

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

## Термоэлектронный диод

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА ПО КУРСУ «ВАКУУМНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА»

выполнила студентка 004 группы ФЭФМ  
Плюскова Наталия Алексеевна

Долгопрудный, 2021 г.

## 1 Цель работы

1. Изучить физические принципы электроконтактной сварки
2. Овладеть основными приёмами различных сварочных операций

## 2 Виды электроконтактной сварки

*Электроконтактная сварка* - комплексный электромеханический процесс, при котором нагрев места соединения производится проходящим через него электрическим током и сопровождается приложением усилий сжатия.

Виды электроконтактной сварки:

- *Точечная сварка* выполняется в виде отдельных точек с интервалом между ними. Одна из разновидностей точечной сварки - рельефная сварка.
- *Роликовая сварка* - при её выполнении соединение деталей производится с помощью вращающихся электродов-роликов. Роликовая сварка подразделяется на непрерывную (непрерывная подача тока в сварочную цепь и образование ряда точек, перекрывающих друг друга, в результате чего получается сплошной герметичный шов), и прерывистой (на ролики подаются кратковременные импульсы тока, соединения не отличаются от выполненных точечно)
- *Стыковая сварка* - электрический ток проходит через стык соединённых деталей, разогревая их концы, после чего прилагается усилие сжатия.

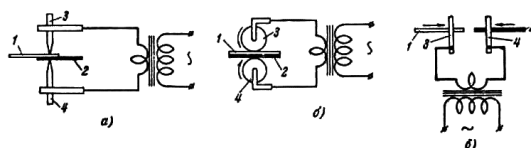


Рис. 1: Виды электроконтактной сварки: а) — точечная, б) — роликовая, в) — стыковая; 1, 2 — свариваемые детали; 3, 4 — электроды

## 3 Требования к сварочным соединениям

При изготовлении электровакуумных приборов часто необходимо изготовление неразъёмных соединений деталей, выполненных из металлов с различными электрофизическими свойствами. Более 90% всех сварных соединений в электровакуумной технике производится с помощью электроконтактной сварки.

Требования к таким соединениям:

1. Высокая статическая и динамическая прочность при длительной работе в вакууме и при других нагрузках
2. Высокая электро- и теплопроводность
3. Соответствие требованиям вакуумной чистоты (отсутствие шлаков, летучих соединений, других посторонних частиц)

Качество соединений зависит от:

- Предварительной подготовки поверхности деталей (полировка, обезжиривание)
- Усилия сжатия
- Сварочного тока
- Времени сварки.

## 4 Принципы работы сварочного оборудования

По способу получения сварочного тока электроконтактная сварка разделяется на трансформаторную и импульсную.

*Трансформаторная сварка* используется в случаях, когда приходится производить сварку в сильно различающихся режимах и высокая производительность не важна. Усилие сжатия и время прохождения тока определяются сварщиком, поэтому качество сварки напрямую зависит от его квалификации. Трансформаторная сварка не позволяет работать в режиме, требующем короткого времени сварки.

*Импульсная сварка* используется для режимов, требующих короткого времени сварки. Формирование импульса напряжения происходит только после достижения требуемого механического усилия на детали. Импульсные формирователи обычно выполняют по *тиристорной* или *конденсаторной* схемам. Детали во время сварки могут удерживаться как вручную, так и при помощи специальных оправок. Для повышения производительности и повторяемости сварочного процесса могут быть использованы автоматические установки с возможностью задания на них усилия сжатия, длительности и мощности сварочного импульса.

## 5 Лабораторная установка

Схема лабораторной установки для исследования характеристик термоэлектронного диода приведена на рис. 1.

