

11 Termická emise elektronů

1. května 2010

Fyzikální praktikum FJFI ČVUT v Praze	
Jméno: Vojtěch Horný	Datum měření: 26.dubna 2010
Pracovní skupina: 2	Ročník a kroužek: 2. ročník, pondělí 13:30
Spolupracoval Jaroslav Zeman	Hodnocení:

1 Úvod

Termická emise elektronů byla objevena roku 1880 Thomasem A. Edisonem, když zkoumal příčinu poškození vláken v žárovkách. Až O.W. Richardson dostal roku 1928 za objasnění jevu Nobelovu cenu.

2 Pracovní úkoly

1. Změřte závislost emisního proudu katody na kladném anodovém napětí v rozmezí (0 - 600) V při konstantní teplotě katody. Měření proveďte pro 5 - 8 teplot v rozmezí 1800 až 2500 K. Teplotu měřte pyrometrem.
2. Výsledky měření podle bodu 1 vynesete do grafu, určete hodnoty nasyceného emisního proudu a nakreslete Richardsonovu přímkou.
3. Vypočtete výstupní práci φ_v a určete hodnotu Richardsonovy konstanty A .
4. Změřte závislost náběhového proudu $I_a = f(U_{KA})$ pro deset hodnot záporného anodového napětí při konstantním žhavicím proudu I_{zh} . Měřte až do zániku náběhového proudu.
5. Měření podle bodu 4) proveďte pro šest různých hodnot žhavicího proudu I_{zh} . Pro každou hodnotu žhavicího proudu změřte teplotu středu katody radiačním pyrometrem.
6. Z průběhů náběhového proudu určete příslušné teploty katody a porovnejte je s teplotami změřenými pyrometrem.

3 Základní pojmy a vztahy

Volné elektrony se sice v kovové krystalové mřížce pohybují volně jako jakýsi elektronový plyn, ale přeci jen jim přitažlivé síly atomů kovu brání v opuštění kovu. Aby elektron opustil kov, je nutno vynaložit výstupní práci $W_v = e\varphi_v$, která je závislá mimo jiné na vnějším elektrickém poli či kvalitě povrchu kovu.

3.1 Náběhový proud

Množství emitovaných elektronů závisí na teplotě. Při vysokých teplotách je pozorován vznik „elektronového mraku“, který svým záporným nábojem brání emisi dalších elektronů. Je-li rozdíl potenciálů mezi bodem x a povrchem katody $\varphi_x < 0$, pak hustota částic v tomto bodě je

$$n_x = n_0 \exp\left(\frac{e\varphi_x}{kT}\right), \quad (1)$$

kde n_0 je hustota elektronů u katody a k je Boltzmanova konstanta. Plošný proud je úměrný částicové hustotě elektronů, platí pro něj analogický vztah:

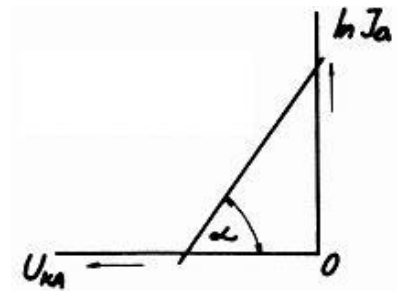
$$i_x = i_0 \exp\left(\frac{e\varphi_x}{kT}\right). \quad (2)$$

Pro planparalelní destičky pak můžeme psát;

$$I_x = I_0 \exp\left(\frac{e\varphi_x}{kT}\right). \quad (3)$$

Veličinu I_0 nazýváme ideální proudová hustota. Pro účely zpracování dat bývá lepší používat linearizovaný zlogaritmovaný vztah

$$\ln I_x - \ln I_0 = \frac{e\varphi_x}{k} \cdot \frac{1}{T}. \quad (4)$$



Obrázek 1: Určení teploty

Závislost proudu na potenciálu vidíme na obrázku 1. Teplotu pak můžeme určit jako

