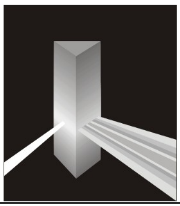
KATEDRA FIZYKI

WYDZIAŁ INŻYNIERII PRODUKCJI
I TECHNOLOGII MATERIAŁÓW
POLITECHNIKA CZĘSTOCHOWSKA

PRACOWNIA OPTYKI



ĆWICZENIE NR O-1

WYZNACZANIE WSPÓŁCZYNNIKA ZAŁAMANIA ŚWIATŁA ZA POMOCĄ SPEKTROMETRU

I. Zagadnienia do opracowania

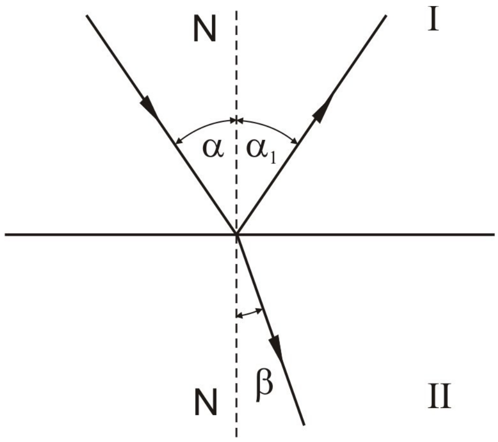
1. Zjawisko odbicia i załamania światła.
2. Załamanie światła w pryzmacie.
3. Budowa i zasada działania spektrometru.
4. Zasada wyznaczania współczynnika załamania światła za pomocą spektrometru.
5. Rachunek błędu metodą różniczki zupełnej.

II. Wstęp teoretyczny

2. 1. Zjawisko odbicia i załamania światła

Podstawowymi prawami optyki geometrycznej są prawa odbicia i załamania światła. Możemy je przedstawić na następującym przykładzie:

Jeżeli na granicę dwóch ośrodków optycznych I i II, w których prędkości rozchodzenia się światła są odpowiednio v_1 i v_2, pada promień pod kątem α, to częściowo ulega on odbiciu pod katem α_1, a częściowo przechodzi do ośrodka drugiego ulegając załamaniu pod kątem β (Rys. 1).



Rys. 1. Zjawisko odbicia i załamania światła

Zjawiskami odbicia i załamania rządzą następujące prawa:

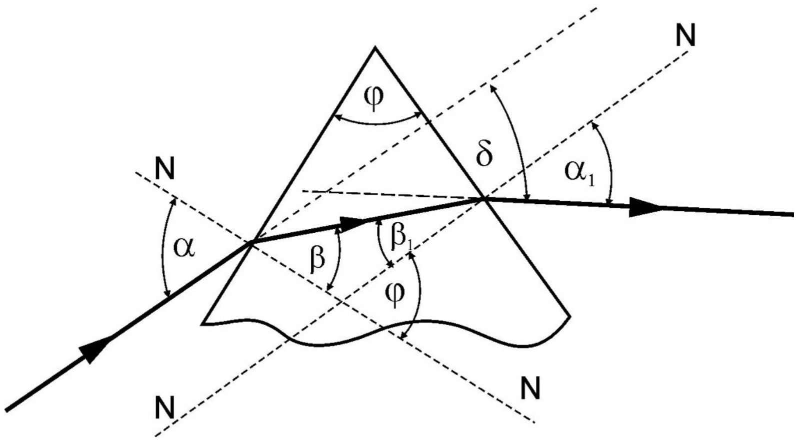
- Kąt padania α (zawarty między normalną N do granicy dwóch ośrodków i promieniem padającym), kąt odbicia α_1 (zawarty między normalną N i promieniem odbitym) oraz kąt załamania β (między normalną N, a promieniem załamanym) leżą w jednej płaszczyźnie.
- Kąt odbicia równy jest kątowi padania: $\alpha_1 = \alpha$.
- Stosunek sinusa kąta padania do sinusa kąta załamania równy jest stosunkowi prędkości rozchodzenia się światła w obu ośrodkach i jest wielkością stałą dla danego rodzaju promieniowania:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n \tag{1}$$

Wielkość n nazywamy współczynnikiem załamania ośrodka drugiego względem pierwszego. Bezwzględnym współczynnikiem załamania danego ośrodka nazywamy współczynnik załamania tego ośrodka względem próżni. W próżni wszystkie rodzaje promieniowania elektromagnetycznego (do którego zaliczamy promieniowanie świetlne, niezależnie od jego długości fali) rozchodzą się z tą samą prędkością $c = 3 \cdot 10^8 \ m/s$. Współczynnik załamania dla próżni n = l. Prędkość rozchodzenia się światła w ośrodkach gazowych różni się niewiele od prędkości rozchodzenia się światła w próżni i dlatego np. dla powietrza można w przybliżeniu przyjąć, że n = l.

2. 2. Załamanie światła w pryzmacie

Bryła wykonana z przezroczystego materiału, ograniczona dwoma płaskimi ścianami przecinającymi się pod kątem φ stanowi pryzmat. Kąt φ nosi nazwę kąta łamiącego pryzmatu. Prosta wzdłuż której przecinają się płaszczyzny ścian bocznych, nosi nazwę krawędzi pryzmatu. Ściana przeciwległa do kąta φ może mieć kształt dowolny, gdyż nie ma ona wpływu na bieg promieni (Rys.2). Zazwyczaj uzupełniamy pryzmat trzecią ścianą przecinającą ściany boczne w równych odległościach od krawędzi, ta ściana nosi nazwę podstawy pryzmatu. Taki pryzmat w przekroju przedstawia się jako trójkąt równoramienny.

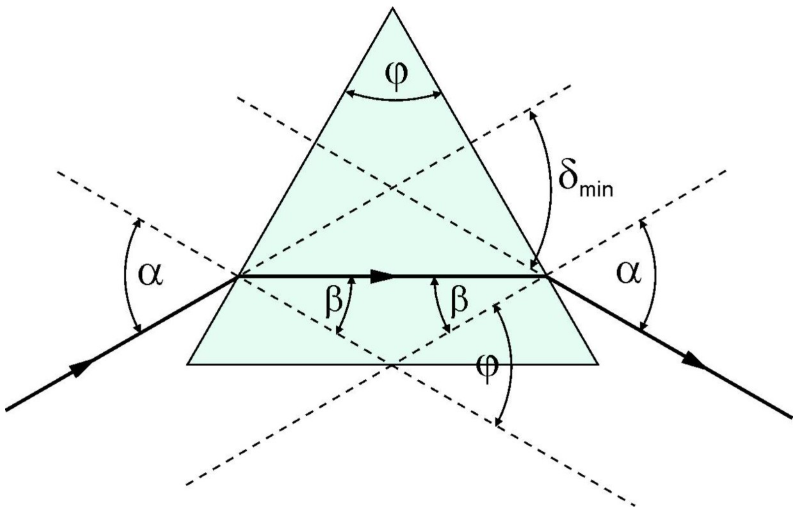


Rys.2. Załamanie światła w pryzmacie

Jak to przedstawiono na Rys. 2, promień padający na ściankę pryzmatu pod kątem α, załamuje się pod kątem β, pada na drugą ściankę pod kątem β_1 i wychodzi z niej pod kątem α_1. Normalne N do obu ścian bocznych pryzmatu tworzą ze sobą kąt równy kątowi łamiącemu pryzmatu φ. Przedłużenia promieni padającego i wychodzącego z pryzmatu tworzą kąt δ, zwany kątem odchylenia. Wartość tego kąta zależy od wartości kąta padania α, od współczynnika załamania n materiału pryzmatu i od kąta łamiącego pryzmatu φ: $\delta = f(\alpha, n, \varphi)$. Dla pryzmatu o stałym kącie łamiącym i dla światła monochromatycznego (stałe n) kąt odchylenia δ zależy jedynie od kąta padania α: $\delta = f(\alpha)$. Z twierdzenia o kącie zewnętrznym w trójkącie wynika, że:

$$\varphi = \beta + \beta_1; \qquad \delta = (\alpha - \beta) + (\alpha_1 - \beta_1) \tag{2}$$

Przy zmniejszaniu kąta padania α kąt odchylenia δ stopniowo się zmniejsza i przy pewnej wartości kąta α osiąga wartość minimalną, a następnie, przy dalszym zmniejszaniu kąta α kąt odchylenia znowu rośnie. Najmniejszej wartości kąta odchylenia, zwanej kątem najmniejszego odchylenia δ_{min}, odpowiada zależność $\alpha = \alpha_1$. Stąd wynika też, że $\beta = \beta_1$. W tych warunkach promień wewnątrz pryzmatu biegnie równolegle do podstawy pryzmatu. Taki bieg promieni w pryzmacie przedstawiono na Rys. 3.



Rys.3. Symetryczny bieg promieni w pryzmacie

Gdy spełnione są zależności (2), to:

$$\varphi = 2\beta; \qquad \delta_{\min} = 2\alpha - 2\beta$$

stąd:

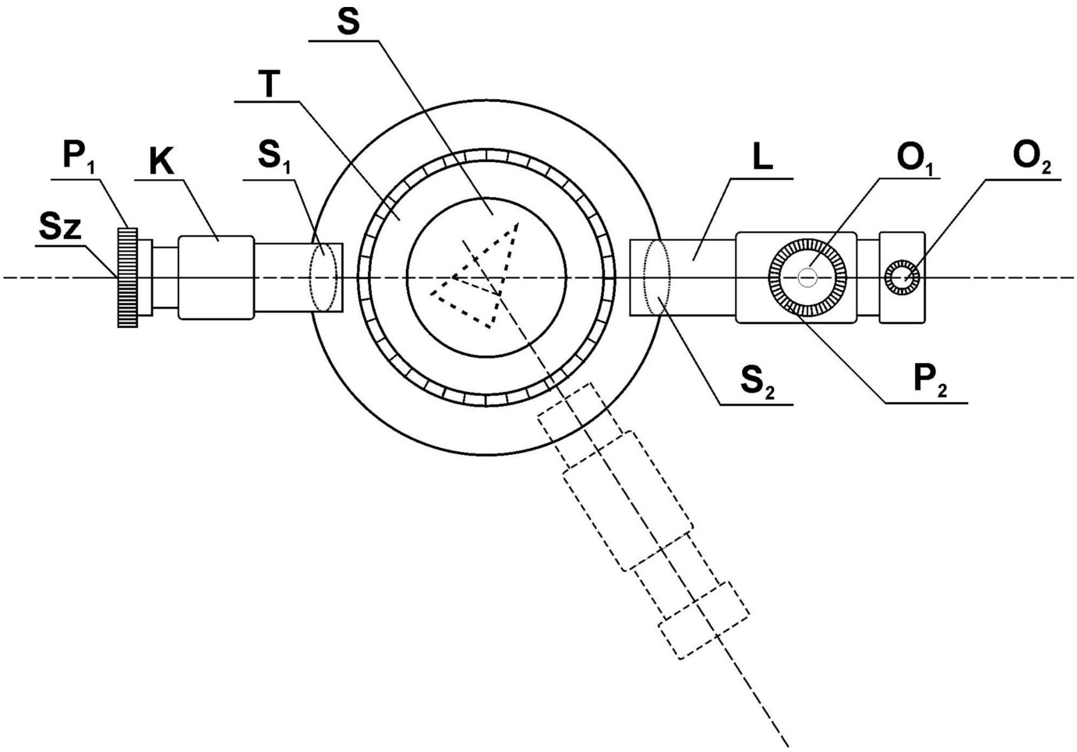
$$\beta = \frac{\varphi}{2}; \qquad \alpha = \frac{\delta_{\min} + \varphi}{2}$$

Stąd ostatecznie współczynnik załamania dla pryzmatu wynosi:

$$n = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\sin\frac{1}{2}\left(\varphi + \delta_{\min}\right)}{\sin\frac{1}{2}\varphi} \tag{3}$$

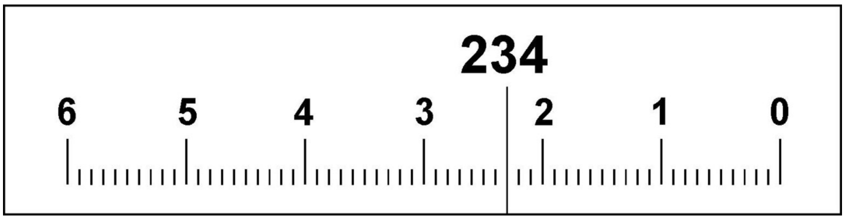
2.3. Budowa i zasada działania spektrometru

Spektrometr stanowi precyzyjną odmianę spektroskopu i umożliwia dokładny pomiar kąta odchylenia promienia przechodzącego przez pryzmat lub inny układ optyczny (Rys.4).



Rys. 4. Budowa spektrometru

Składa się on z kolimatora K i lunety L, które są umieszczone poziomo na metalowej podstawie. Kolimator jest to metalowy tubus zamknięty z jednej strony soczewką zbierającą S_1, z drugiej strony metalową zasłoną, w której znajduje się pionowa szczelina Sz. Szerokość szczeliny można dowolnie regulować za pomocą pierścienia P_1. Przed szczeliną ustawiamy źródło światła monochromatycznego (np. lampę sodową) i traktujemy szczelinę jako źródło promieniowania. Długość tubusa odpowiada dokładnie odległości ogniskowej soczewki kolimatora. Dzięki temu kolimator przekształca rozbieżną wiązkę światła w wiązkę promieni równoległych. Wiązka ta może następnie wchodzić bezpośrednio do lunety L, lub po odchyleniu przez pryzmat ustawiony na stoliku Spektrometru. Sama luneta jest wyposażona w układ soczewek zbierających: S_2 stanowi obiektyw, a O_1 okular lunety, które pozwalają na oglądanie otrzymywanych obrazów. W okularze lunety znajduje się krzyż z nitek pajęczych. Obracając pierścień okularu P_2, można regulować ostrość obrazu nitek krzyża. Obwód tarczy T jest zaopatrzony w podziałkę kątową (która w tej wersji spektrometru ukryta jest wewnątrz tarczy i można ją obserwować tylko przez okular). Kolimator jest nieruchomy, lunetę można dowolnie przesuwać po obwodzie stolika. Dokładny odczyt położenia lunety jest możliwy dzięki dodatkowemu okularowi z noniuszem kątowym O_2 zamontowanemu w lunecie. Sposób odczytu noniusza przestawia Rys. 5.



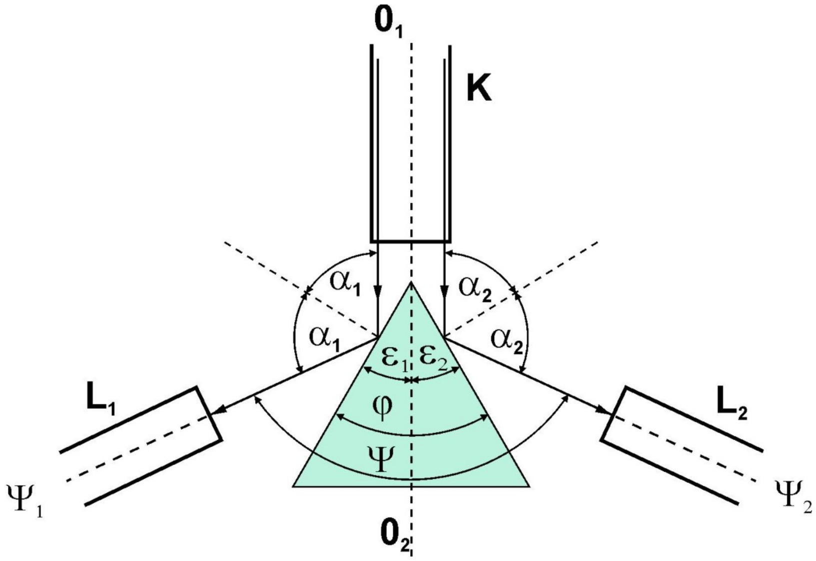
Rys. 5. Przykładowy odczyt noniusza kątowego, w tym przypadku kąt lunety wynosi 234º 23´.

III. Zasada pomiaru (Zasada wyznaczania współczynnika załamania światła za pomocą spektrometru.)

Aby wyznaczyć współczynnik załamania światła, z którego wykonany jest pryzmat należy zgodnie z zależnością (3) dokonać pomiaru kąta łamiącego φ oraz kąta najmniejszego odchylenia δ_{min} dla światła monochromatycznego o określonej długości fali.

3.1. Wyznaczanie kąta łamiącego w pryzmacie

W celu wyznaczenia kąta łamiącego stosujemy układ przedstawiony na Rys.6.



Rys. 6. Zasada pomiaru kąta łamiącego w pryzmacie

Promienie równoległe wychodzące z kolimatora K padają na pryzmat od strony krawędzi łamiącej. Po odbiciu od obu ścian bocznych otrzymujemy w lunecie obrazy przy dwóch jej położeniach L_1 i L_2 symetrycznych względem położenia osiowego O_1O_2. Kąty padania na boczne ściany pryzmatu (i kąty odbicia) wynoszą odpowiednio:

$$\alpha_1 = 90^\circ - \varepsilon_1; \qquad \alpha_2 = 90^\circ - \varepsilon_2$$

ponieważ:

$$\Psi = 360^\circ - 2\alpha_1 - 2\alpha_2 = 360^\circ - \left[\left(180^\circ - 2\varepsilon_1\right) + \left(180^\circ - 2\varepsilon_2\right)\right]$$

$$\Psi = 2\left(\varepsilon_1 + \varepsilon_2\right)$$

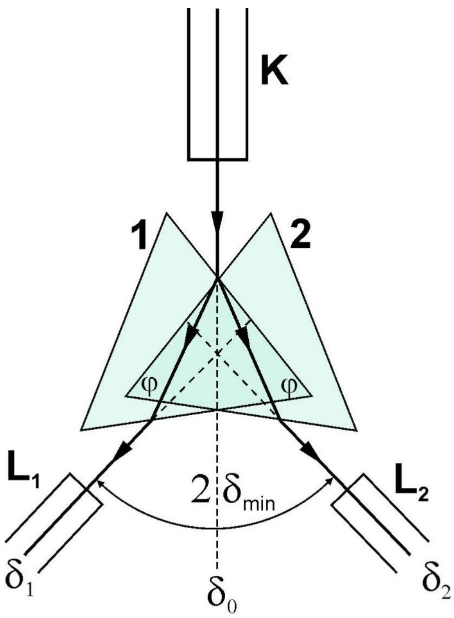
$$\varphi = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

kąt zawarty pomiędzy osiami lunety w obu położeniach jest równy podwojonemu kątowi łamiącemu pryzmatu:

$$\Psi = 2\varphi; \qquad \varphi = \frac{\Psi}{2} = \frac{\Psi_1 - \Psi_2}{2} \tag{4}$$

3.2. Wyznaczanie kąta najmniejszego odchylenia δ_{min} w pryzmacie.

W celu wyznaczenia kąta najmniejszego odchylenia stosujemy układ przedstawiony na Rys. 7.



Rys. 7. Zasada pomiaru kąta najmniejszego odchylenia δ_{min} w pryzmacie

Szczelinę oświetlamy światłem lampy sodowej. Na stoliku umieszczamy badany pryzmat w położeniu 1, tak aby promienie padające na szczelinę boczną pryzmatu uległy załamaniu. Za pomocą lunety szukamy obrazu szczeliny, który odpowiada odchylonemu biegowi promieni. Następnie obracając stolik z pryzmatem stwierdzamy, że obraz szczeliny się przesuwa, albo oddala od kierunku pierwotnego, albo się do niego przybliża. Przy ciągłym obrocie stolika w jedną stronę można zauważyć, że obraz przybliża się do pewnej granicznej pozycji i potem się od niej oddala. To zwrotne położenie obrazu szczeliny odpowiada minimalnemu odchyleniu promienia δ_{min}. Za pomocą lunetki odczytujemy pozycje lunety ustawionej na minimum odchylenia δ_1, a następnie umieszczamy pryzmat w pozycji 2 i wyszukujemy nową pozycję lunety ustawionej na minimum odchylenia i odczytujemy jej pozycję δ_2. Obie pozycje odpowiadające minimum odchylenia są symetryczne względem osi kolimatora, a kąt najmniejszego odchylenia:

$$\delta_{\min} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2} \tag{5}$$

można poprzestać na znalezieniu kąta najmniejszego odchylenia tylko przy ustawieniu pryzmatu w pozycji 1 lub 2, wtedy jednak trzeba znaleźć pozycję osi kolimatora czyli kierunek promieni nieodchylonych δ_0. Pomiar taki wykonujemy bez pryzmatu, a lunetkę ustawiamy na wprost kolimatora i odczytujemy położenie obrazu szczeliny odpowiadające kierunkowi promieni nieodchylonych δ_0. Kąt najmniejszego odchylenia wynosi wtedy:

$$\delta_{\min} = \delta_1 - \delta_0 \tag{6}$$

ale taki pomiar obarczony będzie większym błędem.

IV. Zestaw pomiarowy

Spektrometr, lampa sodowa, transformator do zasilania lampy sodowej, zestaw pryzmatów.

V. Przebieg ćwiczenia

1. Lampę sodową włączamy do transformatora niskiego napięcia, a transformator do sieci prądu zmiennego o napięciu 220V.

   UWAGA: Włączenie lampy sodowej bezpośrednio do sieci prądu zmiennego spowoduje uszkodzenie lampy!
2. Szczelinę kolimatora spektrometru oświetlamy lampą sodową.
3. Lunetę spektrometru ustawiamy na przedłużeniu osi kolimatora tak, aby obraz szczeliny znajdował się na przecięciu krzyża z nitek pajęczych i regulujemy szerokość szczeliny kolimatora za pomocą pierścienia regulującego, a ostrość obrazu szczeliny za pomocą okularu lunety.
4. Ustawiamy na stoliku spektrometru pryzmat krawędzią łamiącą na wprost osi kolimatora tak, aby wiązka światła wychodząca z kolimatora jednakowo oświetlała obie ścianki pryzmatu.
5. Szukamy obrazu szczeliny odbitego od lewej ściany pryzmatu za pomocą lunety, ustawiamy go dokładnie na przecięciu nitek krzyża i odczytujemy to położenie φ_1.

6. Szukamy obrazu szczeliny odbitego od prawej ściany pryzmatu za pomocą lunety i po dokładnym ustawieniu lunety (jak w p. 5), odczytujemy jej położenie φ_2.
7. Zmieniając nieznacznie położenie pryzmatu na stoliku spektrometru wykonujemy pomiary wg punktów 4-6 jeszcze dwukrotnie dla tego samego pryzmatu.
8. Pryzmat ustawiamy na stoliku spektrometru tak, aby jego kąt łamiący znalazł się po prawej stronie osi kolimatora i aby promienie na niego padające uległy odchyleniu.
9. Szukamy obrazu szczeliny w lunecie, a następnie obracając stolikiem ciągle w jedna stronę szukamy zwrotnego położenia obrazu szczeliny odpowiadającego minimalnemu odchyleniu promieni przechodzących przez pryzmat. Odczytujemy pozycje lunety δ_1 dla tego położenia.
10. Pryzmat ustawiamy na stoliku spektrometru tak, aby jego kąt łamiący znalazł się po lewej stronie osi kolimatora i aby promienie na niego padające uległy odchyleniu.
11. Szukamy zwrotnego położenia obrazu szczeliny w lunecie odpowiadającego minimalnemu odchyleniu promieni przechodzących przez pryzmat i odczytujemy jego położenie δ_2.
12. Pomiary wg punktów 8-11 wykonujemy jeszcze dwukrotnie dla tego samego pryzmatu.
13. Przeprowadzamy pomiary wg punktów 4-12 dla pozostałych pryzmatów.
14. Wszystkie wyniki zapisujemy w tabeli.

VI. Tabela pomiarowa

Pryzmat	l.p.	φ_1	φ_2	$\varphi = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$	$\varphi_{śr}$	δ_1	δ_2	$\delta_{\min} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2}$	$(\delta_{\min})_{śr}$	n
I	1.									
	2.									
	3.									
II	1.									
	2.									
	3.									
III	1.									
	2.									
	3.									

VII. Opracowanie ćwiczenia

1. Obliczamy kąt łamiący dla każdego pomiaru:

$$\varphi_i = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2}$$

   oraz wartość średnią dla każdego pryzmatu.

2. Obliczamy kąt najmniejszego odchylenia dla każdego pomiaru:

$$\delta_{\min} = \frac{\delta_1 - \delta_2}{2}$$

   oraz wartość średnią dla każdego pryzmatu.

3. Obliczamy współczynnik załamania dla każdego z pryzmatów:

$$n = \frac{\sin\frac{1}{2}\left(\delta_{\min} + \varphi\right)}{\sin\frac{1}{2}\varphi}$$

4. Wyniki wpisać do tabeli.

VIII. Rachunek błędu

1. Błąd bezwzględny współczynnika załamania wyznaczyć metodą różniczki zupełnej. Mamy tu dwie wielkości obarczone błędem φ i $\delta_{\min}$. Przy ocenie błędów bezwzględnych tych katów należy je liczyć w radianach i uwzględnić dokładność pomiaru odczytywanego za pomocą noniusza kątowego:

$$\Delta n = \left|\frac{\partial n}{\partial \varphi}\right| \cdot \left|\Delta\varphi\right| + \left|\frac{\partial n}{\partial \delta_{\min}}\right| \cdot \left|\Delta\delta_{\min}\right|$$

$$\Delta n = \left|\frac{\left(\cos\frac{1}{2}\left(\delta_{\min}+\varphi\right)\cdot\sin\frac{1}{2}\varphi\right)\cdot\frac{1}{2} - \left(\sin\frac{1}{2}\left(\delta_{\min}+\varphi\right)\cdot\cos\frac{1}{2}\varphi\right)\cdot\frac{1}{2}}{\sin^2\frac{1}{2}\varphi}\right| \cdot \left|\Delta\varphi\right| + \left|\frac{\cos\frac{1}{2}\left(\delta_{\min}+\varphi\right)}{2\sin\frac{1}{2}\varphi}\right| \cdot \left|\Delta\delta_{\min}\right|$$

Po zastosowaniu wzoru redukcyjnego z trygonometrii na sin(α-β) powyższe wyrażenie przyjmuje znacznie prostszą postać:

$$\Delta n = \left|\frac{-\sin\frac{1}{2}\delta_{\min}}{2\sin^2\frac{1}{2}\varphi}\right| \cdot \left|\Delta\varphi\right| + \left|\frac{\cos\frac{1}{2}\left(\delta_{\min}+\varphi\right)}{2\sin\frac{1}{2}\varphi}\right| \cdot \left|\Delta\delta_{\min}\right|$$

gdzie: $\Delta\varphi = 2' = \ldots\ldots\ldots\ldots rad.$

$\Delta\delta_{\min} = 2' = \ldots\ldots\ldots\ldots rad.$

2. Przeprowadzić zaokrąglenie wartości n i Δn zgodnie z obowiązującymi normami.
3. Obliczyć błąd względny wyznaczonych wielkości.

IX. Literatura

1. T. Dryński – Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1976r.
2. H. Szydłowski – Pracownia fizyczna wspomagana komputerem, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003r.
3. A. Zawadzki, H. Hofmokl – Laboratorium fizyczne
4. Sz. Szczeniowski – Fizyka doświadczalna, cz. IV, Optyka
5. A. Piekara – Nowe oblicze optyki,
6. J. Lech – Opracowanie wyników pomiarów w laboratorium podstaw fizyki, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Wydział Inżynierii Procesowej, Materiałowej i Fizyki Stosowanej, Częstochowa 2005