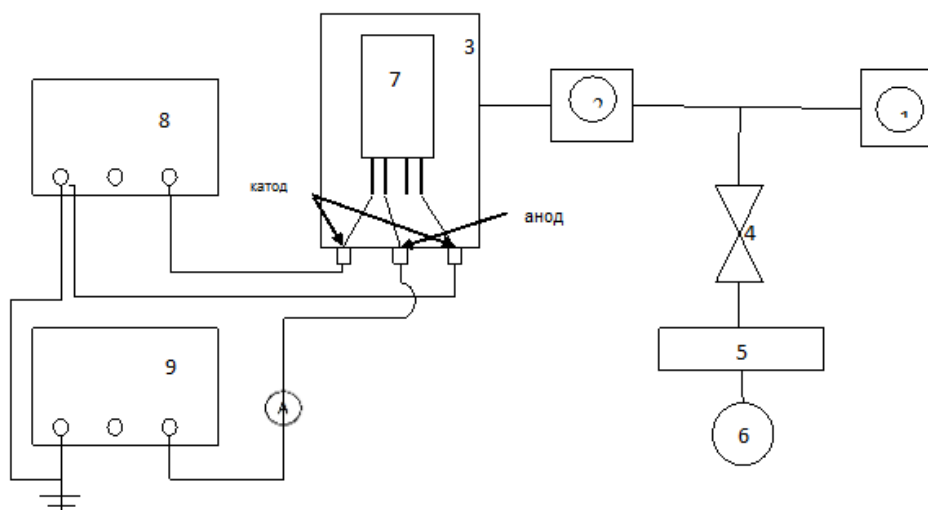


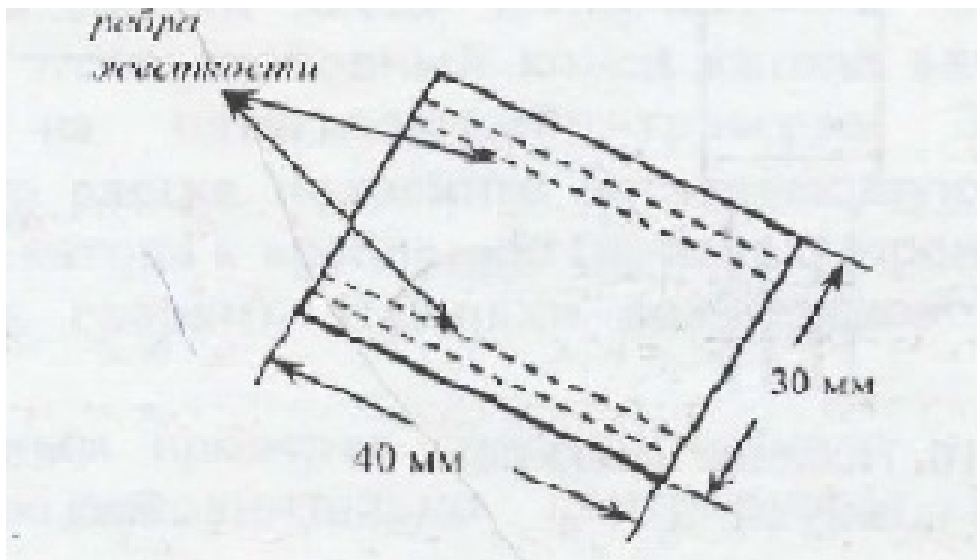
Рис. 2: Принципиальная схема лабораторной установки

1. Форвакуумный насос
2. Турбомолекулярный насос
3. Вакуумная камера
4. Клапан с электрическим управлением
5. Измерительная насадка
6. Фильтр входящего воздуха
7. Диод
8. Источник питания НУ 3010Е
9. Вольтметр GPR-30H100

## 6 Изготовление диода

### 6.1 Изготовление анода

- Для изготовления анода используем никелевую пластину  $30 \cdot 40$  мм. Для большей жесткости анода на заготовке с помощью шила проводятся канавки (ребра жесткости).
- Заготовка наматывается на оправку с захлестом 3 мм, а края пластины завальцовываются на шве для более плотного прилегания.
- Сварка производится с шагом 3 мм между точками.



### 6.2 Монтаж анода на ножку

- Изготавливаем траверсы из двух отрезков никелевой проволоки по 50 мм каждый. Проволока прокатывается между двух пластин для выравнивания и профилируется.
- Траверсы привариваются к аноду так, чтобы ось анода находилась строго между ними.

