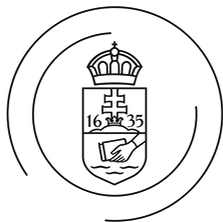


# **Instabilitások és keresztjeffektusok ferroelektromos nematikus folyadékkristályokban**

TÉZISFÜZET

**Máthé Marcell Tibor**

Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet  
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont



Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Természettudományi Kar  
Anyagtudomány és Szilárdtestfizika Program

**Témavezető: Dr. Salamon Péter, PhD.**

*Budapest, 2024*

# Bevezetés

Egyes anyagok a szilárd kristályos fázis és az izotrop folyékony fázis között további köztes fázisokkal, mezofázisokkal rendelkeznek. Az ilyen anyagokat folyadékkristályoknak nevezzük. Az ipari alkalmazásokban legtöbbször használt folyadékkristályos fázis a nematikus, melyet legtöbbször rúd alakú szerves molekulák alkotnak. Nematikus fázisban a molekulák tömegközéppontjai rendezetlenül helyezkednek el, azonban orientációs rendezettséggel bírnak. A molekulák hossz tengelyei egy átlagirány körül fluktuálnak, amit direktornak neveznek. Folyási tulajdonságokat tekintve a nematikusok háromdimenziós folyadéknak tekinthetők, irányfüggő viszkozitási együtthatókkal. A direktor irányában a molekulák hossz tengelyének nincsen preferált orientációja, így a fázis egy további tükrözési szimmetriával is rendelkezik, aminek következtében a molekulák hossz tengellyel párhuzamos dipólmomentumai kiátlagolódnak így a nematikus fázis apoláris.

Napjainkban több olyan mezofázis is ismert mely rendelkezik ferroelektromos jellegű spontán polarizációval, azonban folyási tulajdonságait tekintve ezek nem háromdimenziós folyadékok.

## Előzmények és célkitűzések

Csupán néhány évvel ezelőtt sikerült először előállítani majd kísérleti úton igazolni az első ferroelektromos tulajdonságokkal rendelkező folyadékok létezését<sup>1 2</sup>. Az új folyadékkristályos fázist ferroelektromos nematikusnak nevezik és nagy molekuláris dipólmomentummal rendelkező rúd alakú szerves molekulák esetén figyelték meg.

A ferroelektromos nematikusok háromdimenziós folyadéknak tekinthetők és emellett a ferroelektromos kristályokéval összemérhető spontán polarizációval és permittivitással rendelkeznek. A spontán polarizáció a molekulák orientációjában megfigyelhető poláris rend következménye a direktor mentén, aminek eredményeképpen a molekuláris dipólmomentumok nem átlagolódnak ki, hanem összeadódnak. A poláros rend következménye továbbá, hogy a nematikusokra jellemző tükörszimmetria a ferroelektromos nematikusokban sérül.

Felfedezésük óta a ferroelektromos nematikusokat nagy érdeklődés övezi mind az alapkutatás mind a potenciális alkalmazások terén. A nagy spontán polarizációnak és permittitásnak köszönhetően ezek az anyagok erősebben csatolódnak az elektromos térhez, ami alapul szolgálhat alacsony feszültséggel működtethető kijelzők fejlesztéséhez. Emellett az anyag folyási tulajdonságai és szokatlan szimmetriája újfajta jelenségek felfedezésére is lehetőséget adhatnak.

Korábban elméletileg és kísérletileg is bebizonyították, hogy királis nematikusokban a tükörszimmetria hiánya kö-

<sup>1</sup> H. Nishikawa et al., Adv. Mater., 29, 1702354, (2017)

<sup>2</sup> R. Mandle et al., Phys. Chem. Chem. Phys., 19, 11429-11435, (2017)

vetkeztében különféle keresztteffektusok léphetnek fel<sup>3</sup>. A termomechanikai effektus során a hőmérséklet gradiens a direktor forgását idézheti elő, amit Lehmann forgásnak is neveznek. A termohidrodinamikai jelenség esetén a hőmérséklet gradiens a folyadék áramlásához vezet, ezt az effektust azonban korábban kísérletileg nem igazolták. Mivel a tükrörszimmetria a ferroelektromos nematikusokban is sérül, ez motivációul szolgált hogy megvizsgáljam a hőmérséklet gradiens által indukált esetleges keresztteffektusokat az újfajta folyadékkristályban. [P1]

Ferroelektromos kristályokban jól ismert keresztteffektus, hogy mechanikai deformációval elektromos feszültség indukálható, amit piezoelektromosságnak neveznek. A jelenség fordítva is megfigyelhető amikor a kristályra kapcsolt feszültség hatására lép fel alakváltozás, amit inverz piezoelektromos effektusnak neveznek. Ez közvetlen motivációként szolgált, hogy megvizsgáljam, hogy a ferroelektromos nematikusokban is megfigyelhető-e valamilyen piezoelektromos effektus.[P3]

A kutatómunkám során többször is inspirálódtam a ferrofluidokkal kapcsolatos kutatásokból<sup>4</sup>. A ferrofluidok mágneses nanorészecskék kolloid keverékei szerves oldószerben, így háromdimenziós folyási tulajdonságokkal rendelkeznek, továbbá a nanorészecskék mágneses momentumainak orientációja mágneses térrel befolyásolható. Ferrofluidokban többféle felületi instabilitás is indukálható mágneses tér jelenlétében, ilyen például a Rosensweig-féle normál tér instabilitás ferrofluid cseppekben vagy a labirintus instabilitás folyadékhíd geometriában. Kihazsználva a ferrofluidok és a ferroelektromos nematikusok kö-

<sup>3</sup> P. Oswald et al., Liquid Crystals Reviews, 7:2, 142-166, (2019)

<sup>4</sup> R.E. Rosensweig, Ferrohydrodynamics. Courier Corporation, (2013)

zötti analógiát, felmerült a kérdés, hogy a ferroelektromos nematikusokban is megfigyelhetők-e hasonló felületi instabilitások elektromos tér jelenlétében.[P2]

A folyadékkristályokat legtöbbször felületi orientáló réteggel kezelt üveglapok között vizsgálják, amit szendvics cella geometriának is neveznek. Az itt bemutatott doktori disszertáció témájához szorosan nem kötődő kutatásainkban [P5,P6,P7,P8] azonban azt találtuk, hogy a folyadékkristályokat érdemes lehet másféle frusztrált geometriákban is vizsgálni, mint például a gömbsapka alakú csepp vagy folyadékhíd geometria. Ezen eredmények közvetlen motivációként szolgáltak a ferroelektromos nematikusok vizsgálatához frusztrált geometriákban.[P1,P4]

## **Alkalmazott módszerek**

A minták elkészítéséhez egy általam épített mikromanipulátor berendezést használtam, ami lehetővé tette a szabályos alakú folyadékkristály cseppek és hidak létrehozását és azok méretének befolyásolását, illetve a cseppek precíziós elhelyezését felületi elektródák esetén. Továbbá fotolitográfias módszert használtam az elektródák felületének bevonásához, felületi struktúrák létrehozásához és különféle elektróda rendszerek elkészítéséhez.

A minták vizsgálatához legtöbbször polarizációs mikroszkópot használtam, aminek a felépítése megegyezik a optikai mikroszkópokéval azzal a különbséggel, hogy a vizsgált minta előtt és után a fényútban egy-egy lineáris polarizátor van elhelyezve. Ez a módszer lehetőséget ad a minta kettőtörésének és ezáltal a direktortér struktúrájának vizsgálatára. Amennyiben szükséges volt a direktor-

tér pontosabb vizsgálata, egy általunk épített polarimetri-  
kus mikroszkópot használtam, amivel pixel felbontású in-  
formáció nyerhető a direktor orientációjáról a minta síkjá-  
ban. A jobb időbeli felbontás eléréséhez gyors kamerát, a  
minták háromdimenziós struktúrájának feltérképezéséhez  
pedig fehér fényű interferometrikus profilométert használ-  
tam.

A mért adatok feldolgozásához általam készített kiér-  
tékelő programokat használtam, melyek legtöbbször kép-  
feldolgozási módszereken alapultak. A mintákban kiala-  
kuló elektromos tér meghatározásához véges elem mód-  
szeren alapuló szimulációkat használtam, COMSOL Mul-  
tiphysics segítségével.

# Tézisek

1. Optikai mérésekkel megmutattam, hogy homeotrop felületi orientáló réteg használata esetén a nematikus – ferroelektromos nematikus fázisátmenet során felületi orientációs fázisátalakulás történik folyadékkristály cseppekben. A ferroelektromos nematikus fázisban tangenciális direktor és polarizáció struktúrát találtam, melyet elektrosztatikai okokkal magyaráztam.[P1]
2. Felfedeztem egy új termohidrodinamikai effektust, ami kizárólag a ferroelektromos nematikus fázisban figyelhető meg. A jelenség során csepp geometriában áramlás indukálható hőmérséklet gradiens létrehozásával. Megállapítottam a jelenség tulajdonságait különféle hőmérséklet gradiensekben és elektromos tér jelenlétében. Meghatároztam az áramlási sebesség hőmérséklet függését. A jelenséget egy keresztteffektusként értelmeztem, mely a ferroelektromos nematikus fázis nem szokványos szimmetriájának a következménye.[P1]
3. Kísérletileg igazoltam, hogy szabad felületű ferroelektromos nematikus folyadékkristályokban a mintára kapcsolt váltakozó elektromos tér egy újfajta felületi instabilitás kialakulásához vezet, melyet ágasodásnak nevezünk. Az instabilitást többféle geometriában vizsgáltam és meghatároztam a küszöbfezésültség frekvencia és hőmérséklet függését. Megállapítottam az instabilitás következtében kialakuló fraktál struktúra Hausdorff dimenzióját. Kísérletekkel és szimulációkkal beláttam, hogy az instabilitás

kialakulásában kulcsszerepe van az elektródák felületét bevonó szigetelő rétegnek. Továbbá optikai mérésekkel bizonyítottam, hogy az instabilitás során kialakuló ágakban a polarizáció az ágak hosszten-gelyével párhuzamos, ami a közeli cseppek egymás közti taszításához vezet.[P2],[P5]

4. Megmutattam, hogy a Rosensweig féle labirintus in-stabilitás ferroelektromos nematikus folyadékkristá-lyokban is megfigyelhető váltakozó elektromos tér-ben és a küszöb feszültsége nagyságrendekkel ki-sebb, mint az eddig vizsgált dielektrikumokban. Meghatároztam a küszöb feszültséget a frekvencia és a minta geometriai paramétereinek függvényé-ben.[P5]
5. Meghatároztam a ferroelektromos nematikus folya-dékhidak morfológiai fázisdiagramját a mintára kap-csolt feszültség és frekvencia függvényében. Meg-mutattam, hogy egy adott régióban a cseppek fel-aprózódása és aktív önhajtó viselkedése figyelhető meg, ezzel felfedezve egy újfajta kétdimenziós mes-ter séges aktív részecske rendszert. A részecskék kö-vetésével és statisztikai módszerekkel meghatároz-tam a mozgás jellemzőit. Igazoltam, hogy a részecs-kék átlagsebessége a feszültséggel hangolható.[P6]
6. Akusztikai és közvetlen kísérleti módszerrel is iga-zoltam, hogy lineáris elektromechanikai effektus fi-gyelhető meg ferroelektromos nematikus folyadék-kristályokban. Meghatároztam a jelenség frekvencia illetve feszültségfüggését és egy vizsgált ferroelekt-romos nematikus folyadékkristály inverz piezoelekt-



romos együtthatóját.[P3],[P6]

7. Megmutattam, hogy ferroelektromos nematikus folyadékkristályokból a Rayleigh-limitnél nagyságrendekkel nagyobb oldalarányú stabil szálak húzhatók. Kísérletileg bizonyítottam, hogy a szálak külső állandó elektromos térrel tovább stabilizálhatók és váltakozó térrel rezgésbe hozhatók. Bemutattam továbbá újfajta mérési módszereket melyekkel meghatároztam az anyag spontán polarizációját és viszkozitását.[P4]

## Publikációk

- [P1]. M. T. Máthé, Á. Buka, A. Jákli, and P. Salamon. "Ferroelectric nematic liquid crystal thermomotor". *Physical Review E* 105 (2022), pp. L052701. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.105.L052701>
- [P2]. M. T. Máthé, B. Farkas, L. Péter, Á. Buka, A. Jákli, and P. Salamon, "Electric field-induced interfacial instability in a ferroelectric nematic liquid crystal". *Scientific Reports* 13 (2023), pp. 6981. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-34067-1>
- [P3]. M. T. Máthé, M. S. H. Himel, A. Adaka, J. T. Gleeson, S. Sprunt, P. Salamon, and A. Jákli, "Liquid Piezoelectric Materials: Linear Electromechanical Effect in Fluid Ferroelectric Nematic Liquid Crystals", *Advanced Functional Materials* (2024), pp. 2314158. DOI: <https://doi.org/10.1002/adfm.202314158>
- [P4]. M. T. Máthé, K. Perera, Á. Buka, P. Salamon, and A. Jákli, "Fluid Ferroelectric Filaments". *Advanced Science* (2023), pp. 2305950. DOI: <https://doi.org/10.1002/advs.202305950>
- [P5]. M. T. Máthé, H. Nishikawa, F. Araoka, A. Jákli and P. Salamon. "Ramification and labyrinthine instabilities in a ferroelectric nematic fluid exposed to electric fields". (előkészületben)
- [P6]. M. T. Máthé, H. Nishikawa, F. Araoka, A. Jákli and P. Salamon, "Electrically Activated Ferroelectric Nematic Microrobots". (előkészületben)

Az alábbi publikációk nem kapcsolódnak a disszertáció témájához:

- [P7]. M. T. Máthé, Á. Buka, and P. Salamon, "Defects induced by anchoring transitions of nematic fluids at solid and gas interfaces". *Journal of Molecular Liquids* 336 (2021), pp. 116074. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116074>.
- [P8]. Z. Karaszi, M. T. Máthé, P. Salamon, Á. Buka, and A. Jákli, "Electric field induced buckling of inversion walls in lens-shape liquid crystal droplets. *Journal of Molecular Liquids* 365 (2022), pp. 120177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120177>
- [P9]. Z. Karaszi, M. T. Máthé, P. Salamon, Á. Buka, and A. Jákli, "Lens-shaped nematic liquid crystal droplets with negative dielectric anisotropy in electric and magnetic fields. *Liquid Crystals* 50 (2023), pp. 393-402, DOI: <https://doi.org/10.1080/02678292.2022.2134594>
- [P10]. Á. Buka, P. Salamon, M. T. Máthé, Z. Karaszi, and A. Jákli, "Nematic liquid crystals in lens shape geometry", *Liquid Crystals* 50 (2023), pp. 1582-1598. DOI: <https://doi.org/10.1080/02678292.2023.2168307>
- [P11]. P. Salamon, M. T. Máthé, Á. Buka, and A. Jákli, "Hangolható hibahelyek nematikus folyadékkristály-cseppekben". *Fizikai Szemle* 73 (2023), pp. 120-124