

e/m – měření měrného náboje elektronu

L. Kadlčík, Střední průmyslová škola, Uherské Hradiště,

KadlSoft@seznam.cz

J. Čada, Střední průmyslová škola elektrotechnická, Mohelnice,

jirka.snb@seznam.cz

Fyzikální laboratoře FJFI ČVUT, Břehová 7

Abstrakt

Měrný náboj elektronu je jednou ze základních fyzikálních konstant. Naším úkolem bylo změřit jeho velikost pomocí působení kolmého a podélného magnetického pole na svazek elektronů. Měření kolmým mang. polem dávalo průměrnou hodnotu $e/m = 1,75 \cdot 10^{11}$ C/kg, podélným magn. pole jsme zjistili průměrnou hodnotu $e/m = 2,051 \cdot 10^{11}$ C/kg. Tabulková hodnota této konstanty je $e/m = 1,7588047 \cdot 10^{11}$ C/kg [1].

1. Úvod

Pojmem měrný náboj elektronu rozumíme poměr mezi jeho nábojem a hmotností. Obě metody našeho měření se zakládaly na ovlivňování dráhy pohybujícího se elektronu magnetickým polem. Kolmé (vzhledem k dráze elektronu) magnetické pole stáčí dráhu elektronu do kružnice, podélné pole zaostřuje svazek elektronů do jednoho bodu.

2. Měření a výpočty

Metoda kolmého magnetického pole

Aparatura

Hlavní částí aparatury je skleněná baňka naplněná velmi zředěnými vzácnými plyny. Uvnitř baňky je umístěna žhavená katoda emitující elektrony. Elektrony jsou kovovým kuželem soustředěny do úzkého svazku a poté urychleny elektrickým polem při průchodu mezi dvěma destičkovými anodami, připojenými na vysoké kladné napětí (stovky voltů).

Baňka je umístěna v magnetickém poli dvou Helmholtzových cívek, kterými prochází stejnosměrný proud v řádu jednotek ampér. Na elektrony pohybující se v magnetickém poli působí Lorentzova síla, která je kolmá na směr jejich pohybu, a tím způsobuje, že se dráha elektronů stáčí do kružnice.

Některé elektrony narážejí do atomů vzácných plynů, čímž jim předávají část své pohybové energie, kterou atomy vyzařují v podobě viditelného světla. Tímto lze pozorovat dráhu elektronů.

Odvození vzorců

Elektrické pole anody připojené na kladné napětí U urychluje elektrony, jejich pohybová energie je rovna:

$$(1) \quad E = eU \quad .$$

Rychlost elektronu lze vyjádřit pomocí vzorce pro výpočet pohybové energie (kde v je rychlost pohybujícího se elektronu a m jeho hmotnost):

$$(2) \quad E = \frac{1}{2}mv^2 \quad .$$

Sloučením obou vzorců a vyjádřením proměnné v dostáváme vztah pro výpočet rychlosti:

$$(3) \quad v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \quad .$$

Indukce magnetického pole Helmholtzových cívek lze vypočítat jako:

(4) $B = kI$; $k = 7,81 \cdot 10^{-4}$, kde k je konstanta daná konstrukcí cívek (počet závitů, rozměry, vzdálenost, ...) a I je velikost proudu tekoucího cívkami. Na každý elektron působí Lorentzova síla o velikosti:

$$(5) \quad F_L = Bev \quad .$$

Lorentzova síla je shodná s dostředivou silou, kterou lze určit jako:

(6) $F_d = v^2 \frac{m}{r}$, kde r je poloměr kruhové dráhy elektronu. Pokud sloučíme oba dva předchozí vzorce, kdy dostaneme:

$$(7) \quad v^2 \frac{m}{r} = Bev \quad \text{a za proměnnou } v \text{ dosadíme vzorec (3) a po úpravě vyjádříme zlomek } e/m,$$

dostaneme vztah pro výpočet měrného náboje elektronu:

$$(8) \quad \frac{e}{m} = \frac{2U}{k^2 I^2 r^2} = \frac{2U}{6,0996 \cdot 10^{-7} I^2 r^2} \quad .$$

Postup při měření

Na zdroji anodového napětí a na zdroji proudu pro Helmholtzovy cívky nastavujeme různé hodnoty tak, aby trajektorie svazku elektronů tvořila kružnici. Je nutné, aby baňka byla správně natočena, jinak není svazek elektronů kolmý na magnetické pole a elektrony se pohybují ve spirále. Abychom se vyhnuli zkreslení rozměrů stěnami baňky, měříme obraz průměru kružnice v zrcadle za baňkou pomocí pravítka, které je součástí aparatury.

Naměřené hodnoty								
U [V]	I [A]	r [m]	e/m [C/kg]		U [V]	I [A]	r [m]	e/m [C/kg]
315	1,25	0,054	$1.932 \cdot 10^{11}$		350	2,75	0,0295	$1.744 \cdot 10^{11}$
260	1,75	0,042	$1.578 \cdot 10^{11}$		250	1,35	0,0525	$1.632 \cdot 10^{11}$
350	1,5	0,052	$1.886 \cdot 10^{11}$		125	0,85	0,056	$1.809 \cdot 10^{11}$
250	2	0,0315	$2.065 \cdot 10^{11}$		200	1,1	0,057	$1.668 \cdot 10^{11}$
150	1	0,054	$1.687 \cdot 10^{11}$		310	1,5	0,05	$1.807 \cdot 10^{11}$
370	4	0,0225	$1.497 \cdot 10^{11}$		375	1,65	0,05	$1.806 \cdot 10^{11}$
95	0,75	0,056	$1.766 \cdot 10^{11}$		255	1,9	0,0365	$1.738 \cdot 10^{11}$
350	2,5	0,034	$1.588 \cdot 10^{11}$		155	1,35	0,0405	$1.700 \cdot 10^{11}$
300	1,35	0,0545	$1.817 \cdot 10^{11}$		125	1,4	0,034	$1.808 \cdot 10^{11}$
průměr					$(1.750 \pm 0,0321) \cdot 10^{11}$			

Metoda podélného magnetického pole

Aparatura

Aparaturu tvoří osciloskopická obrazovka vložená do středu cívky napájené stejnosměrným proudem. Z katody vylétává svazek elektronů, který je dvěma anodami zformován do kužele a urychlen (směrem ke stínítku obrazovky). První anoda je napájena pomocným napětím, druhá urychlovacím.

Pohyb elektronů si můžeme rozdělit na dvě složky: podélnou a příčnou (směrem ke stěnám obrazovky). Magnetické pole působí pouze na příčnou složku pohybu – stáčí kuželovitý svazek, a tím jej soustředí do jednoho bodu. Pro výpočet velikosti měrného náboje elektronu nás zajímá, při jak velkém urychlovacím napětí a proudu tekoucí cívkou dojde k zaostření svazku elektronů na stínítko obrazovky.

Teorie

Cívka navinutá kolem obrazovky vytváří magnetické pole o indukci:

$$B = kI \quad k = 5,739 \cdot 10^{-4} \text{ T/A,}$$

kde k je konstanta daná konstrukcí cívky a I je proud tekoucí cívkou.

Je-li svazek elektronů zaostřen na stínítko, lze určit měrný náboj elektronu dle vzorce:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U}{B^2 I^2} = \frac{8\pi^2}{3,2936 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 B^2} \quad ,$$

kde U je urychlovací napětí a l je vzdálenost stínítka obrazovky od druhé anody.

Postup při měření

Nastavíme si urychlovací napětí v doporučeném rozsahu 800 – 1200 V, pomocné napětí nastavíme zhruba na desítky voltů. Poté se snažíme nastavováním proudu tekoucí cívkou zaostřit obraz na stínítku do co nejmenšího ostrého bodu.

Naměřené hodnoty								
U [V]	I [A]	U_p [V]	e/m [C/kg]		U [V]	I [A]	U_p [V]	e/m [C/kg]
800	3.85	75	$2.087 \cdot 10^{11}$		1000	4.35	80	$2.043 \cdot 10^{11}$
850	4	75	$2.054 \cdot 10^{11}$		1050	4.45	80	$2.050 \cdot 10^{11}$
950	4.2	75	$2.082 \cdot 10^{11}$		1150	4.65	80	$2.056 \cdot 10^{11}$
1000	4.25	50	$2.140 \cdot 10^{11}$		1150	4.85	90	$1.890 \cdot 10^{11}$
1000	4.3	50	$2.091 \cdot 10^{11}$		1200	4.8	90	$2.013 \cdot 10^{11}$
1200	4.65	50	$2.146 \cdot 10^{11}$		1150	4.65	11	$2.056 \cdot 10^{11}$
1100	4.6	72	$2.010 \cdot 10^{11}$		750	3.7	40	$2.118 \cdot 10^{11}$
900	4.25	72	$1.926 \cdot 10^{11}$					
průměr					$(2.051 \pm 0,018) \cdot 10^{11}$			

3. Závěr

Metoda kolmého magn. pole

Naměřili jsme průměrnou hodnotu $e/m = 1,75 \cdot 10^{11}$ C/kg, což znamená odchylku -0,005 %. Zjistili jsme, že není vhodné nastavovat příliš malé anodové napětí a zároveň malý proud tekoucí cívkami, neboť svazek elektronů má tendenci vletět dovnitř hrdla s ostatními elektrodami (kvůli jejich el. poli).

Metoda příčného magn. pole

Tato metoda měření nebyla příliš přesná, naměřili jsme hodnotu $e/m = 2,05 \cdot 10^{11}$ C/kg, tj. s chybou +16,6 %. Chyba by mohla být způsobena nepřesností konstrukce obrazovky. Zjistili jsme že, obrazovka nesmí být umístěna příliš blízko k ostatním přístrojům (zdroje, ampérmetr, atd.), protože jejich magnetické pole zhoršuje přesnost měření. Dále jsme zjistili, že při velkém pomocném napětí je obtížné zaostřit elektronový svazek a přesnost měření se zhoršuje.

4. Poděkování

- Naši supervizorce Maryle za asistenci a péči.
- FJFI ČVUT za zprostředkování Fyzikálního týdne.
- Panu Ing. V. Svobodovi za organizaci Fyzikálního týdne.
- Sponzorům Fyzikálního týdne.

5. Reference

[1] Fyzikální tabulky, str 1. <http://www.kfy.zcu.cz/prakt/Skripta/tabulky.pdf> Západočeská univerzita, Fakulta aplikovaných věd.