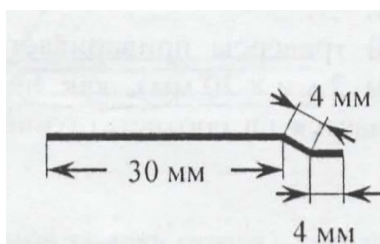


Рис. 8. Траверса анода

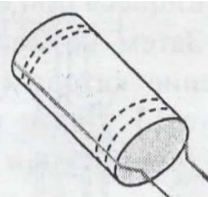
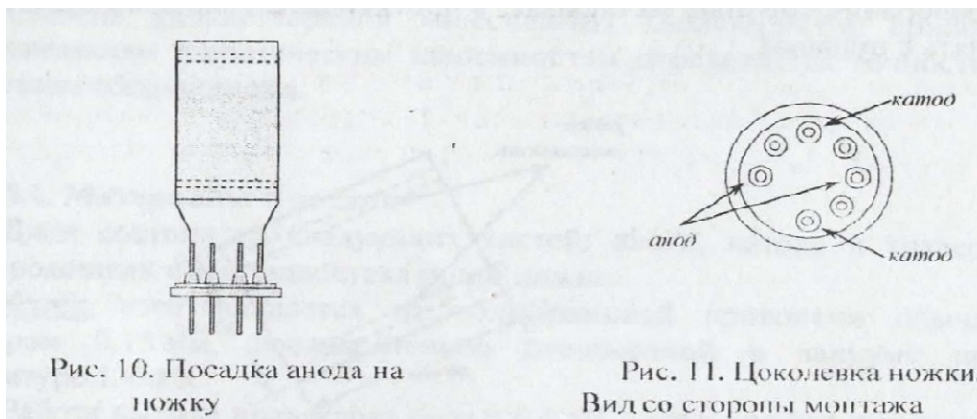


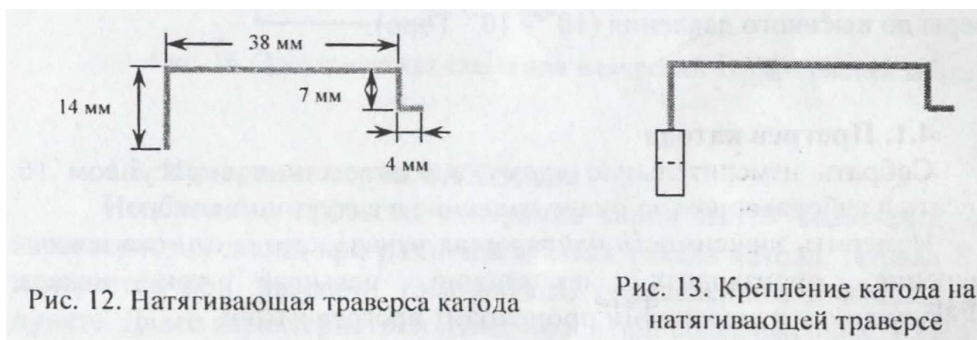
Рис. 9. Крепление траверс на анод

- Далее анод монтируется на ножку так, как показано на рисунке ниже. Предварительно надо очистить выводы ножки от окисла при помощи надфиля.



### 6.3 Подготовка крепления катода

- Для изготовления катода необходимы никелевая проволока длиной 80 мм и две полоски из никеля размерами  $2 \cdot 20$  мм и  $2 \cdot 10$  мм. Для изготовления самого катода понадобится отрезок вольфрамовой проволоки длиной 50 мм.
- Сначала изготавливается траверса и два крепления катода, затем на конец натягивающей траверсы приваривается первое крепление и сама траверса приваривается на соответствующий вывод ножки (см. рисунок)



### 6.4 Монтаж катода

- Сначала отрезок вольфрамовой проволоки распрямляется, затем катод закрепляется во втором креплении.



- Далее крепление вместе с катодом приваривается на соответствующий вывод ножки.
- Происходит натягивание и фиксация катода: для этого свободный конец катода вкладывается в согнутое крепление на натягивающей траверсе. Затем катод натягивается и его приваривают к креплению.

