

1 Аннотация

В данной работе были исследованы автоэмиссионные свойства и механизмы неустойчивости автоэмиссионного тока на примере катода, изготовленного из углеродных волокон, а также получена ВАХ лампы с помощью осциллографа

2 Теория

Теория автоэмиссии

Автоэлектронной эмиссией называется явление испускания электронов в вакуум с поверхности твердого тела или другой среды под действием очень сильного электрического поля напряженностью $F = 10^7 - 10^8 \text{ В/см}$.

Из-за необходимой величины поля для АЭЭ используются тонкие острия с радиусом вершины порядка 0,1-0,01 мкм. С уменьшением радиуса кривизны катода падает необходимое для протекания АЭЭ напряжение.

Основной физический процесс при АЭЭ – туннелирование электронов сквозь потенциальный барьер на поверхности тела, барьер искривляется приложенным полем, таким образом, что появляется область пространства вне тела, где электрон обладал бы такой же полной энергией, как в теле. Таким образом, АЭЭ обуславливается волновыми свойствами электронов. Уравнение, связывающее плотность АЭ тока j и напряженность поля - уравнение Фаулера-Нордгейма:

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

где $\varphi = W_a - E_f$ – работа выхода, E_f – энергия Ферми, W_a – уровень вакуума. Формула составлена для температуры в 0 К, однако при 293К разница, вносимая изменением температуры, пренебрежимо мала. Позже уравнение было изменено Нордгеймом путем введения в него функции Нордгейма, уравнение приняло вид:

$$j = A' \cdot \frac{E^2}{\varphi} \cdot \exp\left(-B' \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{E}\right),$$

где $A' = \frac{e^3}{16\pi^2\hbar} \cdot \exp(0,739\frac{4\sqrt{2m}e^3}{3e\sqrt{\varphi}})$, $B' = 0,965 \cdot \frac{4\sqrt{2m}}{3e\hbar}$.

При построении графика зависимости $\ln(\frac{j}{E^2})$ от $\frac{1}{E}$, график будет представлять собой прямую, называемую кривой *Фаулера-Нордгейма*, соответствующие координаты - *координаты Фаулера-Нордгейма*. Наклон графика равен:

$$S_{FN} = -0,683 \cdot s\left(\frac{3,79\sqrt{E}}{\varphi}\right) \cdot \varphi^{3/2},$$

где $s(y) = \nu(y) - \frac{y}{2} \cdot \frac{d\nu}{dy}$

Одноэмиттерные системы

В случае системы с одним эмиттером имеем $I = Sj$, $E = \beta U$, где β – форм-фактор острия. Тогда имеем следующее уравнение для тока:

$$I = S_3 \cdot \frac{1,537 \cdot 10^{10}}{t^2(y_0)} \cdot \frac{\beta^2 U^2}{\varphi} \exp(-0,683 \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{\beta U} \cdot \nu(y_0)),$$

где $y_0 = 3,79 \cdot \frac{\sqrt{\beta U}}{\varphi}$

График зависимости $\ln(\frac{1}{U^2})$ от $\frac{1}{U^2}$ – прямая Фаулера – Нордгейма для тока и напряжения. Наклон графика в таком случае:

$$tg\alpha = -0,683 \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{\beta} \cdot s(\frac{3,79 \cdot \sqrt{\beta E}}{\varphi}). \quad (1)$$

В рабочем диапазоне токов и напряжений имеем $tg\alpha = -0,683 \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{\beta}$.

Нестабильность автоэмиссионного тока

Из-за разрушения поверхности эмиссионных центров при работе и адсорбции - десорбции атомов остаточных газов эмиссионный ток может быть нестабильным. В результате измерения ВАХ получается следующая зависимость:

$$\ln(\frac{1}{U^2}) = \hat{A} - \hat{B} \cdot \frac{1}{U},$$

где $\hat{A} = \ln(A \cdot N \cdot \frac{1}{\varphi \cdot \ln^2(\frac{R}{r})})$, $\hat{B} = B^* \cdot r \cdot \ln(\frac{R}{r}) \cdot \varphi^{3/2}$

Из зависимости от $\ln(\hat{B})$ можно качественно получить причину нестабильности тока. При изменении числа центров меняется только ; при изменении работы выхода наблюдается линейная зависимость с коэффициентом 1.5; при изменении размеров центров зависимость линейна в координатах $\hat{A} + 2 \cdot \ln(\hat{B})$ от $e^{-\frac{\hat{A}}{2}}$.