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{e}{kT}.$$

3.2 Nasycený proud

Množství elektronů, které je emitováno horkou anodou, se řídí podle Richardsonova zákona:

$$i_0 = AT^2 \exp\left(\frac{-e\varphi_v}{kT}\right), \quad (5)$$

kde i_0 je ideální hustota nasyceného proudu, A Richardsonova konstanta, jejíž hodnota pro wolfram činí přibližně $800 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$, a φ_v je výstupní potenciál, pro wolfram asi 4,5 V. Vztah opět zlogaritmuje a získáváme vztah

$$\ln i_0 - 2 \ln T = \ln A - \frac{e\varphi_v}{kT}, \quad (6)$$

který lze zapsat jako rovnici přímky

$$y = a - bx, \quad (7)$$

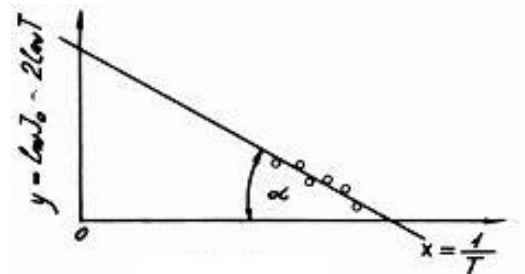
kde $y = \ln i_0 - 2 \ln T$, $a = \ln A$, $b = e\varphi_v/k$, $x = 1/T$. Richardsonova přímka je zobrazena na obrázku 2. Z grafu této závislosti je možno extrapolovat hodnotu y pro $x = 0$ a tak vypočítat konstantu a .

$$a = \ln I_0 - 2 \ln T = \ln SA, \quad (8)$$

$$I_0 = i_0 S, \quad (9)$$

kde S je plocha katody. Konstantu b určíme ze směrnice grafu $b = \operatorname{tg} \alpha$, výstupní potenciál je pak

$$\varphi_v \approx \frac{k}{e} \operatorname{tg} \alpha. \quad (10)$$



Obrázek 2: Grafické zpracování měření k určení výstupního potenciálu

4 Experimentální uspořádání a měřicí metody

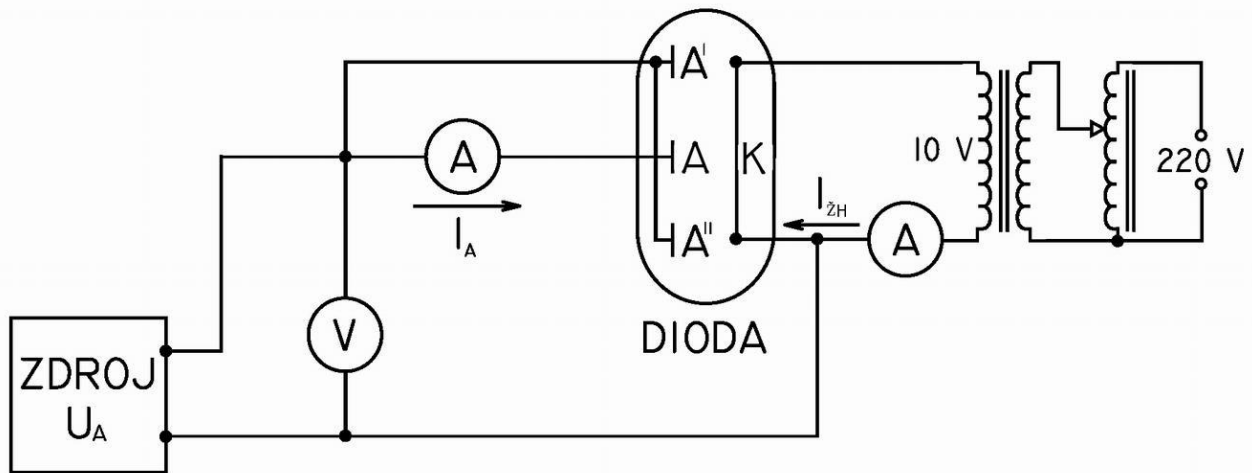
4.1 Pracovní pomůcky

Speciální dioda s wolframovou žhavnou katodou trvale čerpaná vakuovým systémem, regulovatelný zdroj 20 V, žhavicí transformátor, regulovatelný zdroj 600 V, voltmetr, ampérmetr, miliampérmetr, nanoampérmetr, regulační transformátor 0 - 220 V

