

Вивчення явища фотоефекту та визначення сталої Планка

Сергій Поліщук

Макс Планк ввів свою сталу для пояснення спектру випромінювання абсолютно чорного тіла, припустивши, що тіло випромінює електромагнітні хвилі порціями (квантами) з енергією, пропорційною частоті ($h\nu$). У 1905 році Ейнштейн використав це припущення для того, щоб пояснити явище фотоефекту, постулювавши, що електромагнітні хвилі поглинаються порціями з енергією пропорційною частоті. Так зародилася квантова механіка...

Мета роботи: вивчення явища зовнішнього фотоефекту.

Прилади і матеріали: лампа розжарювання з джерелом живлення, фотопомножувач ФЕП-2 у світлонепроникному корпусі, набір світлофільтрів, гальванометр, вольтметр, акумулятор.

Завдання:

1 при домашній підготовці:

- засвоїти теоретичні відомості щодо визначення сталої Планка;
- зарисувати у робочий зошит електричну схему;
- описати і будову та принцип дії приладів, що використовуються.

2 при виконанні роботи:

- скласти електричну схему і показати її викладачеві для перевірки;
- визначити сталу Планка методом затримуючого потенціалу;
- виконати необхідні розрахунки з визначення шуканої величини;
- оформити звіт і подати його викладачеві.

Правила техніки безпеки:

- розташуйте прилади таким чином, щоб уникнути їх падіння;
- при складанні електричної схеми використовуйте провідники з непошкодженою ізоляцією.

Теоретичні відомості та опис установки: Під зовнішнім фотоефектом розуміють звільнення електронів з поверхні металів за допомогою світла. Явище було відкрито у 1887 році Г. Герцем, а пояснене А. Ейнштейном у 1905 році. Виходячи з квантових уявлень, Ейнштейн закон збереження енергії при взаємодії кванта світла й із електроном речовини записав у вигляді формули, яка зараз носить його ім'я:

$$h\nu = A + \frac{m_e V_{max}^2}{2} \quad (1)$$

Тут A - робота виходу електрона з металу, m_e - маса електрона, V_{max} - його максимальна швидкість.

Щоб припинити вихід електронів, потрібно прикласти до металу зворотну гальмівну різницю потенціалів, величина якої U визначається із співвідношення:

$$\frac{m_e V_{max}^2}{2} = eU \quad (2)$$

У цьому разі $h\nu = A + eU$. Оскільки для даного металу $A = const$, то гальмівна напруга залежить лише від частоти

му світла, яке спрямовується на метал. Це відкриває можливість, вимірявши гальмівні напруги U_1 і U_2 при освітленні фотоелемента світлом двох різних частот ν_1 і ν_2 , визначити сталу Планка h :

$$\begin{cases} h\nu_1 = A + eU_1 \\ h\nu_2 = A + eU_2 \end{cases} \quad (3)$$

Розв'язок цієї системи рівнянь відносно h приводить до результату:

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{\nu_1 - \nu_2} \quad (4)$$

або через довжини світлових хвиль

$$h = \frac{e\lambda_1\lambda_2(U_1 - U_2)}{c(\lambda_1 - \lambda_2)} \quad (5)$$

Якщо скористатись принаймні трьома світлофільтрами із стандартного набору, то комбінуючи їх по два, можна одержати три результати відносно h , що є хоча і мінімальною, проте достатньою кількістю значень для визначення усередненої величини сталої Планка.

Table 1: Спектральні характеристики деяких скляних світлофільтрів

№	Марка світлофільтра	Товщина скла, мм	Довжина хвилі максимального пропускання, м	Частота хвилі максимального пропускання, Гц
1	КС-13	2,78	$700 \cdot 10^{-9}$	$4.3 \cdot 10^{14}$
2	ОС-13	3,02	$650 \cdot 10^{-9}$	$4.6 \cdot 10^{14}$
3	ЖС-18	3,07	$600 \cdot 10^{-9}$	$5.0 \cdot 10^{14}$
4	ЗС-1	1,00	$540 \cdot 10^{-9}$	$5.06 \cdot 10^{14}$
5	СС-2	1,00	$390 \cdot 10^{-9}$	$7.7 \cdot 10^{14}$
6	ФС-6	1,00	$360 \cdot 10^{-9}$	$8.3 \cdot 10^{14}$

Інший шлях визначення сталої Планка, у межах цієї лабораторної роботи, наступний. З рівняння $h\nu = A + eU$ визначимо значення гальмівної напруги:

$$U = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e} \quad (6)$$

Звідси слідує, що залежність U від частоти падаючого світла лінійна. Використавши шість вище зазначених світлофільтрів, одержимо шість значень для U . Графічно залежність U від ν має вигляд відрізка прямої BC на рис. 1

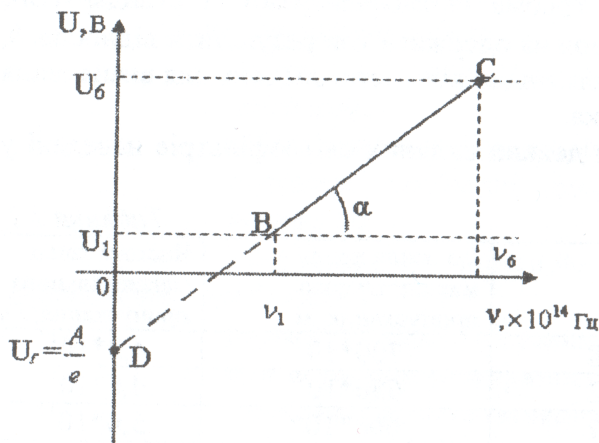


Рис. 1.

Провести цей відрізок слід так, щоб кількість точок, нанесених на графік, зверху і знизу відрізка була однаковою.

Із рівняння (6) слідує, що $tg\alpha = \frac{h}{e}$. Тоді, визначивши із рис.1 $tg\alpha = \frac{U_6 - U_1}{v_6 - v_1}$, знаходимо $h = \frac{U_6 - U_1}{v_6 - v_1} \times e$. Тобто одержали, як і слід було чекати, той самий вираз, але графічним шляхом

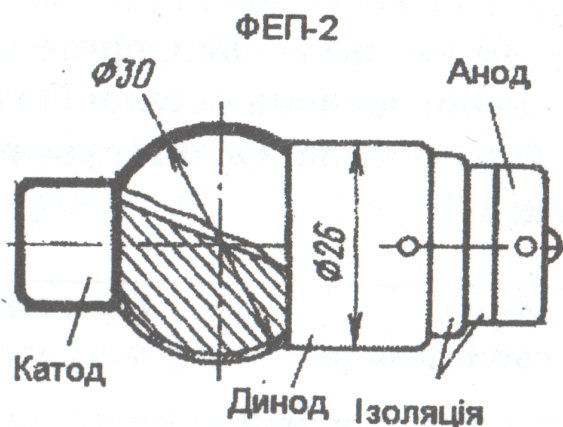


Рис. 2 Вакуумний сурм'яно-цезієвий фотоелектронний помножувач ФЕП-2

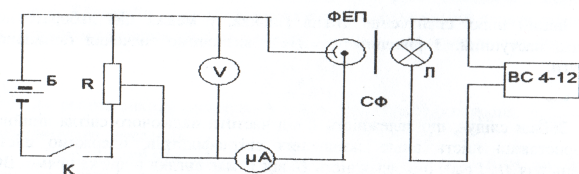


Рис. 3.

Продовживши відрізок BC до перетину його з вертикальною віссю U , отримуємо точку D . Із рівняння (6) слідує, що довжина відрізка OD , виміряна у масштабі напруг, дорівнює $-\frac{A}{e}$. Тоді:

$$A = e \times U_T \quad (7)$$

Роботу виходу A прийнято визначати у електрон-вольтах, вона для металів не перевищує кількох еВ.

У роботі використовується вакуумний сурм'яно-цезієвий фотоелектронний помножувач ФЕП-2. Його зовнішній вигляд зображено на рис.2

Електрична схема установки складається з двох незалежних кіл - кола освітлювача і кола фотопомножувача (рис. 3).

У якості освітлювача використовується низьковольтна лампочка розжарення, яка живиться від випростувача ВС 4-12. Світло від лампочки через світлофільтр спрямовується на фотопомножувач. Гальмівна напруга на фотопомножувач подається через потенціометр від акумулятора. Вольтметр повинен бути розрахований на декілька вольт і мати точність вимірювання не гірше 0,1 В. Мікроамперметр необхідно вибрати якомога чутливим.

Послідовність виконання роботи:

- 1 Скласти електричну схему згідно рис. 3, показати її для перевірки викладачеві.
- 2 Перед фотоелементом встановити світлофільтр.
- 3 Тумблер на приладі ВС 4-12 поставити в положення «Вкл».
- 4 Ключем К замкнути коло фотопомножувача.