## 7 Выполнение работы

1. Сначала проведём прогрев катода, снимем зависимость тока накала от напряжения накала. График зависимости приведён на рисунке 2.

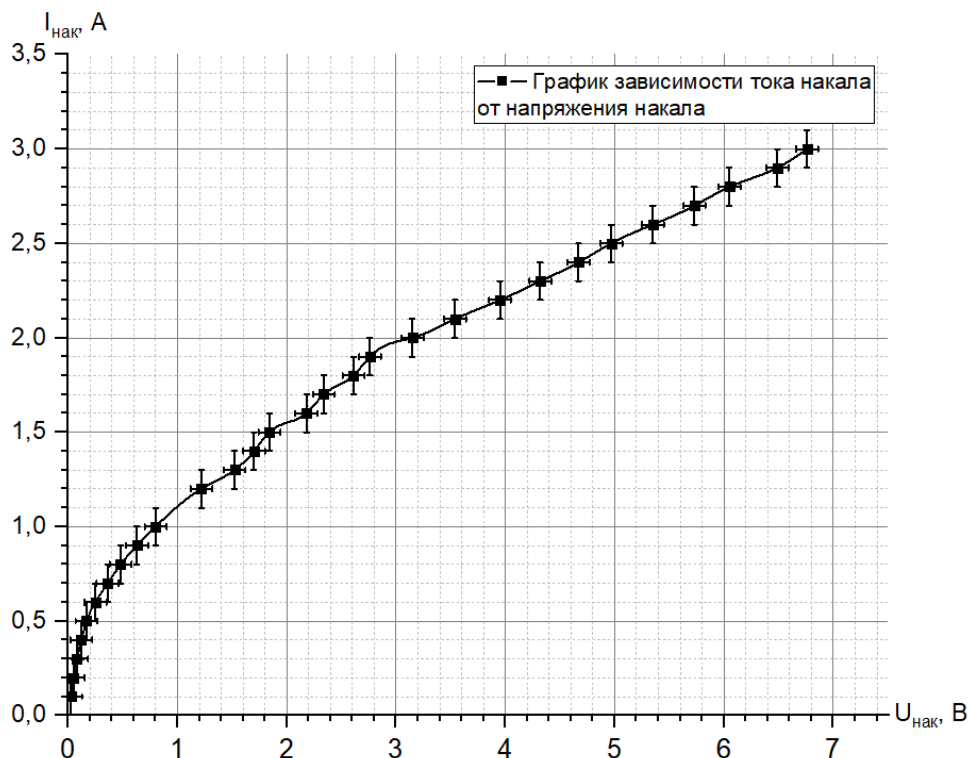


Рис. 3: Зависимость тока накала от напряжения накала

2. Рассчитаем сопротивление диода по формуле, нанесем погрешности на график:

$$R = \frac{U}{I},$$

$$\sigma_R = \sqrt{(\sigma_U/I)^2 + (\sigma_I U/I^2)^2}$$

Рассчитаем подаваемую мощность, нанесём погрешности на график:

$$P = UI$$

$$\sigma_P = \sqrt{(\sigma_U I)^2 + (\sigma_I U)^2}$$

Построим график зависимости сопротивления катода от приложенной мощности (рисунок 3)

3. Построим графики зависимости температуры катода от тока накала.

Для графика, построенного на основании изменения сопротивления катода, температуру будем вычислять по формуле, полученной в результате преобразований:

$$R_T = R_0(1 + \alpha T),$$

$$T = \frac{R_T - R_0}{\alpha R_0}$$

где  $\alpha = 9,29 \cdot 10^{-3}$  - коэффициент температурной зависимости электрического сопротивления,  $\rho_0$  - удельное сопротивление материала катода при  $0^\circ$ . Учтем длину и диаметр проволоки.

Для графика, построенного на основании расчётов с использованием уравнения энергетического баланса, используем формулу

$$T_k = \left(\frac{P}{\varepsilon S \sigma}\right)^{1/4},$$

где  $S$  - площадь эмитирующей поверхности,  $\varepsilon = 0.032$  - степень черноты материала катода,  $\sigma = 5.67 * 10^{-8}$  Дж/(с\*м<sup>2</sup>\*К<sup>4</sup>).

