Pomiar stałych elastycznych nematycznego ciekłego kryształu

Spis treści

1. Wprowadzenie	1
2. Deformacje elastyczne ciekłych kryształów	3
3. Oddziaływanie ciekłych kryształów z polami zewnętrznymi	4
A. Progowy efekt Frederiksa	6
B. Zjawisko samodyfrakcji w ciekłych kryształach	7
4. Układ eksperymentalny	9
5. Wykonanie doświadczenia 1	2
6. Opracowanie wyników i przygotowanie sprawozdania 1	3
Dodatki 1	.3
7. Obliczenie niepewności pomiaru 1	.3
8. Parametry wykorzystywanych w doświadczeniu ciekłych kryształów 1	4
Literatura:1	.4

1. Wprowadzenie

Ciekłe kryształy są substancjami organicznymi lub metaloorganicznymi najczęściej zbudowanymi z prętopodobnych molekuł o dużej anizotropii fizycznej. Dzięki oddziaływaniom typu van der Waalsa charakteryzują się dalekozasięgowym uporządkowaniem orientacyjnym molekuł. Średni kierunek uporządkowania opisywany jest poprzez bezwymiarowy wektor, tzw. direktor, **n**. Direktor reprezentuje tylko położenie długich osi molekuł i nie odwzorowuje żadnych innych własności. Molekuły ciekłokrystaliczne są w większości przypadków jednoosiowe i środkowosymetryczne, co oznacza, że ich właściwości fizyczne w kierunkach +**n** i –**n** są jednakowe

Równoległe uporządkowanie molekuł ulega zniszczeniu po podgrzaniu do odpowiednio wysokiej temperatury, (tzw. temperatura przejścia nematyk-faza izotropowa), w której nie występuje już dalekozasięgowe uporządkowanie i ciekły kryształ przechodzi w fazę izotropową.



Substancje występujące w fazie ciekłokrystalicznej mają charakterystyczną budowę geometryczną. Molekuły tych związków mają kształt wydłużony, przypominający pręty i z reguły nie mają odgałęzień bocznych. Schematyczną budowę molekuły ciekłokrystalicznej przedstawiono na rys. 2. Grupa centralna A decyduje o rodzaju związku i połączona jest z dwoma pierścieniami benzenowymi.



Średni kierunek uporządkowania molekuł w danym obszarze określony jest poprzez direktor \mathbf{n} – rys. 3. Nie wszystkie molekuły ułożone są jednak równolegle do direktora, gdyż na skutek fluktuacji ulegają odchyleniom w czasie i przestrzeni. Stopień uporządkowania określa tzw. parametr uporządkowania S:

$$S = \frac{1}{2} \left\langle 3\cos^2 \theta - 1 \right\rangle \tag{1}$$

gdzie: θ jest kątem pomiędzy direktorem a długą osią molekuły, nawiasy $\langle \rangle$ oznaczają uśrednienie po całym zbiorze molekuł. Dla kryształu o idealnym uporządkowaniu *S*=*I*, a przy braku uporządkowania S=0. Dla nematyków parametr ten przyjmuje wartość z przedziału $< 0,4 \div 0,7 >$ i zależny jest od temperatury.



2. Deformacje elastyczne ciekłych kryształów

Ciekłe kryształy są cieczami optycznie dwójłomnymi, a więc łatwo poddają się oddziaływaniom deformującym, a każda taka deformacja wpływa na właściwości optyczne warstwy ciekłokrystalicznej. Jednocześnie w odróżnieniu od cieczy izotropowych, ciekłe kryształy wykazują sprężystość. Deformacje mogą być wywołane nie tylko mechanicznie, ale również pod wpływem zewnętrznych pól magnetycznych, termicznych i elektrycznych.

W stanie równowagi, nematyk niepoddawany działaniu zewnętrznych sił jest jednorodny, tzn. w całej objętości direktor $\mathbf{n} = const$. Pod wpływem oddziaływania kierunek direktora zmienia się wolno w przestrzeni. Teoria continuum nematyków mówi, że własności opisane polem direktora zmieniają się w sposób ciągły od punktu do punktu. Energia swobodna wynika z deformacji elastycznych i wyraża się poprzez zmianę kierunku direktora \mathbf{n} . Konfigurację, jaką ostatecznie przyjmuje warstwa ciekłego kryształu pod działaniem zewnętrznych sił deformujących oblicza się przy pomocy zasady minimum energii F. W nematykach wyróżnia się trzy podstawowe typy deformacji (rys. 4): wachlarzową (splay) – rys. 4a, ugięciową (bend) – rys. 4b oraz skręceniową (twist) – rys. 4c.

Gęstość energii swobodnej deformacji sprężystych w nematykach została podana przez Franka w 1958 roku:

$$f_f = \frac{1}{2} K_{11} (div \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{22} (\mathbf{n} \cdot rot \, \mathbf{n})^2 + \frac{1}{2} K_{33} (\mathbf{n} \times rot \, \mathbf{n})^2$$
(2)

gdzie: K_{11} , K_{22} , K_{33} są stałymi sprężystości (stałymi Franka) dla trzech podstawowych deformacji nematyka:

Laboratorium Optyki Nieliniowej

Całkowicie optyczny pomiar stałych elastycznych

- a) K_{11} deformacja wachlarzowa (*splay*)
- b) K_{22} deformacja skręceniowa (*twist*)
- c) K_{33} deformacja ugięciowa (*bend*)



Stałe sprężystości są dodatnie, maja wymiar siły rzędu $(10^{-10} \div 10^{-12})$ N i zależą od temperatury. Dla większości nematyków zachodzi relacja: $K_{33} > K_{11} > K_{22}$.

3. Oddziaływanie ciekłych kryształów z polami zewnętrznymi

Zewnętrzne pole elektryczne o odpowiednim natężeniu wywiera na molekuły ciekłego kryształu silnie oddziaływanie reorientujące. W zależności od znaku anizotropii elektrycznej molekuły dążą do ustawienia swoich długich osi równolegle bądź prostopadle do linii sił pola działającego na ciekły kryształ. Umieszczenie nematyka w zewnętrznym polu elektrycznym powoduje pojawienie się dodatkowego członu w równaniu wyrażającym gęstość energii swobodnej:

$$f_{el} = -\frac{1}{2}\varepsilon_0 \Delta \varepsilon (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})^2$$
(3)

Tak, więc wyrażenie na energię swobodną nematyka o objętości V umieszczonego w polu elektrycznym będzie miało postać:

$$f = f_f + f_{el} \tag{4}$$

W stanie równowagi termodynamicznej energia swobodna $F = \int_{V} f d^{3}\mathbf{r}$ przyjmuje minimum a jej

gęstość spełnia równanie różniczkowe Eulera-Lagrange'a.

które dla konfiguracji homeotropowej i homogenicznej (planarnej), oraz jednorodnego pola elektrycznego redukuje się do postaci:

$$K_{ii}\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{\varepsilon_0\Delta\varepsilon}{2}E^2\sin 2\theta = 0$$
(5)

gdzie θ jest kątem pomiędzy direktorem a kierunkiem pola elektrycznego. Rys. 5 przedstawia przypadek dla komórki homogenicznej i pola elektrycznego skierowanego wzdłuż osi Ox , i wówczas we wzorze (5) *K*_{ii} = *K*₁₁. Rozwiązanie równania (5) określa, jaką ostatecznie konfigurację przyjmuje ciekły kryształ pod wpływem zewnętrznych sił deformujących.



Znak anizotropii elektrycznej wpływa na charakter oddziaływania molekuł z zewnętrznym polem elektrycznym. W przypadku dodatniej anizotropii molekuły orientują się zgodnie z kierunkiem pola elektrycznego. W przypadku anizotropii ujemnej molekuły orientują się prostopadle do kierunku pola.

A. Progowy efekt Frederiksa

Deformacja warstwy ciekłokrystalicznej przez umieszczenie jej w zewnętrznym polu elektrycznym często zachodzi powyżej pewnej wartości minimalnej natężenia pola zewnętrznego. Jeśli do komórki ciekłokrystalicznej o ściśle określonych warunkach brzegowych oraz jednorodnej orientacji direktora w całej objętości przyłożone zostanie pole elektryczne rozpocznie się proces przeorientowania molekuł. W sytuacji, kiedy początkowy kierunek linii sił pola jest prostopadły do początkowej orientacji direktora proces ten zacznie się powyżej pewnej wartości progowej. Zjawisko nazywa się efektem progowym Frederiksa i wywołane jest silnym zakotwiczeniem molekuł na powierzchniach ograniczających warstwę. Molekuły zakotwiczone na powierzchni płytek ograniczających warstwę ciekłego kryształu nie zmieniają swojego położenia mimo działania pola zewnętrznego. W celu uzyskania deformacji molekuły z wnętrza warstwy dążą do ustawienia prostopadłego względem molekuł zakotwiczonych. Następuje to wtedy, gdy wartość energia działania pola będzie dostatecznie duża, a jej wartość jest tym większa im większą wartość mają współczynniki sprężystości *K*. Jednocześnie wartość energii progowej maleje wraz ze wzrostem grubości ciekłego kryształu, gdyż działanie powierzchni ograniczających maleje.

Efekt Frederiksa występuje zarówno w komórkach zorientowanych planarnie jak i homeotropowo (pod warunkiem, że zostanie ona umieszczona w zewnętrznym polu prostopadłym do kierunku direktora) w trzech głównych geometriach: *twist, splay* i *bend*, które wiążą ze sobą wartości odpowiednich stałych elastycznych z wartością progową pola. Z minimalizacji energii swobodnej otrzymuje się natężenie progowe pola wywołującego reorientację:

$$E_{c}^{(i)} = \frac{\pi}{d} \left(\frac{K_{ii}}{\varepsilon_{0} \Delta \varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}}$$
(6)

gdzie d jest grubością warstwy ciekłokrystalicznej, a i = 1,2,3 oznacza kolejne deformacje typu *splay, twist* i *bend.*

Iloczyn progowej wartości natężenia i grubości warstwy ciekłego kryształy jest stały $E_c d = const$. Natomiast wartość progowa napięcia wywołującego reorientację nie zależy od grubości: $U_c = E_c d$.

Znając wartość progową pola możliwe jest wyznaczenie odpowiedniej stałej elastycznej:

Laboratorium Optyki Nieliniowej

Całkowicie optyczny pomiar stałych elastycznych

$$K_{ii} = \frac{E_{ih}^2 \varepsilon_0 \Delta \varepsilon d^2}{\pi^2} \tag{7}$$

Reorientacja molekuł może nastąpić również pod wpływem fali elektromagnetycznej, i wówczas we wzorze (5) należy uwzględnić wartość średnią kwadratu pola elektrycznego $\langle E^2 \rangle = \frac{1}{2} E_{opt}^2$, gdzie E_{opt} jest amplitudą pola elektrycznego fali elektromagnetycznej. W tym przypadku $\Delta \varepsilon = n_e^2 - n_o^2$, gdzie n_e i n_o są odpowiednio współczynnikami załamania światła nadzwyczajnym i zwyczajnym. Dla wiązki gaussowskiej o natężeniu $I = I_0 \exp(-r^2 / w_0^2)$, gdzie gdzie w_0 jest przewężeniem wiązki, $r^2 = x^2 + y^2$ a natężenie światła definiowane jest jako $I = \varepsilon_0 < E^2 >$, moc całkowita wiązki wynosi:

$$P = \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{2\pi} I_{o} r dr d\varphi = n_{0} \frac{\pi W_{0}^{2}}{4\mu_{0}c} E_{o}^{2}$$
(8)

gdzie E_{opt} jest amplitudą natężenia pola elektrycznego w środku wiązki. Dokonując pomiaru wartości progowej mocy wiązki, przy których obserwujemy pojawienie się reorientacji możemy oszacować wartość stałej elastycznej (7)

$$K_{ii} = 4P_{th} \frac{d^2 \Delta \varepsilon}{\pi^3 w_0^2 n_0 c}$$
⁽⁹⁾

B. Zjawisko samodyfrakcji w ciekłych kryształach

Pod wpływem prześwietlającej warstwę ciekłokrystaliczną fali świetlnej molekuły wewnątrz warstwy zaczynają się obracać w wyniku reorientacji. Dla wiązki o skończonej szerokości reorientacja molekuł staje się funkcją odległości od środka wiązki. Przyjęcie sztywnych warunków brzegowych powoduje, iż największe zmiany orientacji molekuł zachodzą w środku komórki i maleją wraz ze zbliżaniem się do ścianek ograniczających. Prowadzi to do niejednorodnego rozkładu współczynnika załamania wewnątrz warstwy, co w konsekwencji powoduje zmianę fazy rozchodzącej się wiązki światła. Prowadzi to ostatecznie do wytworzenia się w oświetlanej komórce przesłony fazowej, na której światło ulega dyfrakcji. Światło przechodzące tworzy obraz dyfrakcyjny w polu dalekim. Zjawisko to określane jest mianem samodyfrakcji i obserwowane jest w postaci współśrodkowych prążków

obserwowanych w polu dalekim na ekranie lub matrycy CCD, których liczba jest bezpośrednio związana z gęstością mocy. Przykładowy obraz dyfrakcyjny, przedstawiony został na rys. 6c-e

W sytuacji jak na rys. 6a-b liniowo spolaryzowane światło o wektorze natężenia E, pada na komórkę ciekłokrystaliczną o grubości d wzdłuż osi z (rys. 6a). Pod wpływem pola molekuły ulegają reorientacji w płaszczyźnie *xy*, doznając deformacji typu twist (rys. 6b). Wiązka światła przechodzącą przez warstwę na skutek niejednorodnej zmiany współczynnika załamania doznaje nieliniowej zmiany fazy, określonej:

$$\phi(x,y) = \frac{2\pi}{\lambda} \int_{0}^{d} \Delta n(x,y,z) dz$$
⁽¹⁰⁾



Otrzymany obraz samodyfrakcyjny silnie zależy od parametrów układu pomiarowego, oraz parametrów geometrycznymi samej komórki. Podobne obrazy można uzyskać dla różnych mocy optycznych wiązki. Związane jest to przede wszystkim z grubością badanej próbki, oraz przewężeniem wiązki. We wzorze (9) wartość stałej elastycznej jest proporcjonalna do grubości komórki w kwadracie co oznacza, że im badana próbka jest grubsza tym moc wiązki konieczna do uzyskania efektu maleje. Powodem tego są warunki brzegowe, które definiują początkowe ułożenie

molekuł w komórce ciekłokrystalicznej. Z odwrotną sytuacją mamy do czynienia w przypadku przewężenia w_0 . Im mniejsze staje się przewężenie tym mniejsza moc jest potrzebna do uzyskania obrazu. Przewężenie wiązki jest bezpośrednio związane z obszarem komórki, który jest oświetlany a tym samym z obszarem, na którym dochodzi do efektu samodyfrakcji.

4. Układ eksperymentalny

Celem eksperymentu jest wyznaczenie stałych elastycznych analizowanego ciekłego kryształu (bądź mieszaniny ciekłokrystalicznej).



Podstawowy układ eksperymentalny przedstawiono na rys. 7

(a): W układzie eksperymentalnym zbudowanym według schematu przedstawionego na rys. 7. a. przyłożone pole elektryczne powoduje zmianę orientacji długich osi molekuł do pozycji równoległej względem linii sił pola dla $\vec{E} > \vec{E_{th}}$. Zmiana napięcia na generatorze powoduje zmianę wartości natężenia pola.

(b): W ćwiczeniu jako źródło światła wykorzystany zostanie liniowo spolaryzowany laser emitujący wiązkę o długości fali 532 nm. Polaryzator i półfalówka służą do kontroli mocy i polaryzacji wiązki. Kontrola polaryzacji światła jest warunkiem koniecznym w przypadku konfiguracji planarnej przy wyznaczaniu stałej K₂₂. Liniowo spolaryzowana wiązka skupiana jest przy pomocy obiektywu mikroskopowego do pewnej, ściśle określonej średnicy w₀ i pada wzdłuż osi z, prostopadle do komórki.

W eksperymencie analizowany będzie ciekły kryształ 6CHBT w konfiguracji planarnej i homeotropowej. Konfiguracja planarna służy do wyznaczenia stałej K_{11} i K_{22} , natomiast konfiguracja homeotropowa do wyznaczenia stałej K_{33} .

(a) Pomiar K₁₁

Pomiar wartości stałej elastyczności K_{11} związanej z deformacją typu wachlarzowego polega na obserwacji pod mikroskopem reakcji komórki w konfiguracji planarnej zawierającej analizowany ciekły kryształ na przyłożone zewnętrzne pole elektryczne. Zwiększenie napięcia na generatorze nie powoduje zmian w komórce ciekłokrystalicznej do chwili przekroczenia wartości progowej. Po jej przekroczeniu zmiana barwy lub zaciemnienie obrazu co spowodowane jest zmianą orientacji cząsteczek nematycznego ciekłego kryształu. Zadaniem zespołu jest obserwacja oraz zarejestrowanie progowej wartości napięcia wywołującego reorientację oraz obliczenie progowego natężenia pola elektrycznego. Następnie wartość to wykorzystana zostanie w celu wyznaczenia wartości stałej elastyczności K_{11} ze wzoru (7).



Rys. 8. (a) Schemat komórki ciekłokrystalicznej o orientacji planarnej (b) proces reorientacji molekuł w kierunku osi x pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego przyłożonego wzdłuż osi x.

(b) Pomiar K₂₂

Pomiaru stałej K₂₂, czyli stałej związanej z deformacją typu skręceniowego (twist) wykonuje się wykorzystując zjawisko samodyfrakcji w komórce o orientacji planarnej (rys. 9). W stosowanej geometrii układu molekuły ciekłego kryształu pod wpływem pola elektrycznego będącego składową fali elektromagnetycznej ulegają reorientacji w płaszczyźnie xy doznając głównie deformacji typu twist. Kąt opisujący kąt orientacji molekuł θ , zdefiniowany jest w tym przypadku jako kąt między kierunkiem direktora \vec{n} a osią x. Kąt polaryzacji γ mierzony jest względem osi y. Polaryzacja wzdłuż osi y odpowiada polaryzacji prostopadłej względem orientacji molekuł.

Polaryzacja wzdłuż osi x odpowiada polaryzacji równoległej względem długich osi molekuł zatem wiązka o takiej polaryzacji nie wywoła efektu reorientacji. Polaryzacja wzdłuż osi y wywoła

reorientacją molekuł, gdy moc wiązki przekroczy wartość progową. W celu wykonania prawidłowego pomiaru stałej K_{22} wykorzystuje się efekt progowy oraz opisane wcześniej zjawisko samodyfrakcji, należy zatem precyzyjnie dopasować polaryzację wiązki tak, aby była ona prostopadła do początkowego ustawienia molekuł. Istnieje bowiem możliwość uzyskania prążków samodyfrakcyjnych dla wiązki spolaryzowanej liniowo pod pewnym kątem γ do początkowego położenia długich osi molekuł, nie prostopadle do kierunku ułożenia cząsteczek ciekłego kryształu, jednak moc dla której będą obserwowane nie będzie pokrywała się z mocą progową. W konsekwencji doprowadzi to do błędnego wyznaczenia stałej K₂₂.



Rys. 9 (a) Schemat komórki ciekłokrystalicznej o orientacji planarnej prześwietlanej wiązka światła w kierunku osi z o polaryzacji wzdłuż osi y; (b) proces reorientacji molekuł w płaszczyźnie xy pod wpływem pola elektrycznego o wektorze natężenia **E**

Jak opisano powyżej zjawisko samodyfrakcji mające miejsce przy prześwietlaniu komórki ciekłokrystalicznej charakteryzuje się powstawaniem współśrodkowych pierścieni dyfrakcyjnych dla mocy wiązki powyżej wartości progowej. Jednakże, za bardziej precyzyjną metodę obserwacji zjawiska reorientacji przyjmuje się pomiar mocy rejestrowanej przez detektor umieszczony w osi układy. W eksperymencie należy wstawić przed detektor z rys. 7.b przesłonę oraz ustawić detektor tak, aby rejestrował moc wiązki w środku obrazu dyfrakcyjnego. Następnie zwiększając moc należy rejestrować moc wiązki w centrum obrazu dyfrakcyjnego w funkcji mocy padającej na analizowaną komórkę ciekłokrystaliczna. Zmiana mocy poniżej wartości progowej widoczna bedzie jako liniowa zmiana mocy rejestrowanej przez detektor ustawiony za przesłoną proporcjonalna do zmiany mocy oświetlającej próbkę. Po przekroczeniu mocy progowej zarejestrowany powinien zostać spadek mocy w centrum obrazu dyfrakcyjnego, co spowodowane będzie pojawieniem się pierwszego minimum prażków samodyfrakcyjnych. Następnie z powstałego w ten sposób wykresu należy odczytać progowa wartość mocy Pth jako punkt w którym następuje spadek sygnału rejestrowanego przez detektor ustawiony za przesłoną. W celu wyznaczenia wartości stałej elastyczności K₂₂ należy wykorzystać tę wartość we wzorze (9).

(c) Pomiar K₃₃

Konfiguracja homeotropowa służy do wyznaczenia stałej elastycznej K₃₃, czyli stałej związanej z deformacją typu ugięciowego. W stosowanej geometrii układu molekuły ciekłego kryształu pod wpływem pola ulegają reorientacji w płaszczyźnie xz lub yz doznając głównie deformacji typu bend (ugięciowego). Reorientacja zachodzi zarówno dla polaryzacji wzdłuż osi x, jak i dla polaryzacji wzdłuż osi y. Schemat reorientacji w przypadku orientacji homeotropowej przedstawiony został na rysunku 10. Mechanizm fizyczny jest analogiczny jak dla przypadku konfiguracji planarnej.



5. Wykonanie doświadczenia

- Zaobserwować efekt nieliniowy (zjawisko reorientacji) w konfiguracji planarnej i wyznaczyć stałą elastyczności K₁₁. Dokonać przynajmniej 10 pomiarów w celu weryfikacji wyniku końcowego.
- Zaobserwować efekty nieliniowej (zjawisko samodyfrakcji) w konfiguracji planarnej i wyznaczyć stałą elastyczną K₂₂. Wykonać przynajmniej 3 serie pomiarowe.
- 3. Zaobserwować efekty nieliniowe (zjawisko samodyfrakcji) w konfiguracji homeotropowej i wyznaczyć stałą elastyczną K₃₃. Pomiary przeprowadzić zarówno dla polaryzacji wzdłuż osi x jak i y w celu weryfikacji uzyskanych wyników. Wykonać przynajmniej 3 serie pomiarowe.

Dokładny, szczegółowy zakres prac oraz kolejność ich wykonywania podany zostanie na zajęciach przez prowadzącego.

6. Opracowanie wyników i przygotowanie sprawozdania

- 1. Cel ćwiczenia
- 2. Krótki wstęp teoretyczny co zostało wykonane w ramach ćwiczenia
- 3. Schemat i opis układu pomiarowego wraz z opisem wykonania ćwiczenia
- 4. Określenie parametrów geometrycznych komórki oraz podstawowy opis badanego ciekłego kryształu.
- 5. Wyniki prezentujące zjawisko reorientacji oraz samodyfrakcji w konfiguracji planarnej wraz z wyznaczonymi stałymi elastyczności K₁₁ i K₂₂. Wyniki należy podać z błędem pomiarowym oraz porównać je z wartościami zaczerpniętymi z literatury (patrz Dodatek). Nie należy podawać jedynie wyników końcowych, ale pokazać w jaki sposób zostały one uzyskane.
- 6. Wyniki prezentujące zjawisko samodyfrakcji w konfiguracji homeotropowej wraz z wyznaczoną stałą elastyczną K₃₃. Wyniki należy podać z błędem pomiarowym oraz porównać je z wartościami zaczerpniętymi z literatury (patrz Dodatek). Nie należy podać jedynie wyniku końcowego, ale pokazać w jaki sposób otrzymano wynik.
- 7. Wnioski

UWAGA: Na zajęcia należy przynieść pendrive'a (min. 1GB), jeden na zespół. W trakcie zajęć nie ma możliwości korzystania z własnych komputerów.

Wszystkie prezentowane wyniki powinny zawierać komentarz i opis wyjaśniający, każdy prezentowany wykres w sprawozdaniu powinien zawierać podpis pod wykresem oraz komentarz w tekście sprawozdania.

Dodatki

7. Obliczenie niepewności pomiaru

Głównymi źródłami niepewności wpływającymi na wyniki obliczeń są niepewność związane z przyrządami. Największy wpływ na wynik pomiarów ma dokładne wyznaczenie przewężenia w_0 , które uzależnione jest od przesunięcia kamery CCD w kierunku osi propagacji oraz rozdzielczości

przyrządu rejestrującego obraz. Niewielkie zmiany w wartości przewężenia implikują znaczące zmiany wartości K_{ii} .

Drugim znaczącym źródłem niepewności jest pomiar mocy wiązki uzależniony od klasy przyrządu pomiarowego oraz jego dokładnego ustawienia. Nie bez znaczenia jest również dokładna znajomość grubości próbki ciekłego kryształu. Pozostałe wielkości we wzorze (7) są wielkościami stałymi.

Obliczenie niepewności przesunięcia kamery CCD przy wyznaczaniu w_0 zdeterminowane jest najmniejszą podziałką na śrubie mikrometrycznej, natomiast wielkość pojedynczego piksela podana została w dokumentacji urządzenia. Niepewność pomiaru mocy uzależniona jest od klasy urządzenia oraz zakresu i obliczona powinna zostać jako niepewność standardowa typu B. Niepewność pomiaru grubości komórki zostanie podana na przez prowadzącego. Następnie należy posłużyć się metodą obliczenia niepewności złożonej.

8. Parametry wykorzystywanych w doświadczeniu ciekłych kryształów

ciekły kryształ 6CHBT, λ=532nm

stopnie C	Zwyczajny	nadzwyczajny
20	1,52	1,67

Typowe wartości stałych elastycznych dla ciekłego kryształu 6CHBT:

K ₁₁ [pN]	K ₂₂ [pN]	K ₃₃ [pN]
8,5 - 9,0	3,5-3,9	9,5 - 9,9

Literatura:

- 1. A. Adamczyk, Z. Strugalski, Ciekłe kryształy, (WNT, Warszawa, 1976)
- 2. A. Adamczyk, *Niezwykły stan materii. Ciekłe kryształy*, (Wiedza Powszechna, Warszawa 1979)
- M. A. Karpierz, T. R. Woliński, *Nieliniowe własności ciekłych kryształów*, Tempu Series in Applied Optics, (Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 1997)
- 4. F. Ratajczyk, Optyka ośrodków anizotropowych, (Wyd. Naukowe PWN, Warszawa 1994)
- 5. Liquid crystals databas, LiqCryst 4.2, © 2002 Volkmar Vill.

J. Parka, M. Dąbrowski, R. Kowerdziej, Investigations of twist elastic constant K 22 of new nematic liquid crystal materials using threshold IPS method, *Opto-Electronics Review* 19, 115 (2011)