

21. Planckova konštanta

Autor pôvodného textu: **Ondrej Foltin**

Úloha: Určiť Planckovu konštantu pomocou vonkajšieho fotoelektrického javu

Teoretický úvod

Pri vonkajšom fotoelektrickom jave sa uvoľňujú elektróny z povrchu látky v dôsledku absorpcie svetla touto látkou. Boli pritom pozorované tieto zákonitosti:

- počet elektrónov emitovaných za jednotku času je priamo úmerný intenzite dopadajúceho svetla (ak ide o svetlo rovnakej frekvencie ale rôznej intenzity)
- maximálna rýchlosť elektrónov vyletujúcich z látky závisí od frekvencie dopadajúceho svetla
- rýchlosť vyletujúcich elektrónov nezávisí od intenzity svetla
- vonkajší fotoelektrický jav nastáva len vtedy, ak je frekvencia dopadajúceho svetla väčšia ako istá hraničná frekvencia f_0 , pričom táto frekvencia je pre rôzne látky rôzna

Tieto pozorované zákonitosti môžu byť vysvetlené na základe kvantovej predstavy o povahe svetla.

Pre energiu fotónu platí

$$E = hf, \quad (21.1)$$

kde f je frekvencia dopadajúceho svetla, h Planckova konštanta. Pri vonkajšom fotoelektrickom jave v kovoch sa časť tejto energie spotrebuje na prekonanie výstupnej práce A (na vytrhnutie elektrónu z kovu), zvyšok je kinetickou energiou uvoľneného elektrónu. Preto platí rovnica (Einsteinova rovnica fotoelektrického javu)

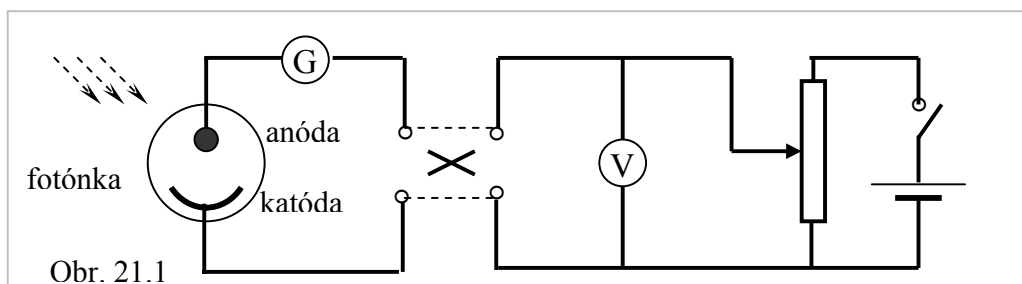
$$hf = A + \frac{1}{2}mv^2, \quad (21.2)$$

kde v je rýchlosť vyletujúceho elektrónu, m jeho hmotnosť. Ak $hf < A$, tak fotoelektrický jav nemôže nastať, lebo energia fotónu nepostačuje ani na vytrhnutie elektrónu z kovu. Pre hraničnú frekvenciu f_0 platí

$$hf_0 = A. \quad (21.3)$$

Metóda merania

Určenie Planckovej konštanty pomocou vonkajšieho fotoelektrického javu sa realizuje meraním voltampérových charakteristík vákuovej fotónky pri jej postupnom osvetlení svetlom



viacerých vlnových dĺžok. Z týchto charakteristík sa určí pre každú vlnovú dĺžku brzdné napätie U_b , t.j. také napätie, pri ktorom je prúd prechádzajúci fotónkou práve nulový. Princípiálna schéma merania je na obr. 21.1.

Jeden možný prípad idealizovaných voltampérových charakteristík vákuovej fotónky pre svetlo dvoch vlnových dĺžok λ_1 a λ_2 a dvoch svetelných tokov Φ_I a Φ_{II} je na obr. 21.2. Ak je potenciál anódy nižší ako potenciál katódy, fotoelektrón vyletujúci z katódy je brzdený elektrostatickým poľom. Tým sa jeho kinetická energia znižuje a pri dopade na anódu je menšia ako pri opustení kovu o hodnotu eU , kde e je náboj elektrónu a U rozdiel potenciálov anódy a katódy (elektrické napätie medzi nimi). Ak je veľkosť brzdného napätia U_b práve taká, že elektrón nedoletí na anódu, je práca eU_b nepatrne väčšia (v krajnom prípade rovnaká) ako kinetická energia vyletujúceho elektrónu. Platí vzťah

$$eU_b \geq E_k = hf - A \quad (21.4)$$

Pre krajný prípad platí

$$hf = eU_b + A. \quad (21.5)$$

Prístroje (monochromátory), ktoré sa používajú na generáciu monochromatického svetla, sú zvyčajne ciachované podľa vlnovej dĺžky λ . Ak chceme na určenie Planckovej konštanty využiť vzťah (21.5), treba použité vlnové dĺžky prepočítať na frekvencie f pomocou vzťahu

$$f = c / \lambda, \quad (21.6)$$

kde c je rýchlosťou svetla. Z určených brzdných napätí pri dvoch rozdielnych frekvenciách (vlnových dĺžkach) možno vypočítať Planckovu konštantu, ak poznáme

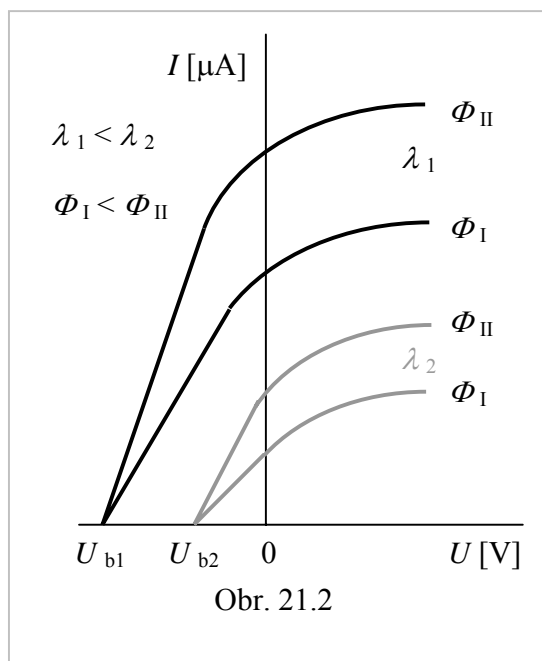
hodnotu náboja elektrónu a rýchlosť svetla. Napíšeme rovnice (21.5) pre dve frekvencie

$$hf_1 = eU_1 + A, \quad hf_2 = eU_2 + A,$$

a odčítaním týchto rovníc získame na výpočet Planckovej konštanty vzťah

$$h = e \frac{U_2 - U_1}{f_2 - f_1} = e \frac{\Delta U}{\Delta f}. \quad (21.7)$$

Aby sme zvýšili presnosť určenia Planckovej konštanty, zmeriame voltampérové charakteristiky pri viacerých vlnových dĺžkach. Ľubovlnú dvojicu vlnových dĺžok môžeme potom použiť na výpočet Planckovej konštanty. Ak meriame pri n vlnových dĺžkach, môžeme vytvoriť $\binom{n}{2}$ dvojíc a z výsledkov vypočítať aritmetický priemer. Racionálnejšie budeme postupovať, ak si uvedomíme, že podľa vzťahu (21.5) je brzdné napätie lineárnou funkciou frekvencie:

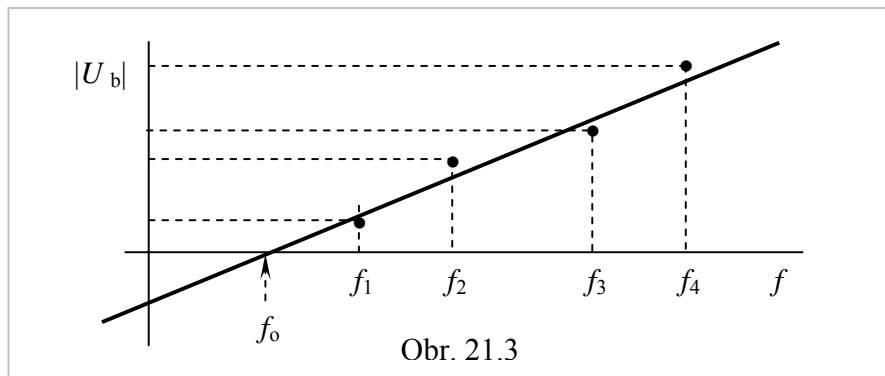


Obr. 21.2

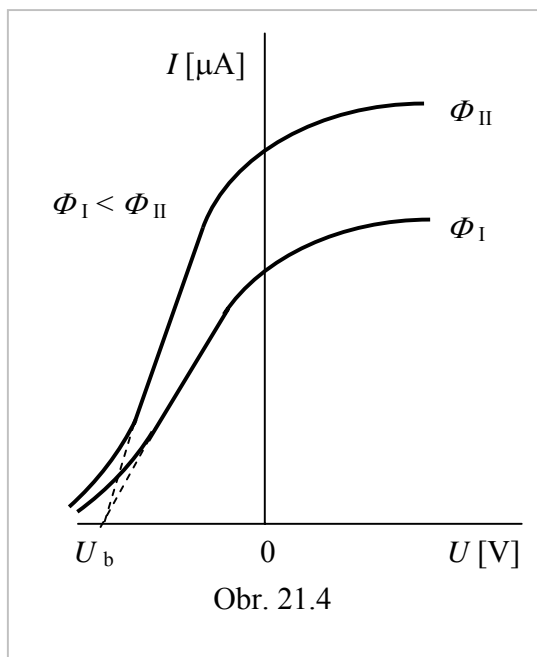
$$U_b = \frac{h}{e} f - \frac{A}{e} .$$

(21.8)

Do grafu vynesieme závislosť brzdnych napätí od frekvencie, bodmi preložíme optimálnu priamku a určíme jej smernicu k . Smernica je podielom Planckovej konštanty a náboja elektrónu $k = h / e$, takže vynásobením smernice nábojom elektrónu získame Planckovu konštantu.



Skutočná závislosť prúdu prechádzajúceho cez fotónku sa od idealizovanej čiastočne líši, a to najmä v tom, že prúd pri hodnote brzdneho napätia nie je nulový. Je to dôsledok existencie zvodového prúdu, iónového prúdu a fotoemisie z anódy, na ktorej sa môžu nachádzať čiastočky z katódy.



Skutočné voltampérové charakteristiky vákuovej fotónky pri osvetlení svetlom jednej vlnovej dĺžky a dvomi svetelnými tokmi sú na obr. 21.4. Hodnotu brzdneho napätia U_b určíme extrapoláciou lineárnych častí voltampérových charakteristík (na obrázku znázornené čiarkovane). Ak by sme použili na meranie dva rozdielne svetelné toky, extrapoláciou by sme mali dostať rovnaké hodnoty brzdneho napätia.

Úvaha o brzdnom napätí bola trochu zjednodušená, lebo sme neuvažovali rozdiel kontaktných potenciálov anódy a katódy, ktorý sa prejavuje pri meraní napätia. Ten sa však zahrnie do veličiny A , ktorá potom nepredstavuje iba výstupnú prácu. Výsledný tvar rovnice (21.5) a význam ostatných veličín v nej vystupujúcich však zostáva rovnaký.

Aparatúra a postup práce

Na určenie Planckovej konštanty využijeme vákuovú fotónku. Zdrojom monochromatického svetla je kolorimeter so zabudovaným monochromátorom. Na meranie prúdu využijeme prúdový zosilňovač a merací prístroj použitého kolorimetra. Prúd fotokatódy za temna sa nastaví na nulu nulovacím potenciometrom, primerané zosilnenie je nastavené

potenciometrom zosilnenia. Pri meraní Planckovej konštanty nepotrebujeme poznať skutočnú hodnotu prúdu, stačí poznať jej relatívnu hodnotu, lebo cieľom je určenie napätia pri nulovom prúde. Preto nepotrebujeme poznať ani zosilnenie zosilňovača, prúd odčítavame iba v dielikoch meracieho prístroja.

Pred vlastným meraním skontrolujeme činnosť optickej časti kolorimetra. Pri rozpojení obvodu fotónky (treba vytiahnuť banánik) odnímeme od výstupnej štrbiny kolorimetra púzdro s fotónkou. Na priloženej matnici vizuálne kontrolujeme farbu svetla, ktorá závisí od nastavenia vlnovej dĺžky (na nastavovacom bubienku). Overíme si aj zmenu intenzity svetla prepnutím páčky prepínača intenzity, ktorý má tri polohy – nulovú, malú a veľkú. Potom pripevníme púzdro s fotónkou na výstupnú štrbinu a rozpojený obvod fotónky opäť spojíme. Pri nastavenej vlnovej dĺžke svetla odmeriame voltampérovú charakteristiku fotónky. Vzhľadom na malú citlivosť zariadenia je vhodné merať iba pri veľkej intenzite svetla. Namerané veličiny zapisujeme do tabuľky.

Tab. 21.1

$\lambda_1 =$		$\lambda_2 =$		$\lambda_3 =$		$\lambda_4 =$		$\lambda_5 =$	
$f_1 =$		$f_2 =$		$f_3 =$		$f_4 =$		$f_5 =$	
U (V)	I (d)	U (V)	I (d)	U (V)	I (d)	U (V)	I (d)	U (V)	I (d)

Elektrický potenciál katódy považujeme za nulový. Brzdné elektrické pole sa potom vytvára tak, že na anóde je záporný elektrický potenciál. Pri postupne sa zvyšujúcej absolútnej hodnote napätia $|U|$ medzi anódou a katódou odmeriame aspoň 10 bodov voltampérovej charakteristiky. Prírastky napätia prispôsobujeme tak, aby fotoprúd klesal rovnomerne.

Meranie opakujeme pri viacerých vlnových dĺžkach. Extrapoláciou lineárnych častí voltampérových charakteristík (obr. 21.4) získame pre každú vlnovú dĺžku príslušné brzdné napätie. Potom zostrojíme graf závislosti brzdného napätia od frekvencie svetla (obr. 21.3), vypočítame smernicu priamky a nakoniec Planckovu konštantu.

Relatívnu chybu merania v percentách určíme pomocou vzťahu

$$\frac{\delta h}{h} = \frac{h_{\text{vyp}} - h_{\text{tab}}}{h_{\text{tab}}} \cdot 100, \quad (21.9)$$

kde $h_{\text{tab}} = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Výpočet smerodajnej odchýlky výsledku merania

Vzťahom (21.9) vypočítame relatívnu chybu merania, teda relatívnu odchýlku nameranej hodnoty od skutočnej hodnoty Planckovej konštanty. Takto však nezískame informáciu o rozptyle nameraných hodnôt, o ich opakovateľnosti. Túto vlastnosť merania kvantifikuje smerodajná odchýlka merania. Rozptyl by sme dokázali posúdiť aj vtedy, keby sme meranie opakovali viackrát, alebo keby sme počítali Planckovu konštantu z viacero dvojíc vlnových dĺžok. V tejto úlohe však nebude cieľom uskutočniť takýto výpočet.

Otázky

1. Prečo treba Planckovu konštantu počítať podľa vzťahu $h = e(\Delta U / \Delta f)$, a nie podľa $h = e(U / f)$?
2. Čo je brzdné napätie a ako ho určujeme?
3. Prečo fotónkou prechádza prúd aj pri pripojenom brzdom napätí?

Meno:

Kružok:

Dátum merania:

Protokol laboratórnej úlohy 21**Meranie Planckovej konštanty****Stručný opis metódy merania:****Vzťahy ktoré sa používajú pri meraní:****Schéma zapojenia:****Prístroje a pomôcky:****Tab. 21.1**

$\lambda_1 =$		$\lambda_2 =$		$\lambda_3 =$		$\lambda_4 =$		$\lambda_5 =$	
$f_1 =$		$f_2 =$		$f_3 =$		$f_4 =$		$f_5 =$	
U (V)	I (d)	U (V)	I (d)	U (V)	I (d)	U (V)	I (d)	U (V)	I (d)
$U_{b1} =$		$U_{b2} =$		$U_{b3} =$		$U_{b4} =$		$U_{b5} =$	

Tu vpíšte jeden konkrétny výpočet s uvedením hodnôt a rozmerov veličín:

Smernica $k = (U_{b2} - U_{b1}) / (f_2 - f_1) =$

Planckova konštanta $h =$

Náboj elektrónu $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$, Planckova konštanta $h_{\text{tab}} = 6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Smernica závislosti brzdného napätia od frekvencie $U_b = k f + q$, získaná pomocou regresnej priamky	$k =$
Planckova konštanta $h = k e$	$h_{\text{vyp}} =$
Relatívna chyba merania $\frac{\delta h}{h} = \frac{h_{\text{vyp}} - h_{\text{tab}}}{h_{\text{tab}}} \cdot 100$	$\frac{\delta h}{h} =$

Výsledok merania:

Uveďte vypočítanú Planckovu konštantu spolu s relatívnou chybou merania:

$h =$

K protokolu treba pripojiť:

- a) grafy závislosti fotoelektrického prúdu od napätia,
- b) graf závislosti brzdného napätia od frekvencie svetla.

Slovné zhodnotenie výsledkov merania a zdrojov možných chýb:

Dátum odovzdania protokolu:

Podpis študenta:

Podpis učiteľa: