

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Московский физико-технический институт
(государственный университет)
Кафедра вакуумной электроники

Автоэлектронная эмиссия

Лабораторная работа по курсу
вакуумная электроника

Выполнил: студент 654гр.
Нехаев А.С.

г. Долгопрудный
2018 год

Содержание

1. Цель работы	2
2. Теоретическая часть	3
2.1. Теория автоэлектронной эмиссии металлов	3
2.2. Нестабильность автоэмиссионного тока	4
2.3. Автоэмиссионные свойства углеродных материалов	5
3. Техника эксперимента	5
4. Практическая часть	6
5. Вывод	8

1. Цель работы

- 1) Изучить работу вакуумной камеры;
- 2) Изучить метод получения автоэмиссионного катода с помощью травления пучка углеродных волокон коронным разрядом;
- 3) Исследовать автоэмиссионные свойства катода из углеродных волокон и причины неустойчивости автоэмиссионного тока в нем.
- 4) Снять вольтамперную характеристику;
- 5) Построить вольтамперную характеристику в координатах $I(U)$ и в координатах Фаулера-Нордгейма.

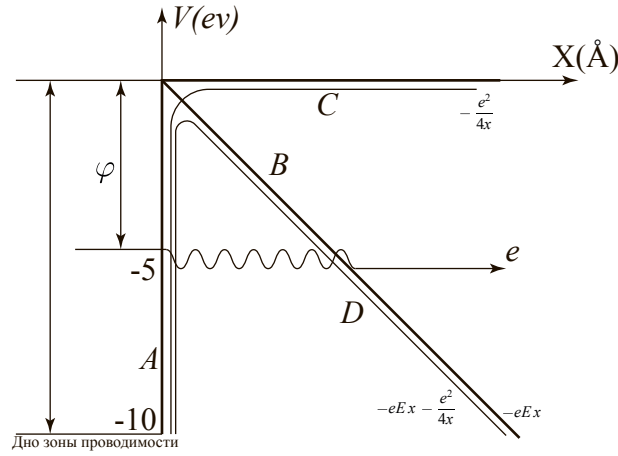


Рис. 1: Поверхностный потенциальный барьер на границе металл-вакуума в присутствии сильного электрического поля. Волнистой линией показан эффект туннелирования электронов сквозь барьер.

2. Теоретическая часть

2.1. Теория автоэлектронной эмиссии металлов

При наличии электрического поля над поверхностью металла наблюдается внешняя автоэлектронная эмиссия (автоэмиссия, холодная эмиссия, туннельная эмиссия).

Автоэлектронная эмиссия является эмиссией, не требующей возбуждения электронов. Суть явления состоит в туннелировании электронов сквозь потенциальный барьер на поверхности тела. Такое туннелирование становится возможным за счет искривления потенциального барьера при приложении внешнего поля. При этом появляется область пространства вне тела, в которой электрон может существовать с той же полной энергией, которой он обладает, находясь в теле. Таким образом, автоэлектронная эмиссия обусловлена волновыми свойствами электронов.

Впервые такое объяснение автоэмиссии было предложено в 1928 году Фаулером и Нордгеймом. Ими впервые была получена формула, описывающая взаимосвязь плотности автоэлектронного тока j с напряженностью электрического поля E

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

где $\varphi = W_a - E_f$ – работа выхода, E_f – энергия Ферми, W_a – уровень вакуума (все энергии отсчитываются от дна зоны проводимости).

Эта формула получена для полубесконечного металла с плоской поверхностью, подчиняющегося модели Зоммерфельда и находящегося при температуре $T = 0$ К. При выводе этой формулы Фаулер и Нордгейм предположили, что потенциальный барьер на поверхности тела имеет следующий вид: кривые B и C . Позднее в 1929 году Нордгейм предложил ввести в рассмотрение силы электростатического изображения (кривые C и D). Это привело к выражениям:

$$j = \frac{A'E^2}{\varphi} \cdot e^{-\frac{B'\cdot\varphi^{3/2}\theta(y)}{E}}, \quad (2)$$

где $A \equiv \frac{e^3}{16\pi^2\hbar}$, $B \equiv \frac{4}{3e} \frac{\sqrt{2m}}{\hbar}$. $\theta(y)$ – спецфункция, которая была табулирована Нордгеймом, и получила название «функция Нордгейма». При не очень близких к 0 или 1 значениях аргумента функция Нордгейма хорошо приближается аналитическим выражением $\theta(y) =$

$0.965 - 0.739y^2$. Подставив это в вышеприведённую формулу, получим:

$$j = \frac{A'E^2}{\varphi} \cdot e^{-\frac{B' \cdot \varphi^{\frac{3}{2}}}{E}} \quad (3)$$

где $A' = \frac{e^3}{8\pi h} e^{0.739 \cdot \frac{8\pi}{3e} \left(\frac{2m\varphi^3}{hE}\right)^{\frac{1}{2}}}$, $B' = 0.965 \cdot \frac{8\pi}{3e} \left(\frac{2m\varphi^3}{hE}\right)^{\frac{1}{2}}$, $y \equiv \frac{\sqrt{e^3 E}}{\varphi}$, α – угол наклона получившейся кривой.

