

17. Folyadékkristályok és folyadékkristály kijelzők

Koltai János

2013. április

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	2
2. A folyadékkristályok alapvető tulajdonságai	2
2.1. A folyadékkristályok története	2
2.2. A folyadékkristályok szerkezete	2
2.2.1. N – Nematikus folyadékkristályok	3
2.2.2. S – Szmeztikus folyadékkristályok	3
2.3. Molekuláris jellemzők	5
2.4. Ferroelektromos folyadékkristályok	7
3. Törésmutató mérése nematikus fázisban	8
3.1. A minta hőmérsékletének szabályozása	10
3.2. A törésmutató hőmérsékletfüggésének értelmezése	10
4. Folyadékkristályok elektrooptikai vizsgálata	10
4.1. A folyadékkristály-kijelzőkről általában	11
4.2. A csavart nematikus kijelző	13
4.3. A felületstabilizált ferroelektromos kijelző	14
4.4. Mi van a lapostévében és az okostelefonban?	15
5. Számolási feladat	18
6. Gyakorló kérdések	18
7. Mérési feladatok	19
8. Ajánlott irodalom	20

1. Bevezetés

Naponta használunk olyan eszközöket, amelyekben folyadékkristály kijelző (liquid crystal display, LCD) található. Mindenhol jelen vannak, a karórában, számológépben, a telefonokban, mikrohullámú sütőben, műszerek előlapján, laptopban, televíziókban, projektorokban és még sorolhatnánk. Sikerességük annak köszönhető, hogy jelentős előnyöket nyújtanak a más technológiákkal (pl. katódsugaras csövek, vagy plazmaképernyők) szemben: vékonyabbak, könnyebbek, kevesebb energiát használnak és ma már olcsóbbak is. A mérés során a folyadékkristályok illetve a folyadékkristály kijelzők alapvető tulajdonságaival ismerkedünk meg.

2. A folyadékkristályok alapvető tulajdonságai

2.1. A folyadékkristályok története

Ha az ókori görögök nem is ismerték, de balgaság lenne azt gondolni, hogy a folyadékkristályok a XX. század végének felfedezettjei. Már 1888-ban Friedrich Reinitzer beszámolt a Bécsi Kémiai Társaság gyűlésén a koleszterol folyadék-kristályos természetéről, azaz arról, hogy két olvadási pontot talált, és a kettő között egy érdekes zavaros folyadékszerű állapotot, mely különlegesen törte a fényt [1]. Otto Lehmann 1904-es publikációjában már használja a „Flüssige Kristalle”, azaz folyadékkristály kifejezést [2]. 1911-ben Charles Mauguin lemezek közötti vékony folyadékkristály réteggel végez kísérleteket. Korai eredményei lényegében a csavart nematikus (twisted nematic, TN) kijelzők alapjainak tekinthetők. Mivel semmilyen gyakorlati hasznát nem látták a felfedezésnek, a téma feledésbe merült egészen a '60-as évek végéig, mikor az első alkalmazási lehetőségeket sikerült demonstrálni. 1970-ben született meg a csavart nematikus kijelző, mely már tömeggyártásra is alkalmas volt és a korai kvarcórákban forgalomba is került. Több technológiai újítás után a korai monitorokban és LCD televíziókban is ezt az elvet alkalmazták. A csavart nematikus kijelzőtípusból máig már sok milliárd darabot gyártottak. Ugyan nem közvetlenül a folyadékkristályokért, de ahhoz is kapcsolódó munkájáért 1991-ben Pierre-Gilles de Gennes kapott Nobel-díjat. Az indoklás szerint „az egyszerű rendszerek rendezettségi jelenségeinek tanulmányozására kifejlesztett eljárásáért, melyet általánosítva az anyag összetettebb formáinak – például folyadékkristályok és polimerek – tanulmányozására is használni lehet”. Leírása alapkőve lett – többek között – a folyadékkristályok modern elméletének.

2.2. A folyadékkristályok szerkezete

A folyadékkristály elnevezés egy különleges halmazállapotot jelöl, amely megnyúlt alakú szerves molekulákból álló kristályok megolvadásakor jön létre. Ebben az állapotban

az anyag részben kristályokra, részben folyadékokra jellemző tulajdonságokat mutat. Mechanikai tulajdonságaikban inkább folyadékokra emlékeztetnek, optikai, dielektromos és más egyéb tulajdonságaiban azonban kristályokra jellemző anizotrópiát mutatnak. A folyadékkristályos állapot mindig csak egy meghatározott hőmérséklet-tartományban áll fenn, egy jól definiált hőmérsékleten az anyag átalakul szokásos (izotrop) folyadékká.

A folyadékkristályok tanulmányozása során kiderült, hogy ezek több csoportba oszthatók. A felosztást polarizációs mikroszkópban látható jellegzetes ábrák (textúrák) és más fizikai vizsgálatok alapján lehet elvégezni. Az egyes csoportok közötti különbségek mélyebb okát elsősorban röntgendiffrakciós vizsgálatok segítségével sikerült tisztázni. Valamennyi folyadékkristály közös sajátossága, hogy bennük a molekulák irány szerint rendezetten helyezkednek el, ugyanakkor – ellentétben a szilárd kristályos állapottal – a molekulák tömegközéppontjai nem alkotnak háromdimenziós rácsot. Az egyes folyadékkristály típusok közötti különbség lényegében a tömegközéppontok rendezettségének mértékében fennálló eltérésekből adódik.

2.2.1. N – Nematikus folyadékkristályok

A folyadékokhoz legközelebb álló folyadékkristályok az úgynevezett nematikus (N) folyadékkristályok. Ebben az állapotban a tömegközéppontok elrendeződése véletlenszerű, a molekulák csak irány szerint rendezettek (lásd 1. ábrát). A nematikus folyadékkristályok – az izotrop folyadékokhoz hasonlóan – semmilyen irányú nyírással szemben nem tanúsítanak ellenállást. A „nematikus” elnevezés onnan származik, hogy polarizációs mikroszkóppal gyakran jellegzetes fonalak figyelhetők meg bennük (*nema* görögül fonalat jelent). A nematikus fázisban a molekulák nincsenek tökéletesen egy irányba rendezve. A hossz tengelyek elhelyezkedését egy eloszlásfüggvénnyel lehet jellemezni. Az eloszlásfüggvénynek egy adott irányban maximuma van, ezt az irányt egy egységvektorral, az úgynevezett direktorral jellemezzük.

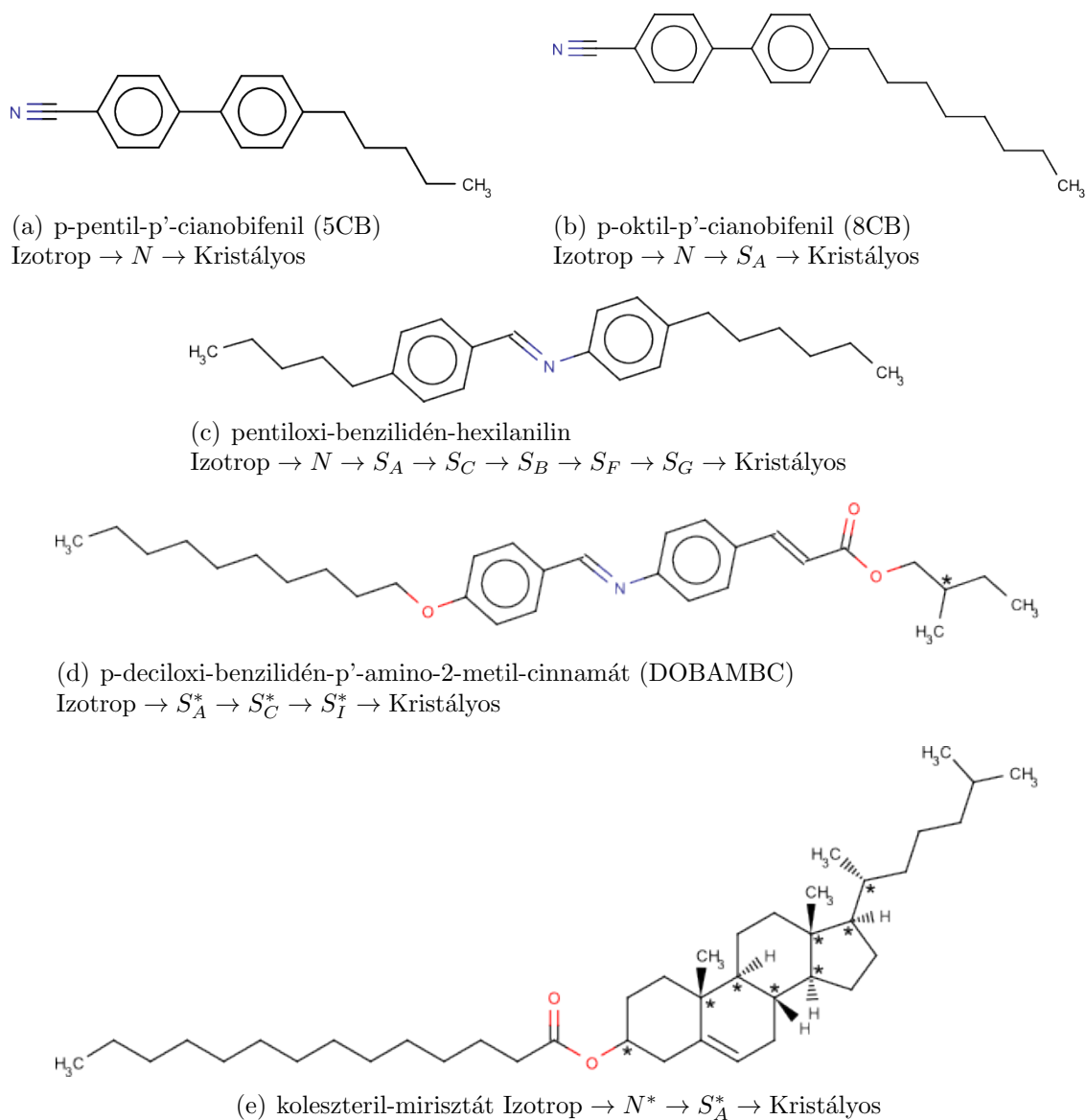
2.2.2. S – Szmeztikus folyadékkristályok

A következő folyadékkristály-csoportba azok tartoznak, amelyeknél a molekulák nemcsak irány szerint rendezettek, hanem tömegközéppontjuk párhuzamos síkokban helyezkedik el. A síkok egymáshoz képest szabadon tudnak mozogni. Ezek az ún. szmeztikus folyadékkristályok. Az elnevezés onnan ered, hogy ezek az anyagok sok tekintetben úgy viselkednek, mint a szappanok vizes oldata (*smegma* görögül szappant jelent). Az 1. ábrán látható módon a szmeztikus folyadékkristályoknak több típusa van. Egyrészt a molekulák hossz tengelyének átlagos iránya, a $\vec{d}$ direktor, a szmeztikus réteg $\vec{n}$ normálisával nem mindig párhuzamos, eszerint megkülönböztetünk egytengelyű vagy kéttengelyű folyadékkristályokat. Másrészt egy rétegen belül a molekulák tömegközéppontjai elhelyezkedhetnek rendezetlenül vagy rendezetten, sőt a molekulák hossz tengely körüli forgása is befagyhat. A továbbiak szempontjából lényeges szerepe a szmeztikus C állapotnak

<i>Fázis</i>	<i>Direktorral párhuzamos metszet</i>	<i>Direktorra merőleges metszet</i>	<i>Megjegyzés</i>
<i>N</i>			<i>3D folyadék egytengelyű</i>
<i>S_A</i>			<i>2D folyadék merőleges, egytengelyű</i>
<i>S_C</i>			<i>2D folyadék dőlt kéttengelyű</i>
<i>S_B</i>			<i>hexagonális merőleges kéttengelyű</i>
<i>S_I</i>			<i>hexagonális dőlt kéttengelyű</i>
<i>S_E</i>			<i>2D kristály halszálkás merőleges egytengelyű</i>
<i>S_G</i>			<i>pszeudo halszálkás dőlt kéttengelyű</i>

1. ábra. A folyadékkristályok fontosabb típusai

van. Az ilyen szerkezettel rendelkező anyag makroszkopikus tulajdonságai invariánsak a réteg normálisa és a direktor által meghatározott síkra való tükrözéssel és az erre a síkra merőleges tengely körüli 180°-os elforgatással szemben, azaz a szimmetriaműveletek a szerkezetet önmagába viszik át.

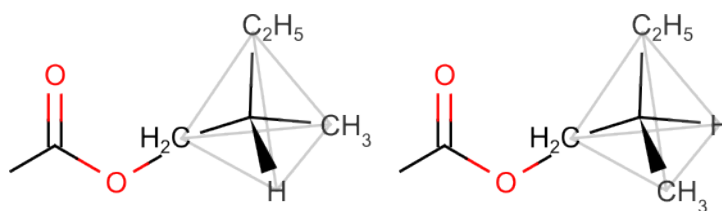


2. ábra. Néhány folyadékkristály-molekula szerkezeti képlete és fázisátalakulásainak sorrendje

2.3. Molekuláris jellemzők

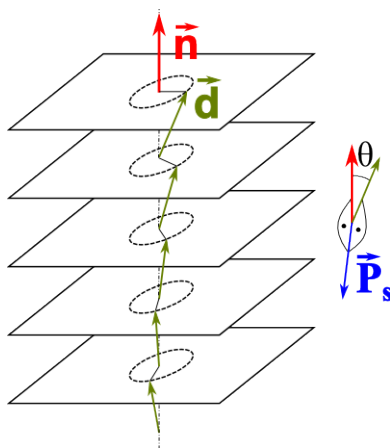
A 2. ábrán néhány olyan jellegzetes molekula szerkezete látható, amelyekből álló anyag bizonyos hőmérséklet-tartományban folyadékkristályos tulajdonságokat mutat. Itt említjük meg, hogy egy adott vegyület a hőmérséklettől függően többféle folyadékkristályos állapotot vehet fel, mint ahogyan ezt az ábra is mutatja. A 2. ábrán a D és E anyagnak

van még egy újabb tulajdonsága: mindkét vegyület tartalmaz királis szénatomot (a második többet is). A kiralitás lényege az, hogy egy tetraédres kötésben lévő szénatomhoz a négy irányban más és más atomok, ill. atomcsoportok kapcsolódnak. Ezek a molekulák nem tükörszimmetrikusak, létezik balos, ill. jobbos módosulatuk is, amelyek egymásba nem alakulhatnak át (lásd a 3 illusztrációt). A tisztán jobbos vagy tisztán balos molekulákból álló anyag optikailag aktív, azaz elforgatja a rajta keresztül haladó poláros fény polarizációs síkját.



3. ábra. Egy királis atomcsoport két lehetséges felépítése (DOBAMBC)

A királis molekulákat tartalmazó folyadékkristályban csavarszerkezet alakulhat ki, azaz a direktor egy adott irány mentén haladva periodikusan körbe forog (4. ábra). A periodicitásra jellemző mennyiség az ún. csavarállandó (P). Ez az a távolság, melyen belül a direktor azimuttszöge 360° -kal elfordul. A csavarállandó előjeles mennyiség, a konvenció szerint a jobbsavarnak pozitív érték felel meg. Tipikus értéke $0,1 \mu\text{m}$ -tól néhány μm -ig terjed. A csavarszerkezetre figyelemmel a királis S_C fázist csavart szmektikus C folyadékkristálynak nevezik, és S_C^* -gal jelölik. A nematikus fázis királis megfelelője külön nevet is kapott, ez a koleszterikus (N^* vagy Ch) fázis (először koleszterin-származékok között találtak ilyen anyagokat).



4. ábra. A csavarszerkezet szemléltetése csavart szmektikus folyadékkristályban

Azok az anyagok, amelyeknél a csavarállandó a látható fény hullámhosszába esik,

színesek, hiszen emiatt bizonyos színű fényt visszavernek. Mivel a csavarállandó hőmérsékletfüggő, az ilyen folyadékkristályok változtatják színüket a hőmérséklettel, azaz felhasználhatók a hőmérséklet mérésére.

2.4. Ferroelektromos folyadékkristályok

A tükrörszimmetria hiánya miatt az S_C^* anyagok csak egy szimmetriaművelettel szemben invariánsak, ez pedig az $\vec{n} \times \vec{d}$ tengely körüli 180° -os forgatás. E forgatás a tengelyirányú vektorokat helyben hagyja, így az S_C^* anyagok rendelkezhetnek spontán polarizációval:

$$\vec{P}_s = P_s \vec{n} \times \vec{d} / \sin \vartheta.$$

Itt P_s szintén előjeles mennyiség, abszolút értéke $(0 - 1000) \cdot 10^{-5} \text{ Cm}^{-2}$ tartományba esik. Ezen spontán polarizáció jelenléte miatt nevezzük a csavart szmektikus C folyadékkristályokat ferroelektromosoknak. Mivel a spontán polarizáció minden rétegben $\vec{n} \times \vec{d}$ irányú, tehát iránya a direktorhoz rögzített, a csavartengely (azaz rétegnormális) irányában haladva a spontán polarizáció a direktorral együtt körbe forog. Ez azt eredményezi, hogy a makroszkopikus méretű tömbi S_C^* minta általában nem rendelkezik permanens polarizációval, hiszen csavarállandónyi távolságon a spontán polarizáció mindig kiátlagolódik. Szigorúan véve tehát csak egyetlen szmektikus réteg lehet ferroelektromos.

A fenti megfontolások mutatják, hogy az S_C^* szerkezet szimmetriái a spontán polarizáció megjelenését lehetővé teszik, de a polarizáció eredetéről nem adnak számot. A molekula szerkezete és a spontán polarizáció közti egyértelmű, kvantitatív kapcsolatot egy megfelelő mikroszkopikus modell keretében kellene vizsgálnunk, de kvalitatív képet enélkül is alkothatunk a folyamatról. A molekulák atomjait összetartó kémiai kötésekben az elektroneloszlás általában nem egyenletes, ezért az egyes kötésekhez elektromos dipólmomentum rendelhető. Ennek eredményeképpen, hacsak a szerkezete nem teljesen szimmetrikus (pl. *metán*, *benzol*), a molekula rendelkezik eredő, permanens dipólmomentummal, mely a molekula hossz tengelyével általában nem párhuzamos. A hőmozgás során a molekulák hossz tengelyük körül általában szabadon foroghatnak, így ez a permanens polarizáció statisztikusan kiátlagolódik.

Az S_C^* fázisban azonban a rétegekben a dőlt királis molekulák hossz tengely körüli forgása gátoltá válik, így a statisztikus átlag 0 és a merőleges permanens dipólmomentum értéke közé eső, a hossz tengelyre merőleges dipólmomentumot eredményezhet. Ha az ismert anyagok mért spontán polarizációját a molekulák becsült permanens dipólmomentumával összehasonlítjuk, azt kapjuk, hogy a statisztikus átlag a merőleges dipólmomentum néhány százaléka.

Összefoglalásképpen megállapíthatjuk, hogy folyadékkristályokban a ferroelektromosság fellépéséhez az alábbi feltételeknek kell teljesülnie:

1. kéttengelyűség (a rétegnormális és a direktor két független, kitüntetett irány),

2. kiralitás (tükörszimmetria hiánya),
3. molekula merőleges dipólmomentuma.

Az elmúlt években már számos olyan vegyületet állítottak elő, melyek csavart szerkezettel is rendelkezhetnek. Egy adott vegyület esetén az anyagi paraméterek összessége (optimális hőmérséklet-tartomány, dőlésszög, csavarállandó, spontán polarizáció, stb.) általában nem felel meg igényeinknek, ezért tiszta anyagok helyett elegyeket szokás használni, ahol az egyes komponensek alkalmas választásával szinte tetszőleges anyagi paraméter beállítható.

Ebben az is segítséget nyújt, hogy pl. a ferroelektromosság fenti három feltételének nem kell szükségszerűen az elegy minden tagjára teljesülnie, sőt az is elég lehet, ha az egyes feltételeket különböző komponensek testesítik meg. Pl. ha nemkirális szmektikus C (tehát nem ferroelektromos) folyadékkristályhoz kis mennyiségű (néhány %) merőleges dipólmomentummal rendelkező királis anyagot (nem szükséges folyadékkristálynak sem lennie!) adunk adaléknak, az elegy ferroelektromos S_C^* szerkezetű lehet.

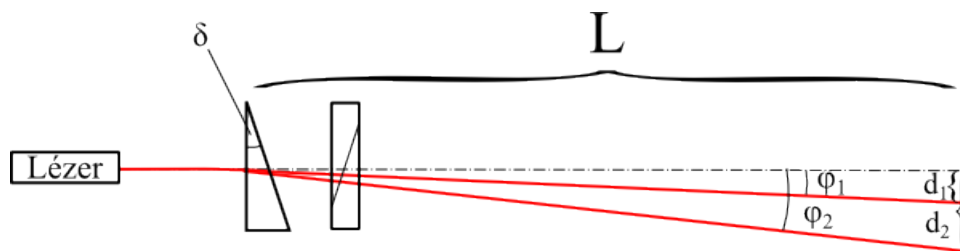
Itt kívánjuk megjegyezni, hogy az S_C^* nem az egyedüli folyadékkristály-fázis, mely ferroelektromosságot mutathat. Léteznek további, alacsonyabb hőmérsékleten előforduló, rendezettebb ferroelektromos fázisok (pl. S_F^* , S_G^* , S_I^*) is. Ezek ugyanúgy tartalmazzak királis molekulákat, továbbá réteges, dőlt szerkezetűek, mint az S_C^* , az eltérés közöttük a szmektikus rétegeken belüli tömegközépponti rendezettség mértékében van.

3. Törésmutató mérése nematikus fázisban

A folyadékkristályok jellegzetes tulajdonsága, hogy kettőtörőek. Általában a törés jelensége azzal függ össze, hogy a mintán áthaladó fény elektromos térerősségvektora az anyag molekuláit polarizálja. Ez a polarizáció, amely időben periodikusan változik, másodlagos sugárzáshoz vezet. Az eredeti fénysugár és a másodlagos sugárzás interferenciája hozza létre a megtört sugarat.

Anizotrop közegekben – szilárd kristályokban és folyadékkristályokban – az elektromos tér által indukált polarizáció nagysága és iránya az elektromos tér irányától is függ. Ez általános esetben arra vezet, hogy az anizotrop közegre beeső fénysugár két komponensre válik szét. A két komponens különböző fázissebességgel halad a közegben, következésképpen, ha a fény valamilyen szögben esik a két közeg határfelületére, a két sugár különböző irányba halad tovább. Ez a kettőtörés.

A nematikus folyadékkristályok optikailag úgynevezett egytengelyű kristályokként viselkednek. Az egytengelyű kristályokat az jellemzi, hogy létezik bennük egy szimmetriatengely, amelyre merőleges síkban minden irány egyenértékű (legalábbis optikai szempontból). Ez a szimmetriatengely a direktorral esik egybe. A kettőtörés során keletkező egyik fénysugár a szimmetriasíkban van polarizálva (azaz az elektromos térerősségvektor ebben a síkban fekszik). Ez az úgynevezett ordinárius sugár, a fázissebesség c/n_o , ahol



5. ábra. Mérési elrendezés a kettőtörés hőmérsékletfüggésének méréséhez

n_o az ordinárius törésmutató. A másik sugár az ordinárius sugárra merőlegesen polarizált (extraordinárius sugár), fázissebessége c/n_e , ahol n_e az extraordinárius törésmutató.

Általában egy mintában – amely két üveglap közé helyezett folyadékkristály-rétegből áll – a direktor helyről helyre változik. A közönséges mikroszkópban nem használjuk ki a fény polarizációs tulajdonságait, a leképezés (alsó megvilágítás esetén) a vizsgált tárgyban levő esetleges inhomogenitások vagy a tárgy szélén létrejövő fényszórás alapján keletkezik. Polarizációs mikroszkópban a minta kereszttezett polarizátorok között helyezkedik el, így a képen kontraszt-különbségek jelentkeznek aszerint is, hogy az anizotrop tárgyban az adott helyen mekkora a kettőtörés, ill. hogyan helyezkedik el az optikai tengely (a direktor) a beeső fény polarizációjához viszonyítva. A polarizációs mikroszkóp ezért különösen alkalmas a folyadékkristályok vizsgálatára.

A törésmutató méréséhez olyan mintát kell készíteni, amelyben a direktor mindenütt ugyanabba az irányba mutat. Megfelelő kezelési módszerekkel elérhető, hogy a mintát határoló két üveglapon a molekulák egy rögzített irányba orientálódjanak, ekkor az egész mintában ebbe az irányba állnak be a molekulák. A mérésben használt cellánál az üvegre vékony SiO réteget párologtattunk. Ez biztosítja, hogy a molekulák az üvegen egy adott irányba álljanak be.

A prizma alakú mintára polarizált sugárnyalábot bocsátunk a prizma beeső lapjára merőlegesen (5. ábra). Ha a beeső sugár polarizációvektorának van az optikai tengelyre merőleges (ordinárius sugármenet) és azzal párhuzamos összetevője is (extraordinárius sugármenet), akkor a prizmát elhagyva a sugár két részre válik, bizonyítva ezzel a folyadékkristály kettőtörő tulajdonságát. Azt a megfelelő polarizációs síkot, amikor a megtört sugarak kb. egyenlő fényességgel, jól láthatók, a prizma és a sugarat kibocsátó lézer közé helyezett polárszűrővel választjuk ki. A prizma adatainak és az eltérülés szögének ismeretében a törésmutatók számíthatók.

Minthogy a prizma törőszöge kicsi, a sugarak eltérülése is az, így hosszú fénnyútra van szükség mérhető eltérülés létrehozásához. Az eltérülés szögének mérésére több módszer áll rendelkezésre. Az egyik módszer a távolságok mérésén alapszik. A mérés pontosítható, ha a prizma helyére kalibrált optikai rácsot teszünk és a különböző rendek elhajlási távolságát mérve az ernyőnk szögekben kalibráljuk. Így rögtön az eltérülés szögét olvashatjuk le.

3.1. A minta hőmérsékletének szabályozása

A folyadékkristályok törésmutatói erősen függnak a hőmérséklettől, ezért fontos feladat a mérőcella hőmérsékletének szabályozása. A hőmérséklet változtatását egy elektromos kályhával és vízzel, mint hőcserélő közeggel végezzük. A mintatartó hőmérsékletét termopárral mérjük. A minta és a mintatartó a réz kontaktusokon keresztül erősen hőkontaktusban van, ha a mintatartó hőmérséklete csak lassan változik, akkor a minta hőmérséklete követni fogja. Lényeges, hogy a mérés megkezdése előtt ne felejtsük el a hűtővizet megnyitni az alacsony hőmérsékletű fixpont biztosítása érdekében. Elegendő enyhén csepegősen megnyitni a csapot, mert különben akkora disszipációja lesz a rendszernek, hogy a kályha nem tudja felmelegíteni a mintát. Ha túlzottan hirtelen megnyitjuk a csapot, akkor a cső elszabadulhat és kifröccsenhet a víz a mosdóból! A kályhán állíthatjuk a fűtőáram nagyságát, amivel elérhetjük, hogy a kályha által közölt hő és a víz által elszállított hő egyensúlyba kerül, a hőmérséklet stabilizálódik.

3.2. A törésmutató hőmérsékletfüggésének értelmezése

Mint a mérések mutatják, a nematikus fázisban a törésmutatók – az izotrop fázistól eltérően – erős hőmérsékletfüggést mutatnak. Ez azért is különös, mert ilyen hőmérsékletfüggés szilárd, kristályos fázisban sem lép fel. A jelenséget a következő módon értelmezhetjük: a folyadékkristályban a molekulák hossz tengelyei nagy valószínűséggel a direktor irányába állnak. A rendezettség mértékét jellemezhetjük a hossz tengelyek eloszlásfüggvényének második momentumával, az ún. rendparaméterrel. A rendparamétert a következő módon szokás definiálni:

$$S = \frac{1}{2} \langle 3 \cos^2 \theta - 1 \rangle,$$

ahol θ egy kiválasztott molekula hossz tengelye és a direktor által bezárt szög. A szögletes zárójel statisztikus átlagot jelöl. Teljes irány szerinti rendezettségnél a rendparaméter értéke 1, izotrop közegben pedig 0.

A rendszer belső energiája akkor lenne minimális, ha a rendezettség tökéletes lenne ($S = 1$). A molekulák azonban termikus mozgást végeznek, így az egyensúlynak egynél kisebb rendparaméter felel meg. A hőmérséklet növelésével a termikus mozgás erősödik, tehát a rendezettség mértéke csökken. Ez azt jelenti, hogy a direktor egyre kevésbé lesz kitüntetett irány, így az anyagot jellemző mennyiségek anizotrópiája egyre csökken.

4. Folyadékkristályok elektrooptikai vizsgálata

A folyadékkristályok anizotrópiája nemcsak az optikai tulajdonságokból, hanem az elektromos térbeli viselkedésükből is nyilvánvalóvá válik. A dielektromos permittivitás folyadékkristályokban tenzorral megadható mennyiség ($\hat{\epsilon}$), egytengelyű folyadékkristályokban

(pl. nematikusokban) a következő alakban írható fel:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_0 (\varepsilon_{\perp} \delta_{ij} + (\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp}) d_i d_j),$$

ahol $\varepsilon_{\parallel}$ a direktorral párhuzamos, $\varepsilon_{\perp}$ a rá merőleges irányban mért permittivitás, δ_{ij} pedig a Kronecker-delta. Az elektromos tér az anyag $\vec{P}$ polarizációjával hat kölcsön:

$$\vec{P} = \hat{\varepsilon} \vec{E} - \varepsilon_0 \vec{E},$$

és olyan direktoreloszlás alakul ki, hogy a W kölcsönhatási energia minimális legyen:

$$W = - \int \vec{P} \cdot d\vec{E} = \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2} \vec{E} \hat{\varepsilon} \vec{E}.$$

Könnyen belátható, hogy pozitív dielektromos anizotrópia ($\varepsilon_{\parallel} > \varepsilon_{\perp}$) esetén a direktor a térrel párhuzamosan, negatív anizotrópia ($\varepsilon_{\parallel} < \varepsilon_{\perp}$) esetén pedig a térre merőlegesen áll be.

Ferroelektromos folyadékkristályok (S_C^*) esetén figyelembe kell venni a spontán polarizáció járulékát is azaz:

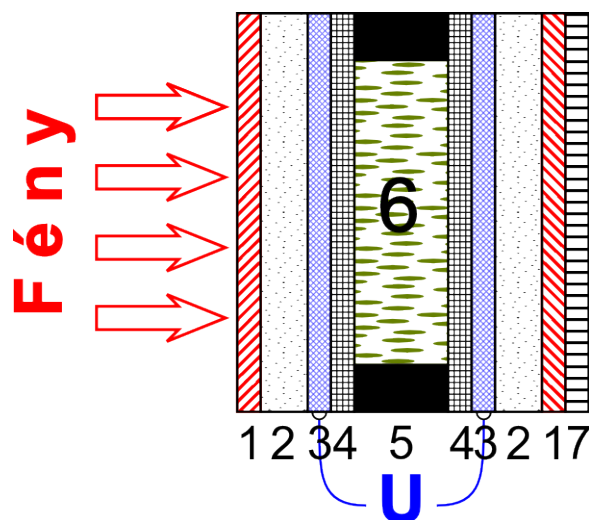
$$W = -\vec{P}_s \vec{E} + \frac{\varepsilon_0}{2} E^2 - \frac{1}{2} \vec{E} \hat{\varepsilon} \vec{E},$$

és $\hat{\varepsilon}$ alakja is bonyolultabb, mert ez a rendszer kéttengelyű. A szokásos kis terek esetén az első tag dominál, tehát ferroelektromos anyagokban a spontán polarizáció beáll a tér irányába, a direktor pedig erre merőleges lesz. Ez egyben azt is jelenti, hogy az elektromos tér az S_C^* fázis csavarszerkezetét képes kicsavarni, eltüntetni, másrészt a direktor átorientálása az erősebb ferroelektromos kölcsönhatás miatt gyorsabban bekövetkezhet, mint pl. nematikusok esetében.

Összefoglalásul elmondhatjuk, hogy az elektromos tér képes a folyadékkristály eredeti direktorelrendeződését megváltoztatni. Mivel a direktor egyben optikai tengely is, eközben az optikai tulajdonságok is változnak. Ez teszi lehetővé, hogy a folyadékkristályokat elektrooptikai kijelzők készítésére felhasználjuk. Az első, kezdetleges kijelző elkészítése (1968) óta a folyadékkristály-kijelzők modern változatai az elektronika számos területén szinte egyeduralkodóvá váltak és napjainkban is egyre újabb alkalmazási lehetőséget nyújtanak. A ma gyártott, ill. fejlesztett LCD-knek (LCD=Liquid Crystal Display) számos változata ismert, melyek konstrukciója és működési elve lényegesen különböző lehet. Ennek ellenére vannak közös vonásaik, amiket az alábbiakban összegezhethetünk. A mérés során kétféle kijelzőtípust fogunk vizsgálni, a csavart nematikus és a ferroelektromos szmektikus kijelzőt.

4.1. A folyadékkristály-kijelzőkről általában

A folyadékkristály-kijelző két üveglap közé zárt folyadékkristály-réteget tartalmaz (6. ábra). A határoló lapok belső felületén átlátszó SnO_2 vezető réteg található, így az



6. ábra. A folyadékkristályos kijelző tipikus felépítése. 1 - polarizátor, 2 - üveglap, 3 - átlátszó elektróda, 4 - orientáló réteg, 5 - távtartó, 6 - folyadékkristály, 7 - tükör (csak a reflexiós típusoknál van)

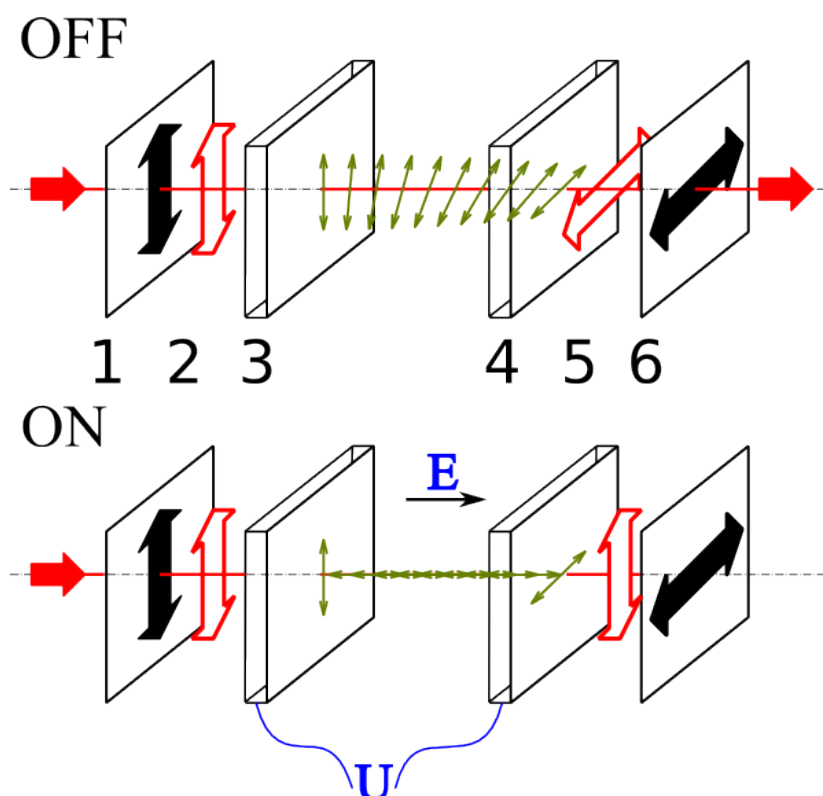
elektromos tér az üveglapokra merőleges. Az elektródák alkalmas orientáló bevonattal vannak ellátva (pl. megdörzsölt polimer vagy felgőzölt SiO réteg), melyek kijelölik az elektródákon a direktor irányát. Ez biztosítja, hogy a cella elektromos tér nélkül mindig ugyanabba az alapállapotba kerüljön vissza. A lapokat szigetelő távtartók ($1 - 15 \mu m$) választják el, és az egész cella hermetikusan le van zárva. Az üveglapok külső felületére gyakran polarizátor fólia van felragasztva, hogy a cella ki- illetve bekapcsolt állapota között a szükséges kontraszt megvalósítható legyen.

Minden folyadékkristály-kijelző közös jellemzője, hogy saját fényt nem bocsájt ki magából, csak a rajta áthaladó fény intenzitását változtatja meg. Ez teszi lehetővé, hogy a kijelzők minimális teljesítmény-felvétellel, kis feszültségekkel működjenek (néhány nW/cm^2 , $1 - 10V$), így kiválóan használhatók teleppel működő hordozható eszközökben. Hátrányaik közé sorolható, hogy vezérlésükhöz egyenszint nélküli váltófeszültség szükséges, mert egyenkomponens hatására az elektródák polarizálódhatnak és a cella élettartama ezáltal lecsökken.

A folyadékkristály-kijelzőkben felhasznált anyagok a gyárak féltve őrzött recept alapján készülők, sokszor 10-20 vegyületből álló elegyei, melyekkel az adott alkalmazáshoz legoptimálisabb anyagi paraméterek állíthatók be. Ezek közül talán a működési hőmérséklet-tartomány a legfontosabb (azaz amikor az anyag folyadékkristály állapotban van). A működési hőmérséklet alkalmas anyagválasztással már kb. $-30^\circ C$ -tól kb. $+120^\circ C$ -ig terjedhet. A folyadékkristályok alkalmazási köre a kijelző felépítésétől és az elektródák mintázatától függően széles körben változhat. Mintázat nélküli elektródák fénymodulátornak, hétszegnemeses kijelzők műszerekben, kalkulátorokban, órákban számok

megjelenítésére, a multiplex vezérlésű mátrixkijelzők pedig televízió, számítógép képernyőjeként használhatók. Az alábbiakban két kijelzőtípus működési elvét mutatjuk be. A csavart nematikus kijelző a jelenleg legelterjedtebb, legegyszerűbb kijelzőtípus. A felületstabilizált ferroelektromos folyadékkristály-kijelző gyors mátrixkijelzők kialakítását teszi lehetővé.

4.2. A csavart nematikus kijelző



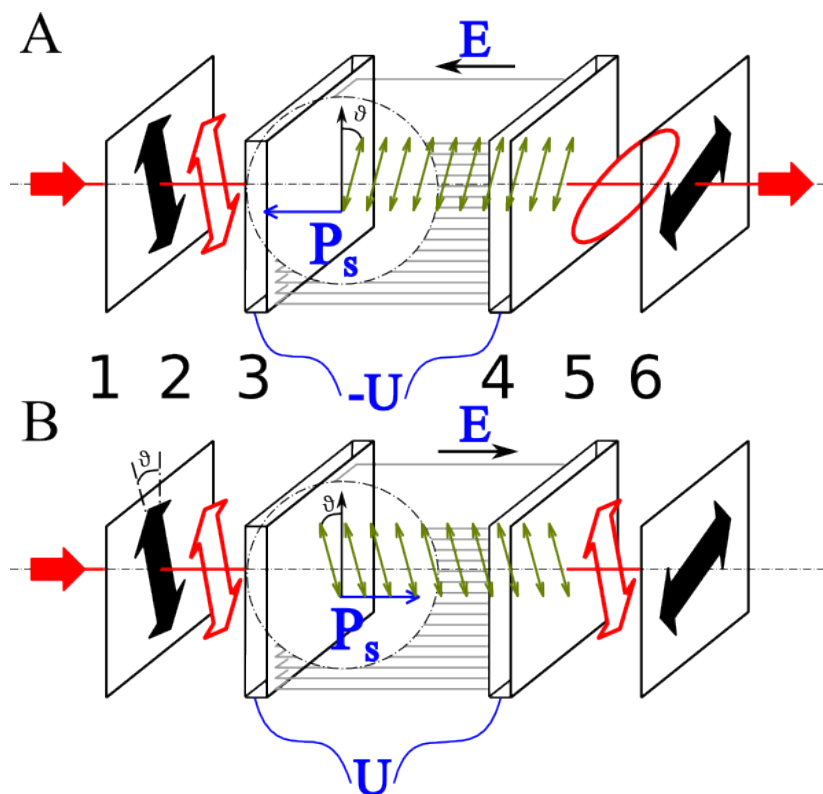
7. ábra. A csavart nematikus kijelző felépítése és működési elve. 1 - bemeneti polarizátor, 2 - a belépő fény polarizációja, 3,4 - határoló átlátszó elektródák, 5 - a kilépő fény polarizációja, 6 - kimeneti polarizátor

Az elektródák olyan felületkezelést kaptak, hogy a molekulák a felülettel párhuzamosan adott irányban, de a két üveglapon egymáshoz képest 90° -os szögben álljanak (lásd 7. ábrát). A cellát pozitív dielektromos anizotrópiájú nematikus folyadékkristállal kitöltve a direktor az egyik üveglaptól a másikig haladva fokozatosan elcsavarodik. Mindkét üveglapon polarizátor fólia van felragasztva oly módon, hogy az általuk átengedett fény polarizációja a direktorral párhuzamos legyen, vagyis a polarizátorok keresztezett állapotban vannak. Mivel a mintában kialakuló csavar csavarállandója (kb. $4 \times (5 - 10) \mu\text{m}$)

sokkal nagyobb, mint a fény hullámhossza ($0,3 - 0,7 \mu\text{m}$), a cellán merőlegesen áthaladó fény polarizációja a direktorral együtt 90° -ot elfordul.

Az elektromos tér nélküli (kikapcsolt, OFF) alapállapotban tehát a mintán átmenő fény intenzitása a keresztezett polarizátorok ellenére maximális. A cellára feszültséget kapcsolva a felületekre és a kezdeti direktor irányra merőleges elektromos tér alakul ki, ennek hatására a molekulák befordulnak a térrel párhuzamos irányba, ezáltal az optikai forgatás megszűnik, és így a keresztezett polarizátorokon nem megy át a fény: a bekapcsolt állapot (ON) tehát sötét. Az elérhető maximális kontrasztviszony kb. $100 : 1$.

4.3. A felületstabilizált ferroelektromos kijelző



8. ábra. A felületstabilizált ferroelektromos folyadékkristály-kijelző felépítése és működési elve. 1 - bemeneti polarizátor, 2 - a belépő fény polarizációja, 3,4 - határoló átlátszó elektródák, 5 - a kilépő fény polarizációja, 6 - kimeneti polarizátor

Ez a kijelző csavart szmektikus C fázisú, vagyis ferroelektromos folyadékkristályt tartalmaz. A határoló lapokon olyan speciális felületkezelést kell elvégezni, hogy a molekulák a felülettel párhuzamosan helyezkedjenek el. Az elkészítése során azt is biztosítják, hogy a szmektikus rétegek az elektródákra merőlegesek legyenek. Mivel az S_C^* fázisban

a direktor a rétegnormálissal ϑ szöget zár be, a direktor a felületen csak két helyzetben lehet. A két irány között 2ϑ szög van, az A helyzetben a spontán polarizáció balra, a B helyzetben jobbra mutat.

Ez a határfeltétel nyilvánvalóan nem fér össze az S_C^* fázis csavarszerkezetével, ezért a csavarszerkezet – a csavarállandó - mintavastagság (P/L) aránytól függő mértékben – torzul. Ha a $P/L > 2$ a felületi kölcsönhatás miatt a csavarszerkezet teljesen eltűnik, a minta teljes vastagságában homogén, az A vagy a B helyzetnek megfelelő, direktor-eloszlás alakul ki (lásd a 8. ábrát). Az elektromos tér nélküli esetben az A, ill. B beállítás azonos energiájú, így a minta előéletétől függően a cellában csak A, csak B, vagy mindkét beállású tartomány található. Elektromos tér jelenlétében a ferroelektromos kölcsönhatás révén a spontán polarizáció a térrel párhuzamosan áll be azaz balra mutató tér esetén az A, jobbra mutató esetében a B beállítás jön létre. Mindkét beállítás a cellának stabil állapota, azaz a tér megszüntetésekor nem változik meg. A felületstabilizált ferroelektromos kijelző tehát bistabil, az átorientálás csak ellenkező irányú tér hatására következik be. A cella úgy helyezkedik el a keresztezett polarizátorok között, hogy a mintába bemeneti polarizátor párhuzamos a direktor irányával az egyik (a 8. ábrán a B) állapotban. Ekkor a rétegen áthaladó fény tisztán extraordinárius nyalábból áll, és így a keresztezett polarizátorokon átmenő fény intenzitás nulla lesz ($I_B = 0$). Az A állapotban az optikai tengely (a direktor) a B állapothoz képest 2ϑ szöggel el van fordulva. Az átmenő fény intenzitása ez esetben a fény polarizációja és az optikai tengely közötti szögtől (2ϑ) valamint a kettőstörő réteg optikai úthosszkülönbségétől ($\Delta s = (n_e - n_o)L$) függ a következőképpen:

$$I_A = I_0 \sin^2(4\vartheta) \sin^2(\pi \Delta s / \lambda). \quad (1)$$

Maximális kontrasztot akkor kaphatunk, ha a dőlésszög az S_C^* fázisban $\vartheta = 22,5^\circ$, és $\Delta s \approx \lambda/2$. Mivel a törésmutató anizotrópia szokásos értéke $n_e - n_o = 0,12 - 0,18$, ez utóbbi feltétel az $L \approx 1,5 - 2 \mu\text{m}$ mintavastagsággal elégíthető ki.

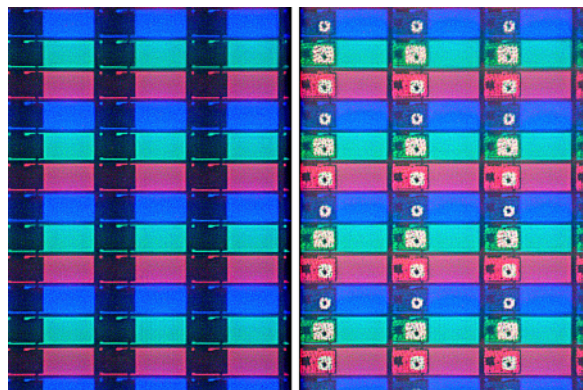
4.4. Mi van a lapostévében és az okostelefonban?

Míg a kis felbontású hétszegmenses kijelző minden képelemét közvetlenül lehetett vezérelni, a nagyfelbontású képernyők sok ezer képpontjánál erre nincs lehetőség. E képernyőkben a képpontok sorokból és oszlopokból álló mátrixban helyezkednek el. A mátrix kijelző lehet passzív, vagy aktív. A passzív mátrixnál a az egyes pixelek fényáteresztőképessége a sor- és oszlopelektródákra adott feszültségimpulzusok hatására soronkénti címzéssel állítható be, amit a pixelnek meg kell őriznie a következő frissítésig (innen a passzív elnevezés). A passzív mátrix előállítása egyszerűbb és olcsóbb, de csak speciális kijelzési módokkal (pl. szuper-csavart nematikus (STN) vagy felületstabilizált ferroelektromos szmektikus) kombinálva használható. Az aktív mátrixban minden képponthoz tartozik egy vékonyréteg tranzisztor (thin film transistor, TFT) kapcsolóelem. A címzés

a félvezetőben történik, a tranzisztor pedig folyamatosan biztosítja a pixel állapotának megfelelő térerősséget a folyadékkristály számára. Az aktív mátrix technológia bonyolultabb, de mára már nagy méretű képernyők is gyárthatók, akár a csavart nematikus kijelzési mód felhasználásával is.

A folyadékkristály kijelzési módok alapvetően világos-sötét kontraszt megvalósítását teszik lehetővé. A színes kijelzés megvalósításához az üveg hordozóra pixelenként felváltva vörös, kék és zöld színszűrőket integrálnak. A szemünk a közeli pixeleket összemosza és így látunk egy adott összetett színt. A 9. ábrán egy ilyen színes, aktív mátrix képernyő kinagyított részlete látható.

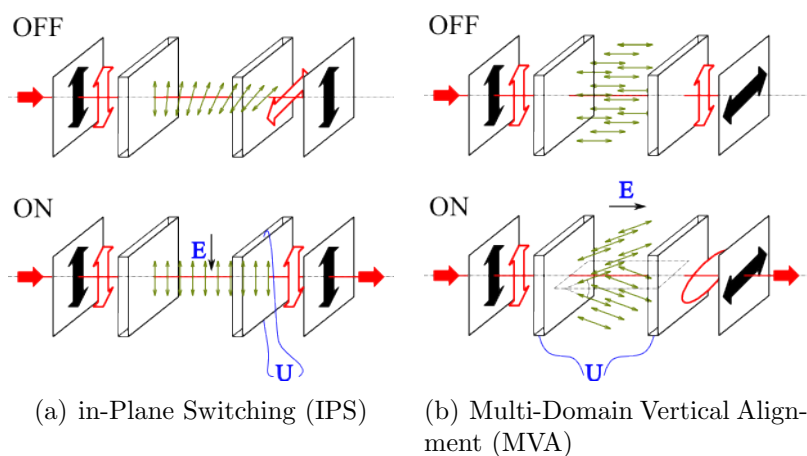
A folyadékkristály-kijelzők nem bocsájtanak ki saját fényt, ezért mögéjük elhelyeznek egy fényt kibocsájtó réteget (=back-light unit). Ez állandóan világít, amikor a kijelző működésben van, ennek a fényét takarja ki a folyadékkristály-kijelző, ha sötét pixelt akarunk megjeleníteni. Éppen ez a pazarlás okozza, hogy ahol a még kisebb fogyasztást akarnak elérni (e-olvasók vagy okostelefonok), ott már nem LCD-t alkalmaznak. A pixelek fényességét itt – az átlátszó elektródák helyett – átlátszó tranzisztorok mátrixa (=thin film transistor, TFT) szabályozza – a megfelelő térerősség létrehozásával. A mátrixok alapvetően lehetnek passzív vagy aktív mátrixok. Előbbiben soronként és oszloponként frissül, az adott pixel fényessége, amit a pixel megőriz a következő frissítésig (innen a passzív elnevezés). Az aktív mátrixban minden képponthoz tartozik egy tranzisztor és minden tranzisztort külön címezhetünk. A passzív mátrix előállítás egyszerűbb, olcsóbb, de nagy felbontású kijelzőt nem lehet vezérelni vele, mert a soronkénti frissítés miatt lassú lesz. Ezenfelül még színszűrő fólia kerül a kijelző felületére, a színes kép előállításához több pixelt hoznak létre, amiket vörös-kék-zöld mintázattal látnak el.



9. ábra. Dell Axim X30 kézisámítógép TFT LCD kijelzőjén látható fehér háttér képe. A kép bal oldala a kijelző saját fényével készült, míg a jobb oldalon a külső megvilágítás miatt látszanak az egyes pixelekhez tartozó tranzisztorok is. A képek egy Olympus mikroszkóppal és PixelINK kamerával készültek. (Forrás: [wikipedia](#))

Az első laptop képernyőkben és LCD monitorokban passzív mátrix STN vagy aktív

mátrixsal kombinált csavart nematikus kijelzőt (TN-TFT) találunk. Játékosoknak ma is megfelelő ez, mert olcsó és nagy sebességű kijelzőtípus. A nagyméretű képernyőknél (pl. lapos televízió) elengedhetetlen megnövelt láthatósági szöget két további kijelző típus, az IPS (=in-plane switching) és a MVA (=multi domain vertical alignment) biztosítja. Az IPS felépítése (10(a). ábra) hasonlít a csavart nematikuséhoz, a különbség az, hogy az elektródák nem a cella két áttellenes oldalán helyezkednek el, hanem egy oldalon elhelyezett két elektródával hoznak létre elektromos teret, ami most a cella síkjában (innen az elnevezés) forgatja el a direktort. A polárszűrők a TN-hez képest elfordítva, párhuzamosan állnak, ezért a kikapcsolt (OFF) állapotban nincs átmenő fény és a bekapcsolt állapotban engedi át a cella a fényt. Az MVA esetén nem csavart folyadékkristályt alkalmaznak (10(b). ábra), és kikapcsolt állapotban (OFF) a direktor állása a felületekre merőleges, a keresztezett polárszűrők miatt a cellán nem jut át fény. Bekapcsolt állapotban (ON) a tér hatására – a negatív dielektromos anizotrópia következtében – a direktor az eredeti irányhoz képest kihajlik és a ferroelektromos szmektikus kijelzőnél leírtakhoz hasonlóan a fény a kettőstörés miatt jut át a cellán. A pixelt úgy osztják fel, hogy különböző helyein a direktor más-más irányba hajoljon ki (multi-domain). Erre a nagyobb láthatósági szög érdekében van szükség. Az IPS panel előnye a jó színfelbontás, míg az MVA panel kontrasztja jobb és nagyobb szögben látható jól. Mindkettőt és persze a továbbfejlesztett altípusaikat alkalmazzák monitorokban és lapos televíziókban.



10. ábra. További kijelzőtípusok működési elve

A ferroelektromos szmektikus folyadékkristályok nagy méretű kijelzők tömeges gyártására nem váltak be, a prototípusok viszont egészen különös dolgokat is tudtak. A bistabil szerkezet miatt a képernyőn a kikapcsolás után is látható maradt a kép, hiszen a vezérlő feszültséget csak a megváltoztatáshoz szükséges bekapcsolni. Ezen kijelzők alkalmazási területe végül a gyors optikai záruk (shutter) lettek, ilyen folyadékkristály-kijelző található az úgynevezett aktív 3D szemüvegekben, ahol a háromdimenziós hatást úgy

érik el, hogy a kivetítőn felváltva küldik a jobb és bal szemnek szánt képeket, a szem-üvegek pedig evvel szinkronban engedik vagy nem engedik be a képeket a szemünkbe.

A modern projektorokban is folyadékkristály-kijelző modulálja a fényt a képalkotáshoz. Az alapszíneknek megfelelően nem is egy, hanem három kijelzőt alkalmaznak, amiknek a képét egymásra vetítik (itt nem lehet különböző színű szomszédos pixelekre bízni az eredményt, mert a nagy pixelméret miatt a színek ekkor „szétcsúszhatnak”).

A folyadékkristály kijelzők nem bocsájtanak ki saját fényt, ezért mögójük elhelyeznek egy fényt kibocsájtó réteget (=back-light unit). Ez állandóan világít, amikor a kijelző működésben van, ennek a fényét takarja ki a folyadékkristály kijelző, ha sötét pixelt akarunk megjeleníteni. Éppen ez a pazarlás okozza, hogy ahol még kisebb fogyasztást akarnak elérni (e-olvasók vagy okostelefonok), ott már nem biztos hogy LCD-t alkalmaznak. Az okostelefonokban például egyre gyakoribbak az ún. AMOLED (=active matrix organic light emitting diode) kijelzők. Ezek nem folyadékkristályokat, hanem olyan szerves molekulákat tartalmaznak, amelyek az elektromos áram hatására fényt bocsátanak ki. Ezek a kijelzők sötét állapotban nem fogyasztanak áramot és ennek megfelelően a teljesítményfelvételük sokkal kisebb lehet, mint az LCD-ké. Fogyasztásuk attól is függ, hogy sötét alapon fehér betűket, vagy fehér alapon fekete betűket jelenítünk meg velük. Hátrányuk, hogy napsütésben még kevésbé láthatóak, mint az LCD-k.

A jelenleg (2013-ban, szerk.) LED TV-ként árult televíziók még LCD kijelzők, a LED (=light emitting diode) bennük csak a hátsó megvilágítás módját jelenti. A televíziók méretében és felbontásában még nem versenyképes az igazi LED-alapú kijelzők előállítása. Az e-olvasók, az energiatakarékos kijelzők gyorsan terjedő új családja, a szokásos kijelzőkétől eltérő követelményeket (nagy fekete-fehér kontraszt, binstabilitás) támasztanak. Bár e követelmények folyadékkristályokkal is kielégíthetőek, az e-tintát más fizikai elven megvalósító megoldások gyakoribbak. Az e-olvasók saját megvilágítással általában nem rendelkezve a visszavert fényben olvashatók, ezért keveset fogyasztanak. Cserébe lassúak, mozgóképek megjelenítésére nem igazán alkalmasak.

5. Számolási feladat

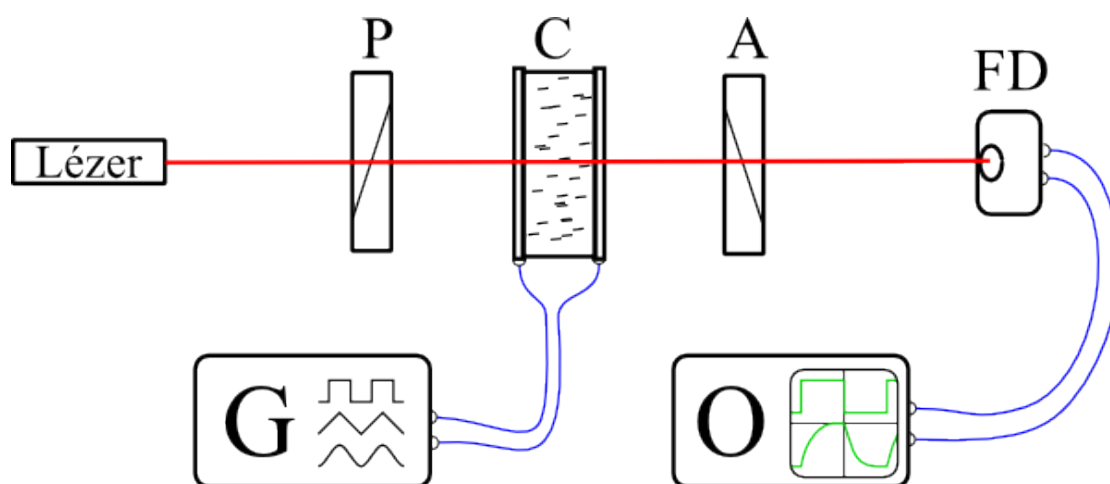
- Ellenőrizzük az (1) formula helyességét!

6. Gyakorló kérdések

1. Mi a folyadékkristály? Mi jellemzi a folyadékkristály halmazállapotot?
2. Mi a direktor?
3. Milyen molekulák/molekulacsoportok jellemzőek a folyadékkristályokra?
4. Mik a folyadékkristályok főbb fajtái, és mi jellemző rájuk?

5. Mi a királitás (királis szénatom)? Mi az a csavarállandó?
6. Milyen irányú lehet az S_C^* anyagokban a spontán polarizáció?
7. Milyen rétegekből áll egy tipikus folyadékkristály-kijelző?
8. Mekkora egy $T = 10$ ms periodusidejű jel frekvenciája?
9. Mi van az oszcilloszkóp képernyőjének a tengelyein?
10. Mit jelent az oszcilloszkóp képernyőjén a vízszintes vonal?
11. Hogyan lehet az oszcilloszkóppal egyenfeszültséget mérni?
12. Írjon fel egy adott értékhez exponenciálisan tartó függvényt! Mi lesz itt az időállandó, és hogyan lehet megmérni?

7. Mérési feladatok



11. ábra. Mérési elrendezés a folyadékkristály-kijelzők vizsgálatához. G - hullámforma generátor, P - polarizátor, A - analizátor (P-re merőleges állású polárszűrő), C - cella, FD - fotodióda, O - oszcilloszkóp

1. Vegyük fel az ék alakú minta törésmutatójának hőmérsékletfüggését a $15 - 40^\circ\text{C}$ -os tartományban, $1 - 2^\circ\text{C}$ -os lépésekben! Számítsuk ki és ábrázoljuk a mért pontokban a törésmutatókat! Határozzuk meg a fázisátalakulás kritikus hőmérsékletét!
2. Határozzuk meg a mintában a folyadékkristályt alkotó molekulák orientációját (a direktor irányát)!

3. Vegyük fel a csavart nematikus cella feszültség-intenzitás karakterisztikáját 100 Hz frekvenciájú szinuszzel a 0 – 20 V csúcstól-csúcsig feszültségtartományban (11. ábra). Milyen feszültséggel célszerű a kijelzőt működtetni?
4. Vegyük fel a csavart nematikus cella frekvencia-intenzitás karakterisztikáját 10 – 1000 Hz frekvenciatartományban az előző feladatban meghatározott optimális feszültségű szinuszzel! Mit mondhatunk a cella működési sebességéről?
5. Oszilloszkóppal vizsgáljuk meg a cellán átmenő fény intenzitásának időfüggését különböző frekvenciájú és jelalakú feszültségek esetén! Becsüljük meg a kijelző kapcsolási idejét!
6. Állítsuk be a ferroelektromos cellát a 8. ábrán látható módon!
7. Vizsgáljuk meg a ferroelektromos cellán átmenő fény intenzitásának időfüggését különböző frekvenciájú és jelalakú feszültségek esetén! Határozzuk meg a kijelző kapcsolási idejét!
8. Hasonlítsuk össze a két típusú cella működését! Megfelel-e a ferroelektromos cella a felületstabilizált ferroelektromos kijelző működéséről leírtaknak?

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozunk Éber Nándornak, aki a mérésnél használt mintákat készítette el számunkra és a mérésleírás elkészítésében is segítséget nyújtott.

8. Ajánlott irodalom

Hivatkozások

- [1] F. Reinitzer: *Beiträge zur Kenntniss des Cholesterins*, Monatshefte für Chemie (Wien) **9**, 421–441 (1888).
- [2] O. Lehmann: *Flüssige Krystalle*, Leipzig, 1904.
- [3] Bata Lajos: *Folyadékkristályok*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1986.
- [4] G. Meier, E. Sackmann, J. G. Grabmaier: *Application of Liquid Crystals*, Springer Verlag, Berlin, 1975.