



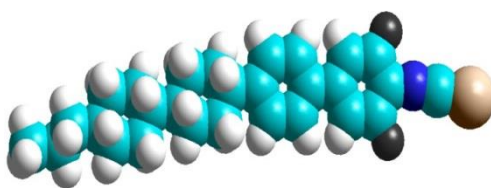
Czy można zbudować płaską soczewkę?

Stanisław Urban
Instytut Fizyki UJ

Każdy z nas zna zasadę działania soczewek optycznych. Zbudowane są one z przezroczystego materiału i mają zmienną grubość. Ograniczające powierzchnie (zwykle sferyczne) mają wspólną oś optyczną, na której położone są dwa punkty zwane ogniskami. Przecinają się w nich promienie światła lub przedłużenia promieni, które przed dościsaniem do soczewki biegły równoległe do osi optycznej. Dzieje się tak dzięki temu, iż promienie przechodzące przez soczewkę w różnej odległości od osi mają zróżnicowaną drogę optyczną $s = dn$, gdzie d jest grubością materiału, a n współczynnikiem załamania światła. O zdolności skupiającej (rozpraszającej) decydują więc promienie sfer i współczynnik załamania światła użytego materiału, najczęściej szkła. Aby uzyskać możliwość zmiany długości ogniskowej, potrzebnej w wielu urządzeniach (aparatach fotograficznych, mikroskopach, lunetach itp.), trzeba zbudować układy soczewek z możliwością płynnej regulacji odległości między nimi. Jest to zwykle mało praktyczne z powodu dużych rozmiarów i ciężaru takich urządzeń.

Czy można zbudować soczewki pozbawione tych niedogodności? Okazuje się, że jest to możliwe, jeśli wykorzysta się sterowaną zmienność współczynnika załamania światła przy stałej grubości ośrodka optycznego. Możliwość taką daje ośrodek złożony z ciekłokrystalicznego (CK) nematyka. Pokrótkce opiszemy zasadę działania takiej soczewki. Wcześniej jednak parę informacji, czym jest nematyk i jakie ma własności decydujące o zastosowaniu do tego celu (zob. także artykuł dr Joanny Janik w *Fotonie* 94/2006).

Nematyczny ciekły kryształ (NLC) składa się z cząsteczek o silnie wydłużonym kształcie, jak pokazuje to rys. 1.

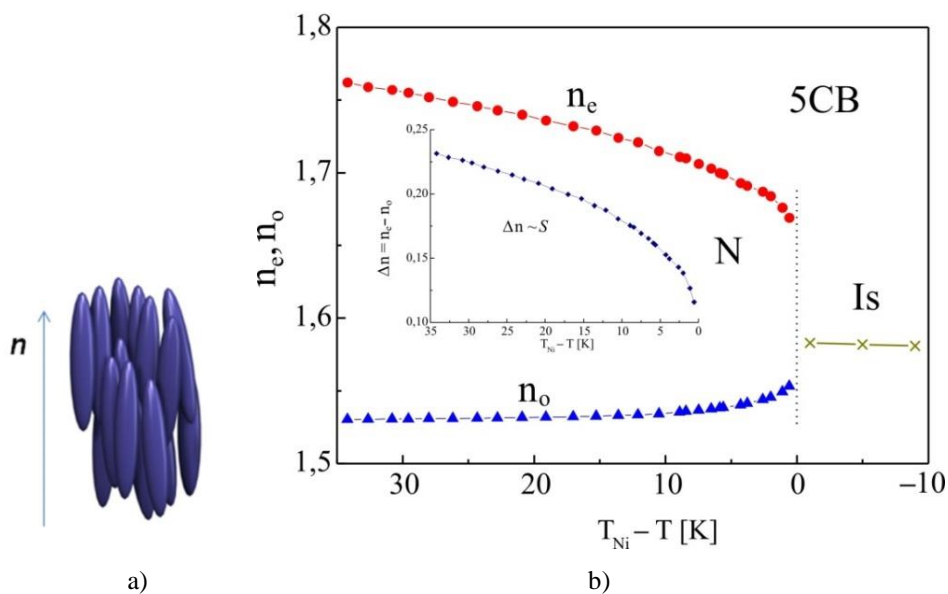


Rys. 1. Budowa typowej molekuly tworzącej fazę nematyczną

W określonym zakresie temperatur, pomiędzy tzw. punktem klarowania (T_{NI}) a punktem przejścia fazowego do fazy krystalicznej lub smektycznej, następuje spontaniczna organizacja molekuł w ten sposób, iż ich długie osie ustawiają się (średnio) wzdłuż pewnego kierunku zwanego direktorem \mathbf{n} , rys. 2a, przy czym

środki ciężkości molekuł są rozłożone chaotycznie (porządkują się one w płaszczyznach dopiero po przejściu do którejś z faz smektycznych).

Takie ułożenie molekuł powoduje, iż faza N jest optycznie dwójłomna – wiązka światła po przejściu z powietrza do ośrodka rozszczepia się na promień zwyczajny (n_o) i nadzwyczajny (n_e), co pokazuje rys. 2b. Podobne anizotropowe własności nematyka dotyczą wielu innych własności fizycznych: podatności magnetycznej, przenikalności dielektrycznej, współczynników sprężystości, współczynników lepkości i innych. Czyste związki CK posiadają na ogół fazę N w stosunkowo wąskim zakresie temperatur i rzadko w zakresie temperatury pokojowej. Dlatego tworzy się mieszaniny kilku związków o składzie gwarantującym pożądane własności fizyczne i termiczne (dla celów użytkowych konieczny uznaje się zakres fazy N pomiędzy -20°C a $+80^{\circ}\text{C}$).



Rys. 2. a) Uporządkowanie molekuł w fazie nematycznej; b) Zależność temperaturowa współczynników załamania światła w fazie izotropowej (Is) i nematycznej (N) jednego z najbardziej znanych związków ciekłokrystalicznych 5CB (pentylo-cyjanobifenyl), który posiada fazę nematyczną w zakresie temperatury pokojowej $T_{Ni} = 34,5^{\circ}\text{C}$. Wkładka przedstawia dwójłomność optyczną $\Delta n = n_e - n_o$

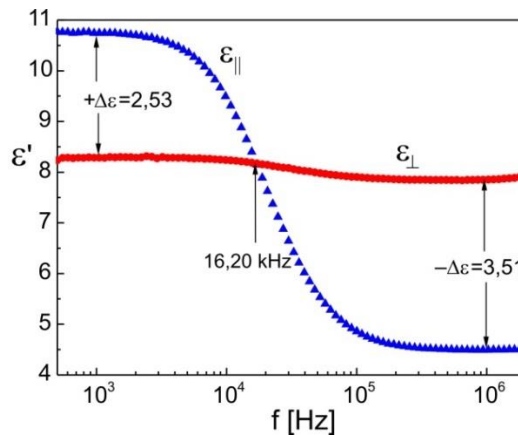
Ciekły kryształ nematyczny znajdujący się w butelce ma charakterystyczny „proszkowy” biały kolor będący efektem rozpraszania światła na domenach o rozmiarach zbliżonych do długości fali świetlnej w zakresie widzialnym. Objętościowa próbka musi zatem zostać uporządkowana. Wykorzystuje się do tego celu pole magnetyczne, pole elektryczne lub specjalnie spreparowane powierzchnie ograniczające warstwę nematyka (tzw. efekt kotwiczenia molekuł).

Dwa ostatnie sposoby stosuje się w komórkach elektrooptycznych – ekranach LCD oraz omawianych tu soczewkach NLC. W zależności od orientacji direktora, sterowanej zewnętrznym polem elektrycznym o odpowiednim natężeniu, zmienia się efektywny współczynnik załamania światła komórki o stałej grubości d . Wytwarzając gradient w rozkładzie direktora uzyskuje się gradient n , a zatem gradient drogi optycznej s promieni. Co więcej, efekt taki może być sterowany zmianą napięcia przykładanego do komórki, dzięki czemu uzyskuje się możliwość sterowania długością ogniskowej f soczewki NLC.

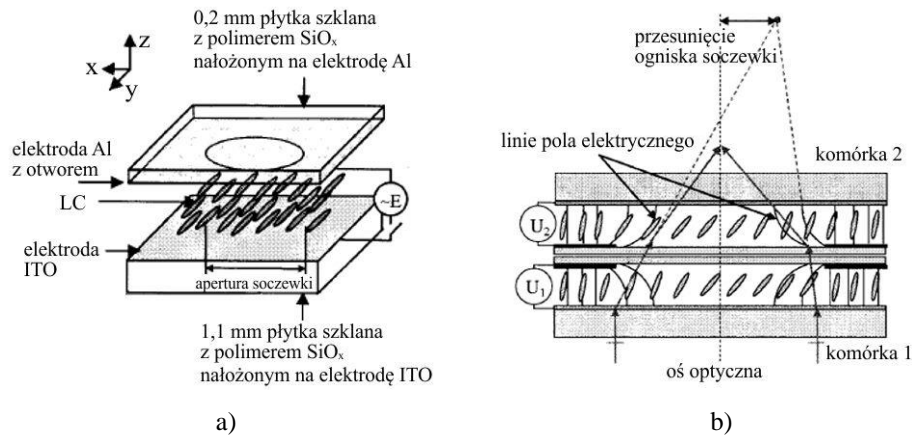
Idea zastąpienia zmienności grubości przez zmienność współczynnika załamania światła przy budowie płaskich soczewek zrodziła się na początku lat 80. XX wieku. Podstawowym problemem w rozwoju elektrycznie sterowanych soczewek NLC była powolność reakcji układu na zmianę napięcia sterującego. Aby uzyskać pożądany zakres zmian f soczewka musi być dość gruba ($d = 100 \mu\text{m}$ w porównaniu do $d \sim 5 \mu\text{m}$ w ekranach LCD). Czas reakcji direktora na wyłączenie pola elektrycznego dany jest zależnością $\tau_{off} = \gamma_1 d^2 / \pi K$, gdzie γ_1 i K są odpowiednio lepkością rotacyjną i stałą elastyczną NLC zaś τ_{off} opisuje, jak szybko direktor relaksuje do stanu wyjściowego, gdy wyłączymy pole elektryczne. Dla typowej mieszaniny nematycznej $\tau_{off} \sim 10$ s, a więc z praktycznego punktu widzenia jest stanowczo za długi. Czas narastania τ_{on} jest rzędu milisekund dzięki m.in. jego odwrotnej zależności od kwadratu przyłożonego napięcia U oraz dużej wartości anizotropii dielektrycznej $\Delta\epsilon = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$, gdzie $\epsilon_{||}$ i ϵ_{\perp} są stałymi dielektrycznymi mierzonymi dla direktora zorientowanego równoległe lub prostopadle do mierzącego pola elektrycznego ($\tau_{on} \sim \Delta\epsilon \gamma_1 d^2 / \pi K U^2$). W ostatnich kilku latach pojawiła się możliwość istotnego skrócenia τ_{off} dzięki wytworzeniu przez chemików mieszanin NLC wykorzystujących interesujące zjawisko zmiany znaku anizotropii dielektrycznej w zakresie częstości kilohercowych, co ilustruje rys. 3. Przy częstościach kilohercowych mieszanina wykazuje dodatnią anizotropię dielektryczną, przy tzw. częstości *cross-over* wynosi ona zero, zaś przy częstości rzędu 1 MHz przyjmuje wartość ujemną. W takiej sytuacji uzyskuje się wpływ na skracanie obu czasów, τ_{on} i τ_{off} , przez przyłożenie pól elektrycznych o różnych częstościach (np. 1 kHz i 1 MHz). Jest to tzw. nematyk z podwójnym adresowaniem (ang. *dual-frequency NLC*).

Przedstawię pokrótce rozwiązanie konstrukcyjne opracowane przez zespół Olega Lawrentowicza z Kent State University (Ohio, USA) [zob. *Applied Optics* **45** (19), 4576–4582 (2006)]. Zbudowana przez nich komórka przedstawiona jest na rys. 4. Górna aluminiowa elektroda posiada okrągły otwór, przez który może przechodzić wiązka spolaryzowanego światła. Dolna elektroda zbudowana jest ze szkła pokrytego przezroczystą przewodzącą warstwą tlenku indu (ITO). Od strony wewnętrznej obu elektrod napyłona jest warstwa SiO_x , na której kotwiczone są molekuly nematyka pod kątem ok. 45° do płaszczyzn; taka wyjściowa orientacja molekuł znacznie ułatwia sterowanie warstwą nematyka. W omawianym przypadku średnica otworu $D = 300 \mu\text{m}$, grubość warstwy ne-

matyka $d = 110 \mu\text{m}$, częstość $f_{co} = 12 \text{ kHz}$, $\Delta\epsilon = 3,2$ (1 kHz), $\Delta\epsilon = -3,1$ (50 kHz), $\Delta n = 0,22$ przy $\lambda = 589 \text{ nm}$ (dane dla temperatury 20°C). Obecność otworu powoduje nieliniowy rozkład pola elektrycznego wewnątrz warstwy nematyka, co wywołuje niejednorodną orientację direktora, a w konsekwencji efekt soczewkowania. Napięcia sterowania zmieniają się przy obu częstościach w zakresie 0–5 V.



Rys. 3. Przykład własności dielektrycznych mieszaniny z efektem *cross-over* (z badań własnych autora prowadzonych przy współpracy z Instytutem Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie)



Rys. 4. Schemat nematycznej soczewki z podwójnym adresowaniem. a) Rozkład molekuł bez włączonego pola. Molekuły są ustawione w jednym kierunku i nachylone pod kątem $\alpha \approx 45^\circ$ do płaszczyzny elektrody. b) Rozkład molekuł w układzie dwóch soczewek po przyłożeniu napięcia pomiędzy elektrodami. Jedna soczewka ogniskuje promień poza ogniskową, druga zaś koryguje ten efekt

Wiązka światła liniowo spolaryzowana wzdłuż osi x i przechodząca przez różne obszary soczewki w kierunku osi z ma różne drogi optyczne $n_{eff}d$, gdzie

$$n_{eff} = \frac{n_o n_e}{(n_o \cos^2 \alpha + n_e \sin^2 \alpha)^{1/2}}$$

jest lokalnym, zależnym od napięcia, efektywnym współczynnikiem załamania nematyka, zaś α jest lokalnym kątem pomiędzy kierunkiem polaryzacji światła a директором w danym miejscu soczewki.

Badania wykazały, że pojedyncza komórka nie ogniskuje wiązki na osi soczewki. Efekt ten dało się wyeliminować przez złożenie dwóch komórek „głowa do głowy”. Stworzyło to dodatkowo możliwość operowania czterema napięciami sterowania: po dwa dla każdej komórki przy dwóch częstotliwościach. Taki podwójny układ soczewek rozszerzył znacznie zdolność zbierającą (*optical power*), która może się zmieniać w granicach od 0 do -520 dioptrii przy częstotliwości 50 kHz oraz od 0 do $+400$ dioptrii przy częstotliwości 1 kHz. Równocześnie podwójne adresowanie spowodowało skrócenie czasu reakcji podczas zmiany ogniskowej soczewek do około 0,4 s w porównaniu z 10 s, charakteryzującymi normalną soczewką NLC o tej samej grubości. Istnieje też możliwość zwiększenia apertury układu kilka razy, co jest istotne dla zastosowań w aparatach fotograficznych i kamerach.

Podsumowując można stwierdzić, iż odpowiedź na postawione w tytule pytanie jest twierdząca. Zastosowanie nematyka CK z podwójnym adresowaniem pozwala zminiaturyzować soczewki oraz łatwo zmieniać długość ogniskowej w szerokim zakresie przy użyciu napięcia kilku woltów o częstotliwościach kilohercowych. Umożliwia to budowę aparatów fotograficznych i innych urządzeń o niewielkich rozmiarach i małym ciężarze.