Téma: Pohyb elektronů v magnetickém a elektrickém poli

Úkoly pro zpracování:

1. Ověřte správnost zapojení vychylovací trubice podle schématu na obr. 2b
2. Po kontrole zapojení vyučujícím ověřte funkci elektronové trysky a vychylování pomocí magnetického a elektrického pole.
3. Vychylování elektrickým polem: při napětí U_A= 3000V měňte napětí na vychylovacích destičkách tak, aby elektronový svazek procházel postupně dvěma místy o souřadnicích x=10cm a y=1cm (y=2cm). Odvoďte vztah a výpočtem ověřte experimentálně určená napětí, která je nutné přivést na vychylovací destičky.
4. Vychylování magnetickým polem: Při napětí U_A= 4000V měňte proud procházející Helmholtzovými cívkami tak, aby elektronový svazek procházel postupně dvěma místy o souřadnicích x=10cm a y=-1cm (y=-2cm). Odvoďte vztah a výpočtem ověřte experimentálně určený proud cívkami, který je nutné nechat téci do cívek.

5.1 Vypočítejte měrný elektrický náboj e/m s pomocí magnetického pole

5.2 Vypočítejte měrný elektrický náboj e/m s pomocí elektrického pole

5.3 Vypočítejte měrný elektrický náboj e/m s využitím magnetického i elektrického pole

DŮLEŽITÉ!

Bezpečnostní pokyny pro používání vychylovací trubice a Helmholtzových cívek – nutno přečíst před spuštěním

Žhavené elektronky jsou tenkostěnné vakuové trubice. Zacházejte s nimi opatrně, protože hrozí riziko imploze.

Především

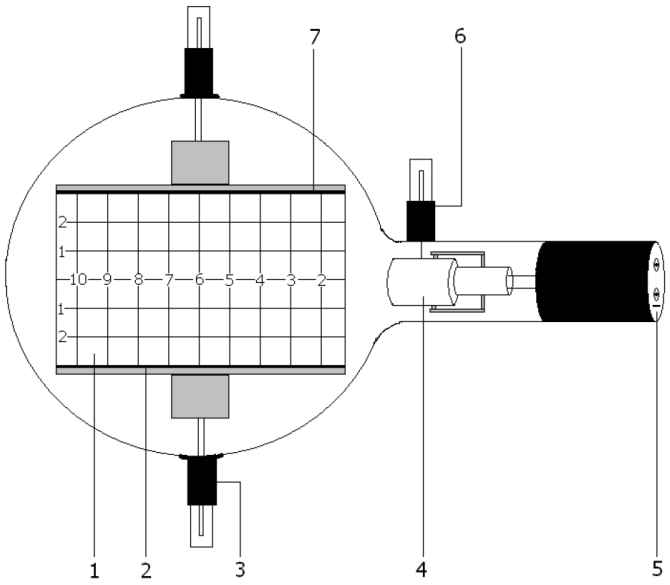
- Nevystavujte trubici mechanickému tlaku
- Nenechte připojovací kabely napnuté
- Trubici lze používat pouze s držákem
- Nepřekračujte provozní parametry uvedené na konci návodu
- Změnu elektrického obvodu provádějte pouze s vypnutým zdrojem
- Trubici nevydělávejte z držáku – pouze za asistence vyučujícího
- Část trubice a držáku v oblasti elektronové trysky mohou být horké – před manipulací nechte trubici vychladnout
- Trubici provozujte pouze s doporučeným zdrojem (elektromagnetická kompatibilita)

Helmholtzovy cívky jsou tvořeny lakovaným měděným drátem navinutým na plastové cívce. Je velmi důležité hlídat maximální proud procházející cívkami, přílišné ohřátí způsobí jejich zničení. Provozní parametry cívek jsou uvedeny na konci návodu.

Popis experimentu

Vychylovací trubice je určena ke zkoumání vychýlení elektronových paprsků v elektrickém a magnetickém poli. Může být také použita k odhadu měrného náboje elektronu *e/m* nebo k určení rychlosti elektronu *v*. Vychylovací trubice obsahuje elektronovou trysku, která ve vakuové skleněné baňce vydává úzký zaostřený elektronový svazek (tzv. katodový paprsek). Zdrojem elektronů v elektronové trysce je wolframové vlákno katody, žhavené přímým průchodem elektrického proudu

(termoemise). Elektrony jsou od povrchu katody urychlovány elektrickým polem anody. Elektronový svazek letí do rozšířené části trubice, kde může být vychylován elektrostatickým polem mezi vestavěnými destičkami kondenzátoru. Další možností je vychylování svazku magnetickým polem generovaným dvojicí Helmholtzových cívek, připevněných k držáku trubice. Elektronový svazek dopadá na šikmo umístěnou slídovou destičku pokrytou z jedné strany fluorescenční vrstvou a z druhé strany čtvercovou sítí pro sledování dráhy paprsku.