4.2 Popis experimentů

Pro měření emisních konstant katody ve tvaru vlákna je důležité, abychom měřili proud, emitovaný z definovaného povrchu katody, který musí mít konstantní teplotu. Tyto předpoklady nejsou splněny u konců katody, kde její teplota klesá vlivem odvodu tepla do přívodů žhavicího proudu. Proto používáme pro měření speciálního uspořádání diody, v němž je vlastní měřicí anoda z obou stran opatřena pomocnými anodami stejného průměru. Všechny tři anody jsou na stejném potenciálu. Elektrické pole uvnitř měřicí anody lze považovat za homogenní a účinnou délku katody lze brát rovnou délce měřicí anody.

Zapojení měřicího obvodu je zřejmé z obrázku 3. Pro měření nasyceného emisního proudu použijeme zdroj proměnného kladného napětí 0 - 600 V, anodový proud měříme miliampérmetrem. Pro měření



Obrázek 3: Zapojení pro měření absolutní teploty katody

náběhového proudu použijeme zdroj proměnného záporného napětí -20 - 0 V, anodový proud měříme nanoampérmetrem.

5 Experimentální data a výsledky měření

Vzhledem k neuspokojivému odečítání intenzit E_r a E_v a tedy velice nespolehlivému určení teploty žhavené katody je nutno brát veškeré naměřené hodnoty pouze jako orientační.

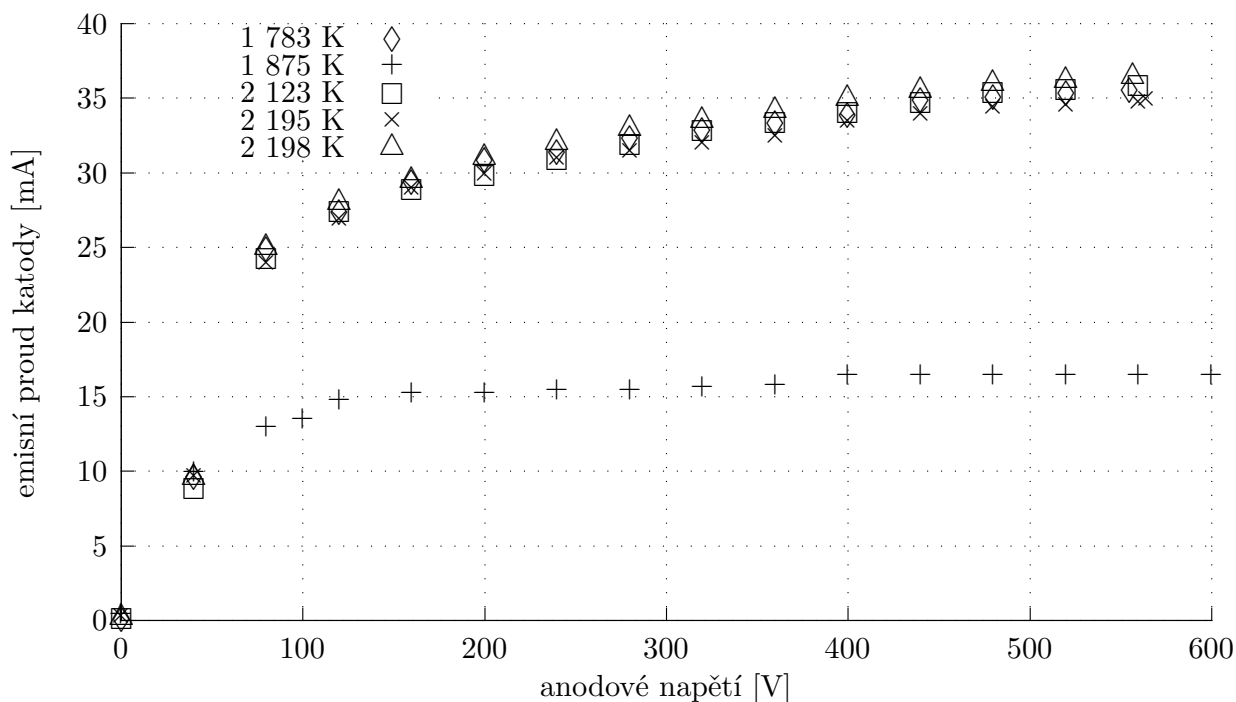
5.1 Závislost emisního proudu katody na kladném anodovém napětí

