

BOLYAI FARKAS ELMÉLETI LÍCEUM

OPTIKAI PÓKHÁLÓ

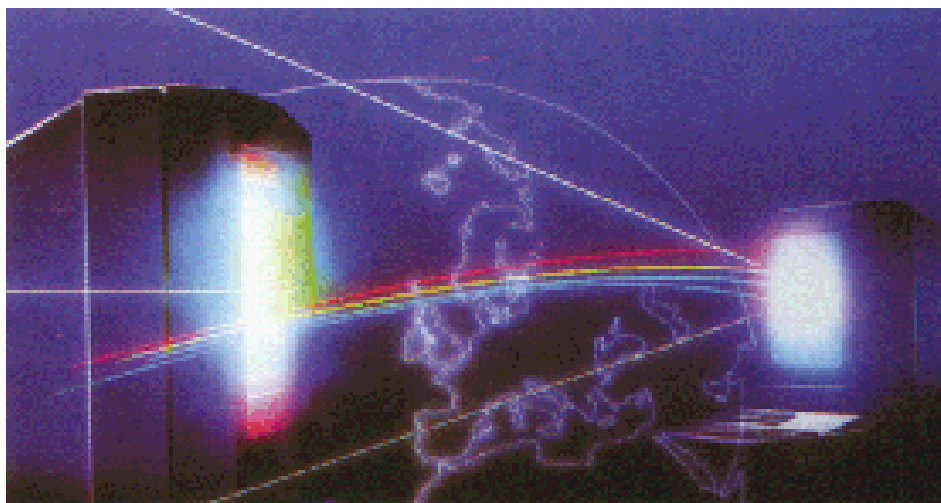
**IRÁNYÍTÓ TANÁR:
SZÁSZ ÁGOTA**

**VERES ORSOLYA
XI. I**

2004

OPTIKAI PÓKHÁLÓ

Az egyenest a fénysugár jelöli ki. A fényvezető szálak azonban meghajlítva, meggörbítve, megcsomózva csapdát jelentenek a fény számára. Ezek a hajszálvékony szálak ma már körbehálózják a bolygónkat, segítségükkel nagy mennyiségű információhoz juthatunk, vagy nagy mennyiségű információt továbbíthatunk nagyon rövid idő alatt. Dolgozatomban a fény terjedését vizsgálom ezekben a szálakban, betekintést nyújtok az optikai szálak gyártási technológiájába, kísérleti úton meghatároztam az optikai szál törésmutatóját, valamint összefoglalom a felhasználási területeket.



1. A FÉNY TERJEDÉSE OPTIKAI SZÁLAKBAN

TÖRTÉNETI ÁTTEKINTÉS

A múlt században feltalált távíró és telefon lehetővé tette az információ fémes vezetőkön való továbbítását. Az 1900-as évek elején a rádió feltalálása nagy előrelépést jelentett a modern hírközlés történetében, ezáltal a vezeték nélküli adattovábbítás is lehetővé vált. Az 1940-es évektől a fénytávközlés is fejlődésnek indult. A fényt információk és jelek továbbítására már több ezer évvel ezelőtt is használták (pl jelzőtüzek). Az irányított fény alkalmazása információátvitelre is több száz évvel ezelőtt kezdődött. A vezetett fényt először orvosi szálakban és repülőgépműszerekben használták fel. Ezeknek a szálaknak a tisztasága korántsem hasonlítható össze a ma használatos optikai szálak tisztaságával (100 dB/km feletti csillapítási értékkel rendelkeztek, a maiak csillapítási értéke 0,2-0,3 dB/km).

Dr Charles Kao és George A. Hockham 1966-ban megjelent cikkével megalapozta az optikai szálak vezetés gyakorlati megvalósítását, amely kimutatta, hogy a fényenergia a vezető belsejében terjed, és a veszteséget a felületen kilépő energiával rendeli össze. A nagy csillapítás nem az üveg alapvető tulajdonsága, hanem a benne lévő szennyeződések okozzák. Ezt követően egyre nagyobb tisztaságú üvegszálakat sikerült előállítani, 1979-ben állították elő a mai elvárásoknak megfelelő első optikai szálakat. Az

ilyen minőségű szál 20-100 km áthidalását teszi lehetővé erősítés és regenerálás nélkül. Sok esetben nem a csillapítás értéke határozza meg az áthidalható távolságot, hanem a diszperzió.

A fényvezető szálakkal párhuzamosan fejlődtek a különböző fényadók és –vevők. Így az 1980-as évek végére sok országban a gerincvonalak kiépítésében áttértek a fénytávközlésre. A jövőben várható, hogy a kisebb kapacitású vonalakon is megjelennek a fénykábelek.

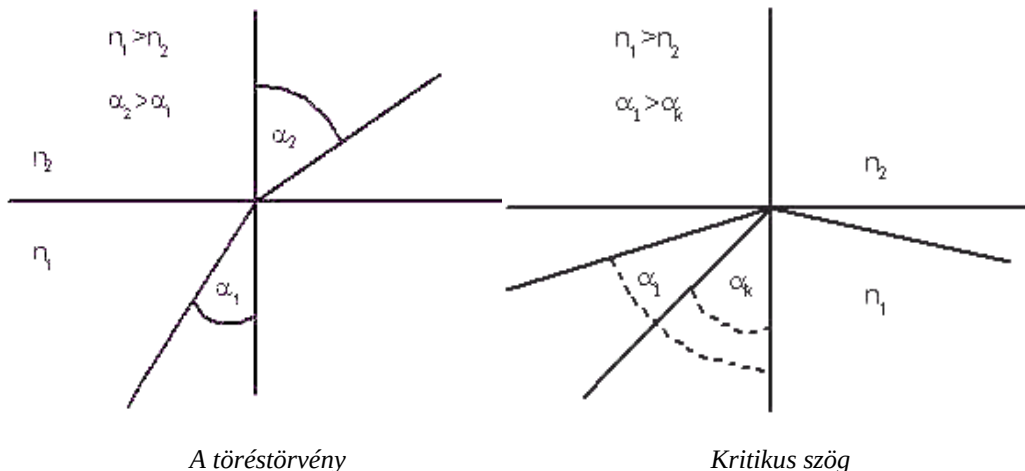
FÉNYTANI ALAPFOGALMAK

A fénytávközlésben **fényadónak** LED-eket és LD lézertiódákat használnak. A LED-eket főleg többmódusú- (MM), a lézereket pedig egymódusú (SM) szálakhoz használják. De a lézerek között is van többmódusú fényt emittáló dióda, amit természetesen többmódusú szálakhoz használnak.

A **fény törése és teljes visszaverődése** a Snellius-Descartes-törvénnyel értelmezhető. Ha a fény ritkább közegből sűrűbb közegbe halad, akkor a beesési merőlegeshez közelebb törik, és fordítva. A beesési és törési szögek között az alábbi összefüggés írható fel:

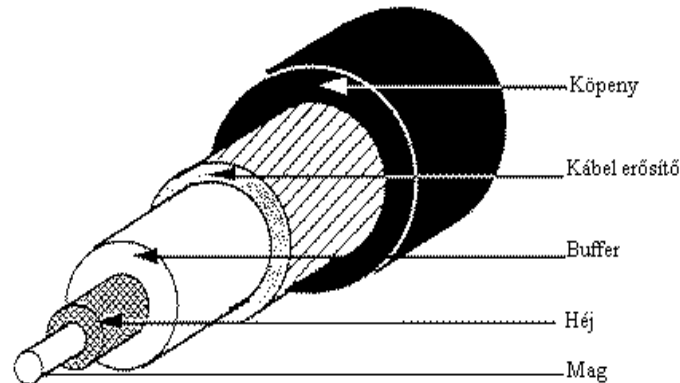
$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1},$$

ahol n_1 és n_2 a közeg törésmutatója, α_1 a beesési szög és α_2 a törési szög. Az optikai szálak törésmutatója 1,4-1,6 érték között változhat. Teljes visszaverődésről akkor beszélünk, ha a fény egy sűrűbb közegből egy ritkább közegbe lépne át, de a beesési szöge nagyobb mint a határszög értéke. A határszög az anyagok törésmutatójától függ. **$\sin \alpha_k = n_1/n_2$** . Ezt a jelenséget használják fel arra, hogy a fényt optikai szálban vezetni lehessen.



Az **optikai szál** a magból, a magot körülvevő optikai árnyékoló közegből és a mechanikai védelmet szolgáló borításból áll. Az **optikai kábel** valamivel bonyolultabb. A magban terjed a fény, a héj feladata, hogy a terjedő fényt a magban tartsa. Ez úgy

valósítható meg, hogy a két anyag törésmutatója különböző, és a teljes visszaverődés törvénye érvényesül.

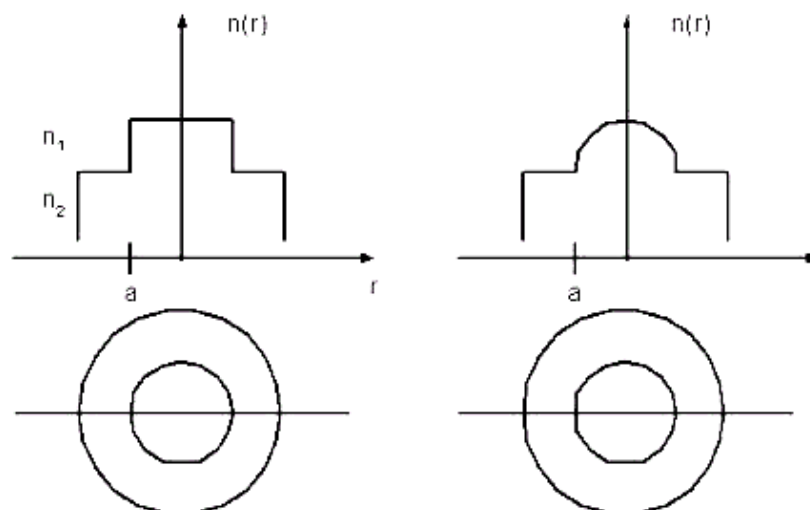


Az optikai kábel szerkezete

AZ OPTIKAI SZÁLAK OSZTÁLYOZÁSA

Az optikai szálakat különböző szempontok alapján csoportosíthatjuk, melyek az adott anyag valamely fizikai tulajdonságát jellemzi.

1. törésmutató profil (index) alapján
 - SI - lépcsős indexű (step index)
 - GRIN - folytonosan változó vagy parabolikus indexű (**graded index**)
2. jeltovábbítás alapján
 - egymódusú vagy monomódusú (**SingleMode**)
 - többmódusú vagy multimódusú (**MultiMode**)

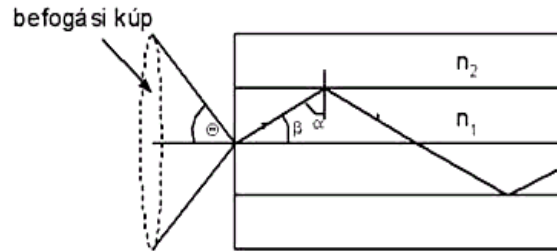


Lépcsős és parabolikus törésmutató profilok

A lépcsős indexű szálak magja és héja két különböző törésmutatójú homogén anyagból készül (a mag törésmutatója n_1 , a héjé n_2). A parabolikus indexű szálak esetében a mag törésmutatója nem állandó, hanem fokozatosan változik.

A FÉNY TERJEDÉSE KÜLÖNBÖZŐ OPTIKAI SZÁLAKBAN

Ahhoz, hogy a fény a fényvezető szálban terjedni tudjon (a totális reflexiónak megfelelően), ezt egy bizonyos szögtartományon belül kell becsatolni. Ezt a szöget akceptancia-szögnek, a szög szinusztát **numerikus apertúrának** nevezzük. $NA = \sin \Theta$



Lépcsős indexű szálban futó meridionális sugarak

A θ az optikai szál befogási kúpjának félszöge, azaz csak a kúpon belül érkező sugarak haladnak a magon belül, a többi átviteli veszteség.

A fényvezető szálakban csak bizonyos hullámhossztartományba eső fényhullámok terjednek, ezeket **módusoknak** nevezzük. Így megkülönböztetünk többmódusú illetve egymódusú szálakat. A **módusszám** a következőképpen számolható: $N = \pi \cdot D \cdot NA / \lambda$ ahol: **D** a magátmérő, **NA** a numerikus apertúra, **λ** pedig a hullámhossz.

A törésmutató index és a mag átmérője meghatározza a szálakon terjedő módusokat. **Egymódusú szál** csak egy adott frekvencián - és annak közvetlen környezetében - képes a fény átvitelére, más frekvenciákon a szál csillapítása igen erős.

A **multimódusú szál** több frekvencián is képes a fény nagyobb távolságra való eljuttatására.

Az optikai szálak gyakorlati megvalósításának szabványai a következők:

- SI szál: SM (egymódusú): 10/125 μm
MM (többmódusú): 50/125 μm
- GRIN szál: MM (többmódusú): 50/125 μm ; 62,5/125 μm

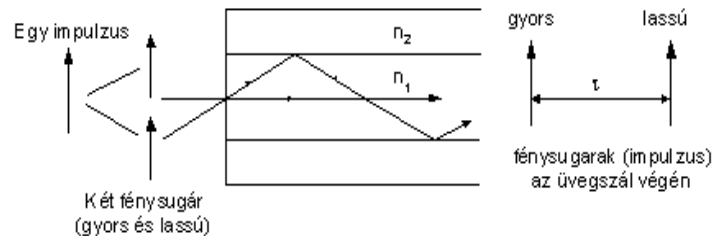
Láthatjuk, a GRIN szálak csak többmódusúak lehetnek. A két számérték a mag és a héj fizikai méretét jelöli.

A következőkben a fent említett háromféle optikai szálban a fény terjedését tanulmányozom, mely meghatározza a felhasználási területeket (a dolgozat végén erre még kitérek).

A **lépcsős indexű (állandó törésmutatójú), többmódusú** szálakban a fény terjedése, a Snellius-Descartes-törvény alapján teljes visszaverődések sorozatával írható le. A magban terjedő módusok száma akár több száz is lehet.

A fent leírtak alapján következik, hogy a fény különböző utakon terjed a mag belsejében. A legrövidebb utat a szál hossz tengelye mentén terjedő fény (a szálba merőlegesen belépő), míg a leghosszabbat az θ szög alatt belépő fénysugár tesz meg.

A következő ábrán egy L hosszúságú szálon történő rövid fényimpulzus átvitele látható. Mivel a fény azonos sebességgel, de különböző hosszúságú utat tesz meg a bemenettől a kimenetig, ezért a fényimpulzus t_1 és t_2 (legrövidebb út, és leghosszabb út) időintervallum között jut a kimenetre. A vett impulzus a különböző késleltetések miatt szélesebb lesz a leadottnál. Ezt a jelenséget nevezzük **módus-diszperzió**nak, amely korlátozza az információátviteli kapacitást. Ennek a futási idő problémájának a megoldására tervezték a változó indexű szálakat.

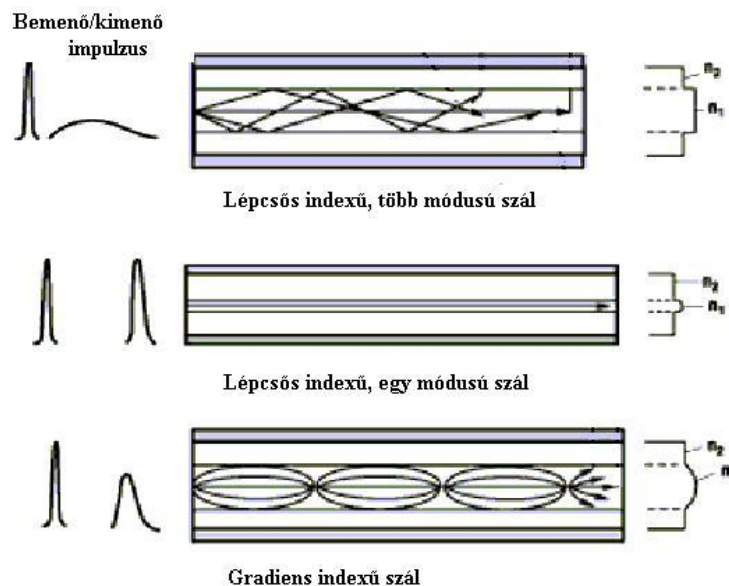


Diszperzió szemléltetése

Egymódusú lépcsős indexű szálakban a rendkívül kicsi (kb. $10 \mu\text{m}$) magátmérő csak egyetlen módus terjedését teszi lehetővé. A problémát az anyagi diszperzió jelenti, ami lényegesen lecsökkenthető lézerek alkalmazásával (LD).

A **változó törésmutatójú szálak** magjában a törésmutató értéke nem állandó, hanem a sugár függvényében változik. Így a fényutak már nem egyenesek, de a változás a hullámhosszhoz viszonyítva nagyon kicsi.

A fénysugarak terjedési ideje független a belépési szögtől és helytől, mert a nagyobb szög alatt belépett sugarak az optikai szál kisebb törésmutatójú tartományában terjednek és ezért nagyobb a sebességük, míg a tengely mentén haladóknak kisebb a sebességük, ezért közel egyidőben érnek célba, csomósodási pontokat létrehozva.



Különböző optikai szálakban terjedő fény módusai

A FÉNYVEZETŐ SZÁLAK CSILLAPÍTÁSA

A fényvezető szálba becsatolt energia nem jelenik meg maradék nélkül a szál végén. Ez a veszteség a csillapítás, amit az alábbi tényezők okozzák :

- Különböző hullámhosszúságú fénysugarak ugyanabban az anyagban különböző sebességgel terjednek, ezért különböző frekvenciájú komponensei más-más mértékben térnek el a beesési iránytól. Ezt a jelenséget nevezzük **diszperzió**nak, szórásnak. A diszperziónak több fajtája is ismeretes, ezek közül az **anyagi diszperzió** (A fényimpulzus frekvencia-összetevői különböző futásidőket mutatnak, ami az impulzus kiszélesedéséhez vezet.), a **módusdiszperzió** és a **hullámvezető-diszperzió** (Az optikai kábel magrésze mellett a magot körülvevő borítás is vezeti a fényt az egymódusú szálak esetében. Zavaró hatása is csak 50-100 km távolság áthidalása után jelentkezik) hatása jelentősebb.
- Ha egy anyagot fénnel megvilágítunk, akkor az anyagban a fény intenzitása exponenciálisan csökken. Ha a fény energiája a megvilágított anyag tiltott energiasávjába esik, akkor az anyag átlátszó. Amennyiben az energia nem esik a tiltott sávba, úgy a fény elnyelődik. Ez az **abszorpció**. Nem egyformán hat az összes fénysugárra, azok elnyelése lesz nagyobb, amelyek hosszabb utat tesznek meg a szálban.
- **Fresnel-reflexió**: A felületre merőlegesen beeső fény sem hatol be teljes mértékben az anyagba, egy kis része visszaverődik. Üvegszál esetén ($n=1.5$) ez a becsatolt fény 4%-át jelenti.

Az optikai szálak a csillapítás terén értek el legnagyobb fejlődést a gyártás során. A kezdeti időben, rendkívül nagy értékű volt, azonban ma már az optikai szálak vesztesége 0,2- 0,3 dB/km. Láthatjuk, hogy az optikai szálak csillapítása több dologból tevődik össze, azonban ezek mind a gyártási folyamat tökéletlenségéből adódnak.

2. FÉNYVEZETŐ SZÁLAK GYÁRTÁSA

A fényvezető szálak többnyire kvarcüvegből készülnek, de lehetnek műanyagból is, sőt műanyaggal bevont üvegszálak is léteznek.

A jelenleg elterjedt szálgyártó módszerek mind **kétlépcsősek**. Először az **előformát** állítják elő, amely 0.5-1 m hosszú és több cm átmérőjű henger. Ebben a hengerben már be van állítva a megkövetelt törésmutató-eloszlás. Ezt az előformát ismét felmelegítve húzzák méretre a szálakat. A szálak átmérője 50-150 μ m között változó érték lehet. Egy ilyen előformából akár 10 km hosszú szál is lehet húzni.

Az előforma előállítására használt egyik módszer az ún. **CVD** (Chemical Vapor Deposition), eljárás – a gőzfázis vegyi lerakódása. A módszer lényege a következő: az alapanyagul szolgáló kvarccsövet egy esztergaszerű gépbe fogják be, majd az egész csövet egy futóláng kb. 1600 °C-ra melegíti fel. A cső egyik végpontjánál oxigént buborékoltatnak át a megfelelő reagenseken, majd ezeket vezetik át a forró kvarccsővön. A cső belső falán a reagenseknek megfelelő összetételű fehér koromréteg rakódik le. A CVD eljárás előnye a nagy tisztaság, hátránya viszont, hogy rövid előforma állítható elő

és a felvitt rétegek száma sem lehet több 50-60-nál. Így a törésmutató-eloszlásban hullámzások jelentkeznek.

Egy másik előforma előállítására szolgáló eljárás, amely kiküszöböli az előző hátrányait, a **PCVD** (plazma indukált CVD) módszer. Ennek segítségével már több ezer réteg vihető fel a cső falára. A csőben, amely csak 1000 °C-ra van felfűtve, egy 8-10 cm/s sebességű plazma mozog. Ennek hatására a bevitt gázok heterogén reakciója jön létre és a cső falán nem korom, hanem már egy réteg adalékolt üveg keletkezik.

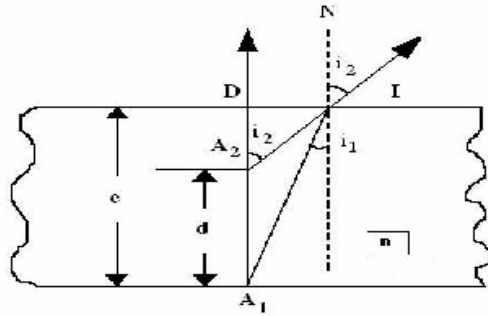
Az előbbiektől eltérő módszer az ún. **OVPO** (Outher Vapor Phase Oxidation) eljárás, - a gőzfázis külső oxidációja. E technika lényege, hogy a törésmutató-eloszláshoz szükséges anyagokat egy égőn keresztül juttatják a hordozó tűskére. A tűske a folyamat közben forog és előre hátra mozog az égő előtt. Itt is fehér koromrétegek rakódnak a tűskére. A kb. 200-250 réteggel igen pontosan beállítható a kívánt törésmutató-eloszlás. Sőt az elkészült forma nagy méretű is lehet, így hosszú szálakat lehet belőle húzni. Hátránya, hogy a tűske helyén lyuk marad, ezért a csövet rúddá kell összeolvasztani.

Egy negyedik előforma előállítási módszer a **VAD** (Vapor Phase Axial Deposition) eljárás, a gőzfázis axiális lerakódása. Az eljárás során a gőzfázisban lévő nyersanyagokat egy oxi-hidrogén égőbe keverik. A lánghidrolízis hatására keletkezett ködöt ráirányítják a kezdő rúd végére, amely egyenletesen forog és emelkedik ahogy az előforma nő rajta. A rúd végén itt is megfelelő összetételű fehér koromréteg rakodik le. A felfelé történő mozgás során a rúd egy gyűrű alakú kályhán megy át, ahol az anyag szinteresedik. E módszer előnye a pontos törésmutató-eloszlás, valamint nem keletkezik lyuk, mint az OVPO eljárásnál.

Ezek után történik **a szál húzása az előformából**. Mégpedig úgy, hogy a húzótorony tetején, az előformát egy kályhába helyezik el, amit 2000 °C-ra hevítenek. A kályha alján a szál átmérőjének megfelelő lyuk van. Ezen a lyukon folyik ki az üveg, amit minden külső erőhatástól mentesen kell hagyni kifolyni, hogy a törésmutató-profil ne változzon. Sőt ügyelni kell arra is, hogy a szál felületére semmi szennyeződés ne kerüljön. A húzási folyamathoz tartozik a szál elsődleges védőréteggel való bevonása is. E réteg felvitele azon a ponton történik, ahol a szál hőmérséklete 500 °C alá csökken. Ekkor a szál egy bevonó műanyagot tartalmazó tégelyen megy keresztül, így egyenletes bevonat képződik. A következő lépés, a bevonat ultraibolya sugárzással történő polimerizációja. Mindezek után a szálakat egy dobra csévélik. Ezzel a módszerrel a szálgyártás sebessége kb. 1-3 m/s.

3. CHAULNES-MÓDSZER A TÖRÉSMUTATÓ MEGHATÁROZÁSÁRA

Ismert jelenség, hogy a síkpárhuzamos optikai lemezen keresztül megfigyelt valós tárgyakról alkotott látszólagos (virtuális) kép helyzete függ a közeg **e** vastagságától és annak **n** törésmutatójától, illetve a megfigyelés szögétől. A fénytörés jelensége segítségével magyarázhatjuk a síkpárhuzamos optikai közegen keresztül (a kábelt egy adott átmérőnél síkpárhuzamos optikai közegnek tekintjük) megfigyelt tárgypontonról alkotott látszólagos képeltolódás értékét (**d**), és a közeg törésmutatójának meghatározására (**n**) az alábbi kifejezést alkalmazhatjuk, ha a beesési merőleges mentén levő kisszögű megfigyelés feltétele teljesül.



$$n = \frac{e}{e - d}$$

Képtolódás szemléltetése síkpárhuzamos optikai közegben

A **kísérleti méréshez** csavarmikrométerrel ellátott **optikai mikroszkópot** és síkpárhuzamos üveglemezt használunk. A mikroszkóp tárgyasztalán üveglemezt helyezünk el, amire rátesszük az előzőleg lepucolt optikai szálát és ennek helyzetét rugós lemezzel rögzítjük. A tárgy pont szerepét játszó apró tárgyról (az üveglemez felületére rajzolt kisméretű tintafolt, vonal stb.) alkotott virtuális képet a mikroszkóppal vizsgálva éleslítésre szabályozzuk. Ehhez a mikroszkópot függőleges mentén elmozdító durva és finomállítást szabályozó csavarokat használjuk. A finomállítást szabályozó csavarmikrométer helyzetéről leolvassuk a fénylő tárgy pont helyzetét megadó **b₀** mikroszkópállást, majd a tanulmányozandó szálát ráhelyezve a tárgypontra, csavarmikrométer segítségével addig mozgatjuk a mikroszkópot amíg az objektívlencse és a tárgy pont közötti távolság újból éleslítást eredményez a mikroszkóp látómezéjében megjelenő képpont számára. Az elmozdulást a csavarmikrométer elforgatásával a teljes körfordulatok száma **N**, illetve a körskála **b₁** beosztási értéke határozza meg. Mivel a csavarmikrométer egyszeri körbeforgatása 0,1 mm elmozdulást eredményez a mikroszkóp és a tárgyasztal között, ezért egy beosztásnyi elforgatáshoz 0,002 mm elmozdulás rendelhető (mivel a körskála 50 beosztást tartalmaz). A **d** képtolódást meghatározhatjuk az alábbi kifejezés segítségével :



$$d = \{N_1 \cdot 0,1 + (b_1 - b_0) \cdot 0,002\}mm$$

A tanulmányozott **optikai szál vastagságának** meghatározása szintén mikroszkóppal történik.. A szál felső felületén levő karcolás tölti be tárgy pont szerepét és a mikroszkóp további emelése folytán határozzuk meg az éleslítésre való szabályozás utáni helyzetét. Legyen **N** fordulat és **b₂** beosztás értékek, amely segítségével valamint a kezdeti mikroszkóphelyzetet jelölő **b₀** segítségével meghatározható a lemez vastagsága:

$$e = \{N_2 \cdot 0,1 + (b_2 - b_0) \cdot 0,002\}mm$$

A mérési adatokat az alábbi táblázatba foglaltam össze, aminek alapján, a kábel törésmutatójának átlagértékének $n=1,515$ értéket kaptam, 0,51 %-os relatív hiba mellett.

e	Δe	d	Δd	n	
0.99	0.0028	0.34	0.0024	1.523076	
0.986	0.0068	0.332	0.0056	1.507645	
0.986	0.0068	0.336	0.0016	1.516923	
0.99	0.0028	0.336	0.0016	1.513761	
1.012	0.0192	0.344	0.0064	1.514970	
0.9928	0.00768	0.3376	0.00352	1.515275	± 0.00881

4. AZ OPTIKAI SZÁLAK ALKALMAZÁSA A MINDENNAPI ÉLETBEN

Az *optikai szálak felhasználásának leggyakoribb módja a digitalizált jelek átvitele*. Ezért főleg a számítógépes hálózatokban, valamint számítógép és a perifériák között találkozhatunk optikai szálak összeköttetéssel.

A távolságtól és az információ minőségétől és mennyiségétől függően választják ki az optikai kábel jellemzőit, hogy az a legeredményesebben lássa el a funkcióit.

Többmódusú, lépcsős indexű szálakat alkalmazták először a gyakorlatban távközlési célokra. A nagy magátmérőben ($D=100-200 \mu m$) több száz módus terjedhet, innen kapta nevét is. Az egyes módusok más-más utat futnak be a szál belsejében. Ennek a következménye a nagy módusszórás, ezért a kimeneten nagy jeltorzulás következik be. Ennek köszönhetően főként kistávolságú összeköttetésekhez használják (pl.: belső hálózatok).

Egymódusú, lépcsős indexű szálakban a kicsi magátmérő miatt csak egyetlen módus terjedhet, ezért ennél a szál típusnál nincs módusszórás. E jellemzőnek következtében a gyakorlatban nagy távolságok áthidalására használják (pl.: helyközi kábel).

A gradiens indexű szálak magjában a törésmutató értéke nem állandó, hanem a sugár függvényében változik, ezzel magyarázható, hogy a különböző szögben beeső fénysugarak közel egy időben érnek célba. Ezáltal a módusdiszperzió lényegesen csökkenthető és az ilyen szál típus jól használható közepes távolságú összeköttetések létesítésére.

Továbbá az optikai kábelek anyaga is szerepet játszik a felhasználási területekben. Azon optikai kábelek elterjedése figyelhető meg, melyek magja és a burkolorétegei műanyagból (poliméerekből) készültek. Ennek fő oka az alacsonyabb előállítási költség és azon tulajdonságuk, hogy kisebb hajlítási sugarat engednek meg. (Annak a körívnek a sugara, melynek mentén az optikai szál vagy kábel még a megtörés vagy a nagyobb csillapítás veszélye nélkül hajlítható. Ha a szál at ennél kisebb sugarú ívben hajlítjuk, nem garantálhatók a szálra meghatározott átviteli paraméterek.)

BIBLIOGRÁFIA

1. Szász Ágota: A fényre szabott fizika, I. fokozati dolgozat
2. Kovács Kálmán: Optika. Egyetemi jegyzet
3. Vastagh György: Kísérlet, labor, Firka
4. <http://www.mozaik.info.hu/MozaWEB/Feny>
5. http://www.bjkmf.hu/bszemle/11_4szam.html
6. <http://www.szulocsatorna.hu/iskola>
7. <http://www.phys.virginia.edu/>
8. Budó Ágoston: Kísérleti fizika
9. dr. Bartolits István: Optikai kábel alapfogalmak

Veres Orsolya
Bolyai Farkas Elméleti Líceum
XI. I osztály
irányító tanár: Szász Ágota
2004