

## O2. POMIARY KĄTA BREWSTERA

tekst opracowały: Bożena Janowska-Dmoch i Jadwiga Szydłowska

Polaryzacja światła jest zjawiskiem, które potwierdza falową naturę światła. Światło jest falą elektromagnetyczną, w której cykliczne zmiany pól elektrycznego i magnetycznego, opisane przez wektory natężenia pola elektrycznego  $\vec{E}$  i indukcji magnetycznej  $\vec{B}$ , rozchodzą się ze stałą prędkością. W ośrodkach izotropowych drgania wektorów  $\vec{E}$  i  $\vec{B}$  są w każdej chwili prostopadłe do siebie i jednocześnie prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Światło jest więc falą poprzeczną. Przy opisie zjawisk optycznych zwraca się jedynie uwagę na wektor  $\vec{E}$  a pomija się wektor  $\vec{B}$  ponieważ jego wartość można obliczyć z wektora  $\vec{E}$ .

Orientacja przestrzenna wektora  $\vec{E}$  może się zmieniać w czasie i wzdłuż kierunku rozchodzenia się fali w sposób zupełnie przypadkowy, chaotyczny. Taką falę nazywamy falą niespolaryzowaną. Możliwość uporządkowania drgań wektora  $\vec{E}$ , tak by jego kierunek i wartość był przewidywalne, nazywamy polaryzacją. Gdy drgania wektora  $\vec{E}$  zachodzą tylko w jednej płaszczyźnie, to fala jest **spolaryzowana liniowo**. Gdy drgania wektora  $\vec{E}$  są takie, że koniec wektora  $\vec{E}$  zatacza w czasie okrąg lub elipsę, to fala jest **spolaryzowana kołowo** lub **eliptycznie**. Światło można spolaryzować poprzez odbicie, selektywną absorpcję (dichroizm), podwójne załamanie lub rozpraszanie światła. Gdy wiązka światła niespolaryzowanego pada na granicę dwóch ośrodków od strony ośrodka optycznie rzadszego pod **kątem Brewstera**, to promień odbity jest całkowicie spolaryzowany. Kąt **Brewstera** charakteryzuje oba ośrodki, zależy bowiem od prędkości z jaką rozchodzi się światło zarówno w pierwszym, jak i w drugim ośrodku.

### Cel

Celem pomiarów jest wyznaczenie współczynników załamania szkła i różnych minerałów z pomiarów kąta **Brewstera**.

### Wymagania

Definicja fali, rodzaje fal, natura światła, światło, jako fala elektromagnetyczna, polaryzacja liniowa, kołowa i eliptyczna, prawa odbicia i załamania światła na granicy dwóch ośrodków, współczynnik załamania światła, zasada Huygensa, kąt Brewstera.

### Literatura

R. Resnick, D. Halliday, Fizyka, tom II, PWN

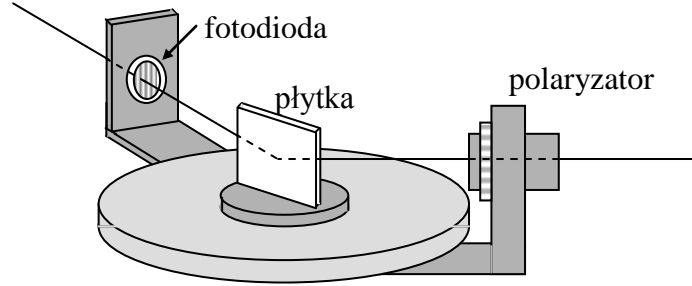
F.S. Crawford, Fale, *Kurs berkeleyjski* tom III, PWN

D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, tom IV, PWN

### Opis przyrządu

Wiązka lasera He-Ne jest skierowana przez układ lusterek na oś obrotu stolika z podziałką kątową. W środku stolika umieszcza się badane płytki. Wiązka światła przechodzi przez polaryzator umieszczony w ramieniu zamocowanym do osi stolika. Następnie światło pada na środek płytki pokrywający się z osią obrotu stolika i odbija się pod kątem zależnym od ustawienia stolika. Obrót stolika powoduje zmiany kąta padania wiązki na płytkę.

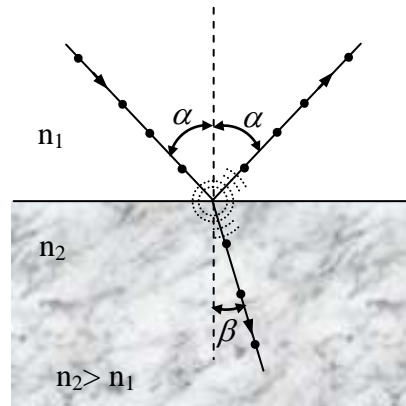
W drugim, ruchomym ramieniu przyrządu umieszczona jest fotodioda. Obrót tego ramienia pozwala nacelować fotodiode na wiązkę odbitą od płytki. Natężenie prądu płynącego w układzie zasilającym fotokomórkę wskazuje mikroamperomierz.



### Wyprowadzenie wzoru

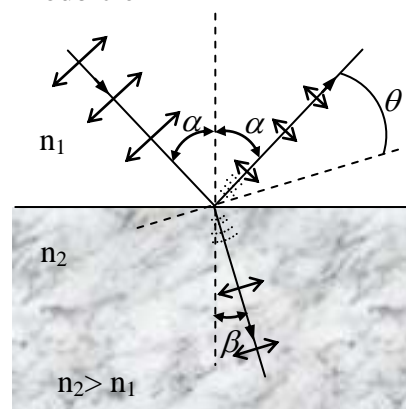
Niech wiązka światła niespolaryzowanego pada na granicę dwóch ośrodków dielektrycznych od strony ośrodka optycznie rzadszego. Wiązkę tę można opisać dwoma składowymi pola elektrycznego  $\vec{E}$ , jedną równoległą do płaszczyzny padania-odbicie (strzałki) i drugą prostopadłą do tej płaszczyzny (kropki). Zmienne pole elektryczne padającej fali świetlnej wzbudza drgania elektronów w drugim ośrodku. Powstają drgające dipole, które emitują fale elektromagnetyczne w stronę pierwszego ośrodka (fala odbita) i w stronę drugiego ośrodka (fala załamana). Rozważmy oddzielnie odbicie światła dla obu składowych pola elektrycznego wiązki padającej.

Składowa pola elektrycznego prostopadła do płaszczyzny padania (kropki) spowoduje drgania dipoli elektrycznych w kierunku prostopadłym do tej płaszczyzny. **Drgający dipol elektryczny** tak jak antena **emituje promieniowanie, które jest najsilniejsze w kierunku prostopadłym do osi dipola**. W takim promieniowaniu istnieje tylko pole elektryczne  $\vec{E}$  równoległe do dipola, czyli składowa prostopadła promieniowania padającego będzie emitowana zarówno w wiązce odbitej jak i załamanej.



- składowa drgań pola elektrycznego prostopadła do płaszczyzny padania-odbicie

Składowa pola elektrycznego równoległa do płaszczyzny padania – odbicie indukuje w ośrodku odbijającym drgania dipoli, które są również równoległe do płaszczyzny padania. A więc może istnieć taka wiązka odbita, w której kierunek pola elektrycznego  $\vec{E}$  powinien być równoległy do wiązki, co jest teoretycznie niemożliwe. W sytuacji przedstawionej na rysunku obok zaznaczono linią przerywaną kierunek, pokrywający się z drgającymi dipolami i w którym emitowane światło nie ma polaryzacji równoległej. Promieniowanie wysyłane w kierunku wiązki odbitej będzie więc tym słabsze, im kąt  $\theta$  między promieniem odbitym a osią dipoli drgających będzie mniejszy. Natomiast dla wiązki przechodzącej



- ↕ składowa drgań pola elektrycznego równoległa do płaszczyzny padania-odbicie

pole  $\vec{E}$  jest prostopadłe do kierunku fali nie ma tu żadnych ograniczeń.

W szczególnym przypadku, gdy  $\theta = 0$  jednocześnie kąt między wiązką załamaną a wiązką odbitą jest równy  $\frac{\pi}{2}$ . Również składowa pola elektrycznego równoległa do płaszczyzny padania **znika zupełnie**.

Wtedy z niespolaryzowanej wiązki padającej odbija się tylko składowa spolaryzowana prostopadłe do płaszczyzny padania. Taki kąt padania, gdy wiązka odbita jest całkowicie spolaryzowana jest nazywany **kątem Brewstera** lub **kątem polaryzacji**.

Uwzględniając prawo załamania światła zapiszemy

$$\frac{\sin \alpha_{Br}}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$

ponieważ

$$\alpha_{Br} + \beta = \frac{\pi}{2} \quad \Rightarrow \quad \beta = \frac{\pi}{2} - \alpha_{Br},$$

$$\text{to } \frac{\sin \alpha_{Br}}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{Br}\right)} = \frac{\sin \alpha_{Br}}{\cos \alpha_{Br}} = \frac{n_2}{n_1}, \quad \text{lub } \text{tg} \alpha_{Br} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2)$$

Wzór powyższy wyraża **prawo Brewstera**.

Gdy wiązka padająca i odbita rozchodzą się w powietrzu, to możemy przyjąć, że  $n_1 \cong 1$ ,  $n_2$  oznaczyć przez  $n$ , a wtedy prawo Brewstera zapiszemy

$$\text{tg} \alpha_{Br} = n. \quad (3)$$

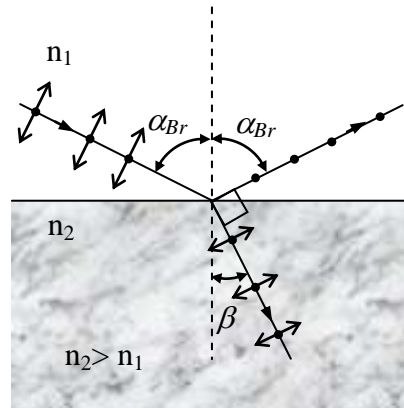
Aby wyznaczyć współczynnik załamania badanej substancji, musimy znaleźć właściwy dla tej substancji kąt Brewstera.

## Wykonanie ćwiczenia

*Wyniki wszystkich pomiarów muszą być zapisane w sprawozdaniu, opatrzone odpowiednimi jednostkami i podpisane przez asystenta.*

### Pomiar kąta Brewstera

- Na stoliku obrotowym umieszczamy badaną płytkę tak, żeby jej powierzchnia odbijająca światło leżała w punkcie pokrywającym się z osią obrotu stolika. (Odwrócenie płytki o  $180^\circ$  spowoduje, że powierzchnia odbijająca nie będzie leżała w osi obrotu)
- Sprawdzamy, czy wiązka lasera jest spolaryzowana **poziomo**. W tym celu obracając stolikiem kierujemy wiązkę odbitą na ekran i poszukujemy miejsca, gdzie ma ona



- ↕ składowa drgań pola elektrycznego równoległa do płaszczyzny padania
- składowa drgań pola elektrycznego prostopadła do płaszczyzny padania

najmniejsza intensywność. Obracamy polaryzatorem, aż do momentu całkowitego wygaszenia wiązki.

- c) Przy całkowitym wygaszeniu odczytujemy kąt  $\theta_1$  z podziałki stolika obrotowego zaopatrzonej w noniusz. Pomiar powtarzamy co najmniej 10 razy.
- d) Obracamy stolik w drugą stronę, znajdujemy całkowite wygaszenie wiązki odbitej i odczytujemy kąt  $\theta_2$  dla takiego położenia stolika. Pomiar, jak poprzednio, wykonujemy 10 razy.
- e) Przeprowadzamy pomiary dla pozostałych płytek.

### Opracowanie wyników.

- a) Obliczamy wartości średnie  $\bar{\theta}_1$  i  $\bar{\theta}_2$  zmierzonych wartości  $\theta_1$  i  $\theta_2$  i wyznaczamy ich błędy jako niepewności wartości średniej.

- b) Ze wzoru  $\alpha_{Br} = \frac{|\bar{\theta}_1 - \bar{\theta}_2|}{2}$  wyznaczamy kąt Brewstera  $\alpha_{Br}$ . A jego błąd  $\Delta\alpha_{Br}$  obliczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych. Ze wzoru (3) obliczamy współczynnik załamania badanych płytek.

### Pomiar natężenia światła odbitego, spolaryzowanego poziomo.

- a) Ustawiamy płytkę badaną na stoliku obrotowym tak, aby jej płaszczyzna odbicia leżała w osi obrotu stolika.
- b) Sprawdzamy, czy wiązka lasera jest spolaryzowana **poziomo**.
- c) Sprawdzamy czy wiązka odbita trafia na fotodiode umieszczoną w ruchomym ramieniu stolika dla płytki ustawionej pod kątem Brewstera  $\pm 30^\circ$ .
- d) Obracamy stolik tak, by wiązkę **odbityą** od płytki zawrócić z powrotem do lasera. W takim ustawieniu wiązka pada prostopadłe na płytkę i wyznacza położenie normalnej. Na podziałce kątowej stolika odczytujemy kąt  $\theta_0$ .
- e) Ustawiamy płytkę pod kątem  $\theta_1$  odpowiadającym kątowi Brewstera. Ruchome ramię z fotodiode ustawiamy tak, by wiązka odbita trafiała na fotodiode. Po włączeniu przez asystenta układu pomiarowego ustawiamy wzmocnienie zasilania fotodiody, tak by wychylenie mikroamperomierza było nieznacznie powyżej zera (przy zgaszonej lampce).
- f) Zwiększamy kolejno kąt ustawienia stolika  $\theta_1$  początkowo o  $1^\circ$  potem  $2^\circ$  za każdym razem ustawiając ruchome ramię tak, by wiązka odbita trafiała na fotodiode i zapisujemy wskazania mikroamperomierza. Jeżeli wartość fotoprądu wychodzi poza skalę, powiększamy zakres miernika.
- g) Powracamy do ustawienia odpowiadającego kątowi Brewstera i następnie zmniejszamy kąt ustawienia stolika  $\theta_1$ . W okolicy minimum natężenia prądu fotodiody zwiększamy dokładność odczytu natężenia prądu zmieniając ustawienia stolika co  $1^\circ$ , a nawet co  $0,5^\circ$ , aby jak najdokładniej wyznaczyć położenie minimum fotoprądu. Pomiary przeprowadzamy w sposób podobny jak przy zwiększaniu kąta  $\theta_1$ .

*Propozycja zapisu wyników:*

Rodzaj płytki .....Położenie normalnej  $\theta_0$  .....

Położenie $\theta_1$ [jednostka] $\Delta\theta = \dots\dots$	$\alpha =  \theta_1 - \theta_0 $ $\Delta\alpha_1$	natężenie fotonprądu $I$ [jednostka] $\Delta I = \dots\dots$
--	--	--

gdzie  $\Delta\theta$  i  $\Delta I$  są błędami systematycznymi wynikającymi z dokładności przyrządów.

### Opracowanie wyników

Dla każdej z badanych płytek:

- obliczamy kąty padania wiązki na płytkę  $\alpha = |\theta_1 - \theta_0|$ . Błąd  $\Delta\alpha_1$  obliczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.
- na papierze milimetrycznym sporządzamy wykres natężenia fotonprądu w zależności od kąta padania wiązki na płytkę. Wartość fotonprądu wyrażamy w jednostkach wskazanych przez miernik. Na wykresie zaznaczamy pomiary  $I(\alpha)$ . Na wykres nanosimy błędy pomiarów.
- z położenia minimum funkcji  $I(\alpha)$  odczytujemy kąt Brewstera.
- korzystając z prawa Brewstera obliczamy współczynnik załamania badanej płytki (3). Błąd obliczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.

We wnioskach spróbujemy ocenić

- jak zmienia się kształt wykresu  $\bar{I}(\alpha)$  dla różnych płytek;
- czy otrzymane wartości współczynników załamania są zgodne w granicach błędów doświadczalnych z wartościami tablicowymi.