Строго говоря, теория Фаулера-Нордгейма применима только при температуре $T = 0\text{К}$. Однако, так как незначительное увеличение температуры мало меняет распределение электронов в металле, лишь размывая его на величину порядка kT вблизи уровня Ферми, то выводы теории остаются качественно верны при температурах, определяемых условием $kt \ll \varphi$. При комнатной температуре, например, $kT = 2.6 \cdot 10^{-2}$ эВ, в то время как характерное значение работы выхода $\varphi = 3...6$ эВ.

Если построить график зависимости $\ln\left(\frac{j}{E^2}\right)$ от $\frac{1}{E}$, то соответствующая кривая окажется практически прямой линией в узкой области напряженности поля, которая характерна для типичного автоэмиссионного эксперимента. Эта прямая называется графиком Фаулера-Нордгейма.

$$I = S_{\Sigma} j$$

$$E = \beta U$$

где S_{Σ} – площадь поверхности эмиттера, β – форм-фактор острия.

Таким образом, если, с учётом этих формул, построить график $\ln\left(\frac{I}{U^2}\right)$ от $\frac{1}{U}$ то мы получим прямую линию (прямая Фаулера-Нордгейма для полного тока и напряжения). Тангенс угла наклона этой прямой будет определяться выражением:

$$\tan(\alpha) = -0.683 \cdot \frac{\varphi^{\frac{3}{2}}}{\beta} \cdot \left(3.79 \cdot \frac{\sqrt{\beta U}}{\varphi}\right) \quad (4)$$

$s(y)$ в узкой области напряжённости поля можно считать константой. В рабочем диапазоне токов и напряжений, эту функцию можно приближённо считать равной 1. Тогда

$$\tan(\alpha) = -0.683 \cdot \frac{\varphi^{\frac{3}{2}}}{\beta}, \quad (5)$$

2.2. Нестабильность автоэмиссионного тока

Основные причины неустойчивости тока автоэлектронных катодов следующие:

- 1) Разрушение поверхности под действием ионной бомбардировки ионами остаточных газов, что может приводить к изменению микрогеометрии поверхности катода: размеров центров и межцентровых расстояний, а также к разрушению центров и изменению межэлектродного расстояния.
- 2) Адсорбция и десорбция атомов остаточных газов, которая может вызывать изменение локальной работы выхода катода.
- 3) Разрушение или изменение геометрии эмиссионных центров под действием пондеромоторных нагрузок.
- 4) Разрушение эмиссионных центров из-за нарушения теплового режима катода при больших плотностях отбираемого тока.
- 5) Механическая непрочность катода, приводящая к взаимному смещению элементов катода за счет электростатического отталкивания, и, как следствие, к изменению конфигурации электрического поля.

2.3. Автоэмиссионные свойства углеродных материалов

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

Для уменьшения влияния электростатических сил, отклоняющих периферийные волокна пучка, необходимо придать пучку геометрическую форму, которая позволила бы обеспечить наиболее одинаковое электрическое поле у волокон в пучке. Для этого применяется метод травления коронным разрядом на воздухе.

Действие коронного разряда на углеродные волокна заключается в том, что за счёт бомбардировки катода ионами кислорода O_2 происходит окисление углерода C и тем самым стравливание материала катода. Таким образом, длина отдельного волокна, выступающего из пучка волокон, уменьшается до тех пор, пока фактор усиления электрического поля не станет меньше или одинаковым по сравнению с другими волокнами из пучка.

3. Техника эксперимента

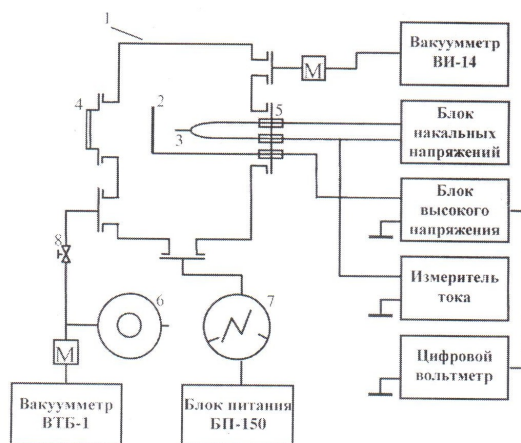


Рис. 4. Блок-схема установки: 1 – вакуумная камера, 2 – анод, 3 – исследуемый образец, 4 – смотровое окно, 5 – фланец с высоковольтными выводами, 6 – цеолитовый насос, 7 – магниторазрядный насос

Рис. 2: Схема лабораторной установки

В качестве катода выступал пучок углеродных волокон, стравленный предварительно коронным разрядом, в результате электрическое поле для всех волокон пучка было почти одинаковым. Исследуемые автокатоды находились в отпаянной стеклянной лампе. На анод подавалось высокое напряжение, а катод заземлялся.

