

Výstupná práca fotokatódy, Planckova konštanta

Úloha: Na základe merania V-A charakteristiky fotónky určte výstupnú prácu fotokatódy.

Teoretický úvod

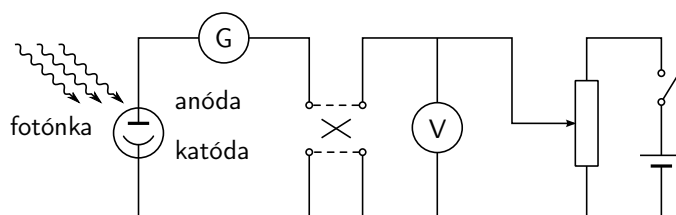
Pri vonkajšom fotoelektrickom jave sa uvoľňujú elektróny z povrchu kovu (sú emitované) v dôsledku absorpcie svetla týmto kovom. Boli pritom pozorované tieto zákonitosti:

- pri svetle rovnakej frekvencie ale rôznej intenzity je počet elektrónov emitovaných za jednotku času priamo úmerný intenzite dopadajúceho svetla
- kinetická energia elektrónov opúšťajúcich kov závisí priamo úmerne od frekvencie dopadajúceho svetla a nezávisí od intenzity svetla
- vonkajší fotoelektrický jav nastáva len vtedy, ak je frekvencia dopadajúceho svetla f väčšia ako istá hraničná frekvencia f_0 , pričom táto hraničná frekvencia je pre rôzne kovy rôzna
- elektróny sú emitované takmer okamžite (v čase menšom ako 10^{-9} s) po osvetlení povrchu kovu.

Tieto pozorované zákonitosti môžu byť podľa Einsteina vysvetlené na základe kvantovej predstavy o povahe svetla, predstavy o fotónoch. Pre energiu fotónu platí

$$E = hf \quad (1)$$

kde f je frekvencia dopadajúceho svetla a h Planckova konštanta. Pri vonkajšom fotoelektrickom jave sa energia pohlteneho fotónu spotrebuje sčasti na vytrhnutie elektrónu z kovu, sčasti sa odovzdá elektrónu vo forme jeho kinetickej energie. Smery rýchlostí jednotlivých emitovaných elektrónov sú rôzne. Aj veľkosti rýchlostí emitovaných elektrónov sú rôzne, keďže na uvoľnenie jednotlivých elektrónov z mriežky kovu je potrebná mierne odlišná



Obr. 1: Schéma zapojenia obvodu.

energia. Výstupná práca A predstavuje minimálnu energiu potrebnú na opustenie kovej katódy. Maximálna kinetická energia $E_{k\max}$ pre elektróny uvoľňované z kovu je daná vzťahom

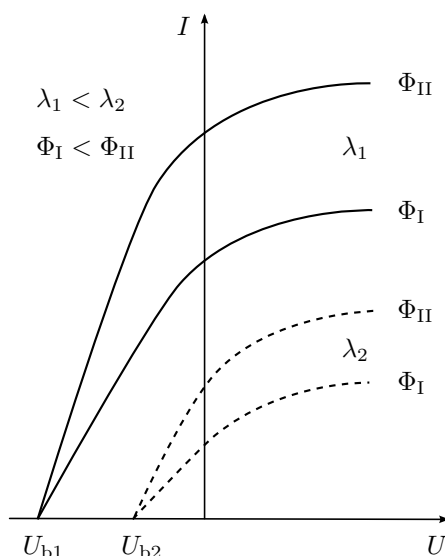
$$E_{k\max} = hf - A \quad (2)$$

Ak $hf < A$, tak fotoelektrický jav nemôže nastať, lebo energia fotónu nepostačuje ani na vytrhnutie elektrónu z kovu. Pre hraničnú frekvenciu f_0 platí

$$hf_0 = A \quad (3)$$

Metóda merania

Určenie Planckovej konštanty pomocou vonkajšieho fotoelektrického javu sa realizuje meraním voltampérových charakteristík vákuovej fotónky pri jej postupnom osvetlení svetlom viacerých vlnových dĺžok. Principiálna schéma merania je na obr. 1.



Obr. 2: Idealizované voltampérové charakteristiky vákuovej fotónky pri dvoch rôznych vlnových dĺžkach λ_1 – plná čiara, λ_2 – prerušovaná čiara a pri dvoch rôznych svetelných tokoch Φ_I a Φ_{II} .

