

Sposób całkowitego optycznego sterowania kierunkiem propagacji sygnału optycznego w komórce ciekłokrystalicznej o geometrii klina wypełnionej domieszkowanym chiralnym nematycznym ciekłym kryształem

Przedmiotem wynalazku: sposób całkowitego optycznego sterowania kierunkiem propagacji sygnału optycznego w komórce ciekłokrystalicznej o geometrii klina wypełnionej domieszkowanym chiralnym nematycznym ciekłym kryształem jest wykorzystanie oddziaływania sygnału optycznego z linią dysklinacji, której położenie zmieniane jest przez nieliniowość termiczną ciekłego kryształu, mające zastosowanie do przełączania sygnałów optycznych w torach sygnałowych, zwłaszcza falowodowych, a także do sterowania sygnałem optycznym w zintegrowanych układach optoelektronicznych oraz w optycznych układach logicznych.

Nematyczne ciekłe kryształy są substancjami składającymi się z anizotropowych molekuł. Jedną z unikatowych cech nematycznych ciekłych kryształów jest charakter oddziaływania pomiędzy zewnętrznymi polami (elektrycznym, magnetycznym oraz elektromagnetycznym) a molekułami. W przypadku oddziaływania pomiędzy molekułami a wiązką elektromagnetyczną kluczową rolę odgrywa charakterystyczna dla ośrodków ciekłokrystalicznych nieliniowość reorientacyjna. Nieliniowość tego typu umożliwia przestrajanie właściwości optycznych ciekłych kryształów poprzez zmianę natężenia przechodzącego przez nie światła. Nieliniowość orientacyjna ciekłych kryształów jest o kilka rzędów wielkości silniejsza od konwencjonalnego efektu Kerra w dielektrykach. Dzięki temu silne efekty nieliniowe obserwowane są już przy użyciu sygnałów o małej mocy optycznej. Bazując na mechanizmie nieliniowości reorientacyjnej wykazane zostało, że w nematycznych ciekłych kryształach można uzyskać bezdyfrakcyjną propagację wiązki światła w postaci optycznego solitonu przestrzennego. Optyczny soliton przestrzenny indukuje kanał falowodowy w warstwie nematycznego ciekłego kryształu.

Zjawisko to w sposób teoretyczny oraz eksperymentalny opisane zostało w pierwszym rozdziale książki G. Assanto, „Nematicons”, (Wiley & Sons, 2013 Hoboken). Silna nieliniowość reorientacyjna umożliwia uzyskanie optycznych solitonów przestrzennych dla źródeł laserowych pracy ciągłej, emitujących wiązkę o małej mocy optycznej. Ważną cechą jest również nielokalność odpowiedzi nieliniowej nematycznych ciekłych kryształów, czyli zakres zmian nieliniowych właściwości wykraczający znacznie poza obszar silnej wiązki świetlnej, co zostało wykazane w pracy A. Snyder, D. J. Mitchell, „Accessible solitons”, *Science* 276, 1538 (1996). W połączeniu z nasyceniowym charakterem nieliniowości reorientacyjnej powyższe właściwości zapewniają uzyskanie stabilnych optycznych solitonów przestrzennych w przestrzeni trójwymiarowej.

Obok nieliniowości reorientacyjnej występuje nieliniowość termiczna, która może być wywołana częściową absorpcją wiązki światła przechodzącej przez ciekły kryształ. W przeciwieństwie do nieliniowości reorientacyjnej cecha ta nie jest zależna od polaryzacji światła, może jednak powodować lokalną zmianę skrętności nematyka chiralnego. Zmiana skrętności nematyka chiralnego na skutek zmiany temperatury została wykazana oraz opisana w pracy N. Emoto, M. Tanaka, S. Saito, K. Furukawa, T. Inkuaki, „Some correlations between the temperature dependence of induced cholesteric pitch and the chemical structure of chiral compound”, *Jap. J. of Appl. Phys.* 28, L-121 (1989).

Do uzyskania propagacji optycznych solitonów przestrzennych w nematycznych ciekłych kryształach wykorzystuje się komórki ciekłokrystaliczne w trzech podstawowych konfiguracjach: homogenicznej, co zostało opisane w pracy M. Peccianti, G. Assanto, „Nematicons”, *Phys. Rep.* 516, 147-208 (2012); homeotropowej, co zostało opisane w pracy M. Karpierz, M. Sierakowski, M. Świłło, T. Woliński, „Self-focusing in liquid crystalline waveguides”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 320, 157b (1998); oraz skróconego nematyka, co zostało opisane w pracy K. Jaworowicz, K. A. Brzdąkiewicz, M. A. Karpierz, M. Sierakowski, „Spatial Solitons in Twisted Nematic Layer”, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, Vol. 453, pp. 301–307, 2006. Możliwa jest również generacja optycznych solitonów przestrzennych w chiralnych nematycznych ciekłych kryształach, w których skok helisy jest rzędu kilku, kilkunastu mikrometrów, co zostało opisane w pracy U. A. Laudyn, M. Kwaśny, M. A. Karpierz, „Nematicons in chiral nematics”, *Appl. Phys. Lett.* 94, 091110 (2009).

Dotychczas w celu zmiany kierunku propagacji optycznego solitonu przestrzennego w homogenicznie zorientowanej warstwie wykorzystywane było m.in. oddziaływanie pomiędzy solitonami (M. Peccianti, G. Assanto, „Signal readressing by steering of spatial soliton in bulk nematic liquid crystals”, *Opt. Lett.* 26, 1690 (2001)); wpływ zewnętrznego pola elektrycznego (M. Peccianti, C. Conti, G. Assanto, A. De Luca, C. Umeton, „Routing of anisotropic spatial soliton and modulation instability in liquid crystals”, *Nature* 432, 733 (2004)) jak również odbicia od powierzchni ograniczających (A. Alberucci, M. Peccianti, G. Assanto, „Nonlinear bouncing of nonlocal spatial soliton at the boundaries”, *Opt. Lett.* 32, 2795 (2007)). Pojawiły się również doniesienia o zmianie kierunku propagacji optycznego solitonu przestrzennego na skutek całkowitego wewnętrznego odbicia od obszaru o zmienionym rozkładzie współczynnika załamania wywołanym drugą wiązką oświetlającą (A. Pasquazi, A. Alberucci, M. Peccianti, G. Assanto, „Signal processing by opto-optical interactions between self-localized and free propagating beams in liquid crystals”, *Appl. Phys. Lett.* 87, 261104 (2005)); stosowanie specjalnego rozdzielania elektrod wywołujących niejednorodny rozkład pola elektrycznego wewnątrz warstwy (M. Peccianti, A. Dyadyusha, M. Kaczmarek, G. Assanto, „Tunable refraction and reflection of self-confined light beams”, *Nat. Phys.* 2, 737 (2006)) lub wprowadzanie do ciekłego kryształu defektów (Y. V. Izdebskaya, V. G. Shvedov, A. S. Desyatnikov, W. Krolikowski, Y. S. Kivshar, „Soliton bending and routing induced by interaction with curved surfaces in nematic liquid crystals”, *Opt. Lett.* 35, 1692 (2010)).

W generacji optycznych solitonów przestrzennych wykorzystywane są komórki ciekłokrystaliczne zbudowane z dwóch płaskich transparentnych powierzchni ograniczających, oddalonych od siebie o dystans rzędu kilku, kilkudziesięciu mikrometrów. Materiałami wykorzystywanymi jako powierzchnie ograniczające są najczęściej szkło, poliwęglan oraz materiały elastyczne wytworzone z tworzyw sztucznych charakteryzujące się dużą transmisją promieniowania elektromagnetycznego w zakresie światła widzialnego. Obszar pomiędzy powierzchniami ograniczającymi wypełniony jest nematycznym ciekłym kryształem. Związki ciekłych kryształów mogą być domieszkowane barwnikami wpływającymi na właściwości elektrooptyczne komórki, w tym na zmianę natężenia światła spolaryzowanego, co pozwala na optymalizację komórki w zależności od zastosowania. Powierzchnie ograniczające komórkę ciekłokrystaliczną od

wewnętrznej strony pokryte są warstwą orientującą, która zapewnia pożądany kierunek ułożenia molekuł na powierzchniach granicznych: homogeniczny lub homeotropowy. Stosowane są także komórki ciekłokrystaliczne o geometrii klina. Przykładem zastosowania takiej komórki jest przełącznik światłowodowy opisany w JPS60247228 oraz modulator optyczny opisany w US5841500. W rozwiązaniach tych zmiana kierunku propagacji wiązki światła następuje po przyłożeniu napięcia elektrycznego i zmianie kierunku polaryzacji wiązki przechodzącej przez komórkę.

Chiralne nematyczne ciekłe kryształy charakteryzują się przestrzennym skręceniem molekuł, co oznacza, że w komórce płaskorównoległej dyrektor \mathbf{n} , określający orientację długich osi molekuł, jest równoległy do powierzchni ograniczających i dodatkowo skręcony wzdłuż kierunku prostopadłego do tych powierzchni. Przestrzenne skręcenie molekuł w chiralnych nematycznych ciekłych kryształach powoduje, że określona zostaje optyczna struktura wielowarstwowa, w której wartość współczynnika załamania dla wiązki rozchodzącej się w kierunku prostopadłym do osi skręcenia uzależniona jest od kierunku polaryzacji oraz miejsca wprowadzenia wzdłuż stałej grubości komórki mierzonej między płaskimi powierzchniami ograniczającymi.

W analizowanej strukturze płaskorównoległej, współczynnik załamania zmienia się okresowo wraz z grubością komórki od wartości n_o – zwyczajny współczynnik załamania do wartości n_e – nadzwyczajny współczynnik załamania, wzdłuż drugiego wyróżnionego kierunku poprzecznego natomiast rozkład współczynnika załamania w ustalonej odległości od powierzchni ograniczających jest stały. Okresowa zmiana współczynnika załamania wzdłuż grubości komórki, mierzonej wzdłuż osi helisy, powoduje powstanie struktury wielowarstwowej, przy czym każda z warstw stanowi falowód gradientowy dla rozchodzącej się wiązki. Wprowadzona w taki falowód wiązka ulega dyfrakcji przestrzennej w przypadku liniowym dla małych mocy optycznych, natomiast wzrost mocy przy odpowiednio dobranej polaryzacji wiązki prowadzi do efektów nieliniowych związanych z nieliniowością reorientacyjną, co z kolei prowadzi do generacji optycznego solitonu przestrzennego w warstwie falowodowej powodowanej nieliniowym zjawiskiem samoogniskowania. Dla wiązki elektromagnetycznej o odpowiednio dobranych parametrach, takich jak kierunek polaryzacji, moc oraz szerokość początkowa wiązki wprowadzonej w środek takiej warstwy, w miejscu o maksymalnym współczynniku

załamania i kierunku propagacji równoległym do powierzchni ograniczających, warstwa nematyka chiralnego umożliwia bezdyfrakcyjne prowadzenie wiązki w postaci optycznego solitonu przestrzennego, co zostało opisane w pracy U. A. Laudyn, M. Kwasny, M. A. Karpierz, „Nematicons in chiral nematics”, *Appl. Phys. Lett.* **94**, 091110 (2009). Propagująca się w ww. warstwie ciekłokrystalicznej wiązka elektromagnetyczna, która na drodze propagacji napotyka nieciągłość współczynnika załamania, powodowaną obecnością defektu w postaci linii dysklinacji w szczególnym przypadku może zmienić kierunek propagacji. Zmiana ta jest powodowana odbiciem wiązki od granicy ośrodków o różnych wartościach współczynnika załamania i zachodzi, gdy kąt zawarty pomiędzy kierunkiem propagacji wiązki elektromagnetycznej a linią dysklinacji jest rzędu kilku, kilkunastu stopni, co zostało opisane w pracach U. A. Laudyn, M. A. Karpierz, „Nematicons deflection through interaction with disclination lines in chiral nematic liquid crystals”, *Appl. Phys. Lett.* **103**, 221104 (2013); M. Kwaśny, B. W. Klus, U. A. Laudyn, “The influence of pitch and birefringence on nematicon propagation at the disclination lines in chiral nematic liquid crystals”, *Phot. Lett. Poland* **6** (4), 154-156 (2014).

Umieszczenie chiralnego nematycznego ciekłego kryształu w komórce o geometrii klina powoduje, że pojawiają się linie nieciągłości direktora, tak zwane linie dysklinacji, będące liniowymi defektami struktury o ściśle określonej pozycji. Linie te tworzą się we wzajemnej odległości równej zmianie odległości pomiędzy zbieżnymi powierzchniami ograniczającymi o połowę skoku helisy, a ich całkowita liczba w komórce ciekłokrystalicznej uzależniona jest od całkowitej zmiany odległości pomiędzy zbieżnymi powierzchniami ograniczającymi, wyznaczającymi liniowo zmienną grubość komórki. Liczba linii dysklinacji może być łatwo zmieniana poprzez zmianę kąta nachylenia pomiędzy powierzchniami ograniczającymi jak i skrętności użytego nematyka chiralnego.

Sposób całkowicie optycznego sterowania kierunkiem propagacji sygnału optycznego w komórce ciekłokrystalicznej o geometrii klina, wypełnionej chiralnym nematycznym ciekłym kryształem domieszkowanym barwnikiem, z wykorzystaniem oddziaływania sygnału optycznego z linią dysklinacji, której położenie zmieniane jest z wykorzystaniem nieliniowości termicznej ciekłego kryształu, a wiązka sygnałowa emitowana przez źródło światła spolaryzowanego generuje sygnał optyczny w postaci optycznego solitonu przestrzennego wytworzonego wskutek nieliniowości reorientacyjnej,

według wynalazku charakteryzuje się tym, że zmianę kierunku propagacji sygnału optycznego w komórce ciekłokrystalicznej wywołuje się poprzez lokalną zmianę położenia linii dysklinacji za pomocą drugiej wiązki przeświełającej emitowanej przez drugie źródło światła monochromatycznego, o długości fali zawierającej się w obszarze zwiększonej absorpcji domieszkowanego barwnikiem chiralnego nematycznego ciekłego kryształu, którą wprowadza się do komórki ciekłokrystalicznej prostopadle do jednej ze zbieżnych powierzchni ograniczających w kierunku propagacji zgodnym z osią helisy chiralnego nematycznego ciekłego kryształu, poprzecznie do kierunku propagacji sygnału optycznego, przy czym wiązkę sygnałową wprowadza się do komórki ciekłokrystalicznej przez ścianki boczne w kierunku równoległym do zbieżnych powierzchni ograniczających, zaś wielkość nieliniowości termicznej oraz zasięg jej działania kontroluje się przez zmianę natężenia wiązki przeświełającej.

Korzystnym jest, jeżeli zmianę natężenia wiązki przeświełającej emitowanej przez drugie źródło światła uzyskuje się za pomocą optycznego kontrolera mocy i polaryzacji zawierającego płytkę półfalową i polaryzator, oraz za pomocą obiektywu, korzystnie przesuwne, o zmiennym położeniu wzdłuż kierunku propagacji wiązki przeświełającej.

Korzystnym jest, jeżeli jako wiązkę sygnałową stosuje się wiązkę o liniowej polaryzacji nadzwyczajnej i długości fali z obszaru minimalnej absorpcji barwnika.

Korzystnym jest, jeżeli do zmiany kierunku propagacji wiązki sygnałowej stosuje się wiązkę przeświełającą o mocy optycznej od kilku do kilkunastu mW, zwłaszcza do 10mW.

