

§ 34. ФОТОЕФЕКТ. ЗАКОНИ ФОТОЕФЕКТУ



Ще двадцять років тому в більшості людей словосполучення «сонячні батареї» асоціювалось із системою забезпечення космічного корабля енергією. Але вже в 2016 р. сумарна потужність «земних» сонячних батарей склала понад 100 ГВт, що майже в 10 разів більше, ніж потужність усіх атомних електростанцій України. Про те, яке наукове відкриття привело до створення цих перспективних джерел електричної енергії, ви дізнаєтесь із цього параграфа.

1 Фотоефект і його спостереження

Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випромінюванням (емісією) електронів, називають **фотоефектом**.

Розрізняють *зовнішній фотоефект*, за якого фотоелектрони вилітають за межі тіла, і *внутрішній фотоефект*, за якого електрони, «вирвані» світлом із молекул і атомів, залишаються всередині тіла.

Зовнішній фотоефект можна спостерігати за допомогою електрометра з прикріпленою до нього цинковою пластинкою (рис. 34.1, а). Якщо пластині передати від'ємний заряд і освітлювати її ультрафіолетовим випромінюванням, стрілка електрометра швидко опускається, що свідчить про швидке розрядження пластини. У разі позитивного заряду пластини такий ефект не спостерігається. Пояснити це можна тим, що, поглинаючи кванти ультрафіолетового випромінювання, пластинка висилає електрони (рис. 34.1, б). Якщо пластинка заряджена негативно, то електрони відштовхуються від неї й пластинка втрачає заряд.

❓ Чому показ електрометра майже не змінюється, якщо пластинка заряджена позитивно?

2 Закони фотоефекту

Зовнішній фотоефект відкрив німецький фізик *Г. Герц* у 1887 р., а детально дослідив російський учений *Олександр Григорович Столетов* (1839–1896) у 1888–1890 рр. Для вивчення фотоефекту О. Г. Столетов використав пристрій, сучасне зображення якого схематично наведено на рис. 34.2. Усередині камери, з якої викачано повітря, розташовані два електроди (катод К і анод А), на які подається напруга від джерела постійного струму.

Крізь кварцове віконце падає світло, під дією якого катод випромінює електрони. Рухаючись в електричному полі від катода до анода, електрони створюють **фотострум**, сила якого вимірюється мікроамперметром. Якщо за допомогою потенціометра П збільшувати напругу на електродах, сила фотоструму теж збільшується (рис. 34.3).

Із рис. 34.3 бачимо, що за певної напруги сила фотоструму досягає максимального значення і далі залишається незмінною. Це відбувається

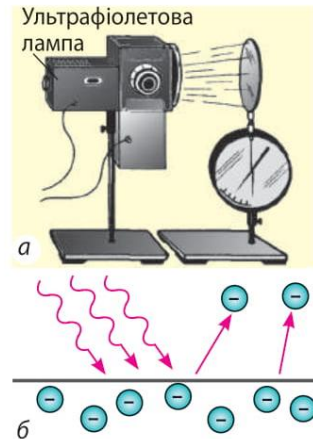


Рис. 34.1. Зовнішній фотоефект: а — спостереження; б — механізм явища

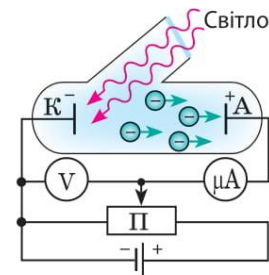


Рис. 34.2. Схема досліду для вивчення фотоефекту

Зі збільшенням світлового потоку ($\Phi_2 > \Phi_1$) кількість електронів, що їх «вибиває» світло з поверхні катода, збільшується, тому збільшується струм насичення

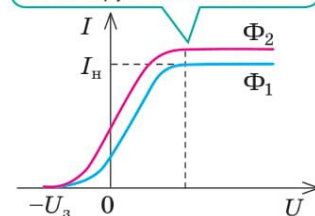


Рис. 34.3. Графік залежності сили фотоструму I від напруги U на електродах за незмінної частоти падаючої світлової хвилі і різних значень світлового потоку Φ

Зі збільшенням частоти світлової хвилі ($\nu_2 > \nu_1$) затримуюча напруга U_3 (а отже, й максимальна початкова швидкість фотоелектронів) збільшується ($U_{32} > U_{31}$)

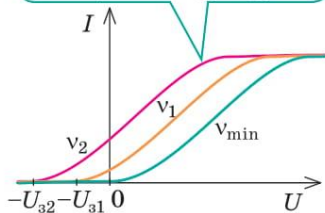


Рис. 34.4. Графік залежності сили фотоструму I від напруги U на електродах за незмінного світлового потоку і різних значень частоти випромінювання, що падає на фотокатод

Закони зовнішнього фотоефекту

Перший закон. Кількість фотоелектронів, яку випромінює катод за одиницю часу, прямо пропорційна інтенсивності світла.

