

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
"МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ"  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## **Автоэлектронная эмиссия**

*Выполнили студенты 2 курса  
группы Б04-906*  
**Пикулина Екатерина**  
**Махсудов Умар**  
**Масленников Дмитрий**  
**Никитин Вадим**  
**Долгов Виктор**

Москва, 2021 г.

**Цель работы:** исследование автоэмиссионных свойств и механизмов нестабильности автоэмиссионного тока на примере катода, изготовленного из углеродных волокон.

## Теория автоэмиссии

Автоэлектронная эмиссия - явление испускания электронов в вакуум с поверхности твердого тела или другой среды под действием очень сильного электрического поля напряженностью  $10^7 - 10^8$  В/см.

Из-за необходимой величины поля для АЭЭ используются тонкие остряя 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:

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

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:

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

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

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:

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

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  $\beta$  - форм-фактор остряя. Тогда имеем следующее уравнение для тока:

$$I = S_3 \cdot \frac{1,537 \cdot 10^{10}}{t^2(y_0)} \cdot \frac{\beta^2 U^2}{\varphi} \cdot \exp\left(-0.683 \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{\beta U} \cdot \nu(y_0)\right), \quad (4)$$

где  $t(y) \equiv \nu(t) - \frac{2}{3}y \cdot \frac{d\nu}{dy}$ ,  $y_0 = 3,79 \cdot \frac{\sqrt{\beta U}}{\varphi}$ .

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

$$\operatorname{tg}\alpha = -0,683 \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{\beta} \cdot s\left(\frac{3,79 \cdot \sqrt{\beta E}}{\varphi}\right). \quad (5)$$

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

## Многоэмиттерные системы

В случае некоторого количества эмиттирующих остряй, большего 1, ток равен сумме токов каждого центра. Усредняя, имеем:

$$I = S_3 \cdot \frac{A}{t^2(y_0)} \cdot \frac{\beta^2 U^2}{\varphi} \cdot \exp\left(-B \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{\beta U} \cdot \nu(y_0)\right), \quad (6)$$

где  $y_0 = 3,79 \cdot \frac{\sqrt{\beta U}}{\varphi}$ ,  $A$  и  $B$  - константы, являющиеся комбинациями физических постоянных.

Форм-фактор выражается формулой:

$$\beta = \frac{1}{k \cdot r \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right)}. \quad (7)$$

Эта формула выведена в приближении параболического эмиссионного центра, в этом случае  $k = 1/2$ ,  $R$  - расстояние анод-катод,  $r$  - характерный размер центра (радиус).

Итоговое уравнение для тока имеет вид:

$$I = N \cdot A^* \cdot \frac{1}{\ln^2\left(\frac{R}{r}\right)} \cdot \frac{U^2}{\varphi} \cdot \exp\left(-B^* \cdot r \cdot \ln\left(\frac{R}{r}\right) \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{U}\right), \quad (8)$$

где  $A^* = \alpha \cdot A \cdot \frac{1}{k \cdot t_{cp}^2}$ ,  $B = B^* \cdot k \cdot \nu_{cp}$ ,  $\alpha$  - коэффициент, зависящий от формы эмиссионного центра,  $N$  - количество эмиссионных центров.

Многоэмиттерную систему представляет собой автокатод на основе углеродных материалов, так как такой катод имеет большое количество эмиссионных центров.

## 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:

$$\ln\left(\frac{I}{U^2}\right) = \hat{A} - \hat{B} \cdot \frac{1}{U}, \quad (9)$$

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

Из зависимости  $\hat{A}$  от  $\ln(\hat{B})$  можно качественно получить причину нестабильности тока. При изменении числа центров меняется только  $\hat{A}$ ; 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  $\exp(-\frac{\hat{A}}{2})$ .

Когда несколько причин действуют одновременно, дать точный ответ невозможно.

### Методика получения острый

Объект исследования в автоэлектронном микроскопе – приготовленные специальным образом остирия с радиусом закругления от 100 Å до 1000 Å. Самый удобный и распространённый метод – электрохимическое травление.

(2) – заготовка – тонкая проволока диаметром 20-150 мкм и длины 15-20 мм приваривается точечной сваркой к дужке из вольфрамовой проволоки (1) диаметром 0,3-0,5 мм. Заготовка помещается в середине никелевой пластины (4) так, чтобы свободный конец заготовки находился в проводящей жидкости (в простейшем случае – это насыщенный раствор поваренной соли). В отверстие пипеткой заливается капля электролита (3), который соответствует материалу заготовки.

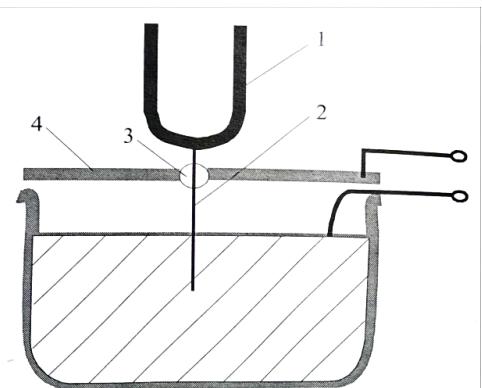


Рис. 1: Схема получения остирий методом травления в капле электролита

### Углеродные материалы и катоды на их основе

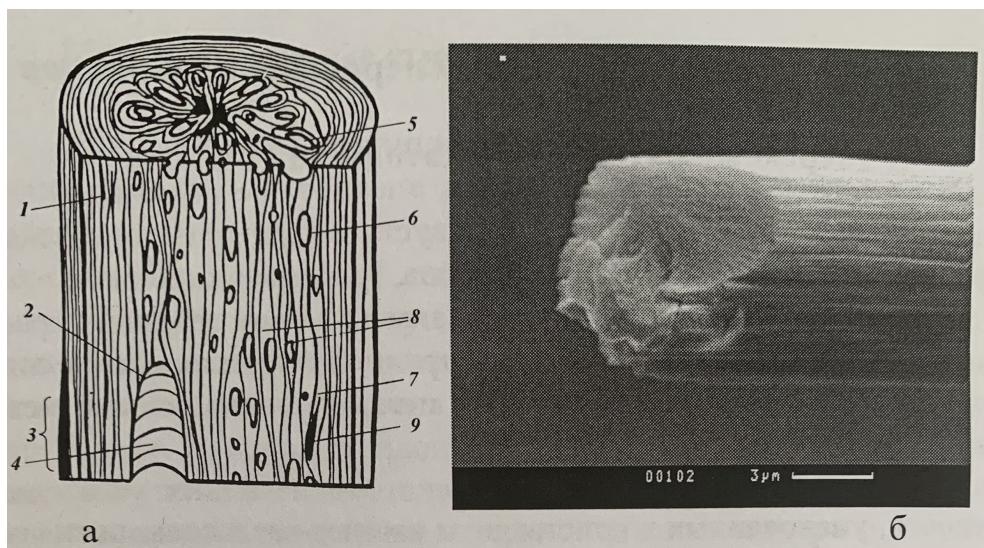


Рис. 2: Структура углеродного поликарбонитрильного волокна (а) и микрофотография волокна в сканирующем электронном микроскопе (б).

1 - микротрешины; 2 - оболочка трещин и пор; 3 - выпуклости на волокне; 4 - крупная пора; 5 - мелкая пора; 6 - микровключения кристаллического графита; 7 - крупный кристалл графита; 8 - межфибрillные прослойки в средней части волокна; 9 - микротрешина

Среди известных углеродных материалов наиболее подходящими для создания АЭК, работающих в условиях высокого технического вакуума, оказались графит и так называемые поликарбонитрильные углеродные волокна.

Использование пучков из 100  $\div$  300 волокон позволяет получить ток 400 – 1000 мА при удовлетворительной стабильности.

Естественной микроструктурой обладают также АЭК из графита и пироуглерода. Такие катоды позволяют отбирать автоэмиссионные токи до 10 мА и больше. Пределы по току ограничиваются только мощностью применяемого высоковольтного источника напряжения и перегревом анода. Обращает на себя внимание высокая стабильность эмиссионного тока - 0,25% при токоотборе 1  $\div$  2 мА. При этом сверх низкочастотные флуктуации эмиссионного тока не превышают  $\pm 2\%$  в течение всего срока службы катода ( $\sim 1000$  часов).

## 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 3.

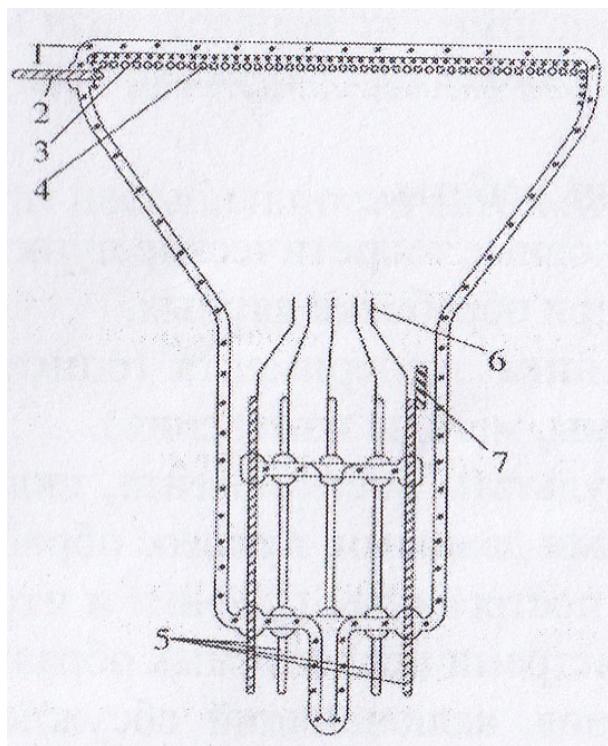


Рис. 3: Конструкция автоэмиссионной лампы на основе углеродных волокон, для исследования автоэмиссионных свойств углеродных волокон.

