

Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)

Термоэлектронный диод

Лабораторная работа по курсу
Вакуумная электроника

Работу выполнил
студент Б04-005 группы
Карташов Константин

Долгопрудный
2 Ноября 2021

Оглавление

Цель работы.....	3
Введение.....	3
Отчет о выполнении работы.....	4
1. Теоретическая справка.....	4
2. Изготовление диода.....	6
3. Описание экспериментальной установки и хода работы.....	6
4. Обработка полученных данных.....	7
Заключение.....	11

Цель работы

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

Введение

Термоэлектронная эмиссия — это испускание электронов поверхностью нагретых проводящих тел. Термоэлектронная эмиссия и токопрохождение в вакууме являются основными процессами, определяющими работу многих электровакуумных приборов, а также электронно-лучевых приборов различных назначений.

Хотя современные приборы имеют довольно сложную конструкцию, многие их характеристики подчиняются тем же закономерностям, которым подчиняется электронный поток в простейшей приборе, представляющем собой двухэлектродную термоэлектронную лампу или, иными словами, диод. Таким образом, изучение его характеристик позволяет сделать выводы и о процессах проходящих в более сложных приборах.

Диод состоит из двух металлических электродов, помещенных в объем с низким давлением остаточных газов. При термоэмиссии катод нагревается до высокой температуры и начинает испускать электроны, которые затем попадают на анод, имеющий существенно более низкую температуру.

Отчет о выполнении работы

1. Теоретическая справка

В ходе работы мы будем пользоваться формулой Ричардсона-Дэшмана, которая позволяет рассчитать максимальную плотность тока (тока насыщения), которую может обеспечить катод при температуре T :

$$j = A_0(1-r)T^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}, \quad (1)$$

где A_0 - термоэмиссионная постоянная Зоммерфельда; T - абсолютная температура катода; r - коэффициент отражения электронов на границе металл-вакуум (обычно не превосходит 0,07, поэтому в данной работе мы будем им пренебрегать); ϕ - работа выхода электронов из катода; k - постоянная Больцмана.

Если дополнительно имеется тормозящее электроны электрическое поле, то ток в цепи будет обеспечиваться теми электронами, которые смогли преодолеть дополнительный потенциальный барьер. Тогда формула 1 примет вид

$$j = A_0(1-r)T^2 e^{-\frac{\phi - eU_a}{kT}}, \quad (2)$$

где U_a - напряжение на аноде.

В общем случае, сила тока термоэлектронной эмиссии будет определяться выражением $I = jS_k = \pi d l_a j$, где S_k – площадь эмитирующей поверхности катода; d - диаметр катода; l_a - высота анода.

Зависимость удельного сопротивления катода от его температуры определяется формулой

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha T), \quad (3)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление в нормальных условиях, α - температурный коэффициент электрического сопротивления.

Уравнение движения электрона можно представить в виде

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = eE = 4 \pi qe = 4 \pi e j t \quad (4)$$

Проинтегрировав, полагая $dx/dt = 0$ при $t = 0$ и $x = x_{\min}$, получаем

$$\frac{dx}{dt} = 2 \pi \left(\frac{e}{m} \right) j t^2, \quad (5)$$

$$x - x_{\min} = \frac{2 \pi}{3} \left(\frac{e}{m} \right) j t^3 \quad (6)$$

Из закона сохранения энергии следует:

$$\frac{mv^2}{2} = m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = -e(U - U_{\min}) \quad (7)$$

Из формул (5), (6) и (7) следует:

$$U - U_{\min} = 3 \left(\frac{3 \pi^2}{2} \right)^{1/3} \left(\frac{m}{-e} \right)^{1/3} j^{3/2} (x - x_{\min})^{4/3}, \quad (8)$$

откуда мы получаем выражение для j :

$$j = \frac{\sqrt{2}}{9 \pi} \sqrt{\frac{-e}{m}} \frac{(U - U_{\min})^{3/2}}{(x - x_{\min})^2} \quad (9)$$