Teplotu pro jednotlivá měření jsme vypočítávali z empirického vztahu

$$T[K] = \frac{2146,35}{\log \frac{E_r}{E_v} + 0,2457}.$$

Nespolehlivost prozrazuje graf 1. Závislosti pro hodnoty teploty 2 195K a 2198 K by měly být téměř totožné. Navzdory tomu jsou mezi ně vklíněny i závislosti pro teploty 2 123 K a dokonce i 1 783 K. Zvláště poslední údaj je šokující, teplotu 1 783 K proto z dalšího zpracování vylučuji.

Jelikož jsme byli v časové tísní, závislosti pro další teploty jsme neměřili.



Graf 1: Závislost emisního proudu katody na kladném anodovém napětí při různých teplotách

5.2 Nasycený emisní proud

Graf 2 představuje hledání hodnoty nasyceného proudu. Je na něm dobře vidět, proč nám výsledky vyšly tak jak vyšly. Hodnoty nasyceného proudu pro jednotlivé teploty shrnuje tabulka 2. Hodnoty z tabulky 2 jsme znázornili v grafu 3 závislostí 6, resp. 7. Fitem vyšly hodnoty zatím nezaokrouhlené:

- $a = -15,755 \pm 0,747,$
- $b = (6698 \pm 1556)K^{-1}.$

Výstupní práce a Richardsonova konstanta jsou pak

- $\varphi = (0,58 \pm 0,14)eV$
- $A \in (5,43; 24,4) \cdot A \cdot m^{-2}K^{-2},$ nejpravděpodobnější hodnota $10,9 \cdot Am^{-2}K^{-2}.$

5.3 Měření náběhového proudu

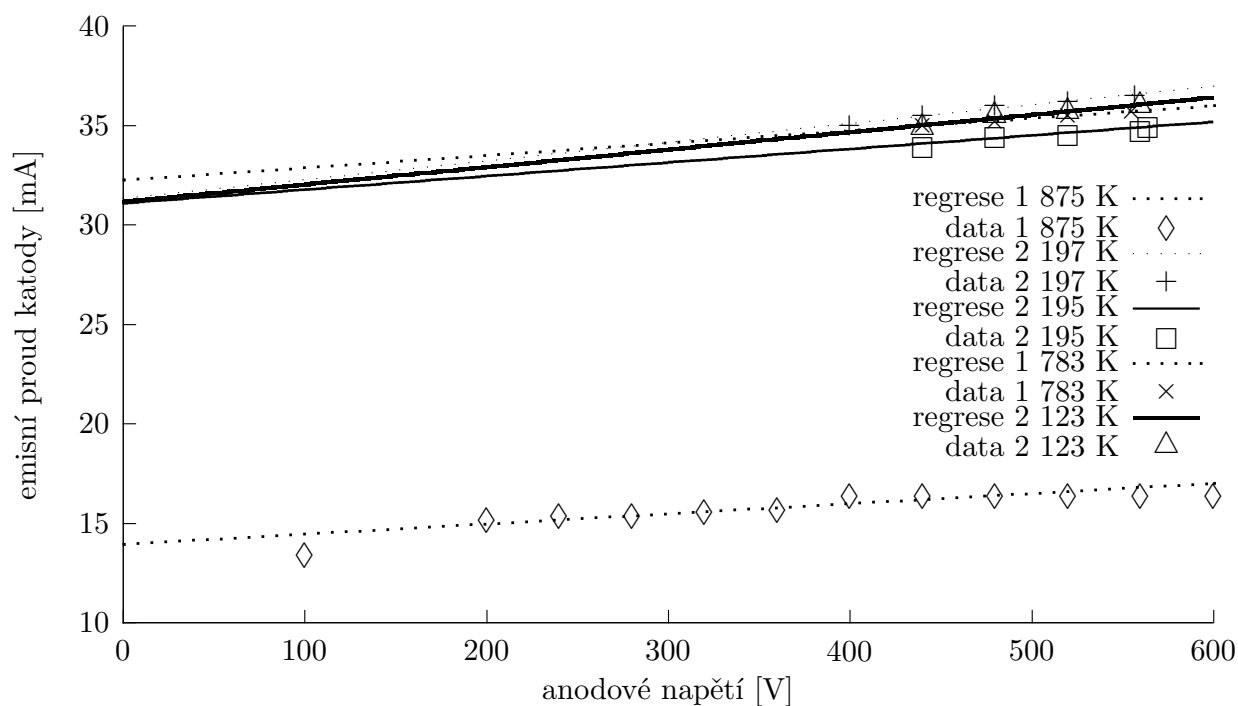
V semilogaritmickém grafu 4 jsou exponenciální závislosti proudu na napětí mezi anodou a katodou. Regresní přímky jsou počítány pouze pro nejmenší proudy. Tabulka 3 nabízí přehled naměřených a vypočtených veličin z tohoto měření. Vypočtené teploty jsou očividně nesmyslné.

