

ĆWICZENIE 41
WYZNACZANIE WSPÓLCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA
ZA POMOCĄ MIKROSKOPU

Kraków, 2018

SPIS TREŚCI

I. CZĘŚĆ TEORETYCZNA	2
1. ŚWIATŁO	2
2. BADANIE FAL ELEKTROMAGNETYCZNYCH.....	2
3. ZAŁOŻENIA OPTYKI GEOMETRYCZNEJ	2
4. ODBICIE ŚWIATŁA	3
5. ZAŁAMANIE ŚWIATŁA.....	4
6. WSPÓLCZYNNIK ZAŁAMANIA ŚWIATŁA	4
7. PRZEJŚCIE ŚWIATŁA PRZEZ PŁYTKĘ RÓWNOLEGŁOŚCIENNĄ.....	5
7. METODY POMIARU WSPÓLCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA.....	6
<i>a). Metoda pomiaru współczynnika załamania światła za pomocą płytki równoległościennej</i>	<i>6</i>
<i>b) Pomiar współczynnika załamania metodą de Chaulnesa.</i>	<i>8</i>
8. MIKROSKOP	10
9. ZDOLNOŚĆ ROZDZIELCZA MIKROSKOPU	11
II. CEL ĆWICZENIA.....	11
III. WYKONANIE ĆWICZENIA.....	12
1. METODA PŁYTKI PŁASKORÓWNOLEGŁEJ:	12
2. METODA DE CHAULNESA:	12
IV. OPRACOWANIE WYNIKÓW.....	13
V. LITERATURA	14

Zakres wymaganych wiadomości:

Światło, założenia optyki geometrycznej. Odbicie i załamanie światła, współczynnik załamania światła. Metody pomiaru współczynnika załamania światła. Bieg promieni świetlnych w płytce płasko-równoległej. Budowa mikroskopu - bieg promieni, powiększenie, zdolność rozdzielcza mikroskopu. Wyprowadzenie wzoru na współczynnik załamania światła metodami stosowanymi w ćwiczeniu.

I. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Światło

Światłem nazywa się tą część całego widma fal elektromagnetycznych, które jest odbierane przez ludzkie oczy, czyli od około 400 nm do 750 nm. Prędkość światła w próżni jest jednakowa dla wszystkich długości fal i wynosi w przybliżeniu 300 000 km/s. W każdym ośrodku materialnym prędkość światła jest mniejsza niż w próżni. Dodatkowo, w konkretnym ośrodku materialnym zależy od długości fali - im większa długość fali, tym większa prędkość.

Światło jest nie tylko falą elektromagnetyczną. Jest równocześnie strumieniem cząstek zwanych fotonami. Światło ma zatem podwójną naturę: falowo - korpuskularną.

2. Badanie fal elektromagnetycznych

Podczas badania fal elektromagnetycznych można wyróżnić 3 przypadki:

a) długości fal są małe w porównaniu z wielkością przyrządów przeznaczonych do badania tych fal, a energie fotonów są dużo mniejsze niż czułość energetyczna przyrządów - tak jak w niniejszym doświadczeniu. Mówi się wtedy o tak zwanej **optyce geometrycznej**;

b) długości fal są porównywalne z wielkością przyrządów do pomiaru tych fal (np. dla fal radiowych), a energie fotonów można również pominąć. Mamy wtedy do czynienia z tzw. **klasyczną teorią promieniowania elektromagnetycznego**;

c) długości fal są bardzo małe i możemy pominąć charakter falowy promieniowania elektromagnetycznego. Fotony mają bardzo dużą energię w porównaniu z czułością energetyczną przyrządu. Wtedy dominuje **natura korpuskularna promieniowania elektromagnetycznego**, w tym również światła.

