

A folyadékkristályok számítástechnikai alkalmazásai

Liquid crystals in computing

SELINGER Sándor

sandor.selinger@gmail.com

Abstract

The history of liquid crystals is an exciting process filled with significant discoveries. The study provides a brief historical overview of the topic from its beginnings to the present day. Furthermore, it discusses the topological structures that appear in liquid crystals, as well as the practical uses of these materials and their potential applications in computing.

Keywords: liquid crystals, topological structures, logic gates, display

Kivonat

A folyadékkristályok története izgalmas és jelentős felfedezésekkel teli folyamat. A tanulmány a témához kapcsolódó rövid történeti áttekintést ad a kezdetektől napjainkig. A továbbiakban a folyadékkristályokban megjelenő topológiai struktúrákról és ezen anyagok gyakorlati felhasználásáról, lehetséges számítástechnikai alkalmazásáról van szó.

Kulcsszavak: folyadékkristályok, topológiai struktúrák, logikai kapuk, kijelzők

1. RÖVID TÖRTÉNETI VISSZATEKINTÉS A FOLYADÉKKRISTÁLYOK FELFEDEZÉSTŐL NAPJAINKIG

1.1. Felfedezés és korai kutatások

1888: *Friedrich Reinitzer* (1857–1927) osztrák botanikus felfedezte a folyadékkristályokat, amikor a koleszterin-észterekkel végzett kísérletei során észrevette, hogy ezek az anyagok két különböző olvadásponttal rendelkeznek. Megfigyelte, hogy a koleszterin-benzoát nevű anyag melegítés hatására különleges viselkedést mutat. Az anyag először zavaros folyadékká alakult, majd további hőmérséklet-emeléskor kitisztult. Hűtés során a folyadék először kék színűvé vált, majd kristályos állapotba került. [1]

Ez a felfedezés alapozta meg a folyadékkristályok tudományos vizsgálatát, amely azóta is jelentős szerepet játszik az anyagtudományban és az elektronikában. Ő hívta fel *Otto Lehmann* figyelmét a jelenségre, amely egyszerre mutat folyékony és szilárd tulajdonságokat.

1890-es évek: *Otto Lehmann* (1855–1922) német fizikus, akit gyakran a *folyadékkristályok „atyjának”* neveznek, az ő munkája alapozta meg a folyadékkristályok tudományos kutatását, ő nevezte el ezeket az anyagokat „*folyadékkristály*”-oknak. A különleges tulajdonság titka az anyag molekuláinak hosszúkás szerkezetében rejlik.

1889: *Lehmann* publikálja az első kísérleti eredményeket és fizikai értelmezéseit a folyadékkristályokról a *Zeitschrift für Physikalische Chemie* című folyóiratban.

1904: Megjelenik *Lehmann* fő műve, a „*Flüssige Kristalle*” (Folyékony kristályok), amely összefoglalja a folyadékkristályokkal kapcsolatos kutatásait.

1922-ben *Georges Friedel* (1865–1933) francia fizikus és minerológus, a *Sorbonne Egyetemen* végzett kutatások során, felfedezi a folyadékkristályok *mezomorf állapotát*. A *mezomorf anyagok* olyan anyagok, amelyek a szilárd kristályos és a folyékony állapot közötti *köztes fázisokban* léteznek. A *mezofázis* a görög „mesos” szóból ered és a folyadékkristályok és a lágy anyagok tudományában egy köztes, *átmeneti állapotot* jelent. A mezofázisok különleges tulajdonságaik miatt egyediek. A folyadékkristályok legismertebb mezomorf anyagok, amelyek molekulái rendezett módon helyezkednek el, de a mozgásuk nagyobb szabadságot élvez, mint a szilárd kristályos anyagoké.

Friedel elutasította a folyadékkristályok kifejezést, inkább a *mezomorf-fázist* részesítette előnyben, de mégis az eredeti kifejezés maradt meg.

Friedel munkája alapvető volt a folyadékkristályok kutatásában, mivel elsőként azonosította és írta le a három fő típusú folyadékkristályos állapotot: *szmektikus*, *nematikus* és *koleszterikus* állapotokat.

Az 1933-as *Faraday-találkozó* nagy jelentőségű volt a folyadékkristályok kutatásának fejlődése szempontjából. Ez a találkozó a *Royal Institution*ben, Londonban került megrendezésre, és a *Faraday Társaság* 58. általános vitájaként tartották meg. A találkozó témája a *Folyadékkristályok és anizotróp folyadékok* volt. A rendezvényen számos korai folyadékkristály-kutató vett részt, és jelentős hatással volt a folyadékkristályok tudományának fejlődésére.

Ezen az eseményen *Vsevolod Frederiks* (1885–1945) az anizotrop folyadékok orientációját kiváltó erőkről számolt be. *Fredericks* nevéhez fűződik a híres „*Fredericks-átmenet*” felfedezése, amely a folyadékkristályok fázisátmenetét írja le, amikor elegendően erős elektromos vagy mágneses mezőt alkalmaznak egy folyadékkristályra.

Hans Zocher (1893–1969) német fizikus a nematikus anyagokra gyakorolt mágneses mező hatását mutatta be. Neve leginkább a *liofoób nematikus fázis* felfedezéséről ismert, amelyet gyakran *Zocher-fázisnak* neveznek. A *liofoób nematikus fázis* a folyadékkristályok egy speciális állapotát jelenti, ahol a molekulák rendezett orientációt mutatnak, de a helyzetükben nincs hosszú távú rend. A *liofoób* kifejezés arra utal, hogy az anyag taszítja a folyadékot, vagy nem kedvez a folyadékkal való kölcsönhatásnak. Ez a tulajdonság különösen fontos lehet olyan alkalmazásokban, ahol a folyadékkristályok és más anyagok közötti kölcsönhatásokat szabályozni kell, például érzékelőkben vagy speciális bevonatokban.

Carl Wilhelm Oseen (1879–1944) svéd elméleti fizikus és matematikus volt, aki jelentős munkát végzett a folyadékok dinamikájának és a folyadékkristályok fizikájának területén. *Oseen* az Uppsala Egyetemen tanított, és a Nobel Intézet elméleti fizikai részlegének igazgatójaként is tevékenykedett Stockholmban.

Frederick Charles Frank (1911–1998) brit fizikus a *Bristoli Egyetemen*, jelentősen hozzájárult a folyadékkristályok fizikájához, különösen az elasztikus torzulások elméletének kidolgozásában, amelyet később a folyadékkristályok kontinuumelméleteként fejlesztett tovább. Munkája segített megérteni, hogyan viselkednek a folyadékkristályok különböző erők hatására, és hogyan alakulnak ki bennük a különböző szerkezeti mintázatok.

Carl Wilhelm Oseen és *Hans Zocher* dolgozták ki a folyadékkristályok makroszkopikus termodinamikai leírását. Az *Oseen–Zocher–Frank-egyenletek* a folyadékkristályok fizikájának leírására használt egyenletrendszer foglalják magukban. Ezek az egyenletek a folyadékkristályokban fellépő erők és energiaviszonyok matematikai modellezésére szolgálnak, segítve a folyadékkristályok struktúráinak és dinamikus tulajdonságainak megértését. Kulcsfontosságúak voltak a folyadékkristály-alapú technológiák, például az LCD-kijelzők kifejlesztésében.

1922–1960-ig terjedő időszakot, a mezomorf vegyületek szintézise iránti általános érdeklődés jellemezte, *Daniel Vorländer* (1867–1941) német kémikus és csoportja Halleban, több mint 2700 *folyadékkristályos vegyületet szintetizált*, amelyek a 1960-as évekig a legtöbb ismert folyadékkristályos anyagot jelenti.

1.2. Alkalmazások és további kutatási irányok

1960-as évek: *George William Gray* (1926–2013), brit kémikus 1962-ben publikálta a *Molecular Structure and the Properties of Liquid Crystals* című könyvét. Ez a mű alapvető fontosságú volt a folyadékkristályok molekuláris szerkezetének és tulajdonságainak megértésében. A könyv részletesen tárgyalja a folyadékkristályok szerkezeti és fizikai jellemzőit, és jelentős hatással volt az LCD-technológia fejlődésére. A folyadékkristályok iránti érdeklődés újra fellángolt, amikor felfedezték, hogy ezek az anyagok kiválóan alkalmasak kijelzők készítésére. [18]

Gray munkásságát számos díjjal ismerték el, köztük a *Kyoto-díjjal* az LCD-technológia terén végzett kiemelkedő hozzájárulásaiért. Az ő neve fémjelzi a *G.W. Gray Medal* díjat is, amelyet a *Brit Folyadékkristály Társaság* (*British Liquid Crystal Society*) alapított a folyadékkristályok kutatásában elért kiválóság elismerésére. Az érmet először 1996-ban ítéltek oda, miután *George Gray* elnyerte a *Kyoto-díjat*. Ez a társaság ma is aktív az idej konferenciáját a *University of Birmingham*en tartják 2025 április 8-10 között.

Az *RCA* (*Radio Corporation of America*) laboratóriumában az 1960-as években fejlesztették ki az első *folyadékkristályos kijelzőt* (*LCD*), amely lehetővé tette a lapos kijelzők elterjedését. Az *RCA* kutatói voltak az elsők, akik felismerték a folyadékkristályok potenciálját a kijelzőtechnológiában, és kifejlesztették az első

működő LCD prototípusokat. *George Harry Heilmeyer* (1936–2014) amerikai mérnök és feltaláló volt, aki úttörő szerepet játszott a folyadékkristályos kijelzők (LCD) kifejlesztésében. 1958-ban csatlakozott az *RCA Laboratories*hoz Princetonban, 1964-ben fedezte fel azokat az új elektrooptikai hatásokat, amelyek lehetővé tették az első működő folyadékkristályos kijelzők létrehozását

1970-ben *Martin Schadt*, *Wolfgang Helfrich* és *James L. Fergason* szabadalmaztatták a svájci F. Hoffmann-La Roche Ltd. Central Research Laboratories laboratóriumában a *twisted nematic* (TN) folyadékkristályos elektrooptikai kijelzőt. Ez az új technológia, amelyben a folyadékkristály molekulák alaphelyzetben, feszültség nélkül, *spirálszerűen elcsavarodnak*, alapvető változást hozott az elektrooptikai kijelzők világában, és azóta is széles körben alkalmazott technológia lett. A TN (*Twisted Nematic*) panel technológia több szempontból is eltér az LCD technológiájától.

1970-es években a *Sharp Corporation*, kezdte továbbfejleszteni a folyadékkristályos kijelzőket (LCD). A Sharp volt az első vállalat, amely kereskedelmi forgalomba is hozta az LCD-ket, és ezzel jelentős hatást gyakorolva a kijelzőtechnológia fejlődésére.

1970-es években a Budapesti Központi Fizikai Kutató Intézetben (KFKI) a folyadékkristályokkal kapcsolatos kutatások kezdődtek. *Ritvay Katalin* és *Pintér Katalin* által végzett kutatások [20] a folyadékkristályok kémiai szerkezetének és mezomorf tulajdonságainak összefüggéseit vizsgálták.

Ezek a kutatások hozzájárultak a szmektikus, nematikus és koleszterikus mezofázisok szerkezeti sajátosságainak megértéséhez.

Bata Lajos (KFKI) a folyadékkristályok kutatásában jelentős szerepet játszott, különösen a szilárdtestfizika és az anyagtudomány területén. Egyik fontos munkája a *Folyadékkristályok* című könyv, 1986-ban jelent meg [23]. Emellett szerkesztette az *Advances in Liquid Crystal Research and Applications* című kötetet, amely a szocialista országok harmadik folyadékkristály-konferenciájának anyagait tartalmazta, és 1981-ben jelent meg.

Buka Ágnes a Budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének kutatója, a nemlineáris folyamatok és mintázatképző instabilitások kísérleti vizsgálatával foglalkozik anizotróp, komplex rendszerekben.

1972-ben kezdték el a *Bukaresti Műszaki Egyetemen* (jelenleg „Politehnica” Egyetem) a folyadékkristályok területén *I. Cuculescu* vezetésével a kutatásokat. Az *IFTM Institutul Național pentru Fizica Materialelor* (Nemzeti Anyagfizikai Intézet) București-Măgurele intézetben *C. Motoc* vezetésével a szilárdtestfizika az anyagtudomány, a folyadékkristályok területén végeztek alap- és alkalmazott kutatásokat.

1974-ben publikálta *Pierre-Gilles de Gennes* (1932–2007) francia fizikus a *The Physics of Liquid Crystals* című könyvét. Ez az alapvető mű a folyadékkristályok fizikájáról szól, és részletesen tárgyalja azok szerkezetét, tulajdonságait, valamint a dinamikus viselkedésüket. A könyv nagy hatással volt a folyadékkristályok tudományának fejlődésére, és hozzájárult a modern technológiák, például az LCD-kijelzők megértéséhez és fejlesztéséhez. [19]

1974-ben *Robert B. Meyer* (1943–1993), amerikai fizikus a *Brandeis University* professzora, fedezte fel a *ferroelektromos folyadékkristályokat*. Munkája alapvető fontosságú volt a folyadékkristályok fizikájának és kémiájának terén. Kutatásai közé tartozik a folyadékkristályok struktúrájának, tanulmányozása, az elektromos és mágneses mezők hatásai, a fázisváltozások és a molekuláris szerkezet és makroszkopikus tulajdonságok közötti kapcsolat tanulmányozása. 2004-ben eredményeiért *Benjamin Franklin Medal in Physics* díjat kapott.

1980-as évek: *koleszterol-* és *B-nor-koleszterol* folyadékkristály származékok fázisátmeneteinek vizsgálata és ezen anyagoknak elektrooptikai kijelzőkben, adattárolókban történő felhasználási lehetőségek tanulmányozása a *kolozsvári Gyógyszerkutató- (ICCF)* és a *Számítástechnikai Intézetben (ITC)*. [2], [3] Az ide vonatkozó kutatási eredmények a *Selinger Sándor–Schwartz Róbert: A folyadékkristályok* (Tudományos és Enciklopédiai Könyvkiadó, 1983) című könyvben jelentek meg. [21]

1991-ben *Pierre-Gilles de Gennes* a folyadékkristályok és polimerek tanulmányozásáért *Nobel-díjat* kapott. Munkássága jelentős hatással volt a folyadékkristályok tulajdonságainak megértésére és alkalmazására, különösen a kijelzők és más optikai eszközök terén. 2011-ben jelent meg *Laurence Plévert: Pierre-Gilles de Gennes. A Life in Science, (World Scientific, 2011)*, című könyv mely részletesen bemutatja *de Gennes* életét és munkásságát. [24]

1.3. Modern kutatások és innovációk

2000-es évek: a folyadékkristályok kutatása tovább folytatódott, és új alkalmazások jelentek meg az optikai kommunikáció és az orvosi képalkotás terén. Az új anyagok és technológiák lehetővé tették a folyadékkristályok hatékonyabb alkalmazását különböző iparágakban.

2020-as évek: bár az első folyadékkristályos logikai kapuk és adattárolók fejlesztése az 1990-es évek elején az *MIT-n* (*Massachusetts Institute of Technology, USA*) kezdődtek, és folyamatosan fejlődnek, az idevonatkozó legújabb kutatások a *Chicagói Egyetem Pritzker Molekuláris Mérnöki Iskolájában* történnek. A kutatók új módszert fejlesztettek ki a folyadékkristályos számítástechnikai alkalmazásokban, amely lehetővé teszi a logikai műveletek végrehajtását a folyadékkristályokban megjelenő aktív topológiai hibák segítségével. [14]

1.4. Konferenciák

A konferenciák a folyadékkristályok tudományának és technológiájának legfontosabb eseményei közé tartoznak. Az események célja, hogy a kutatók, mérnökök és ipari szakemberek megosszák legújabb eredményeiket és ötleteiket. [26]

Az első *Nemzetközi Folyadékkristály Konferenciát* (*First International Liquid Crystal Conference, ILCC*) 1965-ben tartották *Kent State Universityn*, az Egyesült Államokban. Ez az esemény mérföldkő volt a folyadékkristályok kutatásában, és az óta is két évente rendszeresen megrendezik a tudományos közösség számára. Az *Európai Folyadékkristály Konferenciákat* (*ECLC*) is általában két évente rendezik meg.

A legutóbbi *ILCC* konferenciák helyszíne például:

2016: Kent, Ohio, USA,

2018: Kyoto, Japán,

2022: Lisszabon, Portugália,

2024: Rio de Janeiro, Brazília voltak.

Az Európa-szintű *17. ECLC* konferenciára, a következő eseményre *2025. június 1-6.* között kerül megrendezésre *Prágában*, Csehországban.

A folyadékkristályok eddigi története jól mutatja, hogy ezek az anyagok továbbra is folyamatosan fejlődnek, új lehetőségeket kínálva a tudomány és a technológia területén. Az *LCD technológia* folyamatosan fejlődött, és egyre jobb képminőséget és gyorsabb válaszidőt biztosított. A folyadékkristályos kijelzők széles körben elterjedtek a számítástechnikai eszközökben, monitorokban, laptopokban és okostelefonokban.

A teljesség igénye nélkül, alkalmazásokon és alkalmazási lehetőségeken keresztül megpróbáljuk szemléltetni a folyadékkristályok szerepét a mindennapi életben, műszaki-technológiai megoldásokban, *számítástechnikai alkalmazásokban* és a tudomány különböző, interdiszciplináris területein. Fontos megjegyezni, hogy ma már a folyadékkristályok messze túlmutatnak a széles körben alkalmazott kijelzőtechnikákon.

2. FOLYADÉKKRISTÁLYOS FÁZISOK

A legismertebb *mezomorf anyagok közé tartoznak a folyadékkristályok*, amelyek molekulái rendezett módon helyezkednek el, de a mozgásuk nagyobb szabadságot élvez, mint a szilárd kristályos anyagoké. Ezek fizikai jellemzői:

- **rendezett szerkezet:** a mezomorf anyagok molekulái részben rendezett szerkezetet alkotnak, amely különbözik a teljesen rendezetlen folyékony fázistól;
- **anizotrópia:** azaz fizikai tulajdonságaik (optikai, elektromos) irányfüggőek;

- **fázisváltozások:** a mezomorf anyagok különböző fázisokat mutathatnak: *nematikus*, *szmektikus* vagy *koleszterikus* fázisokat.

A fázisátalakulások melegítés-hűtés hatására jönnek létre, amikor is a folyadékkristály molekulák a folyadékok és szilárd kristályok közti állapoton, szerkezetváltozáson mennek keresztül. Melegítéskor a molekulák nem veszik fel azonnal a rendezetlen, folyadékokra jellemző alakot, hanem a két szerkezet közötti állapot alakul ki. Ezért úgy tűnik mintha az anyag két olvadásponttal rendelkezne. Ez a szerkezetváltozás az anyag fizikai-optikai tulajdonságainak a megváltozását vonja maga után. [2], [3]

Nematikus fázis: A nematikus elnevezés a görög *nema* szóból származik, amely *szálat* vagy *fonalat* jelent. A név a nematikus folyadékkristályok szerkezetére utal, ahol a molekulák hosszú, pálcika alakúak, azonos irányba és párhuzamosan rendeződnek, mint a szálak egy kötegben, de a molekulák tömegközéppontjai nem mutatnak rendezettséget. A molekulák orientációja rendezett, de a pozíciójuk nem. Ez a rendezettség teszi lehetővé a nematikus folyadékkristályok molekuláinak elektromos tér hatására történő elfordulását, és a fényáteresztés szabályozását. Ez a fázis gyakran használt LCD-kijelzőkben.

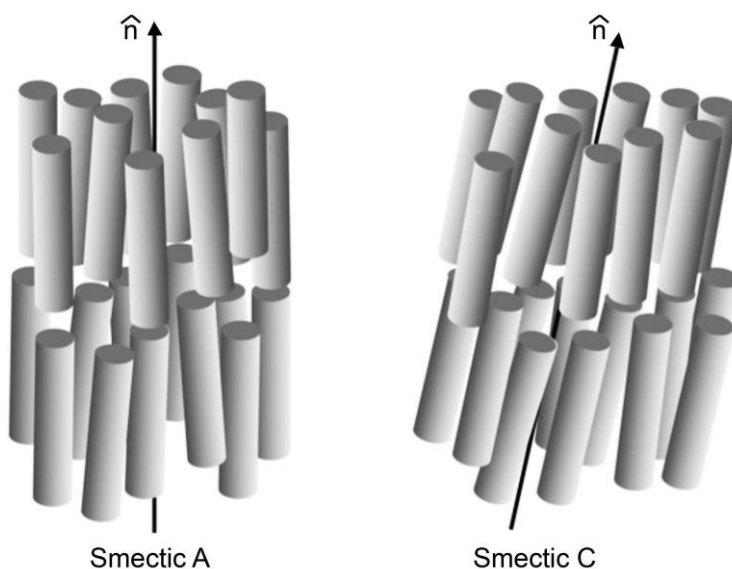
Mivel a nematikus fázisban a molekulák orientációja rendezett, és a molekulák tömegközéppontjai nem mutatnak rendezettséget, ez megkülönbözteti őket más folyadékkristályos fázisoktól, mint például a szmektikus fázistól. (1. ábra)

Szmektikus fázis: A szmektikus elnevezés a görög *smēktikos* szóból származik, amely *kenőcsöst* vagy *kenhető*t jelent. A név a szmektikus folyadékkristályok szerkezetére utal, ahol a molekulák rétegekbe rendeződnek, és ezek a rétegek könnyen elcsúszhatnak egymáson, hasonlóan a kenőcsös anyagokhoz. A szmektikus fázisban a molekulák nemcsak orientációjukban, hanem pozíciójukban is rendezetten helyezkednek el. A molekulák rétegeken belül szabadon mozoghatnak, de a rétegek közötti mozgás korlátozottabb.

A szmektikus folyadékkristály fázist elsőként *Charles-Victor Mauguin* (1878–1958) francia fizikus fedezte fel 1911-ben. Különleges optikai és elektromos tulajdonságaik miatt, a szmektikus folyadékkristályokat, *szmektikus A* (*SmA*) és a *szmektikus C* (*SmC*) a *ferroelektromos* (*FLC*) folyadékkristályos kijelzőkben használják. (2. ábra)



1. ábra
Nematikus folyadékkristály molekulái az igazodási (direktor) tengely mentén [27]



2. ábra
Szmektikus folyadékkristály fázisok [27]

A *szmektikus A (SmA)* fázis két különböző állapotban létezhet: egy nem szimmetrikus, nem homogén állapotban és egy szimmetrikus, homogén állapotban. Ez a fázis rétegekből áll, ahol a folyadékkristály molekulái párhuzamosan rendeződnek egymáshoz és a rétegek síkjaihoz viszonyítva. A molekulák hossz tengelyei merőlegesek a rétegek síkjára, azaz mindegyik molekula függőleges helyzetben áll a rétegen belül. Az SmA fázisban nincs spontán polarizáció.

A *szmektikus C (SmC)* fázis esetében molekulák hossz tengelyei szöget zárnak be a rétegek síkjával. Ez a szög nem nulla, hanem egy meghatározott értékű (általában néhány fok). Ez azt jelenti, hogy a molekulák a rétegek síkjához képest *eldőlnek*. Az SmC fázisban általában van spontán polarizáció, ami azt jelenti, hogy a molekulák polarizáltak lehetnek anélkül, hogy külső elektromos mezőre lenne szükség.

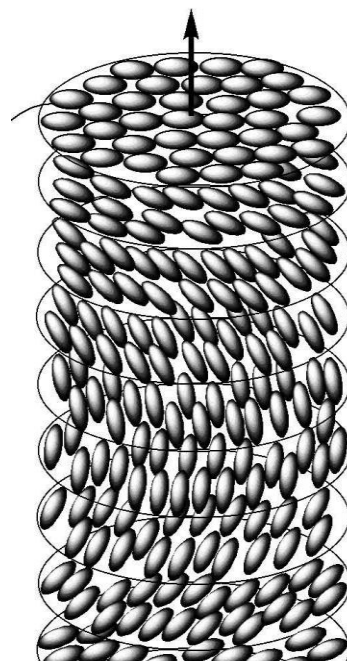
Koleszterikus (vagy chirális nematikus) fázis. A *koleszterikus* elnevezés a koleszterin molekulából származik. A koleszterikus folyadékkristályok (más néven *chirális nematikus folyadékkristályok*) szerkezete hasonlít a *koleszterin* molekulák által alkotott szerkezethez. A molekulák spirális szerkezetben rendeződnek, és a molekulák orientációja fokozatosan változik a spirál mentén. Ez a spirális szerkezet különleges optikai tulajdonságokat eredményez, amelyek számos alkalmazásban hasznosak, például optikai eszközökben és kijelzőkben. Ezt a fázist elsőként *Charles-Victor Mauguin* (1878–1958) francia fizikus fedezte fel 1919-ben. A *chirális* kifejezés olyan molekulákat vagy anyagokat ír le, amelyeknek nincs szimmetriatengelyük, és emiatt nem azonosak a tükörképükkel. Ez a fogalom a görög *cheir* szóból származik, ami *kezet jelent*, mivel a jobb és bal kéz is chirális: tükörképei egymásnak, de nem azonosak. (3. ábra)

Ferroelektromos fázis: A molekulák *chirális szmektikus C (SmC*)* fázisban helyezkednek el, ahol a molekulák ferde szögben rendeződnek a rétegekhez képest, és *chirálisak*. Ez a fázis gyors válaszidőt és nagy kontrasztarányt biztosít.

Biaxiális nematikus fázis: A molekulák két tengely mentén is rendeződnek. A biaxiális nematikus fázis különlegessége abban rejlik, hogy a molekulák két különböző irányban is orientálódnak. Ez a kettős tengelyű rendezettség különleges optikai és elektromos tulajdonságokat eredményez. Ez a fázis ritkábban előfordul, de érdekes kutatási terület.

Diszktikus folyadékkristályok (Discotic Liquid Crystals – DLC): *Sivaramakrishna Chandrasekhar* (1930–2004) indiai-amerikai fizikus az 1970-es években azonosította a *diszktikus folyadékkristályokat*, a korong alakú molekulák folyadékkristályait diszktikus folyadékkristályoknak is szokás nevezni. A *diszktikus* kifejezés a „*korong alakú*” jellemzőjükre utal, a diszktikus folyadékkristályok olyan különleges anyagok, amelyek *molekulái korong alakúak*. Ezek a molekulák réteges szerkezetet alkotnak, és különböző fázisokban rendeződhetnek, például *oszlopos* vagy *lamelláris* mintázatban. Az ilyen anyagok különösen érdekesek az organikus elektronikában és optikai alkalmazásokban. Molekuláris szerkezetüket korong alakú molekulák alkotják, amelyek egymásra helyezkedve oszlopokat képezhetnek. Kiváló fényvezetési képességük van. Organikus félvezetők, napelemek és más elektronikai eszközök fejlesztésében játszanak szerepet. A DLC-k önjavító tulajdonságai és stabilitása miatt ígéretesek lehetnek hosszabb élettartamú OLED-ek gyártásában, valamint elektromosan hangolható optikai lencsék és más innovatív eszközök fejlesztésében.

A diszktikus folyadékkristályok (DLC-k) *önjavító tulajdonsága* azt jelenti, hogy ezek az anyagok képesek természetes módon helyreállítani vagy megőrizni szerkezeti és funkcionális tulajdonságaikat, még külső behatások, például mechanikai sérülések után is.



3. ábra
Chirális
nematikus
fázis [27]

3. FOLYADÉKKRISTÁLYOK ALKALMAZÁSA SZÁMÍTÁSTECHNIKAI INTEGRÁLT ÁRAMKÖRÖKBEN

Az alábbiakban néhány konkrét példa a folyadékkristályok eddigi és jövőbeli lehetséges felhasználási terén.

3.1. Folyadékkristályos kijelzők (LCD)

A folyadékkristályos kijelzők (LCD) széles körben elterjedtek a számítástechnikai eszközökben, például monitorokban, laptopokban, okostelefonokban és okosórákban. Az LCD-k nematikus folyadékkristályokat (NLC) használnak, amelyek elektromos tér hatására megváltoztatják optikai tulajdonságaikat így lehetővé téve képek megjelenítését. [4], [22]. Így például egy dinamikus szórásmodú kijelzőben (DSM) külső elektromos tér hatására a folyadékkristály molekulák irányítottasága megváltozik, a dipólusok a tér irányában állnak be. Ez a jelenség lehetővé teszi az „áttetsző” és „opálos” megjelenési állapotok közötti váltást. (4. ábra)

2013-ban Európai Szabadalmi Hivatal az Európai Feltalálói Díj életműdíját Martin Schadt svájci fizikusnak adta, a lapos folyadékkristályos képernyő, az LCD kidolgozásáért. A Hoffmann-La Roche cég munkatársaként még 1970-ben fejlesztette ki az első folyadékkristályos kijelzőt (LCD), akkor aligha gondolta, hogy ezek az LCD-kijelzők ilyen népszerűek lesznek és gyakorlatilag a mindennapok elengedhetetlen eszközévé válnak.

2023-ban a *Merck KGaA* német vegyipari cég azonban bejelentette, hogy felhagy a folyadékkristályos kijelzők területén a kutatás-fejlesztés további finanszírozásával. Mivel ez a cég az LCD-panelek legfőbb beszállítója a világ tévégyártóinál, ez a hír praktikusán azt is jelenti, hogy ennek a kijelzőtechnológiának vége, azaz nem fejlesztik tovább. A döntést német cég azzal indokolta, hogy ebben a technológiában nemigen volt már újításra vagy fejlődésre tér, főleg az *OLED panelek* és annak mindenféle új variációi mellett.

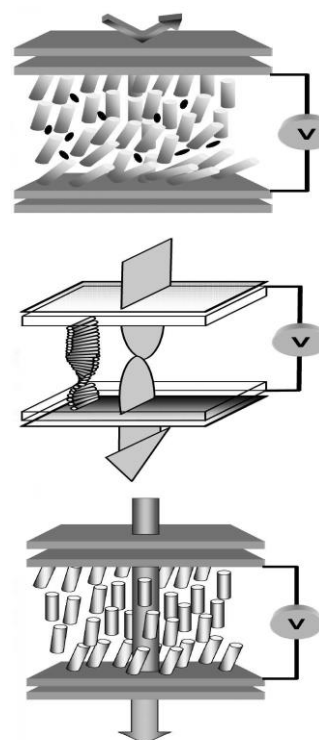
Az *OLED kijelző* úgynevezett szerves diódákat használ. A technológia elnevezése is innen ered, az *Organic Light-Emitting Diode (szerves fénykibocsátó dióda)*, amelyekben a fénykibocsátásért felelős elektrolumineszcens réteg szerves vegyületből készül) rövidítése. Használati előnyükhöz sorolhatók a jobb színek, a nagyobb kontraszt és az abszolút fekete megjelenítésének képessége, amire a hagyományos LCD panelek nem képesek. Az OLED kijelzők nem igényelnek háttérvilágítást, így a fekete szín teljes fekete lehet, ami nagyobb kontrasztot eredményez. [6]

3.2. Optikai modulátorok (LCOM)

A folyadékkristályos optikai modulátorok (Liquid Crystal Optical Modulators – LCOM) olyan eszközök, amelyek a fény intenzitásának, fázisának vagy polarizációjának szabályozására folyadékkristályokat használnak. Gyors válaszidejükkel és kiváló optikai tulajdonságaikkal lehetővé teszik az optikai kommunikációs rendszerekben az adatátviteli sebesség növelését, ami alapvető fontosságú a logikai műveletek végrehajtásában.

3.3. Térbelifény-modulátorok (SLM)

A folyadékkristályos *térbelifény-modulátorok* (Spatial Light Modulators - SLM) olyan eszközök, amelyek folyadékkristályokat használnak a fény térbeli eloszlásának szabályozására. Az SLM-ok működésének alapja az, hogy a folyadékkristályok állapotát (például orientációját vagy fázisát) elektromos mezők segítségével változtatják meg, így az áthaladó fényt szabályozzák. Az SLM-ek fontosak a holografikus kijelzőkben és a 3D képképzésben, ahol a fény pontos irányítása és modulálása szükséges a logikai műveletek végrehajtásához.



4. ábra

Dinamikus szórás módú (DSM) kijelző [27]

3.4. Folyadékkristályos memóriák (LCM)

A folyadékkristályos memóriák (LCM) olyan eszközök, amelyek az adatok tárolására és visszakeresésére folyadékkristályokat használnak. Az LCD működése az elektromos tér hatására bekövetkező molekuláris orientációváltozáson alapul, ami lehetővé teszi az adatok tárolását és visszakeresését. Tárolókapacitásuk néhány kilobájttól több megabájtig terjedhet, attól függően, hogy milyen technológiával és célra készülnek. Méretük néhány millimétertől akár mikrométeres tartományig terjedhet. Gyors válaszidejükkel – mely általában a mikro- és milliszekundumos tartományban mozog – és alacsony energiafogyasztásukkal ígéretesek a jövőbeli számítástechnikai alkalmazásokban. Az LCM technológia még fejlesztés alatt áll, és jelenleg nem olyan elterjedt, mint más memória típusok, például a DRAM vagy a flash memória. Az LCM technológiák célja, hogy nagy adatsűrűséget érjenek el, amely hasonló vagy jobb lehet, mint a számítógépekben használatos hagyományos memóriáké.

3.5. Folyadékkristályos tranzisztorok (LCT)

A folyadékkristályos tranzisztorok (LCT) olyan eszközök, amelyek folyadékkristályokat használnak a kapcsolási műveletek végrehajtására. Gyors válaszidejükkel és alacsony energiafogyasztásukkal ígéretesek a jövőbeli integrált áramkörti alkalmazásokban. Működése az elektromos tér hatására bekövetkező molekuláris orientációváltozáson alapul, ami lehetővé teszi a logikai műveletek végrehajtását, számos alkalmazási lehetőséget kínálva a számítástechnikai integrált áramkörök terén.

3.6. Folyadékkristályos kapuk (LCG)

A Chicagói Egyetem Pritzker Molekuláris Mérnöki Karának kutatói először mutatták be, hogyan lehet megtervezni a logikai műveletekhez szükséges alapvető elemeket egy folyadékkristály nevű anyag felhasználásával, ezáltal megnyitva az utat egy teljesen újfajta számítási módszer előtt.

A folyadékkristályokban található különleges molekuláris elrendezésnek egyik következménye, hogy létrejönnek olyan pontok, ahol a rendezett régiók egymásnak ütköznek, és az orientációjuk nem teljesen egyezik meg. Ezeket a pontokat a tudósok *topológiai hibáknak* nevezik. Amikor a folyadékkristály mozog, ezek a hibák is mozgásban vannak. [5]

A folyadékkristályos kapuk (LCG) működése az elektromos tér hatására bekövetkező molekuláris orientációváltozáson alapul, ami lehetővé teszi olyan logikai műveletek mint például az *AND (ÉS)*, *OR (VAGY)* és *NOT (NEM)* kapuk vezérelte műveletek végrehajtását. Ezek a kapuk alapvető építőkövei a digitális áramköröknek, a folyadékkristályok segítségével új, hatékonyabb és energiatakarékosabb megoldások fejleszthetők ki.

Teljesen formabontó gondolat, ami – persze idővel – teljesen átalakíthatja a számítástechnikai eszközökről alkotott képünket, de a *puha robotikában* szinte biztos, hogy forradalmi változásokat fog előidézni.

3.7. Puha robotika

Az 1980-as években jelent meg *puha robotika* fogalma, amikor a kutatók először használták a folyadékkristályokat és más lágy anyagokat robottechnikai alkalmazásokban. A puha robotika egy olyan robotikai ág, amely a neve is mutatja, puha anyagokból és rugalmas szerkezetekből épített robotok tervezésével és fejlesztésével foglalkozik. A kutatók olyan innovatív megoldásokat hoztak létre, ahol a biológiailag lebomló mesterséges izmok és zselatinból készült nagy teljesítményű robotikai alkalmazásokra nyílt lehetőség.

Az első jelentős fejlesztések közé tartozott a Max Planck Intelligens Rendszerek Intézet (MPI-IS), a Johannes Kepler Egyetem (JKU) és a Colorado Egyetem (CU Boulder) kutatóinak közös munkája.

Ezek a robotok a hagyományos, merev mechanikus szerkezetekkel ellentétben hajlékonyak és deformálhatók, ami lehetővé teszi számukra, hogy jobban alkalmazkodjanak a környezetükhöz és bonyolult feladatokat hajtsanak végre. A puha robotok felhasználhatók az ipari automatizálás területén, például érzékeny és törékeny tárgyak kezelésére, amelyeket a merev robotok könnyen megsérthetnének. A puha robotika néhány fontosabb jellemzői:

- **hajlékony anyagok:** A puha robotok általában rugalmas és hajlékony anyagokból, például szilikonból, gélből vagy textiltől, *folyadékkristályokból* készülnek, ami lehetővé teszi a robotok alakváltozását és deformációját;
- **biomimetikus tervezés:** A puha robotok tervezése biomimetikus elveken alapul, vagyis a természetben előforduló élőlények, például polipok, férgek és más puhatestű állatok mozgását és működését utánozzák (A *biomimetika* más néven *bionika* vagy *biomimézis*, olyan tudományág, amely az élő természetben kifejlesztett megoldásokat próbálja átültetni a műszaki gyakorlatba);
- **biztonság és rugalmasság:** ezek a robotok biztonságosabbak és rugalmasabbak a merev robotokhoz képest, mivel képesek deformálódni és alkalmazkodni a környezetükhöz, ami csökkenti a sérülések kockázatát.

Így már érthető, hogy a *folyadékkristályos anyagok felhasználásával a puha robotikában szinte biztos, hogy forradalmi változások fognak történni már a közeljövőben.*

A folyadékkristályok logikai műveletekben való alkalmazása egy izgalmas és innovatív terület, mert különleges tulajdonságaik lehetővé teszik, hogy különböző elektromos jelek hatására változtassák az állapotukat, ami hasznos lehet a már fent említett logikai kapuk és más elektronikai eszközök létrehozásában.

A legfrissebb kutatási eredmények a *nematikus folyadékkristályok (NLC)* és a *ferroelektromos folyadékkristályok (FLC)* területén számos izgalmas fejlesztést és felfedezést hoztak. [16]

Nematikus folyadékkristályok (NLC) a kutatók folyamatosan dolgoznak új NLC anyagok kifejlesztésén, amelyek gyorsabb válaszidőt és jobb optikai tulajdonságokat biztosítanak. A *fluorozott származékok* és a nanoméretű anyagok alkalmazása már jelentős előrelépést hoztak az NLC-k teljesítményében. Az NLC-ket egyre több területen alkalmazzák, például az optikai kommunikációban és az orvosi képalkotásban.

Ferroelektromos folyadékkristályok (FLC) a ferroelektromos tulajdonsággal rendelkező folyadékkristályok (FLC) *spontán polarizációval* rendelkeznek, ami azt jelenti, hogy külső elektromos tér nélkül is rendelkeznek belső elektromos dipólusmomentummal, de külső elektromos tér hatására megváltoztatják a kialakult spontán polarizációjukat. Az anyagban természetes módon alakul ki az elektromos dipólusmomentum, amely az anyag belső szerkezetéből adódik. A folyadékkristályos molekulák szerkezete gyakran tartalmaz például *ciano (CN)*, *nitro (NO₂)* vagy *halogén (Cl, Br)* poláris csoportokat.

Ezek a poláris csoportok különböző *elektronegativitású atomokat* tartalmaznak, ami az elektromos töltés eloszlásának egyenetlenségét eredményezi. (Az elektronegativitás egy atom vagy molekula azon képessége, hogy magához vonzza a kötött elektronokat. Ez a tulajdonság fontos szerepet játszik a kémiai kötések kialakulásában és a molekulák szerkezetének meghatározásában.)

Az anizotrop szerkezet miatt a molekulák különböző irányokban eltérő elektromos tulajdonságokkal rendelkeznek. Ez az anizotropia hozzájárul a dipólusmomentum kialakulásához.

Az új *chirális származékok* (a chirális molekulák olyan sztereokémiai konfigurációkkal rendelkeznek, amelyek miatt nem lehet őket saját tükörképükbe forgatni) és *fluorozott láncok* alkalmazása lehetővé teszi a gyorsabb molekuláris orientációváltozást és a jobb teljesítményt.

Ezen származékok felhasználása többféle alkalmazásban is előnyösebb lehet kijelzőkben és modern *fotonikai eszközökben*.

A hagyományos szilícium chipekkel ellentétben a *fotonikus chip* elektronok helyett *fotonokat (fényrészecskéket)* használ az adatfeldolgozáshoz, és tranzisztorok és ellenállások helyett optikai alkotórészekre, például hullámvezetőkre és lézerekre épül. A *folyadékkristályos optikai kapcsolók* képesek gyorsan és hatékonyan váltani a fény útját különböző csatornák között. Egy *folyadékkristályos alapú fotonikus chip* építése több lépésből áll, amelyek során a folyadékkristályokat és az optikai alkatrészeket integrálják egy egyesített rendszerbe, mint például optikai szűrőkben és kommunikációs eszközökben, optikai szálakban. Ez lehetővé teszi az információ gyors és megbízható továbbítását az interneten és más kommunikációs rendszerekben.

4. FOLYADÉKKRISTÁLYOKBAN KIALAKULÓ ÉRDEKES TOPOLOGIAI STRUKTÚRÁK, HIBÁK, EZEK GYAKORLATI ALKALMAZÁSAI

A folyadékkristályok olyan pálcika alakú molekulákból álló rendszerek, amelyek önszerveződnek, hogy mezofázisokat alkossanak – ezek a közönséges folyadékok és az anizotróp kristályok között helyezkednek el. Az egyes pontokon a molekulák kollektíven egy kitüntetett irány mentén rendeződnek, amely lokálisan meghatároz egy orientációs rendet. Időnként ez a rend megszakad, és szingularitások jelennek meg, amelyeket *topológiai hibáknak* neveznek. [7]

Egyes folyadékkristályokban megjelenő *topológiai struktúrák* felfedezése és hasznosítása az elmúlt években jelentős fejlődésen ment keresztül. Mint ismeretes a *topológia* a matematika olyan ága, amely az alakzatok és térbeli formák tulajdonságaival foglalkozik. A folyadékkristályokban előforduló *topológiai hibák* jelentős szerepet játszanak a folyadékkristályok dinamikájában és szerveződésében és nem utolsósorban gyakorlati alkalmazásukban.

A *diszlokáció* és a *diszklínáció* két különböző típusú *topológiai hiba*, két különböző fogalom, amelyek különböző tulajdonságokkal és jelentőséggel bírnak a szilárd kristályokban illetve a folyadékkristályokban, a kristálytanban és az anyagtudományban.

A *diszlokációk* olyan topológiai hibák, amelyek a *szilárd kristály szerkezetében* meglévő hibák miatt jönnek létre. Ezek a hibák lehetnek *ponthibák*, *vonalhíbak* vagy *tömbi hibák*.

Ponthibák: azok, amelyek csak egyetlen pontban jelennek meg, és az ideális kristály szerkezetében hiányzó atomokra vagy molekulákra utalnak.

Vonalhíbak: egyenes vonalként megjelölhető hibák a kristályban, ez a kristályrácsban lévő eltolódások vagy megszakadások következtében jön létre, így az anyag belső szerkezetének egy részén változást okoz. Két fő típusa ismert: *éldiszlokáció* (*edge dislocation*) és *csavardiszlokáció* (*screw dislocation*). A diszlokációk dinamikusan változhatnak és kölcsönhatásba léphetnek más hibákkal és külső erőkkel.

Tömbi hibák: a kristályok nagyobb területén elterjedő diszlokációk, amelyek több atomot vagy molekulát érintenek.

A *diszklínáció* a *folyadékkristályokban előforduló olyan topológiai hiba*, amely az *igazodási irányban* mutatkozó eltérést vagy megszakadást jelent. Az igazodási irányt a folyadékkristályok esetében gyakran egy tengelyhez viszonyítva értelmezzük. Ez a tengely az úgynevezett *igazodási tengely* vagy *rendezési tengely* (*direktor*). Az igazodási tengely megadja a folyadékkristály molekuláinak hosszú tengelyének átlagos irányát a tér egy adott pontjában. Más szóval, az igazodási irány megmutatja, hogy a folyadékkristály molekulák hogyan rendeződnek és orientálódnak az anyagon belül.

Az *igazodási irány hibája* *diszklínációs vonalak* vagy *pontok formájában jelenik meg*, ahol a molekulák igazodási iránya diszkontinuitásokat, azaz folytonossági hiányokat mutat. Ezek az iránybeli eltérések hatással lehetnek az anyag optikai és mechanikai tulajdonságaira, mivel az igazodási irány meghatározza, hogyan viselkedik a folyadékkristály külső hatásokra (például hőmérsékletváltozás, elektromos- vagy mágneses tér változás).

- *Nematikus* folyadékkristályok esetében az igazodási tengely iránya határozza meg, hogy a molekulák hogyan orientálódnak az anyagban. Az igazodási tengely iránya mentén a molekulák párhuzamosan rendeződnek, de a helyzetük nem szabályos. (1. ábra)
- *Szmeztikus* folyadékkristályokban az igazodási tengely iránya mentén a molekulák rétegekben helyezkednek el, ezek a síkok párhuzamosak az igazodási tengellyel. (2. ábra)
- *Koleszterikus* folyadékkristályos anyagokban a molekulák az igazodási tengely spirál alakban történő csavarodása mentén rendeződnek, ami különleges optikai tulajdonságokat eredményez. (3. ábra)

Tehát a *diszlokációk*, *vonalmonti hibák* a szilárd kristályos anyagokban, míg a *diszklínációk*, *folytonossági hiányok*, *hibák* a folyadékkristályok igazodási tengely irányában kialakuló hibák, *topológiai hibák*.

Diszlokációk főként szilárd anyagokban (például fémekben, kerámiákban) fordulnak elő, míg diszklínációk folyadékkristályokban jelennek meg.

A folyadékkristályokra a diszklínációk a jellemzők, a diszlokációk nem.

A $+1/2$ és $-1/2$ diszklínáció egy olyan topológiai hiba, amely a folyadékkristályokban jelenik meg és különösen a nematikus folyadékkristályokban figyelhetők meg. A $+1/2$ és $-1/2$ diszklínációk az igazodási irány (direktor) elrendezésében bekövetkező eltérésekre utalnak. Ezek a diszklínációk olyan területeken fordulnak elő, ahol a folyadékkristály molekulái nem rendeződnek egyenletesen, hanem valamilyen rendellenesség vagy torzulás van jelen.

Az aktív anyagokban található topológiai hibák felhasználhatók logikai műveletek elvégzésére. Nematikus folyadékkristályban, a $+1/2$ hibák önálló mozgásra képesek, ami az elektronok feszültséggradiens alatti transzportjához hasonlítható. [8]

$+1/2$ diszklínáció

A $+1/2$ diszklínáció egy fél egész számú diszklínáció, amelynél a folyadékkristály molekulák igazodási iránya körkörös, de fél fordulattal tér el a középponttól. Ez azt jelenti, hogy a molekulák elrendezése egy fél fordulatot követ, azaz egy félfordulattal változik pozitív irányban (az óramutató járásával megegyező irányban). A $+1/2$ diszklínációk általában olyan területeken jelennek meg, ahol a molekulák igazodási iránya fokozatosan változik, de egy térbeli pont körül folytonossági hiány jelentkezik.

A $+1/2$ diszklínációk gyakran ún. *halvány* vagy *enyhe* diszklínációkként jelennek meg, mivel a molekulák elrendezése viszonylag sima és fokozatos. Ez a megjelenés arra utal, hogy ezek a topológiai hibák kevésbé jelentősek vagy kevésbé markánsak a folyadékkristályos anyagban. Ez azt jelenti, hogy a molekulák orientációjának változása viszonylag kisebb mértékű vagy kevésbé drámai a hiba vonala mentén.

$-1/2$ diszklínáció

A $-1/2$ diszklínáció esetében a molekulák orientációja 180 fokkal fordulattal változik a hiba vonala mentén. Ez azt jelenti, hogy a molekulák egy félfordulattal elfordulnak a hiba egyik oldaláról a másikra, és ez elfordulás negatív (azaz az óramutató járásával ellentétes) irányban történik.

2022-ben jelentős eredményeket értek el a finn *Aalto Egyetem*, a kanadai *British Columbia Egyetem* és az amerikai *Princeton Institute for Advanced Study* kutatói. Érdekes topológiai struktúrákat fedeztek fel, amelyek különböző áramlási örvényeket tartalmaznak. Ezek az örvények összekapcsolódhatnak, de nem haladnak át egymáson. A felfedezés számos potenciális gyakorlati alkalmazást kínál, különösen a kvantum-számítástechnikában és a részecskefizikában. A topológiai kvantumszámításban például a logikai műveleteket úgy hajtanak végre, hogy különböző módon, különböző típusú örvényeket fonnak egymás köré.

Az új topológiai struktúrák felfedezése és hasznosítása az anyagtudomány és a fizika egyik legújabb és legígéretesebb területe, amely során további kutatások és fejlesztések várhatók. [11], [12]

4.1. Új topológiai struktúrák

A folyadékkristályokban újfajta *topológiai struktúrák* kialakulását fedeztek fel, mint például az ún. *szkirmionokat* és *hopfionokat*. Ezek a *topológiai struktúrák*, (*szkirmionok* és *hopfionok*) [13], különleges körülmények, külső tényezők hatására alakulhatnak ki, pld.:

- **külső mezők:** elektromos vagy mágneses mezők alkalmazása során a folyadékkristályokban megváltozik a molekulák orientációja;
- **hőmérséklet-változások:** amelyek befolyásolják a folyadékkristályok fázisátmeneteit.

A *szkirmionok* (*skyrmionok*) olyan *topológiai struktúrák*, amelyek különböző anyagokban, például *folyadékkristályokban* és *mágneses anyagokban* fordulhatnak elő és különleges tulajdonságokkal rendelkeznek, mint például alacsony energiafogyasztás és nagy strukturális stabilitás.

A *szkirmion* (angolul *skyrmion*) név *Tony Skyrme* (1922–1987) brit fizikus nevéből származik, aki az 1960-as években dolgozta ki a hipotetikus részecskékről elnevezett *szkirmionok elméletét*.

A *szkirmion* egy olyan *topológiai stabilitással* rendelkező *kvázirészecske*, amelyet a térbeli elrendezésének köszönhetően nehéz megsemmisíteni. A *szkirmionok* gyakran hasonlítanak egy *örvényhez* vagy *spirálhoz*, ahol a molekulák vagy részecskék körkörös rendeződnek el a térben. A *szkirmionok* tipikusan egy gömb alakú topológiai struktúra, és maguk körül forgó mágneses mezővel rendelkeznek, amely szorosan összefonódik az elektronok spinjeivel. A *szkirmionok* belsejében található mágneses vortex egy központi mag körül forog, amely stabilizálja a *szkirmion* szerkezetét. A *szkirmionok* egyfajta „csomó” a mágneses mezőben, ahol a mágneses momentumok spirálisan rendeződnek.

A *szkirmion* egy *kvázipartikula*, olyan egzotikus részecskefajta, amely egy anyagban vagy rendszerben fellépő kollektív gerjesztésként jelenik meg. Nem valódi, különálló részecske, hanem sok részecske közös viselkedésének eredménye. Egyszerűbben fogalmazva, a *kvázipartikula egy kollektív mozgás vagy állapot*, amely úgy viselkedik, mintha egy egyedi részecske lenne. Ezek topológiai védett struktúrákat alkotnak, és amelyek az anyag vektoros mezőjében kialakult örvényeket reprezentálnak.

A *királis nematikus* folyadékkristályban lévő *szkirmionok* kvázirészecskékként viselkednek, amelyek dinamikusan összekapcsolhatók, valamint könnyedén és precízen egyenként létrehozhatók vagy megszüntethetők. [15]

A kristályokban található elektronok spinjei között többféle kölcsönhatás jöhet létre, ezek versengése alakítja ki a *szkirmionokat*. Egyes anyagokban a kölcsönhatás olyan, hogy a spinek egymással párhuzamosan szeretnének állni, ezek az egyszerű *ferromágnesek*. Léteznek kristályok, ahol emellett megjelenik egy másik kölcsönhatás, amely egymásra merőlegesen szeretné rendezni a spineket. A két kölcsönhatás között kialakuló kompromisszumos megoldás eredménye a korábban már elméleti úton megismert *szkirmion-rendeződés*.

A *szkirmionok* segítenek megérteni a fázisátmeneteket, leírni az anyagok viselkedését különböző körülmények között, amelyek fontos szerepet játszanak a kondenzált anyagok fizikájában, amely tárgykörébe a folyadékkristályok is tartoznak. A kutatások a folyadékkristályos információtároló-rendszerek új generációja létrehozásának ígéretét hordozzák.

A *hopfionok* olyan *topológiai struktúrák*, amelyek szintén *folyadékkristályokban és mágneses anyagokban* fordulhatnak elő.

A *hopfion* név *Heinz Hoff* (1894–1971) német matematikus, az algebrai topológia úttörője nevéből származik, aki az 1930-as években dolgozta ki a *Hopf-féle fibráció (fibrálás)* elméletét.

A *Hopf-féle fibráció* egy érdekes komplex *matematikai* fogalom és egyben *fizikai* jelenség. A Hopf-féle fibráció és a folyadékkristályok közötti kapcsolat érdekes és izgalmas terület a modern fizika és matematika határán. A Hopf-féle fibráció olyan topológiai struktúra, amelyet a folyadékkristályokban is megfigyelhetünk, különösen a nematikus folyadékkristályokban.

A *fibráció* egy olyan folyamattal kapcsolatos, ahol egyik térképet egy másikra vetítünk, és ez a vetület megőrzi a topológiai struktúrát. Ennek megértéséhez képzeljünk el egy háromdimenziós gömböt, mint például egy hagyományos focilabdát, melyet egy *kettős fonott fonal* borít be. A kettős fonott fonal egy olyan alakzat, mint amikor két vékony *kötelet* összefonunk, minthogyha egy copfot készítenénk. A gömbön valójában minden egyes pont egy teljes kört (hurk) reprezentál. Ezek a hurkok nem keresztezik egymást, de együtt alkotják a gömb felületét. A *kötelek* spirálisan csavarodnak egymás körül, és egy hosszú, fonott struktúrát hoznak létre. A fonatban mindkét szál szorosan követi a másikat, soha nem keresztezik egymást, de együtt egy egységes, összefonódott mintát alkotnak. A *hopfionok* háromdimenziós topológiai struktúrák, amelyek bonyolultabb szerkezetűek, mint a *szkirmionok*. A *hopfionok* egyfajta „csomó” a térben, ahol a mezővonalak összefonódnak és zárt hurkokat alkotnak.

Egy konkrét példa a kettős fonott fonatra a Hopf-féle fibrációban a *Möbius-szalag* lehet. A Möbius-szalag egy olyan papírcsík, amelynek egyik végét fél fordulattal megcsavarják, majd összeillesztik a másik végével. Ezáltal a Möbius-szalagnak egyetlen oldala és egyetlen éle lesz. Ha most két Möbius-szalagot összefonunk, ez hasonló lenne a kettős fonott fonathoz. Ez a kettős fonott fonal a *Hopf-féle fibráció, egy érdekes topológiai szerkezetet*.

A *hopfionok* viszont olyan részecskék, amelyeknek különleges geometriai struktúrájuk van, nehezen bomlanak le. Ez a stabilitás a különleges topológiai tulajdonságaikból ered, amelyekben a molekulák vagy részecskék térbeli csavarodások és egy összefonódott hurkokból álló hálózat formájában jelennek meg. Ez a stabil struktúra teszi lehetővé alkalmazásukat az adattárolásban és az optikai eszközökben.

Tehát a *Hopf-féle fibráció matematikai szerkezet*, amely magasabb dimenziós terekben lévő objektumok szerkezetét, topológiáját írja le, míg a *hopfionok* konkrét *fizikai objektumok*, amelyek topológiai struktúrával rendelkeznek.

A *nematikus folyadékkristályokban* a molekulák rendezettsége és elrendeződése olyan mintázatokat hozhat létre, amelyek hasonlítanak a *Hopf-féle fibrációra*. A kutatóknak sikerült kísérletileg előállítani a Hopf-féle fibrációt nematikus folyadékkristályokban a pontszerű hibák irányításával.

A $+1/2$ és $-1/2$ diszklínációk kimutatása a folyadékkristályokban és a *szkirmionok* és *hopfionok* megfigyelése és topológiai struktúráiknak a vizsgálata és elemzése több módszerrel is lehetséges, különös figyelmet fordítva az optikai és mikroszkópos technikákra.

Az alábbiakban néhány példa látható a gyakran használt módszerekre.

Polarizált fény mikroszkópia: a polarizált fény segítségével megfigyelhetők a folyadékkristályokban kialakuló topológiai struktúrák, a *szkirmionok* és *hopfionok* illetve ezek szerkezete és orientációja.

Röntgen diffrakció: ez a technika lehetővé teszi az anyagok kristályszerkezetének vizsgálatát.

Elektronmikroszkópia: folyadékkristályokban kialakuló topológiai struktúrák, és nagy felbontású szerkezeti vizsgálatára is alkalmas.

Atomi erő mikroszkópia (Atomic Force Microscopy – AFM): egy nagyon magas felbontású pásztázószondás-mikroszkópia, amely lehetővé teszi az atomi és nanométeres skálájú felületi struktúrák vizsgálatát. Működésének alapelve az, hogy egy *mechanikus szonda (hegyes tű)* pásztázással mozog a minta felületén, és az atomi erők közötti kölcsönhatások alapján mérhetők a fizikai tulajdonságok az anyagok felületének és a folyadékkristályokban kialakuló topológiai struktúrák és azok elrendezésének nagy felbontású vizsgálata. Az AFM képes atomi szintű felbontású képeket készíteni.

Számítógépes szimulációk: lehetővé teszik a folyadékkristályokban kialakuló topológiai struktúrák modellezését. *Molekuláris dinamika (MD) szimulációk*: Ezek a szimulációk az egyes molekulák mozgását és kölcsönhatásait modellezzik, lehetővé téve a folyadékkristályok szerkezetének és dinamikájának részletes vizsgálatát. *Monte Carlo szimulációk*: Ezek a szimulációk statisztikai módszereket alkalmaznak a folyadékkristályok különböző konfigurációinak mintavételezésére és elemzésére, segítve a topológiai struktúrák kialakulásának megértését.

Gépi tanulás alkalmazása: a folyadékkristályok kutatásában azt jelenti, hogy *mesterséges intelligencia (MI)* alapú módszerek alkalmazása által lehetővé válik a folyadékkristályok jelenségeinek és tulajdonságainak elemzése, előrejelzése, különböző fizikai tulajdonságok és fázisátmenetek azonosítása, rendszerparaméterek, mint például a szabadenergia, a koleszterikus hullámhossz és az alkalmazandó elektromos tér erősségének a meghatározása. A gépi tanulási algoritmusok képesek nagy mennyiségű adatot feldolgozni és elemezni, amelyeket a folyadékkristályok kísérleti vizsgálataiban során gyűjtenek.

A *gépi tanulás alapú képfeldolgozó technikák* lehetővé teszik a folyadékkristályok mikroszkópos képeinek automatikus elemzését és osztályozását. Ez segíthet a kutatóknak gyorsan és pontosan azonosítani a különböző topológiai struktúrákat és hibákat. Ennek segítségével új folyadékkristályos anyagokat lehet felfedezni és tervezni, segíthet a folyadékkristályok viselkedésének előrejelzésében. Például a *szkirmionok* és *hopfionok* kialakulásában lehetővé teheti az optimális körülmények keresését és ezek lehetséges felhasználását különböző alkalmazásokban.

2025 januárjában szintén egy a gépi tanulás tárgykörébe tartozó kutatási eredmény a *Max Planck Intelligens Rendszerek Intézet (MPI-IS)*, a *Johannes Kepler Egyetem (JKU)* és a *Colorado Egyetem (CU Boulder)* egy közös közleményében jelent meg. Azt tanulmányozták, hogy az észlelés, a cselekvés és a tanulás alapelvei hogyan alkalmazhatók olyan autonóm rendszerekben, amelyek sikeresen kölcsönhatásba lépnek komplex környezetekkel. Az eredményeket a jövő mesterséges intelligens rendszereinek tervezéséhez lehet majd felhasználni. Kutatásuk a puha robotika tárgykörébe tartozik, ahol folyadékkristályokat is használhatnak.

Egy 2024-ben közölt tanulmányban – *Centro de Física Teórica e Computacional (Elméleti Fizikai és Számítástechnikai Központ) a Faculdade de Ciências (Természettudományi Kar) a Universidade de Lisboa-ban (Lisszabon, Portugália)* – szintén egy a gépi tanulási technika alkalmazására utaló leírás található. A kutatásban az ún. *konvolúciós neuronháló (convolutional neural network - CNN)* technikát alkalmazták a folyadékkristályok optikai textúráinak elemzésére, különösen a *szkirmionok* esetében. A *konvolúciós neuronháló* egy olyan típusú mesterséges neurális hálózat, amelyet kifejezetten képfelismerési és feldolgozási feladatokra terveztek.

A képfeldolgozás módszerei is jelentős mértékben hozzájárulhatnak a *szkirmionok* és *hopfionok* megértéséhez a folyadékkristályokban. A képfeldolgozás lehetővé teszi, hogy vizualizálják és elemezzék ezeket a komplex topológiai struktúrákat, ami segít a szerkezetük és viselkedésük jobb megértésében.

Ilyen képfeldolgozási módszerek:

- *mikroszkópos képalkotás*: a mikroszkópos technikák, mint például a polarizált fény mikroszkópia és a pásztázó elektronmikroszkópia, lehetővé teszik a folyadékkristályok szerkezetének részletes vizsgálatát;
- *képfeldolgozó algoritmusok*: a gépi tanulási algoritmusok és a képfeldolgozó technikák kombinációja lehetővé teszi hogy automatikusan felismerjék és elemezzék a szkirmionokat és hopfionokat a képeken;
- *textúraelemzés*: a textúraelemzési technikák segítenek azonosítani a folyadékkristályok szerkezetének finom részleteit és mintázatait, amelyek a topológiai struktúrák kialakulását jelzik;
- *szegmentáció és észlelés*: a képfeldolgozó algoritmusok képesek azonosítani és szegmentálni a képeken található topológiai struktúrákat, ezáltal könnyebbé téve azok kvantitatív elemzését.

4.2. Szkirmionok és hopfionok alkalmazásai

4.2.1. A szkirmionok és hopfionok folyadékkristályokban

Néhány ismert anyag, amelyben kimutatták a szkirmionok vagy hopfionok jelenlétét: *koleszterikus folyadékkristályok*: koleszterol-származékokban, *koleszteril nonanoát*; *nematikus folyadékkristályok*, egy gyakran használt nematikus folyadékkristály a *4-ciano-4'-pentilbifenil*.

Ezek az anyagok különleges optikai tulajdonságokkal rendelkeznek, például a molekuláris struktúrában dinamikusan átrendezhető ún. *vortex vonalak* jöhetnek létre. A *vortex topológia* fontos szerepet játszik a folyadékkristályok és a *spintronika* közötti kapcsolatokban. A *vortex vonal egy olyan topológiai struktúra*, amelyben az anyag molekulái vagy részecskéi *körkörös mintázatot* alkot. Ezek a vonalak stabilak és nehezen megsemmisíthetők, ez a tulajdonság lehetővé teszi olyan innovatív optikai eszközök fejlesztését, mint például:

- **nanorácsok**: ezekben a különböző hullámhosszúságú fények különböző módokban tükrözhetők;
- **optikai szűrők**: ezek a folyadékkristályok különböző színű fények szűrésére használhatók, ez különösen hasznos lehet a mikroszkópia és a spektroszkópia területén;
- **lézerek**: a *szkirmionok és hopfionok* különleges optikai tulajdonságai lehetővé teszik használatukat lézerekben is a *fénytágítás* által. A *fénytágítás fogalma* az optikai rendszerekben a fénycsoporthullámok térbeli terjedésének a módját jelenti, lehetővé téve a lézercsoporthullám fókuszálását és irányítását különböző alkalmazásokban. A *fénytágítást* használják az több ismert optikai adattároló eszközben, például DVD-ben és Blu-ray lemezekben.

4.2.2. Adattárolás

A *szkirmionok és hopfionok* különleges tulajdonságaik miatt és az alacsony energiafogyasztásuk és a nagy strukturális stabilitásuk lehetővé teszi felhasználásukat nagy sűrűségű és energiatakarékos adattároló eszközökben. Az ilyen típusú adattároló eszközök képesek lehetnek *millió nagyságrendű bitsűrűséget* elérni, ami jelentősen meghaladja a jelenlegi technológiák képességeit. Így lehetővé válik nagyobb mennyiségű adat takarékosabb és hatékonyabb tárolására, ami különösen fontos a modern információk technológiák és alkalmazások esetében. Ugyanakkor lehetővé teszik az információ hosszú távú megőrzését kisebb energiafogyasztással. A *hopfionok* lehetőséget adnak a jövő kvantumszámítógépeinek a kifejlesztésére, különösen az *anyag qubitok* területén, amelyek stabilitást és hosszú élettartamot biztosíthatnak. [13]

4.2.3. Spintronika

A *spintronika* olyan új perspektivikus iparág, amely az elektronok spinjét használja fel az adatok tárolására és feldolgozására. Így a *szkirmionok és hopfionok spintronikai eszközökben* is alkalmazhatók, mivel a *szkirmion* kvázirészecskék stabil állapotban maradnak az áramlásuk során. E tulajdonság lehetővé teszi a hatékonyabb és gyorsabb *spintronikai eszközök* fejlesztését. Ezek az eszközök az elektronok spinjét használják fel az információ tárolására és feldolgozására.

A folyadékkristályok és a *spintronika* kombinációja ígéretes lehetőségeket rejt magában, különösen az optikai eszközök és érzékelők fejlesztése terén. Az optikai spintronikai eszközökben, ahol a fény és a spin kölcsönhatása játszik szerepet. A fotonikus kristályok és a folyadékkristályok kombinációja lehetővé teszi a spin-alapú optikai eszközök létrehozását, amelyek új lehetőségeket nyitnak az adattárolás és adattárolás terén.

4.3. Fény manipulálása

A folyadékkristályok képesek a fény manipulálására, mely az optikai rendszerek és technológiák egyik kulcsfontosságú területe, ez lehetővé teszi innovatív optikai eszközök kifejlesztését. A folyadékkristályok segítségével egyedi ún. *vortex vonalakat* lehet létrehozni, amelyek dinamikusán átrendezhetők külső elektromos mezők hatására.

Ilyen felhasználási terület az optikai modulátorok ahol a folyadékkristályok a fény intenzitásának, fázisának vagy frekvenciájának manipulálására használhatók. Vagy az orvosi képalkotó technológiákban, mint például a MRI és a CT esetében, ahol a fény manipulálásával az emberi test belső szerkezetének feltérképezése a cél.

4.4. Bioszenzorok

A *folyadékkristályos bioszenzorok* egyre nagyobb szerepet kapnak a *biológiai folyamatok detektálásban*. Ezek az érzékelők kihasználják a folyadékkristályok érzékenységet a környezeti változásokra, például a hőmérsékletre, a pH-ra és a *biomolekulák* jelenlétére, lehetővé téve specifikus biomolekuláris interakciók detektálását.

Az ilyen *bioszenzorok* értékesek lehetnek az orvosi diagnosztikában és a környezeti monitorozásban. A *biomolekulák* olyan az élő szervezetekben található molekulák, amelyek alapvető szerepet játszanak az élet fenntartásában és működésében. Ezek a molekulák négy fő kategóriába sorolhatók: *fehérjék, nukleinsavak, szénhidrátok, lipidek*.

A *folyadékkristályos bioszenzorok* használhatók különböző betegségek diagnosztizálására, például vírusok, baktériumok és rákos sejtek kimutatására, mivel gyors és pontos eredményeket biztosítanak, ami lehetővé teszi a korai diagnózist és a hatékony kezelést.

Amikor egy *célmolekula*, például egy vírus vagy baktérium, *kölcsönhatásba lép a folyadékkristályllyal*, az optikai tulajdonságok megváltoznak, amit könnyen detektálni lehet. Bizonyos mikroorganizmusok elektromos vagy mágneses mezőt is generálhatnak, amely befolyásolja a folyadékkristályok orientációját és rendeződését. A mikroorganizmusok által kibocsátott anyagok, például enzimek vagy toxinok, kémiai reakciókat idézhetnek elő a folyadékkristálllyal, ami szintén módosíthatja az optikai tulajdonságokat.

A folyadékkristályos bioszenzorok felületét speciális receptorokkal lehet bevonni, amelyek specifikusan kötődnek a célmolekulákhoz, ezáltal a folyadékkristály szerkezete megváltozik, ami optikai jelet generál.

Ugyiszintén alkalmazhatók a környezeti szennyező anyagok, például nehézfémek és szerves szennyeződések kimutatására, gyorsan és pontosan mérhetők a környezeti változások vagy használhatók az élelmiszerekben található káros anyagok, például toxinok és patogének kimutatására, lehetővé téve az élelmiszerek biztonságának ellenőrzését.

A *folyadékkristályok molekuláris szerkezete érzékenyen reagál a környezet változásaira*. Amikor egy szennyező anyag, például egy nehézfém vagy szerves vegyület, *kölcsönhatásba lép a folyadékkristálllyal*, az optikai tulajdonságok megváltoznak. Ezek a változások könnyen detektálhatók, például a szín vagy a fénytörés megváltozásával.

4.5. Deuterált folyadékkristályok

A kutatóknak sikerült deuterált folyadékkristályokat is szintetizálni a fotokémiai stabilitás javítása érdekében. A deuterált folyadékkristályok olyan folyadékkristályok, amelyekben a hidrogén atomokat deutérium atomokkal helyettesítik. Ezeket gyakran használják különböző kutatásokban és alkalmazásokban, különösen a mágneses rezonancia képalkotásban (MRI) és a nukleáris mágneses rezonancia (NMR) spektroszkópiában, mivel a deutériumnak különböző fizikai tulajdonságai vannak, mint a hidrogénnek.

Ezek az anyagok mivel *deutérium atomokat* tartalmaznak, fokozott ellenállást mutatnak a *fotodegradációval* szemben, miközben megőrzik jó optikai tulajdonságaikat, lehetővé téve hosszabb élettartamú és megbízhatóbb optikai eszközök fejlesztését. A *fotodegradáció* olyan kémiai folyamat, amely során a fény, különösen az ultraibolya (UV) sugárzás hatására bizonyos anyagok lebomlanak vagy kémiailag megváltoznak.

4.6. Aktív topológiai hibák

Az aktív rendszerek *aktív lágy anyagokat* használnak, ez által különböző optimalizálási feladatok végrehajtására kínálnak lehetőséget egyéb számítások és információk továbbítására. Az *aktív lágy anyagok* olyan anyagok, amelyek képesek önálló mozgásra vagy alakváltozásra külső inger hatására. Ez a jelenség lehetővé teszi *topológiai hibák információhordozóként* való felhasználását, új lehetőségeket nyitva logikai műveletek és az információátvitel terén.

Optimalizálási feladatok például *útvonaltervezés, erőforrás-menedzsment* vagy *adatelosztás* megvalósítása. *Valós idejű adatfeldolgozás*, melyben az aktív rendszerek képesek szenzorok adatainak valós idejű gyűjtésére, feldolgozására és elemzésére.

Az aktív rendszerek használhatók a *kiterjesztett valóság* vagy másnéven *augmentált valóság* (*augmented reality, AR*) a *valóság* egyfajta *virtuális (látszólagos)* alapú alkalmazására, például játékokhoz vagy tréning szimulációkhoz, ahol a valós idejű számítások segítenek a felhasználói élmény fokozásában.

A Chicagói Egyetemen a Pritzker School of Molecular Engineering kutatói új módszert fedeztek fel a *folydékkristályok felhasználására a számítástechnikában*. Olyan, a folydékkristályokban megjelenő *aktív topológiai hibákat* használták, amelyek logikai műveleteket végrehajtására alkalmasak. Topológiai hibák dinamikáját és azok mozgását vizsgálták *aktív nematikus folydékokban*. Ezek az *aktív topológiai hibák olyan hibák*, amelyek dinamikusan változnak és kölcsönhatásba lépnek a környezetükkel. Ezek vizsgálata fontos szerepet játszik a általában a modern anyagtudományban és a fizikai kutatásokban. [14]

Az *aktív nematikus folydékok* elnevezése az angol szakirodalomból származik, ahol először említették ezt a fogalmat. Az elnevezés maga a *active nematic fluids* kifejezésből ered, amely a *nematikus folydékok (nematic fluids)* és az *aktív részecskerendszerek (active particle systems)* összefüggését jelöli. Az aktív nematikus folydékok olyan anyagok, amelyekben a molekulák nem csak passzív módon, hanem aktívan mozognak és kölcsönhatnak egymással, például elektromos terek hatására

Ez az új módszer hozzájárulhat a hatékonyabb és gyorsabb számítástechnikai rendszerek kialakításához. Az új fejlesztés az első a maga nemében, és a számítások végrehajtásának vadonatúj módjához vezethet. Bár az új technika *nem eredményez azonnal tranzisztorokat vagy számítógépeket*, de nagyban hozzájárulhat az új funkciókkal rendelkező eszközök létrehozásához a számítástechnika, az érzékelés és a robotika területén. Ez nem azt jelenti, hogy a tranzisztorok és a számítógépek anyagát fogják ilyen technológiával kiváltani, sokkal inkább arról van szó, hogy a kutatók új utakat nyitnának az érzékelésre alkalmas műszerek vagy más robotikai eszközök fejlesztése terén.

4.7. Aktív lágy anyagok

Aktin alapú nematikus folydékkristályok: az aktin filamentumok, hosszú, vékony szálak, melyek hossza változó, de általában méretük *1–10 mikrométer* között változik és önálló mozgásra és alakváltozásra képesek. Az *aktinok olyan fehérjék*, a sejt váz (citoplazmatikus váz) alapvető komponensei, amelyek fontos szerepet játszanak a sejtek szerkezetének és mozgásának fenntartásában. Ezek az anyagok különösen hasznosak lehetnek a biológiai rendszerek modellezésében és az autonóm eszközök fejlesztésében.

Mikrotubulus alapú nematikus folydékkristályok: Ezek az anyagok különösen érdekesek a sejt bázisú rendszerek és az autonóm eszközök fejlesztésében. A mikrotubulusok a sejt váz (citoplazmatikus váz) fontos komponensei, amelyek hosszú, üreges csövekből állnak.

Baktérium alapú élő nematikus folydékkristályok: A baktériumok és passzív folydékkristályok kombinációja lehetővé teszi az önálló mozgást és alakváltozást. Ezek az anyagok különösen hasznosak lehetnek az autonóm rendszerek és eszközök fejlesztésében.

Az aktív nematikus folydékokban az aktív részecskék gyakran $+1/2$ és $-1/2$ *diszklínációkat* alkotnak. Ezek a diszklínációk különböző topológiai töltéssel rendelkeznek, és különféle viselkedési módokat mutathatnak és különböző mintázatok kialakulásához vezethetnek.

A $+1/2$ *diszklínációk* gyorsabban mozoghatnak és foroghatnak, mert az aszimmetrikus alakjuk miatt kevesebb ellenállással találkoznak a közegben. Ezzel szemben a $-1/2$ *diszklínációk* lassabban mozognak és összetettebb mozgási mintákat mutatnak. Az elektronok mozgásához hasonlítva, a $+1/2$ *diszklínációk* inkább a gyorsan mozgó szabad elektronokra, míg a $-1/2$ *diszklínációk* az ellenállásba ütköző elektronokra emlékeztetnek. A diszklínációkban rejlő potenciál izgalmas alkalmazásokra adhat lehetőséget mint pld. *hibakapukat, alagutakat és erősítőket* hozhatnak létre segítségükkel.

4.8. A topológiai hibák alkalmasak logikai műveletek végrehajtására

Hibakapuk: Az aktív topológiai hibák segítségével hibakapukat lehet létrehozni, amelyek hasonlóan működnek a hagyományos tranzistoros logikai kapukhoz, például az *AND*, *OR* és *NOT* kapukhoz. Az aktivitási minták és a felületek orientációja kombinálható a $+1/2$ hibák kialakulásának és szállításának irányítására, lehetővé téve a logikai műveletek végrehajtását.

Hibaalagutak: Az aszimmetrikus magas és alacsony aktivitási minták hatékony hibaalagutakat hozhatnak létre, amelyek lehetővé teszik a $+1/2$ hibák hosszú távú szállítását. Ez a folyamat hasonló az elektronok kollektív mozgásához szilárd anyagokban, ahol az elektronok hatékonyan mozognak hosszú távolságokon keresztül.

Hibaerősítők: Az aktív topológiai hibák segítségével hibaerősítőket is létre lehet hozni, amelyek hasonlóan működnek az elektronikus rendszerekben használt erősítőkhöz. Az aktív stressz hatására a $+1/2$ hibák önállóan mozoghatnak, és új hibák keletkezhetnek, amelyek lehetővé teszik a hibák hatékony szállítását és erősítését.

Hibák irányítása: Az aktivitási minták és a felületek orientációja kombinálható a $+1/2$ hibák kialakulásának és szállításának irányítására.

Az első eredmények arra utalnak, hogy jóval összetettebb műveletek végrehajtására alkalmas szerkezeteket is ki lehet majd alakítani. A kutatók arra is igyekeztek választ találni, hogy a folyadékkristályokban lévő foltszerű régiók milyen módon ütköznek egymásnak, ugyanis ezt a kvázi *topológiai hibát esetleg információátvitelre is lehetne használni – ahhoz hasonló módon, ahogy az elektronok áramlanak egy számítógép áramköreiben.*

Az ötlet meglehetősen szokatlan, hiszen folyadékkristályos megoldások eddig főleg kijelzőkhöz voltak kötve, de mint látható más technológiai lehetőségek is rejlenek bennük.

Ahhoz, hogy az elképzelés egyszer a gyakorlatban is működjön, a kutatóknak ki kellett találniuk, hogy hogyan irányítsák a folyadékkristályban mozgó régiókat. Meghatározott fénybesugárzással a folyadékkristályban mozgó régiókat úgymond *terelgetni* lehet – mivel az elektronokhoz hasonló tulajdonságokkal rendelkeznek – olyan műveletek dolgozzanak ki, amikre egy számítógép áramkörei képesek.

5. A FOLYADÉKKRISTÁLYOKKAL VÉGZETT LOGIKAI MŰVELETEK GYAKORLATI MEGVALÓSÍTÁSA

A logikai kapukkal végzett műveletek megvalósítási folyamata több lépésből áll.

Folyadékkristály kiválasztása: Olyan típus kiválasztása, amely alkalmas a kívánt logikai műveletek elvégzésére. A leggyakrabban használt típusok a *nematikus* és a *ferroelektromos* folyadékkristályok.

Elektromos mező alkalmazása: A folyadékkristályok állapotát elektromos mező alkalmazásával lehet változtatni. Az elektromos tér hatására a folyadékkristályok molekulái átrendeződnek, ami megváltoztatja az optikai tulajdonságaikat.

Logikai kapuk kialakítása: A logikai kapuk kialakításához különböző konfigurációkban kell elhelyezni a folyadékkristályokat és az elektromos mezőket. Például az *AND* kapu esetében két bemeneti jel hatására a folyadékkristályok állapota megváltozik, és a kimeneti jel csak akkor lesz igaz, ha mindkét bemenet igaz.

Áramkör tervezése: az áramkörök tervezése során figyelembe kell venni a folyadékkristályok tulajdonságait és az elektromos terek hatását, hogy a kívánt logikai műveletek elvégezhetők legyenek.

Prototípus készítése és tesztelése: Az áramkörök tervezése után prototípust kell készíteni, és tesztelni kell annak működését. A tesztelés során ellenőrizni kell, hogy a logikai műveletek megfelelően működnek-e, és szükség esetén módosításokat kell végezni.

A folyadékkristályok logikai műveletekben történő alkalmazására már vannak konkrét gyakorlati eredmények, melyek azt mutatták, hogy ezek az áramkörök stabilak, megbízhatóak, és képesek voltak a tervezett logikai műveletek végrehajtására.

5.1. NLC alapú logikai kapuk működése

Elektromos tér alkalmazása: elektromos tér hatására az NLC réteg molekuláinak megváltozik az orientációja, amely befolyásolja a fényáteresztést, lehetővé téve a logikai állapotok (*0* és *1*) létrehozását.

Fényáteresztés szabályozása: a molekulák orientációjának változása befolyásolja a fényáteresztést. Elektromos tér alkalmazásával a fényáteresztés változtatható, ami lehetővé teszi a logikai műveletek végrehajtását. Az NLC alapú kapuk különösen hasznosak optikai eszközökben és kijelzőkben, ahol a fényáteresztés szabályozása fontos.

Logikai műveletek: elektromos tér és a fényáteresztés szabályozásával különböző logikai műveletek, például *AND*, *OR* és *NOT* (*ÉS*, *VAGY*, *NEM*) műveletek végezhetők el. Az elektromos tér alkalmazásával a nematikus folyadékkristályok molekulái elfordulnak, ami megváltoztatja a fényáteresztést és ez által a logikai állapotokat.

AND (ÉS) kapu: az AND kapu két bemeneti jelet fogad, és csak akkor ad ki egy jelet, ha mindkét bemeneti jel egyaránt aktív (*logikai „1” állapotban van*). Amikor két bemeneti elektromos jel érkezik, a nematikus folyadékkristályok molekulái elfordulnak és ennek hatására az optikai tulajdonságok megváltoznak a fényáteresztés csak akkor lesz maximális, ha mindkét bemenet magas (*logikai „1” állapot*), ez az AND műveletet valósítja meg.

OR (VAGY) kapu: a működés hasonló elven alapul, mint az *AND kapu* esetében, de a bemeneti jelek eltérően működnek. Az *OR kapu* két bemeneti jelet fogad, és a kimeneti jel akkor lesz aktív (*logikai „1” állapotban*), ha legalább az egyik bemeneti jel aktív.

Amikor egyik vagy mindkét bemeneti elektromos jel aktív, az elektromos tér befolyásolja a folyadékkristályok molekuláinak orientációját. *Egy bemeneti jel* esetén az egyik bemeneti jel hatására a folyadékkristályok részlegesen elfordulnak, megváltoztatva az optikai tulajdonságokat. *Mindkét bemeneti jel* esetén, ha mindkét bemeneti jel aktív, az elektromos tér intenzívebb hatást gyakorolhat, és a folyadékkristályok nagyobb mértékben fordulhatnak el, ami további változást eredményez az optikai tulajdonságokban.

A *NOT (NEM) kapu* esetében a kimeneti jel mindig ellentétes a bemeneti jellel. Azaz, ha a bemeneti jel *logikai „1” állapotban van*, a *kimeneti jel logikai „0” állapotban lesz*, és fordítva.

Bemeneti jel logikai „1”: ha a bemeneti elektromos jel aktív, akkor elektromos tér alakul ki, amely elfordítja a folyadékkristály molekuláit egy bizonyos irányba. Ez az elfordulás megváltoztatja a kristály optikai tulajdonságait.

Bemeneti jel logikai „0”: ha a bemeneti elektromos jel inaktív, az elektromos tér megszűnik, és a folyadékkristály molekulái visszatérnek az eredeti helyzetükbe. Ez a folyamat biztosítja, hogy a kimeneti optikai tulajdonságok mindig ellentétesek legyenek a bemeneti jel hatására bekövetkező változásokkal.

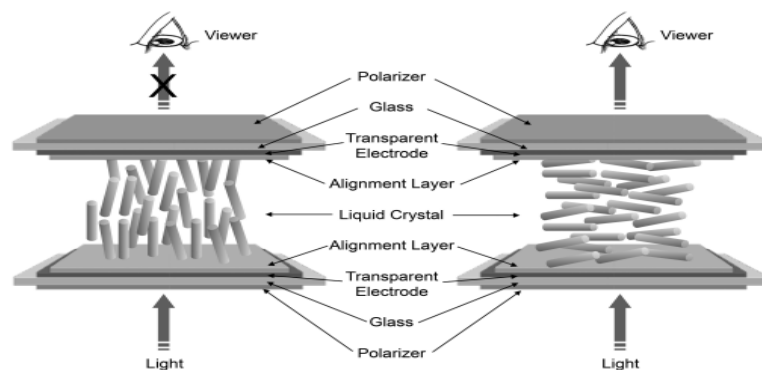
5.2. NLC alapú logikai kapuk felépítése [27]

Elektródák: Az NLC alapú logikai kapukban átlátszó vezető anyagokból, például *indium-ón-oxidból (ITO)* készült elektródákat használnak melyek lehetővé teszik az elektromos tér alkalmazását az NLC rétegre. *Elektróda mérete:* általában néhány mikrométertől néhány tíz mikrométerig terjedhet. Az elektródák mérete befolyásolja a kapuk működését és hatékonyságát.

NLC réteg: Az NLC réteg a két elektróda között helyezkedik el. Az NLC molekulák hosszú, pálcika alakúak és párhuzamosan rendeződnek, de a molekulák tömegközéppontjai nem mutatnak rendezettséget. *Rétegvastagság:* Az NLC rétegek vastagsága általában 1-10 mikrométer között van. Ez a vastagság lehetővé teszi a gyors válaszidőt és a kiváló optikai tulajdonságokat.

Szubsztrátok: Az NLC réteget általában üveg vagy műanyag szubsztrátok közé helyezik, amelyek biztosítják az eszköz mechanikai stabilitását és átlátszóságát.

Kijelző mérete: Általában az NLC alapú logikai kapuk kijelzőkbe integrálódnak, amelyek mérete néhány centimétertől több tíz centiméterig terjedhet, attól függően, hogy milyen alkalmazásra használják őket. Maga a nematikus folyadékkristályos (NLC) alapú logikai kapuk *mérete* számos tényezőtől függ, az alkalmazott technológiától és a konkrét alkalmazástól. A méretük általában a *mikrométeres* tartományban van, mivel a folyadékkristályos anyagok vékony rétegekben kerülnek alkalmazásra. (5. ábra)



5. ábra. Folyadékkristályos kijelző szerkezeti felépítése [27]

5.3. NLC alapú logikai kapuk és a szilícium alapú logikai kapuk működésének összehasonlítása

A nematikus folyadékkristályok (NLC) alapú logikai kapuk és a hagyományos szilícium alapú logikai kapuk alkalmazása különböző előnyökkel és hátrányokkal rendelkezik.

A működési elv szerint: az NLC alapú kapuk működése az elektromos tér hatására történő *molekuláris orientációváltozáson* alapul, míg a szilícium alapú kapuk a *tranzisztorok* működési elvén alapulnak. A tranzisztorok képesek az áram áramlását be- és kikapcsolni, ezeket összekapcsolva különböző logikai kapuk, mint például az *AND*, *OR*, és *NOT* kapuk, építhetők fel. Ezek a kapuk alapvető építőelemei a digitális áramköröknek.

Az energiafogyasztás szerint: az NLC alapú kapuk alacsonyabb energiafogyasztással rendelkeznek, mely általában a *nanowatt (nW)* és *microwatt (μW)* tartományban van, attól függően, hogy milyen konkrét alkalmazásban használják, de ez az változhat a kapuk méretétől, a folyadék sebességétől és a környezeti feltételektől függően. A szilícium alapú kapuk energiafogyasztása is változó lehet, az alkalmazott technológiától és a kapuk méretétől függően változhat, és általában a *nanowatt (nW)* és *microwatt (μW)* tartományban van.

Tehát a nematikus folyadékkristály (NLC) alapú kapuk energiafogyasztása összevethető a szilícium tranzisztoros kapukéval.

A működési sebesség szerint: a szilícium alapú kapuk gyorsabb válaszidővel rendelkeznek, ennek értéke *nanoszekundum (ns)* és *mikroszekundum (μs)* tartományban van, attól függően, hogy milyen konkrét kapukról van szó és milyen körülmények között működnek. A modern digitális logikai kapuk, mint például a *CMOS kapuk*, gyakran *1-2 ns* válaszidővel rendelkeznek.

Az NLC alapú kapuk válaszüze lassúbb, mivel a molekuláris orientációváltozás több időt vesz igénybe, általában *nanoszekundumok (1-100 ns)* és *mikroszekundumok (1-1000 μs)* tartományban van. Az exakt válaszidő az adott kapuk méretétől és a környezeti feltételektől függ. A modern kutatások és fejlesztések során az NLC alapú kapuk válaszüze jelentősen javult, és egyes esetekben akár *nanoszekundum (ns)* is lehet.

Alkalmazások szerint: az NLC alapú kapuk különösen optikai eszközökben és kijelzőkben hasznosulnak, míg a szilícium alapú kapuk széles körben alkalmazhatók a számítógépes rendszerekben és más elektronikai eszközökben.

A nematikus folyadékkristályok (NLC) alapú logikai kapuk számos gyakorlati alkalmazással rendelkeznek, különösen az optikai és elektronikai eszközök területén például:

Optikai számítógépekben: ahol a fény alapú adatfeldolgozás gyorsabb és hatékonyabb lehet, mint a hagyományos elektronikus rendszerekben. [17]

Kijelzőkben: ahol a fényáteresztés szabályozása lehetővé teszi a képek és szövegek megjelenítését.

Érzékelőkben: ahol a fényáteresztés változása jelezheti a környezeti paraméterek változását, például hőmérsékletet vagy nyomást.

Adatátvitelben: ahol a fény alapú adatátvitel gyorsabb és megbízhatóbb lehet, mint a hagyományos elektronikus adatátvitel.

Holografikus adattárolásban: ahol a fény alapú adattárolás nagyobb kapacitást és gyorsabb hozzáférést biztosíthat.

Az NLC alapú logikai kapuk alkalmazása más iparágakban és technológiákban is megtalálható, mint pld. biomedikai eszközökben, kommunikációs- és biztonsági rendszerekben, környezeti érzéklőkben és energia átalakító eszközökben.

6. NÉHÁNY ÉRDEKESSÉG A FOLYADÉKKRISTÁLYOKKAL KAPCSOLATOS ÚJ KUTATÁSOKBÓL

A folyadékkristályos technológiák terén számos izgalmas jövőbeli trend várható, amelyek jelentős előrelépéseket hozhatnak, íme néhány főbb irány:

Programozható fotonikus chipek: a folyadékkristályos technológia és a fejlett mikroelektromechanikai rendszerek lehetővé teszik az újraprogramozható áramkörök használatát. Ezek a chipek több funkciót is támogatnak majd, és jelentősen felgyorsítják a jövőbeli fotonikai chipek fejlesztési ciklusát. A fotonikai chipek egy új technológiai ágat képviselnek, mert az adatfeldolgozáshoz és kommunikációhoz fényt (fotonokat) használnak elektronok helyett.

2024-ben az első programozható, univerzális és többfunkciós fotonikus chipet a *Valenciai Politechnológiai Egyetem (UPV)* és az *iPronics* vállalat fejlesztette ki.

A folyadékkristályok fontos szerepet játszhatnak a fotonikus technológiákban. Például a folyadékkristályos technológia és a mikroelektromechanikai rendszerek (*Micro-Electro-Mechanical Systems - MEMS*) kombinációja lehetővé teszi az újraprogramozható fotonikus áramkörök létrehozását. Ezek az áramkörök képesek a fényjelek kapcsolására, felosztására és szűrésére, ami különösen hasznos lehet a bioérzékelésben, orvosi technológiákban és információfeldolgozásban. A folyadékkristályok optikai tulajdonságai, például a kettőtörés és a polarizáció szabályozása, lehetővé teszik a fény irányítását és modulálását. Ezért a folyadékkristályok alkalmazása a fotonikus chipekben segíthet az energiahatékonyság növelésében és a méretek csökkentésében.

2025-ben a legfrissebb felfedezések közé tartozik a *ferroelektromos nematikus folyadékkristályok felfedezése*. Magyar kutatók a *HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban* fedeztek fel egy új anyagállapotot, amelyben a folyadékcseppek elektromos mező hatására aktívan mozgó, egymással kölcsönható részecskékként viselkednek. A HUN-REN kutatói megfigyelték, hogy a ferroelektromos nematikus folyadékcseppek felülete elektromos mezőben instabillá válik, és fraktálszerű folyadéknúlványok alakulnak ki. Ez a jelenség új utakat nyit a precíziós technológia világában, és gyakorlati alkalmazásokat biztosít az orvosi diagnosztikában, a kémiai analízisben és a biotechnológiában. [16]

LCD-evolúció: az LCD-kijelzők folyamatos fejlődése várható, beleértve a nagyobb felbontású, színes és interaktív kijelzőket. Az új anyagok és technológiák alkalmazása tovább javíthatja a kijelzők teljesítményét és megbízhatóságát.

Energiahatékonyság: a folyadékkristályos technológiák energiahatékonyságának növelése kiemelt cél. Az alacsonyabb energiafogyasztású eszközök fejlesztése hozzájárulhat a fenntarthatóbb technológiai megoldásokhoz.

Integráció más technológiákkal: a folyadékkristályos technológiák integrálása más fejlett technológiákkal, például optikai számítógépekkel és kvantumszámítógépekkel, új lehetőségeket nyithat meg az adatfeldolgozás és az adattárolás terén.

Ezek a trendek hozzájárulhatnak ahhoz, hogy a folyadékkristályos technológiák a jövőben még hatékonyabbak és sokoldalúbbak legyenek.

7. FOLYADÉKKRISTÁLYOS LOGIKAI ÁRAMKÖRÖK KUTATÁSA ÉS FEJLESZTÉSE

Világszerte több neves laboratóriumban folynak idevonatkozó kutatások és fejlesztések.

University of Cambridge, Department of Engineering: a kutatók folyadékkristályokat használnak logikai áramkörök létrehozására, különös tekintettel az alacsony energiafogyasztású és nagy sebességű alkalmazásokra. A kutatások a folyadékkristályok alkalmazásáról és a holografikus rendszerek fejlesztéséről szólnak.

Harvard University, School of Engineering and Applied Sciences: a kutatások a folyadékkristályok különböző típusainak logikai áramkörökben való alkalmazására összpontosítanak, beleértve a nematikus és ferroelektromos folyadékkristályokat.

MIT Media Lab: innovatív megoldások fejlesztése a folyadékkristályos logikai áramkörök területén, különös tekintettel az új anyagok és technológiák alkalmazására.

University of Chicago Pritzker School of Molecular Engineering: új topológiák létrehozása, megvalósítása. [14]

Max Planck Intézet és a Technische Universität München kutatói számos fontos felfedezést tettek a folyadékkristályok szerkezetének és dinamikájának megértésében.

University of Paris XI (Orsay) és a École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la Ville de Paris (ESPCI) új anyagok és technológiák fejlesztése a cellulóz-alapú folyadékkristályok és a fotonikus alkalmazások terén.

Lausanne-i Szövetségi Műszaki Egyetem (EPFL) kutatások folyadékkristályok alkalmazására az optikai kommunikáció és az orvosi képalkotás terén.

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban, BME.TTK kutatói is jelentős eredményeket értek el a folyadékkristályok kutatásában. Például a különleges halmazállapotú folyadékkristályok tanulmányozása terén. [16]

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] 125 Years of Liquid Crystal Research , Karlsruhe Technical University https://www.kit.edu/kat/english/pi_2014_15803.php (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [2] A folyadékkristály állapot 1. <https://emt.ro/sites/default/files/archivum/2017-12/firka1-1992-1993.pdf> (Utolsó letöltés: 2025. 02.10).
- [3] A folyadékkristály állapot 2. <https://emt.ro/sites/default/files/archivum/2017-12/firka2-1992-1993.pdf> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [4] Folyadékkristály-televíziók – a 21. század képernyői, *Fizikai Szemle* 56, 123 (2006) <https://fizikai-szemle.elft.hu/archivum/fsz0604/EberN.pdf> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [5] How to make a 'computer' out of liquid crystals. <https://www.sciencedaily.com/releases/2022/03/220302092732.htm> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [6] It's official — LCD TVs will see further development <https://www.tomsguide.com/news/its-official-lcd-tvs-wont-see-any-further-development> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [7] Introduction to topological defects: from liquid crystals to particle physics <https://link.springer.com/article/10.1140/epjs/s11734-023-00803-x> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [8] Logic operations with active topological defects <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.abg9060> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [9] https://hun-ren.hu/tudomanyos_hirek/wigner-ferroelektromos-nematikus-salamon-peter-108173 (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [10] Electrically activated ferroelectric nematic microrobots <https://www.nature.com/articles/s41467-024-50226-y> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [11] Defect-mediated dynamics of coherent structures in active nematics <https://www.nature.com/articles/s41567-023-02062-y?fromPaywallRec=true> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [12] Topological chaos in active nematics <https://www.nature.com/articles/s41567-019-0600-y> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [13] A jövő memóriatárolása felé egy lépéssel – először figyelték meg hopfionok keletkezését [A jövő memóriatárolása felé egy lépéssel – először figyelték meg hopfionok keletkezését - Raketa.hu](https://raketa.hu/ajovo-memoriatarolasa-fele-egy-lepesseel-eloszor-figyelték-meg-hopfionok-keletkezését) (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [14] Liquid crystals research – University of Chicago's Pritzker School of Molecular Engineering (PME) <https://pme.uchicago.edu/search?query=Liquid%20crystals%20research> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [15] Skyrmion spin ice in liquid crystals <https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.126.047801#> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [16] Különleges halmazállapotú ferroelektromos-nematikus-folyadékkristályok https://hun-ren.hu/tudomanyos_hirek/wigner-ferroelektromos-nematikus-salamon-peter108173 <https://tudomanyplaza.hu/kulonleges-halmazallapotu-ferroelektromos-nematikus-folyadékkristályok/> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [17] Collins, Stuart : Application Of Liquid Crystals To Optical Logic Gates , *Liquid Crystal Chemistry, Physics, and Applications*, (25 July 1989): [Application Of Liquid Crystals To Optical Logic Gates](#) (Utolsó letöltés: 2025.02.10).

- [18] Gray, G. W.: *Molecular Structure and the Properties of Liquid Crystals* (Academic Press, New York, 1962)
- [19] de Gennes, Pierre-Gilles : *The Physics of Liquid Crystals* (Clarendon Press, 1974)
- [20] Ritvay K. , Pintér K.: *Folyadékkristályok kémiaja I.* (Központi Fizikai Kutató Intézet, Budapest, 1973)
- [21] Selinger S. , Schwartz R. : *A folyadékkristályok* (Tudományos és Enciklopédiai Könyvkiadó, Bukarest, 1983)
- [22] Véghely-Seyfried-Faragó: *Folyadékkristályos kijelzők a gyakorlatban* (Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984)
- [23] Bata L.: *Folyadékkristályok* (Műszaki KK. Budapest, 1986)
- [24] Plévert L.: *Pierre-Gilles de Gennes. A Life in Science* (World Scientific, New Jersey. 2011).
- [25] Petrovszki B.: *Folyadékkristályok a kémia és a fizika metszéspontján* (Typotex Elektronikus Kiadó, Budapest, 2012)
- [26] *International Liquid Crystal Conference, ILCC* <https://ilcc2024.com/> (Utolsó letöltés: 2025.02.10).
- [27] Collings P.J., Goodby J.W.: *Introduction to Liquid Crystals* (CRC PressTaylor & Francis Group,2020)
- [28] Wikipédia, <https://hu.wikipedia.org> (Utolsó letöltés 2025.02.10.)