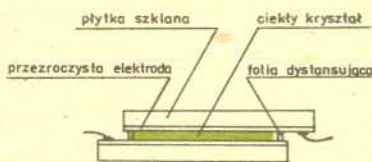


O ciekłych kryształach Autor pisał w ubiegłorocznej listopadowej *Delcie*. Tam też odsyłamy Czytelnika zainteresowanego budową i innymi niż elektrooptyczne własnościami ciekłych kryształów.

Efekty elektrooptyczne i zastosowania ciekłych kryształów

Prof. dr Roman DĄBROWSKI

Efekty elektrooptyczne w ciekłych kryształach są związane ze zmianą ich własności optycznych pod wpływem pola elektrycznego. Do najważniejszych tego typu efektów zaliczamy: efekt skręconego nematyka — „twist effect”; efekt dynamicznego rozpraszania, efekt przejścia fazowego cholesteryk-nematyk i efekty „gościa — gospodarza” z barwnikami pleochroicznymi.



Komórka ciekłokrystaliczna

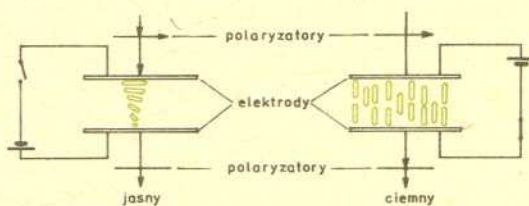
Nematyki to ciekłe kryształy o najniższym stopniu uporządkowania. Długie osie cząsteczek nematyka są ułożone równolegle, a poza tym cząsteczki są rozmieszczone w przestrzeni chaotycznie. W przypadku cholesteryka można wybrać płaszczyznę, w której cząsteczki ułożone są jak w nematyku. Jednak wtedy w kolejnych, równoległych warstwach ich długie osie będą obrócone o pewien określony kąt. Utworzona w ten sposób struktura śrubowa decyduje o wielu własnościach cholesteryków. Skręcony nematyk ma budowę taką jak fragment śruby cholesteryka (mniej niż 1/4 zwoju).

Efekty elektrooptyczne bada się w cienkich warstwach ciekłych kryształów ($5 \div 30 \mu\text{m}$). W tym celu buduje się komórkę składającą się z dwóch równoległych płytek szklanych z naniesionymi po stronie wewnętrznej przezroczystymi elektrodami z tlenku indowo-cynowego. Odległość między płytkami utrzymywana jest za pomocą pasków folii, umieszczonych wzdłuż krawędzi. Przestrzeń między płytkami wypełnia się ciekłym kryształem.

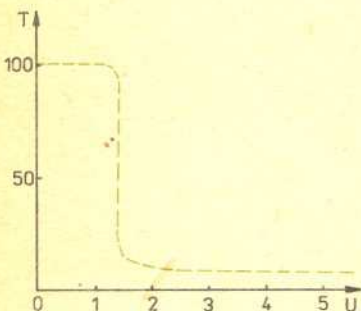
Efekt skręconego nematyka

wymaga stosowania ciekłego kryształu z większą od zera anizotropią dielektryczną. Przez odpowiednią obróbkę powierzchni elektrod, np. rabingowanie, wywołuje się ustawienie cząsteczek długimi osiami równoległe do powierzchni płytek. Jednocześnie płytki są tak złożone, żeby cząsteczki skręcały się o kąt 90° przy przejściu od płytki dolnej do górnej.

Rabingowanie polega na tworzeniu na powierzchni szkła subtelnych defektów (mikrorowki), na przykład przez pocieranie tkaniną.



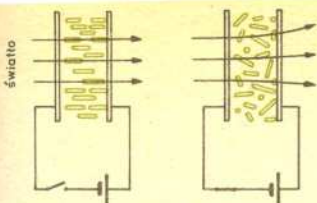
Komórka twistowa i zasada jej działania



Zależność transmisji $[T]$ komórki twistowej od napięcia. O jakości komórki decyduje kontrast $[K]$, tj. stosunek transmisji poniżej progu do transmisji przy danym napięciu.

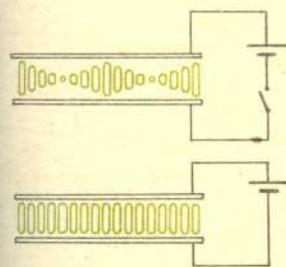
Taka orientacja cząsteczek jest aktywna optycznie — zdolna do skręcenia płaszczyzny polaryzacji. Jeżeli światło spolaryzowane przechodzi przez warstwę ciekłego kryształu o strukturze skręconego nematyka, to jego płaszczyzna polaryzacji ulega skręceniu o kąt skręcenia molekuł. Po przyłożeniu pola elektrycznego zmienia się orientacja molekuł, a warstwa ciekłego kryształu nie skręca płaszczyzny polaryzacji. Jeżeli taką warstwę ciekłego kryształu umieścić między dwoma polaryzatorami, których kierunki polaryzacji są ustawione prostopadłe, to bez pola elektrycznego przepuszcza ona światło (jest jasna), natomiast po przyłożeniu pola elektrycznego, światło nie przechodzi przez warstwę (staje się ciemna). Istotnym z punktu widzenia zastosowań parametrem opisującym komórkę ciekłokrystaliczną jest transmisja, czyli stosunek natężenia światła wychodzącego z komórki do natężenia światła padającego. Zależność transmisji od przyłożonego napięcia pokazuje rysunek. Jeżeli napięcie progowe mieszaniny kilku związków ciekłokrystalicznych wynosi $1-2 \text{ V}$, to zwykle już dla 3 V transmisja wynosi najwyżej 10% wartości poniżej progu. Czas potrzebny do przeorientowania warstwy oraz czas powrotu do stanu wyjściowego po wyłączeniu pola zależą od temperatury. Przy 20°C wynoszą przeciętnie 0,1 i 0,2 s. Efekt skręconego nematyka jest efektem bezprądowym. Zużywana moc jest minimalna, pobór prądu wynosi $0,1-0,5 \mu\text{A}$ na 1 cm^2 powierzchni i zależy od czystości ciekłego kryształu.

Efekt dynamicznego rozpraszania



Zasada działania komórki z dynamicznym rozpraszaniem.

Fala elektromagnetyczna ma polaryzację liniową, gdy wektor natężenia pola elektromagnetycznego (zawsze prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali) nie zmienia kierunku w czasie. Jeśli fala jest złożeniem dwóch fal o tych samych częstościach i amplitudach, które poruszają się w tym samym kierunku i których fazy różnią się o $\frac{\pi}{2}$, to mówimy, że ma polaryzację kołową.



Zasada działania komórki z efektem przejścia fazowego cholesteryk-nematyk.

jest obserwowany w nematykach o ujemnej anizotropii, $\Delta\epsilon < 0$. Nematyk powinien charakteryzować się ponadto przewodnictwem właściwym około $10^8 \div 10^9 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$. Przewodnictwo reguluje się przez wprowadzenie odpowiednich domieszek jonotwórczych. Poza tym dla tego efektu jest wymagane, aby w stanie bez pola elektrycznego cząsteczki samorzutnie ustawiały się długimi osiami prostopadle do powierzchni elektrod.

Po przyłożeniu stałego lub wolnozmiennego pola elektrycznego cząsteczki starają się ułożyć długimi osiami równoległe do powierzchni elektrod (wynika to z warunku $\Delta\epsilon < 0$). Jednocześnie to równoległe ułożenie jest zaburzone ruchem przepływających jonów. Jony te są zwykle luźno związane z kilkoma sąsiednimi cząsteczkami ciekłego kryształu i przemieszczają się wraz z nimi. Dzięki temu w warstwie ciekłego kryształu powstaje ruch turbulentny. Pod wpływem tego ruchu tworzą się obszary o różnej orientacji cząsteczek. Ze względu na dużą anizotropię współczynników załamania nematyków ($\Delta n \approx 0,2$) między różnie zorientowanymi obszarami istnieje wiele granic działających jak ośrodki rozpraszające. Praktycznie efekt dynamicznego rozpraszania obserwuje się jako przejście klarownej warstwy ciekłego kryształu do warstwy mlecznobiałej. Jest to historycznie pierwszy efekt wykorzystywany w praktyce. Jednak znaczny przepływ prądu wywołuje elektrolizę i reakcję na elektrodach, zwiększa pobór mocy i wpływa na skrócenie czasu pracy komórki. Czerpany prąd wynosi $2 \div 20 \mu\text{A}$ na 1 cm^2 powierzchni dla napięcia 20 V. Napięcie progowe $U_p = 10 \div 15 \text{ V}$.

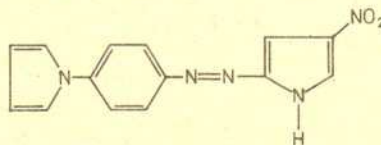
Efekt przejścia fazowego cholesteryk-nematyk

obserwuje się w aktywnych optycznie ciekłych kryształach o dodatniej anizotropii dielektrycznej. Realizowany jest praktycznie w mieszaninach złożonych z nematyków o dużej $\Delta\epsilon$ i cholesteryków mających krótki skok śruby. Dla obserwowania efektu nie jest wymagana obróbka powierzchni elektrod nadająca jej zdolność orientowania warstwy ciekłego kryształu ani stosowanie polaryzatorów. W stanie wyjściowym (bez pola) mieszanina ciekłokrystaliczna w cienkiej warstwie ma strukturę odpowiadającą przypadkowej orientacji spirali, których osie są często równoległe do powierzchni płytek szkła. W tym stanie warstwa silnie rozprasza światło i jest mlecznobiała. Po włączeniu napięcia wyższego niż napięcie progowe, cząsteczki ciekłego kryształu zmieniają orientację na prostopadłą do powierzchni płytek szklanych (spirała rozkręca się) i komórka staje się przezroczysta. Po usunięciu napięcia warstwa powraca do rozpraszającego stanu wyjściowego pod działaniem molekularnych sił elastycznych, w tym przypadku, głównie sił skręcających wywołanych asymetrią cząsteczki cholesteryka. Napięcie progowe dla indukowanej polem elektrycznym przemiany fazowej cholesteryk-nematyk jest wyższe niż dla dwóch wyżej wymienionych efektów i wynosi od 10 do 40 V.

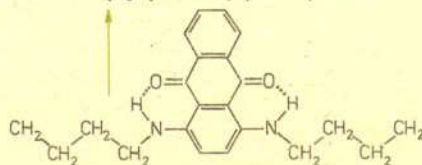
Efekt „gościa-gospodarza”

Opisane wyżej efekty elektrooptyczne pozwalają na uzyskanie obrazów czarnobiałych. Jeżeli jednak do mieszaniny ciekłokrystalicznej wprowadzić barwnik pleochroiczny, można uzyskać obrazy barwne.

Barwnik pleochroiczny charakteryzuje się tym, że ma różne współczynniki absorpcji światła w kierunku równoległym i prostopadłym do długiej osi cząsteczki. W związku z tym w zależności od ułożenia cząsteczki barwnika w stosunku do kierunku rozchodzenia się światła liniowo spolaryzowanego, będzie ono albo absorbowane albo przepuszczane. Przykładem barwnika pleochroicznego mającego oscylator absorpcji o kierunku równoległym do długiej osi jest związek



a barwnika mającego oscylator absorpcji położony prostopadle do długiej osi barwnika związek



Wartość anizotropii dielektrycznej określona jest wzorem

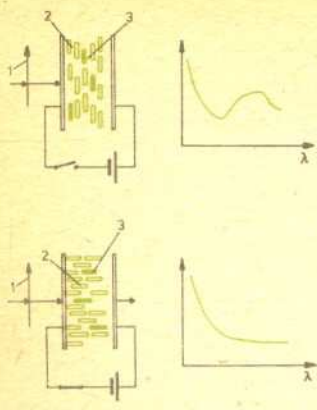
$$\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$$

gdzie ϵ_{\parallel} (ϵ_{\perp}) — przenikalność dielektryczna ciekłego kryształu zorientowanego długimi osiami równoległe (prostopadle) do kierunku pola elektrycznego.

Energia zgmagazynowana w jednostkowej objętości kondensatora jest równa

$$W = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$

gdzie ϵ to przenikalność dielektryczna w kierunku pola elektrycznego E . Dlatego też dla $\Delta\epsilon > 0$ cząsteczki dążą do ustawienia prostopadłego do powierzchni płytek (minimum energii), a gdy $\Delta\epsilon < 0$ — do ustawienia równoległego.

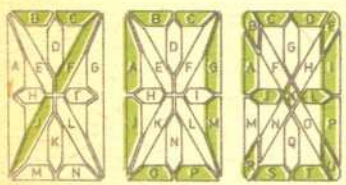


Zasada działania komórki wykorzystującej barwnik pleochroiczny.
 1 — polaryzator
 2 — cząsteczka ciekłego kryształu
 3 — cząsteczka barwnika pleochroicznego

Oba barwniki są niebieskie. Pierwszy absorbuje światło spolaryzowane, gdy swoją długą osią jest skierowany prostopadle do kierunku rozchodzenia się światła tj. równoległe do wektora natężenia pola elektrycznego światła spolaryzowanego liniowo. Natomiast drugi barwnik absorbuje światło, gdy swoją długą osią jest ułożony w kierunku rozchodzenia się światła. Jeżeli pierwszy z barwników umieścić w ciekłym kryształzie o $\Delta\epsilon > 0$ i uporządkować warstwę ciekłego kryształu homogenicznie, to w tym stanie będzie on absorbował światło w zakresie widzialnym. Po przyłożeniu pola elektrycznego warstwa ciekłego kryształu przeorientowuje cząsteczkę barwnika do położenia homeotropowego i barwa warstwy zanika. Pierwszy barwnik w ciekłym kryształzie o $\Delta\epsilon > 0$ umożliwia zatem realizację bezbarwnego obrazu na barwnym tle. W ciekłym kryształzie o $\Delta\epsilon < 0$ powstaje natomiast barwny obraz na bezbarwnym tle. W tym przypadku stan wyjściowy wymaga porządkowania homeotropowego. Z drugim barwnikiem przejście z układu zabarwionego do bezbarwnego jest realizowane w odwrotnej kolejności.

Ciekłe kryształy znajdują głównie zastosowanie do budowy wskaźników i do pomiaru temperatury. Wskaźniki ciekłokrystaliczne są masowo stosowane w zegarkach elektronicznych i kalkulatorach. Równie powszechne są termometry pokojowe i lekarskie. Umożliwiają one pomiar temperatury oraz obserwowanie rozkładu temperatur na dużych powierzchniach.

Wskaźnik jest zbudowany podobnie do komórki pokazanej na pierwszym rysunku, różni się od niej tylko tym, że na jednej z elektrod przedniej ściany jest wytrawiony wzór. W przypadku wskaźników cyfrowych lub cyfrowo-literowych stosuje się wzory elektrod pokazane obok. Przyłożenie napięcia pomiędzy wybrane segmenty przedniej płytki, np. BCFJ, i wspólną elektrodę płytki tylnej powoduje zmianę orientacji warstw ciekłego kryształu i pozwala obserwować cyfrę 7. Wybierając inne elementy można przedstawić dowolną cyfrę od 0 do 9, a także wszystkie litery alfabetu. Celem przeorientowania warstwy można wykorzystać układ realizujący dowolny z omówionych czterech efektów elektrooptycznych. Obecnie wykorzystuje się jednak głównie efekt skręconego nematyka.



Wzory elektrod wskaźników cyfrowo-literowych

Bardziej uniwersalne, ale także bardziej skomplikowane są wskaźniki matrycowe. Na płytkach szklanych wytrawia się paskowe elektrody. Po złożeniu płytek tworzą one wiersze i kolumny. Punkt na przecięciu dwóch pasków jest wyświetlany przez jednoczesne podanie napięcia na kolumnę i wiersz, odpowiadające współrzędnym tego punktu. Różnica napięć na wierszu i kolumnie jest tak dobrana, by pozwalała przeorientować cząsteczki ciekłego kryształu tylko w miejscu krzyżowania się wiersza z kolumną. Wskaźniki matrycowe pozwalają wyświetlić obraz o dowolnym kształcie.

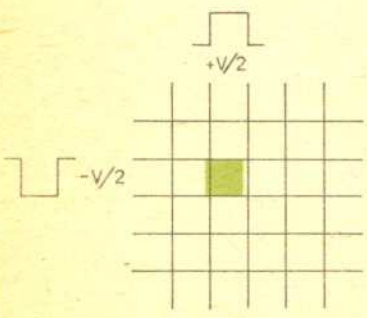
Ciekły kryształ między dwiema równoległymi płytkami szklanymi porządkuje się homogenicznie, tj. długimi osiami cząsteczek równoległe do płytek, bądź homeotropowo tj. prostopadle do powierzchni płytek.

Termometr ciekłokrystaliczny jest to nałożona na pasek czarnej folii warstwa ciekłego kryształu (cholesteryka) przykryta drugim podobnym paskiem. Jeżeli w zewnętrznym pasku wycięte są obszary o kształcie cyfr, to uzyskamy barwny obraz o tym kształcie. Do pomiaru temperatury stosuje się cholesteryki, które mają skok śruby leżący w zakresie długości światła widzialnego. Wykorzystuje się tu zjawisko dichroizmu kołowego i zjawisko selektywnego odbicia. Dichroizm kołowy polega na tym, że światło białe przechodzące przez warstwę cholesteryka zostaje spolaryzowane kołowo. Dzieje się tak dlatego, że warstwy, na przykład prawoskrętnego cholesteryka odbijają całkowicie światło spolaryzowane kołowo prawoskrętnie, a przepuszczają światło spolaryzowane lewoskrętnie. Lewoskrętny ciekły kryształ będzie przepuszczał tylko światło spolaryzowane prawoskrętnie. Odbite od kolejnych, tak samo ułożonych, warstw cholesteryka fale elektromagnetyczne interferują. Wzmocnienie następuje dla długości fali (warunek Bragga):

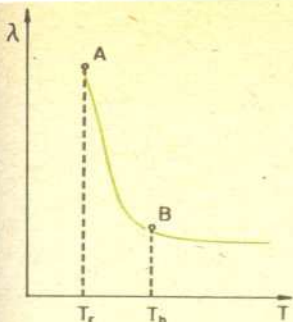
$$\lambda = P \cdot \cos \beta,$$

gdzie β jest kątem padania światła na warstwę ciekłego kryształu a P skokiem śruby. Fale o innych długościach są wygaszane. Jeżeli P jest dobrane tak, że długość fali światła odbitego jest w zakresie widzialnym, to efekt selektywnego odbicia obserwowany jest jako zabarwienie ciekłego kryształu.

Skok śruby nie jest stały, ale zmienia się z temperaturą. Zwykle zmniejsza się ze wzrostem temperatury. Dlatego, gdy temperatura rośnie, obserwuje się zmianę barwy, od czerwonej do fioletowej.



Zasada działania matrycy

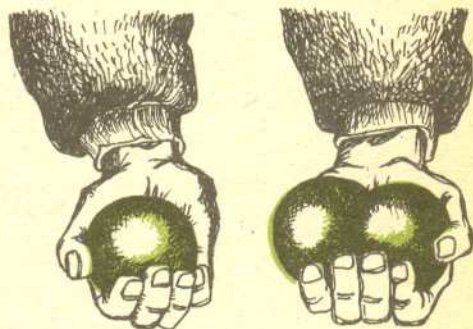


Zależność długości światła selektywnie odbijanego od temperatury dla cholesteryka. T_r , T_b — temperatury odbicia światła czerwonego i fioletowego.

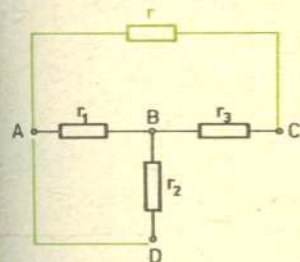
Do wykonania termometru pokojowego konieczne jest sporządzenie szeregu mieszanin ciekłych kryształów (kompozycji), w których określona barwa pojawia się w określonym, żądanym zakresie temperatur. Wytwarza się na przykład szereg kompozycji, dla których dominująca barwa zielona pojawia się co 1°C .

Kompozycje ciekłokrystaliczne przeznaczone do rejestracji rozkładu temperatur na powierzchniach wybiera się tak, aby charakteryzowały się szeroką gamą wyraźnych barw, ponieważ ułatwia to obserwowanie różnic temperatur poszczególnych obszarów. Warunkiem wizualizacji rozkładu temperatury na powierzchniach jest zaabsorbowanie światła przechodzącego przez warstwę ciekłego kryształu. Nie może się ono odbijać od podłoża, ponieważ wtedy będzie się mieszać ze światłem odbitym selektywnie od warstw cholesteryka i obserwator nie zaobserwuje efektu powstania barwy. W tym właśnie celu podłoże pod ciekły kryształ pokrywa się warstwą czerni.

Skok spirali cholesteryka zmienia się również pod wpływem pochłaniania par związków organicznych i dlatego zjawisko selektywnego odbicia jest także wykorzystywane do wykrywania zanieczyszczeń w powietrzu.

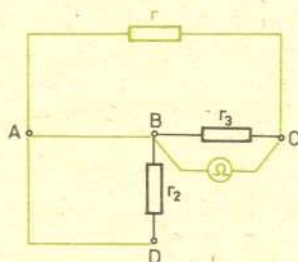


Rozwiązanie zadania F 116. Przewody połączeniowe, jeśli uznać je za pozbawione oporności, mogą służyć do zwierania dostępnych punktów układu. Przyjmijmy, że decydujemy się zmierzyć oporność r_3 . Po zwarceniu punktu A z D , schemat zastępczy układu przedstawia rysunek:



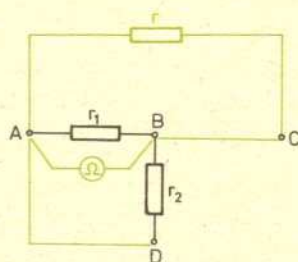
r — jest opornością niedostępnej części układu ze zwartymi punktami A i D .

Należy teraz:



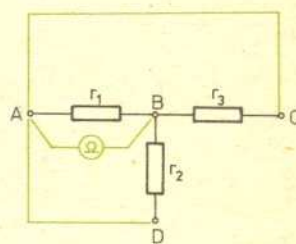
1. Zewrzeć A z B i zmierzyć oporność (R_1) pomiędzy B i C . Jest ona równa

$$(1) \quad \frac{1}{R_1} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_3}$$



2. Zamienić miejscami przewód zwierający i miernik. Wskazanie przyrządu (R_2) wiąże z pozostałymi opornościami zależność:

$$(2) \quad \frac{1}{R_2} = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_3}$$



3. Pozostawić omomierz w tym samym miejscu, zwierając dla odmiany A z C . Miernik wskaże oporność (R_3) spełniającą relację:

$$(3) \quad \frac{1}{R_3} = \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

Dodając stronami (1) i (3) oraz odejmując (2) otrzymujemy

$$r_3 = \frac{2R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 - R_1 R_3}$$

Proponujemy zastanowienie się nad następującymi problemami:

1. Czy przytoczona wyżej procedura daje się efektywnie stosować w przypadku, gdy węzeł B zawiera więcej niż trzy elementy?
2. Zamiast omomierza dysponujemy źródłem napięcia oraz idealnymi miernikami: napięcia i prądu. Jak zestawić układ pomiarowy, aby na podstawie jednej pary odczytów wskazań wyznaczyć r_3 ?