

PRAKTIKUM IV

Úloha č.: **VIII**

Název: Určení měrného náboje elektronu z charakteristik magnetronu

Vypracoval: **Michal Bareš**

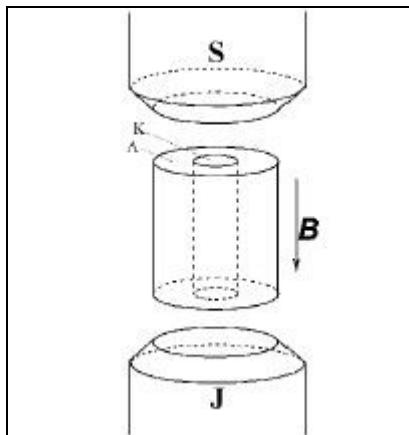
dne 15.11.2007

Pracovní úkol

- 1) Změřte V-A charakteristiky magnetronu při konstantním magnetickém poli. Rozsah napětí na magnetronu volte 0-200V (s minimálním krokem 0.1-0.3V v oblasti skoku). Proměřte 10-15 charakteristik v rozsahu magnetizačních proudů 0-2.5A.
- 2) Pro každou naměřenou charakteristiku (při daném magnetickém poli) určete hodnotu kritického napětí (např. numerickou derivací). Získané hodnoty zpracujte graficky a určete z nich měrný náboj elektronu. Diskutujte přesnost výsledku.
- 3) Z naměřeného souboru dat vytvořte jeden graf závislosti anodového proudu magnetronem I_A na magnetické indukci B při konstantním anodovém napětí U_A a popište jej.

Teorie

Ke zjištění měrného náboje elektronu lze využít magnetron. Jedná se o elektronku, jejíž elektrody tvoří dva sousedé válce, vložené do homogenního magnetického pole B , které má směr rovnoběžný s osou elektrod. Mezi elektrodami existuje radiální elektrické pole $E = E(r)$.



Ze žhavené katody vylétují elektrony, které jsou urychlovány anodovým napětím U_A , dopadají na anodu a vytvářejí tak anodový proud I_A . V důsledku přítomnosti magnetického pole však dochází ke stáčení drah elektronů a pro jistou kritickou hodnotu indukce B je již stáčení natolik velké, že elektrony na anodu vůbec nedopadnou. To je při konstantním anodovém napětí pozorovatelné měřením anodového proudu v závislosti na indukci jako jeho náhlý pokles. Je rovněž možné měřit závislost anodového proudu na anodovém napětí při konstantní magnetické indukci – tehdy je možné při kritické hodnotě U_A pozorovat náhlý vzrůst anodového proudu.

V ideálním případě by se měl pokles, resp. nárůst jevit jako skokový, ve skutečnosti je ovšem přechod hladký. Je to způsobené několika faktory: elektrony vystupující z katody

nemají nulovou rychlost, elektrické pole není zejména na okrajích magnetronu přesně radiální a při ne zcela přesném ztotožnění osy magnetronu se směrem magnetického pole se mohou elektrony pohybovat po složitějších drahách. Jako kritickou oblast je tedy třeba uvažovat místo nejstrmějšího růstu (poklesu) charakteristiky.

Pro vytváření magnetického pole se používají Helmholtzovy cívky, které v místě elektronky indukují přibližně pole

$$B = \frac{8}{5\sqrt{5}} \mu_0 \frac{NI_{mag}}{\rho_0} \left(1 - \frac{b^2}{15\rho_0^2} \right) \quad (1)$$

kde N je počet závitů jedné cívky, ρ_0 je střední poloměr cívky, $2b$ radiální šířka vinutí a I_{mag} je magnetizační proud. Diskuze přesnosti tohoto přibližného vzorce, stejně jako otázka optimalizace parametrů cívek je diskutována např. v [1].

Pokud při známé indukci B změříme kritické hodnoty anodového napětí $U_{A,kr}$, je možné spočítat měrný náboj elektronu jako

$$\frac{e}{m_e} = \frac{8U_{A,kr}}{B^2 r_A^2} \left(1 - \frac{r_K^2}{r_A^2} \right)^{-2} \quad (2)$$

kde r_A , r_K jsou poloměry anody, resp. katody. Odvození tohoto vztahu je provedeno v [1].

Výsledky měření

Měřil jsem VA charakteristiku magnetronu pro různé hodnoty magnetické indukce, přičemž měření bylo prováděno automaticky pomocí kombinovaného zdroje napětí / ampérmetru ovládaného řídicím software. Bylo možné nastavit rozsah anodových napětí a velikost kroku při zvyšování U_A . Magnetizační proud jsem nastavoval manuálně na zdroji, jeho hodnotu jsem ještě kontroloval pomocí sériového ampérmetru. Vzhledem k drobnému (formálnímu) omylu při odečítání hodnot magnetizačních proudů nejsou hodnoty, které jsem pro měření zvolil příliš standardní, nicméně na přesnost měření to nemělo vliv.

Vždy jsem nejprve změřil hrubou charakteristiku s velkým krokem a poté jsem provedl jemné proměření oblasti strmého vzrůstu charakteristiky. Hodnoty magnetizačních proudů a příslušných indukci generovaných cívkami uvádím v tabulce 1.

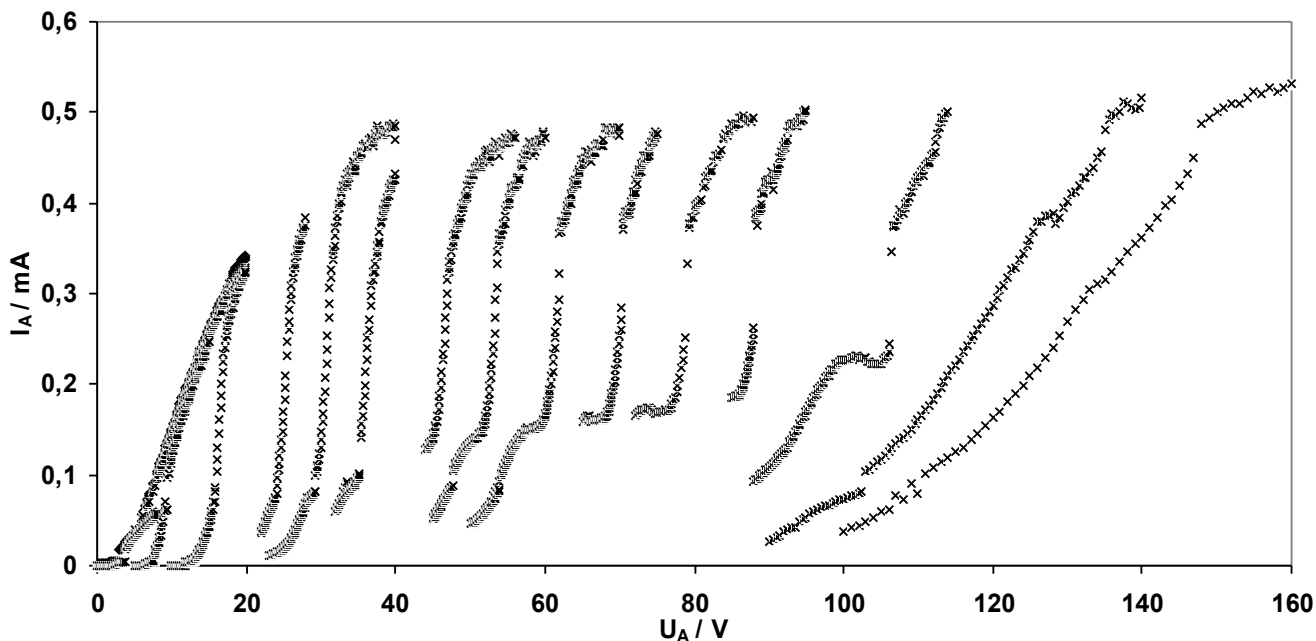
Tabulka 1: Hodnoty magnetizačních proudů

I_{mag} / A	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,00	1,13	1,23
B / mT	1,36	2,71	4,07	5,42	6,78	7,53	8,54	9,26
I_{mag} / A	1,32	1,42	1,51	1,61	1,70	1,89	2,02	2,20
B / mT	10,0	10,7	11,4	12,1	12,8	14,2	15,2	16,6

Chyba určení magnetizačního proudu činila 0,01A pro proudy do 1A, čemuž odpovídá chyba určení indukce 0,07mT a 0,03A pro proudy nad 1A, s odpovídající chybou indukce 0,2mT.

