

# Автоэлектронная эмиссия

Коробкина Екатерина - Б04-107

Салтыкова Дарья - Б04-105

Шмаков Владимир - Б04-105

## Цель работы

- Снять вольт-амперную характеристику вольфрамового острия
- Определить радиус закругления острия

## Введение

**Автоэлектронная эмиссия** — способ получения свободных электронов при приложении к поверхности проводника сильного электрического поля. Явление было открыто в 1897 году экспериментатором Робертом Вудом.

## Теоретические сведения

### Связь плотности тока с напряженностью

Объяснение явления автоэмиссии было предложено в 1928 году Фаулером и Нордгеймом. Они получили формулу, описывающую связь плотности автоэлектронного тока  $j$  с напряженностью электрического поля  $E$ :

$$j = \frac{e^3}{4\pi^2\hbar} \frac{\sqrt{E_f}}{W_a\sqrt{\phi}} E^2 \exp\left(-\frac{4}{3e} \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} \frac{\phi^{3/2}}{E}\right) \quad (1)$$

Здесь:

- $\phi = W_a - E_f$  - работа выхода
- $E_f$  - энергия Ферми
- $W_a$  - уровень вакуума

В 1929 году Нордгейм сделал поправку на силы электростатического изображения:

$$j = A \frac{E^2}{\phi} \exp\left(-B \frac{\phi^{3/2}}{E} \theta(y)\right) \quad (2)$$

Здесь  $A = e^3/16\pi^2\hbar$ ,  $B = 4\sqrt{2m}/3e\hbar$ ,  $y = \sqrt{e^3 E}/\phi$ .  $\theta(y)$  - **функция Нордгейма** — при значениях аргумента близких к нулю или единице функция может быть приближена выражением (3):

$$\theta(y) \sim 0.965 - 0.739y^2 \quad (3)$$

Теория Фаулера-Нордгейма получена для полубесконечного металла находящегося при температуре  $T = 0K$ . Но незначительное увеличение температуры мало меняет распределение электронов в металле, лишь размывая его на величину порядка  $kT$  вблизи

уровня Ферми → теория остается верной если выполнено условие  $kT \ll \phi$ . При комнатной температуре условие верно, так как  $kT \sim 2.6 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$ ,  $\phi \sim 4 \text{ эВ}$ .

