

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
ФГАОУ ВО  
НАБЕРЕЖНОЧЕЛНИНСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)  
«КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра физики

**ИЗУЧЕНИЕ ТОКА В ВАКУУМЕ**

*Методические указания к лабораторному практикуму по физике*

Набережные Челны

2018

УДК 530 (077)

Изучение тока в вакууме: Методические указания к лабораторному практикуму по физике / Составители: Ахунов Д.Н., Карпова М.Н., Ряднинская Л.Ф. - Набережные Челны: ИНЭКА, 2018, 11 с.

Методические указания предназначены в помощь студентам при выполнении лабораторных работ по физике.

Ил. - 7; Табл.- 1; Список лит. - 5 назв.

Рецензент: доцент, к.ф.-м.н. Валиев Р.А.

Печатается по решению Научно-методического совета  
Набережночелнинского института (филиала) Казанского федерального  
университета

© Набережночелнинский институт К(П)ФУ

2018 год.

**Цель работы:** Измерение работы выхода электронов из металла.

**Приборы и принадлежности:** Приборы и принадлежности: кассета ФПЭ-О6/05 "Ток в вакууме", источник питания, два вольтметра.

## 1. Теоретические основы работы

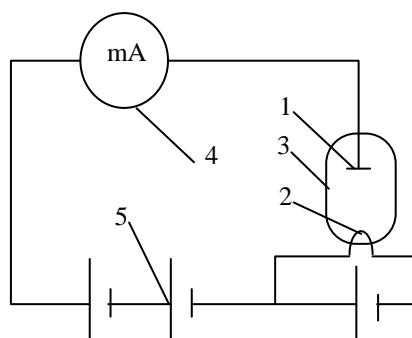


Рис.1.

Если две металлические пластины-электроды 1 и 2 (рис.1.) поместить в стеклянную трубку 3, из которой откачан воздух, то в этом месте цепь будет разомкнута и ток по ней не потечёт. Но если один из электродов нагреть до высокой температуры, то миллиамперметр 4 покажет ток. При изменении полярности батареи 5, ток прекращается. Это объясняется тем, что носителями тока через вакуум являются электроны. Нагретый электрод 2 называется катодом, холодный электрод 1 – анодом. В целом это устройство называется вакуумным диодом. Эффект испускания электронов нагретым катодом называется *термоэлектронной эмиссией*. Ток, регистрируемый миллиамперметром, называется термоэлектронным.

### 1.1. Термоэлектронная эмиссия

Явление термоэлектронной эмиссии было открыто Эдисоном в 1879 году. Электроны, совершая тепловое движение, могут пересекать поверхность металла и удаляться от нее на небольшие расстояния, порядка атомных. Над поверхностью катода возникает электронное облако, плотность которого убывает с удалением от катода. У поверхности катода остается слой положительных ионов. В результате образуется двойной электрический слой, действующий подобно конденсатору. Для преодоления такого слоя электрону необходима энергия. Эта энергия называется *работой выхода электрона*.

При повышении температуры катода увеличивается кинетическая энергия электронов, и она может стать настолько большой, что некоторые из электронов могут преодолеть задерживающее электрическое поле двойного слоя на границе катода и выйти в вакуум. Если в окружающем вакууме существует электрическое поле, направленное к поверхности металла, то оно будет уводить вышедшие электроны, и через вакуум потечет термоэлектронный ток.

## 1.2. Вольтамперная характеристика

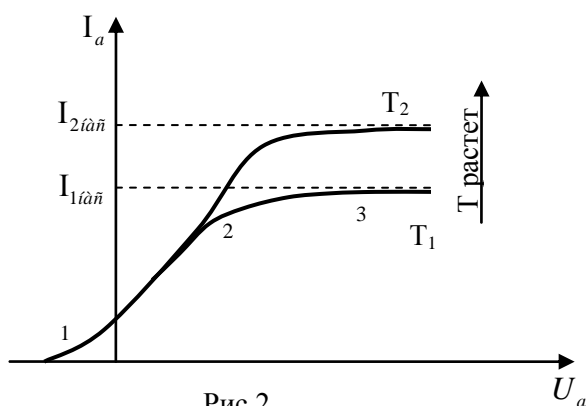


Рис.2.

Если, поддерживая температуру нагретого катода постоянной, менять напряжение  $U_a$  между анодом и катодом, то термоэлектронный ток  $I_a$  будет возрастать (участок 1-2 рис.2). Однако это возрастание идет не пропорционально напряжению, так что для вакуумного диода закон Ома не выполняется. По достижении определенного напряжения, дальнейшее возрастание термоэлектронного тока практически прекращается (участок 2-3).

Ток достигает своего предельного значения  $I_n$ , называемого *током насыщения*. Его величина определяется количеством термоэлектронов, которое в состоянии выйти с поверхности катода в единицу времени. Если электрическое поле настолько сильное, что все электроны с поверхности катода, достигают анода, то дальнейшее увеличение напряжения поля  $U_a$  уже не может привести к увеличению термоэлектронного тока.

Термоэлектронный ток насыщения  $I_n$  определяет эмиссионную способность катода, т.е. максимальное количество электронов, которое может

выйти с катода в единицу времени. Термоэлектронный ток насыщения зависит от материала катода и увеличивается с повышением температуры катода. Термоэлектронный ток насыщения определяется формулой Ричардсона-Дешмана:

$$I_n = AT^2 S \exp(-A_{\text{вых.}} / \kappa T), \quad (1)$$

где  $A = 120 \frac{A}{\text{см}^2 \text{K}^2}$  постоянная, одинаковая для всех металлов,  $T$  – температура катода,  $\kappa$  – постоянная Больцмана,  $A_{\text{вых.}}$  – работа выхода электрона из катода,  $S$  – площадь катода.

Формула (1) была впервые получена Ричардсоном (1879-1959) на основе термодинамических соображений. Другой вывод, в котором была установлена универсальность коэффициента  $A$ , был дан Дешманом в 1933г.

Если бы все электроны, вылетающие с катода, попадали на анод, то сила термоэлектронного тока  $I_a$  не зависела бы от приложенного напряжения  $U_a$ . На самом деле это не так (участок 1-2), с возрастанием напряжения ток растет. Объясняется это тем, что в пространстве между катодом и анодом образуется отрицательный пространственный заряд, создающий электрическое поле, направленное противоположно приложенному электрическому полю. Этот вопрос был исследован Ленгмюром (1881-1957) в 1913 году. Он получил формулу, называемую «законом трех вторых», которая описывает участок 1-2 вольтамперной характеристики

$$I = C U^{3/2}, \quad (2)$$

где  $C$  - постоянная,  $U$  - напряжение, между электродами.

## 2. Практическая часть

### 2.1. Вывод расчетной формулы

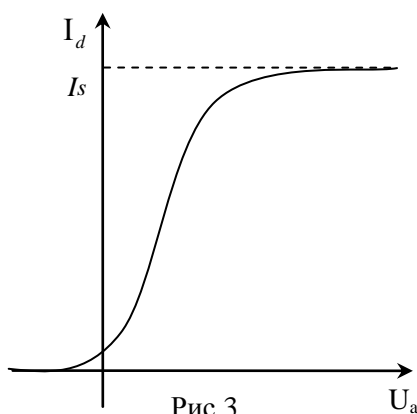


Рис.3.

Работа выхода  $A_{\text{вых.}}$  - мера связи электрона со всем металлом в целом. Эту величину можно определить однозначно лишь при  $T = 0\text{K}$ . При  $T >$

ОК работа выхода зависит от процесса, который сопровождает изменение состояния металла (адиабатический, изотермический, политропический). Вычисление работы выхода - сложнейшая задача теории твердого тела. Поэтому главное внимание уделяется надежным экспериментальным методам измерения.

Методы расчета  $A_{\text{вых}}$  основаны на знании термоэлектронного тока. Этот ток невозможно измерить непосредственно. На практике измеряют зависимость тока, протекающего через вакуумный диод  $I_d$  от приложенной между катодом и анодом разности потенциалов  $U_a$  (рис.3). Определив величину термоэлектронного тока насыщения  $I_s$  и зная температуру катода  $T$ , можно определить работу выхода электронов из катода. Температуру рассчитаем следующим образом. Подводимая к катоду мощность расходуется в вакуумной лампе в основном на тепловое излучение. Для вольфрама была экспериментально определена зависимость температуры катода от расходуемой на его нагрев джоулевой мощности, приходящейся на единицу площади поверхности катода. На графике (рис.4) приведены результаты этих измерений. По этому графику, зная мощность, подводимую к катоду, можно определить его температуру.

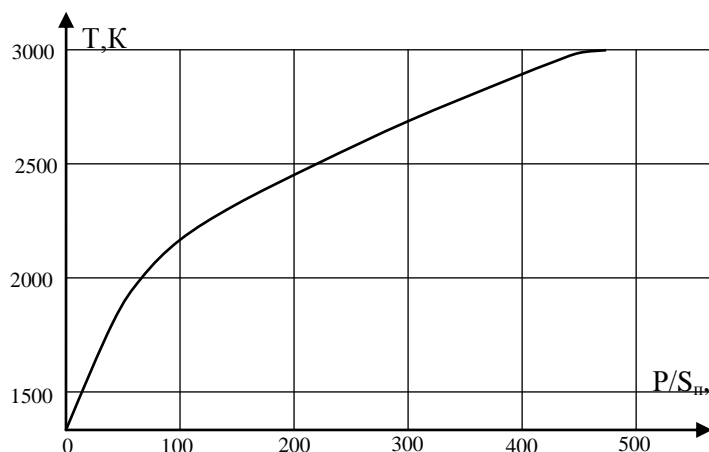


Рис.4.

Для определения работы выхода воспользуемся уравнением Ричардсона - Дешмана (1). Прологарифмировав его, получим:

$$\ln\left(\frac{I_s}{T^2}\right) = \ln(A \cdot S) - \frac{A_{\text{вых}}}{kT} \quad (3)$$

Если работу выхода вычислять в электрон-вольтах (эВ), то это уравнение преобразуется в следующий вид:

$$\ln\left(\frac{I_s}{T^2}\right) = \ln(A \cdot S) - \frac{11594}{T} A_{\text{вых}}. \quad (4)$$

В координатах  $\ln\left(\frac{I_s}{T^2}\right)$  от  $\frac{11594}{T}$  получается прямая Ричардсона (см. рис.5).

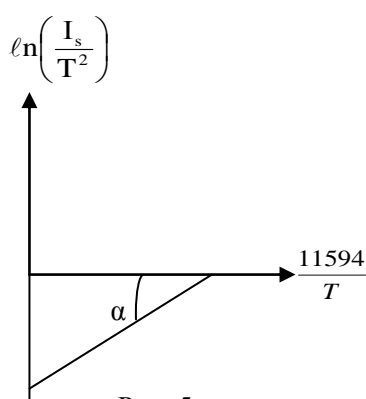


Рис. 5.

Определив тангенс наклона прямой к оси абсцисс, рассчитаем работу выхода ( $A_{\text{вых}} = \text{tg } \alpha$ ).

## 2.2. Схема установки

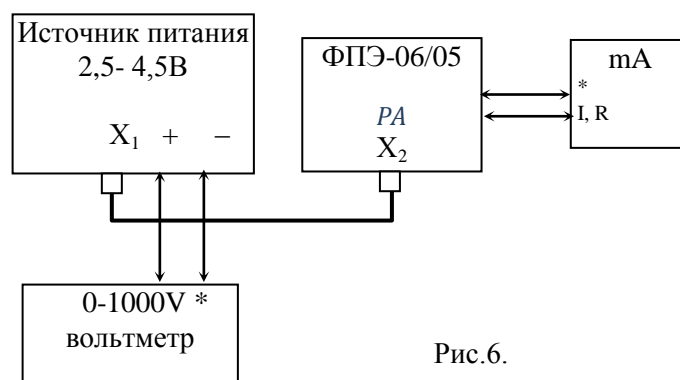
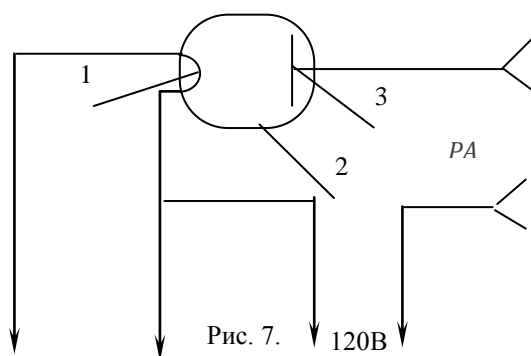


Рис.6.

Схема лабораторной установки, предназначенной для измерения работы выхода электронов методом прямой Ричардсона, приведена на рис.6. Она состоит из кассеты ФПЭ-06/05 "Ток в вакууме", источника питания, вольтметра и миллиамперметра. Схема кассеты ФПЭ-06/05 приведена на рис.7.



На катод 1 вакуумного диода 2 подается постоянное напряжение, которое можно плавно изменять в пределах от 2,5 В до 4,5 В при помощи ручки «2,5В–4,5В» источника питания. Это напряжение, измеряется вольтметром, присоединенным к гнездам "+" и "-" 2,5В ÷ 4,5В на передней панели источника питания. Между катодом и анодом 3 действует постоянное напряжение, которое плавно изменяется от 10 до 120 В при помощи ручки "12В ÷ 120В" источника питания. Значение напряжения определяется вольтметром, расположенном на передней панели источника питания. Ток, протекающий через диод, измеряется миллиамперметром, подсоединенным к гнездам "РА" на кассете ФПЭ-06/05.

### 2.3. Порядок выполнения работы

1. Подключить модуль ФПЭ-06/05 соединительным кабелем к источнику питания (ИП). Амперметр на панели источника питания служит для контроля тока накала  $I_n$ , максимальное значение которого не должно превышать 2,2 А. Плавная регулировка напряжения накала осуществляется ручкой, расположенной под амперметром.
2. Подключить разъем XI на передней панели источника питания к разъему X2 на передней панели блока ФПЭ-06/05 "Ток в вакууме".
3. Подключить вилки приборов к сети 220 В на стенде и включить приборы.
4. Начертить таблицу измерений (табл.1).



5. Вращая ручку "2,5 ÷ 4,5В" на передней панели источника питания по часовой стрелке, установить на катоде диода напряжение накала  $U_n = 3,7В$ . Контроль напряжения осуществляется по вольтметру

6. Снять вольтамперную характеристику вакуумного диода. Для этого, изменяя напряжение на аноде  $U_a$  вращением ручки «12В ÷ 120В» источника питания согласно таблице 1, снимать показания миллиамперметра и записывать их в таблицу 1 в графу " $I_{d1}$ "

7. Пункт 4 и 5 повторить для  $U_n = 4,0; 4,2В; 4,3В$ .

8. Для каждого значения тока накала  $I_n$  (ток накала снимается по амперметру, расположенному на панели источника питания) построить вольтамперную характеристику и точку перегиба полученной кривой считать точкой насыщения.

9. Для всех значений напряжения накала  $U_n$  рассчитать мощность, выделяемую на катоде по формуле  $P = I_n U_n$ , а также мощность, приходящуюся на единицу площади поверхности катода  $P/S_{\text{к}}$ . Для данной лампы площадь поверхности катода принять  $S_{\text{к}} = 3,52 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ .

10. По графику (рис.4) зависимости температуры катода  $T$  от  $P/S_{\text{к}}$ , определить температуру катода для каждого значения мощности нагрева.

11. Все полученные данные занести в таблицу 1.

12. Установить ручки «2,5 В ÷ 4,5 В» и «12 В ÷ 120 В» источника питания в крайнее левое положение.

13. Выключить тумблеры "сеть" миллиамперметра, вольтметра источника питания, стенда.

14. Отключить все приборы от сети 220В стенда.

Таблица 1

$U_a, \text{В}$	$I_{d1}, \text{мА}$	$I_{d2}, \text{мА}$	$I_{d3}, \text{мА}$	$I_{d4}, \text{мА}$
10				
20				
...				
120				
$U_H, \text{В}$	3,7	4,0	4,2	4,3
$I_H, \text{А}$				
$P/S_{\Pi}$				
$T, \text{К}$				
$I_s, \text{А}$				
$\ln\left(\frac{I_s}{T^2}\right)$				
11594/T				

## 2.4. Обработка результатов измерений

1. Построить на миллиметровой бумаге вольтамперные характеристики для соответствующих напряжений  $U_H$ .
2. Определить по вольтамперным характеристикам значения термоэлектронного тока  $I_s$ , и записать в таблицу 1.
3. Построить прямую Ричардсона в координатах  $\ln\left(\frac{I_s}{T^2}\right)$  от  $\frac{11594}{T}$  на миллиметровой бумаге.
4. Определить значение работы выхода электрона  $A_{\text{вых}}$  согласно рис.5.
5. Определить материал, из которого изготовлен катод лампы.
6. Сделать выводы из лабораторной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вафин Д. Б. Физика: учебное пособие для студ. инженерных спец./ Д. Б. Вафин. - 2-е изд., доп.. - Казань: Изд-во МОиН РТ, 2010. - Ч. I.
2. Врублевская Г. В. Физика. Практикум [Электронный ресурс]: учебное пособие / Г. В. Врублевская, И. А. Гончаренко, А. В. Ильюшонок. – Москва: ИНФРА-М, 2012.– Режим доступа: <http://znanium.com/go.php?id=252334>

- 3.Ильюшонок А. В. Физика [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. В. Ильюшонок, П. В. Астахов, И. А. Гончаренко. – Москва: ИНФРА-М, 2013.– Режим доступа: <http://znanium.com/go.php?id=397226>
- 4.Савельев И. В. Курс общей физики [Текст]. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. - 10-е изд., стер. - СПб.: Лань, 2008.
- 5.Пинский А. А. Физика [Электронный ресурс]: учебник / А. А. Пинский, Г. Ю. Граковский; под общ. ред. проф., д.э.н. Ю. И. Дика, Н. С. Пурышевой. – 3-е изд., испр. – Москва: Издательство"ФОРУМ",2013.– <http://znanium.com/go.php?id=375867>.