По итогу при $x_{\min} \ll d$ и $U_{\min} \ll U_a$ мы получаем уравнение Чайлда-Ленгмюра:

$$I_a = \frac{\sqrt{2}}{9 \pi} \sqrt{\frac{-e}{m}} \frac{(U - U_{\min})^{3/2}}{(d - x_{\min})^2} S_k \approx g (U_a - U_{\min})^{3/2} \approx g U_a^{3/2}, \quad (10)$$

где g - первеанс диода, который в случае цилиндрической симметрии принимает вид

$$g = \frac{\sqrt{2}}{9 \pi} \sqrt{\frac{-e}{m}} \frac{1}{\beta^2 r_a^2} S_a = \frac{2 \sqrt{2}}{9} \sqrt{\frac{-e}{m}} l_a \frac{1}{r_a \beta^2} = 14,67 \cdot 10^{-6} \frac{l_a}{r_a \beta^2}, \quad (11)$$

где β — функция от соотношения радиусов анода и катода, значение которой можно приближенно считать равным 1.

2. Изготовление диода

Для изготовления анода мы взяли лист никеля со сторонами 30 и 40 мм, сделали на нем ребра жесткости и свернули в цилиндр с помощью оправки. За счет ребер жесткости анод удерживал приданную нами форму. Шов был проварен точечной электросваркой.

Затем мы создали траверсы из отрезков никелевой проволоки длиной 40 мм, которые мы приварили к двум диаметрально противоположным образующим нашего анода цилиндрической формы. Предварительно траверсы были сплющены и загнуты у одного конца для последующего монтажа анода на промышленно изготовленную металлостеклянную ножку.

Катод представляет собой тонкую вольфрамовую проволоку, протянутую коаксиально сквозь анод и закрепленную на ножке с помощью отрезка сложенного никелевой проволоки с флажком-креплением, сложенным пополам, на конце.

3. Описание экспериментальной установки и хода работы

Схема установки представлена ниже (Рис. 1). В вакуумной камере находится диод, к его выходам подключены два источника питания со встроенными вольтметром и амперметром (мультиметры). Один подключен непосредственно к выходам катода: он показывает выходное напряжение (напряжение накала) и силу тока, идущего через катод (ток накала). Второй подключен к одному выходу катода и одному выходу анода: он показывает напряжение на аноде и силу анодного тока.

В ходе работы мы помещаем наш диод в вакуумную камеру и откачиваем в ней воздух до образования высокого вакуума. Затем мы начинаем прогревать катод, постепенно повышая ток накала. Начиная с момента, когда ток накала равен 2,4 А мы записываем показания мультиметра, подключенного к аноду и катоду, для каждого значения тока проводя по 14 измерений при различных значениях напряжения на аноде. Эти данные в дальнейшем послужат для создания вольт-амперных характеристик диода.

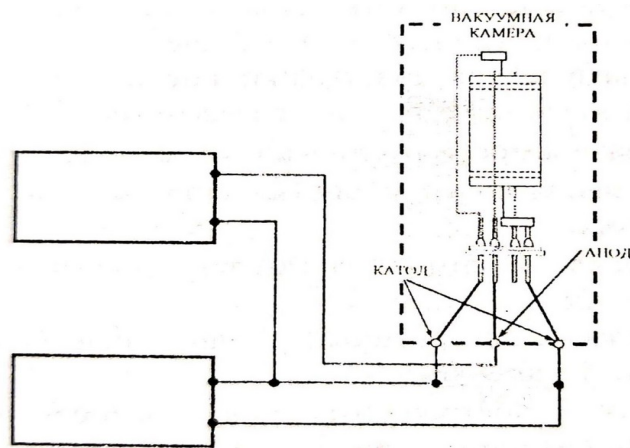


Рис. 1: Электрическая схема для измерений характеристик диода

4. Обработка полученных данных

Построим график зависимости $I_{\text{нак}}$ от $U_{\text{нак}}$ (Рис.2). Очевидно, эта зависимость нелинейна. Это вызвано тем, что катод нагревается и от этого меняется его сопротивление. Построим также график зависимости сопротивления катода R от приложенной мощности P , где $R = U/I$, $P = UI$ (Рис.3).

