



**ĆWICZENIE
88**

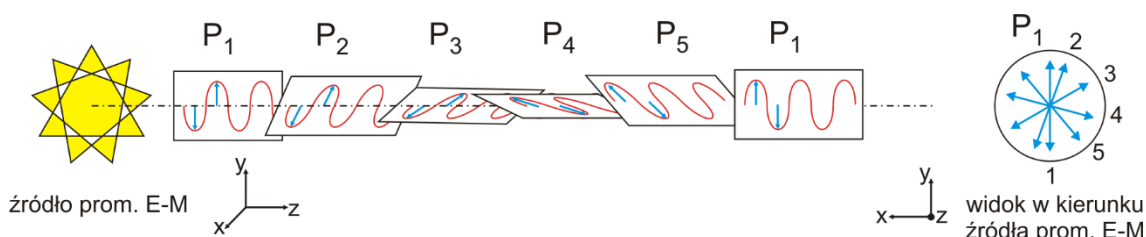
POMIAR NATURALNEJ AKTYWNOŚCI OPTYCZNEJ

Cel ćwiczenia: Badanie zjawiska skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w cieczach i kryształach optycznie czynnych.

Zagadnienia: polaryzacja światła, dwójłomność, dwójłomność kołowa naturalna, zdolność skręcająca właściwa.

1 Wprowadzenie

W falowy opisie światła bieg promienia utożsamiany jest z rozchodzeniem się fal świetlnych, czyli zmiennych pól elektrycznych i magnetycznych (E-M). Naturalne źródła światła emitują fale, której wektory pola E-M drgają w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku rozchodzenia się światła, ale we wszystkich możliwych kierunkach P_i tej płaszczyzny (Rys.1). Takie światło nazywamy niespolaryzowanym.



Rys.1. Naturalne źródło światła emitują promieniowanie niespolaryzowane, czyli wektor pola E drga we wszystkich możliwych kierunkach prostopadłych do kierunku rozchodzenia się fali.

Polaryzacja światła – zjawisko w wyniku którego uzyskuje się uporządkowanie losowych kierunków drgań wektorów pól E-M. Gdy uzyskane drgania odbywają się w jednej płaszczyźnie zawierającej kierunek rozchodzenia się fali mamy do czynienia z polaryzacją liniową. Polaryzację liniową uzyskuje się m.in. przepuszczając wiązkę promieniowania przez filtry polaryzacyjne (polaroidy), pryzmat Nicola, pryzmat Glan–Thompson, pryzmat Glan–Taylor. (więcej informacji o pryzmatach polaryzacyjnych: <https://spie.org/samples/PM200.pdf>)

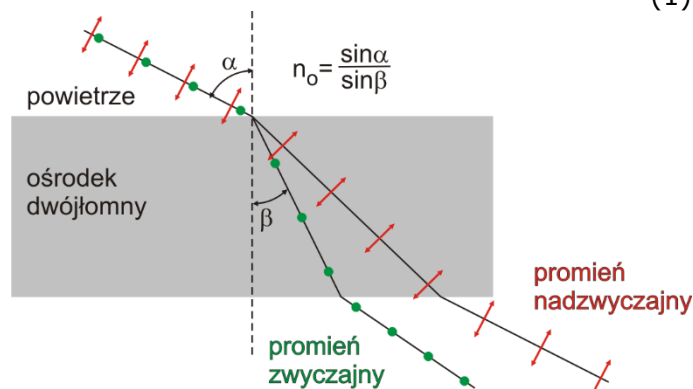
Dwójłomność – zdolność pewnej grupy materiałów do rozdwojenia promienia świetlnego. Do grupy tej należą m.in. kryształy rutilu i kalcytu oraz wszystkie ciekłe kryształy. W ogólności nazywamy je substancjami dwójłomnymi, a ich cechą charakterystyczną jest anizotropowa budowa krystaliczna. Z anizotropowej budowy wewnętrznej wynika, iż współczynniki przenikalności elektrycznej ϵ , a więc również prędkość światła c i współczynnik załamania światła n , w ośrodku dwójłomnym zależą od polaryzacji fali świetlnej, czyli od kierunku drgań jej pola elektrycznego.

W przypadku kryształu jednoosiowego (jeden wybrany kierunek ułożenia anizotropowych cząstek w kryształach) podczas załamania promień świetlny ulega rozdwojeniu na dwa (Rys.2). Jeden z nich, zwany zwyczajnym, ma zawsze stałą prędkość niezależną od tego, w jakim kierunku rozchodzi się w kryształach. Promień ten ma zatem stały współczynnik załamania i spełnia prawo Snelliusa. Dla drugiego promienia, zwanego nadzwyczajnym, prędkość fali zależy od kierunku w którym ta fala rozchodzi się w kryształach. Promień ten nie spełnia prawa Snelliusa, ponieważ stosunek $\sin(\alpha)/\sin(\beta)$ dla różnych kątów padania α nie ma stałej wartości, a zatem traci dla tej wiązki sens fizyczny.

Miarą dwójłomności jest różnica między współczynnikiem załamania promienia nadzwyczajnego n_e (w ogólności nie spełnia prawa Snelliusa) a współczynnikiem załamania promienia zwyczajnego n_o (spełnia prawo Snelliusa)

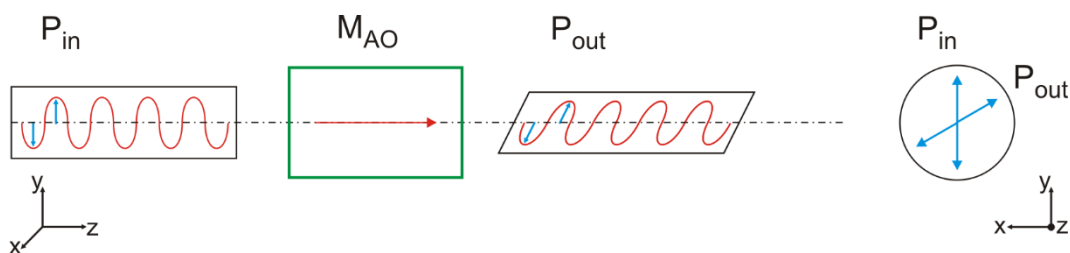
$$\Delta n = n_e - n_o.$$

(1)



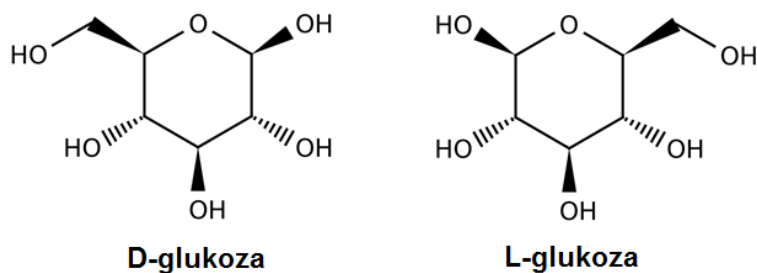
Rys.2. W wyniku dwójłomności ośrodka wiązka niespolaryzowana zostaje rozszczepiona na dwie składowe liniowo spolaryzowane o płaszczyznach polaryzacji wzajemnie prostopadłych.

Dwójłomność kołowa – czyli inaczej aktywność optyczna to zdolność pewnej grupy związków chemicznych do zmiany (skręcenia) płaszczyzny polaryzacji światła liniowo spolaryzowanego.



Rys.3. Zjawisko dwójłomność kołowej. P_{in} – padająca wiązka światła spolaryzowana liniowo, M_{AO} – materiał aktywny optycznie, P_{out} wiązka światła po przejściu przez M_{AO} pozostaje spolaryzowana liniowo, natomiast nastąpiło skręcenie płaszczyzny polaryzacji.

Naturalna aktywność optyczna obserwowana jest jedynie dla cząsteczek chiralnych, czyli cząsteczek dla których ich odbicie lustrzane nie można nałożyć na siebie na drodze translacji i obrotu w przestrzeni (brak inwersyjnej osi symetrii). Dodatkowo cząsteczka chiralna aby była aktywna optycznie musi posiadać silnie spolaryzowane wiązania chemiczne blisko centrum chiralności (https://pl.wikipedia.org/wiki/Centrum_stereogeniczne) lub podstawniki przy centrum chiralności muszą być różne. Dwa enancjomery, czyli cząsteczki będące swoimi lustrzanymi odbiciami, skręcają płaszczyznę polaryzacji przechodzącego światła w przeciwnych kierunkach.



Rys.4. Przykład związków aktywnych optycznie: naturalnie występująca D-glukoza oraz L-glukoza możliwa do zsyntezowania w laboratorium.

Aktywność optyczna jest zależna od długości fali światła, ale także od temperatury, rodzaju rozpuszczalnika, a w pewnym zakresie także od stężenia cząsteczek aktywnych optycznie w rozpuszczalniku. Fakt istnienia aktywności optycznej może znaleźć zastosowanie np. do pomiarów stężenia cukru w roztworze.

2 Zasada pomiaru i układ pomiarowy

2.1. Zasada wyznaczenia stężenia roztworów cukru

Kąt skręcenia γ płaszczyzny polaryzacji jest iloczynem drogi d promienia w ośrodku aktywnym oraz zdolności skręcającej ośrodka γ_{os} :

$$\gamma = \gamma_{os} d \quad (2)$$

W przypadku roztworów substancji aktywnych optycznie równanie to przyjmuje postać:

$$\gamma = \gamma_c c d \quad (3)$$

gdzie c – stężenie roztworu, γ_c – zdolność skręcająca właściwa substancji rozpuszczonej.

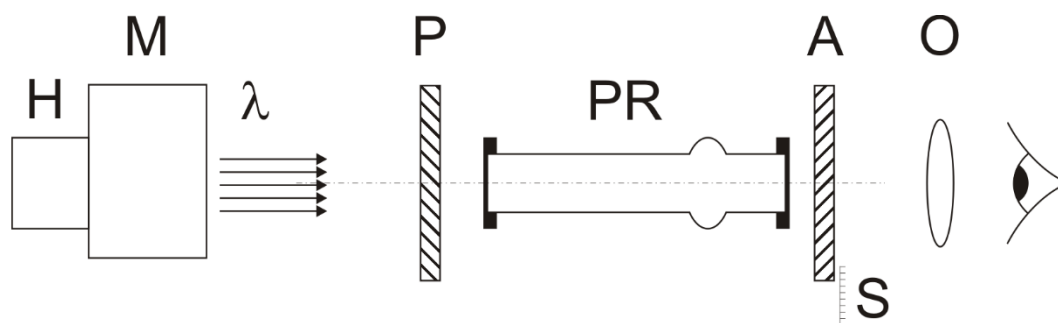
Zasada wyznaczenia nieznanego stężenia c_x substancji optycznie czynnej (np. cukru) w roztworze polega na wykonaniu krzywej cechowania (wykresu $\gamma = f(c)$) na podstawie pomiarów kąta skręcenia γ dla serii roztworów danej substancji o znanym stężeniu c i drodze optycznej d . W praktyce badany roztwór umieszcza się w standaryzowanych komórkach pomiarowych o drodze optycznej $d=100$ lub 200 mm. Zatem dla krzywej cechowania $\gamma = f(c) = \gamma_c d c$ iloczyn $\gamma_c d$ jest wielkością stałą, równą współczynnikowi kierunkowemu a . Znając współczynnik kierunkowy a krzywej cechowania oraz wartość kąta skręcenia γ_x roztworu nieznanego stężeniu c_x roztworu można wyznaczyć z zależności:

$$c_x = \frac{\gamma_x}{a}, \text{ czyli } c_x = \frac{\gamma_x}{\gamma_c d} \quad (4)$$

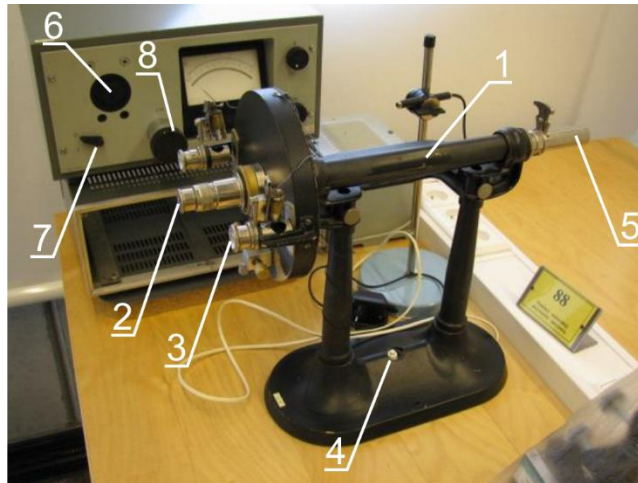
2.3. Układ pomiarowy

Pomiar kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła wykonuje się przy pomocy polarymetru. Polarymetr to urządzenie złożone z polaryzatora, analizatora oraz próbki umieszczonej między nimi (Rys.5). Polarymetr używany w LPF to komercyjne urządzenie umożliwiające bezpośrednie wyznaczenie zawartości sacharozy w roztworze wodnym. Stąd jego nazwa sacharymetr.

W skład układu pomiarowego (Rys.6) wchodzi lampa halogenowej podłączona do monochromatora pełniącego źródło światła monochromatycznego λ . Światło to jest polaryzowane przez półcieniowy polaryzator P , a następnie przechodzi przez badaną próbkę PR . W ćwiczeniu tym badane są próbki w postaci płytek kwarcowych oraz roztwory cukru w wodzie. Roztwory umieszczone są w szklanych komórkach pomiarowych. Za próbką na osi optycznej wiązki pomiarowej znajduje się analizator A , a następnie okular i oko obserwatora.

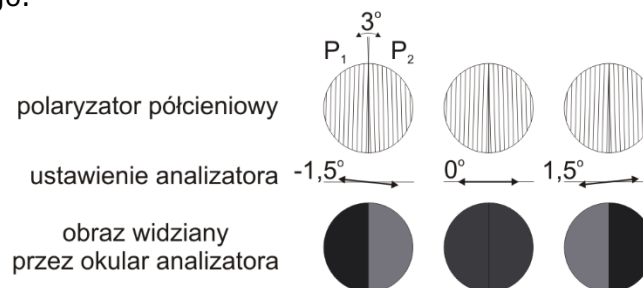


Rys.5. Schemat układu pomiarowego. H – halogen, M – monochromator, λ – światło monochromatyczne, P – polaryzator półcieniowy, PR – badana próbka, A – analizator, S – skala, O – okular.



Rys.6. Stanowisko pomiarowe z sacharymetrem i monochromatorem w laboratorium LPF. 1 – komora pomiarowa sacharymetru, 2 – okular analizatora, 3 – okular skali kątowej, 4 – przycisk oświetlający skalę kątową, 5 – otwór wejściowy dla światła monochromatycznego, 6 – szczelina wyjściowa monochromatora, 7 – przełącznik szczeliny, 8 – pokrętko wyboru długości fali wychodzącej z monochromatora.

Polaryzator półcieniowy umożliwia precyzyjny pomiar kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła. Polaryzator taki wykonany jest z dwóch polaryzatorów P_1 i P_2 , których płaszczyzny polaryzacji tworzą między sobą kąt około 3° (Rys.7). W czasie pomiaru porównywane są oba obszary obrazu, a kąt odczytuje się, gdy zanika granica między obszarami (oba obszary mają jednakową jasność). W takim ustawieniu płaszczyzna polaryzacji analizatora jest prostopadła do dwusiecznej kąta między kierunkami przepuszczania obu części polaryzatora P_1 i P_2 , a całe pole analizatora jest przyciemnione, a nie wygaszone, za to jednakowo jasne. Pomiar taki jest dużo bardziej precyzyjny, niż wtedy gdy wygaszenie światła oceniane jest subiektywnie bez korzystania z obszaru referencyjnego.



Rys.7. Schemat budowy polaryzatora półcieniowego oraz przykłady obrazów obserwowanych w zależności od ustawienia analizatora.

3. Zadania do wykonania

A) Pomiary:

3.1. Wyznaczenie stężenia roztworów cukru

1. Oświetlić skalę kątową przyrządu oraz szczelinę wejściową źródłem światła monochromatycznego.
2. Wstawić do sacharymetru próbkę referencyjną z wodą destylowaną i wyznaczyć położenie analizatora α_0 , przy którym obie połowki pola widzenia są jednakowo ciemne; w tym celu odblokować śrubę makro na pionowym ramieniu i obracając analizatorem ustawić odpowiednie jego położenie; zablokować śrubę makro i śrubą mikro (ramię poziome) ustalić dokładne położenie α_0 ; pomiar powtórzyć kilkakrotnie; dokładność podziałki kątowej wynosi $0,01^\circ$.

3. Wstawić do sacharymetru komórkę z roztworem cukru o znanym stężeniu c_n (np.: $n = 10\%$ i 15%) i wyznaczyć wielokrotnie położenie analizatora α_z dla jednakowego zaciemnienia obu połówek pola widzenia. Pomiar powtórzyć dla innych stężeń n .
4. Wstawić do sacharymetru kolejno komórki z roztworem cukru o nieznanym stężeniu c_{nz} (np.: $n_z = x, y, z$) i analogicznie wyznaczyć położenie analizatora α_{nz} .

3.2. Wyznaczenie zdolności skręcającej kwarcu o różnych grubościach – zadanie dodatkowe

1. Oświetlić szczelinę sacharymetru światłem monochromatycznym o długości λ .
2. Dokonać odczytu położenia analizatora α_0 dla pustego przyrządu, przy którym dwie połówki pola widzenia są jednakowo zaciemnione.
3. Dla każdej z 3 próbek kwarcu i ich 4 kombinacji wyznaczyć położenie analizatora α_d powtarzając pomiar wielokrotnie.

UWAGA 1: Analizator należy obracać zgodnie z ruchem wskazówek zegara, gdy grubość próbki lub ich kombinacja jest dodatnia; zaś przeciwnie do ruchu wskazówek – gdy ujemna.

UWAGA 2: Wprowadzono ujemną grubość próbki, aby pokazać jej skrętność. Kombinacje 3 próbek reprezentują próbki o następujących grubościach:

$$\begin{aligned}d_{12} &= -3,0 \text{ mm (1+2)} \\d_{13} &= +0,5 \text{ mm (1+3)} \\d_{23} &= -0,5 \text{ mm (2+3)} \\d_{123} &= -1,5 \text{ mm (1+2+3)}\end{aligned}$$

3.3. Wyznaczenie dyspersji zdolności skręcającej kwarcu – zadanie dodatkowe

1. Dla kilku różnych długości fali świetlnej λ z zakresu widzialnego wyznaczyć wielokrotnie położenie analizatora $\alpha_{0\lambda}$ dla pustego przyrządu.
2. Wstawić do sacharymetru próbkę kwarcu o danej grubości d i dla tych samych długości fali świetlnej λ wyznaczyć wielokrotnie położenie analizatora $\alpha_{d\lambda}$.

B) Opracowanie wyników:

3.1.1. Wyznaczenie stężenia roztworów cukru - zadanie podstawowe

1. Obliczyć średnie wartości położenia analizatora dla pomiaru referencyjnego α_0 , znanych stężeń α_n oraz próbek o nieznanym stężeniu α_{nz} i ich niepewności $u(\alpha_0)$, $u(\alpha_n)$, $u(\alpha_{nz})$.
2. Obliczyć kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla roztworów cukru o znanych stężeniach γ_n i jego niepewność $u(\gamma_n)$.

$$\gamma_n = \alpha_n - \alpha_0 \quad (5)$$

3. Obliczyć kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla roztworów cukru o nieznanych stężeniach γ_{nz} i jego niepewność $u(\gamma_{nz})$.

$$\gamma_{nz} = \alpha_{nz} - \alpha_0 \quad (6)$$

4. Sporządzić wykres $\gamma = f(c)$, tj. zależności kąta skręcenia od stężenia roztworu korzystając z wartości γ_n i c_n dla roztworów o znanym stężeniu.
5. Obliczyć wartości parametrów regresji liniowej dla funkcji $\gamma = f(c)$.
6. Obliczyć stężenia c_{nz} nieznanymi roztworów korzystając z zależności: $c_{nz} = \frac{\gamma_{nz}}{a}$, gdzie a to współczynnik kierunkowy funkcji $\gamma = f(c)$.
7. Obliczyć niepewność $u_c(c_{nz})$.
8. Na uprzednio przygotowany wykres $\gamma = f(c)$ nanieść punkty o współrzędnych $(\gamma_{nz}; c_{nz})$ reprezentujące roztwory o nieznanym stężeniu.
9. Dla punktów tych zaznaczyć pola niepewności $u(\gamma_{nz})$ i $u_c(c_{nz})$.

3.1.2. Wyznaczenie stężenia roztworów cukru na podstawie regresji liniowej - metoda alternatywna opracowania zadania podstawowego

1. Obliczyć średnie wartości położenia analizatora dla pomiaru referencyjnego α_0 , znanych stężeń α_n oraz próbek o nieznanym stężeniu α_{nz} i ich niepewności $u(\alpha_0)$, $u(\alpha_z)$, $u(\alpha_n)$.
2. Obliczyć kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla roztworów cukru o znanych stężeniach γ_z i jego niepewność $u_c(\gamma_z)$.

$$\gamma_z = \alpha_z - \alpha_0 \quad (7)$$

3. Obliczyć kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla roztworów cukru o nieznanych stężeniach γ_n i jego niepewność $u_c(\gamma_n)$.

$$\gamma_n = \alpha_n - \alpha_0 \quad (8)$$

4. Sporządzić wykres $\gamma = f(c)$, tj. zależności kąta skręcenia od stężenia roztworu korzystając z wartości γ_z i c_z dla roztworów o znanym stężeniu.
5. Obliczyć wartości parametrów regresji liniowej dla funkcji $\gamma = f(c)$.
6. Obliczyć stężenia c_n nieznanymi roztworów korzystając z zależności: $c_n = \frac{\gamma_n}{a}$, gdzie a to współczynnik kierunkowy funkcji $\gamma = f(c)$.
7. Obliczyć niepewność $u_c(c_n)$.
8. Na uprzednio przygotowany wykres $\gamma = f(c)$ nanieść punkty o współrzędnych $(\gamma_n; c_n)$ reprezentujące roztwory o nieznanym stężeniu.
9. Dla punktów tych zaznaczyć pola niepewności $u_c(\gamma_n)$ i $u_c(c_n)$.

3.2. Wyznaczenie zdolności skręcającej kwarcu o różnych grubościach – zadanie dodatkowe

1. Obliczyć średnie wartości położenia analizatora α_0 , α_d i ich niepewności $u(\alpha_0)$, $u(\alpha_d)$. Obliczyć kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla płytek kwarcowych o różnych grubościach $\gamma_d = \alpha_d - \alpha_0$. Obliczyć niepewność $u_c(\gamma_d)$.
2. Sporządzić wykres $\gamma_d = f(d)$ zależności kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji γ_d od grubości kwarcu d . Przy nanoszeniu pól niepewności przyjąć $u(d) = \pm 0,1$ mm.
3. Metodą regresji liniowej wyznaczyć skrętność właściwą kwarcu γ_0 oraz jej niepewność wykorzystując zależność $\gamma_d = \gamma_0 \cdot d$.

3.3. Wyznaczenie dyspersji zdolności skręcającej kwarcu – zadanie dodatkowe

1. Obliczyć średnie wartości położenia analizatora $\alpha_{0\lambda}$, α_λ i ich niepewności $u(\alpha_{0\lambda})$, $u(\alpha_\lambda)$.
2. Obliczyć kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla różnych długości fali $\gamma_\lambda = \alpha_\lambda - \alpha_{0\lambda}$. Obliczyć niepewność $u_c(\gamma_\lambda)$.
3. Przedstawić na wykresie zależność $\gamma_\lambda = f(\lambda)$ kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji γ_λ od długości fali świetlnej λ .

4. Pytania:

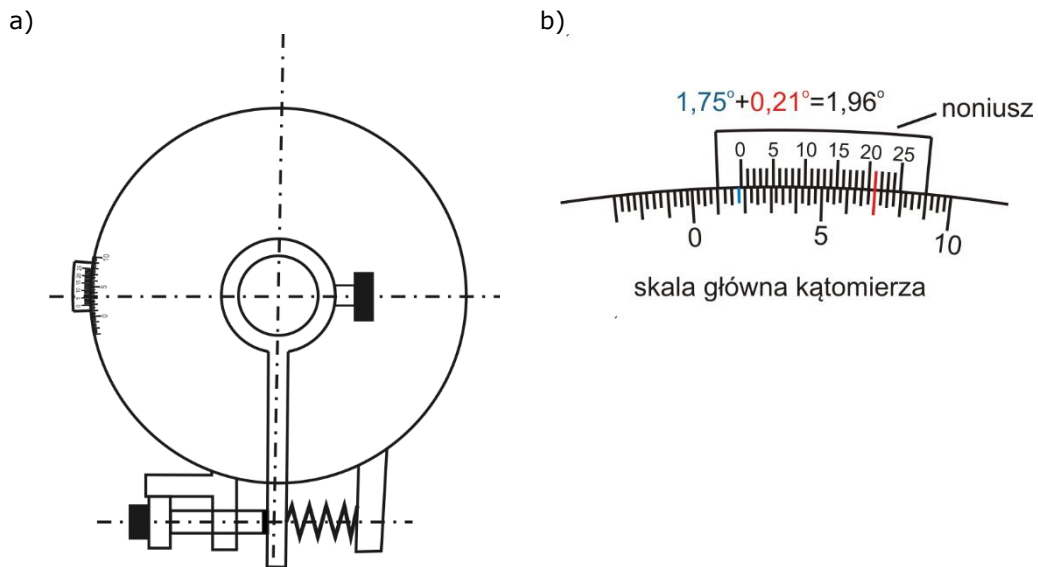
1. Wyjaśnić różnicę między światłem spolaryzowanym a niespolaryzowanym.
2. Na czym polega zjawisko dwójłomności światła?
3. Na czym polega zjawisko naturalnej aktywności optycznej? Wymienić ośrodki, w których występuje to zjawisko.
4. Co to jest kąt skręcenia płaszczyzny polaryzacji i jak można go wyznaczyć?
5. Od czego zależy wartość kąta skręcenia płaszczyzny polaryzacji dla roztworów cukru?
6. Opisać budowę i działanie sacharymetru. Jaka jest rola polaryzatora i analizatora?

5. Dodatek:

5.1. Precyzyjny pomiar kątów

Pomiar kątów sprowadza się do pomiaru odpowiednich łuków w zakresie jednego obrotu kątomierza. W szczególnych przypadkach należy również zliczać liczbę pełnych obrotów. Podziałka kątomierza zależy przede wszystkim od promienia łuku. Dla dostatecznie dużego promienia ($R > 50$ mm) można nanieść podziałkę o działce elementarnej mniejszej niż 1° . Dla zwiększenia dokładności pomiaru często stosuje się kątomierze z noniusem. W wykorzystywanym sacharymetrze zastosowany jest noniusz umożliwiający pomiar z dokładnością do $0,01^\circ$ przy 25 działkach noniusza i podziałce podstawowej co $0,25^\circ$. W celu odczytu wartości kąta z kątomierza

z noniusem najpierw odczytujemy wartość kąta z głównej skali kątomierza wskazaną przez zerową kreskę noniusza (z dokładnością do $0,25^\circ$), a następnie dodajemy do niej wartość kąta odczytaną z noniusza z dokładnością do $0,01^\circ$. Wartość kąta z noniusza odczytujemy odnajdując kreskę noniusza, której położenie pokrywa się z którąś z kresek podziałki głównej kątomierza.



Rys.8. a) Podziałka kąтова z noniusem i ramieniem do precyzyjnego przemieszczenia kąowego. b) Podziałka kąтова i noniusz o dokładności $0,01$ stopnia kąowego. Przykład odczytu kąta o wartości $1,96^\circ$.

opracował dr inż. M.Bański