Ćwiczenie 351

Wyznaczanie ładunku właściwego elektronu metodą podłużnego pola magnetycznego

Przed zapoznaniem się z instrukcją i przystąpieniem do wykonywania ćwiczenia należy opanować następujący materiał teoretyczny:

- 1. Ładunek elektronu, ładunek właściwy. [1] lub [2].
- 2. Ruch ładunku elektrycznego w polach elektrycznym i magnetycznym. [[1] lub [2].
- 3. Metoda podłużnego pola magnetycznego wyznaczania ładunku właściwego elektronu. [2] lub [3]
- 4. Budowa lampy oscyloskopowej. [4].

Cel ćwiczenia

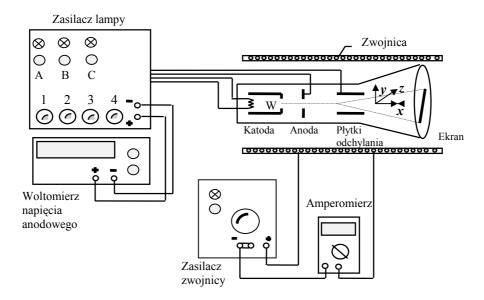
Celem ćwiczenia jest wyznaczenie tak zwanego ładunku właściwego elektronu, czyli stosunku ładunku elektronu do jego masy spoczynkowej e/m.

Metoda pomiaru

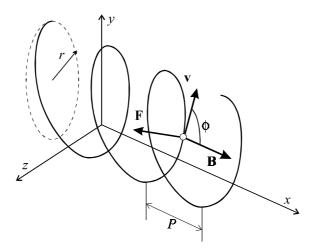
Wyznaczenie ładunku właściwego elektronu możliwe jest między innymi na podstawie badań parametrów ruchu elektronów w polach elektrycznym i magnetycznym. W ćwiczeniu zastosowano tak zwaną metodę podłużnego pola magnetycznego. Metoda ta oparta jest na kontrolowaniu toru ruchu rozbieżnej wiązki elektronów w lampie oscyloskopowej umieszczonej w polu magnetycznym zwojnicy równoległym do osi lampy (rys. 1). Elektrony emitowane przez rozżarzoną katodę są przyśpieszane przez oddziaływanie elektrostatyczne zespołu anod i uformowane w wiązkę przez ujemnie naładowaną elektrodę zwaną cylindrem Wehnelta W. Wiązka ta następnie przechodzi przez zespół płytek odchylania pionowego równolegle do ich powierzchni i ostatecznie trafia w pokrytą luminoforem powierzchnię ekranu lampy, tworząc na niej świecący ślad.

Pole magnetyczne zwojnicy o indukcji ${\bf B}$ oddziałuje na elektrony poruszające się z prędkością ${\bf v}$ siłą Lorentza ${\bf F}$ daną wzorem

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{v} \times \mathbf{B} \ . \tag{1}$$



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego



Rys. 2. Tor ruchu elektronów w polu magnetycznym

Wartość tej siły zależy od kąta ϕ pomiędzy kierunkiem ruchu elektronów (wektora ich prędkości \mathbf{v}) i wektorem indukcji pola magnetycznego \mathbf{B} (rys. 2). Jeśli kąt ten wynosi 0 lub π to siła Lorentza ma wartość zero i pole magnetyczne nie wpływa na ruch elektronów. W każdym innym przypadku siła jest różna od zera i zawsze skierowana prostopadle do płaszczyzny utworzonej przez wektory \mathbf{v} i \mathbf{B} . Taki kierunek wektora siły sprawia, że pełni ona rolę siły dośrodkowej wprawiając elektrony w ruch po okręgu w płaszczyźnie yz. Warunkiem koniecznym takiego ruchu jest niezerowa składowa prędkości wzdłuż kierunku prostopadłego do wektora \mathbf{B} np. wzdłuż y. Przemienne pole elektryczne przyłożone do płytek odchylania pionowego oddziałuje na wiązkę elektronów, zapewniając wystąpienie takiej niezerowej składowej prędkości \mathbf{v}_y . Ruch elektronów w lampie jest więc ruchem złożonym z ruchu jednostajnego po okręgu w płaszczyźnie yz i ruchu jednostajnego prostoliniowego wzdłuż osi x. Tor tego ruchu złożonego ma kształt linii śrubowej (rys. 2).

