

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фізико-математичний факультет

Лабораторна робота № 2-8  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРОННОЇ ЕМІСІЇ**

Виконана студ. групи \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

Київ-2025

## Лабораторна робота № 2-8

# Дослідження термоелектронної емісії

Мета роботи: визначити роботу виходу вольфраму.

Прилади та пристрої (реальний експеримент): спеціальний вакуумний діод із вольфрамовим катодом; мікроамперметр типу М 906; вольтметр змінного струму; джерело струму УИП-2; потенціометр; резистори.

## Теоретичні відомості

Електрони провідності в металах мають велику концентрацію ( $\sim 10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$ ), але самочинно з них не виходять. Цьому перешкоджає електричне поле, що виникає у поверхневому шарі. Для того, щоб електрон міг вийти з металу, повинна бути виконана робота, проти сил цього поля, - робота виходу електрона з металу.

Усередині металу заряд електронів скомпенсований зарядом позитивних іонів. Проте, внаслідок теплового руху, електрони поверхневого шару можуть перетнути поверхню металу й віддалитися на кілька атомних відстаней. Над поверхнею утвориться електронна хмарка, густина якої буде швидко зменшуватися при віддаленні від металу. Як наслідок, навколо поверхні металу утворюється подвійний електричний шар, що складається з негативно зарядженого електронного шару і зарядженого позитивно приповерхневого шару іонів металу. Цей подвійний шар не створює електричного поля у зовнішньому просторі, однак при проходженні крізь нього електрон повинен виконати певну роботу.

Причиною появи роботи виходу є також і те, що під час виходу електрона з металу (внаслідок теплового руху) на поверхні останнього з'являється індукований, позитивний заряд, який притягує електрон до себе. Силу, з якою цей позитивний заряд діє на електрон, можна обчислити, скориставшись методом дзеркальних відображень. Робота проти сили "електричного відображення" складає частину роботи виходу електрона. Повна робота виходу електрона, таким чином, складається з роботи, потрібної для проходження подвійного електричного шару і роботи проти сили "електричного відображення".

Затримуюче електричне поле зосереджується в тонкому шарі поблизу поверхні металу, тому трохи далі від поверхні металу ніякі сили на електрон не діють. Отже, потенціальна енергія електрона ззовні металу має сталу величину. Прийемо це значення потенціальної енергії за нульовий рівень (рис. 8.1).

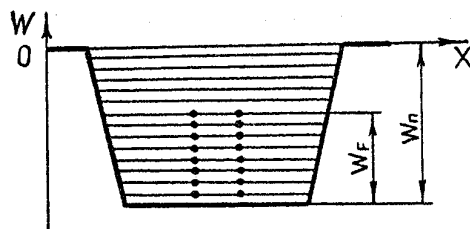


Рис. 8.1

В області затримуючого поля потенціальна енергія електрона різко зменшується, внаслідок спрямованих вбік металу сил. Усередині металу потенціальна енергія електрона має також сталу, але від'ємне значення. Якщо спрямувати вісь  $x$  перпендикулярно до поверхні металу, то залежність потенціальної енергії  $W$  від  $x$  матиме вигляд, зображений на рис. 8.1. Отже, для електронів метал становить потенціальну яму глибиною  $W_n$ . Повна енергія електрона в металі – це сума потенціальної та кінетичної енергій. Кінетична енергія

електрона всередині металу може набувати тільки певних допустимих значень, які утворюють систему розміщених поблизу дискретних рівнів.

На рис. 8.1 енергетичні рівні зони провідності вписані в потенціальну яму. За температури  $T = 0$  К електрони, розміщуючись попарно, займають найнижчі рівні. Найвищий заповнений електронами рівень відповідає певній енергії електронів, яка називається енергією Фермі  $W_F$ . Саме цей рівень називається рівнем Фермі. З рис. 8.1 видно, що при  $T = 0$  К енергія електронів у металі знаходиться в інтервалі  $-W_{\text{п}} \leq E \leq -(W_{\text{п}} - W_F) - W_{\text{п}} \leq E \leq -(W_{\text{п}} - W_F)$ ; у цьому випадку електрони не можуть самочинно покинути метал. Для того, щоб електрон вийшов із металу, йому треба надати додаткової енергії, мінімальне значення якої дорівнює  $(W_{\text{п}} - W_F)$ . Цю енергію можна передати, зокрема, нагріванням. Мінімальна енергія  $W = W_{\text{п}} - W_F$ , потрібна для переведення електрона з металу (з рівня Фермі) у вакуум, називається роботою виходу електрона з металу.

При температурі, вищій за абсолютний нуль, збільшується кінетична енергія теплового руху електронів в околі рівня Фермі. Це призводить до перерозподілу електронів за рівнями і розмиванню межі між повністю заповненими та вільними енергетичними рівнями. Якщо одержана електронном енергія перевищує  $W$ , такий електрон може вийти з металу. Явище випромінювання електронів нагрітими металами (або будь-якими твердими та рідкими тілами) називається термоелектронною емісією.

Електрони, що вилітають з нагрітого металу, можна видалити з поверхні, якщо створити у вакуумі, що оточує метал електричне поле, спрямоване до поверхні металу (у разі, якщо на електрон діятимуть сили, спрямовані від поверхні металу). При цьому у вакуумі буде текти електричний струм, який називається термоелектронним.

Для спостереження та вивчення термоелектронної емісії використовують вакуумний діод. Один із його електродів – катод – це нитка з тугоплавкого металу (молібдену, вольфраму тощо), що розігрівається електричним струмом. Другий електрод (анод) найчастіше має форму навколо катодного циліндра, на який осідають термоелектрони. Щоб одержати в діоді термоелектронний струм, потрібно нагріти катод і між ним та анодом створити прискорююче електричне поле. Сила термоелектронного струму  $I_a$  залежить від потенціалу анода відносно катода.

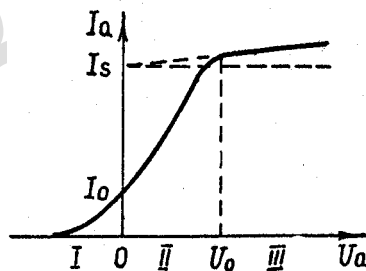


Рис. 8.2

На рис. 8.2 зображено залежність сили струму в діоді від анодної напруги:  $I_a(U_a)$ . Ця крива називається вольт-амперною характеристикою (ВАХ) діода. На вольт-амперній характеристиці можна виділити три ділянки: I, II, III. При достатньо великій напрузі на аноді  $U_a$  (область III) його досягатимуть усі термоелектрони, тому  $I_a$  майже не залежить від  $U_a$ . Максимальний струм, що проходить через діод, називається струмом насичення  $I_s$ . Невелике

збільшення струму на цій ділянці, згідно з формулою  $I_a = I_s e^{-\frac{\text{const} \sqrt{U_a}}{kT}}$ , зумовлене тим, що зі збільшенням прискорюючого поля дещо зменшується глибина потенціальної ями, а отже робота виходу електронів із катода (ефект Шоткі).

Електрони, що рухаються у вакуумному проміжку діода, створюють у ньому негативний заряд. Електричне поле цього заряду  $E_{\text{об}}$  накладається на зовнішнє поле  $E_{\text{зов}}$  між анодом і катодом. Поле  $E_{\text{об}}$  гальмуватиме електрони у просторі, що прилягає до катода, і прискорюватиме їх біля анода.

У режимі насичення, внаслідок зменшення концентрації електронів в області об'ємного заряду, повне поле  $E_{зоб} + E_{об}$  прискорюватиме електрони в усьому вакуумному проміжку. При зменшенні анодної напруги  $U_a$  зменшуватиметься й  $E_{зоб}$ , тому при деякому значенні  $U_a = U_0$  сумарне поле катода буде рівне нулю, а при менших значеннях  $U_a$  – стане гальмуючим навколо катода. Унаслідок цього струм  $I$  стане меншим, ніж  $I_s$  і змінюватиметься зі зміною відповідно до закону Ленгмюра:  $I_a \sim U^{3/2}$  (ділянка II).

При наступному зменшенні потенціалу анода поле  $E_{зоб} + E_{об}$  стає гальмуючим на усьому вакуумному проміжку. До анода тепер потраплятимуть лише ті електрони, кінетична енергія яких достатня для того, щоб подолати зовнішній затримуючий потенціал  $U_a$ . Залежність струму  $I$  від  $U_a$  у цьому випадку визначається геометрією електродів і законом розподілу термоелектронів за початковими швидкостями (область I). Ця частина вольт-амперної характеристики називається „кривою затримки”.

Густина струму насичення  $j_s$  залежить від емісійної здатності матеріалу катода, що визначається максимальним числом електронів, які здатен випромінювати катод з одиниці поверхні за одиницю часу. Густина струму насичення залежить від матеріалу катода і збільшується з підвищенням температури за законом Річардсона – Дешмана:

$$j_s = AT^2 e^{-\frac{W}{kT}} \quad (8.1)$$

де  $A$  – термоелектронна стала, однакова для всіх металів,  $A = \frac{4\pi m e k^2}{h^3} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ А} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-2}$ ;  $m$  – маса електрона;  $e$  – заряд електрона;  $k$  – стала Больцмана;  $h$  – стала Планка;  $W$  – робота виходу.

Формула (8.1) може бути отримана в разі припущення того, що електрони в металі підлягають законам ідеального газу, і всі електрони, які вилетіли з катода, досягають анода.

З цієї формули видно, що при температурі  $T \ll W/k$ , отримуємо  $e^{-\frac{W}{kT}} \ll 1$ , тобто емісії практично немає. Струм насичення  $I_s = j_s S$  ( $S$  – площа поверхні катода) різко збільшується зі збільшенням температури, так як сила цього струму визначається, головним чином, залежним від температури множителем  $\exp\left(-\frac{W}{kT}\right)$ . Враховуючи співвідношення  $I_s = j_s S$ , рівняння (8.1) перепишемо у вигляді:

$$I_s = AST^2 e^{-\frac{W}{kT}}.$$

Логарифмуючи цей вираз, дістанемо:

$$\lg \frac{I_s}{T^2} = \lg(AS) - \frac{W}{kT} \lg e = \text{const} - \frac{5040}{T} W, \quad (8.2)$$

оскільки  $\frac{\lg e}{k \left( \frac{\text{еВ}}{\text{К}} \right)} = 5040 \left( \frac{\text{К}}{\text{еВ}} \right)$ .

Таким чином, в координатах  $\left( \lg \frac{I_s}{T^2}, \frac{5040}{T} \right)$  залежність, що описується формулою (8.1), має вигляд прямої лінії, кутовий коефіцієнт якої дорівнює роботі виходу  $W$  в електрон-вольтах. Визначивши у досліді залежність  $I_s(T)$ , можна обчислити роботу виходу  $W$  матеріалу катода.

## Опис експериментальної установки

Для вивчення термоелектронної емісії у даній роботі використовується вакуумний діод спеціальної конструкції з вольфрамовим катодом прямого (безпосереднього) розжарення (рис. 8.3,а).

