

Určení měrného náboje elektronu z charakteristik magnetronu

Ján Pulmann

29. 11. 2013

Úlohy

1. Zmerajte VA charakteristiky magnetronu pri konštantnom magnetickom poli. Rozsah napätia magnetronu volte $0 - 200 \text{ V}$ (s minimálnym krokom $0.1 - 0.3 \text{ V}$ v oblasti skoku). Premerajte 10-15 charakteristik v rozsahu magnetizačných prúdov $0 - 2.5 \text{ A}$.
2. Pre každú nameranú charakteristiku (pri danom magnetickom poli) určte hodnotu kritického napätia (napr. numerickou deriváciou). Získané hodnoty spracujte graficky a určte z nich merný náboj elektronu. Diskutujte presnosť výsledku.
3. Z nameraného súboru dát vytvorte jeden graf závislosti anódového prúdu magnetronom I_A na magnetickej indukcii B pri konštantnom anódovom napätí U_A a popíšte ho.

Teória

Schéma magnetronu je na obrázku 1 v [1]. Ide o dve súosé valcové elektródy. Vnútná, katóda, je zohriata na vysokú teplotu a emituje elektróny. Medzi elektródami je napätie, elektróny sú urýchľované smerom ku vonkajšej anóde. Dráhy elektrónov sa tiež zakrivujú kvôli pôsobeniu magnetického poľa (obrázok 2 v [1]). Pri istom kritickom magnetickom poli B_{kr} sa začnú zakrivovať natoľko, že nedoletia na anódu a mi pozorujeme prudký pokles prúdu.

Podobne, pri konštantnom magnetickom poli existuje kritické napätie, pri ktorom nastáva prudké zvýšenie prúdu medzi elektródami, pretože elektróny ju dosiahnu

[1] odvádza pohyb elektrónov, ktoré vyletujú z katódy nulovou rýchlosťou. Pri značení polomerov anódy a katódy r_A a r_K a kritického napätia U_{kr} prislúchajúcemu kritickému magnetickému poľu B_{kr} platí

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_{kr}}{B_{kr}^2 r_A^2} \frac{1}{\left(1 - \frac{r_K^2}{r_A^2}\right)^2}. \quad (1)$$

Magnetické pole tvorí dvojica cievok v Helmholtzovom usporiadaní, ktoré dávajú vo svojom strede pole s dobrou homogenitou. Veľkosť indukcie je

$$B = \frac{8\mu_0}{5\sqrt{5}} \frac{NI_{mag}}{\rho_0}, \quad (2)$$

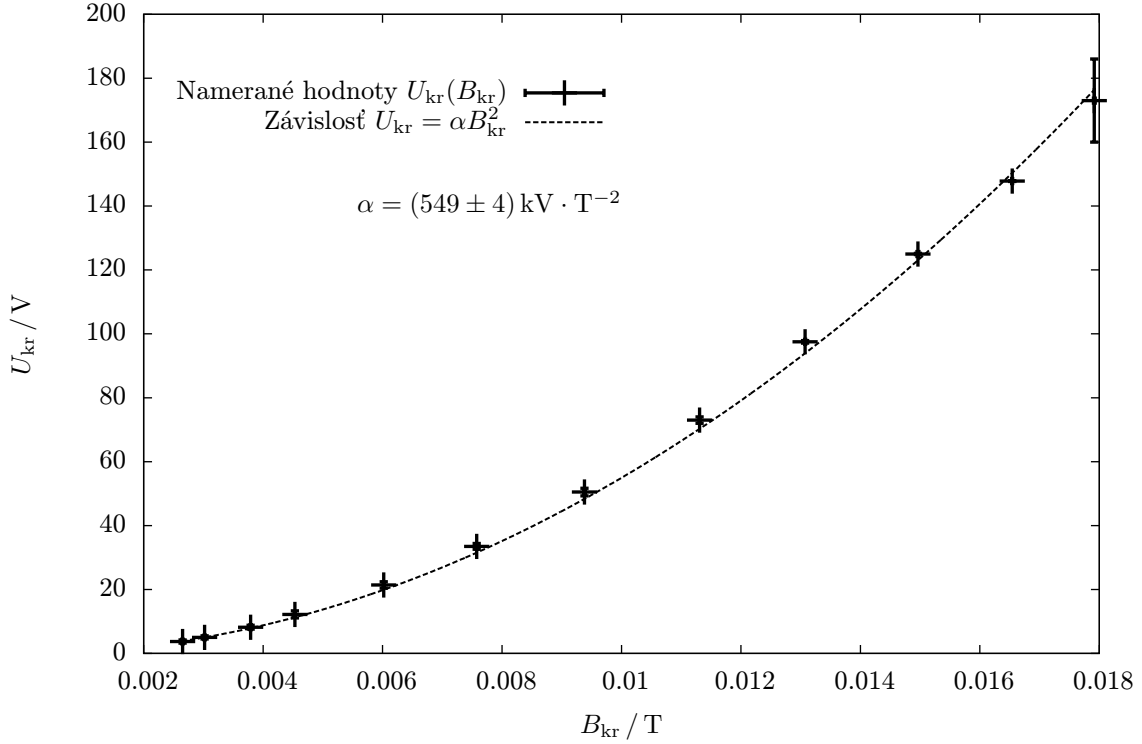
kde N a I_{mag} sú počet závitov jednej cievky a prúd cievkou a ρ_0 je polomer cievky.