3. Założenia optyki geometrycznej

Badając zjawiska związane z rozchodzeniem się światła w ośrodkach optycznych, w których ulega ono m. in. odbiciu i załamaniu, możemy posłużyć się następującymi założeniami optyki geometrycznej:

a) **prostoliniowe rozchodzenia się promieni** świetlnych w ośrodkach jednorodnych, nie rozpraszających i przezroczystych;

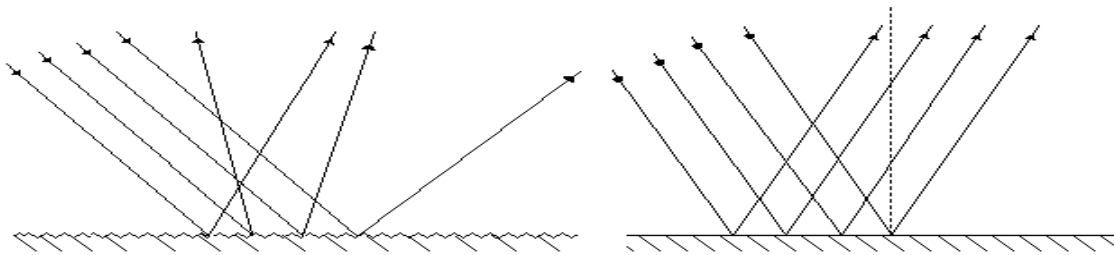
b) **nie zaburzony bieg promienia** przez przecinające się wiązki światła;

c) **odwracalność biegu promieni świetlnych**, co należy rozumieć w ten sposób, że jeżeli dowolny promień światła biegnie z punktu **A** do punktu **B** po pewnej drodze, to poruszając się od punktu **B** do **A** będzie biegł po tej samej drodze.

4. Odbicie światła

Przedmioty o nierównej powierzchni, na które pada równoległa wiązka światła, rozpraszają światło we wszystkich kierunkach. (rys.1).

Ciała o gładkiej powierzchni - zwane zwierciadłami - odbijają światło w jednym kierunku (rys.2).



Rys.1. Rozproszenie światła

Rys.2. Odbicie światła

Określenie "gładka powierzchnia" należy rozumieć w ten sposób, że rozmiary nierówności na tej powierzchni są mniejsze od długości fali świetlnej, czyli mniejsze od około $1\ \mu\text{m}$.

Zjawiskiem odbicia światła rządzi **prawo odbicia światła**, które można sformułować w następujący sposób:

Promień padający i odbity oraz prostopadła do powierzchni poprowadzona w punkcie odbicia leżą w jednej płaszczyźnie, a kąt odbicia równy jest kątowi padania (rys. 3).

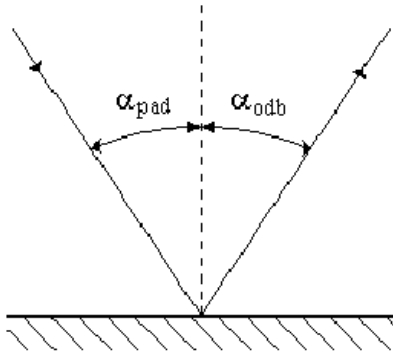
$$\alpha_{\text{pad}} = \alpha_{\text{odb.}} \quad (1)$$

Kąt padania to kąt zawarty między promieniem padającym i prostopadłą do powierzchni w punkcie padania, a kąt odbicia to kąt między tą prostopadłą a promieniem odbitym.

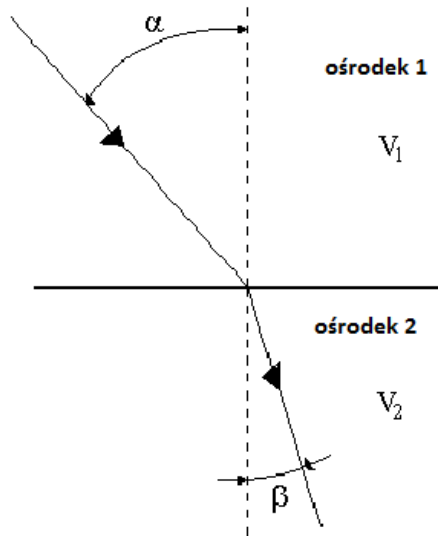
(Prostą prostopadłą do powierzchni poprowadzoną w punkcie odbicia nazywa się *prostą normalną*.)

5. Załamanie światła

Jeżeli światło przechodzi z jednego ośrodka do drugiego, np. z powietrza do wody, ulega załamaniu na granicy ośrodków. (rys.4).



Rys.3. Odbicie światła



Rys.4. Załamanie światła

Zjawisko to opisuje prawo **załamania światła**, czyli **prawo Snella**:

Promień padający, załamany oraz prosta prostopadła do powierzchni w punkcie załamania (czyli prosta normalna) leżą w jednej płaszczyźnie, a stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania jest wielkością stałą dla tych ośrodków i dla danej długości fali:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{const.} \quad (2)$$

6. Współczynnik załamania światła

Rozróżniamy względny i bezwzględny współczynnik załamania światła.

Względny współczynnik załamania światła ośrodka drugiego względem pierwszego oznacza się jako n_{21} i definiuje następująco:

$$n_{21} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}. \quad (3)$$

Względny współczynnik załamania światła można również zapisać inaczej:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2}, \quad (4)$$

gdzie v_1 i v_2 są to prędkości rozchodzenia się światła odpowiednio w ośrodku pierwszym i drugim (patrz rys.4).

Bezwzględny współczynnik załamania danego ośrodka jest to współczynnik załamania tego ośrodka względem próżni. Oznacza się go przez n i można go wyrazić wzorem:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (5)$$

gdzie c jest prędkością rozchodzenia się światła w próżni, a v - prędkością rozchodzenia się światła w danym ośrodku.

Można wykazać, że względny współczynnik załamania ośrodka drugiego względem pierwszego jest równy stosunkowi ich bezwzględnych współczynników załamania:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_1 \cdot c}{v_2 \cdot c} = \frac{v_1}{c} \cdot \frac{c}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (6)$$

Z zasady odwracalności biegu promieni świetlnych wynika kolejna zależność:

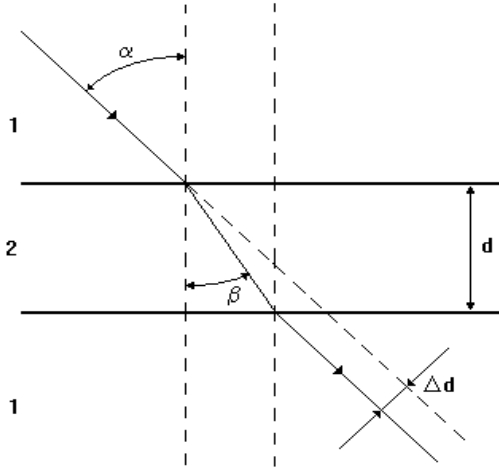
$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}. \quad (7)$$

Współczynnik załamania światła jednego ośrodka względem drugiego zależy od długości fali. Zależność ta nazywana jest **zjawiskiem dyspersji światła**.

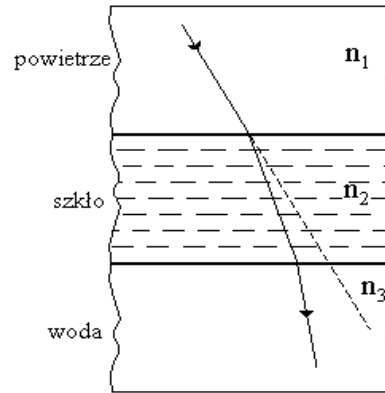
Współczynnik załamania światła zależy również od stanu ośrodków - np. od ich temperatury i ciśnienia.

7.Przejsięcie światła przez płytkę płasko-równoległościenną.

Światło przechodzi często przez płytki płasko-równoległościenne jakimi są np. szyby. Jeżeli po obu stronach płytki płasko-równoległościennej są dwa jednakowe ośrodki (np. powietrze), to promień wychodzący jest równoległy do promienia padającego (rys. 5). Jeżeli jednak po obu stronach płytki równoległościennej są dwa różne ośrodki (np. powietrze i woda), to promień światła w wodzie nie jest równoległy do promienia światła w powietrzu. (Rys.6)



Rys.5. Przejście światła przez płytkę płasko-równoległościenną.



Rys.6. Przejście światła przez płytkę szklaną z powietrza do wody.

Przesunięcie promienia Δd (rys. 5) zależy od grubości płytki d , kąta padania α oraz od współczynnika załamania światła n materiału płytki

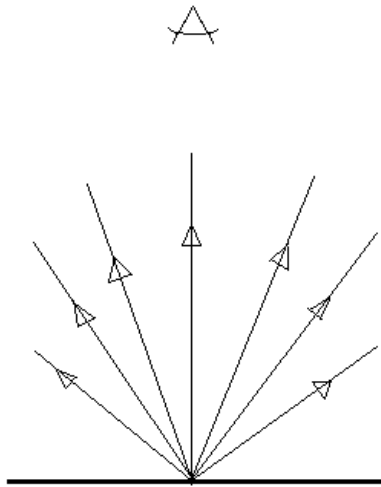
8. Metody pomiaru współczynnika załamania światła

