

§ 48. ФОТОЕФЕКТ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

?!

Ще десять років тому більшість людей, почувши термін «сонячні батареї», підсвідомо асоціювали його із системою забезпечення космічного корабля енергією. Але в 2010 р. сумарна потужність «земних» сонячних батарей склала більш ніж 10 ГВт, що можна порівняти з потужністю всіх атомних станцій України. Про те, яке суто наукове відкриття привело до створення цих перспективних джерел електричної енергії, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1

Що таке фотоелектричний ефект і як його спостерігати

Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випусканням електронів, називається **фотоелектричним ефектом**.

Розрізняють: *зовнішній фотоелектричний ефект*, за якого фотоелектрони вилітають за межі тіла, та *внутрішній фотоелектричний ефект*, за якого електрони, «вирвані» світлом з молекул та атомів, залишаються всередині речовини.

Зовнішній фотоелектричний ефект легко спостерігати за допомогою електрометра з прикріпленою до нього цинковою пластинкою (рис. 48.1, а). Якщо пластині передати від'ємний заряд й освітити її ультрафіолетовим випромінюванням, то електрометр дуже швидко розрядиться. У разі позитивного заряду пластини такий ефект не спостерігається. Пояснити це можна тим, що під дією ультрафіолетового світла пластинка випускає електрони (рис. 48.1, б). Якщо пластинка заряджена негативно, то електрони відштовхуються від неї, і електрометр розряджається. Якщо пластинка заряджена позитивно, випущені електрони притягуються до пластини і повертаються назад, тому заряд електрометра не змінюється.

Зовнішній фотоелектричний ефект відкрив німецький фізик Г. Герц у 1887 р., а детально дослідив російський вчений Олександр Григорович Столетов (1839–1896) у 1888–1890 роках.

2 Закони фотоелектричного ефекту

Для вивчення фотоелектричного ефекту можна використати пристрій, схематичне зображення якого наведено на рис. 48.2. Всередині камери, з якої викачане повітря, розташовані два електроди (анод А і катод К), на які подається напруга від джерела постійного струму. Крізь кварцове віконце падає світловий пучок, під дією якого катод К випускає електрони. Рухаючись в електричному полі від катода до анода, електрони створюють

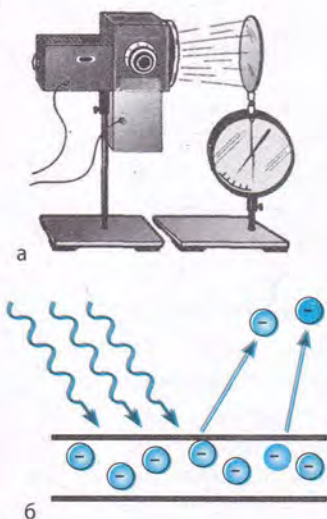


Рис. 48.1. Зовнішній фотоелектричний ефект: а — спостереження; б — механізм явища

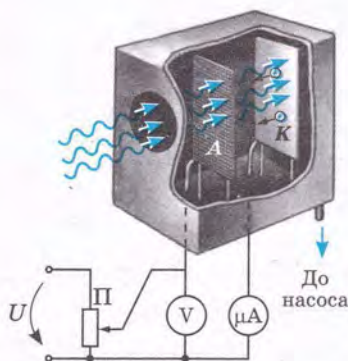


Рис. 48.2. Схема дослідів для вивчення фотоелектричного ефекту

фотострум, сила якого вимірюється мікроамперметром μA . Якщо за допомогою потенціометра Π змінювати напругу на електродах, то сила фотоструму теж змінюватиметься.

На рис. 48.3 наведені графіки залежності сили фотоструму I від напруги U на електродах $I(U)$. З графіків бачимо, що за певної напруги сила фотоструму досягає максимального значення і далі залишається постійною. Зрозуміло, що це відбувається тоді, коли всі електрони, які випускає катод, досягають анода.

