

## WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA ZA POMOCĄ REFRAKTOMETRU

**Cel ćwiczenia:** wyznaczenie współczynników załamania: cieczy i ciał stałych oraz kryształów dwójłomnych.

**Zagadnienia:** załamanie światła na granicy dwóch ośrodków, całkowite wewnętrzne odbicie, zasada działania refraktometrów Abbego oraz Pulfricha, kryształy jednoosiowe, dwójłomność<sup>1</sup>, polaryzatory liniowe<sup>2</sup>.

### 75.1. Wprowadzenie

Bezwzględny współczynnik załamania ośrodka  $n$  jest jedną z podstawowych wielkości fizycznych, służących do opisywania oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią. Jest on zdefiniowany następującą zależnością:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (75.1)$$

gdzie  $c$  – prędkość fal elektromagnetycznych w próżni, a  $v = v(\lambda)$  – prędkość fazowa fali w ośrodku.

Fale elektromagnetyczne w materii wykazują dyspersję, tzn. ich prędkość  $v$  zależy od częstotliwości fali (lub równoważnie – od długości fali  $\lambda$ ). Z tego powodu dyspersyjny jest również współczynnik załamania  $n$ .

Gdy fala świetlna pada na granicę rozdziału dwóch jednorodnych, przezroczystych ośrodków o różnych współczynnikach załamania, wtedy jej część odbija się od tej granicy, a reszta przez nią przechodzi. W pewnych warunkach odbicie jest zupełne.

W ośrodkach izotropowych wartość współczynnika załamania nie zależy od kierunku propagacji fali. W ośrodkach optycznie anizotropowych jedno-

<sup>1</sup>zob. rozdz. W2, p. 2.

<sup>2</sup>zob. ćwiczenie 86, p. 86.1.

osiowych w tym samym kierunku rozchodzą się dwie fale – zwyczajna i nadzwyczajna. Prędkość fazowa fali zwyczajnej  $v_0$  – podobnie jak w przypadku fal w ośrodku izotropowym – nie zależy od kierunku w kryształach. Natomiast dla fali nadzwyczajnej prędkość fazowa zmienia się od wartości  $v_0$  dla kierunku propagacji fali zgodnego z kierunkiem osi optycznej do wartości  $v_e$  dla kierunku prostopadłego do osi optycznej. Różnicę współczynników załamania  $n_e$  dla fali nadzwyczajnej i  $n_o$  dla fali zwyczajnej nazywa się dwójnośnością.

Podczas przechodzenia światła przez granicę dwóch izotropowych ośrodków spełnione jest prawo Snelliusa mówiące, iż promień padający odbity i załamany oraz prostopadła do granicy rozdziału ośrodków (patrz rys. 75.1) leżą w jednej płaszczyźnie (płaszczyźnie padania), oraz że między kątami padania  $\alpha$  i załamania  $\beta$  (rys. 75.1) istnieje związek

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_w, \quad (75.2)$$

$n_w$  jest względnym współczynnikiem załamania ośrodka drugiego (o bezwzględnym współczynniku załamania  $n_2$ ) względem ośrodka pierwszego (o bezwzględnym współczynniku załamania  $n_1$ ).

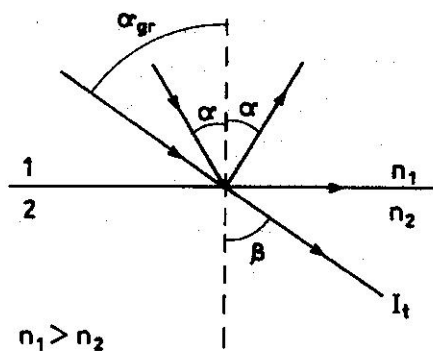
Jeżeli światło przechodzi przez granicę ośrodków (rys. 75.1), gdzie  $n_1 > n_2$ , to w miarę wzrostu kąta padania rośnie także, większy od niego, kąt załamania i przy tzw. kącie granicznym ( $\alpha = \alpha_{gr}$ ) osiąga wartość  $\beta = 90^\circ$

$$\frac{\sin \alpha_{gr}}{\sin 90^\circ} = \sin \alpha_{gr} = n_w, \quad (75.3)$$

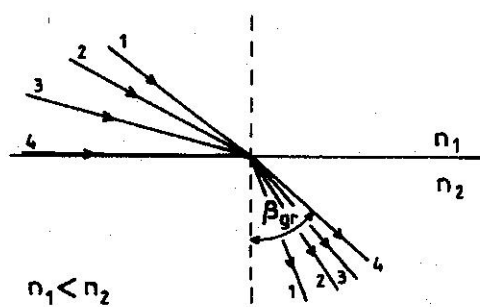
Wszystkie promienie padające na powierzchnię graniczną pod kątem większym niż  $\alpha_{gr}$  zostają od tej powierzchni całkowicie odbite.

Gdy światło pada na granicę ośrodków, dla których  $n_1 < n_2$  (rys. 75.2) pod różnymi kątami, wówczas odpowiednie kąty załamania są zawarte w przedziale od 0 do  $\beta_{gr}$ . Pod kątem większym niż  $\beta_{gr}$  z ośrodka 1 do ośrodka 2 nie wejdzie żaden promień. To zjawisko stanowi zasadę działania refraktometrów Abbego oraz Pulfricha.

Podczas przechodzenia światła z ośrodka izotropowego do ośrodka anizotropowego jednoosiowego (lub na odwrót) promień zwyczajny załamuje się zgodnie z prawem Snelliusa. Do promienia nadzwyczajnego natomiast pra-



Rys. 75.1. Przechodzenie światła przez granicę ośrodków, gdy  $n_1 > n_2$



Rys. 75.2. Przechodzenie światła przez granicę dwóch ośrodków, gdy  $n_1 < n_2$

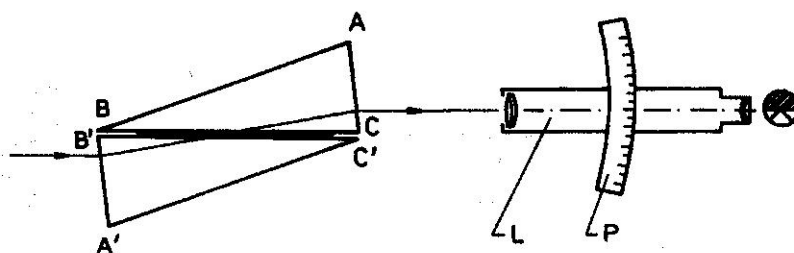
wo Snelliusa na ogół nie stosuje się, np. promień nadzwyczajny może nie leżeć w płaszczyźnie padania. Promień nadzwyczajny leży w płaszczyźnie padania tylko w takim przypadku, gdy oś optyczna kryształu leży w tej płaszczyźnie lub jest do niej prostopadła. W tym ostatnim przypadku stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania nie zależy od kąta padania i równy jest ekstremalnej wartości współczynnika załamania  $n_e$ .

Współczynnik załamania ośrodka jest funkcją długości fali  $\lambda$ . Materiały optyczne opisuje się za pomocą zależności  $n = n(\lambda)$ . Dla zastosowań technicznych podaje się współczynniki załamania dla długości fal wybranych linii spektralnych. Należą do nich m.in.:

czerwona linia wodoru	$\lambda_C = 656,26 \text{ nm}$	$(n_C)$ ,
żółta podwójna linia sodu	$\lambda_D = 589,29 \text{ nm}$	$(n_D)$ ,
żółta linia helu	$\lambda_d = 587,57 \text{ nm}$	$(n_d)$ ,
niebieska linia wodoru	$\lambda_F = 486,13 \text{ nm}$	$(n_F)$ .

## 75.2. Refraktometr Abbego

Zasadę działania refraktometru Abbego przedstawiono na schematycznym rys. 75.3. Zasadniczą częścią przyrządu jest układ dwóch jednakowych pryzmatów w odpowiednich metalowych oprawkach. Jeden z nich może się odchyłać na zawiasie. Między pryzmatami jest szczelina o grubości ok. 0,1 mm, którą wypełnia się badaną cieczą. Wiązka światła wchodzi do pryzmatu dol-



Rys. 75.3. Schemat refraktometru Abbego

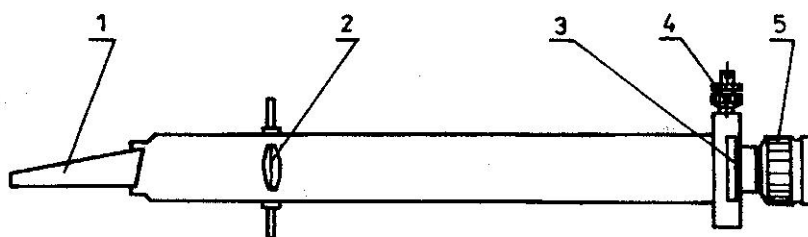
nego przez wypolerowaną ścianę  $A'B'$  i pada na zmatowioną ścianę  $B'C'$  i dalej na cienką warstwę badanej cieczy. Pryzmat górny wykonany jest z ciężkiego flintu, którego współczynnik załamania  $n_0$  jest większy niż współczynnik załamania badanej cieczy. Tak więc promienie padające na wypolerowaną ściankę  $BC$  pod kątem  $90^\circ$  wejdą do górnego pryzmatu pod kątem granicznym. Pomiar polega na obracaniu zespołu pryzmatów, zamocowanych na jednej osi wraz z podziałką kątową  $P$ , aż do pokrycia osi lunety z kierunkiem promieni granicznych, tzn. gdy pole widzenia lunety będzie w połowie ciemne i w drugiej połowie jasne. Dokładne ustawienie granicy światłocienia umożliwi krzyż w okularze lunety.

Podziałka kąтова kręgu  $P$  jest wyskalowana wartościami bezwzględnego współczynnika załamania. W celu sprawdzenia poprawności wskazań refraktometru używa się cieczy wzorcowej (np. woda destylowana w temperaturze  $20^\circ\text{C}$  ma  $n_D = 1,33291$ ).

W pracowni w pomiarach współczynnika załamania refraktometrem Abbego stosuje się oświetlenie światłem monochromatycznym lampy sodowej. Stosowanie światła białego wymaga dodatkowego wyposażenia, którego tu nie będziemy opisywać.

### 75.3. Refraktometr Pulfricha

Jedną z wersji refraktometru Pulfricha jest przedstawiona na schematycznym rysunku 75.4. Jest on przeznaczony do pomiaru współczynnika załamania ciał stałych i cieczy dla żółtej linii sodu. Składa się z pryzmatu pomiarowego 1, obiektywu 2, podziałki 3, pokrętki podziałki pomocniczej 4 (pełni ona podobną rolę jak noniusz) oraz okularu 5.



Rys. 75.4. Schemat refraktometru Pulfricha

Pomiar bezwzględnego współczynnika załamania polega na zaobserwowaniu w okularze granicy światłocienia na tle skali, a następnie, z załączonej tablicy, odczytaniu wartości współczynników załamania.

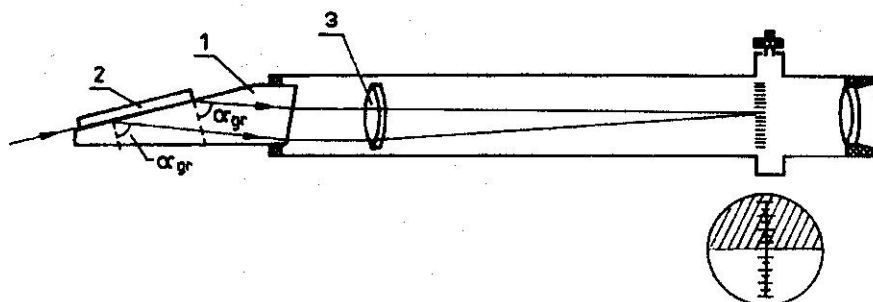
Ponieważ poszczególne elementy refraktometru Pulfricha są połączone sztywno ze sobą, więc zakres pomiarowy współczynnika załamania jest mały i wynosi ok. 0,04. W celu poszerzenia zakresu pomiarowego przyrząd wyposażono w 10 wymiennych pryzmatów pomiarowych o podanych poniżej zakresach pomiarowych:

Pryzmat	Zakres pomiarowy dla $n_D$	Pryzmat	Zakres pomiarowy dla $n_D$
I	1,3254–1,3664	L6	1,5011–1,5322
L2	1,3642–1,3999	L7	1,5312–1,5631
L3	1,3989–1,4360	L8	1,5621–1,5899
L4	1,4350–1,4678	L9	1,5889–1,6205
L5	1,4668–1,5021	L10	1,6195–1,6470

Opisana wersja refraktometru Pulfricha umożliwia więc pomiary współczynników załamania zawartych w granicach 1,3254–1,6470.

#### 75.4. Zasada pomiaru refraktometrem Pulfricha

Działanie refraktometru przedstawia schematyczny rys. 75.5. Refraktometr zamocowany na statywie należy tak pochylić, aby wypolerowana powierzchnia pryzmatu pomiarowego 1 była pozioma. Na tę powierzchnię należy nałożyć kropelkę bromonaftalenu jako cieczy immersyjnej, a następnie badaną płytkę 2. Powierzchnia płytki zwrócona do pryzmatu musi być wypolerowa-

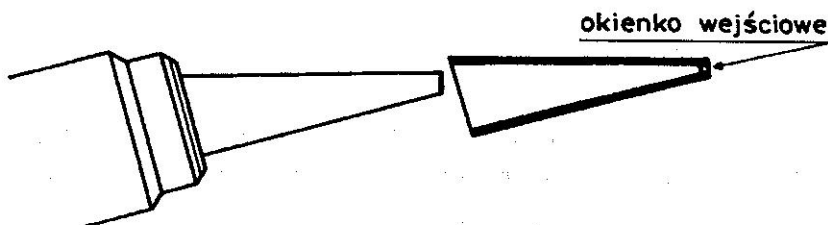


Rys. 75.5. Zasada działania refraktometru Pulfricha

na, podobnie jak powierzchnia badanej płytki zwrócona w stronę źródła światła. Światło wchodzące do badanej płytki (rys. 75.5) pada na pryzmat pod kątem bliskim  $90^\circ$  i załamuje się pod kątem nie większym niż kąt graniczny. Promienie załamane pod kątem granicznym  $\alpha_{gr}$  po przejściu przez obiektyw 3 (rys. 75.5) tworzą w płaszczyźnie ogniskowej tego obiektywu granicę światłocienia. W okularze zaobserwujemy więc linię graniczną dzielącą pole widzenia na dwie części – jasną i ciemną. Dla odczytanego na skali położenia tej linii znajdujemy w odpowiednich tablicach (znajdujących się w laboratorium) wartości współczynnika załamania płytki. Źródłem światła używanym w laboratorium jest spektralna lampa sodowa.

Jeżeli na pryzmacie refraktometru umieścimy płytkę dwójłomną, wykonaną z kryształu jednoosiowego, o osi optycznej równoległej do płaszczyzny pryzmatu i tworzącej kąt  $\theta$  z kierunkiem wiązki padającej, to w świetle monochromatycznym – jako skutek podwójnego załamania – zaobserwujemy na ogół dwie linie graniczne. Będą to linie dla współczynników załamania promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego. Jeżeli na okular nałożymy nasadkę z polaryzatorem liniowym i będziemy nią obracać, stwierdzimy, że są to dwie wiązki światła spolaryzowane w płaszczyznach wzajemnie prostopadłych. Jeżeli natomiast płytkę dwójłomną będziemy skręcać o mały kąt  $\Delta\theta$ , to jedna z linii granicznych będzie zmieniać swoje położenie, druga zaś nie. Zmienna jest utworzona przez promienie nadzwyczajne, stała przez zwyczajne. Wyznaczenie wartości współczynników załamania dla promieni zwyczajnych i nadzwyczajnych pozwala określić, czy jest to kryształ dodatni czy ujemny. Gdy kryształ jest dodatni,  $n_o < n_e$ . Ekstremalną wartość  $n_e$  (podawaną w tabelach fizycznych) znajdujemy wtedy, gdy odległość linii granicznych  $n_o$  i  $n_e$  jest największa.

Do pomiaru współczynnika załamania cieczy służy nasadka na pryzmat pomiarowy (rys. 75.6). Nasadka ma przezroczyste okienko, a jej wnętrze jest tak ukształtowane, że nad wypolerowaną powierzchnią pryzmatu tworzy się szczelina ok. 1 mm. Tę szczelinę wypełnia się badaną cieczą (ok. 0,5 cm<sup>3</sup>). Wiązka światła przechodząca przez okienko biegnie w cieczy i wchodzi do pryzmatu pod kątem granicznym. Dalej postępuje się identycznie jak z ciałami stałymi.



Rys. 75.6. Schemat nasadki do pomiaru współczynnika załamania cieczy

## 75.5. Zadania do wykonania

### 75.5.1. Pomiary

#### Pomiar refraktometrem Abbego

Na wstępie należy sprawdzić poprawność wskazań refraktometru. W tym celu należy przemyć powierzchnie pryzmatów alkoholem. Na poziomo ustawioną powierzchnię dolnego pryzmatu nanieść dwie krople wody destylowanej. Nałożyć drugi pryzmat, zamknąć zameczek, a następnie ustawić refraktometr w pozycji wygodnej do oglądania. Przez obrót pryzmatów znaleźć w polu widzenia lunety granicę cienia. Odczytana wartość współczynnika załamania wody powinna wynosić  $n_D = 1,333$ .

Postępując tak samo jak z wodą należy wyznaczyć współczynniki załamania cieczy wskazanych przez prowadzącego ćwiczenia. Dla każdej cieczy pomiar powtórzyć trzykrotnie. Przed każdym nałożeniem badanej cieczy należy pryzmaty refraktometru starannie przemyć i osuszyć.

### **Pomiar refraktometrem Pulfricha**

Posługując się refraktometrem zgodnie z p. 75.4 wykonać pomiary współczynników załamania: cieczy, szkieł i kryształów dwójłomnych według wskazań prowadzącego ćwiczenia.

Dla cieczy i szkieł wykonać po kilka pomiarów. Dla ciał dwójłomnych zmierzyć współczynniki załamania  $n_e(\theta)$  i  $n_o$  dla kierunku równoległego ( $\theta = 0^\circ$ ), prostopadłego ( $\theta = 90^\circ$ ) do osi optycznej oraz kąta  $\theta$  wynoszącego około  $45^\circ$ .

#### **75.5.2. Opracowanie wyników**

1. Wyniki pomiarów refraktometrem Abbego zestawić w tabeli i obliczyć wartości średnie. Za miarę niepewności pomiarowej  $\Delta n$  przyjąć odchylenie standardowe średniej. W drugiej tabeli zestawić wyniki uzyskane refraktometrem Pulfricha.
2. Na podstawie wyników dla kryształów dwójłomnych należy obliczyć różnicę  $n_e - n_o$  i określić, czy jest to kryształ dodatni czy ujemny.

**Literatura:** [2]