6 Diskuse

Naměřené hodnoty v obou úlohách neodpovídají realitě, mnohdy ani řádově. Celé měření provázeli zmatky a časový tlak. Nestihli jsme naměřit požadovaný počet hodnot. Navzdory tomu je vhodné průběh měření a získané výsledky blíže okomentovat.

E_r/E_v	5,4	E_r/E_v	9,08	E_r/E_v	5,82	E_r/E_v	5,38	E_r/E_v	7,93
T[K]	2195	T[K]	1783	T[K]	2123	T[K]	2196	T[K]	1875
U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]	U [V]	I [mA]
0	0,37	0,45	0,25	0,45	0,26	0,47	0,24	0	0,5
40	9,7	40	9,8	40	9	40	9,6	40	10
80	24	80	25	80	24,4	80	25	80	13
120	27	120	27,5	120	27,5	120	28	120	14,75
160	29	160	29,5	160	29	160	29,5	160	15,3
200	30	200	31	200	30	200	31	200	15,25
240	31	240	31,5	240	31	240	32	240	15,5
280	31,5	280	32,5	280	32	280	33	280	15,5
320	32	320	33	320	33	320	33,5	320	15,7
360	32,5	360	33,5	360	33,5	360	34,2	360	15,8
400	33,5	400	34	400	34,2	400	35	400	16,5
440	34	440	35	440	34,9	440	35,5	440	16,5
480	34,5	480	35,2	480	35,5	480	36	480	16,5
520	34,6	520	35,5	520	35,7	520	36,2	520	16,5
560	34,8	555	35,7	560	36	557	36,5	560	16,5
564	35							600	16,5
								100	13,5