Найбільше значення сили фотоструму називають **силою струму насичення** I_n :

$$I_n = \frac{q_{\max}}{t} = \frac{N|e|}{t},$$

де q_{\max} — максимальний заряд, перенесений фотоелектронами; N — число вибитих електронів; e — заряд електрона; t — час спостереження.

Зі зменшенням напруги між електродами сила струму зменшується. Але навіть коли напруга між електродами досягне нуля, струм не зникне. Це можна пояснити тим, що фотоелектрони мають початкову швидкість, тому деякі з них досягають анода й за відсутності поля. Щоб виміряти цю швидкість, пластину A з'єднують з негативним полюсом джерела струму, а пластину K — з позитивним. У цьому випадку електричне поле гальмує електрони. При досягненні певної **затримуючої напруги** U_3 фотострум припиняється. Згідно із законом збереження енергії:

$$\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3,$$

де m — маса електрона; v_{\max} — максимальна початкова швидкість фотоелектрона.

Дослід показує, що затримуюча напруга (а отже, й початкова швидкість фотоелектронів) зменшується у разі збільшення довжини (зменшення частоти) падаючої на катод світлової хвилі; за певної довжини хвилі фотоефект припиняється.

Змінюючи по черзі інтенсивність та частоту падаючого світла, а також матеріал, з якого виготовлений катод, встановили такі **закони зовнішнього фотоефекту**:

1. Число фотоелектронів, що випускає катод за одиницю часу, прямо пропорційне інтенсивності світла.
2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується при збільшенні частоти падаючого світла й не залежить від інтенсивності світла.

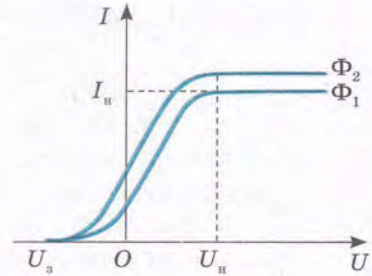


Рис. 48.3. Графік залежності сили фотоструму від напруги на електродах за незмінної частоти падаючої світлової хвилі і різних значень світлового потоку Φ : $\Phi_2 > \Phi_1$

3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі $\lambda_{\text{черв}}$ (червона межа фотоефекту), за якої починається фотоефект. Опромінення речовини світловими хвилями більшої довжини фотоефекту не викликає.

Якщо перший закон фотоефекту можна було пояснити в межах класичної електромагнітної теорії світла, то наступні два закони прямо суперечили уявленням, що існували на той момент. Знадобилося більш ніж 20 років і геніальність двох фізиків — М. Планка та А. Ейнштейна, щоб розгадати цю загадку.

3 За що Ейнштейн одержав Нобелівську премію

Робота виходу
електронів $A_{\text{вих}}$
($1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ Дж}$)

Речовина	$A_{\text{вих}}, \text{eV}$
Вольфрам	4,5
Калій	2,2
Літій	2,4
Мідь	4,7
Платина	6,35
Срібло	4,3
Цинк	4,2

Для пояснення законів фотоефекту А. Ейнштейн використав ідею М. Планка. На той час було відомо, що кожній речовині відповідає своя робота виходу $A_{\text{вих}}$ (таблиця), тобто кожний метал характеризується певною енергією, яку треба передати електрону для того, щоб він зміг подолати сили, які утримують його всередині зразка. Вчений припустив, що внаслідок поглинання фотона металом енергія фотона ($E = h\nu$) може бути цілком передана електрону й витратитися лише на здійснення роботи виходу $A_{\text{вих}}$ та надання електрону кінетичної енергії $E_{\text{к. max}}$.

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:

$$h\nu = A_{\text{вих}} + E_{\text{к. max}} \quad \text{або} \quad h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv^2}{2}$$

Рівняння Ейнштейна дає можливість пояснити всі наведені закони фотоефекту:

1) більша інтенсивність світла означає більшу кількість фотонів, які, поглинаючись електронами речовини, сприяють їхньому випусканню;

2) електрон може поглинати тільки один фотон (більше — лише за дуже великої інтенсивності світла), тому максимальна кінетична енергія електрона визначається тільки енергією фотона, а отже, частотою світла й не залежить від інтенсивності;

3) максимальна довжина світлової хвилі (мінімальна частота) відповідає мінімальній енергії фотона: якщо $h\nu < A_{\text{вих}}$, то електрони не вилітатимуть із речовини. Умова $h\nu_{\text{min}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{черв}}} = A_{\text{вих}}$ визначає червону межу фотоефекту (граничну частоту).

