

Fyzikální praktikum 3 - úloha 2

Studium termoelektronové emise

Teorie: Termoemise, jak název napovídá, je emise, kde se energie potřebná na uvolnění elektronů získává z energie tepelné. V praxi je využívána například v elektronových mikroskopech nebo obrazovkách.

Pokud je tepelná energie dostatečně velká, z materiálu se mohou uvolňovat elektrony a tím vyvolávat proud. Součet všech takto uvolněných elektronů při dané teplotě určuje „*nasyčený emisní proud*“. Velikost proudu pak můžeme určit podle Richardsonovy-Dushmanovy rovnice

$$I_{nas} = BT^2 e^{-\frac{\omega}{kT}}.$$

Pokud tento vztah zlogaritmujeme a upravíme, získáme

$$y = -\frac{\omega}{k}x + \ln B.$$

Ze směrnice této přímky můžeme určit výstupní práci daného materiálu.

Lze ukázat, že kinetická energie elektronů emitovaných z povrchu kovu má Maxwellovo rozdělení. Toto rozdělení lze určit například metodou brzdícího pole. Mezi katodu a anodu vložíme anodové napětí a měříme proud v závislosti na tomto napětí. Pokud snižujeme anodové napětí, elektrony jsou stále více bržděny, takže stále více elektronů se nemůže podílet na vedení proudu. Navíc je zřejmé, že při vyšší teplotě katody se bude emitovat jiné množství elektronů, takže i rozdělení bude jiné. Z VA charakteristiky pak můžeme určit teplotu elektronů, a to ze vztahu

$$I = I_0 e^{\frac{eU_a}{kT}}.$$

Po zlogaritmování lze z přímkové části určit směrnici a z ní teplotu elektronů. Tu můžeme poté srovnat s teplotou určenou při měření výstupní práce.

Přítomnost elektrického pole u katody má za následek snížení výstupní práce katody. Dochází totiž k superpozici potenciálu vakua a potenciálu vnějšího elektrického pole, čímž se potenciálový stupeň změní na potenciálový val, navíc se zmenšenou výškou. To znamená, že elektronu stačí menší práce na překonání valu a navíc je nenulová pravděpodobnost protonelování skrz val. Rozdíl výstupní práce je dán vztahem

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}}.$$

Nová výstupní práce bude tedy dána vztahem

$$\omega' = \omega - \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0}}.$$

Tím se ovšem změní Richardsonova-Dushmanova rovnice, která tak získá tvar

$$I'_{nas} = BT^2 e^{-\frac{\omega'}{kT}} = I_{nas} e^{\frac{\omega_p}{kT}} \Rightarrow \ln I'_{nas} = \ln I_{nas} + \frac{\omega_p}{kT} = \ln I_{nas} + \sqrt{\frac{e^3 E}{4\pi\epsilon_0 k^2 T^2}}.$$

Intenzita elektrického pole je dána vztahem

$$E = \frac{U_a}{r \ln \frac{R}{r}},$$

z čehož vyplývá, že logaritmus anodového proudu je přímo úměrný odmocnině z anodového napětí.

Popis měření: Nejdříve zjistíme výstupní práci katody, která je vyrobena z wolframu. Při tomto měření je nutné pracovat stále v nasycené oblasti anodového proudu. Proto nejdříve nastavíme maximální žhavicí proud a poté zvyšujeme anodové napětí až do požadované oblasti. Pak proměřujeme požadovanou závislost. Je nutné ale určit teplotu katody. Určíme proto odpor katody podle Ohmova zákona a teplotu podle vztahu

$$R_t = \frac{\rho D}{S}(1 + \alpha t),$$

kde t je teplota katody, ρ měrný odpor vlákna, S průřez vlákna a d délka vlákna.

