

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA CIAŁ STAŁYCH I CIECZY

60

Zjawisko załamania światła jest znane od dawna. Aby je opisać ilościowo, wprowadza się wielkość zwaną współczynnikiem załamania i oznacza literą n . Współczynnik załamania charakteryzuje właściwości optyczne określonego materiału i jest zdefiniowany poprzez prędkość fali świetlnej:

$$n = \frac{c}{v_f} \quad (1)$$

gdzie c jest prędkością fali świetlnej w próżni, a v_f prędkością fazową¹ tej fali w badanym materiale. Dla próżni $v_f = c$, czyli $n = 1$. Ponieważ prędkość fazowa fali w ośrodkach materialnych jest mniejsza niż w próżni, wartości n są większe od jednośc. Wartości bezwzględnego współczynnika załamania różnych materiałów wahają się w granicach od jednośc do kilku. Ośrodki o większych wartościach n nazywamy „optycznie gęstszymi”, inne „optycznie rzadszymi”. Wartości te zależą silnie od częstośc ν fali świetlnej (zjawisko dyspersji czyli rozszczepienia światła), szczególnie w pobliżu pasma pochłaniania światła przez dany ośrodek. Dla opisanja zjawisk na przechodzenia światła przez granicę dwu ośrodków materialnych wprowadza się pojęcie względnego współczynnika załamania $n_{2,1}$, który jest równy stosunkowi bezwzględnych współczynnika załamania obu ośrodków:

$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

Spróbujmy krótko wyjaśnić przyczyny powodujące załamanie promieni świetlnych.

Fala świetlna jest falą elektromagnetyczną, czyli zaburzeniem pola elektrycznego \mathbf{E} i pola magnetycznego \mathbf{H} , rozchodzącym się w przestrzeni. Fala ta przenosi energię. Obecność w ośrodku pola o natężeniu \mathbf{E} , wpływa na elektrony walencyjne jego atomów powodując ich drgania względem rdzeni atomowych, w takt zmian natężenia pola elektrycznego fali. Mówimy, że ośrodek optyczny ulega polaryzacji elektrycznej pod wpływem szybkozmiennego pola elektrycznego. Wpływ pola elektrycznego na różne ośrodki (materiały) jest różny i zależy od struktury materiału, temperatury i przede wszystkim od częstośc ν zmian natężenia pola elektrycznego. Zmiany zachodzące w materiale pod wpływem pola elektrycznego charakteryzuje parametr zwany przenikalnością elektryczną ϵ danej substancji. Im większa jest wartość ϵ , tym mniejsze jest natężenie pola elektrycznego wewnątrz próbki.

Z równań Maxwella, które stanowią syntezę i uogólnienie szczegółowych praw elektromagnetyzmu wynika, że współczynnik załamania n dla substancji przezroczystych i niemagnetycznych jest związany z przenikalnością elektryczną danej substancji wzorem:

$$n = \sqrt{\epsilon_\infty} \quad (3)$$

gdzie ϵ_∞ jest wartością przenikalności elektrycznej ϵ substancji, zmierzoną przy wysokiej częstości pola elektrycznego ν , równej częstości fal świetlnych ($\nu \cong 10^{15}$ Hz)². Wzór ten wskazuje na silny związek właściwośc optycznych i elektrycznych różnych materiałów, które wynikają z mechanizmu oddziaływania fali elektromagnetycznej z ośrodkiem. Ponieważ jak wspomniano współczynnik załamania n zależy od częstośc, a więc i od długośc fali świetlnej, przy podawaniu jego wartości należy jednocześnie określić długość fali świetlnej, przy której została zmierzona. W tablicach wielkośc fizycznych najczęściej podaje się wartości n różnych materiałów dla żółtej linii sodu ($\lambda = 589$ nm).

¹ Prędkością fazową fali nazywamy prędkość, z jaką rozchodzi się w przestrzeni określona faza fali, np. grzbiet lub dolina fali.

² Wartość przenikalności elektrycznej substancji zależy od częstośc ν zmian pola elektrycznego. Zmiany wartości współczynnika załamania są zmianami wtórnymi.

Przy pomiarze współczynnika załamania korzystamy z prawa załamania, sformułowanego przez Snelliusa. Mówi ono, że jeśli wiązka światła pada na granicę dwóch ośrodków przezroczystych o różnych współczynnikach załamania n_1 i n_2 , wówczas częściowo zostaje odbita a częściowo przechodzi do drugiego ośrodka ulegając załamaniu. Zgodnie z prawem Snelliusa (patrz Rys. 1.), promień padający (1), odbity (2) i załamany (3) oraz prosta prostopadła do granicy rozdziału ośrodków (linia przerywana), leżą w jednej płaszczyźnie, a stosunek sinusa kąta padania α do sinusa kąta załamania β jest stały dla danej pary ośrodków, czyli:

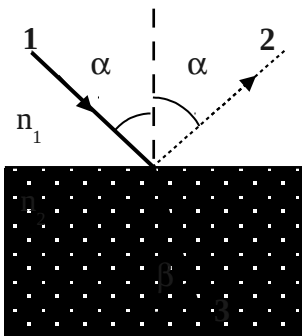
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1} \quad (4)$$

Jeżeli ośrodkiem pierwszym jest próżnia, czyli gdy $n_1=1$, przez pomiar kątów α i β możemy wyznaczyć wartość n_2 , czyli bezwzględny współczynnik załamania ośrodka drugiego. Dokładność takich pomiarów nie jest zbyt wysoka.

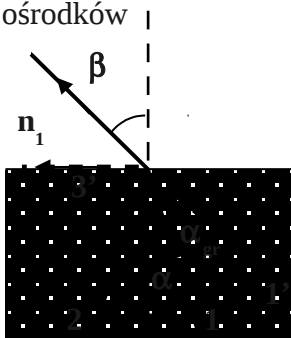
OPIS EKSPERYMENTU

A. Wyznaczanie współczynnika załamania światła cieczy metodą refraktometru Abbego

Do dokładniejszego pomiaru współczynnika załamania można zastosować refraktometr Abbego („refrakcio” to po łacinie przełamanie, załamanie). W przyrządzie tym wykorzystuje się zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia, mające obecnie szerokie zastosowanie w światłowodach i w wielu przyrządach optycznych. Można je opisać następująco:



Rys. 1. Bieg promieni na granicy dwu ośrodków



Rys. 2. Bieg promieni przy zjawisku całkowitego wewnętrznego odbicia

Jeśli promień (1) pada na granicę dwu ośrodków od strony ośrodka o większym współczynniku załamania, to bieg promieni jest identyczny jak na Rys. 1, ale musimy zamienić oznaczenia kątów padania α i załamania β . Istotna różnica przy odwróconym kierunku biegu promieni wynika z faktu, że jeśli kąt padania α zwiększy się do wartości α_{gr} (patrz Rys. 2.), to promień załamany, oznaczony jako 3' będzie ślizgał się po granicy ośrodków, a dla kątów α jeszcze większych, ulegnie całkowitemu wewnętrznemu odbiciu i nie przejdzie do drugiego ośrodka. Kąt α_{gr} nazywamy kątem granicznym. Odpowiadająca mu wartość kąta β wynosi 90° . Wtedy na podstawie wzoru (4) możemy napisać:

a gdy światło przechodzi z ośrodka o współczynniku załamania równym n , do próżni, to mamy:

$$\frac{\sin \alpha_{gr}}{\sin 90^\circ} = \sin \alpha_{gr} = n_{2,1} \quad (5)$$

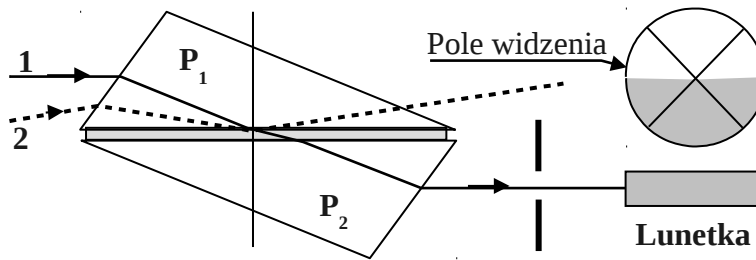
Wtedy na podstawie wzoru (4) możemy napisać:

$$\frac{1}{\sin \alpha_{gr}} = n \quad (6)$$

W praktyce, przy pomiarze n refraktometrem Abbego wykorzystuje się wzór (5).

Zasadę działania refraktometru przedstawiono na Rys. 4. Szczegóły budowy przyrządu opisuje Szydłowski [1]. Zasadniczą częścią refraktometru Abbego są dwa trójkątne pryzmaty P_1 i P_2

wykonane ze szkła o dużym i znanym współczynniku załamania. Badana ciecz wypełnia płasko-równoległą szczelinę o grubości ok. 0,1 mm pomiędzy pryzmatami. Promienie w pryzmacie P_1 padające pod różnymi kątami na granicę szkło – ciecz ulegają załamaniu i odbiciu. Jeśli kąt padania jest mniejszy od granicznego (promień 1), to promień załamany przechodzi do pryzmatu P_2 , i oświetla pole widzenia lunetki refraktometru. Promień 2, padający na ciecz pod kątem większym od granicznego, ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu w pryzmacie P_1 , a więc nie trafia do lunetki.



Rys.4. Zasada działania refraktometru Abbego.

Oba pryzmaty można obracać dookoła osi prostopadłej do płaszczyzny rysunku, dzięki czemu można zmieniać kąt padania. Obserwujemy wtedy pojawienie się lub znikanie światła w polu widzenia lunetki. Przy prawidłowym ustawieniu pryzmatów jedna połowa pola widzenia jest jasna a druga ciemna (patrz Rys. 4). Wartość współczynnika załamania odczytujemy bezpośrednio na skali w drugiej pomocniczej lunetce, sprzężonej z kątem obrotu pryzmatów. Skala refraktometru Abbego podaje wartości n dla fali o długości 589 nm. Ponieważ do oświetlania pryzmatów stosuje się światło żarówki, które nie jest monochromatyczne, a jak wiadomo współczynnik załamania zależy od długości fali, to przyrząd ma wbudowany specjalny kompensator opisany w [1], który pozwala zniwelować nieostrą granicę która powstaje między jasnym i ciemnym polem widzenia wskutek stosowania źródła światła białego.

B. Wyznaczenie współczynnika załamania światła ciał stałych przy użyciu mikroskopu

Załamanie światła w ośrodku o większym współczynniku załamania niż próżnia czy powietrze powoduje, że przedmiot umieszczony w tym ośrodku (np. w wodzie), obserwowany z ośrodka optycznie rzadszego (powietrza) wydaje się mniejszy niż jest w rzeczywistości. Na podobnej zasadzie można wyznaczyć współczynnik załamania ciał przezroczystych. Pomiar sprowadza się do znalezienia położenia obrazów kresek, zaznaczonych na dolnej i górnej powierzchni płytki płasko-równoległej, obserwowanej pod mikroskopem. Bieg promieni pokazany na Rys. 4 odpowiada sytuacji eksperymentu, w którym płytki przezroczyste są umieszczane na obiektywie mikroskopu. Rozważamy dwa promienie (1) i (2), wychodzące z oświetlacza i przechodzące przez płytkę o grubości geometrycznej d . Obserwujemy obraz punktu O na górnej powierzchni płytki. Promień (1) prostopadły do powierzchni granicznej przechodzi przez płytkę bez załamania, natomiast promień (2) dwukrotnie się załamuje w punktach O i B . Przedłużenia obu promieni wychodzących z płytki przecinają się w punkcie O_1 tworząc pozorny obraz punktu O w odległości h od dolnej powierzchni płytki.

Odległość $O_1A = h$ stanowi pozorną grubość płytki, podczas gdy odległość $OA = d$ jest jej grubością

rzeczywistą. Ponieważ z prawa Snelliusa mamy $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{2,1}$, to dla małych kątów

α i β stosunek sinusów możemy z dobrym przybliżeniem zastąpić stosunkiem tangensów czyli $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \approx \frac{\text{tg} \alpha}{\text{tg} \beta} \approx n_{2,1}$. Po

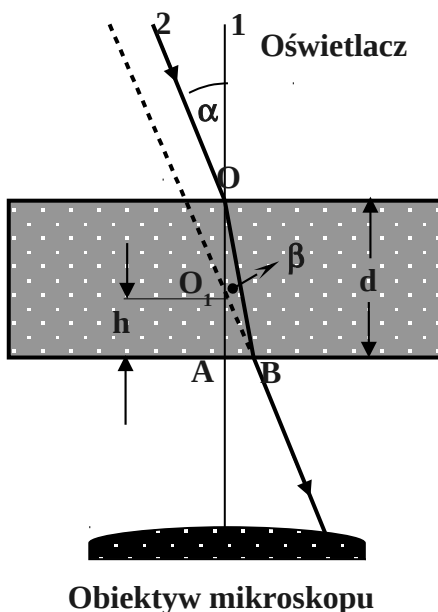
przeanalizowaniu trójkątów ABO i ABO_1 (Rys. 4) możemy napisać:

$$\frac{\text{tg} \alpha}{\text{tg} \beta} = \frac{\frac{AB}{h}}{\frac{AB}{d}}$$

a stąd: $n_{2,1} = \frac{d}{h}$

(7)

Wielkości d i h możemy wyznaczyć eksperymentalnie. Grubość płytki d mierzymy bezpośrednio przy pomocy



Rys. 4 Wyznaczenie optycznej grubości płytki

precyzyjnej suwmiarki z mikrometrem zegarowym. Grubość „optyczną” h mierzymy posługując się mikroskopem. Dokładność tej metody nie jest wysoka, a otrzymane wartości są wartościami średnimi dla światła białego.