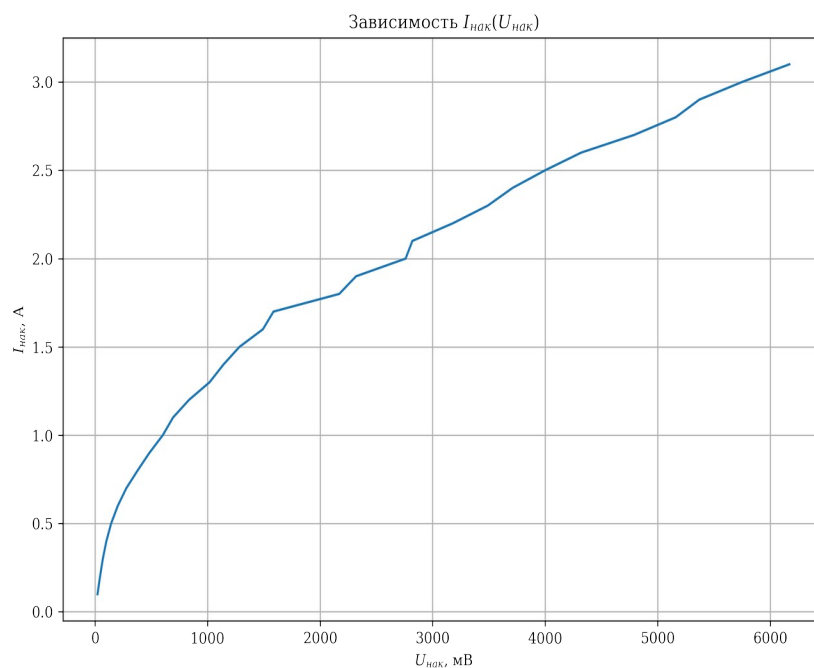


Рис. 2: График зависимости $I_{\text{нак}}(U_{\text{нак}})$

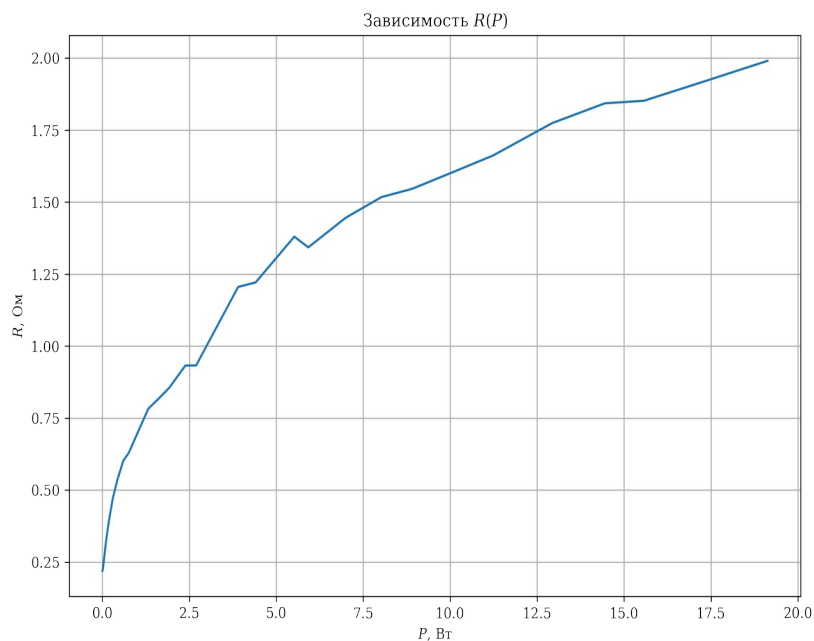


Рис. 3: График зависимости $R(P)$

Построим график зависимости температуры катода T от тока накала $I_{\text{нак}}$, воспользовавшись зависимостью сопротивления катода от его температуры, определяемой уравнением (3). Отсюда получаем следующую формулу:

$$T = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{\pi d^2 U_{\text{нак}}}{4 I_{\text{нак}} \rho_0 l_k} - 1 \right)$$

