

Józef Zaplotny, Maria Nowotny-Róžańska

Zakład Fizyki, Uniwersytet Rolniczy

Do użytku wewnętrznego

ĆWICZENIE 41

WYZNACZANIE WSPÓLCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA ZA POMOCĄ MIKROSKOPU

Kraków, 2016

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 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 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;

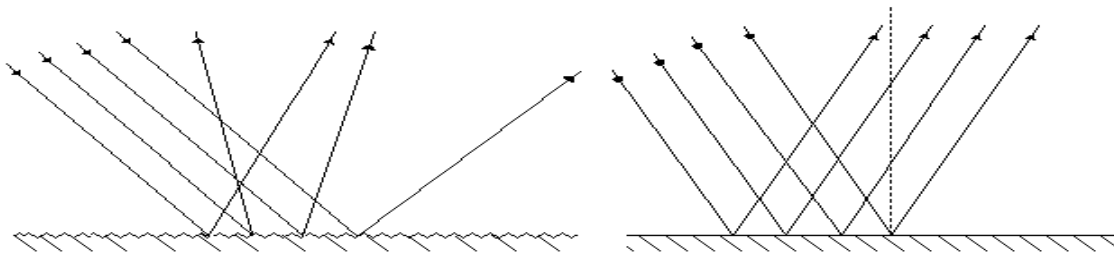
b) **nie zaburzony bieg promienia** przez przecinające się wiązki światła;

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).

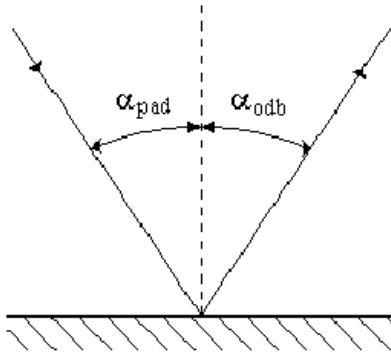
$$\alpha_{\text{pad}} = \alpha_{\text{odb.}} \quad (1)$$

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.

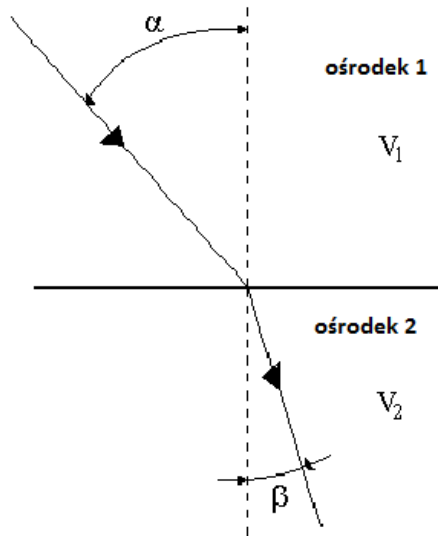
(Prostą prostopadłą do powierzchni poprowadzoną w punkcie odbicia nazywa się *prostą normalną*.)

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:

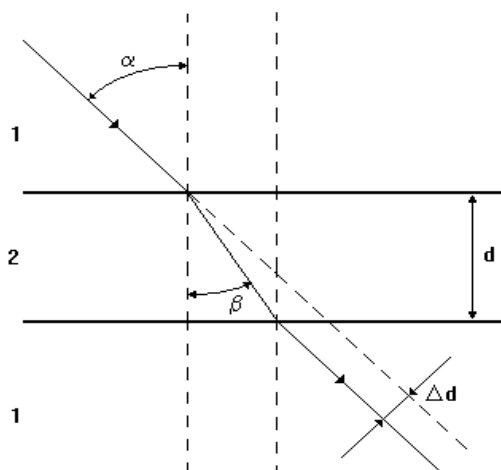
$$n_{21} = \frac{1}{n_{12}}. \quad (7)$$

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

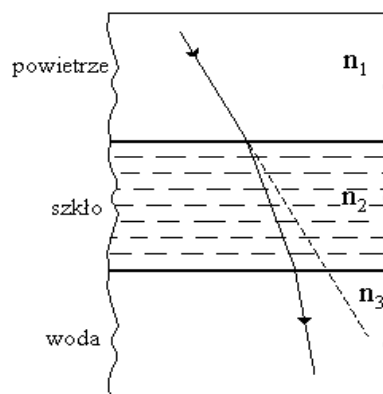
Współczynnik załamania światła zależy również od stanu ośrodków - np. od ich temperatury i ciśnienia.