Саме за пояснення явища фотоефекту А. Ейнштейн одержав найвищу наукову нагороду — Нобелівську премію.

4 Де і як застосовують фотоефект

Фотоефект отримав широке застосування у пристроях для перетворення світлових сигналів на електричні або для безпосереднього перетворення світлової енергії на електричну. Існують два великі класи таких пристроїв: *вакуумні фотоелементи* (рис. 48.4), дія яких ґрунтується на зовнішньому фотоефекті, і *напівпровідникові фотоелементи* та *фоторезистори* — їхня дія заснована на внутрішньому фотоефекті. ★

Властивість фотоелемента майже миттєво реагувати на світлову дію або її зміну використовують у різноманітних *фотореле*. Фотореле слугують для автоматичного вмикання і вимикання освітлення, сортування деталей за формою й кольором, у системах безпеки, наприклад для зупинки потужного преса, якщо рука людини опинилась в небезпечній зоні, тощо.

Фотоелементи застосовують також у надчутливих *фотоприймачах*, які перетворюють слабкі світлові сигнали на електричні. Особливо масово застосовують такі чутливі датчики в цифрових фотоапаратах. Замість фотоплівки такий фотоапарат має напівпровідникову пластинку (матрицю), яка складається з великої кількості напівпровідникових фотоелементів. Кожен із цих елементів приймає «свою» частину світлового потоку, перетворює її на електричний сигнал і передає його у відповідне місце екрана. Фотозйомка таким апаратом являє собою не що інше, як запам'ятовування масиву сигналів.

Енергетичні застосування фотоефекту пов'язані насамперед із *сонячними батареями*. Крім невеликих електростанцій на одну родину, останнім часом стали створювати й великі «енергетичні поля» із сонячних батарей. Типова потужність однієї такої станції становить 20 МВт. Більшість із вас бачили автономний «грибок» на сонячних батареях, який, зарядившись за день, увечері й уночі освітлює доріжку в саду. Промислове застосування подібних пристроїв дозволяє практично безкоштовно освітлювати автомобільні траси.

5 Учимося розв'язувати задачі

Задача. Цинкова пластинка освітлюється монохроматичним світлом із довжиною хвилі 300 нм. Якого максимального потенціалу набуде пластинка? Червона межа фотоефекту для цинку $\lambda_{\text{черв}} = 332$ нм.

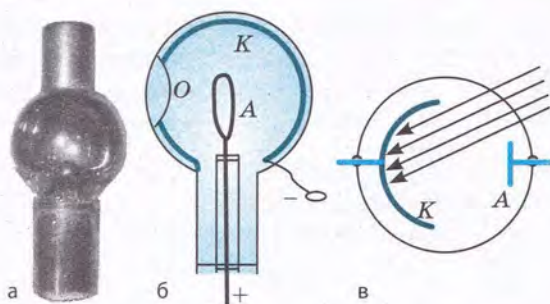


Рис. 48.4. Вакуумний фотоелемент: а — зовнішній вигляд; б — будова; в — схематичне позначення. У скляному балоні закріплене металеве кільце — анод А; внутрішня поверхня балона, за винятком невеликого віконця О, вкрита світлочутливим шаром металу, що слугує катодом К

φ — ?

Дано:

$$\lambda = 3,00 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$\lambda_{\text{черв}} = 3,32 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$$

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

Аналіз фізичної проблеми

Пластина припиняє витратити електрони, коли останні повністю затримуються електричним полем пластини, яка завдяки фотоефекту набуває позитивного заряду. Вважаючи, що потенціал точок поля на достатній відстані від пластини дорівнює нулю, маємо: $U_a = \varphi$.