Другий закон. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується зі збільшенням частоти падаючого світла і не залежить від інтенсивності світла.

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

тоді, коли всі електрони, які випромінює катод, досягають анода.

Найбільше значення сили фотоструму називають **силою струму насичення** $I_{\text{н}}$:

$$I_{\text{н}} = \frac{q_{\text{max}}}{t} = \frac{Ne}{t},$$

де q_{max} — заряд, перенесений фотоелектронами за час t ; N — кількість «вибитих» електронів; e — модуль заряду електрона.

Зі зменшенням напруги між електродами сила фотоструму зменшується (див. рис. 34.3). Але навіть коли напруга між електродами досягне нуля, струм не зникне, адже фотоелектрони мають певну початкову швидкість, тому ті з них, що вилетіли в напрямку анода, досягнуть його й за відсутності поля. Щоб виміряти цю швидкість, анод з'єднують із негативним полюсом джерела струму, а катод — із позитивним. У цьому випадку електричне поле виконує від'ємну роботу і гальмує електрони. З досягненням певної **затримуючої (запірної) напруги** U_3 навіть найшвидші електрони не дістануться анода, а отже, *фотострум припиниться*. Згідно з теоремою про кінетичну енергію робота електростатичного поля дорівнює зміні кінетичної енергії фотоелектрона ($A_{\text{ел}} = \Delta E_{k\text{max}}$):

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

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

Дослід показує, що *затримуюча напруга* (а отже, й початкова швидкість фотоелектронів) *збільшується в разі збільшення частоти світлової хвилі, яка падає на катод, і зменшується в разі зменшення її частоти*; за певної частоти світлової хвилі фотоефект припиняється (рис. 34.4).

Змінюючи по черзі інтенсивність і частоту падаючого світла, а також матеріал, з якого виготовлений катод, О. Г. Столетов установив *три закони зовнішнього фотоефекту* (див. текст ліворуч).

3

За що А. Ейнштейн одержав Нобелівську премію

Якщо перший закон фотоефекту можна було пояснити в межах класичної електромагнітної теорії

світла, то наступні два закони прямо суперечили уявленням, які існували на той час. Знадобилося понад 20 років і геніальність двох фізиків — М. Планка і А. Ейнштейна, щоб розгадати цю «загадку». Саме ідею Планка про кванти використав Ейнштейн для пояснення законів фотоефекту. Тоді вже було відомо, що кожному металу відповідає своя *робота виходу* (див. таблицю):

Робота виходу $A_{\text{вих}}$ — це фізична величина, що характеризує метал і дорівнює енергії, яку треба передати електрону для того, щоб він зміг подолати сили, які утримують його на поверхні цього металу.

А. Ейнштейн припустив: *унаслідок поглинання фотона металом енергія фотона ($E_{\text{ф}} = h\nu$) може бути повністю передана електрону й витратитися на здійснення роботи виходу $A_{\text{вих}}$ та надання електрону кінетичної енергії $E_{k\text{max}}$.*

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:

$$E_{\text{ф}} = A_{\text{вих}} + E_{k\text{max}}, \text{ або } h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\text{max}}^2}{2}$$

Рівняння Ейнштейна дає можливість пояснити всі закони зовнішнього фотоефекту. Саме за пояснення явища фотоефекту А. Ейнштейн одержав найвищу наукову нагороду — Нобелівську премію (1921 р.).

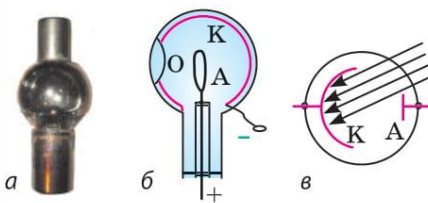
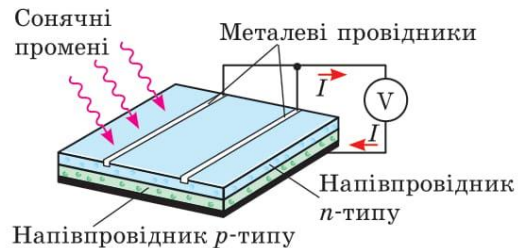
Робота виходу електронів із поверхні деяких металів
(1 eV = $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж)

Метал	$A_{\text{вих}}$, eV
Вольфрам	4,5
Золото	4,3
Калій	2,2
Кобальт	4,4
Літій	2,4
Мідь	4,7
Нікель	4,5
Платина	6,35
Срібло	4,3
Хром	4,6
Цезій	1,8
Цинк	4,2

