

ĆWICZENIE 41
WYZNACZANIE WSPÓLCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA
ZA POMOCĄ MIKROSKOPU

Kraków, 2019

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
a) <i>Metoda pomiaru współczynnika załamania światła za pomocą płytki równoległościennej</i>	6
b) <i>Pomiar współczynnika załamania metodą de Chaulnesa.</i>	8
8. MIKROSKOP	10
9. ZDOLNOŚĆ ROZDZIELCZA MIKROSKOPU	11
II. CEL ĆWICZENIA	11
III. WYKONANIE ĆWICZENIA	12
1. METODA PŁYTKI PŁASKORÓWNOLEGLEJ:	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 płycie 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;

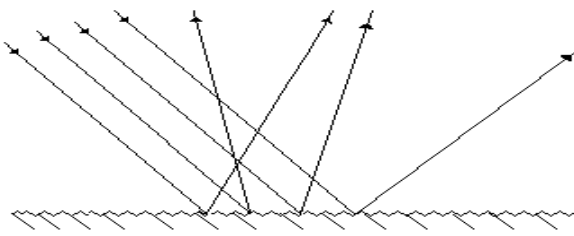
b) **nie zaburzony bieg promienia** przez przecinające się wiązki światła;

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.

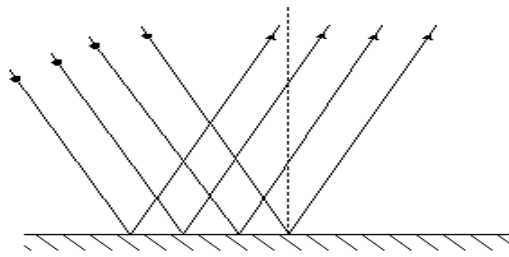
4. Odbicie światła

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).

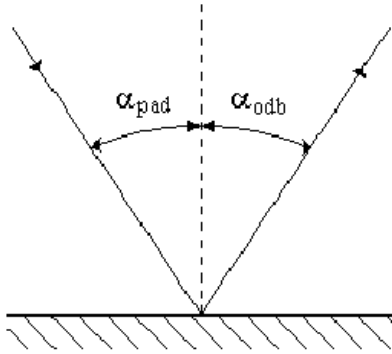
$$\alpha_{\text{pad}} = \alpha_{\text{odb.}} \quad (1)$$

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.

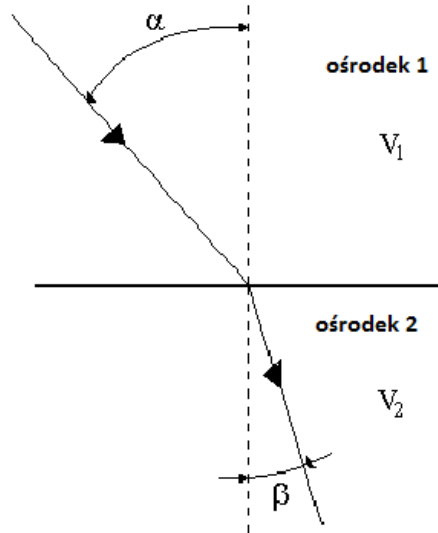
(Prostą prostopadłą do powierzchni poprowadzoną w punkcie odbicia nazywa się *prostą normalną*.)

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:

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

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:

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

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:

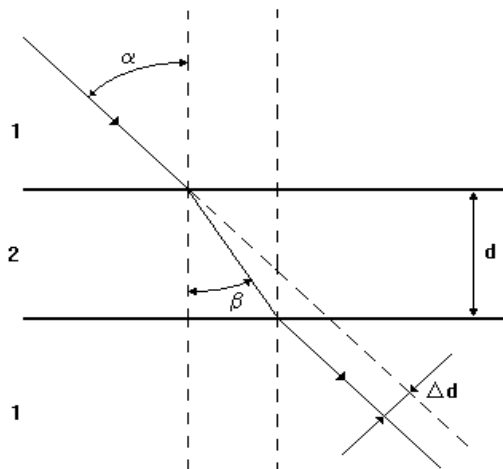
$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}. \quad (7)$$

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

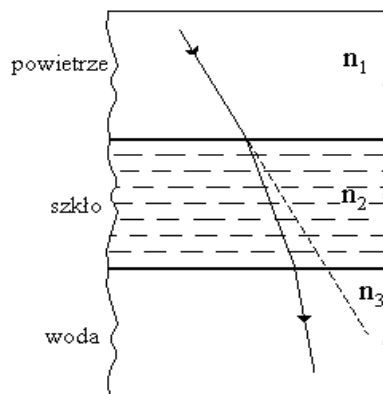
Współczynnik załamania światła zależy również od stanu ośrodków - np. od ich temperatury i ciśnienia.

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.Przejsięcie światła przez płytkę płasko-równoległościenną.



Rys.6.Przejsięcie 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

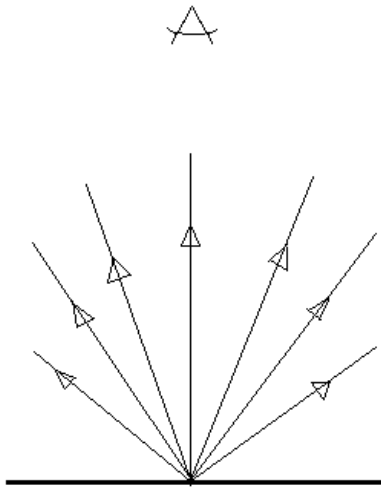
8. Metody pomiaru współczynnika załamania światła

Metody pomiarów współczynnika załamania światła możemy podzielić na cztery grupy:

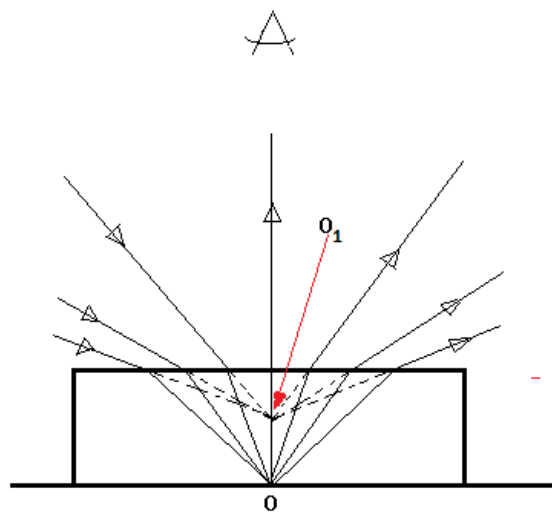
- *metody spektrometryczne* (Fraunhofera, Rydberg-Martensa, Abbego i inne). Materiał badany musi mieć kształt pryzmatu. W metodach tych współczynnik załamania światła jest przedstawiony jako funkcja kąta łamiącego pryzmatu i kąta odchylenia pryzmatu.
- *metody opierające się na pomiarze kąta granicznego* (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

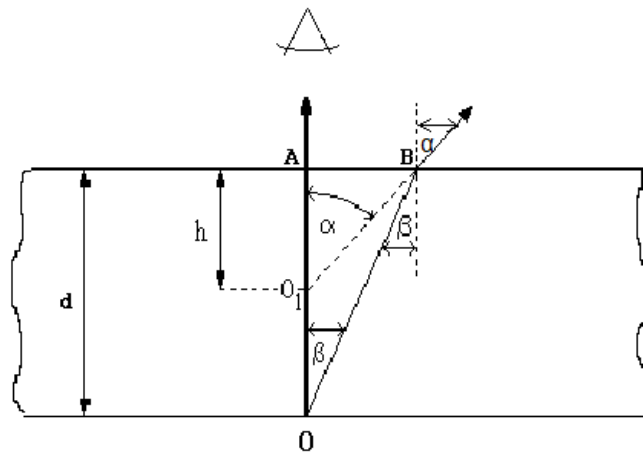
Każdy punkt oświetlonej powierzchni wysyła światło odbite (rys.7). Jeżeli oświetlimy płytkę równoległościenną (rys.8), również punkt O leżący na dolnej powierzchni będzie wysyłał światło odbite. Obserwując światło odbite, zobaczymy pozorny obraz punktu O w punkcie O_1 .



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:

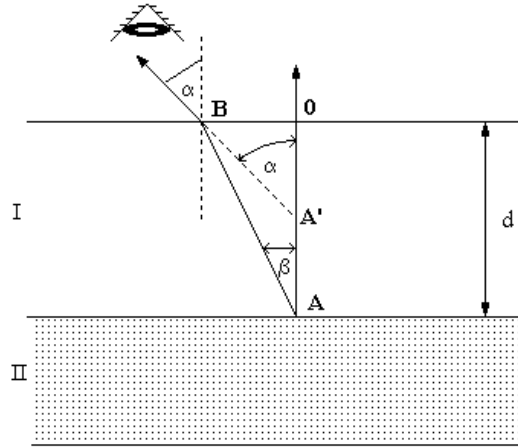
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{d}{h} = n. \quad (13)$$

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:

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

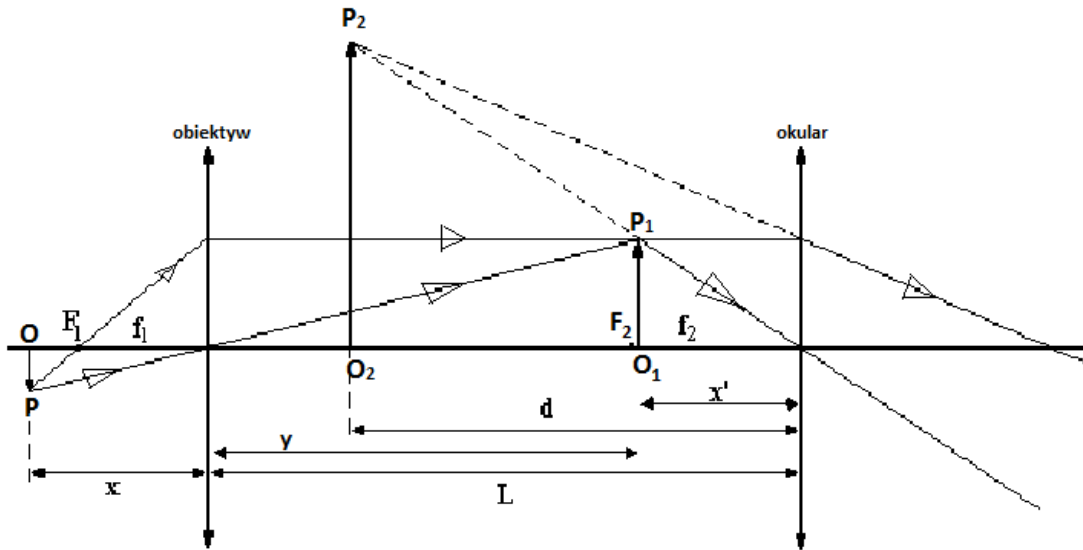
Zatem dla małych kątów padania promieni na płytkę:

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

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

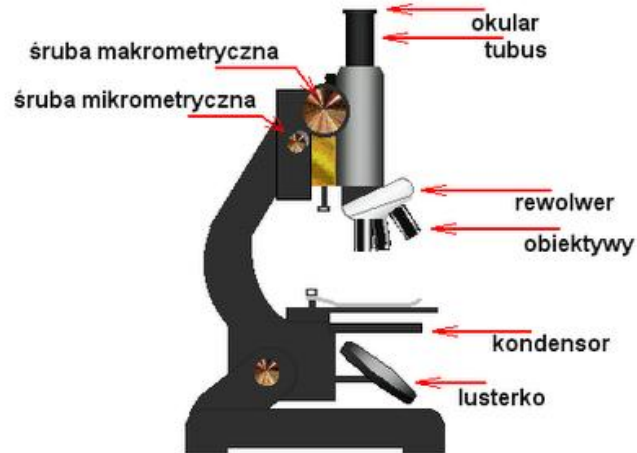
n - współczynnik załamania ośrodka między przedmiotem, a obiektywem mikroskopu (najczęściej jest to powietrze),

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.

V. Literatura

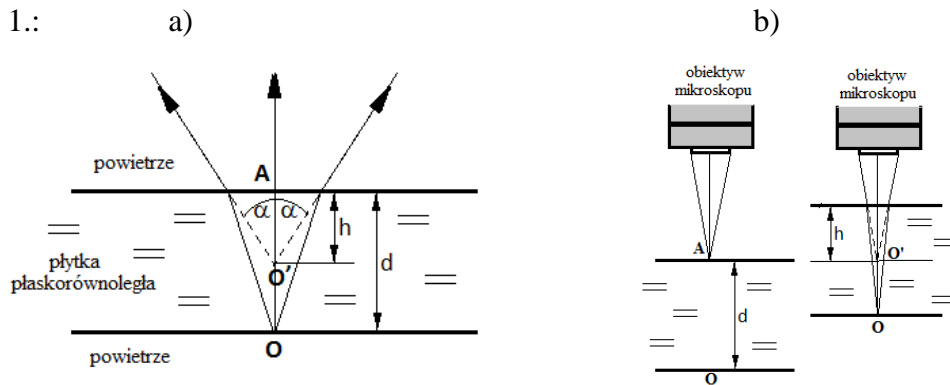
1. Chyla K., Fizyka dla ZSZ
2. Crawford F.C., Fale s. 184-200
3. Feynman R.P., Feynmana wykłady z fizyki T.1, część 2, s. 11-38, 77-93
4. Hanc T. Pomiary optyczne, WNT, W-wa 1964, s. 130-131
5. Herman M. i in., Podstawy Fizyki, PWN W-wa 1980, s. 397-404, 419-420
6. Massalscy M., J., Fizyka dla kl. IV,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

41 WYZNACZANIE WSPÓLCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA ZA POMOCĄ MIKROSKOPU.

I. ZASADA POMIARU

Jeżeli oko umieścimy na wprost punktu **A** (Rys. 1a), znajdującego się na górnej powierzchni przezroczystej płytki płaskorównoległej, to punkt **O** na dolnej powierzchni tej płytki będzie się wydawał położony w punkcie **O'**, tzn. bliżej punktu **A**. Odległość **OA** jest to *rzeczywista grubość* płytki d , natomiast odległość **O'A** jest to tzw. *pozorna grubość* płytki h .

Rys. 1.:



Można udowodnić, że dla promieni przyosiowych ($\alpha \rightarrow 0$) iloraz tych dwu łatwo mierzalnych wielkości - grubości rzeczywistej d i grubości pozornej h - jest równy współczynnikowi załamania światła n badanej płytki względem powietrza:

$$n = d/h \quad 1)$$

Grubość pozorną h badanej płytki można wyznaczyć przy pomocy mikroskopu mierząc mikrometrem pionowy przesuw płytki konieczny do uzyskania ostrego obrazu raz dolnej, a raz górnej powierzchni płytki (Rys.1 b).

II. CEL ĆWICZENIA

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

III. WYKONANIE ĆWICZENIA

A) Zmierzyć **pięciokrotnie** zegarowym czujnikiem mikrometrycznym grubość rzeczywistą d płytki (płytkę wskazuje prowadzący zajęcia):

1. Włączyć mikrometr sensorem (ON/OFF).
2. Unosząc do góry końcówkę trzpienia pomiarowego umieścić badaną płytkę na stoliku mikroskopu pod końcówką pomiarową mikrometru.
3. Wyzerować wskazanie mikrometru sensorem ZERO.
4. Przytrzymując trzpień pomiarowy wyjąć badaną płytkę i delikatnie opuścić go na powierzchnię stolika mikroskopowego.
5. Zanotować wskazanie mikrometru.
6. Powtórzyć czynności od 2. do 5. czterokrotnie. Wyniki pomiarów zanotować jako d_1, d_2, \dots, d_5 .

B) Zmierzyć pięciokrotnie zegarowym czujnikiem mikrometrycznym grubość pozorną h płytki:

1. Umieścić badaną płytkę w uchwycie stolika mikroskopu.
2. Włączyć lampę podświetlającą i uregulować binokular do rozstawu własnych oczu.
3. Przy pomocy pokręteł przesuwu stolika wzdłuż osi x, y, z 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. Wyzerować wskazanie mikrometru sensorem ZERO. Przy pomocy pokręteł przesuwu stolika wzdłuż osi z uzyskać ostry obraz dolnej powierzchni płytki. Zanotować wskazanie mikrometru h .
5. Powtórzyć pomiar jeszcze czterokrotnie uzyskując wyniki h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 .
6. Wyłączyć mikrometr i oświetlenie mikroskopu.

IV. OPACOWANIE WYNIKÓW

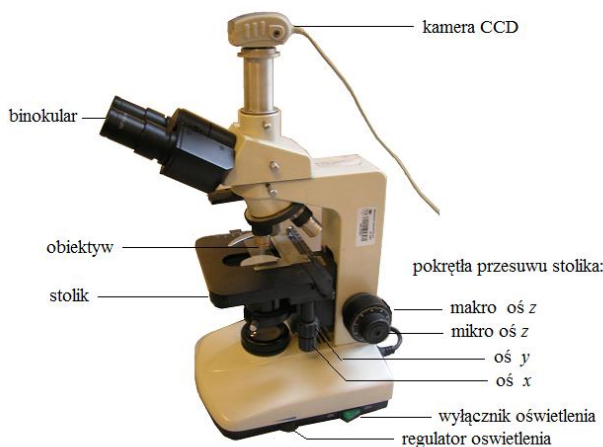
1. Obliczyć wartości średnie d_{sr} i h_{sr} .
2. Obliczyć współczynnik załamania światła n dla badanych płytek korzystając ze wzoru (1).

V. ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIAROWYCH

1. Obliczyć niepewności standardowe średnich d_{sr} i h_{sr} jako eksperymentalne odchylenia standardowe średnich $u(d_{sr})$ oraz $u(h_{sr})$ korzystając ze wzoru (3) we "Wprowadzeniu do metod opracowania wyników pomiarowych":
2. Obliczyć złożoną niepewność standardową pomiaru pośredniego n , korzystając ze wzoru (12) we "Wprowadzeniu do ...":
3. Zaokrąglić uzyskaną wartość $u(n)$ oraz wynik n wg zasad przedstawionych we "Wprowadzeniu do...".



Rys.2 Cyfrowy czujnik zegarowy.



Mikroskop pomiarowy z kamerą CCD.

Uwaga: Możliwa jest obserwacja obrazu z mikroskopu na ekranie komputera.
O sposobie prowadzenia pomiaru decyduje prowadzący zajęcia.