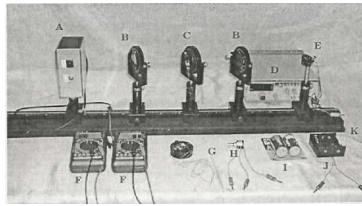


A mérés során a *fényképen* látható eszközök és anyagok álltak a versenyzők rendelkezésére:



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

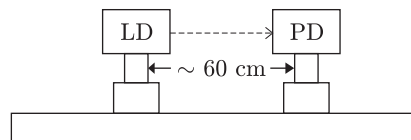
A lézerdióda optikai tulajdonságai

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 feszültségjellel 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.

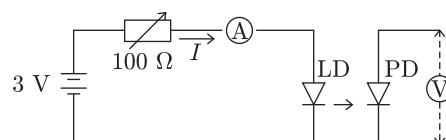
II. Mérési feladatok

Ahhoz, hogy a méréseket sikeresen el tudj 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

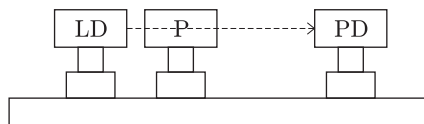
2. A fotodetektor kimenő feszültségét használd a lézerfény J intenzitásának leírására! Növel a változtatható ellenállással a lézerdióda I áramát nullától a maximális értékig, és mérd meg J -t I függvényében! Győződj meg róla, hogy a mérés során megfelelő lépésekben növeled-e az áramot!

A.1 Mérd meg, foglald táblázatba és ábrázd 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 „nyílak” segítségével, és határozd meg az I_k küszöbáramot és annak hibáját (3,5 pont)!

3. Válaszd a lézerdióda áramát $I_k + 2(I_{\max} - I_k)/3$ értékre, 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 fénypútba, 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!

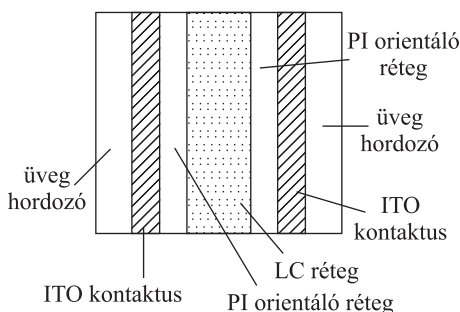
B rész: 90° TN LC-cella elektro-optikai kapcsolási karakterisztikája

I. Bevezetés

A nematikus folyadékkristály optikai tulajdonságai

1. Folyadékkristály

A folyadékkristály (LC = Liquid Crystal) olyan állapota az anyagnak, ami a kristályos szilárd állapot és az amorf folyadék állapot között van. A nematikus LC-k szerves vegyületek, melyek hosszúkas, tűszerű molekulákból állnak. A molekulák irányítottasága (orientációja) elektromos erőter 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 csiszolós 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 irányítottaságú lesz. Egy adott helyen a molekula-orientációt az LC adott helyen lévő *direktorának* nevezik.



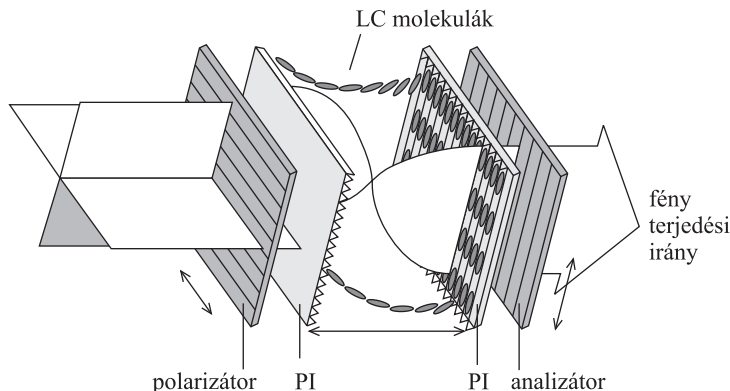
4. ábra. A folyadékkristály (LC) cella szerkezete

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: $\Delta n = n_e - n_o$.

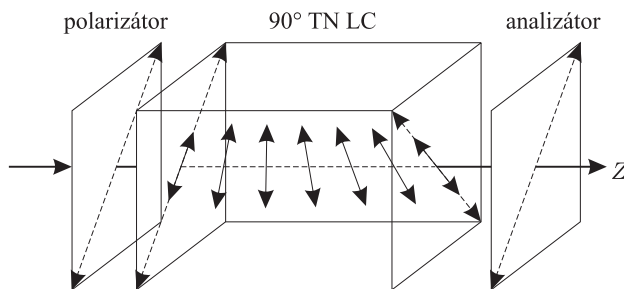
2. 90°-kal elcsavart nematikus LC-cella

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 fénné 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 $\frac{U_{90} - U_{10}}{U_{10}}$ 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! Állítsd 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 ábrázd az NB 90° TN LC-cella elektro-optikai kapcsolási görbét (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)!

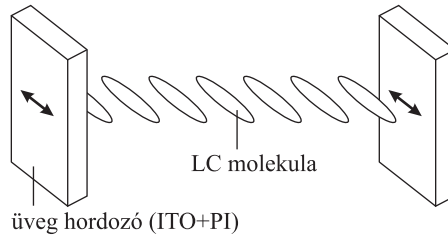
Figyelem! Amikor az alkalmazott külső feszültség eléri a kritikus feszültséget, a fényáteresztő képesség gyorsan és „törésmentesen” nőni kezd!

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 $\theta = 45^\circ$ -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 $\theta = 45^\circ$ -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 $\Delta n (= n_e - n_o)$ maximális, és így δ -nak is ekkor van maximuma. Tehát Δn csökken, ha U növekszik.

Általános esetben:

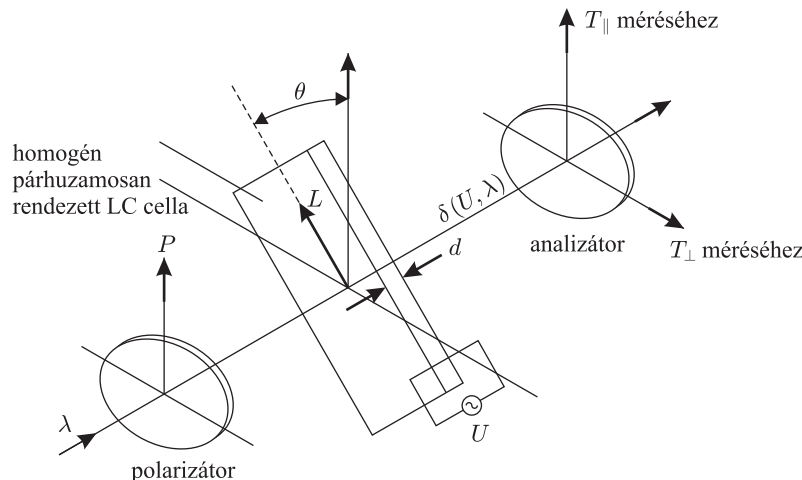
$$T_{\parallel} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2}, \quad T_{\perp} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2},$$

ahol $\parallel$ és $\perp$ az analízátor 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 $\theta = 45^\circ$ -os konfigurációt és az $U = 0$ értéket (8. ábra)! Legyen az analízátor és a polarizátor polarizációs iránya egymásra merőleges! Ezután fordasd 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 $\theta = 45^\circ$ konfigurációt. Jegyezd fel $T_{\perp}$ értékét! Ezután mérd meg ugyanebben az LC-cellában az áteresztőképességet abban az esetben is, ha az analízátor 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 $7,7 \mu\text{m}$ 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 $\theta = 45^\circ$ -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 ábrázd ennek a párhuzamosan rendezett LC-cellának a $T_{\parallel}$ elektro-optikai kapcsolási görbét a $\theta = 45^\circ$ -os konfigurációban (3 pont)!

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

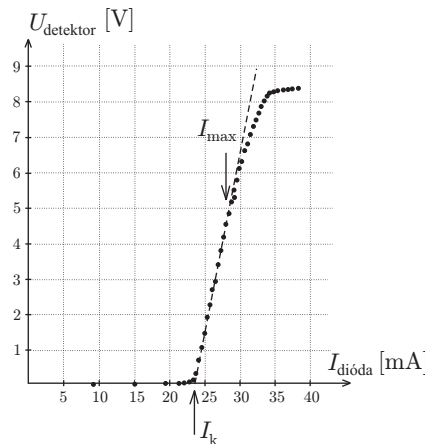
Megjegyzések: 1. Ne felejtse el, hogy Δn az U feszültség csökkenő függvénye!

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

A mérési feladat megoldása²

A mérés során elektromos mennyiségeket (a lézerdióda áramát, a fotodetektor feszültségét és a folyadékkristály cellára kapcsolt feszültséget) kellett leolvasni digitális műszerekről. A nehézséget így inkább a mérési elrendezés pontos optikai beállítása és a nagyszámú adat kiértékelése jelentette.

Az optikai elemek gondos elrendezése alapvető volt a mérés sikeres elvégzéséhez. A lézersugarat pontosan a fotodetektor nyílásába kellett irányítani, a polárszűrőket és a folyadékkristály cellákat pedig pontosan a lézersugárra merőlegesen kellett rögzíteni. (Ebben az egyes elemek felületéről visszaverődő fény segített: ha a fényútba egy áttetsző papírt helyezünk, akkor helyes beállításnál a beeső és a visszavert fénysugár foltja egybeesik. Ezt a beállítási „trükköt” a mérés leírása is tartalmazta, igaz, elég szűkszavúan és eldugott helyen. Nem csoda, hogy a versenyzők többsége figyelmen kívül hagyta az erre vonatkozó „javaslatot”.) További nem várt nehézségeket okozott a versenyzőknek (főleg a délutáni csoportban, ahol a magyarok is mértek) egy-egy elromlott eszköz, amit ugyan a rendezők kérésre kicseréltek, de a hiba felismeréséig sok időt lehetett veszteni. Az egyik legnehezebb feladat annak eldöntése, hogy a rendelkezésre álló idő alatt az egyes részfeladatoknál hány mérési pontot lehet és kell felvenni a sikeres kiértékeléshez.

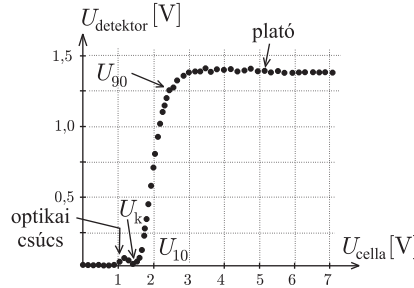


9. ábra. A lézerdióda karakterisztikája

Az **A** feladatban a lézerdióda karakterisztikáját kellett felvenni, vagyis a detektor feszültségét mérni és ábrázolni a dióda áramának függvényében (9. ábra). Meg kellett határozni a dióda lineáris tartományát és a küszöbáramot (ez a lineáris tartományra illesztett egyenes és az áram tengely metszéspontja). Itt a feladat kitér az egyenes illesztésénél számításra (pl. a legkisebb négyzetek módszerét), vagy grafikus módszert (a hibák ábrázolását kis szakaszokkal, minimális és maximális meredekségű lehetséges egyenesek berajzolását vonalzóval), valamint részletes hibaszámítást is elvártak. Sok versenyző nem vette észre az $I_{\max}$ áramnál lévő kis törést (amit a dióda melegevése okoz), és a lineáris tartomány végének azt a pontot tekintette, ahol a görbe a detektor telítődése miatt vízszintessé válik.

² A mérési eredmények pontos megadása és azok kiértékelésének ismertetése helyett itt csupán néhány jellegzetes (az olimpia szervezői által megadott) mérési grafikont mutatunk be, továbbá néhány mérés technikai buktatóra szeretnénk felhívni a figyelmet.

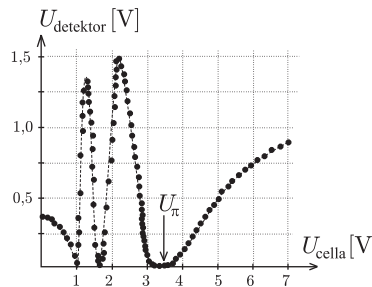
A feladat **B** részében egy ún. 90° -kal elcsavart nematikus folyadékkristály (90° TN LC) cellát vizsgáltak a versenyzők. Ez a cella feszültségmentes állapotban 90° -kal elcsavarja a polarizált fény polarizációs irányát. Így ha a cellát két párhuzamos állású polárszűrő (polarizátor és analízátor) közé rakjuk, a rendszeren egyáltalán nem jut át fény; ez a normál fekete üzemmód. Ha azonban a cellára feszültséget kapcsolunk, a folyadékkristály molekulái átrendeződnek, és a polarizált fény elcsavarodás nélkül átjut a cellán, és így az analízátoron is. A feladat a kapcsolási görbe (10. ábra) felvétele és kiértékelése volt. A $\kappa = \frac{U_{90} - U_{10}}{U_{10}}$ kapcsolási meredekség meghatározásához U_{10} és U_{90} értékét a mért adatokból interpolációval kellett meghatározni. A U_k kritikus feszültség helyes meghatározásához pedig észre kellett venni és a görbe emelkedő szakaszától el kellett különíteni a cella tényleges átkapcsolása előtt megfigyelhető kis púpot. (Ehhez persze elegendően sűrűn felvett mérési pontokra volt szükség.)



10. ábra. A 90° TN LC cella kapcsolási görbéje

A feladat utolsó, **C** részében egy másik folyadékkristály cellát (párhuzamosan rendezett folyadékkristály) vizsgáltak a versenyzők. Ennél a cellánál, ha a beeső fény polarizációs iránya a cella rendezettségének irányával 45° -os szöget zár be, a belépő fény két komponensre bomlik, és ezek eltérő sebességgel haladnak át a kristályon (optikai anizotrópia). Az analízátorból kilépő fény intenzitása így a cellán belül létrejövő fáziskülönbségtől függ.

A **C.1** feladat az anizotrópia értékének meghatározása volt. Itt tipikus hibalehetőség annak figyelmen kívül hagyása, hogy a fázistolás 2π -nél nagyobb is lehet. A feladat hátralévő része a cella elektro-optikai kapcsolási görbéjének felvétele és kiértékelése volt (11. ábra).



11. ábra. A párhuzamosan rendezett folyadékkristály cella kapcsolási görbéje

Ahhoz, hogy mindkét maximumot és mindhárom minimumot megtalálja valaki, sok mérési pontra van szükség. A π fázistoláshoz tartozó U_π feszültség meghatározásához észre kellett venni, hogy ez a görbe utolsó (legnagyobb cellafeszültséghez tartozó) minimumhelye (mert a fázistolás növekvő feszültség esetén monoton csökken). A minimumhely környékén újabb mérési pontokat kellett felvenni, és ezekből lehetett U_π -t viszonylag pontosan meghatározni.