1 - стеклянная колба, 2 - высоковольтный вывод, 3 - проводящее покрытие, 4 - люминофор, 5 - катодные выводы, 6 - автоэмиссионный катод, 7 - геттер

## Ход работы

Результаты опыта (ВАХ катода) занесены в таблицу 1:

$U$ , В	$I$ , мА	$U$ , В	$I$ , мА
2500	0,026	3550	0,23
2650	0,043	3700	0,286
2800	0,068	3850	0,328
2950	0,09	4000	0,41
3100	0,118	4150	0,483
3250	0,16	4300	0,624
3400	0,19	4450	0,725

Таблица 1: Вольт-амперная характеристика катода

На основании этих данных построим график зависимости  $I = f(U)$ :

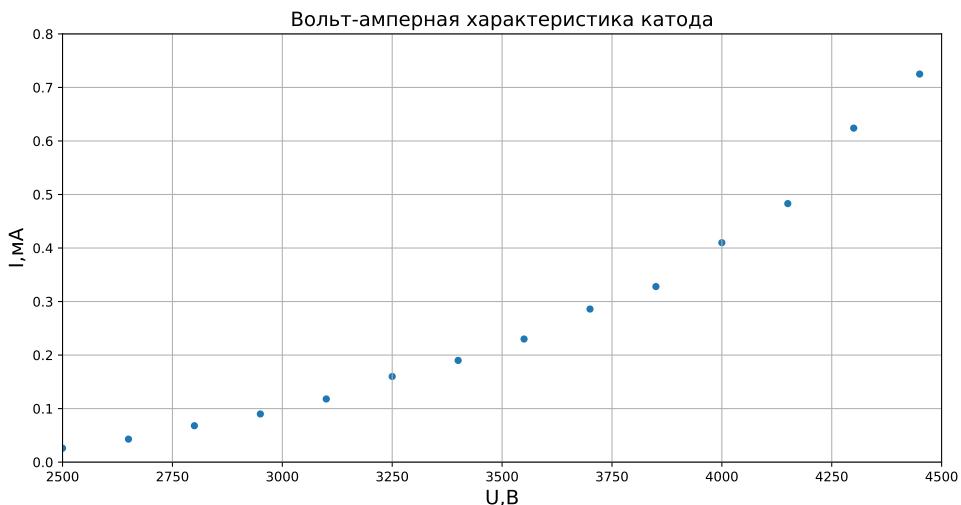


Рис. 4:  $I = f(U)$  (ВАХ катода)

Построим вольт-амперную характеристику катода в координатах Фаулера-Нордгейма (рис.5)

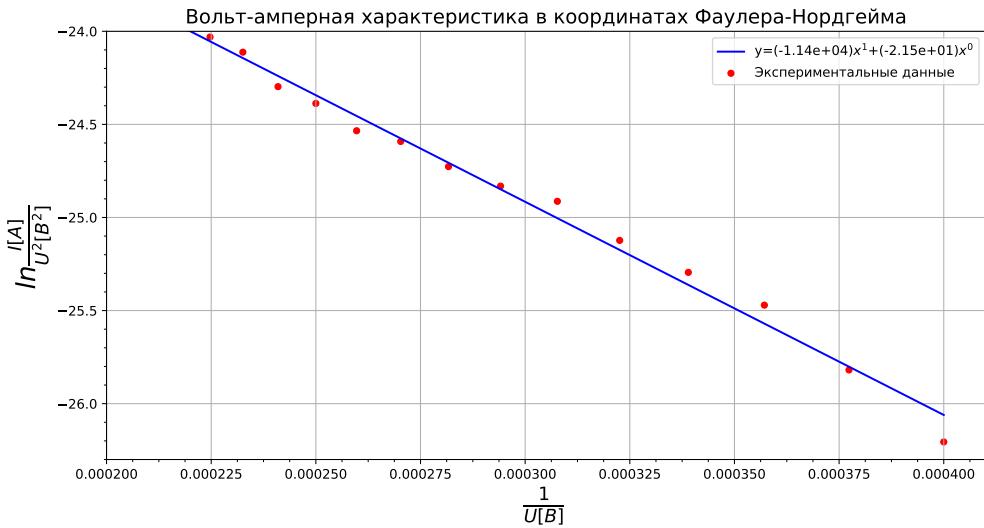


Рис. 5:  $\ln\left(\frac{I}{U^2}\right) = f\left(\frac{1}{U}\right)$  (ВАХ катода в координатах Фаулера-Нордгейма)

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

$$\beta = -0,683 \cdot \frac{\varphi^{3/2}}{k} \approx 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}.$$

## 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 вольтамперная характеристика катода в координатах  $(U; I)$  и координатах Фаулера-Нордгейма  $(1/U; \ln(I/U^2))$ .
- 2) Опираясь на эти графики, мы смогли рассчитать форм-фактор эмиссионного центра:

$$\beta \approx 5,7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-1}.$$