31 ФОТОЕЛЕКТРИЧНИЙ ЕФЕКТ

§ 31.1. Загальні відомості про фотоефект

Явище фотоелектричного ефекту посідає особливе місце не тільки в структурі оптики, а і взагалі в фізиці. Відкриття даного явища, і особливо його теоретичне обґрунтування, мало велике значення як для розвитку вчення про взаємодію світла з речовиною, так і для розвитку вчення про природу світла. Аналіз явища фотоефекту призвів до уявлення про світлові кванти (фотони) і зіграв надзвичайно важливу роль в розвитку сучасних теоретичних фізичних уявлень. Відкриття фотоефекту можна віднести до 1887 р., коли Г. Герц, проводячи досліди з іскровим розрядником (рис. 31.1), помітив, що освітлення пучком ультрафіолетових променів електродів іскрового розрядника полегшує проскакування іскри (розряду), тобто розряд відбувається при меншій напрузі, ніж без такого освітлення. Пізніше інший німецький фізик В. Гальвакс (1859 – 1922), російський фізик А. Г. Столєтов (1839 – 1896) та інші дослідники показали, що в досліді Герца відбувається звільнення зарядів із електродів під дією світла. Попадаючи в електричне поле між електродами, заряди прискорюються, іонізують оточуючий газ і викликають розряд.

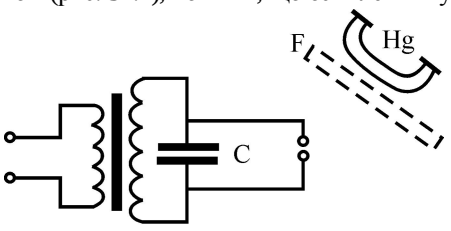

Рис. 31.1

Схема дослідів, виконаних російським фізиком А.Г. Столєтовим, наведена на рис. 31.2, де С – мідна сітка, D – цинкова пластинка, G – гальванометр, V – вольтметр, Б – джерело електричного струму.

При освітленні негативно зарядженої цинкової пластинки в колі виникав електричний струм, який отримав назву **фотоструму**. Явище виривання зарядів з поверхні металу було назване **фотоелектричним ефектом.** Основними результатами досліджень Столєтова, які зберегли своє значення до наших днів, були наступні **висновки.**

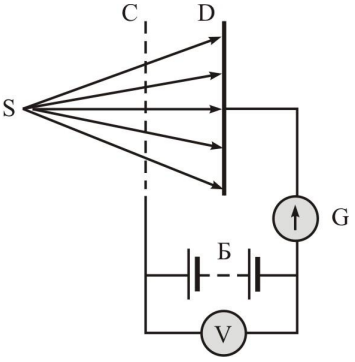

Рис. 31.2

1. Найбільш ефективно діють ультрафіолетові промені;
2. Під дією світла звільняються негативні заряди;
3. Величина фотоструму пропорційна величині освітленості цинкової пластинки;
4. Явище фотоефекту практично безінерційне.

Столєтов також вперше вказав на можливість практичного використання фотоефекту, зокрема, для реєстрації світла.

В 1898 р. Ф. Ленард і Д. Томсон* методом відхилення зарядів в електричному і магнітному полях виміряли питомий заряд e/m частинок, які вириваються під дією світла із като-

*Ф. Ленард (1862 – 1947) і Д. Томсон (1892 – 1975) – англійські фізики, лауреати Нобелівської премії: Ф. Ленард – "за дослідження катодних променів" (1905 р.); Д. Томсон – "за теоретичні і експериментальні дослідження проходження електричних зарядів через гази" (1906 р.)

да. Ці вимірювання показали, що e/m = 1,759·10^{11} Кл/кг, довівши цим самим, що **звільнені під дією світла заряди є електронами.** Явище виривання з речовини електронів під дією світла отримало назву **зовнішнього фотоефекту.** Безпосередній доказ виривання електронів з металу під дією світла отримано в дослідах А. Ф. Іоффе.*

До цього слід зробити два зауваження:

1. В широкому розумінні фотоефектом можна назвати будь–яке явище (ефект), пов'язане з дією світла на речовину або окрему частинку–молекулу, атом і навіть атомне ядро. Тому нижче мова піде не про фотоефект взагалі, а про один із його проявів, який називається **зовнішнім фотоефектом.** Так його називають, підкреслюючи, що цей термін означає явище випромінювання електронів речовиною під дією світлового потоку, що падає на речовину. Випромінювання тілом тих чи інших частинок (не обов'язково електронів) називають **емісією.** Тому зовнішній фотоефект називають також **фотоелектронною емісією,** або скорочено – **фотоемісією.**

2. Світловий потік, який викликає фотоемісію, не обов'язково повинен бути у видимому діапазоні. Істотно, що він являє собою потік електромагнітних хвиль. В залежності від властивостей речовини, із якої вибиваються електрони, це може бути інфрачервоне, ультрафіолетове і навіть рентгенівське і γ – випромінювання.

§ 31.2. Закони фотоефекту

Для дослідження закономірностей фотоефекту використовують установку, схема якої наведена на рис.31.3. Освітлювана металічна пластинка (катод) розміщується у вакуумному балоні, оскільки невеликі забруднення поверхні катода значною мірою впливають на емісію електронів під дією світла. Катод покривається досліджуваним металом і освітлюється монохроматичним світлом, що проходить у трубку крізь віконце D. Поверхні катода і анода виготовляють, як правило, вгнутими, щоб всі електрони, які звільняються із като-

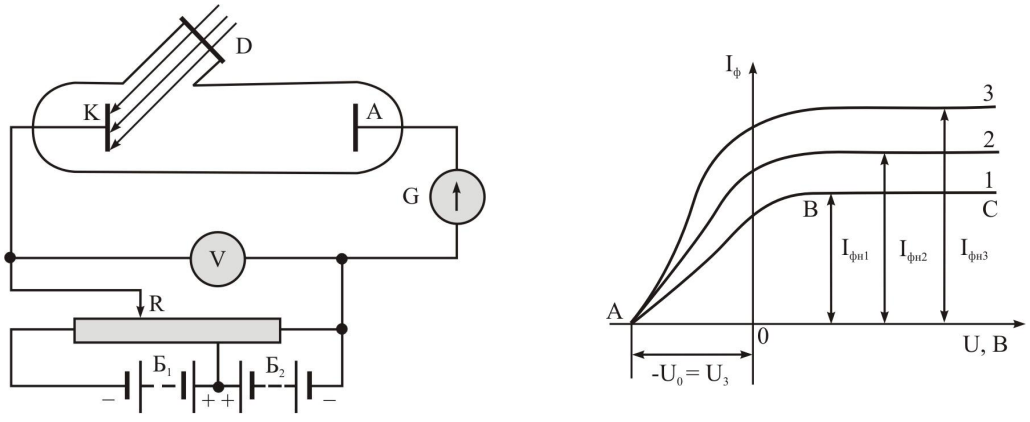

Рис. 31.3

да, попадали на анод. Напругу між катодом і анодом регулюють за допомогою потенціометра R і вимірюють вольтметром *V*. Дві акумуляторні батареї $Б_1$ і $Б_2$, які вмикаються "назустріч одна одній", мають можливість за допомогою потенціометра змінювати не лише абсолютну величину, а й знак напруги *U*. Величина фотоструму вимірюється галь-

*__Іоффе Абрам Федорович (1880 – 1960)__ – російський фізик радянської доби, академік АН СРСР, Лауреат Державної (1942 р.) і Ленінської (1961 р.) премій, Герой Соціалістичної праці (1955 р.)

ванометром G. На рис. 31.4 зображено криві залежності фотоструму I від напруги U, які відповідають різним освітленостям катода: E_1 (кр. 1), E_2 (кр. 2), E_3 (кр. 3) ($E_1 < E_2 < E_3$). Частота світла у всіх випадках однакова. Із рис. 31.4 видно, що для кривої залежності I від U при незмінній освітленості (світлового потоку) характерним є існування ділянки ВС струму насичення $I_н$, коли всі звільнені світлом електрони (фотоелектрони) досягають анода і ділянки наростання АВ, яке починається в точці А при деякому значенні від'ємної напруги U_0. Максимальне значення струму $I_н$ називають **фотострумом насичення.** Він дорівнює

$$I_н = en. \tag{31.1}$$

де n – число фотоелектронів, які вилітають із катода за 1 с, e – абсолютна величина заряду електрона.

Існування фотоструму в області від'ємних напруг від 0 до U_0 пояснюється тим, що фотоелектрони, вибиті з катода, мають відмінну від нуля початкову кінетичну енергію. За рахунок цієї енергії електрони можуть здійснювати роботу проти сил затримуючого поля в балоні і досягати анода. Очевидно, що початкова максимальна швидкість υ_{max} фотоелектронів пов'язана з U_0 співвідношенням

$$\frac{m\upsilon_{max}^2}{2} = eU_з, \tag{31.2}$$

де m – маса електрона, $U_З$ – затримуюча напруга ($U_З = -U_0$). При $U \le U_З$ величина фотоструму $I = 0$.

Шляхом узагальнення отриманих результатів в багаточисельних експериментах були встановлені такі три основні закони фотоефекту:

1. При незмінному спектральному складі світла сила фотоструму насичення прямо пропорційна освітленості катода (світловому потоку, що падає на катод). Цей закон перевірений для широкого інтервалу інтенсивностей. Звідси випливає, що число фотоелектронів, які вириваються з катода за 1 с, пропорційне потужності (інтенсивності) падаючого випромінювання.

2. Максимальна кінетична енергія вирваних світлом електронів лінійно залежить від частоти ν (рис. 31.5) і не залежить від його інтенсивності.

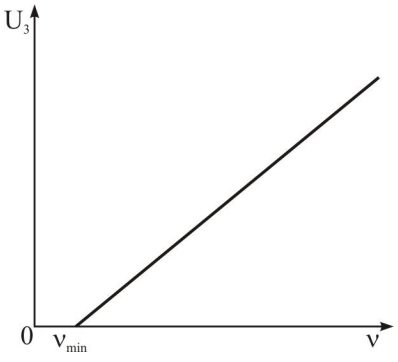

Рис. 31.5

3. Для кожної речовини існує максимальна довжина хвилі світла λ_{max} (мінімальна частота ν_{min}), при якій ще існує фотоефект. Якщо $\lambda > \lambda_{max}$ ($\nu < \nu_{min}$), то фотоефект відсутній навіть при значній інтенсивності світла.

