



## Termicznie przełączane kompozyty ciekłokrystaliczne

KRZYSZTOF SUŁKOWSKI<sup>1</sup>, STANISŁAW J. KŁOSOWICZ

<sup>1</sup>Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa, Instytut Techniczny,  
33-320 Nowy Sącz, ul. L. Zamenhofa 1a, lukowica300@poczta.onet.pl  
Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii, Instytut Fizyki  
Technicznej, 00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2, stanislaw.klosowicz@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Zbadano właściwości termooptyczne kompozytów typu PDLC, zawierających nematiczne ciekłe kryształy w zakresie widzialnym oraz w bliskiej podczerwieni. Potwierdzono, że warstwa kompozytu może być przełączana, z zadowalającym kontrastem optycznym, od stanu rozpraszanego do transparentnego po osiągnięciu progowego przedziału temperatury przejścia ciekłego kryształu do fazy izotropowej. Kontrast optyczny i wartość przedziału temperaturowego przełączenia zależą od doboru składników mieszaniny ciekłokrystalicznej. Zjawisko może być wykorzystane do konstrukcji szyb o „inteligentnej” transmisji ciepła, w zależności od temperatury zewnętrznej.

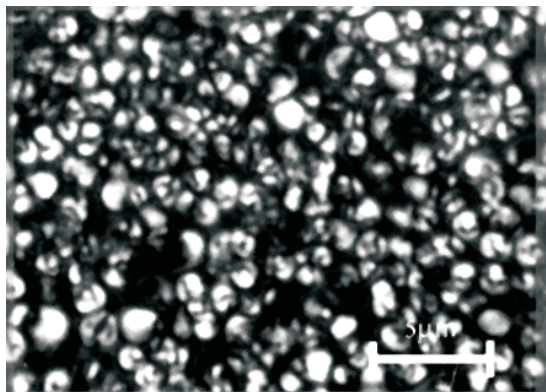
**Słowa kluczowe:** inżynieria materiałowa, kompozyty ciekłokrystaliczne, efekt termooptyczny  
**DOI:** 10.5604/12345865.1197975

### 1. Wstęp

Kompozyty ciekłokrystaliczne typu PDLC (ang. *Polymer-Dispersed Liquid Crystals*) to układy dwufazowe, w których kropelki ciekłego kryształu o rozmiarach rzędu 0,1-10  $\mu\text{m}$  są zawieszone w folii polimerowej (rys. 1). Ich głównymi zaletami są: elastyczność i możliwość nanoszenia na podłoża o złożonym kształcie, przy jednoczesnym zachowaniu właściwości substancji ciekłokrystalicznych. W układach tego rodzaju można odtworzyć większość efektów elektrooptycznych występujących w cienkich warstwach ciekłego kryształu, a co ważniejsze, występują w nich również unikatowe zjawiska elektrooptyczne.

Metody otrzymywania kompozytów typu PDLC, jak również formowania ich morfologii, czyli koncentracji, rozmiarów i kształtu kropek ciekłego kryształu,

grubości warstwy kompozytu oraz orientacji ciekłego kryształu w kroplach, są dobrze poznane i opisane w literaturze [1, 2]. Zdecydowana większość dotychczas opublikowanych prac dotyczy właściwości elektrooptycznych tych materiałów, w szczególności nematicznych ciekłych kryształów, a zwłaszcza występującego w nich efektu elektrycznie indukowanej transmisji światła, zarówno w aspekcie doświadczalnym [1-4], jak i teoretycznym [5, 6].



Rys. 1. Obraz kompozytu PDLC otrzymany w mikroskopie polaryzacyjnym

Powyższe zjawisko polega na przełączeniu od rozpraszającego światła stanu wyłączzonego OFF do stanu transparentnego ON (lub odwrotnie) w wyniku przyłożenia pola elektrycznego o dostatecznie wysokim natężeniu.

W niniejszej pracy opisano wyniki otrzymane dla efektu podobnego, ale wywołanego przemianą fazową ciekły kryształ–ciecz izotropowa. Ten efekt może zostać wykorzystany do konstrukcji szyb o „inteligentnej” reakcji na zmianę temperatury otoczenia, polegającej na zmianie transmitancji, a zatem i izolacyjności cieplnej, zwłaszcza w obszarze bliskiej podczerwieni, w zależności od temperatury otoczenia.