- 5 Спостерігаючи за показами мікроамперметра, переміщувати повзунок реостату до положення, поки мікроамперметр покаже відсутність струму.
- 6 Зняти з максимальною точністю покази вольтметра.
- 7 Замінити світлофільтр. Увага! При заміні світлофільтра слід обов'язково вимкнути освітлювач, перевівши тумблер на приладі ВС 4-12 у положення «Вик».
- 8 Після заміни світлофільтра повторити дії 3, 5, 6.
- 9 Виміряти гальмівну напругу для усіх світлофільтрів.
- 10 За формулою (5) визначити сталу Планка щонайменше для трьох пар світлофільтрів, розрахувати похибки вимірювань.
- 11 Побудувати графік залежності гальмівної напруги від частоти падаючого на фотокатод світла.
- 12 Користуючись одержаним графіком, визначити сталу Планка і роботу виходу.
- 13 Провести аналіз одержаних результатів, порівнявши їх з табличними.

References

- 1 Кучерук І.М., Горбачук І.Т. Загальний курс фізики: Т.3.: Оптика. Квантова фізика. - К.: Техніка, 2006.- 518с., стр. 239 - 247.
- 2 Кучерук ІМ, Дущенко В.П. Загальна фізика. Оптика. Квантова фізика. - К.: Вища школа, 1999. - 463с., стр. 260 - 264.
- 3 Горбачук ІТ. Загальна фізика. Лабораторний практикум. - К.: Вища школа, 1992.- 512 с., стр. 434 - 437.
- 4 Методична розробка до роботи.

Завдання для самоконтролю:

- 1 У чому полягає явище фотоефекту?
- 2 Сформулюйте закони фотоефекту.
- 3 Який вигляд має рівняння Ейнштейна для фотоефекту?
- 4 Що таке робота виходу?
- 5 Що таке червона межа фотоефекту?
- 6 Яка будова вакуумного фотоелемента?
- 7 Що таке затримуючий потенціал?
- 8 Чим пояснити наявність струму насичення у вакуумних фотоелементах? Чи буде струм насичення у газонаповнених фотоелементах?
- 9 Який принцип дії фотопомножувача?
- 10 Чи існують явища обернені фотоефекту?

Тестові завдання для вхідного контролю:

1 Під фотоефектом розуміють:

- (a) звільнення електронів з речовини при її освітленні;
- (b) втрату металом позитивного заряду під дією світла;
- (c) утворення в речовині під дією світла пари «електрон-дірка»;
- (d) перерозподіл у речовині під дією світла електронів на енергетичних рівнях.
- (e) перерозподіл у речовині під дією світла електронів на енергетичних рівнях.

Яке з цих тверджень є хибним?

2 Яке з перелічених нижче явищ не може відбуватися під дією світла?

- (a) зовнішній фотоефект;
- (b) ядерний фотоефект;
- (c) внутрішній фотоефект;
- (d) вентильний фотоефект.

3 При фотоефекті проявляються:

- (a) хвильові властивості світла;
- (b) корпускулярні властивості світла;
- (c) дуалістичні властивості світла;
- (d) дотепер невідомі властивості світла.

4 Поверхня деякого тіла освітлюється світлом з частотою ν . Яку енергію може поглинати тіло?

- (a) $0.5h\nu$
- (b) $h\nu$
- (c) $2h\nu$
- (d) будь-яку між $h\nu$ та $2h\nu$

5 Максимальна кінетична енергія вибитих світлом з металу електронів не залежить від:

- (a) частоти падаючого світла;
- (b) освітлюваного металу;
- (c) інтенсивності світла;
- (d) довжини світлової хвилі.

6 Кількість електронів, вибитих світлом за 1 с з металу, залежить від:

- (a) освітлюваного металу;
- (b) частоти світла;
- (c) інтенсивності світла;
- (d) температури металу.

7 Фотоефект може припинитися, якщо:

- (a) збільшити в 2 рази температуру освітлювального металу;
- (b) збільшити в 2 рази відстань між поверхнею металу і джерелом світла;
- (c) зменшити в 2 рази світловий потік;
- (d) зменшити в 2 рази частоту падаючого світла.

8 Інерційність фотоефекта можна визначити за допомогою:

- (a) звичайного секундоміра;
- (b) мікросекундоміра;
- (c) мілісекундоміра;
- (d) наносекундоміра.

9 Падаюче на метал світло викликає фотоефект. Якщо інтенсивність світлового потоку збільшити удвічі, то кінетична енергія фотоелектронів:

- (a) не зміниться;
- (b) збільшиться удвічі;
- (c) збільшиться;
- (d) збільшиться учетверо.

10 Робота виходу електрона з металу:

- (a) $A = h\nu$;
- (b) $A = \frac{hc}{\lambda_{min}}$
- (c) $A = h\nu_{max}$
- (d) $A = \frac{hc}{\lambda_{max}}$

Тестові завдання для підсумкового контролю:

1 Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоелектричного ефекту має вигляд:

- (a) $E = mc^2$
- (b) $h\nu = A + \frac{mv^2}{2}$
- (c) $\frac{mv^2}{2} = Q + h\nu$
- (d) $A = \frac{mv^2}{2} + h\nu$

2 Кількість електронів, вибитих світлом з одиниці поверхні освітлюваного металу за 1 с, залежить від:

- (a) сили світла джерела;
- (b) яскравості джерела світла;
- (c) світлового потоку;
- (d) освітленості поверхні металу.