Voltampérové charakteristiky pro jednotlivé magnetizační proudy v oblasti prudkého vzrůstu jsou znázorněny v grafu 1. Číselné hodnoty vzhledem k enormnímu množství dat neuvádím. U vyšších magnetizačních proudů nebylo (pouze z hrubých charakteristik) zřejmé, kde se kritická oblast nachází, proto jsem volil i u jemného měření větší krok, aby bylo měření časově únosné.

Graf 1: Voltampérové charakteristiky v kritické oblasti

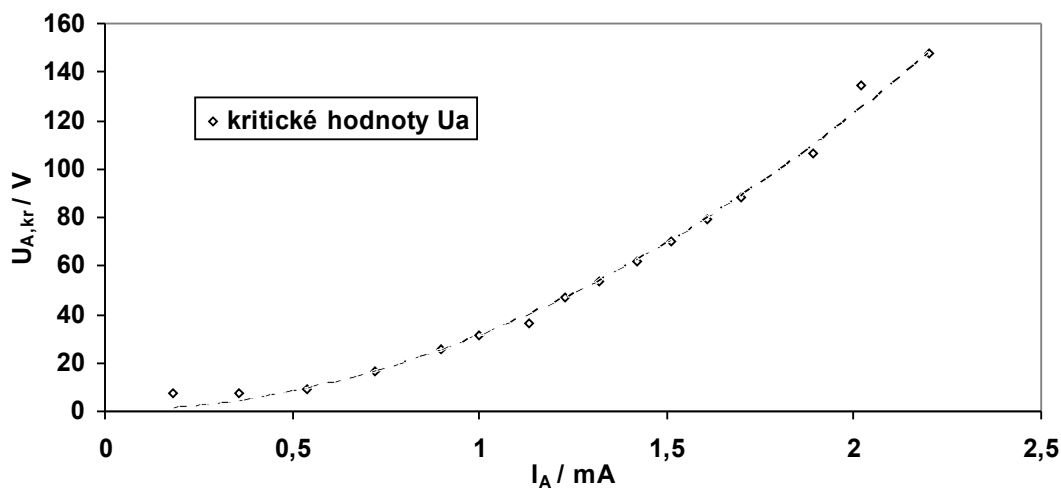


Pomocí programu Origin jsem provedl numerickou derivaci naměřených závislostí, čímž jsem našel inflexní body. Tyto jsou místy neprudšího vzrůstu a nejlépe tak odpovídají kritickým hodnotám $U_{A,kr}$. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 2 a grafu 2. Pro dva nejnižší magnetizační proudy jsem kritické hodnoty určil jen odhadem a dále je nezpracovával, neboť nebyly jednoznačné - v příslušné oblasti docházelo k rozvojení charakteristiky.

Tabulka 2: Kritické hodnoty $U_{A,kr}$

I_{mag} / A	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,00	1,13	1,23
$U_{A,kr} / V$	7,3	7,9	9,4	16,5	25,4	31	36,6	46,9
I_{mag} / A	1,32	1,42	1,51	1,61	1,70	1,89	2,02	2,20
$U_{A,kr} / V$	53,6	61,9	70,3	79	88,2	106,3	134,7	147,5

Graf 2: Závislost kritických hodnot $U_{A,kr}$ na magnetizačním proudu



Podle (2) je závislost $U_{A,kr}(I_{mag})$ kvadratická, proložil jsem tedy grafem parabolu a pomocí regrese spočítal konstantu úměrnosti, ze které jsem získal měrný náboj elektronu