В самому факті звільнення електронів із металу під дією світла з точки зору класичних хвильових уявлень про природу випромінювання нічого дивного немає, оскільки електромагнітна хвиля, яка падає на поверхню, викликає вимушені коливання електронів в металі. Поглинаючи енергію хвилі, електрон може нагромадити її в кількості, яка достатня для подолання сили, що втримує електрон в металі (тобто, для здійснення роботи виходу). Якщо це так, то енергія фотоелектрона повинна залежати від інтенсивності падаючого світла. Однак експерименти показували, що енергія фотоелектронів зовсім не залежить від інтенсивності падаючого світла. Збільшення інтенсивності призводить лише до збільшення числа фотоелектронів. Енергія ж фотоелектрона залежить лише від частоти падаючого світла.

Крім того, навіть при дуже малій інтенсивності світла фотоелектрони з'являються практично відразу після початку освітлення (безінерційно, $\Delta t = 10^{-10}$ с), хоча, відповідно до класичних уявлень, необхідний скінчений час (~1 с), щоб електрон міг нагромадити необхідну енергію для здійснення роботи виходу.

§ 31.3. Теоретичне обґрунтування законів фотоефекту

Труднощі в поясненні законів фотоефекту привели А. Ейнштейна до створення в 1905 р. **квантової теорії світла.** Ейнштейн скористався квантовими ідеями Планка, який кількома роками раніше показав, що світло випромінюється квантами, і припустив, що **світло не тільки випромінюється квантами, але й поширюється і поглинається у вигляді квантів.** Ці кванти електромагнітного випромінювання отримали загальноприйняту тепер назву **фотонів** (див. § 25.1). Фотони у вакуумі поширюються зі швидкістю світла c. Для монохроматичного випромінювання з частотою ν усі фотони мають однакову енергію, яка дорівнює

$$E_\nu = h\nu. \tag{31.3}$$

Процес поглинання світла речовиною зводиться до того, що фотони передають всю свою енергію частинкам цієї речовини (електронам). Якщо енергія фотона достатня для того, щоб звільнити електрон від стримуючих зв'язків, то він може вийти за межі поверхні металу. Імовірність одночасного поглинання двох фотонів одним електроном металу мала, тому кожний фотоелектрон отримує енергію від одного фотона.

Ці ідеї Ейнштейна лягли в основу квантової теорії світла, яка дала можливість пояснити закони фотоефекту і ряд інших явищ, що не вкладаються в межі класичної електромагнітної теорії.

Розглянемо зовнішній фотоефект з точки зору квантової теорії. Відомо, що для виходу із металу електрон повинен здійснити роботу виходу A. Внаслідок поглинання фотона електрон набуває енергію $h\nu$. Якщо $h\nu > A$, то електрон може виконати роботу виходу і вирватися з металу. Надлишок енергії фотона перетворюється в кінетичну енергію звільненого електрона. Користуючись **законом збереження енергії** для даного випадку, матимемо:

$$h\nu = A + \frac{m\upsilon_{\max}^2}{2}. \tag{31.4}$$

Таким чином, енергія поглинутого фотона витрачається на роботу виходу електрона A та на надання йому кінетичної енергії. Рівняння (31.4) у вигляді

$$\boxed{\frac{m\upsilon_{\max}^2}{2} = h\nu - A} \tag{31.5}$$

називають **рівнянням Ейнштейна для зовнішнього фотоефекту.**

Рівняння (31.5) отримане в припущенні, що електрони в металі рухаються незалежно один від одного, тобто, між ними не діють сили взаємодії. Тому передача фотоном енергії одному з електронів не змінює енергії всіх інших електронів. Теорію, яка ґрунтується на цьому припущенні, називають **одноелектронною**.

Рівняння (31.5) дає можливість пояснити основні закони фотоефекту для металу. Дійсно, із (31.5) видно, що $\frac{m\upsilon_{\max}^2}{2}$ фотоелектрона залежить не від інтенсивності падаючого світла, а від частоти при даній роботі виходу. Звідси ж видно, що фотоефект можливий лише в тому випадку, якщо енергія фотона $h\nu \geq A$. Якщо припустити, що $\frac{m\upsilon_{\max}^2}{2} = 0$, то

$h\nu_0 = A$. Звідси можна записати, що

$$\nu_0 = \frac{A}{h} \quad \text{або} \quad \lambda_0 = \frac{ch}{A}, \tag{31.6}$$

де ν_0 або λ_0 називають **граничною частотою або граничною довжиною хвилі,** при якій ще можливий фотоефект. Граничну довжину (частоту) ще називають **червоною межею фотоефекту. Червона межа залежить лише від величини роботи виходу електрона, тобто від природи металу і стану його поверхні.**

Таблиця 31.1

Метал	Робота виходу, *еВ*	Гранична частота, 10^{14} *Гц*	Гранична довжина хвилі, *нм*	
Цезій	1,9	4,6	650	Видиме світло
Калій	2,2	5,3	560	
Натрій	2,3	5,6	540	
Кальцій	2,7	6,5	460	
Магній	3,7	8,9	340	Ультрафіолет
Срібло	4,7	11,4	260	
Нікель	5,0	12,1	250	

В таблиці 31.1 наведені фотоелектричні характеристики деяких чистих металів. Як видно із таблиці, для лужних металів "червона межа" лежить в області видимого світла, тоді як для інших металів вона знаходиться в області ультрафіолету. Варто відмітити також, що присутність домішок, наприклад, газів, часто сильно полегшує вихід електронів, зсуваючи червону межу в область довгих хвиль.

Нарешті, з самого механізму протікання явища зовнішнього фотоефекту зрозуміло, що загальне число фотоелектронів, які вилітають з поверхні металу за одиницю часу (тобто величина фотоструму), пропорційне числу фотонів, які падають за той самий час на одиничну поверхню речовини. Отже, відповідно до першого закону фотоефекту, **число фотоелектронів, які вилітають з катода за одиницю часу, пропорційне інтенсивності світла (величині світлового потоку).**

Якщо скористатися рівностями (31.2), (31.5) і (31.6), то рівняння Ейнштейна можна записати у вигляді:

$$eU_3 = h(\nu - \nu_0). \tag{31.7}$$

Знаючи ν і ν_0 і, визначивши експериментально U_3, можна за формулою (31.7) обчислити сталу Планка:

$$h = \frac{eU_з}{\nu - \nu_0}. \tag{31.8}$$

Значення h, визначене таким чином, досить добре співпадає із значенням h, отриманого за допомогою інших методів, що може бути підтвердженням правильності рівняння (31.7). Це було вперше здійснено в блискучих дослідах американського фізика Р. Міллікена (1868 – 1953) в 1916 році. За дослідження в області елементарних зарядів і фотоелектричного ефекту Міллікен був удостоєний Нобелівської премії з фізики (1923 р.).

Зовнішній фотоефект характеризують поняттям квантового виходу η, який визначають як відношення кількості фотоелектронів n_e до кількості квантів світла n_f, які спричиняють фотоефект:

$$\eta = \frac{n_e}{n_f}. \qquad (31.9)$$

Приклад 31.1. *За певних умов сітківка ока людини може реєструвати всього лише п'ять фотонів голубувато-зеленого світла ($\lambda = 5\cdot10^{-7}$м). Розрахувати відповідну кількість енергії, яка попадає на сітківку, в джоулях і електрон-вольтах. Коли щосекунди в око попадають і поглинаються п'ять таких фотонів, то якою є енергія (у ватах), що передається при цьому оку?*

Розв'язок. ***1.*** *Енергія одного фотона визначається формулою (31.3):*

$$E_f = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6{,}62\cdot10^{-34}\,Дж\cdot с)(3\cdot10^{8}\,м/с)}{5\cdot10^{-7}\,м} = 3{,}97\cdot10^{-19}\,Дж.$$

Повна енергія дорівнює

$$E = 5E_f = 5\cdot(3{,}97\cdot10^{-19}\,Дж) = 1{,}985\cdot10^{-18}\,Дж.$$

1 еВ = 1,6·10^{-19}Дж. Тому енергія у електрон-вольтах виразиться так:

$$E = \frac{1{,}985\cdot10^{-18}\,Дж}{1{,}6\cdot10^{-19}\,Дж/еВ} = 12{,}41\,еВ.$$

2. *Енергія, що поглинається щосекунди оком, дорівнює*

$$W = \frac{E}{t} = \frac{1{,}985\cdot10^{-18}\,Дж}{1\,с} = 1{,}985\cdot10^{-18}\,Вт.$$

Приклад 31.2. *Знайти максимальну кінетичну енергію і швидкість електрона, вирваного з поверхні натрію (робота виходу A_{Na} = 2,28 еВ) світлом з довжиною хвилі λ = = 4100 Å;*

Розв'язок. ***1.*** *Максимальну кінетичну енергію фотоелектрона знайдемо, скориставшись рівнянням Ейнштейна (31.5) для фотоефекту:*

$$T_{\max} = h\nu - A \quad \text{або} \quad T_{\max} = \frac{hc}{\lambda} - A,$$

де $T_{\max} = \frac{m\upsilon_{\max}^2}{2}$, *m = 9,1·10^{-31}кг – маса електрона, h = 6,62·10^{-34} Дж·с – стала Планка, с – швидкість світла у вакуумі, А – робота виходу. Тоді:*

$$T_{\max} = \frac{(6{,}62\cdot10^{-34}\ Дж\cdot с)(3\cdot10^{8}\,м/с)}{4{,}1\cdot10^{-7}\,м} - 2{,}28\,(1{,}6\cdot10^{-19}\,Дж) = 1{,}2\cdot10^{-19}\,Дж.$$

2. *Максимальну швидкість фотоелектронів виразимо із формули:*

$$T_{\max} = \frac{m\upsilon_{\max}^2}{2} \Rightarrow \upsilon_{\max} = \sqrt{\frac{2T_{\max}}{m}}.$$

Тоді

$$\upsilon_{\max} = \sqrt{\frac{2(1{,}2\cdot10^{-19}\,Дж)}{9{,}1\cdot10^{-31}\,кг}} = 5{,}1\cdot10^{5}\,м/с.$$

Приклад 31.3. *Визначити червону межу фотоефекту для платини. Робота виходу електрона із платини* $A_{Pt} = 8{,}5 \cdot 10^{-19}$ *Дж.*

Розв'язок. *Для цього скористаємось формулою (31.6):*

$$\lambda_0 = \frac{ch}{A} = \frac{(3\cdot 10^8\ м/с)(6{,}62\cdot 10^{-34}\ Дж\cdot с)}{8{,}5\cdot 10^{-19}\ Дж} = 2{,}3\cdot 10^{-7}\ м.$$

§ 31.4. Фотоефект у напівпровідниках і діелектриках

Крім розглянутого вище зовнішнього фотоефекту, існує і широко використовується на практиці, так званий **внутрішній фотоефект,** який властивий лише напівпровідникам і діелектрикам. Суть його полягає в тому, що **під дією світла збільшується електропровідність опромінюваної речовини за рахунок зростання в ній числа вільних носіїв струму (електронів провідності і дірок).** Це явище часто ще називають **фотопровідністю.** Ефект фотопровідності вперше спостерігався американським фізиком І. Смітом в селені ще в 1873 р.