Idealizované voltampérové charakteristiky vákuovej fotónky pre svetlo dvoch vlnových dĺžok λ_1 a λ_2 a dvoch svetelných tokov Φ_I a Φ_{II} sú na obr. 2. Ak je potenciál anódy nižší ako potenciál katódy, tak fotoelektrón vyletujúci z katódy je brzdený elektrostatickým poľom. Čím je toto brzdiace pole silnejšie, tým menej elektrónov dosiahne anódu a teda tým menší bude anódový prúd. Ak je hodnota tohto napätia práve taká, že žiaden elektrón nadoletí na anódu, nazývame to brzdným napätím U_b . Toto napätie zodpovedá zápornej časti voltampérovej charakteristiky (pozri obr. 2 a obr. 4) a preto je potrebné jeho hodnoty považovať za záporne. Práca $e|U_b|$ sa rovná kinetickej energii najrýchlejšieho vyletujúceho elektrónu (kde $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ je veľkosť náboja elektrónu). Platí vzťah

$$e|U_b| = E_{k\max} = hf - A \quad (4)$$

Z toho vyplýva

$$hf = e|U_b| + A \quad (5)$$

Prístroje, ktoré sa používajú na generáciu monochromatického svetla, sú zvyčajne ciachované podľa vlnovej dĺžky λ . Ak chceme na určenie Planckovej konštanty využiť vzťah (5), treba použité vlnové dĺžky prepočítať na frekvencie f pomocou vzťahu

$$f = c/\lambda \quad (6)$$

kde c je rýchlosť šírenia sa svetla svetla ($c = 299\,792\,458\text{ ms}^{-1}$). Z určených brzdných napätí pri dvoch rozdielnych frekvenciách (vlnových dĺžkach) možno vypočítať Planckovu konštantu, ak poznáme hodnotu náboja elektrónu a rýchlosť svetla. Napíšeme rovnice (5) pre dve frekvencie

$$hf_1 = e|U_1| + A \quad hf_2 = e|U_2| + A$$

a odčítaním týchto rovníc získame na výpočet Planckovej konštanty vzťah

$$h = e \frac{|U_2| - |U_1|}{f_2 - f_1} = e \frac{\Delta U}{\Delta f} \quad (7)$$

Aby sme zvýšili presnosť určenia Planckovej konštanty, zmeriame voltampérové charakteristiky pri viacerých vlnových dĺžkach. Ľubovoľnú dvojicu vlnových dĺžok môžeme potom použiť na výpočet Planckovej konštanty. Racionálnejšie budeme postupovať, ak si uvedomíme, že podľa vzťahu (5) je brzdné napätie lineárnou funkciou frekvencie:

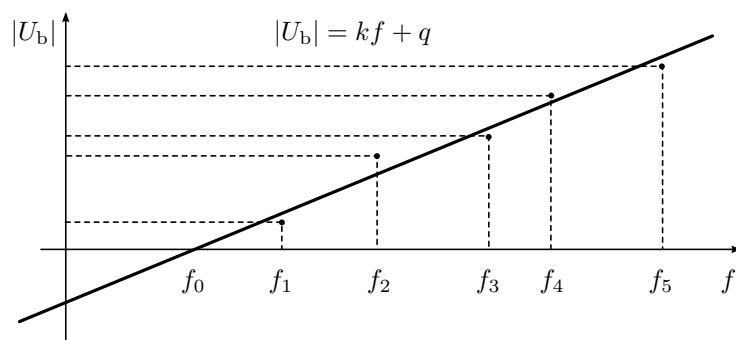
$$|U_b| = \frac{h}{e}f - \frac{A}{e} \quad (8)$$

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

$$h = ek \quad (9)$$

Skutočná závislosť prúdu prechádzajúceho cez fotónku sa od idealizovanej čiastočne líši, a to hlavne v tom, že prúd pri hodnote brzdného napätia nie je nulový. Je to dôsledok existencie zvodového a iónového prúdu. Reálna voltampérová charakteristiky vákuovej fotónky pri osvetlení svetlom jednej vlnovej dĺžky je na obr. 4. Hodnotu brzdného napätia U_b určíme extrapoláciou lineárnej časti voltampérovej charakteristiky (na obrázku znázornené čiarkovane).

Úvaha o brzdnom napätí bola trocha 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 (5) a význam ostatných v nej vystupujúcich veličín však zostáva rovnaký.



Obr. 3: Graf lineárnej závislosti veľkosti brzdného napätia $|U_b|$ od frekvencie f dopadajúceho žiarenia. Krivka grafu pretína vodorovnú os v bode f_0 , ktorý by v ideálnom prípade zodpovedal hraničnej frekvencii materiálu katódy fotónky. V našom experimente to tak nie je, pretože neuvažujeme kontaktné napätie medzi katódou a anódou.

Postup práce

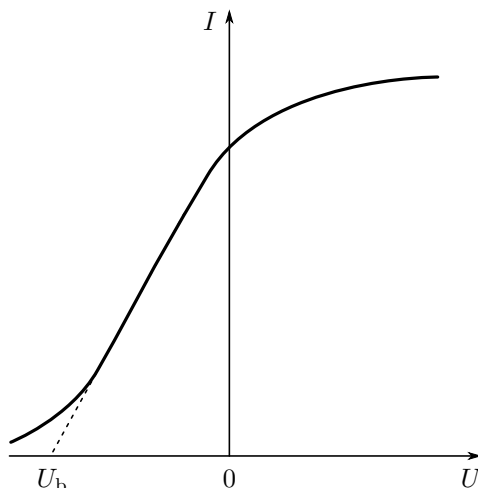
Na určenie Planckovej konštanty využijeme vákuovú fotónku. Zdrojom monochromatického svetla je kolorimeter so zabudovaným monochromátorom. Na meranie prúdu využijeme prúdový zosilňovač a merací prístroj použitého kolorimetra. Pri meraní Planckovej konštanty nepotrebujeme poznať skutočnú hodnotu prúdu, stačí poznať relatívnu hodnotu, lebo cieľom je určenie napätia pri nulovom prúde. Preto nepotrebujeme poznať ani zosilnenie zosilňovača, prúd odčítavame iba v dielikoch meracieho prístroja. Intenzita svetla kolorimetra je pre rôzne vlnové dĺžky rôzna, čo má vplyv na veľkosť prúdu, avšak to neovplyvní určenie príslušného brzdného napätia.