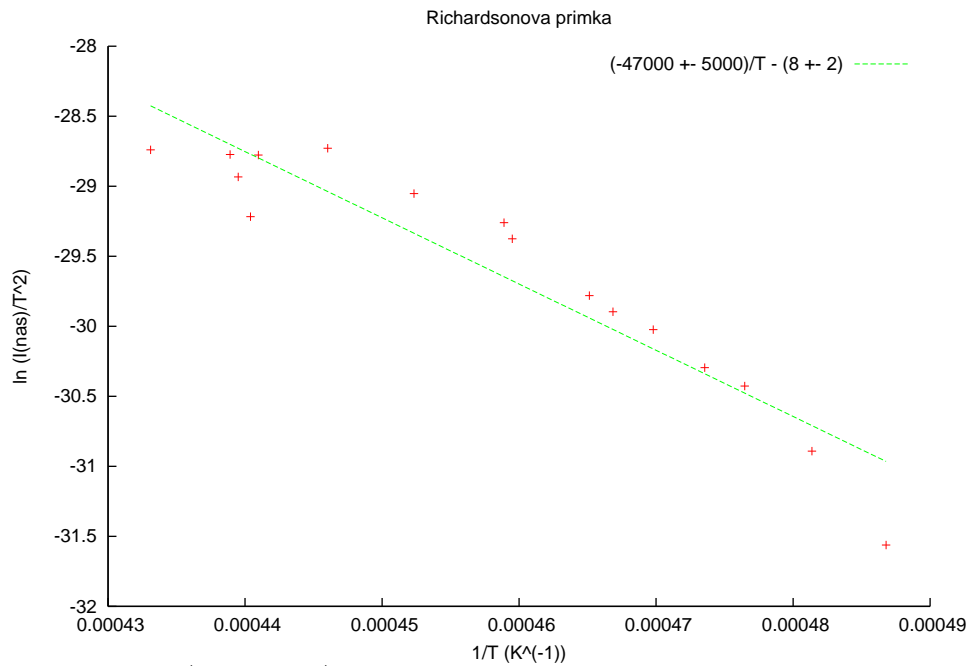
Dále nastavíme žhavicí proud a měříme závislost anodového proudu na napětí. Z tohoto měření můžeme určit jednak přírůstek proudu díky přítomnosti elektrického pole, jednak teplotu elektronů podle vztahu uvedeného výše.

Vlastní měření: V následující tabulce jsou hodnoty potřebné pro určení výstupní práce.

$I_{nas}(\mu A)$	$I_f(A)$	$U_f(V)$	$R(\Omega)$	$T(K)$	$\ln \frac{I_{nas}}{T^2}(10^1)$	$T^{-1}(10^{-4})$
1,760	1,454	1,471	1,012	2309	-2,874	4,331
1,656	1,447	1,444	0,998	2278	-2,877	4,389
1,635	1,451	1,441	0,993	2268	-2,878	4,410
1,408	1,445	1,440	0,997	2275	-2,893	4,395
1,056	1,438	1,430	0,994	2271	-2,922	4,404
1,677	1,460	1,433	0,982	2242	-2,873	4,460
1,180	1,443	1,396	0,967	2211	-2,905	4,523
0,932	1,430	1,363	0,953	2179	-2,926	4,589
0,828	1,433	1,364	0,952	2176	-2,937	4,595
0,538	1,416	1,331	0,940	2150	-2,978	4,651
0,476	1,415	1,325	0,936	2142	-2,990	4,669
0,414	1,407	1,309	0,930	2129	-3,002	4,698
0,311	1,398	1,290	0,923	2112	-3,030	4,735
0,269	1,396	1,280	0,917	2099	-3,043	4,765
0,166	1,380	1,252	0,907	2077	-3,089	4,814
0,083	1,357	1,217	0,897	2054	-3,156	4,868

V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty potřebné pro určení teploty elektronů a voltampérové charakteristiky.

