

4.9 Badanie stanu polaryzacji światła (O8)

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z różnymi rodzajami polaryzacji światła, sposobami uzyskania danego typu polaryzacji oraz doświadczalnego sprawdzenia stanu polaryzacji światła.

Zagadnienia do przygotowania:

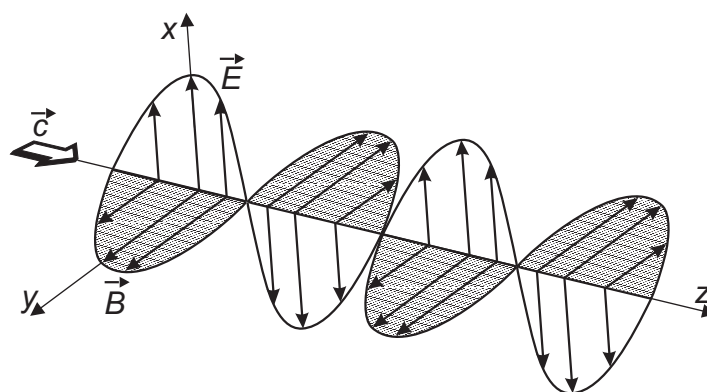
- światło jako fala elektromagnetyczna;
- zjawisko polaryzacji światła: polaryzacja liniowa, polaryzacja kołowa, polaryzacja eliptyczna;
- metody polaryzacji światła: podwójne załamanie w kryształach, dichroizm kryształów, odbicie światła; polaryzatory;
- prawo Malusa;
- płytka ćwierćfalowa (ćwierćfalówka) i jej działanie, półfalówka i jej działanie.

Literatura podstawowa: [2], [35].

4.9.1 Podstawowe pojęcia i definicje

Światło jest falą elektromagnetyczną o długości z zakresu 300 do 700 nm (w próżni). Granice te zostały przyjęte umownie i zawierają promieniowanie elektromagnetyczne z obszaru widzialnego (fiolet – czerwień). Światło, jako fala elektromagnetyczna jest falą poprzeczną. Oznacza to, że płaszczyzna drgań wektora pola elektrycznego $\vec{E}$ oraz płaszczyzna drgań wektora pola magnetycznego $\vec{B}$ są prostopadłe do kierunku wektora falowego, tzn. do kierunku propagacji światła (w ośrodkach izotropowych). Jednocześnie wektory $\vec{E}$ i $\vec{B}$ są prostopadłe do siebie nawzajem. Zjawisko polaryzacji występuje tylko dla fal poprzecznych. W przypadku światła za kierunek polaryzacji przyjmujemy wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$, który nazywany jest „wektorem świetlnym”.

Zwykła wiązka światła emitowana jest przez wiele niezależnych atomów lub molekuł źródła. Każdy atom emituje falę z jej własną orientacją wektora $\vec{E}$ (rysunek 4.9.1). Przy



Rys. 4.9.1: Fala elektromagnetyczna rozchodząca się w kierunku z.

dużej liczbie atomów źródła wszystkie kierunki wektora $\vec{E}$ są równie prawdopodobne i wypadkowa fala, będąca superpozycją fal emitowanych przez poszczególne atomy, jest światłem niespolaryzowanym (rysunek 4.9.2a). Jeżeli drgania wektora natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ zachodzą tylko w jednym, określonym kierunku to światło jest spolaryzowane liniowo (rysunek 4.9.2b).

Fala monochromatyczna o długości λ rozchodząca się wzdłuż osi z i spolaryzowana w płaszczyźnie xz opisana jest wzorem:

$$E_x = E_{0x} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right), \quad (4.9.1)$$

gdzie: E_{0x} – amplituda drgań wektora $\vec{E}$, T – okres drgań.

Polaryzacja liniowa jest najprostszym, ale nie jedynym rodzajem polaryzacji. Rozważmy wiązkę światła poruszającą się w kierunku z i posiadającą wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ będący superpozycją dwu fal o wektorach pola elektrycznego skierowanych wzdłuż osi x i y :

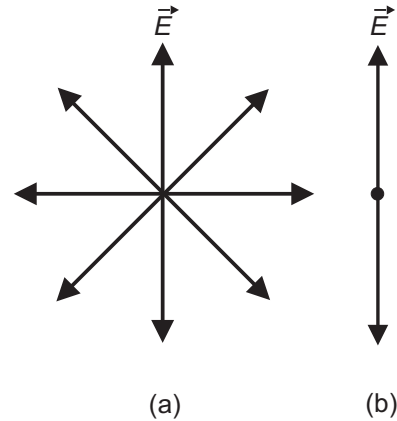
$$\begin{aligned} E_x &= E_{0x} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} \right) \\ E_y &= E_{0y} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{z}{\lambda} + \varphi \right) \end{aligned} \quad (4.9.2)$$

W zależności od amplitud E_{0x} i E_{0y} oraz względnego przesunięcia fazowego φ mamy do czynienia z różną polaryzacją. Jeżeli przesunięcie fazowe $\varphi = n\pi$ (n – liczba naturalna) to fala jest spolaryzowana liniowo. Jeżeli $E_{0x} = E_{0y}$ oraz $\varphi = (2n + 1)\pi/2$ to fala spolaryzowana jest kołowo – łatwo zobaczyć, że w dowolnym, ustalonym punkcie przestrzeni pole zmienia się w czasie tak, że koniec wektora $\vec{E}$ zatacza pełny okrąg. Polaryzację eliptyczną otrzymamy w pozostałych przypadkach – wtedy koniec wektora $\vec{E}$ zakreśla w danym punkcie elipsę.

Istnieją proste sposoby otrzymania światła spolaryzowanego liniowo poprzez usunięcie z wiązki światła niespolaryzowanego wszystkich fal oprócz tych, których wektor pola elektrycznego oscyluje w jednej płaszczyźnie. Poniżej omówione są trzy podstawowe metody otrzymywania światła spolaryzowanego liniowo.

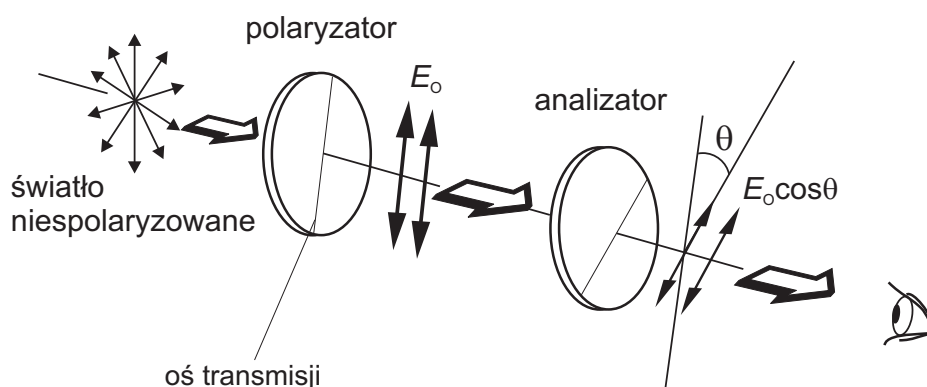
Selektywna absorpcja

Światło pada na specjalny rodzaj materiału, posiadający właściwość przepuszczania fal, których wektor elektryczny oscyluje w płaszczyźnie równoległej do pewnego kierunku (oś transmisji), a pochłaniania fal o polaryzacji prostopadłej do tej osi. Takie



Rys. 4.9.2: a) Światło niespolaryzowane b) Światło spolaryzowane liniowo. Kierunek rozchodzenia się fali jest prostopadły do płaszczyzny rysunku.

zjawisko znane jest pod nazwą dichroizmu. W 1938 roku E.H. Land odkrył materiał, który nazwano polaroidem, a który polaryzuje światło poprzez selektywną absorpcję wywołaną przez zorientowane molekuly. Materiał ten jest wytwarzany w postaci cienkich arkuszy, zawierających długie łańcuchy wodorowo-węglowe polialkoholu winylowego domieszkowanego jodkiem potasu. Łańcuchy polimerowe można orientować liniowo poprzez mechaniczne rozciąganie ogrzanych arkuszy polimeru. Jodek potasu łączy się z łańcuchami polialkoholu poprzez wiązania wodorowe powodując powstanie przewodnictwa jonowego wzdłuż łańcuchów. W rezultacie molekuly absorbują fale świetlne, których wektor elektryczny jest równoległy do ich osi, a przepuszczają fale, których wektor elektryczny jest do niej prostopadły. Zwyczajowo, kierunek prostopadły do łańcuchów molekularnych nazywany jest osią transmisji. W idealnym polaryzatorze, przepuszczane są wszystkie fale, których wektor elektryczny jest równoległy do osi transmisji, a wszystkie z wektorem prostopadłym są absorbowane.



Rys. 4.9.3: Polaryzacja światła przy przejściu przez dwie płytki polaryzujące.

$$I = I_0 \cos^2 \theta, \quad (4.9.3)$$

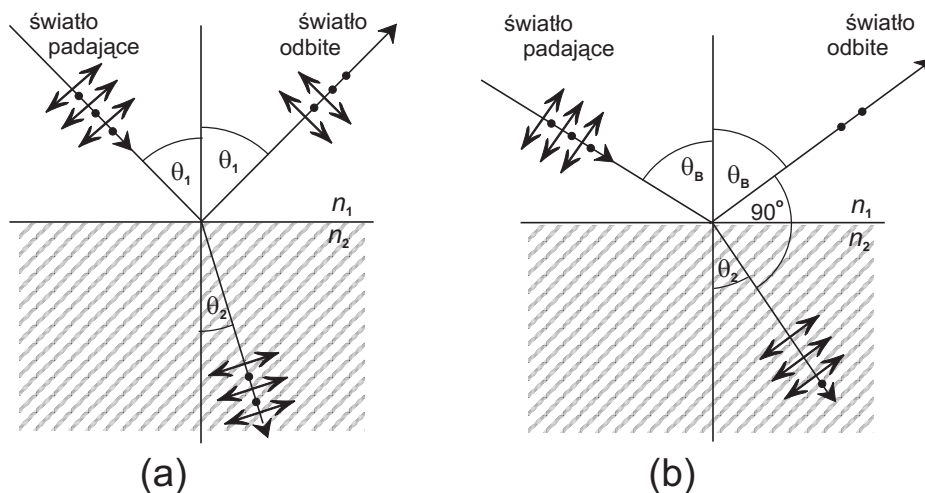
Rysunek 4.9.3 przedstawia przejście światła niespolaryzowanego przez dwie płytki polaryzujące, których osie transmisji tworzą kąt θ . Pierwsza z nich, zwana polaryzatorem, powoduje liniową polaryzację światła w kierunku zgodnym z jej osią transmisji. Po przejściu przez polaryzator, fala świetlna jest reprezentowana przez wektor elektryczny $\vec{E}_0$. Druga płytka, zwana analizatorem, przepuszcza tylko składową równoległą do jej osi transmisji, czyli $E_0 \cos \theta$. Natężenie światła jest wprost proporcjonalne do kwadratu amplitudy pola elektrycznego, a więc natężenie światła, transmitowanego przez analizator wynosi:

gdzie I_0 to natężenie światła spolaryzowanego liniowo, padającego na analizator. Równanie (4.9.3) znane jest jako prawo Malusa. Z jego analizy wynika, że maksimum natężenia występuje, gdy osie transmisji obu płytek są równoległe ($\theta = 0$ lub 180°), natomiast w przypadku osi prostopadłych natężenie światła wynosi zero.

Odbicie

Przy odbiciu niespolaryzowanej wiązki światła od powierzchni można otrzymać światło całkowicie lub częściowo spolaryzowane, w zależności od kąta padania na powierzchnię odbijającą.

Rysunek 4.9.4a przedstawia przypadek, gdy wiązka niespolaryzowanego światła pada na powierzchnię pod kątem $0^\circ < \theta_1 < 90^\circ$. Pole elektryczne tej fali można przedstawić za pomocą dwóch składowych wzajemnie prostopadłych. Jedna ze składowych (kropki) jest prostopadła do płaszczyzny padania wyznaczonej przez promień padający i normalną do powierzchni granicznej ośrodków, natomiast druga składowa (strzałki) leży w płaszczyźnie padania. Składowa prostopadła ulega odbiciu w większym stopniu niż równoległa, co powoduje, że zarówno wiązka odbita jak i załamana są częściowo spolaryzowane. W przypadku, gdy kąt padania θ_1 spełnia warunek, że promień odbity i załamany są wzajemnie prostopadłe, to wiązka światła odbitego jest całkowicie spolaryzowana i wektor jej pola elektrycznego jest prostopadły do płaszczyzny padania, natomiast wiązka załamana jest częściowo spolaryzowana (rysunek 4.9.4b). Z geometrii wynika, że $\theta_B + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ$ więc $\theta_2 = 90^\circ - \theta_B$. Stosując prawo załamania można znaleźć związek pomiędzy współczynnikiem załamania powierzchni odbijającej i kątem padania θ_B , przy którym następuje całkowita polaryzacja światła:



Rys. 4.9.4: Polaryzacja światła przez odbicie. a) częściowa polaryzacja wiązki załamanej i odbitej b) całkowita polaryzacja wiązki odbitej dla kąta padania równego kątowi Brewstera.

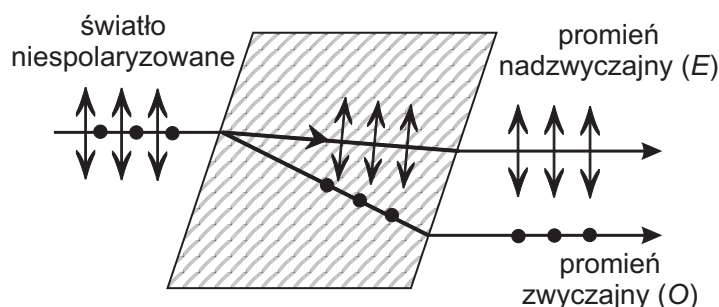
$$n = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_B}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_B}{\cos \theta_B} = \operatorname{tg} \theta_B, \quad (4.9.4)$$

bo $\sin \theta_2 = \sin (90^\circ - \theta_B) = \cos \theta_B$. Równanie $n = \operatorname{tg} \theta_B$ nosi nazwę prawa Brewstera, a kąt padania θ_B – kąta Brewstera.

Fakt częściowej polaryzacji światła w wyniku odbicia jest wykorzystywany w pewnego typu okularach przeciwsłonecznych. Światło słoneczne odbite od wody, szkła oraz metalicznych powierzchni jest częściowo spolaryzowane i wystarczy zastosować soczewki z materiału, którego oś transmisji jest prostopadła do silniejszej składowej światła spolaryzowanego, by ją wygasić. Z uwagi na to, że większość powierzchni odbijających światło w życiu codziennym jest pozioma w okularach tych stosuje się pionową oś transmisji.

Podwójne załamanie

Fala świetlna rozchodząca się w ośrodkach jednorodnych takich, jak szkło porusza się we wszystkich kierunkach z tą samą prędkością. Istnieją jednak materiały krystaliczne np. kalcyt lub kwarc, dla których prędkość światła ma różną wartość w zależności od kierunku rozchodzenia i polaryzacji. Takie materiały posiadają dwa (a nawet więcej, jak będzie przedyskutowane poniżej) różne współczynniki załamania. Zjawisko nosi nazwę podwójnego załamania, a kryształy nazywane są dwójłomnymi. Rysunek 4.9.5 przedstawia bieg promieni w kryształach dwójłomnych.



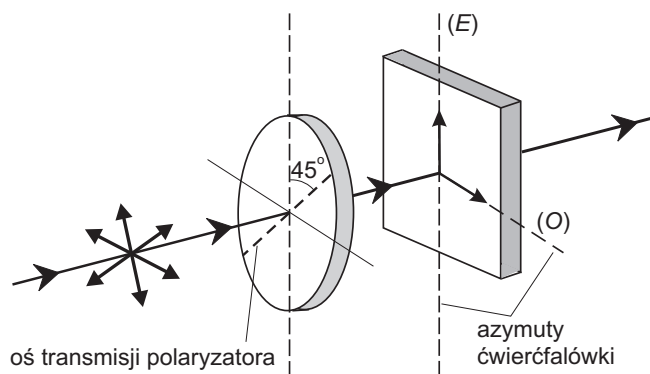
Rys. 4.9.5: Bieg promieni światła w kryształach dwójłomnych.

Wiązka światła niespolaryzowanego padająca na kryształ dwójłomny ulega rozszczepieniu na dwa promienie spolaryzowane liniowo, poruszające się z różnymi prędkościami odpowiadającymi dwóm różnym kątom załamania. Obydwa promienie są spolaryzowane liniowo w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach (kropki i strzałki na rysunku). Jeden z nich, nazywany promieniem zwyczajnym (O), charakteryzuje się współczynnikiem załamania n_O , który jest taki sam we wszystkich kierunkach (promień ten podlega prawu załamania), natomiast drugi, nadzwyczajny (E) porusza się z różnymi prędkościami w zależności od kierunku i dlatego ma współczynnik załamania n_E , który zmienia się także w zależności od kierunku rozchodzenia się fali. W kryształach dwójłomnych istnieje jeden kierunek, tzw. oś optyczna, wzdłuż którego promienie zwyczajny i nadzwyczajny mają tę samą prędkość, czyli $n_O = n_E$. Natomiast, w kierunku prostopadłym do osi optycznej różnica pomiędzy wartościami współczynników załamania jest największa. Powyższe rozważania prowadzą do prostego wniosku, że

w celu otrzymania światła spolaryzowanego liniowo, wystarczy zastosować kryształ dwójłomny i wygasić jeden z promieni.

Polaryzacja kołowa i eliptyczna

W celu otrzymania światła spolaryzowanego kołowo lub eliptycznie należy zastosować polaryzator liniowy i płytkę ćwierćfalową. Jak już wspomniano wcześniej, światłem spolaryzowanym kołowo jest światło, w którym koniec wektora świetlnego porusza się jednostajnie po okręgu. Reprezentujemy to jako wynik superpozycji dwóch drgań do siebie prostopadłych, spolaryzowanych liniowo, posiadających tę samą amplitudę i częstotliwość, ale różniących się w fazie o $\pi/2$. Taka sytuacja ma miejsce, gdy światło spolaryzowane liniowo (po przejściu przez polaryzator) pada pod odpowiednim kątem na płytkę ćwierćfalową tzw. „ćwierćfalówkę”. Ćwierćfalówka jest to cienka płytka z kryształu dwójłomnego, wycięta tak by oś optyczna kryształu była równoległa do powierzchni płytki. Grubość płytki d jest tak dobrana by przy kącie padania światła 0° różnica faz φ pomiędzy promieniem zwyczajnym (O) i nadzwyczajnym (E) wynosiła nieparzystą wielokrotność $\pi/2$ dla danej długości fali λ , czyli $\varphi = (2\pi d/\lambda) |n_O - n_E|$. Kąt padania 0° wybrany jest tak by promienie te nie rozdzielały się przestrzennie przy przejściu przez płytkę. Na ćwierćfalówce zaznaczone są dwa wzajemnie prostopadłe kierunki, tzw. azymuty. Są to kierunki drgań promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego. Należy ustawić ćwierćfalówkę w taki sposób, aby płaszczyzna drgań światła spolaryzowanego liniowo tworzyła kąty 45° z azymutami. Takie ustawienie zapewnia równość amplitud promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego. Za ćwierćfalówką światło jest spolaryzowane kołowo (rysunek 4.9.6). Przy innym ustawieniu ćwierćfalówki (kąt $\theta \neq 45^\circ$) otrzymuje się światło spolaryzowane eliptycznie.



Rys. 4.9.6: Otrzymywanie światła spolaryzowanego kołowo za pomocą polaryzatora liniowego i ćwierćfalówki.

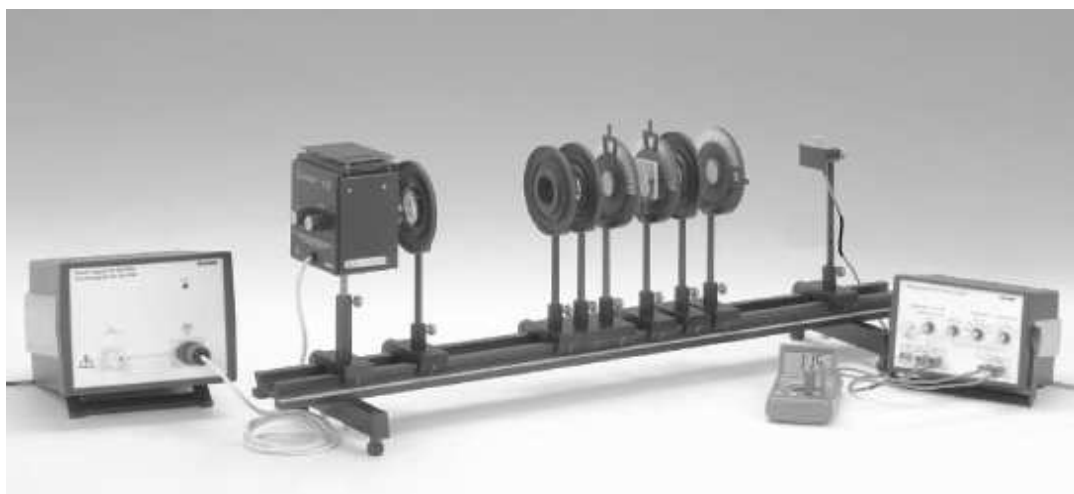
Płytkę z tego samego materiału o grubości $2d$ zmienia fazę względną promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego o wielokrotność π , taką płytkę nazywamy półfalówką, jak widać można ją złożyć z dwu odpowiednio ustawionych ćwierćfalówek. Przemysł

jak zmienia ona polaryzację światła przez nią przechodzącego i jak należy złożyć te dwie ćwierćfalówki by dostać półfalówkę.

4.9.2 Przebieg pomiarów

Układ doświadczalny

Do wykonania ćwiczenia służy układ doświadczalny (pokazany na rysunku 4.9.7), w skład którego wchodzi: źródło światła – wysokociśnieniowa lampa rtęciowa z zasilaczem, filtrem interferencyjnym dla żółtej linii rtęci (długość fali 578 nm) i diafragmą; dwa polaryzatory liniowe; dwie płytki ćwierćfalowe $\lambda/4$; soczewka; detektor promieniowania – element światłoczuły wraz ze wzmacniaczem i miernikiem uniwersalnym.



Rys. 4.9.7: Widok układu doświadczalnego.

Wszystkie elementy układu doświadczalnego umieszczone są w uchwytach, co umożliwia łatwą zmianę ich położenia na ławie optycznej. Uchwyty polaryzatora i płytek ćwierćfalowych umożliwiają ich obrót wokół wiązki światła, a skala kątowa pozwala odczytać położenie.

Po sprawdzeniu czy zestaw jest kompletny i pobraniu miernika uniwersalnego, a przed wykonaniem właściwych pomiarów, należy sprawdzić czy wszystkie elementy optyczne znajdują się na jednakowej wysokości nad ławą optyczną. Następnie usuwając obie ćwierćfalówki i analizator ustawić pozostałe elementy układu (lampę, filtr, przesłonę, polaryzator, soczewkę i detektor) tak by uzyskać dobre oświetlenie detektora. W razie potrzeby do precyzyjnej regulacji położenia wiązki światła można użyć pokręteł znajdujących się na tylnej części obudowy lampy.

Przebieg doświadczenia

W celu sprawdzenia stanu polaryzacji światła wychodzącego z polaryzatora liniowego ustawiamy go w pozycji 0° , a do układu opisanego powyżej dokładamy analizator (drugi polaryzator liniowy). Obracając analizator od położenia -90° do 90° co 5° zapisywać wskazania woltomierza, w okolicy minimum i maksimum pomiary należy zagęścić (dokonywać przy mniejszych zmianach kąta) by znaleźć te położenia jak najdokładniej. Przy pomiarach w okolicy minimum pamiętać o zmniejszeniu zakresu miernika tak by zwiększyć dokładność pomiaru. Sprawdzić także jakie są wskazania miernika przy wiązce światła zasłoniętej np. kartką papieru (tło, prąd ciemny miernika). Na podstawie tych pomiarów ustalić czy światło jest spolaryzowane liniowo i w jakim kierunku.

Ustawwszy skrzyżowane polaryzator i analizator wstawić pomiędzy nie pierwszą ćwierćfalówkę i ustalić jej osie główne (azymuty). Wcześniej zastanowić się dlaczego są one dane przez położenia minimów natężenia światła transmitowanego przez układ przy obracaniu ćwierćfalówki. Podobnie jak wcześniej ustalić położenia tych minimów jak najdokładniej. W ten sam sposób ustalić położenia azymutów drugiej ćwierćfalówki.

Dla położenia, które według dotychczasowych pomiarów odpowiada kątowi 45° między azymutami, a kierunkiem polaryzacji światła padającego sprawdzić czy stan polaryzacji odpowiada polaryzacji kołowej – w wyniku obrotu analizatora powinno się dostać niezmiennie wartości natężenia światła. Zastanowić się dlaczego tak powinno być. Jeśli zależność nie jest płaska spróbować poprawić ustawienie ćwierćfalówki tak by dostać jak najbardziej stałe wartości.

Wstawiwszy odpowiednio zorientowaną drugą ćwierćfalówkę (to jak ma być zorientowana przemyśleć wcześniej na podstawie fragmentu o półfalówce), zmieniając położenie analizatora sprawdzić jak wyżej czy udaje się uzyskać z powrotem polaryzację liniową.

Dla jednego lub więcej dowolnego innego kąta, np. 30° czy 60° , pomiędzy azymutami ćwierćfalówki, a kierunkiem polaryzacji światła sprawdzić eliptyczność uzyskanego światła badając jak poprzednio zależność wskazań miernika od położenia analizatora. Używając drugiej ćwierćfalówki sprawdzić czy i w tym wypadku da się odzyskać polaryzację liniową światła przechodzącego przez układ.

4.9.3 Opracowanie wyników

Na podstawie pomiarów polaryzacji światła w pierwszej części sprawdzić prawo Malusa, tj. sprawdzić czy wyniki doświadczenia są zgodne z zależnością teoretyczną $I = I_0 \cos^2 \theta$. W tym celu do uzyskanych w tej części wyników dopasować krzywą postaci $U(\theta) = a_1 \cos^2(\theta + a_2) + a_3$. Uwzględniając istnienie zmierzonego tła (parametr a_3) proszę przedyskutować, czy założenie o liniowej polaryzacji światła za pierwszym polaryzatorem jest poprawne. Określić stan polaryzacji światła.

Wykonać wykresy danych otrzymanych dla światła spolaryzowanego kołowo i eliptycznie oraz przedyskutować w jaki sposób wnioskujemy z tych wykresów, że światło było spolaryzowane kołowo lub eliptycznie. Podać położenia katowe osi głównych elipsy

oraz wyznaczyć doświadczalną i teoretyczną wartość eliptyczności światła dla znanych ustawień kątów pomiędzy polaryzacją światła padającego, a azymutami ćwierćfalówki.