Ćwiczenie 48

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA

48.1. Wiadomości ogólne

W ośrodku jednorodnym i izotropowym światło rozchodzi się po liniach prostych. Promienie świetlne mogą przecinać się ze sobą i dalej rozchodzić się niezależnie od siebie. Ich bieg jest odwracalny. Jeżeli na swojej drodze natrafią na inny ośrodek (inna gęstość optyczna), to na powierzchni granicznej część wiązki świetlnej zostanie odbita, a część przejdzie do drugiego ośrodka, ulegając załamaniu. W zależności od grubości warstwy tego ośrodka wiązka ulegnie w nim częściowemu lub całkowitemu pochłonięciu.

Zjawisko odbicia i załamania światła opisują następujące prawa (rys. 48.1):

— promień padający, odbity i załamany oraz normalna do powierzchni granicznej ośrodków, leżą w jednej płaszczyźnie;

— kąt padania równy jest kątowi odbicia:

$$\sphericalangle \alpha = \sphericalangle \alpha' , \qquad (48.1)$$

— dla danych dwóch ośrodków stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest wielkością stałą i równą stosunkowi prędkości światła w odpowiednich ośrodkach:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} . \qquad (48.2)$$

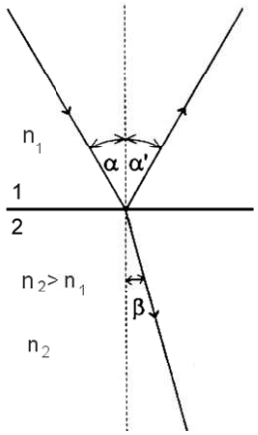
Wielkość n_{21} nazywamy względnym współczynnikiem załamania światła ośrodka drugiego względem pierwszego. Współczynniki załamania względem próżni (v = c) nazywamy współczynnikami bezwzględnymi. Są to liczby niemianowane

$$n_1 = \frac{c}{v_1} \quad \text{i} \quad n_2 = \frac{c}{v_2} . \qquad (48.3)$$

Z (48.2) i (48.3) wynika:

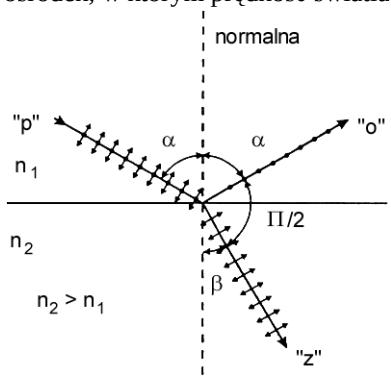
$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} , \qquad (48.4)$$

$$\frac{n_2}{n_1} = n_{21} . \qquad (48.5)$$



Rys. 48.1

Współczynniki załamania są odwrotnie proporcjonalne do prędkości rozchodzenia się światła w ośrodkach. Ośrodek, w którym światło rozchodzi się z większą prędkością, nazywamy optycznie rzadszym, zaś ośrodek, w którym prędkość światła jest mniejsza – optycznie gęstszym.



Rys. 48.2

Światło przechodzące z ośrodka optycznie rzadszego do ośrodka optycznie gęstszego zmniejsza swoją prędkość i załamuje się do normalnej. Przy odwrotnym przejściu światła, kąt załamania będzie większy od kąta padania.

Z odbiciem i załamaniem światła może wiązać się zjawisko polaryzacji. Polega ono na całkowitym lub częściowym uporządkowaniu drgań wektora natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ fali świetlnej w jednej płaszczyźnie, zwanej płaszczyzną polaryzacji.

Przy padaniu światła na granicę dwóch ośrodków następuje polaryzacja zarówno promienia odbitego, jak i załamanego. Polaryzatorem jest powierzchnia odbijająca światło. Dla dowolnego kąta

padania polaryzacja ta jest częściowa, stopień polaryzacji zmienia się ze zmianą kąta padania światła. Całkowita liniowa polaryzacja światła odbitego zachodzi dla takiego kąta padania α_B, dla którego promień odbity jest prostopadły do promienia załamanego. Promień załamany jest spolaryzowany częściowo (rys. 48.2). Kąt α_B nosi nazwę kąta całkowitej polaryzacji albo kąta Brewstera. Drgania wektora $\vec{E}$ w świetle odbitym zachodzą prostopadle do płaszczyzny, w której leży promień padający i odbity, a w świetle załamanym odbywają się w płaszczyźnie równoległej do płaszczyzny, w której leżą te promienie.

