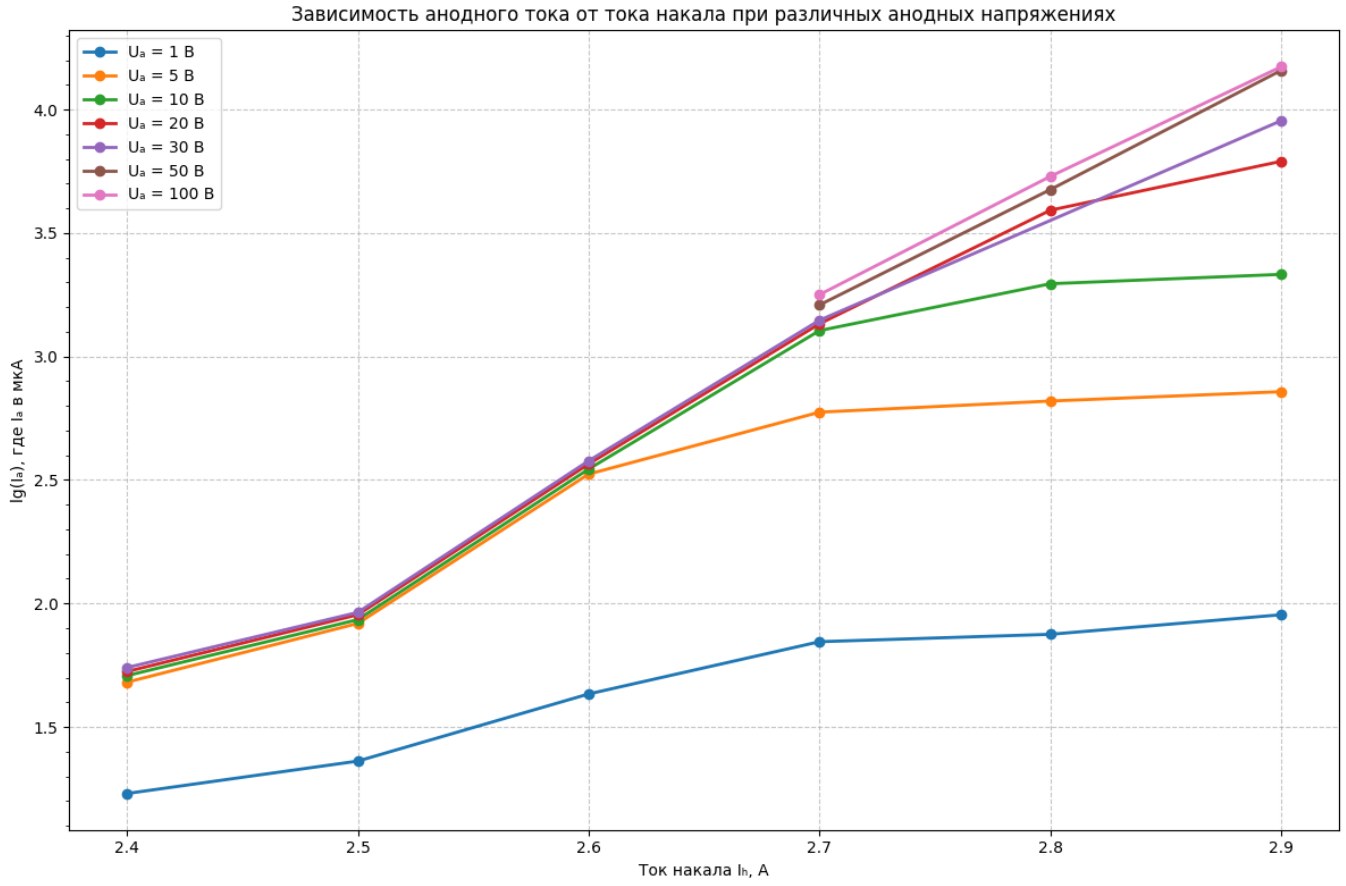


Рисунок 11: График зависимости анодного тока от тока накала

4 К рисунку 7

1. Первый график:

$$T = T_0 + \frac{\left(\frac{R_T}{R_0} - 1\right)}{\alpha},$$

где

$$T_0 = 273 \text{ K}, \quad R_0 = 0.145 \Omega, \quad \alpha = 9.29 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}, \quad R_T = \frac{U}{I}.$$

