

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни

**«ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА»**

*(для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2018**

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізичні основи джерел світла» (для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : Л. А. Назаренко, Г. О. Петченко, А. С. Литвиненко, А. І. Колесник. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 44 с.

Укладачі : д-р техн. наук, проф. Л. А. Назаренко,  
д-р фіз.-мат. наук, проф. Г. О. Петченко,  
канд. техн. наук, доц. А. С. Литвиненко,  
асист. А. І. Колесник

Рецензент

**К. І. Суворова**, кандидат технічних наук, доцент кафедри світлотехніки і джерел світла Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою світлотехніки і джерел світла, протокол № 1 від 1 вересня 2017 р.*

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ.....	5
<b>Лабораторна робота № 1</b> Визначення констант рівняння термоелектронного струму в металах .....	5
<b>Лабораторна робота № 2</b> Дослідження емісії оксидного катода за допомогою методу Фаунда .....	13
<b>Лабораторна робота № 3</b> Визначення роботи виходу електрона .....	19
<b>Лабораторна робота №4</b> Дослідження тліючого розряду.....	24
<b>Лабораторна робота № 5</b> Дослідження дугового розряду.....	29
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	36
ДОДАТОК А .....	43

## ВСТУП

Ці методичні вказівки містять описання лабораторних робіт з курсу «Фізичні основи джерел світла». Їх завдання полягає в ознайомленні студентів з деякими експериментальними методами досліджень при вивченні джерел світла у лабораторних умовах.

Описи лабораторних робіт містять лише короткі теоретичні відомості, необхідні для загального розуміння робіт, тому для їх успішного виконання студенту необхідно попередньо вивчити теоретичний матеріал, опис електричних схем, вимірювального обладнання, літературу для самостійної підготовки, усвідомити закономірності, що лежать в основі робіт, які виконуються. Запитання і список літературних джерел для самостійної підготовки додаються до кожного з описів лабораторних робіт.

Після завершення лабораторної роботи кожний студент має підготувати звіт-протокол про її виконання. У звіті-протоколі вказуються прізвище виконавця, дата виконання і назва лабораторної роботи, наводяться схеми вимірів, таблиці їх результатів з вказівкою розмірності виміряних величин, розрахункові формули, необхідні графічні залежності, остаточні результати експерименту і висновки, вказуються використані у роботі вимірювальні прилади з вказівкою їх класу точності.

Побудови графіків здійснюють на міліметровому папері, а осцилограм – на кальці, після чого їх вклеюють у звіт-протокол.

Остаточні результати треба подати в одиницях СІ з урахуванням можливих похибок.

Список рекомендованих джерел охоплює як основні, так і допоміжні літературні джерела, що окреслюють коло професійних кафедральних інтересів і безпосередньо стосується фундаментальних досліджень твердотільної фізики, фізики плазми і прикладної оптики і практичного застосування результатів цих досліджень у галузях, передбачених паспортом спеціальності 05.09.07 – світлотехніка та джерела світла.

Студент допускається до виконання роботи після співбесіди з викладачем, якому він повинен назвати мету роботи, досліджувані залежності, порядок виконання.

У додатку А наведено всі необхідні для розрахунків матеріали.

# 1 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

## Лабораторна робота № 1

### Визначення констант рівняння термоелектронного струму металів

*Мета роботи* – дослідження термоелектронної емісії металів, визначення констант рівняння Річардсона - Дешмана.

Метали складаються з великого числа атомів, розташованих близько один до одного. Валентні електрони в металі є «загальними» для всіх атомів. Через те, що вони не «прив'язані» до окремо взятих атомів, їх називають вільними.

Оскільки кожному атому відповідає не менш ніж один «вільний» електрон, концентрація останніх у металі дуже висока. Наприклад, атом вольфраму має два вільних електрони ( $N_e = 2$ ). Атомна вага  $\mu_w = 184$ , густина  $\rho_w = 19,3 \text{ Г/см}^3$ . Тому число вільних електронів у  $1 \text{ см}^3$  вольфраму визначається формулою:

$$n = \frac{N_A \cdot \rho_w \cdot N_e}{\mu_w} = \frac{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 19,3 \cdot 2}{184} = 1,26 \cdot 10^{23}, \quad (1.1)$$

де  $N_A$  число Авогадро.

Таким чином, концентрація електронів у металі в 5000 разів більше молекулярної концентрації газу за нормальних умов ( $2,7 \cdot 10^{19}$  молекул /  $\text{см}^3$ ).

Якщо для опису руху молекул газу застосовується класична статистика Максвелла - Больцмана, то для опису поведінки електронів у металах вона є непридатною через велику концентрацію «електронного газу» (у звичайному газі параметри його стану змінюються неперервно (невироджений колектив), а в електронному газі – дискретно (вироджений колектив)). (Умовою переходу від неvirодженого газу до virодженого є підвищення концентрації чи зниження температури).

Для визначення стану електронів у металах з урахуванням хвильових властивостей електрона і їх високої концентрації застосовують квантову статистику Фермі – Дірака - Зоммерфельда (ФДЗ):

$$\frac{dn}{d\varepsilon} = \frac{4\pi}{h^3} (2m)^{3/2} \frac{\sqrt{\varepsilon}}{e^{\frac{\varepsilon - \varepsilon_F}{kT}} + 1}, \quad (1.2)$$

де  $\varepsilon$  – енергія електрона;

$h$  – стала Планка;

$m$  – маса електрона;

$\varepsilon_F$  – енергія Фермі;

$k$  – стала Больцмана;

$T$  – температура речовини.

Розподіл ФДЗ електронів по енергіях у вольфрамі поданий на рисунку 1.

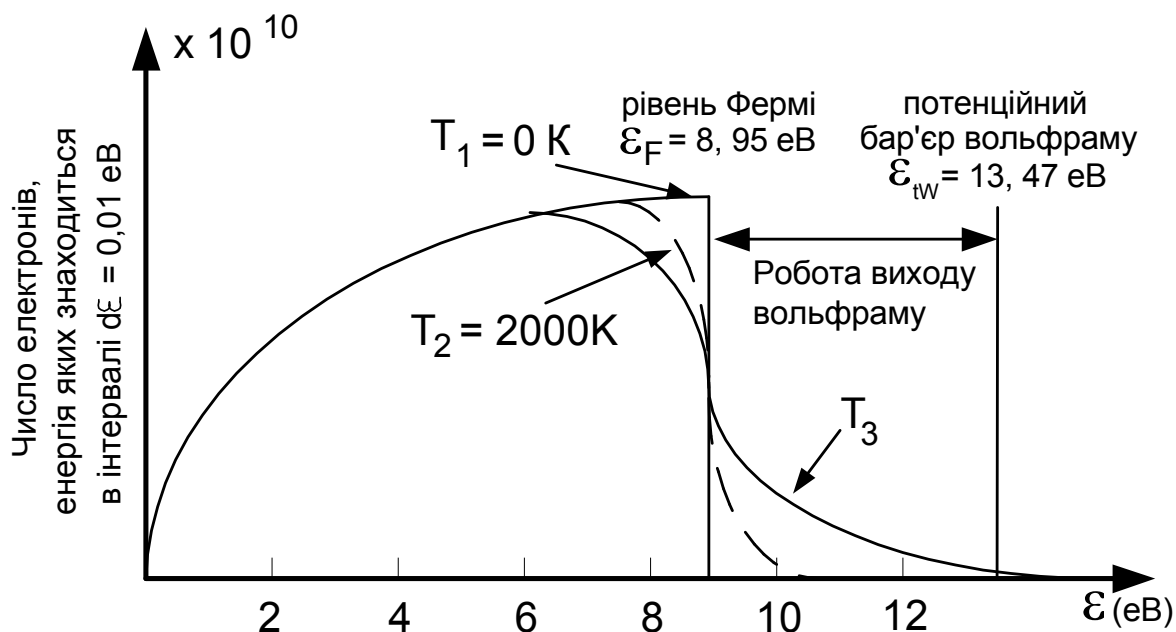


Рисунок 1.1 – Розподіл ФДЗ електронів

З формули (1.2) випливає, що в разі, коли електрон має енергію  $\varepsilon \leq \varepsilon_F$ , то при  $T = 0 \text{ K}$  залежність  $dn/d\varepsilon (\varepsilon)$  має параболічний вигляд, отже число електронів з енергіями від  $\varepsilon$  до  $\varepsilon + d\varepsilon$  зростає і набуває максимального значення при  $\varepsilon = \varepsilon_F$ . Електронів з енергією  $\varepsilon > \varepsilon_F$  і  $T = 0 \text{ K}$  немає. У цьому випадку  $dn/d\varepsilon = 0$ . Найбільший енергетичний рівень, який може бути заповнений електронами в металі при абсолютному нулі температур, має назву енергетичного рівня Фермі ( $\varepsilon_F$ ).

Якщо електронам у металі якимось чином надати додаткову енергію (наприклад, нагріванням), то певна частина високоенергетичних електронів зможе зайняти більш високий енергетичний рівень  $\varepsilon > \varepsilon_F$  (частина кривої 2 на рисунку 1.1). Однак і в цьому випадку електрони будуть належати металу. Для того, щоб залишити метал, електрон має подолати певний потенційний (енергетичний) бар'єр, тобто виконати роботу по розірванню зв'язків з атомною ґраткою металу, або, інакше кажучи, мати енергію першого емісійного рівня. Кожний метал характеризується як своїм рівнем Фермі, так і власною енергією потенційного бар'єра. Наприклад, для вольфраму  $\varepsilon_t = 13,47 \text{ eV}$ ;  $\varepsilon_F = 8,95 \text{ eV}$ ; а для молібдену  $\varepsilon_t = 13,70 \text{ eV}$ ;  $\varepsilon_F = 9,27 \text{ eV}$ .

Якщо нагріти метал до температури  $T_3$  ( $T_3 > T_2$ ), то невелика частина електронів залишить метал (див. рис. 1.1), тому що їх енергії вистачить на роботу подолання потенційного бар'єра. Перехід електрона з рівня Фермі на рівень потенційного бар'єра називається емісією електронів (*emissio* – випускання, випромінювання). У цьому випадку електрон залишає метал. Робота, яку необхідно зробити для переходу електрона з рівня Фермі на рівень

потенційного бар'єра, називається ефективною роботою виходу і визначається в такий спосіб:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_t - \varepsilon_F. \quad (1.3)$$

Електрони можуть залишати тверді тіла з різних причин. Явище випромінювання електронів з поверхні металу під дією нагрівання називається термоелектронною емісією.

За статистикою ФДЗ Річардсоном і Дешманом було отримане рівняння для густини струму емісії електронів з нагрітих металів:

$$j_e = AT^2 e^{-\frac{\varepsilon_0}{kT}}, \quad (1.4)$$

де  $j_e$  – густина струму насичення, тобто найбільша густина струму емісії з одиниці поверхні металу при температурі  $T$ ;

$A$  і  $\varepsilon_0$  – константи, що визначаються експериментально.

Якщо поверхню металу позначити через  $S$ , то повний струм, що може емітувати нагрітий метал,

$$I_{\text{нас}} = S \cdot A \cdot T^2 \cdot e^{-\frac{\varepsilon_0}{kT}}. \quad (1.5)$$

Існує декілька методів визначення констант термоелектронної емісії  $A$  і  $\varepsilon_0$ .

### Метод прямої Річардсона

Розділимо рівняння (1.4) на  $T^2$  і прологарифмуємо:

$$\ln \frac{j_e}{T^2} = \ln A - \frac{\varepsilon_0}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (1.6)$$

Залежність  $\ln(\frac{j_e}{T^2}) = f(\frac{1}{T})$  має вигляд прямої, показаної на рисунку 1.2.

Відрізок, що відтинається прямою на осі ординат, складає  $\ln A$ , а  $\text{tg } \alpha = \varepsilon_0 / k$ . Таким чином, за допомогою прямої Річардсона можна визначити як термоемісійну константу  $A$ , так і роботу виходу  $\varepsilon_0$ .

Для цього необхідно експериментально визначити густину струму емісії при різних температурах нагрівання досліджуваного металу і побудувати графічну залежність  $\ln(\frac{j_e}{T^2}) = f(\frac{1}{T})$ . Незважаючи на простоту, метод прямої Річардсона має ряд недоліків, пов'язаних як з неточністю виміру температури металу, так і неточністю виміру густини струму емісії.

Знайдемо температуру, використовуючи залежність електричного опору металу від температури:

$$R_t = R_0 (1 + \beta \cdot t), \quad (1.7)$$

де  $R_t$  і  $R_0$  – опір при температурах  $t$  °C та 0 °C відповідно;

$\beta$  – температурний коефіцієнт опору.

Недоліком цього способу визначення температури нагрівання емітуючого металу є залежність коефіцієнта  $\beta$  від температури у поєднанні з неоднорідністю температури емітуючого електрони металу, різної уздовж його поверхні: в утримувачів (выводів) вона нижче в результаті тепловідводу, ніж між ними. Наявність температурних градієнтів призводить до неточності визначення температури емісії внаслідок збільшення похибки використаної величини  $\beta$ .

Для дослідження термоелектронної емісії в роботі використовують двохелектродну лампу, що називається діодом. Як метал, що випромінює електрони, використовується нитка розжарювання (катод). Другий електрод – анод (рис. 1.3), залежно від знака прикладеного потенціалу може притягувати чи відштовхувати електрони, що випромінюються нагрітим катодом.

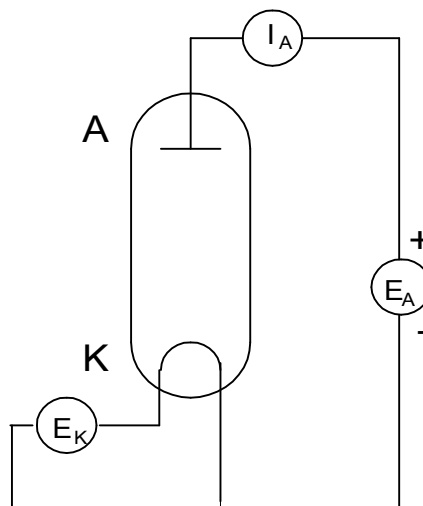
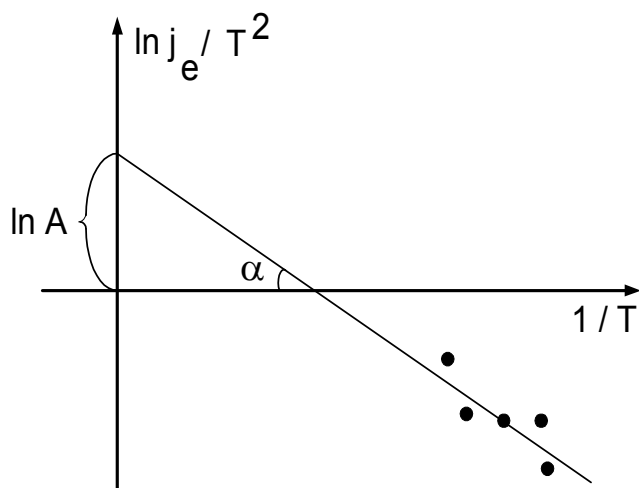


Рисунок 1.2 – Графічна залежність Рисунок 1.3 – Двохелектродна лампа

Коли потенціал анода дорівнюватиме нулю, анодний струм досягне струму насичення, тобто струму, при якому електрони, що випромінюються катодом, надходять до анода:

$$I_{\text{нас}} = S \cdot A \cdot T^2 \cdot e^{\frac{-e\phi_0}{kT}}, \quad (1.8)$$

де  $e\phi_0 = \epsilon_0\phi_0$  – потенціал виходу електрона з металу.



Коли прикладений до анода потенціал буде гальмуючим, тобто мінус до анода і плюс до катода, анодний струм виразиться формулою:

$$I_a = I_{\text{нас}} \cdot e^{\frac{-e(U_a)}{kT}}. \quad (1.9)$$

Якщо катод і анод виготовлені з різних металів, то в проміжку анод - катод діятиме контактна різниця потенціалів  $U_{\text{к.р.}}$ , що буде гальмувати рух емітованих електронів і її треба додати до потенціалу анода. Тоді:

$$I_a = I_{\text{нас}} \cdot e^{\frac{-e(U_a + U_{\text{к.р.}})}{kT}}. \quad (1.10)$$

Залежність анодного струму від потенціалу анода називають вольт-амперною характеристикою (ВАХ) діода (рис. 1.4). З рисунка 1.4 видно, що на ділянці АВ струм із зменшенням негативного потенціалу анода зростає і продовжує зростати із збільшенням позитивного потенціалу на ділянці ВР. Поблизу точки С рівень зростання струму зменшується, тому що всі електрони, які випускаються нагрітим катодом, надходять до анода. При додатковому збільшенні потенціалу анода струм росте, але вже не за експоненціальним законом, а в результаті ефекту Шотткі. Тому анодний струм у точці С приймають рівним току насичення  $J_{\text{нас}}$ . При зміні температури катода значення струму в точці С змінюється. Наявність точки перегину С викликана як просторовим зарядом, так і неоднорідністю поверхні катода. Це вносить додаткову неточність при визначенні струму насичення в методі прямої Річардсона.

Використовуючи залежність на ділянці АВ (рис. 1.4) і значення  $J_{\text{нас}}$ , можна встановити контактну різницю потенціалів  $U_{\text{к.р.}}$ . Для цього треба побудувати залежність  $\ln J_a = f(U_a)$ , наведену на рисунку 1.5.

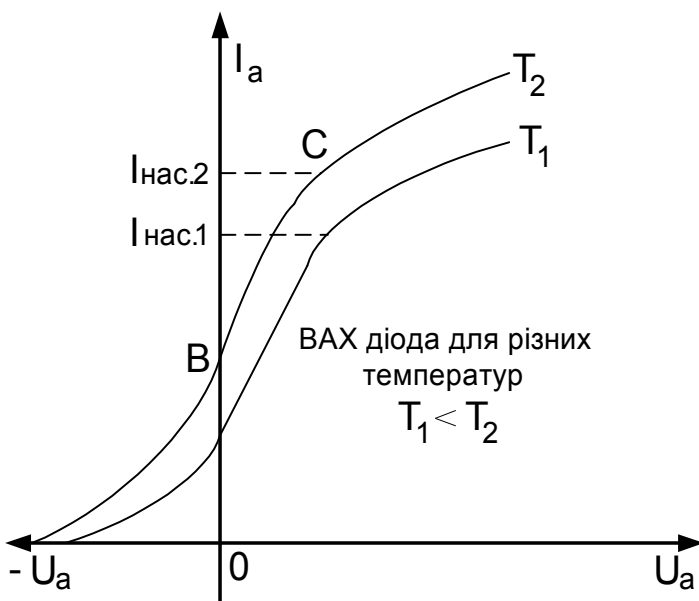


Рисунок 1.4 – Вольт - амперна характеристика діода

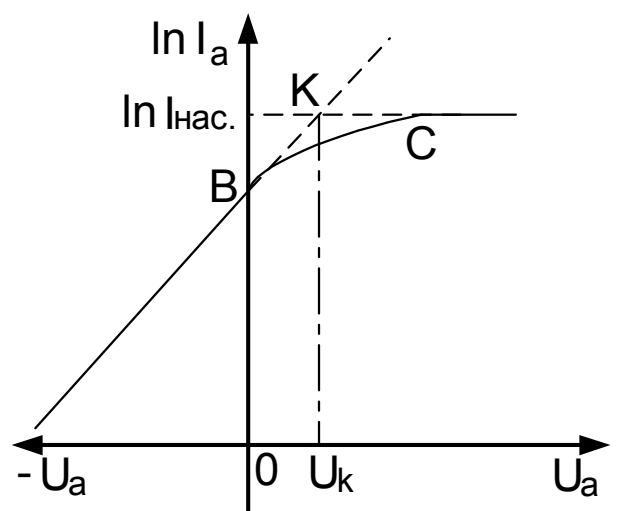


Рисунок 1.5 – Вольт - амперна характеристика діода

Продовжимо залежність на ділянці АВ до перетину з рівнем  $\ln J_{\text{нас}}$ . Якби не існувало контактної різниці потенціалів між анодом і катодом, то точка перетину К перемістилася б на пряму  $U_a = 0$ . Тому абсциса точки К, взята із зворотним знаком, дорівнює значенню контактної різниці потенціалів між анодом і катодом:  $U_{k.p.} = -U_k$ .

### Опис експериментальної установки

Схема робочої лампи приведена на рисунку 1.6. У скляній колбі, де створений високий вакуум, на держачу закріплений циліндричний анод довжиною  $l_a = 27$  мм і катод у вигляді металевої нитки довжиною  $l_k = 62$  мм і діаметром  $d_k = 0,1$  мм, що підтримується посередині пружиною.

Анод виготовлений з нікелю, а нитка розжарювання (катод) – з металу з питомим електричним опором  $r = 9,3 \cdot 10^{-8}$  Ом·м. Для визначення термоемісійних констант рівняння Річардсона – Дешмана необхідно зібрати схему, наведену на рисунку 1.7.

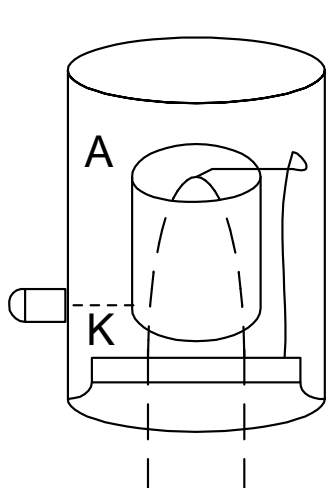


Рисунок 1.6 – Схема робочої лампи

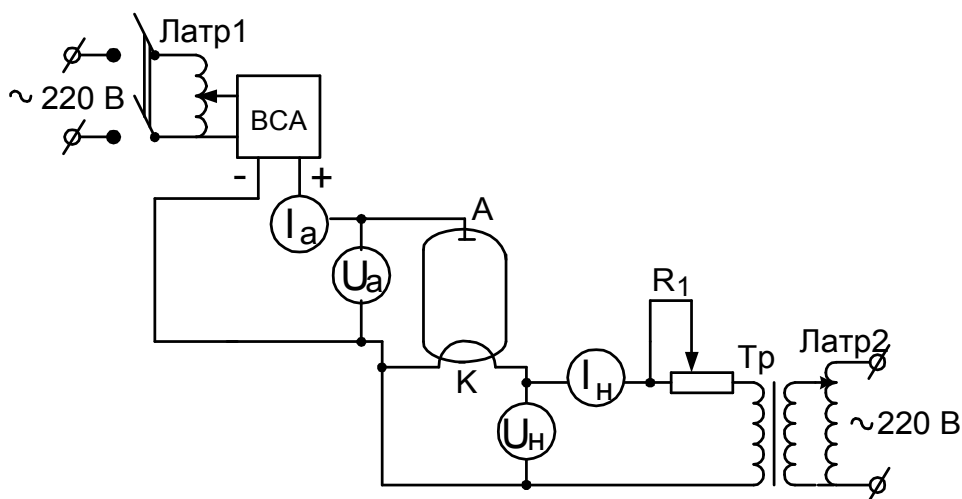


Рисунок 1.7 – Схема для проведення експерименту

Нитка розжарювання (катод) нагрівається електричним струмом. Через понижуючий трансформатор  $T_p$  напруга, що знімається з ЛАТРа2, подається на нитку розжарювання. Температура нагрівання залежить від величини струму розжарювання і змінюється реостатом  $R_1$ . Струм розжарювання вимірюється амперметром  $J_H$ , а напруга розжарювання – вольтметром  $U_H$ . На анод лампи подається постійна напруга від випрямляча ВСА. Значення цієї напруги змінюється за допомогою ЛАТРа1. Анодний струм вимірюється мікроамперметром, що має два діапазони вимірів: 500 мкА і 5 мА. Анодна напруга, прикладена між анодом і катодом, вимірюється вольтметром  $U_a$ .

Для розрахунку температури катода застосовується формула 1.7. Опір при  $t = 0$  °С розраховується з урахуванням його розмірів за формулою 1.11.

$$R_0 = \rho \frac{\ell_H}{S_H}, \quad (1.11)$$

де  $\rho$  і  $S_H$  – питомий електричний опір металу нитки розжарювання і її поперечний переріз відповідно.

Температурний коефіцієнт опору  $\beta$  у формулі 1.7 для металу нитки розжарювання  $\beta = 6,5 \cdot 10^{-3}$  град. $^{-1}$

Для побудови вольт – амперної характеристики в області АВ (див. рис. 1.4) збирають схему, наведену на рисунку 1.8.

Схема на рисунку 1.8 відрізняється від попередньої тим, що на анод подають не позитивний потенціал, а негативний (зворотний), тобто затримуючий.

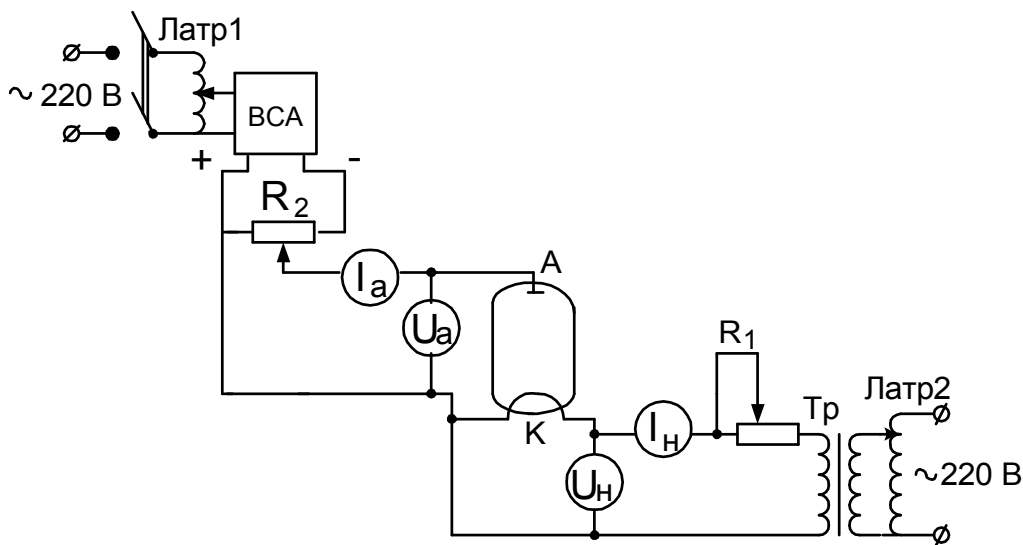


Рисунок 1.8 – Схема для проведення експерименту 2

Значення зворотної напруги регулюють потенціометром  $R_2$  і вимірюють вольтметром  $U_{A.обр.}$  з діапазоном виміру 4 В. Анодний струм у цьому випадку вимірюють чутливим мікроамперметром із діапазоном виміру від 5 мкА до 10 мкА.

### Завдання

1) Зняти і побудувати вольт-амперні характеристики лампи  $J_a = f(U_a)$  для декількох значень струму розжарювання (від 4 до 5 характеристик).

Для цього треба ознайомитися із стендом лабораторної роботи, підключити до клем необхідні прилади. Повернути ручку регулятора напруги ЛАТРів 1 і 2 і потенціометра  $R_2$  проти годинникової стрілки до упору. Напруга, що знімається з ЛАТРів, у цьому випадку дорівнюватиме нулю.

**Після дозволу викладача** включити перемикач В1 і ручками регулятора напруги ЛАТРів 2 і реостата  $R_1$  встановити перше значення струму

розжарювання, що складає 1,3 А, і виміряти відповідну цьому струму напругу розжарювання.

2) Поставити перемикач полярності анодної напруги в положення «ЗВОРОТНА НАПРУГА». Відповідно до схеми рисунку 1.8 провести виміри для побудови ділянки АВ вольт-амперної характеристики. При цьому ручка регулятора напруги ЛАТРа 1 **повинна бути увесь час** у початковому положенні. Обертаючи за годинниковою стрілкою ручку потенціометра R<sub>2</sub>, виміряти різні значення анодного струму і негативної анодної напруги (вольтметр на 4В). Негативну напругу змінювати, доки анодний струм стане рівним нулю. Результати вимірів занести у таблицю.

3) Перевести перемикач полярності анодної напруги у положення «ПРЯМА НАПРУГА». Відповідно до схеми на рисунку 1.7 зробити виміри для побудови ділянки ВС вольт-амперної характеристики. Обертаючи ручку регулятора напруги ЛАТРа 1, виміряти значення анодного струму (спочатку в діапазоні 500 мкА, а коли стрілка зашкалюватиме, переключити прилад на діапазон 5 мА) і анодної напруги. Результати вимірів занести в таблицю.

4) Повторити виміри відповідно до п. 1, 2 і 3 для інших значень струму розжарювання: 1,35; 1,4; 1,45 А, фіксуючи відповідні значення напруги розжарювання.

5) За формулою (1.7) розрахувати значення температури, що відповідає встановленому струму розжарювання. Значення опору R<sub>t</sub> розрахувати на підставі закону Ома:  $R_t = U_H / J_H$

6) Побудувати вольт-амперні характеристики і за точками перегину (точка С) визначити з графіків значення струму емісії (насичення) J<sub>нас</sub> . відповідне температурам катода T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>, ...

7) За результатами вимірів побудувати залежність  $\ln (j_e / T^2) = f (1/ T)$  (див. рис.1.2). Густина струму емісії розрахувати за формулою

$$j_e = \frac{J_{\text{нас.}}}{S}, \quad (1.12)$$

де S – площа поверхні катода.

8) Визначити константи А і ε<sub>0</sub> досліджуваного катода по відрізку, що відтинається на осі ординат, і нахилу прямої відповідно. Значення ε<sub>0</sub> виразити у електронвольтах.

9) Визначити такі характеристики катода при встановлених температурах: J<sub>нас</sub> – струм насичення,  $\eta = J_{\text{нас}} / P_H$  - ефективність катода, τ – довговічність. Занести їх у таблицю.

Довговічність ([с]) визначається за формулою:

$$\tau = \frac{0,1 \cdot d_H \cdot \gamma}{4\sigma_H}, \quad (1.13)$$

де  $\gamma$  – густина матеріалу катода [ $\text{кг}/\text{м}^3$ ];

$\sigma_H = 4,38 \cdot 10^{-3} P \sqrt{\frac{\mu}{T}}$  – швидкість випару металу нитки розжарювання [ $\text{кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$ ];

$P$  – визначається із графіка, наведеного в Додатку А.

10) Визначити контактну різницю потенціалів  $U_{k.p.}$ .

### Методичні рекомендації

1) Вимір вольт-амперних характеристик треба починати з низьких температур. Найбільше значення струму розжарювання не повинно перевищувати 1,5 А.

2) Перемикач полярності анодної напруги *не переключати в положення* “ЗВОРОТНА НАПРУГА”, якщо ручки регулятора напруги ЛАТРа 1 і потенціометра R2 не виведені проти годинникової стрілки до упору.

3) Варто звернути увагу на те, що у формулі (1.12),  $S$  – площа поверхні катода, а не всієї нитки розжарювання.

4) Побудову графіків виконувати на міліметровому папері, а обчислення і виміри робити в одиницях СІ.

5) У звіті вказати назву лабораторної роботи, привести схеми вимірів і результати у вигляді таблиць і графіків.

### Контрольні запитання

1. Яка статистика і чому застосовується для опису електронів у металах? Проілюструвати пояснення.
2. Що називається рівнем Фермі?
3. Що таке потенційний бар'єр?
4. Написати рівняння Річардсона - Дешмана.
5. Що таке термоелектронна емісія?
6. Що таке робота виходу електрона? Одиниці її виміру.
7. У чому полягає метод прямої Річардсона, які його недоліки?
8. Який спосіб визначення температури катода?
9. Від чого залежить довговічність катода?

## Лабораторна робота № 2

### Дослідження емісії оксидного катода за допомогою методу Фаунда

*Мета роботи* – визначення константи рівняння Тягунова з використанням методу Фаунда для знаходження струму емісії оксидного катода.

Поряд з металевими катодами, робота виходу для яких досить висока (від 3 еВ до 5 еВ), широкого застосування набули катоди з меншою роботою виходу торійовані (2,5 еВ) і оксидні (від 1 еВ до 1,2 еВ).

Оксидні катоди мають такі переваги у порівнянні з вольфрамовими:

- 1) Менша робота виходу.
- 2) Більш висока ефективність (струм емісії на одиницю споживаної катодом потужності).
- 3) Робоча температура оксидного катода 1000 – 1100 К, тоді як у вольфрамового – 2500 К.
- 4) Густина струму емісії оксидного катода при робочій температурі складає 5000 А/м<sup>2</sup>, у вольфрамового – всього 3000 А/м<sup>2</sup>.

Густину струму термоелектронної емісії оксидного катода визначають за рівнянням Тягунова:

$$j_0 = B \sqrt{n_{\text{ва}}} \cdot T^{\frac{5}{4}} e^{\frac{-\chi_{\text{в}} - \frac{\theta}{2}}{kT}},$$

де  $B$  – стала рівняння Річардсона - Дешмана;

$n_{\text{ва}}$  – концентрація домішкових атомів;

$\chi_{\text{в}}$  – зовнішня робота виходу, рівна величині енергії, яку необхідно надати електрону, що знаходиться на дні зони провідності, щоб він залишив оксидний шар;

$\theta$  – внутрішня робота виходу, рівна за величиною енергії, необхідній електрону, щоб перейти з домішкового рівня на дно зони провідності.

Сума  $\chi_{\text{в}} + \theta/2 = \chi_0$  – ефективна робота виходу, тому рівняння Тягунова можна записати у вигляді:

$$j_0 = B' \cdot T^{\frac{5}{4}} e^{\frac{-\chi_0}{kT}}. \quad (2.1)$$

Теоретичний розрахунок константи  $B$  і роботи виходу  $\chi_0$  виявляється неможливим, і їх визначають експериментально.

Перенесемо в ліву частину співвідношення (2.1) член  $T^{5/4}$  і прологарифмуємо цей вираз, тоді:

$$\ln\left(\frac{j_0}{T^{5/4}}\right) = \ln B' - \frac{\chi_0}{kT}. \quad (2.2)$$

З виразу (2.2) видно, що залежність  $\ln(j_0/T^{5/4}) = f(1/T)$  повинна зображуватися прямою лінією (рис. 2.1). Пряма відтинає на вертикальній осі відрізок, рівний  $\ln B'$ , і нахилена під кутом  $\alpha$ , обумовленим відношенням:

$$\operatorname{tg} \alpha = \chi_0/k,$$

де  $k$  – стала Больцмана.

Таким чином, визначення термоелектронної емісії оксидного катода зводиться до виміру густини струму емісії катода при декількох значеннях температури і побудові прямої Річардсона.

Але при проведенні такого експерименту можуть виникнути труднощі з визначенням струму емісії оксидного катода, тому що при робочій температурі оксидний катод не дає насичення на вольт-амперній характеристиці з наступних причин:

1) поперечний опір оксида великий. При відбиранні струму на ньому відбувається спадання напруги і виділяється значна потужність, що призводить до додаткового нагрівання катода і росту струму емісії;

2) на струм емісії оксидного катода сильно впливає зовнішнє електричне поле, що призводить до росту струму емісії (ефект Шоттки).

У зв'язку із зазначеними труднощами на практиці струм емісії оксидного катода вимірюють методом незагартованих характеристик, у імпульсних режимах, і методом Фаунда, тобто методом нульового поля.

Метод Фаунда дозволяє усунути вплив зовнішнього електричного поля на емісію оксидного катода. Для цього між оксидним катодом і анодом поміщають додатковий електрод.

Якщо між катодом і анодом у двохелектродній лампі прикласти не дуже велику напругу, то при деякій температурі не всі емітовані електрони долетять до анода, і поблизу катода буде накопичуватися негативний просторовий заряд, що зменшує струм емісії. Розподіл потенціалу між катодом і анодом у цьому випадку має вигляд кривої (а) (рис. 2.2).

Уявимо собі, що запалили допоміжний розряд між додатковим електродом і анодом. Для цього досить нагріти додатковий електрод, пропустивши через нього струм. При цьому в просторі між додатковим електродом і анодом утвориться плазма, що і буде єдиним джерелом позитивних іонів, які спрямовуються до оксидного катода. (Напруга між оксидним катодом і анодом має бути менше потенціалу іонізації газу, тоді електрони, що йдуть від оксидного катода на анод, не зможуть іонізувати атоми газу).

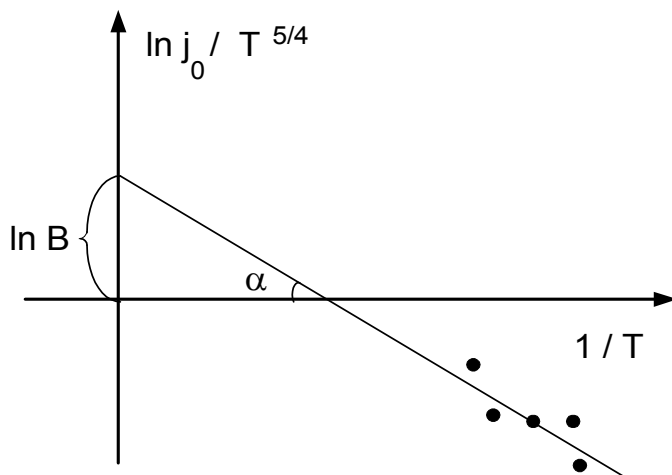


Рисунок 2.1 – Графік залежності

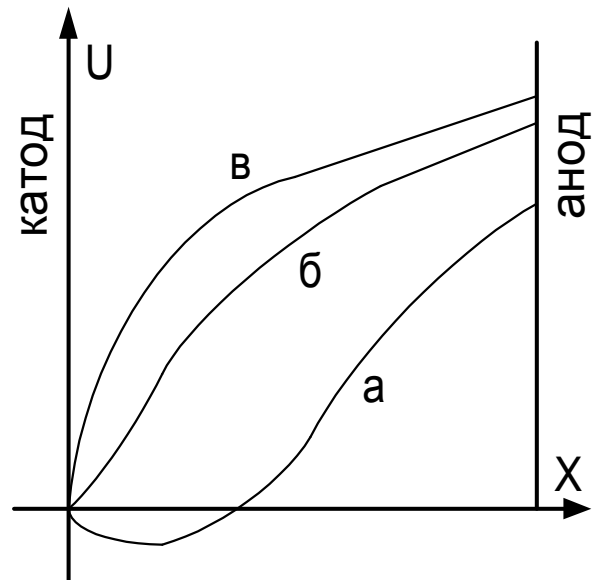


Рисунок 2.2 – Розподіл потенціалу між катодом і анодом

Концентрація іонів змінюється зі зміною струму допоміжного розряду. Позитивні іони, що підходять до оксидного катода, зменшують гальмуюче поле катода, і електронний струм між катодом і анодом зростатиме (ділянка 1 на рисунку 2.3.). При деякому значенні струму допоміжного розряду  $J_p$  гальмуюче поле в катода може стати рівним нулю, при цьому електрони, емітовані катодом, ідуть на анод. Це відповідає точці А (рисунок 2.3). За точкою перегину залежності струму емісії  $J_e$  від струму допоміжного розряду  $J_p$  можна визначити справжній струм емісії оксидного катода  $J_{e0}$ , необхідний для побудови прямої Річардсона. У цьому випадку розподіл потенціалу зображується кривою (б) (див. рис. 2.2).

При подальшому збільшенні струму допоміжного розряду в катода утворюється позитивний просторовий заряд, що призводить до росту струму емісії оксидного катода (ділянка II на кривій рисунку 2.3). Розподіл потенціалу за наявності позитивного просторового заряду показано кривою (в) (див. рис. 2.2).

### Опис експериментальної установки

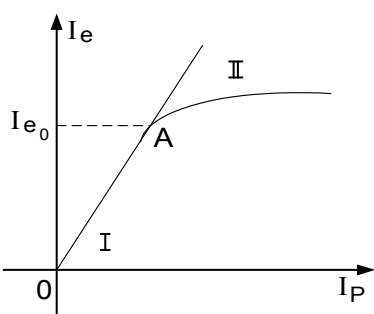


Рисунок 2.3 – Залежність струму емісії від струму допоміжного розряду



Рисунок 2.4 – Схема лампи з додатковим електродом



Для визначення емісії оксидного катода використовують експериментальну лампу з додатковим електродом, схема якої подана на рисунку 2.4.

Анод являє собою нікелевий циліндр висотою 3 і діаметром 2,5 см. У центрі анода знаходиться оксидний катод. Площа  $S$  робочої поверхні катода (з оксидним покриттям) складає  $4,7 \text{ см}^2$ . На відстані 6 мм від катода паралельно його осі вміщений додатковий електрод – вольфрамовий дріт діаметром 0,18 мм.

Для виконання експерименту необхідно зібрати електричну схему, як показано на рисунку 2.5.

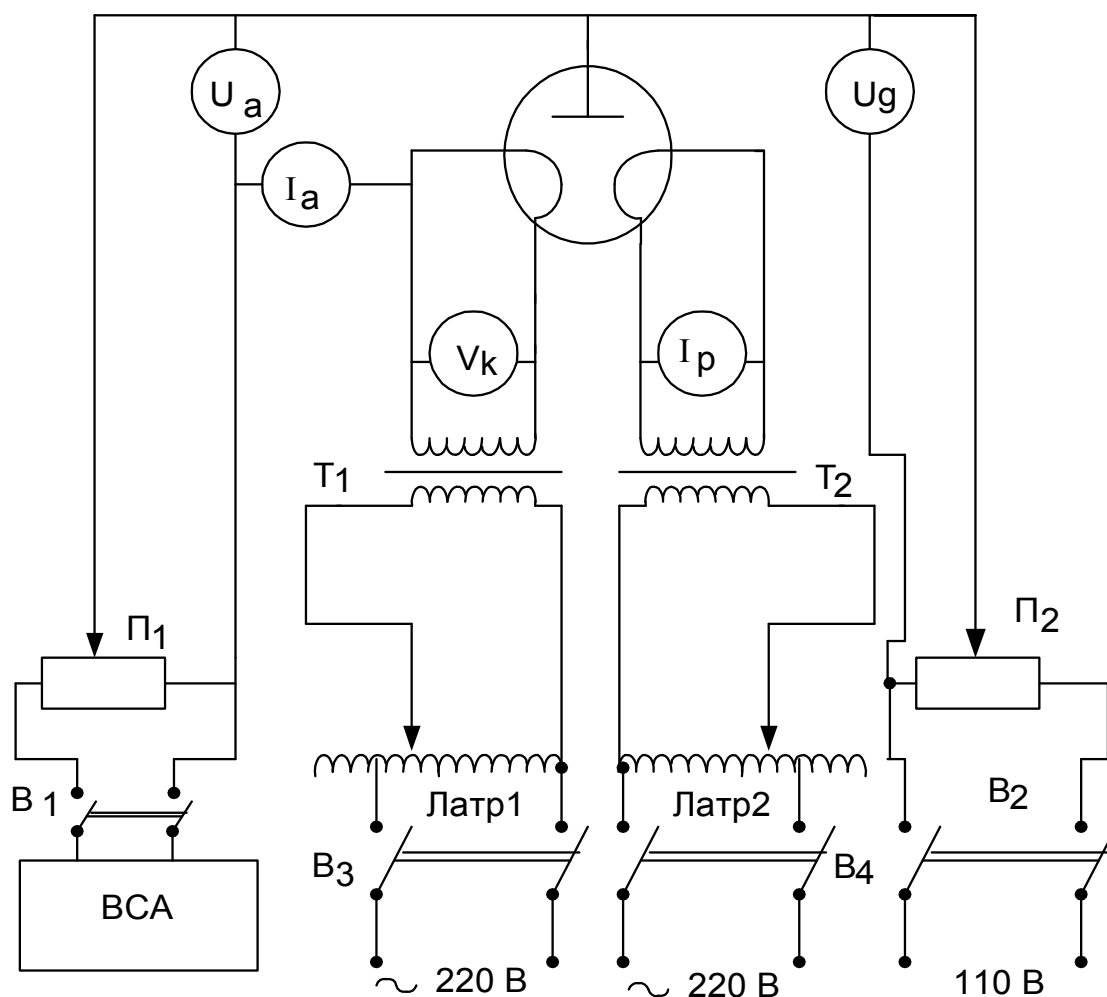


Рисунок 2.5 – Електрична схема

### Завдання

- 1) Зрисувати схему (рис. 2.5) і одержати дозвіл викладача на виконання вимірів.
- 2) Включити тумблер «РОЗЖАРЮВАННЯ КАТОДА» (B3).