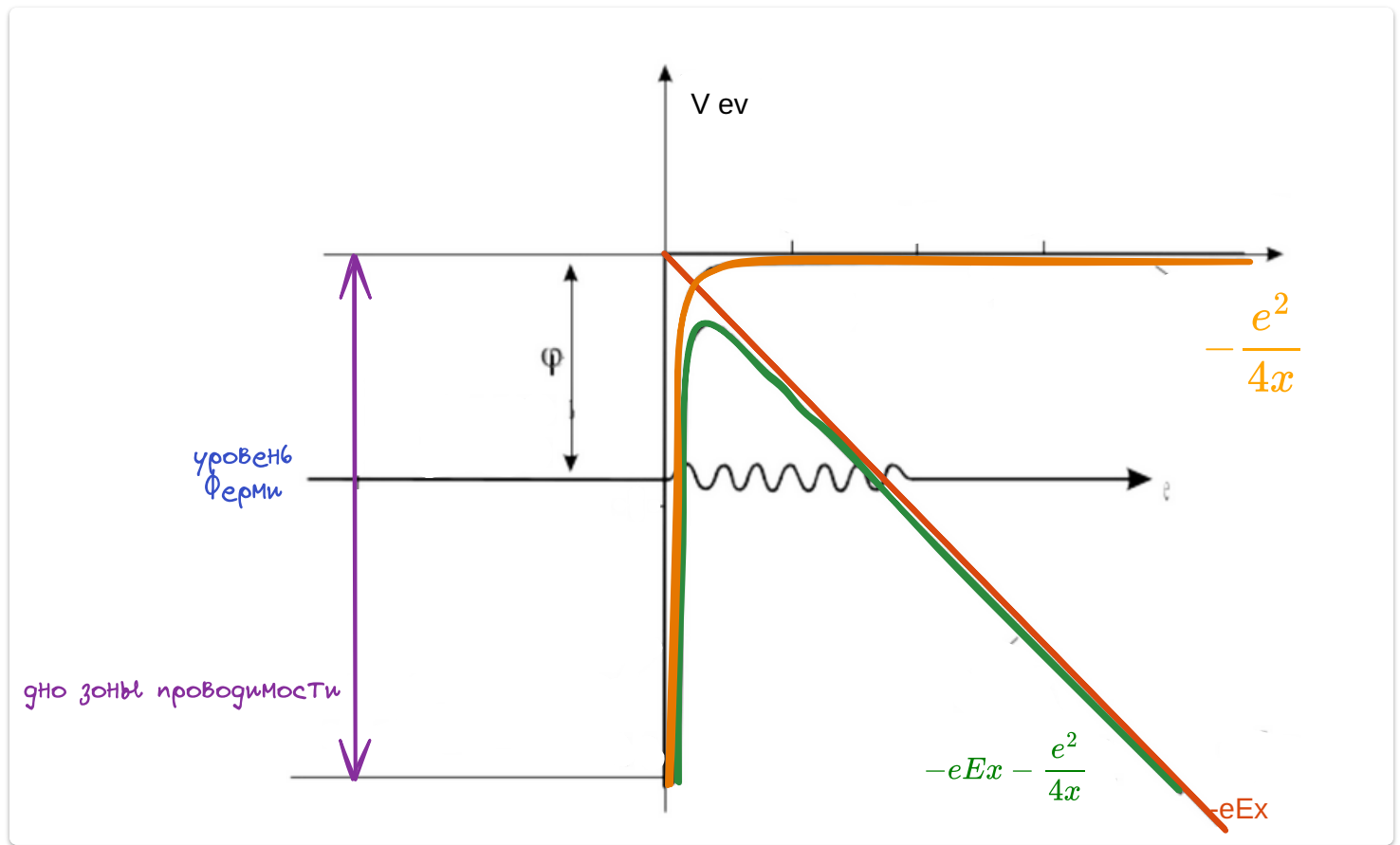


Рисунок 1. Поверхностный потенциальный барьер на границе металл — вакуум в присутствии сильного электрического поля

Если построить зависимость  $\ln(j/E^2)$  от  $1/E$ , то получится практически прямая линия. Эта прямая называется графиком Фаулера-Нордгейма, а координаты в которых она строится — **координатами Фаулера-Нордгейма**. Наклон прямой выражается по формуле:

$$S_{FN} = \frac{d \ln(j/E)}{d(1/E)} = -0.683 \cdot s \left( \frac{3.79 \sqrt{E}}{\phi} \right) \phi^{3/2} \quad (4)$$

$s(y)$  - введенная в выражении (4) - специальная функция, график которой представлен на рисунке 2:

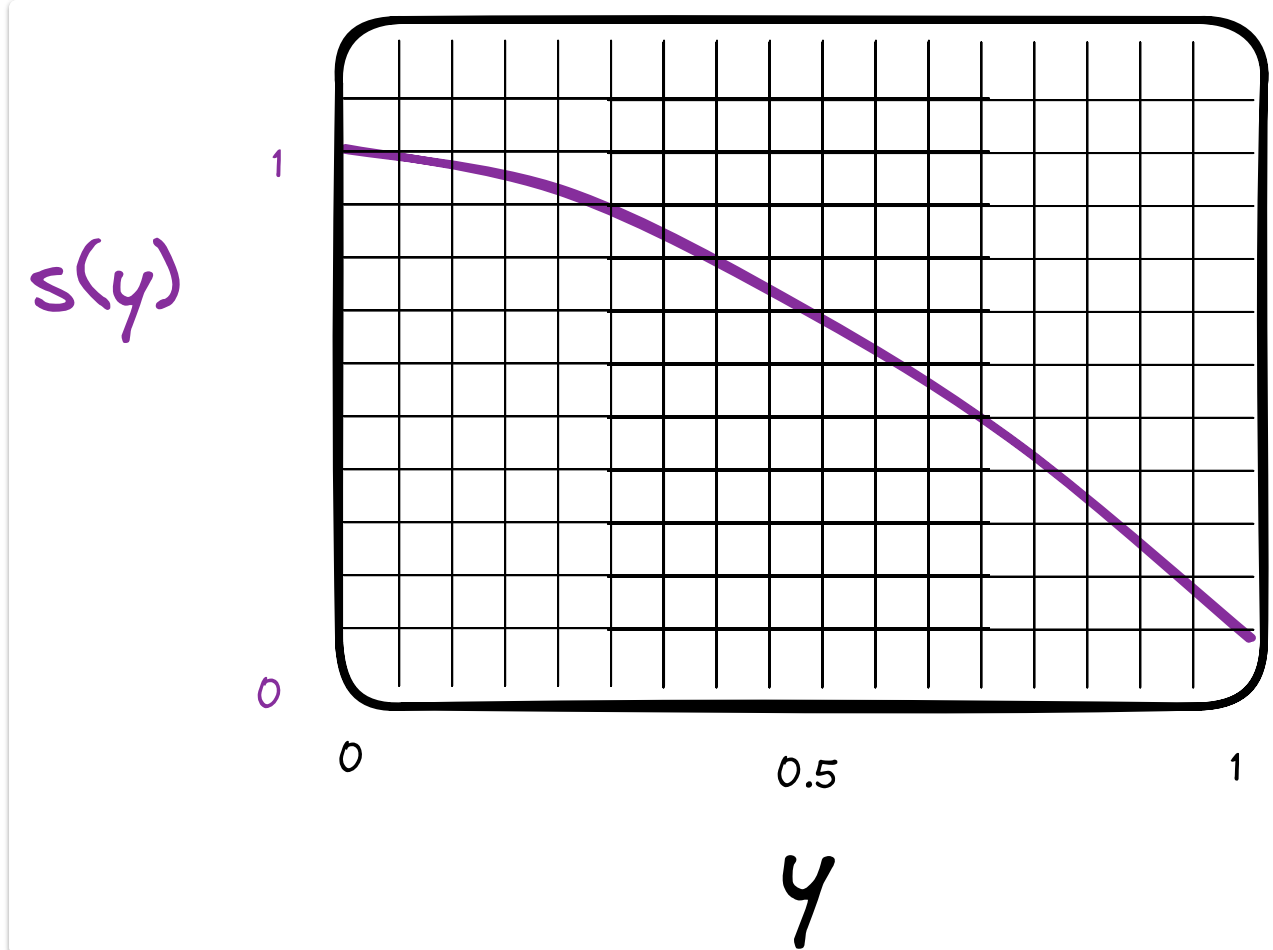


Рисунок 2. Вид специальной функции  $s(y)$

## Одноэмиттерные системы

В экспериментах измеряется зависимость полного тока от приложенного к эмиттеру напряжению. Эти величины пропорциональны плотности тока и напряженности электрического поля соответственно:

$$I = S_{\text{э}} j \quad E = \beta U \quad (5)$$

В формуле (5)  $S_{\text{э}}$  - площадь острия,  $\beta$  - **форм-фактор острия**.

Таким образом, если построить зависимость  $\ln(I/U^2)$  от  $1/U$  должна получиться прямая, тангенс угла наклона которой определяется по формуле:

$$\text{tg}(\alpha) = -0.683 \frac{\phi^{3/2}}{\beta} \quad (6)$$

Если известна работа выхода острия, то можно определить  $\beta$  и тем самым напряженность электрического поля у поверхности острия.

## Многоэмиттерные системы

Если имеется множество эмиссионных центров, то пренебрегая взаимным влиянием эмитирующих центров запишем:  $I = \sum_i I_i$ .

Форм-фактор каждого центра заменим средним значением и для суммарного тока получим выражение:

$$I = S \frac{A}{t^2(y_0)} \frac{\beta^2 U^2}{\phi} \exp\left(-B \frac{\phi^{3/2}}{\beta U} v(y_0)\right) \quad (7)$$

Суммарная площадь рабочей поверхности определяется выражением  $S = NS_0 = N\alpha r^2$ .  $N$  - число эмиссионных центров,  $\alpha$  - коэффициент зависящий от формы центра,  $r^2$  - квадрат радиуса центра.

## Нестабильность автоэмиссионного тока

В результате измерения ВАХ получается набор точек, являющиеся прямой в координатах Фаулера-Нордгейма:

$$\ln\left(\frac{I}{U^2}\right) = \hat{A} - \frac{\hat{B}}{U}$$

При снятии нескольких ВАХ можем узнать причину неустойчивости автоэмиссионного тока:

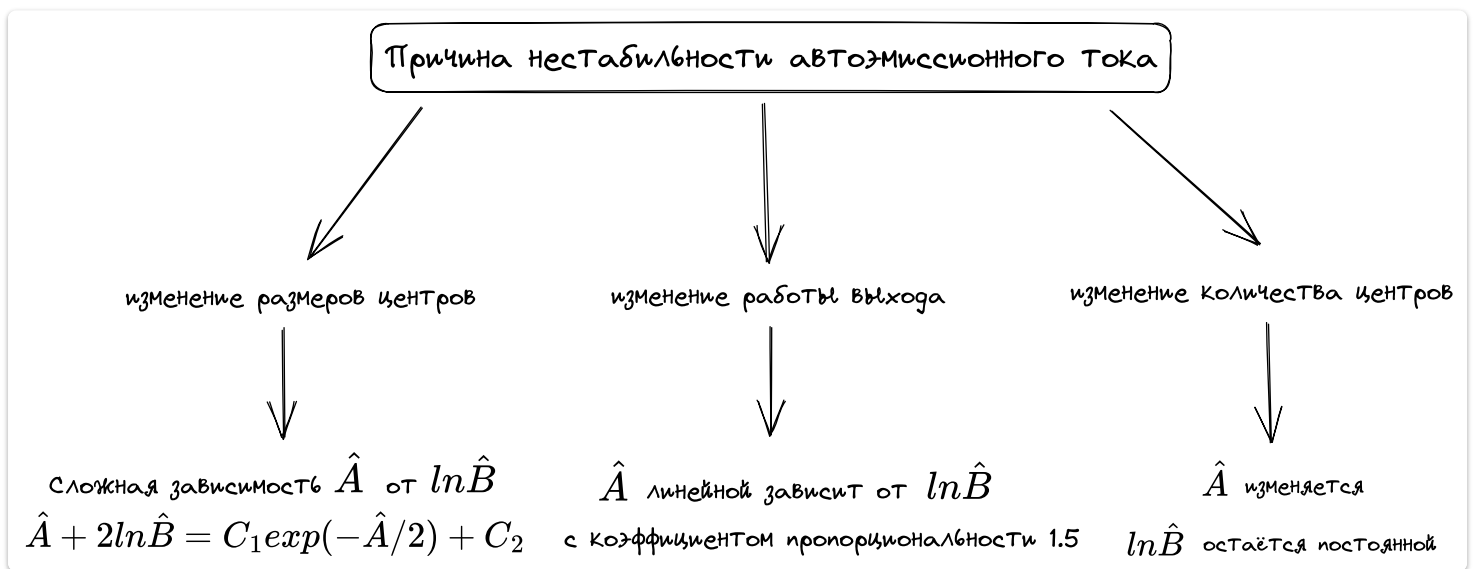


Рисунок 3. Причина неустойчивости автоэмиссионного тока.

## Методика

Для снятия вольт-амперной характеристики подключим плюс блока питания к аноду, минус блока питания к катоду. Изменяя напряжение, снимаем силу тока (в нашем блоке питания уже предусмотрен амперметр).

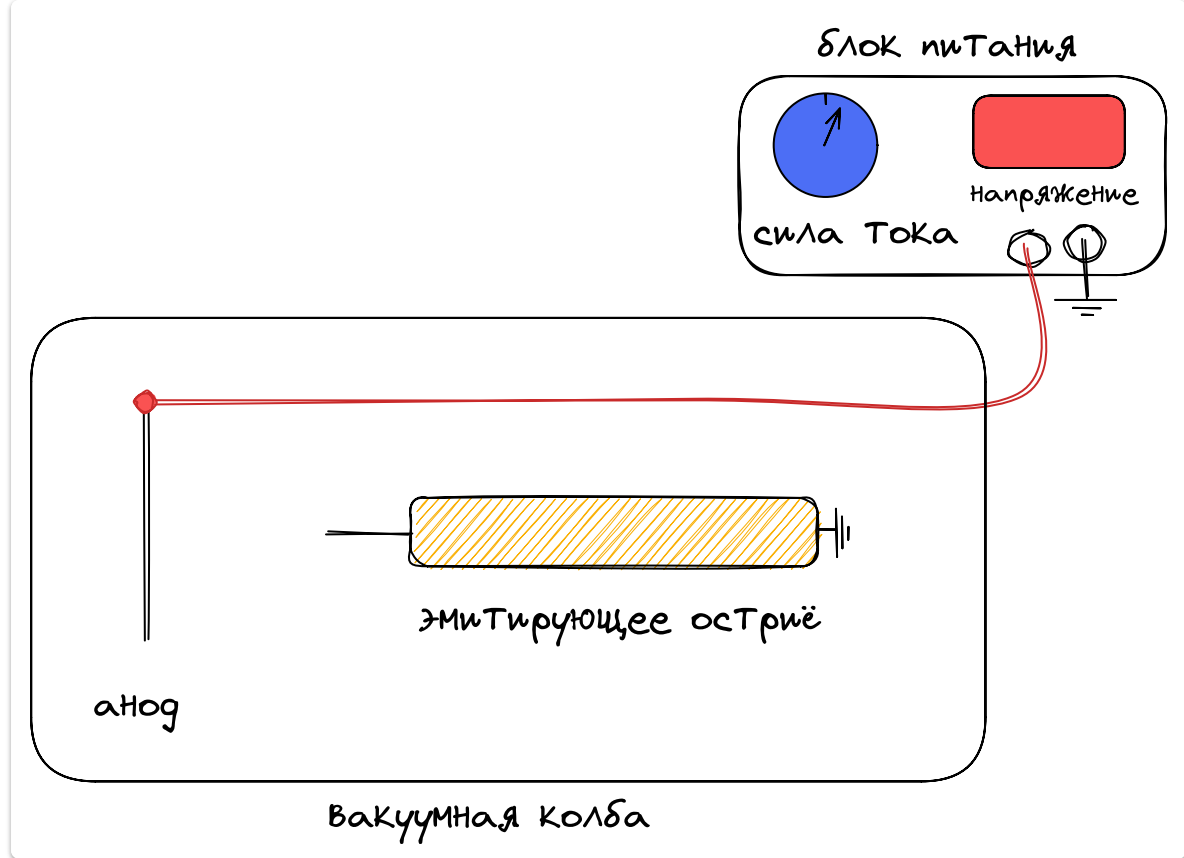


Рисунок 4. Схема экспериментальной установки

## Обработка результатов эксперимента

Экспериментальные данные представлены на рисунке 5. Подробнее с ними можно ознакомиться в репозитории [ShmakovVladimir/Labs](#).

