

Laboratórna úloha č. 30

Tepelná emisia elektrónov v kovoch

Úloha: Vypočítať výstupnú prácu elektrónov z wolfrámu na základe merania voltampérových charakteristík vákuovej diódy

Teoretický úvod

Každá látka, teda aj kov, pozostáva z atómov, ktoré sa skladajú z kladne nabitého jadra a záporne nabitých elektrónov. Ako celok je atóm a teda aj látka skladajúca sa z atómov elektricky neutrálna. V kovoch je časť elektrónov pomerne voľná (jeden aj dva elektróny na každý atóm), nie sú viazané na konkrétne atómy, môžu sa medzi nimi pohybovať. Voľné elektróny tvoria tzv. *elektrónový plyn*, v ktorom sa elektróny celkom náhodne pohybujú rôznymi smermi a rôznymi rýchlosťami. Podobne ako pri molekulách plynu, nachádzajú sa medzi nimi rýchle aj pomalé elektróny, pričom rýchlosť jednotlivých elektrónov sa pri vzájomných zrážkach, ako aj pri zrážkach s atómami skokom mení.

Napriek tomu, že tieto elektróny sa môžu v kove voľne pohybovať, nemôžu z kovu jednoducho uniknúť. Dá sa to vysvetliť vznikom príťažlivej sily medzi záporne nabitým elektrónom, ktorý sa dostane tesne nad povrch kovu a kovom, v ktorom sa tým súčasne vytvára nadbytok kladného náboja. Aby elektrón mohol z kovu uniknúť, musel by mať jednak správny smer pohybu, ale najmä dostatok energie na prekonanie príťažlivej sily. Minimálna energia, ktorú elektrón potrebuje na únik z kovu, sa nazýva *výstupná práca*. Túto energiu môže elektrón získať napríklad absorbovaním energie svetelného fotónu (vtedy vzniká fotoelektrický jav), pôsobením vhodne orientovaného vonkajšieho elektrického poľa (studená emisia), ale túto energiu dosahujú aj niektoré z voľných elektrónov, vzhľadom na štatistické rozdelenie ich energií (rýchlostí), ktoré je vyjadrené Maxwellovou distribučnou funkciou. Čím vyššia je teplota kovu, tým väčšie percento voľných elektrónov dosahuje túto energiu a opúšťa kov. Tento jav sa využíva vo vákuových elektródkach (aj obrazovkách osciloskopov, či televízorov), v ktorých zdrojom elektrónov je žeravené vlákno.

Richardson s Dushmanom odvodili vzťah vyjadrujúci tzv. *termoemísny elektrický prúd*, teda prúd I_e podmienený uvoľňovaním elektrónov zo zohriateho telesa (teda aj zo žeravenej katódy elektrónky) iba vplyvom zvýšenej teploty:

$$I_e = BST^2 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \quad (1)$$

V tomto vzťahu B je konštanta charakteristická pre daný kov, T termodynamická teplota kovu, S plošný obsah jeho povrchu, k_B Boltzmannova konštanta a W výstupná práca.

Veľkosť veličín B a W závisí nielen od druhu kovu, ale aj od fyzikálneho stavu jeho povrchu, najmä čistoty.

Logaritmovaním rovnice (1) získame vzťah

$$\ln\left(\frac{I_e}{T^2}\right) = \ln(BS) - \frac{W}{k_B} \frac{1}{T} \quad (2)$$

Ak použijeme označenie

$$y = \ln\left(\frac{I_e}{T^2}\right), \quad q = \ln(BS), \quad k = -\frac{W}{k_B}, \quad x = \frac{1}{T} \quad (3)$$

vzťah (2) nadobudne tvar rovnice priamky:

$$y = kx + q$$

Z hľadiska určenia výstupnej práce W má v tomto vzťahu rozhodujúci význam smernica priamky k , ktorú treba určiť. Na to treba najprv meraním získať súradnice niekoľkých bodov tejto priamky. To znamená, pri rôznych hodnotách premennej x , čiže pri rôznych teplotách vlákna katódy, určiť hodnotu premennej y , t.j. určiť podiel emisného prúdu a druhej mocniny termodynamickkej teploty vlákna (resp. logaritmus tohto podielu).

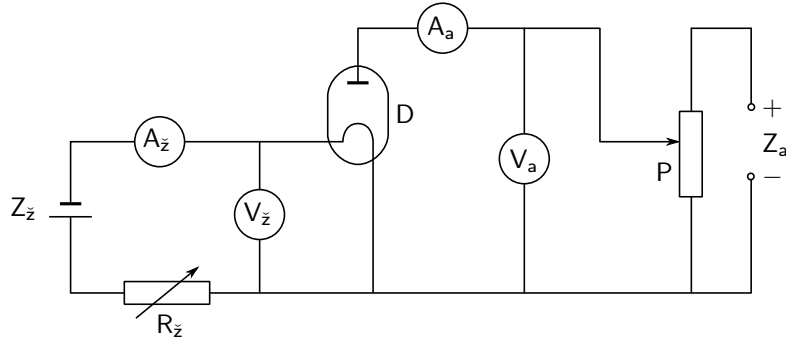
Metóda merania a opis aparatury

Na meranie slúži vákuová dióda s valcovou anódou, pričom katódu tvorí tenký wolfrámový drôt (vlákno) umiestnený v osi valcovej anódy. Teplota katódy sa dá určiť zo známej (tabelovanej) teplotnej závislosti rezistivity wolfrámu (detaily sú uvedené ďalej). Vo vákuovej dióde dokážme merať anódový, nie priamo emisný prúd. Anódový prúd sa rovná emisnému iba vtedy, keď všetky elektróny emitované katódou dopadnú na anódu. To nastáva iba v stave nasýtenia anódového prúdu, teda pri väčších anódových napätiach. Ak je anódové napätie nulové alebo iba malé, okolo žeravenej katódy vzniká elektrónový oblak, ktorého záporný náboj vytvára elektrické pole urýchľujúce elektróny naspäť ku katóde, takže nie všetky sa dostanú na anódu. Preto treba merať voltampérové charakteristiky diódy, a z nich určiť nasýtený anódový prúd.

Schéma zapojenia obvodu na meranie voltampérových charakteristík je na obr. 1.

Žeravenie katódového vlákna diódy D je zabezpečené zdrojom Z_z , ovládané reostatom R_z a kontrolované ampérmetrom A_z a voltmetrom V_z . Zmenou elektrického odporu reostatu sa mení žeraviaci prúd I_z , a tým teplota vlákna a súčasne aj emisný prúd. Z hodnôt napätia a prúdu odčítaných na prístrojoch A_z a V_z sa vypočíta odpor vlákna R_v , ktorého hodnota slúži na určenie *teploty vlákna* – pomocou tabuľky nachádzajúcej sa pri aparatúre.

Voltampérové charakteristiky diódy treba zmerať aspoň pri piatich teplotách vlákna. Zdrojom anódového napätia je jednosmerný zdroj Z_a , pričom veľkosť anódového napätia medzi katódou a anódou sa nastavuje potenciometrom P. *Pri meraniach neslobodno prekročiť maximálne hodnoty napätí a prúdov, vyznačených na dióde.*



Obr. 1: Schéma zapojenia obvodu.

Zmenou anódového napätia U_a sa dosahuje zmena anódového prúdu I_a , pričom táto závislosť (prúdu od napätia) nie je lineárna. Spočiatku, pri malých U_a , prúd rastie podľa Langmuirovho zákona $I_a = CU_a^{3/2}$ a je menší než termoemisný prúd I_e vyjadrený vzťahom (1). Pri malých napätiach sa totiž časť tepelne emitovaných elektrónov vracia na katódu. Akonáhle je elektrické pole také veľké, že všetky emitované elektróny dopadnú na anódu (vtedy zanikne priestorový náboj okolo katódy), anódový prúd dosiahne stav nasýtenia a rovná sa termoemisnému prúdu (pozri korekciu na anódové napätie).