Представим эти зависимости на одном графике (рисунок 4).

4. Построим графики зависимости анодного тока от анодного напряжения при различных значениях тока накала (рисунки 5 - 11). Покажем прямую линию, отвечающую аппроксимации начального участка графика уравнением вида  $I_A = g(V_A)^{3/2}$
5. По этим данным определим первеанс диода  $g$ . Зная, что  $I_a = gV_A^{3/2}$  и имея зависимости  $\lg(I_A) = k \lg(V_A) + b$ , получим

$$g = 10^{\frac{3b}{2k}}$$

Определим первеанс по разным данным тока накала диода и сравним значения с расчётным:

$$g = 2.33 * 10^{-6} \frac{S_c}{R_a^2} = 3.4485 * 10^{-3},$$

где  $S_c$  - площадь поверхности катода,  $R_a$  - радиус анода.

Также вычислим отношение заряда электрона к его массе по формуле

$$e/m = \frac{81}{8} (g \frac{R_a}{L_a})^2$$

Вычислим эффективность катода:

$$\eta = \frac{I}{P}$$

Таблица 1: Значения первеанса по разным опытам

$I, A$	$U, B$	k	b	g	e/m	$\eta, \%$
2.4	4.7	0.137	-4,4898	$6.944 * 10^{-50}$	—	21.3
2.5	5.3	0.2409	-4,0071	$1.12 * 10^{-25}$	$3.528 * 10^{-51}$	18.7
2.6	5.5	0.3184	-3,7983	$1.27 * 10^{-18}$	$4.536 * 10^{-37}$	18.0
2.7	6.0	0.5798	-3,7735	$1.73 * 10^{-10}$	$8.41 * 10^{-21}$	16.7
2.8	6.3	0.7506	-3,7191	$3.69 * 10^{-8}$	$3.83 * 10^{-16}$	15.9
2.9	6.6	1.0087	-3,8266	$2.04 * 10^{-6}$	$1.17 * 10^{-12}$	15.0
3.0	7.0	1.2219	-3,9186	$1.55 * 10^{-5}$	$6.75 * 10^{-11}$	14.3

6. Построим зависимость анодного тока от тока накала при напряжении  $V = 110 B$

## 8 Вывод

В ходе лабораторной работы

1. Были изготовлен диод методом электроконтактной сварки
2. Были получены представления о структуре элементарного диода
3. Была исследована вольт-амперная характеристика диода
4. Был рассчитан первеанс, эффективность и отношение заряда электрона к его массе
5. Были проверены и подтверждены закономерности ВАХ диода: при больших токах накала - справедливо уравнение Чайлда-Ленгмюра, а при насыщении – уравнение Ричардсона-Дэшмана;
6. Была рассчитана температура катода двумя разными способами: используя сопротивление катода, используя уравнение энергетического баланса, при помощи уравнения Ричардсона-Дэшмана построить зависимость  $T(I$  накала) не удалось, так как явной зависимости между  $T$  и  $I$  накала нет, а численные методы решения не дали результатов, схожих с двумя предыдущими графиками.
7. Мы ознакомились с принципами работы сварочного оборудования, используемого в электровакуумном производстве, его основными характеристиками. Были изучены различные дефекты, возникающие при сварке, и причины их возникновения. При выполнении практической части были проведены простейшие сварочные операции (сварка пластина-пластина, пластина-проволока), изготовлены заготовка анода и траверсы.



## 9 Список литературы

1. Батурин А.С., Кириченко Л.А., Коновалов Н.Д. и др. Под ред. Шешина Е.П. Эмиссионная электроника в примерах и задачах: учебное пособие / –М.:МФТИ, 2002 - 193 с.
2. Батурин А.С., Стариков П.А., Шешин Е.П. Термоэлектронный диод: лабораторная работа по курсу Вакуумная электроника /–М.:МФТИ, 2008 - 43 с.

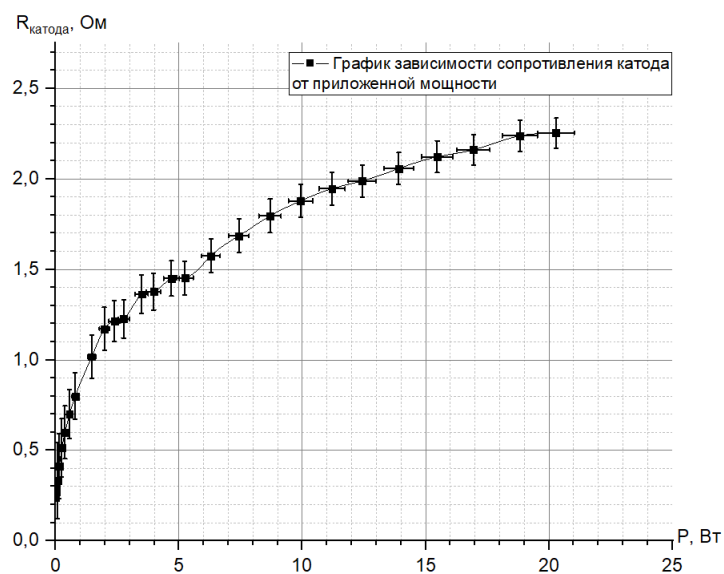


Рис. 4: Зависимость сопротивления катода от приложенной мощности

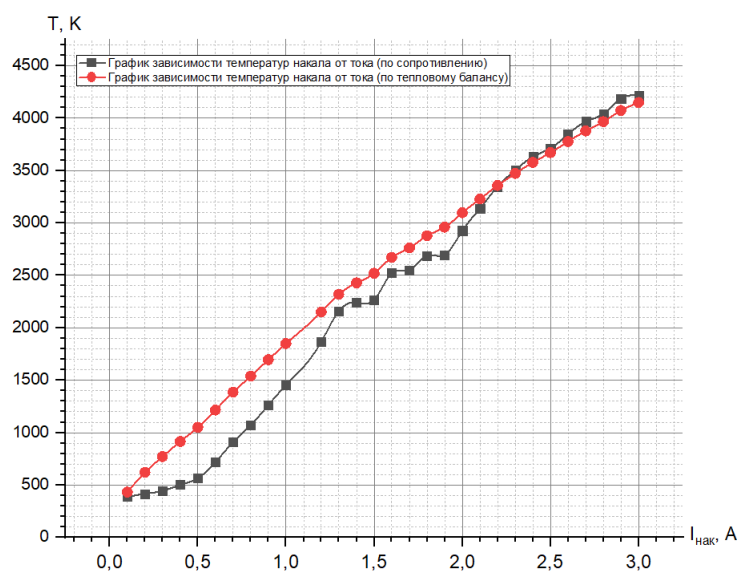


Рис. 5: Зависимость температуры катода от тока накала: расчёт по измерению сопротивления и по уравнению Стефана-Больцмана