2. Второй график:

$$T = \left(\frac{P_{\text{накала}}}{\varepsilon \sigma S_{\text{изл}}}\right)^{1/4},$$

где

$$P_{\text{накала}} = \frac{U}{I}, \quad \varepsilon = 0.25, \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-12} \text{ W cm}^{-2} \text{ K}^{-4}, \quad S_{\text{изл}} = 0.1884 \text{ cm}^2.$$

3. Третий график: Используется формула Ричардсона — Дешмана для плотности насыщенного тока термоэлектронной эмиссии:

$$j_{\text{нас}} = A_0(1 - \tau)T^2 \exp\left(-\frac{\varphi}{kT}\right),$$

где

$$\varphi \approx 4.5 \text{ eV}, \quad A_0 = 120.4 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}, \quad j_{\text{нас}} = \frac{I_{\text{нас}}}{S_{\text{к}}}.$$

Таблица 8: Экспериментальные данные(рис 6)

I (A)	U (V)	P (W)	R (Ω)
0.1	0.021	0.002	0.210
0.2	0.043	0.009	0.215
0.3	0.066	0.020	0.220
0.4	0.096	0.038	0.240
0.5	0.132	0.066	0.264
0.6	0.178	0.107	0.297
0.7	0.239	0.167	0.341
0.8	0.317	0.254	0.396
0.9	0.404	0.364	0.449
1.0	0.514	0.514	0.514
1.1	0.729	0.802	0.663
1.2	0.906	1.087	0.755
1.3	1.041	1.353	0.801
1.4	1.209	1.693	0.864
1.5	1.452	2.178	0.968
1.6	1.578	2.525	0.986
1.7	1.852	3.148	1.089
1.8	1.991	3.584	1.106
1.9	2.270	4.313	1.195
2.0	2.480	4.960	1.240
2.1	2.740	5.754	1.305
2.2	2.970	6.534	1.350
2.3	3.140	7.222	1.365
2.4	3.410	8.184	1.421
2.5	3.730	9.325	1.492
2.6	4.120	10.712	1.585
2.7	4.340	11.718	1.607
2.8	4.660	13.048	1.664
2.9	5.090	14.761	1.755

Таблица 9: Зависимость g от $I_{\text{нак}}$

$I_{\text{нак}}$ [А]	g [мкА/В ^{3/2}]
2.4	5.65
2.5	9.62
2.6	32.83
2.7	53.57
2.8	59.48
2.9	64.45

5 К рисунку 8 и 9

Экспериментальные значения g

$I_{\text{нак}}$ [А]	g [мкА/В ^{3/2}]
2.4	5,65
2.5	9,62
2.6	32,83
2.7	53,57
2.8	59,58
2.9	64,45

Теоретическое значение g

$$g_{\text{теор}} = 104.72 \text{ мкА/В}^{3/2}$$

Сравнение экспериментальных и теоретических значений

$I_{\text{нак}}$ [А]	$g_{\text{эксп}}$ [мкА/В ^{3/2}]	Отношение $g_{\text{эксп}}/g_{\text{теор}}$
2.4	5,65	0.165
2.5	9,62	0.174
2.6	32,83	0.347
2.7	53,58	0.622
2.8	59,48	0.643
2.9	64,45	0.691

Анализ зависимости g от тока накала

С увеличением тока накала $I_{\text{нак}}$:

Увеличивается эмиссия электронов с катода

Увеличивается коэффициент g

Это соответствует увеличению крутизны ВАХ

6 К рисунку 9

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ e/m

$$d = 1.50 \times 10^{-4} \text{ м}$$

$$S = 1.88 \times 10^{-5} \text{ м}^2$$

$$g = 1.01 \times 10^{-4} \text{ А В}^{-1.5}$$

$$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ Ф м}^{-1}$$

Результат:

$$e/m = 4.73 \times 10^{10} \text{ Кл/кг}$$

$$e/m = 4.73 \times 10^{10} \text{ Кл/кг}$$

Сравнение с табличным значением:

Табличное значение: 1.76×10^{11} Кл/кг

Отклонение: 73.1%

7 К рисунку 10

МАКСИМАЛЬНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ КПД ДЛЯ КАЖДОГО ТОКА НАКАЛА

$I_{\text{нак}}$ [А]	$U_{\text{нак}}$ [В]	$P_{\text{нак}}$ [Вт]	U_a [В]	I_a [мкА]	P_a [мкВт]	КПД [%]
2.4	3.41	8.184	30	55	1650.0	0.020
2.5	3.73	9.325	30	92	2760.0	0.030
2.6	4.12	10.712	30	378	11340.0	0.106
2.6	4.12	10.712	30	378	11340.0	0.106
2.7	4.34	11.718	130	1860	241800.0	2.022
2.8	4.66	13.048	140	6210	869400.0	6.247
2.9	5.09	14.761	130	15000	1950000.0	11.669

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. КПД вакуумного диода очень низкий (менее 0.1%)
2. С увеличением тока накала максимальный КПД увеличивается
3. Основная потребляемая мощность - мощность накала
4. Вакуумные диоды неэффективны как преобразователи энергии
5. Основное применение вакуумных диодов - выпрямление и детектирование, а не энергопреобразование

8 К рисунку 11

ЗАВИСИМОСТЬ АНОДНОГО ТОКА ОТ ТОКА НАКАЛА

U_a [В]	I_a [мкА] ($\lg(I_a)$)					
	2.4 А	2.5 А	2.6 А	2.7 А	2.8 А	2.9 А
1	17 (1.23)	23 (1.36)	43 (1.63)	70 (1.85)	75 (1.88)	90 (1.95)
5	48 (1.68)	83 (1.92)	334 (2.52)	595 (2.77)	660 (2.82)	720 (2.86)
10	51 (1.71)	86 (1.93)	350 (2.54)	1273 (3.10)	1970 (3.29)	2150 (3.33)
20	53 (1.72)	90 (1.95)	367 (2.56)	1356 (3.13)	3010 (3.59)	6170 (3.79)
30	55 (1.74)	92 (1.96)	378 (2.58)	1402 (3.15)	-	9010 (3.95)
50	-	-	-	1617 (3.21)	4740 (3.68)	14400 (4.16)
100	-	-	-	1780 (3.25)	5360 (3.73)	14900 (4.17)

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. С увеличением тока накала анодный ток увеличивается
2. Зависимость $\lg(I_a)$ от I_a близка к линейной
3. Чем выше анодное напряжение, тем больше анодный ток при том же токе накала
4. При малых U_a (1-5 В) зависимость более слабая
5. При больших U_a (20-100 В) наблюдается более сильная зависимость
6. Это объясняется увеличением термоэлектронной эмиссии с ростом температуры катода

9 Вывод

Изучил явления термоэлектронной эмиссии и процессов токопрохождения в вакууме, изготовил вакуумный диод и исследовал некоторые его характеристики. Выяснил зависимость и построил график тока накала от напряжения (зависимость напоминает график корня при небольших напряжениях и токах). Также выяснил, как зависит напряжение катода от приложенной к нему мощности и по имеющимся данным построил график. Была выяснена зависимость температуры накала от тока накала с помощью 3 методов: метод определения по сопротивлению показал наибольшее отклонение от остальных 2-х. Возможно, это связано с неточностью взятия геометрических параметров диода, а также с не совсем корректно рабочим источником питания и напряжения. Далее было посчитано теоретическое и экспериментальное значение первеанса диода g , была выяснена его зависимость: чем больше ток накала, тем меньше отклонение от теоретического значения. Возможно, если бы мы сделали еще пару значений тока накала, то удалось бы минимизировать эту разницу. Было вычислено отношение e/m : оно отличилось от табличного более чем в 3 раза, это связано с несовершенством снятых нами характеристик. Были определены значения КПД для каждого тока накала и зависимость анодного тока накала. Их результаты описаны выше.