Pri nastavenej vlnovej dĺžke svetla odmeriame voltampérovú charakteristiku fotónky. Namerané veličiny zapisujeme do tabuľky 1.

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 niekoľko bodov voltampérovej charakteristiky. Prírastky napätia prispôsobujeme tak, aby fotoprúd klesal rovnomerne.

Meranie opakujeme pri viacerých vlnových dĺžkach. Voltámperové charakteristiky vynášame do grafu a extrapoláciou ich lineárnej časti (obr. 4) získame pre každú vlnovú dĺžku príslušné brzdné napätie. Extrapoláciu môžeme vykonať ručne na milimetrovom papieri tak, že po vynesení nameraných bodov zhodnotíme, ktoré body ležia na priamke. Nameraná závislosť nesmeruje k vodorovnej osi po priamke z dôvodov, ktoré sú opísané vyššie. Musíme rozhodnúť, kde sa začína a končí lineárna časť grafu. Vybranými bodmi preložíme optimálnu priamku priložením pravítka tak, aby rovnaký počet bodov ležal pod a nad krivkou. Priesečník predĺženej (extrapolovanej) priamky a napäťovej osi vymedzuje hľadané brzdné napätie.

Druhá možnosť, ako extrapolovať lineárnu časť nameranej charakteristiky je použiť softvér na spracovanie experimentálnych dát. Namerané body si necháme počítačom vykresliť do grafu a rozhodneme, ktoré body ležia v lineárnej časti závislosti. Tie vyberieme pre ďalšie spracovanie. Metódou lineárnej regresie preložíme vybranými bodmi optimálnu



Obr. 4: Reálna voltampérová charakteristika vákuovej fotónky (plná čiara) nesmeruje priamo k brzdnému napätiu najmä vplyvom iónového a zvodového prúdu. Brzdé napätie nájdeme extrapoláciou lineárnej časti charakteristiky (prerušovaná čiara) k nulovému prúdu.

priamku $I = kU + q$. Brzdé napätie potom vypočítame z rovnice priamky tak, že za prúd dosadíme hodnotu 0:

$$0 = kU_b + q$$

Takto získame niekoľko brzdných napätí pre rôzne vlnové dĺžky dopadajúceho žiarenia. Vlnové dĺžky prevedieme na frekvencie použitím vzťahu (6) a zostrojíme graf závislosti brzdného napätia od frekvencie svetla (obr. 3), metódou lineárnej regresie určíme smernicu priamky a nakoniec pomocou vzťahu (9) Planckovu konštantu.

Relatívnu chybu merania v percentách určíme pomocou vzťahu

$$\frac{\delta h}{h} = \frac{h - h_{\text{tab}}}{h_{\text{tab}}} \cdot 100\% \quad (10)$$

kde tabuľková hodnota Planckovej konštanty je $h_{\text{tab}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Výpočet smerodajnej odchýlky výsledku merania

Vzťahom (10) 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

- Prečo treba Planckovu konštantu počítať podľa vzťahu $h = e(\Delta U/\Delta f)$ a nie podľa $h = e(U/f)$?

- Čo je brzdné napätie a ako ho určujeme?
- Prečo fotónkou prechádza prúd aj pri pripojenom brzdnom napätí?

Meno:

Krúžok:

Dátum merania:

Protokol laboratórnej úlohy č. 5 – 28

Výstupná práca fotokatódy, Planckova konštanta

Stručný opis metódy merania

Vzťahy, ktoré sa používajú pri meraní

Prístroje a pomôcky

Záznam merania, výpočty a výsledky

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

Náboj elektrónu $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$, Planckova konštanta $h_{\text{tab}} = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

Smernica závislosti brzdného napätia od frekvencie $ U_b = kf + q$ získaná pomocou regresnej priamky	$k =$
Planckova konštanta $h = ek$	$h =$
Koeficient determinovanosti	$\mathcal{R} =$
Relatívna chyba merania $\frac{\delta h}{h} = \frac{h - h_{\text{tab}}}{h_{\text{tab}}} \cdot 100\%$	$\frac{\delta h}{h} =$

Výsledok merania:

Uveďte vypočítanú Planckovu konštantu. Uveďte aj relatívnu chybu merania:

$$h = \frac{\delta h}{h} =$$

Prílohy

- Grafy závislosti fotoelektrického prúdu od napätia.
- Graf závislosti brzdného napätia od frekvencie svetla.

Zhodnotenie výsledkov

Dátum odovzdania protokolu:

Podpis študenta:

Hodnotenie a podpis učiteľa: