

# Fényvezető szálak és optikai kábelek

## Fizikai alapok

A fénytávközlés alapvető passzív elemei.

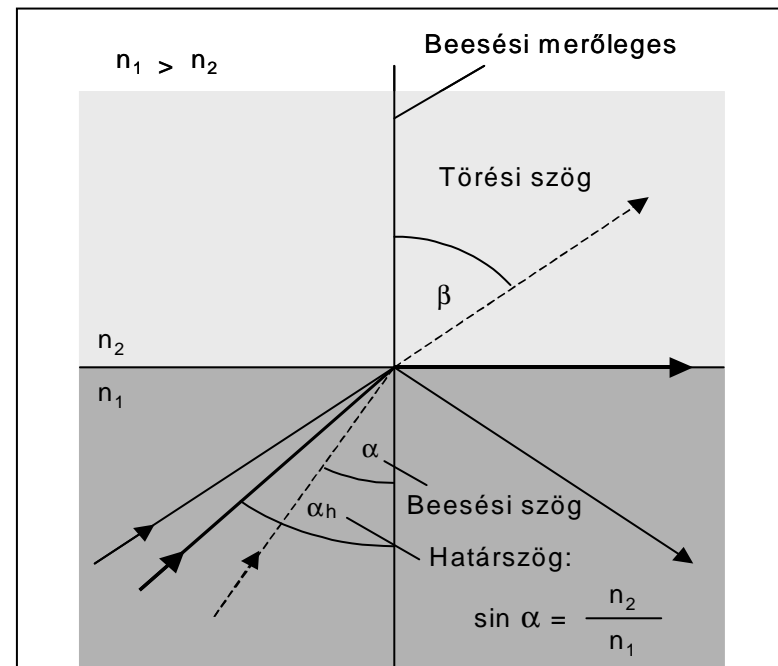
Ötlet: 1880-as években Alexander Graham Bell.

Optikai szálak felhasználásának kezdete: 1960-as évek.

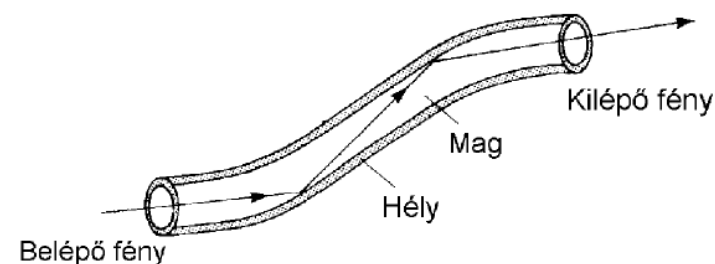
Áttörés az 1970-es években: 20 dB/km-nél kisebb veszteségű fényvezető szál megvalósítása.

*Fizikai alap:* a teljes visszaverődés. Egy határszög felett a nagyobb törésmutatójú közegből a kisebb törésmutatójú közegbe a fény nem tud kilépni, így teljes visszaverődést szenved.

A fényvezető szálban a belső mag törésmutatója nagyobb, mint a külső héj anyagának törésmutatója, ez biztosítja a szál tengelyével közel párhuzamosan haladó fénysugarak vezetését.



Fénytörés és teljes visszaverődés



A fény terjedése optikai szálban.

## Határszög, akceptanciaszög

A határszög a Snellius-Descartes törési törvényből könnyen meghatározható:

$$\sin\alpha/\sin\beta=n_2/n_1$$

A teljes visszaverődés határán:

$$\sin\beta=\sin 90^\circ=1=n_1\sin\alpha_h/n_2$$

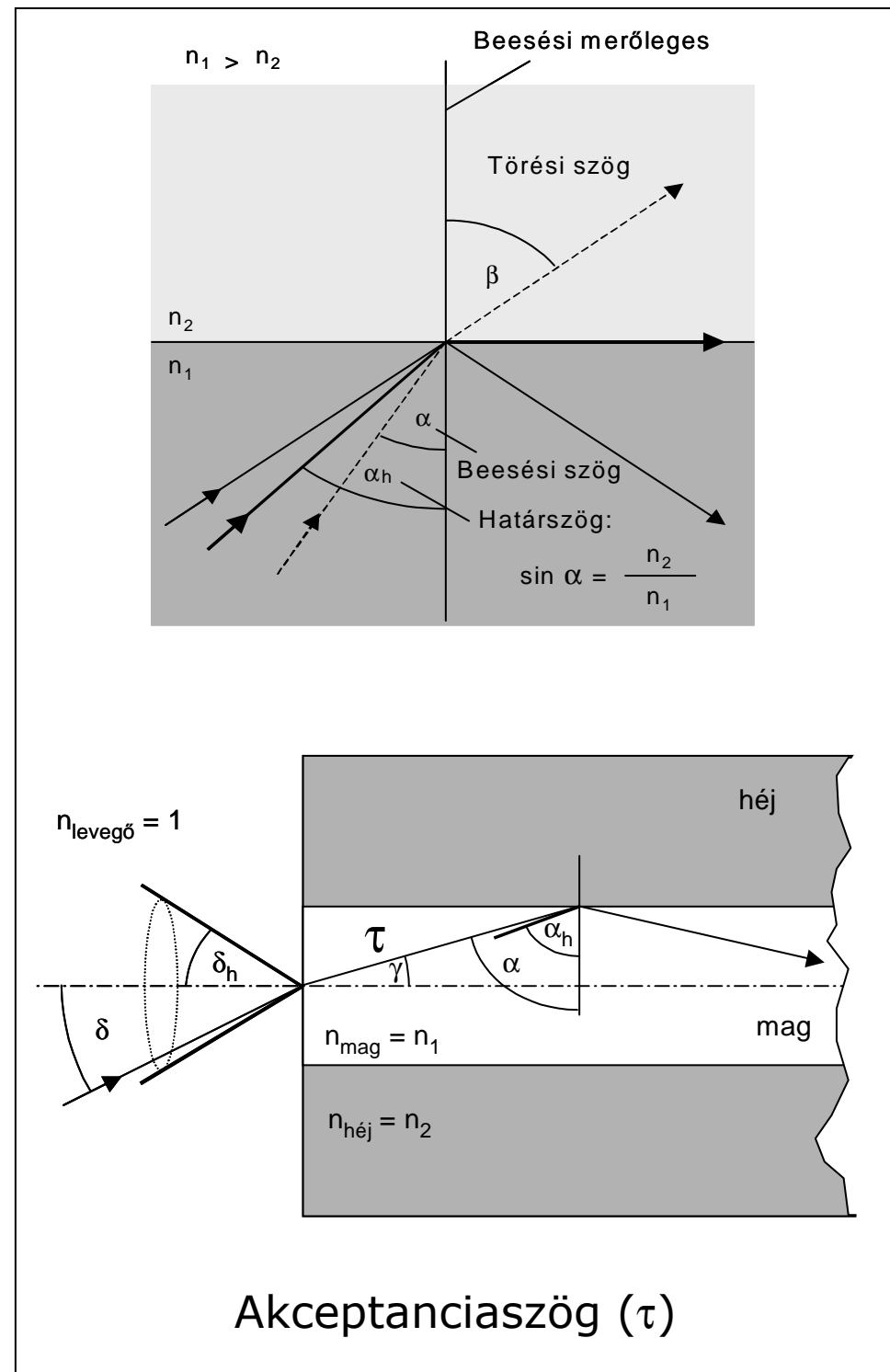
Innen a határszög:

$$\alpha_h=\arcsin(n_2/n_1)$$

A szokásos szálak esetén a mag/héj határfelületen a törésmutató relatív változása általában  $(n_1-n_2)/n_1=\Delta<0,01$ .

Kvarcüveg törésmutatója a szokásos hullámhossztartományban kb. 1,5.

$\Delta=0,01$  és  $n_1=1,5$  esetén a mag/héj határfelületen a teljes visszaverődés határszöge  $\alpha_h=81,9^\circ$ , azaz a szál tengelyével  $90^\circ-\alpha_h=8,1^\circ$ -nál kisebb szöget (akceptanciaszög) bezáró sugarakat vezet a szál.



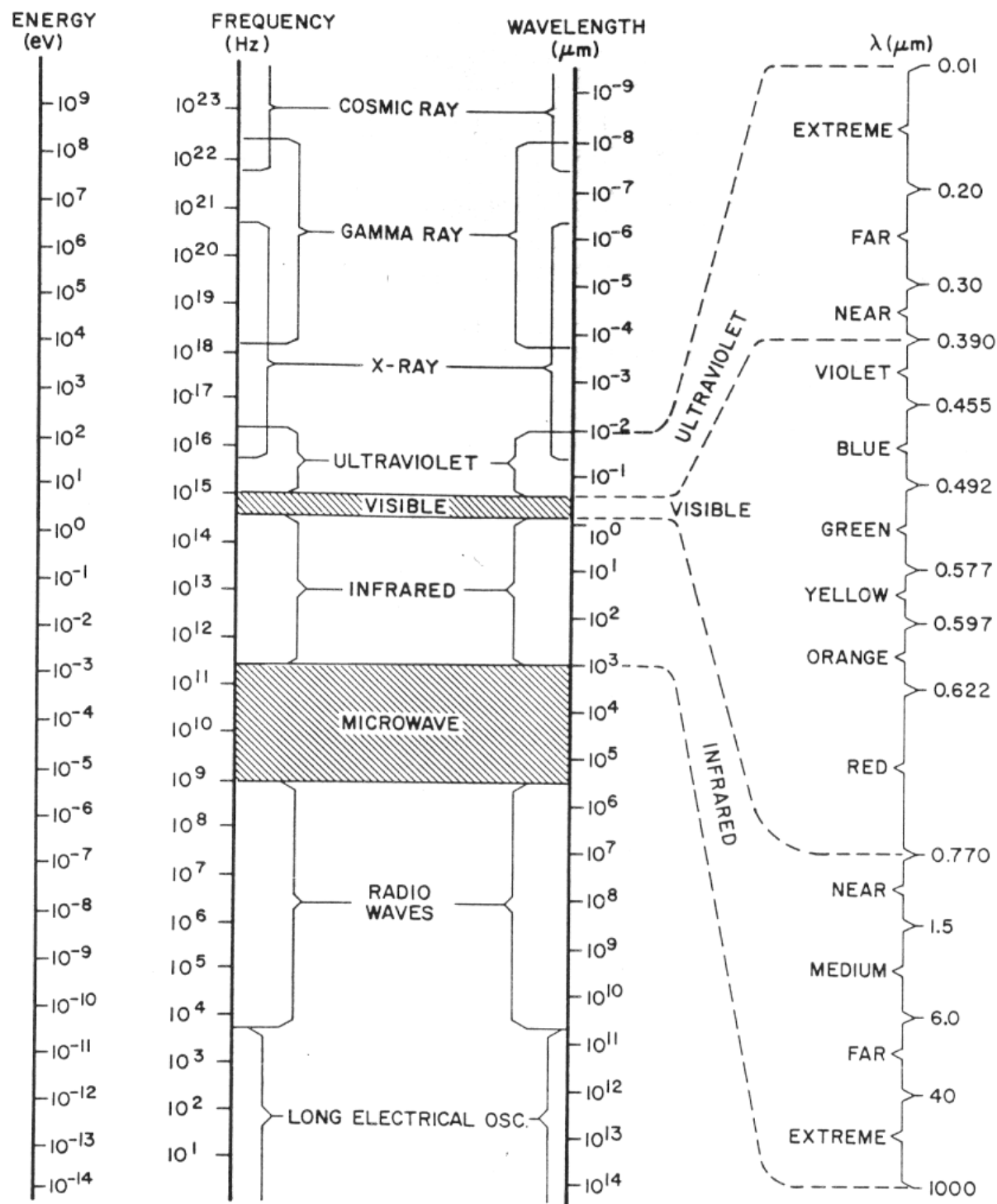
## Az elektromágneses spektrum

A látható fény kb. egy oktávot ölel fel (kétszeres frekvencia a tartomány felső szélén, mint az alsón).

A hullámhossz és a foton energiája közötti összefüggés:

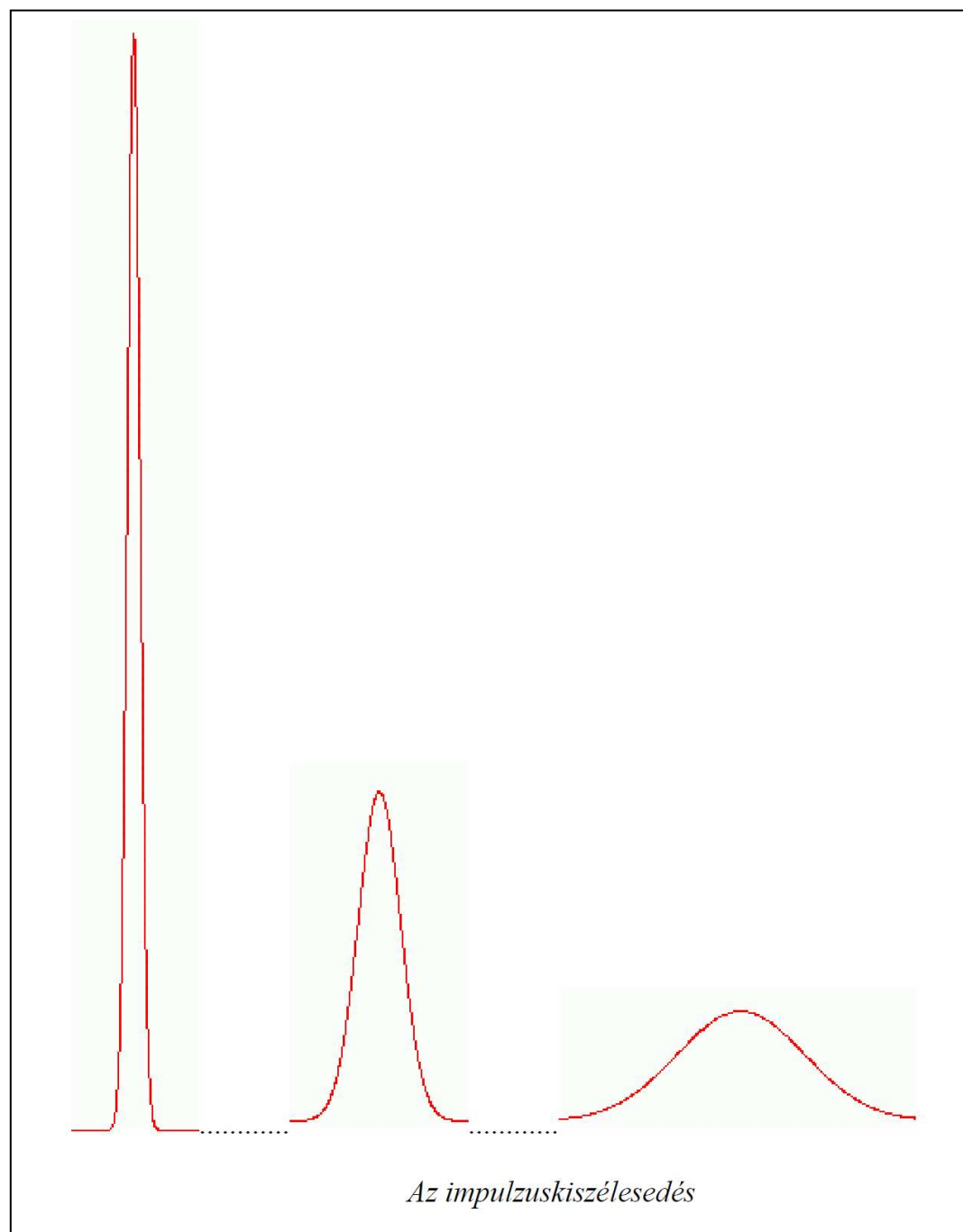
$$\lambda = c/v = hc/h\nu = 1,24/h\nu$$

ahol  $\lambda$  a hullámhossz,  $c$  a fénysebesség,  $h$  a Planck állandó, értéke  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js. A foton energiáját eV-ban kell behelyettesíteni, a hullámhosszat  $\mu\text{m}$ -ben kapjuk.



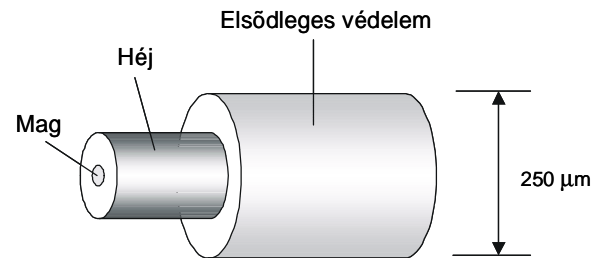
## *Diszperzió*

A fény terjedési sebessége az anyagban függ a hullámhossztól. Ez a fényimpulzusok kiszélesedését és amplitúdójuk csökkenését eredményezi: ha nincsenek veszteségek, az impulzushoz tartozó energia (a görbe alatti terület) állandó.



## Felépítés

Felépítés: mag, héj, védőréteg. A mag törésmutatója nagyobb, mint az azt körülvevő héjé. A héjat védőréteg veszi körül, melynek szerepe a szál mechanikai védelme.



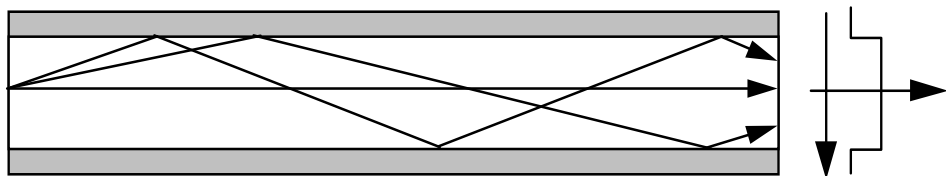
## Az optikai szál kialakítása

A mag anyaga kvarc vagy többkomponensű üveg, a héj anyaga kvarc, többkomponensű üveg, vagy műanyag.

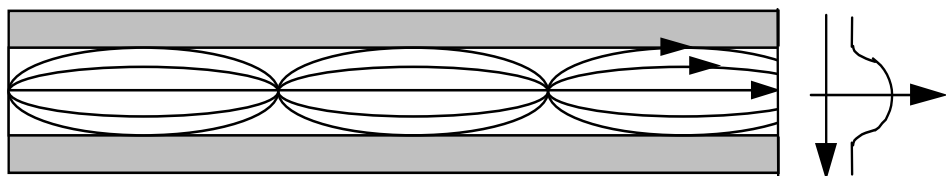
A gyakorlatban háromféle típusú (egymódusú lépcsős törésmutatójú, többmódusú lépcsős törésmutatójú, és fokozatosan változó törésmutatójú, más néven gradiens indexű) fényvezető szálak terjedtek el.

## Fényvezető száltípusok

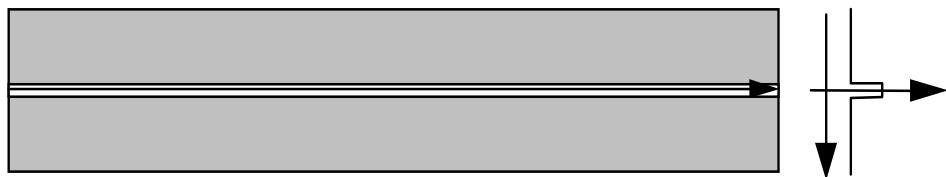
A magátmérő ( $d_m$ ) és a hullámhossz ( $\lambda$ ) viszonyától függően egy- vagy többmódusú terjedés lehetséges. Ha  $d_m/\lambda$  elegendően kicsi ( $<10$ ), akkor csak egy módus terjedhet.



A többmódusú lépcsős indexű szálak magátmérője 50-200  $\mu\text{m}$ , a héj átmérője 125-400  $\mu\text{m}$ .



A többmódusú gradiens indexű szálak magátmérője 50  $\mu\text{m}$ , a héj pedig 125  $\mu\text{m}$ , ezen két méret nemzetközi szabványos méret.



Az egymódusú lépcsős törésmutatójú szálak magátmérője néhány (1-10)  $\mu\text{m}$ , a terjedő fény hullámhosszával azonos nagyságrendű, a héj átmérője 100-150  $\mu\text{m}$ .

Fényvezető száltípusok

## Csillapítás

A fényvezetőszálak alapvető minőségi jellemzője a veszteség, illetve az egységnyi szálhosszra eső csillapítás. Az optikai szálban a fényteljesítmény csillapítására érvényes az alábbi összefüggés:

$$dP/dx = -\alpha P$$

itt  $\alpha$  a csillapítási tényező, és  $P$  az optikai teljesítmény.

Ha egy  $L$  hosszúságú szál be- és kimenetén a fényteljesítmény  $P_{in}$  és  $P_{out}$ , akkor

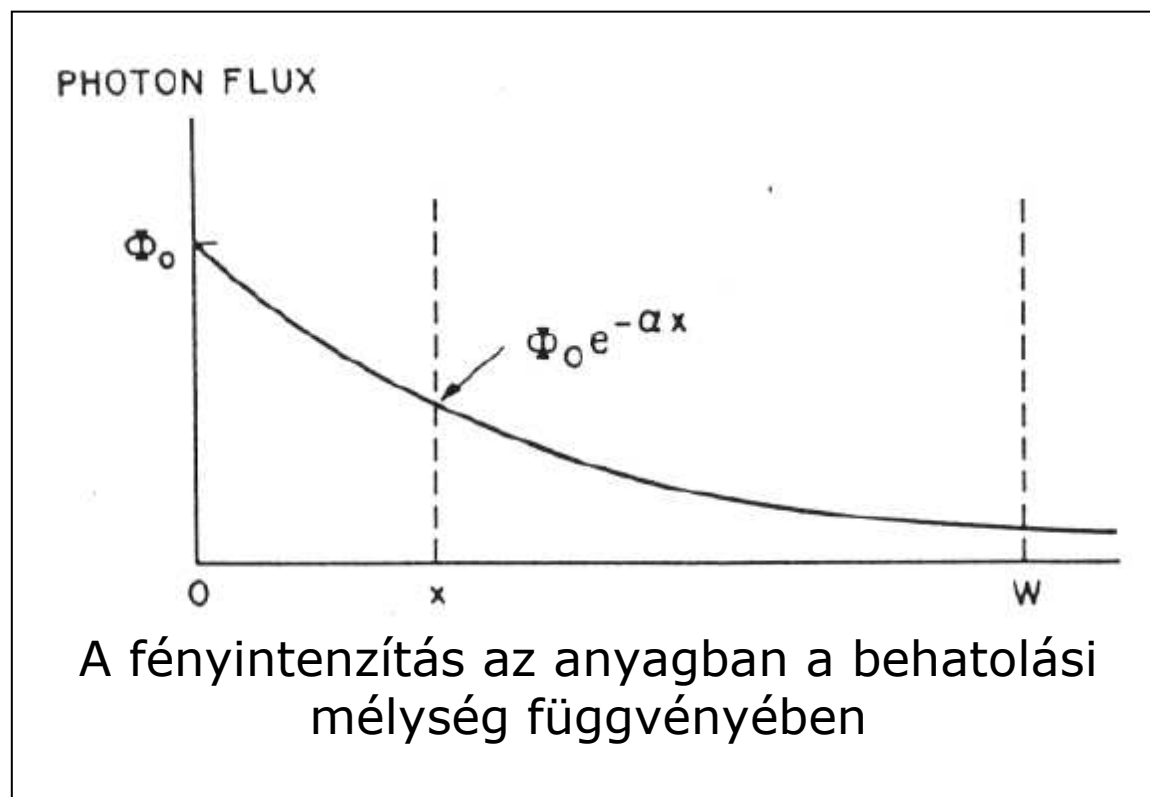
$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L)$$

Az  $\alpha$  szokásos mértékegysége dB/km, és

$$\alpha[\text{dB/km}] = -(10/L) \lg(P_{out}/P_{in})$$

és

$$\alpha[\text{dB/km}] = -(4,343/L) \ln(P_{out}/P_{in})$$



## A csillapítás hullámhosszfüggése

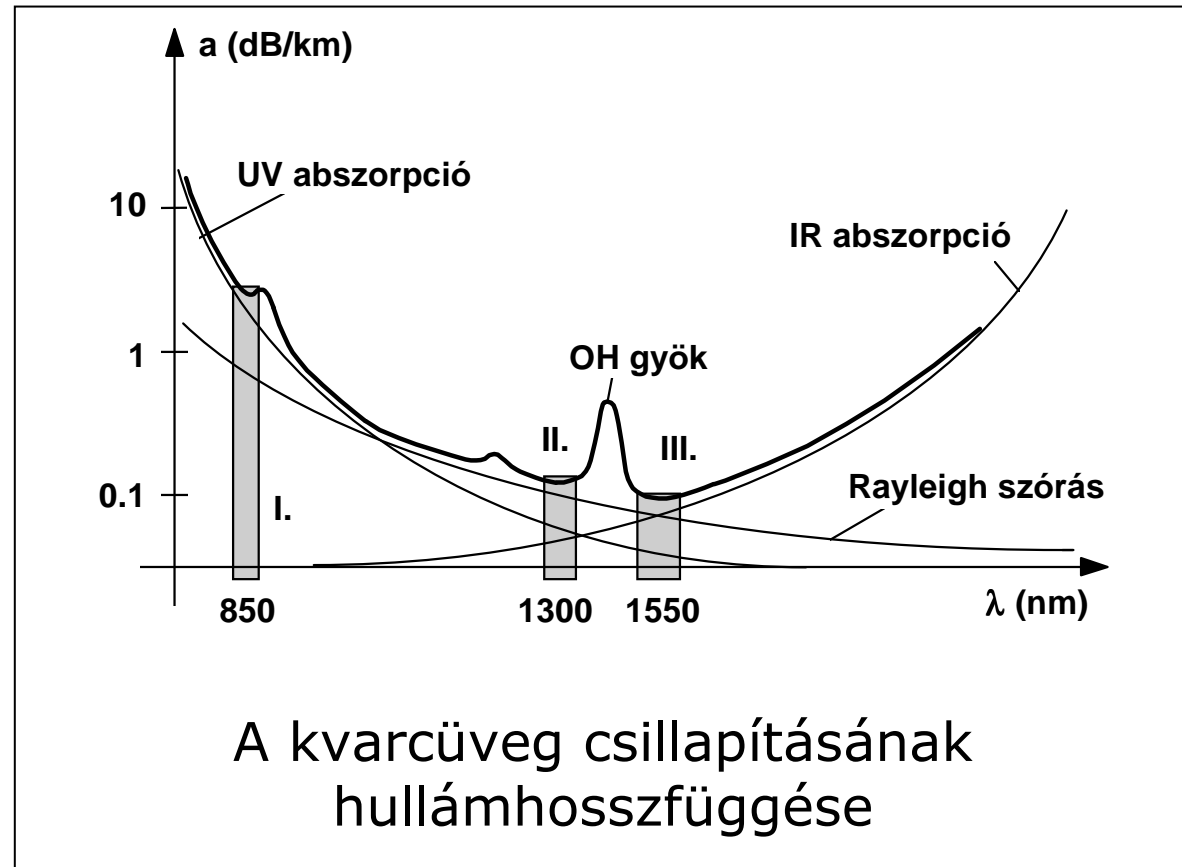
A kvarcüveg szálakban a csillapítás értéke igen erősen függ a hullámhossztól.

A látható spektrális tartományban a veszteség meghaladja az 5 dB/km-t.

Az első optikai ablakban ( $\sim 0,85 \mu\text{m}$ , első generációs optikai szálak) a csillapítás 2-3,5 dB/km.

A második optikai ablakban (lokális minimum  $\sim 1,3 \mu\text{m}$  hullámhossznál - közeli infravörös tartomány, második generációs optikai szálak), a csillapítás többmódusú szálban 0,6 dB/km, egymódusú szálban 0,4 dB/km. A diszperzióknak is minimuma van ezen hullámhossz környékén, így ezt az ablakot gyakran használják távközlési rendszerekben.

A veszteségi tényező abszolút minimuma  $\sim 1,55 \mu\text{m}$  hullámhossznál van (harmadik optikai ablak, harmadik generációs szálak). Itt a szálveszteség átlagosan 0,25 dB/km, az abszolút minimum 0,16 dB/km.





## **Fényforrások és érzékelők**

A fényforrás az első optikai ablakban AlGaAs vagy GaAs lézer-vagy világítódióda (LED). A detektor Si PIN- vagy lavina-fotódióda.

A második optikai ablakban a fényforrás InGaAsP/InP szerkezeten alapuló lézerdióda. A detektor InGaAs pin- vagy lavina-fotodióda.

A harmadik optikai ablakban a fényforrás InGaAsP/InP lézer, és az  $1,3 \mu\text{m}$  hullámhosszon működő detektorok változatlanul itt is használhatók.

### *Átviteli sebesség*

A legkisebb információsebesség a többmódusú lépcsős indexű szálak sajátja, kedvezőbb a helyzet a többmódusú gradiens indexű szálaknál. A legkedvezőbb átviteli tulajdonságokkal az egymódusú lépcsős indexű szálak rendelkeznek.

## **Kötések, csatlakozók, kábelek**

Az optikai szálakból kialakított kábeleket a szokásos technológiával lehet fektetni. Az ilyen kábeleken folyó információátvitelt nem zavarja sem az interferencia, sem a földhurok, sem más kábelek közelsége. Külön előnyük, hogy kicsi a tömegük és méretük, emiatt a meglévő rendszerekbe pótlólagosan is be lehet építeni őket. Természetesen ekkor az elektromos/optikai és optikai/elektromos átalakítók az optikai kábelszerelvény integráns részei. Gondot okozhatnak a rezgések, valamint a deformációkkal szembeni kisebb ellenállóképesség. Az előbbi főleg a nagyvárosi környezetbe telepített rendszerekben jelent kockázati tényezőt.

Megoldott az optikai szálak szerelése. Kötések készíthetők a szálak megfelelő pozicionálása és előkészítése után hidrogénlángos hegesztéssel. A beiktatási csillapítás  $\sim 0,1$  dB. Az oldható kötésekhez megfelelő csatlakozók állnak rendelkezésre. Ezek finommechanikai csúcstermékek, meghatározott számú (nem túl sok) oldásra és kötésre garantált átviteli paraméterekkel. A beiktatási csillapítás általában  $\sim 0,5$  dB. Gyors becslésre alkalmazható az alábbi ökölszabály: egy 1 km-es szál, egy hegesztett kötés és egy csatlakozás átviteli veszteségei nagyjából azonosak.

Bonyolultabb "csatlakozó elemek" mint pl. elágazások, iránycsatolók szintén rendelkezésre állnak.

## **Előnyök, hátrányok**

### *Előnyök:*

1. Nagyon kicsi a veszteség, a minimális érték  $\sim 0,15$  dB/km, ez 100-200 km ismétlődő nélküli átviteli távolságot tesz lehetővé (koaxiális kábelnél ez csak néhány km).
2. Igen nagy sáv szélesség, pl. gradiens indexű többmódusú szálaknál a BxL (sáv szélesség és átviteli távolság szorzata) értéke  $\sim 1$  GHzkm, egymódusú szálaknál  $\sim 100$  GHzkm (koaxiális kábelnél  $\sim 20$  MHzkm).
3. Kis méret, kis súly, nagyfokú flexibilitás.
4. Nem érzékenyek elektromágneses interferenciára, földhurkok nem zavarják, nagy zajvédelem.
5. Viszonylag egyszerű anyagokból készíthetők, üveg (elemi összetétele szilícium, germánium, foszfor, bor), kvarc.
6. Egymáshoz közelfekvő vonalak között nincs áthallás.
7. A szál anyagának Young modulusa nagyobb, mint a rézé.

### *Hátrányok:*

1. A rugalmas határ fölött az üveg törik.
2. Nem ismeretes még a deformációkkal szembeni hosszúidejű stabilitás mértéke.
3. Csatlakozóelemek és egyéb szerelvények drágák.

## **Ellenőrző kérdések**

- 1., Mi tette lehetővé az 1970-es években az optikai távközlés megvalósulását?
- 2., Milyen fizikai mechanizmuson alapszik a fényvezető szálak működése?
- 3., Hány rétegből épülnek fel a fényvezető szálak?
- 4., Hogy viszonyulnak egymáshoz a törésmutatók a különböző rétegekben?
- 5., Hogy viszonyul egymáshoz a határszög és az akceptanciaszög?
- 6., Mekkora hullámhossz tartományt ölel föl a látható fény?
- 7., Milyen arányosság áll fenn a foton energiája és hullámhossza között?
- 8., Miért szélesedik ki az optikai szálban terjedő fényimpulzus?
- 9., Mi okozza a fényimpulzus amplitúdójának a csökkenését?
- 10., Mi a mag és a héj anyaga?
- 11., Milyen típusú fényvezető szálak vannak?
- 12., Hogy függ a jel teljesítménye (intenzitása) az átviteli távolságtól?
- 13., Mi a csillapítási tényező definíciója?
- 14., Milyen jellegű a csillapítási tényező hullámhosszfüggése kvarcüvegben?
- 15., Milyen hullámhossztartományban használják az optikai szálakat?
- 16., Hány optikai ablakot használnak?
- 17., Miért pont az optikai ablakokban történik a jelátvitel?
- 18., Milyen fényforrásokat és érzékelőket használnak az optikai jelátvitelnél?
- 19., Hogyan köthetők össze az optikai szálak?
- 20., Milyen előnyökkel bírnak az optikai kábelek az elektromos kábelekkel szemben?

21., Mik a hátrányai az optikai kábeleknek az elektromos kábelekkel szemben?

22., Mi a diszperzió?