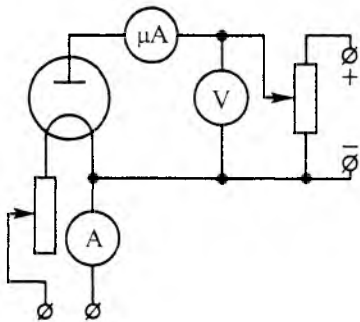


Електричний струм у металах: демонстраційні досліди

Семен ГОНЧАРЕНКО, Зіновій ДРОБЧАК,
Роман ХЛОПІК

Ознайомлення учнів з основними положеннями класичної електронної теорії (КЕТ) займає особливе місце під час вивчення теми "Електричний струм у різних середовищах" тому, що саме з позицій КЕТ викладається наступний матеріал. На жаль, вивчення КЕТ обмежується виключно теоретичним викладом її основних положень. Фактично ж у середній (та й вищій) школі немає жодної демонстрації, яка б підтверджувала ці положення. Немає й лабораторних робіт, які б проводилися з цією метою. Мотивується це складністю необхідного лабораторного обладнання та громіздкістю обчислень для обробки результатів.

На нашу думку, такий підхід необґрунтований. Ми вважаємо, що наведений нижче блок робіт є доступним для виконання в умовах шкільного фізичного кабінету. Роботи виконуються на установці для зняття вольт-амперної характеристики (ВАХ) вакуумного діода (з використанням шкільного демонстраційного вакуумного діода), принципова схема якої зображена на мал. 1.



Мал. 1

У роботах цього блоку ведеться не лише перевірка виконання закону розподілу молекул за швидкостями (закон Максвелла) для електронного газу, а й можливе виконан-

ня таких робіт фізичного практикуму, як "Вимірювання індукції магнітного поля постійного магніту" та "Знаходження роботи виходу електронів з металу".

Робота 1 РОЗПОДІЛ ТЕРМОЕЛЕКТРОНІВ ЗА ШВИДКОСТЯМИ

Внаслідок термоелектронної емісії електрони залишають катод. Кількість електронів, які випускає катод за одиницю часу, є величиною сталою. Сила струму, яка проходить через діод, дорівнює:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{eN}{t}, \quad (1)$$

де N — кількість електронів, які долетіли до анода. Якщо між катодом і анодом прискорююча різниця потенціалів відсутня, то N дуже мала. Це пояснюється тим, що подолати відстань між катодом і анодом електрон може тільки в тому випадку, якщо його кінетична енергія не менша за деяке значення E . Тобто:

$$\frac{mv_1^2}{2} \geq E, \quad (2)$$

де v_1 — швидкість електрона після вильоту з поверхні катода.

Якщо на електроди подали напругу U_1 , яка б прискорювала електрони, то струм, що проходить через діод, збільшиться, оскільки енергія кожного електрона зростає на величину eU_1 . Таким чином, до електронів, для яких виконується (2), приєднається ще деяка кількість ΔN електронів, яким бракувало до E енергії, рівної eU_1 або меншої. Тепер умова (2) набуде вигляду:

$$\frac{mv_1^2}{2} + eU_1 \geq E. \quad (3)$$

Вимірявши зміну ΔI сили струму, можна знайти кількість ΔN цих електронів:

$$\Delta I = \frac{\Delta Q}{t} = \frac{e\Delta N}{t}. \quad (4)$$

При дальшому збільшенні різниці потенціалів струм також зростає. Досягнувши деякого максимального значення I_n (струм насичення), він перестане залежати від анодної напруги. Це означає, що всі електрони, які покинули катод, досягають анода. Враховуючи, що серед них завжди є електрони, для яких $v_1 = 0$, то можна знайти значення енергії E . Воно дорівнює роботі електричного поля по переміщенню таких електронів. Якщо позначити напругу, при якій настає струм насичення I_n через U_n , то, згідно з вищесказаним, матимемо

$$E = eU_n. \quad (5)$$

Таким чином, швидкості електронів v_1 можна дістати з (3) і (5):

$$\frac{mv_1^2}{2} + eU_1 \geq eU_n; \quad (6)$$

$$v_1 = \sqrt{\frac{2e}{m}(U_n - U_1)}.$$

Кількість усіх електронів, які випускає катод, дорівнює:

$$I_n = \frac{eN}{t}. \quad (7)$$

Тоді відносна кількість електронів $\Delta N/N$, швидкості яких лежать в інтервалі Δv , буде:

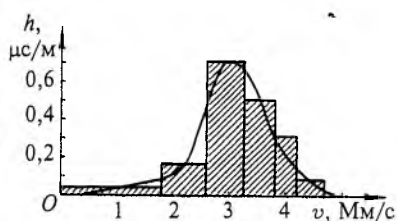
$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{\Delta I}{I_n} \quad (8)$$

Здобути результати інтерпретуємо графічно. Для цього по горизонтальній осі відкладаємо значення швидкостей електронів, які знайдено згідно з (6). Відмічаємо інтервали Δv і на них, як на основах, будуємо прямокутники, площі яких чисельно дорівнюють долі частинок, що потрапили в інтервал, тобто $S = \Delta N/N$.

Висота h цих прямокутників визначається з таких міркувань: ордината відповідає на діаграмі висоті прямокутника, площа якого дорівнює $\Delta N/N$, а основа Δv . Звідси висота:

$$h = \frac{\Delta N}{N \Delta v} \quad (9)$$

Тобто вона чисельно дорівнює частці молекул від загальної кількості, які потрапляють в інтервал швидкостей. Таким чином, ордината показує, скільки молекул потрапляє в інтервал швидкостей, абсциса — значення самої швидкості. Від діаграми переходимо до кривої розподілу (мал. 2).



Мал. 2

Нижче наведено результати, що одержано при значенні струму розжарення $I_{\text{роз}} = 1,7 \text{ А}$ (табл. 1).

Примітка. Дану лабораторну роботу можна виконувати і як фронтальну. При цьому на кожен стід (кожному учневі) роздаються ВАХ різних вакуумних діодів.

Робота 2 ПЕРЕВІРКА ЗАКОНУ РОЗПОДІЛУ МОЛЕКУЛ ЗА ШВИДКОСТЯМИ

Закон розподілу молекул за швидкостями (закон Максвелла) дає змогу знайти кількість молекул ΔN , швидкості яких лежать в інтервалі від v до $v + \Delta v$:

$$\frac{\Delta N}{N} = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) v^2 \Delta v \quad (1)$$

Часто (1) записують так:

$$\frac{\Delta N}{N} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-u^2} \cdot u^2 \Delta u \quad (2)$$

де $u = v/v_{\text{н.і}}$ — відносна швидкість; v — дана швидкість; $v_{\text{н.і}}$ — найімовірніша швидкість.

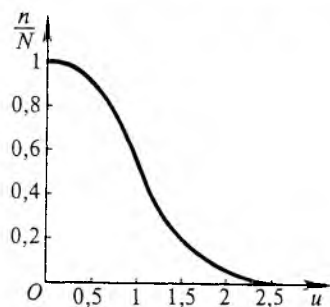
У багатьох випадках треба знати кількість молекул n , швидкості яких перевищують задане значення швидкості u :

$$\frac{n}{N} = \int_u^{\infty} \frac{4}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-u^2} \cdot u^2 du \quad (3)$$

Як видно з (3), n/N залежить лише від u , тобто:

$$\frac{n}{N} = f(u) \quad (4)$$

Для всіх газів при даному u n/N однакове. Графічно функція (4) показана на мал. 3. Для того щоб покинути катод, електрон повинен мати кінетичну енергію не меншу, ніж робота виходу:



Мал. 3

$$\frac{mv^2}{2} \geq A \quad (5)$$

Тоді необхідна для цього швидкість:

$$v = \sqrt{\frac{2A}{m}} \quad (6)$$

Таким чином, відносна швидкість електронів повинна бути не менша:

$$u = \frac{v}{v_{\text{н.і}}} = \sqrt{\frac{A}{kT}} \quad (7)$$

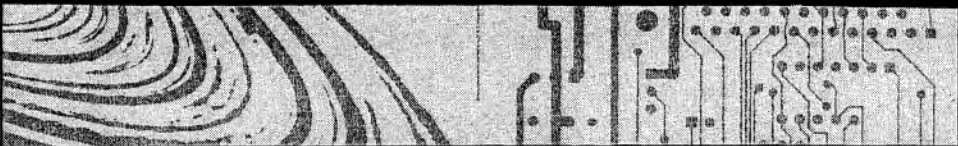
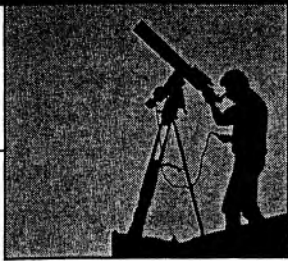
Робота виходу для вольфраму: $A = 7,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$; k — стала Больцмана. Температура нитки розжарення в робочому режимі, як правило, лежить у межах: $1500^\circ\text{C} < t < 3000^\circ\text{C}$, або $1773 \text{ К} < T < 3273 \text{ К}$. Тоді значення u , які нас цікавлять, будуть знаходитися, згідно (7), у межах: $3,95 < u < 5,45$.

Позначимо інтеграл (3) при фіксованому u через S :

$$S = \int_u^{\infty} e^{-u^2} \cdot u^2 du \quad (8)$$

Таблиця 1

$U, \text{ В}$	$I, \mu\text{А}$	$v, \text{ Мм/с}$	$\Delta U, \text{ В}$	$\Delta I, \mu\text{А}$	$\frac{\Delta v}{v_{\text{н.і}}}$	$\frac{\Delta N}{N}$	$h, \mu\text{с/м}$
0	0	5,30	-	-	-	-	-
10	0	4,96	0-10	0	0,34	0	0
20	0	4,59	10-20	0	0,37	0	0
30	0,5	4,19	20-30	0,5	0,40	0,02	0,05
40	4	3,75	30-40	3,5	0,44	0,13	0,30
50	10,5	3,25	40-50	6,5	0,50	0,25	0,50
60	22	2,65	50-60	11,5	0,60	0,44	0,73
70	25	1,87	60-70	3	0,78	0,12	0,15
80	26	0	70-80	1	1,87	0,04	0,02
90	26	-	80-90	0	0	0	0



ЕКСПЕРИМЕНТУЄМО

Таблиця 2

Значення S , обчислені при даному u , заносяться до таблиці. Щоб знайти u , а відповідно і S , треба знати температуру катода T . Її знаходимо таким чином. Вимірюємо опір R_0 нитки розжарення в холодному стані. Наближено R_0 дорівнює опору катода при 0°C .

Складаємо установку за схемою (мал. 1) Вимірюємо напругу U на катоді, силу струму I , який протікає через нього, і струм насичення I_n діода. При цьому катод розжарюється до температури t і його опір R_t рівний:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (9)$$

$$i \quad R_t = \frac{U}{I} \quad (10)$$

Із (9) і (10) знаходимо t :

$$t = \frac{\frac{U}{I} - R_0}{\alpha R_0} \quad (11)$$

Звідси T :

$$T = \frac{\frac{U}{I} - R_0}{\alpha R_0} + 273 \quad (12)$$

Крім цього, відносну кількість електронів n/N , які залишили катод, знаходимо з таких міркувань:

$$n = \frac{I_n}{e} \quad (13)$$

$$N = N_{\text{cat}} \cdot N_A \cdot \frac{m}{M} \quad (14)$$

де N_{cat} — кількість електронів в одному атомі; N_A — стала Авогадро; m — маса катода; M — молярна маса речовини катода.

Таким чином:

$$\frac{n}{N} = \frac{I_n M}{e N_{\text{cat}} \cdot N_A m} \quad (15)$$

Прирівнявши (3) й (15) і врахувавши (8), дістанемо:

$$S = \frac{I_n M}{e N_{\text{cat}} \cdot N_A m} \quad (16)$$

Запишемо (16) в іншому вигляді:

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$I_n, \mu\text{А}$	u	S	S/I_n
3,0	1,60	3	4,94	$1,43 \cdot 10^{-10}$	$4,78 \cdot 10^{-5}$
3,2	1,67	5	4,89	$2,32 \cdot 10^{-10}$	$4,64 \cdot 10^{-5}$
3,4	1,73	9	4,83	$4,11 \cdot 10^{-10}$	$4,57 \cdot 10^{-5}$
3,6	1,78	15	4,76	$7,93 \cdot 10^{-10}$	$5,29 \cdot 10^{-5}$
3,8	1,84	25	4,72	$1,15 \cdot 10^{-9}$	$4,60 \cdot 10^{-5}$
4,0	1,90	40	4,67	$1,82 \cdot 10^{-9}$	$4,55 \cdot 10^{-5}$
4,2	1,95	60	4,62	$2,86 \cdot 10^{-9}$	$4,78 \cdot 10^{-5}$

$$\frac{S}{I_n} = \frac{M}{e N_{\text{cat}} \cdot N_A m} \quad (17)$$

$$\text{або} \quad \frac{S}{I_n} = \text{const.}$$

Для визначення постійної S/I_n можна обмежитися трьома вимірюваннями.

У табл. 2 наведено експериментальні результати, одержані при $R_0 = 0,20 \text{ Ом}$; $\alpha = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$.

Робота 3 ВИМІРЮВАННЯ ІНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ПОСТІЙНОГО МАГНІТУ

У цій роботі для вимірювання індукції магнітного поля постійного магніту використовується метод, який дістав назву методу магнетрона (магнетрон — аналог двоелектродної лампи (діода), що перебуває у зовнішньому магнітному полі).

Розглядаємо траєкторію електрона, який рухається в діоді під дією електричного і магнітного полів.

Робота сил електричного поля, що здійснюється при переміщенні електрона від катода до точки з потенціалом U , дорівнює його кінетичній енергії (початковою швидкістю електронів нехтуємо):

$$eU = \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

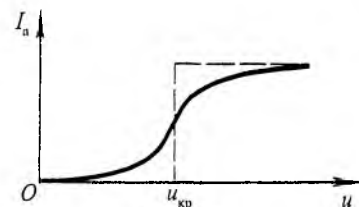
За наявності магнітного поля траєкторія руху електрона викривлюється силою Лоренца, яка змушує його рухатися по колу радіуса R :

$$\frac{mv^2}{R} = evB \quad (2)$$

З рівнянь (1) і (2) дістаємо взаємозв'язок між U і B :

$$B = \frac{I}{R} \sqrt{\frac{2U}{e}} \cdot \frac{1}{m} \quad (3)$$

Розглянемо траєкторію електронів, що вилетіли з катода. Якщо висока різниця потенціалів, то траєкторія дещо викривлюється, але всі електрони потрапляють на анод. При зменшенні U можна досягнути такого критичного значення $U_{\text{кр}}$, при якому траєкторія викривлюється настільки, що електрони лише доторкаються до анода. При $U < U_{\text{кр}}$ електрони зовсім не потрапляють на анод. Таким чином, залежність анодного струму від напруги повинна мати вигляд пунктирної лінії (мал. 4). Експериментальна крива має вигляд суцільної лінії на мал. 4. Згладжування кривої відбувається за рахунок різних початкових швидкостей електронів, які випускає катод; неоднорідності електричного і магнітного полів і т.д. Але не дивлячись на це, перегин функції $I_a = I_a(U)$



Мал. 4

залишається все-таки достатньо різким і його можна використати для знаходження $U_{кр}$. Тоді згідно з (3) можна знайти B :

$$B = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2U_{кр}}{e/m}} \quad (4)$$

Робота 4
ЗНАХОДЖЕННЯ РОБОТИ ВИХОДУ ЕЛЕКТРОНІВ З МЕТАЛУ

Найменша енергія, яку необхідно надати електрону для того щоб вирвати його з твердого (рідкого) тіла у вакуум, називається роботою виходу.

Кількість електронів, які можуть покинути метал, різко

збільшується при підвищенні температури. Тому і густина струму насичення, що протікає через діод, також залежить від температури. Згідно з формулою Річардсона — Дешмена ця залежність має вигляд:

$$j_n = BT^2 \cdot e^{-\frac{A}{kT}} \quad (1)$$

де B — емісійна стала; T — термодинамічна температура катода; A — робота виходу; k — стала Больцмана.

Вимірюючи на досліді залежність струму насичення від температури, можна знайти роботу виходу для даного металу. Дійсно:

$$I_n = j_n S, \quad (2)$$

де S — площа поверхні катода. Тоді:

$$I_{n1} = BST_1^2 \cdot e^{-\frac{A}{kT_1}}; \quad (3)$$

$$I_{n2} = BST_2^2 \cdot e^{-\frac{A}{kT_2}}. \quad (4)$$

Поділимо рівняння (3) на (4):

$$\frac{I_{n1}}{I_{n2}} = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^2 \cdot e^{-\frac{A}{k}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}. \quad (5)$$

Із (5) знаходимо роботу виходу:

$$A = \frac{kT_1T_2}{T_2 - T_1} \cdot \ln \left[\frac{I_{n2}}{I_{n1}} \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^2 \right]. \quad (6)$$

Температури T_1 і T_2 знаходимо за аналогією з роботою 2 "Перевірка закону розподілу молекул за швидкостями".

Універсалізація шкільного електронного метронома

Микола БОЙКО

У фізичних кабінетах шкіл є електронні метрономи "БЕМ-1", які у шкільному фізичному експерименті використовуються порівняно мало. Проте нескладні й доступні навіть недосвідченим гуртківцям доповнення дають змогу перетворити метроном на електронний стробоскоп, що значно розширить можливості використання цього приладу під час проведення демонстрацій та лабораторних робіт. Доконструювання метронома дає змогу не лише удосконалити прилад, а й провести цікаві експерименти фізико-технічного характеру.

Метроном є простим релаксацийним генератором, зібраним на диністорі. Коли напруга на конденсаторі досягає 80—100 В, диністор відкривається і конденсатор розряджається через котушку гучномовця. У цей момент чути гучне клацання. Частота подання сигналів регулюється в

межах 0,25—4,0 Гц (15—240 сигн/хв).

Для створення періодичних спалахів використовують імпульсну лампу ИФК-120, яку монтують у рефлекторі. Якщо є фотоспалах, можна скористатися готовим рефлектором з лампою та її імпульсним трансформатором.

Принципову схему метронома-стробоскопа зображено на малюнку. Доповнення, що вносяться в принципову схему метронома, виділені потовщеними лініями. Новими елементами у схемі, крім імпульсної лампи, є конденсатор ємністю 0,5—1,0 мкф, розрахований на робочу напругу 200 В (СЗ), імпульсний трансформатор ТVI (можна скористатися і трансформатором, встановленим у лампі-спалаху) та два перемикачі (SA1, SA2). Перемикач SA1 призначений для зміни діапазонів частоти генератора, а перемикач SA2 — для переведення приладу у режими "метроном" або "стробоскоп".

Найвідповідальнішою деталлю є імпульсний трансформатор. Він повинен мати коефіцієнт трансформації не менше 100. Для намотування трансформатора треба виготовити котушку з таким внутрішнім діаметром, щоб у неї ввійшов відрізок феритового осердя \varnothing 8 мм від магнітної антени. Довжина котушки 25—30 мм,