4. Практическая часть

- 1) Сняли зависимость автоэмиссионного тока катода из углеродных трубок от приложенного напряжения

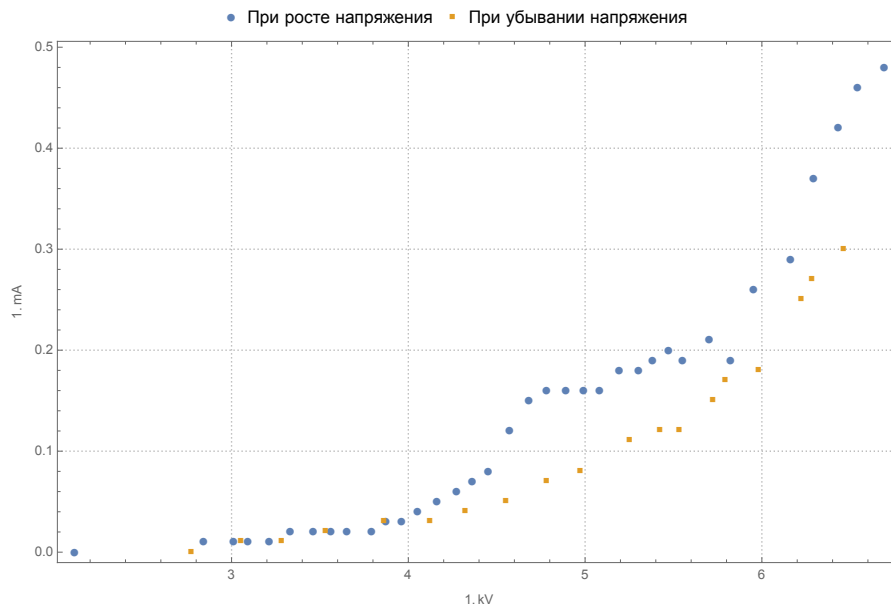


Рис. 3: График зависимости автоэмиссионного тока от напряжения

По графику можно определить, что ВАХ системы отличалась при возрастании и убывании напряжения.

- 2) Построили полученную зависимость в координатах Фаулера-Нордгейма

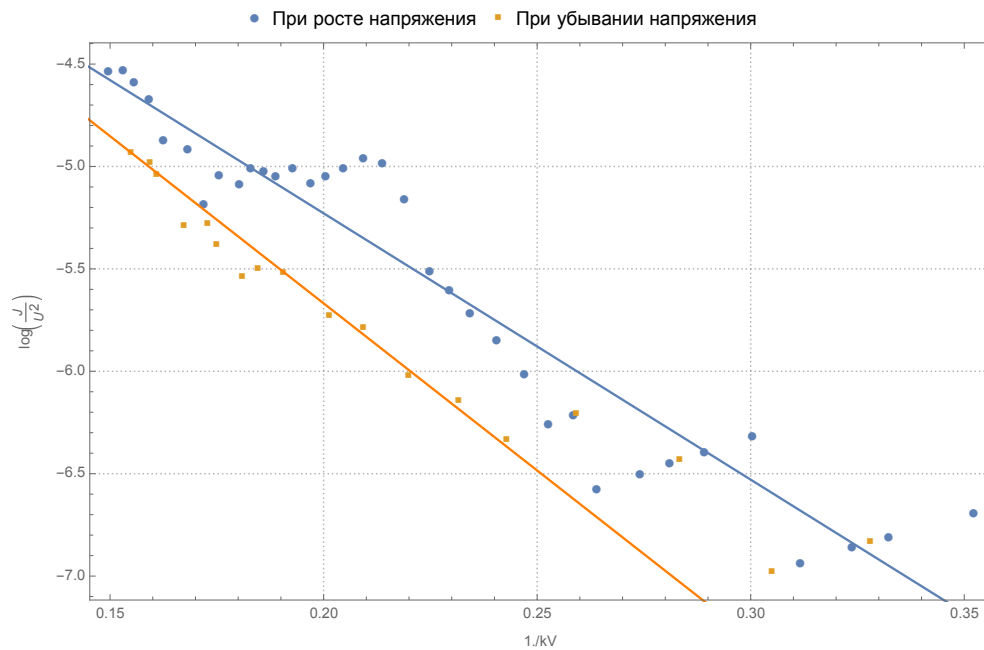


Рис. 4: График зависимости давления от времени

По полученным кривым можно выяснить, что основную роль в нестабильности тока имело изменение размеров эмиссионных центров, так как значение величины $A +$

$2\ln(B)$, где A – смещение кривой ФН, а B - её коэффициент наклона, осталось почти постоянным в течение снятия ВАХ.

Форм фактор для возрастания и убывания соответственно равен $\beta = \frac{2}{r \ln(2R/r)}$. Для вольфрама $\varphi = 4.6$ эВ, тогда для ВАХ при росте напряжения $\beta = 0.52$, при убывании напряжения $\beta = 0.41$.

5. Вывод

- 1) Изучили особенности автоэлектронной эмиссии и её применения.
- 2) Ознакомились с техникой автоэлектронной микроскопии и областями её применения, а также методикой получения острий для автоэмиссионных микроскопов
- 3) Исследовали автоэмиссионные свойства катода из углеродных волокон и определили причину нестабильности автоэмиссионного тока такого катода.