



**ĆWICZENIE
76**

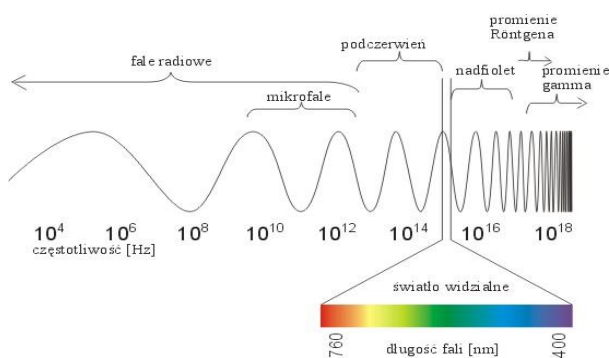
**WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA SZKŁA
ZA POMOCĄ SPEKTROMETRU**

Cel ćwiczenia: pomiar kąta łamiącego i kąta minimalnego odchylenia pryzmatu, wyznaczenie współczynnika załamania szkła w funkcji długości fali (dyspersji).

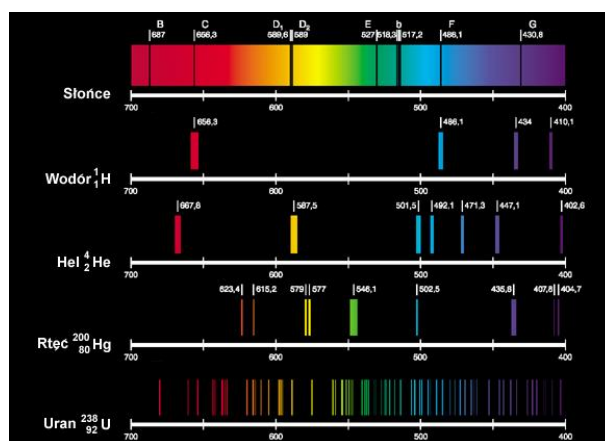
Zagadnienia: współczynnik załamania, dyspersja, rozszczepienie światła, bieg promienia w pryzmacie, spektrometr.

1 Wprowadzenie

Światło, według teorii Maxwella, jest falą elektromagnetyczną (elektromagnetycznym ruchem falowym), takim samym rodzajem promieniowania jak fale radiowe, promieniowanie gamma czy promieniowanie Roentgena. Różnią się od siebie tylko częstotliwością (długością). Fale elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni z taką samą prędkością $c=3 \cdot 10^8 \text{m/s}$. W całym zakresie długości tych fal, rozciągającym się od około 10^{-16}m do ponad 10^{10}m światło (promieniowanie widzialne) zajmuje tylko mały wycinek, znajdujący się w przedziale od $0.4 \cdot 10^{-6} \text{m}$ do $0.75 \cdot 10^{-6} \text{m}$.



Rys. 1. Spektrum fal elektromagnetycznych



Rys. 2 Widmo optyczne wybranych pierwiastków.

Światło, które zawiera wszystkie możliwe częstotliwości w zakresie promieniowania widzialnego nazywamy światłem białym (np. zwykłe żarówki, słońce). Istnieją jednak źródła światła, które emitują promieniowanie o charakterystycznych, ściśle określonych i rozdzielonych częstotliwościach. Takie źródła nazywamy lampami spektralnymi. Ośrodkiem aktywnym w nich jest w nich pierwiastek, który ma określona budowę kwantową. Po wzbudzeniu emituje tylko te długości fal, dla których istniały energie wzbudzenia. Widmo nie jest ciągłe, ale dyskretne. Widma optyczne wybranych pierwiastków przedstawiono na rys. 2. Niektóre długości fal mają szczególne znaczenie w praktyce i do ich opisu stosuje się charakterystyczne litery, np. żółta linia spektralna D sodu ($\lambda_D=589.3 \text{ nm}$) czerwona linia spektralna C wodoru ($\lambda_C=656.3 \text{ nm}$) czy fioletowa linia spektralna wodoru F ($\lambda_F=486.1 \text{ nm}$).

Głównymi parametrami fali świetlnej są jej długość (λ), częstotliwość (f) i prędkość (v). Częstotliwość jest wielkością stałą, określoną przez źródło promieniowania, natomiast prędkość i długość fali zależą od ośrodka, w którym fala się rozchodzi. Jeśli przez c i λ oznaczymy

prędkość i długość fali w próżni, a przez v_s i λ_s prędkość i długość tej samej fali w środowisku materialnym to:

$$v = \frac{c}{\lambda} = \frac{v_s}{\lambda_s} \quad (1)$$

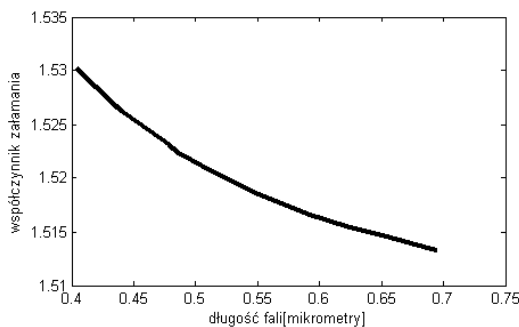
Z powyższej zależności wynika:

$$\frac{c}{v_s} = \frac{\lambda}{\lambda_s} = n_b, \quad (2)$$

gdzie n_b jest tzw. bezwzględnym (odniesionym do próżni) współczynnikiem załamania. W praktyce korzysta się nie z bezwzględnego, ale względnego współczynnika załamania

$$n = \frac{v_p}{v_s}, \quad (3)$$

gdzie v_p jest prędkością fali świetlnej w powietrzu. Zazwyczaj stosuje się skróconą nazwę – współczynnik załamania, pomijając wyraz względny. W temperaturze 20°C i przy ciśnieniu normalnym (1000hPa) współczynnik załamania suchego powietrza wynosi 1.0003. Niewiele się zatem różni od współczynnika załamania próżni, który wynosi 1. Prędkość rozchodzenia się fal świetlnych v_s w ośrodku innym niż próżnia zależy od długości fali λ . Z równania (3) wynika zatem, że współczynnik załamania jest również funkcją długości fali: $n = n(\lambda)$. Zależność współczynnika załamania od długości fali nazywa się dyspersją. Typowa krzywa dyspersji materiału przezroczystego w zakresie promieniowania widzialnego przedstawiona jest na rys 3.



Rys. 3. Typowa krzywa dyspersji szkła w zakresie promieniowania widzialnego

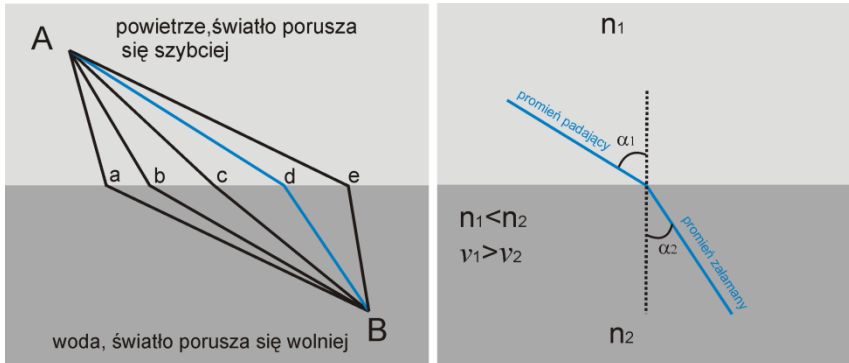
Z rysunku (3) wynika, że współczynnik załamania maleje wraz ze wzrostem długości fali. Zazwyczaj podaje się jego wartość dla żółtej linii spektralnej sodu D i oznacza się go symbolem n_D . Właściwości dyspersyjne ośrodka charakteryzuje się za pomocą dyspersji $\Delta n = n_F - n_C$ lub współczynnika dyspersji (liczby Abbego)

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C} \quad (5)$$

Innym ważnym pojęciem w optyce geometrycznej jest promień świetlny, który wskazuje kierunek propagacji fali świetlnej. Promienie świetlne w optyce geometrycznej są traktowane jako niezależne i nieoddziałujące ze sobą. Według zasady Fermata, promień świetlny porusza się po drodze, która lokalnie jest najszybsza. Stąd wynika, że w ośrodku jednorodnym (o stałej wartości współczynnika załamania) promień świetlny porusza się po linii prostej. Z zasady Fermata również wynikają dwa podstawowe prawa optyki geometrycznej – prawo odbicia i załamania. Przyjrzyjmy się bliżej przejściu promienia przez dwa ośrodki, różniące się współczynnikami załamania (rys. 4). Promień świetlny zmieni swój kierunek na skutek zmiany prędkości światła w ośrodku. Przechodząc np. z powietrza do wody, światło zwalnia. Torem najszybszym w takiej sytuacji jest tor oznaczony na rys. 4 niebieskim kolorem. Gdy mamy określone współczynniki załamania (prędkości), to najszybszy tor spełnia warunek:

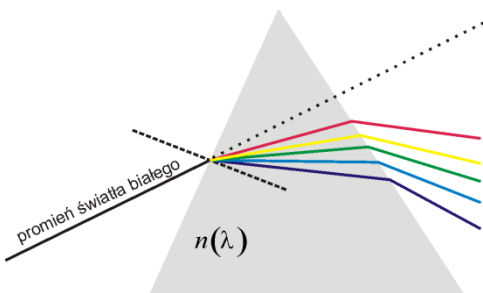
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (6)$$

Zależność (6) nazywana jest prawem załamania. Przy przechodzeniu przez ośrodki o różnych współczynnikach załamania promień świetlny zmienia kierunek zgodnie z równaniem (6).

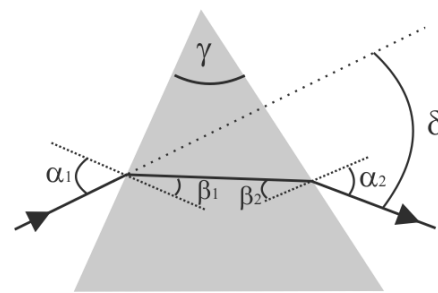


Rys. 4. Zasada Fermata a prawo załamania. Po lewej: promień świetlny spośród wszystkich możliwych dróg łączących punkty A i B będzie poruszał się po drodze najszybszej oznaczonej kolorem niebieskim. Po prawej: załamanie na granicy powierzchni.

Jednym z najważniejszych zjawisk wynikających z dyspersji ośrodka i prawa załamania jest rozszczepienie światła przy przejściu światła z jednego ośrodka do drugiego. Uwidacznia się ono szczególnie przy przejściu promienia światła białego przez pryzmat (rys. 5). Promień ten, na skutek dyspersji zostanie rozszczepiony na pęk promieni barwnych – kąt odchylenia dla promieni fioletowych jest większy niż dla promieni czerwonych.



Rys. 5. Na skutek dyspersji materiału $n(\lambda)$ i załamania na granicy ośrodków, światło zawierające różne częstotliwości (długości) promieniowania widzialnego ulega rozszczepieniu.



Rys. 6. Promień światła przechodząc pryzmat o kącie łamiącym γ na skutek załamania na dwóch powierzchniach zostaje odchyłony o kąt δ od pierwotnego kierunku.

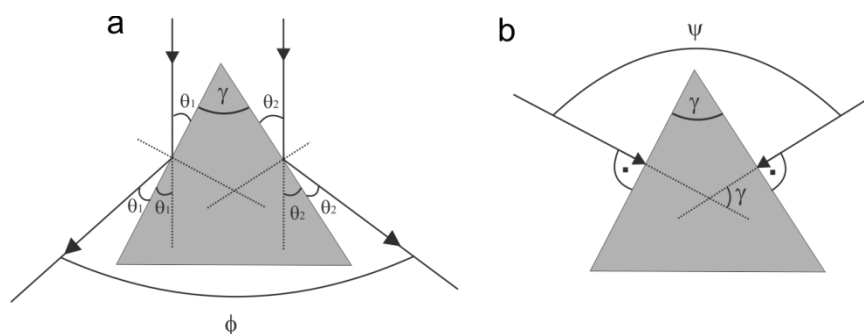
Współczynnik załamania szkła można wyznaczyć wykorzystując załamanie światła w pryzmacie. W pryzmacie dwie płaszczyzny optycznie czynne tworzą ze sobą kąt γ nazywany kątem łamiącym pryzmatu (rys. 6). Światło monochromatyczne padające na pierwszą powierzchnię pod kątem α_1 załamuje się na niej pod kątem β_1 . Padając na drugą powierzchnię pod kątem β_2 załamuje się ponownie pod kątem α_2 (pod warunkiem że β_2 jest mniejszy niż kąt graniczny). W rezultacie, promień przechodzący pryzmat ulega odchyleniu o kąt δ . Dokonując prostych przeliczeń można wyznaczyć wyrażenie na kąt odchylenia:

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \gamma \quad (7)$$

Można pokazać, że przy symetrycznym przejściu promienia przez pryzmat ($\alpha_1 = \alpha_2$, $\beta_1 = \beta_2$) kąt odchylenia jest najmniejszy. Kąt ten nazywamy kątem minimalnego odchylenia i oznaczamy δ_{\min} . Podstawiając do zależności (7) prawo załamania można dostać wyrażenie na współczynnik załamania pryzmatu:

$$n = \frac{\sin\left(\frac{\gamma + \delta_{\min}}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)}. \quad (8)$$

Ze wzoru (8) widać, że w celu wyznaczenia współczynnika załamania światła należy zmierzyć kąt łamiący pryzmatu γ oraz kąt minimalnego odchylenia δ_{\min} . Kąt łamiący pryzmatu można wyznaczyć przez pomiar kąta utworzonego przez kierunki promieni początkowo równoległych a potem odbitych od obu ścian pryzmatu (rys. 7a) lub pomiar kąta pomiędzy kierunkami prostopadłymi do ścian pryzmatu (rys. 7b).



Rys. 7. Rysunki pomocnicze do wyznaczenia kąta łamiącego pryzmatu.

Z rysunku 7a widać, że $\gamma = \theta_1 + \theta_2$ oraz $\phi = 2\theta_1 + 2\theta_2$, zatem

$$\gamma = \frac{\phi}{2}. \quad (9)$$

Natomiast z rysunku 7b mamy

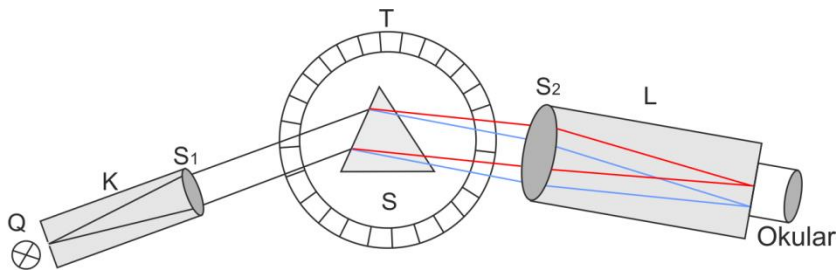
$$\gamma = 180^\circ - \psi. \quad (10)$$

Kąt minimalnego odchylenia znajdujemy za pomocą spektrometru.

2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Do pomiaru kąta minimalnego odchylenia oraz kąta łamiącego pryzmatu korzysta się z układu spektrometru (rys.8). Składa się on z kolimatora K, lunety L oraz stolika obrotowego S z kołem podziałowym T (kątomierzem). Zadaniem kolimatora jest utworzenie obrazu szczeliny w dużej odległości (wytworzenie wiązki promieni równoległych). W tym celu szczelina umieszczona jest w płaszczyźnie ogniskowej obiektywu S_1 kolimatora. Zadaniem lunety jest obserwacja obrazu szczeliny wytworzonego przez kolimator (luneta umożliwia obserwację daleko położonych przedmiotów). Luneta składa się z obiektywu S_2 i okularu wyposażonego w krzyż pomiarowy. Stolik obrotowy, na którym umieszcza się badany pryzmat P oraz luneta, mają wspólną oś obrotu, prostopadłą do płaszczyzny stolika. Kolimator oraz luneta leżą w płaszczyźnie prostopadłej do tej osi. Kątowe położenie lunety można odczytać na kole podziałowym.

Szczelinę kolimatora oświetlamy lampą spektralną. Wiązką światła z kolimatora oświetlamy pryzmat. Wiązka ta po przejściu przez pryzmat zostaje odchylona oraz rozszczepiona. W rezultacie, pryzmat tworzy wiele obrazów szczeliny (tyle, ile częstotliwości emituje lampa spektralna) rozdzielonych przestrzennie (patrz rys. 5). Za pomocą lunety obserwujemy obrazy szczeliny i mierzymy ich kątowe położenie.



Rys. 8. Schemat spektrometru: Q- lampa spektralna, K- kolimator, L- luneta, S- stolik obrotowy, T- koło podziałowe z podziałką kątową, P- przyzmat, S₁- obiektyw kolimatora, S₂- obiektyw lunety.

3 Zadania do wykonania

A) Pomiary:

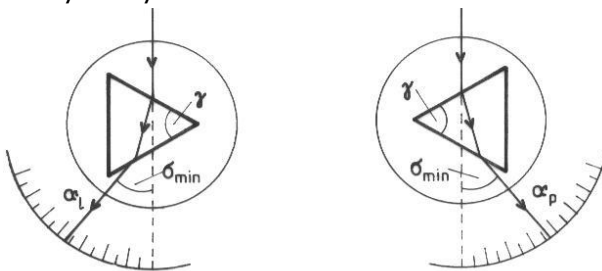
1. Wyznaczenie kąta łamiącego przyzmatu

Zmierzyć kąt łamiący wykorzystując jeden z dwóch sposobów przedstawionych na rysunku 7. W przypadku ustawienia na rys. 7a wyznaczamy kąt ϕ zawarty pomiędzy promieniami odbitymi od płaszczyzn przyzmatu i korzystając ze wzoru (9) wyliczamy kąt łamiący.

W przypadku ustawienia pokazanego na rys. 7b, odczytujemy kątowne położenia lunety odpowiadające kierunkom prostopadłym do płaszczyzn przyzmatu mierząc tym samym kąt ψ , a następnie wyliczamy kąt łamiący korzystając z wyrażenia (10).

2. Zmierzenie kąta minimalnego odchylenia dla różnych długości fali świetlnej

Zmierzyć kąt minimalnego odchylenia dla różnych długości fali emitowanych przez daną lampę spektralną ustawiając badany przyzmat tak, aby odchyłał bieg promieni świetlnych w sposób pokazany na rys. 9.



Rys. 9. Zasada pomiaru kąta minimalnego odchylenia.

B) Opracowanie wyników:

- Wyznaczyć ze wzoru (8) współczynniki załamania szkła przyzmatu dla zmierzonych długości fal i ich niepewności;
- Sporządzić wykres krzywej dyspersji $n = n(\lambda)$ szkła, z którego wykonano przyzmat (rys.3);
- Z krzywej dyspersji odczytać wartości n_d , n_F , n_C , a następnie wyliczyć dyspersję szkła i jego współczynnik dyspersji (wzór 5).

4 Pytania:

1. Co to jest współczynnik załamania?
2. Dlaczego promień świetlny załamuje się na granicy ośrodków? Podaj postać prawa załamania.
3. Narysuj bieg promienia światła monochromatycznego przez przyzmat. Omów w jaki sposób można wykorzystać ten efekt do pomiaru współczynnika załamania?
4. Dlaczego światło w przyzmacie się rozszczepia?
5. Omów budowę spektrometru. Jaka jest rola kolimatora i lunety w układzie?

opracowała Agnieszka Popiołek-Masajada