3 Экспериментальная установка

В нашей работе исследуются автоэмиссионные свойства и механизмы нестабильности автоэмиссионного тока на примере катодов, изготовленных из углеродных волокон. Исследуемые автокатоды находятся в отпаянной стеклянной лампе, схема которой представлена на рисунке 1.

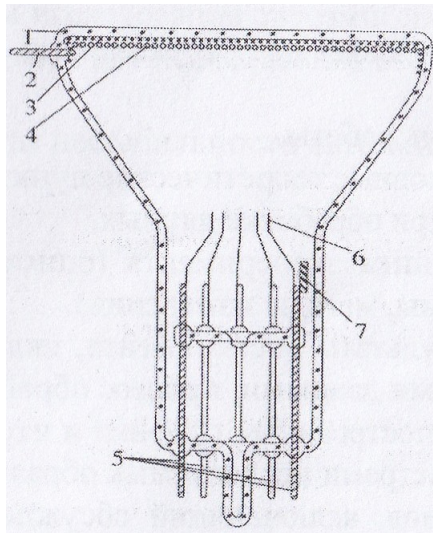


Рис. 1: Конструкция автоэмиссионной лампы на основе углеродных волокон, для исследования автоэмиссионных свойств углеродных волокон

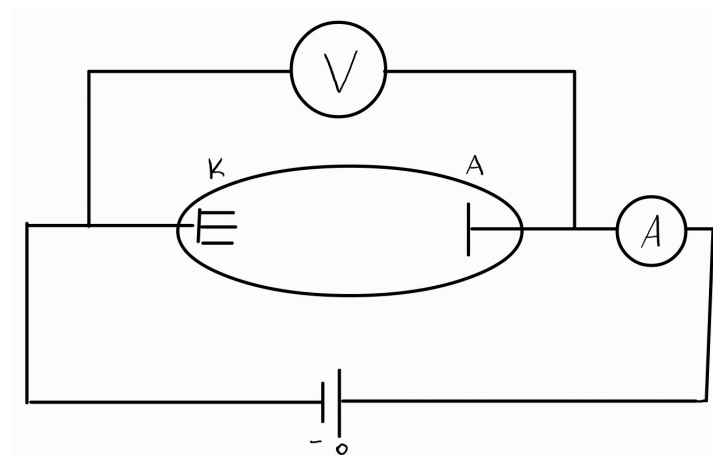


Рис. 2: Схема экспериментальной установки

4 Ход работы

Снимем ВАХ катода:

I, mA	U, V	I, mA	U, V
0,002	1800	0,12	2530
0,01	1990	0,11	2458
0,02	2064	0,1	2430
0,03	2092	0,08	2398
0,045	2142	0,07	2357
0,05	2206	0,06	2326
0,06	2234	0,05	2260
0,07	2325	0,04	2200
0,08	2388	0,03	2150
0,1	2439	0,02	2053
0,11	2500	0,01	1930

Таблица 1: ВАХ катода

Построим соответствующий график:

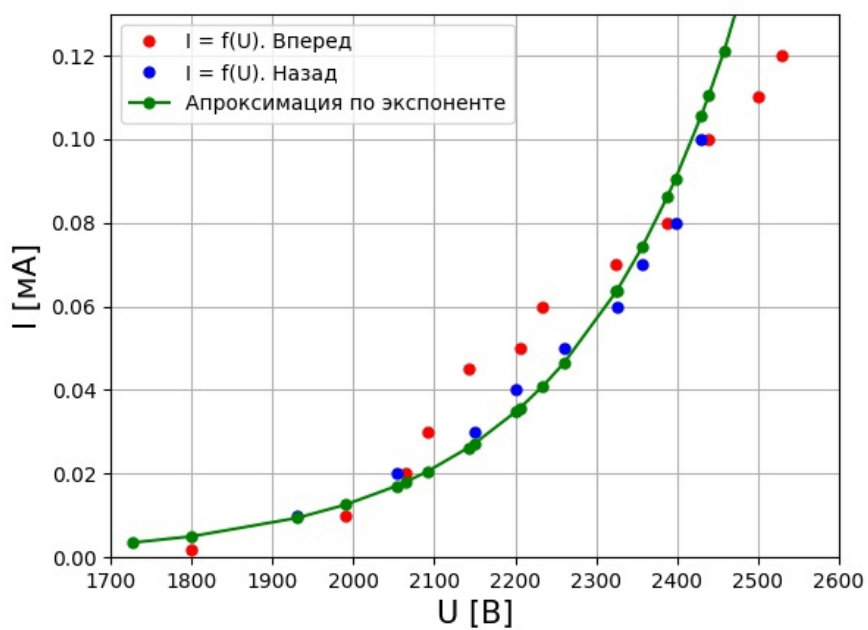


Рис. 3: ВАХ катода

Построим тот же график в координатах Фаулера-Нордгейма:

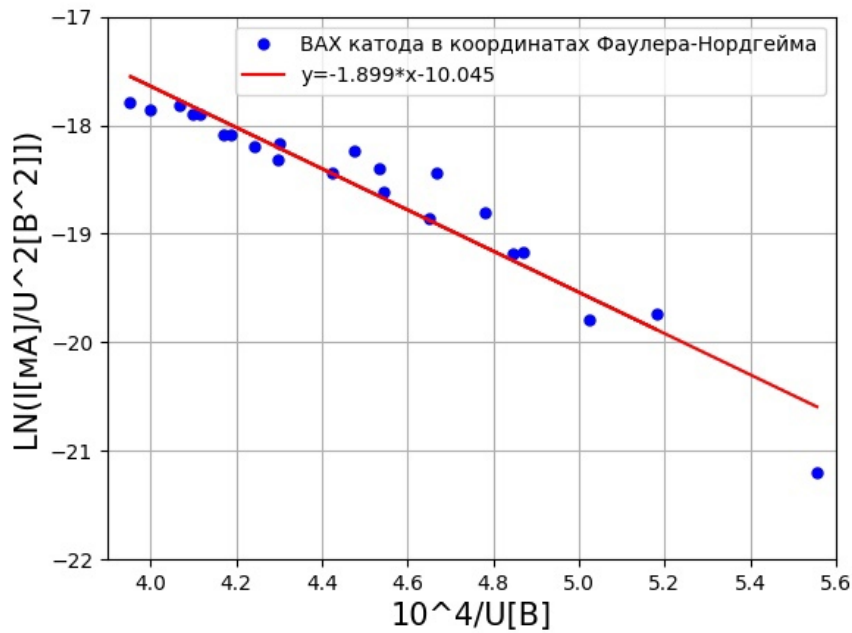


Рис. 4: ВАХ катода в координатах Фаулера-Нордгейма

Из коэффициента наклона k получившейся прямой можем по формуле (1) вычислить форм-фактор β (взяв работу выхода углеродных нанотрубок как $\varphi = 4,5$ эВ):

$$\beta = -0,683 \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{k} \approx 3,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}. \quad (2)$$

Снимем ВАХ лампы с помощью осциллографа. Для этого на один канал мы подаем сигнал с напряжением, подаваемым на катод(рис.5), на другой - сигнал с напряжением, пропорциональным току, снимаемому с анода (рис.6). Зависимость напряжения с анода от напряжения на катод - ВАХ лампы(рис.7)