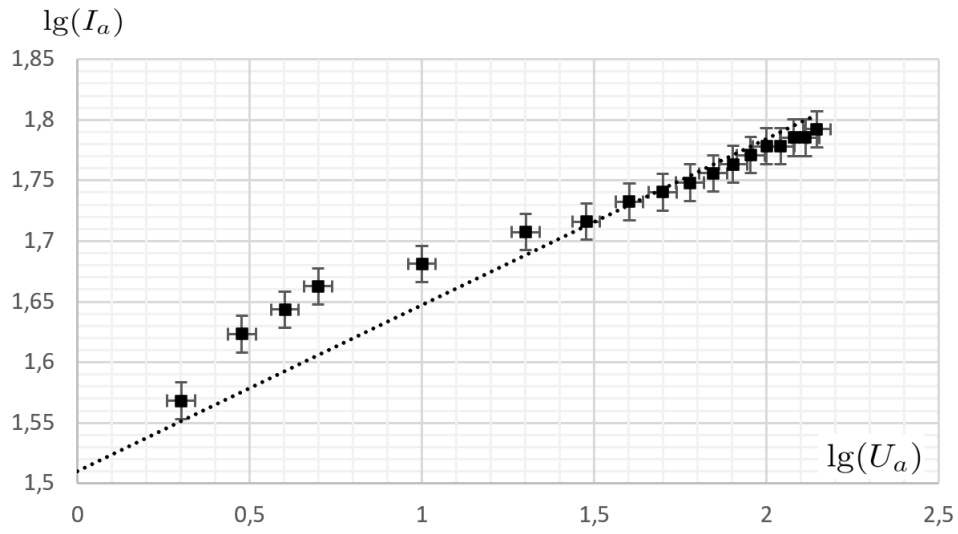


Рис. 6: Зависимость  $lg(I_A)$  от  $lg(V_A)$  при токе накала 2.4 А, напряжении накала 4.7 В

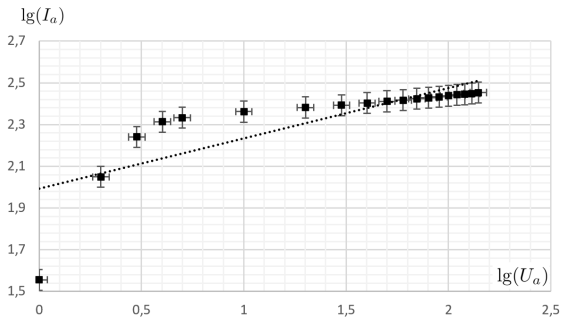


Рис. 7: Зависимость  $lg(I_A)$  от  $lg(V_A)$  при токе накала 2.5 А, напряжении накала 5.3 В

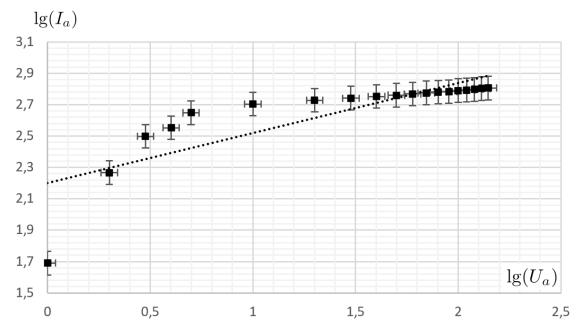


Рис. 8: Зависимость  $lg(I_A)$  от  $lg(V_A)$  при токе накала 2.6 А, напряжении накала 5.5 В

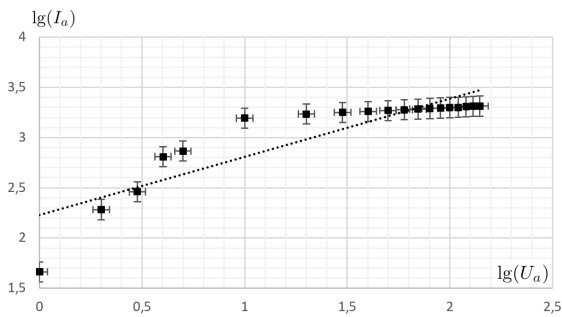


Рис. 9: Зависимость  $lg(I_A)$  от  $lg(V_A)$  при токе накала 2.7 А, напряжении накала 6.0 В

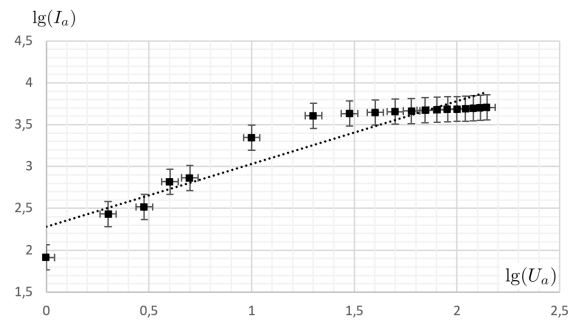


Рис. 10: Зависимость  $lg(I_A)$  от  $lg(V_A)$  при токе накала 2.8 А, напряжении накала 6.3 В

