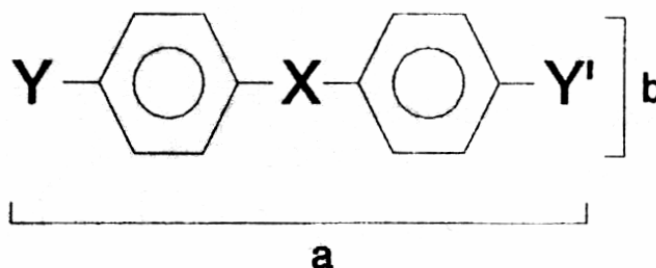


Ćwiczenie nr 53

BADANIE PRZEJŚĆ FAZOWYCH I WŁAŚCIWOŚCI ELEKTROOPTYCZNYCH CIEKŁYCH KRYSTAŁÓW.

Ogólne wiadomości o ciekłych kryształach.

Ciekłe kryształy to grupa kilkudziesięciu tysięcy ciekłych substancji organicznych o unikalnych właściwościach fizycznych. Fazy ciekłokrystaliczne można traktować jako fazy pośrednie między kryształem, a izotropową cieczą i dlatego mówi się o ciekłych kryształach jako o fazach mezomorficznych, czyli fazach o budowie pośredniej. Dużą grupę tych związków można opisać ogólnym wzorem chemicznym pokazanym na rys.1, gdzie Y,Y'= CH₃O, C₅H₁₁, CN i inne, a X = CHN, NNO itd.



Rys.1. Ogólny wzór chemiczny dużej grupy ciekłych kryształów.

Pierścienie benzenowe mogą też być połączone bezpośrednio. Molekuły związków ciekłokrystalicznych mają z reguły kształt wydłużonego, sztywnego pręta, choć mogą przyjmować także inne kształty (np. dysku – związki dyskotyczne) lub nie być sztywne (np. polimerowe ciekłe kryształy). Stosunek dłuższej (a) i krótszej (b) (rys.1) osi molekuł ciekłych kryształów wynosi od około sześciu do kilkunastu. W przypadku jednego z pierwszych znanych ciekłych kryształów – p-azoksyanizolu (PAA) (Y = CH₃O, X = NNO, Y' = CH₃O) a = 2nm, b = 0.3 ÷ 0.4nm, a więc stosunek ten wynosi około 7.

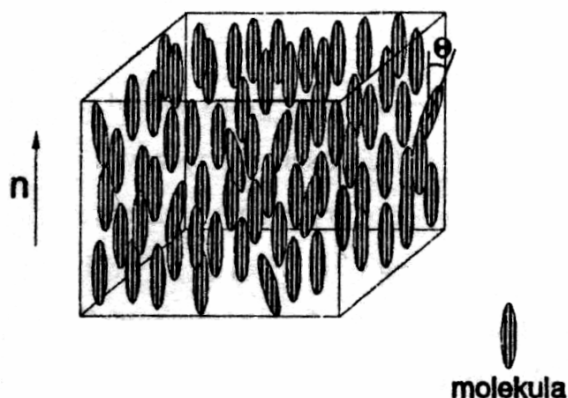
Typy struktur ciekłych kryształów.

Podstawową przyczyną występowania specyficznych właściwości jest istniejące w ciekłych kryształach uporządkowanie orientacyjne. Polega ono na równoległym ustawieniu się długich osi molekuł. Różne modyfikacje tego typu uporządkowania prowadzą do powstawania różnych typów struktur. Można spośród

nich wyróżnić: nematyki i smektyki oraz ich odmiany chiralne – nematyki chiralne i smektyki chiralne.

Nematyki.

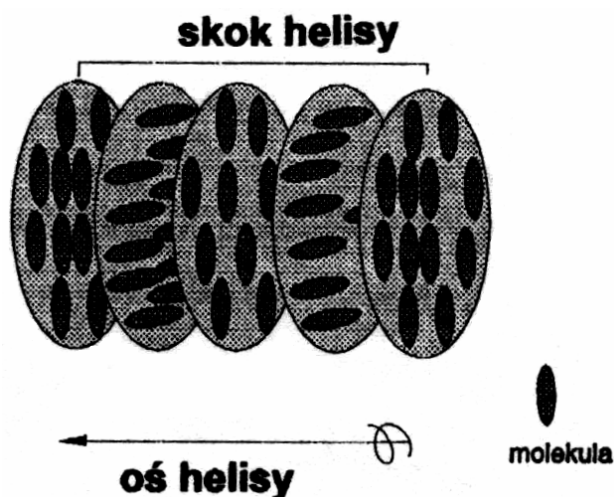
W tych związkach jedynym ograniczeniem ułożenia molekuł jest warunek równoległości ich długich osi. W nematykach istnieje jednak pewien rozrzut kierunków długich osi ze względu na drgania termiczne. Średni kierunek długich osi molekuł jest wyznaczony przez jednostkowy wektor uporządkowania \mathbf{n} (rys.2). Lepkość nematyków jest mała, porównywalna z lepkością mleka.



Rys.2. Schemat struktury nematyka.

Nematyki chiralne.

W tym przypadku molekuly tworzą quasi-warstwy, przy czym długie osie molekuł są skierowane równolegle względem warstw. Cechą charakterystyczną tej grupy jest to, że średnie kierunki ułożenia długich osi molekuł, pozostając równoległe w obrębie pojedynczej warstwy ulegają skręceniu o niewielki kąt przy przejściu do warstw sąsiednich (rys.3).



Rys.3. Skręcenie molekuł w kolejnych warstwach nematyka chiralnego.

Przyczyną tego skręcenia jest

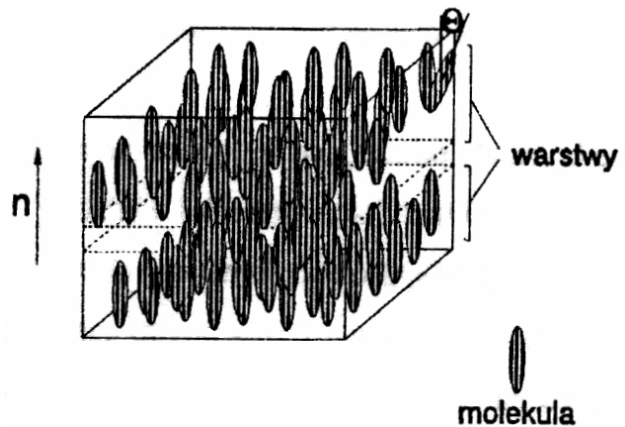
występowanie w molekułach nematyków chiralnych bocznych grup atomowych, powodujących, że najkorzystniejszym energetycznie ułożeniem molekuł z sąsiednich warstw jest ułożenie ukośne. Skręcenie prowadzi do helikoidalnej struktury tych ciekłych kryształów. Skok helisy zależy od wielu czynników takich jak np. temperatura, może wynosić od 200nm do około 5000 nm. W większości przypadków w miarę wzrostu temperatury ten skok początkowo szybko maleje, po czym szybko ustala się, choć są materiały, w których ta zależność temperaturowa jest przeciwna. Fakt, że skok helisy jest porównywalny z długością fal świetlnych z zakresu światła widzialnego (400 ÷ 700nm), prowadzi do zjawiska odbicia w warstwach nematyków chiralnych światła o określonej długości fali i powstania charakterystycznych dla nich

czystych, metalicznych barw, zmieniających się z temperaturą. Lepkość ciekłych kryształów z tej grupy jest dużo większa niż lepkość nematyków.

Smektyki.

Cechą wspólną smektyków jest to, że molekuly, będąc równoległe względem siebie tworzą warstwy. Znanych jest szereg odmian smektyków z których najważniejsze to:

- **smektyki A**, w których długie osie molekuł ustawione są prostopadle do warstw (rys.4) ale wewnątrz warstw molekuly mogą się beładnie przemieszczać, tworząc 2-wymiarową ciecz.
- **smektyki B**, w których, w odróżnieniu od smektyków A, molekuly tworzą wewnątrz warstw struktury uporządkowane przypominające 2-wymiarowy kryształ. Jest to rzadziej spotykany typ struktury.
- **smektyki C**, popularny typ smektyków, które od smektyków A różnią się tym, że długie osie molekuł są ustawione ukośnie do warstw. Molekuly rozmieszczone są wewnątrz warstw w sposób beładny.
- **smektyki chiralne**, w związkach tej grupy mamy do czynienia ze strukturą warstwową. Molekuly w warstwie są pochylone, a kąt pochylenia waha się między 13° a 50° . Dodatkowo kierunek pochylenia w kolejnych warstwach ulega skręceniu wokół osi prostopadłej do warstw. Struktura taka wykazuje istnienie lokalnej spontanicznej polaryzacji elektrycznej, która pozwala na sterowanie właściwościami elektrycznymi warstw ciekłokrystalicznych przy pomocy zewnętrznego pola elektrycznego. Do tej grupy należą ferroelektryczne ciekłe kryształy znajdujące zastosowanie w przetwarzaniu obrazów.



Rys.4. Schemat struktury smetyka

Lepkość smektyków jest na ogół większa niż lepkość nematyków i nematyków chiralnych, mogąc osiągać wartości porównywalne z lepkością wosku.

Przejścia fazowe w ciekłych kryształach pod wpływem ogrzewania.

Ciekłe kryształy powstające w wyniku stopienia fazy krystalicznej lub ochłodzenia cieczy izotropowej, czyli w rezultacie przemian termicznych, nazywamy termotropowymi ciekłymi kryształami. Innym sposobem otrzymania struktur ciekłokrystalicznych jest mieszanie pewnych rozpuszczalników z określonymi

substancjami organicznymi. Fazy, które można uzyskać tylko na tej drodze liotropowymi ciekłymi kryształami. (W dalszym ciągu będzie mowa tylko o związkach termotropowych).

Ciekłe kryształy są fazą przejściową występującą w pewnym zakresie temperatur, różną dla różnych związków ciekłokrystalicznych. Poniżej tego zakresu związki mają postać krystaliczną, powyżej są typowymi izotropowymi cieczami. Dana substancja może przyjmować w zależności od temperatury różne struktury mezomorficzne, własność tę nazywamy polimezomorfizmem. Możliwe drogi przejścia od fazy krystalicznej do cieczy izotropowej przedstawione są poniżej:

- i) f.kryst. —————→ nematyk —————→ ciecz izotropowa
- ii) f.kryst. —————→ nematyk chiralny —————→ ciecz izotropowa
- iii) f.kryst. → smektyk B → smektyk C → smektyk A → ciecz izotropowa
- iv) f.kryst. → smektyk B → smektyk C → smektyk A → nematyk —————→ ciecz izotropowa
- v) f.kryst. → smektyk B → smektyk C → smektyk A → nematyk chiralny → ciecz izotropowa

Przemiany zachodzące przy ochładzaniu nie zawsze zachodzą według tego samego schematu co przy ogrzewaniu.

Anizotropia właściwości fizycznych ciekłych kryształów.

Uporządkowanie dalekiego zasięgu podłużnych molekuł ciekłych kryształów powoduje silną anizotropowość (kierunkowość) wielu właściwości fizycznych, w szczególności optycznych. Cieczowy charakter tych materiałów, a przede wszystkim duża swoboda reorientacji molekuł, umożliwia łatwe sterowanie tymi właściwościami za pomocą stosunkowo słabych zewnętrznych pól np. elektrycznych. Istotne zmiany właściwości optycznych ciekłych kryształów można spowodować już po przyłożeniu do nich napięcia kilku woltów, gdy dla osiągnięcia porównywalnych zmian w kryształach należy przyłożyć napięcia rzędu kilkuset woltów.

Dwójłomność ciekłych kryształów.

Efekty elektrooptyczne (polegająca na zmianie właściwości optycznych pod wpływem przyłożonych pól elektrycznych) występujące w ciekłych kryształach są zależne przede wszystkim od trzech czynników:

- anizotropii polaryzowalności molekuły α_e
- wartości trwałego elektrycznego momentu dipolowego molekuły μ

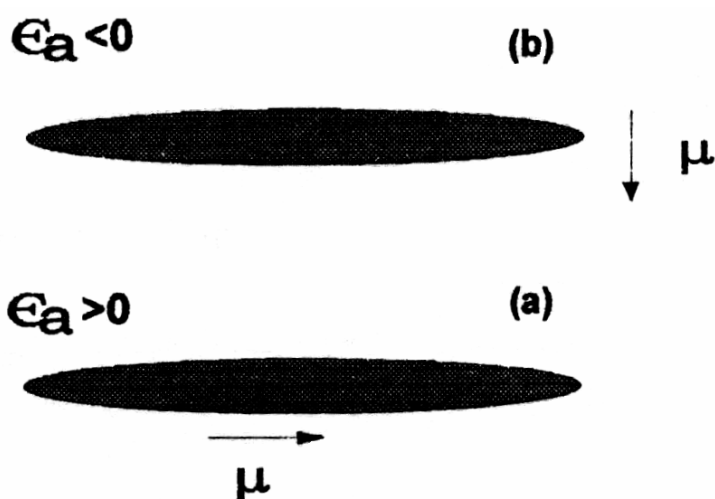
- kąta pomiędzy trwałym momentem dipolowym μ a kierunkiem długiej osi molekuly

W przypadku ciekłych kryształów istotny wpływ na całkowitą polaryzowalność substancji w polu fali świetlnej ma przede wszystkim polaryzowalność elektronowa. Chmura elektronowa molekuly deformuje się o wiele łatwiej w kierunku długiej osi molekuly niż w kierunku osi krótkiej. Oznacza to, że na skutek różnic w oddziaływaniu zmiennego pola elektrycznego fali świetlnej z chmurą elektronową molekuł w kierunku równoległym do ich długich i krótkich osi właściwości optyczne ciekłego kryształu będą charakteryzowane przez dwa współczynniki załamania:

- nadzwyczajny n_e dla światła spolaryzowanego tak, że wektor natężenia pola elektrycznego fali świetlnej \mathbf{E} jest równoległy do długich osi molekuł
- zwyczajny n_o dla fali świetlnej, której wektor \mathbf{E} jest prostopadły do tych osi.

Własnościami optycznymi nematyków można sterować zmieniając kąt między kierunkiem osi optycznej (związanej z kierunkiem długich osi molekuł) a kierunkiem wektora \mathbf{E} fali świetlnej. Można to uzyskać poprzez zmianę kierunku uporządkowania długich osi molekuł. W tym celu należy do warstwy nematyka przyłożyć stałe lub wolnozmiennie zewnętrzne „sterujące” pole elektryczne, które powoduje, że trwałe momenty dipolowe, zarówno sztywno związane z osiami molekuł tych związków jak i indukowane, obracają się zgodnie ze zmianami pola elektrycznego. Ze względu na swą dużą bezwładność trwałe momenty dipolowe cząstek nematyków nie nadążają za zmianami wektora natężenia pola elektrycznego fali świetlnej $\mathbf{E}(t)$.

Zachowanie się molekuł ciekłych kryształów w zewnętrznym polu elektrycznym jest związane z tzw. anizotropią dielektryczną ϵ_a . Wielkość tę definiuje się jako różnicę $\epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$, gdzie $\epsilon_{||}$ jest przenikalnością elektryczną próbki, w której kierunek długich osi molekuł jest równoległy do wektora natężenia pola „sterującego”, zaś ϵ_{\perp} gdy te



Rys.5. Przykłady ciekłych kryształów o ujemnej i dodatniej anizotropii dielektrycznej.

kierunki są prostopadłe. Anizotropia dielektryka może przyjmować wartości dodatnie, (gdy wektor trwałego momentu dipolowego molekuly μ jest równoległy (lub prawie

równoległy do osi molekuly)) (rys.5a) oraz ujemną, gdy jest on do niej prostopadły (rys.5b).

W zewnętrznym polu elektrycznym ciekłe kryształy ustawiają się tak, aby ich momenty dipolowe μ były równoległe do wektora natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} , a zatem cząsteczki o $\epsilon_a > 0$ ustawiają się tak, aby długie osie ich molekuł były równoległe do \mathbf{E} , zaś gdy $\epsilon_a < 0$, ustawiają się prostopadle do wektora \mathbf{E} .

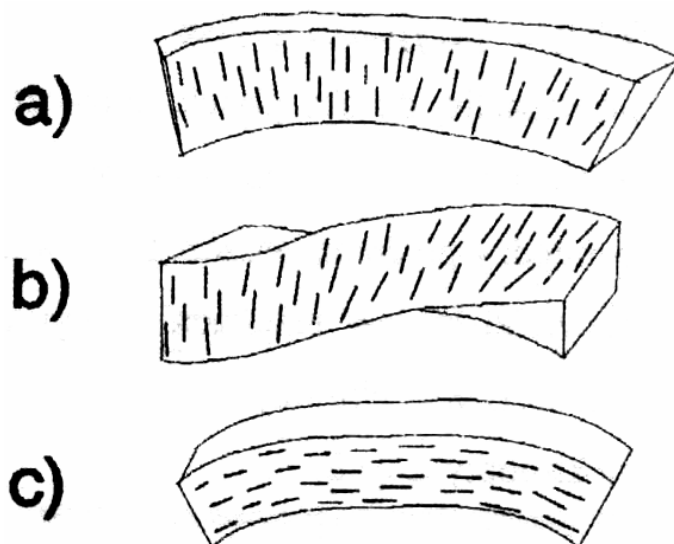
Deformacje w ciekłych kryształach.

Konfiguracja ciekłych kryształów w polu elektrycznym wynika z konkurencyjnego oddziaływania deformującego zewnętrznego pola \mathbf{E} i naprężenia statycznego. Pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego molekuly ciekłych kryształów mogą zmieniać swoją orientację przestrzenną. Jednakże, na skutek istniejących sprzężeń między molekułami (czego skutkiem jest między innymi uporządkowanie dalekiego zasięgu) molekuly obracają się indywidualnie. W wyniku przyłożenia pola tworzą się deformacje mechaniczne obejmujące makroskopowe obszary ciekłego kryształu. Aby osiągnąć zamierzony efekt zmiany orientacji molekuł w całej objętości ośrodka należy, w większości przypadków, przyłożyć pole elektryczne o natężeniu nie mniejszym od pewnej wartości progowej E_p . Wartość ta jest zależna między innymi od współczynników sprężystości charakteryzujących poszczególne rodzaje deformacji w ciekłym kryształach.

Zasadnicze rodzaje deformacji istotne w zjawiskach elektrooptycznych w ciekłych kryształach to:

- deformacja rozpływu, (rys.6a)
- deformacja skręcenia, (rys.6b),
- deformacja ugięcia (rys.6c)

Uporządkowanie równowagowe ustalające się po przyłożeniu zewnętrznego pola elektrycznego odpowiada sytuacji, w której powstałe w wyniku deformacji naprężenia mechaniczne równoważą się z siłami związanymi z przyłożonym polem



Rys.6.

Tekstury molekularne ciekłych kryształów.

Istotny wpływ na właściwości fizyczne ciekłych (w sensie makroskopowym) warstw ciekłych kryształów ma tzw. tekstura molekularna, czyli sposób ułożenia molekuł w warstwach. Do najważniejszych typów tekstur spotykanych w ciekłych kryształach należą:

tekstura planarna.

Molekuły ułożone są równoległe do siebie nawzajem i do płytek

ograniczających warstwę ciekłokrystaliczną (rys.7a). Można ją uzyskać poprzez jednokierunkowe polerowanie płytek lub przez ukośne napyłanie warstw dielektryków lub metali na te płytki. Wskutek takiego przygotowania powierzchni, molekuły układają się równoległe do mikrorowków wytworzonych na płytkach ograniczających.

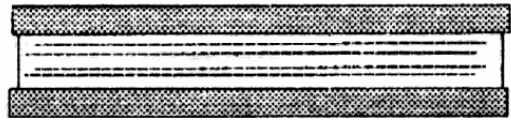
Tekstura planarna skręconego nematyka.

W tym przypadku płytkę dolną obracamy względem górnej o 90° wokół osi prostopadłej do obu płytek. Wówczas molekuły przylegające do dolnej powierzchni obrócone są w stosunku do molekuł sąsiadujących z drugą płytką. W obszarze pomiędzy płytkami poszczególne warstwy nematyka są obrócone względem siebie o niewielki kąt. W rezultacie struktura takiej cienkiej warstwy przypomina strukturę nematyków chiralnych. Tekstura ta jest wykorzystywana w układach elektrooptycznych.

Tekstura homeotropowa.

W przypadku tej tekstury długie osie molekuł są skierowane prostopadle do powierzchni ograniczających (rys.7b). Można ją wytworzyć w smektykach i nematykach. Najistotniejsze jest przy tym, aby zorientować pierwszą warstwę prostopadle do powierzchni ograniczającej. Można to osiągnąć nanosząc na tę powierzchnię warstewkę substancji (np. detergentów) o podłużnych molekułach posiadających na jednym końcu grupę polarną. Grupa ta wiąże się z podłożem a reszta molekuły ustawia się prostopadle do powierzchni. Molekuły ciekłego kryształu naniesionego na tak przygotowaną powierzchnię ustawiają się równoległe do molekuł substancji podkładowej, czyli prostopadle do podłoża.

a)



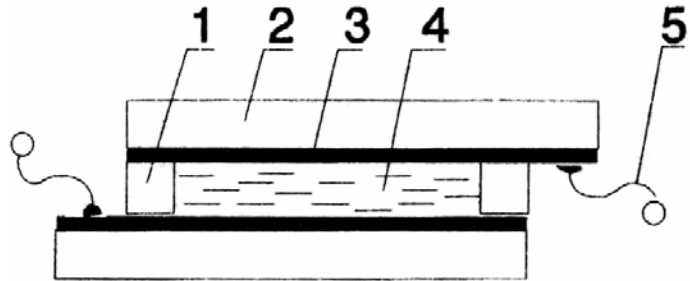
b)



Rys.7. Tekstury molekularne ciekłych kryształów: planarna (a) i homeotropowa (b)

Efekty elektrooptyczne w ciekłych kryształach.

Efekty elektrooptyczne są zdeterminowane przez rodzaj ciekłego kryształu i jego teksturę molekularną. Badanie tych efektów wymaga umieszczenia warstwy ciekłego kryształu w komórce pomiarowej, umożliwiającej przykładanie zewnętrznego pola elektrycznego i zapewniającej możliwość obserwacji tej warstwy w świetle spolaryzowanym. Takie warunki spełnia komórka typu „sandwich” przedstawiona na rys.8. W skład komórki wchodzi: dwie przezroczyste płytki szklane (2) pokryte, także przezroczystą warstwą przewodzącą prąd elektryczny (SnO_2 lub In_2O_3) (3). Płytki stykają się stroną przewodzącą z warstwą ciekłokrystaliczną (4). Doprowadzenia elektryczne (5) umożliwiają przykładanie zewnętrznego pola elektrycznego do komórki. Konstrukcję komórki uzupełniają warstwy izolujące (1) zapewniające między innymi stałą grubość warstwy ciekłego kryształu.

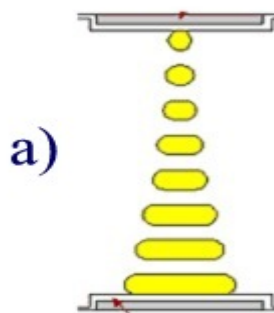


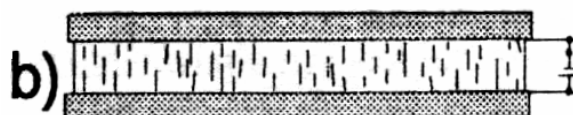
Rys.8. Komórka pomiarowa typu „sandwich” (objaśnienia oznaczeń w tekście)

Poniżej przedstawiono, w jaki sposób można przy pomocy tej komórki badać niektóre efekty elektrooptyczne:

1. Efekt skręconego nematyka.

W komórce umieszczony jest nematyk o dodatniej anizotropii dielektrycznej ($\epsilon_a > 0$) i teksturze skręconego nematyka (rys.9a). (Różnice w długości osi molekuł mają odzwierciedlać ich różną orientację przestrzenną: prostopadła do płaszczyzny kartki u góry i równoległa u dołu). Przykładając słabe pole elektryczne wymuszamy taki obrót molekuł, aby ich długie osie ustawiły się równoległe do kierunku pola. Oznacza to przejście do struktury homeotropowej. Efekt ma charakter progowy i w





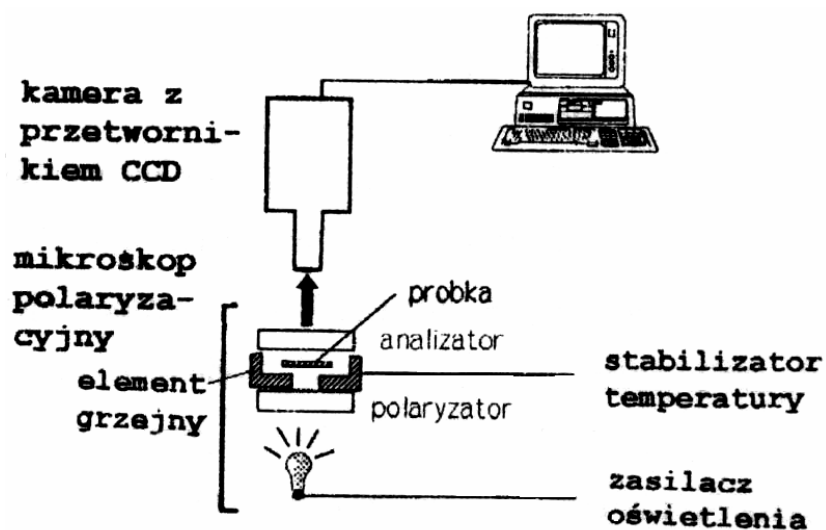
Rys. 9. a) Nematyk skręcony w rzucie z boku, b) tekstura homeotropowa po włączeniu pola sterującego

mikroskopie polaryzacyjnym przy skrzyżowanych polaryzatorach pole obserwacji jest jasne dla pola elektrycznego o natężeniu niższym od natężenia progowego, a następnie po wzroście natężenia pola powyżej progowego pole obserwacji ulega zaciemnieniu.

Układ pomiarowy.

Próbki związków ciekłokrystalicznych mają postać cienkich warstw o znanych grubościach umieszczonych w komórkach typu „sandwich”. Komórki te obserwuje się w mikroskopie polaryzacyjnym między skrzyżowanymi polaryzatorami. Mikroskop jest sprzężony z kamerą, co umożliwi obserwację obrazu na monitorze. Schemat ideowy zestawu pomiarowego przedstawiony jest na rys.10.

Za pomocą tego zestawu można prowadzić dwa rodzaje pomiarów: badanie przejść fazowych przy ogrzewaniu oraz badania efektów elektrooptycznych. W pierwszym przypadku komórka z próbką ciekłokrystaliczną znajduje się w uchwycie, którego temperaturę można sterować za pomocą



Rys.10. Schemat ideowy zestawu do badań efektów elektrooptycznych w ciekłych kryształach.

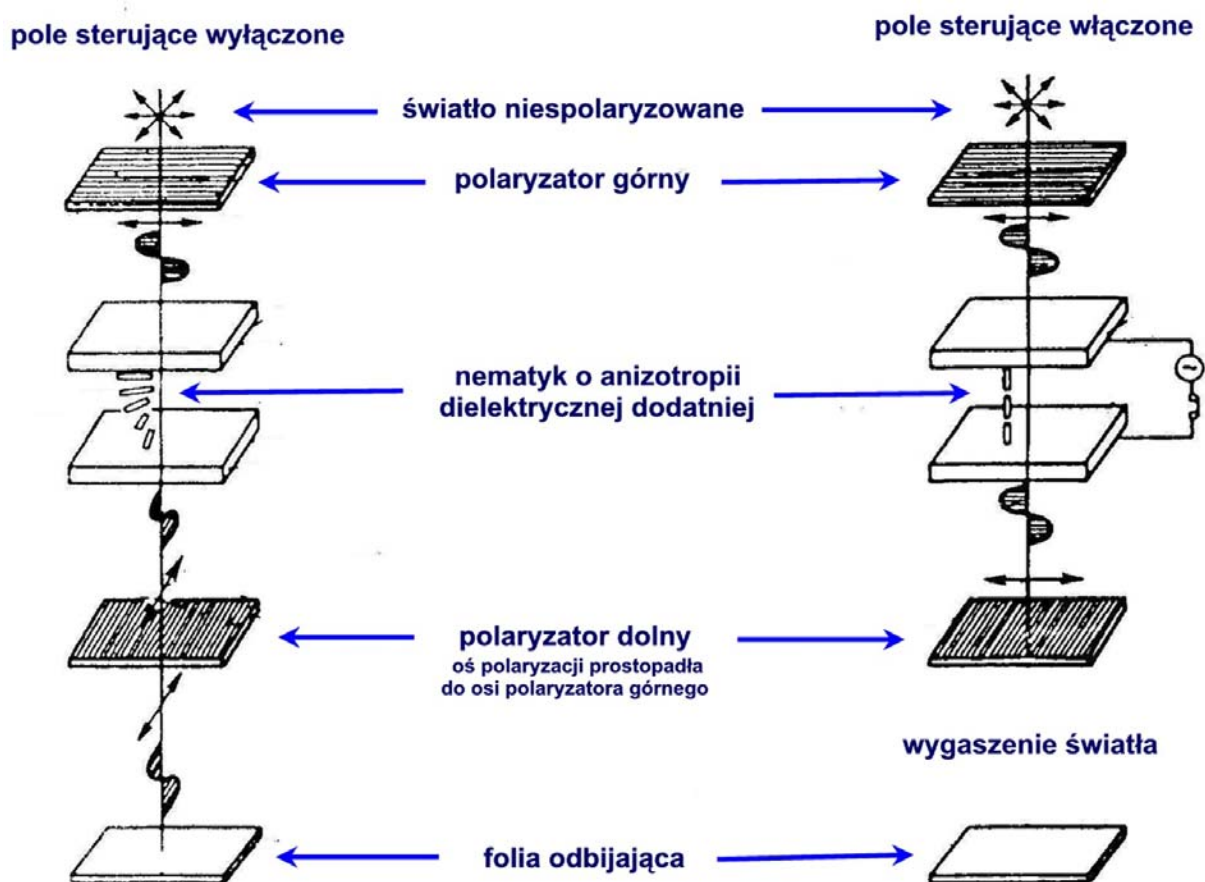
W drugim przypadku doprowadzenia elektryczne komórek podłączone są do generatora napięcia sinusoidalnego o częstościach z zakresu 20Hz ÷ 20kHz i regulowanym napięciu obejmującym zakres 0 ÷ 50V.

1. Badanie deformacji tekstury nematyka.

Komórkę typu „sandwich” z próbką nematyka o dodatniej anizotropii dielektrycznej o teksturze skręconego nematyka umieszczamy w mikroskopie polaryzacyjnym ze skrzyżowanymi polaryzatorami. Ustalamy częstość generatora na 20Hz i podczas powolnego zwiększania napięcia obserwujemy warstwę nematyka przez mikroskop. Odczytujemy wartość napięcia, przy której następuje rozjaśnienie pola widzenia wyznaczając tym samym wartość progową natężenia pola elektrycznego, przy której zachodzi deformacja tekstury nematyka.

Powtarzamy pomiary dla częstości 1kHz i 20kHz.

2. Analiza działania wyświetlacza ciekłokrystalicznego



Rys.11. Schemat wyświetlacza ciekłokrystalicznego

3. Wyznaczanie temperatury przejść fazowych ciekłych kryształów.

Komórkę zawierającą próbkę ciekłokrystaliczną umieszczamy w uchwycie temperaturowym w mikroskopie polaryzacyjnym przy skrzyżowanych polaryzatorach. Włączamy układ podgrzewania próbki. Obserwujemy próbkę na monitorze. W momencie, gdy obraz ulegnie całkowitemu zacinieniu, zapisujemy temperaturę. Jest to temperatura przejścia fazowego ciekły kryształ – ciecz izotropowa.

Przykładowe pytania kontrolne

1. Scharakteryzuj poszczególne typy ciekłych kryształów.
2. Co odróżnia fazy mezomorficzne od kryształów, a co od cieczy izotropowych.
3. Jak w zewnętrznym stałym polu elektrycznym zachowują się ciekłe kryształy o dodatniej a jak o ujemnej anizotropii dielektrycznej.
4. Czy pole elektryczne fali świetlnej padającej na warstwę ciekłokrystaliczną oddziałuje ze stałym momentem dipolowym molekuł czy z chmurą elektronową molekuł?
5. Na jakich drogach mogą występować przejścia pomiędzy fazą krystaliczną a cieczą izotropową dla związków ciekłokrystalicznych?
6. Scharakteryzuj podstawowe rodzaje deformacji występujące w ciekłych kryształach.
7. Opisz podstawowe tekstury molekularne ciekłych kryształów. Jak je można uzyskać?
8. Jakie wektory opisują falę elektromagnetyczną, co to znaczy, że światło jest falą poprzeczną ?
9. Co to znaczy, że wiązka światła jest spolaryzowana liniowo ?
10. Na czym polega zjawisko dwójłomności, czym charakteryzuje się substancja jednoosiowa optycznie ?
11. Kiedy płaszczyzna polaryzacji światła spolaryzowanego liniowo padającego na substancja jednoosiowa optycznie ulega skręceniu, a kiedy nie jest skręcana ?
12. Co rozumiesz przez skrzyżowane polaryzatory. Dlaczego przy skrzyżowanych polaryzatorach, w transmisyjnym mikroskopie polaryzacyjnym pole obserwacji jest ciemne?
13. Jeśli pomiędzy skrzyżowanymi polaryzatorami umieścimy nematyk skręcony to jakie będzie pole obserwacji i dlaczego?
14. Jak działa wyświetlacz ciekłokrystaliczny ?

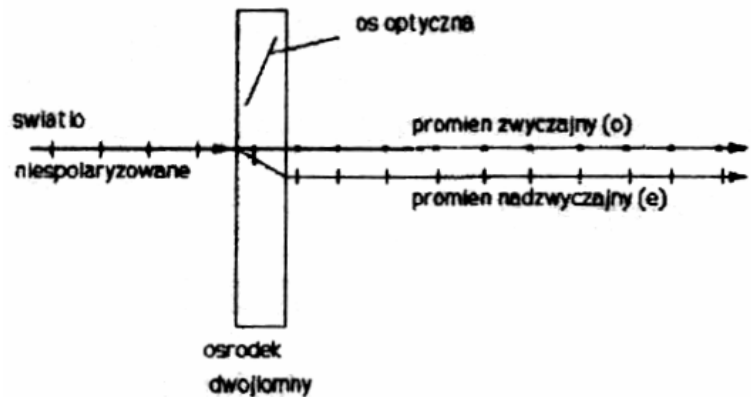
Literatura uzupełniająca

1. A.Adamczyk, „Niezwykły stan materii - ciekłe kryształy”, WP, W-wa 1979.
2. J.Żmija, J.Parka, E.Nowinowski–Kruszelnicki, „Displeje ciekłokrystaliczne”, PWN, W-wa, 1993.
3. D.Halliday, R.Resnick, J.Walker, „Podstawy Fizyki”, tom 4, PWN, W-wa 2003.

DODATEK

Dwójłomność optyczna substancji to zjawisko polegające na tym, że promień świetlny przechodzący przez nią ulega rozdzieleniu na dwa promienie załamane zwane promieniem zwyczajnym (o), i nadzwyczajnym (e) (rys.12).

Substancje dwójłomne można podzielić na jednoosiowe i dwuosiowe. W tych pierwszych można wyróżnić jeden kierunek (oś optyczną) wzdłuż którego nie zachodzi podwójne załamanie światła, w długich są dwa takie kierunki. (Dalsze informacje będą dotyczyły ośrodków jednoosiowych). W przypadku



Rys.12. Przejście niespolaryzowanego światła przez ośrodek dwójłomny.

promienia zwyczajnego wektor \mathbf{E} fali elektromagnetycznej jest prostopadły do płaszczyzny wyznaczonej przez kierunek rozchodzenia się fali i oś optyczną, w przypadku promienia nadzwyczajnego wektor \mathbf{E} drga w tej płaszczyźnie.

Przyczyną zjawiska dwójłomności są różnice oddziaływania fali elektromagnetycznej, a w szczególności wektora natężenia pola elektrycznego \mathbf{E} tej fali z ośrodkiem anizotropowym przy różnej orientacji wzajemnej wektora \mathbf{E} i osi optycznej ośrodka.

Anizotropię (kierunkowość) właściwości optycznych substancji dwójłomnych charakteryzują dwa współczynniki załamania:

- n_o odpowiadający za załamanie promienia zwyczajnego,
- n_e związany z załamaniem promienia nadzwyczajnego,

Przepuszczając przez warstwę ośrodka dwójłomnego, w kierunku nie pokrywającym się z kierunkiem osi optycznej, światło spolaryzowane liniowo uzyskuje się m.in. skręcenie płaszczyzny polaryzacji, którego wielkość zależy od takich czynników, jak kąt między osią optyczną i kierunkiem rozchodzenia światła, wielkością anizotropii współczynnika załamania i grubości warstwy. Można to stwierdzić umieszczając tę warstwę między skrzyżowanymi polaryzatorami (kąt między płaszczyznami obu polaryzatorów wynosi 90°). W przypadku materiału izotropowego nastąpiłoby całkowite wygaszenie fali świetlnej, obserwowane jako czarne tło. Gdy między skrzyżowanymi polaryzatorami znajduje się odpowiednio zorientowany materiał dwójłomny, pole widzenia jest rozjaśnione.

Polaryzowalność substancji α określa zdolność substancji do wytwarzania indukowanego elektrycznego momentu dipolowego μ_{ind} w pojedynczej cząsteczce umieszczonej w polu elektrycznym o natężeniu \mathbf{E} .

$$\mu_{\text{ind}} = \varepsilon_0 \alpha \mathbf{E},$$

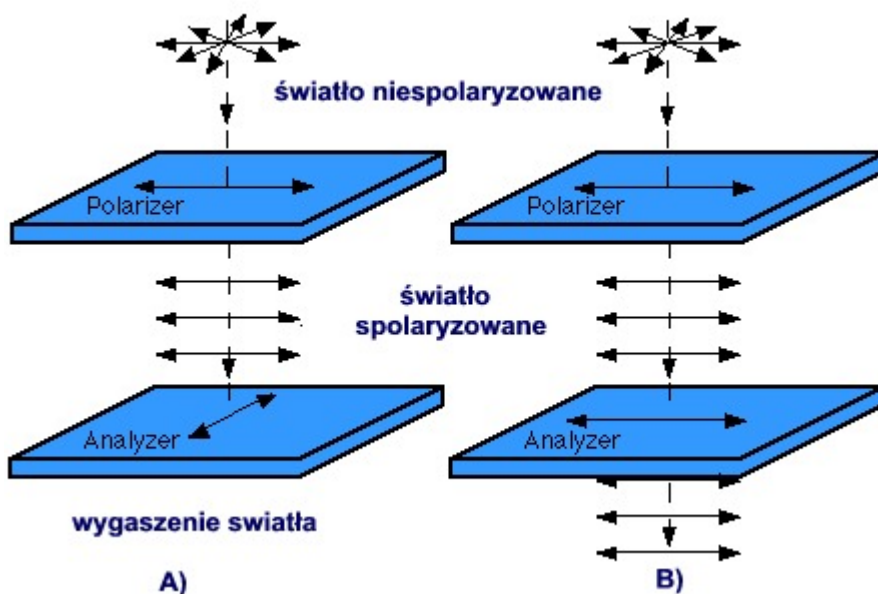
gdzie α - polaryzowalność, ε_0 - przenikalność elektryczna próżni.

Polaryzowalność elektronowa α_{el} jest miarą zdolności do deformacji chmury elektronowej atomu (molekuły) w zewnętrznym polu elektrycznym:

$$\alpha_{\text{el}} = \varepsilon_0 4\pi r_0^3,$$

gdzie r_0 - promień atomu (molekuły).

Układ dwóch polaryzatorów liniowych



Rys. 13.

- A) polaryzatory skrzyżowane
- B) osie polaryzatorów równoległe