

Extraordinary properties of bent-core and rod-like nematic liquid crystals

CÍMŰ DOKTORI ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

Salamon Péter

Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet
Wigner Fizikai Kutatóközpont
Magyar Tudományos Akadémia

Témavezető: Dr. Éber Nándor, C.Sc.



EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
Fizika Doktori Iskola

Iskolavezető: Prof. Dr. Palla László, D.Sc.

Anyagtudomány és szilárdtestfizika program
Programvezető: Prof. Dr. Lendvai János, D.Sc.

Budapest
2013

Bevezetés

A folyadékkristályok fontos szerepet játszanak mindennapi életünkben, mivel a széles körben elterjedt vékony kijelzők alapjául szolgálnak. A legtöbb alkalmazás a nematikus folyadékkristályokat hasznosítja, amik általában rúd alakú szerves molekulákból állnak. A nematikus fázis egytengelyű szimmetriával írható le, ahol a szimmetriatengely az ún. direktor, amit lokálisan a molekulák hossztengeyének átlagos iránya határoz meg. A direktort külső mágneses és elektromos terekkel lehet deformálni, ami a kijelző-technológiai alkalmazások alapja.

Előzmények és célkitűzések

A múlt század kilencvenes éveiben a tudományos érdeklődés a hajlott törzsű molekulák alkotta folyadékkristályok felé fordult. A hajlott törzsű molekulák - a rúd alakúakhoz képest - alacsonyabb szimmetriája újfajta komplex struktúrák kialakulásához vezetett az ún. 'banán' fázisokban¹. Az efféle különleges folyadékkristály fázisok kutatása napjainkban is fontos téma. Talán az egyik legfigyelemreméltóbb tulajdonsága a banán fázisoknak az, hogy lehetnek ferroelektromosak vagy antiferroelektromosak anélkül is, hogy az őket alkotó molekulák királisak lennének².

A hajlott törzsű molekulák alkothatnak nematikus fázist is, bár ez elég ritka, mivel a hajlott molekula-alak nem igazán kompatibilis a nematikus fázis translációs szabadságával. Az első hajlott törzsű molekulák alkotta nematikus folyadékkristályokat az ezredforduló környékén szintetizálták és a kutatásuk azóta is tart. Felvetődik a kérdés, hogy ezek miben különböznek a hagyományos rúd-alakú molekulákból álló nematikus folyadékkristályoktól.

Egy nyilvánvaló különbség az eltérő molekula-szimmetria. A rúd alakú molekulákat hosszúka forgás-ellipszoidoknak lehet tekinteni, mely közelítést sikeresen alkalmazzák a nematikus fázis molekuláris elméleti leírásaiban. A hajlott törzsű molekulák szimmetriája kéttengelyű, de az általuk alkotott egytengelyű nematikus fázis makroszkópiusan megegyezik azzal, amit a hagyományos rúd-alakú molekulák építenek fel. Mivel minőségi különbség nincs a rúd alakú illetve a hajlott törzsű molekulák alkotta nematikus fázisok között, felmerül a kérdés, hogy a hajlott molekula-alak hogyan befolyásolja a nematikus fázist jellemző anyagi paramétereket.

¹ H. Takezoe et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* vol. 45, no. 2 A, pp. 597-625, 2006.

² D. Link et al., *Science*, vol. 278, no. 5345, pp. 1924-1927, 1997.

Egy hajlott törzsű nematikus folyadékkristályban talált különleges mintázatképződési jelenségek vizsgálata során 100 kHz frekvencia alatt a vezetőképesség anizotrópiájának kettős előjelváltását tapasztalták³, ami egy szokatlanul alacsony frekvencián fellépő dielektromos relaxáció jelenlétére utalt. Ez szolgált egy közvetlen motivációjaként a hajlott törzsű nematikus folyadékkristályon végzett dielektromos spektroszkópiai vizsgálatoknak [P1, P4], azon túl, hogy ebben a témakörben korábban még nem történt kutatás hajlott törzsű nematikus anyagokon. Felvetődött az az ötlet is, hogy rúd alakú és hajlott törzsű molekulákat tartalmazó elegyek vizsgálatával lehetővé válna a dielektromos tulajdonságok változását követni a koncentráció függvényében.

Egy hajlott törzsű nematikus folyadékkristályon végzett korábbi elektro-optikai mérések⁴ azt mutatták, hogy az ún. feszítés és hajlítás direktor deformációkhoz tartozó rugalmas állandók aránya a rúd alakúaknál tapasztaltnál képest fordított. Egy másik hajlott törzsű anyagban vizsgált diszklínációk analíziséből arra a következtetésre jutottak, hogy a csavarás deformációhoz tartozó rugalmas állandó a rúd alakúaknál megszokottnál képest egy nagyságrenddel kisebb. A különleges rugalmas tulajdonságokra utaló jelek motiválták a többfajta hajlott törzsű anyagon elvégzett méréseket, melyek lehetővé tették mindhárom rugalmas állandó pontos értékének meghatározását [P2, P4]. Ezen kísérletek kapcsán felmerült egy új módszer alkalmazási lehetősége a csavarás rugalmas állandó meghatározására [P4].

2006-ban, a hajlítás direktor deformáció által keltett ún. flexoelektromos polarizációt vizsgálták egy hajlott törzsű nematikus folyadékkristályon⁵. Egy periodikusan deformált hajlékony folyadékkristály cellán megmérték a flexoelektromos áramot, melynek segítségével meghatározták a releváns flexoelektromos együtthatót. Egy tipikus rúd alakú molekulából álló folyadékkristályhoz viszonyítva három nagyságrenddel nagyobb flexoelektromos együtthatót kaptak a hajlott törzsű anyag esetén. Hasonló eredményt adott a fordított kísérlet, amikor a cella kihajlását mérték a rákapcsolt feszültség függvényében⁶. Egy kritikus feszültségérték felett itt is az ún. 'óriási flexoelektromosság' volt tapasztalható.

A hajlott molekula-alakot is figyelembe vevő elméleti modellek azonban nem tudtak magyarázatot adni az óriási flexoelektromosság jelenségére. Egy alternatív magyarázat szerint a hajlott törzsű nematikus folyadékkristályokban jelenlévő ún. poláros

³ D. Wiant et al., *Phys. Rev. E*, vol. 72, no. 4, p. 041712, 2005.

⁴ P. Sathyanarayana et al., *Phys. Rev. E*, vol. 81, no. 1, p. 010702, 2010.

⁵ J. Harden et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol. 97, no. 15, p. 157802, 2006.

⁶ J. Harden et al., *Phys. Rev. E*, vol. 78, no. 3, p. 031702, 2008.

szmektikus klaszterek felelősek a különleges effektusért. Ezeket a néhány tíz darab molekulából álló objektumokat egy erős poláros rövidtávú rendeződés idézheti elő, mely koncepciót röntgenszórás, magmágneses rezonancia, illetve dinamikus fényszórás kísérletek támasztottak alá. A klaszterek a nematikus fázisétól eltérő szimmetriával rendelkeznek, de az anyagban véletlen eloszlással vannak jelen. Ezáltal a makroszkópikus nematikus szimmetria megőrződhet. Sok jelenséget (pl. óriási folyási kettőstörés, reológiai tulajdonságok) a klaszterek hatásával magyaráztak.

Az óriási flexoelektromosságot nem sikerült egyéb módszerekkel reprodukálni. A közvetett módon mérő elektro-optikai technikák^{7,8}, a rúd-alakú nematikus folyadékkristályoknál megszokott nagyságrendbe eső értékeket adtak a flexoelektromos együttthatókra a hajlott törzsű molekulák esetében is. A hajlékony és a merev cellákat használó módszerek eredményeinek ellentmondása máig feloldatlan.

A flexoelektromos instabilitás egy elektromos tér által indukált mintázatképző folyamat nematikus folyadékkristályokban, mely meglehetősen ritkán figyelhető meg. Az ennek nyomán kialakult mintázatot flexodoméneknek hívják, melyek a direktorral párhuzamos csíkként jelennek meg. A flexoelektromos instabilitással szemben az elektrokonvekció egy gyakran megfigyelhető váltófeszültség hatására fellépő mintázatképző folyamat, mely a direktorra merőleges (vagy dőlt) konvekciós hengerek formájában figyelhető meg.

2011-ben a flexodomének és az alacsony frekvenciás váltófeszültség hatására kialakuló elektrokonvekció egy új elméleti leírását publikálták⁹, mely kísérletileg még nem ellenőrzött állításokat tartalmazva szolgáltatva egy fontos motivációját ezen jelenségek vizsgálatának. Az új elmélet a korábbinál pontosabb leírást nyújt, ami lehetőséget adott a flexoelektromos együttthatók különbségének az eddiginél precízebb meghatározására [P7]. Ily módon egy új, megbízható módszer vált elérhetővé a rúd alakú és a hajlott törzsű nematikus folyadékkristályok flexoelektromosságának összehasonlítására.

A standard ún. 'konduktív' elektrokonvekció egy közel statikus direktor-modulációval jellemezhető azokon a magasabb gerjesztő frekvenciákon, ahol a korábbi kísérleti vizsgálatok történtek. A nematikus folyadékkristályokban a direktor relaxációs idő egy alapvető időskálát ad meg. A korábbi kísérleteket abban a tartományban végezték el, ahol ez jelentősen meghaladta az alkalmazott váltófeszültség periódusidejét. Felmerült a kérdés,

⁷ K. van Le et al. *Liq. Cryst.*, vol. 36, no. 10-11, pp. 1119-1124, 2009.

⁸ P. Kumar et al., *J. Phys. Chem. B*, vol. 113, no. 27, pp. 9168-9174, 2009.

⁹ A. Krekhov et al., *Phys. Rev. E*, vol. 83, no. 5, p. 051706, 2011.

hogy mi történik valójában az alacsony frekvenciájú gerjesztés esetén, amikor a mintára kapcsolt feszültségjel periódusideje nagyobb mint a direktor relaxációs idő [P5-P7].

Alkalmazott módszerek

A disszertáció első része a rúd alakú és a hajlott törzsű molekulákból álló nematikus folyadékkristályok dielektromos és rugalmas tulajdonságainak különbségét taglalja.

A dielektromos spektrumokat az üres és a folyadékkristállal megtöltött cella komplex impedanciájának mérésével lehetett meghatározni. A direktor megfelelő orientálása mágneses tér segítségével valósult meg. A spektrumok illesztése a komplex nemlineáris legkisebb négyzetek módszerével történt. Az eredmények értelmezése érdekében a molekuláris dipólmomentumokat olyan kvantumkémiai módszerrel sikerült meghatározni, mely a különböző molekula-konformációkat is figyelembe vette.

Az elektromos és mágneses terek által létrehozott direktor átorientálások (Freedericksz-átmenetek) különböző geometriákban történő optikai és dielektromos vizsgálata lehetőséget adott a folyadékkristályok rugalmas állandóinak meghatározására. A folyadékkristály effektív dielektromos állandójának és az optikai transzmissziójának mérése a mágneses tér (vagy feszültség) függvényében történt. A mért mennyiségeket a nematikus folyadékkristályok kontinuum leírásának segítségével numerikusan sikerült kiszámolni. A kísérleti adatok és az elméleti számítások legkisebb négyzetek módszerével történő illesztése számos anyagi paramétert - köztük a rugalmas állandókat - tett meghatározhatóvá.

A disszertációban közölt eredmények második része a rúd alakú és a hajlott törzsű nematikus folyadékkristályokban alacsony frekvenciás gerjesztés esetén fellépő mintázatképződési folyamatokkal kapcsolatos.

Az elektromos tér által keltett mintázatok megfigyelése a cellán átmenő fény segítségével, polarizációs mikroszkópban történt. A mikroszkópos képek rögzítése és a cellán átfolyó áram mérése a gerjesztő feszültségjelhez pontosan szinkronizálva, egy nagy sebességű kamera illetve egy oszcilloszkóp alkalmazásával valósult meg.

Teljesen automatizált (elemi egységekből felépített) mérő- és kiértékelő-rendszereket sikerült létrehozni, melyek a disszertáció tárgyát nem képező témakörökben is alkalmazhatóak. A szükséges szoftverek kifejlesztése Labview és Matlab környezetekben történt.

Tézisek

1. A dielektromos spektroszkópiai méréseim megmutatták, hogy egy hajlott törzsű nematikus folyadékkristály frekvenciafüggő dielektromos tulajdonságai minőségileg különböznek a hagyományos rúd-alakú folyadékkristályok jellemzőitől. Öt dielektromos relaxációt találtam a hajlott törzsű anyag nematikus fázisában, szemben a rúd alakú folyadékkristályoknál szokásos hárommal. Az egyik relaxáció karakterisztikus frekvenciája mindössze néhány kHz-re adódott, mely nagyságrendekkel kisebb a rúd-alakú molekulákból álló folyadékkristályoknál tapasztalható legalacsonyabb relaxációs frekvenciánál [P1, P4].
2. Hajlott törzsű és rúd alakú molekulákból álló folyadékkristályok elegyeit vizsgáltam dielektromos spektroszkópiai módszerekkel. A kísérleti adatok alapján az elegyekben talált relaxációk megfeleltethetők a komponensek relaxációs módusainak, illetve azok összegének. Demonstráltam, hogy az elegyek összetett spektrumai előállíthatók a hajlott törzsű és a rúd alakú komponensek szuperpozíciójaként [P1].
3. Meghatároztam egy tipikus hajlott törzsű nematikus folyadékkristály rugalmas állandóit Fredericksz-átmenetek dielektromos és optikai vizsgálatának segítségével. A csavar- és hajlítás-deformációkhoz tartozó rugalmas állandók értékeit egy nagyságrenddel kisebbnek találtam a rúd alakú folyadékkristályokhoz viszonyítva, mely eredmények a hajlott molekula-alak és a molekuláris klaszterek hatásának tulajdoníthatók [P2].
4. Kidolgoztam egy új módszert, mely lehetővé teszi a direktor csavar deformációjához tartozó rugalmas állandó meghatározását dielektromos méréssel. Ez a technika a felületi direktor dőlés (pretilt) jelenlétét használja ki a csavar Fredericksz-átmenet esetén. Az új dielektromos és a korábban használt optikai módszer összehasonlító szimulációjával a cellavastagság és a pretilt hatását vizsgáltam. A dielektromos mérés technika alkalmazhatóságát egy standard rúd alakú és egy hajlott törzsű folyadékkristályon végzett kísérletekkel demonstráltam. A nem tipikus hajlott törzsű folyadékkristály rugalmas állandóit a rúd-alakúakéhoz hasonlónak találtam, ami a különleges molekula-szerkezetnek volt tulajdonítható [P3].

5. Megmutattam, hogy a standard konduktív elektrokonvekció stacionárius mintázata a frekvenciát csökkentve fokozatosan válik modulálttá, majd felvillanásszerűen megjelenővé. Nagyon alacsony frekvencián, fél feszültség-periódusonkénti ismétlődéssel az elektrokonvekció és flexodomének időben elkülönült megjelenését találtam. Egy kritikus frekvencián a különböző mintázatok küszöbfeszültségei megegyeznek, mivel frekvenciafüggésük jelentősen eltérő [P5–P7].
6. Kísérletileg megmutattam, hogy az elektrokonvekció villanásszerű feltűnése és a folyadékkristályon átmenő áram csúcsa időben egybeesik. Az áram nemlineáris jellegét a polaritás-váltások után a szigetelő elektróda-bevonatoknál kialakuló ionos kettős rétegek képződésével magyaráztam. Az elektrokonvekció alacsony frekvencián ellaposodó küszöb-karakterisztikáját is a szennyező ionok hatásának tulajdonítottam [P7].
7. A flexodomének különböző hőmérsékleteken megmért kritikus hullámszámát felhasználva megkaptam egy rúd-alakú folyadékkristály flexoelektromos együtthatóinak különbségét a hőmérséklet függvényében. Az adatok alátámasztották a flexoelektromosság molekuláris elméletének releváns eredményét. A flexodomének vizsgálata egy tipikus hajlott törzsű folyadékkristályon nagyobb flexoelektromos együttható különbséget eredményezett a rúd alakú folyadékkristályon mérthez képest, de az egyéb merev cellát alkalmazó elektro-optikai kísérletekhez hasonlóan az 'óriási flexoelektromosság' reprodukciója nem történt meg [P7].

Következtetések

A disszertációban bemutatott tudományos eredmények hozzájárultak a hajlott törzsű és a rúd alakú molekulákból álló folyadékkristályok különböző természetének megértéséhez.

Egy tipikus hajlott törzsű nematikus folyadékkristályon végzett dielektromos spektroszkópiai mérések [P1, P4] a rúd alakú molekulák esetén tapasztalhatóhoz képest kettővel több relaxációt mutattak a nematikus fázisban. A relaxációk nagyobb számát a rúd alakú nematikus folyadékkristályok viselkedését jól leíró 'poláros rúd' modellek nem tudják megmagyarázni. Továbbá a hajlott törzsű anyagban talált relaxációk karakterisztikus frekvenciái jelentősen alacsonyabbak a rúd alakú folyadékkristályok esetén megszokottnál. A legalacsonyabb frekvenciájú módust a nematikus fázis párhuzamos komponensében, mindössze néhány kHz-en lehet megtalálni. Ez az eredmény igazolja az alacsony frekvenciás relaxáció jelenlétére vonatkozó feltételezést, mely a korábbi vezetőképeség anizotrópia mérésekből következett.

Kielégítő elméleti alátámasztás nélkül a hajlott törzsű folyadékkristályban talált relaxációk eredete nem adható meg egyértelműen. Jelenleg nem áll rendelkezésre olyan dielektromos relaxációkra vonatkozó elméleti leírás, amely tudná kezelni a hajlott molekula-alakot, ezért a kísérleti eredményeket csak kvalitatíven lehet magyarázni. A hajlott törzsű anyag szokatlan dielektromos viselkedése indokolható talán a kéttengelyű molekula-szimmetriával, ami több rotációs módus megjelenését teheti lehetővé. Továbbá a poláros rúd modell a molekulákat merev forgásellipszoidnak tekinti, mely a merevség szempontjából sem jó közelítés a vizsgált hajlott törzsű anyag esetén, amit a konformáció számolások is alátámasztanak. Következésképpen a hajlott törzsű folyadékkristály nagyobb konformációs szabadsága is hozzájárulhat a különleges dielektromos viselkedéshez. Azt sem lehet kizárni, hogy az alacsony frekvencián megjelenő módusért a szmektikus klaszterek a felelősek.

A hajlott törzsű nematikus folyadékkristály rugalmas tulajdonságai is rendkívülinek bizonyultak. A Freedericksz-átmenetek vizsgálatából kiderült [P2], hogy a direktor csavarásához és hajlításához tartozó rugalmas állandók egy nagyságrenddel kisebbek a rúd alakúakban mérhetőhöz képest, míg a feszítés deformáció rugalmas állandója szokásos nagyságú. Az eredmények a hajlott molekula-alak és a szmektikus klaszterek hatásának tulajdoníthatók. A klaszterek szerkezetében jelenlévő kvázi csavarás és hajlítás deformációk hozzájárulhatnak a tömbi anyag rugalmas állandóinak lecsökkenéséhez.

A mágneses csavar Freedericksz-átmenet numerikus szimulációja megmutatta, hogy a felületi direktor dőlés (pretilt) figyelembe vétele lehetőséget ad a csavarás rugalmas állandójának egy új, dielektromos méréssel való meghatározására. Az új módszer a korábbi optikai depolarizációméréssel összehasonlítva egyszerűbb méréstechnikát és egyértelműbb kiértékelést biztosíthat. A numerikus számolás felfedte, hogy az adiabatikus fényterjedésnek a rugalmas állandó optikai mérése szempontjából zavaró hatása vékony cellák alkalmazásával minimalizálható.

Az új dielektromos mérési módszer alkalmazhatóságának demonstrációja egy rúd-alakú és egy speciális szerkezetű hajlott törzsű folyadékkristályon végzett kísérletek segítségével történt [P3]. Az eredmények azt mutatták, hogy az oldalsó szénláncokkal rendelkező hajlott törzsű folyadékkristály rugalmas tulajdonságai hasonlóak a rúd alakúaknál tapasztalhatókhöz. Ez azzal magyarázható, hogy az oldalsó szénláncok akadályozzák a hajlott molekulatörzsek kölcsönhatását, meggátolva ezzel a hajlott törzsű nematikus folyadékkristályok jellegzetességeiért felelős klaszterek kialakulását.

A mintázatképződés témakörében kapott eredmények megmutatták, hogy a konduktív elektrokonvekció jellege megváltozik az alacsony frekvenciás gerjesztés esetén, amikor az alkalmazott feszültségperiódus a direktor relaxációs időnél nagyobb [P5, P6]. Magas frekvenciákon ($f \sim 100$ Hz) a mintázat kontrasztja időben közel állandó, szemben az alacsony frekvenciás tartománnyal, ahol a konvekciós hengerek a feszültségperiódusnak csak egy kis részében tűnnek fel. A mérési eredmények felfedték, hogy a frekvencia csökkentésével végbemegy egy folytonos átmenet az állandó kontraszttal jellemezhető és a villanásszerűen megjelenő konduktív elektrokonvekció között, amit a direktor relaxációs idő karakterizál. Nagyon alacsony frekvencián ($f \sim 30$ mHz) a flexodomének is megfigyelhetővé válhatnak az elektrokonvekciótól elkülönült felvillanásokként.

A kísérleti eredmények jó egyezést mutattak egy munkatárs elméleti számításaival [P6], leszámítva a mintázatok perióduson belüli feltűnési idejét, ahol a mérés és az elmélet között szisztematikus eltérés adódott alacsony frekvenciákon. Ezen eltérés az alacsony frekvencián dominánssá váló nemlineáris ionos vezetési effektus hatásával volt magyarázható, amit az elmélet nem vett figyelembe.

A későbbi árammérések egyértelmű bizonyítékot adtak az ionos vezetés fontos hatására, ugyanis alacsony frekvencián az áram nemlineárisává válik, és az elektrokonvekció mindig a polaritásváltások után kialakuló áramcsúccsal egyidőben villan fel. Az elektrokonvekciónál nagyon alacsony frekvencián tapasztalható kevésbé éles küszöbviselkedés is az ionos

hatással magyarázható. Következésképpen egy pontosabb jövőbeli elméleti leírásnak figyelembe kell vennie a folyadékkristályok gyengén elektrolit természetét.

Az elektrokonvekció és a flexodomének küszöbfeszültségének eltérő frekvenciafüggése miatt egy kritikus frekvencián ($f_c \sim 60$ mHz) a két teljesen eltérő mintázatképző mechanizmus küszöbfeszültsége érdekes módon megegyezhet. A kísérleti eredmények egy korábban még nem látott morfológiai változás, a dőlt konduktív - dőlt dielektromos elektrokonvekció módusok közti átmenet létezését is megmutatták egy rúd-alakú nematikus folyadékkristályon.

A flexodomének küszöbhullámszámát felhasználva a flexoelektromos együtthatók különbségének ($|e_1 - e_3|$) hőmérsékletfüggését sikerült meghatározni a nemrégiben publikált pontos és a korábbi egy-rugalmas-állandó közelítést alkalmazó elméleti modellel. Kiderült, hogy a két módszerrel kapott értékek 10 százalékon belül megegyeznek, mivel a flexodomének küszöbparaméterei nem érzékenyek a rugalmas állandók különbözőségére a vizsgált tartományban. Az $|e_1 - e_3|$ hőmérsékletfüggése alátámasztotta a flexoelektromosság korábbi molekuláris elméletének a releváns jósolatát.

Egy tipikus hajlott törzsű molekulákból álló nematikus folyadékkristályban megfigyelhető flexodomének segítségével az anyag flexoelektromos együtthatóinak különbségét meg lehetett határozni a fentebb említett módszerekkel. A kapott $|e_1 - e_3|$ mennyiség nagyobbnak bizonyult a rúd alakú anyagnál kapotthoz képest, de a hajlékony cellákat alkalmazó módszerek eredményeiből következtetett óriás flexoelektromosság reprodukciója nem történt meg. A flexodomének vizsgálatából kinyert érték jól illeszkedik a hajlott törzsű nematikus folyadékkristályokon egyéb elektro-optikai mérések eredményei által kijelölt tartományba.

Publikációk

- [P1] P. Salamon, N. Éber, Á. Buka, S. Sprunt, J. T. Gleeson, and A. Jákli, "Dielectric properties of mixtures of a bent-core and a calamitic liquid crystal", *Phys. Rev. E*, vol. 81, p. 031711, 2010
- [P2] M. Majumdar, P. Salamon, A. Jákli, J. T. Gleeson, and S. Sprunt, "Elastic constants and orientational viscosities of a bent-core nematic liquid crystal", *Phys. Rev. E*, vol. 83, p. 031701, 2011
- [P3] P. Salamon, N. Éber, J. Seltmann, M. Lehmann, J. T. Gleeson, S. Sprunt, and A. Jákli, "Dielectric technique to measure the twist elastic constant of liquid crystals - The case of a bent-core material", *Phys. Rev. E*, vol. 85, p. 061704, 2012
- [P4] Á. Buka, N. Éber, K. Fodor-Csorba, A. Jákli, and P. Salamon, "Physical properties of a bent-core nematic liquid crystal and its mixtures with calamitic molecules", *Phase Transitions*, vol. 85, no. 10, pp. 872-887, 2012
- [P5] N. Éber, P. Salamon, and Á. Buka, "Competition between electric field induced equilibrium and non-equilibrium patterns at low frequency driving in nematics", 13th Small Triangle Meeting Proceedings, Slovak Academy of Sciences, Stará Lesná, Slovakia, pp. 56-63, 2012
- [P6] N. Éber, P. Salamon, L. Palomares, A. Krekhov, and Á. Buka, "Temporal evolution and alternation of mechanisms of electric field induced patterns at ultra-low-frequency driving", *Phys. Rev. E*, vol. 86, p. 021702, 2012
- [P7] P. Salamon, N. Éber, A. Krekhov, and Á. Buka, "Flashing flexodomains and electroconvection rolls in a nematic liquid crystal", *Phys. Rev. E*, vol. 87, p. 032505, 2013

Az alábbi publikáció nem tartozik a disszertáció témaköréhez:

- Z. Li, P. Salamon, A. Jákli, K. Wang, C. Qin, Q. Yang, Z. Liu, and J. Wen, "Synthesis and mesomorphic properties of resorcylic di[4-(4-alkoxy-2,3-diflorophenyl)ethynyl] benzoate liquid crystals", *Liq. Cryst.*, vol. 37, p. 427, 2010