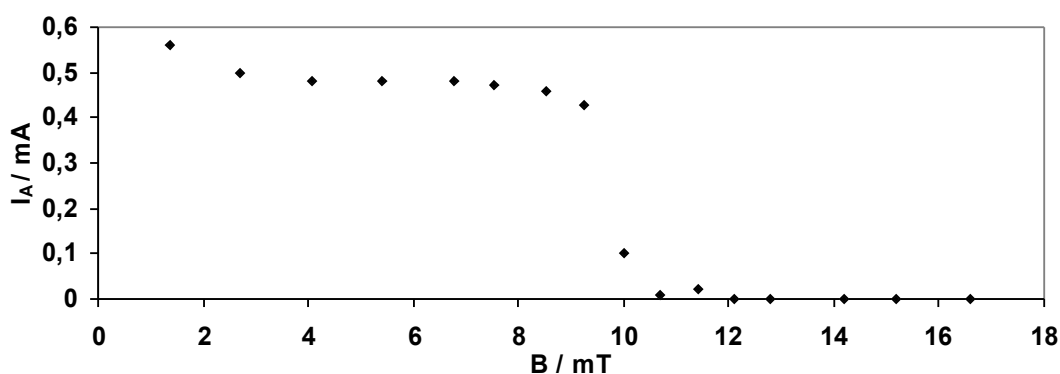
$$\frac{e}{m_e} = (1,76 \pm 0,01) \cdot 10^{11} \text{ C.kg}^{-1} \quad (8)$$

Nakonec jsem sestrojil závislost anodového proudu na magnetické indukci při konstantním anodovém napětí $U_A = 50\text{V}$. Údaje jsou shrnuty v tabulce 3 a grafu 3.

Tabulka 3: Závislost $I_A = I_A(B)$, $U_A = 50\text{V}$

B / mT	1,36	2,71	4,07	5,42	6,78	7,53	8,54	9,26
I_A / mA	0,56	0,5	0,48	0,48	0,48	0,47	0,46	0,43
B / mT	10,0	10,7	11,4	12,1	12,8	14,2	15,2	16,6
I_A / mA	0,1	0,01	0,02	0	0	0	0	0

Graf 3: Závislost $I_A = I_A(B)$, $U_A = 50\text{V}$



Z grafu je vidět, že při jisté kritické hodnotě magnetické indukce dochází k náhlému poklesu anodového proudu – přesně jak předpověděla teorie. Elektronky jsou magnetickým polem natolik stáčeny, že nedoletí na anodu a elektronkou přestává téci proud.

Diskuze

Jak jsem již v teoretické části zmínil, voltampérové charakteristiky nejsou „schodové“ z důvodů uvedených výše (nenulové rychlosti vylétujících elektronů, které rovněž mohou mít i axiální složku, odchylky pole mezi elektrodami od přísně radiálního). Proto jsem přistoupil ke ztotožnění inflexních bodů závislosti s kritickými hodnotami a použil jsem numerické derivace. Pro střední magnetizační proudy, kde jsou charakteristiky pěkně hladké, je toto určení dosti přesné (odhaduji přesnost na 0,1V). Problémy nastávají u malých mag. proudů, kde docházelo k rozdvojení charakteristik a také u velkých magnetizačních proudů, kde měla charakteristika průběh dost vzdálený teoretické skokové změně – zde jsem kritické hodnoty hledal v horní části charakteristik (viz. graf 1). Podle výsledků soudím, že se tam příslušné body skutečně nacházely.

Zjištěná hodnota měrného náboje se velice dobře shoduje s hodnotou tabulkovou (uvedenou v [1]).

Závislost anodového proudu na magnetické indukci při konstantním anodovém napětí vykazuje očekávanou závislost, bohužel, při měření jsem nezvolil dostatečně velké rozsahy anodových napětí, a tak jediné společné U_A bylo 50V (což však pro vypracování úkolu stačilo).

Závěr

Proměřil jsem voltampérové charakteristiky magnetronu pro různé magnetizační proudy. Pomocí numerické derivace jsem určil kritická anodová napětí a jejich zpracováním jsem získal měrný náboj elektronu $e/m_e = (1,76 \pm 0,01) \cdot 10^{11} \text{ C.kg}^{-1}$. Rovněž jsem sestrojil závislost anodového proudu na magnetické indukci při konstantním anodovém napětí. Naměřené závislosti potvrdily teoretické předpoklady, včetně očekávaných odchylek od ideálních průběhů.

Literatura

[1] studijní text k úloze č. 10; <http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp>