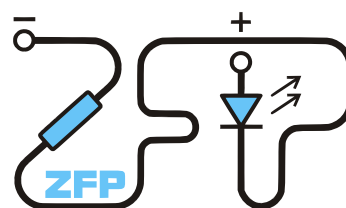


Kabinet výuky obecné fyziky, UK MFF

Fyzikální praktikum IV



Atomovka



Úloha č. A13

Název úlohy: Určení měrného náboje elektronu z charakteristik magnetronu

Jméno: Josef Iosephus Kučera

Datum měření: 16. 11. 2021

Připomínky opravujícího:

Chapu, že Vam praktika lezi v zaludku i Vas pokus o odlehčení použitím radoby historizujícího pravopisu. Jedna se ale o odborný text, který by musí sledovat stavající jazykovou normu.

V Diskusi jste již zcela rezignoval na odbornost a pojal ji jako fejeton do novin. Toto bohužel není v odborném textu akceptovatelné. Nebo si myslíte, že článek do odborného časopisu by mohl být napsán "Cocney" nebo jiným hovorovým dialektem angličtiny a že by vám jej obratem editor nevrátil...

	Možný počet bodů	Udělený počet bodů
Theoretická část	0–2	1
Výsledky a provedení měření	0–9	7
Diskuse výsledků	0–4	2
Závěr	0–1	1
Použité knižstvo	0–1	1
Celkem	max. 17	12

Posuzoval: Tomas Kmjec

dne: 24. 12. 2021

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 - 2A.
2. Pro každou naměřenou charakteristiku (při daném magnetickém poli) určete hodnotu kritického napětí (např. numerickou derivací). Získané hodnoty zpracujte graficky (použijte závislost kritického napětí na druhé mocnině magnetizačního proudu, absolutní člen získané lineární závislosti interpretujte jako kontaktní rozdíl potenciálů U_K mezi materiály katody a anody) a ze směrnice určete 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. Rozmyslete si předem, jak musí být zvolené magnetizační proudy při měření anodových charakteristik, aby bylo možné určit sklon této charakteristiky v okolí kritické magnetické indukce B_{kr} .

Poznámka 1:

Neopomeňte uvést vztah pro určení měrného náboje ze směrnice uvedené závislosti!

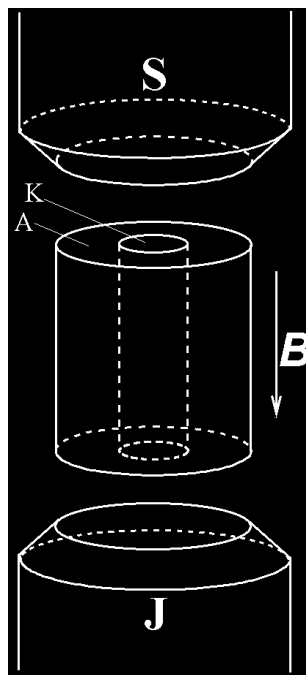
Poznámka 2:

Vakuum v magnetronu není dokonalé. Pokud mají emitované elektrony v „magnetické pasti“ ($B > B_{kr}$) dostatečnou energii (od cca 50eV), může dojít k ionizaci zbytkových plynů v elektronce a objeví se měřitelný proud v oblasti ($U_A < U_{kr}$), kde by magnetronem ještě proud protékat neměl. Tento jev je tím výraznější, čím je energie elektronů vyšší.

Theorie

Úvod

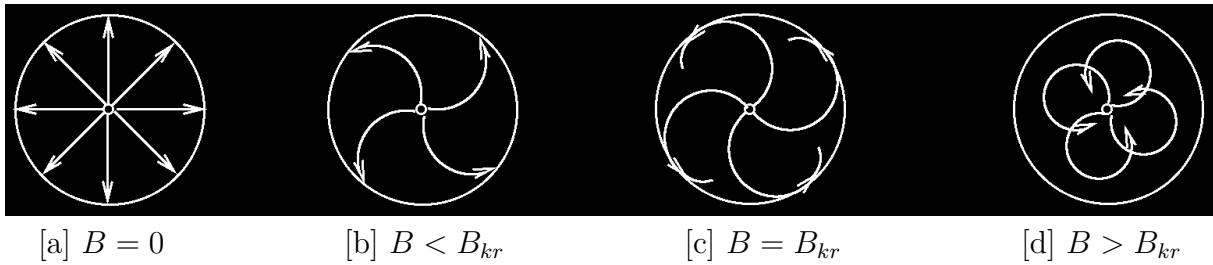
Magnetron je elektronická součástka, anžto se využívá pro vytváření mikrovlnného záření. Magnetrony mohou mít typicky různou geometrii. Námí využitý magnetron se skládá ze 2 sousedních elektrod umístěných ve vakuové nádobě mezi dvojicí cívek. Viz obr.1:



Obr.1: Geometrie elektronky; přejato z [1]

Cívky jsou uspořádány v tzv. Helmholtzově uspořádání, což nám umožňuje vytvářet uvnitř nádoby takměř homogenní mag. pole, jehož orientace je kolmá na pole elektrické.

Dráha elektronů je tak **pokřivena**. V závislosti na velikosti magnetického pole B rozlišujeme 4 případy pokřivení:



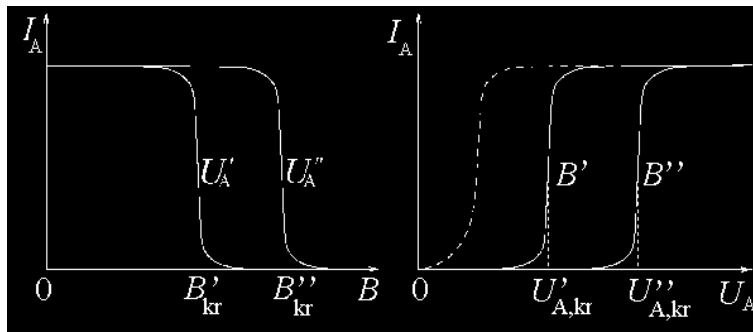
Obr.2: Dráhy vystřelovaných elektronů v závislosti na B ; přejato z [1]

Vidíme, že pokud je $B = 0$ (případ [a]), tak jsou elektrony vyzařovány mezi elektrodami radiálně. Pro rostoucí velikost B se dráha elektronů stále více **zakřivuje** (případy [b] a [c]) a pro hodnoty B vyšší než kritická hodnota B_{kr} již elektrony na anodu vůbec nedopadají a **zvracejí** se zpět na žhavou katodu. (případ [d])

Charakteristika magnetronu

Magnetron můžeme charakterisovat buď **skrze** závislost anodového proudu I_A na magnetické indukci B při **konstantním anodovém napětí** U_A , NEBO skrze závislost anodového proudu I_A na anodovém napětí U_A při **konstantní hodnotě** B .

Oba typy charakteristik jsou schematicky zobrazeny na obr. 3.



Obr.3: „Ideální“ charakteristiky magnetronu; přejato z [1]

U obou závislostí můžeme pozorovat strmý pokles anodového proudu I_A .

Měrný náboj elektronu e/m_e budeme určovat z naměřených hodnot

$$I_A = I_A(B) \text{ (charakterizované dvojicemi hodnot } U_A, B_{kr} \text{)}$$

RESP.

$$I_A = I_A(U_A) \text{ (charakterizované dvojicemi hodnot } B, U_{A,kr} \text{)}.$$

Důležité vztahy

Řešením Lagrangeových rovnic druhého druhu v polárních souřadnicích s předpokladem sféricky symetrického potenciálu a počáteční podmínky, že elektron vystupuje z katody s nulovou rychlostí, je možné dojít k rovnici

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

kde r_K jest poloměr katody a r_A poloměr anody

Pro naše experimentální uspořádání jest magnetická indukce B rovna

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

kde N jest počet závitů cívky, ρ_0 střední poloměr cívky a b rozměr vinutí a I_b magnetisační proud.

Pokud určíme závislost U_{kr} na I_b jest toliko možné ze směrnice lineární regrace S za pomoci vztahů (1), (2) určit měrný náboj elektronu jako

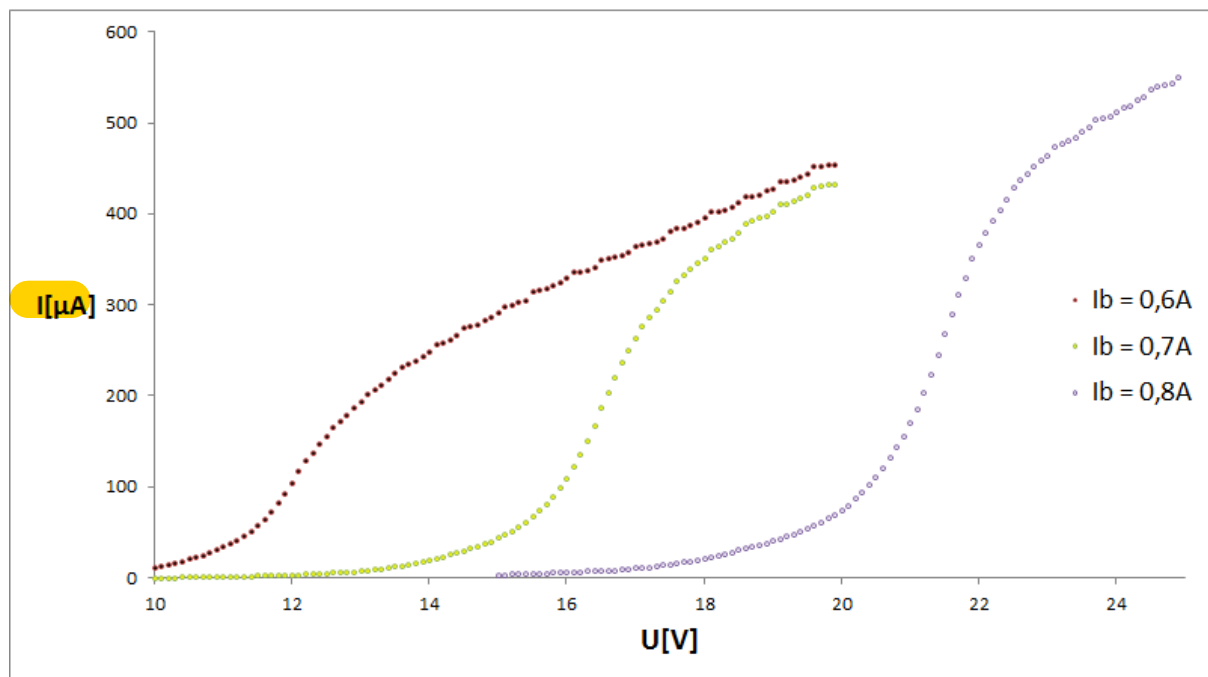
$$\frac{e}{m_e} = \frac{S}{8K^2 r_A^2 \left(1 - \frac{r_K^2}{r_A^2}\right)^2} \quad (3)$$

Výsledky měření

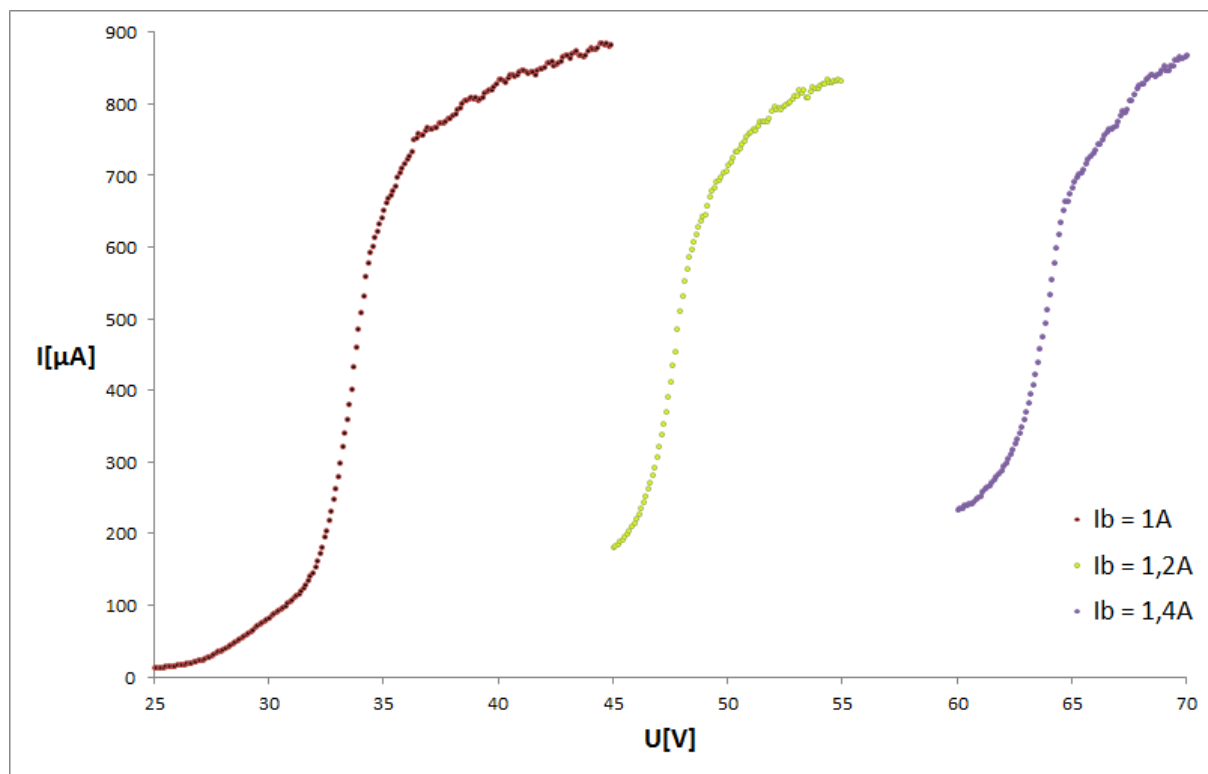
1) *V-A charakteristiky magnetronu při konstantním magnetickém poli*

Nejprve jsme pro konstantní hodnotu magnetisačního proudu magnetronu I_b a tedy i magnetického pole B proměřovali závislost napětí U na proudu anodou I .

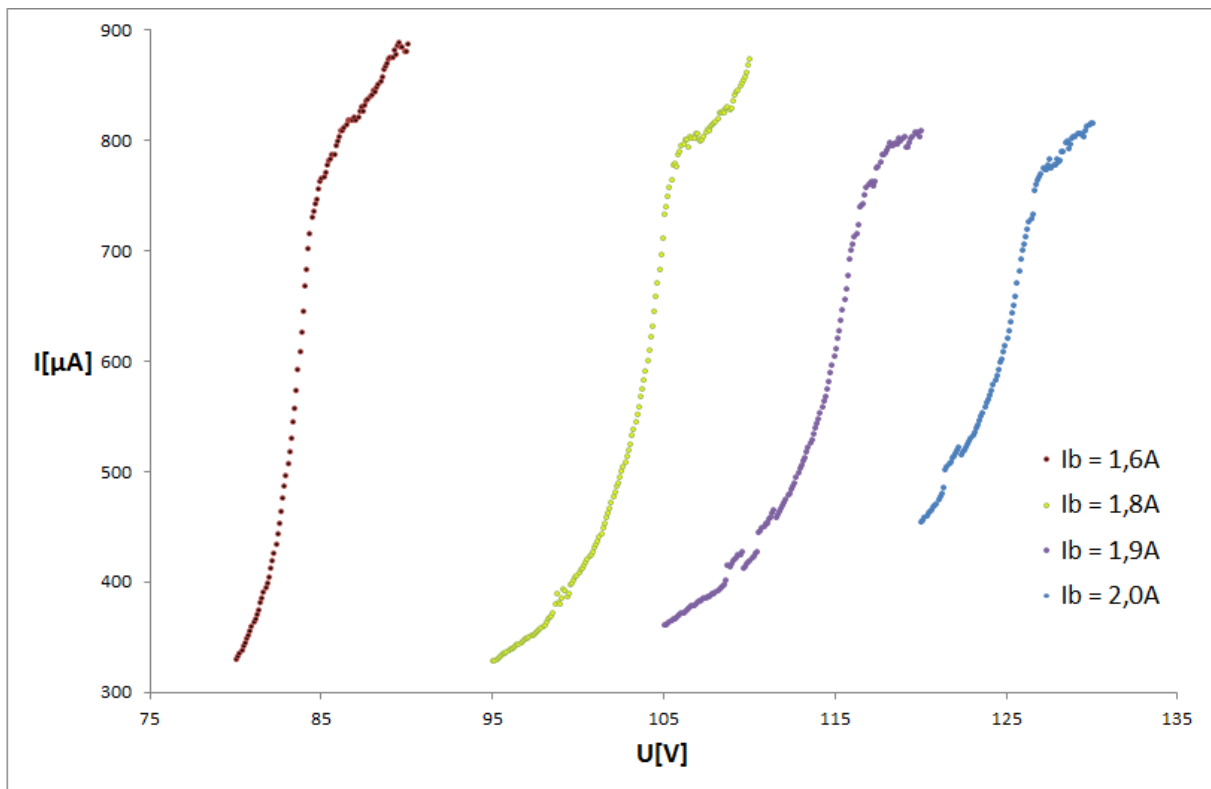
Naměřené hodnoty jsou pro hodnoty magnetisačního proudu $I_b = 0,6-2A$ v Grafech 1-3:



Graf.1: Závislost proudu anodou na napětí pro magnetisační proudy $I_b = 0,6-0,8A$



Graf.2: Závislost proudu anodou na napětí pro magnetisační proudy $I_b = 1-1,4A$



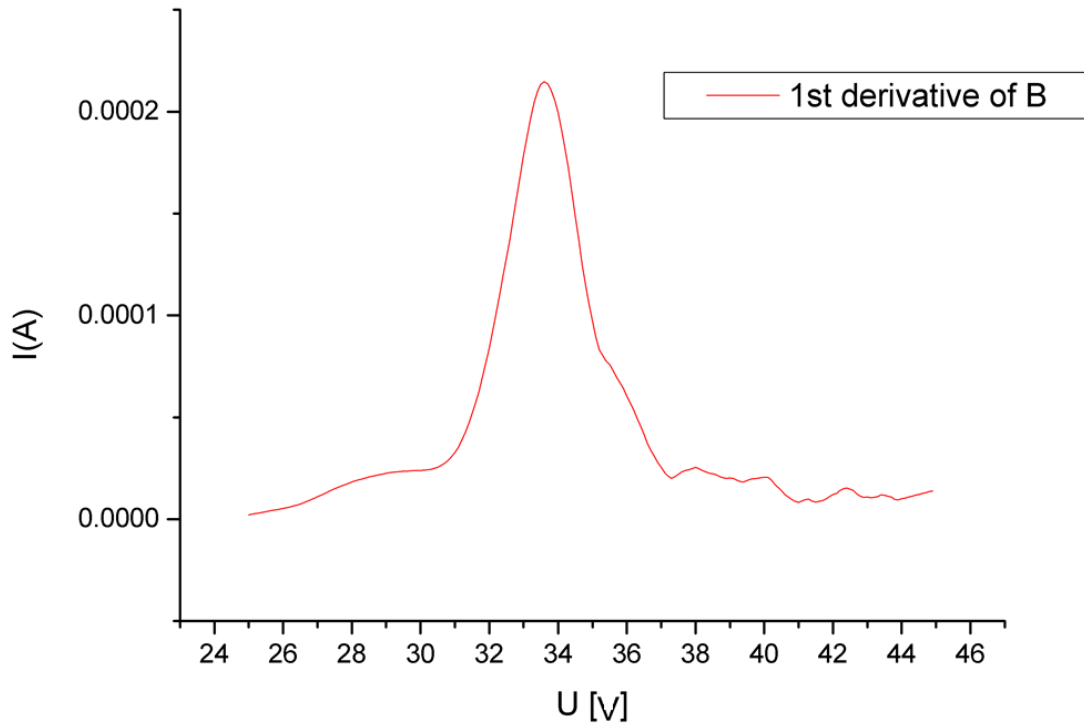
Graf.3: Závislost proudu anodou na napětí pro magnetisační proudy $I_b = 1,6-2A$

Pozn. red. 1: U vyšších magnetisačních proudů I_b se nám jeví závislost nespojitá. Patrně zde docházelo k přepínání rozsahu měřícího přístroje, což způsobilo to, že naše křivka se rozpojila.

Pozn. red. 2: Naměřili jsme i závislosti pro magnetické proudy $I_b < 0,5A$. Tyto charakteristiky však nemají žádnou vypovídající hodnotu, neboť pozorovaný pokles resp. vzrůst proudu není takřka viditelný. Proto zde jejich grafy neuvádíme.

2) Určování hodnot kritického napětí U_{kr}

Pomocí programu Origin jsme si spočítali numerické derivace všech závislostí pro hodnoty magnetisačního proudu $I_b = 0,2-2A$ viz graf 4.



Graf.4: Numerická derivace závislosti pro $I_b = 1A$

Z polohy hrbíku jsme vyčetli, kde jest střed vzrůstu proudu I_b a tedy i hodnota kritického napětí U_{kr} .

V tabulce 1 uvádíme odečtené hodnoty U_{kr} a kvadráty magnetisačního proudu I_b :

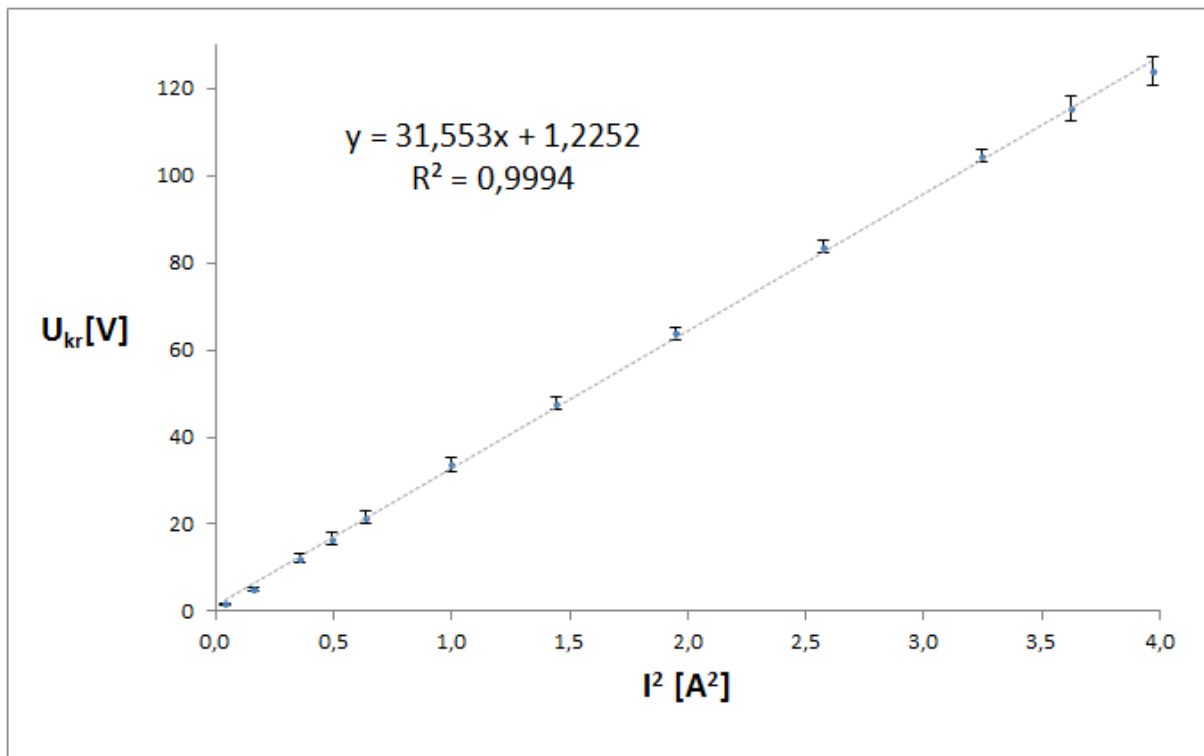
U[V]	$\pm \varepsilon(U[V])$	$I^2[A^2]$	$\pm \varepsilon(I^2[A^2])$
1,6	0,3	0,042	0,001
5,1	0,5	0,162	0,001
12,2	1,0	0,360	0,001
16,6	1,4	0,490	0,001
21,5	1,4	0,635	0,001
33,6	1,7	1,000	0,001
47,6	1,4	1,440	0,001
63,8	1,4	1,949	0,001
83,6	1,4	2,573	0,001
104,5	1,4	3,244	0,001
115,5	2,9	3,621	0,001
123,9	3,2	3,968	0,001

Tab.1: Odečtené hodnoty U_{kr} a I_b^2

V tabulce 1 jsme chyby napětí $\varepsilon(U)$ určili z nalezení FWHM délky Gaussovské křivky derivace, kterážto odpovídá rozpětí chyby $\pm 1\sigma$. Chyby magnetisačního proudu I_b jsme odečítali (odhadovali) přímo z přístroje jakožto poslední digitu, která už nekolísala.

Vidíme, že s rostoucím magnetisačním proudem I_b se absolutní chyba U zvětšovala, zatímco relativní chyba U (velikost chyby / velikost naměřené hodnoty) se naopak zmenšovala.

Data z tabulky 1 jsme vynesli do Grafu 5:



Graf.5: Směrnice závislosti U_{kr} na I_b^2

Tuto závislost jsme proložili lineární regrací a dostali jsme její směrnici S i absolutní člen posunutí U_K .

Absolutní člen zde představuje kontaktní napětí mezi anodou a katodou (a vysvětlení, proč proud u 0V není nulový) a činí $U_K = (1,230 \pm 0,005)$ kde chybu jsme položili rovnou zaokrouhlovací chybě na druhém desetinném místě.

Ze směrnice závislosti $S = (31,550 \pm 0,005)$ a parametrů magnetronu a magnetizačních cívek můžeme dopočítat měrný elektrický náboj elektronu ze vztahů (2) a (3). Jmenovitě potřebujeme znát [1]:

poloměry elektrod: $r_K = (0,19 \pm 0,01)$ mm, $r_A = (5,00 \pm 0,05)$ mm

počet závitů jedné cívky: $N = 630$

střední poloměr vinutí: $\rho_0 = 75$ mm

rozměry vinutí: $2a = 22$ mm, $2b = 30$ mm.

permeabilita vakua [2]: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$

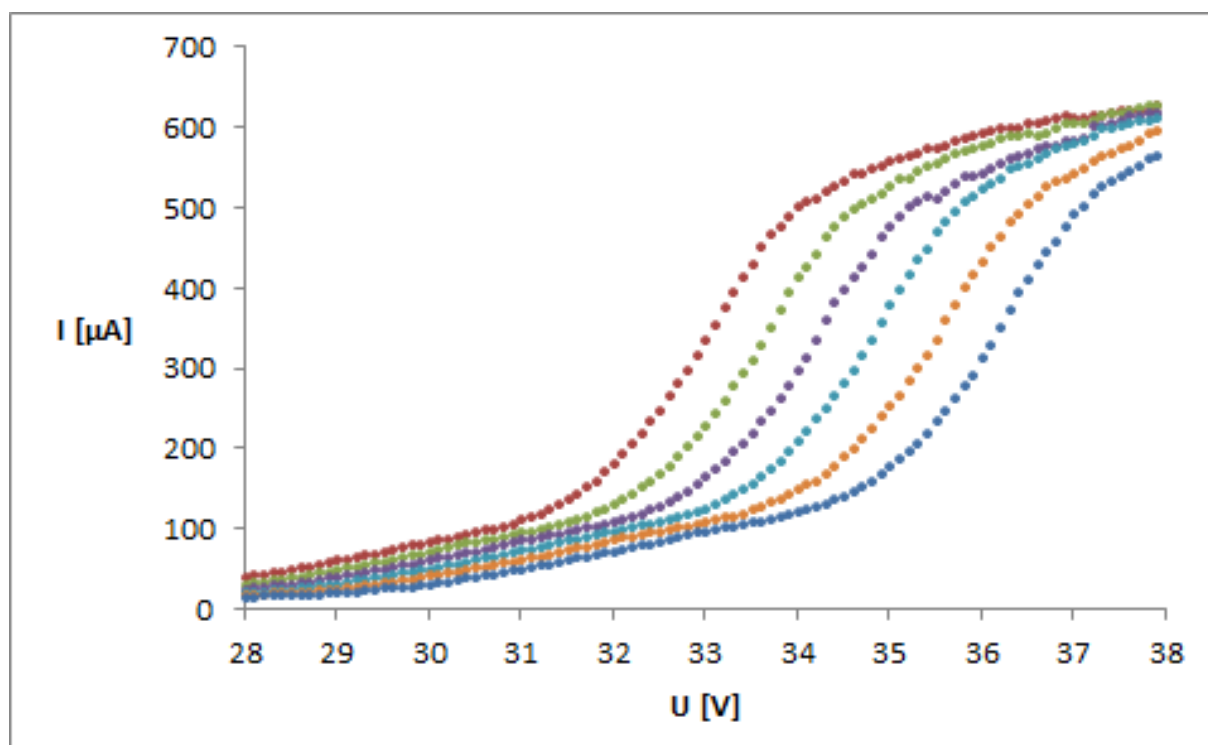
Velikost měrného náboje elektronu nám pak vychází jako

$$\frac{e}{m_e} = (1,69 \pm 0,06) \cdot 10^{11} C/kg$$

kde chyba jest určena jako zaokrouhlená relativní chyba vážené lineární regrese.

