

Ćw. 20. Pomiary współczynnika załamania światła z pomiarów kąta załamania oraz kąta granicznego

Wprowadzenie

Światło widzialne jest promieniowaniem elektromagnetycznym o długości fali w przybliżeniu w zakresie od 380 nm do 780 nm i rozchodzi się w próżni z tą samą prędkością $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Zjawiska fizyczne związane z promieniowaniem świetlnym można wyjaśnić na gruncie falowej i korpuskularnej (kwantowej) teorii światła. W kwantowej teorii światło jest traktowane jako strumień fotonów. Każdy foton niesie porcję (kwant) energii o wartości

$$E = h \cdot \nu \quad (1)$$

gdzie ν jest częstotliwością światła, natomiast h jest stałą Plancka. Przykładami zjawisk potwierdzających kwantową naturę światła są efekt Comptona, czy też zjawisko fotoelektryczne. Z kolei zjawiskiem potwierdzającym falową naturę światła jest zjawisko odbicia i załamania światła na granicy dwóch ośrodków. W celu opisu tych zjawisk przypomnimy najważniejsze zagadnienia dotyczące fal.

Ogólnie, falą nazywany zaburzenie mechaniczne lub elektromagnetyczne rozchodzące się w czasie i przestrzeni z określoną prędkością, charakterystyczną dla danego rodzaju fali i ośrodka, w którym fale te się rozchodzą. Dla przykładu rozpatrzmy falę rozprzestrzeniającą się w jednowymiarowym ośrodku materialnym. Pewne pojęcia i zjawiska zdefiniowane na tym przykładzie, można z powodzeniem stosować dla ośrodków trójwymiarowych jak również dla fal elektromagnetycznych. Jeżeli wybraną cząstkę jednowymiarowego ciągłego ośrodka materialnego pobudzimy w dowolny sposób do drgań harmonicznnych, to jej drgania można opisać równaniem:

$$y = A \sin(\omega t)$$

gdzie y jest wielkością wychylenia cząstki z położenia równowagi, A - amplitudą drgań (największym wychyleniem), ω - częstością kołową, t - czasem, natomiast ωt - fazą drgań. Drgania te, z pewnym opóźnieniem w fazie będą się przenosić na cząstki sąsiednie. Wielkość opóźnienia będzie wynosić $t' = x/v$ gdzie x to odległości tych cząstek od cząstki pierwotnej (źródła fali), a v to prędkość fali. Wychylenie z położenia równowagi dla tych cząstek przyjmuje więc następującą postać:

$$y = A \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \frac{x}{v}\right). \quad (2)$$

Prędkość v to prędkość rozchodzenia się zaburzeń, albo inaczej prędkość, z jaką musiałby się poruszać obserwator, aby widzieć zawsze tą samą fazę drgań ośrodka. Nazywamy ją prędkością fazową fali. Związek prędkości fali v z jej długością λ opisuje zależność

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (3)$$

co oznacza, że fala przemieszcza się o odległość λ w czasie T będącym okresem drgań punktu ośrodka, w którym rozchodzi się fala. Przypomnijmy okres jest odwrotnością częstotliwości, czyli $T = 1/\nu$. Jeśli zdefiniujemy liczbę falową

$$k = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}, \quad (4)$$

to równanie (2) przyjmie postać

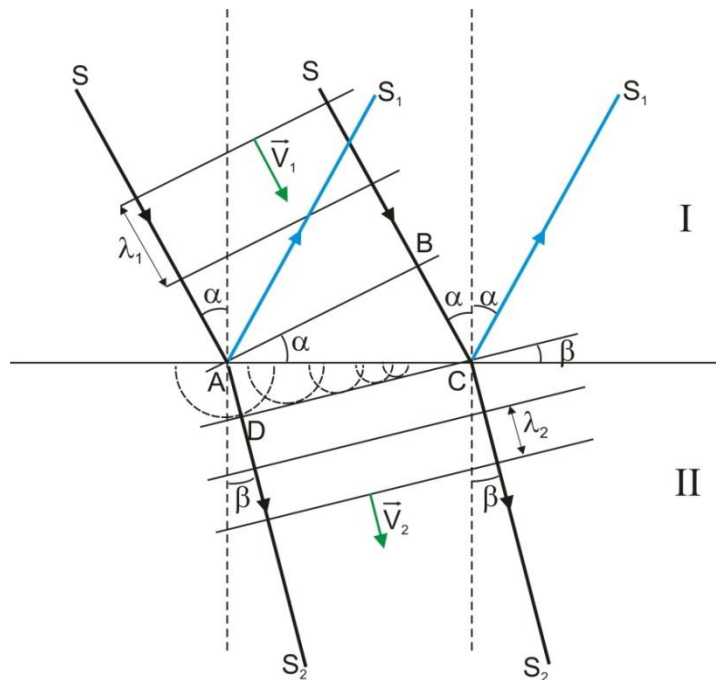
$$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x) \quad \text{lub}$$

$$y = A \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x + \phi_0) \quad (5)$$

gdzie ϕ_0 jest fazą początkową. Jest to równanie fali dla przypadku jednowymiarowego. Dla ośrodków dwu- i trójwymiarowych, równanie fali staje się bardziej skomplikowane, lecz definicje podstawowych pojęć pozostają takie same, jak dla przypadku ośrodka jednowymiarowego.

Jeżeli drgania cząstek ośrodka są zgodne z kierunkiem rozchodzenia się fali to falę taką nazywamy podłużną; jeżeli zaś kierunki te są wzajemnie prostopadłe, to fala taka nosi nazwę poprzecznej. W przypadku, gdy źródłem fali będzie pulsująca kula umieszczona w ośrodku gazowym lub ciekłym, to wytworzone periodyczne zmiany gęstości tego ośrodka, będą się rozchodziły we wszystkich kierunkach w postaci fali kulistej. Nazwa ta pochodzi stąd, że miejsca geometryczne cząstek posiadających tę samą fazę drgań są powierzchniami kul koncentrycznych, w środku których znajduje się źródło drgań. Można również wytworzyć takie fale, których powierzchnie falowe redukują się do okręgów (fale wywołane przez punktowe źródło na powierzchni wody) są to tzw. fale koliste. Istnieją także fale płaskie, których powierzchnie falowe są płaszczyznami. Poszczególne parametry opisujące falę świetlną odpowiadają: częstotliwość ν – za barwę światła natomiast amplituda A – za jego jasność.

Niektóre zjawiska związane z ruchem falowym można wyjaśnić w oparciu o zasadę Huygensa, chociaż należy tu podkreślić, że zasada ta ma sens bardziej matematyczny aniżeli fizyczny. Zgodnie z tą zasadą każdy punkt ośrodka, do którego dociera fala (czoło fali), można traktować jako źródło fali kulistej, tzw. elementarnej fali cząstkowej. Powierzchnię falową fali biegnącej konstruujemy jako obwiednię poszczególnych fal elementarnych, zaś kierunek rozchodzenia się fali jest prostopadły do tak określonej powierzchni fazowej.



Rys. 1. Przejście fali płaskiej przez granicę dwu ośrodków o różnych prędkościach rozchodzenia się fali.

Rozpatrzmy teraz przypadek, gdy fala płaska przechodzi z jednego ośrodka do drugiego, przy założeniu, że prędkości fali w obu ośrodkach są różne (rys. 1). Niech prędkość fali w ośrodku I wynosi v_1 zaś w ośrodku II – v_2 , przy czym $v_1 > v_2$. Odpowiadające im długości fal wynoszą odpowiednio λ_1 oraz λ_2 . Trzeba też wiedzieć, że Przy przejściu z jednego ośrodka do drugiego częstotliwość fali nie zmienia się. Przyjmijmy, że kierunki promieni S (prostopadłe do czoła fali AB) rozchodzenia się fali padającej tworzą kąt α , z normalnymi (linie przerywane) do powierzchni rozgraniczającej ośrodki. Na granicy ośrodków fala zostanie częściowo odbita w postaci promieni S_1 pod tym samym kątem

α , częściowo zaś przejdzie do drugiego ośrodka. Niech t będzie czasem, w którym fala w ośrodku I rozejdzie się na odległość $BC = v_1 \cdot t$. W tym czasie w ośrodku II z punktu A rozejdzie się fala cząstkowa na odległość $AD = v_2 \cdot t$ mniejszą niż BC gdyż $v_1 > v_2$. Z punktów pośrednich, leżących pomiędzy A i C, też rozejdą się fale cząstkowe, oczywiście na odległości odpowiednio mniejsze. Czoło fali rozchodzącej się w ośrodku II, stanowiące obwiednię fal elementarnych, będzie płaszczyzną. To oznacza, iż po przejściu granicy dwu ośrodków fala płaska pozostaje falą płaską.

W związku z tym, że $v_1 > v_2$ promień fali rozchodzącej się w ośrodku II, będzie tworzył z normalną do powierzchni rozgraniczającej kąt $\beta < \alpha$. **Kąty α i β nazywamy odpowiednio kątem padania i kątem załamania fali, które zawsze mierzone są między odpowiednim promieniem światła a normalną do płaszczyzny rozgraniczającej ośrodki.** Z konstrukcji geometrycznej przedstawionej na Rys. 1 wynika, że

$$\begin{aligned} AC \cdot \sin \alpha &= BC = v_1 \cdot t = \lambda_1 \\ AC \cdot \sin \beta &= AD = v_2 \cdot t = \lambda_2 \end{aligned}$$

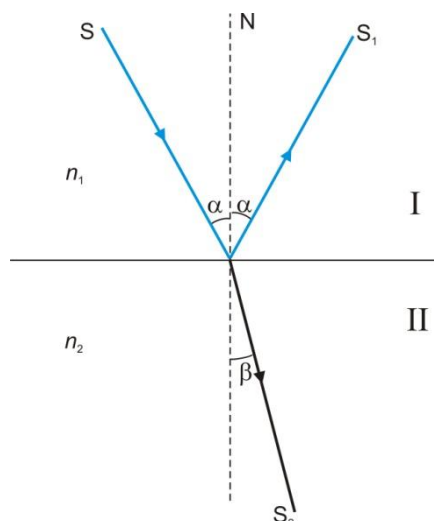
Dzieląc stronami równanie pierwsze przez drugie otrzymamy:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = n_{21}, \quad (6)$$

zatem stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania fali, dla danych dwu ośrodków, jest wielkością stałą i równą stosunkowi prędkości fali w tych ośrodkach. Wielkość tę oznaczamy przez n_{21} i nosi ona nazwę względnego współczynnika załamania ośrodka drugiego względem pierwszego. Postępując jak wyżej, można w oparciu o zasadę Huygensa wykazać, że kąt padania równy jest kątowi odbicia, oraz że promień padający, promień odbity i normalna w punkcie padania leżą w jednej płaszczyźnie. Formuła ta stanowi prawo odbicia fali.

Należy podkreślić, że podstawowe prawa nauki o świetle, w tym prawo odbicia i załamania światła, zostały doświadczalnie ustanowione na podstawie poglądów o prostoliniowości rozchodzenia się promieni świetlnych, na długo przed stworzeniem teorii ruchu falowego oraz teorii zjawisk elektromagnetycznych. W ośrodku jednorodnym, promieniem fali będzie normalna do powierzchni fazowej.

Posługując się pojęciem promienia świetlnego, jeszcze raz rozpatrzmy prawo odbicia i załamania światła (tzw. Prawo Snelliusa). Rys. 2 ilustruje zjawisko odbicia i załamania promienia świetlnego na granicy ośrodków I i II.



Rys. 2. Odbicie i załamanie promienia świetlnego na granicy dwu ośrodków.

S jest promieniem padającym, S_1 – promieniem odbitym zaś S_2 - promieniem załamanym. Prostą N prostopadłą do powierzchni rozgraniczającej, nazywamy normalną padania. Kąt α nazywamy kątem padania, który jest równy kątowi odbicia a kąt β - kątem załamania. Prawo odbicia i załamania brzmi

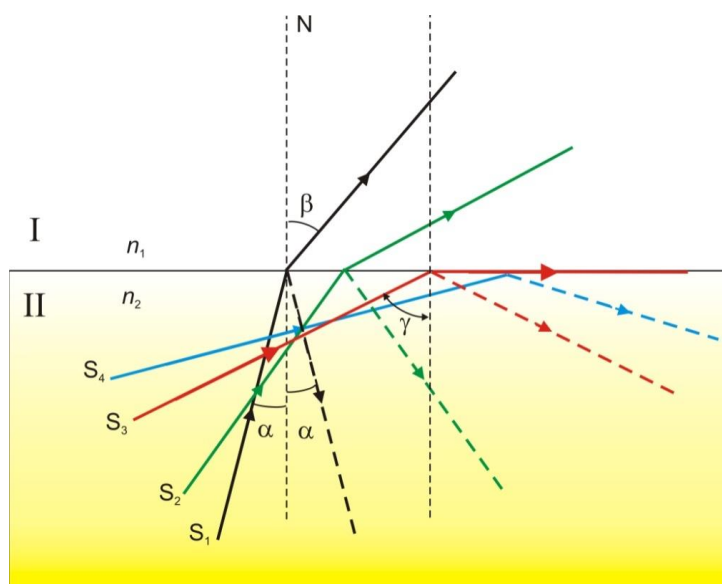
następująco: (1) Promień padający, odbity i załamany oraz normalna padania leżą w jednej płaszczyźnie. (2) Kąt odbicia jest równy kątowi padania. (3) Stosunek sinusów kąta padania i kąta załamania promienia świetlnego dla danych dwu ośrodków i określonej długości fali jest wielkością stałą i nazywamy go współczynnikiem załamania ośrodka II względem I (patrz równanie (6)). Z równania (6) wynika, że

$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}} \quad (7)$$

gdzie n_{12} jest współczynnikiem załamania ośrodka I względem II. Oznacza to, że jeżeli promień biegnie w przeciwnym kierunku tzn. z ośrodka II do ośrodka I, to po załamaniu będzie skierowany wzdłuż promienia S. Jest to tzw. zjawisko odwracalności biegu promienia. Jeśli jednym z ośrodków będzie próżnia to współczynnik załamania oznaczamy jako n . Jest to współczynnik załamania danego ośrodka mierzony względem próżni, nazywany bezwzględny współczynnikiem załamania. Praktycznie n jest wyznaczony względem powietrza, albowiem różnica prędkości światła w próżni i w powietrzu jest znikoma. Z równania (6) wynika, że dla fal świetlnych bezwzględny współczynnik załamania jest zawsze większy od jedności, ponieważ prędkość światła w próżni c jest największą ze wszystkich możliwych. Ośrodek, który posiada większy współczynnik załamania (mniejsza prędkość światła) nazywa się niekiedy optycznie gęstszym. Na Rys. 2. n_1 i n_2 oznaczają bezwzględne współczynniki załamania ośrodków I i II.

Jeżeli promień świetlny biegnie z ośrodka optycznie gęstszego do ośrodka optycznie rzadszego, to oprócz odbicia na granicy tych ośrodków ulega on załamaniu, odchylając się od normalnej padania (patrz Rys. 3). Promienie S_1 - S_3 częściowo ulegają odbiciu pod tym samym kątem co kąt padania, a częściowo załamaniu pod większym kątem. Dla promienia S_1 kąt padania wynosi α a załamania β . W miarę wzrostu kąta padania promień załamany coraz bardziej odchyła się od normalnej N. Przy pewnym kącie γ promień załamany biegnie wzdłuż powierzchni granicznej, czyli $\beta = 90^\circ$ (promień S_3 Rys. 3). Gdy promień świetlny przechodzi z ośrodka optycznie gęstszego do rzadszego przy kącie padania większym od γ (Promień S_4), to promień padający nie przejdzie do ośrodka I, lecz ulegnie całkowitemu odbiciu na granicy ośrodków. **Kąt γ nazywamy kątem granicznym, jest to kąt padania promienia przechodzący z ośrodka optycznie gęstszego do rzadszego, przy którym kąt załamania wynosi 90° (biegnie wzdłuż granicy ośrodków)** i możemy go wyrazić w następujący sposób:

$$n_{12} = \frac{1}{n_{21}} = \frac{\sin \gamma}{\sin 90^\circ} \quad (8)$$



Rys. 3. Przejście światła z ośrodka II do ośrodka I, dla których $n_2 > n_1$.z zaznaczonym kątem granicznym γ .

Metoda pomiaru

Z powyższych rozważań wynika, iż współczynnik załamania można w prosty sposób wyznaczyć na podstawie pomiarów kątowych promieni padających, odbitych i załamanych. Pierwszy sposób to pomiar kąta padania α i załamania β (patrz Rys. 2). Z zależności (6) wyliczamy łatwo współczynnik załamania

$$n_{21} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (9)$$

Drugi sposób to pomiar kąta granicznego γ (patrz Rys. 3), a następnie z zależności (8) wyliczamy współczynnik załamania

$$n_{21} = \frac{1}{\sin \gamma}. \quad (10)$$

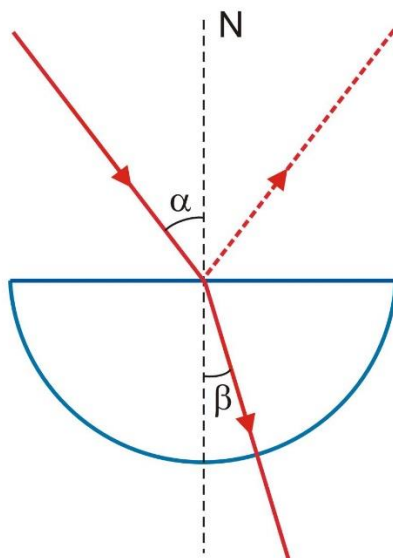
Wykonanie zadania



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe.

I. Pomiar współczynnika załamania światła z pomiarów kąta załamania

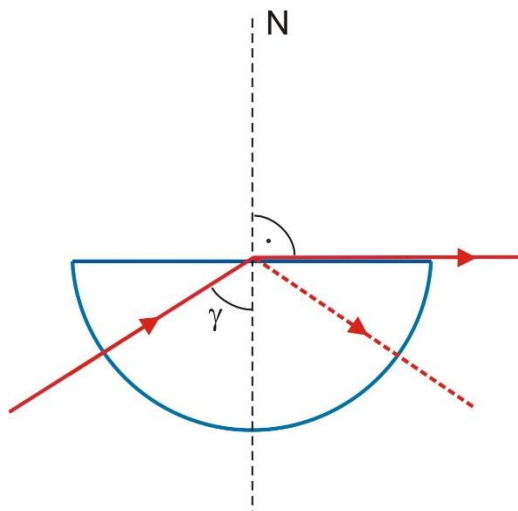
1. Otrzymaną próbkę w kształcie półwalca umieścić na tarczy z podziałką kątową (rys. 4) tak, aby płaska ściana boczna próbki pokrywała się ze średnicą tarczy. Promień światła musi padać na środek płaskiej części próbki, gdyż wtedy bez względu na kąt załamania, będzie rozchodził się wzdłuż promienia krzywizny próbki. Dzięki temu taki opromień nie ulegnie załamaniu przy wyjściu z próbki (patrz rys 5).
2. Włączyć źródło strumienia świetlnego (dioda laserowa) i skierować wąski strumień światła na punkt padania tak, aby „ślizgał” się on po powierzchni tarczy.
3. Przeprowadzić pomiary kąta padania (α) i załamania światła (β). Pomiary wykonać w zakresie od $\alpha = 20^\circ$ do $\alpha = 70^\circ$, zmieniać kąt padania co 5° .
4. Dla każdego pomiaru obliczyć współczynnik załamania próbki ze wzoru (9).
5. Otrzymane wyniki zestawić w tabeli.



Rys. 5. Sposób wyznaczania kąta padania α i załamania β .

II. Pomiar współczynnika załamania światła z pomiarów kąta granicznego

1. Otrzymaną próbkę w kształcie półwalca umieścić na tarczy z podziałką kątową (rys. 4) tak, aby płaska ściana boczna próbki pokrywała się ze średnicą tarczy.
2. Włączyć źródło strumienia świetlnego (lampka lub dioda laserowa) i skierować wąski strumień światła na punkt padania tak, aby „ślizgał” się on po powierzchni tarczy.
3. Oświetlając próbkę od strony wypukłej wyznaczyć kąt graniczny γ . Uwaga: podobnie jak w części pierwszej zadania światło należy skierować wzdłuż promienia próbki, tak by padało na płaską jej ścianę w jej środku (patrz rys. 6).
4. Pomiar kąta granicznego powtórzyć, co najmniej, 5-krotnie.
5. Dla każdego pomiaru obliczyć współczynnik załamania próbki ze wzoru (10).
6. Otrzymane wyniki zestawić w tabeli.



Rys. 6. Sposób wyznaczania kąta granicznego γ .

Dla każdej próbki wyliczyć wartość średnią współczynnika załamania otrzymanego metodą I i II, a następnie porównać wyniki obliczeń. Do oszacowania niepewności wyznaczenia współczynnika załamania dla danej próbki zastosować metodę różniczkowania wzorów (9) i (10) wiedząc, że $n_1 = f(\alpha, \beta)$ w pierwszym przypadku oraz $n_2 = f(\gamma)$ w drugim przypadku. Niepewność wyznaczenia kątów padania, załamania i kąta granicznego ($\Delta\alpha, \Delta\beta, \Delta\gamma$) wyrazić w mierze łukowej ($\pi \text{ rad} = 180^\circ$).

Tabela pomiarowa

Nr próbki	Lp.	α	β	n	γ	n
		stopnie	stopnie		Stopnie	
	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
	...					
n _{śr}					n _{śr}	

Bibliografia:

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003, t. 3.
2. Cz. Bobrowski, *Fizyka – krótki kurs*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1998.

Zagadnienia do kolokwium:

1. Natura światła
2. Charakterystyka fali świetlnej (budowa, długość fali, prędkość)
3. Zasady Huygensa i Fermata
4. Definicja współczynnika złamania
5. Prawo odbicia i załamania światła (Snelliusa)
6. Zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia i kat graniczny.

Opiekun ćwiczenia: dr Jarosław Borec