Elektrony przyśpieszone różnicą potencjałów U w obszarze zespołu anod mają jednakową prędkość v_x wzdłuż osi x równą

$$v_x = \sqrt{\frac{2eU}{m}} \tag{2}$$

a zatem drogę l do ekranu lampy wszystkie pokonują w tym samym czasie, równym

$$t = l/v_x = l/\sqrt{2eU/m} . ag{3}$$

Rzuty torów ruchu poszczególnych elektronów na płaszczyznę yz są okręgami. Ich promienie r zależą od indukcji pola magnetycznego B oraz od składowych v_y prędkości, które elektrony uzyskują dzięki oddziaływaniu płytek odchylających:

$$r = \frac{m \, v_y}{eB} \,. \tag{4}$$

Okres obiegu T czyli czas potrzebny na opisanie przez elektrony pełnego okręgu, nie zależy od promienia okręgu i jest dla wszystkich elektronów taki sam:

$$T = \frac{2\pi m}{eB}. (5)$$

Po upływie pewnego czasu t elektrony przebywają określoną odległość w kierunku x. Mogą wtedy znajdować się w punktach różnie oddalonych od osi x. Wszystkie takie punkty tworzą na płaszczyźnie yz ślad przekroju rozbieżnej wiązki elektronów. Ma on kształt odcinka, ponieważ wszystkie elektrony tworzą go w tym samym momencie i w tym samym stadium ruchu po okręgu - leżą więc na cięciwie okręgu. W różnych punktach osi x odcinek ten może być oczywiście różnie nachylony i mieć różną długość. Dobierając odpowiednią wartość indukcji pola magnetycznego można doprowadzić do sytuacji, kiedy czas przebycia drogi l wzdłuż osi x w lampie będzie równy okresowi obiegu elektronów w ruchu po okręgu T (lub całkowitej jego wielokrotności nT). Wówczas wszystkie elektrony trafią w jeden punkt na ekranie lampy. Ten stan nazywamy zogniskowaniem wiązki. Warunek ogniskowania otrzymuje się z porównania wzorów (3) i (5). Pozwala on na obliczenie szukanego stosunku e/m:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U n^2}{l^2 B^2},\tag{6}$$

gdzie *n* jest krotnościa ogniskowania.

Przebieg pomiaru

Pomiar polega na doprowadzeniu, przez dobór indukcji pola magnetycznego - a bezpośrednio przez regulację prądu zwojnicy - do zogniskowania wiązki elektronów na ekranie lampy oscyloskopowej. Znając wartość indukcji takiego ogniskującego pola magnetycznego można obliczyć poszukiwaną wartość ładunku właściwego e/m ze wzoru (6). Potrzebną wartość v_x składowej prędkości wzdłuż osi v_x można wyznaczyć v_x 0, a wartość indukcji pola - na podstawie wartości prądu przepływającego przez zwojnicę o znanych parametrach konstrukcyjnych ze wzoru

$$B = \frac{\mu \mu_0 NI}{2\sqrt{\left(r + \frac{h}{2}\right)^2 + \frac{d^2}{4}}},\tag{7}$$

gdzie: μ =1 - przenikalność magnetyczna ośrodka wewnątrz zwojnicy tj. powietrza; $\mathbf{M}_0 = 4\mathbf{P}10^{-7} \text{ VsA}^{-1}\text{m}^{-1}$ - przenikalność magnetyczna próżni, I - natężenie prądu w zwojnicy, N=2215 - całkowita liczba zwojów zwojnicy, r=0,04m - promień wewnętrzny zwojnicy, h=0,009m - grubość warstwy zwojów, d=0,3m - długość zwojnicy.

Wartość e/m wyznaczona z pojedynczego pomiaru na podstawie (6) obarczona jest jednak znacznym błędem. Poprawę dokładności można uzyskać dokonując serii obserwacji zogniskowania dla różnych wartości napięcia anodowego. Dzięki temu można wyznaczyć zależność $U(B^2)$, która ujęta jest wzorem

$$U = \frac{l^2}{8\pi^2 n^2} \frac{e}{m} B^2 \tag{8}$$

uzyskanym z przekształcenia równania (6). Zależność $U(B^2)$ jest funkcją liniową typu y=ax i jej wykresem jest linia prosta o współczynniku kierunkowym

$$a = \frac{l^2}{8\pi^2 n^2} \frac{e}{m} \,. \tag{9}$$

Wyznaczenie parametru a (z przebiegu eksperymentalnie otrzymanej zależności $U(B^2)$) umożliwia ostatecznie obliczenie ładunku właściwego elektronu ze wzoru

$$\frac{e}{m} = a \frac{8\pi^2 n^2}{l^2} \,. \tag{10}$$

Przygotowanie pomiaru

- 1. Połączyć zasilacz anodowy z woltomierzem (według rys. 1). Na woltomierzu wybrać zakres pomiarowy większy niż 400 V.
- 2. Zasilacz zwojnicy i zwojnicę połączyć z amperomierzem (szeregowo) **poprzez gniazdo oznaczone napisem 20 A , DC**. Włączyć amperomierz.
- 3. Włączyć zasilacz lampy czerwonym przyciskiem A. Odczekać 3 minuty na rozgrzanie katody lampy.
- 4. Pokrętło 4 napięcia anodowego w pozycji minimum skręcić do oporu w lewo. Włączyć napięcie anodowe żółtym przyciskiem B.
- 5. Pokrętłami jasności 1 i ostrości 2 ustawić jasny i ostry punktowy obraz plamki na ekranie lampy.
- 6. Pokrętło zasilacza zwojnicy skręcić do oporu w lewo. Włączyć zasilacz zwojnicy przyciskiem czerwonym.
- 7. Włączyć napięcie odchylania na zasilaczu lampy zielonym przyciskiem C. Plamka na ekranie przybierze postać odcinka. Obracając pokrętło 3 należy nadać mu długość ok. 3cm.

Pomiar właściwy

- 1. Ustawić napięcie anodowe pokrętłem 4 na wartość 350 V.
- 2. Obracając powoli pokrętłem zasilacza zwojnicy doprowadzić do zogniskowania wiązki tj. do przekształcenia się obrazu na ekranie lampy z odcinka w punkt.
- 3. Odczytać wartość natężenia prądu I.
- Zanotować w tabeli wartości napięcia anodowego U (z dokładnością do 1V) i natężenia prądu zwojnicy I z dokładnością do 0,01 A.

nr pomiaru	U	I	В	B^2
i	[V]	[A]	[T]	$[T^2]$

5. Zmniejszyć do zera wartość prądu zwojnicy.

- 6. Pomiary z punktów 1 4 powtórzyć dla co najmniej 20 różnych wartości napięcia anodowego obejmując zakres od 350 V do 700 V.
 - **Uwaga.** W przypadku zaniku napięcia anodowego (zablokowania się zasilacza) należy skręcić pokrętło 4 w lewo i na kilka sekund wyłączyć zasilanie lampy przyciskiem A.
- 7. Zwrócić uwagę na możliwość wielokrotnego zogniskowania wiązki przy tym samym napięciu anodowym po zwiększeniu natężenia prądu zwojnicy.

Zakończenie ćwiczenia

- 1. Skręcić potencjometry napięcia anodowego i natężenia prądu zwojnicy w położenia minimum to jest w lewo do oporu.
- 2. Wyłączyć napięcie anodowe, odchylania i zasilanie lampy (przyciskami C, B, A)
- 3. Wyłączyć zasilacz zwojnicy.
- 4. Wyłączyć zasilanie woltomierza, i amperomierza.
- 5. Rozłączyć połączenia kablowe.

Opracowanie sprawozdania

- 1. Wykreslić zależność $U(B^2)$.
- 2. Obliczyć współczynnik nachylenia a prostej o postaci y = ax i jego błąd Δa metodą najmniejszych kwadratów.
- 3. Obliczyć wartości e/m według wzoru (10). Przyjąć krotność n=1 oraz długość drogi elektronów w użytej w ćwiczeniu lampie oscyloskopowej $l=0.072\pm0.004$ m.
- 4. Obliczyć błąd bezwzględny wyznaczonej wartości e/m według wzoru

$$\Delta(e/m) = \left(\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta a}{a}\right) (e/m). \tag{12}$$

5. Przedyskutować przebieg pomiarów i ich wynik. Przedstawić porównanie uzyskanej wartości *e/m* z danymi tablicowymi. Wskazać źródła niedokładności.

Literatura

- [1] R. Resnick, D. Halliday, Fizyka, t. II, PWN, Warszawa, 1998.
- [2] I. W. Sawieliew, Wykłady z fizyki, t. 2, PWN, Warszawa, 2002
- [3] T. Dryński, Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, PWN, Warszawa, 1978.
- [4] J. Karniewicz, T. Sokołowski, Podstawy fizyki laboratoryjnej, skrypt PŁ, Łódź, 1996.