A 34. Nemzetközi Fizikai Diákolimpia mérési feladata: Lézerdióda és nematikus folyadékkristály optikai tulajdonságai[1]

Vankó Péter

A mérés során a *fényképen* látható eszközök és anyagok álltak a versenyzők rendelkezésére:

[1] A mérési feladat kidolgozására 5 óra állt rendelkezésre. A feladat szövegét – amely eredetileg mintegy 13 oldal terjedelmű – rövidítve, bizonyos technikai részletek (műszerkezelési útmutatások, balesetvédelmi tanácsok és a javítók munkáját megkönnyítő formai szabályok) elhagyásával közöljük.

A: fotodetektor, B: 2 darab polárszűrő forgatható foglalattal, C: 90°-kal elcsavart nematikus (röviden 90° TN) folyadékkristály (röviden LC) cella forgatható LC foglalattal, D: jelgenerátor (részletes használati utasítással), E: lézerdióda (röviden LD), F: 2 darab multiméter (részletes használati utasítással), G: párhuzamos LC-cella, H: változtatható ellenállás, I: 2 darab telep, J: teleptartó, K: optikai sín; továbbá 2 darab áttetsző papír, vonalzó, fehér ragasztószalag (az eszközök megjelölésére), olló és 10 darab milliméterpapír.

A rész: A lézerdióda és a fotodetektor karakterisztikája

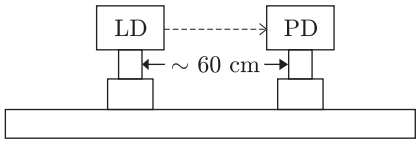
I. Bevezetés
A lézerdióda optikai tulajdonságai

A méréshez használt *fényforrás* egy 650 nm hullámhosszúságú félvezető lézer. Ha a lézerdióda (LD) árama nagyobb egy küszöbáramnál, a dióda monokromatikus, részlegesen polarizált, koherens fényt bocsát ki. Ha a lézerdióda árama kisebb egy küszöbértéknél, a kibocsátott fény intenzitása nagyon kicsi. A küszöbáram felett a fényerősség az áramerősség növekedésével rohamosan nő, és a két mennyiség között lineáris kapcsolat van. Ha az áram tovább nő, a fényerősség növekedési üteme a lézerdióda melegedése miatt csökken. Így a lézerdióda optimális működési tartománya az, ahol a fényerősség lineárisan függ az áramerősségtől. Az I_k küszöbáram definíció szerint az áramerősség tengely és a lineáris tartományra illesztett egyenes meghosszabbításának metszéspontja.

A méréshez használt *fotodetektor* egy fotodiódából és egy áramerősítőből áll. Ha a fotodiódára tápfeszültséget kapcsolunk, akkor a diódára eső fény hatására áram generálódik (fotoáram). Állandó hőmérsékleten, monokromatikus fény esetében a fotoáram egyenesen arányos a fényintenzitással. Az áramerősítő ezt a fotoáramot kimenő feszültségjellé alakítja. Ha a fényerősség nagyon nagy (a fotodióda tulajdonságai miatt) a kimenő feszültség 8 V tájékán telítődik (nem nő tovább). A fotodetektor csak a *lineáris* tartományban mutatja helyesen a fényintenzitást.

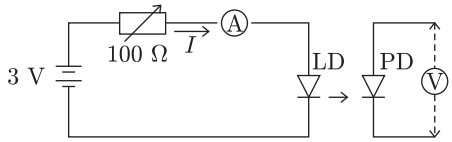
II. Mérési feladatok

Ahhoz, hogy a méréseket sikeresen el tudd végezni, nagyon fontos az elrendezés egyes részei közötti sugármenetek gondos beállítása. A fényforrásnak és a detektornak is megfelelően kell működnie. Az **A** rész ezekkel a kérdésekkel kapcsolatos.



1. ábra. Optikai összeállítás (LD: lézerdióda; PD: fotodetektor)

1. Szereld fel a lézerdiódát és a fotodetektort egy vízszintes egyenes mentén az optikai sínre, ahogy az *1. ábrán* látható! Kapcsold össze a változtatható ellenállást, a telepet, az amper- és a voltmérőt, a lézerdiódát és a fotodetektort a *2. ábrának* megfelelően! Állítsd be a változtatható ellenállást úgy, hogy a lézerdiódán átfolyó áram kb. 25 mA legyen, és a lézerdióda megfelelően világítson! Állítsd be a lézerdióda és a fotodetektor magasságát úgy, hogy a lézersugár a detektoron lévő kis lyukba juthasson és a fotodetektor maximális értéket mutasson!



2. ábra. A lézerdióda és a fotodetektor elektromos kapcsolása

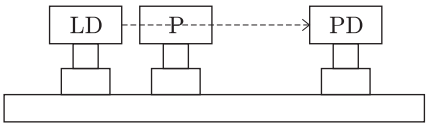
2. A fotodetektor kimenő feszültségét használd a lézerfény J intenzitásának leírására! Növeld a változtatható ellenállással a lézerdióda I áramát nullától a maximális értékig, és mérd meg J-t I függvényében! Győződj meg róla, hogy a mérés során megfelelő lépésekben növeled-e az áramot!

A.1 Mérd meg, foglald táblázatba és ábrázold J-t I függvényében *(1,5 pont)*!

A.2 Határozd meg a J–I görbe lineáris tartományának maximális I_max áramát és annak mérési hibáját! Jelöld be a lineáris tartományt a J–I görbén „nyilak” segítségével, és határozd meg az I_k küszöbáramot és annak hibáját *(3,5 pont)*!

3. Válaszd a lézerdióda áramát $I_\mathrm{k}+2(I_\mathrm{max}-I_\mathrm{k})/3$ értékűre, és győződj meg róla, hogy a lézerdióda és a fotodetektor jól működik!

4. A következő (B) mérési részfeladat előkészítéséhez: Szereld fel az egyik polárszűrőt az optikai sínre a lézerdióda közelében a *3. ábrán* látható módon! Győződj meg róla, hogy a lézersugár a polárszűrő középső részén halad át!



3. ábra. A polárszűrő (P) beállítása

Állítsd be a polárszűrőt úgy, hogy a beeső fénysugár merőleges legyen a polárszűrő síkjára! (*Javaslat:* Rakj be egy darab áttetsző papírt a fényútba, és ezen a „teszt-ernyőn" ellenőrizd, hogy a beeső és a visszavert sugár egybeesik-e.)

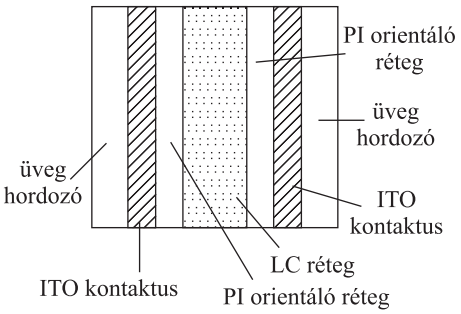
5. Szerelj fel egy másik polárszűrőt is az optikai sínre az előzőhöz hasonlóan, és győződj meg róla, hogy minden helyesen van-e beállítva, azaz a fényforrás, a polárszűrők és a detektor egy egyenesbe esnek-e, és a polárszűrők merőlegesek-e a fénysugárra! Ne változtasd meg a lézerdióda áramát!

B rész: 90° TN LC-cella elektro-optikai kapcsolási karakterisztikája

I. Bevezetés
A nematikus folyadékkristály optikai tulajdonságai

1. Folyadékkristály

A folyadékkristály (LC = Liquid Christal) olyan állapota az anyagnak, ami a kristályos szilárd állapot és az amorf folyadék állapot között van. A nematikus LC-k szerves vegyületek, melyek hosszúkás, tűszerű molekulákból állnak. A molekulák irányítottsága (orientációja) elektromos erőtér segítségével szabályozható. Az LC eszközökhöz azonos vagy jól meghatározott orientációjú LC molekulákra van szükség. A méréshez használt LC-cella felépítése a *4. ábrán* látható. Az üveg hordozólemezeket először egy vékony, elektromosan vezető, de optikailag átlátszó indium-ón-oxid (ITO = Indium-Tin-Oxid) réteggel vonják be, majd egy vékony polyimid (PI) „rendező" réteget alakítanak ki. Ezután a PI réteg felszínét megcsiszolják, és ezzel mikroszkopikus árkokat alakítanak ki rajta. Ezek az árkok rendezik egy irányba az LC molekulákat, melyeket szendvicsszerűen két hordozó közé helyeznek. Ezzel a csiszolásos módszerrel a kívánt irányba orientált, jól rendezett LC-molekulák kerülnek a hordozók felszínére, és a molekulák közt ható erők hatására az egész LC-hasáb azonos irányítottságú lesz. Egy adott helyen a molekula-orientációt az LC adott helyen lévő *direktorának* nevezik.

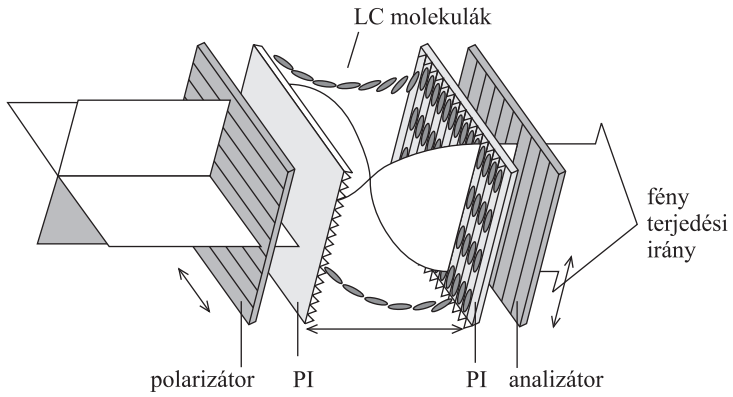


4. ábra. A folyadékkristály (LC) cella szerkezete

Az LC-cellában megfigyelhető az ún. kettőstörés jelensége, amikor az anyagnak kétféle fő törésmutatója van. Ha a fény a direktor irányába terjed, akkor az összes polarizációs összetevő ugyanakkora $v_o = c/n_o$ sebességgel terjed, ahol n_o az ordinárius (rendes) törésmutató. Ezt a terjedési irányt (a direktor irányát) nevezik a cella optikai tengelyének. Ha a fény az optikai tengelyre merőleges irányba terjed, akkor két terjedési sebesség van. A fény elektromos mezejének az optikai tengelyre merőlegesen polarizált része $v_o = c/n_o$ sebességgel halad, míg az optikai tengellyel párhuzamosan polarizált rész $v_e = c/n_e$ sebességgel halad, ahol n_e az extraordinárius (rendellenes) törésmutató. Az optikai anizotrópia (pontosabban annak mértéke) az extraordinárius és az ordinárius törésmutató különbsége: $\Delta n = n_e - n_o$.

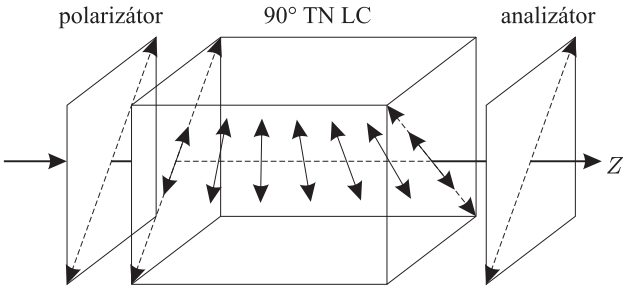
2. 90°-kal elcsavart nematikus LC-cella

A 90°-kal elcsavart nematikus (TN = Twisted Nematic) cellában (*5. ábra*) a hátsó felület LC direktora 90°-kal el van forgatva az első felülethez képest. Elöl a helyi direktor párhuzamos a polarizátor (első polárszűrő) polarizációs irányával. A belépő polarizálatlan fény az első polárszűrőben lineárisan polarizált fénnyé változik.



5. ábra. 90° TN LC-cella

Ha egy lineárisan polarizált fény halad át egy 90° TN cellán, akkor polarizációs iránya követi az LC direktorának csavarodását (a polarizált fény csak n_e-t érzékeli), így a kilépő fénysugár is lineárisan polarizált marad, csak polarizációs iránya 90°-kal elfordul. (Ezt n_e által okozott polarizációs forgató hatásnak nevezzük, ehhez hasonlóan van n_o által okozott forgató hatás is.) Eszerint a 90° TN-cella normál fekete (NB = Normál Black) üzemmódjához az analizátor (a második polárszűrő) polarizációs irányát párhuzamosra kell állítani a polarizátor (az első polárszűrő) polarizációs irányával, mint ahogy a *6. ábrán* látszik. Ha azonban az LC-cellára kapcsolt U feszültség értéke elér egy kritikus U_k értéket, az LC-molekulák igyekeznek beállni az alkalmazott külső elektromos tér irányába, ami itt megegyezik a fény terjedési irányával. Ennél fogva az LC-cella polarizációs irányt elforgató hatása folyamatosan csökken, és a fény átjuthat az analizátoron (a második polárszűrőn). A cella κ elektro-optikai kapcsolási meredekségét az $\dfrac{U_{90} - U_{10}}{U_{10}}$ képlet definiálja, ahol U_{10} és U_{90} azok a feszültségek, ahol a cellán áthaladó fény intenzitása eléri a maximális fényintenzitás 10%-át, illetve 90%-át.



6. ábra. A 90° TN LC cella NB módusú működése

II. Mérési feladatok

1. Szereld fel az NB 90° TN LC-cellát a két polárszűrő közé! Állítsad a polárszűrők polarizációs irányát egymással párhuzamosra! Kapcsolj az üveghordozókat borító ITO kontaktusokra 100 Hz-es négyszögjelet a jelgenerátorból, és változtasd az alkalmazott U (effektív) feszültség nagyságát 0-tól 7,2 V-ig! (A fontos, érdekes pontoknál finoman, kis lépésekben változtasd a feszültséget!)

B.1 Mérd meg, foglald táblázatba és ábrázold az NB 90° TN LC-cella elektro-optikai kapcsolási görbéjét (vagyis J-t U függvényében), és határozd meg a $\kappa = (U_{90} - U_{10})/U_{10}$ kapcsolási meredekséget *(5 pont)*!

B.2 Határozd meg a NB 90° TN LC-cella kritikus U_k feszültségét! Mutasd meg egyértelműen, hogy a grafikonból hogyan határozod meg U_k értékét *(2,5 pont)*!

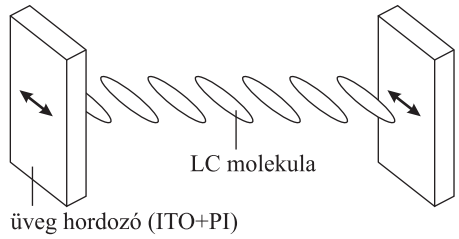
Figyelem! Amikor az alkalmazott külső feszültség eléri a kritikus feszültséget, a fényáteresztő képesség gyorsan és „törésmentesen" nőni kezd!

C rész: Párhuzamosan rendezett LC-cella elektro-optikai kapcsolási karakterisztikája

I. Bevezetés

Homogén, párhuzamosan rendezett LC-cella optikai tulajdonságai

A párhuzamosan rendezett LC-cella esetében az elülső és a hátsó hordozón lévő direktorok párhuzamosak egymással (*7. ábra*). Ha egy polarizált fénysugár úgy esik a párhuzamosan rendezett cellára, hogy a polarizációs iránya párhuzamos az LC-cella direktorával (a csiszolt vájatok irányával), akkor semmi lényeges változás nem történik, mivel a fény tisztán extraordinárius sugárként viselkedik.



7. ábra. Homogén, párhuzamosan rendezett LC-cella

Ha viszont egy lineárisan polarizált fénysugár úgy esik (merőlegesen) a párhuzamosan rendezett cellára, hogy a polarizációs iránya $\theta = 45°$-os szöget zár be a cella direktorának irányával (*8. ábra*), akkor fáziskülönbség (δ) lép fel az extraordinárius és az ordinárius sugarak különböző terjedési sebessége miatt. Ebben a $\theta = 45°$-os elrendezésben, ha a két polárszűrő egymással párhuzamos, akkor a párhuzamosan rendezett LC-cella fényáteresztő képességét a következő összefüggés írja le:

$$T_{\parallel} = \cos^2 \frac{\delta}{2}.$$

A δ fáziskülönbség kifejezhető: $\delta = 2\pi d \Delta n(U, \lambda)/\lambda$, ahol d az LC-réteg vastagsága, λ a fény hullámhossza levegőben, U a váltakozó feszültség effektív értéke, és Δn, ami λ és U függvénye, az LC-cella optikai anizotrópiájának mértéke. Azt is meg kell jegyezni, hogy ha $U = 0$, akkor Δn $(= n_{\mathrm{e}} - n_{\mathrm{o}})$ maximális, és így δ-nak is ekkor van maximuma. Tehát Δn csökken, ha U növekszik.

Általános esetben:

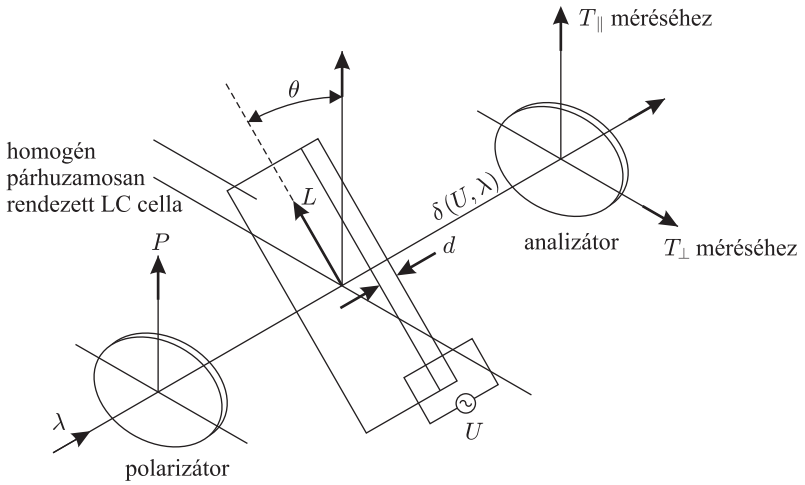
$$T_{\parallel} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2}, \qquad T_{\perp} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2},$$

ahol $\parallel$ és $\perp$ az analizátor és a polarizátor polarizációs irányának párhuzamos, illetve merőleges állására utal.

II. Mérési feladatok

1. Cseréld ki az NB 90° TN LC-cellát a párhuzamosan rendezett LC-cellával!

2. Állítsd be a $\theta = 45°$-os konfigurációt és az $U = 0$ értéket (*8. ábra*)! Legyen az analizátor és a polarizátor polarizációs iránya egymásra merőleges! Ezután forgasd a párhuzamosan rendezett LC-cellát addig, amíg az átmenő fény intenzitása el nem éri a maximális értékét ($T_{\perp}$)! Ez a helyzet valósítja meg a $\theta = 45°$ konfigurációt. Jegyezd fel $T_{\perp}$ értékét! Ezután mérd meg ugyanebben az LC-cellában az áteresztőképességet abban az esetben is, ha az analizátor és a polarizátor polarizációs iránya párhuzamos ($T_{\parallel}$)! (A mérés során most $U = 0$.)



8. ábra. A mérési elrendezés vázlata. (Az L nyíl a cella rendezési iránya)

C.1 Tudjuk, hogy a lézerfény hullámhossza 650 nm, az LC-réteg vastagsága 7,7 μm és hogy $\Delta n = 0{,}25$. Felhasználva $T_{\perp}$ és $T_{\parallel}$ az előzőek szerint megmért értékét, számítsd ki a δ fáziskülönbség és a Δn optikai anizotrópia pontos értékét az adott LC-cellára $U = 0$ esetében *(2,5 pont)*!

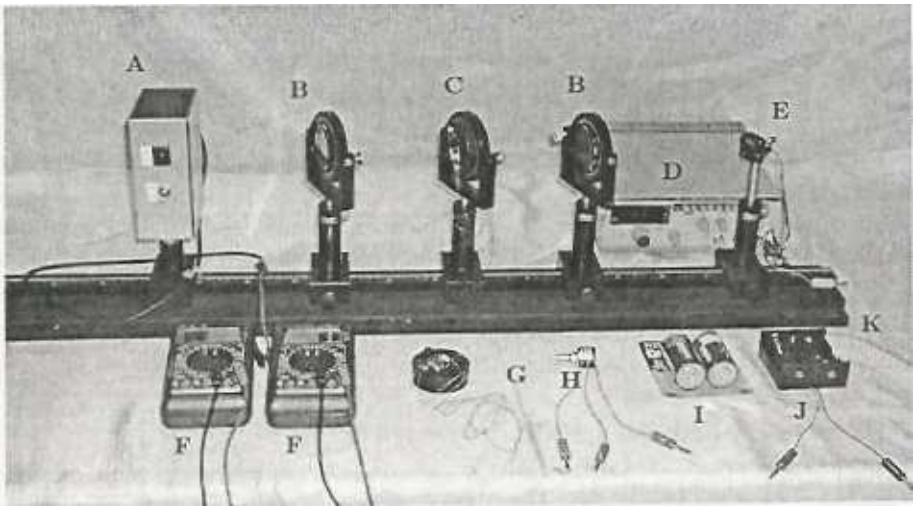
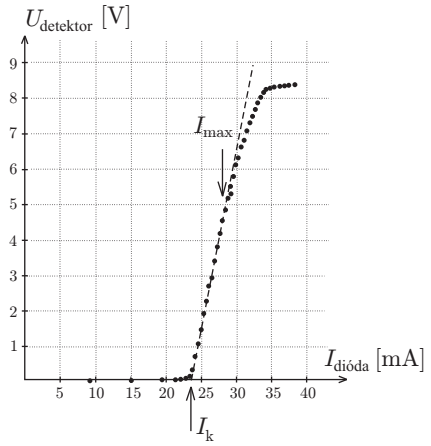
3. Az előzőekhez hasonlóan, továbbra is a $\theta = 45°$-os konfigurációban mérjél! Kapcsolj 100 Hz-es négyszögjelet az ITO kontaktusokra, változtasd az U feszültség (effektív) értékét 0-tól 7 V-ig, és mérd ki az elektro-optikai kapcsolási görbét az analizátor és a polarizátor párhuzamos állásánál ($T_{\parallel}$)!

(*Megjegyzés:* A $T_{\perp}$ kapcsolási görbe kimérése hasznos lehet a $T_{\parallel}$ mérés pontosságának fokozásához; azonban a $T_{\perp}$ adatokra a következőkben nem lesz szükség.)

A függvény szélsőértékeinek közelében vedd fel sűrűbben a pontokat (különösen a 0,5–4,0 *V feszültségtartományban)!*

C.2 Mérd meg, foglald táblázatba és ábrázold ennek a párhuzamosan rendezett LC-cellának a $T_{\parallel}$ elektro-optikai kapcsolási görbéjét a $\theta = 45°$-os konfigurációban *(3 pont)*!

C.3 Az elektro-optikai kapcsolási adatokból határozd meg azt az U_{π} feszültséget, amelynél az LC-cellában a fázistolás π (azaz 180°) *(2 pont)*!

Megjegyzések: 1. Ne felejtsd el, hogy Δn az U feszültség csökkenő függvénye!

2. Valószínűleg szükséged lesz interpolációra is U_{π} pontos értékének meghatározásakor.