Postup merania

- Zvolíme si magnetizačné prúdy a pri každom prúde nameriame dve VA charakteristiky. Jednu meriame nahrubo, v celom rozsahu napätia a s veľkým krokom. Tak určíme oblasť so skokom napätia a tú premeriame s malým krokom
- Hodnoty presnejšieho merania vyhladáme a numericky zderivujeme. Dostaneme tak maximum, jeho poloha a pološírka budú hodnota a neistota kritického napätia.
- Závislosť kritického napätia na magnetickom poli vykreslíme a vyhodnotíme podľa 1. Tiež si zvolíme jednu pevnú hodnotu napätia a vykreslíme závislosť prúdu na magnetickom poli.

Pomôcky

magnetron, Helmholtzove cievky, zdroje napätia a merače.



Graf 1: Kritické napätie pri danom poli, určenie merného náboja

Výsledky merania

Použité parametre cievky a magnetrónu sú

$$r_K = 0.19 \text{ mm} ,$$

$$r_A = 5.00 \text{ mm} ,$$

$$N = 630 ,$$

$$\rho_0 = 75 \text{ mm} .$$

Namerané hodnoty kritického napätia a magnetizačné prúdy sú v tabuľke 1 a grafe 1. V grafe je aj preložená kvadratická závislosť. Podľa vzťahu 1 teraz z tejto konštanty určíme hodnotu merného náboja ako

$$\frac{e}{m} = (1.76 \pm 0.02) \cdot 10^{11} \text{ C/kg} .$$

Neistoty v tabuľke pochádzajú z kolísania magnetizačného prúdu a pološírky maxima v prvej numerickú derivácii VA charakteristiky. Neistota merného náboja je štatistická neistota prekladania. Keďže je podobná či trochu vyššia ako neistoty nameraných veličín, budeme ju brať ako neistotu výsledku.

Pre najmenšie prúdy (do 500 mA) sme na zvýraznenie inflexného bodu od nameraných dát najprv odčítali závislosť pri nulovom magnetickom poli. Porovnali sme aj takto určenú hodnotu s hodnotou bez odčítania. Odchýlka bola menšia ako neistota merania.

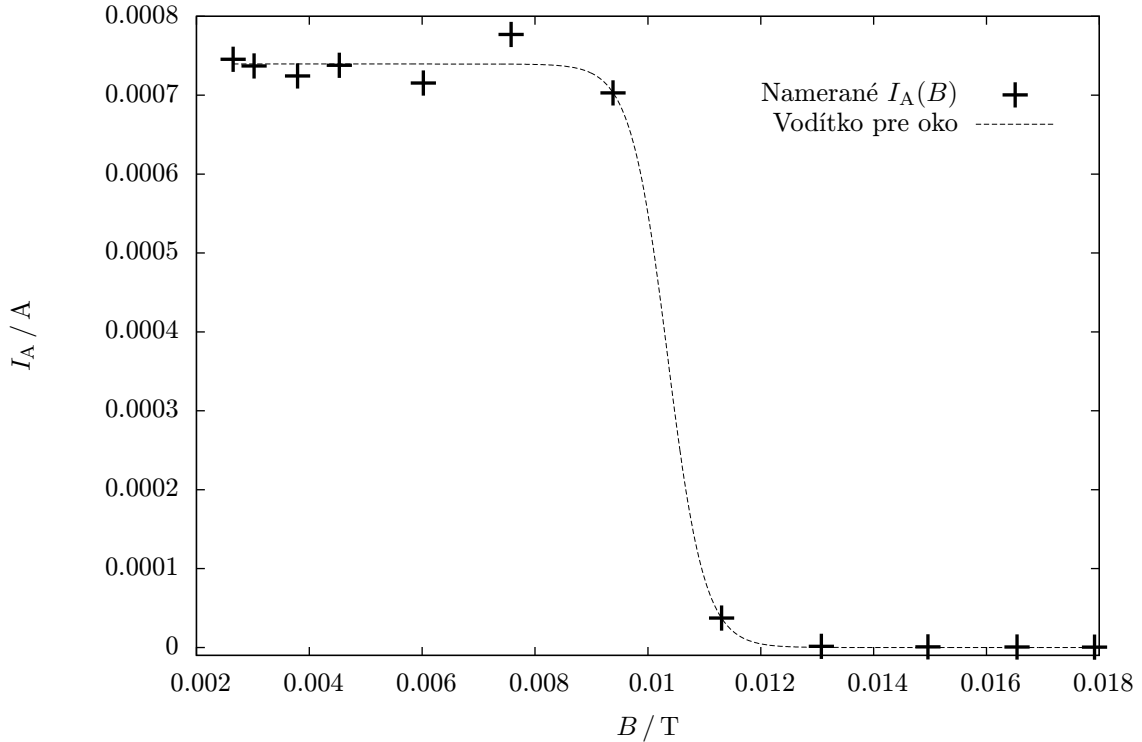
Pre napätie $U = 55.0 \text{ V}$ sme do tabuľky 2 a do grafu 2 naniesli závislosť prúdu magnetrónom na magnetickej indukčii.

V grafe 3 sú nanesené všetky namerané VA charakteristiky.

Diskusia

Nameraný efekt dobre súhlasí s teoretickou predpoveďou, či už skokmi v grafoch 2 a 3 alebo kvadratickou závislosťou v 1. Skok v prúde pri zvyšujúcom sa napätí nie je úplne ostrý, no aj tak sme boli schopní určiť jeho polohu pomerne presne (graf 1).

Na grafe 2 vidíme alternatívnu charakteristiku magnetrónu, prúd v závislosti od magnetickej indukcie. Dostávame očakávané prudké zníženie pri kritickej hodnote magnetického poľa, elektróny



Graf 2: Prúd magnetrónom pre pevné napätie

nedoletia na anódu.

Určená hodnota merného náboja sa v rámci chyby zhoduje z tabuľkovou hodnotou

$$\frac{e}{m_e} = 1.7588 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}.$$

Neistota merania je spôsobená štatistickým rozptylom určených hodnôt kritického napätia, na zníženie chyby by sme teda museli presnejšie určovať polohy skokov v prúde. Rýchlo by sme tak mohli naraziť na systematické vplyvy znižujúce presnosť experimentu. Jeden z prejavov je oblasť záporného odporu, ktorú vidíme na grafe 3.

- Elektróny vylutujú z katódy nenulovou rýchlosťou. To je jeden z dôvodov, prečo nemáme ostré skoky - niektoré elektróny potrebujú dodať menšiu energiu, aby sa dostali na anódu.
- Teoretické odvodenie nepočíta s okrajovými efektami, no samotná elektróda má podobnú dĺžku ako priemer. Elektróny vylutujúce mimo elektródu cítia slabšie elektrické pole, preto pre ne môže byť ťažšie dostať sa na anódu. To z časti spôsobuje pomalšie nasycovanie na maximálny prúd.
- V magnetróne nie je vákuum, elektróny teda môžu narážať do atómov vzduchu. Môžu tak prísť o časť energie potrebnej na dosiahnutie anódy. Ionizované atómy majú oveľa nižší merný náboj (a teda väčší Larmorov polomer), no majú opačný náboj a sú priťahované ku katóde. Práve tento efekt môže spôsobovať oblasť záporného odporu, podobne ako vo VA charakteristike plynovej výbojky. Pri vyšších magnetických poliach potrebujeme väčší potenciál, aby sme elektrón dostali do nejakej vzdialenosti od katódy a udelili mu potrebnú rýchlosť - možno preto pozorujeme posúvanie miesta záporného odporu ku vyšším napätiam v grafe 3.

