



## Historia badań ciekłych kryształów

ZBIGNIEW RASZEWSKI, JERZY ZIELIŃSKI, STANISŁAW KŁOSOWICZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii,  
Instytut Fizyki Technicznej, Zakład Fizyki i Technologii Kryształów,  
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,

zbigniew.raszewski@wat.edu.pl, jerzy.zielinski@wat.edu.pl, stanislaw.klosowicz@wat.edu.pl

**Streszczenie.** Przedstawiono rys historyczny badań nad ciekłymi kryształami z uwzględnieniem zastosowań tych substancji. Szczególną uwagę poświęcono badaniom prowadzonym w polskich ośrodkach naukowych od lat trzydziestych ubiegłego wieku do dziś.

**Słowa kluczowe:** ciekłe kryształy, właściwości fizyczne, inżynieria materiałowa, wyświetlacze ciekłokrystaliczne

**DOI:** 10.5604/01.3001.0016.1466

### 1. Wprowadzenie

„Ciekły kryształ” (CK) to definicja stanu wewnętrznie sprzeczna — jak można łączyć w całość stan ciekły, gdzie molekuly są swobodne, nieuporządkowane, z kryształem charakteryzującym się dalekim uporządkowaniem struktury? Jeszcze 50 lat temu niewielu naukowców–fizyków rozumiało sposób, w jaki taki stan może powstać. Dziś jest to podstawa budowy monitorów telewizyjnych, komputerowych, tabletek, telefonów komórkowych czy prostych wyświetlaczy dystrybutorów paliw, tablic informacyjnych dla podróżnych na dworcach kolejowych itp.

Na Wydziale Nowych Technologii i Chemii WAT szerokie badania ciekłych kryształów prowadzone są nieprzerwanie od 1975 roku, a zespół chemików i fizyków ma bardzo dużą wiedzę na ten temat. Dlatego proponujemy cykl artykułów poświęconych poszczególnym właściwościom tych dziwnych/ciekawych materiałów i ich zastosowaniom.

Autorzy cyklu ukończyli studia na Wydziale Chemii i Fizyki Technicznej Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Kierunek ten został utworzony w 1962 roku z inicjatywy gen. prof. Sylwestra Kaliskiego, aby kształcić przyszłe kadry naukowe dla potrzeb rozwijającej się uczelni, jak i wojskowych instytutów naukowych. Autorzy od chwili ukończenia studiów pracują w WAT i brali udział we wszystkich pracach naukowo-badawczych prowadzonych w Instytucie Fizyki Technicznej WAT w dziedzinie fizyki, technologii i aplikacji CK. Cykl tych publikacji jest adresowany zwłaszcza do studentów i doktorantów zgłębiających głównie problematykę przesyłania, kontroli i wizualizacji informacji oraz modulacji parametrów fali świetlnej. Zrozumienie podstaw fizyki zjawisk zachodzących w ciekłych kryształach, praw oddziaływania światła ze strukturami CK oraz poznanie niezbędnych technologii potrzebnych do wytworzenia ciekłokrystalicznych elementów optycznych jest niezbędne dla twórczej pracy współczesnego inżyniera.

Cykl tych publikacji autorzy poświęcają pamięci swoich Nauczycieli, Wielkim Wizjonerom, niezującym już profesorom: Sylwestrowi Kaliskiemu (fizyka plazmy, 1925-1978), Czesławowi Rymarzowi (mechanika ośrodków ciągłych, 1930-2011), Lechowi Solarzowi (mechanika teoretyczna, 1937-2017), Janowi Szmelterowi (mechanika techniczna, 1925-1978), Romanowi Leitnerowi (matematyka ogólna, 1914-2008) i Feliksowi Borowskiemu (fizyka ogólna, 1912-1983), którzy utworzyli w WAT kierunek fizyka techniczna. Publikacje te są podziękowaniem dla profesorów Józefa Żmii i Romana Dąbrowskiego za inicjatywę podjęcia w WAT badań nad ciekłymi kryształami i konsekwentne ich prowadzenie pomimo wielu zakrętów historii. Autorzy dziękują także swoim nauczycielom i współpracownikom, profesorom: Mieczysławowi Szustakowskiemu (fizyka falowa), Janowi Witoldowi Baranowi (fizyka molekularna), Jerzemu Kędzierskiemu (optyka CK), Leszkowi Romanowi Jaroszewiczowi (optoelektronika i technika światłowodowa), doktorowi Edwardowi Nowinowskiemu-Kruszelnickiemu (technologia LCD) oraz wszystkim innym „ludziom z pasją”, którzy przez swą pracę i konsekwentne działania dokonali zmiany statusu WAT z lokalnej akademii wojskowej w ważną, rozpoznawalną i liczącą się na świecie polską uczelnię techniczną.

Celem artykułu jest przedstawienie, jak doszło do odkrycia ciekłych kryształów i jak z egzotycznych substancji interesujących garstkę naukowców stały się one obecnie jednym z ważniejszych materiałów funkcjonalnych. Czytelnik bliżej zainteresowany tym zagadnieniem znajdzie w literaturze [1, 2] dodatkowe informacje, a przede wszystkim teksty oryginalnych publikacji w języku angielskim.

## 2. Droga do odkrycia ciekłych kryształów

Mimo że rok 1888 powszechnie uważa się za datę odkrycia ciekłokrystalicznego stanu skupienia materii, jego pierwsze obserwacje zostały niewątpliwie dokonane wcześniej. Jedne z nich są słabo udokumentowane, np. wykrycie w XVIII wieku przez G.L. Leclerca tworów nazwanych „wijącymi się węgorzami” — były to prawdopodobnie cylindryczne warstwy fosfolipidów powstałe z lecytyny w wodzie. Inne, jak odkrycie przez H. Heintza dwóch temperatur topnienia w mieszaninie kwasów tłuszczowych, doczekały się wyjaśnienia bez odwoływania się do idei nowego stanu skupienia.

Okolo roku 1850 pojawiły się jednak udokumentowane doniesienia wskazujące na wyjątkowe właściwości niektórych substancji. Badacze zajmujący się pochodnymi cholesterolu, głównie chlorkiem cholesterylu, obserwowali zmieniające się z temperaturą niebiesko-fioletowe zabarwienie stopionych faz tych związków. F. Reinitzer w swej fundamentalnej pracy [3] przytacza takie obserwacje dokonane przez austriackich badaczy: M.B. Raymanna, J. Planera i W. Loebischa [4-6]. Dziś wiemy, że obserwowane właściwości należy przypisać ciekłokrystalicznej fazie termotropowej.

Prawie w tym samym czasie wybitny niemiecki lekarz i biolog (rys. 1) R. Virchow (1821-1902) wraz z C.F.C. von Mettenheimerem i G. Valentinem, badając zawiesinę ludzkich włókien nerwowych w wodzie, stwierdził, że jest ona niewątpliwie dwójfomna, a takie właściwości przypisywano jedynie kryształom stałym [7]. Można zatem stwierdzić z pewnością, że obserwowali oni ciekły kryształ liotropowy.



Rys. 1. Rudolf Virchow (1821-1902) [8]



Rys. 2. Otto Lehmann (1855-1922) [9]

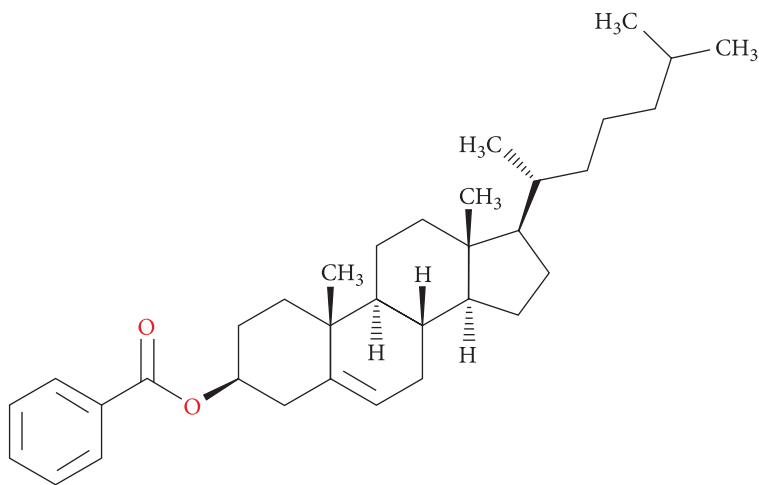
### 3. Odkrycie ciekłokrystalicznego stanu skupienia

Obserwacje substancji, które nie będąc kryształami w klasycznym tego słowa znaczeniu, wykazywały pewne cechy charakterystyczne dla kryształów stałych, mają swe korzenie w XIX wieku i są ściśle związane z użyciem do badań mikroskopu polaryzacyjnego. Niemiecki przyrodnik (rys. 2) Otto Lehmann (1855-1922) zastosował po raz pierwszy polaryzatory (światło spolaryzowane) w badaniach mikroskopowych, aby obserwować „zjawisko dwójłomności” pojawiające się w procesie krystalizacji kryształów stałych.

Austriacki botanik Friedrich Reinitzer (1857-1927) zastosował wynaleziony przez Lehmana mikroskop polaryzacyjny do badania różnic struktury chemicznej pochodnych cholesterolu pochodzenia organicznego (uzyskanych z tkanek roślin i zwierząt) i pochodnych uzyskanych na drodze laboratoryjnych syntez chemicznych. W roku 1888 Reinitzer zauważył nietypowe, dwustopniowe topienie się samodzielnie zsyntezowanego benzoesu cholesterylu (wzór strukturalny tego związku przedstawiono na rysunku 3). Badany benzoesan cholesterylu podczas ogrzewania topił się w temperaturze około  $145,5^{\circ}\text{C}$ , przechodząc w mętną ciecz, która nagle, w temperaturze  $178,5^{\circ}$ , stawała się cieczą kompletnie przezroczystą [2, 10]. Reinitzer swoimi obserwacjami podzielił się z Otto Lehmannem, który do badań tej niezwyklej cieczy udostępnił mu w owym czasie unikalny przyrząd, jakim był mikroskop polaryzacyjny.

W swoim szesnastostronicowym liście, napisanym pięknym pismem gotyckim, Reinitzer stwierdził, że mętnego wyglądu i opalizujących barw estrów po ich stopieniu z fazy krystalicznej lub po ochłodzeniu z cieczy izotropowej nie należy wiązać z ich budową krystaliczną, lecz raczej z tym, że są cieczami tworzącymi oleiste smugi.

Lehmann starannie powtórzył doświadczenia Reinitzera i ku swemu zaskoczeniu niezbitnie stwierdził, że substancja Reinitzera, będąc cieczą, wykazuje dwójłomność, a więc cechę wskazującą na właściwości anizotropowe badanego ośrodka, które do tej chwili przypisywano wyłącznie ciałom stałym. W roku 1889 Otto Lehmann opublikował swoje odkrycia [2, 3], nazywając tę substancję „płynącym kryształem” (niem. *Flüssige Kristalle*). Nazwa tego stanu materii nieco ewoluowała, by ostatecznie utrwalić się (za Lehmanem) w powszechnym obiegu jako „ciekły kryształ” — CK (ang. *liquid crystal* — LC).

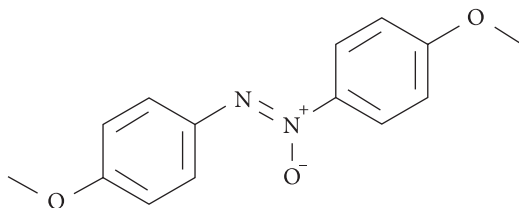


Rys. 3. Wzór strukturalny benzoesanu cholesterylu, w którym pomiędzy stanem stałym i cieczą izotropową występuje „nowy” stan (ciekłokrystaliczny) w zakresie od 145,5°C do 178,5°C

#### 4. Rozwój badań nad ciekłymi kryształami

Początkowo ciekłymi kryształami zajmowali się wyłącznie chemicy. Ich działalność skupiała się głównie na syntezie wielkocząsteczkowych związków organicznych, które wykazywały właściwości ciekłokrystaliczne (mezogenne). W roku 1890 niemiecki chemik Ludwig Gattermann (1860-1920) zsyntetyzował p-azoksyanizol (ozn. PAA, o wzorze strukturalnym przedstawionym na rysunku 4) [11], pierwszy termotropowy ciekły kryształ, w którym istnienie fazy nematycznej potwierdził sam Otto Lehmann. Stan ciekłokrystaliczny w PAA występuje w stosunkowo szerokim zakresie

temperatury (od 118°C do 136°C), co czyni go materiałem wygodnym do badań. Dłatego PAA odegrał ważną rolę w rozwoju chemii, fizyki ciekłych kryształów oraz przyczynił się do rozwoju technologii ich zastosowań [12-16].



Rys. 4. Wzór strukturalny p-azoksyanizolu. W PAA stan ciekłokrystaliczny występuje w zakresie od 118°C do 136°C

W początkowym okresie badań ciekłych kryształów prawdziwymi „kamieniami milowymi” były prace niemieckiego chemika Daniela Vorländera (1867-1941) [17, 18], który zauważył, że anizotropowy (silnie wydłużony) kształt molekuł sprzyja kreacji stanu ciekłokrystalicznego. To Vorländer przeprowadził syntezę większości substancji ciekłokrystalicznych (około 250) znanych do początku lat dwudziestych ubiegłego wieku. Materiały te z pasją badał francuski mineralog i krystalograf Georges Friedel (1865-1933) [13, 19], który w roku 1922 po raz pierwszy zasugerował, że stan ciekłokrystaliczny jest pośrednim stanem fazy skondensowanej, pomiędzy trójwymiarowo uporządkowanym kryształem a cieczą izotropową charakteryzującą się całkowitym brakiem porządku ułożenia molekuł.

Ciekłe kryształy stanowią zatem odrębną fazę termodynamiczną, różniącą się właściwościami zarówno od fazy krystalicznej (Kr), jak i fazy izotropowej (Izo). Przejścia od fazy CK do fazy Izo oraz z fazy Izo do CK mają wszelkie cechy przemian fazowych. W związku z tym uzasadnione jest wprowadzenie przez Friedela w [13, 19] pojęcia „mezomorficzny stan materii” (ang. *mesomorphic state of the matter*) dla określenia stanu ciekłokrystalicznego. Współcześnie ten szczególny (ciekłokrystaliczny) stan materii, kiedy obserwowana substancja jest cieczą i jednocześnie wykazuje właściwości anizotropowe, nazywamy za Friedelem mezofazą.

Liczne badania wskazywały, że stan ciekłokrystaliczny pojawia się w określonych warunkach w substancjach organicznych, których molekuły mają wyraźnie anizotropowy kształt. Najogólniejszy podział CK został dokonany ze względu na warunki konieczne do powstania mezofazy [12]. Na tej podstawie CK dzielimy na dwa rodzaje:

- termotropowe, jeżeli stan mezomorficzny pojawia się ze wzrostem temperatury po stopieniu ciała stałego i zanika po przemianie w ciecz izotropową lub odwrotnie oraz
- liotropowe, dla których występowanie mezofazy jest zależne bezpośrednio od stężenia substancji mezogennej w mieszaninie z rozpuszczalnikiem polarnym (najczęściej wodą), a także od temperatury.

Za pierwsze pełne doniesienia naukowe opisujące termotropowe CK należy uznać prace Friedricha Reinitzera [10] z roku 1888, Otto Lehmana [3] z roku 1889 oraz Georges'a Friedela [13, 19] z roku 1922. Friedel dokonał pierwszej klasyfikacji termotropowych CK pod względem ich mikroskopowego uporządkowania molekularnego i wyróżnił trzy typy: tzw. ciekłe kryształy nematyczne (ozn. N), cholesterolowe (cholesteryczne — Ch) i smektyczne (Sm).

Pierwszy dokument naukowy dotyczący liotropowych CK, autorstwa Rudolfa Virchowa (niemieckiego patologa, antropologa i higienisty, 1821-1902) [7], pochodzi z roku 1854. W pracy tej Virchow po raz pierwszy opisał liotropowy CK uzyskany poprzez rozpuszczenie mieliny (substancji wytwarzanej przez komórki otaczające niektóre neurony komórek nerwowych) w wodzie.

Wpływ pola magnetycznego na uporządkowanie próbek ciekłokrystalicznych badał francuski mineralog i krystalograf Charles-Victor Mauguin (1878-1958), zapoczątkowując prace nad „porządkowaniem”. Wykazał [2, 20], że „mętna faza” składa się z mikroskopijnych „dwójłomnych elementów” — jakby bryłek, w których orientacje osi optycznych są rozłożone losowo w różnych kierunkach w przestrzeni. Taka mętna, prawie nieprzezroczysta struktura, uformowana pomiędzy dwoma płaskimi szkiełkami w warstwę o grubości rzędu 1/10 milimetra, poddana działaniu pola magnetycznego, stawała się fazą jednorodną, idealnie przezroczystą.

Pożądane jednorodne uporządkowanie cienkiej warstwy CK Mauguin uzyskiwał także bez działania pola magnetycznego na ciekły kryształ. Dokonał tego, umieszczając CK między dwoma płatkami łupanej miki. W tym eksperymencie oś optyczna całej struktury CK pomiędzy płatkami z krystalicznej miki uzyskiwała orientację równoległą do jednego z kierunków krystalograficznych w strukturze kryształu miki (w tym przypadku leżącego w płaszczyźnie płatka miki).

W 1927 roku, pięć lat po doniesieniach Friedela, pojawiają się publikacje rosyjskiego fizyka Wsiewołoda Frederiksa (1885-1944) [21, 22] opisujące zachowanie się CK w zewnętrznych polach magnetycznych i elektrycznych.

W roku 1933 szwedzki fizyk teoretyczny Carl Wilhelm Oseen (1879-1944) położył podwaliny pod teorię stanu ciekłokrystalicznego [2, 23]. Jest to teoria fenomenologiczna typu „continuum”. Praca ta nie wyjaśnia fizyki zjawiska indukcji mezofazy, lecz ją opisuje. Ten opis szczególnych właściwości CK polega na zastosowaniu metod statystycznych dla ośrodka sprężystego bez wnikania w przyczyny pojawienia się i występowania mezofazy. W tym samym roku niemiecki fizyk Hans Ernest Zöcher (1893-1969) zbadał wpływ pola magnetycznego na stan nematyczny [24]. Wyniki swoich rozważań opisał *m.in.* na podstawie prac polskiego fizyka Mieczysława Jeżewskiego (1890-1971) [25]. W latach trzydziestych dwudziestego wieku M. Jeżewski prowadził wraz z Marianem Mięśowiczem (1907-1992) pionierskie badania właściwości magnetycznych, elektrycznych i reologicznych popularnego w tym czasie *p-azoksyanizolu*. W 1924 roku zapoczątkował badania anizotropii przenikalności elektrycznej i przewodności w CK. Z kolei dokonane przez M. Mięśowicza

w 1935 roku obserwacje anizotropowych właściwości reologicznych CK i wyznaczenie wartości liczbowych współczynników lepkości [2, 26] stały się istotnym wkładem w rozwój wiedzy o mezomorficznym stanie materii. Zaproponowane przez niego geometria pomiarów i definicja współczynników anizotropowej lepkości substancji ciekłokrystalicznych weszły na trwałe do literatury przedmiotu i są cytowane w licznych monografiach naukowych [12, 14, 15, 27, 28] dotyczących CK pod nazwą „współczynników lepkości Mięslowicza”.

Minęło już sto lat od czasu odkrycia pierwszego mezogenu przez F. Reinitzera w 1888 roku, nazwania tego typu materiałów ciekłymi kryształami przez O. Lehmana (1889 rok), wyodrębnienia dla nich własnego (mezomorficznego) stanu skupienia oraz określenia trzech typów tego niezwyklego stanu materii (nematycznego, smektycznego i cholesterycznego) przez G. Friedela w roku 1922. Nazwa „ciekłe kryształy” powszechnie się przyjęła (pomimo zawartej w niej wewnętrznej sprzeczności) dla określenia cieczy, w których występuje orientacyjne uporządkowanie molekuł, co wiąże się z anizotropowymi właściwościami optycznymi, elektrycznymi, magnetycznymi i mechanicznymi. Precyzyjny podział CK zaproponowany przez Friedela na nematyczne, cholesteryczne i smektyczne ciekłe kryształy do dziś nie uległ zmianie, podobnie cały czas używane są zamiennie dwie nazwy: ciekłe kryształy i stany mezomorficzne.

Odkryto lub zsyntezowano wiele rodzajów i typów CK. Fizycy badali ich interesujące właściwości optyczne, elektryczne, magnetyczne i mechaniczne. Materiały ciekłokrystaliczne, będąc szczególnym przypadkiem materii organicznej (jednocześnie materii miękkiej — w odróżnieniu od typowych struktur kryształów organicznych), otwierają szerokie pole badawcze i aplikacyjne, łącząc w sobie pewne cechy fizyczne typowe dla cieczy (gęstość, lepkość, mała sprężystość) i dla kryształów (anizotropia optyczna, dielektryczna, magnetyczna). W tym miejscu należy wspomnieć, że fizyka CK, która do końca lat pięćdziesiątych dwudziestego wieku rozwijała się bardzo powoli, zaczyna swój „renesans” dzięki przełomowym pracom [29, 30] fizyków teoretyków: Anglika Fredericka Charlesa Franka (1911-1998) oraz Niemców — Wilhelma Maiera (1913-1964) i Alfreda Saupego (1935-2008). W 1958 roku F.Ch. Frank [29] zmodyfikował teorię sprężystości CK zaproponowaną wcześniej przez Oseena [23], budując teorię stanu ciekłokrystalicznego typu „continuum” i wprowadzając tensory sprężystości ośrodka CK. W tym samym roku W. Maier i A. Saupe [30] opracowali teorię stanu ciekłokrystalicznego opartą na koncepcji typu „średniego pola molekularnego”. Teoria ta wyjaśnia termodynamiczne właściwości CK. Na podstawie charakterystycznych cech struktury elektronowej molekuł nematogennych opisuje przejście fazowe N-Izo zachodzące pod wpływem temperatury. Stopień uporządkowania molekuł w fazie nematycznej został opisany za pomocą tzw. parametru uporządkowania (ozn.  $S$ ), zaproponowanego w roku 1942 przez rosyjskiego fizyka Wiktora Cwetkowa (1910-1999, studenta W. Frederiksa) [31].



## 5. Ciekłe kryształy w technice

Okres ostatnich pięćdziesięciu lat wiąże się z szerokim wykorzystaniem CK w technice. Dzięki swoim unikalnym własnościom optyczno-sprężystym znalazły wiele różnych zastosowań, głównie w technologiach zobrazowania informacji. Począwszy od wyświetlaczy znakowych, przez monitory komputerów, po ogromnych rozmiarów ekrany telewizyjne — wszędzie spotykamy materiały ciekłokrystaliczne. Parametry użytkowe, jakość i niezawodność tych urządzeń świadczą o wysokim poziomie technologii zastosowań CK. Dojrzałość technologii ciekłokrystalicznych wynika z intensywnych badań właściwości materiałów CK, fizyki efektów elektrooptycznych (rozpoczęte w 1962 roku przez Richarda Williama badania nad „zjawiskiem dynamicznego rozpraszania światła” [32]), a także chemii związków wchodzących w skład stosowanych obecnie nowoczesnych materiałów CK o właściwościach fizycznych i fizykochemicznych dostosowanych do potrzeb aplikacyjnych.

Opierając się na efekcie dynamicznego rozpraszania światła DSM (ang. *Dynamic Scattering Mode*), występującym przy turbulentnym ruchu materiału CK (nematyka) wywołanym przepływem prądu przez warstwę CK, zespół George’a Heilmeiera skonstruował w 1968 roku pierwszy wyświetlacz ciekłokrystaliczny — tzw. LCD (ang. *Liquid Crystal Display*) [33], skomercjalizowany w 1970 roku przez firmę Opton.

W roku 1971 M. Schadt i W. Helfrich odkryli ciekawszy (włączany tylko przyłożeniem pola elektrycznego do warstwy CK — bez przepływu prądu) efekt elektrooptyczny w strukturze skręconego nematyka — TN (ang. *Twisted Nematic*) [34] i wykazali jego ogromny potencjał aplikacyjny, który wkrótce przerodził się w sukces komercyjny.

W 1978 roku Japończycy wykazali występowanie efektu elektrooptycznego w ferroelektrycznym ciekłym kryształ — FLC (ang. *Ferroelectric Liquid Crystals*). Dla świata naukowego był to kolejny szok — ciecz o właściwościach ferroelektrycznych. Wkrótce potem, w 1980 roku, N.A. Clark i S.T. Lagerwall zaprezentowali „szybki” (z czasem przełączenia rzędu mikrosekundy) efekt elektrooptyczny w cienkich (o grubości rzędu pojedynczych mikrometrów), stabilizowanych oddziaływaniami powierzchniowymi strukturach FLC [35], którego zastosowanie w wyświetlaczach ciekłokrystalicznych daje przełomowe możliwości dynamiczne i optyczne.

Sukces technologii z zastosowaniem materiałów ciekłokrystalicznych, mierzony wielką liczbą różnego rodzaju produkowanych urządzeń, jest ściśle związany ze specyficznymi właściwościami fizycznymi CK. Anizotropia właściwości fizycznych w połączeniu z ciekłym stanem skupienia pozwala na przełączanie właściwości niewielkimi impulsami polowymi. Ciekłe kryształy okazały się w pełni kompatybilne z półprzewodnikową technologią adresowania. To umożliwia stosunkowo tanie rozwiązywanie różnorodnych problemów fizycznych, takich jak wąski kąt dobrego widzenia obrazu dla efektu TN czy wolny czas przełączania ON/OFF charakterystyczny dla wszystkich ekranów/ „matryc” ciekłokrystalicznych.

Drugim polem zastosowań CK, którego znaczenie wciąż rośnie, jest wykorzystanie możliwości, jakie daje użycie ciekłych kryształów, w specjalizowanych aktywnych układach optycznych zastępujących elementy optyki klasycznej lub w elementach, których nie można wytworzyć innymi metodami. CK znajdziemy w układach modulacji parametrów wiązki laserowej (np. w automatycznych dalmierzach), w układach zmiany składu widmowego wiązki pomiarowej w analizatorach widma, w układach do modulacji stanu polaryzacji i kierunku propagacji wiązki świetlnej i innych. Zastosowanie CK jako aktywnego ośrodka optycznego jest szczególnie wygodne w złożonych (zintegrowanych) systemach optycznych. Wykorzystując ciekłokrystaliczne elementy optyczne, eliminuje się konieczność stosowania ruchomych i ciężkich elementów mechanicznych, umożliwiając tym samym łatwą automatyzację sterowania takimi układami oraz obniżenie kosztów budowy takich systemów. Dwuwymiarowa płaska postać elementów ciekłokrystalicznych umożliwia konstrukcję układów do przetwarzania informacji na podstawie czasowo-przestrzennej modulacji zarówno wiązek światła, jak i promieniowania spójnego. W szczególnych przypadkach do tego celu stosuje się równoczesne sterowanie struktur CK polem elektrycznym i sygnałem optycznym.

## 6. Ciekłe kryształy w Polsce

Od końca lat sześćdziesiątych ubiegłego wieku tematyką ciekłokrystaliczną zaczęło się interesować coraz więcej polskich badaczy. Liderami w tej dziedzinie byli w tym czasie profesorowie: Aleksander Szymański (1933-2011) [15, 16] z Politechniki Łódzkiej i Rzeszowskiej, Antoni Adamczyk (1937-2010) [12, 15] z Politechniki Warszawskiej i Józef Żmija [28] z Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Na początku lat siedemdziesiątych w Polsce działały już ukształtowane zespoły badawcze zajmujące się ciekłymi kryształami. W roku 1973 Antoni Adamczyk obronił pierwszą w Polsce pracę doktorską zatytułowaną *Własności elektryczne struktur mezomorficznych o symetrii spiralnej*, której promotorem był A. Szymański, a recenzentem J. Żmija. W tym czasie w Krakowie działał już, rozpoznawalny na świecie, zespół prof. Jerzego Antoniego Janika (1927-2012), który z inspiracji prof. Henryka Niewodniczańskiego (fizyka jądrowego, 1900-1968) kontynuuje krakowskie tradycje badań CK, zapoczątkowane przez M. Jeżewskiego i M. Mięśowicza [25-27, 36].

W roku 1973 prof. Wojciech Kuczyński (1941-2020) z Instytutu Fizyki Molekularnej Polskiej Akademii Nauk w Poznaniu (późniejszy odkrywca zjawiska indukcji fazy ferroelektrycznej poprzez domieszkowanie paraelektrycznej skośnej fazy smektyka C substancją chiralną [37]) stworzył grupę badawczą zajmującą się ciekłymi kryształami. Współpracowała ona z dr. Pawłem Pierańskim ze słynnego

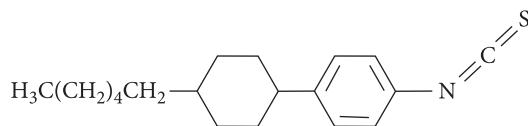
laboratorium „Orsay” we Francji, gdzie w roku 1975 została odkryta ferroelektryczna faza ciekłokrystaliczna — FLC [38]. W roku 1977 zespół Kuczyńskiego potwierdził doświadczalnie, po raz pierwszy na świecie, istnienie tej fazy [39].

W roku 1973 prof. Grzegorz Derfel z Politechniki Łódzkiej rozpoczął badania dotyczące zjawisk występujących w warstwach CK pod wpływem zewnętrznych pól fizycznych i podczas przepływów. Badania jego zespołu, uwzględniające wpływ stałych materiałowych, w tym fleksoelektrycznych i transportu ładunku, na odkształcenia warstw ciekłokrystalicznych i w konsekwencji na ich właściwości optyczne, są niezmiernie cenne w inżynierii materiałowej CK [40, 41].

W roku 1988 prof. Ewa Górecka z Uniwersytetu Warszawskiego otrzymała stypendium UNESCO, które umożliwiło jej staż naukowy w Tokyo Institute of Technology w Japonii, jednym z najlepszych ośrodków naukowych świata. Intensywna praca małego zespołu w laboratorium prof. Atsuo Fukudy, w którym pracowała Górecka, doprowadziła w 1989 roku do odkrycia antyferroelektrycznych ciekłych kryształów — AFLC (ang. *Antiferroelectric Liquid Crystals*), przynosząc Ewie Góreckiej światową sławę [42].

Od połowy lat siedemdziesiątych dwudziestego wieku w Wojskowej Akademii Technicznej badania ciekłych kryształów w zakresie chemii, fizyki i zastosowań prowadzą dwa zespoły. W Instytucie Fizyki Technicznej zespół utworzony przez prof. Józefa Żmiję, w Instytucie Chemii zespół prof. Romana Dąbrowskiego. Zespoły WAT poszukują nowych CK i ich mieszanin o bardzo szerokim zakresie mezofazy (od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ ), m.in. do celów wojskowych. Prof. Dąbrowski zwrócił uwagę na niektóre ciekłokrystaliczne izotiocyaniany mające niskie temperatury topnienia, niską lepkość i wysoką odporność na promieniowanie ultrafioletowe [43, 44].

Zsyntetyzowany w WAT 4-(trans-4'-n-heksylocykloheksylo) izotiocyanobenzen (6CHBT), o wzorze sumarycznym przedstawionym na rysunku 5, świetnie nadaje się (nawet jako indywidualum chemiczne) do budowy wysokospecjalizowanych przetworników elektrooptycznych typu TN i ECB (ang. *Electrically Controlled Birefringence*) pracujących w temperaturze pokojowej. CK z rodziny pochodnych cykloheksylobenzenów zostały opatentowane w kraju i za granicą [45] i stały się głównym komponentem profesjonalnych (stosowanych w Polsce, USA, Chinach, Korei Południowej i Indiach) wieloskładnikowych mieszanin ciekłokrystalicznych wykazujących właściwości eutektyczne przy przejściu fazowym [Kr—N].



Rys. 5. Wzór strukturalny 4-(trans-4'-n-heksylocykloheksylo) izotiocyanobenzenu. W 6CHBT stan ciekłokrystaliczny występuje w zakresie od  $11,8$  do  $42,4^{\circ}\text{C}$

W latach osiemdziesiątych dwudziestego wieku powstawał polski przemysł wyświetlaczy ciekłokrystalicznych. Podstawą był zakup w drugiej połowie lat siedemdziesiątych japońskiej linii do produkcji prostych wskaźników ciekłokrystalicznych przez wrocławski Dolam oraz amerykańskiej licencji na produkcję kineskopów kolorowych dla Polkoloru. Oba te zakłady, przy „wspieraniu” polskiego zaplecza naukowego głównie z WAT i OBREP (Ośrodka Badawczo-Rozwojowego Elektroniki Próżniowej), próbowały rozwijać swoje możliwości wytwórcze. Powstawały wtedy w Polsce, opracowane w WAT, proste wyświetlacze alfanumeryczne. We współpracy z Dolamem zbudowano wielkoformatowe tablice informacyjne do celów wojskowych (w roku 1983). W 1985 roku, we współpracy z Polkolor, opracowano ciekłokrystaliczne „deski rozdzielcze” do produkowanych w Polsce pojazdów mechanicznych (w tym do Fiata 126p), samolotów (w tym do PZL-130 „Orlik”, PZL M93 „Iryda” i PW-4 „Pelikan”), a nawet cały ciekłokrystaliczny system informacji podróży, zainstalowany na Dworcu PKP Warszawa Gdańska (1992). Kontynuowano współpracę z Elwro we Wrocławiu, opracowując w 1990 roku monitory do ich cyfrowych maszyn do pisania. W roku 1996 roku opracowano i wykonano w WAT ciekłokrystaliczną tablicę informacyjną o zanieczyszczeniu powietrza w Warszawie. OBREP opracował w tym czasie dla Polkoloru plazmowe wyświetlacze alfanumeryczne.

Po turbulencjach ekonomicznych podczas transformacji gospodarczej lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych w WAT opracowano wysoko specjalizowane nematyczne mieszaniny ciekłokrystaliczne o małej, średniej i dużej dwójłomności w zakresach widzialnym oraz bliskiej, krótkiej i średniej podczerwieni [46, 47]. Doskonalono i optymalizowano również para- i ferroelektryczne smektyczne mieszaniny ciekłokrystaliczne. Na podstawie wieloletnich badań FLC opracowano w 2008 roku (po raz pierwszy) antyferroelektryczną ortokoniczną mieszaninę (z kątem pochylenia direktora w warstwie smektycznej wynoszącym dokładnie  $45^\circ$ ). Mieszanina ta [48] o podwyższonej stabilności chemicznej oraz dużej wartości skoku helisy (większym niż  $3,5 \mu\text{m}$ ), jak również związki chiralne, achiralne i racemiczne do jej wytwarzania zostały opatentowane w Polsce i USA [49]. Opracowano i opatentowano również smektyczny materiał o wysokiej stabilności fotochemicznej i szerokim temperaturowym zakresie występowania monowarstwowej fazy smektycznej SmA [50, 51]. Takie materiały w cienkiej warstwie smektyka SmA (bez polaryzatorów) wykazują dwa trwałe stany optyczne (transparentny i rozpraszający), które można przełączać elektrycznie. To opracowanie otwiera możliwości budowy wielkomiaryowych inteligentnych okien regulujących ilość światła i ciepła wpadających do pomieszczeń, a także wyświetlaczy LCD z pamięcią, które bez dalszego zasilania utrzymują raz zaadresowany obraz.

Stosując unikalne nematyczne mieszaniny CK, próżniową technologię cienkowarstwową oraz profesjonalną technologię LCD, opracowano w WAT urządzenia wykorzystywane w technikach i technologiach ciekłokrystalicznych światłowodów

i włókien fotonicznych [52, 53]. Włókna te, wypełnione materiałem ciekłokrystalicznym, umożliwiają kontrolę właściwości optycznych światłowodów, takich jak: stan polaryzacji, dyspersja dwójłomności czy nieliniowość współczynnika załamania światła. Zastosowanie światłowodowych włókien fotonicznych umożliwia tym samym sterowanie zarówno widmem, jak i pasmem transmisji. Opracowano przezierniki do automatycznych masek spawalniczych, produkowane seryjnie w latach 1998-2005 przez Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów (PIAP) w Warszawie. Budowano elementy LCD dalmierzy laserowych, w tym do „kosmicznego” dalmierza laserowego w lądowniku Misji Kosmicznej „Phobos-Grunt”, wystrzelonego w 2011 roku przez Federację Rosyjską [54]. Opracowano przetworniki LCD do diagnostyki gorącej plazmy [55], alkomatów [47] oraz rodzinę przełączników stanu polaryzacji światła o „bardzo niskim” odbiciu wstecznym, do bardzo dokładnych pomiarów w laserowej metrologii warsztatowej (i celów specjalnych) [56].

Interesującym i obiecującym aplikacyjnie obszarem eksploracji CK są badania prowadzone w WAT w dziedzinie dyspergowania ciekłych kryształów w polimerze [57, 58], a także badania zachowania CK w terahercowym zakresie promieniowania elektromagnetycznego w sterowanych elektrycznie strukturach metamateriałowych [59]. Nie bez znaczenia są też badania prowadzone w kierunku poznania i zrozumienia roli substancji ciekłokrystalicznych w procesach biologicznych oraz ich zastosowanie w diagnostyce medycznej i kosmetyce [60].

W 2018 roku zespoły z Uniwersytetu Warszawskiego i WAT zainicjowały badania, które wskazują, że fotony, czyli cząstki pozbawione masy spoczynkowej i poruszające się z prędkością światła, da się (jakby) „zatrzymać” wewnątrz specjalnej wnęki ciekłokrystalicznej i „skłonić” je, by zachowywały się tak jak mikrocząstki posiadające masę spoczynkową i reagujące na pole magnetyczne (tak jak można czynić z elektronami) [61]. Umieszczenie warstwy CK w obszarze pomiędzy dwoma cienkowarstwowymi zwierciadłami dielektrycznymi (we wnętrzu wnęki) umożliwiło odkrycie unikalnych właściwości światła emitowanego z takiego układu. Zaobserwowano również, że takie fotony mogą wykazywać efekt analogiczny do efektu Halla, który można zauważyć u elektronów poruszających się w polu magnetycznym [62].

Źródło finansowania pracy — pracę zrealizowano w ramach projektu UGB 22-793/WAT.

Artykuł wpłynął do redakcji 10.05.2022. Zatwierdzono do publikacji 16.08.2022.

Zbigniew Raszewski <https://orcid.org/0000-0003-4894-4775>

Jerzy Zieliński <https://orcid.org/0000-0002-4638-5271>

Stanisław Kłosowicz <https://orcid.org/0000-0002-2256-8428>

## LITERATURA

- [1] KELKER H., *History of Liquid Crystals*, Molecular Crystals and Liquid Crystals, 21(1-2) 1973, Published online: 21 Mar 2007, 1-48.
- [2] *Crystals that Flow: Classic papers from the history of liquid crystals*, Compiled with translation and commentary by Timothy J. Sluckin, David A. Dunmur and Horst Stegemeyer, Taylor and Francis, 2004.
- [3] LEHMANN O., *Über flüssende Kristalle*, Zeitschrift für Physikalische Chemie, 4, 1889, 462-472.
- [4] RAYMAN M.B., *Contribution à l'histoire de la cholestérine*, Bull. Soc. Chim. Paris, 47, 1887, 898-901.
- [5] PLANER J., *Notiz über das Cholestearin*, Ann Chem., 118, 1861, 25-27.
- [6] LOEBISCH W., *Zur Kenntniss des Cholesterins*, Ber. Deutsch. Chem. Ges., 5, 1872, 510-514.
- [7] VIRCHOW R., *Über das ausgebreitete Vorkommen einer dem Nervenmark analogen Substanz in den thierischen Geweben*, Archiv für Pathologische Anatomie und Physiologie, Bd 6, 1854, 562-565.
- [8] *Rudolf Virchow*, strona w Wikipedii, [https://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf\\_Virchow#/media/File:Rudolf\\_Virchow.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Virchow#/media/File:Rudolf_Virchow.jpg), [dostęp: 19.10.2022].
- [9] *Otto Lehmann*, strona w Wikipedii, [https://en.wikipedia.org/wiki/Otto\\_Lehmann\\_\(physicist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Lehmann_(physicist)), [dostęp: 19.10.2022].
- [10] REINITZER F., *Beiträge zur Kenntniss des Cholesterins*, Monatshefte für Chemie, 9, 1888, 421-441.
- [11] GATTERMAN L., RITSCHKE A., *Über Azoxyphenoläther*, Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, 23, 1890, 1738-1750.
- [12] ADAMCZYK A., Z. STRUGALSKI, *Ciekle kryształy*, PWN, Warszawa, 1976.
- [13] SLUCKIN T.J., DUNMUR D.A., STEGEMEYER H., *Crystals that Flow*, Taylor & Francis Group, Boca Roton, London, New York, Singapore 2005.
- [14] OSWALD P., PIERAŃSKI P., *Nematic and Cholesteric Liquid Crystals*, Taylor & Francis Group, Boca Roton, London, New York, Singapore 2005.
- [15] ADAMCZYK A., SZYMAŃSKI A., *Interfacial Potential Maxima in Liquid Crystals. I Cholesteric Structure*, Bull. Acad. Pol. Sci., 20, 1972, 955-60.
- [16] GRZEJDIĄK E., ROGOWSKI A., SZYLHABEL R., SZYMAŃSKI A., HEJWOWSKI J., *Ciekkokrystaliczne wskaźniki temperatury i ich zastosowanie w elektronice*, Elektronika, 13, 6, 1972, 234-238.
- [17] VORLÄNDER D., *Über kristallinisch-flüssige Substanzen*, Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, 39, 1906, 803-810.
- [18] VORLÄNDER D., *Einfluß der molekularen Gestalt auf den kristallinisch-flüssige Zustand*, Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft, 40, 1907, 1970-1972.
- [19] FRIEDEL G., *Mesomorphic State of Matter*, Annales de Physique, 18, 1922, 273-474.
- [20] MAUGUIN CH., *Orientation des cristaux liquides par le champ magnétique*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 152, 1911, 1680-1683.
- [21] FRÉDERICKSZ V., REPIEWA A., *Theoretisches und Experimentelles zur Frage nach der Natur der anisotropen Flüssigkeiten*, Zeitschrift für Physik, 42, 7, 1927, 532-546.
- [22] FRÉDERICKSZ V., ZOLINA V., *Über die Doppelbrechung dünner anisotrop — flüssiger Schichten in Magnetfeldern und die diese Schicht orientierenden Kräfte*, Zeitschrift für Kristallographic, 79, 1931, 255-267.
- [23] OSEEN C.W., *The Theory of Liquid Crystals*, Transactions of the Faraday Society, 29, 1933, 883-900.
- [24] ZÖCHER H., *The Effect of a Magnetic Field on the Nematic State*, Transactions of the Faraday Society, 29, 1933, 945-957.

- [25] JEŻEWSKI M., *Über elektrische Anisotropie der kristallinen Flüssigkeiten*, Zeitschrift für Physik, 40, 1926, 153-160.
- [26] MIĘSOWICZ M., *Influence of the Magnetic Field on the Viscosity of para-azoxyanisole*, Nature, 136, 1936, 261.
- [27] URBAN S., *High Pressure Investigations of Liquid Crystals*, [in:] *Handbook of Liquid Crystals*, Edited by J.W. Goodby, P.J. Collings, T. Kato, C. Tschierske, H.F. Gleeson and P. Raynes, Wiley-VCH, Weinheim, v. 2, chap. 15, 2014, 443-486.
- [28] ŻMIJA J., ZIELIŃSKI J., PARKA J., NOWINOWSKI R., *Displeje ciekłokrystaliczne: fizyka, technologia, zastosowania*, PWN, Warszawa 1993.
- [29] FRANK F.C., *On the Theory of Liquid Crystals*, Discussions of the Faraday Society, 25, 1958, 19-28.
- [30] MAIER W., SAUPE A., *Eine einfache molekulare Theorie des nematischen kristallinflüssigen Zustands*, Zeitschrift Naturforschung, 13a, 1958, 564-566.
- [31] ZWETKOFF W., *Über die Molekülanordnung in der anisotrop-flüssigen Phase*, Acta Physicochimica U.R.S.S., 15, 1942, 132-147.
- [32] WILLIAMS R., *Domains in Liquid Crystals*, Journal of Chemical Physics, 39, 1963, 384-388.
- [33] HEILMEIER G.H., ZANONI L.A., BARTON L.A., *Dynamic Scattering in Nematic Liquid Crystals*, Applied Physics Letters, 13, 1968, 46-47.
- [34] SCHADT M., HELFRICH W., *Voltage Dependent Optical Activity of a Twisted Nematic Liquid Crystal*, Applied Physics Letters, 18, 1971, 127.
- [35] CLARK N.A., LAGERWALL S.T., *Submicrosecond bistable electro-optic switching in liquid crystals*, Appl. Phys. Lett., 36, 1980, 899.
- [36] WRÓBEL S., JANIK J.A., MOŚCICKI J., URBAN S., *Dielectric relaxation in the isotropic, nematic and solid phases of p-azoxyanisole in the radio and microwave frequency range*, Acta Phys. Polonica, A48, 1975, 215-230.
- [37] KUCZYŃSKI W., *Ferroelectric Liquid Crystals with Doping-Induced Polarization*, Ferroelectrics, 78, 1988, 111-119.
- [38] MAYER R.B., LIEBERT L., STRZELECKI L., KELLER P., *Ferroelectric Liquid Crystals*, J. de Phys. Lett., 36, 1975, L-69.
- [39] HOFFMAN J., KUCZYŃSKI W., MAŁECKI J., *Dielectric Studies of Ferroelectric Properties in Chiral Smectic C*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 44, 1978, 287-300.
- [40] DERFEL G., *Podstawy fizyki ciekłych kryształów*, Politechnika Łódzka, Instytut Fizyki, Łódź 2010.
- [41] BUCZKOWSKA M., DERFEL G., *Spatially periodic deformations in planar and twisted flexoelectric nematic layers*, Phys. Rev., E 95, 062705-1-062705-8, 2017.
- [42] CHANDANI D.L., GÓRECKA E., OUCHI Y., TAKAZOE H., FUKUDA A., *Antiferroelectric Chiral Smectic Phases Responsible for the Tristable Switching in MHPOBC*, Japanese Journal of Applied Physics, 28, 1989, 1265-1268.
- [43] DĄBROWSKI R., DZIADUSZEK J., SZCZUCIŃSKI T., RASZEWSKI Z., *Liquid-crystalline 4-(trans-4 prime-n-alkylcyclohexyl) benzoates. The effect of terminal and lateral substituents on the mesomorphic, thermodynamic and dielectric properties*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 107, 3, 1984, 411-443.
- [44] BARAN J.W., RASZEWSKI Z., KĘDZIERSKI J., RUTKOWSKA J., *Some Physical Properties of Mesogenic 4-trans-4'-n-Alkylcyclohexyl-isothiocyanato-benzenes*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 123, 2, 1985, 237-2433.
- [45] DĄBROWSKI R., DZIADUSZEK J., SZCZUCIŃSKI T., ZIELIŃSKI J., KENIG K., *Liquid crystalline cyclohexylbenzene derivatives their preparation and the liquid compositions containing same*, Patent RP nr 124264 z 15.03.1985, Patent Europejski nr 84103243.6 z 8 Jun. 1984, Patent USA nr 4,528,116 z Jul. 9, 1985.

- [46] RASZEWSKI Z., PIECEK W., JAROSZEWICZ L.R., NOWINOWSKI-KRUSZELNICKI E., PERKOWSKI P., SOMS L., DĄBROWSKI R., KĘDZIERSKI J., OLIFIERCZUK M., MRUKIEWICZ M., MISZCZYK E., MORAWIAK P., MAZUR R., KOWIORSKI K., *High Birefringence Liquid Crystals Mixtures and Their Selected Applications*, Advanced Materials Research, 909, 2014, 12-18.
- [47] PIECEK W., JAROSZEWICZ L.R., MISZCZYK E., RASZEWSKI Z., MRUKIEWICZ M., KULA P., JASEK K., PERKOWSKI P., NOWINOWSKI-KRUSZELNICKI E., ZIELIŃSKI J., KĘDZIERSKI J., OLIFIERCZUK M., CHODOROW U., KOWIORSKI K., MORAWIAK P., MAZUR R., HARMATA P., HERMAN J., *Mid-wave infrared liquid crystal shutter for breathalyzer applications*, Opto-Electronics Review, 25, 2017, 103-109.
- [48] PIECEK W., PERKOWSKI P., RASZEWSKI Z., MORAWIAK P., ŻUROWSKA M., DĄBROWSKI R., CZUPRYŃSKI K., *Long Pitch Orthoconic Antiferroelectric Binary Mixture for Display Applications*, Mol. Cryst. Liq. Cryst., 525, 2010, 140-152.
- [49] DĄBROWSKI R., CZUPRYŃSKI K., KULA P., ŻUROWSKA M., REJMER W., PIECEK W., RASZEWSKI Z., *Antyferroelektryczna ortokoniczna mieszanina o podwyższonej stabilności chemicznej i dużej wartości skoku helisy oraz związki chiralne, achiralne i racemiczne do jej wytwarzania*, Patent RP: PL 214647B1 z 14.04.2009, Patent USA nr US 8, 101, 095 B2 z Jan. 24, 1912.
- [50] DĄBROWSKI R., WĘGŁOWSKA D., PIECEK W., MAZUR R., *New ion-doped fluorinated smectics for smartwindows and memory displays*, Liquid Crystals Today, 27, 4, 2018, 113-114.
- [51] DĄBROWSKI R., PIECEK W., ŻUROWSKA M., DZIADUSZEK J., WĘGŁOWSKA D., MAZUR R., BOŻĘTKA J., *Wide temperature range and high photochemical stability smectic liquid crystal compositions with a monolayer smectic A phase (SmA1) and devices used them*, Patent RP: P.423327 z 31.10.2017, Patent Europejski PCT/EP20181077651.
- [52] KĘDZIERSKI J., GARBAT K., RASZEWSKI Z., KOJDECKI M.A., KOWIORSKI K., JAROSZEWICZ L.R., MISZCZYK E., DĄBROWSKI R., ZIELIŃSKI J., PIECEK W., *Optical properties of a liquid crystal with small ordinary and extraordinary refractive indices and small optical anisotropy*, Opto-Electronics Review, 22, 3, 2014, 162-165.
- [53] MOŚ J.E., FLOREK M., GARBAT K., STASIEWICZ K.A., BENNIS N., JAROSZEWICZ L.R., *In-line tunable nematic liquid crystal fiber optic filter*, J. Lightwave Techn., 36, 4, 2018, 891-897.
- [54] NOWINOWSKI-KRUSZELNICKI E., JAROSZEWICZ L.R., RASZEWSKI Z., SOMS L., PIECEK W., PERKOWSKI P., KEDZIERSKI J., DABROWSKI R., OLIFIERCZUK M., GARBAT K., MISZCZYK E., *Liquid crystal cell for space-borne laser rangefinder to space mission applications*, Opto-Electron. Review, 20, 4, 2012, 315-322.
- [55] RASZEWSKI Z., PIECEK W., JAROSZEWICZ L.R., SOMS L., MARCZAK J., NOWINOWSKI-KRUSZELNICKI E., PERKOWSKI P., KĘDZIERSKI J., MISZCZYK E., OLIFIERCZUK M., MORAWIAK P., MAZUR R., *Laser damage resistant nematic liquid crystal cell*, J. Appl. Phys., 114, 5, 2013, 053104.
- [56] PIECEK W., JAROSZEWICZ L.R., MISZCZYK E., RASZEWSKI Z., MRUKIEWICZ M., PERKOWSKI P., NOWINOWSKI-KRUSZELNICKI E., ZIELIŃSKI J., OLIFIERCZUK M., KĘDZIERSKI J., SUN X.W., GARBAT K., KOWIORSKI K., MORAWIAK P., MAZUR R., TKACZYK P., *Refractive index matched half-wave plate with a nematic liquid crystal for three-dimensional laser metrology applications*, Opto-Electronics Review, 24, 4, 2016, 169-182.
- [57] 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.
- [58] KŁOSOWICZ S.J., ALEKSANDER M., *Effect of polymer-dispersed liquid crystal morphology on its optical performance*, Opto-Electronics Review, 12, 3, 2004, 305-312.
- [59] CHODOROW U., PARKA J., KULA P., HERMAN J., CHOJNOWSKA O., DĄBROWSKI R., CHIGRINOV V.G., *Terahertz properties of fluorinated liquid crystals*, Liquid Crystals, 40, 11, 2013, 1586-1590.



- [60] JUNG A., ŽUBER J., KALICKI B., SACHA P., ŁUKASIEWICZ J., KŁOSOWICZ S., *Usefulness of thermography methods for skin prick test monitoring in children*, J. Inv. Allerg. Clin. Immunol., 7, 5, 1997, 542.
- [61] RECHCIŃSKA K., KRÓL M., MAZUR R., MORAWIAK P., MIREK R., ŁEMPICKA K., BARDYSZEWSKI W., MATUSZEWSKI M., KULA P., PIECEK W., LAGOUKAKIS P.G., PIĘTKA B., SZCZYTKO J., *Engineering spin-orbit synthetic Hamiltonians in liquid-crystal optical cavities*, Science, 366, 2019, 727-730.
- [62] LEKENTA K., KRÓL M., MIREK R., ŁEMPICKA K., STEPHAN D., MAZUR R., MORAWIAK P., KULA P., PIECEK W., LAGOUKAKIS P.G., PIĘTKA B., SZCZYTKO J., *Tunable optical spin Hall effect in a liquid crystal microcavity*, Light: Science & Applications, 7, 2018, 74.

Z. RASZEWSKI, J. ZIELIŃSKI, S. KŁOSOWICZ

### History of the research of liquid crystals

**Abstract.** A historical view of studies on liquid crystals is presented. Application of those materials are also taken into account. Special attention is paid to the studies conducted at Polish scientific centres since the thirties of the last century till now.

**Keywords:** liquid crystals, physical properties, material science, liquid crystal displays

**DOI:** 10.5604/01.3001.0016.1466