3) За допомогою ЛАТРу 1 встановити задану викладачем напругу розжарювання оксидного катода (за вольтметром  $V_k$ ).

4) Включити анодну напругу тумблером  $B_1$  і за допомогою потенціометра П1 встановити анодну напругу  $U_a = 4,5$  В.

5) Включити тумблером  $B_2$  постійну напругу, що подається між додатковим електродом і анодом, і потенціометром П2 встановити значення  $U_g$ , задане викладачем.

6) Включити тумблер «РОЗЖАРЮВАННЯ ДОДАТКОВОГО ЕЛЕКТРОДА» ( $B_4$ ) і за допомогою ЛАТРу 2 змінювати розрядний струм  $J_p$  від 0 до 2,5 мА, записуючи значення струму емісії оксидного катода  $J_e$ .

7) Повторити зняття залежності струму емісії оксидного катода  $J_e$  від струму допоміжного розряду  $J_p$  для трьох-чотирьох різних напруг розжарювання катода (за вказівкою викладача).

8) За побудованими залежностями  $J_e = f(J_p)$  знайти значення  $J_{e0}$  струму емісії оксидного катода (див. рис.2.3).

9) Визначити густину струму емісії оксидного катода  $j_e = J_e/S$ , де  $S$  - площа робочої поверхні оксидного катода.

10) За графіком залежності температури оксидного катода від напруги розжарювання знайти значення температур катода.

11) За отриманим значенням  $J_{e0}$ , і  $T$  побудувати пряму Річардсона (див. рис.2.1).

12) Знайти значення роботи виходу оксидного катода  $\chi_0$  за формулою (2.3) і сталої  $B'$  (див.рис.2.1). Виконати графіки на міліметровому папері.

### Контрольні запитання

1. Які переваги оксидних катодів?
2. Яка мета роботи?
3. Які залежності необхідно визначити в роботі?
4. Які методи використовують для дослідження оксидних катодів?
5. Яка сутність методу Фаунда?
6. Яка сутність методу недозагартованих характеристик?
7. Яка сутність імпульсного методу?
8. Рівняння Тягунова, його аналіз.
9. Чому важко визначити струм насичення оксидного катода?
10. Розходження торійованих і оксидних катодів.
11. Технологія приготування торійованих катодів.
12. Технологія приготування оксидних катодів.
13. Оксидні катоди прямого і непрямого розжарювання.
14. Метод прямої Річардсона для визначення констант рівняння Тягунова.
15. Вплив електричного поля на емісію металевих і оксидних катодів.
16. Власна і домішкова провідність напівпровідників.
17. Зовнішня і внутрішня робота виходу оксидного катода.

## Лабораторна робота № 3

### Визначення роботи виходу електрона

*Мета роботи* – експериментально визначити роботу виходу електрона з металу методом компенсації охолодження металу.

Електронний газ утримується в металі полем позитивних іонів кристалічної ґратки.

Потенційна енергія електрона в цьому полі менше потенційної енергії електрона поза кристалом, тому для видалення його за межі металу необхідно виконати роботу.

Можна вважати, що електрони металу знаходяться в потенційній ямі, розміри якої відповідають розмірам тіла. Якщо вважати енергію електронів у металі негативною, а поза металом - позитивною, то вищезгадане можна проілюструвати діаграмою розподілу енергії електронів на границі метал-вакуум (рисунок 3.1).

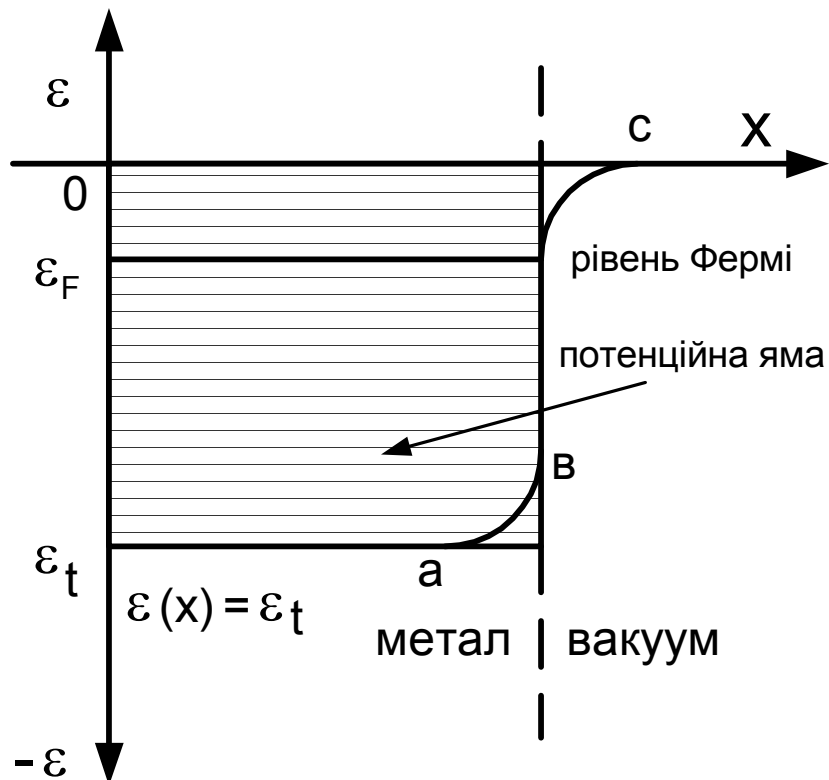


Рисунок 3.1 – Діаграма розподілу енергії електронів на границі метал-вакуум

На відстані, більшій  $10^{-4}$  мм від границі метал-вакуум (в області ліворуч від точки  $a$ ), електрони мають найменшу енергію  $\varepsilon_t$ . Відстань  $10^{-4}$  мм у тисячу разів більше міжатомної. З наближенням до поверхні набуває ефективності вплив неоднорідності поверхні металу, тому енергія електрона збільшується аж до виходу його з металу у вакуум (точка  $b$ ). Однак на відстані  $\sim 10^{-4}$  мм від

поверхні металу (область між точками  $b$  і  $c$ ) електрон ще не є вільним, через те що метал ще впливає на нього. І тільки на відстані, що перебільшує  $10^{-4}$  мм від поверхні металу (область правіше точки  $C$ ), електрон можна вважати остаточно вільним.

Для вилучення з об'єму металу електрона з найменшою кінетичною енергією, розташованого на «дні» потенційної ями, необхідно виконати роботу по подоланню потенційного бар'єра  $\varepsilon_t$ , яку називають повною роботою виходу.

У металах вже при абсолютному нулі температур електрони заповнюють всі енергетичні рівні від «дна» потенційної ями до рівня Фермі  $\varepsilon_F$ . Для просунення електрона з енергією  $\varepsilon_F$  на відстань, де вплив металу на нього зневажливо малий, потрібно виконати роботу  $\varepsilon_0 = \varepsilon_t - \varepsilon_F$ , що називається просто роботою виходу.

З потенційної ями можуть вилучатись електрони з енергіями як більше, так і менше ферміївської. Однак тільки при вилученні електронів з рівня Фермі не порушується термодинамічна рівновага металу.

Для визначення роботи виходу електрона існує декілька методів. Один з них – метод компенсації охолодження металу, який також називають калориметричним методом визначення роботи виходу електрона.

### **Калориметричний метод визначення роботи виходу електрона**

В основі калориметричного методу визначення роботи виходу електрона припускається, що емітовані металом електрони несуть із собою деяку частину енергії подібно до звичайного молекулярному випару речовини. При випаровуванні речовина охолоджується, тому катод, що випромінює електрони, повинен у результаті трохи прохолоннути. Часто енергія, що уноситься електроном, складає роботу виходу  $\varepsilon_0$ ,

У роботі використовують лампу-діод прямого розжарювання з вольфрамовим катодом (рисунок 3.2).

При нагріванні катода струмом розжарювання до визначеної температури виникає термоелектронна емісія. Число електронів, що залишають катод, і число електронів, що повертаються на катод з області просторового заряду, буде рівним.

При замкнутому ключі  $K_d$  рівновагу буде порушено, тому що найбільш швидкі електрони, що залишають катод, досягнуть анода і створять струм у ланцюзі. У результаті відбудеться зниження температури катода.

Кожний швидкий електрон несе енергію, рівну роботі виходу  $\varepsilon_0$  плюс кінетичну енергію. Поза металом електрони описуються статистикою Максвелла – Больцмана, тому середня енергія найбільш швидких електронів дорівнює  $2kT$ , де  $T$  – різниця між температурою катода  $T_k$  і температурою проводу  $T_0$ , по якому електрони повертаються на катод;  $k$  – стала Больцмана.

Якщо струм, що протікає в анодному ланцюзі  $J_a$ , то число електронів, що залишають катод і досягають анод в одиницю часу, дорівнює  $J_a/e$ .

Отже, потужність, що виноситься з катода дорівнює:

$$\Delta P = \frac{I_a}{e} [\varepsilon_0 + 2k(T_k - T_0)]. \quad (3.1)$$

У результаті втрати потужності температура катода знизиться. Калориметричний метод полягає у вирівнюванні температури катода до початкової шляхом збільшення струму розжарювання на  $\Delta I_H$ . У цьому випадку потужність, що споживається катодом, зростає на:

$$\Delta P' = (I_H + \Delta I_H)^2 R - I_H^2 R. \quad (3.2)$$

Нехтуючи членом  $R \Delta I_H^2$ , одержимо

$$\Delta P' = 2 \cdot R \cdot I_H \cdot \Delta I_H, \quad (3.3)$$

де  $R$  - опір нагрітого катода.

Щоб температура катода досягла початкової, необхідно, щоб  $\Delta P = \Delta P'$ . Таким чином:

$$\frac{I_a}{e} [\varepsilon_0 + 2k(T_k - T_0)] = 2 \cdot R \cdot I_H \cdot \Delta I_H. \quad (3.4)$$

Звідси одержимо вираз для визначення роботи виходу електрона:

$$\varepsilon_0 = \frac{2 \cdot R \cdot I_H \cdot \Delta I_H \cdot e}{I_a} - 2k(T_k - T_0). \quad (3.5)$$

### Експериментальна установка і схема вимірювання

Щоб розрахувати значення роботи виходу електрона з металу катода, необхідно, як випливає з виразу 3.5, знати значення опору нагрітого катода, струм розжарювання  $I_H$  і збільшення струму розжарювання  $\Delta I_H$ , потрібне для компенсації охолодження нитки при встановленні в ланцюзі анодного струму  $J_a$ .

Оскільки другий доданок у виразі 3.5 у 10-20 разів менше першого, то неточність у визначенні температури вносить незначну помилку в результат і різницю температур досить знати приблизно. Вважатимемо, що  $T_k - T_0 = 700$  К.

Значення  $\Delta I_H$  і  $J_a$  треба знати точно, тому в роботі застосовується спеціальна методика, що ґрунтується на використанні моста Уїтстона.

Схема вимірювання приведена на рисунку 3.3, де видно, що в одне плече моста Уїтстона включено нитку розжарювання (катод) лампи, опір якої у нагрітому стані  $R$ , в друге плече підключено магазин опорів  $R_M$ , у третє і четверте плечі моста включені точно відомі опори  $R_1 = 10$  Ом;  $R_2 = 1000$  Ом.

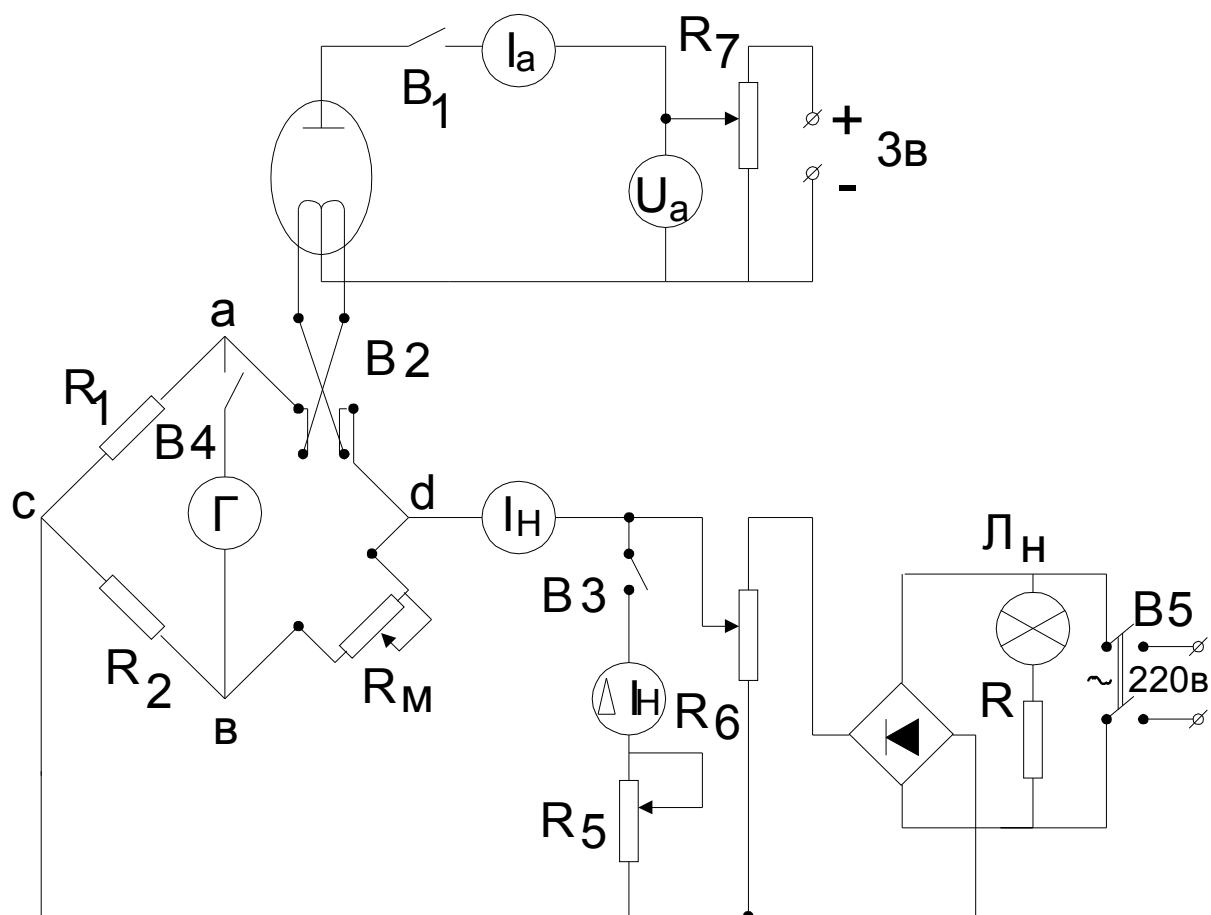


Рисунок 3.3 – Схема вимірювання

У мосту Уїтстона опоры пліч можна підібрати так, що в однієї з діагоналей (ab) різниця потенціалів дорівнюватиме нулю, тобто включений у цю діагональ чутливий гальванометр показуватиме відсутність струму, тоді як до іншої діагоналі (cd) підключена різниця потенціалів. У цьому випадку міст Уїтстона зрівноважений.

Використовуючи цю властивість, одержимо, що при проходженні струму, що нагріває нитку розжарювання лампи, міст буде зрівноважений, тобто стрілка гальванометра Г при замкнутій кнопці V4 буде на нулі, якщо:

$$R = \frac{R_1}{R_2} R_M. \quad (3.6)$$

При замкнутому ключі V1 в анодному ланцюзі протікає струм  $J_a$ , що відповідає заданому струму розжарювання  $J_H$ . Коли ключ V1 розімкнутий, електрони не відбираються від катода і його температура зростає. Отже збільшиться опір нитки розжарювання і порушиться рівновага моста.

Для зменшення опоры нитки розжарювання треба зменшити струм розжарювання на величину  $\Delta J_H$ . Це відбудеться, якщо замкнути ключ V3 і реостат R5 зрівноважити міст Уїтстона. Струм у ланцюзі R5 стане рівним  $\Delta J_H$ .

При протіканні анодного струму на катоді виникає додаткове падіння напруги, не зв'язане із струмом розжарювання, що вносить помилку у визначення рівноваги моста. Для запобігання цієї помилки використовується лампа з відводом від середини нитки. Змінюючи перемикачем У2 напрямок струму розжарювання, будемо змінювати знак помилки, а роботу виходу визначимо як середнє значення результатів, отриманих при різних напрямках струму розжарювання.

Щоб опір струму розжарювання практично не змінювався, опір R5 повинен бути значно більше, ніж  $R_1 + R$ .

### Порядок проведення роботи

- 1) Ознайомитися із схемою рисунку 3.2 і лабораторним стендом.
- 2) Повернути ручки потенціометрів R5 і R6 проти годинникової стрілки до упору, а в магазині опорів  $R_M$  включити опір, рівний 5000 Ом.
- 3) Встановити перемикач В2 у нижнє положення.
- 4) Включити ключ В5, переконатися, що світиться індикаторна лампа ЛН, і ручкою опору встановити струм  $J_H$ , заданий викладачем.
- 5) Підключити анодну напругу +3 В і встановити потенціометром R7 задане викладачем значення  $U_a$ .
- 6) Включити ключ В1.
- 7) Натиснувши кнопку В4, шляхом підбору опору магазину  $R_M \geq 5000$  Ом, встановити стрілку гальванометра на нуль шкали. Записати підібране значення  $R_M$ .
- 8) Після встановлення рівноваги моста знайти значення  $J_a$  і  $J_H$ .
- 9) Відключити ключ У1. При цьому рівновага моста порушиться.
- 10) Включити кнопку В4 і ключ У3; обертаючи ручку реостата R5 зрівноважити мост. Знайти значення  $\Delta J_H$ . Результати вимірів занести в таблицю.
- 11) За формулами (3.5) – (3.6) розрахувати значення R і  $\epsilon_0$  відповідно.
- 12) Перевести перемикач В2 у верхнє положення і повторити виміри за п.6-11. Потім знайти середнє значення  $\epsilon_0$ .
- 13) Установити ручкою R6 інше значення  $J_H$ , задане викладачем, і повторити виміри, починаючи з п.6.
- 14) За отриманими середніми значеннями  $\epsilon_0$  визначити середнє значення  $\overline{\epsilon_0}$ . Усі результати звести у таблицю.

### Методичні рекомендації

При виконанні вимірів треба стежити, щоб у магазині опорів завжди був включений опір  $R_M$  4000 Ом, а ручка потенціометра R5 перед початком вимірів завжди була виведена проти годинникової стрілки до упору, тому що в іншому випадку може зіпсуватись прилад для виміру  $\Delta J_H$ .

## Контрольні запитання

1. Які вигляди емісії існують?
2. Як змінюється енергетичний потенціал в області границі метал - вакуум?
3. Як залежить струм термоелектронної емісії від температури катода?
4. У чому полягає метод компенсації охолодження нитки розжарювання?
5. Вивести основні розрахункові формули.
6. Для чого роблять відведення від середини нитки розжарювання в експериментальній лампі?
7. Показати, чому дорівнює середня кінетична енергія швидких електронів.
8. Що таке міст Уїтстона?
9. Що значить зрівноважити міст Уїтстона?
10. Які існують методи виміру роботи виходу електрона з металів?
11. Пояснить роботу експериментальної схеми.
12. Які фактори впливають на точність визначення роботи виходу?
13. Як досягається зрівноважування температури катода?

## Лабораторна робота № 4

### Дослідження тліючого розряду

*Мета роботи* - вивчити закономірності тліючого розряду; з'ясувати залежність ступеня покриття катода тліючим світінням від сили розрядного струму; експериментально перевірити закон подібності.

Електричні розряди в газі розділяються на несамотійні й самотійні.

*Несамостійним* називається електричний розряд, що вимагає для його підтримки емісії електронів з катода чи утворення заряджених часток у розрядному проміжку під дією зовнішніх факторів (таких, як нагрівання або опромінювання катода чи газу в розрядному проміжку світлом, рентгенівським чи реактивним випромінюванням тощо).

*Самостійним* розрядом називається електричний розряд, що не вимагає для його підтримки дії зовнішніх факторів. При самотійному розряді генерація зарядів і їх рух у розрядному проміжку здійснюються виключно за рахунок електричного поля, що діє між електродами - катодом і анодом.

До самотійних розрядів відносять тліючий, дуговий, іскровий, коронний та ін.

Тліючий розряд спостерігається в газах при порівняно низьких тисках (від 1,33 Па до 1330 Па) і великих напруженостях електричного поля (порядку декількох десятків тисяч вольт на метр). Розряд супроводжується світінням газу, неоднаковим за яскравістю на різних ділянках довжини розрядної лампи.



На рисунку 4.1 (а) схематично показано світлову картину розряду між катодом і анодом. Розряд підрозділяється на вісім областей: 1 – Астонів темний простір; 2 – перше катодне світіння; 3 – темний (Круксовий) катодний простір; 4 – катодне тліюче світіння; 5 – Фарадеїв темний простір; 6 – позитивний стовп; 7 – анодний темний простір; 8 – анодне світіння.

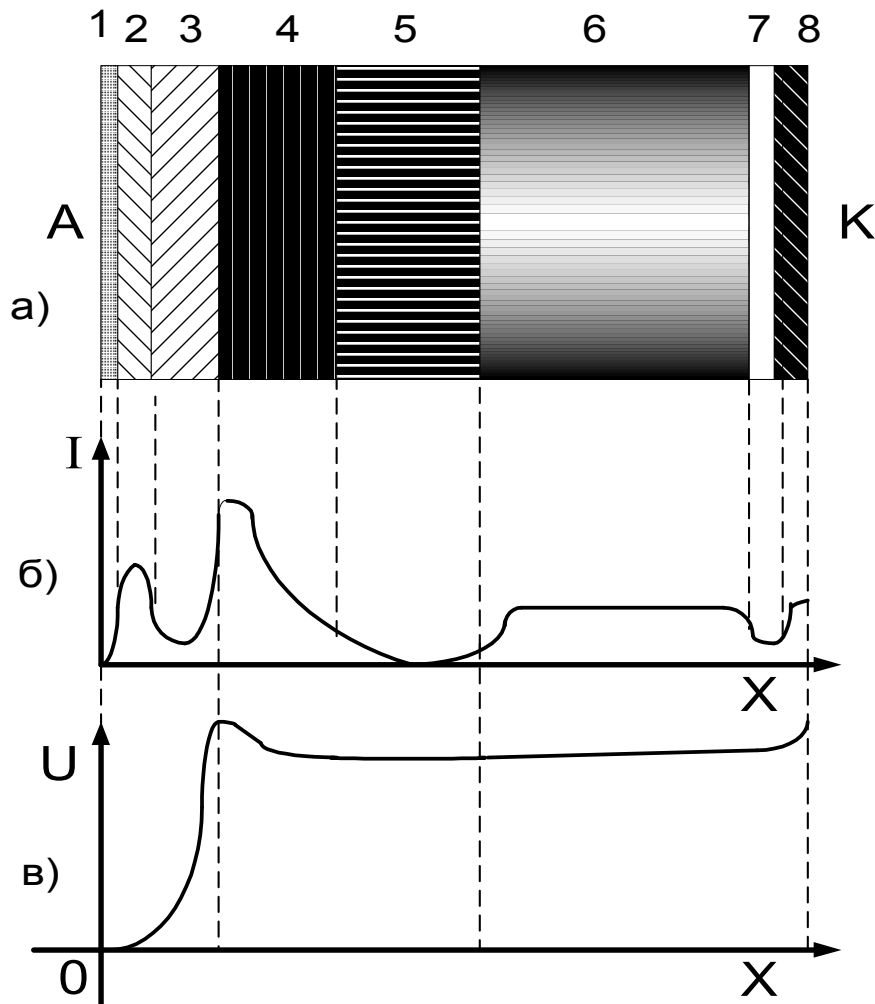


Рисунок 4.1 – Графіки залежності : а – схема світлової картини розряду між катодом і анодом; б – крива інтенсивності світіння різних областей розряду; в – крива розподілу потенціалу між електродами

Для тліючого розряду характерним є те, що при зменшенні відстані між електродами зменшується лише довжина позитивного стовпа. Катодні області при цьому не змінюються, анодні ж можуть зникнути зовсім.

На рисунку 4.1 (б) зображена крива інтенсивності світіння різних областей розряду. Найбільш яскрава область - область катодного тліючого світіння.

Для усвідомлення процесу виникнення описаних темних і світлих прошарків газу в розряді розглядають криву розподілу потенціалу між електродами, зображену на рисунку 4.1 (в). Характерним для вказаної залежності  $U(x)$  є велике падіння потенціалу біля катода (майже все падіння потенціалу приходить на 1-3 області розряду). Це пояснюється особливістю розподілу просторового заряду в тліючому розряді. Внаслідок різної рухливості

іонів і електронів у катода концентрація іонів значно переважає концентрацію електронів. Через це поблизу катода виникає сильний просторовий позитивний заряд, що і викликає появу катодного падіння потенціалу.

Одна з закономірностей тліючого розряду була вперше сформульована Гелем. За *законом Геля* поверхня катода, покрита світінням, пропорційна силі струму. Цей закон справедливий для невеликих сил струму, коли катод не повністю покритий світінням. При цьому, як показує досвід, значення катодного падіння потенціалу і густина струму розряду  $j$  не залежать від сили струму і є незмінними.

Режим тліючого розряду, при якому падіння потенціалу і густина струму залишаються незмінними, називається нормальним.

Коли при збільшенні сили струму вся поверхня катода покривається світінням, катодне падіння і густина струму розряду зростають. Такий режим тліючого розряду називають аномальним. Ця властивість катодного падіння потенціалу залишатися постійним при зміні струму в межах, що не призводять до переходу нормального тліючого розряду в аномальний, використовується в електронних стабілізаторах напруги (стабілівольт).

Важливою характеристикою тліючого розряду, як і будь-якого іншого самостійного розряду, є напруга запалювання. Як показує експеримент, напруга запалювання  $U_z$  залежить від добутку тиску  $p$  на відстань між електродами  $d$ :  $U_z = f(pd)$ . Ця залежність, названа *законом Пашена*, представлена на рисунку 4.2: 1 – для повітря; 2 – для неону.

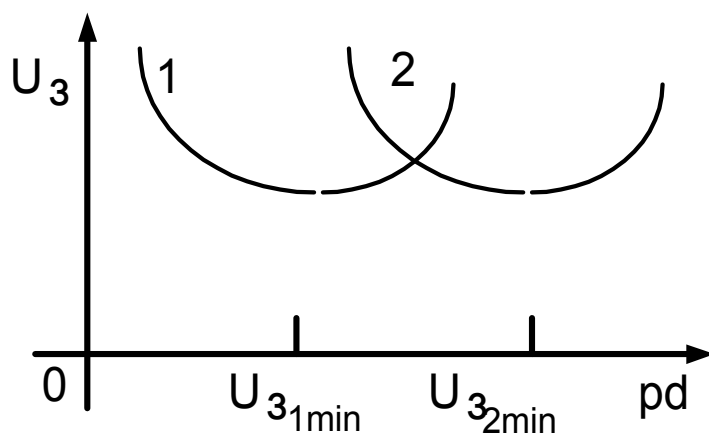


Рисунок 4.2 – Залежність напруги запалювання від добутку тиску на відстань між електродами

Існує зв'язок, описуваний законом подібності: якщо в двох розрядних трубках з плоскими електродами і однаковим газом добутки тиску газу на відстань між електродами рівні, то і напруга запалювання в цих трубках буде одна й та ж, хоча значення  $p$  і  $d$  у них можуть розрізнятися.

Як видно з показаних залежностей, для кожного газу існує свій оптимальний добуток  $pd$ , що відповідає мінімальному значенню  $U_z$ .

На значення  $U_z$  впливає робота виходу катода і домішковий склад газу трубки.

## Прилади і схема вимірів

Експерименти проводять на високовольтній випрямній установці напругою до 800 В, тому **КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ** робити які-небудь переключення в схемі при включеному вимикачеві В2 і наявності напруги.

Високовольтна установка рисунок 4.3 складається з підвищувального трансформатора Т1, напівпровідникового випрямляча, згладжувального фільтра, що складається з дроселя Др і конденсатора С. Через вимикач В1 напруга подається на ЛАТР, за допомогою якого регулюється випрямлена напруга.

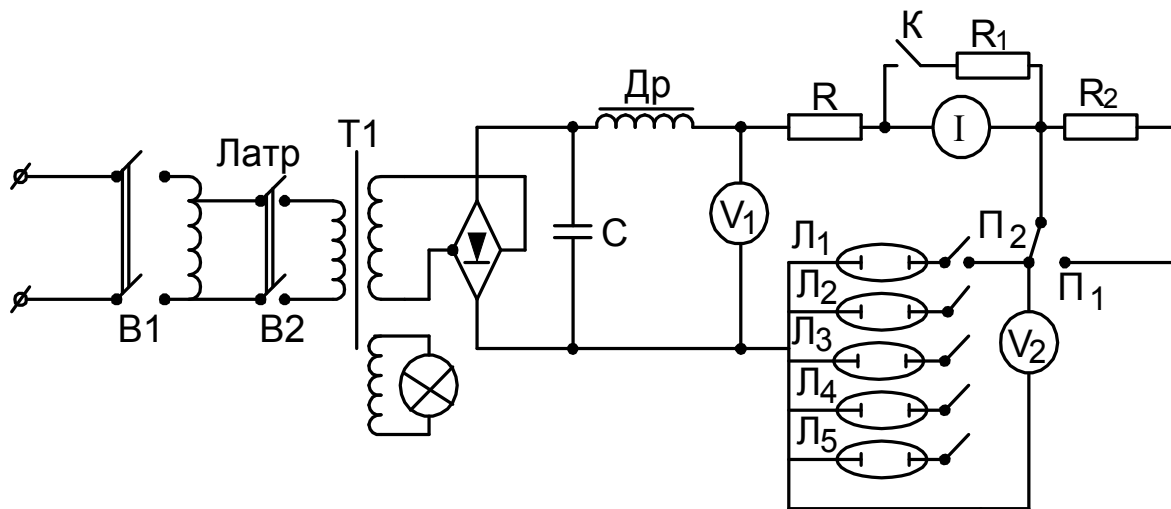


Рисунок 4.3 – Схема високовольтної установки

Вимикач В2 подає напругу на високовольтний трансформатор. Напругу на виході вирівнювача вимірюють вольтметром  $V_1$ .

Дослідження ( $\Pi_1$ ) виконують на двох розрядних лампах  $Л_1$  і  $Л_2$ , заповнених аргеном до тиску 665 і 1330 Па. Катоди розрядних трубок нікелеві і мають на своїй поверхні риски, нанесені на відстані 5 мм одна від одної, що дозволяє виміряти площу, покриту світінням. Анодом служить рамка з нікелевого дроту.

Напругу між електродами розрядної трубки контролюється вольтметром  $V_2$ , струм, що проходить через розрядну трубку, міліамперметром.

Переключення розрядних трубок виконується установкою у відповідне гніздо штекера  $\Pi_2$ .

Дослідження залежності спаду напруги на розряді від відстані між електродами, а також визначення градієнта потенціалу в позитивному стовпі розряду і напруги запалення розряду проводиться на трубках тліючого розряду  $Л_3$ ,  $Л_4$  та  $Л_5$ , які мають різні довжини і тиск наповнюючого газу.

## Завдання

1) Зняти для розрядних ламп  $L_1$  і  $L_2$  залежності площі катода, покритої світінням, і падіння напруги від сили розрядного струму. Простежити вплив тиску наповнюючого газу на ці залежності. Перевірити, чи відповідають отримані експериментальні дані закону Геля. Побудувати графіки залежності густини струму на катоді і спадання напруги від сили розрядного струму.

2) Для розрядних трубок  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$  зняти залежність напруги запалювання  $U_3$  від відстані між електродами і тиску наповнюючого газу.

## Рекомендації до проведення експерименту

*Перевірка закону Геля.* Переконавшись у відсутності напруги на виході вирівнювача (показання вольтметра  $V_1$ ), включити штекер  $П2$  у гніздо розрядної трубки  $L_2$  (див.рис.4.3). Перемикач  $П1$  встановити в положення мінімальної випрямленої напруги. Вимикачем  $B_1$  подати напругу на ЛАТР. Вимикачем  $B_2$  подати напругу на блок вирівнювача. Діючи рукояткою ЛАТРа, збільшити напругу на розряді. Записати покази міліамперметра, вольтметра і значення площі катода, покритої світінням. Змінюючи ЛАТРОм струм у розрядній трубці через 2 мА, вимірювати відповідні кожному струму площі тліючого світіння на катоді і спадання напруги на розрядній трубці. Виміри продовжувати до повного покриття катода світінням. Закінчивши виміри, включити вирівнювач, переконавшись у нульовому положенні вольтметра, і тільки тоді робити переключення схеми на розрядник. Дані вимірів занести в таблиці 4.1.

Для розрядних трубок  $L_3$ ,  $L_4$ ,  $L_5$  виміряти спад напруги на розряді, а також градієнт потенціалу в позитивному стовпі розряду  $\varepsilon = (dU/dl)$ , і проаналізувати залежність цих параметрів від відстані між електродами  $d$  та від тиску газу  $P_2$ . Заміряти напругу запалення розряду і проаналізувати залежності  $U_\gamma$  від  $P_2 \cdot d$ . Дані вимірів занести до таблиці 4.2.

## Вимоги до протоколу

*Протокол, що подається студентом, повинен містити:*

- 1) Дату проведення експерименту;
- 2) Завдання по роботі;
- 3) Опис і креслення застосованої апаратури і схеми вимірів;
- 4) Таблиці і графіки результатів вимірів;
- 5) Висновки за отриманими результатами.

Таблиця 4.1 – Результати перевірки закону Геля

	$L_1(P_2 = \quad)$	$L_2(P_2 = \quad)$
$I_p, \text{мА}$		
$A, \text{см}^2$		
$J, (\text{мА}/\text{см}^2)$		
$U_2, \text{В}$		

Таблиця 4.2 – Перевірка закону Пашена

№ лампи	$P_2, \text{мм.рт.ст}$	$D, \text{см}$	$U_3, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$\varepsilon = (dU_2/dl),$ $\text{В}/\text{см}$
$L_1$					
$L_2$					
$L_3$					

### Контрольні запитання

1. Яка мета роботи?
2. Самостійний і несамостійний розряди?
3. Умови виникнення розряду?
4. Режим тліючого розряду?
5. Характерні риси тліючого розряду?
6. Області світіння в тліючому розряді?
7. Розподіл потенціалу між електродами в тліючому розряді та інтенсивності світіння між електродами?
8. Закон Геля?
9. Закон Пашена?
10. Закон подібності?

### Лабораторна робота № 5

#### Дослідження дугового розряду

*Мета роботи* – вивчення дугового розряду в парах ртутно-кварцової лампи типу ДРЛ-250 і дослідження її характеристик.

Якщо на холодні електроди (анод і катод) розрядної лампи, наповненої газом, подати відповідно до схеми (рис. 5.1) постійну напругу, то в лампі виникне електричний розряд, характер якого залежить від величини протікаючого струму.

Величина струму, що протікає в розрядному проміжку (анод – катод), залежить від значення баластового опору  $R$ . Зменшення цього опору приводить до зростання сили струму розряду (ділянка **d-e** на рисунку 5.2).

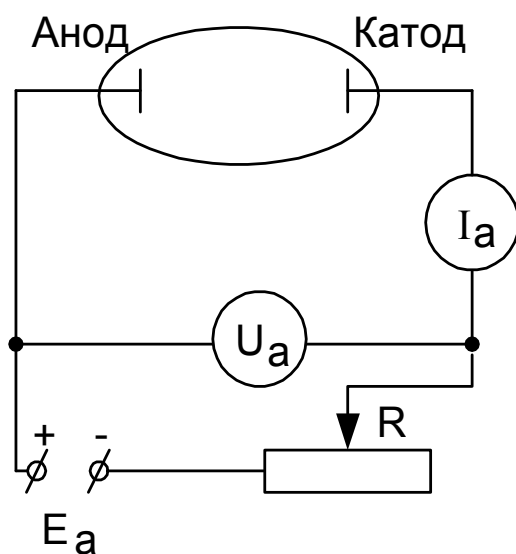


Рисунок 5.1 – Електрична схема з розрядною лампою

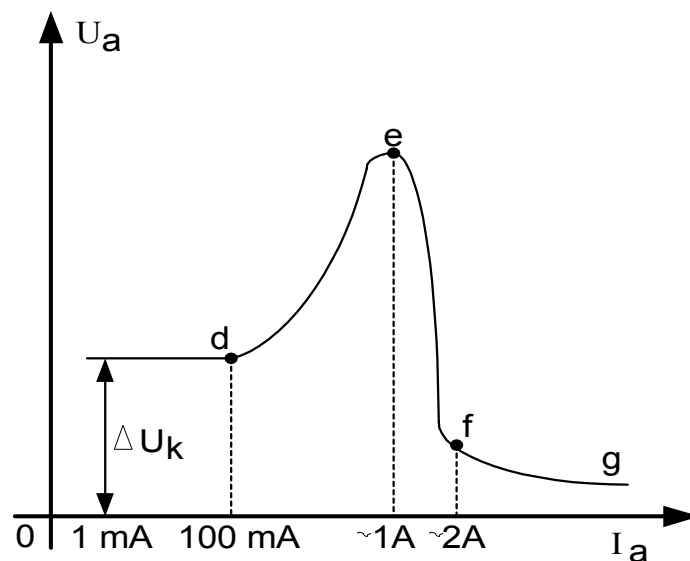


Рисунок 5.2 – Залежність величини струму від баластового опору

При певному значенні струму ( $\sim 1\text{A}$ ), що залежить від форми катода, матеріалу, з якого він виготовлений, тиску газу, аномальний тліючий розряд (ділянка d-e на рис. 5.2) переходить у самостійний дуговий розряд (ділянка f-g). Ділянка e-f на рисунку 5.2 із спадаючою вольт-амперною характеристикою відповідає перехідним процесам. Коли струм розряду досягає значення порядку  $1\text{A}$ , відбувається розігрів певної області на катоді, викликаний посиленням бомбардування катода іонами газу. Найбільш нагріта область на поверхні катода, з якої відбувається термоелектронна емісія, називається катодною плямою. Інтенсивне випускнення електронів з області катодної плями призводить до того, що переважною стає термоелектронна емісія, а не  $\gamma$ -процеси. У результаті цього електричний розряд з аномального тліючого перетворюється в самостійний дуговий. Повне падіння напруги на розрядному проміжку складається із суми катодного падіння, падіння напруги на позитивному стовпі дуги і падіння в прианодній області. На рисунку 5.3 наведено розподіл потенціалу між електродами лампи при дуговому розряді. Безпосередньо перед катодом спостерігається катодне падіння потенціалу. На відміну від тліючого розряду довжина катодного падіння при дуговому розряді дорівнює величині середньої довжини вільного пробігу електрона. Величина катодного падіння  $\Delta U_k$  приблизно дорівнює потенціалу іонізації  $U_i$  газу, в якому спостерігається розряд, що значно менше, ніж при тліючому розряді.

Майже весь розрядний проміжок займає позитивний стовп дугового розряду. Однак падіння напруги на ньому незначне. На відміну від тліючого розряду тут більше густина струму.

Дуговий розряд існує як при низькому ( $\sim 100$  Па), так і при високому ( $\sim 10^5$  Па) і надвисокому тисках. При дуговому розряді катод і анод нагріваються до високої температури. Залежно від температури, форми і матеріалу анода і прианодної області може спостерігатися як збільшення падіння напруги (позитивне анодне спадання напруги), так і зменшення (негативне анодне падіння напруги). Однак прианодне падіння напруги може бути відсутнім (горизонтальна ділянка на рисунку 5.3).

Від температури катода сильно залежить густина струму емісії. Тому, змінюючи величину відводу тепла від розрядної лампи, можна змінювати величину номінального струму, тобто при додатковому охолодженні лампи можна значно підвищити допустимий струм розряду.

Баластовий опір  $R$  (див. рис. 5.1) обмежує значення струму розряду, підтримуваного зовнішнім джерелом ЕРС. При збільшенні баластового опору  $R$  і незмінному діючому значенні ЕРС зовнішнього джерела може настати момент, коли дуговий розряд не запалиться. Найбільше значення опору  $R$ , при якому дуговий розряд ще можливий, називають критичним  $R_{кр}$ . При цьому значення струму розряду буде найменшим  $J_a = J_{amin}$ . Якщо необмежено зменшувати значення опору баласту  $R$ , відбудеться таке збільшення розрядного струму, що приведе до пошкодження лампи. Номінальне значення баластового опору, що визначає величину робочого струму лампи, розраховують на основі балансу теплової енергії на катоді.

Залежність між падінням напруги на лампі, струмом розряду, значенням баластового опору і діючою ЕРС називають навантажувальною характеристикою лампи. Вона виражається рівнянням

$$U_a = E_a - J_a \cdot R. \quad (5.1)$$

Графічно це є рівняння прямої лінії з негативним нахилом (рис.5.4, 5.5).

Якщо пряма навантажувальної характеристики перетинає статистичну характеристику, то точка перетину показує величину можливого струму в даному ланцюзі. При значенні баластового опору  $R_1$  дуговий розряд не спостерігається.

Збільшення розрядного струму призводить до того, що падіння напруги на позитивному стовпі зменшується, тому що зростає його провідність. Тому диференціальний опір дугового розряду є негативним, тобто  $dU/dI < 0$ .

Оскільки відношення  $dU/dI$  визначає тангенс кута нахилу дотичної до статичної вольт-амперної характеристики, то, обчислюючи тангенс кута нахилу дотичної до кожної точки статичної вольт-амперної характеристики (виконуючи графічне диференціювання), можна побудувати залежність динамічного опору розряду від анодного струму.

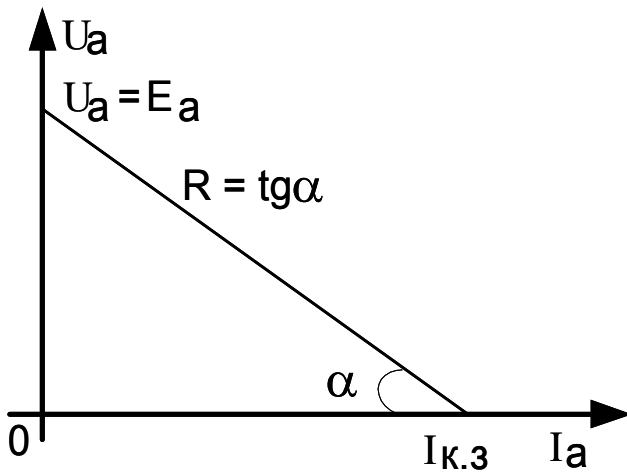


Рисунок 5.4 – Залежність між падінням напруги на лампі, струмом розряду

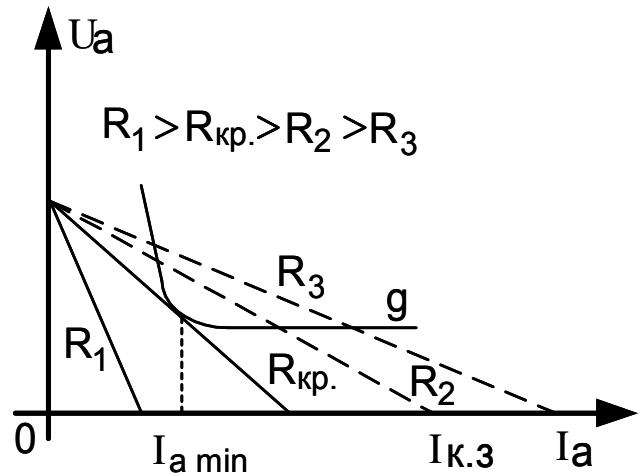


Рисунок 5.5 – Залежність між падінням напруги на лампі, струмом розряду, значенням баластового опору

Промислові дугові лампи працюють на змінному струмі з частотою 50 Гц. У цьому випадку електроди лампи називаються анодом і катодом умовно, тому що через половину періоду анод стає катодом, а катод - анодом.

Залежність миттєвих значень падіння напруги на електродах лампи від миттєвих значень розрядного струму називається динамічною характеристикою розряду. Динамічна характеристика дугового розряду різко відрізняється від статичної. Вигляд динамічної характеристики можна одержати на екрані осцилографа. Якщо подати на пластини У осцилографа напруги падіння потенціалу на лампі, а на пластини Х значення струму в цей момент, то за період одержимо динамічну вольт-амперну характеристику дугового розряду (рис.5.6).

З ростом напруги зростає розрядний струм і в момент часу, що відповідає точці А, відбувається запалювання дуги. Останнє призводить до збільшення струму розряду і падінню напруги на електродах лампи, хоч ЕРС зовнішнього джерела збільшується (рис.5.7). Коли ЕРС зовнішнього джерела починає зменшуватися, зменшується і струм розряду. У точці З дуга гасне.

Після переходу напруги через нуль роль катода починає виконувати колишній анод і картина повторюється при протилежних знаках струму і напруги. Вигляд динамічної характеристики сильно залежить від відстані між електродами, частоти живильного струму, значення баластового опору тощо.



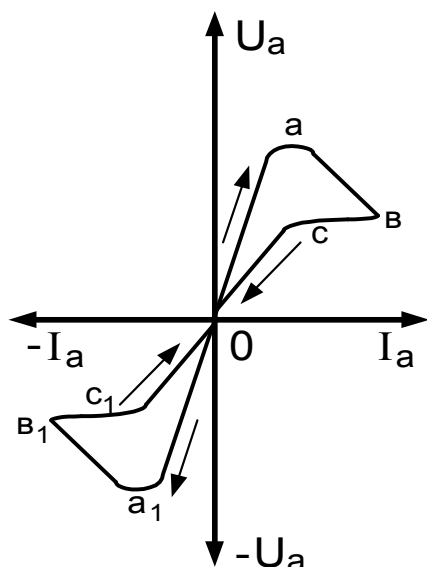


Рисунок 5.6 – Вольт-амперна характеристика дугового розряду

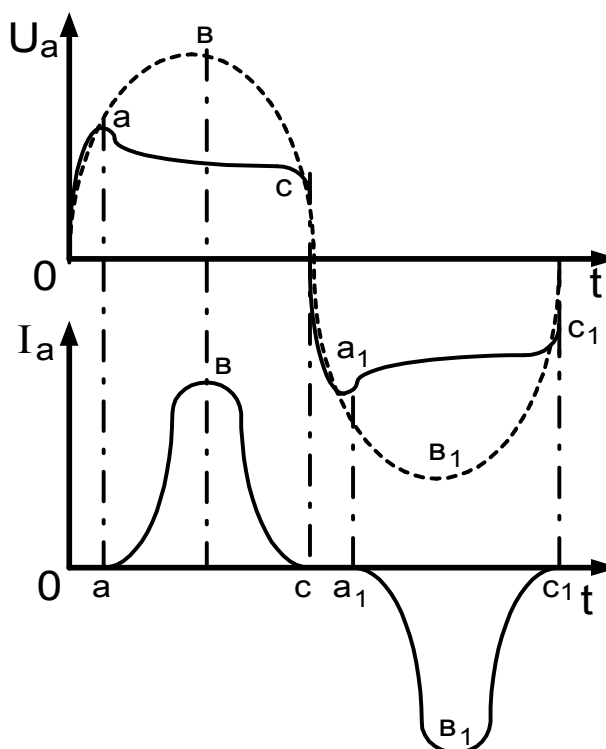


Рисунок 5.7 – Динамічна характеристика

### Експериментальна установка і схема виміру

Для дослідження дугового розряду використовується лампа ДРЛ-250, що включена в мережу змінного струму відповідно до схеми, яка наведена на рисунку **5.8 а)**, для дослідження динамічної характеристики  $U_a(t)$  – на рисунку **5.8 б)**;  $I_a(t)$  – на рисунку **5.8 в)**;  $N_a = f(I_a)$  – на рисунку **5.8 г)**.

Розряд відбувається в парах ртуті з добавкою аргону. Аргон необхідний для забезпечення запалювання розряду при початковій температурі катода, коли тиск пар ртуті малий.

Лампа має однакові електроди у вигляді вольфрамового стержня, обмотаного спіраллю з вольфрамового дроту. Електроди активізуються спеціальною обробкою, що забезпечує високу емісійну здатність при їх розігріванні у процесі горіння дуги. Робочий струм лампи складає 2,2 А.

Для зняття падіння напруги  $U_a$ , що подається на вхід осцилографа, застосовується високоомний подільник напруги, що складається з опорів  $R_3$  і  $R_4$  і підключений паралельно лампі. На вхід Х осцилографа подається напруга, пропорційна струму розряду, що знімається з опору  $R_2$ .

Опір реостата  $R$  і резистора  $R_1$  складає в сумі величину баластового опору.

Для захисту від ультрафіолетового випромінювання лампа закрита захисним екраном. Охолодження лампи при необхідності здійснюється за допомогою обдування вентилятором.

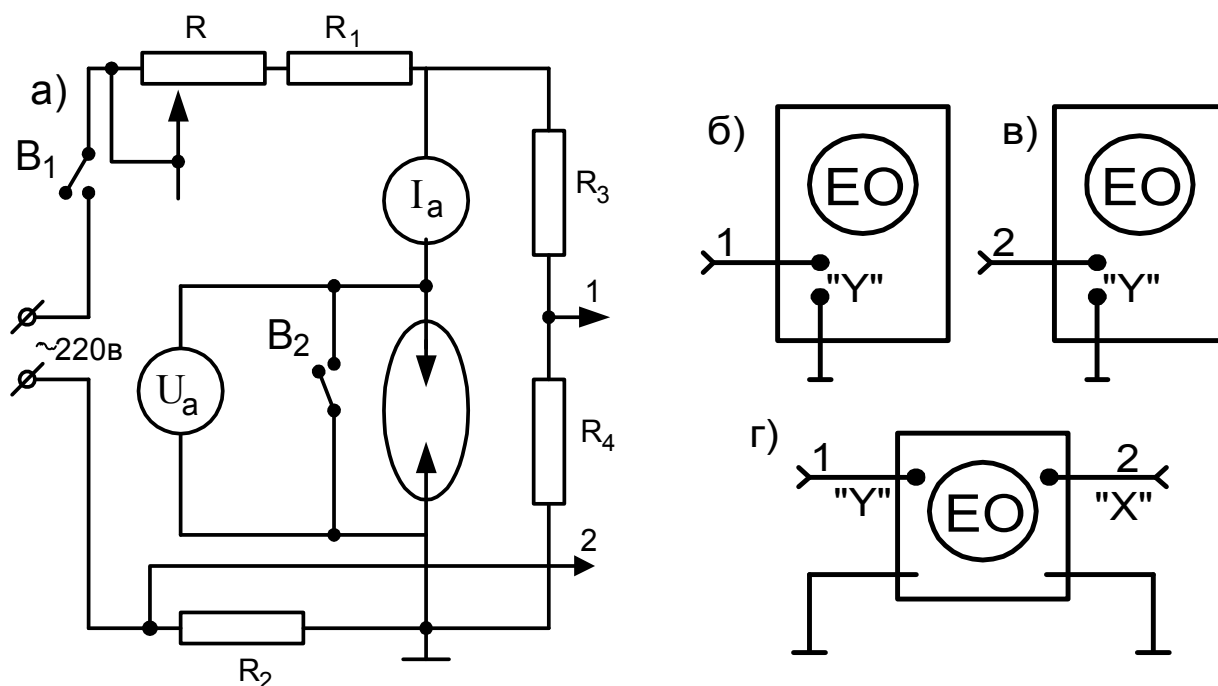


Рисунок 5.8 – Схема ввімкнення розрядної лампи

### Порядок виконання роботи

- 1) Установити найбільше значення опору реостата  $R$  і зробити ключем  $B_1$  запалювання лампи.
- 2) Одержати на екрані осцилографа і перенести на кальку осцилограми струмів і напруги залежно від часу.
- 3) Одержати на екрані осцилографа і перенести на кальку осцилограму динамічної характеристики розряду.
- 4) Короткочасно натиснувши на кнопку  $B_2$ , встановити значення струму, необхідне для побудови навантажувальної характеристики.
- 5) Змінюючи від найбільшої величину опору реостата  $R$ , зняти статичну вольт – амперну характеристику дугового розряду і побудувати її на міліметровому папері.
- 6) Короткочасно натиснувши кнопку  $B_2$ , знайти значення струму, необхідне для побудови навантажувальної характеристики при найменшому опорі реостата  $R$ .
- 7) Повторити виконання пункту 5 при ввімкнутому обдуванні лампи. Порівняти значення найбільшого струму.
- 8) Шляхом графічного диференціювання побудованої статичної характеристики дугового розряду (без обдування), побудувати криву залежності диференціального опору лампи від величини розрядного струму.
- 9) Побудувати дві навантажувальні характеристики, що відповідають максимальному і мініимальному значенням опору реостата  $R$ . Побудову

виконати на статичній вольт – амперній характеристиці дугового розряду без обдуву.

### Методичні рекомендації

При знятті статичної вольт-амперної характеристики слід мати на увазі, що розряд внаслідок теплової інерційності встановлюється при кожному вимірі протягом однієї-трьох хвилин. При сталому розряді струм не змінюється.

Коли виконується побудова навантажувальної характеристики, значення  $E_a$  дорівнює напрузі живильної мережі, а значення струму встановлюється при замиканні кнопки  $B_2$ . Дуга при цьому гасне і значення струму залежить тільки від величини баластового опору.

При роботі з осцилографом необхідно попередньо підготувати його до роботи. Для цього перемикач роду синхронізації поставити в положення «ВІД МЕРЕЖІ». Підібрати таке значення розгортки, щоб на екрані спостерігався один-два періоди коливань. Ручкою «РІВЕНЬ СИНХРОНІЗАЦІЇ» підібрати таке положення, при якому зображення на екрані буде найбільш стійким. Надалі це положення не змінювати.

При визначенні залежностей  $U_a(t)$  і  $j_a(t)$  перемикач розгортки поставити в положення «АВТОМАТИЧНА», а при дослідженні динамічної характеристики розгортка повинна бути відключена і сигнали відповідно до схеми подаються безпосередньо на відхиляючі пластини.

Осцилограми знімати на кальку, що прикладається до звіту.

### Контрольні запитання

1. Назвати основні відмінності тліючого розряду від дугового.
2. Які умови необхідні для виникнення дугового розряду?
3. Що таке динамічна характеристика розряду?
4. Що називають катодною прямою?
5. Дати визначення катодного падіння напруги, назвати причини його виникнення.
6. Охарактеризувати  $\gamma$ -процеси.
7. Що таке термоелектронна емісія?
8. Дати визначення діючого значення чи струму напруги.
9. Пояснити вигляд осцилограм струму і напруги дугового розряду в залежності від часу.
10. Пояснити вигляд динамічної характеристики розряду.
11. Від чого залежить величина анодного струму в газорозрядних приладах?
12. Що таке диференціальний опір дугової лампи, чому він негативний?
13. Чим обумовлене падіння напруги в області дугового розряду?
14. Пояснити, як розподілений потенціал уздовж розряду.
15. Що таке навантажувальна характеристика лампи?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Фізичні основи джерел світла : навч. посіб. для студ. вищих техніч. навч. закладів / Л. А. Назаренко ; ХНАМГ . – Харків : ХНАМГ, 2009 . – 206 с.
2. Світлодіоди: фізика, технологія виготовлення, застосування: навч. посібник / В. І. Карась, Л. А. Назаренко, І. В. Карась ; ХНАМГ . – Харків : ХНАМГ, 2012. – 323 с.
3. Основи радіометрії та фотометрії: монографія / Л. А. Назаренко, В. М. Сорокін; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова – Харків.; ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2014, – 352 с.
4. Світлові прилади: навч. посіб. для студ. вищих техніч. навч. закладів / А. С. Литвиненко, О. Л. Черкашина ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 125 с.
5. Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Фізичні основи джерел світла» (для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : Л. А. Назаренко, Г. О. Петченко, А. С. Литвиненко, А. І. Колесник. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 44 с.
6. Баландаева Л. Г. Эффективная методика расчета формы зеркального отражателя светильника с требуемой КСС / Л. Г. Баландаева, Г. А. Петченко, А. И. Токмань // Коммунальное хозяйство городов. – № 53. –2003. – С. 207–210.
7. Петченко Г. А. Решение обратной задачи применительно к нахождению оптимального профиля дзеркального круглосимметричного отражателя в рамках метода элементарных отображений / Г. А. Петченко, Л. Д. Гуракова, Л. Г. Баландаева, Т. А. Хихля, В. И. Степура // Світлотехніка та електроенергетика. – № 1(9). – 2007. – С. 40–44.
8. Дмитренко Т. В. Расчет световых приборов с экологически перспективными источниками света / Т. В. Дмитренко, Г. А. Петченко // Коммунальное хозяйство городов. – № 74. –2006. – С. 381–384.

9. Петченко Г. А. Апробация методики решения обратной задачи применительно к нахождению оптимальных габаритов отражателя светильника с заданным светораспределением / Г. А. Петченко, Л. Д. Гуракова, Л. Г. Баландаева, В. И. Степура // Тези допов. на XXXIV науково-техн. конференції. – Харків: ХНАМГ. – 2008. – С.40-41.

10. Г. О. Петченко. Технологія світлотехнічного виробництва / Петченко Г. О., Ляшенко О. М. // Конспект лекцій для студентів 4 курсу денної і заочної форм навчання спец. 7.090605 / Харків: ХНАМГ, 2009. – 157с.

11. Balandayeva L. G. Effective method for calculating the shape of specular reflector of the luminaire with the required luminous intensity distribution curve / L. G Balandayeva, G. A Petchenko, A. I Tokman // Municipal services of cities. – № 53. – 2003. – P. 207–210.

12. Автономна система освітлення гібридного типу / А. С. Литвиненко, О. М. Діденко, Ю. О. Васильєва, Л. Д. Гуракова, К. І. Іоффе // Світлотехніка та електроенергетика. – 2016. – № 1 (45). – С. 12 – 18.

13. Литвиненко А. С. Забезпечення дозиметричного контролю лазерного випромінювання / А. С. Литвиненко, О. М. Ляшенко, В. М. Балабан, Є. П. Тимофеев // Український Метрологічний журнал. – 2017. – № 2 (45). – С. 27–32.

14. Литвиненко А. С. Обзор детекторов оптического излучения со 100% квантовой эффективностью / А. С. Литвиненко, Д. Н. Татьянко, Е. П. Тимофеев // Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф., 4 – 6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – С. 27–28.

15. Литвиненко А. С. Світильники комбінованого освітлення / А. С. Литвиненко // Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф., 4 – 6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – С. 81.

16. Литвиненко А. С. Альтернативные конструкции светодиодов / А. С. Литвиненко // Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI Міжнарод.

наук.-техн. конф., 4 – 6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – С. 82 – 83.

17. Балабан В. М. Забезпечення дозиметричного контролю лазерного випромінювання / В. М. Балабан, Є. П. Тимофеев, А. С. Литвиненко, О. М. Ляшенко // Метрологія та вимірювальна техніка : матеріали X Міжнарод. наук.-техн. конф., 5 – 7 жовтня 2016 р. / ННЦ «Інститут метрології». – Харків : ННЦ «Інститут метрології», 2016. – С. 122.

18. Діденко О. М., Васильєва Ю. О., Гуракова Л. Д., Іоффе К. І. // Світлотехніка та електроенергетика. – 2016. – № 1 (45). – С. 12 – 18.

19. Намитоков К. К. Конспект лекцій по технической физике (том I. Механика, молекулярная термодинамика) для студентов высших технических заведений / К. К. Намитоков; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А.Н. Бекетова. – Харьков : ХНУГХ, 2015. – 522 с.

20. Світлотехнічні розрахунки навч. посібник / Л. А. Назаренко, Т. В. Мажаровська, В. С. Чернець ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – 142 с.;

21. Конспект лекцій по технической физике (том II. Электричество и магнетизм) : учеб. пособ. для высш. техн. учеб. завед. / К. К. Намитоков ; Харьков. нац. ун-т гор. хоз-ва им. А. Н. Бекетова . – Харьков : ХНУГХ им. А. Н. Бекетова, 2017 . – 440 с.

22. Штучне зовнішнє освітлення : навчальний посібник / Л. А. Назаренко, К. І. Іоффе ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 88 с.

23. Petchenko G. A. Phonon damping of dislocations in potassium bromide crystals at different dislocation density values / G. A. Petchenko // Functional Materials. – 2000. – V. 7, № 4(2). – P. 785–789.

24. Petchenko G. A. Study of ultrasound absorption by dislocations in KBr single crystals under low static stresses / G. A. Petchenko // Functional Materials. – 2001. – V. 8, № 3. – P. 483–487.

25. Petchenko A. M. Dynamic damping of dislocations with phonons in KBr single crystals / A. M. Petchenko, G. A. Petchenko // *Functional Materials*. – 2006. – V. 13, № 3. – P. 403–405.
26. Petchenko A. M. Features of resonance absorption of longitudinal ultrasound in strained crystals KBr at temperature variations / A. M. Petchenko, G. A. Petchenko // *Functional Materials*. – 2007. – V. 14, № 4. – P. 475–479.
27. Petchenko A. M. Effect of crystal pre-straining on phonon damping of dislocations / A. M. Petchenko, G. A. Petchenko // *Functional Materials*. – 2008. – V. 15, № 4. – P. 481 – 486.
28. Petchenko G. A. The dislocation resonance absorption of ultrasound in KBr crystals at low temperatures / G. A. Petchenko, A. M. Petchenko // *Functional Materials*. – 2009. – V. 16, № 3. – P. 253–257.
29. Петченко А. М. Особенности поглощения ультразвука в кристаллах LiF при варьировании плотности дислокаций / А. М. Петченко, Г. А. Петченко // *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Сер. “Фізика”*. – 2009. – Вип. 12, № 865. – С. 39–44.
30. Petchenko O. M. Phonon drag of dislocation in KCl crystals with various dislocation structure states / O. M. Petchenko, G. O. Petchenko // *Ukrainian journal of physics*. – 2010. – V. 55, № 6. – P. 716–721.
31. Petchenko G. A. The study of the dislocation resonance in LiF crystals under the influence of the low-dose X-irradiation / G. A. Petchenko, A. M. Petchenko // *Functional Materials*. – 2010. – V. 17, № 4. – P. 421–424.
32. Petchenko G. O. Acoustic studies of the effect of X-ray irradiation on the dynamic drag of dislocations in LiF crystals / G. O. Petchenko // *Ukrainian journal of physics*. – 2011. – V. 56, № 4. – P. 339–343.
33. Петченко Г. А. Исследование дислокационных потерь ультразвука в облученных монокристаллах LiF в интервале доз облучения 0...400 Р / Г. А. Петченко // *Вопросы атомной науки и техники*. – 2012. – № 2(78). – С. 36–39.

34. Методичні рекомендації до виконання лабораторних та контрольних робіт, самостійного вивчення курсу з навчальної дисципліни «Системи керування світлотехнічними пристроями» (для магістрів денної і заочної форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка освітньо-професійної програми «Світлотехніка і джерела світла») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : К. І. Суворова, А. І. Колесник. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 27 с.

35. Petchenko G. A. Dynamic damping of dislocations in the irradiated LiF crystals / G. A. Petchenko // Functional Materials. – 2012. – V. 19, № 4. – P. 473–477.

36. Petchenko G. A. Research of the preliminary deformation and irradiation effect on the viscous damping of dislocation in LiF crystals / G. A. Petchenko // Functional Materials. – 2013. – V. 20, № 3. – P. 315–320.

37. Petchenko G. O. Research of the elastic wave velocity dispersion in X-ray-irradiated LiF crystals / G. O. Petchenko, O. M. Petchenko // Ukrainian journal of physics. – 2013. – V. 58, № 10. – P. 974–979.

38. Петченко Г. А. Изучение природы радиационных дефектов в облученных кристаллах LiF / Г. А. Петченко // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Сер. “Фізика”. – 2013. – Вип. 18, № 1075. – С. 50–54.

39. Petchenko G. A. The effect of preliminary deformation and irradiation on the optical absorption in LiF crystals / G. A. Petchenko, S. S. Ovchinnikov // Problems of atomic science and technology. – 2014. – № 2(90). – P. 29–33.

40. Petchenko G. A. Dependence of electronic color center concentration on the state of irradiated LiF crystal dislocation structure / G. A. Petchenko, A. M. Petchenko // Problems of atomic science and technology. – 2015. – № 2(96). – P. 25–28.

41. Petchenko G. A. Influence of elastic stresses and temperature on the dislocation unpinning from the stoppers in KCl crystals / G. A. Petchenko, A. M. Petchenko // Functional Materials. – 2015. – № 3. – P. 293–298.



42. Petchenko G. A. Thermal activation analysis of the dislocation unpinning from stoppers in KCl crystals / G. A. Petchenko, A. M. Petchenko // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Сер. “Фізика”. – 2015. – Вип. 23. – С. 28–31.

43. Petchenko G. Color center concentration in irradiated and deformed functional materials / G. Petchenko // Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф., 4 – 6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – С. 30–31.

44. Petchenko G. The optical absorption in functional materials / G. Petchenko, S. Ovchinnikov // Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф., 4 – 6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – С. 32–33.

45. Петченко Г. О. Вплив механічної обробки на оптичні характеристики функціональних матеріалів / Матеріали 13-ї Міжнародної конференції “Фізичні явища в твердих тілах” // Г. О. Петченко, О.М. Петченко – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна (Україна). – 2017. – С. 162.

46. Petchenko G. O. Nonmonotonical deformation dependence of color center concentration in functional materials / G. O. Petchenko, O. M. Petchenko, M. Ya. Rokhmanov // Світлотехніка та електроенергетика. – 2017. – № 2 (49). – С. 22–24.

47. Petchenko G. O. The optical absorption in irradiated by X-ray and deformed functional materials / G. O. Petchenko, O. M. Petchenko, S. S. Ovchinnikov, M. Ya. Rokhmanov // Світлотехніка та електроенергетика. – 2017. – № 2 (49). – С. 30–33.

48. Петченко Г.О. Вплив дислокаційної структури кристалів LiF на їх світлотехнічні і колориметричні характеристики / Г. О. Петченко, О. М. Петченко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2017. – № 3 (50). – С. 25–30.

49. Колесник А. І. Методики та результати експериментальних досліджень відводу тепла від світлодіодного приладу / А. І. Колесник, Д. О. Усіченко, Л. А. Назаренко // Світлотехніка та електроенергетика. – 2017. – № 49 (2). – С. 25–29.

50. Kolesnyk A.I. The research of thermal characteristics of the LEDs / A.I. Kolesnyk, L.A. Nazarenko // Lighting engineering and power engineering. – 2016. – No. 46 (2). – P. 27-30.

51. Колесник А. І. Теплове дослідження профілю світлодіодного світильника в програмному середовищі Solidworks Simulation / А. І. Колесник, Д. О. Усиченко, Л. А. Назаренко // Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф., 4 – 6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – С. 51–53.

52. Колесник А. І. Методики та результати експериментальних досліджень відводу тепла від світлодіодного приладу / А. І. Колесник, Л. А. Назаренко // Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф., 4–6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – С. 71–72.

53. Колесник А. І. Особливості розрахунку тепловідводу для світлодіодних вуличних світильників / А. І. Колесник, Л. А. Назаренко // Метрологія та вимірювальна техніка : матеріали X Міжнарод. наук.-техн. конф., 5 – 7 жовтня 2016 р. / ННЦ «Інститут метрології». – Харків : ННЦ «Інститут метрології», 2016. – С. 116.

54. Колесник А., Усиченко Д. Результати дослідження розподілу температурних полів світильника // VI Міжнародна науково-технічна конференція Світлотехніка й електроенергетика: історія, проблеми, перспективи. – ФОП Паляниця ВА, 2018. – С. 38–38.

55. Актуальні проблеми світлотехніки : матеріали VI Міжнарод. наук.-техн. конф. в рамках форуму «LIGHT FORUM 2017», Харків, 4 – 6 жовтня 2017 р. / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2017. – 180 с.

## ДОДАТОК А

### Константи та коефіцієнти

#### *Фізичні константи*

- Стала Больцмана  $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град
- Заряд електрона  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл
- Маса електрона  $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$  кг
- Маса протона  $m_p = 1.67 \cdot 10^{-27}$  кг
- Відношення маси протона до маси електрона  $m_p / m_e = 1836.5$
- Питомий заряд електрона  $e / m_e = 1.76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг
- Стала Планка  $h = 6.22 \cdot 10^{-34}$  Дж
- Швидкість світла у вакуумі  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с
- Електронвольт у джоулях  $1 \text{ев} = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Дж
- Стала Стефана – Больцмана  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup>·град<sup>4</sup>
- Число Авогадро  $N_a = 6.02 \cdot 10^{26}$  1/(К·моль)
- Універсальна газова стала  $R = 8.31 \cdot 10^3$  Дж/(К·моль·град)
- Міліметр рт.ст. у паскалях  $1 \text{ мм.рт.ст.} = 133.3$  Н/м<sup>2</sup>
- Діелектрична проникність вакууму  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м
- Магнітна проникність вакууму  $\mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м
- Абсолютний нуль температур  $T_{0 \text{ абс}} = -273^\circ \text{C} = 0 \text{ К}$
- Коефіцієнт політропи для повітря  $\alpha = 1,2$

Таблиця А.1 – Емісійні константи оксидних катодів

Вигляди катодів	$\epsilon$ , ев	$B$ , А/(см <sup>2</sup> · град <sup>5/4</sup> )
Барій на окисленому вольфрамі	1.10	0,3
Нікель – Ва – Sr	1.20	0,96
Торієво-оксидний катод	2,59	4,35
Барій-кисень-вольфрам	1,34	0,18

Таблиця А.2 – Емісійні константи металів

Елемент	$\varepsilon$ , еВ	$B$ , А/(см <sup>2</sup> град <sup>5/4</sup> )
Вольфрам	4,50	60-100
Молибден	4,37	115
Нікель	4,84	30
Платина	5,29	32
Торий	3,41	70
Цезій	1,89	160

Таблиця А.3 – Питомий опір і температурний коефіцієнт опору металів (при 20 °С)

Елемент	Питомий опір $\rho$ , Ом./см	Температурний коефіцієнт опору $\alpha$ , 1/°С
Вольфрам	$5,5 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$
Молибден	$5,7 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
Нікель	$10 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$
Залізо	$9,8 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-3}$

Таблиця А.4 – Температура плавлення деяких металів

Елемент	$T$ , °С
Вольфрам	3 416
Тантал	2 950
Титан	1 725

Таблиця А.5 – В'язкість газів (при 0 °С)

Елемент	$\eta$ , Па·с
Азот	$1,67 \cdot 10^{-5}$
Водень	$0,93 \cdot 10^{-5}$
Повітря (без O <sub>2</sub> )	$1,72 \cdot 10^{-5}$
Кисень	$1,92 \cdot 10^{-5}$
Вуглекислий газ	$1,40 \cdot 10^{-5}$

## *Виробничо-практичне видання*

Методичні рекомендації  
до виконання лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни

### **«ФІЗИЧНІ ОСНОВИ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА»**

*(для студентів денної і заочної форм навчання спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі: **НАЗАРЕНКО** Леонід Андрійович,  
**ПЕТЧЕНКО** Гліб Олександрович,  
**ЛИТВИНЕНКО** Анатолій Савелійович,  
**КОЛЕСНИК** Анастасія Ігорівна

Відповідальний за випуск *Г. О. Петченко*  
*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *А. І. Колесник*

План 2017 , поз. 217 М

---

Підп. до друку 15.02.2018      Формат 60×84/16

Друк на різнографі. Ум. друк. арк. 0,9

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.