$I_f = 1,501A, U_f = 1,546V$			
$I_a(\mu A)$	$U_a(V)$	$\sqrt{U_a}$	$\ln I_a$
2,79	152	12,33	-12,79
2,71	140	11,83	-12,82
2,63	130	11,40	-12,85
2,59	121	11,00	-12,86
2,48	111	10,54	-12,91
2,46	104	10,20	-12,91
2,36	91	9,54	-12,96
2,32	78	8,83	-12,97
2,26	71	8,43	-13,00
2,24	61	7,81	-13,01
2,19	52	7,21	-13,03
2,11	42	6,48	-13,07
2,01	31	5,57	-13,12
1,97	21	4,58	-13,14
1,82	9	3,00	-13,22
1,74	9,83	3,14	-13,26
1,68	8,94	2,99	-13,30
1,57	7,94	2,82	-13,36
1,51	6,94	2,63	-13,40
1,45	5,97	2,44	-13,44
1,43	5,09	2,26	-13,46
1,41	4,01	2,00	-13,47
1,35	3,06	1,75	-13,52
1,32	2,02	1,42	-13,53
1,20	1,09	1,04	-13,63
1,12	1,00	1,00	-13,70
1,10	0,982	0,991	-13,72
1,01	0,903	0,950	-13,80
0,828	0,807	0,898	-14,00
0,600	0,695	0,834	-14,33
0,393	0,590	0,768	-14,75
0,269	0,506	0,711	-15,13
0,186	0,414	0,643	-15,50
0,083	0,296	0,544	-16,31
0,041	0,193	0,439	-17,00
0,021	0,089	0,298	-17,69

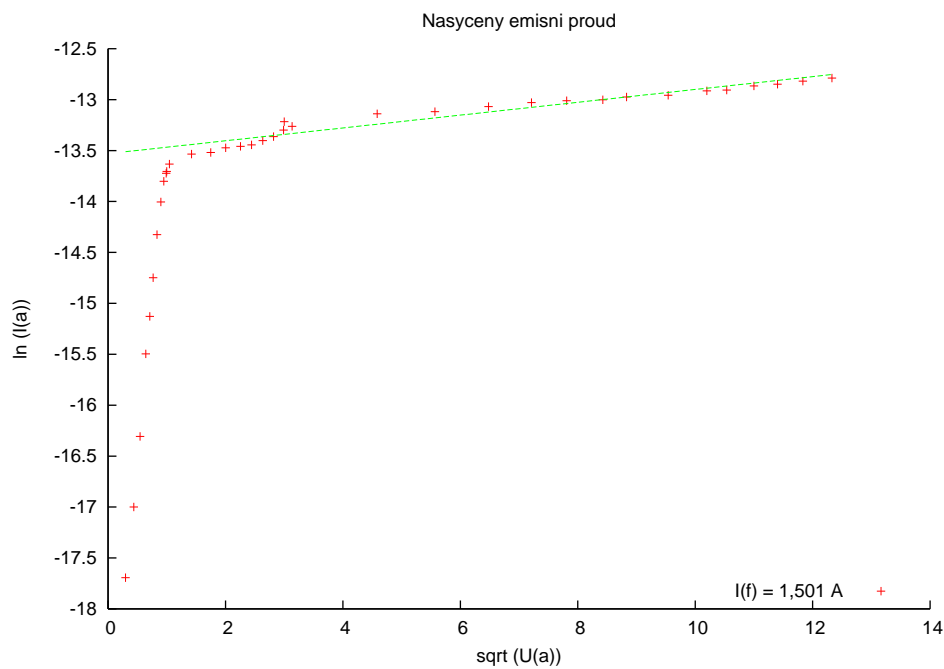


Výstupní práce: $(4,1 \pm 0,4)eV$.

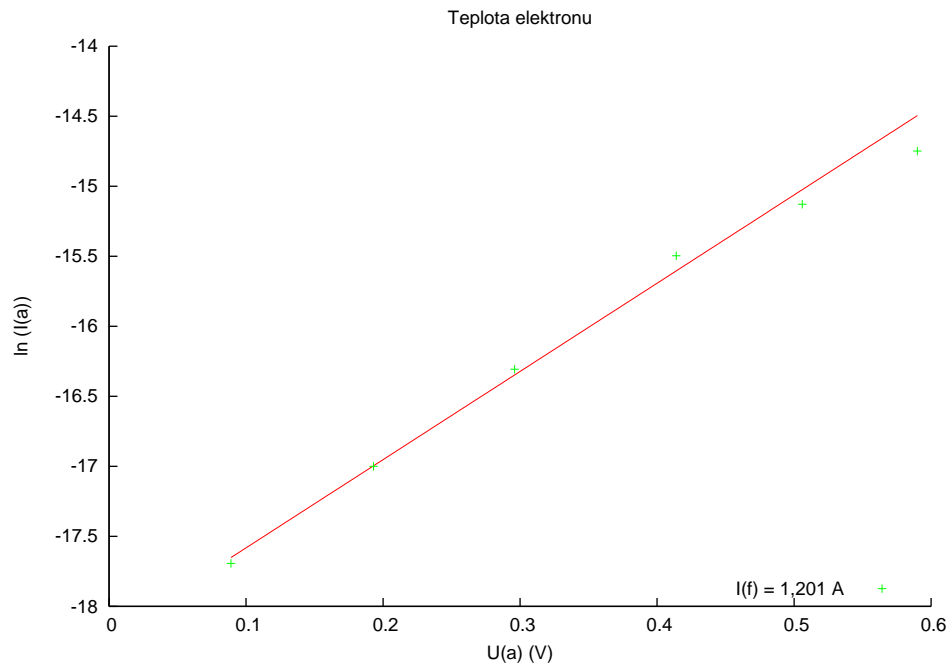
Nyní můžeme určit rozdíl výstupní práce. Známe koeficient B , teplotu T , výstupní práci bez elektrického pole ω . Vztah pro výstupní práci za přítomnosti elektrického pole je uveden výše. Dokážeme tedy spočítat nasycený emisní proud a odečtením nasyceného emisního proudu bez přítomnosti elektrického pole zjistíme požadovaný rozdíl. Výsledný vztah je

$$\Delta I = BT^2 e^{-\frac{\omega}{kT}} \cdot (e^{\frac{\omega_p}{kT}} - 1).$$

Dosazením máme $\Delta I = 2,01\mu A$. Tuto hodnotu lze ověřit z následujícího grafu.



Z tohoto grafu vychází rozdíl $(2,2 \pm 0,1)\mu A$.



Teplota elektronů určená ze směrnice přímky v tomto grafu je $(1850 \pm 100)K$.

Závěr: Prvním úkolem bylo určit výstupní práci wolframu. Její velikost je $4,1eV$, což se liší od tabulkové hodnoty $4,5eV$ o zhruba 10 %. Chyba mohla být způsobena nepřesnostmi při odečítání nebo samotnými měřicími přístroji. Největší vliv měla asi chyba při odečítání. Měřilo se totiž pomocí galvanoměru se světelnou ručkou, která byla špatně vidět, zvláště při jasném světle zvenci.

Dále se měla spočítat intenzita elektrického pole u povrchu katody. Ta je přímo ze vztahu $1130000V\,m^{-1}$.

V dalším úkolu se měl zjistit přírůstek proudu při přítomnosti elektrického pole pomocí dvou metod, přímo ze vzorce a odečtením z grafu. Obě metody přinesly podobné výsledky. Přesnější bude asi metoda početní, protože při odečítání z grafu závisí na výběru hodnot, ze kterých se přírůstek proudu počítá.

Posledním úkolem bylo zjistit teplotu elektronů pomocí směrnice přímkové části náběhové oblasti. Takto určená teplota se liší od teploty určené přes odpor, ale jen málo, zhruba o 10 %. V grafické metodě mohl být zdrojem chyby jiný výběr hodnot pro určení přímky. Stačilo vzít například o 2 body navíc a teplota byla zhruba o $500K$ vyšší.

Dále můžeme zjistit snížení výstupní práce katody. Teoretická hodnota je určena podle vztahu uvedeného výše a vychází $\omega' = \omega - \omega_p = 4,46eV$.

Výstupní práci katody můžeme zjistit ze směrnice přírůstku proudu. Směrnice přímky je $0,045 \pm 0,002$, odtud $\omega'_{T_e} = (4,41 \pm 0,31)eV$ pro teplotu elektronů $T_e = 1850K$.

Pro teplotu vlákna danou odporem (střední teplota) $T_s = 2350K$ vychází $\omega'_{T_s} = (4,39 \pm 0,20)eV$.

Chyba u posledních dvou údajů vychází ze směrnice přímky pro nasycený emisní proud a z určení teploty vlákna, resp. elektronů. V rámci chyby se tedy údaje shodují.