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

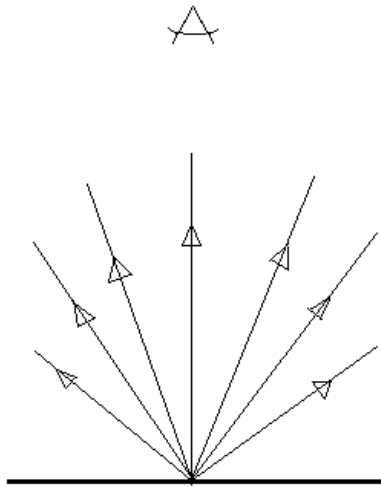
8. Metody pomiaru współczynnika załamania światła

Metody pomiarów współczynnika załamania światła możemy podzielić na cztery grupy:

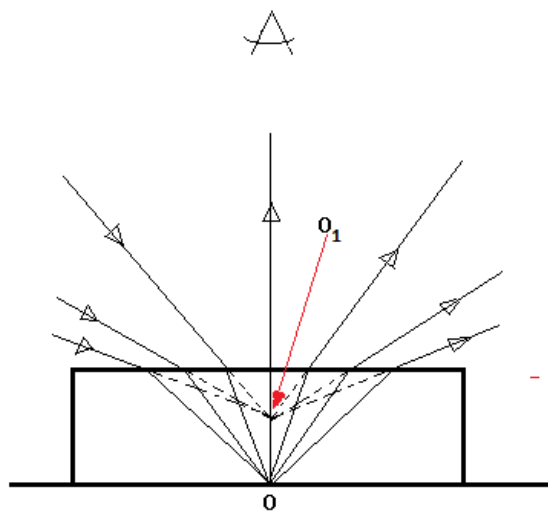
- *metody spektrometryczne* (Fraunhofera, Rydberg-Martensa, Abbego i inne). Materiał badany musi mieć kształt pryzmatu. W metodach tych współczynnik załamania światła jest przedstawiony jako funkcja kąta łamiącego pryzmatu i kąta odchylenia pryzmatu.
- *metody opierające się na pomiarze kąta granicznego*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

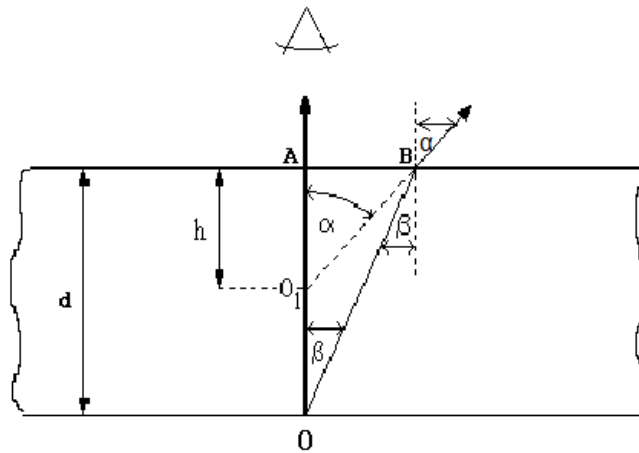
Każdy punkt oświetlonej powierzchni wysyła światło odbite (rys.7). Jeżeli oświetlimy płytkę równoległościenną (rys.8), również punkt O leżący na dolnej powierzchni będzie wysyłał światło odbite. Obserwując światło odbite, zobaczymy pozorny obraz punktu O w punkcie O_1 .



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:

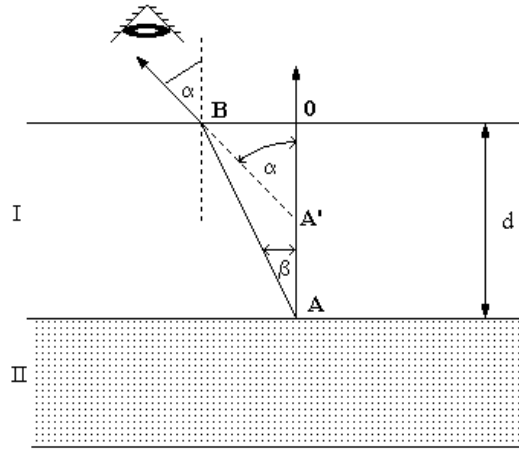
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{d}{h} = n. \quad (13)$$

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:

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

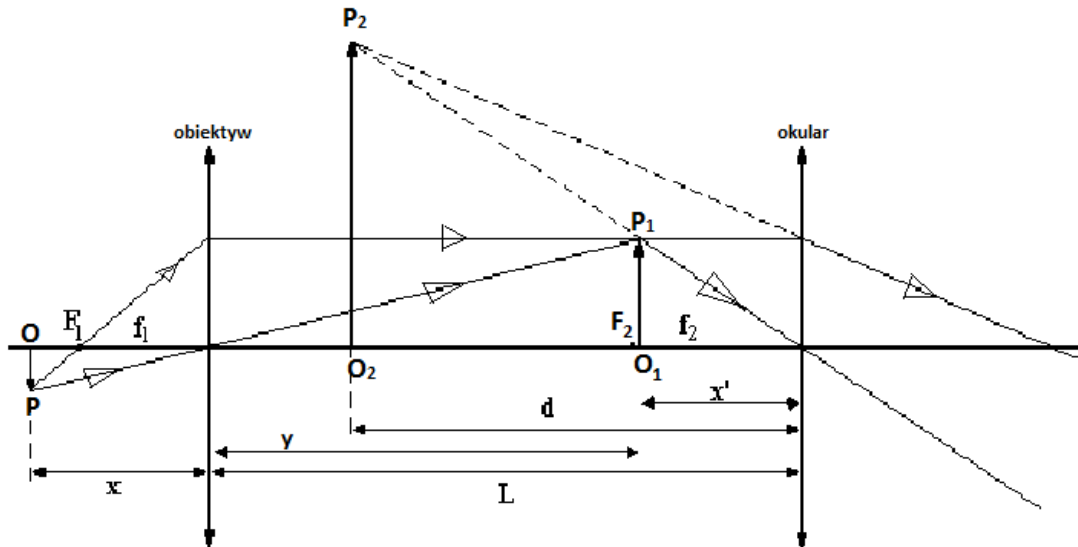
Zatem dla małych kątów padania promieni na płytkę:

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

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

III. WYKONANIE ĆWICZENIA

1. Metoda płytki płasko-równoległej:

a) Zmierzyć pięciokrotnie śrubą mikrometryczną grubość rzeczywistą płytki **d**. Skok śruby mikrometrycznej wynosi 0.5 mm, a jej dokładność, czyli odległość między dwiema kolejnymi podziałkami na bębnie - 0.01 mm.

Pomiary zanotować jako **d₁, d₂, ..., d₅**.

b) Zmierzyć (również pięciokrotnie) za pomocą mikroskopu wyposażonego w śrubę mikrometryczną grubość pozorną płytki **h**.

W tym celu płytkę zmierzoną w podpunkcie "a" z dwoma naniesionym na obu powierzchniach rysami (lub kreskami) położyć na stoliku mikroskopu. Rysa na dolnej powierzchni płytki odpowiada punktowi O z rys.9, a rysa na górnej powierzchni - punktowi A.

Następnie pokrętko śruby mikrometrycznej znajdujące się z prawej strony mikroskopu, poniżej okularu, obracać w lewo do oporu (na skali śruby powinno pokazać się zero), a następnie przesunąć tubus pokrętkiem bez podziałki (nie używając chwilowo śruby mikrometrycznej mikroskopu) tak, aby zobaczyć ostry obraz rysy na górnej powierzchni płytki (punkt A), po czym obracać śrubą mikrometryczną mikroskopu w prawo dopóty, dopóki nie pokaże się ostry obraz O₁ rysy na dolnej powierzchni płytki (punkt O).

Zanotować wskazanie śruby mikrometrycznej: liczbę pełnych obrotów śruby **n₁** (jest to liczba w okienku śruby) oraz liczbę podziałek **m₁** na bębnie śruby. Skok śruby mikrometrycznej mikroskopu wynosi 0.09371 mm, a odległość między dwiema kolejnymi podziałkami na skali bębna jest 100 razy mniejsza od skoku śruby mikrometrycznej.

Obliczyć **h₁** ze wzoru:

$$h_1 = 0.09371 \left(n_1 + \frac{m_1}{100} \right). \quad (21)$$

Powtórzyć pomiar jeszcze czterokrotnie, znajdując **h₂, h₃, h₄, h₅**.

c) Czynności opisane w punkcie 1 i 2 powtórzyć dla płytek wskazanych przez prowadzącego.

2. Metoda de Chaulnesa:

a) Zmierzyć pięciokrotnie śrubą mikrometryczną rzeczywistą grubość płytki **d**. Skok śruby mikrometrycznej wynosi 0.5 mm, a jej dokładność, czyli odległość między dwiema kolejnymi podziałkami na bębnie - 0.01 mm.

b) Na stoliku mikroskopu położyć płytkę pomocniczą z naniesioną na górnej powierzchni rysą - odpowiednik punktu A z rys.10. Następnie na szkiełku pomocniczym umieścić zmierzoną w podpunkcie "2a" badaną płytkę płasko-równoległą ze szkła lub pleksiglasu.

Wyzerować wskazanie śruby mikrometrycznej. Następnie obracając pokręteł bez podziałki znaleźć ostry obraz A_1 rysy A.

Usunąć **badaną płytkę i** za pomocą śruby mikrometrycznej uzyskać ostro widoczną rysę A.

Zanotować wskazanie śruby mikrometrycznej mikroskopu n_1 i m_1 i obliczyć wielkość osiowego przesunięcia obrazu kreski Δs_1 :

$$\Delta s_1 = 0.09371 \left(n_1 + \frac{m_1}{100} \right) \quad (22)$$

Pomiar ten powtórzyć czterokrotnie.

IV. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Część A

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

$$n = \frac{d_{sr}}{h_{sr}} \quad (23)$$

ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIAROWYCH (dla jednej płytki)

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":

$$u(d_{sr}) = S_{d_{sr}} = \sqrt{\frac{(d_1 - d_{sr})^2 + (d_2 - d_{sr})^2 + \dots + (d_5 - d_{sr})^2}{5(5-1)}} \quad (24)$$

$$u(h_{sr}) = S_{h_{sr}} = \sqrt{\frac{(h_1 - h_{sr})^2 + (h_2 - h_{sr})^2 + \dots + (h_5 - h_{sr})^2}{5(5-1)}} \quad (25)$$

2. Obliczyć złożoną niepewność standardową pomiaru pośredniego n , korzystając ze wzoru (12) we "Wprowadzeniu do":
Wskazówka: Najpierw przedstawić współczynnik załamania n (wzór 23 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...".

IV. OPRACOWANIE WYNIKÓW

Część B

1. Obliczyć wartości średnie \mathbf{d}_{sr} i Δs_{sr} .
2. Obliczyć współczynnik załamania światła \mathbf{n} dla wszystkich badanych płytek korzystając ze wzoru:

$$n = \frac{d_{sr}}{d_{sr} - \Delta s_{sr}} \quad (26)$$

ANALIZA NIEPEWNOŚCI POMIAROWYCH (dla jednej płytki)

1. Obliczyć niepewności standardowe średnich \mathbf{d}_{sr} i Δs_{sr} jako eksperymentalne odchylenia standardowe średnich $S_{d_{sr}}$ oraz $S_{\Delta s_{sr}}$ korzystając ze wzoru (3) we "Wprowadzeniu do metod opracowania wyników pomiarowych":

$$u(d_{sr}) = S_{d_{sr}} = \sqrt{\frac{(d_1 - d_{sr})^2 + (d_2 - d_{sr})^2 + \dots + (d_5 - d_{sr})^2}{5(5-1)}} \quad (27)$$

$$u(\Delta s_{sr}) = S_{\Delta s_{sr}} = \sqrt{\frac{(\Delta s_1 - \Delta s_{sr})^2 + (\Delta s_2 - \Delta s_{sr})^2 + \dots + (\Delta s_5 - \Delta s_{sr})^2}{5(5-1)}} \quad (28)$$

2. Obliczyć złożoną niepewność standardową pomiaru pośredniego \mathbf{n} , korzystając ze wzoru (9) we "Wprowadzeniu do":

$$u(n) = \sqrt{\left(\frac{\partial n}{\partial d_{sr}}\right)^2 u^2(d_{sr}) + \left(\frac{\partial n}{\partial (\Delta s_{sr})}\right)^2 u^2(\Delta s_{sr})} \quad (29)$$

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. 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