Zgodnie z prawem załamania

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_{21},$$

oraz warunkiem

$$\alpha_B + \beta = 90° \rightarrow \beta = 90° - \alpha_B, \qquad (48.6)$$

otrzymujemy związek:

$$\frac{\sin\alpha_B}{\sin\beta} = \frac{\sin\alpha_B}{\sin(90° - \alpha_B)} = \mathrm{tg}\,\alpha_B = n_{21}. \qquad (48.7)$$

Polaryzację światła wykrywamy i badamy za pomocą analizatorów – może to być np. pryzmat Nikola (nikol). (Budowa i zasada działania nikola – ćwiczenie 31). Jeżeli płaszczyzna polaryzacji nikola będzie równoległa do płaszczyzny polaryzacji światła odbitego od płytki, światło przechodzące przez analizator będzie posiadało maksymalne natężenie. Przy płaszczyznach prostopadłych obserwujemy całkowite wygaszanie światła. W wypadkach pośrednich, gdy płaszczyzny polaryzacji światła przez płytkę i przez nikol tworzą ze sobą pewien kąt γ, obowiązuje prawo Malusa:

$$I = I_0 \cos^2\gamma, \qquad (48.8)$$

gdzie: I – natężenie światła wychodzącego z analizatora, gdy jest on skręcony o kąt γ względem polaryzatora,
I_0 – natężenie światła wychodzącego z analizatora dla kąta $\gamma = 0$.

48.2. Zadania

48.2.1. Wyznaczyć współczynnik załamania światła metodą de Chaulnesa:
48.2.1.1. Zmierzyć grubość płytki d – pomiar wykonać w pięciu różnych punktach płytki.
48.2.1.2. Zmierzyć pozorne podniesienie obrazu h – pomiar wykonać 5 razy.
48.2.1.3. Analogiczne pomiary wykonać dla pozostałych płytek.
48.2.1.4. Obliczyć współczynniki załamania światła w poszczególnych płytkach.
48.2.1.5. Ocenić niepewności pomiarów, z jakimi wyznaczono współczynniki załamania światła.
48.2.2. Wyznaczyć współczynnik załamania światła, stosując prawo Brewstera:
48.2.2.1. Znaleźć i zmierzyć kąt Brewstera dla badanej płytki. Pomiary wykonać po 5 razy z jednej i drugiej strony układu.
48.2.2.2. Obliczyć średni współczynnik załamania $n_{śr}$.
48.2.2.3. Obliczyć niepewność z jaką wyznaczono średni współczynnik załamania.

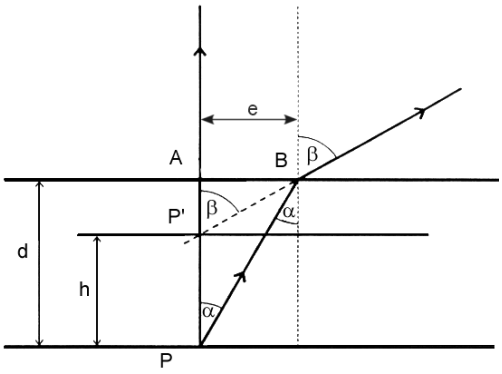
48.3. Zasada i przebieg pomiaru

Istnieje szereg metod służących do wyznaczania współczynnika załamania światła. Podczas ćwiczenia zapoznajemy się praktycznie z dwiema:

a) metodą de Chaulnesa,
b) metodą opartą na prawie Brewstera.

48.3.1. Metoda de Chaulnesa

Załamanie światła w ośrodkach optycznie gęstszych sprawia wrażenie, że przedmioty umieszczone w tych ośrodkach i obserwowane z ośrodka rzadszego wydają się nam bliższe niż w rzeczywistości. Wykorzystanie tej obserwacji pozwala w prosty sposób zmierzyć współczynniki załamania przeźroczystych płytek (rys. 48.3).



Rys. 48.3

Obserwując punkt P poprzez płytkę płaskorównoległą, widzimy go w położeniu P', czyli otrzymujemy pozorne podniesienie obrazu na wysokość h.

Rozpatrzmy trójkąty ABP i ABP, w których:

$$AB = e\,,$$

$$AP = d\,,$$

$$AP' = d - h\,,$$

$$\mathrm{tg}\,\alpha = \frac{e}{d} \approx \sin\alpha\,,$$

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{e}{d-h} \approx \sin\beta\,,$$

$$n = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha} = \frac{d}{d-h}\,. \qquad (48.9)$$

Z otrzymanych zależności wyliczamy n, wyznaczając doświadczalnie d oraz h.

— Pomiar grubości płytki d wykonujemy za pomocą śruby mikrometrycznej. Grubość mierzymy 5 razy w różnych miejscach, aby w obliczeniach uwzględnić błąd wynikający z ewentualnej niejednakowej jej grubości. Obliczamy średnią wartość $d_{śr}$.

— Wielkość h mierzymy, posługując się mikroskopem. Śruba przesuwająca tubus mikroskopu jest śrubą mikrometryczną. Pełny obrót śruby powoduje przesunięcie z = 0,5 mm. Jest to tzw. skok śruby. Ten pełny obrót podzielony jest jeszcze na 50 części tak, że dokładność odczytu wynosi 0,01 mm. Na stoliku umieszczamy zarysowaną płytkę i ustawiamy mikroskop tak, aby brzegi rysy były ostro widoczne. Następnie przykrywamy rysę badaną płytką o nieznanym współczynniku załamania i ponownie szukamy ostrego obrazu rysy, przesuwając tubus mikroskopu za pomocą śruby. Liczymy pełną ilość obrotów śruby k, a ze skali odczytujemy setne części milimetra r. Podniesienie obrazu w płytce wyniesie:

$$h = k\,z + r\ [\mathrm{mm}]. \qquad (48.10)$$

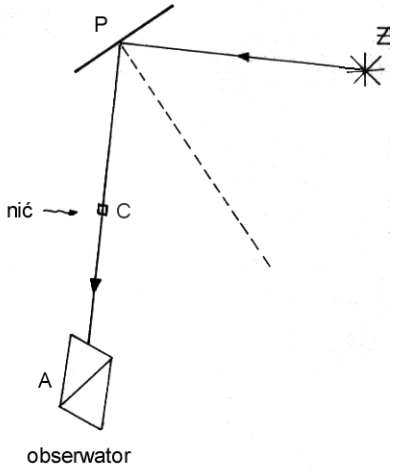
Dla badanej płytki pomiar h wykonujemy pięciokrotnie i obliczamy średnią wartość $h_{śr}$. Do wzoru (48.9) podstawiamy $d_{śr}$ i $h_{śr}$.

48.3.2. Metoda oparta na prawie Brewstera

Korzystamy bezpośrednio ze wzoru Brewstera (48.7)

$$\operatorname{tg} \alpha_B = n.$$

Doświadczalnie wyznaczamy kąt α_B, posługując się przy tym prostym układem optycznym (rys. 48.4). Na ławie optycznej umieszczona jest, w ruchomej podstawce, badana płytka P będąca polaryzatorem światła oraz nikol A, spełniający w tym układzie rolę analizatora. Monochromatyczne źródło światła Z znajduje się na ruchomym ramieniu obracającym się wokół polaryzatora. W celu znalezienia kąta całkowitej polaryzacji ustawiamy źródło tak, aby promień padał na płytkę w środku skali kątowej. Spełnione to będzie wówczas, jeżeli na tle plamki świetlnej będziemy widzieć pionową nić celownika C umieszczonego między P i A. Obracamy analizator wokół kierunku biegu promienia odbitego. Zmiany natężenia wiązki światła świadczą o pewnym uporządkowaniu drgań wektora $\vec{E}$. Jeżeli przy obrocie nikola natrafimy na takie jego położenie, przy którym natężenie promienia odbitego będzie równe zeru, wówczas znaleziony kąt padania jest kątem całkowitej polaryzacji α_B. Odnajdujemy ten kąt metodą kolejnych prób dla różnych kątów padania światła na płytkę P.



Rys. 48.4

Należy pamiętać, że przy zmianie położenia źródła światła należy odpowiednio zmieniać położenie płytki P. Kąt Brewstera mierzymy pięciokrotnie z jednej i drugiej strony ławy optycznej. Odczytu wartości kąta całkowitej polaryzacji α_B dokonujemy na tarczy obracającej się razem z płytką P.

Wartość współczynnika załamania obliczamy dla wartości średniej kąta Brewstera

$$n = \operatorname{tg} \alpha_{śr}, \tag{48.11}$$

gdzie

$$\alpha_{śr} = \frac{\alpha_{1lpśr} + \alpha_{2lpśr} + ... + \alpha_{5lpśr}}{5} \tag{48.12}$$

oraz

$$\alpha_{lpśr} = \frac{\alpha_l + \alpha_p}{2}, \tag{48.13}$$

α_l, α_p – kąty całkowitej polaryzacji odpowiednio z lewej i prawej strony ławy optycznej.

48.4. Ocena niepewności pomiarów

Niepewność pomiarów współczynnika załamania metodą de Chaulnesa wyznaczamy jako niepewność standardową wielkości złożonej (Wstęp, wzór (28)):

$$u_c(n) = \sqrt{\left[\frac{h_{śr}}{(d_{śr} - h_{śr})^2}\right]^2 u^2(d) + \left[\frac{d_{śr}}{(d_{śr} - h_{śr})^2}\right]^2 u^2(h)}, \tag{48.14}$$

gdzie: $u(d) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (d_{śr} - d_1)^2}{n(n-1)}}$ i $u(h) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (h_{śr} - h_1)^2}{n(n-1)}}$ – niepewności standardowe grubości płytki d i przesunięcia pozornego obrazu h, n – liczba pomiarów.

Niepewność pomiaru współczynnika załamania światła metodą opartą na prawie Brewstera, obliczamy metodą różniczki zupełnej (wzór 28 – Wstęp), zastosowaną do wzoru 48.11:

$$u(n) = \frac{1}{\cos^2 \alpha_{śr}} u(\alpha), \tag{48.15}$$

gdzie: $u(\alpha) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\alpha_{śr} - \alpha_i)^2}{n(n-1)}}$ – niepewność standardowa w wyznaczeniu kąta polaryzacji, którą należy wyrazić w radianach przed podstawieniem do wzoru (48.15),

n – liczba pomiarów.

Literatura

[1] Halliday D., Resnick R.: Fizyka, t. II. Warszawa: PWN 1983.

[2] Szczeniowski S.: Fizyka doświadczalna, cz. IV. Warszawa: PWN 1983.