где ρ_0 - удельное сопротивление в нормальных условиях, α - температурный коэффициент электрического сопротивления; d - диаметр катода; l_k - длина катода. График зависимости представлен ниже (Рис. 4)

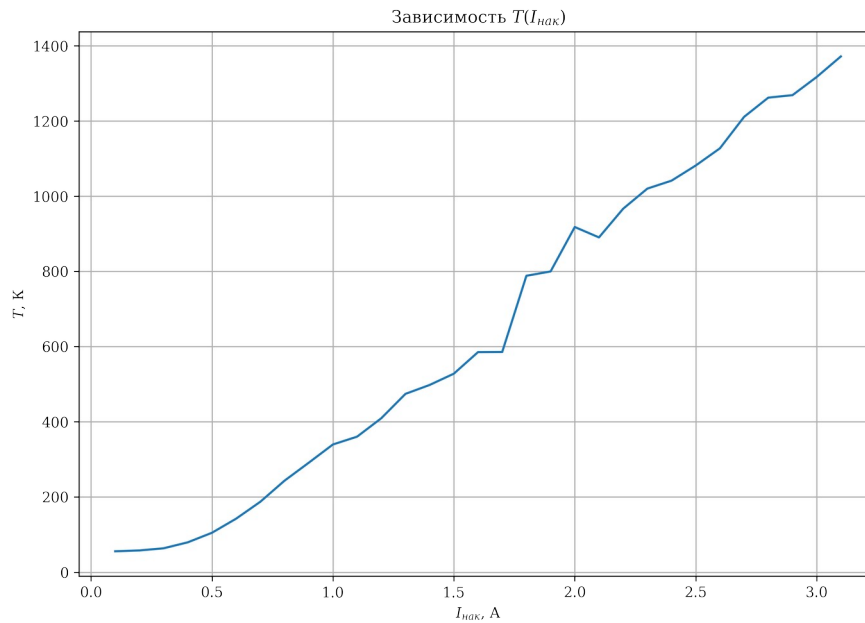


Рис. 4 График зависимости $T(I_{\text{нак}})$

Построим вольт-амперные характеристики диода в координатах $\lg I(\lg U)$. Из графиков по углу наклона прямой в зоне выполнения закона Чайлда-Ленгмюра определим g и сравним ее со значением полученным с помощью формулы (11). Из нее же найдем и значение удельного заряда электрона. Также построим график зависимости $\lg I_A(I_{\text{нак}})$ для различных значений $U_{\text{нак}}$.

