

Určení měrného náboje elektronu z trajektorie ve zkřížených polích

1. Úvod

Měrným nábojem elektronu e/m_e rozumíme poměr absolutní hodnoty jeho náboje e a hmotnosti m_e . Jde o důležitou veličinu, kromě jiného například i pro určení hmotnosti elektronu, která se neměří přímo; je však možné ji z měrného náboje e/m_e jednoduše určit při znalosti velikosti náboje e . Problematika přímého měření náboje elektronu má přitom svou specifickou historii (viz například [1]); dnešní užívaná hodnota (podle adjustace z r. 1986 [2]) činí $e = 1,602\,177\,33(49) \cdot 10^{-19}$ coulombu.

Klasické metody pro měření měrného náboje elektronu vycházejí ze studia pohybu elektronu v elektrickém a magnetickém poli. První spolehlivou hodnotu $e/m_e = 1,7 \cdot 10^{11}$ C/kg získal roce 1897 objevitel elektronu J. J. Thomson na zařízení velmi podobném dnešní obrazovce, kombinující elektrické a magnetické vychylování elektronového svazku. Metody založené na studiu pohybu volných elektronů v elektrickém a magnetickém poli byly dále zdokonalovány a v prvních desetiletích 20. století přinesly značné zpřesnění výsledku.

2. Princip určení e/m_e v tomto uspořádání

Tato aparatura pro studium dráhy elektronového svazku ve zkřížených polích je založena na možnosti sledovat dráhu elektronového svazku ve zředěném plynu. Experimentální prostor, tvořený skleněnou baňkou o průměru přibližně 170mm, byl po vyčerpání na vysoké vakuum naplněn argonem pod tlakem přibližně 0,1 Pa. Tento zředěný inertní plyn plní významnou úlohu při fokusaci a zviditelnění elektronového svazku, který se na své dráze sráží s molekulami plynu, ionizuje je a argon při následné rekombinaci vydává luminiscenční záření. Přitom většina pomalých iontů vytváří vlákno podél dráhy elektronového svazku a svým kladným nábojem významně přispívá k jeho fokusaci.

Ve středu baňky jsou na nosnících připevněny příčky. Jejich vzdálenosti od ústí zdroje elektronového svazku jsou 40, 60, 80 a 100mm a na příčkách jsou naneseny fluorescenční vrstvy, které při dopadu elektronového paprsku světélkují.

Na elektron, pohybující se rychlostí \mathbf{v} v magnetickém poli s indukcí \mathbf{B} působí síla

$$\mathbf{F} = e \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

V naší aparatuře pro studium dráhy elektronového svazku ve zkřížených polích je magnetické pole tvořeno Helmholtzovými cívkami, které poskytují dostatečně homogenní magnetické pole se směrem, rovnoběžným s osou cívek. Elektrony, emitované žhavenou katodou, jsou urychleny napětím U na rychlost v (počáteční energii elektronů při opuštění katody přitom zanedbáváme), pro niž ze zákona zachování energie plyne:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eU \quad (1)$$

Odtud lze vyjádřit rychlost v :

$$v = \frac{\sqrt{2eU}}{\sqrt{m_e}} \quad (2)$$

Urychlovací napětí U je součtem dvou nezávisle nastavitelných napětí U_1 a U_2 , přivedených na fokusační elektrody. Při vhodném poměru napětí U_1 a U_2 je na výstupu

elektronového zdroje úzký zkolimovaný paprsek, kolmý na magnetické pole. Síla, která pak na elektronový svazek působí, má velikost

$$F = e v B \quad (3)$$

a je kolmá na vektor rychlosti i magnetického pole. Svazek elektronů proto zakřivuje po kruhové dráze s poloměrem r :

