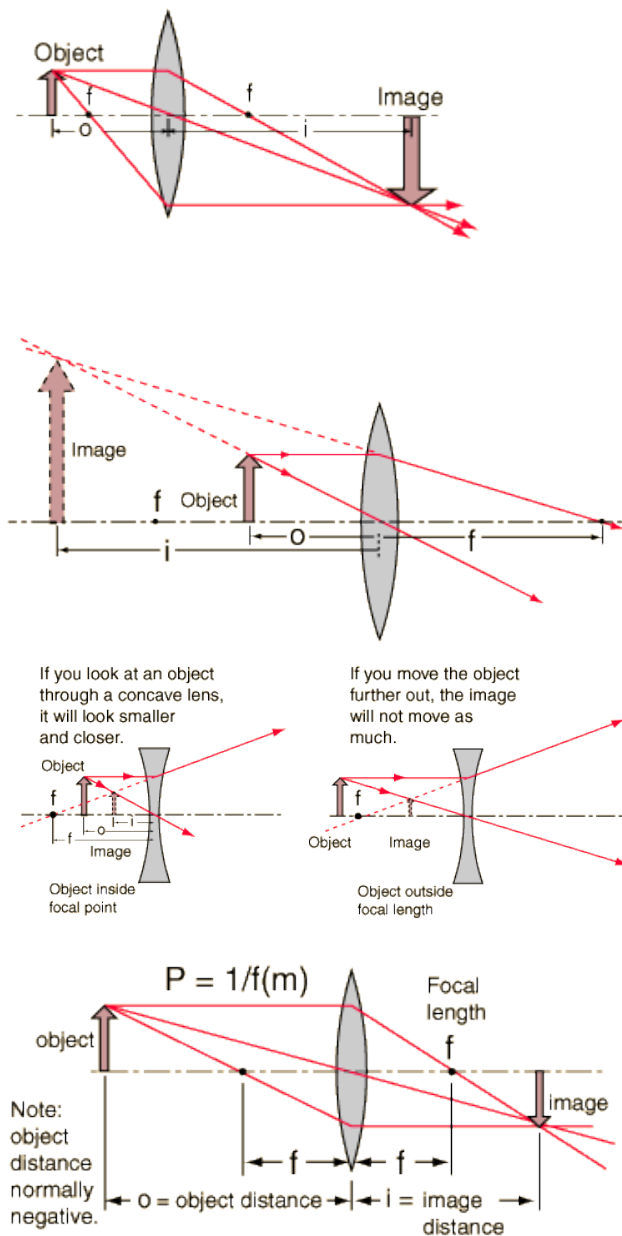


Optika mérések építőmérnököknek

I. Geometriai optikai vizsgálatok

A leggyakoribb és legegyszerűbb optikai eszközök viselkedését geometriai optikai módszerrel lehet szemléletesen leírni. Ezen ismeretek felidézésére az alábbi ábrák tanulmányozását ajánljuk:



Mérési feladat: Lencse fókusz távolságának meghatározása

Domború lencse fókusz távolságát két módon határozzuk meg:

- A leképezési törvény közvetlen alkalmazásával, vagyis egy fókusz távolságon kívüli tárgy leképezésével a tárgy-és képtávolság mérésével.
- A Bessel-módszerrel. Itt rögzített kép-tárgy távolság (s) esetén a lencse két pozíciójában kapunk éles képet. Ha a

két pozíció közötti távolság d , akkor a fókusz távolság az alábbi módon határozható meg:

$$f = \frac{(s - d)(s + d)}{4 \cdot s}$$

II A polarizáció

A fény *transzverzális* hullám: ez azt jelenti, hogy az elektromágneses hullámban az elektromos térerősség (és a mágneses indukció) vektora a hullám terjedési irányára merőleges. Ilyen irány azonban végtelen sok van. Egy izólámpa vagy egy LED fényében, a napfényben az elektromos térerősség minden lehetséges (a terjedési irányra merőleges) irányt felvesz. (Ennek az az oka, hogy a fényt kibocsátó atomok egymástól függetlenül sugároznak, és így ez az irány véletlenszerű.) Az ilyen fényt *polarizálatlan* fénynek nevezzük.

Ha valamilyen módon elérjük, hogy a fényben az elektromos térerősség vektora egy kitüntetett irányba mutasson, akkor a fényt (lineárisan) *polarizáltak* nevezzük. A lézertől már eleve polarizált fény lép ki (mert a lézerben az atomok nem egymástól függetlenül sugároznak), de bármely polarizálatlan fény is megfelelő eszközökkel polarizálható. A legegyszerűbb speciális polimerekből készült vékony *polárszűrő*ket használni.

Ha az így polarizált fény egy másik polárszűrőn halad át, akkor attól függően, hogy a két polárszűrő polarizációs iránya egymáshoz képest milyen irányban áll, mást és mást tapasztalunk. Ha a két szűrő iránya párhuzamos, akkor a fény a második szűrőn akadálytalanul és gyengítetlenül áthalad, ha viszont a két szűrő egymásra merőlegesen áll, akkor a fény a második szűrőn nem tud áthaladni, teljesen elnyelődik.

III. Törésmutató meghatározása reflexió vizsgálatával

A testeket érő elektromágneses sugárzás részben visszaverődik a felületről, részben elnyelődik, egy része pedig áthalad rajta. Ezen három rész intenzitás-aránya anyagonként más és más, és függ a hullámhossztól is.

Méréstechnikai szempontból legegyszerűbben a visszaverődő és az áthaladó hányad mérhető meg, míg az elnyelt részt az energia-megmaradás törvénye alapján határozhatjuk meg.

Mínt hogy az elektromágneses sugárzás transzverzális hullám, így nem lényegtelen megvizsgálunk, hogy milyenek a polarizációs viszonyok a visszaverődéskor. Ezért tanulmányozzuk a lineárisan poláros fény visszaverődését is.

Elméleti összefoglaló:

Essen két közeg határfelületére lineárisan poláros, I_0 intenzitású fény. Legyen az első közeg levegő, míg a másodiknak a levegőre vonatkozó törésmutatója n . A beeső, a visszaverődő és a megtört sugárzás intenzitásait jelölje I_0 ,

I_R , és I_T . Az egyszerűség kedvéért itt eltekintünk az elnyelődéstől.

Tudjuk, hogy merőleges beesésnél a visszavert és a megtört sugár egyaránt merőlegesek a felületre és az intenzitásokra az energia-megmaradás értelmében:

$$I_o = I_R + I_T, \quad (1)$$

avagy kifejezve az áthaladó fény intenzitását a közeg törésmutatójával:

$$I_o = I_R + I_o \frac{4n}{(n+1)^2}. \quad (2)$$

A visszaverődő fény intenzitását kifejezve az

$$I_R = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 \cdot I_o \quad (3)$$

összefüggés adódik. Jól látható, hogy még merőleges beesésnél is a sugárzás egy jelentős hányada visszaverődik (pl. $n = 1,5$ törésmutatójú üveget véve alapul, a beeső fény intenzitásának 4%-a verődik vissza). Ha a veszteségektől eltekintünk, az áthaladó intenzitás a leírt összefüggések alapján meghatározható.

Amennyiben optikailag sűrűbb közegből ritkább közeg határfelületéhez ér a fény, akkor egy határszögnél (α_h) nagyobb beesési szögek esetén teljes visszaverődés lép fel, nem jut fény a ritkább közegbe. (Két közeg közül az az optikailag sűrűbb, amelyikben kisebb sebességgel halad a fény.)

$$\frac{\sin \alpha_h}{\sin 90^\circ} = n_{2,1}$$

$n_{2,1}$ a kettes (optikailag ritkább) közeg törésmutatója az egyes közegre vonatkoztatva.

A határszög mérésével a közeg törésmutatója meghatározható. A teljes visszaverődés jelenségét használják ki az optikai jelátvitelnél („üvegszálás” összeköttetés).

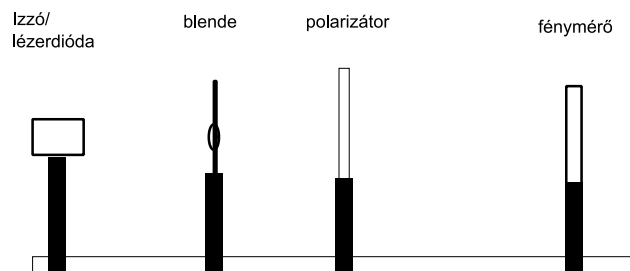
Mérési feladat:

Üveg törésmutatójának meghatározása

Üvegből készült prizma törésmutatójának meghatározása a teljes visszaverődés határszögének mérése alapján. A fehér fényel végzett mérés lehetőséget ad az üveg diszperziójának kimérésére is a látható tartományban.

IV. Fényforrások polarizációjának vizsgálata

Megvizsgáljuk, hogy egy közönséges fényforrás, a wolframszálas izzó valamint egy lézerciódá polarizációs tulajdonságát tekintve milyen fényt sugároz.



V. Mikrométeres elmozdulás meghatározása interferométerrel

Elméleti összefoglaló

Egy fénynyaláb elektromos és mágneses terek oszcillációjaként létrejövő hullámként modellezhető. Amikor két vagy több fénynyaláb találkozik a térben, az oszcilláló terek a szuperpozíció elvének megfelelően összeadódnak, azaz a tér minden egyes pontjában az elektromos és mágneses teret a különböző nyalábok tereinek vektoriális összege határozza meg.

Ha az egyes fénynyalábok különböző forrásokból származnak, általában nincs meghatározott összefüggés az összeadó elektromágneses rezgések között. Minden időpillanatban lesznek olyan pontok a térben, ahol a terek maximális térerősséget eredményezve adódnak össze, de lesznek olyanok is, ahol kioltják egymást. Mivel nincs meghatározott összefüggés az összeadó rezgések között, abban a pontban, ahol az egyik pillanatban maximum volt, a következő pillanatban minimum lehet. A látható fényt alkotó elektromágneses rezgések frekvenciája olyan nagy, hogy az emberi szem nem tudja érzékelni, így az intenzitás gyors változásait kiátlagolja, és egyenletes fényintenzitást érzékel.

Ha a fénynyalábok ugyanabból a forrásból származnak, bizonyos korreláció van a rezgések frekvenciája és fázisa között, így a tér egy pontjában a nyalábok intenzitása folyamatosan fázisban lehet egymással. Ebben az esetben az eredő térerősség mindig maximális lesz, és ott fényes folt látható. Ahol a nyalábok intenzitása folytonosan ellentétes fázisban van egymással, az eredő intenzitás minimális, és sötét folt keletkezik.

Először Thomas Young hozott létre ilyen interferenciaképeket úgy, hogy keskeny fénynyalábot irányított két szorosan egymás mellett elrendezett résre. A résekkel szemben elhelyezett ernyőn a réseken keresztül ráeső fényből szabályos, sötét és világos sávokból álló kép jött létre. Young kísérlete fontos bizonyítéka volt a fény hullámtermészetének.

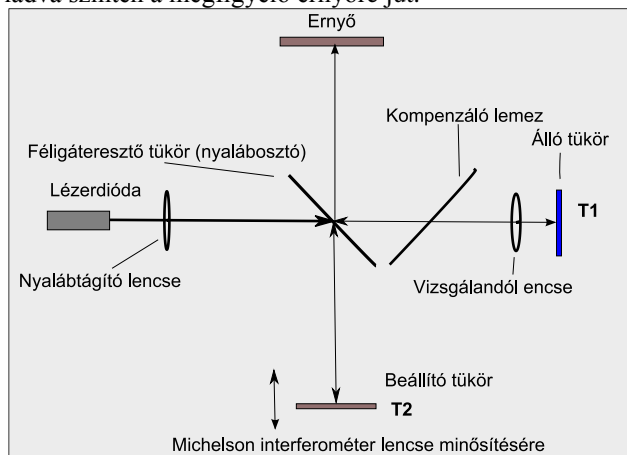
Young rései egyszerű interferométerként használhatók. Ha ismerjük a rések közötti távolságot, a maximumok és minimumok távolsága felhasználható a fény hullámhosszának meghatározására. Ha viszont a fény hullámhossza ismert, az interferenciaképből a rések távolsága határozható meg.

A Michelson-féle interferométer

1881-ben, 78 évvel Young után, A. A. Michelson hasonló elven működő interferométert épített. Michelson eredetileg az éternek, az elektromágneses sugárzások - így a fénynek is - terjedését biztosító feltételezett közegnek a kimutatására szerkesztette meg interferométerét. Részben az ő erőfeszítéseinek is köszönhetően az éter feltételezését ma nem tekintjük életképes hipotézisnek. Ezen túlmenően azonban a Michelson - féle interferométer széleskörűen elterjedt a fény hullámhosszának mérésére illetve ismert hullámhosszúságú fényforrás alkalmazásával rendkívül kis távolságok mérésére és optikai közegek vizsgálatára.

Az 1. ábrán a Michelson-féle interferométer vázlata látható. A lézer sugárnyalábja sugárosztóra esik, amely a beeső fény 50 %-át visszaveri, és másik 50 %-át átengedi.

A beeső fény így két nyalábra oszlik. Az egyik a mozgatható beállító tükörrre (T_2) esik, a másik a rögzített, álló tükörrre (T_1) verődik. Mindkét tükör a sugárostóra veri vissza a fényt. A mozgatható tükörről visszavert fény egyik fele most a megfigyelő ernyőre esik be, és a rögzített tükörről visszaverődő fény fele a sugárostón áthaladva szintén a megfigyelő ernyőre jut.



1. ábra

Ily módon az eredeti sugárnyaláb először kettéosztódik, majd a keletkezett nyalábok egy része visszafelé egyesül egymással. Mivel a nyalábok ugyanabból a fényforrásból származnak, fázisuk erősen korrelált. Így, amikor lencsét helyezünk a lézer fényforrás és a sugárostó közé, a fény nyaláb kitágul és a megfigyelő ernyőn sötét és világos gyűrűkből álló kép jelenik meg (2. ábra).



2. ábra

Mivel a két interferáló nyaláb ugyanabból a forrásból származik, fázisuk eredetileg azonos volt. Relatív fázisuk, amikor a megfigyelő ernyő bármely pontjában találkoznak, attól az optikai úthossztól függ, amelyet ezen pont eléréseig megtettek.

T_2 mozgásával az egyik nyaláb úthossza változtatható. Mivel a nyaláb az T_2 és a sugárostó közötti utat kétszer teszi meg, T_2 -t $1/4$ hullámhossznyival közelítve a sugárostóhoz, a nyaláb úthossza $1/2$ hullámhossznyival csökken. Eközben megváltozik az interferenciakép. A maximumok sugara olymódon csökken, hogy a korábbi minimumok helyét foglalják el. Ha T_2 -t tovább mozgatjuk $1/4$ hullámhossznyival a sugárostó felé, a maximumok sugara tovább csökken úgy, hogy a maximumok és a minimumok ismét helyet cserélnek, és az új elrendezés megkülönböztethetetlen lesz az eredeti képtől.

Lassan mozgatva a tükröt egy meghatározott d_N távolságon, és közben leszámolva N -et, annak számát, hány-szor jutott a gyűrűkép az eredeti állapotába, meghatározható a fény hullámhossza:

$$\lambda \equiv \frac{2d_N}{N}.$$

Ha a fény hullámhossza ismert, ugyanígy mérhető a d_N távolság.

Az 1. ábrából kitűnik, hogy az egyik nyaláb csak egyszer halad át a sugárostón, míg a másik háromszor. Ha erősen koherens és monokromatikus fényforrást alkalmazunk, például, lézert, ez nem okoz problémát. Más fényforrások esetében azonban hibaforrás lehet. Növekszik a szétválasztott nyalábok effektív úthosszának különbsége, ezért csökken koherenciájuk mértéke a megfigyelő ernyőnél, és ez torzíthatja az interferenciaképet.

Kompenzátort helyezve el a nyaláb útjában az 1. ábra szerint, mindkét nyaláb azonos vastagságú üvegen halad át, ami kiküszöböli a problémát. A kompenzátor ugyanolyan mint a sugárostó, de nincs fényvisszaverő bevonata.

A Michelson-féle interferométer felhasználható optikai elemek vizsgálatára. A nyaláb útjában egy optikai lencsét helyezve el úgy, hogy azon csak az interferáló nyalábok egyike haladjon át (lásd 1. ábra), a vizsgáló lencse bármilyen szabálytalansága jellegzetes torzulást okoz a létrejövő interferenciaképben.

A piezoelektromos effektus

Egyes anyagokban (pl. kvarc) mechanikai feszültség is okozhat polarizáció-változást, ez a piezoelektromos effektus. Az ilyen anyagok a piezoelektromos anyagok. Az egyik legrégebben ismert ilyen anyag a kvarc, de számos egyéb piezoelektromos anyag (pl. kerámiák) ismeretes. A gyakorlati felhasználás alapja az, hogy a mechanikai behatás által okozott polarizáció-változást a fenti elrendezés segítségével elektromos jellé lehet alakítani. A mechanikai behatás miatt létrejött elektromos jel általában arányos a deformációval illetve a mechanikai feszültséggel, ezért ilyen módon egyszerűen lehet deformációt illetve erőt mérni.

Az effektus hangérzékelésre is használható, mivel a hang által egy felületen létrehozott nyomásingadozás elektromos jellé alakítható. Ezen alapul pl. az ultrahangos vizsgáló készülékekben használt érzékelők működése. Ezen az effektuson alapul a piezo-gyújtó működése is. A gyújtóban elhelyezett piezoelektromos anyag elektródjai itt nincsenek összekötve, mert az elektródról jövő vezetékét megszakítják. Az anyag hirtelen deformációja-kor a polarizációs töltések megjelenése a megszakított vezeték végei között olyan nagy elektromos feszültséget hoz létre, hogy a levegőben elektromos szikra keletkezik.

A piezoelektromos effektus megfordítható: ha egy piezoelektromos anyagot elektromos erőterbe helyezünk, akkor deformálódik. Ez az inverz piezoelektromos effektus. Mivel a deformáció az alkalmazott elektromos tér növelésekor növekszik, ez az effektus lehetővé teszi, hogy elektromos erőterrel kis elmozdulásokat hozzunk létre.

Váltakozó elektromos erőteret alkalmazva az effektus segítségével piezoelektromos anyagok berezegtethetők. Ezen alapul a piezoelektromos hangkeltők működése, amelyeket elsősorban ultrahangos vizsgáló berendezésekben használnak.

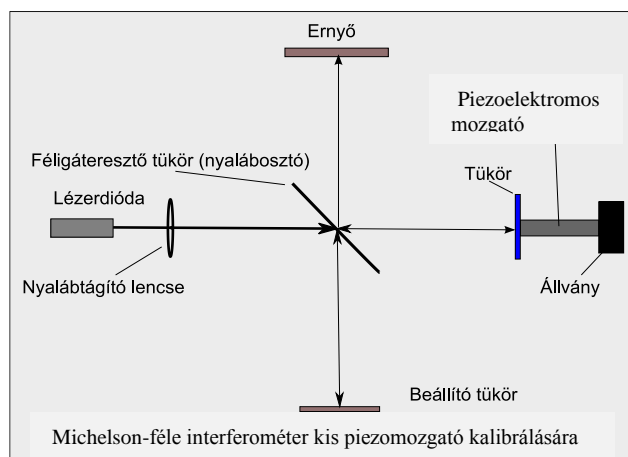
Ezt a jelenséget alkalmazzák a „kvarc”-órákban használt piezoelektromos lapka megrezgetésére is, amely az óra stabil frekvenciáját biztosítja (az erre a célra használt anyag ma már legtöbbször nem kvarc).

Kis elmozdulások reprodukálható létrehozására is alkalmaznak piezoelektromos anyagokat. Ezekkel az átalakítókkal akár nanométeres méretű elmozdulásokat is meg lehet valósítani. Napjaink korszerű anyagvizsgáló eszköze a pásztázó alagútmikroszkópban (STM) a mérőfej mozgását végzik ilyen érzékeny átalakítók.

Mérési feladat:

Piezoelektromos mozgató kalibrálása

A Michelson-féle interferométer egyik végtükrét egy piezoelektromos mozgatóelem egyik végéhez rögzítettük, a másik végét az interferométer elemeit tartó optikai asztalhoz szereltük. A mozgatóra lassan növelve 0-20 V közötti feszültséget kapcsolunk és közben számoljuk az interferenciakép sötét-világos átmeneteit. Az átmenetek számából és az alkalmazott feszültségből adjuk meg a mozgató elmozdulás/feszültség paraméterét $\mu\text{m}/\text{V}$ mértékegységben!

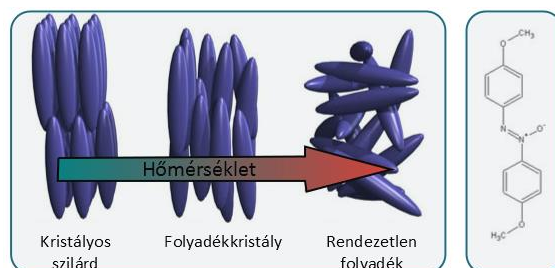


1. ábra

VI. Folyadékkristályok

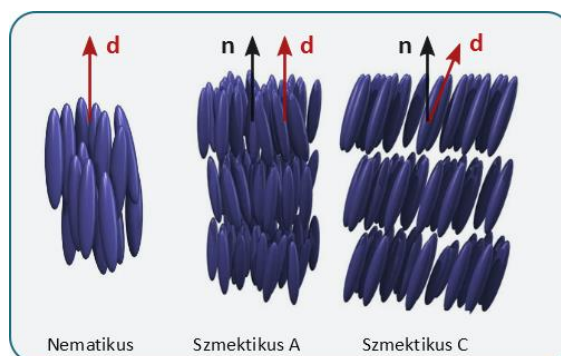
A folyadékkristályos állapot egy negyedik lehetséges halmazállapota az anyagoknak, mely jellemzőit tekintve a folyadék és a szilárd fázisok 'között' helyezkedik el. Egy folyadék molekulái, mint pl. a víz szobahőmérsékleten, rendezetlenül helyezkednek el egymás közelében és orientációjuk is teljesen véletlenszerű. Ezzel szemben egy kristályos anyag molekulái, mint pl. a víz 0°C alatt, egymáshoz képest jól meghatározott helyzetben és irányított-sággal rendeződnek. A folyadékkristályok ezeket a tulajdonságokat ötvözik: a molekulák elhelyezkedése teljesen rendezetlen vagy részlegesen rendezett, de irányított-ságukban egyértelmű rendeződést mutatnak. Ebből az is következik, hogy a folyadékkristályos anyagok molekulái nem lehetnek gömbszimmetrikusak, leggyakrabban pál-cika vagy korong alakúak, és általában szerves eredetűek.

A leggyakoribb szerves eredetű folyadékkristályos anyagok törzsét széngyűrűk alkotják, melyekhez szénhidrogén láncok kapcsolódnak.



A molekulák sematikus elhelyezkedése a különféle halmazállapotokban és egy tipikus szerves eredetű folyadékkristályt képző molekula. forrás: [2]

A folyadékkristályos állapotot a molekulák rendezettségének és irányítottságának mértéke szerint további altípusokra osztjuk. A nematikus fázisban a molekulák tömegközéppontjai hosszútávú rendezettséget nem mutatnak, azonban mikrométeres, vagy annál nagyobb méretű tartományokban közel azonos irányban állnak. A szmektikus fázisban már a tömegközéppontok is rétegekbe rendeződnek, de a rétegeken belül a molekulák a folyadékhoz hasonlóan szabadon elmozdulhatnak.



A molekulák sematikus elhelyezkedése a különféle folyadékkristály-típusokban. 'n' jelöli a molekulák irányítottságát, 'd' a rendezési síkokra merőleges irányt. A szmektikus A típusnál ezek az irányok párhuzamosak, míg a szmektikus C típusnál valamilyen szöglet zárnak be. A fenti példákon túl sokféle szmektikus rendeződés is előfordulhat.

Kettőtörés

Bizonyos anyagok érdekesen viselkednek: a polarizálatlan fény mindkét komponensét átengedik, de más sebességgel! Ez tehát azt jelenti, hogy az anyag kitüntetett irányával párhuzamosan polarizált fényre vonatkozóan más lesz az anyag *törésmutatója*, mint a erre merőleges irányban polarizált fényre vonatkozóan. Az anyagnak tehát kétféle törésmutatója van, ezért a jelenséget *kettőtörésnek* nevezik.

Ha a polarizálatlan fény nem merőlegesen éri el ennek az anyagnak a felületét, akkor a két, egymásra merőlegesen

polarizált komponens más irányba tör meg, két külön sugárra bomlik. Egy ilyen kristályon át nézve "szellemkép" lesz a mögé helyezett kép vagy szöveg.

Azonban akkor is érdekes jelenségeket figyelhetünk meg, ha a polarizálatlan fény merőlegesen éri el a kettőtörő anyag felületét. Ilyenkor a két, egymásra merőlegesen polarizált komponens ugyanabba az irányba (egyenesen, törés nélkül) halad tovább, de más sebességgel. Emiatt a két komponens más fázisban éri el a kettőtörő anyag másik felületét, ahol kilépve ismét egyesülnek.

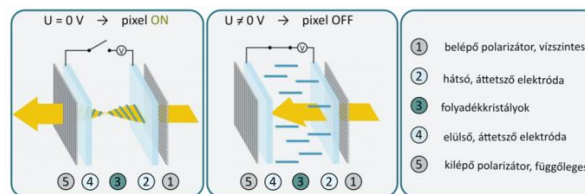
Ha a kettőtörő anyagra lineárisan polarizált fény esik, mégpedig úgy, hogy a polarizáció iránya 45° -os szöveget zár be a kettőtörő anyag kitüntetett irányával, akkor az anyagba való belépéskor a polarizált fény két, egymásra merőleges komponensre bomlik. Ez a két komponens különböző sebességgel halad az anyagban, majd a kilépéskor újra egyesül. Attól függően, hogy a két komponens között mekkora lesz a kilépéskor a fáziskülönbség, mást látunk: Ha a fáziseltolás 2π egészszámu többszöröse, akkor a fény ugyanúgy lép ki, mint ahogy belépett. Ha azonban a fáziseltolás π páratlan többszöröse, akkor az egyik komponens előjelet vált a másikhoz képest, és így a kilépő fény polarizációs síkja 90° -kal elfordul!

Még furcsább történik, ha a fáziseltolás $\pi/2$ páratlan többszöröse, ekkor *cirkulárisan poláros* fény lép ki az eszközből, amelyben az elektromos térerősség vektora már nem egy síkban rezeg, hanem haladás közben körbe forog (tehát egy spirált rajzol). A cirkulárisan poláros fény lehet balra és jobbra forgó - ezt használják ki a korszerű 3D moziban.

A folyadékkristály-kijelző (LCD)

A mai elektronikus eszközök többsége, az egyszerű digitális karóráktól és számológépektől kezdve a színes TV-ken és laptopokon át a legkorszerűbb telefonokig folyadékkristályos kijelzővel működik.

A pontos elektronikai kialakítás természetesen eltérő a különféle alkalmazásokban, de a működést biztosító fizikai jelenség közös: a kijelzők szegmensekre, pixelekre vannak osztva, melyek vagy átengedik háttérből jövő fényt (világos pixel) vagy 'elzárják' annak útját (sötét pixel), a nyitás/zárás pedig elektronikusan vezérelhető. Ezáltal pixelenként változtatható a kijelző sötét vagy világos állapota, és tetszőleges fekete-fehér kép megrajzolható. Mindezt a folyadékkristályok két különleges fizikai tulajdonsága teszi lehetővé: az optikai kettőtörés és az elektromos térrel való rendezhetőség. Az általános működési elvet az alábbi ábra szemlélteti.



A legegyszerűbb és legáltalánosabb, csavart nematikus kristályokat alkalmazó LCD kijelzők működési elve.

Világos pixel:

- A legtöbb laptop és telefon LCD kijelzője valamilyen aktív fényforrásból (halogén lámpa, LED) származó háttérvilágítással működik, mely folyamatosan világít a kijelző bekapcsolása után. *Megj.: a LED képernyőnek nevezett kijelzők többsége valójában LED háttérvilágítású LCD technológiával működik.*

A megvilágító fényt egy polarizátoron és egy átlátszó elektródán keresztül vetítik a folyadékkristályokat tartalmazó cellára.

A cellában a kristályok a határoló felület érdessége miatt rendezettek, irányuk a belépő oldalon merőleges a kilépő oldali irányra, a molekulák közti kölcsönhatások miatt a köztes térrészben pedig folytonosan csavarodik a kristályorientáció.

A belépő oldalon a fény polarizációja a kristályok hossztengegyével párhuzamos, majd a csavarodó kristályok kettőtörésük révén folytonosan elforgatják a fény polarizációs síkját a cellán való áthaladás során. Így mire a fény a kilépő oldalra ér, a merőleges polarizációt tartalmazó elölapi polarizációja éppen 90° -ot fordul és csillapítatlanul kilép. Ilyenkor fényesnek látjuk az adott pixelt vagy épp egyeneműnek a karóra háttérét.

Sötét pixel:

A fényáteresztő elektródákra feszültséget kapcsolunk, mely elektromos teret hoz létre a folyadékkristály-molekulákat tartalmazó térrészben és a fény terjedési irányával párhuzamosan rendezi azok hossztengegyét.

Ekkor az áthaladó, polarizált nyaláb a kristályok optikailag 'homogén' tengelyét látja, nem történik kettőtörés, így a fény polarizációs iránya sem fordul el. A merőleges tengelyű kilépő oldali polarizátor elnyeli a teljes beeső intenzitást, nem jut át fény a cellán és a pixel sötét marad. Mivel a folyamat az elektromos tér ki-be kapcsolásával vezérelhető, így megfelelően kis elektródákkal kis térszeket egymástól függetlenül lehet világossá/sötétté tenni és ezáltal tetszőleges képet létrehozni.

Mérési feladat:

Folyadékkristályos kijelző vizsgálata

A mérés során egy numerikus LCD működését szemléltetjük. Megvizsgáljuk a különböző polarizáltságú fény áthaladását, a polarizációs sík forgatását.