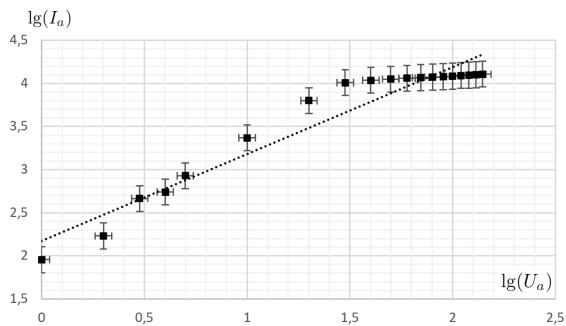


Рис. 11: Зависимость  $\lg(I_A)$  от  $\lg(V_A)$  при токе накала 2.9 А, напряжении накала 6.6 В

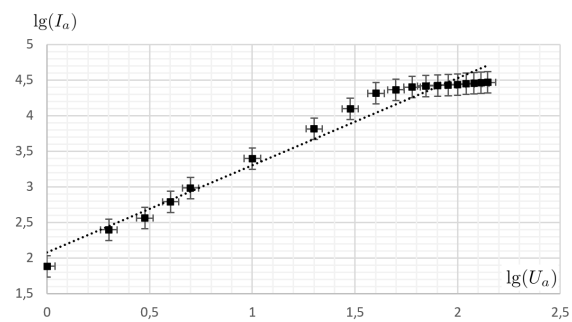


Рис. 12: Зависимость  $\lg(I_A)$  от  $\lg(V_A)$  при токе накала 3.0 А, напряжении накала 7.0 В

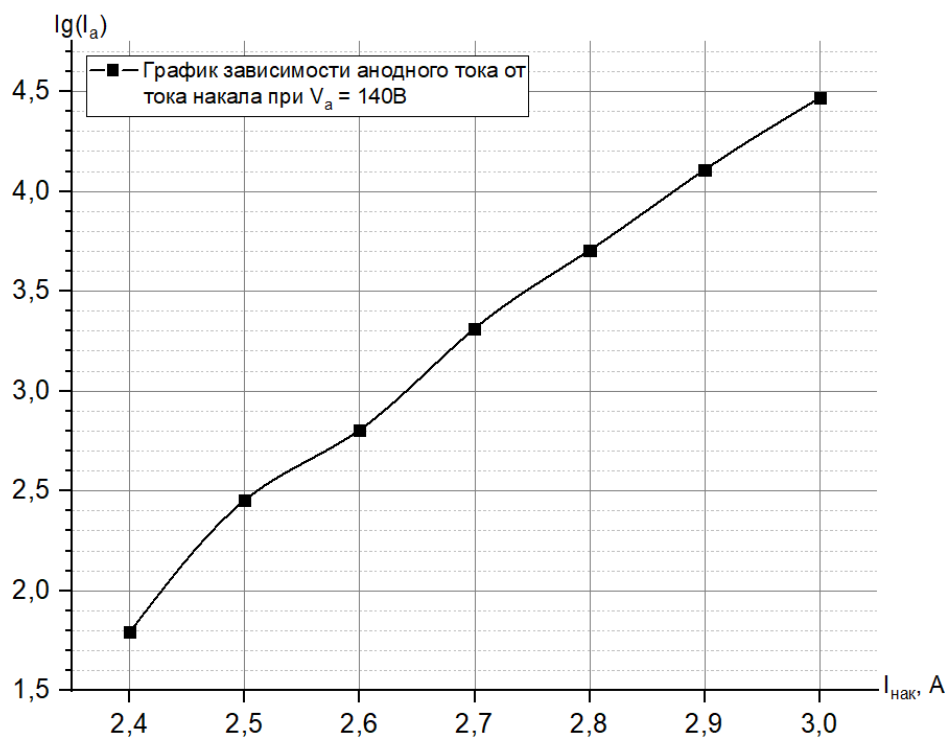


Рис. 13: Зависимость  $\lg(I_A)$  от тока накала при  $V = 140 \text{ В}$