Закони фотоефекту	Пояснення
1. Кількість фотоелектронів, що їх випромінює катод за одиницю часу, прямо пропорційна інтенсивності світла.	Більша інтенсивність світла означає більшу кількість фотонів, які падають на катод. Поглинаючись електронами речовини, фотони сприяють випромінюванню електронів.
2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується в разі збільшення частоти падаючого світла і не залежить від інтенсивності світла.	<i>Електрон може поглинути тільки один фотон</i> (більше — лише за дуже великої інтенсивності світла), тому максимальна кінетична енергія електрона визначається тільки енергією фотона, а отже, частотою світла і не залежить від кількості фотонів.
3. Для кожної речовини існує максимальна довжина світлової хвилі $\lambda_{\text{max}} = \lambda_{\text{черв}}$ (червона межа фотоефекту), за якої починається фотоефект. Опромінення речовини світловими хвилями, які мають більшу довжину, фотоефекту не викликає.	Максимальна довжина світлової хвилі (мінімальна частота) відповідає мінімальній енергії фотона: якщо $h\nu < A_{\text{вих}}$, то електрони не вилітатимуть із речовини. Умова $h\nu_{\text{min}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{max}}} = A_{\text{вих}}$ визначає червону межу фотоефекту.

4 Де і як застосовують фотоэффект

Фотоэффект 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 та напівпровідникові фотоелементи*.

Вакуумні фотоелементи	Напівпровідникові фотоелементи
Дія вакуумних фотоелементів ґрунтується на <i>зовнішньому фотоэффекті</i> .	Дія напівпровідникових фотоелементів заснована на <i>внутрішньому фотоэффекті</i> .
Вакуумні фотоелементи здебільшого застосовують у різноманітних <i>фотореле</i> (для автоматичного вмикання і вимикання освітлення, сортування деталей за формою і кольором, у системах безпеки тощо) і <i>вимірювальних приладах</i> (для вимірювання освітленості, вимірювання потужності імпульсних оптичних сигналів і т. ін.). Нижче подано вигляд (а), будову (б) і схематичне позначення (в) <i>вакуумного фотоелемента</i> .	Напівпровідникові фотоелементи застосовують у чутливих <i>фотоприймачах</i> , які перетворюють слабкі світлові сигнали на електричні; у <i>сонячних батареях</i> , в яких сонячна енергія перетворюється на електричну.
 Вакуумний фотоелемент має таку будову: у скляному балоні, з якого відкачано повітря, закріплене металеве кільце — анод А; внутрішня поверхня балона, за винятком невеликого віконця О, вкрита світлочутливим шаром металу, що слугує катодом К. Коли через віконце на катод потрапляє світло, катод випромінює електрони, які прямують до анода, й електричне коло, що містить фотоелемент, замикається.	 Напівпровідниковий фотоелемент складається із двох пластин (шарів), які виготовлені з напівпровідників різного типу провідності — електронної (напівпровідник <i>n</i>-типу) і діркової (напівпровідник <i>p</i>-типу). Світло, що падає на <i>n</i>-шар, «вибиває» електрони із кристалічної ґратки. «Звільнені» електрони прямують у <i>p</i>-шар, де займають вільні дірки. Унаслідок цього процесу між шарами виникає різниця потенціалів. Фотоприймачі застосовують у <i>цифрових фотоапаратах</i> — їхня матриця складається з великої кількості напівпровідникових фотоелементів, кожен з яких приймає «свою» частину світлового потоку, перетворює її на електричний сигнал і передає його у відповідне місце екрана. Застосування фотоэффекту в енергетиці пов'язане насамперед із <i>сонячними батареями</i>.

5 Учимся розв'язувати задачі

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

Аналіз фізичної проблеми. Пластина припиняє втрачати електрони, коли електрони повністю затримуються електричним полем пластини, яка завдяки фотоефекту набуває позитивного заряду. Вважаючи, що потенціал точок поля на достатній відстані від пластини дорівнює нулю, маємо: $U_3 = \phi$.

Дано:

$$\begin{aligned}\lambda &= 3,00 \cdot 10^{-7} \text{ м} \\ \lambda_{\max} &= 3,32 \cdot 10^{-7} \text{ м} \\ e &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \\ h &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ c &= 3,0 \cdot 10^8 \text{ м/с}\end{aligned}$$

ϕ — ?

Пошук математичної моделі, розв'язання.

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

де $\nu = \frac{c}{\lambda}$, $A_{\text{вих}} = \frac{hc}{\lambda_{\max}}$, $\frac{mv_{\max}^2}{2} = eU_3$.

Урахувавши, що $U_3 = \phi$, маємо: $\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_{\max}} + e\phi$, отже:

$$\phi = \frac{\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda_{\max}}}{e} = \frac{hc}{e} \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right).$$

Перевіримо одиницю, знайдемо значення шуканої величини:

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

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

Відповідь: $\phi \approx 0,40 \text{ В}$.



Підбиваємо підсумки

• Явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випромінюванням електронів, називають фотоефектом.

• Експериментально встановлено три закони фотоефекту.

1. Кількість фотоелектронів, що їх випромінює катод за одиницю часу, прямо пропорційна інтенсивності світла.

2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується зі збільшенням частоти падаючого світла й не залежить від інтенсивності світла.

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

• Пояснити закони фотоефекту з позицій квантової теорії дозволило рівняння А. Ейнштейна для фотоефекту: $E_{\phi} = A_{\text{вих}} + E_{k\max}$, або $h\nu = A_{\text{вих}} + \frac{mv_{\max}^2}{2}$.

• Фотоефект використовують у різних датчиках для систем керування і безпеки. На сьогодні основна галузь використання внутрішнього фотоефекту — виробництво сонячних батарей.



Контрольні запитання

1. Дайте означення фотоефекту. 2. Чим внутрішній фотоефект відрізняється від зовнішнього? Де їх застосовують? 3. Опишіть пристрій для вивчення фотоефекту. Які фізичні величини вимірюють під час експерименту? Як подають його результати? 4. Які висновки можна зробити, проаналізувавши вольт-амперну характеристику фотоефекту? Які фізичні величини можна визначити за цим графіком? 5. Сформулюйте закони фотоефекту та поясніть їх, спираючись на рівняння А. Ейнштейна для фотоефекту.



Вправа № 34

1. Схему якого дослідів зображено на рис. 1? Хто першим провів цей дослід? Які явища спостерігав учений?
2. Фотони з енергією 3,4 еВ спричиняють фотоефект із поверхні цезію. Якою є максимальна кінетична енергія фотоелектронів?
3. Енергія фотонів, що падають на фотокатод, утричі більша за роботу виходу електронів з поверхні матеріалу, із якого виготовлений фотокатод. Знайдіть відношення максимальної кінетичної енергії фотоелектронів до роботи виходу.
4. Якою є червона межа фотоефекту для цезію? Чи спостерігатиметься фотоефект, якщо зразок, виготовлений із цезію, освітлювати видимим світлом?
5. На рис. 2 подано вольт-амперну характеристику фотоефекту для деякого металу. Побудуйте вольт-амперну характеристику для цього металу 1) в разі збільшення частоти падаючого випромінювання; 2) в разі зменшення падаючого світлового потоку.
6. Визначте максимальну кінетичну енергію фотоелектронів, «вирваних» із калієвого фотокатода фіолетовим світлом із довжиною хвилі 420 нм.
7. Червона межа фотоефекту для певного металу відповідає довжині хвилі 600 нм. Якою є частота випромінювання, що спричиняє емісію фотоелектронів, кінетична енергія яких утричі більша за роботу виходу?
8. Знайдіть частоту світла, якщо електрони, «вирвані» цим світлом із поверхні металу, повністю затримуються напругою 2,0 В. Фотоефект у цьому металі починається за частоти падаючого світла $6 \cdot 10^{14}$ Гц.
9. За графіком залежності затримуючої напруги від частоти падаючого світла (рис. 3) знайдіть сталу Планка.
10. Сонячні батареї на сьогодні є одним із найперспективніших джерел електричної енергії. Дізнайтесь, у яких країнах ця галузь енергетики розвивається найкраще. Якими є перспективи її розвитку в Україні?

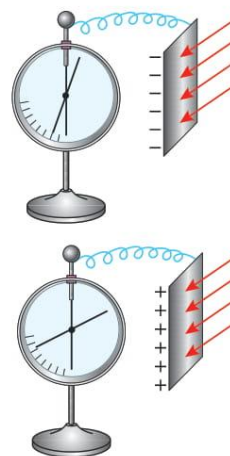


Рис. 1

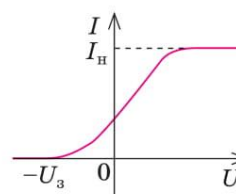


Рис. 2

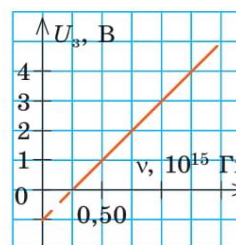


Рис. 3

ПРОФЕСІЇ МАЙБУТНЬОГО



Фахівець із розробки, монтажу, обслуговування сонячних електростанцій

Ще двадцять років тому застосування альтернативних джерел енергії виглядало як дивацтво. А зараз уже є країни, де виробництво електричної енергії за допомогою альтернативних джерел, перш за все сонячних батарей, перевищує 50% у загальному балансі. І ця тенденція буде зберігатися. Тож наш наступний прогноз щодо професії майбутнього — фахівці з розробки, монтажу, обслуговування сонячних електростанцій.