

Válasz Erdélyi Zoltán tanszékvezető egyetemi tanár, az MTA doktora bírálatára

Mindenekelőtt szeretném megköszönni Erdélyi Zoltán tanszékvezető egyetemi tanárnak, az MTA doktorának az értekezés gondos átolvasását, elismerő szavait és azt, hogy a tézispontokat új tudományos eredményeimnek elismerve az értekezést nyilvános vitára bocsájtásra és sikeres védelem esetén az MTA doktora cím odaítélésére alkalmasnak értékelte.

Kérdéseire, megjegyzéseire az alábbiakban válaszolok.

Megjegyzések:

- *1. oldal: „... jelenségnek számítana, amit...” → „... jelenségnek számítanak, amit...”*

A teljes mondat: „A mai kijelzőkben az elektrokonvekció nem játszik szerepet; pontosabban olyan parazita, a kijelző minőségét rontó jelenségnek számítana, amit feltétlen el kell kerülni.” Minthogy az alany (elektrokonvekció), amire a mellékmondat utal, egyes számban van, nem tartom indokoltnak az állítmányt többes számban használni.

- *40. oldalon „(pont-vonás vízszintes vonal a 17. ábrán)” szerepel. Tudomásom szerint pontvonal a helyes elnevezés. Azaz „(vízszintes pontvonal a 17. ábrán)” lenne az általam javasolt kifejezés.*

Egyetértek. Valóban a pontvonal a helyes elnevezés, csak az értekezés írásakor ezzel nem voltam tisztában.

- *84-85. oldalon a 19. ábrára történő hivatkozások szerepelnek. Helyesen az 55. ábrára vonatkoznának.*

Egyetértek, valóban az 55. ábrára akartam hivatkozni. Köszönöm, hogy felhívta a figyelmemet erre az elírásra.

KÉRDÉSEK

1. FEJEZETHEZ

A bevezetőben a szerző is említi, hogy az elektrokonvekció ma már egy mindenáron kerülendő jelenség a folyadékkristályos kijelzőkben. Azonban más alkalmazásokban potenciálisan használható lehet.

- *Melyek ezek az alkalmazások?*

Az elektrokonvekciós mintázat egy térben periodikus direktor moduláció, ami a kettőstörés révén egy optikai fázisrácsnak felel meg. Az e fázisrácsot megvilágító lézernyaláb diffraktálódik, azaz a nyaláb egy része a mintázat és a fény hullámhosszaitól függő mértékben eltérül. Minthogy a mintázat hullámvektora az alkalmazott váltófeszültség amplitudójával és frekvenciájával változtatható, az elektrokonvekciót mutató cellával lehetővé válik egy lézernyaláb feszültséggel hangolható eltérítése, illetve az eltérített nyaláb ki- és bekapcsolása. Mindez felhasználható a fényvel letapogatás vezérlésére pl. litográfiánál.

- *Mennyire előrehaladottak ezek, azaz mennyire állnak közel a tényleges alkalmazáshoz?*

A jelenség demonstrálása könnyen megvalósítható. A tényleges alkalmazáshoz megoldandó feladatok közé tartozik a cellageometria és a folyadékkristály anyagi paramétereinek optimalizálása, a stabilitással, élettartammal és diffrakciós határfokkal kapcsolatos problémák megoldása. Ilyen kutatáson több csoport is dolgozik, de tudomásom szerint ilyen eszköz nincsen még kereskedelmi forgalomban. Minthogy alkalmazási kérdésekkel sosem foglalkoztam, nem tudom megítélni, hogy egy eladható eszköz kifejlesztése mennyi időt és pénzt igényelne és végül megérné-e.

- *Ugyanezen alkalmazásokban van lehetőség arra, hogy az elektrokonvekción kívül más alkalmazzanak, vagy az elektrokonvekció unikális lehetőséget biztosíthat? Amennyiben nem unikális, mik lehetnek az előnyei az elektrokonvekciónak más alkalmazásokkal szemben?*

A fényrel letapogatáshoz szükséges nyalábeltérítést jelenleg tudomásom szerint piezoelektromosan vezérelt tükrökkel valósítják meg. A folyadékkristályon alapuló nyalábeltérítés fő előnye a mozgó mechanikai alkatrészek kiküszöbölése lenne. Folyadékkristályban optikai rácsot lehet létrehozni fésűs elektróda elrendezéssel, de ennek rácsállandója rögzített. Hangolható rácsállandó megvalósítható például LCOS (liquid crystal on silicon) térbeli fénymodulátorokkal, de csak reflexiós üzemben és az eszköz térbeli felbontása korlátot jelent a nagyobb szögű eltérítésnél. Az elektrokonvekció, vagy a folyadékkristályok másik elektromosan indukált mintázata (a flexoelektromos domének) felhasználásával tág szögterületben folytonosan hangolható eltérítés válik lehetségessé. E problémán kínai együttműködésben mi is dolgozunk [E24, E26, E28, E29, E31]. A flexoelektromos doménekhez képest az elektrokonvekció sokkal robusztusabb jelenség; több folyadékkristályban figyelhető meg és könnyebben teszi lehetővé a mintázat hullámvektora irányának megváltoztatását, míg a flexoelektromos domének rögzített hullámvektor irány mellett a könnyebb hullámhossz-változtatásban előnyösek.

2. FEJEZETHEZ

- *Az 5. oldalon található összefüggésben a q_0 mennyiség nem került definiálásra, ha nem tévedek. Mit jelöl pontosan q_0 ?*

Köszönöm az észrevételt. Sajnálatosan az (1) formulában a q_0 mennyiség definiálása valóban kimaradt; q_0 a koleszterikus folyadékkristályok spontán csavarszerkezete hullámszámának felel meg, azaz $q_0 = 2\pi/P_0$ ahol P_0 a koleszterikus csavarállandója (az a távolság, amin a direktor 360 fokban körbefordul). Mentségemre szolgáljon, hogy az értekezésben kizárólag nematikus folyadékkristályok elektrokonvekcióját tárgyaltam és nematikusokban a tükrörszimmetria okán $q_0 = 0$.

- *A 9. oldalon hivatkozik a 4a. és a 4b. ábrákra. A meglepő az, hogy ezek az ábrák, csak a 15. oldalon, a 3., azaz a következő fejezetben jelennek meg. Miért választotta ezt a szokatlan megoldást? Miért nem került a 4. ábra a 2. fejezetbe? A visszahivatkozás lényegesen megszokottabb, mint az előre hivatkozás. Először azt is hittem, hogy kimaradt az ábra.*

Az értekezés írásakor igyekeztem elkerülni, hogy hasonló ábrák ismétlődjenek. A 4a. és 4b. ábrák két lehetséges Freedericksz-átmenet geometriájának illusztrálását szolgálják. Ezek tér nélküli alapállapota (az ábrák bal oldala) az a planáris, illetve homeotrop orientáció, amit a 9. oldalon említettem. Így logikusnak tűnt a 4a. és 4b. ábrákra történő hivatkozás. Az ábráknak a 2. fejezetbe beépítését nem tartottam célszerűnek, mert akkor zavaró lett volna az ábrák többi (jobboldali) részéhez kapcsolódó magyarázat hiánya és az ábraalírás sem illeszkedett volna a mondanivalóhoz. Észrevétele alapján most úgy gondolom, hogy mégis jobb lett volna az orientációk bemutatása a 2. fejezetben egy független ábrán, még ha ez ábrarészek részleges ismétlését is jelenti.

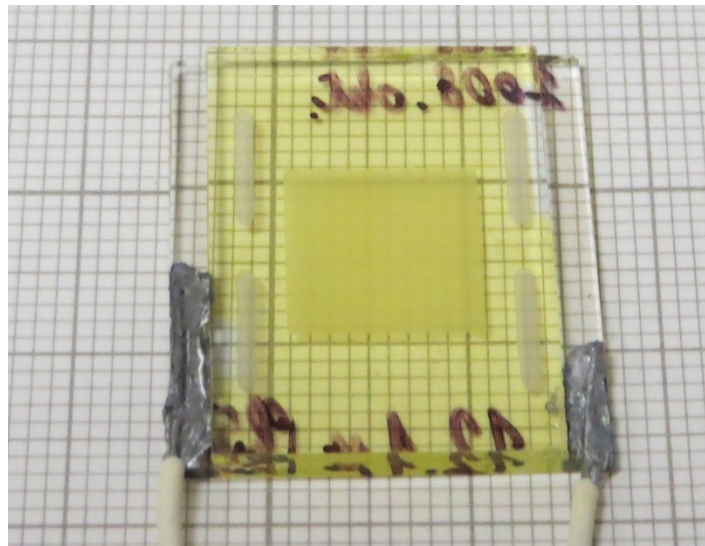
4-7. FEJEZETHEZ

A mintakészítésnél leírja, hogy az üveglapok távolságát, megfelelő távtartók segítségével, 3-50 μm -re állították be. Arra vonatkozóan azonban nem találtam információt, hogy mekkora volt a minták laterális irányú mérete.

- *Mekkora volt a minták laterális irányú mérete?*

Köszönöm az észrevételt. A minták laterális mérete 1-2 cm. Ezt a IV.2. Mintakészítés fejezetben meg kellett volna adnom, de ez sajnos véletlenül kimaradt. Mindazonáltal a laterális méretnél fontosabb,

hogy mekkora az átfedő elektródák mérete, mert a mintázat csak azon a területen alakul ki. Az általam használt cellákban az elektróda mérete általában 5 mm * 5 mm, vagy 10 mm * 10 mm volt. Az ábra egy milliméterpapírra helyezett tipikus cella fényképét mutatja. Az elektródák a rájuk kapcsolt váltófeszültség hatására válnak könnyen láthatóvá (elektrokonvekció dinamikus szórású állapota).



Egy feszültség alatti tipikus mérőcella fényképe

• Az értekezésben bemutatott képek a teljes mintáról készültek, vagy csak egy részletét mutatják? A 19. ábrán pl. van hosszskála, melynek alapján feltételezhető, hogy a kép a teljes minta csak egy részletét mutatja. Általában mekkora területről (hányszor hányas) készültek a képek? Kicsit hiányoltam, hogy az ábránál, az ábraszövegben csak az üveglapok távolsága volt megadva, a fotózott terület mérete nem.

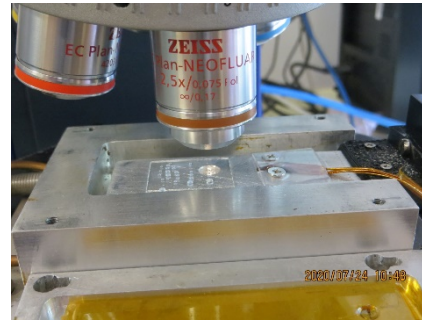
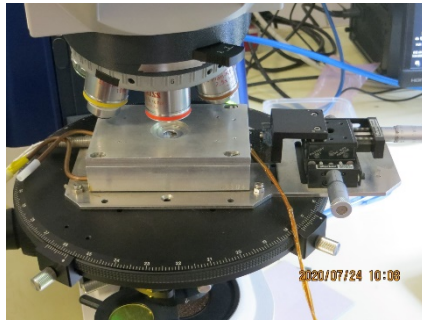
Az értekezésben bemutatott mikroszkópos felvételek minden esetben az elektródafelület egy részletét mutatták. Olyan nagyítást kellett választani, hogy a mintázat konvekciós hengerei jól elkülönüljenek. Minthogy a hullámhosszat többnyire a mintavastagság határozza meg, e követelmény a mikroszkóp látóterét tipikusan a nagyságrendileg 0,5 mm * 0,5 mm méretre korlátozta (a pontos érték a használt mikroszkóp, objektív és kamera típusától függ). A dielektromos elektrokonvekciós mintázatok felvételéhez, a kisebb hullámhossz miatt, nagyobb nagyításra volt szükség ami kisebb látóteret eredményez. A demonstrációs képekhez, a jobb láthatóság biztosítása végett, gyakran a felvételek egy kivágott részletét használtam. Az ábrák többségénél megadtam a hosszskála, amiből a terület mérete kiszámítható.

A mérési összeállítás bemutatásánál azt írja, hogy a hőmérsékletet $\pm 0,01$ - $0,1$ °C pontossággal lehetett tartani illetve szabályozni.

• A $\pm 0,01$ °C különösen felkeltette az érdeklődésemet. Tudná részletezni a megvalósítást? Hol, miben helyezkedett el a minta, mivel mérték a hőmérsékletet stb.?

A mintát többnyire gyári (Linkam LTS350, Instec HS1-i), kimondottan mikroszkópos megfigyelésekhez tervezett, fűthető tárgyasztalba helyeztük. A tárgyasztalok a mintának állandó hőmérsékleten tartott, zárt környezetet biztosítottak, melyben a mikroszkópos megfigyelés üveglapokon keresztül volt lehetséges. A hőmérséklet stabilizálását digitális PID szabályozóval vezérelt elektromos fűtés és természetes hűtés tette lehetővé.

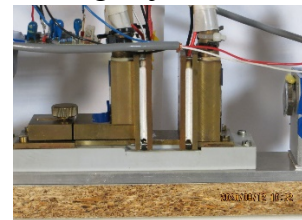
A 0,01 °C pontosságot az Instec HS1-i tárgyasztallal értük el, ami egy elektromosan fűtött üreges alumínium tömb. A minta az üregbe benyúló, az alumíniumon csúszó vörösréz vagy alumínium nyelven helyezkedett el. Az alumínium tömb hőmérsékletét a Pt100 ellenállásnál sokkal erősebb, de nemlineáris hőmérsékletfüggéssel rendelkező, speciális, gyárilag kalibrált termisztorral mértük egy számítógépkártyán kialakított ellenállásmérő hídkapcsolással és 16 bites analóg-digitális átalakítóval (MK1 kártya). Ez 0,001 °C felbontású hőmérsékletkijelzést tett lehetővé a szobahőmérséklettől maximum 150 °C-ig. Az ezen hőmérsékletértéket feldolgozó, gyári digitális PID szabályozó szoftvertette lehetővé a 0,01 °C-os stabilitást.



Az Instec HS1-i fűthető tárgyasztal fedővel és fedő nélkül

A Linkam LTS350 tárgyasztalában a hőmérsékletet Pt100 ellenállással mérték és 0,1 °C pontossággal jelezték ki a maximálisan 350 °C-ig terjedő hőmérséklet-tartományban.

A mágneses térben végzett méréseknél a gyári tárgyasztalok nem voltak használhatók. Ehhez saját tervezésű, elektronikusan szabályozott Peltier-elemekkel fűtött/hűtött mintatartót használtunk, Pt100 ellenálláshőmérővel, 0,1 °C pontossággal a szobahőmérséklettől 80 °C-ig terjedő tartományban.



A Linkam LTS350 fűthető tárgyasztala, és a saját készítésű Peltier-elemes mintatartó

A méréseket állandó hőmérsékleten végeztük, és a mérés megkezdése előtt minimum fél órát vártunk, hogy a minta a zárt környezet hőmérsékletét felvehesse.

• Mennyire lehetett homogén a hőmérséklet a teljes minta felületén? Az esetleges inhomogenitások mennyire befolyásolhatják a mintaképződést, azok lebomlását és a további eredményeket?

Az átláthatósághoz szükséges ablakok miatt nem zárható ki némi radiális hőmérsékletgradiens jelenléte, de a teljes minta hőmérséklet-eloszlását nem teszteltük. Minthogy azonban a méréseket csak a minta kis részletén (a mikroszkóp látóterében) végeztük el, az itt fellépő hőmérsékletkülönbség elhanyagolhatóan tekinthető.

A hőmérséklet eltérése egyébként megváltoztathatja a mintázat küszöb feszültségét és a mintázat hullámhosszát. Tapasztalataink ugyanakkor azt mutatták, hogy a mintában megtalálható egyéb, kisebb méretskálán fellépő inhomogenitások (pl. az orientáció vagy az ionkoncentráció lokális változása) a hőmérséklet-eltérésnél nagyobb szerepet játszhatnak.

• A felvételek szélektől távol készültek? A minta szélei befolyásolják a mintaképződést, lebomlást, diszlokációk képződést, mozgását stb.? Történtek erre vonatkozó vizsgálatok?

Igen, a felvételek a minta széleitől, sőt az elektródák széleitől is távol készültek. Megkerestük a mintában azt a helyet, ahol a mintázat a leghomogénebb volt és ott végeztük el a méréseket a minta további mozgatása nélkül.

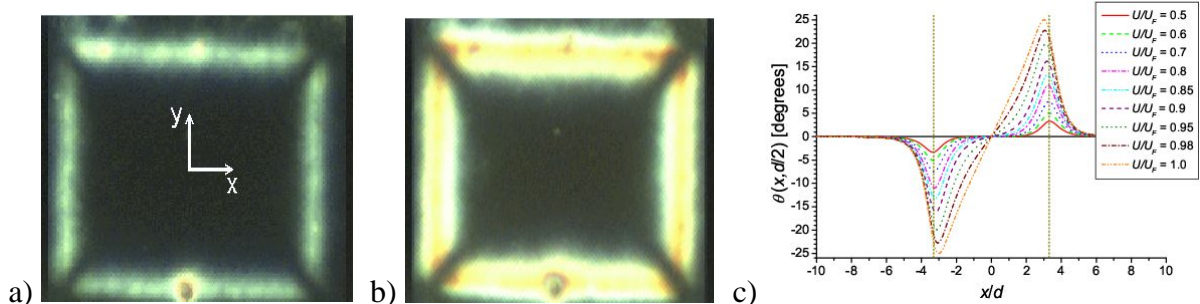
Az elektródák széleinél fellépő széleffektusok (pl. a felületekre nem merőleges elektromos tér) befolyásolják a mintázatképződést, csökkenthetik a küszöbfeszültséget, így a mintázatképződés gócaként szolgálhatnak. Úgyszintén várható, hogy diszlokációk keltésében és eltűnésében is szerepet játszhatnak. Mindenesetre ilyen típusú vizsgálatokról nincs tudomásom.

Az elméletek, gondolom, végtelen laterális kiterjedésű mintát feltételeznek. Létezik kritériuma arra vonatkozóan, hogy ez jó közelítéssel milyen esetben teljesül?

Valóban, az elméleti számítások végtelen laterális kiterjedésű mintára vonatkoznak. Tudomásom szerint nem történtek szisztematikus vizsgálatok arra nézvést, hogy mi az a minimális méret, ahol a végtelen kiterjedés már jó közelítés, azaz nincs kvantitatív küszöbkritérium. Mindenesetre a témán dolgozó kutatók abban egyetértenek, hogy a szokásos elektródaméretek (5-10 mm) és mintavastagságok (5-50 μm) esetén, amikor a cellában a mintázat több száz periódusa van jelen, a minta végtelennek tekinthető.

A közelítés biztosan nem tekinthető jónak abban az esetben, ha az elektróda szélessége a mintázat periódusával azonos nagyságrendben van. Vizsgálatok kimutatták [S. Rudroff, I. Rehberg: [Pattern formation and spatiotemporal chaos in the presence of boundaries. Phys. Rev. E 55, 2742 \(1997\)](#)], hogy míg végtelen mintában a mintázat hullámszáma a frekvenciával folytonosan változik, vékony elektródák esetén a mintázat hullámszáma csak diszkrét értékeket vehet fel.

Bár az elektróda széleffektusoknak az elektrokonvekcióra gyakorolt hatását nem tanulmányoztam, végeztem megfigyeléseket és szimulációkat vékony elektródáknál megfigyelhető homogén deformáció (Freedericksz-átmenet) esetére [N. Éber, J. Heuer, R. Stannarius, G. Tátrai, Á. Buka: [Director distortions and singularities in inhomogeneous fields. Phys. Rev. E 81, 51702 \(2010\)](#)]. Ezek azt mutatták, hogy a széleffektusok a mintavastagság néhányszorosának megfelelő távolságon észlelhetők.



410 μm *410 μm elektróda-felületű, 47 μm vastagságú mintáról a Freedericksz küszöbfeszültségnek a) 83%-ánál, b) 95%-ánál készült felvételek. A deformáció (világos foltok) csak az elektródaszélek környezetében következik be. c) Különböző feszültségekre számolt deformáció profilok. A függőleges szaggatott vonal jelzi az elektróda szélét.