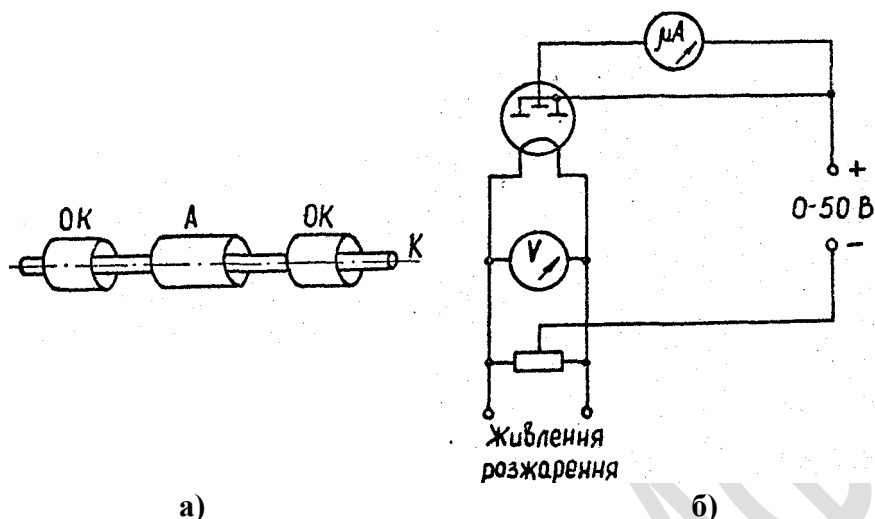


Рис. 8.3

Катод К – це вольфрамовий дріт, натягнутий вздовж осі циліндричного анода. Анод зроблений з трьох частин: А – власне анод, який вмикається у вимірювальну схему діода, ОК – охоронне кільце, яке компенсує неоднорідність поля біля країв анода та перепади температури на кінцях катода, тобто усуває небажані явища, пов'язані з обмеженими розмірами електродів. До охоронних кілець подається такий самий позитивний потенціал, як і на анод. З метою усунення впливу перепаду потенціалу вздовж катода (нееквіпотенціальності катода), зумовленого струмом розжарення, катод живиться змінним струмом і під'єднується до джерела анодної напруги симетрично (рис. 8.3,б). Температура розжарення катода визначається за величиною падіння напруги на нитці розжарення, яка вимірюється вольтметром у колі катода. Для зручності температури розжарення вказані на установці.

Конструктивно установка виконана у вигляді блоку, на верхній панелі якого змонтовано мікроамперметр для вимірювання анодного струму і вольтметр для вимірювання напруги розжарення, а отже, і температури катода. На панелі знаходиться ручка "НАКАЛ" для регулювання напруги розжарення. Живлення установки здійснюється від джерела струму УИП-2. Для розжарення використовується змінний струм, що знімається з виходу "6,3 В". Анодне коло живиться від виходу "0...50 В".

## Порядок виконання роботи

1. Установити ручки регулювання напруги розжарення й анодної напруги у крайні ліві позиції, що відповідає відсутності напруг.
2. Увімкнути УИП і дати прогрітися впродовж 5...10 хв.
3. Установити ручку "НАКАЛ" у таку позицію, щоб при відсутності анодної напруги з'явився невеликий анодний струм (5...10 мкА). Дати діоду прогрітися (коливання анодного струму повинні припинитися). Записати у табл. 8.1 температуру катода  $T_1$  (у кельвінах).
4. Для 10 різних значень анодної напруги  $U_a$  виміряти анодний струм  $I_a$ . Дані занести до табл. 8.1. Межі зміни повинні забезпечити отримання ділянки насичення.
5. Виконати вимірювання, вказані в п.4, для п'яти різних температур катода від мінімальної до максимально можливої. Дані занести до табл. 8.1.



## Контрольні запитання

1. Що таке напруженість і потенціал електричного поля? Як пов'язані між собою напруженість і потенціал електричного поля?
2. Що таке заряд, сила струму, густина струму? Який зв'язок між ними?
3. Чому дорівнює енергія заряду в електричному полі?
4. Як формулюється закон Ома в диференціальній формі?
5. Чому для дослідження явища термоелектронної емісії треба збільшувати температуру катода?
6. Які причини виникнення затримуючого потенціалу у поверхневому шарі металу?
7. Як пояснити хід кривої потенціальної енергії електрона в металі?
8. Як розподілені електрони за рівнями в металі за умови  $T = 0 \text{ K}$ ? Що таке рівень Фермі, енергія Фермі?
9. Що таке робота виходу? Як можна визначити її, знаючи струм насичення?
10. У чому полягає явище термоелектронної емісії?
11. Що таке вакуумний діод? Яка його вольт-амперна характеристика і яким чином її пояснити?
12. Яку конструкцію має діод, що використовується в даній роботі?
13. Яка залежність густини струму насичення від температури катода? У чому полягає зміст формули Річардсона – Дешмана?
14. У чому полягає суть методу визначення роботи виходу за струмом насичення?
15. У чому полягає метод дзеркальних відображень?

## Література

1. Бушок Г. В. Венгер. Курс фізики : у 3 кн. Кн. 2. Електрика і магнетизм: Навч. посіб. – К: Вища школа, 2003. §3 с.9 – 10, § 5 с.13 - 16, §§9-11 с. 24 – 30, §22 с. 57 – 58, §54 с. 139 – 141.  
[https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2015/Byshok\\_P2\\_2003\\_278.pdf](https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2015/Byshok_P2_2003_278.pdf)
2. Горбачук І.М. Тищук І.Т., Луцик П.П. Загальний курс фізики. В 3 т. Т.2 Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 2001 р.