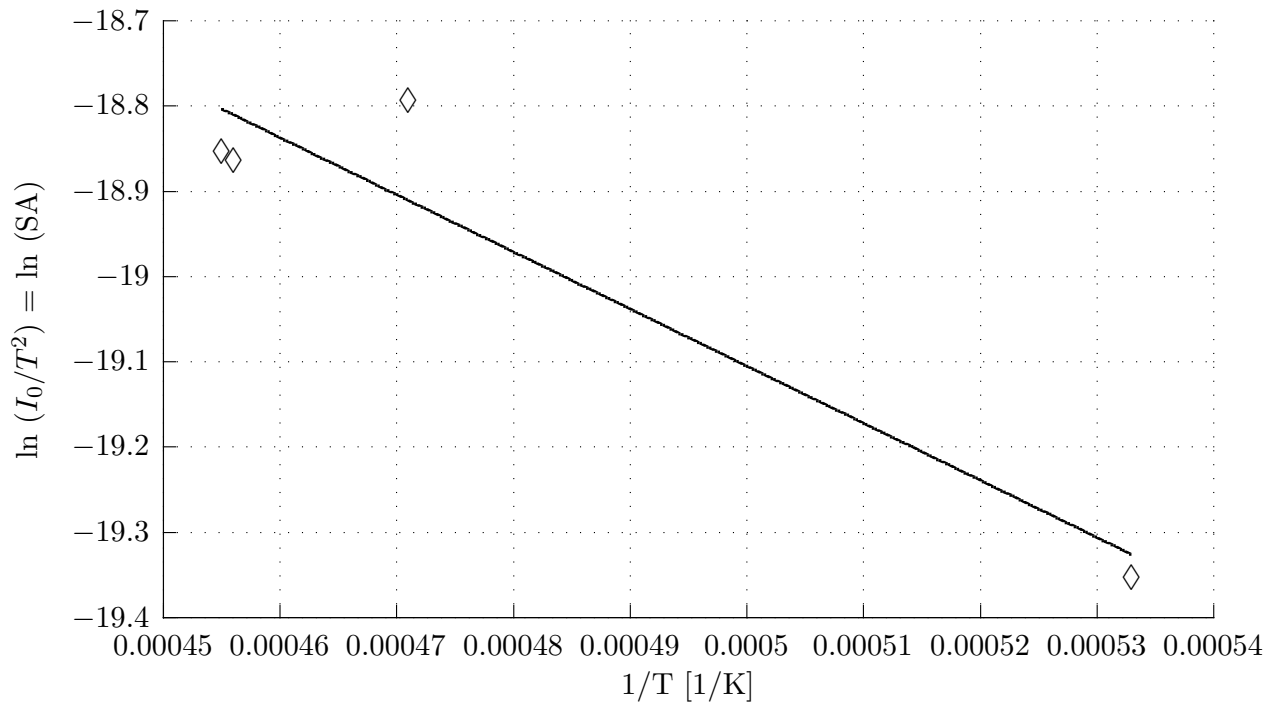
Tabulka 1: Závislost emisního proudu i katody na kladném anodovém napětí U v rozmezí (0 - 600) V při konstantní teplotě katody.



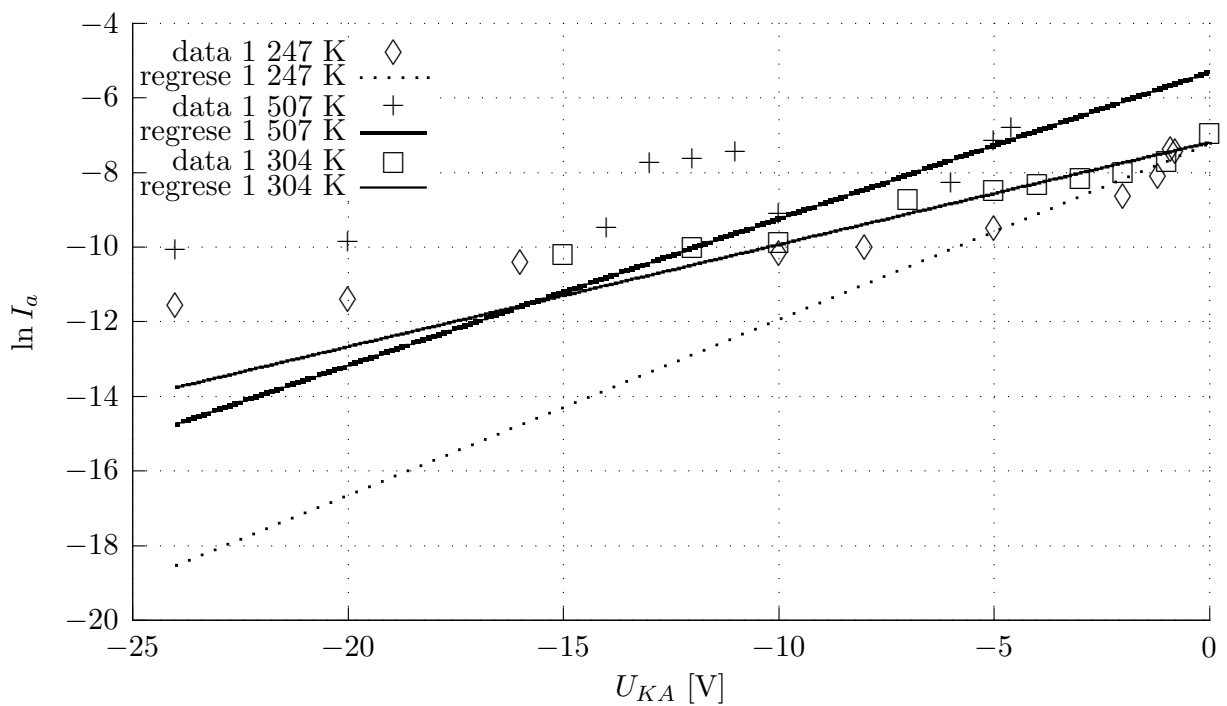
Graf 2: Závislost emisního proudu katody na kladném anodovém napětí při různých teplotách