Problémom tohoto vysvetlenia je pomerne nízke napätie a prúd, pre ktoré tento jav nastáva (plynové výbojky operujú na vyšších napätiach a cielene pripravujú atmosféru na výboj, pričom tu sa snažíme o opak).

- Magnetické pole v magnetróne môže byť vyosené. To by opäť spôsobovalo rozšírenie skoku, pretože potrebné napätie na dosiahnutie anódy by bolo rôzne pre rôzne cesty. Zložka poľa

Prúd cievkou $I_{\text{mag}} / \text{A}$	B / mT	U_{kr} / V
0.351 ± 0.001	2.651 ± 0.008	3.7 ± 0.5
0.400 ± 0.001	3.021 ± 0.008	5.0 ± 0.5
0.502 ± 0.001	3.792 ± 0.008	8.2 ± 0.6
0.600 ± 0.001	4.532 ± 0.008	12 ± 1
0.797 ± 0.001	6.020 ± 0.008	21 ± 1
1.003 ± 0.002	7.58 ± 0.02	33.5 ± 0.9
1.242 ± 0.002	9.38 ± 0.02	50 ± 1
1.497 ± 0.001	11.307 ± 0.008	73 ± 1
1.731 ± 0.001	13.074 ± 0.008	97.5 ± 0.4
1.981 ± 0.002	14.96 ± 0.02	125.0 ± 0.2
2.190 ± 0.001	16.541 ± 0.008	147.8 ± 0.1
2.372 ± 0.002	17.92 ± 0.02	170 ± 20

Tabuľka 1: Kritické napätia pri rôznych magnetických poliach

B / mT	$I_A / \mu\text{A}$
2.651 ± 0.008	745.55
3.021 ± 0.008	737.16
3.792 ± 0.008	724.42
4.532 ± 0.008	737.94
6.020 ± 0.008	715.48
7.58 ± 0.02	776.96
9.38 ± 0.02	703.03
11.307 ± 0.008	37.28
13.074 ± 0.008	1.44
14.96 ± 0.02	0.86
16.541 ± 0.008	0.72
17.92 ± 0.02	0.46

Tabuľka 2: Prúdy pri danom napätí

kolmo na os by ale mohla posúvať častice von z magnetrónu, čím by sme mohli prispieť ku oblasti záporného odporu.

- Magnetické pole má tiež istú nehomogenitu, ale tento efekt je malý, viz diskusiu homogenity poľa v [1].

Všetky tieto efekty spôsobujú rôzne zakrivenia ideálneho skoku, ktorý by sme pozorovali podľa teoretického modelu.

Neistoty odvodených veličín sú počítané podľa vzťahu o prenose chýb parciálnou deriváciou.

Na presnejšie meranie by sme potrebovali presnejší magnetrón - teda väčšie elektródy a silnejšie vákuum. Tiež by sme mohli predpokladať rýchlostné rozdelenie elektrónov (zo štatistickej fyziky) vylietavajúcich z katódy a korigovať tak aspoň jeden z vyššie diskutovaných efektov. Znížili by sme tak neistoty nameraných kritických napätí.

