

KVANTOVÝ CHARAKTER ELEKTROMAGNETICKÉHO ZÁŘENÍ

TEORETICKÝ ÚVOD

Začátkem 20. století byla navržena a v experimentech potvrzena **kvantová hypotéza**. Podle této hypotézy zdroje záření nevyzařují ani neabsorbují energii spojitě, ale diskrétně, po malých částech, nazývaných **kvanta energie**. Toto kvantum energie nazval Einstein **foton** a experimentálně byly potvrzeny jeho částicové vlastnosti.

Elektromagnetické záření má kvantový charakter a kromě vlnové podstaty má ještě druhou stránku své povahy, a to částicovou. Částicová povaha světla se projevuje tím průkazněji, čím je menší vlnová délka záření.

Při emisi nebo absorpci světla se energie E nepředává spojitě, ale po kvantech.

Platí vztah

$$\Delta E = h\nu, \quad (1)$$

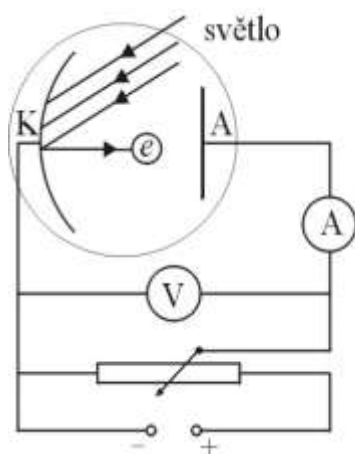
Kde ν je frekvence záření a h Planckova konstanta. Její hodnota v SI soustavě je $h = 6,626076 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Vztah (1) se obvykle nazývá **Planckova kvantová hypotéza**, protože sám Planck jej považoval pouze za pracovní hypotézu. V roce 1905 jej použil Einstein pro vysvětlení dalšího jevu, který klasická fyzika rovněž neuměla uspokojivě popsat. Vzniklo tak **kvantové vysvětlení fotoelektrického jevu**.

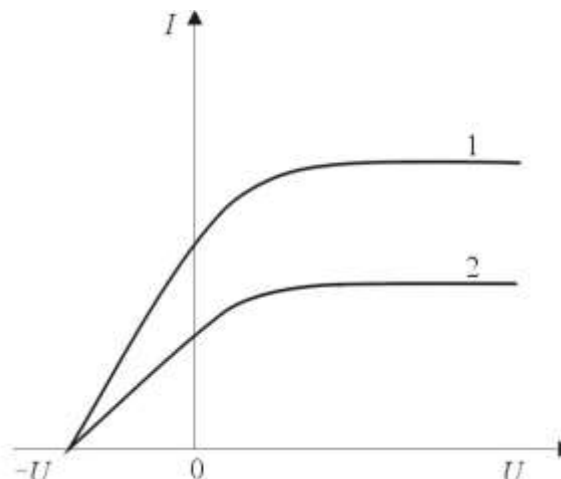
Fotoelektrický jev

Při fotoelektrickém jevu jsou při dopadu elektromagnetického záření (obvykle viditelného a ultrafialového světla) na povrch látky z tohoto povrchu emitovány elektrony. K samovolnému uvolňování elektronů, tj. bez dopadu světla, nemůže dojít, protože elektrony jsou v látce vázány s určitou vazební energií Φ , která se nazývá **výstupní práce**. K tomu, aby se elektron z látky uvolnil, je třeba prostřednictvím světla dodat energii, která je stejná nebo větší než velikost výstupní práce.

Vlastnosti emitovaných elektronů se studují na zařízení, jehož schéma je na obr. 1.



Obr. 1



Obr. 2

Ve vakuované baňce se nalézají dvě elektrody a látka, na které se fotoelektrický jev studuje, je nanášena na katodu. Anoda je sběrnou elektrodou, na kterou dopadají elektrony z katody uvolněné v důsledku fotoelektrického jevu. Zvolený způsob uspořádání dovoluje měřit velikost i polaritu napětí mezi elektrodami a měřit fotoelektrický proud. Příklad naměřených voltampérových charakteristik je na obr. 2.

Intenzita světla dopadajícího na katodu byla v případě křivky 1 větší než v případě křivky 2. Je-li anoda na kladném potenciálu, proud elektronů s rostoucím napětím roste, až dosáhne nasycené hodnoty, která je úměrná intenzitě dopadajícího světla. Jestliže je anoda vzhledem ke katodě na záporném potenciálu, fotoelektrický proud s rostoucím napětím klesá, až při určité hodnotě napětí zaniká. Velikost tohoto závěrného napětí, které označujeme jako **brzdné napětí**, nezávisí na intenzitě světla, ale na jeho kmitočtu. Charakteristické vlastnosti fotoelektrického jevu lze shrnout do následujících bodů:

1. Elektrony jsou emitovány pouze tehdy, jestliže frekvence dopadajícího záření je větší než hodnota ν_0 (mezní frekvence), charakteristická pro danou látku.
2. Velikost fotoelektrického proudu závisí na intenzitě záření, ne na jeho frekvenci.
3. Kinetická energie elektronů závisí lineárně na frekvenci záření. Může být stanovena měřením brzdného napětí, při kterém proud elektronů klesne na nulu.
4. Elektrony se uvolňují bez zpoždění i při velmi malých intenzitách dopadajícího záření.

Pomocí klasické elektrodynamiky nelze tyto vlastnosti fotoelektrického jevu vysvětlit.

Einsteinovo úspěšné vysvětlení fotoelektrického jevu bylo založeno na využití Planckovy kvantové hypotézy na celé spektrum elektromagnetického záření. Einstein zavedl představu elektromagnetického záření jako proudu kvant energie – částic, které nazval **fotony**.

Fotony se ve vakuu pohybují rychlostí světla c a nesou energii o velikosti

$$E = h\nu . \quad (2)$$

Při fotoelektrickém jevu interaguje jednotlivý foton s látkou tak, že foton zaniká a elektron přebírá jeho celkovou energii.

Energetickou bilanci jevu popisuje rovnice (Einsteinova)

$$h\nu = \Phi + \frac{1}{2}m_{0e}v^2, \quad (3)$$

kde m_{0e} je klidová hmotnost elektronu a v je rychlost elektronu, se kterou opouští látku.

Výstupní práce je veličina s hodnotou charakteristickou pro určitou látku. Z praktických důvodů se obvykle udává v jednotkách elektronvolt.

Elektronvolt je definován jako změna energie elektronu při průchodu elektrickým polem o rozdílu potenciálů rovnému 1 V. Pro převod mezi elektronvoltem a joulem platí:

$$1 \text{ eV} = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ J} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Hodnoty výstupní práce pro několik vybraných kovů:

Kov	Na	Al	Cu	Zn	Ag	Fe
$\Phi(\text{eV})$	2,28	4,08	4,70	4,31	4,73	4,50

Z rovnice (3) vyplývá, že fotoelektrický jev se uskuteční až od mezní frekvence ν_0 , pro kterou platí vztah

$$h\nu_0 = \Phi. \quad (4)$$

Vlnová délka λ_0 nazývaná mezní vlnová délka, je s ν_0 svázána vztahem $\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0}$, kde c je rychlost světla ve vakuu.

Například pro sodík je mezní vlnová délka 505 nm, která přísluší světlu ze zelené části viditelného spektra elektromagnetického záření. Pro ostatní kovy leží mezní vlnové délky v ultrafialové oblasti spektra.

Z energetické bilance lze také odvodit vztah mezi mezní frekvencí, skutečnou frekvencí fotonu a brzdícím napětím. Uvědomíme-li si, že kinetická energie elektronu se v případě, že fotoelektrický proud zanikne při brzdícím napětí U_0 , rovná energii eU_0 , kterou elektronu odebralo elektrické pole, tak po dosazení do vztahu (3) za výstupní práci ze vztahu (4) dostaneme vztah

$$eU_0 = h(\nu - \nu_0). \quad (5)$$

Fotoelektrický jev se v současné době uplatňuje v řadě aplikací. Obecně se jako fotoelektrické jevy označují všechny jevy, při nichž je velikost elektrického proudu ovlivněna světlem. Doposud jsme se zabývali **vnějším fotoelektrickým jevem**, tj. emisí elektronů z atomů do volného prostoru. Světelná čidla pracující na tomto principu, obr. 1, se nazývají vakuové fotočlánky a dnes se používají jen ke speciálním účelům. Na vnějším fotoelektrickém jevu jsou však založeny **fotonásobiče**, což jsou vakuové fotočlánky, kde se počet elektronů iniciovaný vnějším fotoelektrickým jevem v materiálu fotokatody zvětšuje pomocí sekundární emise

elektronů na dalších elektrodách. Fotonásobiče se užívají pro detekci a registraci velmi slabých světelných signálů.

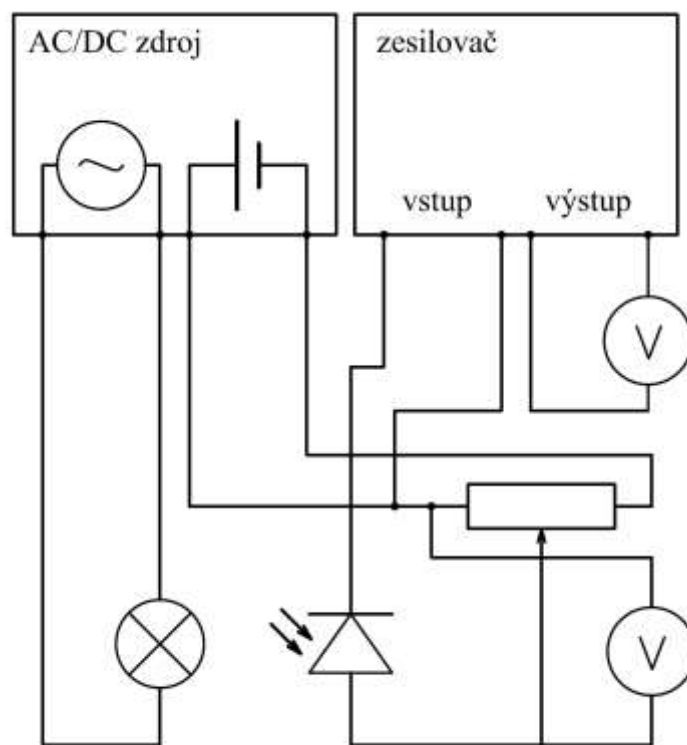
Vnitřní fotoelektrický jev nastává při interakci fotonů s nositeli elektrického náboje v polovodičích. Neprojevuje se emisí elektronů, ale změnou energie nositelů náboje a z toho vyplývající změny elektrické vodivosti. Polovodičové prvky využívající tento jev (fototranzistory, fotoodpory, CCD prvky atd.) se stále více prosazují, a to jak z důvodů nižších výrobních nákladů, tak z důvodů nižších nároků na napájení, možnosti miniaturizace atd.

SODIUM FOTOELEKTRICKÉHO JEVU

ÚLOHA č. 59

Způsob měření:

Schéma měření je na obr. 3.



Obr. 3

Pro zvolený filtr budeme zjišťovat závislost fotoelektrického proudu na předpětí. Napětí, při kterém klesne fotoelektrický proud na nulu, je rovno brzdnému napětí U_0 . z jeho znalosti a ze znalosti výstupní práce pro danou fotokatodu určíme Planckovu konstantu ze vztahu

$$h = (\Phi + eU_0) \frac{\lambda}{c}, \quad (6)$$

kde λ je použitá vlnová délka.

Připomínky k měření a vyhodnocení:

K zesilovači je připojený voltmetr. Vnitřní odpor zesilovače je $10 \text{ k}\Omega$. V případě, že je zesilovač nastaven na zesílení 10^4 , tak 1 V na výstupu zesilovače, odpovídá $0,1 \text{ mV}$ na vstupu. Proto 1 V na voltmetru připojeném k zesilovači odpovídá proudu 10 nA . Fotoelektrický proud tak jednoduše určíte uvedeným přepočtem.

Před měřením vynulujte na zesilovači výchytku voltmetru.

Z proměřené závislosti odhadněte oblast, kde se bude nacházet brzdné napětí. Tuto oblast proměřte s větší přesností, abyste brzdné napětí našli co nejpřesněji.