Metody pomiarów współczynnika załamania światła możemy podzielić na cztery grupy:

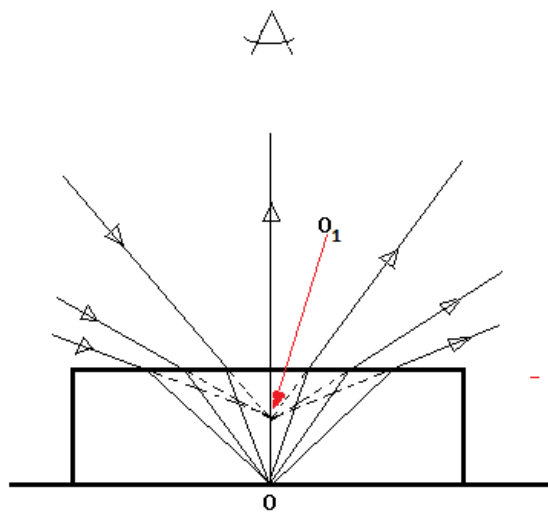
- *metody spektrometryczne* (Fraunhofera, Rydberg-Martensa, Abbego i inne). Materiał badany musi mieć kształt pryzmatu. W metodach tych współczynnik załamania światła jest przedstawiony jako funkcja kąta łamiącego pryzmatu i kąta odchylenia pryzmatu.
- *metody opierające się na pomiarze kąta granicznego* (zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia). Metoda ta wymaga stosowania światła monochromatycznego.
- *metody interferencyjne* (interferometry: Rayleigha, Jamina i inne). Umożliwiają pomiar współczynnika załamania światła również gazów i cieczy.
- *metody pomiaru wykorzystujące poosiowe przesunięcie obrazu, utworzonego przez płytkę płasko-równoległą*, z których dwie zostaną omówione poniżej.

a) Metoda pomiaru współczynnika załamania światła za pomocą płytki równoległościennej

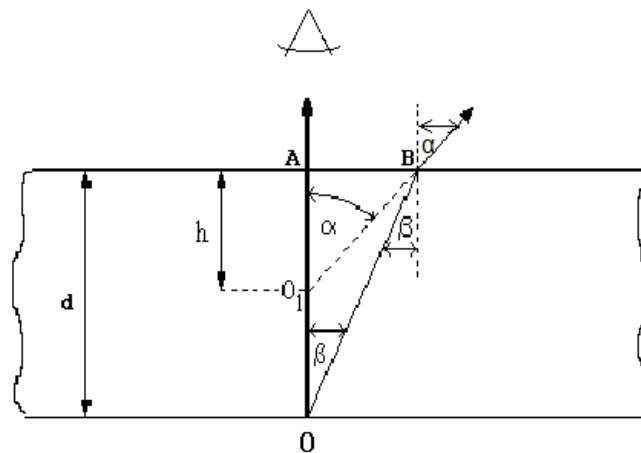
Każdy punkt oświetlonej powierzchni wysyła światło odbite (rys.7). Jeżeli oświetlimy płytkę równoległościenną (rys.8), również punkt O leżący na dolnej powierzchni będzie wysyłał światło odbite. Obserwując światło odbite, zobaczymy pozorny obraz punktu O w punkcie O_1 .



Rys.7. Promienie odbite wysyłane przez punkt oświetlonej powierzchni.



Rys.8. Pozorny obraz punktu O w punkcie O_1 .



Rys.9. Bieg promieni odbitych wychodzących z punktu O.

Jeżeli umieścimy oko na wprost punktu A (rys. 9), znajdującego się na górnej powierzchni szklanej płytki, to punkt O na dolnej powierzchni tej płytki będzie się wydawał położony w punkcie O_1 , tzn. bliżej punktu A. Punkt O_1 jest pozornym obrazem punktu O. Aby znaleźć

zależność między OA (rzeczywistą grubością płytki oznaczoną przez d) i O_1A (grubością pozorną h) należy rozpatrzyć dwa promienie wychodzące z punktu O .

Promień OA prostopadły do górnej powierzchni płytki przechodzi przez nią bez załamania. Promień OB pada na górną powierzchnię płytki pod kątem β i wychodzi z niej załamując się pod kątem α . Przedłużeniem tego promienia wychodzącego jest linia przerywana O_1B , która daje w miejscu przecięcia z promieniem OA obraz O_1 . Promień OB przechodzi ze szkła do powietrza, ale ze względu na zasadę odwracalności biegu promieni, można zapisać, że:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, \quad (9)$$

gdzie n oznacza współczynnik załamania światła szkła względem powietrza. W trójkącie prostokątnym ABO_1 kąt AO_1B jest równy α , więc:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{AB}{h}. \quad (10)$$

Podobnie kąt BOA w trójkącie ABO jest równy β , czyli:

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{AB}{d}. \quad (11)$$

Po podzieleniu stronami równania (10) przez (11) można otrzymać:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{d}{h}. \quad (12)$$

W warunkach obserwacji wiązka światła wychodząca z punktu O jest mało rozbieżna, tzn., że kąty α i β są małe. Można więc tangensy tych kątów zastąpić z dobrym przybliżeniem poprzez sinusy. Równanie (12) przyjmie wtedy następującą postać:

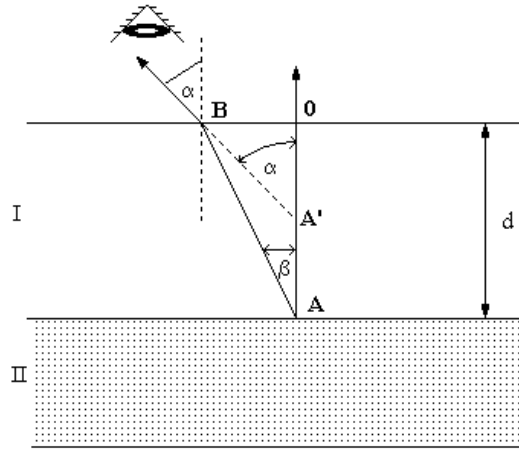
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{d}{h} = n. \quad (13)$$

Zależność (12) pozwala wyznaczyć w prosty sposób współczynnik załamania światła za pomocą mikroskopu, który posłuży do wyznaczenia h , gdyż d można zmierzyć np. śrubą mikrometryczną.

b) Pomiar współczynnika załamania metodą *de Chaulnesa*.

Metoda *de Chaulnesa* opiera się na pomiarze wielkości poosiowego przesunięcia obrazu, utworzonego przez płytkę płasko-równoległą. Rys.10 przedstawia dwie płytki: płytkę **I**, której współczynnik załamania wyznaczamy i płytkę **II** - która jest płytką pomocniczą i ma zaznaczony

punkt A na jednej powierzchni. Jeżeli płytkę pomocniczą (II) umieścimy na stoliku mikroskopu, powierzchnią z zaznaczonym punktem A do góry, to po położeniu na płytkę pomocniczą płytki badanej (I) o grubości d , punkt A będzie widoczny w punkcie A' w wyniku załamania promieni światła w płytce badanej I. Z rys.10 widać:



Rys.10.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{BO}{OA'} \quad \text{oraz} \quad \operatorname{tg} \beta = \frac{BO}{OA}. \quad (14)$$

Dzieląc stronami równania (14) otrzymamy:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{OA}{OA'}. \quad (15)$$

Oznaczając $AA' = \Delta s$, można zapisać:

$$OA' = OA - AA' = d - \Delta s. \quad (16)$$

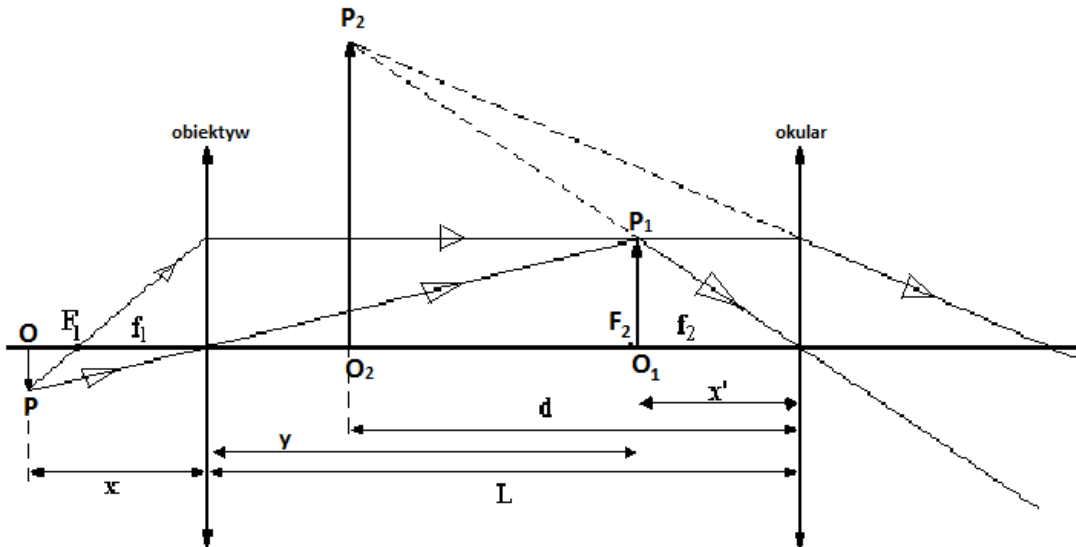
Zatem dla małych kątów padania promieni na płytkę:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg} \beta} \approx \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = \frac{d}{d - \Delta s}, \quad (17)$$

gdzie: n - współczynnik załamania szkła, z którego wykonano płytkę, d - grubość rzeczywista płytki, Δs - wielkość popoziowego przesunięcia obrazu utworzonego przez płytkę płasko-równoległą. Pomiar tego przesunięcia wykonujemy za pomocą mikroskopu wyposażonego w śrubę mikrometryczną do mierzenia popoziowego przesunięcia tubusa mikroskopu.

8. Mikroskop

Mikroskop jest przyrządem optycznym składającym się z dwóch soczewek skupiających: obiektywu i okularu (rys.11) umieszczonych w odległości L , posiadających wspólną oś optyczną. (Aby wyeliminować wady pojedynczej soczewki, i obiektyw i okular zbudowane są w rzeczywistości z wielu soczewek). Obiektyw daje obraz rzeczywisty, odwrócony i powiększony, a okular, spełniający rolę lupy, daje obraz pozorny, prosty i powiększony. Przedmiot OP umieszcza się przed obiektywem, w odległości niewiele większej od jego ogniskowej f_1 , można więc przyjąć, że $x \cong f_1$. Obraz O_1P_1 wytworzony przez obiektyw powstaje w odległości x' od okularu, niewiele mniejszej od ogniskowej f_2 okularu,



Rys.11. Mikroskop.

czyli $x' \cong f_2$. Natomiast obraz wytworzony przez okular O_2P_2 powstaje w odległości dobrego widzenia $y' = d$. Ponieważ ogniskowe soczewek są małe, możemy przyjąć, że obraz otrzymany za pomocą obiektywu powstaje w odległości $y \cong L$, gdzie L jest długością tubusa mikroskopu, czyli odległością obiektywu od okularu.

Powiększenie p mikroskopu

$$p = \frac{O_2 P_2}{OP} \quad (18)$$

przy przybliżeniach opisanych powyżej można wyrazić poniższym wzorem:

$$p = p_1 p_2 = \frac{O_1 P_1}{OP} \cdot \frac{O_2 P_2}{O_1 P_1} = \frac{y}{x} \cdot \frac{y'}{x'} \approx \frac{Ld}{f_1 f_2} \quad (19)$$

gdzie p_1 i p_2 to odpowiednio powiększenie obiektywu i okularu.

9. Zdolność rozdzielcza mikroskopu

Każdy przyrząd optyczny, a więc i mikroskop, charakteryzuje się tzw. zdolnością rozdzielczą, czyli wielkością informującą jak małe szczegóły badanego ciała możemy nim zobaczyć. Wartość graniczna zdolności rozdzielczej wiąże się z takimi zjawiskami, jak dyfrakcja, czy interferencja światła. Odpowiednie obliczenia uwzględniające te zjawiska prowadzą do poniższego wzoru na zdolność rozdzielczą mikroskopu:

$$d_{min} = 0.61 \frac{\lambda}{n \sin \varphi}, \quad (20)$$

gdzie: d_{min} - minimalna odległość dwóch punktów, przy której punkty te są widziane oddzielnie,

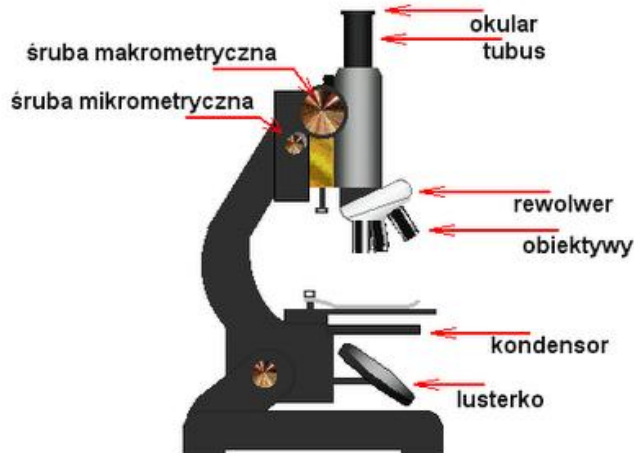
n - współczynnik załamania ośrodka między przedmiotem, a obiektywem mikroskopu (najczęściej jest to powietrze),

φ - tzw. kąt rozwartości optycznej obiektywu, czyli kąt pomiędzy osią optyczną soczewki obiektywu, a najbardziej skrajnym promieniem wpadającym do tej soczewki.

Jeżeli pomiędzy przedmiotem a obiektywem mikroskopu znajduje się jakaś ciecz o dużym współczynniku załamania światła, o wartości bliskiej współczynnikowi załamania szkła, to mikroskop rozróżnia punkty przedmiotu leżące bliżej siebie, czyli możemy pod takim mikroskopem zobaczyć więcej szczegółów badanego przedmiotu. Ciecze takie nazywamy **cieczami immersyjnymi**.

II. CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie za pomocą mikroskopu współczynnika załamania światła n kilku płytek wykonanych ze szkła i z tworzywa sztucznego.



Rys. 2 Podstawowe elementy mikroskopu optycznego.

III. WYKONANIE ĆWICZENIA

Część A: Metoda pomiaru grubości pozornej płytki płasko-równoległej.

(Płytkę o grubości mniejszej niż 2.5 mm wskazuje prowadzący zajęcia.)

- a) Zmierzyć pięciokrotnie śrubą mikrometryczną grubość rzeczywistą d płytki. Pomiarów zanotować jako d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 .
- b) Zmierzyć za pomocą mikroskopu grubość pozorną h płytki:
 1. Umieścić badaną płytkę na stoliku mikroskopu, a pokrętkę śruby mikrometrycznej (małe pokrętko) przekręcić **lewoskrętnie** do oporu.
 2. Włączyć lampę podświetlającą i lusterkiem umieszczonym w podstawie mikroskopu doprowadzić do możliwie najlepszego oświetlenia pola widzenia w okularze mikroskopu.
 3. Przy pomocy pokrętki śruby makrometrycznej (duże pokrętko) uzyskać ostry obraz górnej powierzchni płytki (kreski wykonanej na górnej powierzchni). Przeprowadzić korektę ustawienia płytki na stoliku tak, aby w polu widzenia udało się również zaobserwować nieostry obraz kreski na dolnej powierzchni płytki.

4. Włączyć cyfrowy licznik obrotów. Przy pomocy pokręta śruby mikrometrycznej (małe pokrętko), kręcąc prawoskrętnie, uzyskać ostry obraz dolnej powierzchni płytki. Zanotować wskazanie licznika obrotów **N**.
5. Obliczyć grubość pozorną **h** płytki ze wzoru:

$$h = N \cdot 2.082 \cdot 10^{-3} \text{ mm.} \quad 2)$$

Powtórzyć pomiar jeszcze czterokrotnie uzyskując wyniki **h₁, h₂, h₃, h₄, h₅**.

Uwaga: Wskazanie licznika obrotów zeruje się każdorazowo przyciskiem Zerowanie.

- c) Czynności opisane w punkcie **a** i **b** powtórzyć dla płytek wskazanych przez prowadzącego.

OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Obliczyć wartości średnie **d_{sr}** i **h_{sr}**.
2. Obliczyć współczynnik załamania światła **n** dla badanych płytek korzystając ze wzoru:

$$n = \frac{d_{sr}}{h_{sr}} \quad 3)$$

IV. ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIAROWYCH

1. Obliczyć niepewności standardowe średnich **d_{sr}** i **h_{sr}** jako eksperymentalne odchylenia standardowe średnich $S_{d_{sr}}$ oraz $S_{h_{sr}}$ korzystając ze wzoru (3) we "Wprowadzeniu do metod opracowania wyników pomiarowych":

$$u(d_{sr}) = S_{d_{sr}} = \sqrt{\frac{(d_1 - d_{sr})^2 + (d_2 - d_{sr})^2 + \dots + (d_5 - d_{sr})^2}{5(5-1)}} \quad 4)$$

$$u(h_{sr}) = S_{h_{sr}} = \sqrt{\frac{(h_1 - h_{sr})^2 + (h_2 - h_{sr})^2 + \dots + (h_5 - h_{sr})^2}{5(5-1)}} \quad 5)$$

2. Obliczyć złożoną niepewność standardową pomiaru pośredniego **n**, korzystając ze wzoru (12) we "Wprowadzeniu do":

Wskazówka: Najpierw przedstawić współczynnik załamania n (wzór 3 powyżej) w postaci iloczynu potęg (wzór (10) we "Wprowadzeniu do").

3. Zaokrąglić uzyskaną wartość $u(n)$ oraz wynik n wg zasad przedstawionych we "Wprowadzeniu do...".

Część B: Metoda de Chaulnesa (dla płytek o grubości przekraczającej 2.5mm)

a) Zmierzyć pięciokrotnie śrubą mikrometryczną rzeczywistą grubość płytki d .

b) Zmierzyć odległość Δs (różnica pomiędzy grubością rzeczywistą a pozorną płytki):

1. Na stoliku mikroskopu położyć płytkę pomocniczą z naniesioną na **górnej** powierzchni kreską. Na płycie pomocniczej umieścić płytkę badaną.

2. Pokręćło śruby mikrometrycznej (małe pokręćło) przekręcić lewoskrętnie do oporu.

Wyzerować wskazanie licznika obrotów. Przy pomocy pokręćła śruby makrometrycznej (duże pokręćło) uzyskać ostry obraz górnej powierzchni płytki pomocniczej (kreski na jej górnej powierzchni).

3. Usunąć **badaną płytkę** i przy pomocy pokręćła śruby mikrometrycznej (małe pokręćło), kręcąc prawoskrętnie, uzyskać ponownie ostry obraz górnej powierzchni płytki pomocniczej.

4. Zanotować wskazanie N licznika obrotów i obliczyć wielkość osiowego przesunięcia Δs :

$$\Delta s = N \cdot 2.082 \cdot 10^{-3} \text{ mm} \quad 6)$$

Pomiar powtórzyć czterokrotnie.

OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Obliczyć wartości średnie d_{sr} i Δs_{sr} .

2. Obliczyć współczynnik załamania światła n dla wszystkich badanych płytek korzystając ze wzoru:

$$n = \frac{d_{sr}}{d_{sr} - \Delta s_{sr}} \quad 7)$$

ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIAROWYCH

1. Obliczyć niepewności standardowe średnich \mathbf{d}_{sr} i $\Delta\mathbf{s}_{sr}$ jako eksperymentalne odchylenia standardowe średnich $S_{d_{sr}}$ oraz $S_{\Delta s_{sr}}$ analogicznie jak w metodzie pierwszej.
2. Obliczyć złożoną niepewność standardową pomiaru pośredniego \mathbf{n} , korzystając ze wzoru (9) we "Wprowadzeniu do":

$$u(n) = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial d_{sr}}\right)^2 u^2(d_{sr}) + \left(\frac{\partial n}{\partial (\Delta s_{sr})}\right)^2 u^2(\Delta s_{sr})} \quad 8)$$

3. Zaokrąglić uzyskaną wartość $\mathbf{u(n)}$ oraz wynik \mathbf{n} wg zasad przedstawionych we "Wprowadzeniu do...".

V. Literatura

1. Chyla K., Fizyka dla ZSZ
2. Crawford F.C., Fale s. 184-200
3. Feynman R.P., Feynmana wykłady z fizyki T.1, część 2, s. 11-38, 77-93
4. Hanc T. Pomiarzy optyczne, WNT, W-wa 1964, s. 130-131
5. Herman M. i in., Podstawy Fizyki, PWN W-wa 1980, s. 397-404, 419-420
6. Massalscy M., J., Fizyka dla kl. IV, s. 38-51, 77-78, 99-102
7. Halliday D., Resnick R., Fizyka T.2, s. 418-428, wyd. 8, 1994