

Optoelektronikai Kommunikáció

Optikai alapismeretek

(OK-4)



Budapesti Műszaki Főiskola
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Főiskolai Kar
Számítógéptechnikai Intézete
Székesfehérvár
2002.



Budapesti Műszaki Főiskola
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Főiskolai Kar
Számítógéptechnikai Intézete
8002. Székesfehérvár
Budai ut 45. pf. 34.

tel.: (22) 316-260
fax: (22) 312-337

Hudoba György, 2002.

A fejezet célja:

- Megismertetni a geometriai és a fizikai optika alapvető törvényeit
- Megismertetni a fényenergia veszteségeinek okát és csökkentésük módját
- Bemutatni néhány fontosabb optikai építőelemet

A fejezet végére érve tudni kell:

- Mi történik a fényvel két közeg határán
- A fényvel kapcsolatos szakkifejezéseket
- Egyszerű optikai számításokat végezni
- Melyek a fontosabb optikai építőelemek, hogyan és mire használhatók

Előismeretek:

Jelen fejezet anyagának tanulmányozása előtt ismerni kell a teljes elektromágneses spektrumot (ld.OK-2 - **Az elektromágneses spektrum**). A fejezet megértéséhez alapvető algebrai és trigonometriai ismeretekre is szükség van. A differenciálegyenletek és a Fourier analízis ismeretében természetesen még jobban megérthetők a leírt folyamatok. A fény és anyag kölcsönhatás részletes vizsgálatához az elektromágnesség ismerete is szükséges.

Tartalom

Bevezetés	1
Geometriai optika	2
A fény visszaverődése	3
A fénytörés	4
A teljes visszaverődés	7
Hullámoptika	9
A fény, mint elektromágneses hullám	9
A fény polarizációja	9
Az elektromágneses hullám teljesítménysűrűsége	11
Dielektrikum törésmutatója	12
Veszteségek	13
Veszteség a közegben	13
Az <i>abszorpció</i>	13
A <i>diszperzió</i>	15
A <i>Rayleigh szórás</i>	17
Veszteségek két közeg határán	18
A <i>tükröződés, vagy Fresnel reflexió</i>	18
A <i>diffúz visszaverődés</i>	19

Optikai építőelemek	20
Tükrök	20
Lencsék	20
Prizmák	21
Optikai vékonyrétegek	22
<i>Tükrözésgátló rétegek</i>	23
<i>Dielektrikum tükrök</i>	23
Kristályoptika	25
A Brewster-szög	26
<i>A Malus-törvény</i>	26
A kettőtörés	26
<i>A Nicol-prizma</i>	27
<i>A Rochon-prizma</i>	27
<i>A félhullámú (1/2-es) és a negyedhullámú (1/4-es) lemez</i>	27
<i>Optikai izolátor</i>	28
Lineáris és nem lineáris jelenségek	29
<i>Optikai aktivitás</i>	29
<i>Faraday-effektus</i>	30
<i>Magnetooptikai Kerr-effektus</i>	30
<i>Felharmonikus keltés</i>	30
<i>A soliton</i>	31
Fénymodulátorok	32
<i>Kerr-cella</i>	32

<i>Pockels-cella</i>	33
<i>Akusztóoptikai modulátor, vagy Bragg-cella</i>	34
Összefoglalás	35
Ellenőrző kérdések	36
Válaszok	37
Kulcsszavak	38

Bevezetés

Hogy az optikai kommunikációban használatos eszközöket és fogalmakat megbeszélhessük, ismernünk és értenünk kell néhány optikai alapelvet. Ebben a fejezetben áttekintjük azokat, amelyekre a későbbiekben szükségünk lesz.

Miért úgy viselkedik a fény, ahogy? Hosszú-hosszú ideje próbálták már ezt a kérdést megválaszolni. Az egyik legrégebbi elméletet a nagy görög filozófus, Démokritosz (i.e. 470-378) állította fel. Szerinte a fény számos, végtelenül kicsiny atomból áll. Mintegy 500 évvel később a szintén görög Hero könyvet írt a tükrökről és a visszaverődés törvényéről, megalkotva ezzel a geometriai optika modelljét. Jóllehet ezután még számos elméletet kidolgoztak, a 17. századig valódi fejlődés nem történt.

Mint ismeretes, ha a fény két, optikailag eltérő tulajdonságú közeg határára érkezik, törést szenved. Bár az arabok táblázatos formában már rögzítették a beeső fénysugár különböző értékéhez tartozó törési szöget, s a szögfüggvényeket is ismerték, a két szög közötti összefüggést csak 1621-ben fedezte fel a holland matematikus, Snellius, ami a korábbiakhoz képest hatalmas áttörést jelentett.

Isaac Newton (1642-1727) nagymértékben továbbfejlesztette a fény korpuszkuláris elméletét, valamint felfedezte és tanulmányozta a diszperziót. Az optikai jelenségek különféle fényrészecskékkal való magyarázata azonban később tévedésnek bizonyult. Newtonnal egy időben Huygens (1629-1695) holland fizikus a fényjelenségeket úgy értelmezte, hogy a fényt hullámnak tettelezte fel. Sok tekintetben ezt a modellt még ma is alkalmazzuk. A fény természetét azóta is sok fizikus vizsgálta, mint pl. Compton (1892-1962), deBroglie (1892-1987) vagy Albert Einstein (1879-1955). Einstein felelevenítette Démokritosz részecskeelméletét, mely bizonyításához Compton lényegesen hozzájárult a foton felfedezésével. Compton és deBroglie megmutatták, hogy a fény viselkedésének leírásához szükség van mind a hullám, mind a részecske modellre.

Az optikai jelenségek leírásához manapság három modellt használunk. Hogy mikor melyiket, azt praktikussági szempontok döntenek el.

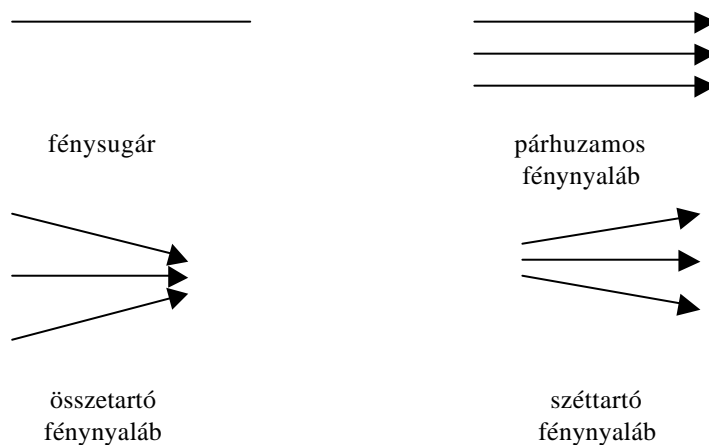
- *geometriai* vagy *sugároptikát* árnyékok, tükrök, lencsék prizmák esetében, az egyszerűsége miatt
- *fizikai*, vagy *hullámoptikát*, ha a fény útjába kerülő akadályok a fény hullámhosszának nagyságrendjébe esnek
- *kvantumoptikát* a fény és az anyag kölcsönhatása esetén (lézerdióda, fotodetektorok, ...stb)

Geometriai optika

A geometriai optika úgy tekinti a fényt, mint a fényforrásból kiinduló *fénynyaláb*, vagy *fénysugár*, amely a térben egyenes vonalban terjed.

Fényforrásnak, közelebbről *valódi*, vagy *elsődleges fényforrás*nak nevezzük az önállóan világító testeket, mint pl. a Nap, izzólámpa, lézerdióda. Az olyan testeket, amelyek csak a rájuk eső fény hatására láthatók, és ezáltal szerepelhetnek fényforrásként, a *másodlagos fényforrások* (pl. Hold, vetítövásznon, fal, ...stb).

Ha pl. sötét, dohányfüstös helyiségbe szűk nyíláson fényt vetítünk be, oldalról kéveszerű fényjelenséget látunk. Ez a *fénynyaláb*. A nyílást egyre szűkítve, a határeset elképzelésével jutunk a geometriai vonallal ábrázolható *fénysugár* idealizált fogalmához.

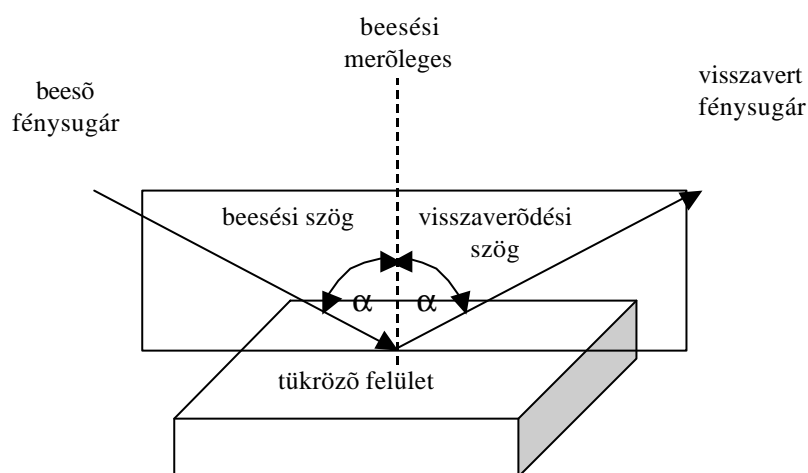


A fénysugár a fény útját jelöli, a fénynyaláb együtt haladó fénysugarak összessége.

A geometriai optika a fényt egyenes vonal mentén haladó fénysugárnak tekinti. Ez a modell jól használható a fénytörés és visszaverődés tárgyalására.

A fény visszaverődése

Tekintsünk egy fénysugarat, amely a fentiek szerint egyenes vonalban terjed mindaddig, amíg valamely test vagy eltérő közeg határfelületére nem érkezik. Ha a felület tükröző, a fénysugár visszaverődik. Síma felületről a visszaverődés *tükrös*, durva felületről *diffúz*. Az abba a pontba állított merőlegest, ahol a *beeső fénysugár* eléri a felületet, *beesési merőlegesnek* hívják. A *beeső* és a *visszavert fénysugár*nak a *beesési merőlegessel* bezárt szögét *beesési* illetve *visszaverődési szög*nek hívjuk.



Sík, tükröző felületről visszavert fénysugár

Az ábrára tekintve könnyen megállapíthatók a fényvisszaverődés törvényei (Euklidesz, i.e. 300 körül):

- a beeső fénysugár, a beesési merőleges és a visszavert fénysugár egy síkban vannak
- a beesési szög megegyezik a visszaverődési szöggel

Ha a fény az anyag felületére érkezik, valójában három dolog történik:

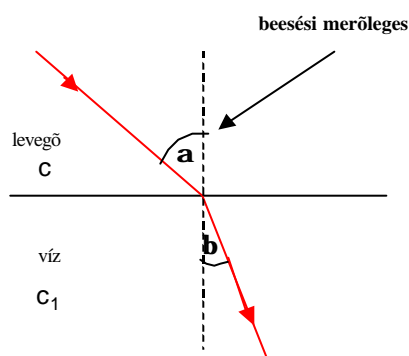
- a fény egy része visszaverődik
- a fény egy része elnyelődik, és az anyagban hővé alakul
- a fény egy része áthatol a közegen

Tökéletes tükrőről az összes fény visszaverődik. A valóságban mindig vannak veszteségek, s a visszavert fény intenzitása csökken. A legnagyobb reflexiós tényezője az ezüstnek van (95%), ezt követi az alumínium (92%).

A fénytörés

Ha a fény valamely átlátszó közeg határára érkezik, mint azt az előzőekben láttuk, akkor onnan a fény egy része visszaverődik, másik része pedig behatol a közegbe. A részleges visszaverődés jelenségét, amit a francia fizikus, Augustin Fresnel (1788-1827) vizsgált behatóan, **tükröződésnek**, vagy **Fresnel reflexiónak** hívják. Fresnel értékes munkát végzett a fény hullámelméletének kidolgozásában, s megalkotta a róla elnevezett lencsét, melyet a világítótornyokban használnak. A **tükröződéssel** később még részletesebben foglalkozunk az átviteli veszteségek tárgyalásakor.

Zárjon be a **beeső fénysugár** a felület **normálisával** alfa (**a**) szöget! Ha a fénysugár nem merőlegesen érkezik, azaz ha a **beesési szög** különbözik zérustól, a közegbe behatoló fénysugár haladási iránya megváltozik, és a beesési pontban a felületre bocsátott merőlegessel, a **beesési merőlegessel** béta (**b**) szöget bezárva folytatja útját.



A fénytörés törvénye

A beesési és törési szögek közötti összefüggést Wilebrod Snell van Roinen (latinosan Snellius) (1591-1626) fedezte fel 1621-ben. Megállapította, hogy nem a szögekre, hanem azok szinuszaira mondható ki a törési törvény, melynek elméleti kidolgozásából René Descartes (1596-1650) is kivette a részét. A fénytörés törvényét ezért **Snellius-Descartes féle törvénynek** nevezzük, miszerint **a beesési szög és a törési szög szinuszának hányadosa állandó**. Ezt az állandót a közeg **törésmutatójának** (angolul *index*) nevezzük:

$$\frac{\sin \mathbf{a}}{\sin \mathbf{b}} = \frac{c}{c_1} = n$$

vákuum	1,000	ZnSiO ₄	1,9 (cirkónium)
levegő	1,0003	SiO	2,0
víz	1,33	ZnS	2,3
MgF ₂	1,384	gyémánt	2,4
SiO ₂	1,4	TiO ₂	2,6 (rutil)
üveg	1,5	Sb ₂ S ₃	3,2
Al ₂ O ₃	1,66	GaAs	3,5

Néhány anyag törésmutatója

A fénytörés oka az, hogy a fény a különböző közegekben különböző sebességgel terjed. Mint ismeretes, a fény vákuumban másodpercenként mintegy 300 ezer kilométert tesz meg. (A vákuumbeli fénysebesség szokásos jelölése c .) Ha a fény valamely átlátszó közegbe jut, abban kisebb, mondjuk c_1 sebességgel tud csak haladni. Ezért azt is szokták mondani, hogy a közeg optikailag sűrűbb, mint a vákuum. Az $n=c/c_1$ hányadost az illető közeg vákuumra vonatkoztatott **törésmutatójának** nevezzük. A víz törésmutatója pl. $n=1,33$, mivel abban a fény csak 225 ezer km/s -os sebességgel halad.

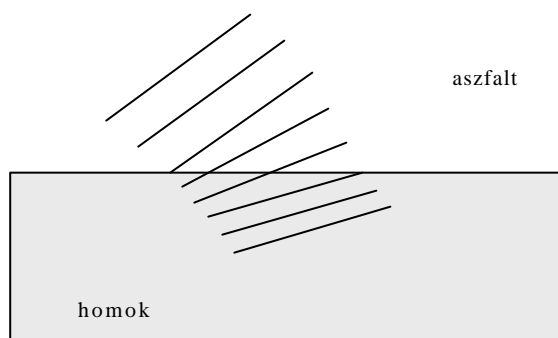
Szám példa:

- a, Mekkora a fény sebessége üvegben, ha a törésmutatója $n=1.5$?
(M: $v=200$ ezer km/s)
- b, Mekkora a fény sebessége a lézerdíóda alapanyagában, a galliumarzenidban (GaAs)?

Az *optikai úthossz* a fénynek a közegben megtett d útja, szorozva a közeg n törésmutatójával. Az így kapott érték megadja, hogy a fény mekkora utat tenne meg vákuumban ugyanannyi idő alatt, mint amennyi alatt a d távolságot befutja a kérdéses közegben.

$$L=nd.$$

A fénytörés létrejöttének szemléltetéséhez képzeljük el, hogy egy hosszú gerendát víz két személy, miközben ferdén letérnek az aszfaltozott útról a homokos talajra. Mivel a homokban csak lassabban lehet haladni mint az aszfalton, valamint nem egy időben érik el a homokos talajt, eltérülnek eredeti útirányuktól. Jelen példánkban a gerenda jelképezi a fény hullámfrontját. Az ábráról az is látszik, hogy a lassabb haladási sebesség (az apróbb lépések) miatt a hullámhossz a közegben megrövidül.



A fénytörés magyarázata a különböző terjedési sebességek alapján

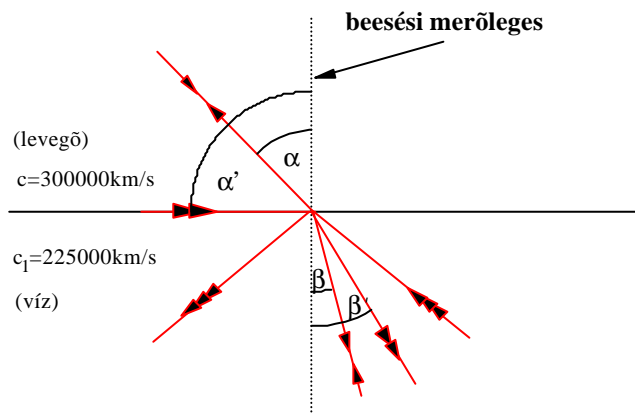
Megjegyezzük, hogy a Newton-i részecskemodell alapján a fénynek az optikailag sűrűbb közegben kellene gyorsabban haladnia. A fénysebesség mérések a hullámelméletet igazolták.

A teljes visszaverődés

Ha a fény az optikailag ritkább közegből (pl. levegő) lép át a sűrűbbe (pl. víz), mint azt az ábrán a balról jobbra mutató egyszerűen nyílazott fénysugár mutatja, a törési szög mindig kisebb lesz a beesési szögnél ($\mathbf{b} < \mathbf{a}$). Ha most a beesési szöget egészen 90 fokig növeljük (ld. kétszeresen nyílazott sugár), a törési szöggel elérkezünk egy \mathbf{b}' határig, a $\sin(90^\circ) = 1$ miatt:

$$\sin \mathbf{b}' = \frac{1}{n}$$

A közegbe belépő fénysugár ennél nagyobb szöget nem zárhat be a beesési merőlegessel. Fordítsuk most meg képzeletben a fénysugár haladási irányát, és érkezzon a fény az optikailag sűrűbb közegből (ld. jobbról balra mutató nyílak) a beesési merőlegestől egyre nagyobb szög alatt! A törési törvény most is érvényben marad mindaddig, amíg a beesési szög növelésével a \mathbf{b}' határszöget el nem érjük, mikor is a kilépő fénysugár mintegy "súrolja" a közeg felszínét. A béta szöget ugyan most minden akadály nélkül tovább növelhetjük (balra mutató háromszoros nyíl), de a fény többé már nem tud kilépni a közegből, hanem ilyenkor a határfelületen *teljes visszaverődést* szenved (Kepler, 1611). A \mathbf{b}' szöget ezért a *teljes visszaverődés határszögének* nevezzük. A fényvezető szálak ezt a természettörvényt használják ki a fény csapdába ejtéséhez.



A teljes visszaverődés létrejötte

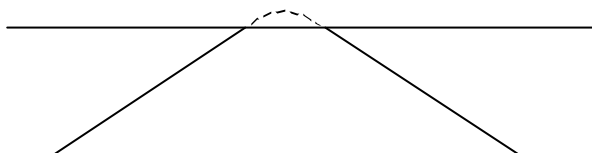
Szám példa:

a, Mekkora a teljes visszaverődés határszöge, ha a fény az üvegből érkezik az üveg/levegő határra? Az üveg törésmutatója $n=1,5$?

(M: 41,48 fok)

b, Mekkora a teljes visszaverődés határszöge, ha az üveget vízbe merítjük?

Ellentmondásnak tûnik, hogy a teljes visszaverődés függ azon közeg törésmutatójától, amelybe be sem lép a fény. A pontosabb vizsgálatok azt mutatják, hogy a valóságban a fény igen kis távolságon (egy-két hullámhossznyi mélységben) behatol a másik közegbe is, és fokozatosan fordul vissza a kiinduló közegbe, miközben a visszavert sugár egy kissé eltolódik, mert egy kevés utat abban is megtesz (Goos-Hänchen jelenség).



A Goos-Hänchen jelenség

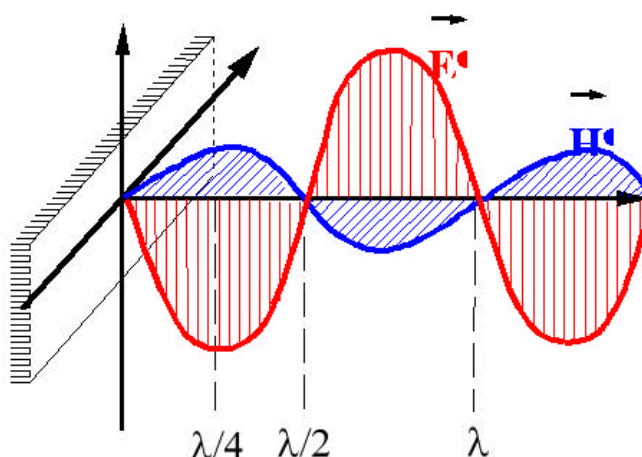
A fényvezető szálakban a teljes visszaverődéssel magyarázzuk a fény foglyul ejtését. A fenti jelenség azt mutatja, hogy nem tudunk mindent maradéktalanul megmagyarázni a geometriai optika segítségével, valamint hogy a fény visszaverődésén alapuló eszközökben milyen nagy jelentősége van a határfelületek tulajdonságainak és minőségének. A fényvezető szálak esetében ezért nem is a szál felszínéről, azaz az üveg-levegő határfelületről történik a teljes visszaverődés, hiszen a legkisebb szennyeződés, vagy akár a szál érintése megváltoztatná a viszonyokat, hanem a nagyobb törésmutatójú mag és az azt körülvevő valamivel kisebb törésmutatójú héj határáról.

Hullámoptika

Mint már korábban említettük, ha a fény útjába eső akadályok a fény hullámhosszával összemérhető tartományba esnek, akkor a hullámoptikára lesz szükségünk. Bizonyos jelenségek, mint pl. a diffrakció, kettőtörés, polarizáció a geometriai optika segítségével nehezen, vagy egyáltalán nem magyarázhatók.

A fény, mint elektromágneses hullám

A fény transzverzális elektromágneses hullám, ami azt jelenti, hogy mind az \vec{E} elektromos, mind a \vec{H} mágneses térerő a fény terjedése mentén térben és időben periodikusan változik. Egészen pontosan a haladás irányára (és ugyanakkor egymásra is) merőleges síkban harmonikus rezgést végeznek.



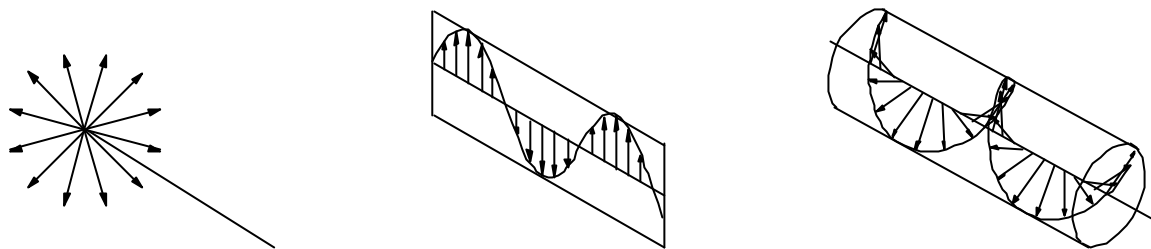
Az elektromágneses hullám

Mivel a detektorok, beleértve szemünket is, az elektromos térerő változását érzékelik, a fény rezgési síkján a továbbiakban az elektromos tér síkját értjük.

A fény polarizációja

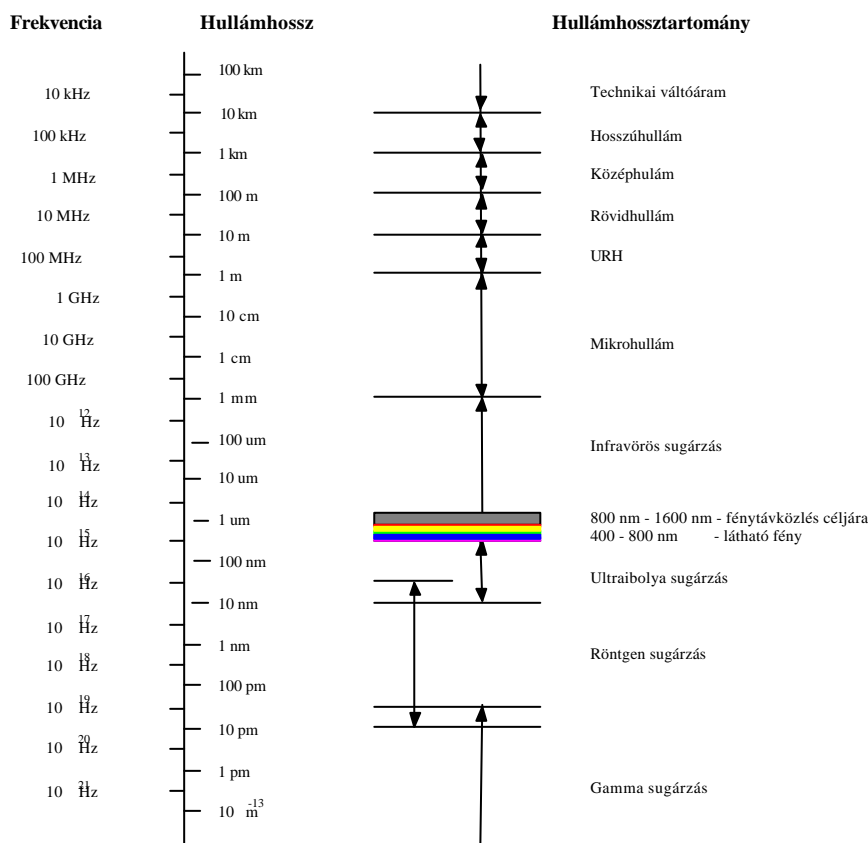
A fénynyaláiban haladó elektromágneses hullámok rezgési síkjá tetszőleges lehet, a fény *apoláros*. Ha a nyaláiban az összes hullám rezgését egy síkra korlátozzuk, a fény *polarizációjáról* beszélünk. Ha ez a sík időben állandó, a fény *lineárisan*, ha

körbe forog, *elliptikusan*, ezen belül állandó amplitúdó esetén *cirkulárisan poláros*.



Apoláros, síkban ill. cirkulárisan poláros elektromágneses hullám

A szemünkkel érzékelhető tartomány hullámhossza a 400 és 800 nm közé esik. Fénytvóközlés céljára általában a 800 és 1600 nm közötti hullámhossztartomány használatos.



Az elektromágneses spektrum

Az elektromágneses hullám teljesítménysűrűsége

Az elektromágneses hullám időben változó elektromos tere képes a töltéseket elmozdítani, rezgésbe hozni, az anyagot elektromosan polarizálni. A fény tehát energiát szállít. Ennek az energiának felületegységre és egységnyi időre vetített értékét *teljesítménysűrűségnek* nevezzük. Nagysága:

$$N = \frac{1}{8\pi} \cdot \frac{c' \cos \alpha}{9 \cdot 10^5 \text{ A}^2 / \text{m}^2} E_0^2 \quad [\text{W} / \text{m}^2]$$

ahol c' a közegbeli fénysebesség, α a beesés szöge, E_0 pedig az elektromos térerő amplitúdója.

Szám példa:

Mekkora az elektromos térerősség amplitúdója, ha merőleges beesésnél másodpercenként és négyzetméterenként 1 W energiát szállít?

(M: $E = 2,47 \cdot 10^{-3} \text{ V/m}$)

(Erősen fókuszált lézernyalábbal elértek már 10^5 V/m térerőt is!)

Az előzőekben már említettük, hogy a fénytörés oka az, hogy a közegben a fény lassabban halad, mint vákuumban. Ez természetesen nem valamiféle mechanikai ellenállás miatt van, hanem azért, mert a váltakozó elektromos tér kényszerrezgésbe hozza az anyag elektronburkát. A rezgő töltések pedig, mint tudjuk, (a kényszerrezgésével megegyező frekvenciájú) sugárzást bocsátanak ki. Számításokkal követni lehet, hogy a beérkező és a közeg rezgő atomjai által kibocsátott sugárzás összege (a rezgéseket jelentő forgó vektorok eredője) a közeg utáni térben ugyanolyan rezgés, mint a beérkező, de a közeg vastagságával arányos fáziskésést szenved. Ezt a fáziskésést észleljük úgy, mintha a fény a közegben lassabban haladt volna.

Dielektrikum törésmutatója

A törésmutatót kifejezhetjük a beeső fény és a közeg adataival:

$$n = 1 + \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 m (\omega_0^2 - \omega^2)}$$

ahol

- ω a beérkező fény, ω_0 a közeg atomjainak saját körfrekvenciája
- N a közeg egységnyi térfogatában levő atomjainak száma
- ϵ_0 a dielektromos állandó
- e és m az elektron töltése és tömege

Mint láttuk, a fény közegben lassabban halad, mint vákuumban. Mivel a fény frekvenciája nem változhat meg, viszont a sebessége lecsökken, így a közegbeli hullámhossz megrövidül.

Szám példa:

a, Mekkora a lézerdióda $\lambda = 780 \text{ nm}$ infravörös fényének hullámhossza az $n=1,5$ törésmutatójú üvegszálban? (M: $\lambda' = 520 \text{ nm}$)

b, Mekkora ugyanennek a fénynek a hullámhossza magában a GaAs kristályban?

Veszteségek

A geometriai optikával jól leírhatók a fénytörés és visszaverődés törvényei, a veszteségekről azonban nem tud számot adni.

Ha a fény nem vákuumban halad, mindig fellépnek veszteségek. A hasznos fényenergia csökken két közeg határán, de magában a közegben való haladás során is. Ennek következtében a vétel helyén mindig kevesebb a fényenergia, mint amennyit az adó kibocsátott. Ha a veszteségek túl nagyok, a jel olyan gyenge lesz, hogy detektálhatatlanná válik. Ennek elkerülése érdekében tudnunk kell, melyek ezek a veszteségek, mik okozzák, és hogyan kerülhetjük el, vagy legalább is hogyan csökkenthetjük azokat. A téma fontossága miatt a későbbiek során is előkerül majd.

Az átviteli veszteségeknek öt fő oka van: elnyelődés, diszperzió, szóródás, a tükröződés és a szórt visszaverődés.

Veszteség a közegben

Ha a fény valamely közegen halad keresztül, a fényenergia egy része elveszik. A veszteség egyik oka a *fényelnyelés*, vagy *abszorpció*.

Az *abszorpció*

*Abszorpció*ról akkor beszélünk, ha az atom vagy molekula a beérkező fotont elnyeli, s hatására magasabb energiájú állapotba kerül. Ez lehet egy elektron energiaszint átmenete, vagy egy atom vagy atomcsoport kezd intenzívebb rezgő mozgást végezni. A fotonnak az így átadott energiája a szomszédos atomokkal való ütközések során fokozatosan szétterjed az egész anyagban, vagyis hővé alakul. A foton elnyelése mindkét esetben rezonanciaszerű.

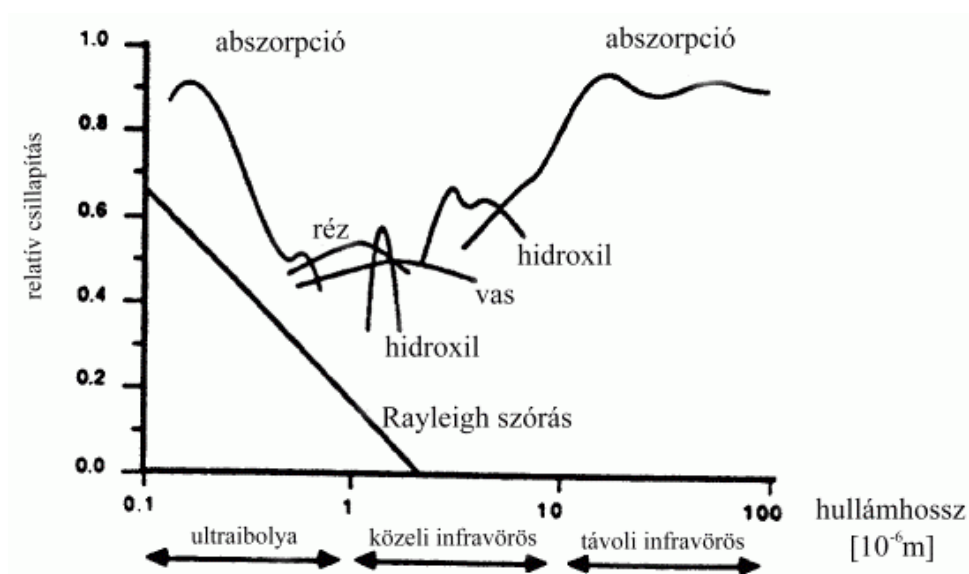
A különböző anyagok különböző mértékben nyelik el a fényt. Emellett ugyanazon anyag fényelnyelése a különböző hullámhosszakon más és más, azaz hullámhosszfüggő. Az üvegben és üvegszerű anyagokban az elektronátmenetekhez tartozó rezonanciák az ultraibolya, a molekularezgésekhez tartozók pedig az infravörös tartományba esnek. A 850 - 1600 nm között az elnyelés, azaz a csillapítás rendkívül kicsi. Ha egy anyagra azt mondjuk, hogy átlátszó, valójában azt értjük alatta, hogy a látható tartományban az *abszorpciója* alacsony.

A közönséges ablaküveget például átlátszónak tekintjük. Egy 20 méter vastag ilyen üvegtömbön keresztül azonban nem látnánk meg a túloldalon bekapcsolt zseblámpa

fényét. Ennek jelentőségét akkor értjük meg, ha meggondoljuk, hogy az üvegszál kábel akár több száz kilométer hosszú is lehet. A fényvesztéséget főként a szennyező anyagok számlájára írhatjuk. Üveg esetében elsősorban a fémek és a víz jöhet számításba.

Nézzük most meg, hogy viselkedik az üveg a látható tartományon kívül! Az üveg elnyeli az ultraibolya (UV) fényt. Ezért nem sültünk le az ablaküveg mögött. Az infravörös (IR) fényt azonban nagymértékben átengedi, s ezért melegszik fel a szoba.

Az alábbi ábra az üveg fényelnyelését mutatja be, különböző hullámhosszakon. Az elnyelt energia az anyagban rendszerint hővé alakul.



Az anyag abszorpciója több összetevő együttes hatásából tevődik össze. Az üveget szennyező réz, vas és hidroxil ionok további elnyelési csúcsokat adnak a tiszta üveg abszorpciójához. A Rayleigh szórásról a későbbiekben még szót ejtünk.

Miközben a fény az üvegen (vagy más dielektrikumon) áthalad, energiája a megtett úttal arányosan csökken. Egy nagyon kicsi dz távolság megtétele után az energiaváltozás:

$$dP = -Kdz$$

A negatív előjel az energiavesztéséget jelenti. Ennek a differenciálegyenletnek a jól ismert megoldása:

$$P = P_0 e^{-Kz} \quad \text{vagy} \quad P = P_0 10^{-az}$$

A fizikában az e alapú, a híradástechnikában a 10-es alapú logaritmust használjuk. A K illetve az a állandókat *csillapítási tényező*nek nevezzük.

Készíthetők olyan speciális anyagok, amelyek a beérkező fényt, egy keskeny hullámhossztartomány kivéve, erősen elnyelik. Ezeket fényszűrőként használjuk

A *diszperzió*

A diszperzió az anyagbeli fényvesztés egy másik formája. A közegben haladó fény általában nem csak egyetlen szigorúan meghatározott hullámhosszat tartalmaz. Mint azt korábban már láttuk, a törésmutató, s így a fény közegbeli sebessége függ a fény körfrekvenciájától, azaz a hullámhosszától. Ezt a hullámhosszfüggést *diszperzió*nak nevezzük.

$$n = n(\lambda) \quad \Rightarrow \quad c = c(\lambda)$$

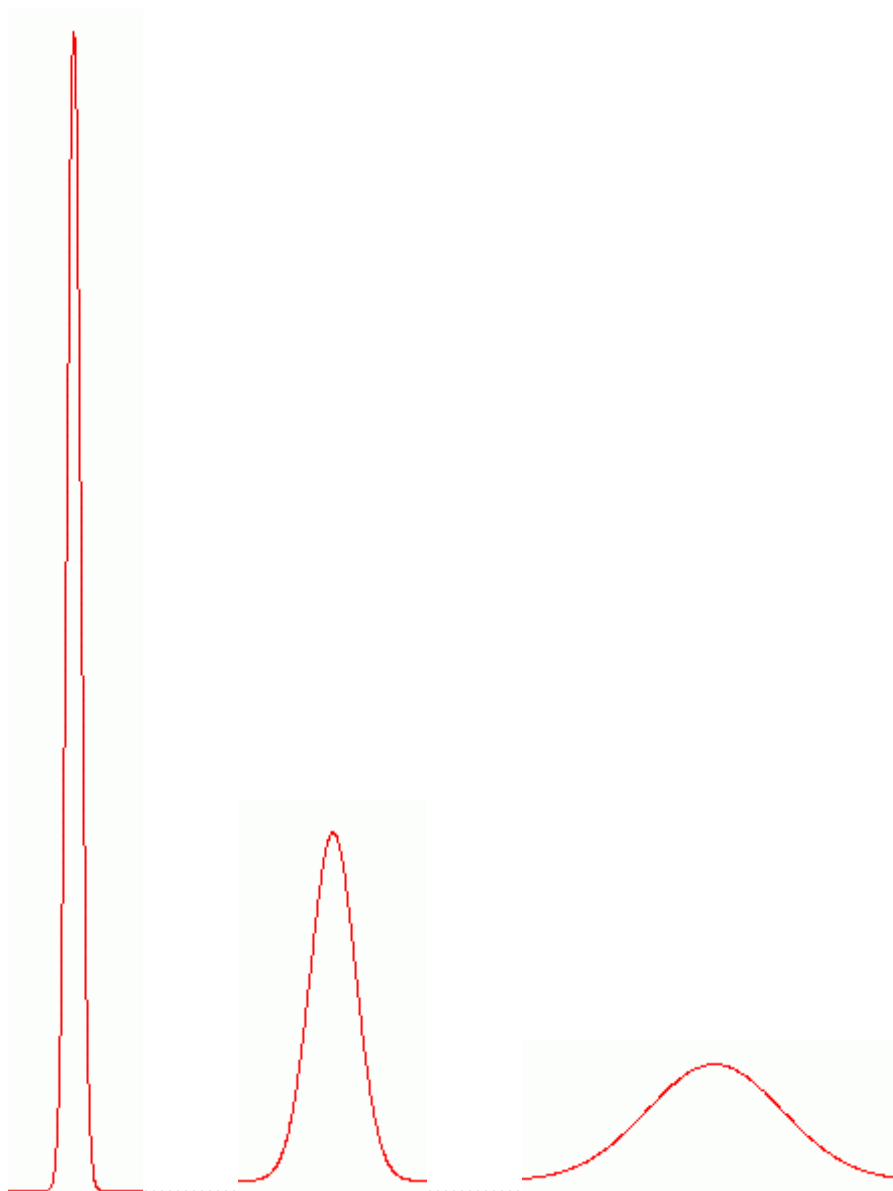
$$\text{diszperzió} = \frac{dn(\lambda)}{d\lambda}$$

Fénytöréskor a többféle szín keverékéből álló fény összetevőire bomlik, színek szerint szétszóródik. Ezt a színszóródást (vagy diszperziót) Newton fedezte fel 1666-ban és tanulmányozta részletesen úgy, hogy egy besötétített szobába keskeny nyíláson besütő napfényt prizmán bocsátott keresztül.

A többféle hullámhosszúságú fényt tartalmazó hullámcsoport sebessége:

$$c^* = c - \frac{dc}{d\lambda} \lambda.$$

Szigorúan monokromatikus, azaz egyszínű fényt előállítani nem lehet. A fényimpulzus (a Fourier-felbontás miatt) többféle hullámhosszúságú fényből összetettnek tekinthető. Mivel a különböző hullámhosszkomponensek különböző sebességgel haladnak, az impulzus idővel, pontosabban a megtett úttal arányosan “szétfolyik”.



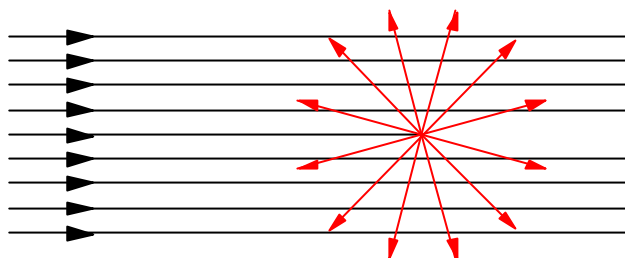
Az impulzuskiszélesedés

Mivel az impulzus energiája adott (a görbe alatti terület), a kiszélesedés az amplitúdó csökkenésével jár, s végül a detektálhatóság szintje alá csökken. A valóságban fellépő egyéb veszteségek miatt a helyzet még rosszabb.

Az impulzuskiszélesedés másik hatása a sávszélesség drasztikus csökkenése. Mivel a sűrű egymásutánban küldött impulzusok a vétel helyén összefolynak, lehetetlené válik az eredetileg küldött információ visszaállítása.

A Rayleigh szórás

A fényteljesítmény csökkenésének másik fő tényezője a szóródás. Ennek több típusa is létezik. A **Rayleigh szórás** a szálban levő, az áthaladó fény hullámhosszánál jóval kisebb inhomogenitásokon lép fel. Ezek lehetnek mikro-repedések, buborékok, de származhatnak az adalékanyagok szabálytalan eloszlásából, mechanikai feszültségekből, alakváltozásokból, szálgörbületből.



A Rayleigh szórás

Ha az anyag molekulái egymástól egyenlő távokra, tökéletesen szabályosan helyezkednének el, nem lépne fel semmilyen szóródás. De az inhomogén mikrostruktúra magának az üvegnek is alapvető sajátossága.

A Rayleigh szórás iránykarakterisztikája a haladási irány, mint tengely körül forgásszimmetrikus. Az előre és hátraszórás megegyező. A szórt fény intenzitása a haladási irányra merőlegesen a legkisebb. Az optikai kábelek OTDR-rel (Optical Time Domain Reflectometer) való vizsgálatokor ezt a visszaszórt fényt mérik, amivel a későbbiekben még részletesen foglalkozunk.

A szórás mértéke a fény hullámhosszának negyedik hatványával fordítottan arányos. Ebből következik, hogy a kék színű fény mintegy 16-szor jobban szóródik, mint a vörös. A szórás nem csak szilárd anyagokban, de a gázokban, így a levegőben is fellép. Ezért kék az égbolt, ugyanis felnézve a szórt fényt látjuk. Ugyanez magyarázza a lenyugvó Nap vörös színét, ugyanis a kék szétszóródott, maradt a vörös, de persze annak is csak töredéke.

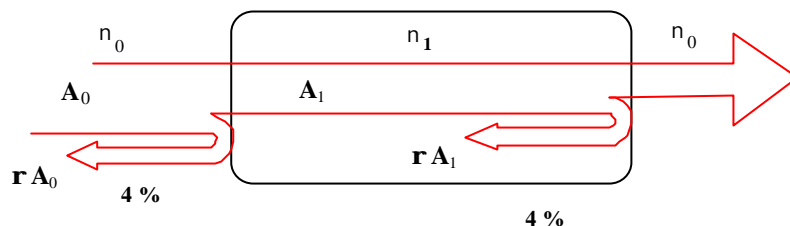
Ha a szóró inhomogenitások mérete a hullámhossz felét meghaladja, akkor az aszimmetrikus eloszlású ún. **Mie szórás** lép fel. A nagyobb fényintenzitásoknál jelentkező nem lineáris **Raman** és **Brillouin szórás** esetünkben elhanyagolható.

Visszatekintve az üveg korábban közölt csillapítási görbéjére, a szennyezések hatását leszámítva három alapvető tényezőt látunk: az UV és az IR abszorpciót, valamint a Rayleigh szórást. Ezek eredőjeként kapott csillapítási görbe minimuma az 1,5 és 1,6 mikrométer között van. Azt is megállapíthatjuk, ha a minimális csillapítást csökkenteni akarjuk, az egyedüli lehetőség az IR abszorpció csökkentése (például fluor adalékkal).

Veszteségek két közeg határán

A tükröződés, vagy Fresnel reflexió

Mint már említettük, ha a fény valamely közeg felületére érkezik, arról részben visszaverődik. Kísérletileg azt találták, hogy a teljes energia visszavert hányada az anyag n törésmutatójától függ (Fresnel ~1800).



Fresnel reflexió

Érkezzen balról az A_0 amplitúdójú hullám merőlegesen a (nem fém) közeg felületére! A visszavert hullám amplitúdóját jelöljük rA_0 -al. Ekkor a r -val jelölt reflexiók együttható - közel merőleges beesés esetén - a határfelület két oldalán érvényes törésmutatók különbségétől függ. Értékét a következő kifejezés adja meg:

$$r = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$$

A fenti egyenlet szerint r negatív, ha a hullám a kisebb törésmutatójú közegből halad a nagyobb törésmutatójú felé. A negatív előjel a visszavert hullámra nézve 180 fokos fázisugrást jelent.

Az R reflexióképesség, azaz a visszavert energiahányad r^2 -tel egyenlő, mivel a hullám energiája az amplitúdójának négyzetével arányos. Ez a visszavert fény egyrészt energiavesztést jelent, másrészt káros pozitív visszacsatolást okoz a lézerforrás felé, amit a lehetőségekhez képest minimálisra kell csökkenteni. A lézer ugyanis egy optikai erősítő, így a rendszerbe visszajutott fény káros visszacsatolást jelent. Ezáltal a fényforrásunk minőségét tönkretesszük, működése instabillá válik.

Szám példa:

a, A fény hány százaléka verődik vissza a levegőben ill. a vízben levő üveg felületéről? (M: 4%, ill. 0,36%)

b, A fény hány százaléka verődik vissza a levegőben levő GaAs kristály felületéről?

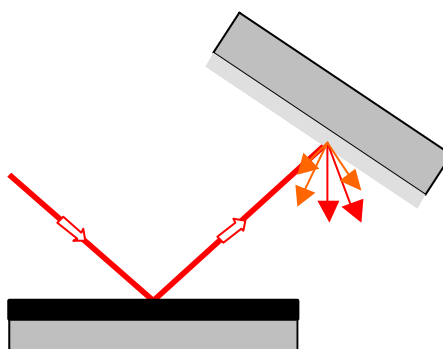
c Egy (levegőben levő) üvegszál magjának törésmutatója 1,62. Mekkora veszteséggel tudjuk vele a fényt továbbítani? (Figyelem, a reflexiós veszteség mind a be-, mind a kicsatoláskor fellép!)

A száloptikai rendszerekben a fény általában a merőlegestől nagyon kis eltéréssel érkezik a felületekre, így a fenti formulával számolhatunk. Nagyobb beesési szögek esetén a formula sokkal bonyolultabb, pl. a polarizációt is figyelembe kell venni.

A diffúz visszaverődés

Eddigi vizsgálataink során úgy gondoltuk, hogy a visszaverődés tökéletesen sík, polírozott felületről történik. Az ilyen reflexiót **tükrös visszaverődés**nek nevezzük. A valóságban, ha valamely felületet mikroszkóppal megvizsgálunk, durvának fogjuk látni, még ha az polírozott is. Különösen, ha a síktól való eltérést a ráeső fény hullámhosszával hasonlítjuk össze. A száloptikában megkívánjuk, hogy a lencsék, prizmák, szálvégek optikailag sík felületek legyenek, ami azt jelenti, hogy a tökéletlenségek (gödrök és kiemelkedések) nem haladhatják meg az alkalmazott fény hullámhosszát. (Precíziós optikai műszerekben, mint pl. csillagászati távcsövek esetén a főtükör felületének az ideálistól való eltérése legfeljebb a hullámhossz tized, de inkább huszad része!)

Ha a felület nem sík, **diffúz visszaverődés** történik. Ez azt jelenti, hogy minden beeső fénysugár több irányba szóródik szét.



Optikailag sík felületről a visszaverődés tükrös, durva felületről diffúz

Optikai építőelemek

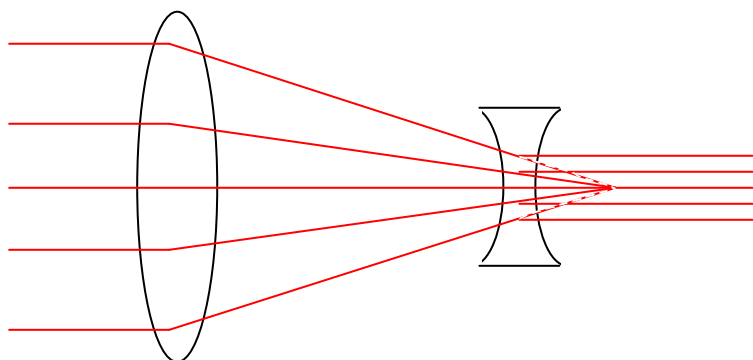
Nagyon fontos, hogy az optikai szálba belépő illetve az abból távozó fény lehetőleg minél kisebb veszteséget szenvedjen. A fény útjának módosításához általában tükröket, lencsákat vagy prizmákat használunk. Ha ezek felülete nem optikai minőségű, a fényenergia egy része elveszik. Ha anyaguk nem homogén, a Rayleigh szóródás következtében veszítünk energiát.

Tükrök

A fény útjába gyakran helyeznek sík vagy homorú (konkáv) gömbtükröket. A síktükörrel a fény haladási irányát állítjuk be. A homorú tükrökkel összegyűjtjük a fényt, megnövelve ez által az intenzitását.

Lencsék

A gyűjtő és szóró lencséknek még a tükröknél is szélesebb az alkalmazási köre a száloptikában. A lencsékkel nem áll módunkban részletesebben foglalkozni, csupán azt mutatjuk meg, hogy egy pozitív (gyűjtő, vagy konkáv) és egy negatív (szóró, vagy konvex) lencséből álló rendszerrel hogyan lehet a fénynyalábot szűkíteni, vagy éppen tágítani, ahol erre szükség van.

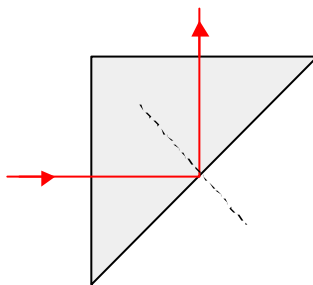


Teleszkopikus rendszer a fénynyaláb szűkítésére ill. tágítására

Prizmák

A prizma olyan átlátszó anyagból készült tömb, amelynek legalább két, egymással szöget bezáró optikailag sík oldala van. A prizmát felhasználhatjuk az összetett fény hullámhossz szerinti komponensekre bontásához (hullámhossz multiplexelt rendszerekben), vagy a fény irányának megváltoztatására.

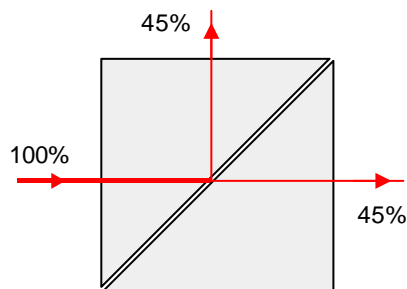
A fény visszaverésére a prizmák alkalmasabbak a tükröknél, mert a teljes visszaverődéskor nem lép fel veszteség. A prizmába való be- és kilépéskor fellépő *Fresnel reflexió* speciális tükrözésgátló (antireflexiós) réteg felvitelével majdnem teljesen megszüntethető. Ezért használnak a távcsövekben tükrök helyett prizmát a képfordításra.



90 fokos eltérítés derékszögű egyenlő szárú prizmával

A prizma oldallapjára beeső fény az átfogóra 45 fokos szögben érkezve teljes visszaverődést szenved, mivel az $n=1,5$ törésmutatójú üvegre levegőben a teljes visszaverődés határszöge mintegy 42 fok. (Jégből nem lehetne ilyen készíteni.)

A száloptikai rendszerekben a prizmákat sugárosztóként és sugárkeverőként is felhasználják. Ilyen építőelemhez úgy jutunk, hogy két, a fenti ábrán látható 90 fokos eltérítésű prizmát az átfogójuknál fogva összeragasztunk, miközben köztük egy 50%-os áteresztésű réteget alakítunk ki. Ez a réteg általában alumíniumból készül. Különböző tényezők, mint pl. a tükröződés, abszorpció, ...stb. mintegy 10% fényenergia veszteséget okoznak.



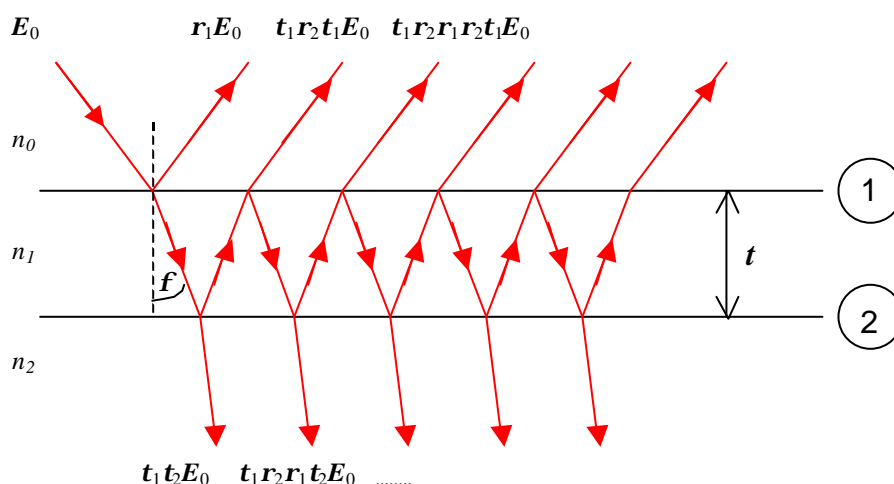
Prizmás sugárosztó/sugarkeverő. A fénysugarak ábrán jelölt irányítását megfordítva sugárkeverőt kapunk, ami optikai multiplexerként használható.

Optikai vékonyrétegek

Ha egy optikai felületre a fény hullámhosszának nagyságrendjébe eső dielektrikum réteget viszünk fel, optikai vékonyréteget kapunk. Az ilyen rétegek igen figyelemre méltó tulajdonságokkal rendelkeznek. A törésmutató és a vastagság alkalmas megválasztásával a *tükröződést* egy bizonyos hullámhosszra szinte teljesen kiküszöbölhetjük. Több réteg felvitelével pedig a legjobb minőségű tükrük állíthatók elő.

A következőkben megvizsgáljuk két, egymástól t távolságban levő párhuzamos felületről történő visszaverődést. A beeső hullám amplitúdóját E_0 -al, az első felület transzmissziós és reflexiós együtthatóit t_1 -el és r_1 -el, a másodikét t_2 -vel és r_2 -vel jelöljük. Az anyagok törésmutatói legyenek rendre n_0 , n_1 és n_2 , valamint teljesüljön, hogy $n_0 < n_1 < n_2$! Az előzőek szerint a reflexiós együtthatók:

$$r_1 = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \quad \text{illetve} \quad r_2 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}$$



Viszonylag egyszerű számolással kimutatható, hogy két egymást követő visszavert hullám között a fáziskülönbség

$$d = \frac{2pn_1}{l} 2t \cos F$$

Tükrözésgátló rétegek

Igen fontos az optikai eszközök esetében a tükrözésgátló, vagy antireflexiós réteg. Egy adott hullámhosszra gyakorlatilag nulla reflexióképesség érhető el, ha üveg, vagy egyéb n_2 törésmutatójú szigetelő hordozóra n_1 törésmutatójú, megfelelő vastagságú réteget viszünk fel. Az egyes sugarak járulékaiknak összegzésével itt nem részletezett számítások szerint az R reflexióképességre a következő formulát kapjuk:

$$R = \frac{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\mathbf{d})}{1 + r_1^2r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(\mathbf{d})}$$

Itt \mathbf{d} a réteg t vastagságától és a beesési szögtől az előzőek szerint függő mennyiség. Ha a réteg vastagságát úgy állítjuk be, hogy $n_1t = \lambda / 4$ legyen, akkor $\delta = \pi$, következésképpen $\cos(\mathbf{d}) = -1$ lesz. Behelyettesítve most a reflexióképességre kapott két fenti kifejezést:

$$R = \frac{(r_1 + r_2)^2}{(1 + r_1r_2)^2} = \frac{n_1^2 - n_0n_2}{n_1^2 + n_0n_2}$$

Arra az eredményre jutunk, ha $n_1 = \sqrt{n_0n_2}$ akkor az adott hullámhosszú (pl. lézer) fényre nincs reflexió ($R=0$).

Dielektrikum tükrök

A rétegszám és rétegvastagság megfelelő beállításával nem csak antireflexiós, hanem majdnem tökéletes tükrök is előállíthatók ($R=99.99999\%$).

$$R = \left(\frac{n_0 - (n_1/n_2)^{2N}}{n_0 + (n_1/n_2)^{2N}} \right)^2$$

Ilyen ún. dielektrikum tükrök szükségesek a lézerek készítéséhez, mivel a fémtükrök vesztesége túl nagy.

A vékony rétegek készítésére a két leggyakrabban használt módszer a vákuumpárolgatás és a kémiai felvitel. A felviendő anyagot a vákuumkamra belsejében elektromosan fűtött „csónak”-ba helyezi, a hordozót pedig a forrás fölé helyezik. A szükséges vákuum nagysága minimálisan 10^{-6} Torr.

Számos fém-oxid, mint pl. a SiO_2 és a TiO_2 , komplex oldatot képez bizonyos alkoholokkal. Ha a hordozót az oldatba mártjuk, majd kiemeljük, az oldatból egy

vékony réteg tapad rá. Az alkohol elpárolgása után a mintát kiegészítő tartós réteg marad vissza. A tapadáshoz a felület tisztasága kritikus.

Kristályoptika

Az abszorpció és a diszperzió vizsgálatakor feltételeztük, hogy a fényel, mint elektromágneses hullámmal kölcsönható anyag izotróp, azaz minden irányban ugyanúgy viselkedik. Ez a feltevés érvényes a gázokra és a folyadékok nagy részére, s néhány szilárd anyagra, mint pl. az ömlesztett üvegre. A legtöbb szilárd test belsejében azonban az atomok vagy atomcsoportok szabályos alakzatban helyezkednek el, azaz kristályos szerkezetű. A szabályos belső szerkezetből viszont az következik, hogy a különböző irányok nem lesznek egyenértékűek, az anyag anizotrop.

Az optikai tulajdonságokat tekintve azt tapasztaljuk, hogy a kristálytani tengelyekhez képest különböző irányokban a fény más és más sebességgel terjed, vagyis más a törésmutatója. Képzeljük el, hogy a kristály belsejében egy pontból elindul egy gömbhullám. Egy kis idővel később az anizotrópia miatt a hullámfront ellipszoid alakú lesz. Ha az egyszerűség kedvéért csak az egytengelyű kristályokat vizsgáljuk, forgási ellipszoidot kapunk. Lesz egy leggyorsabb és egy leglassabb irány a fény számára, vagyis egy kisebb (ordinárius) és egy nagyobb (extraordinárius) törésmutató.

		n_o	n_{e_o}
SiO_2	kvarc	1,544	1,553
TiO_2	rutil	2,616	2,903
ZnSiO_4	cirkon	1,923	1,968
H_2O	jég	1,309	1,310

Néhány kristály kétféle törésmutatója

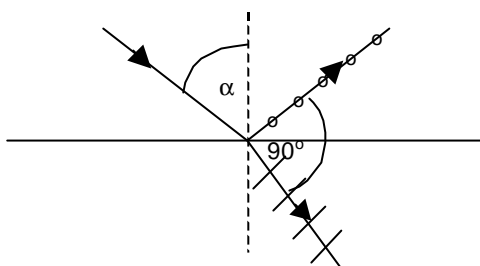
A fény, mint korábban már láttuk, transzverzális elektromágneses hullám, azaz az elektromos és a mágneses térerő, melynek amplitúdója szinuszosan változik, merőleges a terjedési irányra. Ennél fogva minden egyes terjedési irányhoz két, egymásra merőleges polarizáció tartozik. A fény és az anyag kölcsönhatásának megértésében a fény polarizációja és az anyagok anizotrópiája egyaránt fontos szerepet játszik.

A fény az anyagokra főként az elektromos terén keresztül hat. Az elektromos tér a pozitív és a negatív töltések súlypontját szétválasztja, az anyagot elektromosan polarizálja a fény frekvenciájának ütemében. Mivel az atommag tömege lényegesen nagyobb az elektronokéhoz képest, gyakorlatilag az elektronok fognak rezegni az oszcilláló elektromos tér hatására. A mágneses kölcsönhatás v/c -vel arányos, ahol v

az elektronok sebessége az anyagban, c pedig a fénysebesség. Tehát ez a kölcsönhatás kicsi.

A Brewster-szög

Mint már korábban láttuk, ha fény esik egy átlátszó anyagra, a fény egy része megtörve halad tovább, másik része visszatükröződik. A két fénysugár egymásra merőleges síkban részben polarizált lesz. A polarizáció akkor lesz maximális, ha a megtört és a visszavert fénysugár egymással 90 fokos szöget zár be. Az ehhez tartozó beesési szöget **Brewster-szög**nek nevezzük.



A Brewster-szög

A Malus-törvény

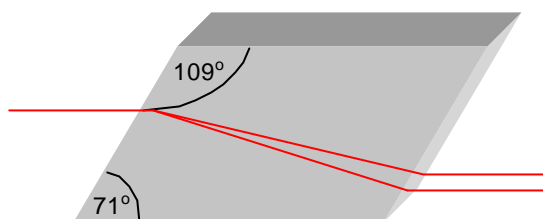
A Malus-törvény azt mondja ki, hogy a polarizátoron áthaladó polarizált fény intenzitása a polarizációsík és a polarizátor áteresztési síkja által bezárt F szög koszinuszának négyzetével arányos.

$$I = I_0 \cos^2 F$$

Ezt rögtön beláthatjuk, ha a beeső fény elektromos vektorát felbontjuk a polarizátor áteresztési síkjával párhuzamos, és egy arra merőleges komponensre. A vektor amplitúdója a vetület koszinuszával, az intenzitás pedig a hullám amplitúdójának négyzetével arányos.

A kettőtörés

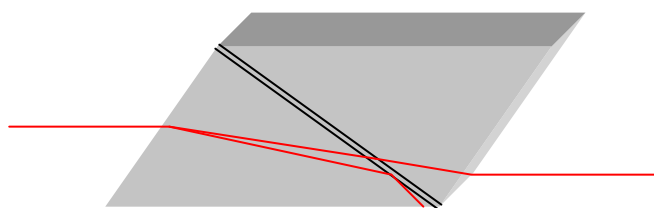
Bartholinus 1669-ben felfedezte, ha kalcit kristályon (CaCO_3) keresztül nézett egy tárgyat, annak képe megkettőződött. Később kiderült, a két képet előállító fénycsugár egymásra merőlegesen polarizáltak. A kalcit ez által felhasználható polarizátor készítésére (ld. Nicol-prizma).



Kettőtörés a kalcitprizmában

A Nicol-prizma

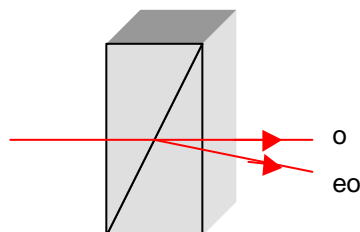
A Nicol-prizmában (1828), mely két félprizma összeragasztásával készül, az egyik polarizációs irány teljes visszaverődést szenved, majd elnyelődik, az extraordinárius sugár viszont akadálytalanul kilép.



A Nicol-prizma sugármenete

A Rochon-prizma

A Rochon-prizma a fénynyalábot két polarizált nyalábra bontja, amelyek kissé különböző szögben lépnek ki. Leggyakrabban kvarcból készítik.



A Rochon-prizma

A félhullámú (1/2-es) és a negyedhullámú (1/4-es) lemez

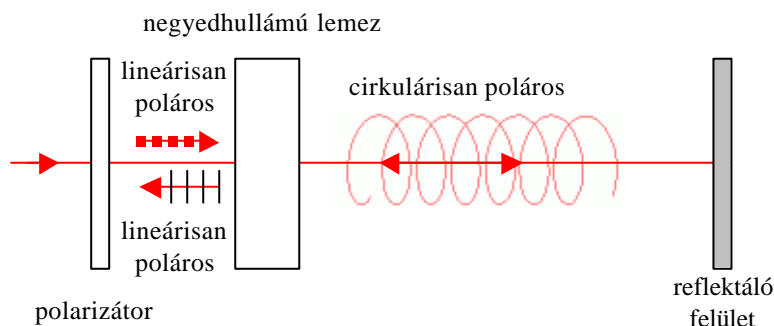
A kettősen törő anyagokat nagyon jól felhasználhatjuk az optikai rendszerekben. A félhullámú lemez nem azt jelenti, hogy a vastagsága a hullámhossz fele, hanem hogy a két polarizációs irány között fél hullámhossznyi eltolást hoz létre. Bocsássunk lineárisan poláros fényt egy ilyen lemezre úgy, hogy a beeső fény polarizációsíkja a lemez optikai tengelyével 45 fokos szöget zárjon be. Ekkor a fény elektromos vektora a kristály két polarizációs irányának megfelelően felbomlik két azonos amplitúdójú, de egymásra merőleges komponensre.

Mivel a kétféle polarizációs irányban a fény különböző sebességgel halad, a két komponens között a megtett távolsággal arányos fáziseltolódás jön létre. A félhullámú lemezt olyan vastagságúra készítik, hogy a kilépéskor a két komponens fáziskülönbsége pont 180 fok, azaz a hullámhossz fele legyen. Könnyen beláthatjuk, hogy ez által a kilépő fény polarizációsíkja 90 fokkal elfordul.

A negyed hullámú lemez csak annyiban tér el az előzőtől, hogy most az eltolódás 90 fok, azaz negyed hullámhossznyi lesz. A hatására azonban a kilépő fény cirkulárisan polarizált lesz.

Optikai izolátor

A negyedhullámú lemez fontos alkalmazást nyer az optikai izolátorban. Működése a következő. Állítsunk a fénysugár útjába egy polarizátort, majd egy negyedhullámú lemezt, optikai tengelyét megfelelő szögben beállítva!



Az optikai izolátor

A fény áthaladva a negyedhullámú lemezen cirkulárisan polárosként halad tovább. Ha most valamely felületről részben vagy teljesen visszaverődik, ismét áthalad a negyedhullámú lemezen, melyben a fáziskülönbség tovább nő. A végeredmény az, hogy az eredeti irányra merőleges polarizáltsággal éri el a polarizátort. Ezen azonban már nem tud átjutni. Az optikai izolátorral a lézert meg tudjuk védeni a káros visszacsatolásoktól, melyek instabillá tennék a működését.

Lineáris és nem lineáris jelenségek

Az elektromosság elméletéből ismert, hogy izotróp anyagokban az E elektromos térerősség és a D elektromos eltolás kapcsolatát a permittivitás adja meg, a P polarizáció pedig a szuszceptibilitáson keresztül kapcsolódik E -hez.

Anizotróp közegben az összefüggések sokkal bonyolultabbak. Az indukált polarizáció pl. nem feltétlenül a kiváltó elektromos tér irányába fog mutatni.

Másféle bonyodalmak lépnek fel nagy térerősségek esetén. Az anyag válasza ekkor már nem is lesz arányos a gerjesztő térerősséggel, hanem a lineáris összefüggést további tagokkal kell kiegészíteni. A legegyszerűbb esetben pl.

$$P = aE + bE^2$$

Ilyen nemlineáris válaszokra példák az elektro- és magnetooptikai jelenségek, a cirkuláris kettőtörés, a felharmonikus keltés, vagy az indukált folyamatok. Ezek azért fontosak, mert a fényhullámok irányításának és alakításának kulcsát jelentik.

A gerjesztő elektromos tér érkezik kívülről, de ha a beeső fény intenzitása elég nagy, a fény saját elektromos tere is létrehozhat nemlineáris hatást. A következőkben áttekintünk néhány lineáris és nemlineáris jelenséget, s az elektrooptikában fontos alkalmazásukat.

Optikai aktivitás

Ha síkban polarizált fényhullám bizonyos anyagokban terjedve a polarizáció síkja az anyag vastagságával arányosan elfordul, *optikai aktivitás*ról beszélünk (Arago, 1811). (A jelenség nem azonos a kettőtöréssel. Ott a síkban poláros fény elliptikusan polárossá válik.) Magyarozatát Fresnel adta meg, mi szerint a jobbra és a balra cirkulárisan poláros fény terjedési sebessége kissé különbözik. Számos anyag mutat *optikai aktivitást*, többek között a cukoroldatok. Ez alapján határozzák meg a must cukorfokát.

Faraday-effektus

A mágneses tér elforgatja a fény polarizációsíkját az anyagon való áthaladás közben, ha a haladás a térrel párhuzamos irányban történik. A szögelfordulás nagysága arányos az alkalmazott mágneses indukció erősségével és a közeg hosszával. Ez a jelenség a ***Faraday-effektus***. A polarizációsík szögelfordulása mindkét irányban ugyanakkora, akár a tér irányába, akár ellenkező irányban halad a fény, nem úgy, mint az optikai aktivitásnál, ahol visszafele haladva a szögelfordulás iránya ellenkező. A *Faraday-effektus* ezért felhasználható *optikai izolátor* készítésére (Faraday-izolátor) teljesen hasonló módon, mint azt a negyedhullámú lemeznél láttuk. Jelentős effektust mutat a YIG – Ittrium Iron Gránát, valamint a TGG – Terbium Gallium Gránát.

Magnetooptikai Kerr-effektus

Ha lineárisan poláros fényt ejtünk egy mágnesre, a visszavert fény polarizációsíkja kis mértékben elfordul. Az elfordulás ellenkező irányú a mágnes É-i pólusáról, mint a D-iről. A jelenség neve ***magnetooptikai Kerr-effektus***. A jelenséget a magnetooptikai adatrögzítésben használják ki. A mágneses rétegre fókuszált lézérfény a lemezt abban a pontban a Curie-pont fölé hevíti, miközben egy elektromágnezt bekapcsolva külső mágneses teret alkalmaznak. A lemez tovább fordulva lehül, és a mágneses tér irány „befagy” a lemezbe. A kiolvasás kisebb energiájú lézersugárral történik. A mágnesezettség két lehetséges iránya jelentheti a 0-t vagy 1-et.

Felharmonikus keltés

A lézer 1960-as felfedezésével lehetővé vált intenzív, monokromatikus, koherens fénynyaláb előállítás. Ekkor fedezték fel a felharmonikus keltést, a parametrikus erősítés elvén működő folyamatosan hangolható fényforrásokat, és még több más jelenséget. Az erős elektromos tér miatti nemlineáris karakterisztikából következik például, hogy az alapharmonikus mellett megjelennek a felharmonikusok. Ezt a jelenséget használták először kék lézer előállítására.

A nemlineáris karakterisztika, csakúgy, mint az elektronikában, lehetővé teszi az optikai keverést, összeg és különbség képzést, s megjelennek az oldalsávok.

A soliton

Az elektromos térben harmadrendű tagokat ($\sim E^3$) tartalmazó polarizáció az intenzitásfüggő törésmutatót írja le. Ennek megfelelően a törésmutatóra az alábbi kifejezést kapjuk:

$$n = n_1 + n_2 E^2$$

Bizonyos anyagok és bizonyos intenzitású fény esetében elérhető, hogy egy alkalmas hullámhossz környezetében ne lépjen fel diszperzió, azaz $dn/d\lambda = 0$ legyen. Tehát ha elindítunk egy nagyenergiájú impulzust a szálban, akkor a fényimpulzus saját elektromos tere helyileg úgy változtatja meg a szál törésmutatóját, hogy a korábban említett Fourier-felbontásból adódó hullámhossz komponensek azonos sebességgel futnak. Az eredmény az, hogy az impulzus szétfolyás megszűnt! Az alakját megtartó fényimpulzust nevezzük *soliton*nak. Laboratóriumi körülmények között végeztek már sikeres kísérleteket. Az abszorpció és fényszóródás miatt azonban a fényimpulzus intenzitása folyamatosan csökken, s egy bizonyos határ alatt a *soliton* megszűnik. Az elnevezés az angol „solitaire” (magányos) szóból ered.

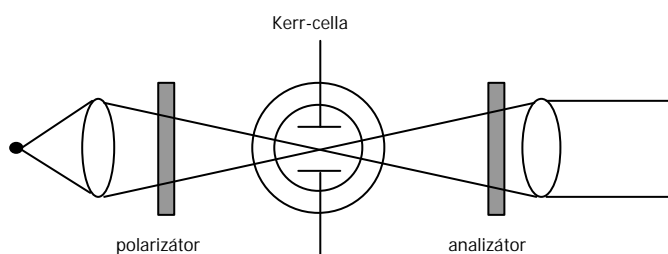
Fénymodulátorok

A gyakorlatban a fénykibocsátó diódák (LED és lézerdióda) sugárzása, vagyis az általuk kibocsátott fényenergia mennyisége, a diódán átfolyó áram változtatásával egyszerűen modulálható.

A gázlézerekhez azonban külön modulátort kell használni. Külső modulátort használnak az osztott hullámhosszú (WDM) technikában szilárdtest lézerek alkalmazása esetében is, mivel a lézer hullámhosszát extrém – néhányszor 10pm – pontossággal állandó értéken kell tartani. Az egyes csatornákat 100 ill. 50GHz választja csak el, ami $0,8$ ill. $0,4\text{nm}$ -nek felel meg a $193,1\text{THz}$ -re, azaz a $1552,52\text{nm}$ -re vonatkoztatva. Modulátorként *Kerr-cella* vagy kristálymodulátor használható, kivételesen ultrahang modulátort (*Bragg-cella*) is alkalmaznak.

Kerr-cella

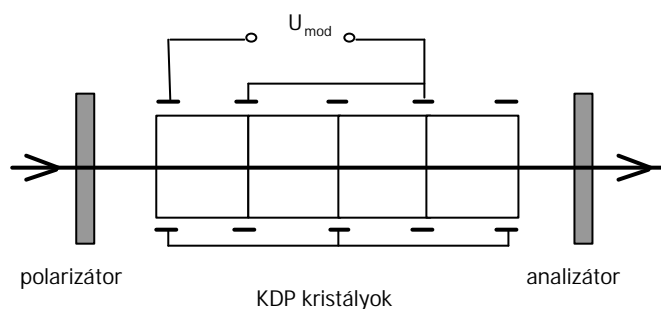
A két, egymásra merőlegesen álló polarizációsíkú, ún. keresztezett *Nicol-prizma* között elhelyezett *Kerr-cella* nitrobenzollal töltött optikailag kifogástalan felületű üvegtartály, amelyben a síkkondenzátort alkotó két elektróda foglal helyet. Az elektródákra adott feszültség hatására a nitrobenzol anizotroppá, kettőtörővé válik, azaz a törésmutató az elektromos erőter erővonalaival párhuzamos, ill. az arra merőleges irányban egymástól eltér. A cellára eső lineárisan polarizált monokromatikus fénysugár két egymásra merőleges polarizációs síkú összetevőre bomlik, és a *Kerr*-cellát elhagyó fény elliptikusan polarizálttá válik. Az analízator a két összetevőt egy síkban egyesíti, és ezek egymással interferálnak. A sugarak fáziskülönbsége az elektródákra adott feszültség pillanatnyi értékétől függ, s ha ez a feszültség váltófeszültség, akkor az analízatorot amplitúdómodulált fénysugár hagyja el.



A *Kerr*-cellás optikai modulátor felépítése. 10^9Hz -ig modulálható

Pockels-cella

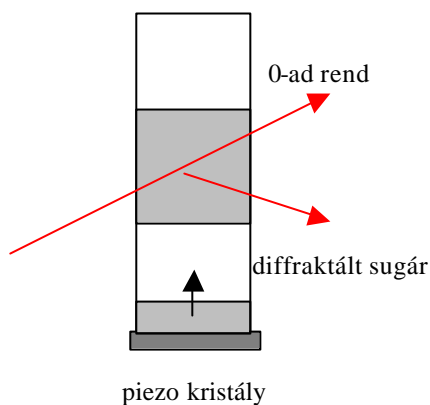
A kristálymodulátor, vagy más néven *Pockels-cella* káliumdihidrogénfoszfát (KDP – KH_2PO_4) kristályhasábjainak a z - z hosszirányra (tengelyirányra) merőleges lapjait párhuzamosra csiszolják és összeragasztják. Az egyes kristályhasábok optikailag sorba, villamosan párhuzamosan vannak kapcsolva a kristályra felvitt elektródák segítségével. (Az egyes kristályokat tengelyirányba kell orientálni.) Villamos erőter hatására a kristály kettőtörővé válik, a polarizált sugárnyaláb két összetevőre bomlik, melyek terjedési sebessége a kristályban különböző. A modulátorkristályt elhagyó két összetevő között a megtett úthosszal és a terjedési sebességek különbségével arányos fáziskülönbség lép fel. Az analizátoron keresztül már csak az azzal azonos polarizációsíkú összetevők lépnek ki, melyek interferálnak egymással. Így a moduláló váltófeszültség hatására periódikus fénytéljesítmény változás, amplitúdómoduláció jön létre.



A *Pockels*-cellás optikai modulátor felépítése

Akusztóoptikai modulátor, vagy Bragg-cella

A **Bragg-cellában** ultrahang segítségével haladó sűrűség hullámokat hoznak létre. Mivel a cellában levő pl. tellurdioxid (TeO_2) kristály törésmutatója sűrűségfüggő, a sűrűség hullámok egy optikai rácsot állítanak elő. A cellán áthaladó fény így diffrakciót szenved, vagyis megjelennek az elhajlási rendek.



Bragg-cella

A fény modulációja a piezo kristály be és kikapcsolásával történik. A 0-ad rendet rendszerint kitakarják, s a diffraktált sugár a moduláció ütemében megjelenik illetve eltűnik. A Cristal Technology 3225-ös modellje esetében az ultrahang frekvenciája 225MHz és 50MHz -ig modulálható.

Összefoglalás

A fényvisszaverődés törvénye: a beeső fénysugár, a beesési merőleges és a visszavert fénysugár egy síkban vannak, valamint a beesési szög megegyezik a visszaverődési szöggel

A fénytörés törvénye (Snellius-Descartes féle törvény): a beesési szög és a törési szög szinuszának hányadosa állandó. Ezt az állandót, amely megegyezik a két közegbeli fénysebességek hányadosával, a közeg törésmutatójának nevezzük

Teljes visszaverődés: akkor következik be, mikor a fény az optikailag sűrűbb közegből az optikailag ritkább közeg határára a kritikus szögnél nagyobb szög alatt érkezik.

A fény energiája az alábbi folyamatokban csökkenhet:

- abszorpció: függ a közeg anyagától és a hullámhossztól
- Rayleigh szórás: a hullámhossznál jóval kisebb inhomogenitásokon való szóródás
- Tükröződés, vagy Fresnel reflexió: a közeg felületéről történő, a törésmutatók különbségétől függő visszaverődés
- diffúz visszaverődés: optikailag durva felületen való szóródás

A fénysugár útjának módosítására tükröket, prizmákat és lencsákat használunk.

A prizmák tükörként, sugárosztóként és sugárkeverőként is használhatók

Optikai vékonyrétegekkel tükrözésgátló bevonat és majdnem tökéletes tükör is készíthető.

A lézer optikai erősítő, s ha kívülről fény jut bele, működése instabillá válik.

A negyedhullámú lemez és a Faraday effektus lehetőséget nyújt optikai izolátor készítésére, ami megakadályozza, hogy a lézerefény visszaverődjön a fényforrásba.

A szilárdtest lézerek önmagukban modulálhatók. Külső optikai modulátorként használható a Kerr-cella, a Pockels-cella és a Bragg-cella.

Ellenőrző kérdések

Az alábbi kérdések segítenek eldönteni, hogy mennyit sikerült megjegyezni ebből a részből. Amennyiben valamelyik kérdésre nem tud helyes választ adni, akkor a megfelelő szövegrészt újra át kell tanulmányoznia.

1. Mi a különbség a fénytörés és a fényvisszaverődés között?
2. Mi a törésmutató?
3. Mi a teljes visszaverődés és mi határozza meg a teljes visszaverődés határszögét?
4. Mi a fénypolarizáció és milyen típusai vannak?
5. Mi a diszperzió és milyen hatása van az impulzusátvitelre?
6. Melyek a fényveszteség főbb okai?
7. Hogy védhetjük meg a lézert a káros fényvisszacsatolástól?
8. Mi a soliton?

Válaszok

1. Ha a fény két közeg határára érkezik, a fény egy része visszaverődik abba a közegbe, ahonnan érkezett. Ha a második közeg is átlátszó, akkor a fény haladási irányát megváltoztatva behatol ebbe a közegbe. Ezt nevezzük fénytörésnek.
2. Az anyag törésmutatója a fény vákuumbeli és a közegbeli sebességének az aránya.
3. Ha a fény az optikailag sűrűbb közegből az optikailag ritkább közeg határára a teljes visszaverődés határszögénél nagyobb szög alatt érkezik, nem tud kilépni a közegből, és a teljes fényenergia visszaverődik. Mivel ilyenkor energiaveszteség nincs, így valósíthatjuk meg a legjobb tükröket. A határszög a Snellius-Descartes törvényből kapható meg úgy, hogy az optikailag ritkább közegbeli szöget 90 foknak választjuk.
4. A polarizáció az, amikor a fényhullám rezgését egy síkra korlátozzuk. Típusai: lineárisan poláros, ha ez a sík időben állandó, elliptikus, ha körbe forog, cirkulárisan poláros, ha a két egymásra merőleges összetevő amplitúdója megegyezik.
5. Diszperzióknak nevezzük a törésmutató hullámhosszfüggését. Ennek az a hatása, hogy a különböző hullámhosszkomponensek a közegben különböző sebességgel haladnak, szétszóródnak, így az impulzus kiszélesedik és ellaposodik.
6. Abszorpció, diszperzió, Rayleigh szórás, tükröződés és a diffúz visszaverődés.
7. Optikai izolátorral, ami lehet két keresztezett polarizátor közé helyezett negyedhullámú lemez, vagy Farady-cella.
8. Diszperzió nélkül haladó hullám, fényimpulzus.

Kulcsszavak

Jelen részben az alábbiakban felsorolt szakkifejezéseket tanultuk meg. Mielőtt tovább haladna, bizonyosodjon meg, hogy mindegyiket érti és ismeri. A felsorolásban megadjuk az angol szakirodalomban előforduló megnevezését is.

beesési szög	angle of incidence
visszaverődési szög	angle of reflection
törési szög	angle of refraction
törésmutató	(refractive) index
normális	normal
Snellius-Descartes törvény	Snell's law
teljes visszaverődés	total internal reflection
teljes visszaverődés határszöge	critical angle
fényelnyelés, vagy abszorpció	absorption
Rayleigh szórás	Rayleigh scattering
tükröződés	Fresnel reflexió
diszperzió	dispersion
diffúz visszaverődés	diffuse reflection
polarizáció	polarisation
tükrözésgátló réteg	antireflection layer
Brewster-szög	Brewster angle
negyedhullámú lemez	quarter wave plate
optikai izolátor	optical isolator
fénymodulátor	light modulator

Jegyzetek