3) Určování hodnot kritické indukce B_{kr}

Pro hodnoty magnetisačního proudu $I_b=0,996-1,045A$ jsme prozkoumali 6 charakteristik, které jsme vynesli do Grafu 6:



Graf.6: Závislosti zkoumané pro určení B_{kr}

Odsud jsme se rozhodli zvolit jako pevnou hodnotu napětí pro naše další zkoumání $U = 35V$. Získali jsme tak následující tabulku dat:

U=35V		
$I_b[A]$	$\pm \varepsilon(I_b[A])$	$I[\mu A]$
0,996	0,001	557,33
1,005	0,001	528,58
1,015	0,001	478,26
1,024	0,001	380,00
1,034	0,001	255,62
1,045	0,001	178,20

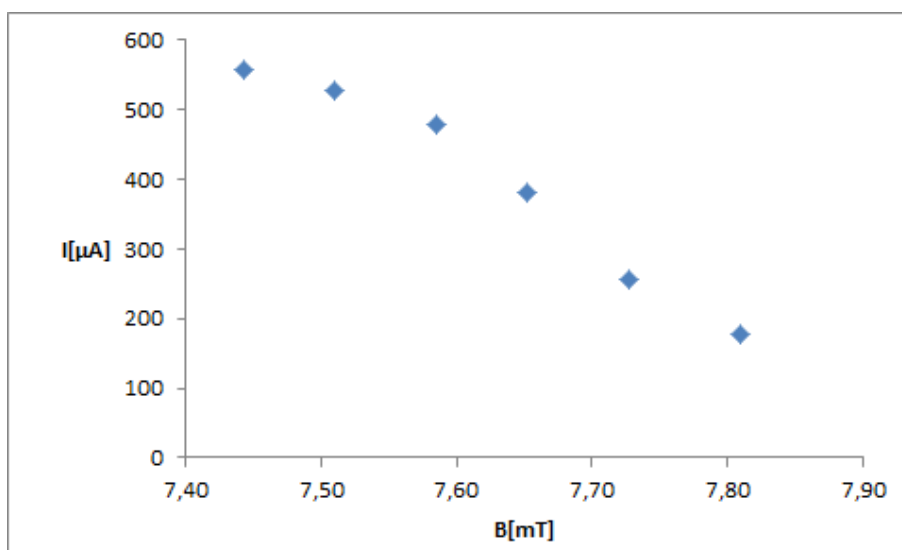
Tab.2: Hodnoty proudů pro pevné napětí U

Následně jsme dopočítali hodnoty magnetické indukce B z magnetizačních proudů I_b dle vzorce (2) a vytvořili následující tabulku:

$I_b[\text{A}]$	$\pm \varepsilon(I_b[\text{A}])$	$B[\text{mT}]$	$\pm \varepsilon(B[\text{mT}])$	$I[\mu\text{A}]$	$\pm \varepsilon(I[\mu\text{A}])$
0,996	0,001	7,44	0,01	557	1
1,005	0,001	7,51	0,01	529	1
1,015	0,001	7,58	0,01	478	1
1,024	0,001	7,65	0,01	380	1
1,034	0,001	7,73	0,01	256	1
1,045	0,001	7,81	0,01	178	1

Tab.3: Data pro určení B_{kr}

Data z Tabulky 3 jsme vynesli do Grafu 7 a zjistili jsme, že nic nevíme:



Graf.7: Pokus o určení B_{kr}

Diskuze

Pokud bychom měli ideální podmínky a ideální magnetron, měl by zlom charakteristik na okolí kritického napětí U_{kr} respektive kritické indukce B_{kr} takřka svislou směrnici.

Ale nic není dokonalé a my se tak musíme spokojit se značně rozplizlou křivkou, která má k ideálu stejně daleko jako řadový člověk k mathematice. Magnetron se totiž, převít jeden, chová jako nějaká vakuová či plynová dioda, takže v oblasti nulových napětí má zbytkový nenulový proud.

Magnetron nemá ani ideálně homogenní magnetické pole.

Kontaktní potenciál elektrod U_K by v ideálním magnetronu též měl být roven nule ale my víme z absolutního členu lingrese, že tomu tak není a jsme smutní a spíláme Bohům i magnetronu samému.

Závěr

Naměřili jsme 15 volt-ampérových charakteristik pro magnetisační proudy $I_b = 0-2A$.

Pomocí programu Origin jsme si spočítali numerické derivace všech závislostí pro hodnoty magnetisačního proudu $I_b = 0,2-2A$.

Vynesli jsme v graf a z lineární regrace U/I^2 jsme určili velikost měrného náboje elektronu jako

$$\frac{e}{m_e} = (1,69 \pm 0,06) \cdot 10^{11} C/kg$$

V druhé části se nám ji bohužel nepovedlo dopočítat.

Reference

- [1] (A13) Určení měrného náboje elektronu z charakteristik magnetronu. [Základní fyzikální praktikum]. [online][cit. 21.11.2021]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/_media/zadani/texty/txt_413.pdf
- [2] Permeabilita vakua[online][cit. 21.11.2021]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Vacuum_permeability