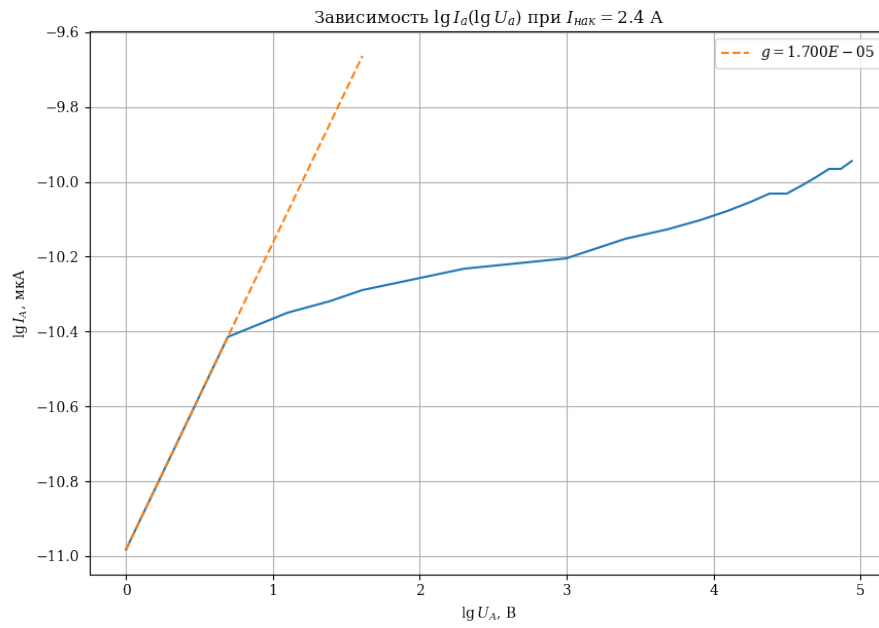


Рис. 5: График зависимости $\lg I_a(\lg U_a)$ при $I_n = 2,4 \text{ A}$

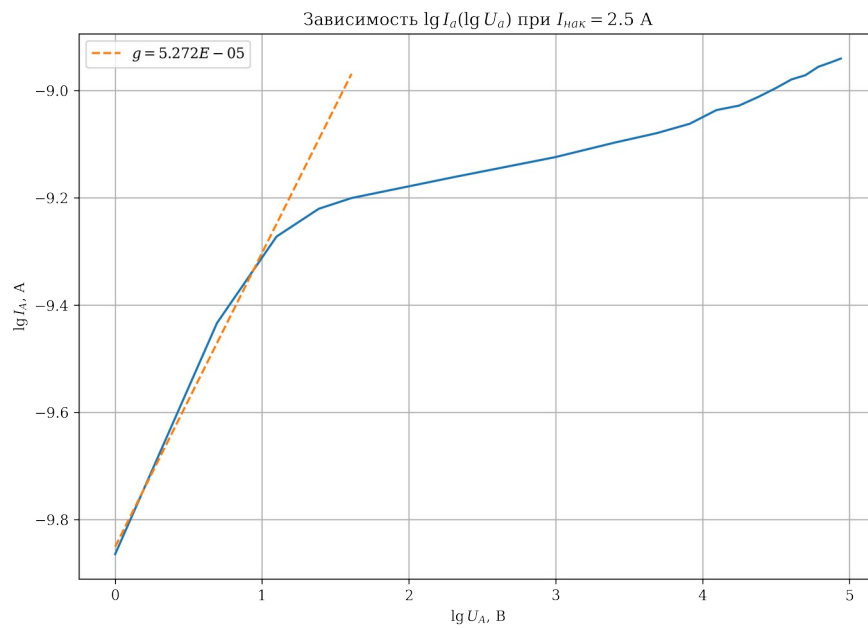


Рис. 6: График зависимости $\lg I_a(\lg U_a)$ при $I_n = 2,5 \text{ A}$

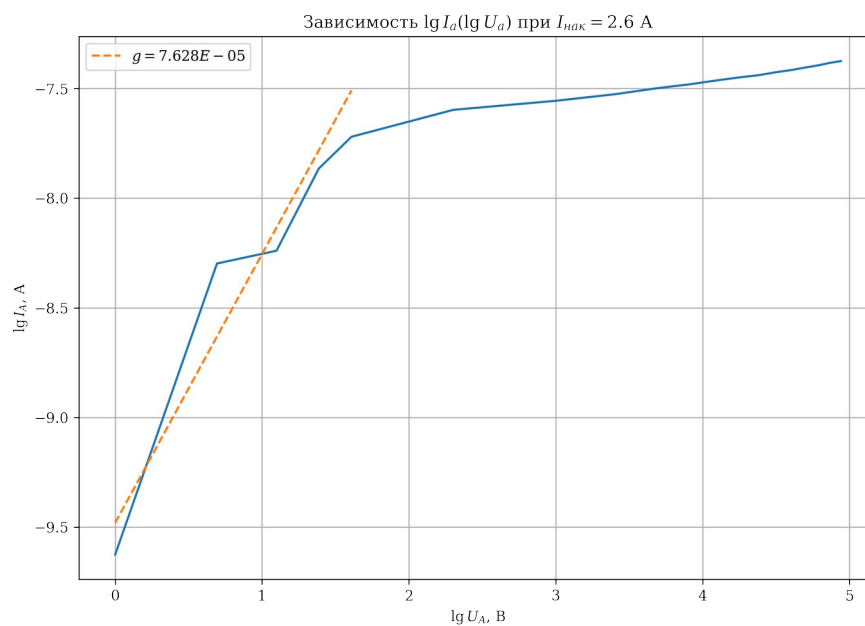


Рис. 7: График зависимости $\lg I_a(\lg U_a)$ при $I_n = 2,6 \text{ A}$

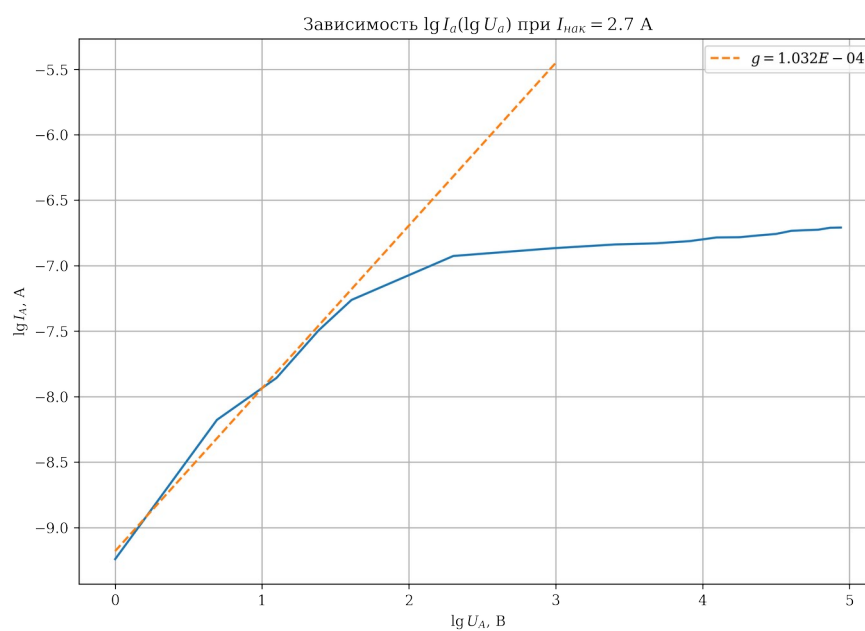


Рис. 8: График зависимости $\lg I_a(\lg U_a)$ при $I_n = 2,7 \text{ A}$

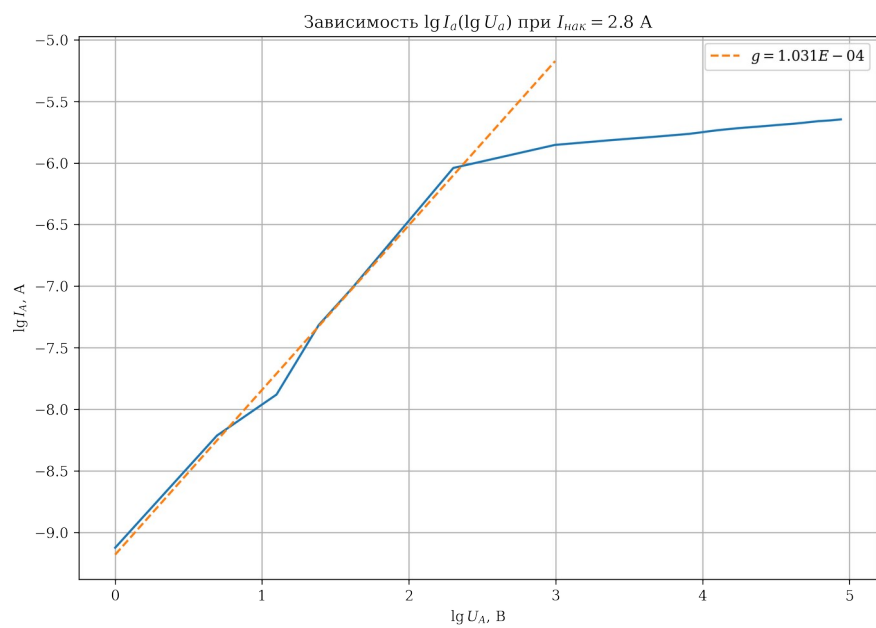


Рис. 9: График зависимости $\lg I_a(\lg U_a)$ при $I_n = 2,8 \text{ А}$

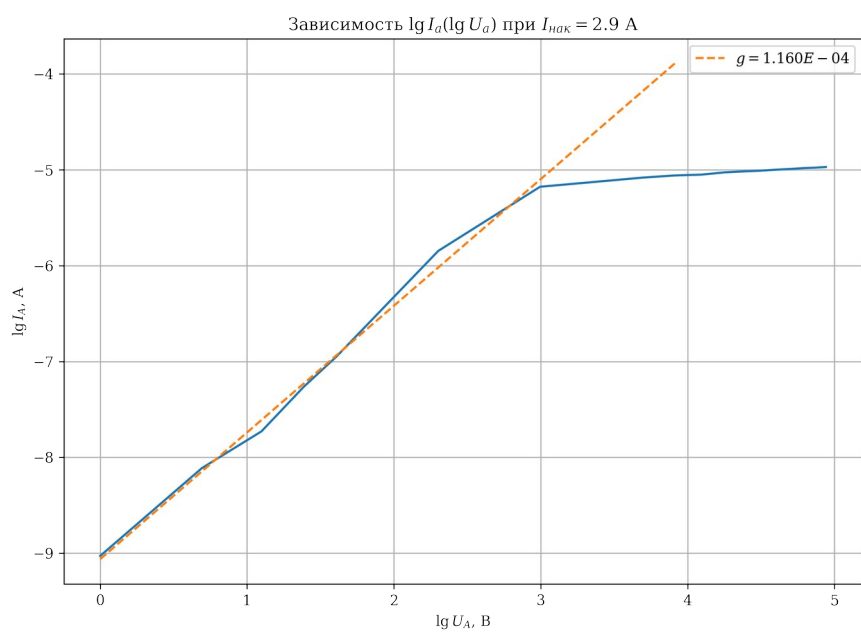


Рис. 10: График зависимости $\lg I_a(\lg U_a)$ при $I_n = 2,9 \text{ А}$

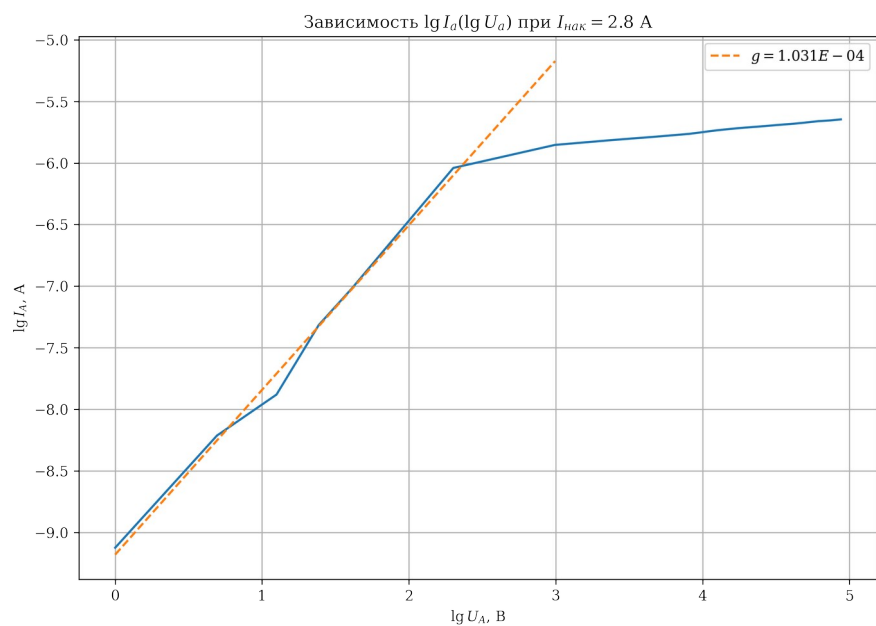


Рис. 11: График зависимости $\lg I_a(\lg U_a)$ при $I_{н} = 2,8 \text{ A}$

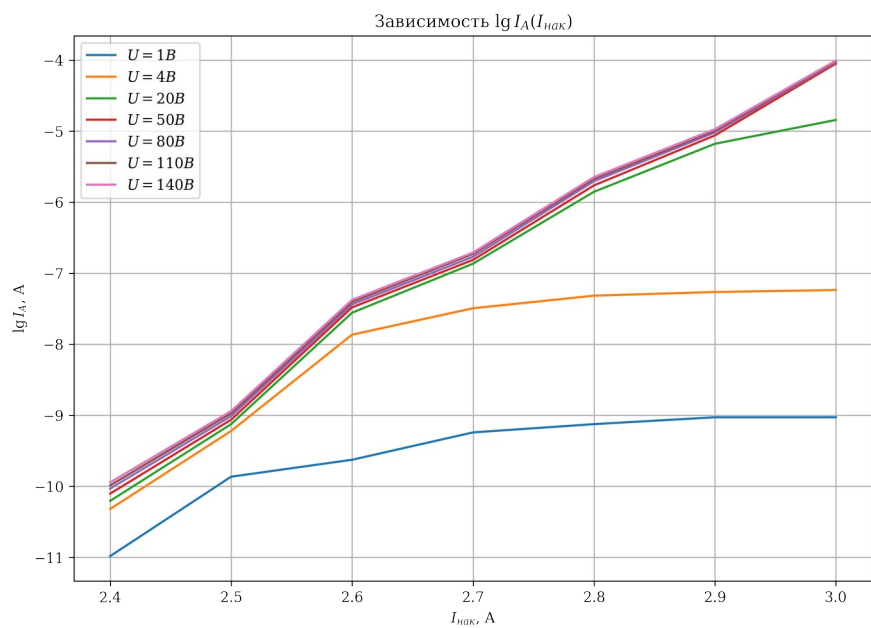


Рис. 12: График зависимости $\lg I_A(I_H)$ при различных значениях U_H

$I_{н}, \text{ A}$	$g, \text{ A/B}^{3/2}$
2.4	$1.7 \cdot 10^{-5}$
2.5	$5.3 \cdot 10^{-5}$

2.6	$7.6 \cdot 10^{-5}$
2.7	$10.3 \cdot 10^{-5}$
2.8	$10.3 \cdot 10^{-5}$
2.9	$11.6 \cdot 10^{-5}$
3.0	$10.1 \cdot 10^{-5}$

Наименьший разброс для значения g у графиков соответствующих значениям тока I_A от 2.7 А до 3.0 А. По ним рассчитаем $g = 10.3 \cdot 10^{-5}$. Ему соответствует $e/m = -2.38 \cdot 10^{11}$ Кл/кг

Из формулы (11) следует, что $g = 8.8 \cdot 10^{-5}$.

Табличное значение удельного заряда электрона равно - $1.76 \cdot 10^{11}$ Кл/кг

Заключение

В данной лабораторной работе мы ознакомились с устройством диода, исследовали его вольт-амперные характеристики, получили значение его первеанса ($g=10.3 \cdot 10^{-5}$), в целом удовлетворяющее теоретическим рассуждениям, рассчитали удельный заряд электронов, соответствующий ему ($e/m=-2.38 \cdot 10^{11}$ Кл/кг), который практически равен табличному значению.

Помимо этого мы убедились в наличии у диода области напряжений, на которой выполняется закон Чайлда-Ленгмюра и определили зависимость температуры катода от силы тока накала.