Електропровідність кристалічних твердих тіл в сучасній фізиці пояснюється на основі квантових уявлень зонної теорії.

В діелектрику і бездомішковому напівпровіднику при абсолютному нулі температури зона провідності не містить електронів, а валентна зона, яка знаходиться енергетично нижче, повністю заповнена електронами (рис. 31.6). Різниця між енергіями нижнього рівня зони провідності і верхнього рівня валентної зони E_g (ширина забороненої зони) у напівпровідників значно менша, ніж у діелектриків. Якщо енергія фотона $h\nu \geq E_g$, то при поглинанні такого фотона речовиною електрон перейде із валентної зони в зону провідності. В результаті з'явиться додаткова пара носіїв струму – в зоні провідності електрон, у валентній зоні – дірка. Такі пари різнойменних заряджених носіїв струму здатні під дією зовнішнього електричного поля приходити у впорядкований рух, утворюючи електричний струм. Очевидно, що концентрація електронів провідності і дірок пропорційна числу фотонів, які падають на одиницю поверхні речовини за одиницю часу. Червона межа внутрішнього фотоефекту визначається величиною енергії активації провідності E_a (яка в даному випадку співпадає з шириною забороненої зони E_g):

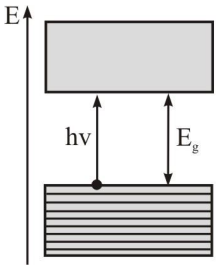

Рис. 31.6

$$\nu_0 = \frac{E_a}{h} = \frac{E_g}{h}. \qquad (31.10)$$

Вона залежить від природи напівпровідника і може лежати в області значно більш довгих хвиль, ніж у приймачів із зовнішнім фотоефектом.

У напівпровідниках з невеликим вмістом домішок імовірність поглинання фотонів електронами домішок мала. Тому зміна провідності таких напівпровідників під дією світла в основному пов'язана з переходом електронів з валентної зони в зону провідності. Коли в речовині є достатньо домішок, то під дією світла електрони можуть переходити із валентної зони на рівні домішок або з домішкових рівнів в зону провідності. В першому випадку виникає **діркова,** а в другому **– електронна фотопровідність.**

Крім фотопровідності, одного із видів внутрішнього фотоефекту, особливий інтерес становить так званий **вентильний фотоефект** (фотоефект в запірному шарі), який вперше спостерігав професор Казанського університету (Росія) В. А. Ульянін (1863 – 1919). **Суть**

його полягає у виникненні електрорушійної сили (фото-ЕРС) при освітленні контакту двох різних напівпровідників або напівпровідника і металу у відсутності зовнішнього електричного поля.

Це явище (**фотогальванічний ефект**) зумовлене тим, що в силу однобічної провідності напівпровідників із запірним шаром відбувається просторове розділення всередині провідника оптично збуджених електронів і позитивно заряджених дірок. Електрони і дірки концентруються на різних кінцях напівпровідника, внаслідок чого і виникає електрорушійна сила, яку часто називають **фотоелектрорушійною силою.**

Якщо паралельно до освітленого контакту напівпровідників під'єднати зовнішнє навантаження, то через нього потече струм. При невеликих освітленнях сила струму пропорційна світловому потоку, що падає на контакт напівпровідників. Таким чином досягається пряме перетворення світлової енергії в електричну.

З цієї причини приймачі світла на основі вентильного фотоефекту (фотогальванічні приймачі) використовуються не тільки для реєстрації світлових сигналів, але і в електричних колах, як джерела електричної енергії.

Основні типи таких приймачів працюють на основі селену, сірчаного срібла, кремнію, германію і ряду сполук CaAs, InSb, CdTe та інших. Фотогальванічні елементи, які використовуються для перетворення світлової енергії в електричну, знайшли широке застосування для живлення окремих пристроїв, зокрема, радіоапаратури на космічних кораблях, ракетах, супутниках. Вони характеризуються відносно великим коефіцієнтом корисної дії. Так, фотогальванічні приймачі світла, виготовлені на основі кремнію, мають коефіцієнт корисної дії близько 15 %, а можна його довести до 20 %.

§ 31.5. Фотоелементи та їх застосування

Приймачі випромінювання, в яких фотоефект використовується для перетворення світлового сигналу в електричний, називаються фотоелементами. Вони знайшли широке застосування в техніці і наукових дослідженнях.

Відповідно до різних видів фотоефекту створено різні види фотоелементів, а саме: **фотоелементи із зовнішнім фотоефектом, фотоопори та вентильні фотоелементи.** Дія останніх ґрунтується на явищі внутрішнього фотоефекту.

Серед фотоелементів із зовнішнім фотоефектом розрізняють вакуумні і газонаповнені. **Вакуумний фотоелемент** – це евакуйований скляний балон, частина внутрішньої поверхні якого покрита шаром світлочутливого металу, що відіграє роль фотокатода. В якості анода використовується металеве кільце або рідка сітка, яка також міститься всередині балона. При освітленні катода з нього внаслідок зовнішнього фотоефекту вибиваються електрони, і в колі виникає фотоелектричний струм. Величину ЕРС батареї беруть такою, щоб фотострум дорівнював фотоструму насичення. Катоди фотоелементів виготовляють із різних матеріалів залежно від спектрального складу світла. Наприклад, для реєстрації видимого світла та інфрачервоного випромінювання застосовують фотоелементи з кисневоцезієвим катодом, а для реєстрації короткохвильової частини видимого світла і ультрафіолету – фотоелементи з сурм'яноцезієвим катодом. Для підсилення фотоструму насичення балон фотоелемента після відсмоктування повітря заповнюють інертним газом (як правило, аргоном). Такі фотоелементи називаються **газонаповненими.** Фотоелектрони, які рухаються в електричному полі від катода до анода, володіють достатньою кінетичною енергією, щоб при зіткненні з молекулами газу іонізувати їх, внаслідок чого величина фотоструму в колі зростає. Цим же пояснюють і той факт, що чутливість газонаповнених фотоелементів в декілька разів перевищує чутливість вакуумних фотоелементів.