teplota [K]	1 875	2 197	2 195	1 783	2 123
nasycený proud [mA]	13,94±0,03	31,4±0,4	31,1±0,6	32,2±0,2	31,7±0,7

Tabulka 2: Hodnoty nasycených proudů pro různé teploty



Graf 3: Richardsonova přímka



Graf 4: Měření náběhového proudu a určování teploty

T_{int} [K]	směrnice grafu	T_{vyp} [K]
1304	$-7,19 \pm 0,15$	$84\,000 \pm 2\,000$
1247	$-7,21 \pm 0,27$	$84\,000 \pm 3\,000$
1507	$-5,31 \pm 0,79$	$61\,000 \pm 9\,000$

Tabulka 3: Určování teploty. T_{int} - teplota vypočtená z poměru intenzit, T_{vyp} - teplota z náběhového proudu

6.1 Nasycený proud

Je potěšitelné, že některý popsané jevy byly alespoň kvalitativně pozorovány. Křivka emisního proudu I katody na kladném anodovém napětí U při konstantní teplotě katody se podobá očekávanému průběhu (graf 2). Richardsonova konstanta vyšla $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ Am}^{-2} \text{ K}^{-2}$, očekávaná hodnota je $8 \cdot 10^5 \text{ Am}^{-2} \text{ K}^{-2}$. Výstupní potenciál pro wolfram vyšel $(0,6 \pm 0,1) \text{ V}$, očekávali bychom $4,5 \text{ V}$.

Mezi možné příčiny takových chyb patří nedostatečné vakuum, jiné jevy probíhající v systému, např. iontový proud, chybné nastavení spektrometru pro odečítání teploty, špatné odečítání naměřených hodnot či jiné chyby experimentátorů pracujících v časovém presu.

6.2 Náběhový proud

V tomto měření jsme mimo i kvalitativně. Naměřené veličiny vůbec neodpovídají teoretickému modelu. Teplota tání wolframu je přibližně 3700 K , my jsme ale vypočetli teploty mnohem vyšší.

7 Závěr

Měřili jsme termoemisi elektronů ve vakuu, pokusili jsme se určit výstupní potenciál pro wolfram a Richardsonovu konstantu. Nebyli jsme úspěšní, naměřené výsledky řádově neodpovídají realitě. Mezi hlavní chyby patří nepřesné určování teploty spektrometrem, které výrazně ovlivnilo zpracování dat z měření nasyceného proudu, a asi také i nedostatečné vakuum a systematické chyby experimentátorů.

Reference

- [1] FJFI ČVUT, *Termická emise elektronů*, [online], [cit. 1. května 2010], <http://praktika.fjfi.cvut.cz/Termoemise/praktika.html>
- [2] FJFI ČVUT, *Návody k přístrojům*, [online], [cit. 24. dubna 2010], <http://praktika.fjfi.cvut.cz/ProvPokyny/chybynav/CHYBY1n.pdf>