Пошук математичної моделі, розв'язання

Відповідно до формули Ейнштейна: $h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$,

де $A_{\text{вих}} = h\nu_{\text{мін}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{черв}}}$, $\frac{mv_{\text{max}}^2}{2} = |e|U_a$, $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

Враховуючи, що $U_a = \varphi$, маємо: $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{\text{черв}}} + |e|\varphi$.

$$\text{Отже, } \varphi = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_{\text{черв}}}}{|e|} = \frac{hc}{|e|} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\text{черв}}} \right).$$

Визначимо значення шуканої величини:

$$[U] = \frac{\frac{\text{Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м}}{\text{Кл}}}{\frac{\text{м}}{\text{м}}} \cdot \left(\frac{1}{\text{м}} - \frac{1}{\text{м}} \right) = \frac{\text{Дж} \cdot \text{м}}{\text{Кл} \cdot \text{м}} = \frac{\text{Дж}}{\text{Кл}} = \text{В};$$

$$\{U\} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,0 \cdot 10^8}{1,6 \cdot 10^{-19}} \cdot \left(\frac{1}{3,00 \cdot 10^{-7}} - \frac{1}{3,32 \cdot 10^{-7}} \right) \approx 0,40; U = 0,40 \text{ В}.$$

Відповідь: максимальний потенціал пластини $U = 0,40 \text{ В}$.



Підбиваємо підсумки

Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випусканням електронів, називається фотоефектом.

Експериментально встановлено три закони фотоефекту:

1. Число фотоелектронів, що випускає катод за одиницю часу, прямо пропорційне інтенсивності світла.

2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується при збільшенні частоти падаючого світла й не залежить від інтенсивності світла.

3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі $\lambda_{\text{черв}}$ (червона межа фотоефекту), за якої починається фотоефект. Опромінення речовини світловими хвилями більшої довжини фотоефекту не викликає.

Пояснити всі три закони з позицій квантової теорії дозволила формула Ейнштейна для фотоефекту: $h\nu = \frac{mv_{\text{max}}^2}{2} + A_{\text{вих}}$.

Фотоефект використовується в різних датчиках для систем керування й безпеки. Основна галузь використання внутрішнього фотоефекту — сонячні батареї.



Контрольні запитання

1. Дайте визначення фотоефекту. 2. Чим відрізняється внутрішній фотоефект від зовнішнього? 3. Опишіть пристрій для вивчення фотоефекту. 4. Які фізичні величини вимірюються під час експерименту? Як подається його результат? 5. Які висновки можна зробити, аналізуючи вольт-амперну характеристику фотоефекту? Які фізичні величини можна визначити за цим графіком? 6. Сформулюйте закони фотоефекту. 7. Запишіть формулу Ейнштейна для фотоефекту і поясніть її фізичну сутність. 8. Що називають червоною межею фотоефекту? Як її визначити? 9. Які ви знаєте приклади застосування фотоефекту?



Вправа № 36

- Електрон виходить із цезію з максимальною кінетичною енергією 2 еВ. Яка частота світла, що опромінює цезій, якщо робота виходу дорівнює 1,8 еВ?
- На рис. 48.3 подано вольт-амперну характеристику фотоефекту. Накресліть вольт-амперні характеристики: 1) у разі збільшення частоти падаючого випромінювання; 2) у разі зменшення падаючого світлового потоку.
- Яка максимальна кінетична енергія фотоелектронів, «вирваних» із калієвого фотокатода фіолетовим світлом із довжиною хвилі 420 нм?
- Визначте максимальну швидкість фотоелектрона, що вилетів із срібла внаслідок освітлення його ультрафіолетовим випромінюванням із довжиною хвилі 155 нм.
- Знайдіть частоту світла, якщо електрони, «вирвані» цим світлом з поверхні металу, повністю затримуються напругою 2,0 В. Фотоефект у цьому металі починається за частоти падаючого світла $6,0 \cdot 10^{14}$ Гц. Яка робота виходу електрона для цього металу?
- За графіком залежності затримуючої напруги від частоти падаючого світла (рисунок) знайдіть сталу Планка.

