

LXXII OLIMPIADA FIZYCZNA

ZAWODY II STOPNIA

CZEŚĆ DOŚWIADCZALNA, 19.02.2023

Za zadanie można otrzymać maksymalnie 40 punktów.

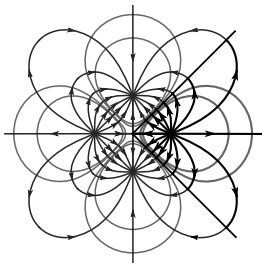
Masz do dyspozycji:

- płytkę o płaskiej powierzchni wykonaną z krzemu,
- polaryzator liniowy,
- czerwoną oraz niebieską diodę LED wraz z opornikami zabezpieczającymi przed przekroczeniem nominalnego prądu pracy diod,
- baterię oraz przewody połączeniowe,
- papier milimetrowy,
- rolkę taśmy klejącej,
- nożyczki.

Wyznacz kąt między osią polaryzacji polaryzatora (kierunkiem polaryzacji fali, dla którego jest ona najmniej tłumiona) a dłuższą jego krawędzią.

Krzem jest mało przezroczysty dla światła widzialnego, jednak może ono w nim pokonywać niewielkie odległości. Wyznacz wartości współczynnika załamania krzemu dla światła czerwonego oraz dla światła niebieskiego.

WSKAZÓWKA: Istnieje kąt (kąt Brewstera), pod jakim światło odbite od powierzchni dielektryka jest spolaryzowane liniowo. Wtedy promień odbity i promień załamany tworzą względem siebie kąt prosty, a oś polaryzacji światła odbitego jest równoległa do powierzchni dielektryka.



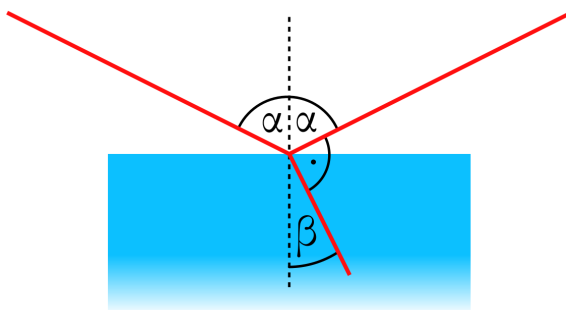
LXXII OLIMPIADA FIZYCZNA

ROZWIĄZANIA ZADAŃ ZAWODÓW II STOPNIA

CZĘŚĆ DOŚWIADCZALNA

Rozwiązanie zadania

Gdy światło biegnące przez ośrodek o współczynniku załamania n_0 pada na powierzchnię dielektryka o współczynniku załamania n pod kątem α (patrz: Rys. 1.),



Rys. 1. Schemat odbicia promienia światła od powierzchni dielektryka pod kątem Brewstera

wtedy zgodnie z prawem Snelliusa kąt załamania β jest opisany równaniem

$$n \sin \beta = n_0 \sin \alpha. \quad (1)$$

Współczynnik załamania światła dla powietrza jest bardzo bliski 1, co pozwala zapisać równanie (1) w formie

$$n \sin \beta = \sin \alpha. \quad (2)$$

Gdy odbicie zachodzi pod kątem Brewstera, wtedy promień załamany i odbity tworzą kąt prosty. W takim wypadku suma kątów α , β oraz kąta prostego musi tworzyć kąt półpełny:

$$\alpha + 90^\circ + \beta = 180^\circ, \quad (3)$$

czyli

$$\beta = 90^\circ - \alpha. \quad (4)$$

Podstawiając równanie (4) do równania (2) otrzymujemy:

$$n \sin (90^\circ - \alpha) = \sin \alpha. \quad (5)$$

Korzystając z tożsamości trygonometrycznej można zamienić $\sin (90^\circ - \alpha)$ na $\cos \alpha$:

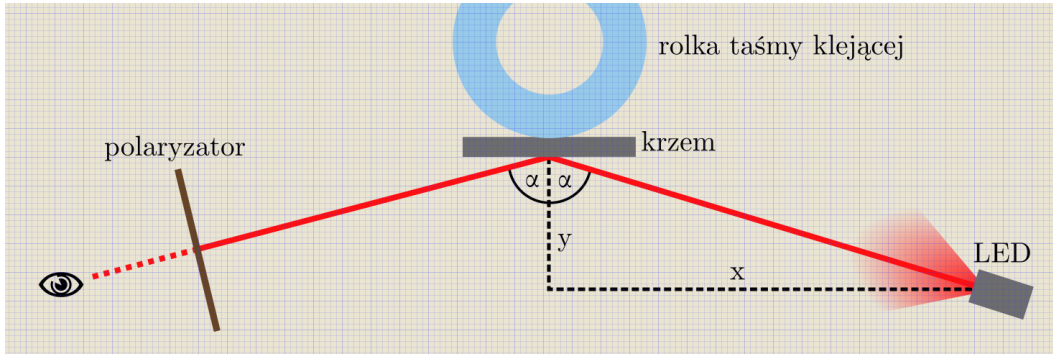
$$n \cos \alpha = \sin \alpha, \quad (6)$$

a następnie dzieląc stronami przez $\cos \alpha$ otrzymać:

$$n = \operatorname{tg} \alpha, \quad (7)$$

Równanie (7) pozwala na obliczenie współczynnika załamania badanego materiału na podstawie pomiaru kąta Brewstera. Po odbiciu pod kątem Brewstera światło jest spolaryzowane liniowo.

Przepuszczając światło przez polaryzator liniowy można sprawdzić, czy światło jest spolaryzowane liniowo, a zatem czy odbicie nastąpiło pod kątem Brewstera. Jeśli polaryzacja światła jest liniowa, to obracając polaryzator można dla pewnego kąta je w całości wygasić, co pozwala na zweryfikowanie, czy odbicie następuje pod kątem Brewstera.



Rys. 2. Metoda pomiaru kąta Brewstera, widok z góry

Jeśli powierzchnia płytki krzemowej, od której następuje odbicie światła jest ustawiona prostopadle do stołu oraz równoległe do linii papieru milimetrowego, wtedy szukany kąt Brewstera α można wyznaczyć odczytując z papieru milimetrowego odległości x oraz y (patrz Rys. 2).

Tangens kąta α wynosi wtedy

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{y}, \quad (8)$$

co po podstawieniu do równania (7) pozwala na odczytanie współczynnika załamania n :

$$n = \frac{x}{y}. \quad (9)$$

Równanie (9) można przekształcić do postaci równania prostej:

$$x = n \cdot y. \quad (10)$$

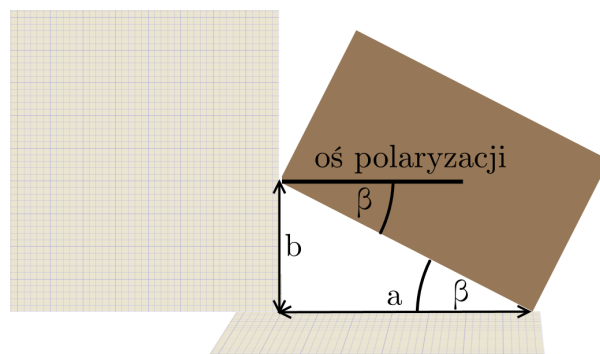
Po wykonaniu kilku pomiarów par y i odpowiadających im x , w położeniach spełniających warunków, że światło odbite jest spolaryzowane liniowo, można sporządzić wykres zależności odległości $x(y)$ i wyznaczyć współczynnik kierunkowy n metodą dopasowania prostej.

Po ustawieniu płytki krzemowej i diody świecącej tak, aby odbicie następowało pod kątem Brewstera oraz ustawieniu polaryzatora w kierunku maksymalnego wygaszenia przechodzącego światła można znaleźć kąt osi polaryzacji polaryzatora. W takich warunkach światło odbite od płytki krzemowej jest całkowicie spolaryzowane, a kierunek polaryzacji jest równoległy do płytki krzemowej, czyli pionowy. Aby wygasić w całości spolaryzowane pionowo światło polaryzator musi mieć poziomą oś polaryzacji. Kąt β pomiędzy osią polaryzacji polaryzatora, a jego dłuższą krawędzią można wyznaczyć mierząc odległości a oraz b zaznaczone na rysunku 3. W takiej sytuacji tangens kąta β wynosi

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{b}{a}, \quad (11)$$

a zatem kąt β ma wartość

$$\beta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{b}{a}. \quad (12)$$



Rys. 3. Pomiar kąta kierunku polaryzacji polaryzatora, widok z boku

Część doświadczalna

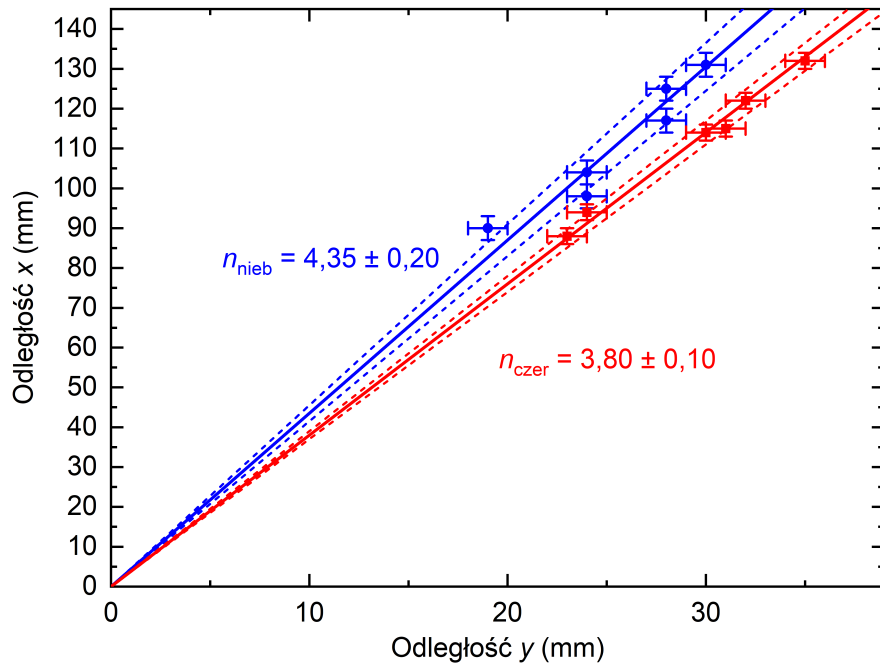
W celu dokładnego zmierzenia kąta Brewstera skonstruowano układ przedstawiony na rysunku 2. Na stole położono arkusz papieru milimetrowego i unieruchomiono go taśmą klejącą. Diode świecąca podłączono i przyklejono do baterii w taki sposób, aby świeciła w kierunku poziomym i znajdowała się na niewielkiej wysokości nad stołem. Następnie odwinęto fragment taśmy klejącej z rolki i nawinięto ją z powrotem tak, aby była skierowana klejącą stroną na zewnątrz. Przyklejono do niej płytkę krzemową, dzięki czemu pozostawała ona ustawiona pionowo oraz można było ją łatwo przemieszczać i obracać. Krzem przyklejono w taki sposób, aby po położeniu rolki na stole znajdował się na tej samej wysokości co dioda świecąca. Rolkę z płytką krzemową ustawiono tak, aby powierzchnia krzemu była równoległa do linii papieru milimetrowego (patrz Rys. 2). Aby upewnić się, że płytka jest ustawiona równolegle, dobrano jej położenie w taki sposób, aby obraz linii papieru milimetrowego w lustrzanej powierzchni krzemu był równoległy do linii papieru milimetrowego obserwowanych bezpośrednio.

Podczas pomiarów jedną ręką trzymano polaryzator, a drugą ręką diode świecąca przymocowaną do baterii. Głowę ustawiono nisko za krawędzią stołu, aby patrząc przez polaryzator widzieć odbłask diody świecącej w płytce krzemowej. Polaryzatorem oraz diode świecąca poruszano i obracano w taki sposób aby jak najbardziej wygasić widoczne odbicie światła od krzemu. Po znalezieniu kąta i położenia, dla których wygaszenie odbicia jest maksymalne upewniano się, że odbłask od krzemu jest widoczny na środku płytki krzemowej. Pozostawiono diode w tej pozycji a następnie odczytywano odległości x oraz y i nanoszono je na wykres (Rys. 4.). Pomiary powtórzono sześciokrotnie dla obu diod. Niepewność pomiaru odległości y oszacowano na 1 mm. Pomiar odległości x był mniej dokładny ze względu na niepewność określenia, kiedy odbicie światła następuje w środku płytki krzemowej, zatem jego niepewność określono na 2 mm.

Do danych pomiarowych dopasowano proste najlepszego dopasowania oraz skrajne proste obejmujące większość punktów pomiarowych, a następnie odczytano ich współczynniki kierunkowe otrzymując wartość współczynnika załamania krzemu dla światła niebieskiego (n_{nieb}) oraz dla światła czerwonego (n_{czer}):

$$n_{nieb} = 4,35 \pm 0,20. \quad (13)$$

$$n_{czer} = 3,80 \pm 0,10. \quad (14)$$



Rys. 4. Wyniki pomiarów wraz z prostą najlepszego dopasowania

Niepewność określenia wartości n_{nieb} oraz n_{czer} obliczono jako połowę różnicy między współczynnikami kierunkowymi skrajnych prostych.

Aby wyznaczyć kierunek osi polaryzacji polaryzatora użyto dwóch prostokątnych kawałków papieru milimetrowego (Rys. 3.) i zmierzono odległości a oraz b w pozycji największego wygaszenia. Pomiar powtórzono trzykrotnie, każdorazowo otrzymując wartości $a = 41$ mm oraz $b = 22$ mm. Niepewność pomiaru tych odległości oszacowano na wielkość podziałki papieru milimetrowego, czyli 1 mm. Korzystając z wzoru (12) obliczono kąt β pomiędzy osią polaryzacji polaryzatora a jego dłuższą krawędzią:

$$\beta = 28^\circ \pm 2^\circ. \quad (15)$$

Niepewność wyniku końcowego obliczono jako połowę różnicy między wartością β obliczoną dla b powiększonego a a pomniejszonego o wartości ich niepewności oraz wartością β obliczoną dla b pomniejszonego a a powiększonego o wartości ich niepewności.

Komentarz: Współczynnik załamania krzemu dla światła czerwonego o długości fali takiej jak w zestawie doświadczalnym, czyli 660 nm wynosi 3,84, a dla światła niebieskiego (o długości fali 460 nm) 4,58.

Punktacja

Pomysł na obliczenie współczynnika załamania na podstawie kąta Brewstera (wzór (7) lub równoważny)	3 pkt.
Pomysł na wyznaczenie współczynnika załamania (wzór (10) lub równoważny)	1 pkt.
Pomysł na wyznaczenie kąta pomiędzy osią polaryzacji polaryzatora a jego dłuższym bokiem (wzór (12) lub równoważny)	2 pkt.
Opis układu pomiarowego oraz procedury pomiaru	3 pkt.
Wykonanie pomiarów umożliwiających wyznaczenie współczynników załamania	2 pkt.
Co najmniej pięciokrotne powtórzenie pomiarów dla obu kolorów	1 pkt.
Wyznaczenie współczynnika załamania krzemu dla obu kolorów	3 pkt.
Otrzymanie wyników w zakresie 4,15-5,00 dla światła niebieskiego oraz 3,60-4,05 dla światła czerwonego	2 pkt.
Wyznaczenie kąta β	1 pkt.
Otrzymanie wyniku kąta β mieszczącego się w zakresie $25^\circ - 31^\circ$	1 pkt.
Ocena niepewności otrzymanych wyników	1 pkt.