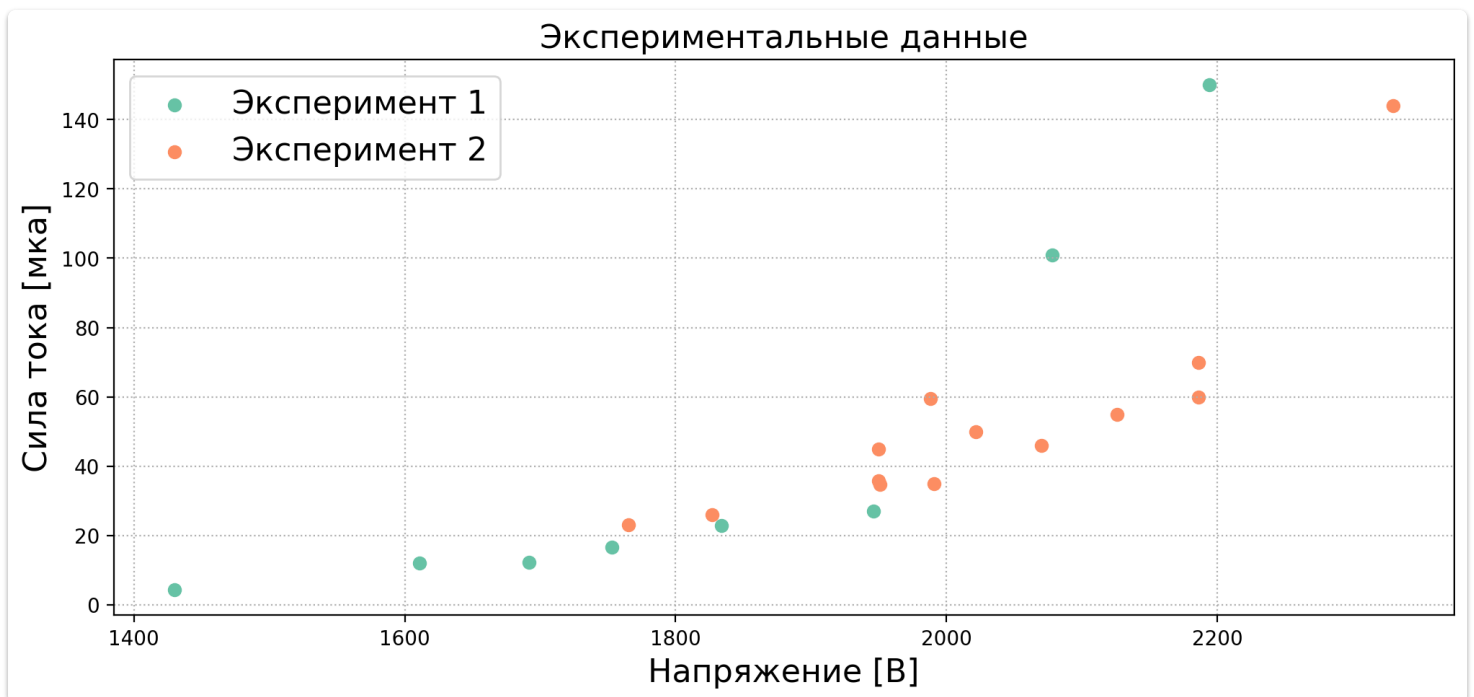


Рисунок 5. Экспериментальные данные. Зелёные точки получены при повышении напряжения, оранжевые — при понижении

Построим прямую Фаулера-Нордгейма. По оси  $y$  отложим  $\ln(I/U^2)$ , по оси  $x$  -  $1/U$ . Методом наименьших квадратов найдём коэффициенты наилучшей прямой, проходящей через экспериментальные точки.

ВАХ в координатах Фаулера - Нордгейма

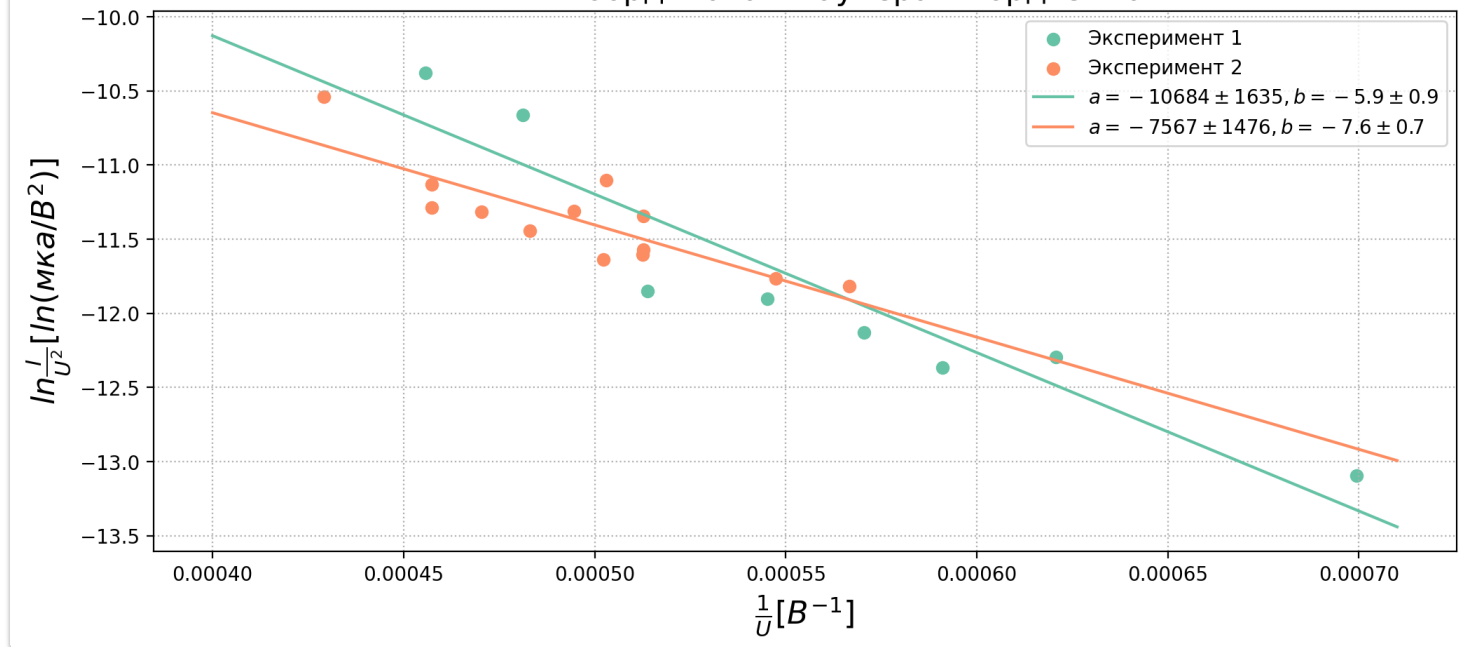


Рисунок 6. Прямая Фаулера - Нордгейма.

По коэффициентам наклона прямых определим форм-фактор острия. Согласно формуле (6),  $\beta = -0.683 \cdot \phi^{3/2} / \text{tg}(\alpha)$ . Работа выхода вольфрама  $\phi = 4.6 \text{ эВ} \rightarrow \beta_1 = 0.6 \pm 0.1, \beta_2 = 0.9 \pm 0.2$ .

## Вывод

Удалось исследовать автоэмиссионные свойства катода из углеродных волокон. Определён форм-фактор катода.