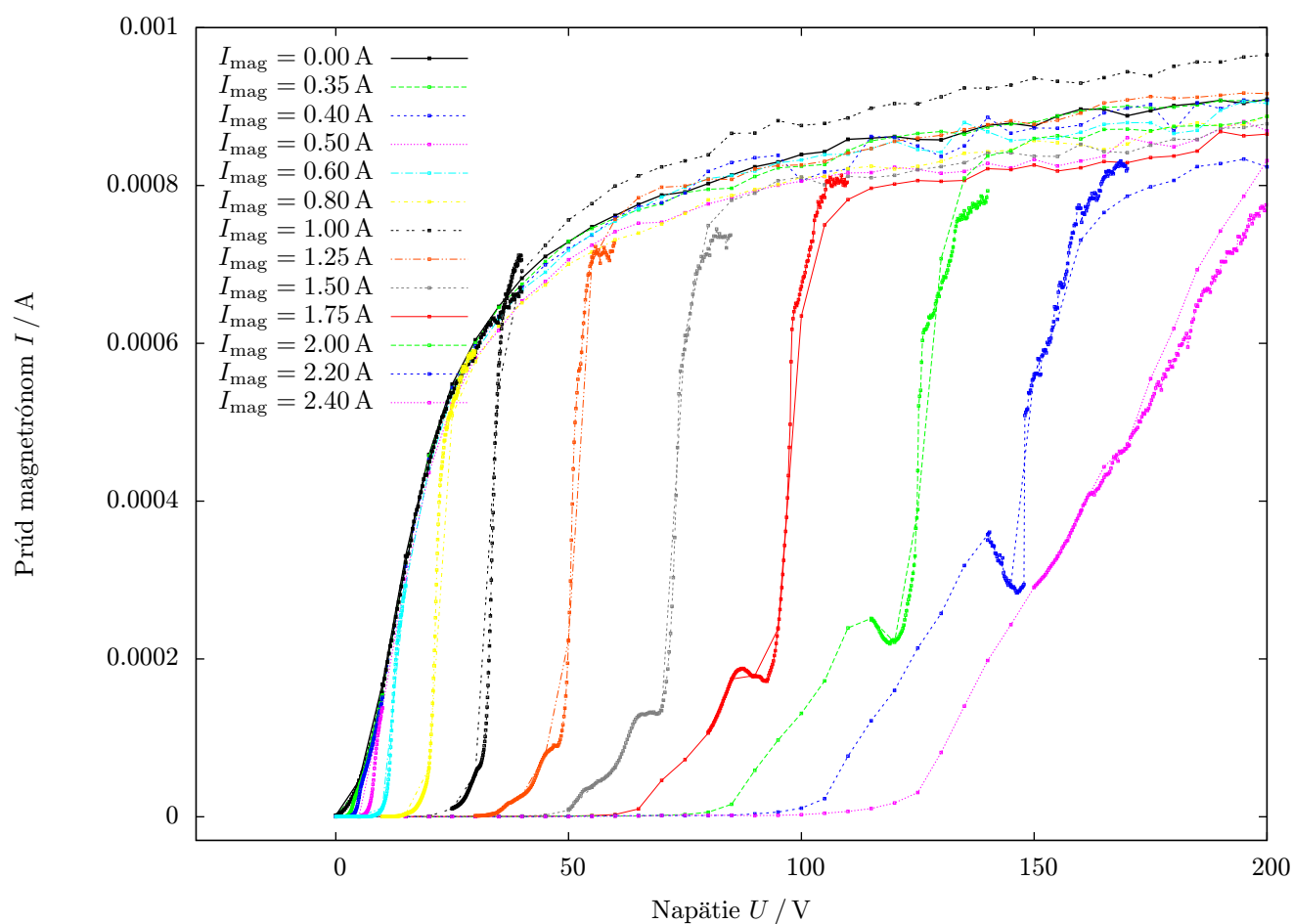
Záver

Namerali sme VA charakteristiky magnetróny pre rôzne veľkosti magnetického poľa, viz tabuľka graf 3. Z nameraných charakteristík sme určili kritické napätie a preložili sme teoretickou závislosťou (tabuľka 1, graf 1). Z prekladania sme určili merný náboj elektrónu

$$\frac{e}{m} = (1.76 \pm 0.02) \cdot 10^{11} \text{ C/kg}.$$

Pre vybrané napätie $U = 55.0 \text{ V}$ sme v tabuľke 2 a grafe 2 vykreslili závislosť prúdu magnetrónom na magnetickej indukcii.

V diskusii sme diskutovali systematické chyby merania.



Graf 3: Kritické napätie pri danom poli, určenie merného náboja

Literatúra

[1] Študijný text ku úlohe A13

http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_413.pdf 29.11.2013