3 Яке(-і) твердження вірне(-і)?

При фотоелектричному ефекті кінетична енергія вибитих з металу електронів залежить від:

- (a) частоти падаючого світла
- (b) освітлюваного металу
- (c) інтенсивності падаючого світла

4 Довжина хвилі, що відповідає червоній межі фотоелектричного ефекту:

- (a) $\lambda_{max} = \frac{A}{c}$;
- (b) $\lambda_{max} = \frac{A}{h}$;
- (c) $\lambda_{max} = \frac{hc}{A}$;
- (d) $\lambda_{max} = \frac{Ac}{h}$

де A - робота виходу електрона з металу.

5 При зовнішньому фотоелектричному ефекті гальмівна напруга залежить:

- (a) лише від частоти світла;
- (b) лише від інтенсивності світла;
- (c) лише від того металу, який освітлюють;
- (d) як від металу, так і від частоти світла.

6 Величина гальмівної напруги змінюється з частотою світла, яке викликає фотоелектричний ефект:

- (a) у прямій пропорційній залежності;
- (b) у оберненій залежності;
- (c) лінійно;
- (d) за експоненціальним законом.

7 На рисунку 4 наведено графік залежності гальмівної напруги від частоти світла, що діє на деякий метал. Чи можна визначити за цим графіком який це метал?

- (a) не можна, недостатньо даних;
- (b) це може бути платина;
- (c) це срібло;
- (d) це може бути цезій.

8 Який з нижче наведених виразів для визначення гальмівної напруги є принципово хибним?

- (a) $U = \frac{m_e V_{max}^2}{2e}$;
- (b) $U = \frac{A}{e}$;
- (c) $U = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e}$;
- (d) $U = \frac{h}{e} \nu$.

де m_e - маса електрона, e - заряд електрона, V - швидкість фотоелектрона, A - робота виходу електрона з металу, ν - частота світла, що викликає фотоелектричний ефект.

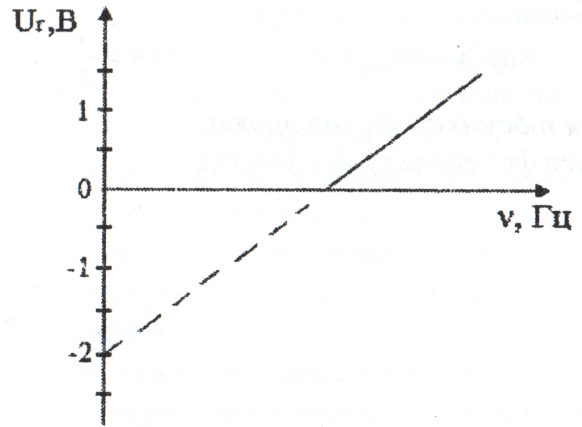


Рис. 4 Графік залежності гальмівної напруги від частоти світла до завдання 7

9 Збільшення інтенсивності падаючого на метал світла призводить до:

- (a) збільшення кінетичної енергії вибіваючих електронів;
- (b) збільшення фотоструму;
- (c) збільшення гальмівної напруги;
- (d) зменшення роботи виходу;

10 Фотоелемент - це пристрій для:

- (a) перетворення світлового сигналу в електричний;
- (b) підсилення світла;
- (c) підсилення фотоструму;
- (d) перетворення електричного сигналу у світловий.

Визначення сталої Планка за даними досліджень: Згідно даних досліджень гальмівна напруга для світових фільтрів:

№	Марка світлофільтра	Гальмівна напруга, Вольт
1	КС-13	0.87
2	ЖС-18	0.42
3	ЗС-1	0.47
4	СС-2	0.48
5	ФС-6	0.49

За формулою (5) визначимо сталу Планка на основі отриманих експериментальних даних:

1 Фільтри КС-13 і ЖС-18

$$h = \frac{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 700 \cdot 10^{-9} \cdot 600 \cdot 10^{-9} \cdot (0.87 - 0.42)}{300 \cdot 10^6 (700 \cdot 10^{-9} - 600 \cdot 10^{-9})} = \frac{302 \cdot 10^3 \cdot 10^{-37}}{300 \cdot 10^6 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = \frac{1}{2} \quad (8)$$

2 Фільтри ЖС-18 і ЗС-1

3 Фільтри КС-13 і ЗС-1