## 2. Podstawy zjawiska

Układy dyspersyjne rozpraszają promieniowanie elektromagnetyczne w wyniku różnicy współczynników załamania faz rozpraszającej i rozproszonej, czyli obecności w układzie granic dielektrycznych. Natężenie i kierunek rozpraszania zależą od grubości układu oraz koncentracji i kształtu cząstek fazy rozproszonej, rozmiarów cząstek rozproszonych względem długości fali padającego promieniowania, a także wspomnianej różnicy współczynników załamania obu faz dla danej długości fali.

Nematiczny ciekły kryształ jest fazą dwójłomną o dwóch współczynnikach załamania światła: zwyczajnym  $n_o$  i nadzwyczajnym  $n_e$ . W typowym kompozycie

typu PDLC, znajdującym się w wyjściowym stanie OFF, orientacja przestrzenna osi optycznych kropek ciekłokrystalicznych jest przypadkowa, przez co światło padające „widzi” średni współczynnik załamania ciekłego kryształu:

$$\bar{n}_{CK} = \frac{2n_o + n_e}{3}, \quad (1)$$

różny od współczynników załamania poszczególnych kropek ciekłego kryształu oraz współczynnika załamania matrycy polimerowej. Układ taki rozprasza zatem światło padające. Jeżeli jednak jeden z głównych współczynników załamania fazy ciekłokrystalicznej, na przykład zwyczajny  $n_o$ , jest równy współczynnikowi załamania matrycy polimerowej  $n_p$ , to jednolite uporządkowanie osi optycznych kropek, na przykład za pomocą pola elektrycznego, może spowodować zanik granic dielektrycznych i wówczas układ staje się transparentny (stan ON). Możliwe jest również uzyskanie efektu odwrotnego [7]. W klasycznym przypadku wspomnianego wyżej przełączenia elektrooptycznego dopasowanie współczynników załamania składników kompozytu, odpowiednio w stanach OFF i ON, ma postać:

$$\bar{n}_{CK} \neq n_p \rightarrow n_o = n_p. \quad (2)$$

Podobne przełączenie między stanem rozpraszającym i transparentnym może również wystąpić w temperaturze klarowania ciekłego kryształu —  $T_{kb}$ , czyli temperaturze przemiany fazowej od stanu ciekłokrystalicznego do stanu cieczy izotropowej, dzięki zanikowi uporządkowania nadmolekularnego, stanowiącego o stabilności fazy ciekłokrystalicznej, pod wpływem ruchów cieplnych molekuł. Schematyczną ilustrację tego zjawiska pokazano na rysunku 2. Kreski w okręgach w lewej części rysunku obrazują typowe lokalne uporządkowanie długich osi molekuł nematycznego ciekłego kryształu wewnątrz kropek, czyli kierunek wektora jednostkowego zwanego директором.

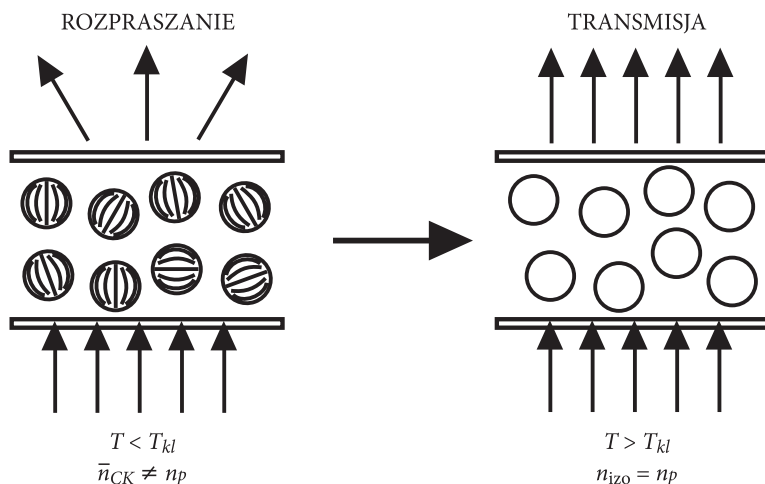
W przypadku takiego przełączenia termooptycznego odpowiednie dopasowanie współczynników załamania powinno mieć następującą postać:

$$\bar{n}_{CK} \neq n_p \rightarrow n_{izo} = n_p, \quad (3)$$

gdzie  $n_{izo}$  jest współczynnikiem załamania światła dla fazy izotropowej substancji mezogennej.

Należy podkreślić, że dobrze opanowana inżynieria materiałowa ciekłych kryształów umożliwia uzyskanie substancji o zadanym przedziale temperaturowym występowania fazy ciekłokrystalicznej oraz o zadanych współczynnikach załamania światła w szerokich zakresach tych parametrów. Ponadto można sterować morfologią kompozytów PDLC, a zwłaszcza rozmiarami kropek ciekłego kryształu, na etapie

ich otrzymywania. Dzięki temu możliwe jest wytwarzanie kompozytów o właściwościach przeznaczonych dla konkretnych zastosowań.



Rys. 2. Ilustracja zjawiska temperaturowo indukowanej transmisji światła w kompozycie PDLC

### 3. Część doświadczalna

Kompozyty ciekłokrystaliczne typu PDLC badane w pracy otrzymano za pomocą dwóch różnych metod opisanych szczegółowo we wcześniejszych publikacjach. Pierwszą z nich było mikrokapsułkowanie w modyfikowanym poli(alkoholu winylowym) — PAW PA-18GP (*Shin Etsu Chemical Co.*) — poprzez dyspergowanie ciekłego kryształu w roztworze polimeru i następujące odparowanie rozpuszczalnika [8]. Drugą metodą była separacja faz, zachodząca w początkowo homogenicznej mieszaninie substancji ciekłokrystalicznej i żywicy na bazie poli(merkptoestrów) NOA65 (*Norland Optical Adhesives*) pod wpływem fotopolimeryzacji prepolimeru [9].

Jako materiały ciekłokrystaliczne zastosowano nematyczne ciekłe kryształy W-765 o  $T_{kl} = 337\text{-}347\text{ K}$  oraz W-1815 o  $T_{kl} = 333\text{-}336\text{ K}$  (Instytut Chemii WAT), których właściwości optyczne w zakresie widzialnym były dopasowane odpowiednio do badanych polimerów. Oba te materiały są mieszaninami wieloskładnikowymi zawierającymi głównie izotiocyjaniany. Właśnie ze względu na złożony skład klarowanie ciekłego kryształu w obu mieszaninach zachodzi w stosunkowo szerokim przedziale temperatury.

Zawartość substancji ciekłokrystalicznej w kompozycie wahała się od 20 do 35 procent wagowych, zależnie od wzajemnych relacji składników, a przeciętna średnica kropli ciekłego kryształu  $d$  wynosiła (w zależności od zawartości ciekłego kryształu oraz warunków otrzymywania kompozytu) od 2 do 6  $\mu\text{m}$ .

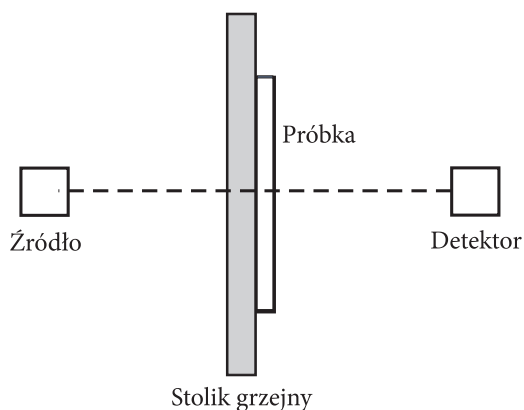
Grubość warstwy kompozytu umieszczonej między płytkami szklanymi ustalono za pomocą dystansowników szklanych o średnicy 10  $\mu\text{m}$ . Współczynniki załamania składników kompozytu zestawiono w tabeli 1.

TABELA 1

Współczynniki załamania światła składników kompozytu dla długości fali  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$  i  $\lambda = 1064 \text{ nm}$

Materiał	$n_{o589}$	$n_{e589}$	$n_{izo}$	$n_{p589}$	$n_{o1064}$	$n_{e1064}$	$n_{izo}$	$n_{p1064}$
PVA	–	–	–	1,50	–	–	–	1,49
NOA-65 [10]	–	–	–	1,524	–	–	–	1,515
W-765	1,50	1,57	1,52	–	1,49	1,56	1,51	–
W-1815	1,52	1,68	1,55	–	1,51	1,65	1,54	–

Pomiary transmitancji optycznej w dalekim polu optycznym przeprowadzono za pomocą układu schematycznie pokazanego na rysunku 3. Wykorzystano w nim stolik grzejny z otworem optycznym (Linkam) oraz dwa źródła światła: lampę sodową dla zakresu widzialnego oraz laser Nd:YAG generujący promieniowanie o długości  $\lambda = 1064 \text{ nm}$  dla zakresu bliskiej podczerwieni. Promieniowanie przechodzące przez próbkę pod kątem  $90^\circ$  do jej powierzchni było rejestrowane za pomocą fotodiody. Odległość między źródłem i próbką oraz próbką i detektorem wynosiła 30 cm.



Rys. 3. Schemat układu pomiarowego do badania transmisji próbek kompozytów w funkcji temperatury

## 4. Wyniki i ich omówienie

Transmitancja próbki —  $TR$  określa, jaka część wiązki światła padającego prostopadłe do powierzchni próbki jest przez nią przepuszczana. Maksymalną wartość

transmitancji kompozytu, równą 100%, znormalizowano do wartości uzyskanej dla pustej komórki pomiarowej.

W tabelach 2-4 zebrano przykładowe, ale reprezentatywne wartości współczynnika kontrastu optycznego  $CR$ , obliczonego jako stosunek transmitancji próbki w stanie ON i stanie OFF:

$$CR = \frac{T_{ON}}{T_{OFF}}, \quad (4)$$

przy czym wartość  $CR_{pok}$  jest odniesiona do stosunku transmitancji odpowiednio dla temperatury końca klarowania oraz temperatury pokojowej, czyli 20-22°C, natomiast  $CR_{pret}$  jest odniesiona do stosunku transmitancji dla temperatury końca klarowania oraz temperatury o 2 K niższej niż temperatura końca klarowania, czyli dla obszaru przedprzejściowego.

TABELA 2

Wartości współczynników kontrastu optycznego otrzymane dla światła widzialnego

Kod próbki	Skład (% wag.)	Metoda otrzymania	$\bar{d}$ (μm)	$CR_{pok}$	$CR_{pret}$
P11	PVA + W-765 (80:20)	Mikrokapsułkowanie	3	8,7	1,3
P12	PVA + W-765 (80:20)	Mikrokapsułkowanie	6	8,4	1,2
P13	PVA + W-765 (65:35)	Mikrokapsułkowanie	3	11,2	1,5
P14	PVA + W-765 (65:35)	Mikrokapsułkowanie	6	9,6	1,3
P21	PVA + W-1815 (80:20)	Mikrokapsułkowanie	3	9,0	1,6
P22	PVA + W-1815 (80:20)	Mikrokapsułkowanie	6	8,5	1,5
P23	PVA + W-1815 (65:35)	Mikrokapsułkowanie	3	11,9	1,9
P24	PVA + W-1815 (65:35)	Mikrokapsułkowanie	6	9,4	1,8
N11	NOA-65 + W-765 (80:20)	Separacja faz	3	9,1	1,3
N12	NOA-65 + W-765 (80:20)	Separacja faz	6	7,4	1,2
N13	NOA-65 + W-765 (70:30)	Separacja faz	3	12,0	1,4
N14	NOA-65 + W-765 (70:30)	Separacja faz	6	10,2	1,3
N21	NOA-65 + W-1815 (80:20)	Separacja faz	3	10,3	1,5
N22	NOA-65 + W-1815 (80:20)	Separacja faz	6	7,8	1,4
N23	NOA-65 + W-1815 (65:35)	Separacja faz	3	13,4	1,8
N24	NOA-65 + W-1815 (65:35)	Separacja faz	6	10,7	1,7

TABELA 3

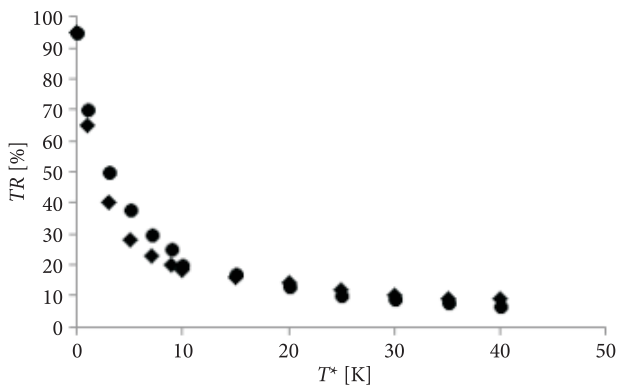
Wartości współczynnika kontrastu optycznego otrzymane dla podczerwieni

Kod próbki	Skład (% wag.)	Metoda otrzymania	$\bar{d}$ ( $\mu\text{m}$ )	$CR_{\text{pok}}$	$CR_{\text{pret}}$
P11	PVA + W-765 (80:20)	Mikrokapsułkowanie	3	7,9	1,3
P12	PVA + W-765 (80:20)	Mikrokapsułkowanie	6	8,0	1,4
P13	PVA + W-765 (65:35)	Mikrokapsułkowanie	3	10,1	1,7
P14	PVA + W-765 (65:35)	Mikrokapsułkowanie	6	10,4	1,7
P21	PVA + W-1815 (80:20)	Mikrokapsułkowanie	3	7,8	1,9
P22	PVA + W-1815 (80:20)	Mikrokapsułkowanie	6	8,1	2,0
P23	PVA + W-1815 (65:35)	Mikrokapsułkowanie	3	10,8	2,1
P24	PVA + W-1815 (65:35)	Mikrokapsułkowanie	6	11,2	2,2
N11	NOA-65 + W-765 (80:20)	Separacja faz	3	8,3	1,1
N12	NOA-65 + W-765 (80:20)	Separacja faz	6	8,4	1,2
N13	NOA-65 + W-765 (65:35)	Separacja faz	3	10,5	1,3
N14	NOA-65 + W-765 (65:35)	Separacja faz	6	10,7	1,4
N21	NOA-65 + W-1815 (80:20)	Separacja faz	3	9,4	1,5
N22	NOA-65 + W-1815 (80:20)	Separacja faz	6	9,7	1,5
N23	NOA-65 + W-1815 (65:35)	Separacja faz	3	12,7	1,6
N24	NOA-65 + W-1815 (65:35)	Separacja faz	6	12,6	1,7

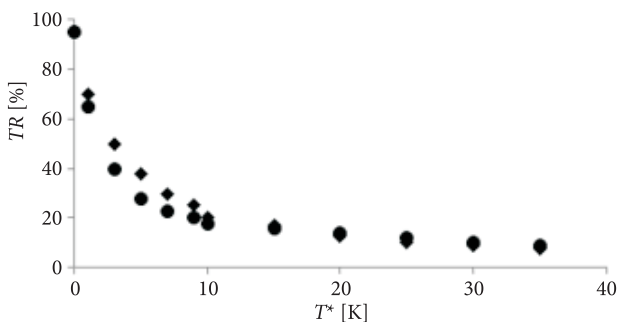
Przykłady otrzymanych charakterystyk termooptycznych pokazano na rysunkach 4-6. Temperatura zredukowana  $T^*$  jest tu różnicą pomiędzy temperaturą bezwzględną końca klarowania ciekłego kryształu i aktualną temperaturą bezwzględną kompozytu  $T$ .

$$T^* = T_{kl} - T. \quad (5)$$

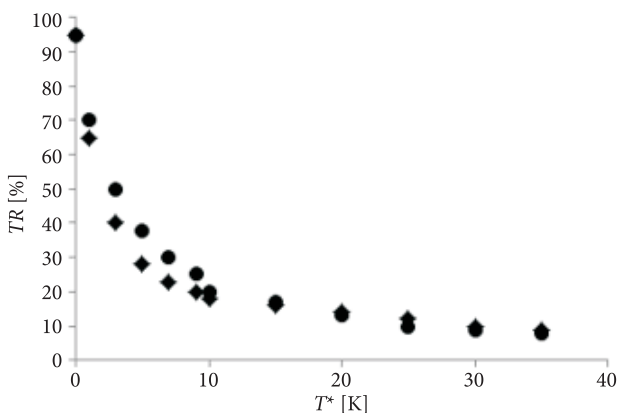
Zgodnie z przewidywaniami zaobserwowano znaczący wzrost transmitancji badanych kompozytów w przedziale temperatury odpowiadającym klarowaniu ciekłego kryształu. Transmitancja i współczynnik kontrastu optycznego zależą od dopasowania współczynników załamania składników kompozytu, co można zauważyć na przykładzie badanych par składników kompozytu dla tej samej długości fali światła padającego. Ten sam efekt odpowiada za mniejsze wartości współczynnika kontrastu optycznego dla promieniowania podczerwonego w porównaniu z widzialnym, przy czym należy podkreślić, że skład badanych mieszanin ciekłokrystalicznych był zaprojektowany dla zjawiska przełączenia elektrooptycznego w obszarze widzialnym. Niewielkie różnice zmierzonych wartości transmitancji wynikają



Rys. 4. Zależność charakterystyki termooptycznej od koncentracji kropelek ciekłego kryształu na przykładzie kompozytów: a) P11 — ● oraz b) P21 — ◆ w zakresie widzialnym. Przeciętny rozmiar kropelek ciekłego kryształu — 3  $\mu\text{m}$



Rys. 5. Zależność charakterystyki termooptycznej od rozmiarów kropelek ciekłego kryształu na przykładzie kompozytów: a) N23 — ● oraz b) N24 — ◆ w zakresie widzialnym. Zawartość ciekłego kryształu w próbce — 35% wag.



Rys. 6. Porównanie przykładowych charakterystyk termooptycznych kompozytów w zakresie bliskiej podczerwieni: P23 — ◆ oraz N23 — ●



z porównywalnych właściwości optycznych obu badanych materiałów. Należy jednak pamiętać, że mieszaniny różnią się także innymi właściwościami, m.in.: lepkością, energią kotwiczenia na powierzchni wnęki polimerowej czy powinowactwem chemicznym do danego polimeru, a właściwości termooptyczne kompozytów zależą w pewnym stopniu również od tych czynników.

W zakresie podczerwieni różnice wartości kontrastu optycznego dla kompozytów zawierających krople ciekłego kryształu o różnych średnicach są mniejsze niż dla zakresu widzialnego, co potwierdza przewidywania teoretyczne związane z relacją rozmiarów kropeł i długości fali padającej.

Niepełne dopasowanie współczynników załamania polimeru i mieszaniny mezo-gennej, zwłaszcza w fazie izotropowej, jest główną przyczyną występowania resztkowego rozpraszania światła powyżej temperatury klarowania ciekłego kryształu ( $TR < 100\%$ ). Jak już jednak wspomniano, jest możliwe opracowanie składu mieszanin ciekłokrystalicznych przeznaczonych dla określonego polimeru oraz zakresu promieniowania.

Maksymalna zawartość ciekłego kryształu w kompozycie, a zatem i koncentracja jego kropeł, zależy zarówno od właściwości składników, jak i metody otrzymywania kompozytu, dlatego też możliwość zmniejszania transmisji w stanie OFF dla określonej grubości warstwy kompozytu jest ograniczona. Tym niemniej w dalekim polu optycznym kontrast optyczny osiąga zadowalające wartości.

Rzeczywiste wartości zakresu temperatury klarowania ciekłego kryształu różniły się o kilka dziesiątych kelwina dla kompozytów otrzymanych różnymi metodami oraz dla czystego ciekłego kryształu, co jest spowodowane śladowymi zanieczyszczeniami ciekłego kryształu przez substancje występujące w procesie otrzymywania kompozytu, a także oddziaływaniami ciekły kryształ–polimer. Różnice te pominięto dzięki zastosowaniu do opisu zjawiska temperatury zredukowanej.

Jednorodność grubości próbki ma w opisywanym zjawisku znacznie mniejszy wpływ na jej jednorodność optyczną w stanie ON niż w przypadku zjawiska elektrycznie sterowanej transmisji światła, gdyż temperatura termostatowanej próbki jest praktycznie jednorodna ze względu na małą grubość warstwy kompozytu.

Przedstawiony efekt może być wykorzystany do konstrukcji szyb okiennych, których transmitancja, zwłaszcza w zakresie podczerwieni, wzrasta gwałtownie w określonej temperaturze, umożliwiając kilkakrotnie szybszy przepływ ciepła do wnętrza budynku. Takie szyby, niewymagające zasilania, mogłyby być stosowane zarówno w budownictwie mieszkalnym, jak i cieplarniach, zmniejszając emisję ciepła w niskiej temperaturze i zwiększając jego pochłanianie w temperaturze wyższej. Na drodze odpowiedniego doboru morfologii kompozytu i jego składników, w tym substancji silnie absorbujących w podczerwieni, możliwe jest jednocześnie zachowanie zadowalającej przezroczystości szyby w obszarze widzialnym oraz wysokiego kontrastu optycznego dla zakresu maksymalnej emisji promieniowania podczerwonego w widmie słonecznym, czyli do około 1440 nm.

## 5. Wnioski

1. Zbadano zjawisko temperaturowo indukowanej transmisji światła w kompozytach typu PDLC.
2. Efekt ten prowadzi do samoistnego przełączenia między stanem rozpraszającym i transmisyjnym kompozytu w przedziale temperaturowym klarowania ciekłego kryształu.
3. Odpowiedni dobór składu mieszaniny ciekłokrystalicznej umożliwia ustalenie temperatury przełączenia oraz uzyskanie zadowalającego kontrastu optycznego.
4. Przetworniki wykorzystujące omawiane zjawisko mogą być używane do konstrukcji szyb zmieniających transmisję powyżej określonego progu temperaturowego, zwłaszcza w zakresie bliskiej podczerwieni.

Praca została wykonana przy wsparciu finansowym Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Projektu Kluczowego POIG.01.03.01-14-016/08 „Nowe materiały fotoniczne i ich zaawansowane zastosowania” oraz Własnego Funduszu Stypendialnego PWSZ w Nowym Sączu.

Artykuł wpłynął do redakcji 2.10.2015 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 1.12.2015 r.

### LITERATURA

- [1] BOUTELLER L., LEBARNY P., *Polymer-dispersed liquid crystals: preparation, operation and application*, Liq. Cryst., 21(2), 1996, 157-174 i odnośniki tam przytoczone.
- [2] KŁOSOWICZ S.J., ALEKSANDER M., *Effect of polymer-dispersed liquid crystal morphology on its optical performance*, Opto-Electronics Review, 12(3), 2004, 305-312.
- [3] KŁOSOWICZ S.J., ŻMIJA J., *Optics and electro-optics of polymer-dispersed liquid crystals: physics, technology and application*, Optical Engineering, 34(12), 1995, 3440-3450.
- [4] ELLAHI M., LIU F., SONG P. et al., *Characterization and Morphology of Polymer-Dispersed Liquid Crystal Films*, Soft Materials, 12(3), 2014, 339-345.
- [5] ŽUMER S., DOANE J.W., *Light-scattering from a small nematic droplet*, Phys. Rev. A, 34(4), 1986, 3373-3386.
- [6] PAJEDA S., PAJEDIENE S., VAISNORAS R., ADOMENIENE O., GASPARRINI F., ROGANTE M., RUS- TICHELLI F., YANG B., *Electrooptical response in PDLC film*, Proc. SPIE, 3318, 1998, 422-426.
- [7] WĘGŁOWSKI R., *Elektrooptyczne właściwości kompozytów PDLC domieszkowanych nanokryształami nieorganicznymi*, rozprawa doktorska, WAT, Warszawa, 2013.
- [8] KŁOSOWICZ S.J., NOWINOWSKI-KRUSZELNICKI E., ŻMIJA J., *The simple method to prepare polymer dispersed liquid crystals*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 215, 1992, 253-255.
- [9] WĘGŁOWSKI R., KŁOSOWICZ S.J., MAJCHROWSKI A., OZGA K., KITYK I.V., CAŁUS S., CHMIEL M., *Electro-optical modulators in polymer-dispersed liquid crystal complexes*, Optics and Lasers in Engineering, 48(9), (2010), 856-858.
- [10] <http://www.norlandprod.com/adhesives.html>

K. SUŁKOWSKI, S.J. KŁOSOWICZ

### **Thermally switched PDLC liquid-crystalline composites**

**Abstract.** The thermo-optical properties of conventional polymer-dispersed nematic liquid crystals (PDLC) composites in visual and near IR ranges have been studied. It has been confirmed that the composite film can be switched from the scattering milky state to the transparent state just by reaching a threshold temperature range, namely liquid crystal clearing phase transition to the isotropic one with satisfactory contrast ratio. The optical contrast and switching temperature range can be adjusted by the proper choice of the components of liquid crystalline mixture. This effect could be adopted for a construction of panes with “intelligent” heat transmission.

**Keywords:** materials engineering, liquid-crystalline composites, thermo-optical effect

**DOI:** 10.5604/12345865.1197975