$$F = m_e \frac{v^2}{r} \quad (4)$$

Ze vztahů (2) a (3) dostáváme

$$v = \frac{e}{m_e} B r \quad (5)$$

Porovnáním (2) a (5) dostaneme

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2 U}{r^2 B^2} \quad (6)$$

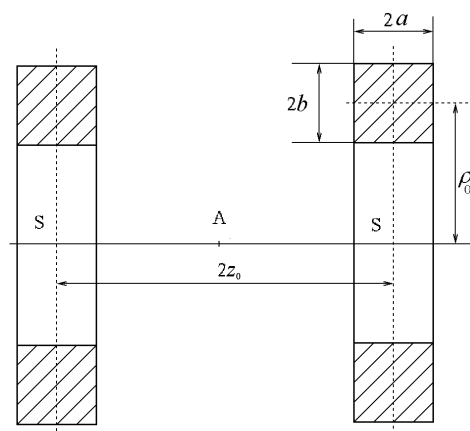
Pro určení specifického náboje elektronu tedy potřebujeme určit urychlující napětí U potřebné k tomu, aby v magnetickém poli o indukci B byl poloměr kruhové dráhy elektronového svazku r .

3. Vlastnosti použitého zdroje magnetického pole.

Tímto zdrojem je dvojice stejných cívek protékaných proudem I_{mag} v souhlasném směru. Ve známém Helmholtzově uspořádání, kdy vzájemná vzdálenost rovin symetrie obou cívek $2z_0$ je rovna střednímu poloměru ρ_0 jejich vinutí (viz obr. 1), vytváří cívky pozoruhodně homogenní pole v okolí středového bodu „A“ na jejich společné ose za předpokladu, že rozměry a , b vinutí jsou zanedbatelné proti poloměru ρ_0 . Pro magnetickou indukci B v bodě „A“ pak platí vztah

$$B = \frac{8\mu_0}{5\sqrt{5}} \frac{N I_{\text{mag}}}{\rho_0}, \quad (7)$$

v němž N značí počet závitů jedné cívky. Homogenita pole Helmholtzových cívek v okolí středového bodu „A“ ve směru jejich společné osy je diskutována např. v [2]. Z údajů zde uváděných plyne, že v intervalu délky $0,1 \rho_0$ symetricky položeném vůči středovému bodu „A“, se magnetické pole liší o méně než o 0,01 % hodnoty v bodě „A“, určené podle vzorce (7)!



Obr. 1: Parametry magnetizačních cívek

Pro použité provedení cívek lze rozměry a , b proti poloměru ρ_0 zanedbat. Výpočet, který k těmto rozměrům přihlíží, je uveden např. ve studijním textu k úloze A13 [3].

Obě shodně navinuté cívky jsou zkonstruovány tak, aby bylo možné snadno určit počet jejich závitů. Každá z cívek je navinuta z měděného drátu ve 14 vrstvách po 11 závitěch, celkem tedy je počet závitů $N = 154$.

Střední poloměr ρ_0 je 200 mm, indukce při maximálním proudu $I_{\text{mag}} = 5\text{ A}$ dosahuje 3,5 mT.

Literatura

[1] J. Brož, V. Roskovec: Základní fyzikální konstanty, SPN, Praha 1980

[2] J. Brož a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983

[3] http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_413.pdf

Pracovní úkol: Úloha A23

Určení měrného náboje elektronu z trajektorie ve zkřížených polích

1. Pootáčením baňky nastavte elektronový paprsek kolmo k magnetickému poli. Přitom si všimněte, že pokud není elektronový paprsek přesně kolmý k magnetickému poli, tvoří jeho dráha v experimentálním prostoru šroubovici s konstantním stoupáním.
2. Určete napětí, potřebné pro urychlení elektronového svazku tak, aby v magnetických polích, vyvolaných magnetizačními proudy v rozmezí od 0,5 A do 4 A byl průměr kruhové dráhy svazku 40, 60, 80 a 100 mm. Vhodnou volbou dílčích urychlovacích napětí U_1 a U_2 docilujete co nejlepší fokusaci pozorovaného elektronového svazku.
3. Z naměřených hodnot určete měrný náboj elektronu. Diskutujte vliv poloměru dráhy svazku na chybu určení e/m_e a použitelný rozsah urychlovacích napětí U .

Úloha byla vybudována s podporou projektu 992/2009 FRVŠ.