Po odmeraní termoemisného prúdu I_e pri rôznych teplotách T katódy, by sme mohli využiť vzťah (2) na výpočet výstupnej práce vynesением závislosti $\ln(I_e/T^2)$ od $1/T$ a určením smernice tejto závislosti. Takéto určenie výstupnej práce by však nezohľadňovalo závislosť celkového emisného prúdu od intenzity elektrického poľa v mieste povrchu katódy. Pôsobenie elektrického poľa medzi katódou a anódou sa neobmedzuje iba na urýchľovanie tepelne emitovaných elektrónov, ale vyvoláva aj studenú emisiu, takže anódový prúd v stave nasýtenia je súčtom termoemisného prúdu a prúdu vyvolaného studenou emisiou. Elektrické pole vytrháva z katódy také elektróny, ktorých kinetická energia ešte celkom nestačí na uvoľnenie z kovu. Čím silnejšie je toto pole, tým väčší je jeho príspevok k celkovej emisii elektrónov z kovu. Nameraný prúd je väčší ako termoemisný, čo sa javí tak, ako keby výstupná práca bola menšia. Preto je nevyhnutná *korekcia výsledku na anódové napätie* U_a . Bez odvodnenia uvedieme vzťah medzi skutočnou výstupnou prácou W a výstupnou prácou W_a , ktorú pri tejto metóde nameriame:

$$W_a = W - c\sqrt{U_a} \quad (4)$$

kde c je konštanta úmernosti, v ktorej je zahrnutý náboj elektrónu, a zohľadnená aj geometria diódy. Po dosadení vzťahu (4) do (1), pre anódový prúd dostaneme:

$$\begin{aligned} I_a &= BST^2 \exp\left(-\frac{W_a}{k_B T}\right) = BST^2 \exp\left[-\frac{1}{k_B T} (W - c\sqrt{U_a})\right] = \\ &= BST^2 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right) \exp\left(\frac{c\sqrt{U_a}}{k_B T}\right) \end{aligned}$$

a po ďalšej úprave

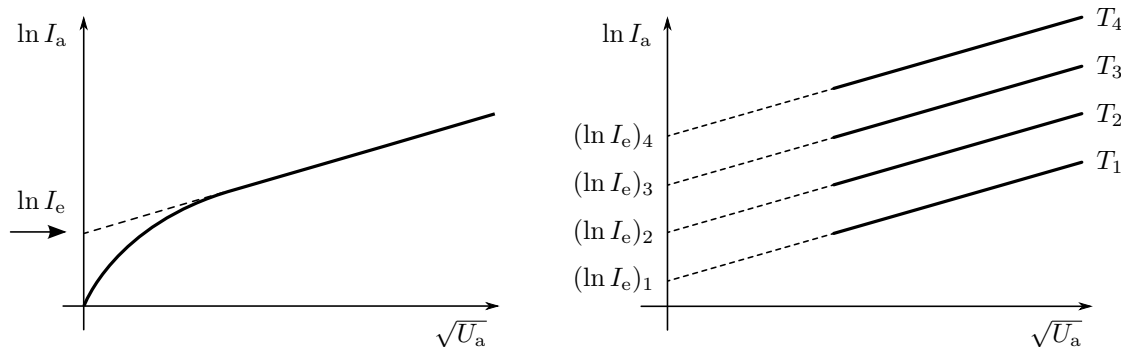
$$I_a = I_e \exp\left(\frac{c\sqrt{U_a}}{k_B T}\right) = I_e \exp\left(\frac{A}{T} \sqrt{U_a}\right)$$

kde $A = c/k_B$. Logaritmovaním túto rovnicu upravíme a dostaneme vzťah vhodný na určenie skutočného emisného prúdu:

$$\ln I_a = \ln I_e + \frac{A}{T} \sqrt{U_a} \quad (5)$$

Postup merania

Nastavíme žeraviaci prúd I_z na prvú vhodnú hodnotu, odčítame žeraviace napätie U_z , zapíšeme do hlavičky tabuľky 1 a vypočítame elektrický odpor R_v vlákna katódy. Pomocou tabuľky určíme jeho teplotu T . Potom odmeriame závislosť anódového prúdu I_a od anódového napätia U_a , výsledky postupne zapisujeme do tabuľky a do grafu vynesieme závislosť $\ln I_a$ od $\sqrt{U_a}$. Získame graf približne takého tvaru, ako je na obr. 2 vľavo. Extrapoláciou nameranej závislosti k hodnote $U_a = 0$ získame logaritmus emisného prúdu $\ln I_e$ a tým aj prúd I_e pri danej teplote vlákna.



Obr. 2: Grafy závislostí $\ln I_a$ od $\sqrt{U_a}$. Vľavo je ukážka reálneho priebehu (plná krivka) a extrapolácia lineárnej časti.

Tento postup opakujeme aspoň pri piatich teplotách vlákna (obr. 2 vpravo). Získané hodnoty emisných prúdov I_e a príslušných teplôt T zapíšeme do tabuľky 2. Vypočítame údaje potrebné na nakreslenie grafu v súlade so vzťahom (2), vynesieme graf závislosti $y = \ln(I_e/T^2)$ od premennej $x = 1/T$ a nájdeme smernicu tejto závislosti. Zo smernice pomocou vzťahu (3) vypočítame skutočnú výstupnú prácu W .

Otázky

1. S akým mechanizmom súvisia jednotlivé časti voltampérových charakteristík?
2. Prečo sa anódový prúd nerovná termoemisnému prúdu?
3. Čo môže byť zdrojom chýb merania pri tejto metóde?

Meno:

Kružok:

Dátum merania:

Protokol laboratórnej úlohy č. 30
Tepelná emisia elektrónov v kovoch

Stručný opis metódy merania

Vzťahy, ktoré sa používajú pri meraní

Prístroje a pomôcky

Záznam merania, výpočty a výsledky

$U_{\bar{z}} =$		$I_{\bar{z}} =$				$R_v =$			$T =$		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
U_a											
$U_a^{1/2}$											
I_a											
$\ln I_a$											
$\ln I_e =$						$I_e =$					

$U_{\bar{z}} =$		$I_{\bar{z}} =$				$R_v =$			$T =$		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
U_a											
$U_a^{1/2}$											
I_a											
$\ln I_a$											
$\ln I_e =$						$I_e =$					

$U_{\bar{z}} =$		$I_{\bar{z}} =$				$R_v =$			$T =$		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
U_a											
$U_a^{1/2}$											
I_a											
$\ln I_a$											
$\ln I_e =$						$I_e =$					

$U_{\bar{z}} =$		$I_{\bar{z}} =$			$R_v =$			$T =$		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_a										
$U_a^{1/2}$										
I_a										
$\ln I_a$										
$\ln I_e =$					$I_e =$					

$U_{\bar{z}} =$		$I_{\bar{z}} =$			$R_v =$			$T =$		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_a										
$U_a^{1/2}$										
I_a										
$\ln I_a$										
$\ln I_e =$					$I_e =$					

	T	$1/T$	T^2	I_e	I_e/T^2	$\ln(I_e/T^2)$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
smernica závislosti $k =$			výstupná práca $W =$			

Výpočet výstupnej práce:

$k =$

$W =$

Výsledok merania s odhadnutou neistotou merania:

$W =$

Prílohy

- Grafy závislostí $\ln I = f(\sqrt{U})$ pri všetkých teplotách katódy.
- Graf závislost $y = kx + q$ kde $y = \ln(I_e/T^2)$ a $x = 1/T$.

Zhodnotenie výsledkov

Dátum odovzdania protokolu:

Podpis študenta:

Hodnotenie a podpis učiteľa: