

## LABORATORIUM OPTYKI GEOMETRYCZNEJ I INSTRUMENTALNEJ

## ĆWICZENIE OG-1

## Pomiar współczynników załamania szkła metodą goniometryczną

**1 Cele ćwiczenia**

Zapoznanie z techniką pomiaru kątów łamiących w pryzmatach. Zapoznanie z techniką wyznaczania współczynnika załamania światła w materiałach optycznych. Wyznaczenie krzywej dyspersji chromatycznej dla zadanego materiału, w oparciu o pomiary goniometryczne, stosując różne źródła światła. Nauka opracowywania wyników pomiarów, z uwzględnieniem niepewności pomiarowych, dla wielkości wyznaczanych bezpośrednio i obliczanych.

**2 Zakres wymaganych zagadnień wstępnych**

Do poprawnego wykonania ćwiczenia niezbędna jest znajomość poniższych zagadnień, weryfikowanych w trakcie egzaminu wejściowego:

- współczynnik załamania światła,
- prawo Snelliusa,
- bieg promieni przez pryzmat,
- dyspersja chromatyczna,
- droga optyczna.

**3 Wstęp teoretyczny****3.1 Współczynnik załamania światła**

**Względny współczynnik załamania** określa zmianę prędkości rozchodzenia się światła, gdy promień świetlny przechodzi z jednego ośrodka do drugiego, co można wyrazić wzorem

$$n = \frac{v_1}{v_2}, \quad (1)$$

gdzie:

- $v_1$  – prędkość światła w pierwszym ośrodku,
- $v_2$  – prędkość światła w drugim ośrodku.

Najczęściej rozważany jest przypadek zmiany prędkości światła w ośrodku względem próżni. Wzór (1) przyjmuje wtedy postać

$$n = \frac{c}{v}, \quad (2)$$

gdzie:

- $c$  – prędkość światła w próżni,
- $v$  – prędkość światła w ośrodku.

Wzór (2) jest definicją **bezwzględnego współczynnika załamania światła**.

### 3.2 Dyspersja chromatyczna

W optyce, dyspersja chromatyczna jest właściwością materiału, charakteryzującą się tym, że światło o różnych długościach fali porusza się w danym materiale z inną prędkością. Ponieważ bezwzględny współczynnik załamania określa spowolnienie fali w ośrodku względem próżni, można powiedzieć, że dyspersja to **zależność bezwzględnego współczynnika załamania światła od długości bądź częstotliwości fali**, poruszającej się w danym materiale. W przypadku wiązki światła polichromatycznego (stanowiącego mieszaninę fal o różnych długościach lub częstotliwościach), załamującej się na granicy ośrodka dyspersyjnego, każda składowa widma (osobna długość fali) ulegnie załamaniu pod innym kątem, co prowadzi np. do rozszczepienia światła białego.

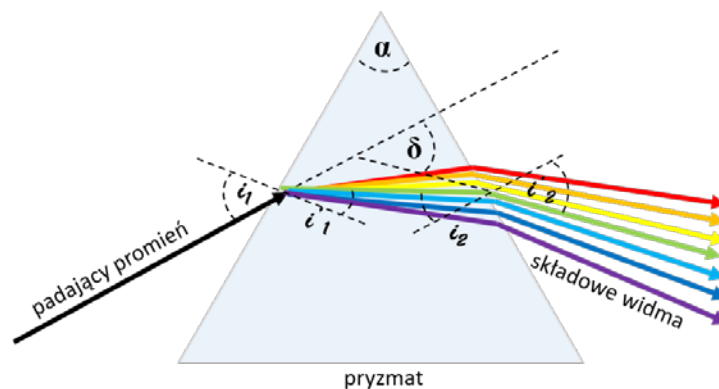
Charakter dyspersji chromatycznej powoduje, że typowa zależność to zmniejszanie się bezwzględnego współczynnika załamania wraz ze wzrostem długości fali.

Zjawisko dyspersji chromatycznej jest jednym z ważniejszych zjawisk w optyce geometrycznej i falowej, w tym także optometrii oraz optyce okularowej. Może być wykorzystane między innymi do uzyskania i analizy widma padającego światła czy określenia prawidłowej korekcji okularowej. W wielu przypadkach jest niepożądana, bowiem prowadzi do innego działania układu optycznego dla różnych długości fali światła padającego (aberracje chromatyczne).

Znajomość zależności bezwzględnego współczynnika załamania materiału od długości padającej fali (lub częstotliwości), zwanej krzywą dyspersji, umożliwia lepsze zrozumienie różnic pomiędzy materiałami użytymi do korekcji okularowej lub kontaktowej (soczewki kontaktowe). W praktyce częściej używa się współczynników dyspersji (np. dyspersja względna lub liczba Abbego), wyliczanych na podstawie krzywej dyspersji.

### 3.3 Pryzmat

Pryzmat to blok szklany (mineralny) lub z tworzywa sztucznego (organiczny), o co najmniej dwóch wypolerowanych ścianach tworzących kąt  $\alpha$ , który nazywa się **kątem łamiącym pryzmatu**. Na rysunku 1 przedstawiono przekrój główny pryzmatu dwusiecznego wraz z przykładowym biegiem promieni.

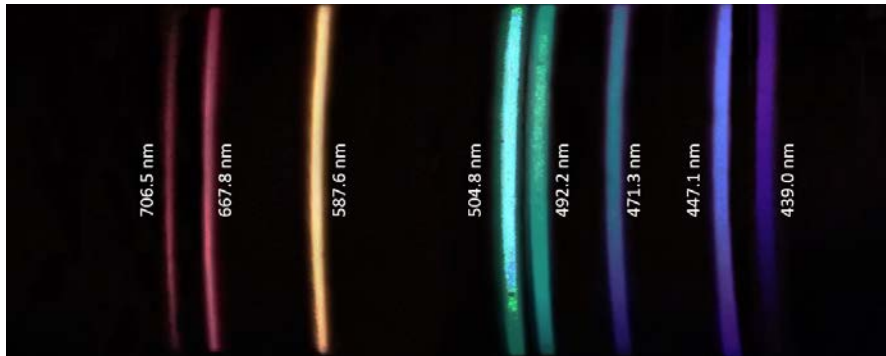


**Rysunek 1.** Bieg promieni przez pryzmat dwusieczny.

Kąty: padania promienia na pierwszą powierzchnię (kąt „wejścia”) i załamania promienia na drugiej powierzchni (kąt „wyjścia”) oznaczono symbolami  $i_1, i'_2$ . Z kolei, kąty: załamania promienia na pierwszej powierzchni pryzmatu oraz padania promienia na

drugą powierzchnię (oba wewnątrz pryzmatu) oznaczono  $i'_1, i_2$ . Kąty  $\alpha$  i  $\delta$  to, odpowiednio, kąt łamiący pryzmatu oraz kąt odchylenia promienia względem pierwotnego kierunku biegu.

Jeżeli jedna ze ścian pryzmatu zostanie oświetlona pod kątem światłem polichromatycznym, np. pochodzącym z lampy gazowej, składowe widmowe zostaną załamane pod różnymi kątami, zależnymi od długości fali. Wynika to z dyspersji chromatycznej materiału, z jakiego wykonano pryzmat. Każda ze składowych przebywa różną drogę optyczną wewnątrz pryzmatu, przez co są przestrzennie rozdzielone. Po wyjściu wiązki światła z pryzmatu otrzymuje się widmo światła z rozseparowanymi liniami widmowymi, jak pokazano na rysunku 2.



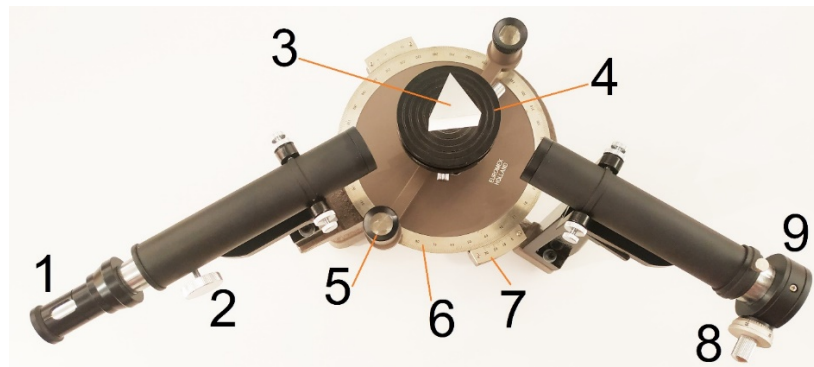
**Rysunek 2.** Widmo emisyjne helu rozszczepione przez pryzmat, z zaznaczonymi długościami fali.

## 4 Układ pomiarowy

### 4.1 Goniometr

Goniometr jest jednym z instrumentów optycznych używanych w laboratoriach. W zależności od przeznaczenia goniometri mogą się różnić konstrukcją i dokładnością pomiarową. Głównie służą do pomiaru kątów łamiących pryzmatów dwuściennych i klinów optycznych, do pomiarów kątowych odległości linii widmowych, kątów promieni ugiętych na siatce dyfrakcyjnej lub załamanych w pryzmacie rozszczepiającym, oraz do wyznaczania współczynników załamania światła w materiale w funkcji długości fali. Na rysunku 3 przedstawiono budowę typowego goniometru.

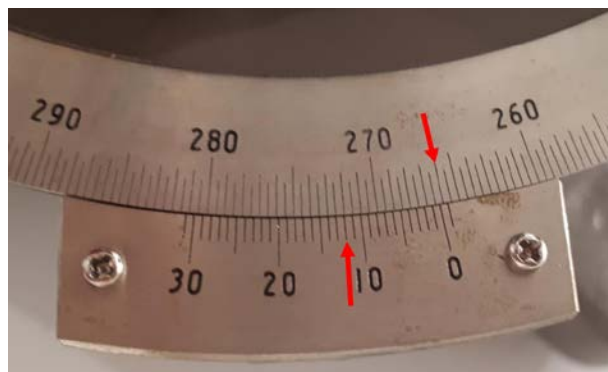
Na obwodzie koła podziałowego **6** jest naniesiona podziałka kątowa oraz dwie przeciwległe podziałki sprzężone z lunetą, które mogą być w formie noniusza. W środku koła jest umieszczony stolik obrotowy **4**. Na stoliku goniometru umieszcza się badany pryzmat. Oś obrotu stolika **4** pokrywa się z osią obrotu koła podziałowego **6**. Nad kołem podziałowym jest umieszczona luneta **1** i kolimator **9** w taki sposób, że ich osie optyczne przechodzą ponad stolikiem. Kolimator i luneta mają obiektywy o jednakowej ogniskowej. W płaszczyźnie ogniskowej obiektywu kolimatora znajduje się szczelina, której szerokość można regulować za pomocą śruby mikrometrycznej **8**. Obraz szczeliny, oświetlonej źródłem światła, utworzony przez obiektyw kolimatora, leży w nieskończoności. Kolimator goniometru jest najczęściej nieruchomy, zaś lunetę można obracać w płaszczyźnie poziomej dokoła osi obrotu koła podziałowego.



**Rysunek 3.** Budowa goniometru.

- 1 – luneta z wyciągiem okularowym i śrubą do regulacji dioptryjnej 2;
- 3 – badany obiekt (np. pryzmat);
- 4 – stolik z regulacją kąta płaszczyzny i blokadą obrotu;
- 5 – przeciwległe lupy odczytowe;
- 6 – koło podziałowe z blokadą obrotu;
- 7 – dwie przeciwległe podziałki sprzężone z lunetą do odczytywania minut kątowych;
- 9 – kolimator ze śrubą mikrometryczną 8, służącą do regulacji szerokości szczeliny.

Jeśli na stoliku goniometru zostanie położony pryzmat, a źródło światła oświetlające szczelinę kolimatora jest polichromatyczne, to w płaszczyźnie ogniskowej, ustawionej pod odpowiednim kątem lunety utworzą się barwne obrazy szczeliny kolimatora (widmo ciągłe lub liniowe). Należy zmniejszyć szerokość szczeliny tak, aby obserwowane linie były jak najwęższe, a zarazem dostatecznie jasne, by je zobaczyć. Luneta jest wyposażona w krzyż kolimacyjny, którego pionową linię należy zawsze umieszczać w środku obserwowanej linii widmowej. Dopiero wtedy można odczytać wartość kąta na kole podziałowym 6 z pomocą lup odczytowych 5. Odczytu dokonuje się w sposób analogiczny jak w suwmiarce, czyli ustalamy na początku kąt zgodny z kołem podziałowym, a następnie minuty na noniuszu. Przykładowy odczyt został przedstawiony na rysunku 4, gdzie czerwoną strzałką z góry zaznaczony jest kąt  $266^{\circ}$ , a pokrywająca się linia noniusza wskazuje  $12'$ .



**Rysunek 4.** Przykładowy odczyt kątowy pomiaru z użyciem noniusza ( $266^{\circ}12'$ ).

## 5 Opis elementów części pomiarowej ćwiczenia

### 5.1 Justowanie goniometru

#### a) Wstępne ustawienie goniometru

Przed przystąpieniem do justowania goniometru, lunetę ustawia się naprzeciw kolimatora tak, aby ich osie były wzajemnie równoległe. Następnie należy goniometr wypoziomować. Dokonuje się tego pokręcając dwoma śrubami (stopami) umieszczonymi pod podstawą przyrządu. W podobny sposób należy wstępnie wypoziomować stół goniometru – za pomocą trzech pokręteł poziomujących ustalamy poprawne położenie płaszczyzny stołka. Czynność tę wykonuje się w celu ułatwienia dalszej regulacji ustawień przyrządu.

#### b) Ustawienie lunety na nieskończoność

Podobnie, jak dla większości przyrządów optycznych, na początku za pomocą regulacji dioptryjnej okularu, należy ustawić ostre widzenie skali płytki ogniskowej. Następnie, wyciąganiem okularowym trzeba ustawić lunetę na nieskończoność. Jeżeli kolimator był już wyjustowany, to luneta będzie ustawiona na nieskończoność wtedy, gdy obraz oświetlonej szczeliny kolimatora będzie widoczny bez paralaksy na tle krzyża płytki ogniskowej. Jeżeli kolimator nie był wyjustowany, to jest to jedyny sposób ustawienia lunety na nieskończoność.

#### c) Pozycjonowanie stołka

Ostatnim, a zarazem najbardziej oczywistym krokiem, będzie ustalenie pozycji stołka obrotowego w celu dalszych pomiarów. Poleca się ustalenie podziałki kątowej na  $0^{\circ}$  zgodnie z biegiem promieni ze źródła, w innych przypadkach należy wziąć pod uwagę wprowadzoną **różnicę**. Uwzględnioną pozycję należy zablokować przykręcając śrubę odpowiadającą za obrót stołka.

### 5.2 Pomiar kąta łamiącego pryzmatu

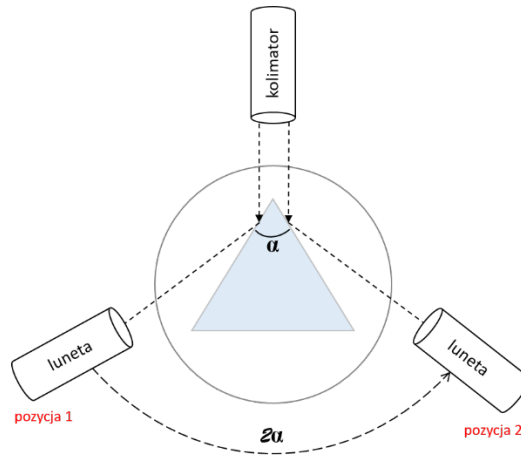
Schemat układu do pomiaru kąta łamiącego pryzmatu przedstawiono na rysunku 5.

W celu wykonania dalszej części ćwiczenia niezbędne jest zweryfikowanie kąta łamiącego pryzmatu. W tym celu należy wykonać poniższe kroki:

1. Umieścić badany pryzmat tak, aby światło z kolimatora padało na obie powierzchnie pryzmatu (dwusieczna kąta łamiącego w przybliżeniu równoległa do osi kolimatora). Warto również poszerzyć nieco szczelinę padającego światła.
2. Ustawić lunetę pomiarową tak, aby uzyskać ostry obraz szczeliny, odbity od pierwszej powierzchni i kolejno od drugiej.
3. Różnica kątów położenia lunety wynosi  $2\alpha$ . Zatem kąt łamiący wynosi

$$\alpha = \frac{\gamma}{2} \quad (3)$$

Stosuje się również inne metody pomiarów ze względu na rodzaj i wielkość pryzmatu. W przypadku tego ćwiczenia dokładność będzie satysfakcjonująca przy użyciu opisanej wyżej metody rozdwojonej wiązki.



**Rysunek 5.** Schemat pomiaru kąta łamiącego pryzmatu metodą rozdwojonej wiązki.

### 5.3 Pomiar współczynnika załamania światła w pryzmacie

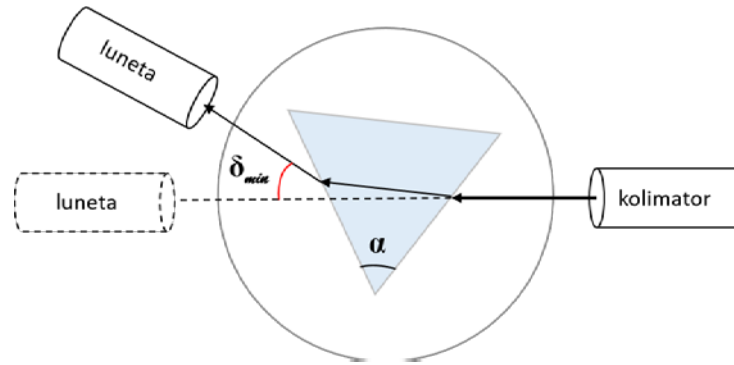
Schemat układu do pomiaru kąta współczynnika załamania światła przedstawiono na rysunku 6.

Po weryfikacji kąta załamania pryzmatu można przejść do pomiarów współczynnika załamania światła metodą kąta najmniejszego odchylenia. Postępując krok po kroku zgodnie z poniższymi punktami otrzymamy względny współczynnik światła dla danej długości fali linii widmowej.

1. Odchylenie biegu promieni jest najmniejsze przy symetrycznej propagacji światła przez pryzmat. Zachodzi wtedy równość kąta padania i kąta wyjścia z pryzmatu ( $i_1 = i'_2$ , rys. 1).
2. Należy umieścić pryzmat na stoliku, tak aby odchylić promień i odnaleźć ostry obraz szczeliny w lunetce pomiarowej.
3. Aby spełnić warunek minimalnego odchylenia należy obracać stolikiem z pryzmatem do momentu, w którym obraz szczeliny „zawraca”, niezależnie od kierunku obrotu stolika. W tym położeniu należy dokonać odczytu z lup odczytowych.
4. Wartość odczytu od ustalonego punktu referencyjnego do położenia lunety wynosi  $\delta_{min}$ .
5. Współczynnik załamania światła  $n_\lambda$ , z którego wykonany jest pryzmat, dla użytej długości fali  $\lambda$  wynosi

$$n_\lambda = \frac{\sin\left(\frac{\alpha + \delta_{min}}{2}\right)}{\sin\frac{\alpha}{2}}. \quad (4)$$

6. Zależnie od użytego źródła światła (lampa gazowa), oświetlającego szczelinę kolimatora, w obrazie otrzymuje się różne widma liniowe. Identyfikację zadanych do pomiaru linii przeprowadza się w oparciu o załączoną do źródła światła tabelę linii widmowych.



**Rysunek 6.** Schemat pomiaru współczynnika załamania światła w pryzmacie, za pomocą goniometru.

#### 5.4 Pomiar widma światła diod LED

Analogicznie do poprzedniej metody pomiarowej należy zmierzyć  $\delta_{min}$  dla diod LED. Jednak w przypadku tego źródła światła otrzymamy ciągle widmo, zatem należy dokonać pomiaru na końcu i na początku otrzymanego rozkładu. Następnie, przeprowadzić odpowiednią analizę wyników w sprawozdaniu.

### 6 Opracowanie wyników i niepewności pomiarowych

Po zapoznaniu się z przyrządami na stanowisku pomiarowym (lampy, zasilacze, goniometr itp.) i po wyjustowaniu goniometru, ćwiczenie należy wykonać w następujących etapach:

#### 6.1 Pomiar kąta łamiącego pryzmatu

1. Dokonać pomiaru kąta łamiącego 3-krotnie.
2. Obliczyć wielkość kąta łamiącego i przeprowadzić ocenę niepewności względnej oraz bezwzględnej pomiaru na podstawie tabeli 1.

**Tabela 1.** Obliczenie kąta łamiącego.

Wyniki doświadczalne						Niepewności pomiarowe	
Nr	$\gamma_1$ [°']	$\gamma_2$ [°']	$\gamma_1$ [°]	$\gamma_2$ [°]	$\alpha = \gamma_1 + \gamma_2$ [°]	$\Delta\alpha$ [°]	$\Delta\alpha$ [%]
1							
2							
3							
				$\bar{\alpha}$ [°]			

Niepewności pomiaru kąta łamiącego (błąd średniokwadratowy) można obliczyć na podstawie wzoru

$$\Delta\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{\alpha} - \alpha_i)^2}{N(N-1)}}, \quad (5)$$

gdzie:

$N$  – liczba pomiarów,

$\bar{\alpha}$  – średnia z wyników pomiaru kąta łamiącego,

$\alpha_i$  –  $i$ -ty pomiar kąta łamiącego.

## 6.2 Wyznaczenie współczynnika załamania i krzywej dyspersji

1. Przed szczeliną kolimatora ustawić lampę gazową, tak by jej obraz obserwowany przez lunetę był maksymalnie jasny.
2. Wykonać pomiary kąta najmniejszego odchylenia dla poszczególnych linii widmowych kolejno w 3 lampach (helowej, wodorowej i neonowej).
3. Obliczyć współczynnik załamania  $n_\lambda$  na podstawie tabeli 2. Wykreślić krzywą dyspersji dla każdej lampy i przeprowadzić dyskusję niepewności pomiarowych.

**Tabela 2.** Obliczenie współczynnika załamania dla pojedynczej lampy.

Nr linii	Kolor	Długość fali $\lambda$ [nm]	$\delta_{min}$ [°]	$n$
1				
2				
...				
$N$ (w zależności od liczby widocznych linii)				

Jeżeli nastąpi problem z określeniem długości fali to należy zaznaczyć, iż jest to **wątpliwe**. W sprawozdaniu należy przenieść otrzymane wyniki dla każdej z lamp na wykres  $n = n(\lambda)$  oraz naszkicować ołówkiem przybliżoną krzywą dyspersji chromatycznej, odpowiadającą przebiegowi wykresu.

## 6.3 Wyznaczenie widma diod LED

Naprzeciwno szczeliny spektrometru ustawić diody LED. Zmierzyć kąt minimalny początku oraz końca widma i uzupełnić tabelę nr 3. Następnie sporządzić wykres  $\delta_{min}(\lambda)$ .

**Tabela 3.** Przykład tabeli wyników dla diod LED.

Granice widma	Kolor	Długość fali $\lambda$ [nm]	$\delta_{min}$ [°]
LR (prawa)			
LL (lewa)			

### Literatura:

1. H. Szydłowski, „Pracownia fizyczna”
2. T. Hanc, „Pomiary optyczne”
3. F. Ratajczyk, „Instrumenty optyczne”
4. P. G. Hewitt, „Fizyka wokół nas”, rozdz. 6.



5. E. Boeker, R. van Grondelle , „Fizyka środowiska”, rozdz. 2. i 7.
6. "Encyklopedia Fizyki PWN", hasła: spektrometr, monochromator