Фізика 11Урок 68 Фотоефект. Закони фотоефекту

Мета уроку:

Навчальна. Роз'яснити учням явище фотоефекту й зміст його законів.

Розвивальна. Розвивати пізнавальні навички учнів; вміння аналізувати навчальний матеріал, умову задачі, хід розв'язання задач; вміння стисло і грамотно висловлювати свої міркування та обґрунтовувати їхню правильність.

Виховна. Виховувати уважність, зібраність, спостережливість.

Тип уроку: урок вивчення нового матеріалу.

Наочність і обладнання: навчальна презентація, комп'ютер, підручник.

Хід уроку

I. ОРГАНІЗАЦІЙНИЙ ЕТАП

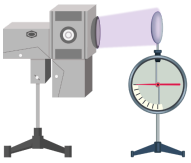
II. АКТУАЛІЗАЦІЯ ОПОРНИХ ЗНАНЬ ТА ВМІНЬ

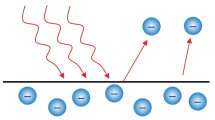
Ще двадцять років тому в більшості людей словосполучення «сонячні батареї» асоціювалось із системою забезпечення космічного корабля енергією. Але вже в 2016 р. сумарна потужність «земних» сонячних батарей склала понад 100 ГВт, що майже в 10 разів більше, ніж потужність усіх атомних електростанцій України.

Яке наукове відкриття привело до створення сонячних батарей?

III. ВИВЧЕННЯ НОВОГО МАТЕРІАЛУ

1. Фотоефект





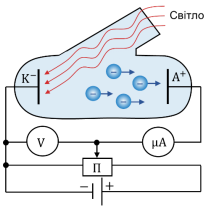
Фотоефект – це явище взаємодії світла з речовиною, яке супроводжується випромінюванням (емісією) електронів.

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 пластиною. 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, пластина висилає електрони. Якщо пластина заряджена негативно, то електрони відштовхуються від неї й пластина втрачає заряд.

2. Закони зовнішнього фотоефекту

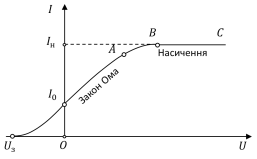
Зовнішній фотоефект відкрив німецький фізик *Г. Герц* у 1887 р., а детально дослідив російський учений *Олександр Григорович Столетов* (1839-1896) у 1888-1890 рр.



Досліди Столетова

Для вивчення фотоефекту О. Г. Столетов використав пристрій, сучасне зображення якого схематично наведено на рисунку.

Всередині камери, з якої викачане повітря, розташовані два електроди (анод А і катод К). На електроди подається напруга від джерела струму, яка регулюється. Світловий пучок, який падає на катод, «вириває» з його поверхні електрони. Рухаючись від катода до анода, фотоелектрони створюють ***фотострум***, сила якого сила якого вимірюється мікроамперметром.



Якщо побудувати графік залежності сили фотоструму від поданої напруги то можна побачити:

1) За певної напруги сила фотоструму досягає максимального значення і далі залишається незмінною. Це відбувається тоді, коли всі електрони, які випромінює катод, досягають анода.

Сила струму насичення $I_н$ – це найбільше значення сили фотоструму.

$$I_{\text{н}} = \frac{q_{max}}{t} = \frac{N|e|}{t}$$

q_{max} – заряд, перенесений фотоелектронами; N – кількість «вибитих» електронів; e – заряд електрона; t – час спостереження.

2) Зі зменшенням напруги між електродами сила фотоструму зменшується. При відсутності напруги між електродами фотострум не зникає. Це можна пояснити наявністю у фотоелектронів певної кінетичної енергії.

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2}$$

m_e – маса електрона; v – швидкість, яку має електрон, в момент «відриву» від катода.

3) Якщо катод з'єднати з позитивним полюсом джерела струму, а анод – із негативним, то електричне поле буде гальмувати електрони, і при досягненні певної **затримуючої (запірної) напруги** $U_{\text{з}}$ навіть найшвидші електрони не дістануться анода, а отже, фотострум припиниться. Згідно з теоремою про кінетичну енергію робота електростатичного поля дорівнює зміні кінетичної енергії фотоелектрона $\left(A_{\text{ел}} = \Delta E_{k\,max}\right)$:

$$|e|U_{\text{з}} = \frac{m_e v_{max}^2}{2}$$

m_e – маса електрона; v_{max} – максимальна початкова швидкість фотоелектрона.

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

Закони зовнішнього фотоефекту:

1. Кількість фотоелектронів, яку випромінює катод за одиницю часу, прямо пропорційна інтенсивності світла.
2. Максимальна початкова швидкість фотоелектронів збільшується зі збільшенням частоти падаючого світла і 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.

Робота виходу електронів поверхні деяких металів

$1\ \text{еВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

Метал	$A_{\text{вих}}$, еВ
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

3. Квантове пояснення фотоефекту

Для пояснення законів фотоефекту А. Ейнштейн використав ідею М. Планка. На той час було відомо, що кожній речовині відповідає своя робота виходу.

Робота виходу $A_{вих}$ – 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* $\left(E_ф = h\nu\right)$ *може бути повністю передана електрону й витратитися на здійснення роботи виходу* $A_{вих}$ *та надання електрону кінетичної енергії* $E_{k\,max}$.

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:

$$E_ф = A_{вих} + E_{k\,max} \qquad h\nu = A_{вих} + \frac{m_e v^2_{max}}{2}$$

Рівняння Ейнштейна дає можливість пояснити всі закони зовнішнього фотоефекту:

1. Більша інтенсивність світла означає більшу кількість фотонів, які падають на катод. Поглинаючись електронами речовини, фотони сприяють випромінюванню електронів.

2. *Електрон може поглинути тільки один фотон* (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. Максимальна довжина світлової хвилі (мінімальна частота) відповідає мінімальній енергії фотона: якщо $h\nu < A_{вих}$, то електрони не вилітатимуть із речовини. Умова $h\nu_{min} = \frac{hc}{\lambda_{max}} = A_{вих}$ визначає *червону межу фотоефекту*.

Саме за пояснення явища фотоефекту А. Ейнштейн одержав найвищу наукову нагороду – Нобелівську премію (1921 р.).

4. Застосування фотоефекту

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

Дія вакуумних фотоелементів ґрунтується на *зовнішньому фотоефекті.*

Вакуумні фотоелементи здебільшого застосовують у різноманітних *фотореле* (для автоматичного вмикання і вимикання освітлення, сортування деталей за формою і кольором, у системах безпеки тощо) і вимірювальних приладах (для вимірювання освітленості, вимірювання потужності імпульсних оптичних сигналів).

Напівпровідникові фотоелементи

Дія напівпровідникових фотоелементів заснована на *внутрішньому фотоефекті*.

Напівпровідникові фотоелементи застосовують у чутливих *фотоприймачах*, які перетворюють слабкі світлові сигнали на електричні; у *сонячних батареях*, в яких сонячна енергія перетворюється на електричну.

Фотоприймачі застосовують у *цифрових фотоапаратах* – 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 фотоефекту в енергетиці пов’язане насамперед із *сонячними батареями*.

IV. ЗАКРІПЛЕННЯ НОВИХ ЗНАНЬ І ВМІНЬ

1. Як зміниться робота виходу фотоелектронів з металу при збільшенні частоти падаючого світла? (Не зміниться)

2. Фотон вибиває з металу, для якого робота виходу дорівнює 3 еВ, електрон з енергією 2 еВ. Яка мінімальна енергія такого фотона?

Дано:

$A_{\text{вих}} = 3$ еВ

$E_{k\,max} = 2$ еВ

$E_{\text{ф}} - ?$

Розв'язання

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:

$$E_{\text{ф}} = A_{\text{вих}} + E_{k\,max} \qquad E_{\text{ф}} = 3 + 2 = 5\ (\text{еВ})$$

Відповідь: $E_{\text{ф}} = 5$ еВ.

3. Червона межа фотоефекту для деякого матеріалу 150 нм. Знайдіть роботу виходу електронів із даного матеріалу.

Дано:

$\lambda_{max} = 150\ \text{нм} = 1,5{\cdot}10^{-7}$ м

$c = 3{\cdot}10^{8}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$h = 6,63{\cdot}10^{-34}$ Дж·с

$A_{\text{вих}} - ?$

Розв'язання

$$A_{\text{вих}} = \frac{hc}{\lambda_{max}}$$

$$A_{\text{вих}} = \frac{6,63{\cdot}10^{-34}{\cdot}3{\cdot}10^{8}}{1,5{\cdot}10^{-7}} \approx 1,3{\cdot}10^{-18}\ (\text{Дж})$$

Відповідь: $A_{\text{вих}} \approx 1,3{\cdot}10^{-18}$ Дж$\approx 8,1$ еВ.

4. Робота виходу електронів з металу 5,15 еВ. Чи викличе фотоефект ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 300 нм?

Дано:

$A_{\text{вих}} = 5,15$ еВ

$= 5,15{\cdot}1,6{\cdot}10^{-19}$ Дж

$= 8,24{\cdot}10^{-19}$ Дж

$\lambda = 300\ \text{нм} = 3{\cdot}10^{-7}$ м

$c = 3{\cdot}10^{8}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$h = 6,63{\cdot}10^{-34}$ Дж·с

$\lambda_{max} - ?$

Розв'язання

Для розв'язання задачі необхідно знайти червону межу фотоефекту:

$$A_{\text{вих}} = \frac{hc}{\lambda_{max}} \qquad => \qquad \lambda_{max} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}$$

$$\lambda_{max} = \frac{6,63{\cdot}10^{-34}{\cdot}3{\cdot}10^{8}}{8,24{\cdot}10^{-19}} \approx 2,41{\cdot}10^{-7}\ (\text{м})$$

Фотоефект не настане, тому що найбільша довжина хвилі, при якій ще існує фотоефект, $\lambda_{max} = 241$ нм, а дане ультрафіолетове випромінювання має довжину хвилі $\lambda = 300$ нм, тобто більшу за довжину хвилі червоної межі фотоефекту.

Відповідь: фотоефект не настане, так як $\lambda > \lambda_{max}$.

5. Енергія випромінювання, що падає на метал, в три рази більша за роботу виходу. У скільки разів максимальна кінетична енергія фотоелектронів відрізняється від роботи виходу?

Дано:

$E_{\text{ф}} = 3A_{\text{вих}}$

$\frac{E_{k\,max}}{A_{\text{вих}}} - ?$

Розв'язання

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:

$$E_{\text{ф}} = A_{\text{вих}} + E_{k\,max} \qquad 3A_{\text{вих}} = A_{\text{вих}} + E_{k\,max}$$

$$2A_{\text{вих}} = E_{k\,max} \qquad => \qquad \frac{E_{k\,max}}{A_{\text{вих}}} = 2$$

Відповідь: $\frac{E_{k\,max}}{A_{\text{вих}}} = 2.$

6. Червона межа фотоефекту для Платини 198 нм. Якщо Платину прожарити при високій температурі, червона межа фотоефекту дорівнюватиме 220 нм. На скільки прожарювання зменшило роботу виходу фотоелектронів?

Дано:

$\lambda_{max\,1} = 198\text{ нм} = 1,98\cdot10^{-7}$ м

$\lambda_{max\,2} = 220\text{ нм} = 2,2\cdot10^{-7}$ м

$c = 3\cdot10^{8}\ \frac{\text{м}}{\text{с}}$

$h = 6,63\cdot10^{-34}$ Дж·с

$\Delta A_{\text{вих}} - ?$

Розв'язання

$$A_{\text{вих}\,1} = \frac{hc}{\lambda_1} \qquad A_{\text{вих}\,2} = \frac{hc}{\lambda_2}$$

$$\Delta A_{\text{вих}} = A_{\text{вих}\,2} - A_{\text{вих}\,1}$$

$$\Delta A_{\text{вих}} = hc\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)$$

$$\Delta A_{\text{вих}} = 6,63\cdot10^{-34}\cdot3\cdot10^{8} \bullet \left(\frac{1}{2,2\cdot10^{-7}} - \frac{1}{1,98\cdot10^{-7}}\right)$$

$$\approx -1\cdot10^{-19}\text{ (Дж)}$$

Відповідь: $\Delta A_{\text{вих}} \approx -1\cdot10^{-19}$ Дж$\approx -0,6$ еВ.

V. ПІДБИТТЯ ПІДСУМКІВ УРОКУ

Бесіда за питаннями

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.

VI. ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ

Опрацювати § 34, Вправа № 34 (2-4)

Додаткові задачі

1. Як зміниться кінетична енергія фотоелектронів при зменшенні довжини хвилі падаючого світла? (Збільшиться)

2. Як зміниться максимальна швидкість руху фотоелектронів при збільшенні інтенсивності падаючого світла? (Не зміниться)

3. Як зміниться кількість фотоелектронів, що вилітають, при зменшенні інтенсивності падаючого світла? (Зменшиться)

4. Фотони з енергією 5 еВ падають на поверхню металу й вибивають електрони з максимальною кінетичною енергією 1,4 еВ. При якій мінімальній енергії фотона можливий фотоефект для цього металу?

Дано:

$E_{\text{ф}} = 5$ еВ

$E_{k\,max} = 2$ еВ

Розв'язання

Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:

$$E_{\text{ф}} = A_{\text{вих}} + E_{k\,max} \quad => \quad A_{\text{вих}} = E_{\text{ф}} - E_{k\,max}$$

$$A_{\text{вих}} = 5 - 2 = 3\text{ (еВ)}$$

$A_{\text{вих}} - ?$	***Відповідь:*** $A_{\text{вих}} = 3$ еВ.

5. Робота виходу електронів із Ртуті 4,53 еВ. Чи виникне фотоефект, якщо на поверхню Ртуті падатиме видиме світло?

Дано:	***Розв'язання***
$A_{\text{вих}} = 4,53$ еВ	Для розв'язання задачі необхідно знайти червону межу фотоефекту:
$= 4,53 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж	$A_{\text{вих}} = \frac{hc}{\lambda_{max}} \quad => \quad \lambda_{max} = \frac{hc}{A_{\text{вих}}}$
$= 7,248 \cdot 10^{-19}$ Дж	$\lambda_{max} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}{7,248 \cdot 10^{-19}} \approx 2,74 \cdot 10^{-7}$ (м)
$c = 3 \cdot 10^{8} \frac{\text{м}}{\text{с}}$	Фотоефект не настане, тому що найбільша довжина хвилі, при якій ще існує фотоефект, $\lambda_{max} = 274$ нм, а дане видиме світло має довжину хвилі в діапазоні від $\lambda_1 = 400$ нм до $\lambda_2 = 700$ нм , тобто більшу за довжину хвилі червоної межі фотоефекту.
$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	
$\lambda_{max} - ?$	***Відповідь:*** фотоефект не настане, так як $\lambda > \lambda_{max}$.

6. Робота виходу електронів із Цезію 1,9 еВ. Чи виникне фотоефект, якщо на поверхню Цезію буде падати світло із частотою $1 \cdot 10^{15}$ Гц?

Дано:	***Розв'язання***
$A_{\text{вих}} = 1,9$ еВ	Для розв'язання задачі необхідно знайти червону межу фотоефекту:
$= 1,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж	$A_{\text{вих}} = h\nu_{min} \quad => \quad \nu_{min} = \frac{A_{\text{вих}}}{h}$
$= 3,04 \cdot 10^{-19}$ Дж	$\nu_{min} = \frac{3,04 \cdot 10^{-19}}{6,63 \cdot 10^{-34}} \approx 0,46 \cdot 10^{15}$ (Гц)
$\nu = 1 \cdot 10^{15}$ Гц	Фотоефект настане, тому що мінімальна частота хвилі, при якій ще існує фотоефект, $\nu_{min} = 0,46 \cdot 10^{15}$, а дане світло має частоту хвилі в $\nu = 1 \cdot 10^{15}$ Гц, тобто більшу за частоту червоної межі фотоефекту.
$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	
$\nu_{min} - ?$	***Відповідь:*** фотоефект настане, так як $\nu > \nu_{min}$.

7. Енергія випромінювання, що падає на метал, у два рази більша за максимальну кінетичну енергію фотоелектронів. У скільки разів максимальна кінетична енергія фотоелектронів відрізняється від роботи виходу?

Дано:	***Розв'язання***
$E_{\text{ф}} = 2E_{k\,max}$	Рівняння Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту:
$\frac{E_{k\,max}}{A_{\text{вих}}} - ?$	$E_{\text{ф}} = A_{\text{вих}} + E_{k\,max} \quad 2E_{k\,max} = A_{\text{вих}} + E_{k\,max}$
	$E_{k\,max} = A_{\text{вих}}$
	Відповідь: $E_{k\,max} = A_{\text{вих}}$.

8. Червона межа фотоефекту для Золота 265 нм. Якщо Золото прожарити при високій температурі, робота виходу фотоелектронів зменшиться на 0,4 еВ. Якою стане червона межа фотоефекту?

Дано:

$\lambda_{max\,1} = 265$ нм

$= 2,65 \cdot 10^{-7}$ м

$\Delta A_{вих} = -0,4$ еВ

$= -0,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж

$= -0,64 \cdot 10^{-19}$ Дж

$c = 3 \cdot 10^{8} \frac{м}{с}$

$h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с

$\lambda_{max\,2} - ?$

Розв'язання

$$A_{вих\,1} = \frac{hc}{\lambda_1} \qquad A_{вих\,2} = \frac{hc}{\lambda_2}$$

$$\Delta A_{вих} = A_{вих\,2} - A_{вих\,1} \quad \Delta A_{вих} = hc\left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda_2} = \frac{\Delta A_{вих}}{hc} + \frac{1}{\lambda_1}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{\Delta A_{вих}\lambda_1 + hc}{hc\lambda_1}} = \frac{hc\lambda_1}{\Delta A_{вих}\lambda_1 + hc}$$

$$\lambda_2 = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8} \cdot 2,65 \cdot 10^{-7}}{-0,64 \cdot 10^{-19} \cdot 2,65 \cdot 10^{-7} + 6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^{8}}$$

$$\approx 2,9 \cdot 10^{7}\ (м)$$

Відповідь: $\lambda_2 \approx 290$ нм.