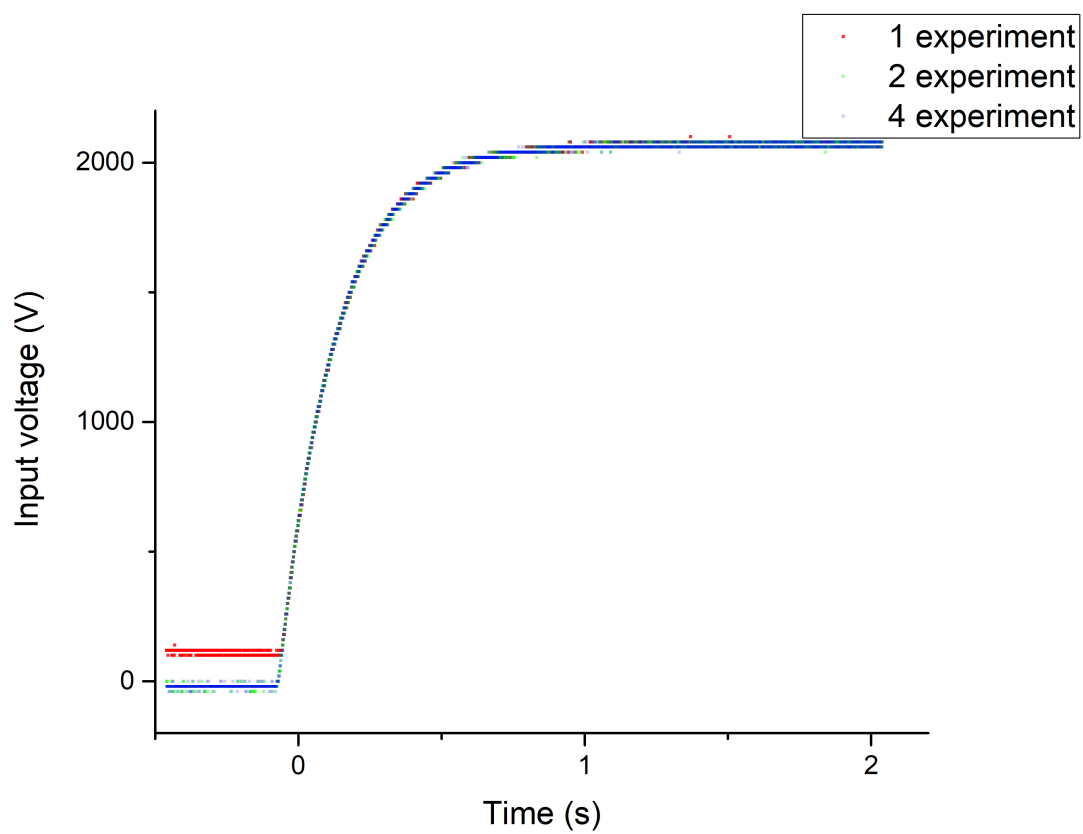


Рис. 5: Напряжение, подаваемое на катод

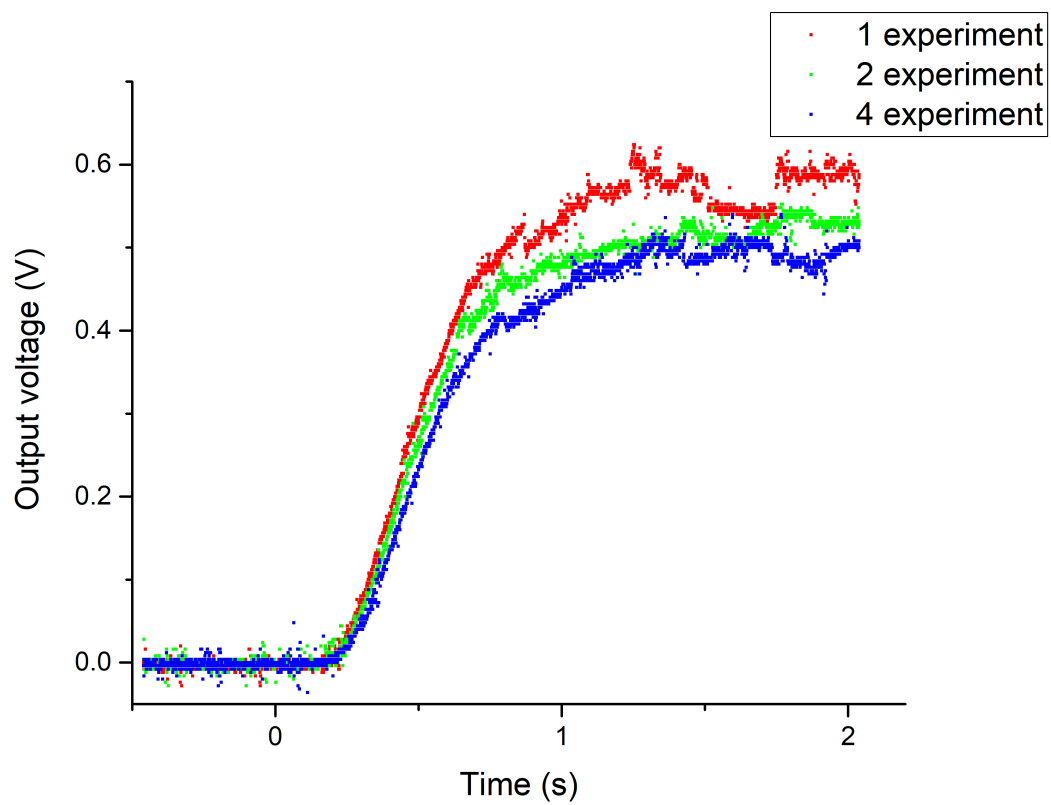


Рис. 6: Напряжение, пропорциональное току, снимаемому с анода

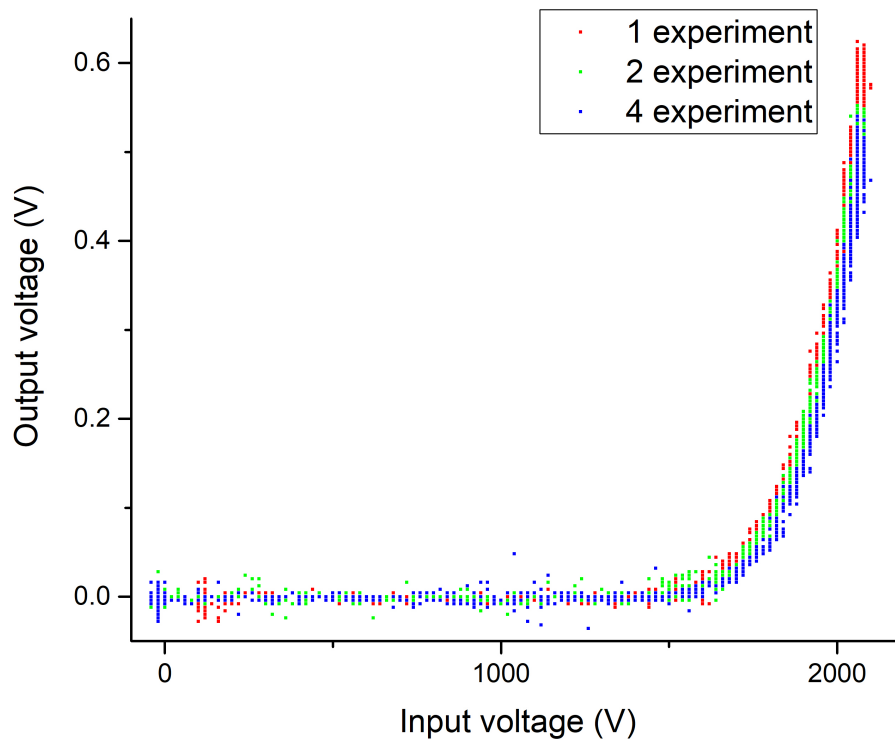


Рис. 7: ВАХ лампы

5 Вывод

В ходе работы мы познакомились с основными автоэмиссионными свойствами углеродных материалов на примере катода, изготовленного из углеродных волокон; с методом травления пучка углеродных волокон коронным разрядом. На основании полученных в ходе эксперимента данных нами были проделаны следующие действия:

1. Была построена вольт-амперная характеристика катода в координатах $(U; I)$ и координатах Фаулера-Нордгейма $(\frac{1}{U}; \ln(\frac{I}{U^2}))$
2. Опираясь на эти графики, мы смогли рассчитать форм-фактор эмиссионного центра:

$$\beta \approx 3,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}$$

3. С помощью осциллографа была получена ВАХ лампы