Вольт-амперні характеристики фотоелементів із зовнішнім фотоефектом, які визначають

залежність фотоструму від різниці потенціалів між катодом і анодом, різні для вакуумних (рис. 31.7) і газорозрядних (рис. 31.8) фотоелементів.

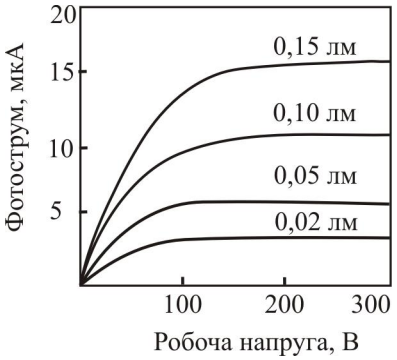

Рис. 31.7

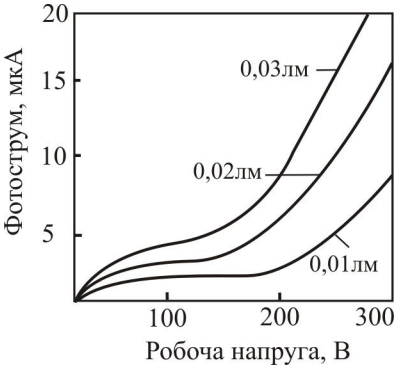

Рис. 31.8

Основним параметром фотоелемента є його чутливість, яка виражається відношенням сили фотоструму до відповідного світлового потоку. Ця величина у вакуумних фотоелементах досягає значення порядка 100 мкА/лм.

Фотоелементи із зовнішнім фотоефектом практично безінерційні, що робить їх незамінними в приладах реєстрації швидкозмінних світлових імпульсів.

Для вимірювання ефективних енергетичних величин доцільніше застосовувати вакуумні фотоелементи, як більш стабільні.

Основним недоліком вакуумних фотоелементів при світлових вимірюваннях слід вважати той факт, що вони виробляють дуже малий електричний сигнал. Цей недолік повністю усувається в фотоелектронних помножувачах (ФЕП), які вперше були побудовані в 1934 р. Принцип ФЕП можна зрозуміти із рис. 31.9. Кожний електрон, що вибивається світлом з фотокатода ФК, прискорюється і при попаданні на перший емітер E_1 вибиває з нього кілька електронів. Ці електрони прискорюються і, попадаючи на наступний емітер E_2, знову збільшують загальний потік електронів і т.д. Вторинні електрони з останнього емітера, а їх буває до 10 – 15, збираються на анод. З анода знімають струм:

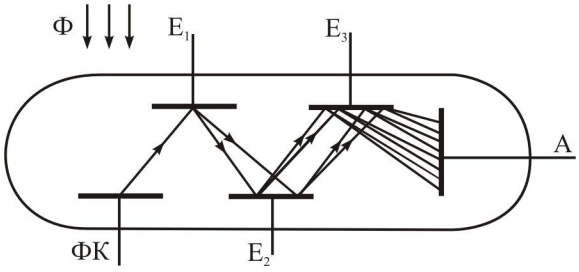

Рис. 31.9

$$I = i_0 \sigma^n, \tag{31.11}$$

де i_0 – фотострум на першому емітері, n – кількість емітерів, σ^n – коефіцієнт підсилення. Загальний коефіцієнт підсилення таких систем досягає $10^7 – 10^8$, а інтегральна чутливість ФЕП досягає тисячі ампер на люмен. Величина підсилення визначається кількістю емітерів в ФЕП. Спектральна чутливість ФЕП визначається, як і фотоелементів, фотохімічними властивостями катода. До недоліків ФЕП слід віднести необхідність застосування джерела високовольтного і стабілізованого живлення, дещо гіршу стабільність чутливості і великі шуми. Останні два недоліки легко ліквідовуються.

Внаслідок того, що інтегральна чутливість ФЕП достатньо велика (приблизно $10^{-13} – 10^{-14}$ лм), вони знайшли широке застосування для реєстрації дуже слабких потоків випроміню-

вання. Для живлення ФЕП необхідна високо стабілізована напруга.

Широко застосовуються ФЕП в астрономії, ядерній фізиці, телебаченні, геології, медицині, в космічних дослідженнях та в техніці оптичних квантових генераторів. За призначенням можна відмітити дві області застосування ФЕП: вимірювання слабких постійних і змінних світлових потоків та імпульсних світлових сигналів, зокрема, для реєстрації надслабкої біолюмінесценції, що є важливим при деяких фізичних дослідженнях.

Фотоопори – фотоприймачі, принцип дії яких ґрунтується на ефекті фотопровідності – зміні електричного опору напівпровідника під дією світла. В цьому разі електрони не звільняються з речовини, а лише переходять із заповненої валентної зони в зону провідності, збільшуючи електропровідність напівпровідника.

Виготовляють фотоопори або з чистих напівпровідників, або з напівпровідників з домішками. Найчастіше застосовують для цього сульфат свинцю (фотоопори ФС – А), сульфат кадмію (ФСК – М), сульфід кадмію (ФМ – К). Фотоопори, як і інші фотоелементи, характеризуються селективним сприйманням світла, тобто в них світло однакової інтенсивності, але різної довжини хвилі, зумовлює неоднакові струми. Так, наприклад, для фотоопору ФС – А, який використовують в інфрачервоній ділянці спектра, максимум чутливості припадає на довжину хвилі 2,1 – 2,7 мкм, для фотоопору ФС – 52 – на довжину хвилі 0,52 мкм.

Будову фотоопорів показано на рис. 31.10. На діелектричну пластинку 1 нанесено тонкий шар напівпровідникової речовини 2, на кінцях якого випаровуванням у вакуумі напилюють металеві електроди 3. Для захисту від шкідливого впливу навколишнього повітря фоточутливу поверхню фотоопору покривають прозорою плівкою лаку. Фотоопори володіють високою чутливістю, але вони інерційні. Особливістю фотоопорів є відсутність полярності, тобто вони проводять струм в обох напрямках. Вольт-амперна характеристика їх лінійна, тобто струм насичення відсутній.

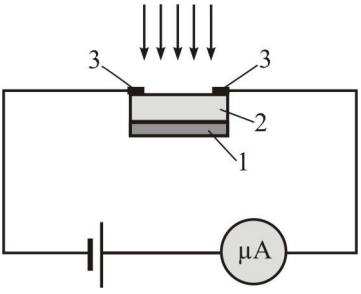

Рис. 31.10

Фотоопори широко використовуються в різних пристроях автоматики і телемеханіки, у пристроях для відтворення оптичного запису звуку тощо. Такі пристрої дають можливість керувати на відстані виробничим процесом, автоматично розпізнавати порушення нормального ходу і в разі потреби зупиняти процес.

Вентильні фотоелементи – прилади, дія яких ґрунтується на вентильному фотоефекті. Чутливість вентильних фотоелементів досягає декількох тисяч мікроампер на люмен. Схема одного з таких фотоелементів – мідно - закисного – наведена на рис. 31.11. Мідна пластинка, яка служить одним із електродів, покривається тонким шаром закису міді Cu_2O (напівпровідник). На закис міді наноситься прозорий шар металу (наприклад, золото), який служить другим електродом. Якщо фотоелемент освітити через другий електрод, то між електродами виникне фото – ЕРС, а при замиканні електродів в електричному колі пройде струм, який залежить від величини світлового потоку.

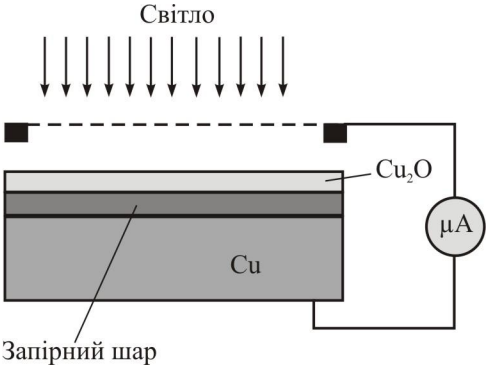

Рис. 31.11

Вентильні фотоелементи застосовуються як один із засобів безпосереднього перетворення світлової енергії в електричну. Вже тепер виготовляють кремнієві фотоелементи, що мають коефіцієнт корисної дії 11–15 %. За теоретичними розрахунками його можна довести до 22 %.

Залежність сили струму від освітленості (світлового потоку) дозволяють використовувати фотоелементи як люксметри. Деякі вентильні фотоелементи (сірчано-талієві, германієві тощо) чутливі до інфрачервоного випромінювання, і їх застосовують для виявлення нагрітих невидимих тіл, тобто розширяються можливості зору.

Великий інтерес являє застосування фотоелектронної емісії для підвищення ефективності термоелектронної емісії нагрітим зразком, який потім використовується в електронному кінескопі. Розроблені на цьому принципі пристрої називаються **фотоемісійними електронними мікроскопами.** В такому мікроскопі досліджувана речовина опромінюється ультрафіолетовим світлом, а зображення формується за допомогою фокусування випромінюваних при цьому із зразка електронів. При частоті світла, яка лише не набагато перевищує червону межу фотоефекту, величина струму достатньо чутлива до фізичних і кристалографічних властивостей поверхні зразка.

§31.6. Фотобіологічна дія випромінювання

Здавна відома дія оптичного випромінювання на людину, тварин, мікроорганізми і рослини. Ці дії випромінювання, що називаються **фотобіологічними,** не дивлячись на їх різноманітність, мають загальну основу. Загальними для всіх процесів фотобіологічної дії випромінювання є фотохімічні реакції, які протікають в білкових речовинах клітин в результаті поглинання ними випромінювання з довжинами хвиль $\lambda \leq 0{,}4$ мкм.

Високою біологічною активністю володіє **ультрафіолетове випромінювання** (УФ випромінювання) з квантами великої енергії, які здатні змінити хімічну структуру окремих клітин і тканин.

Як показує досвід, біологічна дія УФ випромінювання може бути якісно різною в залежності від кванта енергії випромінювання, густини опромінення і тривалості дії.

Поглинання УФ випромінювання білковими колоїдами протоплазми клітин тканини призводить до розщеплення білка і утворення нових речовин. Продукти (гістамін, вітамін Д та ін.), що утворилися, є **біологічно активними** і, поширюючись по організму дифузією або шляхами циркуляції рідин, викликають загально біологічні зсуви **тонізуючого і терапевтичного характеру.** Достатньо великі дози короткохвильового УФ випромінювання з $\lambda \leq 0{,}3$ мкм можуть викликати незворотні зміни протоплазми і ядер клітин в результаті коагуляції (згортання) білкової речовини. Такі зміни призводять до руйнування клітин і відмирання живої тканини. Характерним прикладом цього є **бактерицидна дія випромінювання.**

Крім тонізуючої, терапевтичної і бактерицидної дії випромінювання, велике значення для організму людини і тварин має процес виникнення зорового відчуття в результаті поглинання випромінювання спеціалізованими клітинами світлочутливої речовини.

Таким чином, загальний комплекс фотобіологічних дій випромінювання можна розділити на три групи: *а*) психофізіологічна дія, яка визначає зорові відчуття і уявлення оточуючого світу; *б*) тонізуюча і терапевтична дія; *в*) руйнівна дія випромінювання, наприклад, бактерицидна.

Особливе значення в загальному комплексі біологічних дій випромінювання займає **фотосинтез** органічних сполук (вуглеводів і жирів) із неорганічних речовин, який протікає в опромінюваних листях рослин, що містять **хлорофіл.**

Один із засновників російської школи фізіології К.А. Тімірязєв (1843 – 1920) в одній із своїх перших праць по фотосинтезу показав, що хлорофіл, поглинаючи енергію випро-

мінювання, вступає у окислювально-відновлювальну реакцію з вуглекислим газом і водою (CO_2 і H_2O), в результаті якої виникають вуглеводи та вільний кисень, який виділяється рослинами в оточуюче середовище.

Мірою ефективності фотосинтезу, як показав К.А. Тімірязєв, може служити поглинута хлорофілом енергія випромінювання. Молекули хлорофілу, збуджені поглинутими фотонами, вступають у взаємодію з молекулами води, які дисоціюють. Вільний водень H_2 вступає в реакцію з вуглекислотою CO_2, відновлюючи її шляхом витіснення атома кисню.

Таким чином, фотосинтез є складною фотохімічною реакцією, яка вимагає поглинання декількох фотонів в процесі утворення одного атома вільного кисню і відновлення однієї молекули вуглекислого газу. Так, наприклад, для відновлення однієї молекули CO_2 в молекулу формальдегіду CH_2O необхідне поглинання восьми фотонів. Подальша полімеризація молекул формальдегіду призводить до утворення молекули вихідного вуглеводу $C_6H_{12}O_6$, що називається **гексозою**. Результуюче рівняння фотосинтезу можна записати в такому вигляді:

$$6CO_2 + 6H_2O + nh\nu + \text{хлорофіл} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 + \text{хлорофіл},$$

де n – кількість фотонів, поглинутих хлорофілом для одиничного елементарного процесу фотосинтезу. Фотосинтез практично не виникає при опроміненні рослин світловим потоком з $\lambda \geq 0{,}75$ мкм.

Таким чином, сутність процесу фотосинтезу у відновленні двоокису вуглецю у вуглеводи, завдяки чому поглинута світлова енергія нагромаджується в асимілюючих органах у вигляді хімічної енергії.

Хімічна енергія, яка походить із світлової енергії, забезпечує в основному потребу в енергії всього живого світу. Розвиток рослин створив можливість виникнення тварин і інших організмів, нездатних до фотосинтезу. При їх виникненні важливу роль відіграє якраз зворотний процес дихання і окислення. Необхідний для останнього процесу кисень і створюється в атмосфері Землі під впливом фотосинтезу. В кінцевому рахунку тварини і інші організми отримують необхідну для існування енергію із рослинних органічних сполук, які утворюються при фотосинтезі і, перетворюючи їх, будують свої органічні речовини. Таким чином, з енергетичної точки зору, живий світ можна розділити на дві групи: на нагромаджувачів (рослини) і на споживачів (тварин) енергії. Ці дві групи знаходяться в біологічній рівновазі.

Приклад 31.3. *Прийнято вважати, що при* ***фотосинтезі*** *(процесі перетворення вуглекислого газу CO_2 на вуглеводи під дією енергії сонячного світла в деяких рослинних пігментах, наприклад, в хлорофілі) на перетворення однієї молекули CO_2 у вуглевод і O_2 необхідно біля 9 фотонів. Припустимо, що довжина хвилі падаючого світла дорівнює $\lambda = 6700$ Å (хлорофіл сильніше поглинає в діапазоні довжин хвиль від 6500 Å до 7000 Å). Який ККД фотосинтезу? Зворотна реакція характеризується енерговиділенням $\mathcal{E} = 7{,}84 \cdot 10^{-19}$ Дж $= 4{,}9$ еВ на одну молекулу CO_2.*

Розв'язок. *Сумарна енергія дев'яти фотонів*

$$E = \frac{9hc}{\lambda} = \frac{9(6{,}62 \cdot 10^{-34}\,Дж \cdot с)(3 \cdot 10^{8}\,м)}{6{,}7 \cdot 10^{-7}\,м} = 2{,}66 \cdot 10^{-18}\,Дж \approx 17\,еВ.$$

Значить, ККД фотосинтезу дорівнює

$$\eta = \frac{\mathcal{E}}{E}100\,\% = \frac{4{,}9\,еВ}{17\,еВ}\,100\,\% \approx 29\,\%.$$