

## Лекція №8. Електричний струм у вакуумі.

### Термоелектричні явища. Електричний струм у газах

#### 26. Електричний струм у вакуумі

**Емісія** – це вихід електронів з металу під дією зовнішніх факторів.

*Явище термоелектронної емісії полягає в тому, що нагріті метали випускають електрони.* Електрон провідності може вилетіти з будь-якого металу тоді, коли його енергія (кінетична) перевищує роботу виходу електрона з металу.

Внаслідок термоелектронної емісії виникає термоелектронний струм.

Явище термоелектронної емісії на практиці можна спостерігати за допомогою вакуумної лампи-діода, в яку впаяно два електроди - катод  $K$  і анод  $A$  (рис.3). Катод нагрівається електричним струмом від батареї розжарювання  $B_p$ . Регулюючи за допомогою реостата  $R_p$  силу струму розжарювання, можна змінювати температуру катода. Від батареї на електроди подається напруга  $U_a$ , величину якої можна змінювати за допомогою потенціометра  $\Pi$  і вимірювати вольтметром  $V$ . Термоелектронний струм  $I_a$  вимірюється гальванометром  $G$ .

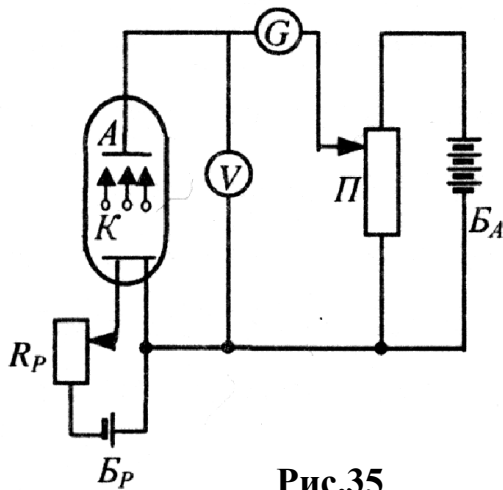


Рис.35

Сила термоелектронного струму  $I_a$  залежить від напруги  $U_a$ , яка прикладена між катодом та анодом, температури катода і матеріалу, з якого виготовлений катод.

На рис.3 подано залежність термоелектронного струму  $I_a$  від напруги  $U_a$  при різних температурах катода. Ця крива називається *вольт-амперною характеристикою діода*. При малих значеннях  $U_a$  криві при різних температурах

збігаються.

При невеликих анодних напругах сила струму спочатку повільно зростає з підвищенням напруги. Це пояснюється тим, що при невеликих значеннях  $U_a$  не всі електрони, які вийшли з катода, досягають анода. Частина електронів між катодом і анодом утворює електронну хмаринку (просторовий заряд), яка перешкоджає руху до анода електронів, які знову вилетіли з катода. Із збільшенням напруги  $U_a$  електронна хмаринка поступово розсіюється і струм  $I_a$  зростає. При  $U_a = U_n$  зростання струму припиняється. Це пов'язано з тим, що кількість електронів, які долітають до анода за одиницю часу, дорівнює кількості електронів, що вилітають за той самий час з катода.

Максимальний термоелектронний струм, можливий при даній температурі катода, називають **струмом насичення**  $I_n$ .

При малих значеннях  $U_a \ll U_n$  залежність термоелектронного струму від анодної напруги описується законом Богуславського - Ленгмюра

$$I_a = BU_a^{3/2}.$$

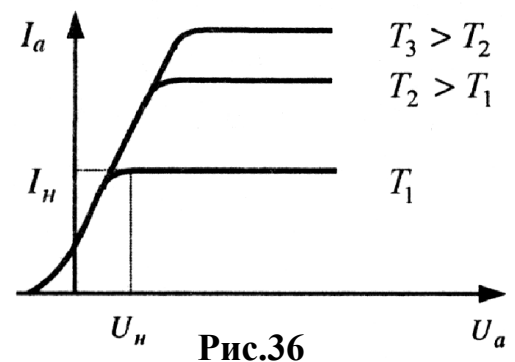


Рис.36

де  $B$  – коефіцієнт, який залежить від форми електродів та їх взаємного розміщення.

Математично залежність густини струму насичення описується за класичною електронною теорією **формулою Річардсона**:

$$j_n = A\sqrt{Te}^{-\frac{e\Delta\phi}{kT}},$$

де  $A = ne\sqrt{\frac{k}{2\pi m}}$ , тут  $e$ ,  $m$ ,  $n$  – відповідно, заряд, маса та концентрація електронів в металі,  $k$  – стала Больцмана.

Отже, за класичною електронною теорією коефіцієнт  $A$  залежить від концентрації електронів  $n$  і для різних металів є неоднаковим.

За квантовою теорією густина струму Насичення визначається **формулою Річардсона- Дешимена**:

$$j_n = BT^2 e^{-\frac{e\Delta\phi}{kT}},$$

де

$$B = \frac{4\pi emk^2}{h^3} \approx 120 \frac{A}{\text{см}^2 K}.$$

Отже, стала  $B$  є однаковою для всіх металів. Проте таке  $B$  не виявлене у жодного з металів. Розбіжності пояснюються тим, що в теоретичних розрахунках використовується модель ідеального електронного газу.

Обидві теорії правильно передають експоненціальну залежність густини струму  $j_n$  від температури. Множники  $T^{1/2}$  і  $T^2$  відіграють другорядну роль, оскільки показникова функція змінюється значно сильніше за степеневу.

## 27. Робота виходу електронів з металу.

### Контактна різниця потенціалів

Електрони провідності в металі весь час перебувають у хаотичному тепловому русі. Та обставина, що вільні електрони утримуються всередині металу, вказує на те, що в поверхневому шарі металу виникає затримуюче електричне поле, яке перешкоджає електронам виходити з металу в навколишній вакуум. Щоб покинути метал, електрон повинен виконати деяку роботу, яка називається **роботою виходу**.

Одна із причин виникнення роботи виходу полягає в наступному. Якщо при тепловому русі електрон вилетить з металу, то він індукує на його поверхні заряд, який називається зарядом дзеркального відображення. Між електронем і цим зарядом виникає сила притягання, що називається силою електричного зображення і яка намагається повернути електрон назад у метал.

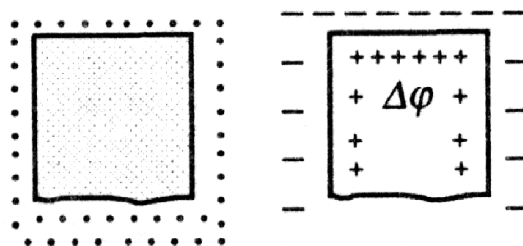


Рис. 37

Інша причина зумовлена тим, що біля поверхні металу у вакуумі існує “електронна хмарка”, яка заряджена негативно (рис.1). Розміри цієї хмарки одного порядку з розмірами атомів ( $10^{-10} \text{ м}$ ). При цьому метал, охоплений негативною електронною хмаринкою, відносно вакууму заряджений позитивно (рис.1). Позитивний потенціал внутрішньої частини металу відносно вакууму називається

внутрішнім потенціалом  $\Delta\phi$ .

Потенціальну енергію  $W$  вільних електронів  $-e$  у вакуумі вважають такою, що дорівнює нулю (бо  $\phi = 0$ ). Тоді всередині металу з позитивним внутрішнім потенціалом  $\Delta\phi$  потенціальна енергія електронів провідності від’ємна:

$$W = (-e)\Delta\phi = -e\Delta\phi.$$

Отже, вільні електрони в металах знаходяться в “потенціальній ямі з плоским дном” (рис.2) (плоским через те, що поверхневий подвійний шар утворює електричне поле, подібне до поля плоского конденсатора).

Для виходу електрона з металу у вакуум треба подолати потенціальний бар’єр – поле подвійного поверхневого шару. Це потребує додаткової енергії, яка має бути не меншою за глибину потенціальної ями.

**Роботою виходу** називається величина  $A_{\text{вих}}$ , що дорівнює тій найменшій додатковій енергії з протилежним знаком,

яку потрібно передати електрону провідності в металі для його виходу у вакуум. Отже, числове робота виходу дорівнює:

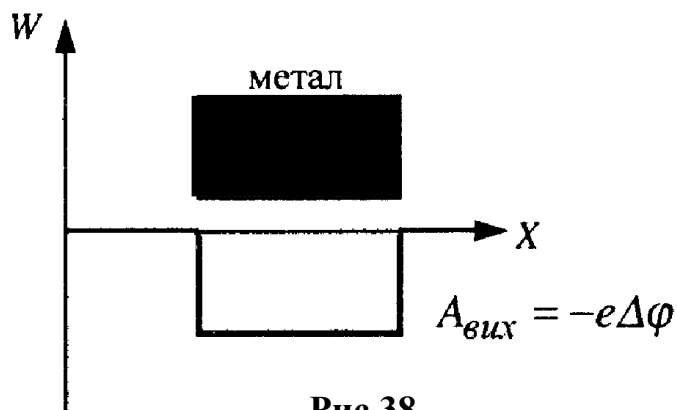


Рис.38

$$A_{\text{вих}} = e\Delta\varphi.$$

Якщо електрону в металі надати додаткової енергії, його кінетична енергія зростає. Умову виходу електрона з металу можна записати так:

$$\frac{mv_n^2}{2} \geq e\Delta\varphi.$$

де  $v_n$  – проекція швидкості електрона на нормаль до поверхні металу.

Додаткову енергію електрони провідності можуть отримати при освітленні металу (зовнішній фотоэффект), нагріванні (термоелектронна емісія), під дією сильного електричного поля (автоелектронна емісія), при бомбардуванні поверхні металу потоком електронів у вакуумі (вторинна електронна емісія).

Робота виходу залежить від хімічної природи металу і стану його поверхні. Забруднення, залишки вологи тощо змінюють величину роботи.

Підібравши певним чином покриття поверхні, можна значно зменшити  $A_{\text{вих}}$ . Якщо на поверхню вольфраму ( $A_{\text{вих}}=4,5 \text{ eV}$ ) нанести шар оксиду лужно-земельного металу (Ca, Ba), то робота виходу зменшується до  $2 \text{ eV}$ .

Якщо розглянути два контактуючих метала із роботами виходу  $A_1 > A_2$ , то електрони будуть більше переходити у перший метал. Між металами виникає різниця потенціалів  $\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ , яка зветься **внутрішньою контактною різницею потенціалів**.

Це явище було відкрито А. Вольтою і описується законами Вольти.

### **I<sup>й</sup> закон Вольти**

*при з'єднанні двох провідників, виготовлених із різних металів, між ними виникає контактна різниця потенціалів, яка залежить тільки від їх хімічних властивостей і температури:*

$$\Delta\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2},$$

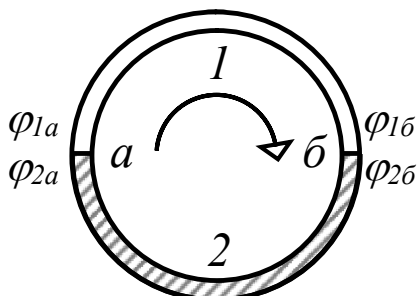
де  $k$  – стала Больцмана;  $e$  – заряд електрона;  $n_1, n_2$  – концентрація вільних електронів у металах.

### **II<sup>й</sup> закон Вольти**

*різниця потенціалів між кінцями кола, яке складається із послідовно з'єднаних металевих провідників, що знаходяться при однакових температурах  $T$ , не залежить від хімічного складу проміжних провідників. Вона дорівнює контактній різниці потенціалів, яка виникає при безпосередньому з'єднанні крайніх провідників.*

## **28. Термоелектричні явища**

Розглянемо електричне коло, яке складається із двох механічних провідників (рис. 1).



**Рис. 39**

Виберемо напрямок обходу контура за стрілкою. На ділянці  $a1б$  виникає спад напруги  $U_1 = IR_1$ , на ділянці  $a2б$  –  $U_2 = IR_2$ .

$$U_1 = \varphi_{1a} - \varphi_{1б}; \quad U_2 = \varphi_{2б} - \varphi_{2a}.$$

Тоді  $(\varphi_{1a} - \varphi_{2a}) + (\varphi_{2b} - \varphi_{1b}) = \varepsilon$ .

При  $T_a = T_b = T$

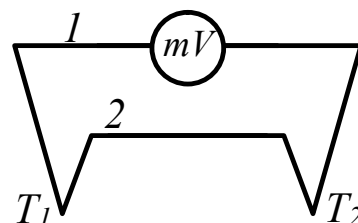
$$\varepsilon = \frac{kT}{e} \ln \frac{n_1}{n_2} + \frac{kT}{e} \ln \frac{n_2}{n_1} = 0, \text{ тобто е.р.с. у такому}$$

колі дорівнює нулю. При  $T_a \neq T_b$  (нехай  $T_a > T_b$ ) в колі з'являється **термоелектрорушійна сила** (термо-е.р.с.), яка дорівнює:

$$\varepsilon = \frac{k}{e} (T_a - T_b) \ln \frac{n_1}{n_2} = \alpha (T_a - T_b),$$

де  $\alpha$  – питома термо-е.р.с.

Завдяки цій термо-е.р.с. у такому колі виникає термоелектричний струм. Це явище застосовується у термопарах.



Зворотнє явище до виникнення термоструму було відкрите у 1834 р. і зветься **ефектом Пальтьє**.

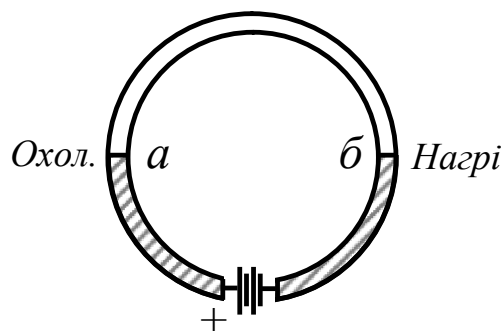


Рис. 40

Під час проходження струму через коло, яке складається з двох різних спаяних металів, відбувається *виділення теплоти* на одному спаї, тоді як інший спай *охолоджується*.

## 29. Електричний струм у газах

Гази, які складаються із електрично нейтральних молекул та атомів, являються **ізоляторами**. Для виникнення електропровідності газ повинен бути **іонізований**.

**Іонізація** – від’єднання або приєднання до нейтрального атома одного або декількох електронів. Зворотній процес має назву **рекомбінація**.

### Способи іонізації газів.

Підвищення температури.

Дією випромінювання (ультрафіолет, рентгенівське, радіоактивне).

Бомбардуванням швидкими електронами або іонами (ударна іонізація).

Мінімальна енергія електрона для ударної іонізації визначається:

$$\frac{mv^2}{h^{32}} \approx A_i \left( 1 + \frac{m}{M} \right),$$

де  $A_i$  – робота ізоляції,  $m$  – маса електрона,  $M$  – маса атома.

Процес проходження струму через газ зветься **газовим розрядом**. Якщо електропровідність газу створюється під дією зовнішнього іонізатора, то таке явище зветься **несамостійним газовим розрядом**.

Залежність сили струму  $I$  при самостійному газовому розряді від прикладеної напруги  $U$  має вигляд, зображений на рис. 5.

На ділянці 1 спостерігається

лінійна залежність  $I$  від  $U$  і густина струму визначається:

$$j = q_+ n_+ (U_+ + U_-) E,$$

де  $q_+$ ,  $n_+$  – заряд та концентрація додатніх зарядів;

$U_+$ ,  $U_-$  – рухливості додатніх та від’ємних іонів;

$E$  – напруженість електричного поля.

На ділянці 2 пропорційність порушується внаслідок того, що концентрація іонів у газі зменшується.

На ділянці 4 виникає **ударна іонізація**, що супроводжується утворенням **вторинних електронів та іонів**.

Ударна іонізація, яка створюється електронами, недостатня для самостійного розряду. Необхідно, щоб додатні іони іонізували молекули газу, або вибивали електрони із металу катоду. Це можливе при великих напругах  $U$ .

Перехід несамостійного газового розряду у самостійний зветься **електричним пробоем газу**, а відповідна йому напруга  $U_z$  – **напругою запалювання**.

Газові розряди супроводжуються свіченням газу. Випромінювання світла відбувається, коли молекули газу переходять із збудженого стану в нормальний стан, а також при рекомбінації додатніх іонів з електронами (рекомбінаційне свічення).

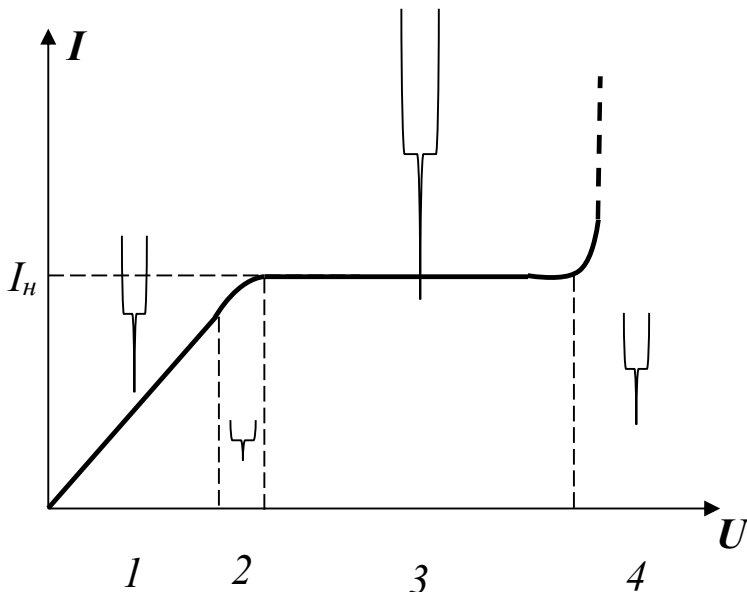


Рис. 41

## 29.1. ТИПИ ГАЗОВИХ РОЗРЯДІВ:

- **Тліючий розряд** – спостерігається при низькому тиску газу ( $5...7 \text{ кПа}$ ) та прикладеній напрузі  $U \sim 500...1000 \text{ В}$ . Приклад – “неонові вогні”.
- **Коронний розряд** – виникає при нормальному тиску газу, який знаходиться у дуже неоднорідному електричному полі  $E \sim 30 \text{ кВ/м}$ . Приклад – “Вогні святого Ельма”.
- **Іскровий розряд** – виникає при нормальному тиску газу, який знаходиться у однорідному електричному полі  $E \sim 3 \cdot 10^6 \text{ В/м}$ . Приклад – лінійна блискавка ( $U_{\text{хм.-землі}} = 10^8...10^9 \text{ В}$ ;  $I = 10...1000 \text{ кА}$ ;  $t - \text{мкс}$ ;  $q = 0,1...10 \text{ Кл}$ ).
- **Деровий розряд** – виникає при  $\rho = \rho_{\text{атм}}$ ,  $U = 60...90 \text{ В}$ . Приклад – “дугова зварка”.

Плазма – особливий стан речовини з майже повною іонізацією частинок речовини, у якій густина додатніх та від’ємних частинок майже однакова.

Повністю іонізована плазма утворюється при надвисоких температурах і існує на сонці та інших гарячих зірках.  
За своєю електропровідністю плазма наближається до провідників.

Плазму необхідно вважати четвертим агрегатним станом речовини.

### НАЙВАЖЛИВІШІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛАЗМИ:

1. Сильна взаємодія з зовнішніми магнітними та електричними полями.
2. Специфічна колективна взаємодія частинок плазми, що здійснюється через особливе поле.
3. Плазма є своєрідним пружним середовищем, у якому легко збуджуються і розповсюджуються різного роду коливання та хвилі.

Розрізняють “низькотемпературну плазму” ( $T_{\text{іон}} \leq 10^5 \text{ К}$ ) та “високотемпературну плазму” –  $T_{\text{іон}} \sim 10^6...10^8 \text{ К}$ .