

TÓTH-KATONA TIBOR – FODOR-CSORBA KATALIN – BUKA ÁGNES

Nem légnemű, nem folyadék, nem szilárd

ELSŐ RÉSZ

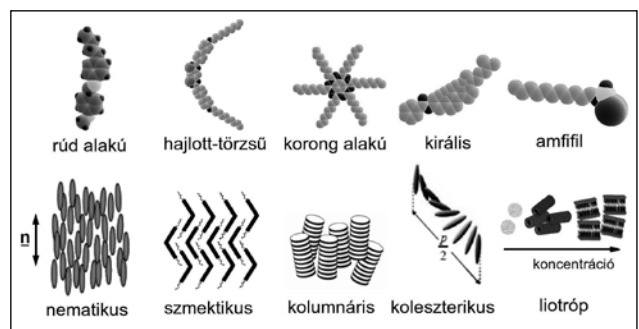
Kristály, ami folyik

Már az általános iskolák Természetismeret c. tárgyának is az egyik fő célja, hogy megismertesse a tanulókkal az anyag három halmazállapotának (légnemű, folyékony, szilárd) alapvető jellemzőit. Szintén közzismert, hogy létezik negyedik halmazállapot is, amelyet 1879-ben Sir W. Crookes írt le először. 1928-ban I. Langmuir plazmaállapotnak nevezte el.

Az ötödik halmazállapotot F. Reinitzer botanikus fedezte fel 1888-ban, amikor a koleszteril-benzoát „két olvadáspontját” figyelte meg. O. Lehmann német fizikus igazolta a megfigyelést, és a jelentkező opálos olvadékokat „gyenge mechanikai szilárdságú kristály”-ként jellemezte, bevezetve a „folyékony kristály” elnevezést (ma már inkább a *folyadékkristály* vagy a *mezofázis* az elfogadottabb terminológia [1]). Annak ellenére, hogy folyadékkristály állapotú anyagot több mint egy évezrede használ az ember (800 táján már általánosan elterjedt a mai értelemben vett szappanfőzés), az új halmazállapot még 60 évvel felfedezése után is inkább tudományos kuriózumként szerepelt. A folyadékkristályok kutatása az 1950-es évek közepétől vált intenzívebbé, miután G. Gray változatos kémiai szerkezetű, ezzel a halmazállapottal rendelkező *mezogén* anyagokat kezdett előállítani 1948-tól. Az igazi áttörést azonban a 60-as évek második fele hozta meg, amikor kifejlesztették az első folyadékkristály kijelzőket.

A folyadékkristály állapotú anyagok alkotóelemei általában nagy alak-anizotrópiájú (különböző irányokban nagyon eltérő méretű) molekulák, amelyek a hőmérséklet és/vagy a koncentráció bizonyos tartományában statisztikusan egy irányba rendeződnek. A rendezettség által kitüntetett irányt az n *direktor* jelöli. Az 1. ábrán bemutatunk néhány ilyen nagy alak-anizotrópiával rendelkező molekulát és sematikusan ábrázolunk néhány folyadékkristály fázist, többek között a csak irányrendezettséggel rendelkező *nematikus*; a réteges rendezettséggel is bíró *szmektikus*; a királis centrummal rendelkező molekulákból felépülő, csavar szerkezetű *koleszterikus* fázist. A hátsó borító háttere és a bal oldali oszlopban látható felvételek különböző folyadékkristály fázisokról készült polarizációs mikroszkópon keresztül. A folyadékkristályokról és fázisairól az olvasó további részleteket találhat akár a magyar nyelvű szakirodalomban [1], akár a világhálón [2, 3].

A folyadékkristály állapotú anyagok átszövik életünket, mindennap találkozunk velük. Idetartoznak például a szappanok, a mosószerek vízben oldva, egyes kozmetikai szerek, a selyem rostja, megtalálhatók a rovarok szárnyában és saját testünk sejtjeiben is. Megesszük őket a kenyérrrel – mint rendezett molekulákat – a gluténben, megisszuk a tejjel mint foszfolipideket, amelyek stabilizálják a zsírcseppeket. Külön kiemelendő, hogy a biológiai



1. ábra. Tipikus, folyadékkristály fázisokat kialakító molekulák (felső sor) és néhány mezofázis rendezettségének sematikus ábrázolása (alsó sor)

membránok liotróp folyadékkristály-tulajdonságokat mutatnak – testünkben a sejtfalat folyadékkristály állapotú anyagok építik fel, végzik a zsírok és ionok transzportját, befolyásolják a belső fülben található rendkívül érzékeny szőrsejtek, sőt még a DNS működését is. A liotróp folyadékkristályok általában poláros (vizet szerető – *hidrofil*) és apoláros (vizet taszító – *hidrofób*) részekkel rendelkező, ún. *amfifil* molekulákból állnak, amelyek a koncentráció függvényében többféleképpen is rendeződhetnek, amint az 1. ábrán is látható.

A teljesség igénye nélkül, alkalmazásokon és alkalmazási lehetőségeken keresztül megpróbáljuk szemléltetni a folyadékkristályok szerepét a mindennapi életben, műszaki vívmányokban, technológiai megoldásokban és a tudomány különböző, sokszor interdiszciplináris területein. Azt szeretnénk demonstrálni, hogy a folyadékkristályok messze túlmutatnak a manapság széles körben alkalmazott kijelzőtechnikákon. Az írás most megjelenő, első részében a kijelzőtechnikák mellett a folyadékkristályokat felhasználó optikai elemekről szólnunk. A következő, második részben elsősorban a folyadékkristályok biológiai aspektusaira, valamint speciális anyagokra (kevlár, negatív törésmutatójú anyagok) és úrkutatási alkalmazásokra összpontosítunk.

Folyadékkristály kijelző (Liquid Crystal Display – LCD)

A mindennapi életben elsősorban a modern elektrooptikai kijelzők kapcsán találkozunk a felhasználó a folyadékkristályokkal a számítógép, a televízió, vagy például a mobiltelefon ún. LCD-képernyőjében. Az LCD-kijelzők működési elvéről nemrég j-

lent meg átfogó ismeretterjesztő cikk [4], ezért itt inkább rövid történeti áttekintést adunk és felvázoljuk az egyik legígéretesebb fejlesztési irányt.

A kijelzők első generációja. 1966-ban G. Heilmeyer, R. Williams és W. Helfrich az RCA cégnél elkészítették az első *dinamikus fényoszóró* alapuló LCD-t. A működési elve a folyadékkristályok anizotróp (irányfüggő) elektromos tulajdonságain alapul: ha – megfelelő anyagi paraméterek esetén – a folyadékkristály rétegre elegendő nagyságú elektromos feszültséget kapcsolunk, *turbulens* áramlás [5] indul be. Ez az állapot szórja a fényt, szemben a feszültség nélküli állapottal, amely (a határoló felületek által biztosított, megfelelő irányrendezettség mellett) átérteszi a fényt. A két állapot között a kijelzéshez elegendő kontraszt jön létre, azonban az intenzív turbulens áramlás viszonylag nagy küszöb-feszültsége miatt a kijelzőket nagy fogyasztás és rövid élettartam jellemezte. Tömegek elterjedésüket az is akadályozta, hogy már 1969-ben Fergason demonstrálta a kijelzés energiatakarékosabb és hosszabb élettartamú módját. Megmutatta, hogy megfelelő kontraszt érhető el a csavart nematikus mintában is, ahol a két párhuzamos határoló üveglap felületkezelése biztosítja, hogy a direktor a lapokkal párhuzamos legyen, de a két határfelületen egymással 90° -ot zárjon be. Ezáltal a folyadékkristály rétegben a direktortér csavarodik (negyed csavart ír le) és kereszttezett polarizátorok közé téve (amelyek egyébként a polarizálatlan fényt nem engedik át) a folyadékkristály réteg a polarizált fényt (elforgatva) mégis átengedi. Elektromos feszültséget kapcsolva a cellára a csavarszekezet megszűnik (n párhuzamos lesz az elektromos tér irányával) és a kereszttezett polarizátorok miatt a minta nem engedi át a fényt.

A csavart nematikus kijelzők (Twisted Nematics, TN) működési elvét Európában Helfrich és Schadt szabadalmaztatta 1970-ben, míg az Egyesült Államokban Fergason 1971-ben. Az egyszerű, néhány szegmensből álló alfa-numerikus számkijelzők ma is ezzel a technológiával készülnek.

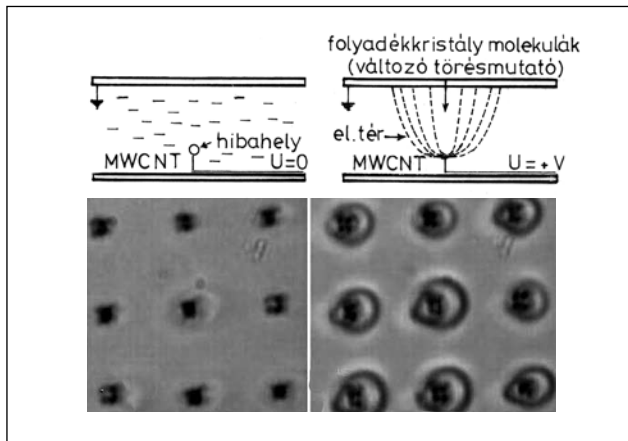
A modern LCD-kijelzők. Ahhoz, hogy az első generációs LCD-k szélesebb körű felhasználására kerüljön sor, két technikai problémát kellett megoldani. Egyrészt, az egy időben vezérelhető képelemek számának drasztikus növelését (multiplexelhetőség), másrészt a látószög növelését (a csavart nematikus kijelzőkben a kontraszt szögfüggő, akkor maximális, ha merőlegesen nézünk rá, ferdén nézve a sötét és világos állapotok még fel is cserélődhetnek). A grafikus képernyők több ezer képelemét már nem lehet külön-külön kivezetéssel ellátni és ezáltal egymástól függetlenül vezérelni. Ekkor az úgynevezett mátrixkijelzőt használják, amelyben a képelemek sor- és oszlopelektrodák metszéspontjaiban találhatók és az adott képelemet a sor- és oszlopelektrodára egyidejűleg adott feszültségimpulzussal vezérlik. A ki- és bekapcsolt állapot közötti kontrasztkülönbség azonban erősen csökken a sorok/oszlopok számával, ezért már az 5×5 -ös TN mátrixkijelző sem felel meg az elvárásoknak. A képelemek számának további növelése céljából fejlesztették ki a *szupercsavart nematikus* (STN) kijelzőket, amelyekben a direktor a két felület között nem 90° , hanem 180 – 270 fokkal fordul el, és ezáltal a címezhető sorok száma már 200 fölé növelhető. A félvezető-technológia fejlődése a probléma megoldásának másik módját kínálta fel az ún. aktív mátrix kijelzőkkel. Itt a vezérlés az egyik üveghordozóra felvitt félvezető vékonyréteg áramkörben történik. A címzés az egyes képelemek alá integrált tranzisztoros (*thin film transistor*, TFT) kapcsolóelem állapotát állítja be, így minden képelem közvetlenül vezérelt (szemben a TN- és STN-mátrixos vezérlésével, ahol a sor- és oszlopelektrodákra egyidejűleg kapcsolnak feszültségimpulzust a kijelzéshez). Az első 120×120 képelemből álló TFT LCD 1973-ban a Westinghouse-ban készült. A látószög növelésére is két különböző technológiai megoldás terjedt el: a Hitachi és az LG-Philips által kifejlesztett *síkbeli kapcsolat* (az elektromos teret létrehozó mindkét elektróda ugyanazon a felületen található, azaz a tér a kijelző felületével párhuzamos), illetve a Fujitsu és

a Samsung által kidolgozott *többszörös merőleges orientáció* (az elektródák az átteljes felületeken vannak, a direktor azokra merőleges és a direktor tér hatására bekövetkező kidőlését az egyik felületen képelemként kialakított kitérkedések szabályozzák). Ma már mindkét technológia 150 – 170 fokos látószöget biztosít 1920×1080 képelemszámú HDTV (high-definition tv) felbontás mellett. Nem véletlen tehát, hogy jelenleg a síkképernyős LCD-k gyártásában a felsorolt cégek dominálnak. Ezekről a kijelzési módokról az olvasó további részleteket a [4]-es referenciából tudhat meg.

A nagyképernyős képmegjelenítők piacát jelenleg az LCD-k és a plazmakijelzők uralják szinte teljesen kizorítva a hagyományos katódcsöves képernyőket. Ma már az LCD-k és a plazmatévék párharca is eldőlni látszik. A plazmatévék legnagyobb előnyét (a képméretet) az LCD-k lassan behozzák: 2007-ben a legnagyobb plazmatévé 103 hüvelykes volt (Panasonic), szemben a 108 hüvelykes LCD-tévével (Sharp, AQUOS) – igaz, 2008-ban a Panasonic bemutatta 150 hüvelykes plazmatelevízióját is (a közel 4 m-es képátmérő már nem lakásba való). Másrészt az LCD-k egyes tulajdonságai felülmúlják a plazmamegjelenítőkét. Így például az LCD-k sokkal kevésbé érzékenyek a „beégésre”, vagy ami még fontosabb, kisebb az energiaigényük. Eppen ezért, környezetvédelmi megfontolásból, már felmerült az EU-szabályozás lehetősége a plazmatévék még inkább háttérbe szorítására (a hagyományos izzókhoz hasonlóan) [6].

Jelenleg úgy tűnik, hogy a jövőben az LCD-kijelzők legnagyobb vetélytársa az *aktív mátrix szerves fénykibocsátó diódás* képernyő (*Active Matrix Organic Light-Emitting Diode*, AM OLED [7]) lesz, amely nem igényel háttér-megvilágítást és még energiatakarékosabb, mint az LCD. Az AM OLED-et – technológiai korlátai miatt – eddig csak mobiltelefonokban és más digitális eszközökben használták kisebb képernyőként, a Samsung azonban már bemutatta a 40 hüvelykes átmérőjű, 1920×1080 képelem felbontású panel prototípusát is. Mindennek ellenére, az ár/méret arány és a kijelző élettartama miatt (a fényemittáló anyag stabilitása bizonyos színek – főleg a kék – esetében még nem éri el a kívánt néhány száz tízezer órát) évekre telhet, míg az OLED-technológia versenyképessé válik az LCD-vel szemben. Végül megjegyzendő, hogy egyes folyadékkristályok is rendelkeznek fényemittáló tulajdonsággal és kutatják is lehetséges felhasználásukat ezen a területen.

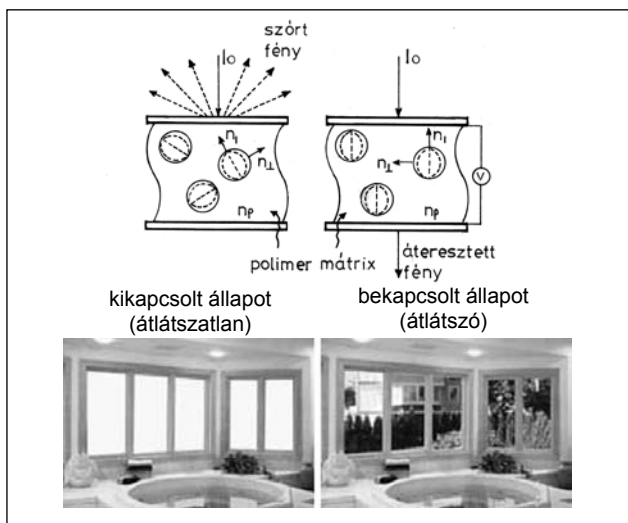
A jövő a háromdimenziós (3D) kijelzőké. A folyadékkristály jövője a képalkotásban nem csak két dimenzióra korlátozódik. **T. D. Wilkinson és csoportja (Cambridge) kidolgozta és tavaly már le is közölte a valós idejű, nagyfelbontású, háromdimenziós (3D) folyadékkristály kijelző potenciális gyártási technológiáját.** Szilíciumhordozóra elektronsugaras litográfiával katalizátorként 5 nm magas nikkelpontokat vittek fel hálószerűen, egymástól kb. $10 \mu\text{m}$ távolságra, amelyekre azután $2 \mu\text{m}$ magas, 50 nm átmérőjű sokfalú szén nanocsöveket növesztettek. Az így előkészített lapka a már ismertetett integrált tranzisztoros TFT kapcsolóelemmel kiegészítve az egyik elektróda-ként szolgált, amelyen minden nanocsőre kapcsolt feszültséget közvetlenül vezérelhettek. A másik elektródát (a közös földelést) átlátszó vezetőréteggel ellátott üveglap képezte. Az elektródák közé nematikus folyadékkristály réteg került oly módon, hogy a direktor párhuzamos legyen a határoló felületekkel (2/a ábra). A nanocső környezetében hibahelyek alakulnak ki már elektromos feszültség hiányában ($U=0$) is (2/a és 2/b ábra). Feszültséget kapcsolva rá, a nagy vezetőképességű nanocső tú alakja erős, lokalizált elektromos teret kelt, amelynek profilja a Gauss-eloszláshoz közeli (2/c ábra). Ez az inhomogén elektromos tér átorientálja a nematikus direktort, ahogy az ábra sematikus bemutatja, és ezáltal a rétegben változó törésmutató keletkezik. Ily módon elektromos térrel vezérelhető fókusz távolságú, rekonfigurálható mikrolencse-rendszer jön létre (2/d ábra), amely alkalmas hologramok létrehozására.



2. ábra. Hologramok létrehozására alkalmas 3 dimenziós lencserendszer kialakítása sokfalú szén nanocsövek (MWCNT) és nematikus folyadékkristály segítségével

Polimerben diszpergált folyadékkristályok (PDLC-k), folyadékkristály emulziók. Ezek a rendszerek kevésbé terjedtek el a kijeléstechikában, habár a technológiai megoldások 1983 óta ismertek és mára már jól kidolgozottak. Mint látni fogjuk, olyan területeket is érintenek, ahol a hagyományos kijelzők nem, vagy csak korlátozottan alkalmazhatók. A PDLC polimerkeverék mátrixba ágyazott folyadékkristály cseppekből áll. Általában két vezetőréteggel ellátott üveglap közé helyezve, elektromosan vezérelt árnyékolóként használják, melynek működési elve a fényszórás alapszik. Kikapcsolt állapotban ($U=0$) a folyadékkristály cseppek véletlenszerűen orientáltak, szórják a fényt, és ezáltal átlátszatlan (tejfehér) állapotot hoznak létre (3. ábra). Elektromos feszültség hatására a folyadékkristály az elektromos térrel párhuzamosan rendeződik és átengedi a fényt (3. ábra). Az átlátszatlan és az átlátszó állapotokon kívül köztes fénytáresztő képességek is elérhetők az elektromos feszültség megfelelő megválasztásával.

A határoló üveglapok helyett flexibilis, elektromosan vezető polimerok is használhatók. Az így kapott, akár 20 μm vékony rétegekből összehajtható, göngyölhető, nagyfelbontású, újraindítható kijelzők készíthetők, amelyek például flexibilis elektronikus papírként, színváltoztató felületborítóként, vagy akár csomagolóanyagként is megállják a helyüket.



3. ábra. A PDLC-k működési elve és egy alkalmazás

Ez a kijelzőcsalád esetenként nemcsak elektromos térrel, hanem például nyomással (érintéssel), hőmérséklettel, vagy akár UV-fénnyel is címezhető (írható), ami további széles körű alkalmazási lehetőségeket rejt magában.

Optikai elemek

A folyadékkristályokat optikai elemek széles spektrumában is alkalmazzák, például optikai kapcsolókban, fénymodulátorokban, szűrőkben.

Hangolható lézer. A hangolható lézerek napjainkban rendkívül fontosá váltak például adatátvivőként a telekommunikációs hálózatokban, vagy fényforrásként érzékelőkben, esetleg spektroszkópiai berendezésekben. A lézer tükrökkel határolt optikai üregből áll. Az üregben lévő anyagot elektromos árammal vagy másik fényforrással gerjesztjük, hogy a stimulált emisszió (fénykibocsátás) keresztül elegendő fényerősítést érjünk el, miközben a tükrök oda-vissza reflektálják a fényt az üregben. Az, hogy mely fényhullámhossz válik dominánssá és emittálódik koherensen, függ az üreg hosszától, a tükrök reflexiós tulajdonságaitól és az üregben lévő anyag tulajdonságaitól. Az ilyen rendszerekben tükröként *folyadékkristályos pixeltükröket* használhatunk a lézer hullámhosszáinak digitális hangolására és kiválasztására. A hangolás megoldható elektromos térrel vagy akár hőmérséklet-változtatással is.

A lézerek szempontjából talán még fontosabb, hogy a királis folyadékkristályok térben periodikus szerkezetet alakítanak ki (1. ábra), ami egyúttal a dielektromos térben ismétlődését is jelenti. Ennek a periódusa a látható fény hullámhossz-tartományába is eshet. Ekkor a folyadékkristály szelektíven tükrözi a fényt – az anyagban a fényterjedés szempontjából tiltott sáv jön létre az adott hullámhossz-tartományban (a félvezetők tiltott sávjának analógiájára), ún. *fotonkristály* [8] keletkezik. A tiltott sáv szélein a fotonállapotok sűrűsége megnő, és mivel a fotonkibocsátás valószínűsége arányos az állapotsűrűséggel, koherens emisszió (lézergyén) várható a tiltott sávszéleken, ha az anyagot gerjesztjük. Az ilyen, festékkel adalékolt királis folyadékkristály anyagokból kialakuló lézersugárzást már 1973-ban megjósolták, azonban csak 1998-ban demonstrálták egyértelműen. Ezzel bebizonyosodott, hogy a folyadékkristályokkal tükrök nélküli, optikailag gerjesztett lézerek készíthetők, amelyekben a folyadékkristály egyidejűleg átveszi az üreg és a gerjesztendő médium szerepét is. Az utolsó évtized kutatásai ezen a területen továbbfejlesztették a térhálósított önmegtartó rétegből (királis mezogén elasztomerből) álló médiumot, amelyben az emittált lézergyén hullámhossza mechanikai deformációval is szabályozható.

Optikai áramkörök. A számítástechnika régi álma a fényvel működő integrált áramkör. A fotonok az elektronoknál gyorsabban és hatékonyabban közvetíthetnek a jeleket. A fotonkristályokkal, amelyeknek fénytáresztő képessége a rácson belül helyről helyre szabályozható, ez az álom megvalósítható. A fotonkristályokban a szórt fotonhullámok úgy interferálnak egymással, hogy bizonyos fotonenergiák tiltott sávba kerülnek – ahogy az előbb utaltunk rá –, azaz bizonyos frekvenciájú fotonokat nem engednek át. Ha az egyébként tökéletes fotonkristályba például egy vonalhibát visznek be, akkor a kristály már úgy működik, mint egy hullámvezető: a vonalhiba mentén az egyébként tiltott frekvenciájú fotonok is terjedhetnek. Ilyen, viszonylag egyszerűen gyártható és hangolható fotonkristály az *inverz opál*, amelyben a tiltott sáv helyzete és szélessége kívülről szabályozható. Az inverz opál valójában egy légbuborékokból álló kristály, amelynek teljes térfogatát 75 százalékban levegő tölti ki. A buborékokat magába záró szilíciumváz belső felületei folyadékkristállal vannak bevonva, amelynek fénytáresztő képessége külső elektromos térrel szabályozható. A légbuborékok (amelyek mintegy csapdába ejtik

a fényt) ezzel mikroszkopikus kapcsolóként működtethetők, és csatolást létesíthetnek az áramkör elemei között. Ebben a szerkezetben a tiltott sáv jellemzői bármely pontban az elektromos térerősség helyi értékével állíthatók be. Így olyan integrált optikai áramkör készíthető, amelyben az inverz opálkristály rácsponthoz egy-egy vezeték kapcsolódik, amely helyi elektromos teret hoz létre, és amellyel az optikai kör tulajdonságai bármikor megváltoztathatók.

Ultravékony zoom-lencse. Kanadai kutatók nemrégben a papírnál ötször vékonyabb lencsét fejlesztettek ki, amely mozgó, mechanikai alkatrészek nélkül, elektromos feszültséggel zoomolható. A lencse úgy készül, hogy kis mennyiségű fényérzékeny anyagot adalékolnak a folyadékkristályhoz. Az anyag stabil polimer hálót képez, amikor lézérfényvel megvilágítják. A háló sűrűsége a besugárzó fény intenzitásától függ, és emiatt a lencse a pókhálóhoz hasonlítható: a közepén sűrűbb, mint a szélein. Amikor a lencsére gyenge elektromos teret kapcsolunk, a folyadékkristály a film közepén másként rendeződik, mint a szélein, ezért lencse alakját és optikai tulajdonságait veszi fel. A lencse görbülete (fókuszpontja) változtatható az elektromos feszültség nagyságával és frekvenciájával. Így például a feszültség 1,5 voltról 4,5 voltra növelésével a fókusz távolság 1,6 méterről 8 méterre nő néhány milliszekundum alatt. A kifejlesztett lencse fókusz távolsága 80 cm-től a végtelenig változtatható. Legigéretesebb alkalmazása a kamerákkal ellátott mobiltelefon: ez a lencse sokkal jobb minőségű lehet a jelenleg használt digitális zoom-lencsénél, amelyek csak kinagyítják a kép egy részét, így a kép minősége esetenként kiábrándító.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönettel tartoznak Vajda Anikónak a hátsó borítón látható folyadékkristály fázisokról készített felvételeiért.

Kutatásunkat jelenleg az OTKA a K-61075 sz. kutatási pályázattal támogatja.

IRODALOM

- [1] Bata L., *Folyadékkristályok. Új anyagok a tudományos kutatás és gyakorlati felhasználás számára.* Akadémiai Kiadó, Budapest, 1980.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Liquid_crystal
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Lyotropic_liquid_crystal
- [4] Éber N., *Fizikai Szemle* **56**, 123 (2006).
- [5] Buka Á., Tóth-Katona T., Börzsönyi T., Tóth P., *Fizikai Szemle* **46**, 376 (1996).
- [6] <http://www.nol.hu/lap/mozaik/lap-20090115-20090115-46>
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Organic_light-emitting_diode
- [8] http://en.wikipedia.org/wiki/Photonic_crystal

Előrejelezhető- e a földren-