Rozwiązanie według wynalazku wykorzystuje chiralny nematyczny ciekły kryształ umieszczony w komórce o geometrii klina do przełączanie sygnału w optycznym torze sygnałowym, zwłaszcza falowodowym. W celu zmiany kierunku propagacji sygnału optycznego wykorzystywana jest zmiana położenia linii dysklinacji wywołana oddziaływaniem ośrodka z drugą wiązką świetlną przeświełającą warstwę domieszkowanego barwnikiem chiralnego nematycznego ciekłego kryształu o kierunku propagacji zgodnym z osią helisy. Chiralny nematyczny ciekły kryształ domieszkowany jest odpowiednim barwnikiem absorbującym długość fali odpowiadającej wiązce przeświełającej oraz mającym minimum absorpcji dla długości fali odpowiadającej

wiązce sygnałowej. Ze względu na indukowaną wiązką prześwietlającą nieliniowość termiczną na skutek absorpcji części promieniowania elektromagnetycznego następuje wzrost temperatury ciekłego kryształu, co powoduje lokalną zmianę skrętności nematyka chiralnego. Jako wiązkę prześwietlającą stosuje się wiązkę elektromagnetyczną o stosunkowo niskiej mocy optycznej, do około 10mW. W opisywanym sposobie zmiana skrętności wywołana zmianą temperatury indukowaną wiązką elektromagnetyczną powoduje zmianę położenia linii dysklinacji oraz jej wygięcie. To z kolei prowadzi do zmiany kierunku propagacji wiązki elektromagnetycznej sygnałowej propagującej się w płaszczyźnie równoległej do usytuowanych zbieżnie płytek ograniczających.

Sposób według wynalazku jest objaśniony w przykładzie realizacji na rysunku, na którym fig. 1a przedstawia schematycznie komórkę ciekłokrystaliczną o geometrii klina w widoku z boku, fig. 1b przedstawia schematycznie komórkę z fig. 1a w widoku z dołu, fig. 2 przedstawia schemat układu optycznego do realizacji sposobu według wynalazku, fig. 3 przedstawia lokalne odchylenie linii dysklinacji w zależności od mocy wiązki prześwietlającej w płaszczyźnie z-y, a fig 4 przedstawia wykres ilustrujący odchylenie sygnału optycznego w płaszczyźnie z-y w zależności od mocy wiązki prześwietlającej.

Jak przedstawiono na fig. 1a, 1b, komórka ciekłokrystaliczna o geometrii klina ma dwie zbieżne powierzchnie ograniczające 1 pochylone względem siebie pod kątem ostrym alfa α nie przekraczającym 5° w płaszczyźnie x-y, wyznaczone przez oś y i współrzędne d_1, d_2 na osi x. W komórce ciekłokrystalicznej 5 o takiej konfiguracji powierzchnie ograniczające 1 są usytuowane symetrycznie względem dwusiecznej klina, a oś helisy jest zasadniczo prostopadła na przecięciu z płaszczyzną powierzchni ograniczającej. Strzałka λ_1 ilustruje kierunek wiązki sygnałowej, prostopadły do płaszczyzny x-y, a strzałka λ_2 ilustruje kierunek wiązki sygnałowej, prostopadły do płaszczyzny z-y. Kąt theta θ na fig. 1a określa kierunek direktora w płaszczyźnie z-y.

Sposób według wynalazku został zrealizowany w przykładowym układzie widocznym na fig. 2, składającym się z dwóch źródeł światła monochromatycznego 1, 6, pierwszego i drugiego, płytek fazowych półfalowych 2, 7, polaryzatorów 3, 8, obiektywów 4, 9, oraz komórki ciekłokrystalicznej 5. Pierwsze źródło światła 1 emituje monochromatyczną wiązkę sygnałową gaussowską o długości fali z dala od maksimum

absorpcji materiału ciekłokrystalicznego wypełniającego komórkę ciekłokrystaliczną 5. Wiązka sygnałowa prostopadła do płaszczyzny x-y jest wykorzystywana do generacji sygnału optycznego - optycznego solitonu przestrzennego. Moc oraz jej polaryzacja kontrolowane są przy pomocy optycznego kontrolera mocy i polaryzacji złożonego z płytki fazowej półfalowej 2 i polaryzatora 3. Następnie wiązka sygnałowa o znanej mocy oraz kierunku liniowej polaryzacji skupiana jest przez obiektyw 4 i wprowadzana w obszar wypełniony domieszkowanym chiralnym nematycznym ciekłym kryształem generując optyczny soliton przestrzenny oddziałujący z liniami dysklinacji wytworzonymi w komórce ciekłokrystalicznej 5. Sterowanie kierunkiem propagacji tak wytworzonego sygnału optycznego odbywa się poprzez kontrolę położenia linii dysklinacji z wykorzystaniem drugiej monochromatycznej wiązki przeświełającej emitowanej przez drugie źródło 6 w kierunku prostopadłym do płaszczyzny z-y. Długość fali elektromagnetycznej wiązki emitowanej przez drugie źródło 6 jest dobrana w taki sposób, aby była ona w obszarze zwiększonej absorpcji barwnika, którym domieszkowany jest chiralny nematyczny ciekły kryształ wypełniający komórkę ciekłokrystaliczną 5 o geometrii klina. Moc oraz kierunek liniowej polaryzacji wiązki elektromagnetycznej emitowanej przez drugie źródło 6 są kontrolowane przy pomocy drugiego optycznego kontrolera mocy i polaryzacji złożonego z płytki fazowej półfalowej 7 i polaryzatora 8. Następnie wiązka przeświełająca jest skupiana przez drugi obiektyw 9 i wprowadzana do komórki ciekłokrystalicznej 5 w kierunku zgodnym z kierunkiem wyznaczonym przez oś helisy. Wiązka przeświełająca na skutek oddziaływania z domieszkowanym chiralnym nematycznym ciekłym kryształem lokalnie wywołuje wzrost temperatury. Wzrost temperatury może być sterowany poprzez kontrolę dwóch parametrów: natężenia wiązki elektromagnetycznej emitowanego przez drugie źródło 6 lub poziomu absorpcji materiału ciekłokrystalicznego wypełniającego komórkę ciekłokrystaliczną 5. Wartość natężenia wiązki elektromagnetycznej może być kontrolowana poprzez zmianę mocy wiązki emitowanej przez drugie źródło 6 przy pomocy płytki fazowej półfalowej 7 lub poprzez zmianę wielkości oświetlanego obszaru ściśle związaną z wykorzystanym drugim obiektywem 9, lub jego pozycją względem komórki ciekłokrystalicznej 5, która może być zmienna wzdłuż kierunku propagacji wiązki. Kontrola poziomu absorpcji następuje poprzez dobór domieszki barwnika oraz jego stężenia w chiralnym nematycznym ciekłym kryształach.

W wykorzystanym układzie z fig. 2 dokonano zmiany położenia linii dysklinacji o $100 - 120 \mu\text{m}$ przy wykorzystaniu mocy wiązki prześwietlającej o długości fali λ_2 do 10mW . Kąt α mieścił się w zakresie $0,2^\circ - 0,3^\circ$. Przykładowe wyniki dla ciekłego kryształu 6CHBT domieszkowanego związkami chiralnymi wywołującym skręcenie o skoku helisy $10\mu\text{m}$ oraz domieszką barwnika Sudan Blue na bazie toluenu w stężeniu $0,1\%$ (w komórce) zaprezentowano na fig. 3, 4. Wykorzystano monochromatyczne wiązki elektromagnetyczne o długościach $\lambda_1 = 1064\text{nm}$ i mocy optycznej 6mW oraz fali $\lambda_2 = 532\text{nm}$ i mocy optycznej z zakresu $0 - 10\text{mW}$. Fig. 3 obrazuje uzyskane wyniki dla mocy wiązki nieprzekraczającej 5mW . Położenia linii dysklinacji zaznaczone zostały przerywaną linią, natomiast miejsce oddziaływania domieszkowanego chiralnego nematycznego ciekłego kryształu z wiązką zaznaczone zostało okręgiem. Widoczna jest znaczna zmiana położenia linii dysklinacji oraz kierunku propagacji sygnału optycznego o długości fali λ_1 , co ilościowo zaprezentowano na wykresie z fig. 4 dla mocy optycznej P wiązki o długości fali λ_2 nieprzekraczającej 10mW . W przypadku wiązki o mocy 10mW w skutek oddziaływania sygnału optycznego o długości fali λ_1 z linią dysklinacji uzyskano zmianę trajektorii wiązki o ponad 1mm w komórce ciekłokrystalicznej.

RZECZNIK PATENTOWY


mgr inż. Jerzy Woźniak