1 Fluorescenční stínítko
2 Spodní vychylovací deska
3 Zástrčka pro napájení vychylovacích desek
4 Elektronová tryska
5 4mm zdířky pro napájení katody
6 4mm zdířka pro napájení anody
7 Horní vychylovací deska

Obr. 1: Schéma vychylovací trubice pro sledování pohybu elektronu v elektromagnetických polích

Vychýlení elektronů magnetickým polem

Elektron o hmotnosti m a jednotkovém náboji e, letící konstantní rychlostí $\vec{v}$ uvnitř oblasti s konstantní magnetickou indukcí $\vec{B}$ bude vychylován Lorentzovou silou $\overrightarrow{F_l} = e\vec{v} \times \vec{B}$. Protože síla $\overrightarrow{F_l}$ musí být z definice kolmá na rychlost $\vec{v}$ a současně na indukci $\vec{B}$, bude se elektron pohybovat po kruhové trajektorii o poloměru r, jejíž rovina je kolmá na vektor $\vec{B}$. (Pozn.: Těleso se pohybuje po kružnici tehdy, když výsledná síla působící na těleso je neustále kolmá na vektor rychlosti tělesa.) Po dosazení do 2. Newtonova zákona ve skalárním tvaru

$$F_l = ma_d$$

dostáváme

$$Bev = \frac{mv^2}{r}. \qquad (1)$$

Magnetické pole o indukci *B* je vytvářeno prostřednictvím páru Helmholtzových cívek. Pokud jsou zapojeny v Helmholtzově konfiguraci podle obr. 2, platí pro velikost magnetické indukce vztah

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 n}{R} I = kI. \qquad (2)$$

Tento zjednodušený vztah platí pro geometrii cívek, kdy poloměr cívek je roven jejich vzájemné osové vzdálenosti. Tato podmínka je u našeho zařízení splněna. Energie elektronu o jednotkovém náboji e, který vylétá z elektronové trysky do rozšířené části trubice je dána anodovým napětím U_A a je možné ji vypočítat ze vztahu

$$E_k = eU_A.$$

Použitím vztahu pro kinetickou energii elektronu dostáváme rovnost

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_A. \qquad (3)$$

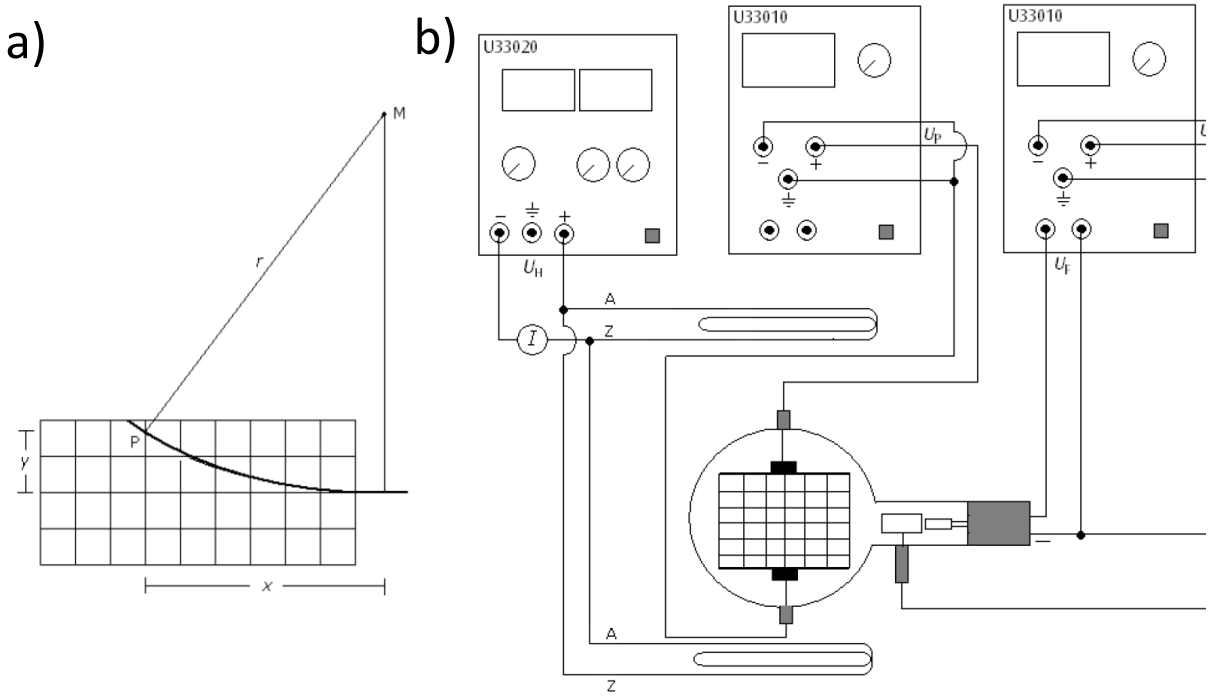
Pokud potřebujeme vypočítat poloměr zakřivení dráhy elektronu pohybujícího se v magnetickém poli, můžeme využít odměrnou síť na fluorescenčním stínítku uvnitř vychylovací trubice. Po odečtení souřadnic x a y podle obr. 2a je možné přibližně vypočítat poloměr zakřivení r z Pythagorovy věty

$$r^2 = x^2 + (r - y)^2,$$

odkud plyne

$$r = \frac{x^2+y^2}{2y}. \qquad (4)$$

Kombinací vztahů (1), (2), (3) a (4) je možné vypočítat vychýlení elektronu, měrný elektrický náboj nebo další veličiny podle zadání.



Obr. 2a: K vysvětlení způsobu výpočtu poloměru zakřivení elektronového svazku
Obr. 2b: Schéma zapojení vychylovací trubice pro experimenty s elektronovým svazkem

Vychýlení elektronů elektrickým polem

Napětí na elektrodách kondenzátoru budí mezi destičkami elektrické pole o intenzitě E. Toto pole vychyluje nabité částice mezi destičkami elektrickou sílou $F_E = eE$.

Elektrická intenzita uvnitř kondenzátoru souvisí s napětím na destičkách U_P a vzájemnou vzdáleností destiček d vztahem

$$E = \frac{U_P}{d}. \qquad (5)$$

Dosazením elektrické síly F_E do 2. Newtonova zákona ve směru vychýlení elektronu dostáváme rovnici

$$m\frac{d^2y}{dt^2} = eE,$$

ze které po dvojí integraci dostaneme vztah pro výpočet příčného vychýlení elektronu y, dosažené po průletu elektronu vzdáleností v podélném směru x

$$y = \frac{1}{2}\frac{e}{m}\frac{E}{v^2}x^2. \qquad (6)$$

Výpočet měrného elektrického náboje

Měrný elektrický náboje je možné určit několika způsoby. Rozdělme tento úkol na tři možnosti podle toho, zda pro určení měrného elektrického náboje využijeme magnetické, elektrické, nebo obě pole.

Výpočet měrného elektrického náboje pomocí magnetického pole

Z rovnic (1) a (3) lze vyjádřit poměr $^e/_m$ v závislosti na proměnných U_A, B a r. U_A je dáno vhodným nastavením zdroje napětí, indukci B a poloměr r lze vypočítat ze vztahů (2) a (4).

Výpočet měrného elektrického náboje pomocí elektrického pole

Měrný elektrický náboj je možné určit snadno úpravou rovnice (6). Velikost intenzity elektrického pole se vypočítá ze vztahu (5), kde U_P je dána nastavením zdroje napětí a vzdálenost destiček d lze zjistit z technických údajů vychylovací trubice.

Výpočet měrného elektrického náboje pomocí kompenzace elektrického a magnetického pole

Při vhodném nastavení velikosti magnetického a elektrického pole může dojít k situaci, kdy elektrická a magnetická síla působící na letící elektron je v rovnováze. V tomto případě se elektron pohybuje rovnoměrně přímočaře. Pro rovnováhu sil platí

$$eE = evB.$$

Ze vztahu plyne podmínka pro rychlost elektronu pohybujícího se mezi destičkami

$$v = \frac{E}{B}. \qquad (7)$$

Kombinací vztahu (7) a vztahů pro výpočet velikosti elektrického pole E (5) a velikosti magnetické indukce B (2) lze vyjádřit měrný elektrický náboj $^e/_m$.

Technické a provozní parametry experimentálního zařízení:

Vychylovací trubice

Žhavící napětí	≤7,5 V AC/DC
Anodové napětí	1000V – 5000V
Anodový proud	1mA
Napětí vychylovacích desek	max. 5000V

Vzdálenost mezi deskami	54mm
Velikost čtverce sítě	10mm

Helmholtzovy cívky

Maximální proud	
nepřetržitý	1,0A
krátkodobý	1,5A (max. 10min)
	2,0A (max. 3min)

Počet závitů cívky	320 u každé cívky
Průměr cívky	cca 136mm
Osová vzdálenost cívek	68mm