

# Optikai hálózatok elemei

(BMEVIHVMA05)

Bevezetés

2015.02.09.



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



2

## A tárgy felépítése

Tárgyfelelős oktató: dr Gerhátné Udvary Eszter, docens

Szoba: V1 214, labor: V1 213, [udvary@mht.bme.hu](mailto:udvary@mht.bme.hu)

Társelőadó: Dr Berceli Tibor, egyetemi magántanár

Szoba: V1 209, labor: V1 213, [berceli@mht.bme.hu](mailto:berceli@mht.bme.hu)

Gyakorlat-vezetők: Cseh Tamás, doktorandusz, szoba: V1 213

Fekete Gábor, doktorandusz, szoba: V1 213

A félév menete

- Előadások (hétfő 12:15-13:45 – szünet legyen?)
- Gyakorlat (páros hét kedd 14:15-16:00)
  - Üvegszál, kábelek, csatlakozók vizsgálata
  - Csatlakozó szerelés
  - Laborbemutató & műszerbemutató
  - Gyakorlati példák

## A tárgy menete

- Követelmények
  - Aláírás
    - két kiadott házi feladat elégséges szintű teljesítése
    - pótlási lehetőség: házi feladat utólagos beadása a pótlási héten
  - Vizsga
    - szóbeli, tételsor alapján

## A tárgy helye a képzésben

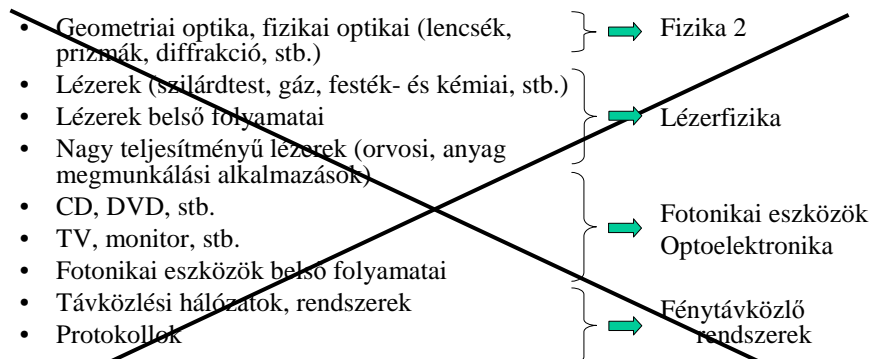
- Kapcsolódó tárgyak
  - Régi MSc mellékszakirány tárgyhármas / kötelezően választható tárgyak
    - Fénytvádközlő eszközök
    - Fénytvádközlő rendszerek
    - A kábeltelevízió rendszertechnikája és elektronikája
  - Optikai hálózatok, új MSc mellékspecializáció
    - Optikai hálózatok elemei
    - Fénytvádközlő rendszerek és alkalmazások
    - Optikai hálózati architektúrák
    - Optikai hálózatok laboratórium
  - Az optikai hálózatok alapjai (szabadon választható)
- Információs oldal: [www.mht.bme.hu](http://www.mht.bme.hu) => oktatás => ???

## A tárgy motivációja

- Az optikai távközlés és az optikai hálózatok legfontosabb eszközeinek (távközlési szempontjából jelentős) tulajdonságainak megismerése, kapcsolódó tervezési, megvalósítási és mérési eljárások áttekintése
- Miért fontos?
  - Optikai távközlés elemeinek fejlődése a hálózat fejlődésére is kihat
  - Új optikai elemek kifejlesztésére van szükség
- A tárgy célja:
  - Az optikai hálózatokban jelenleg használt ( vagy a közeljövőben várhatóan használatba kerülő) elemek, eszközök bemutatása
- Szoros kapcsolat a Fénytvközlő rendszerek és alkalmazások tárggyal

## Amiről nem lesz szó...

- Távközlésben használt eszközökre fókuszálunk

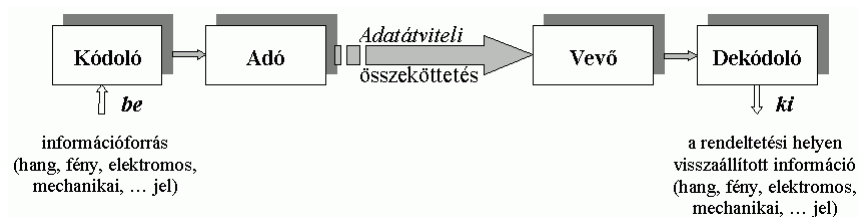


## Bevezetés

Alkalmazási területek

## Fénytvközlés / optikai távközlés

- Fényt használ információ továbbításra (lightwave technology)
- Általában fényvezető szálon/üvegszálon (fiber optic technology)
- Általában nem látható fény
- Eredetileg hang nagy távolságú átvitelére használták (telefon hálózatok)
- Jelenleg adatátvitel (számítógép, műhold, elektromos eszközök, LAN, stb)
- ***A legárhatókonyabb módszer nagy mennyiségű információ gyors és megbízható továbbítására***

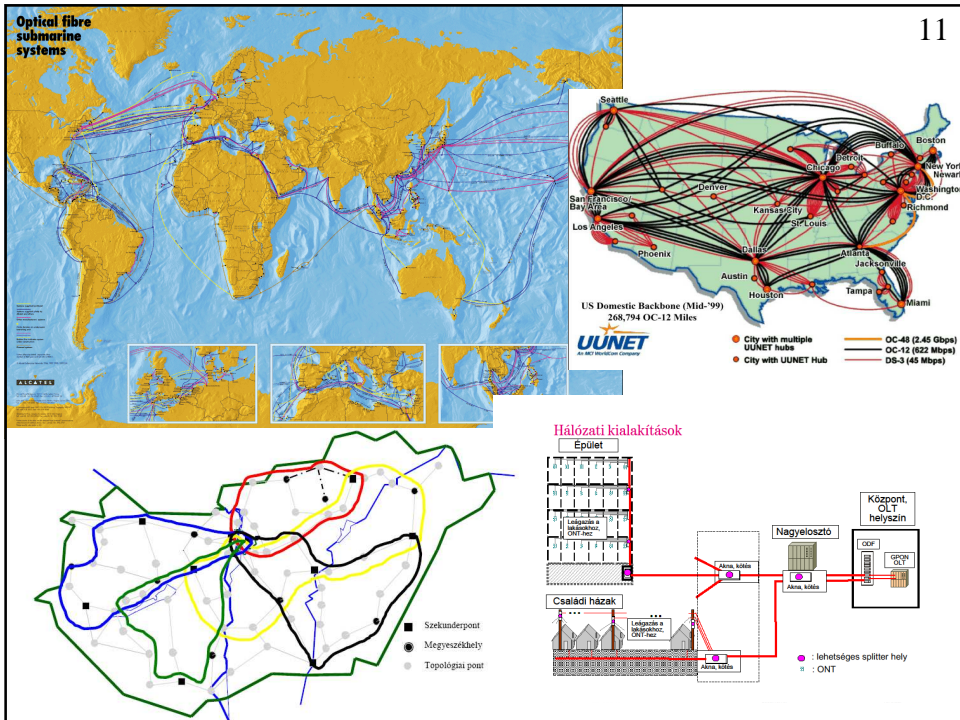


## Miért optikai átvitel?

- Nagy átviteli sávszélesség és alacsony csillapítás
  - 10 Gbit/s, 100 km összeköttetés (egymódusú szál, egy hullámhossz, erősítő nélkül)
  - > 200 Gbit/s, több hullámhossz => több csatorna
  - 10 Gbit/s, > 20000 km, optikai erősítővel
- Kis méret és kis súly
- Érzéketlen az elektromágneses interferenciára
  - Adatbiztonság
  - Zavarvédetség

## Hol? – Mindenhol ☺

- Nagy távolságú távközlés
  - Teljes összeköttetés hossza:  $n \cdot 1000$  km
  - Legigényesebb
  - *submarine, longhaul*
- Rövid távolságú adatátvitel (1 m - 500 m)
  - A legolcsóbb megoldásra törekszünk
  - *premises network, LAN, backbone, FDDI* (100 Mb/s sebességű, korai adat interface), *Gigabit-Ethernet* (1.25 Gb/s sebességű számítógép interface protokoll), *Fibre Channel* (1.06 Gb/s sebességű, számítógép I/O összekapcsolódási protokoll)
- Előfizetői hálózat (1 km - 20 km)
  - Ár-érzékeny, kisebb technológiai követelmények
  - *local exchange, regional interexchange, MAN, FTTC, FTTH*
- Kábeltelevízió (városi elosztóhálózat)
  - Analóg hálózat
  - *head end, star coupler, subcarrier*



## Gyakorlati rendszerek - történelem

- 1976: Első telepített rendszer (Chicago)
- 1980-as évek eleje: fontosabb városokat már üvegszál köti össze
- 1980-as évek közepe: nagy távolságú távközlésben leváltja a rézvezetékeket
- 1990-es évek: CATV alkalmazás (nő a megbízhatóság, telefon és internet szolgáltatás azonos közegen)
- 2000: számítógép hálózatoknál való alkalmazás (internet)
- További alkalmazások: repülőgépek, hajók, autók adatbusz

Jelenleg: domináns a kommunikációs rendszerekben, egyre közelebb a felhasználókhöz

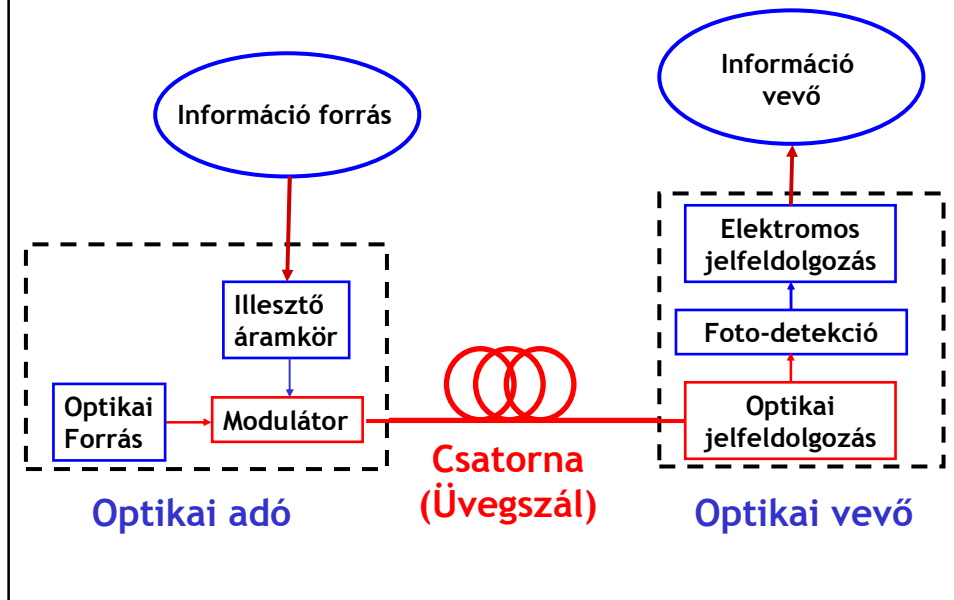
## Optikai összeköttetés (egyszerűsített) blokkvázlata



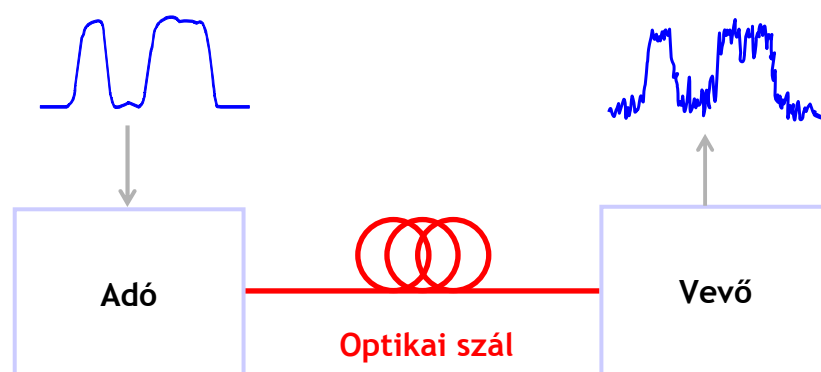
Fény (valamely tulajdonsága arányos az átvinni kívánt információval)

- Adó: fényforrás, E/O átalakítás
- Vevő: O/E átalakítás
- Átviteli közeg: üvegszál, optikai hálózat, aktív és passzív optikai eszközök

## Optikai összeköttetés főbb elemei



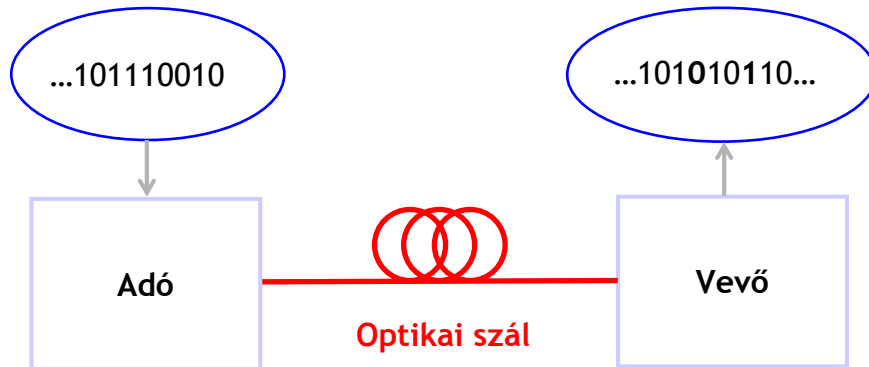
## Analóg optikai összeköttetés



- információ: analóg hullámforma
  - A világ analóg, analóg technológia régi és jól ismert, nem drága
  - Analóg jel a torzításra érzékeny => alakhű átvitel

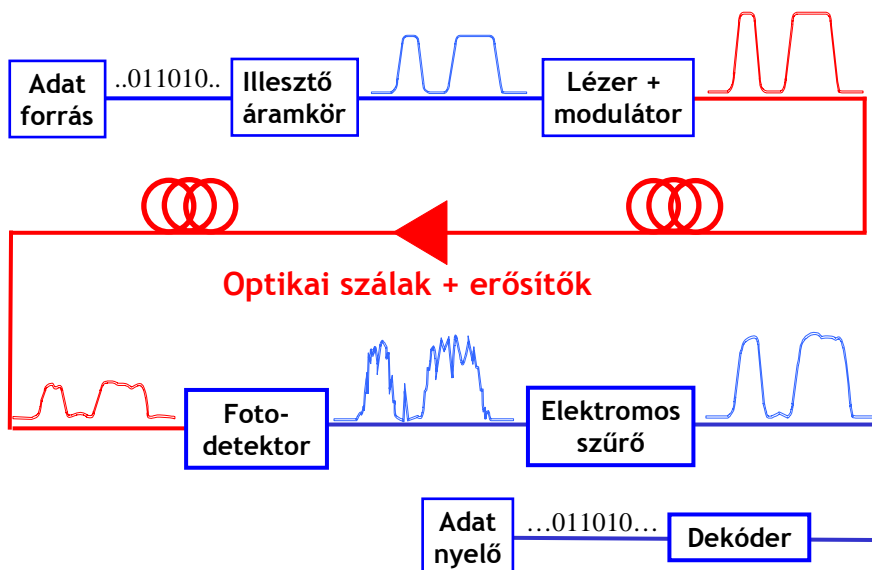


## Digitális optikai összeköttetés



- információ: digitális (bináris) jel (bitek)
  - Nem szükséges alakhű átvitel
  - olcsóbb, tömöríthetőbb, érzéketlenebb
  - Cél: Bit Error Rate (BER) elegendően alacsony legyen

## Optikai összeköttetés





## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVA05)

### Optikai átviteli közeg

2015.02.09.

Gerhátné Dr. Udvary Eszter

udvary@mht.bme.hu



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



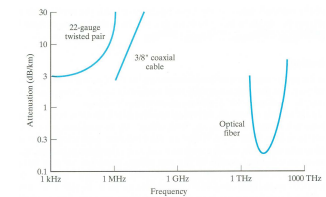
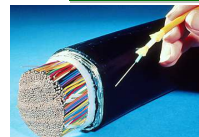
## Optikai összeköttetés (egyszerűsített) blokkvázlata



## Üvegszál tulajdonságai

- SiO<sub>2</sub>
- Kis átmérő
- Kis súly
- Kis csillapítás
- Nagy sáv szélesség
- Nagy mennyiség áll rendelkezésre, olcsó
- Nincs elektromágneses zavar, biztonság
- Földfüggetlen, szigetelt átvitel  
(nincs földhurok, földpotenciál, drift probléma)
- Könnyű kezelhetőség
- Nagy távolság
- Nagy kapacitás

## Átviteli közegek összehasonlítása



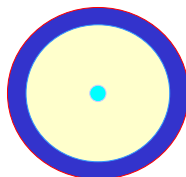
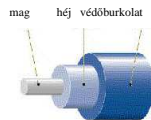
62 mm  
448 réz pár  
5500 kg/km

21 mm  
648 üvegszál  
363 kg/km

	Optikai szál	Koax (RG-19/U)
Csillapítás	0.3dB/km (kb. 7%/km)	22.6dB/km@100MHz (kb.99.5%/km)
súly	6kg/km (2.5mm kábelátmérő)	1110kg/km (d=28.4mm)

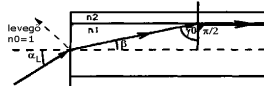
## Fényvezető szál felépítése

- Mag
  - adalékolt üveg
  - $n_1 \cong 1.5$
- Héj
  - Üveg
  - $n_1 > n_2$
- Védőburkolat
  - elsődleges védelem
  - műanyag



## Fényvezetés elmélete

- Sugároptika: Teljes reflexió a mag és héj határán  
Akkor ad pontos leírást, ha a szál méretei nagyobbak a fény hullámhossznál (MM szálak esete)



Numerikus apertúra:

$$NA = \sin \alpha_L = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx \sqrt{2n_1 \Delta n}$$

- $\alpha_L$  határszögnél, kisebb szögben érkező sugarak ( $\alpha < \alpha_L$ ) a mag és a héj határfelületén teljes visszaverődnek, ez biztosítja a fényvezetést
- Hullámoptika: a fényt elektromágneses hullámnak tekinti, és a Maxwell egyenleteket alkalmazza a vezetés feltételeinek meghatározására

### Fényvezetés - sugároptika

7

ha  $\theta_i < \text{határszög} \Rightarrow$  a sugár részben törlik részben reflektálódik a jel elszivárog (Leaky Mode)

ha  $\theta_i > \text{határszög} \Rightarrow$  teljes reflexió vezetett jel

### Fényvezetés - hullámoptika

8

Maxwell egyenletek alapján  
véges számú vezetett módus  
végtelen számú szivárgó módus

Szivárgó módusok                      Vezetett módusok

### Fényvezető szál

9

egymódusú

- mag  $< 10\lambda$
- mag átmérője=9 (8.3-10)  $\mu\text{m}$
- héj átmérője=125 $\mu\text{m}$
- SI

Többmódusú (rövid távolságra)

- mag = 50, 62.5, 100 $\mu\text{m}$
- héj átmérője=125 $\mu\text{m}$
- SI és GI

### Minőségrontó hatások

10

Bemenet

Csillapítás (vesztesség)

Diszperzió (torzítás, Pulzus kiszélesedés)

Nemlinearitás (torzítás)

Kimenet

### Minőségrontó hatások

11

csillapítás

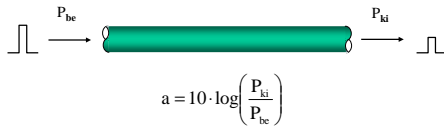
impulzus kiszélesedés (pl. diszperzió)

### Csillapítás

12

## Csillapítás

13



Okai:

- **Abszorpció (fényelnyelés)**
- **Szóródás (inhomogenitásokon)**
  - Rayleigh szórás
- Fresnel reflexió (határatmeneten)
- Sugárzásos veszteség (hullámvezető deformáció)

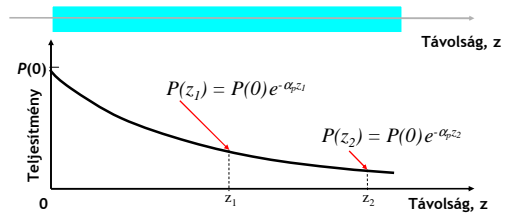
Függ:

- Hullámhossz
- Hőmérséklet
- Anyag
- stb.

## Csillapítás

14

Az üvegszál mentén a teljesítmény exponenciálisan csökken a hossz függvényében  $P(z) = P(0) e^{-\alpha_p z}$   $\alpha_p$ : Csillapítási együttható



$$\alpha_p = \frac{-1}{z_2 - z_1} \ln \left( \frac{P(z_2)}{P(z_1)} \right)$$

$$a \left[ \frac{dB}{km} \right] = \frac{P_1^{[dBm]} - P_2^{[dBm]}}{z_2 - z_1}$$

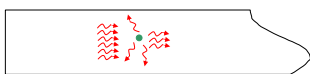
## Csillapítás okai

15

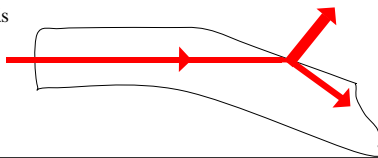
- Abszorpció



- Szórás



- Sugárzás



## Abszorpció

16

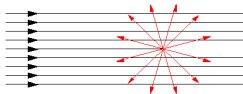
Fényelnyelés

- Az atom vagy molekula a beérkező fotont elnyeli, hatására magasabb energiájú állapotba kerül
- Üvegben:
  - Az elektronátmenetekhez tartozó rezonanciák az ultraibolya tartományba esnek
  - A molekularezgésekhez tartozó rezonanciák az infravörös tartományba esnek => 1700 nm-nél nagyobb hullámhosszak esetén az alkalmazott üveg csillapítása hirtelen megnő
- 1400nm körül OH<sup>-</sup> ionok miatt csillapítási csúcs
- a szál csillapításának 10-20 %-ért felelős

## Rayleigh szórás

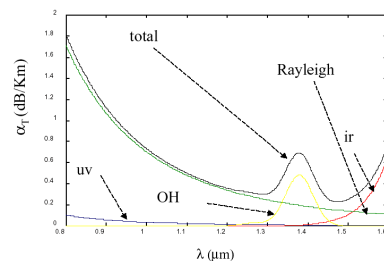
17

- a hullámhossznál kisebb ( $< \lambda/4$ ) inhomogenitásokon való szóródás
  - mikro-repedések, buborékok
  - az adalékanyagok szabálytalan eloszlása
  - mechanikai feszültségek
  - alakváltozások, szálgörbület
- iránykarakterisztikája
  - a haladási irány körül forgásszimmetrikus.
  - Az előre és hátraszórás megegyező, a haladási irányra merőlegesen a legkisebb.
- csillapítás értékének 80 - 90 %-ért felelős
- akkor a legnagyobb, ha a fény hullámhossza összemérhető a mikroszkopikus egyenetlenségek nagyságával => a hullámhossz növelésével csökken
- Felhasználás: OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) mérés



## Abszorpció + Rayleigh szórás

18



Alacsony optikai csillapítás @ 800nm-1700nm ➡  $\Delta \lambda = 900\text{nm}$

(Látható fény: 360-760nm)

$\lambda_1 = 800\text{nm} \Rightarrow f_1 = 375\text{ THz}$

$\lambda_2 = 1700\text{nm} \Rightarrow f_2 = 176\text{ THz}$

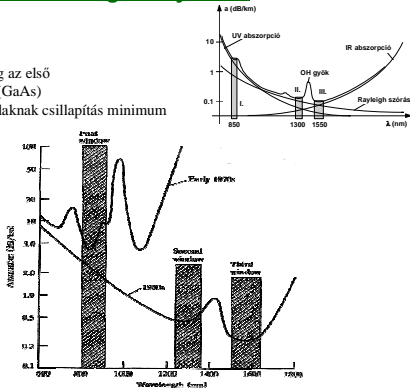
$f = c/\lambda$  ( $\Delta f \neq c/\Delta \lambda = 333 \cdot 10^{12}$  !!!!)

## Technológiai fejlődés

19

3 optikai ablak

- 850nm
  - Történelmileg az első
  - Első lézerek (GaAs)
  - Első üvegszálaknak csillapítás minimum
- 1310nm
- 1550nm



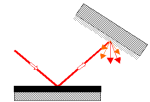
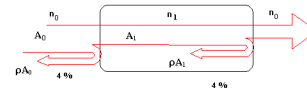
## Fresnel reflexió + diffúz visszaverődés

20

• Fresnel: a közeg felületéről történő, a törésmutatók különbségétől függő visszaverődés

visszavert amplitudó:  $\delta = \frac{n_0 - n_1}{n_0 + n_1}$     energiahányad:  $R = \delta^2$

szálvég: üveg-levegő átmenet  $\Rightarrow n_0=1.5, n_1=1 \Rightarrow R=4\%$



• Diffúz: optikailag durva felületen való szóródás a tökéletlenségek (gödrök és kiemelkedések) nem haladhatják meg az alkalmazott fény hullámhosszát

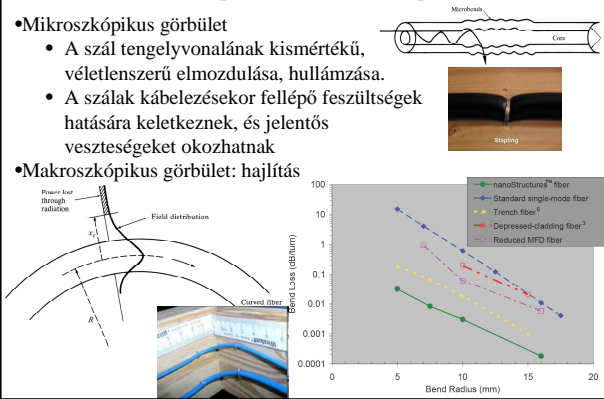
## Sugárzási veszteség

21

• Mikroszkópikus görbület

- A szál tengelyvonalának kismértékű, véletlenszerű elmozdulása, hullámszása.
- A szálak kábelezésekor fellépő feszültségek hatására keletkeznek, és jelentős veszteségeket okozhatnak

• Makroszkópikus görbület: hajlítás



## Diszperzió

22

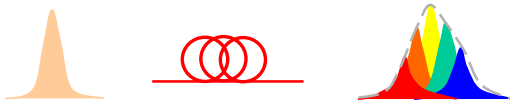
## Diszperzió hatása

23

Diszperzió: a jel egyes összetevői eltérő sebességgel terjednek

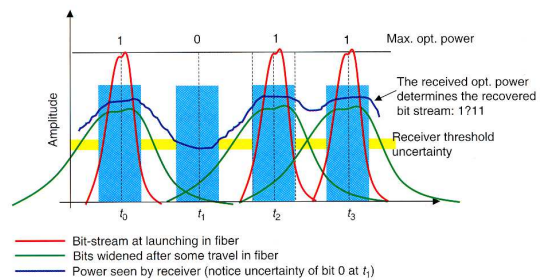
különböző késleltetéssel érkeznek a vevőre

az impulzus kiszélesedik



## Miért káros?

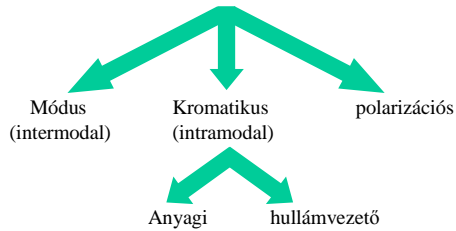
24



## Diszperzió típusok

25

Diszperzió: a jel egyes összetevői eltérő sebességgel terjednek



Következmény: impulzus kiszélesedése

## Diszperzió

26

A jel egyes összetevői eltérő sebességgel terjednek

- Módus diszperzió (többmódusú terjedés esetén a módusok eltérő sebességgel haladnak)
- Kromatikus diszperzió (a különböző frekvenciájú összetevők eltérő sebességgel terjednek)
  - Anyagi (az anyag tulajdonsága miatt, a törésmutató hullámhossz függő)
  - Hullámvezető (a hullámvezető az eltérő frekvenciájú jeleket eltérően koncentrálna a magba, ezért az átlagos törésmutató, tehát az átlagos sebesség eltérő)
- Polarizációs mód diszperzió: a nem tökéletesen kör keresztmetszetű magban a fény két polarizációs síkja eltérő sebességgel terjed, nagy sebességű átvitelnél jelentős (>10Gbps)

## Módusdiszperzió

27

A módusoknak eltérő a csoportfutási ideje

Eltérő terjedési idő:  $t_{\min} = \frac{L}{c/n_1}$ ,  $t_{\max} = \frac{L}{\frac{c}{(n_1)^2/n_2}}$

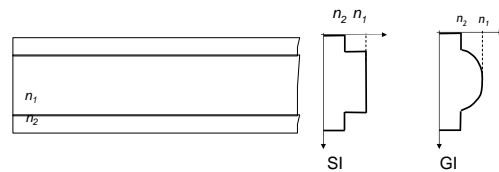
A késleltetés különbség, időbeli impulzus kiszélesedés:

$$\Delta t = t_{\max} - t_{\min} = \frac{L}{c} \cdot n_1 \cdot \frac{n_1}{n_2 - 1}$$

## Módusdiszperzió csökkentése

28

- Single Mode (SM) szál => Módusdiszperzió=0
- GI (Graded-Index) MultiMode (MM) szál => csökkentett módusdiszperzió
  - A szál szerkezete miatt kevesebb módus alakul ki
  - A terjedési sebesség a mag közepén legkisebb, a széle felé növekszik
  - GI szál növeli a magasabb rendű módusok csoportsebességét
  - Csökkenti a terjedési idő különbséget => kompenzálja a módusdiszperziót
  - Közel parabolikus törésmutató profil minimalizálja a diszperziót

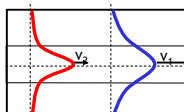


SI 100/140 µm üvegszál: ~ 20 Mb/s · km  
 SI 0.8/1.0 mm műanyag szál: ~ 5 Mb/s · km  
 GI 62.5/125 vagy 50/125 µm, NA ~ 0.2 : ~ 1 Gb/s · km

## Kromatikus diszperzió

29

- Különböző hullámhosszú fénykomponensek kis mértékben eltérő sebességgel terjednek
- Kb. 1000-szer kisebb, mint a módusdiszperzió => SM szálakban jelentős
- Bite sebesség • Távolság < 1000 Gb/s · km
- Az adó jele nem monokromatikus
  - forrás vonaszélessége (LED: 30-40nm, LD: 2-5nm)
  - Chirp
  - modulációs sáv szélesség
- Anyagi: törésmutató változik a hullámhossz függvényében
- Hullámvezető: különböző frekvenciájú jeleket eltérő mértékben koncentrálna a hullámvezető a magba
  - A sebesség az átlagos törésmutatótól függ => arányos a magban terjedő teljesítményhányaddal
  - Hosszabb hullámhossz kevésbé koncentrált => Alacsonyabb átlagos törésmutatót érzékel => nagyobb sebességgel terjed
    - Nagyobb hullámhossz:  $n_{eff} = n_{mag}$
    - Kisebb hullámhossz:  $n_{eff} < n_{mag}$



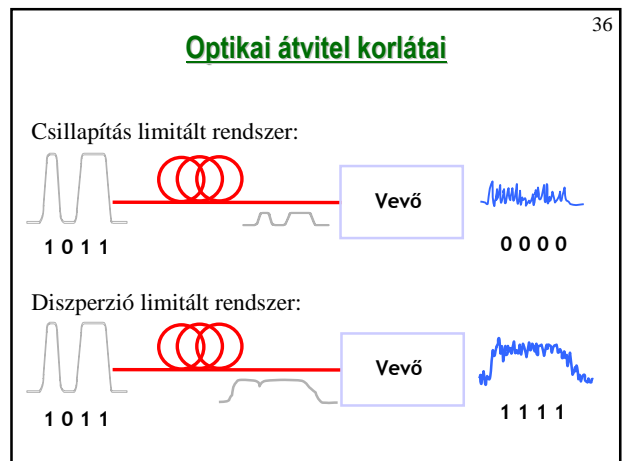
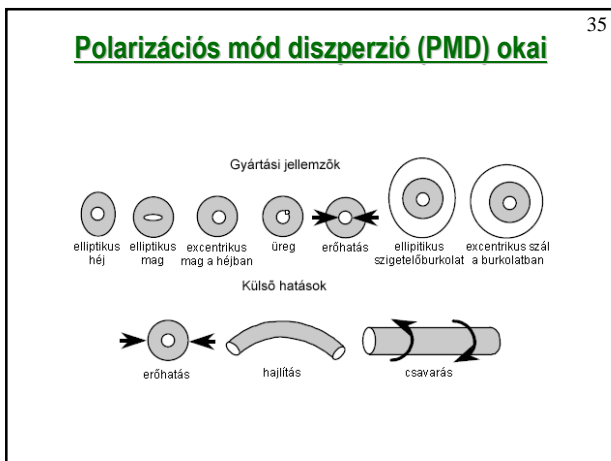
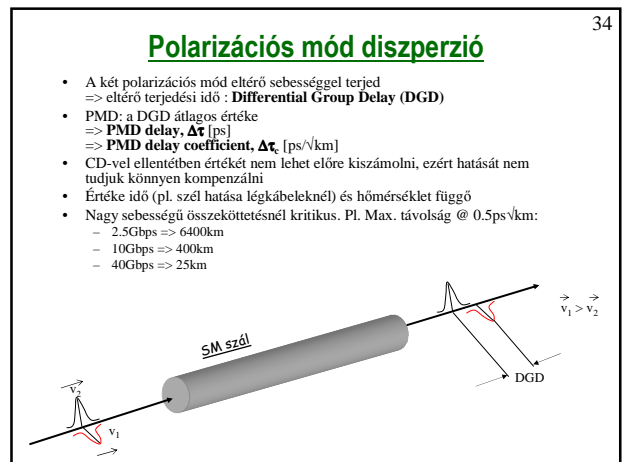
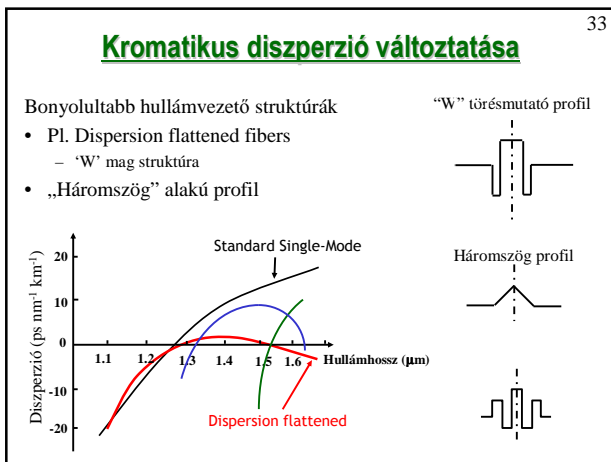
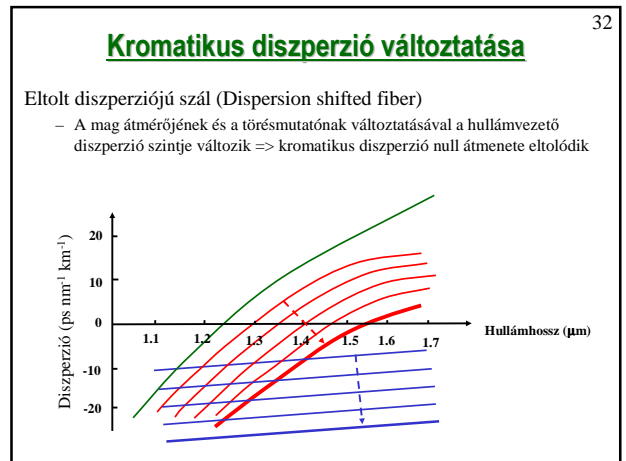
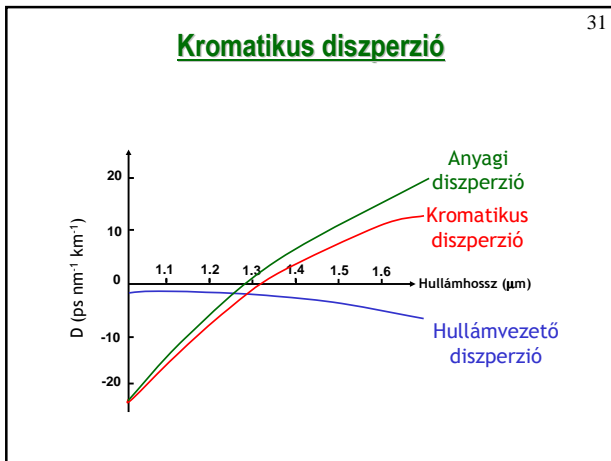
## Kromatikus diszperzió leírása

30

$$\Delta \tau = |D| \cdot \Delta \lambda \cdot L$$

- $\Delta \tau$ : Impulzusszélesség növekedése (időben) [ps]
- $D$ : Diszperziós együttható [ ps/(nm·km) ]  
 nem számítható, hanem mérhető  $D = -\frac{2 \cdot \pi}{c \cdot \lambda^2} \frac{d^2 \beta}{dk^2} \left[ \frac{ps}{nm \cdot km} \right]$   
 hullámhossz függő
- $\Delta \lambda$ : Impulzus hullámhossz sáv szélessége, azaz a fényforrás spektrális szélessége (a használt fényforrás fizikai paramétere) [nm]
- $L$ : szál hossz [km]

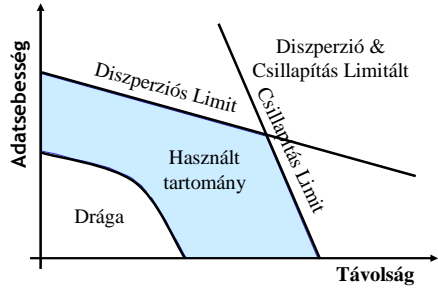
$D$  negatív => a rövidebb hullámhossz terjed lassabban  
 $D$  pozitív => a hosszabb hullámhossz terjed lassabban  
 (mindkét esetben elkenődik az impulzus, de diszperzió kompenzálás szempontjából fontos az előjel.)





## Optikai átvitel korlátai grafikus ábrázolás

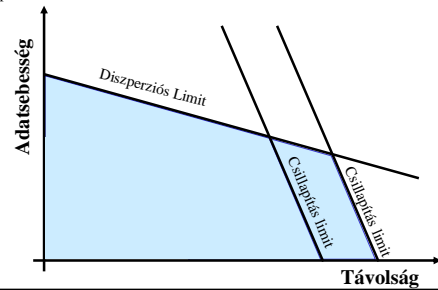
37



## Korlátok kiterjesztése Csillapítás limitált eset

38

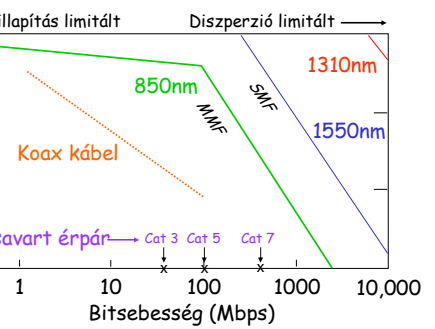
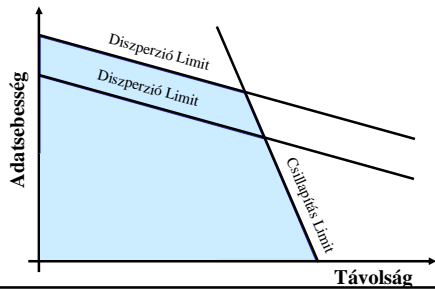
- Nő az adó teljesítménye
- Nő a vevő érzékenysége
- Kisebb a szálcsillapítás
- Optikai erősítőt használunk



## Korlátok kiterjesztése Diszperzió limitált eset

39

- Alacsonyabb adó chirp => Közvetlen moduláció helyett külső modulátor
- Kisebb szál diszperziója
- Diszperzió kompenzálás

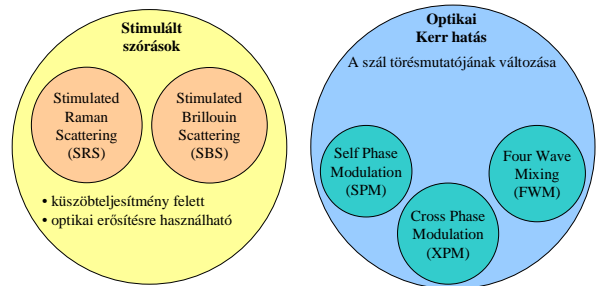


## Optikai nemlinearitás

41

## Nemlineáris jelenségek

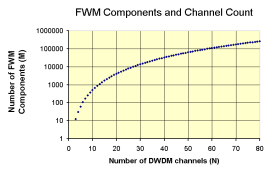
42





## FWM

- A jelenség koherens folyamat, tehát akkor jön létre, ha a jelek alapharmónikusai fázisillesztettek vagy azonos a csoportfutási idejük.
  - a hatás erősebben figyelhető meg csökkentett diszperziójú szálak esetén
  - a hatás erősebben figyelhető meg a szakasz elején, ahol még nem csillapodtak a jelek és a még nem lépett fel fázisillesztetlenség a diszperzió miatt
- A keveredési termékek száma drasztikusan nő a csatornák számával:



$$N_{mix} = \frac{N^2 \cdot (N-1)}{2}$$



## Fénytvádközlő eszközök (BMEVIHVM351)

### Optikai szál – kábel - csatlakozó

2014.10.06.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



## Optikai összeköttetés (egyszerűsített) blokkvázlata

2



## Fényvezető szál - szabványok

ITU-T G.652: Standard Single Mode Fiber (SMF)  
 Non Dispersion Shifted Fiber (NDSF)  
 Dispersion Unshifted Fibre (USF)

A leggyakrabban alkalmazott szál típus (a világon telepített szálak 95%-a).

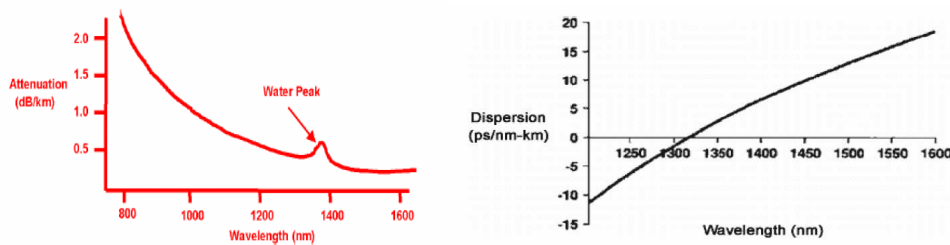
1550nm: Csillapítási minimum, diszperzió:  $D_{\text{crom}} < 20$  (tip.17) ps/nm\*km

1310nm: nulla diszperzió

“Water Peak Region”: 1383nm körül, kb. 80nm széles tartomány, nagy csillapítással

Alkalmazás: egycsatornás átvitel és TDM (1310nm)

DWDM (1550nm, diszperzió kompenzálással)



## Fényvezető szál - szabványok

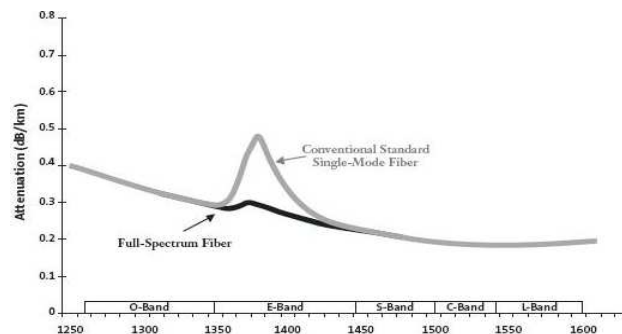
ITU-T G.652c: Low Water Peak Non Dispersion Shifted Fiber (LWPF)

OH szennyezések  
eltávolítása



Csillapítási csúcs eltávolítása  
(1385 nm-nél lévő maximum)

Alkalmazás: CWDM



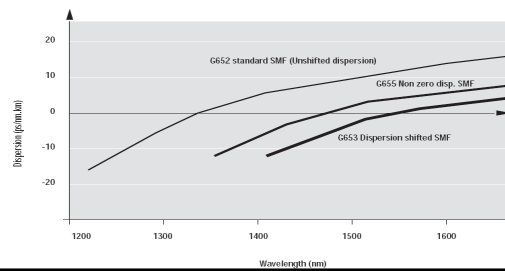
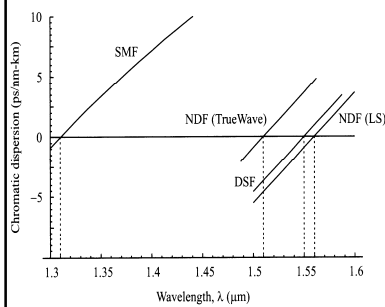
## Fényvezető szál - szabványok

ITU-T G.653 – Dispersion Shifted Fiber (DSF)

Diszperzió zérus pontja = 1550nm (C sávba tolódott)  
Túl alacsony diszperzió miatt nemlineáris hatások erősödnek  
(Four Wave Mixing - FWM → nem jó WDM-re)  
Alkalmazás: Soliton, TDM (1550nm)

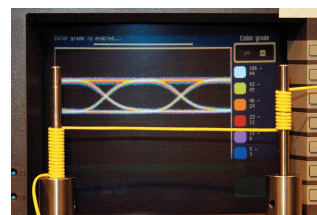
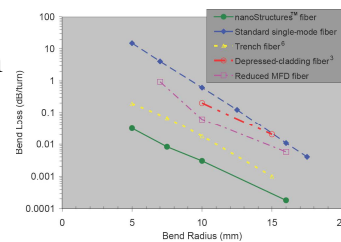
ITU G.655 - Non-Zero Dispersion Shifted Fibre (NZDF/NDF/NZDSF)

1550nm-en (C sávban) alacsony diszperzió  
 $D_{\text{crom}} = -2$  (4.5) ps/nm-km (elég a nemlineáris hatások csökkentésére)  
alkalmazás: TDM (1550nm), DWDM (1550nm, C és L sáv átvitelre optimalizált)



## Hajlításra érzéketlen szál

- ITU-T G.657
- Csillapítás: 0.4dB/km@1310nm  
0.3dB/km@1550nm
- diszperzió < 18ps/(nm km)
- $R=10\text{mm} \Rightarrow a < 0.1\text{dB}$   
 $R=15\text{mm} \Rightarrow a < 0.003\text{dB}$
- Tipikus hajlítási sugár: 7-10mm (G652: >30mm)



## Speciális fényvezető szálak

- Low loss: nagyon hosszú összeköttetések
- Negative dispersion fiber (NDF)  
Negatív diszperzió a 1300-1600 nm-es tartományban  
=> diszperzió kompenzálás
- Long wavelength  
speciális szennyezés (fluor adalék) => IR abszorpciót eltoljuk => 1600nm felett kis csillapítás
- Large Effective Area Fiber (LEAF)  
80 $\mu\text{m}^2$  (hagyományos szál: 55  $\mu\text{m}^2$ )  
nemlineáris hatások csökkentése, nagyobb optikai teljesítmény megengedett
- stb.

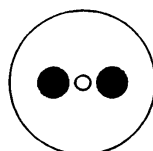
## Polarizáció tartó szálak (PMF)

Ha fontos a polarizációs állapot kézben tartása

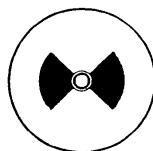
- eszközök működése függ tőle (pl. modulátor)
- Koherens átvitel

a szál magjában szimmetrikus feszültséget idéznek elő

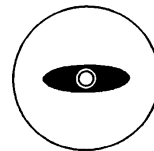
A kívánt feszültséget geometriai- (elliptikus magú szál), vagy mechanikai módszerekkel (panda, csokornyakkendő) érik el.



a) Panda

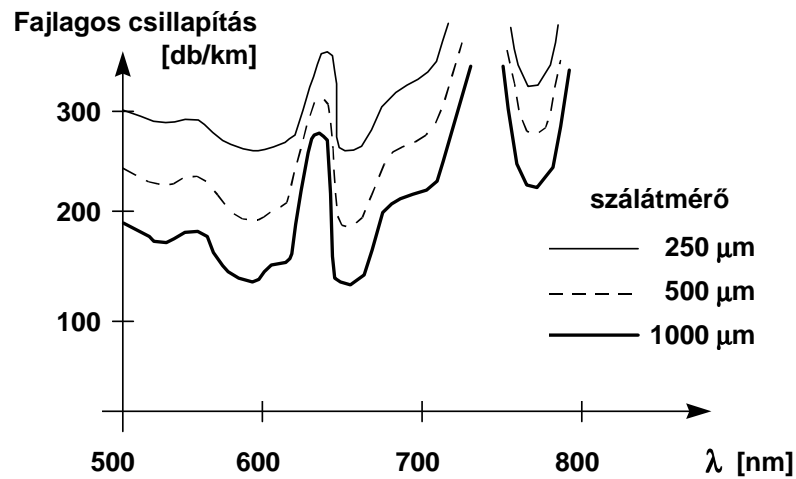


b) Csokornyakkendő



c) Elliptikus héj felvétel

## Műanyag szál



## Műanyag szál

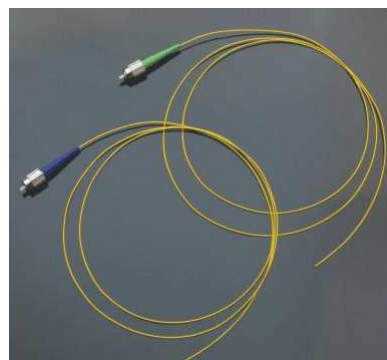
- nagyobb magátmérő, a héj (köpeny) vastagsága a magátmérő 10%-a.
- A szál átmérője tipikusan 1 mm, amit egy polietilén védőburkolattal látnak el.
- Rövid távú (<100 m) alkalmazásokra
- Előny:
  - a nagyobb magátmérő megkönnyíti az illesztést, olcsóbbá válik a szerelés
  - Olcsóbb anyag
- Hátrány:
  - nagy csillapítás
  - nagy diszperzió
  - korlátos sávszélesség
- Az  $a_{\min} = 140$  dB/km, 650 nm-en érhető el (szemmel is látható fénytartomány), hullámhossz-konverzióra van szükség (át kell alakítani 850 nm-re)
- A diszperzió rövid szakaszokon nem jelentős, az áthidalható sávszélesség LED-el 50 Mbit/s, míg lézerek alkalmazásával 155 Mbit/s. Ez megfelelő érték a mai elosztóhálózatokban (de pl. kábeltévé jele nem vihető át rajta).



## Szál - kábel

### Pigtail

- Egyik végén csatlakozó, másik végén szabad szálvég
- Eszközhöz (pl. adó, vevő) illesztés
- Kábelvéghez hegesztés



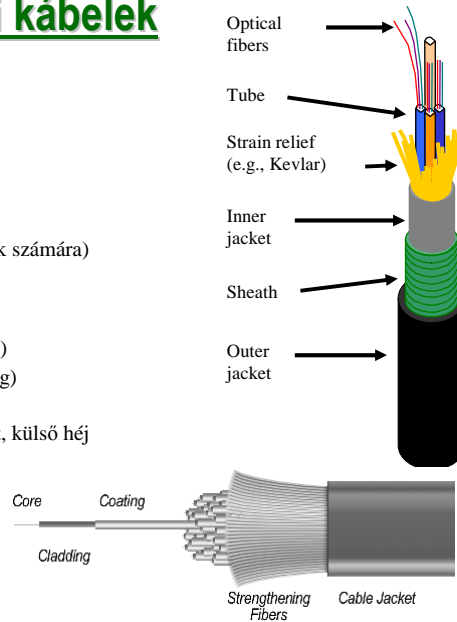
## Patchcord

- Mindkét végén csatlakozó
- Összekötő kábel: eszközök és berendezések közti kapcsolat
- Adapter kábel : különböző típusú csatlakozók közti kapcsolat
- A beiktatási csillapítás elsősorban a csatlakozók csillapításából adódik (1-2m szál => elhanyagolható csillapítás)
- Általában
  - sárga: egymódusú,
  - narancs: többmódusú



## Optikai kábelek

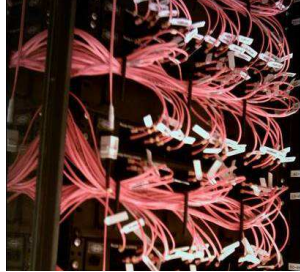
- Mechanikai szempontok:
  - Beltéri, kültéri, tengeralatti
  - Helyi, nemzeti előírások
- Elektromos szempontok:
  - Ne legyen fém és elektromos kábel
  - Tápellátás (erősítők vagy regenerátorok számára)
- Felépítés
  - Elemi fényvezető szál
  - Elsődleges védelem (245  $\mu\text{m}$  lakkréteg)
  - Másodlagos védelem (900  $\mu\text{m}$  műanyag)
  - Kevlár (feszültség/feszítés könnyítése)
  - Köpeny (1.5-3mm): belső héj, burkolat, külső héj



## Kábelek

15

### Beltéri



Késleltetett égésű  
kis füst kibocsátású és halogénmentes  
Feszés vagy laza szerkezet  
Hajlékony

### Kültéri



rágcsáló védelem  
vízálló  
robosztus => alépítményi csövekbe való befűjás

16

## Szálak illesztése

## Szálak illesztése

Az üvegszálakat illeszteni kell

- Hosszabb szálszakaszra van szükség
- Törött kábel javítás
- Szál végződtesítés
  - Adóhoz, vevőhöz
  - Műszerekhez
  - Elosztódobozhoz
  - Stb.
- Illesztési lehetőségek
  - Hegesztés (bonthatatlan/fix)
  - Mechanikai illesztés (bonthatatlan/fix)
  - Csatlakozók (bontható)

## Főbb paraméterek

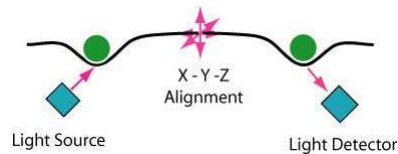
- Beiktatási csillapítás
- Reflexió (RL: return loss)
  - A reflektált és beeső fénytéljesítmény hányada
    - $RL=10\text{dB} \Rightarrow$  a fény 10%-a reflektálódik
    - $RL=20\text{dB} \Rightarrow$  a fény 1%-a reflektálódik
  - Hatása: Teljesítményvesztés, kábelTV rendszerben szellemkép, stb.

Szál & illesztés	Csillapítás (max)	Reflexió (min)
SM hegesztés	0.15 dB	50 dB
SM csatlakozó	1 dB	30 dB
MM hegesztés	0.25 dB	50 dB
MM csatlakozó	0.75 dB	25 dB

## Szálhegesztés

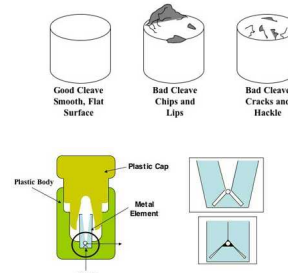
Elektromos ív olvasztja össze a két szálvéget  
Csatlakozókkal összehasonlítva:

- Kisebb csillapítás és reflexió
- Erősebb és olcsóbb
- Könnyebb gyártás (gyorsabb)
- Modern készülékek már egyszerre 12 szál is képesek kezelni (szalagkábelnél)
- Drága berendezés



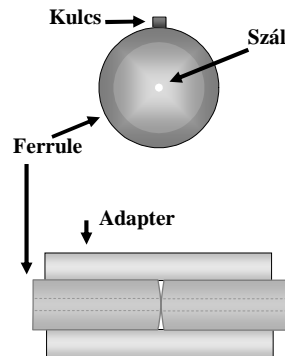
## Mechanikus illesztés

- Pattintott szálvég (fontos a jó minőség)
- A két szálát mechanikusan rögzítik (több módszer, pl. V)
- A szálvégek között törésmutató illesztő olaj
- Szálhegesztéshez képest olcsóbb berendezés, de egy illesztésre eső ár nagyobb
- A csillapítás változó, de kisebb, mint csatlakozóknál



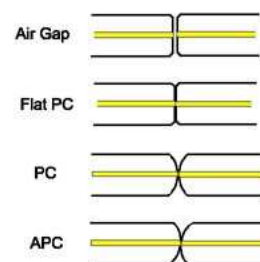
## Csatlakoztatás

- Csap – adapter – csap
- Nagy pontosság
  - Optikai tengelyek között max  $\pm 1 \mu\text{m}$  eltérés lehet (SM)
  - Fizikai kontaktus kell a határfelületeken
- Pontos csapátmérő és adapter belső átmérő
- Tökéletes felületi megmunkálás (szóródás)
- Csatlakozó tisztasága
  - Speciális tisztító és vizsgáló eszközök

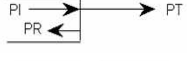
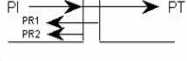

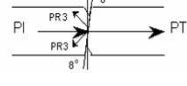


## Csatlakozó – ferrule (csap)

- *Ferrule* biztosítja a szál mechanikai tartását
  - Leggyakrabban kerámia (merev) (létezik rugalmas, barázdált lemez, táguló sugarú is)
  - A szálak végei polírozottak
  - Átmérő: 2.5mm vagy 1.25 mm
- *Ferrule* végének kialakítása / polírozás nem merőleges, hanem konvex a vég kialakítása (10-25mm sugár)
  - PC (Physical Contact)
    - A két szálvég fizikailag érintkezik egymással.
    - A szálak végei a terjedés irányára merőlegesek.
    - Az elérhető minimális csillapítás 0.25dB, RL=40dB
  - APC (Angled Physical Contact)
    - A szálvégek a terjedés irányára nem merőlegesek (7-8°eltérés)
    - RL= 60dB

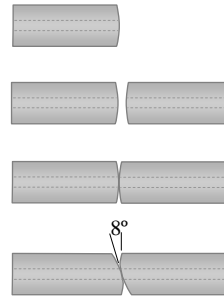


## Csatlakozó – csillapítás, reflexió

	Insertion Loss	Reflectance	
Fiber To The Air		-14dB	
Non-Contact	< 1 dB	-12 dB	
MM csatlakozó			
Physical Contact (PC)	< 0.7 dB	< -30	
Super PC (SPC)	< 0.5 dB	< -40	
Ultra PC (UPC)	< 0.5 dB	< -50	
SM csatlakozó			
Physical Contact 8° APC	< 0.5 dB	< -60	

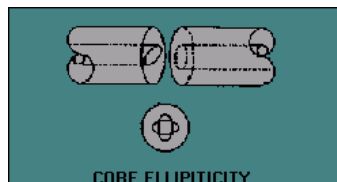
PI: Incident Power  
PT: Transmitted Power  
PR: Reflected Power

PR1: Reflected power from the first face  
PR2: Reflected power from the second face  
PR3: Tiny scattering issues from the imperfections of the surface



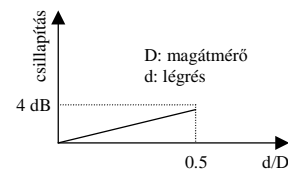
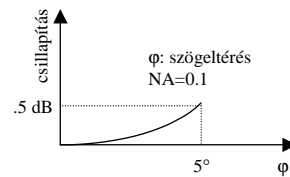
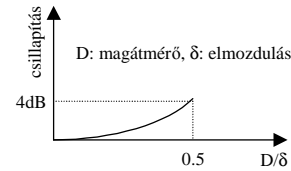
## Csatlakoztatási hibák - szálhiba

- a két mag koncentricitási (excentricitási) hibája.
  - 5 μm eltérésnél már a fénynek 60%-a elvész
  - 10 μm fölött már semmi fény nem jut a másik szálba
- A két mag elipszicitása (ovalitása)



## Csatlakoztatási hibák

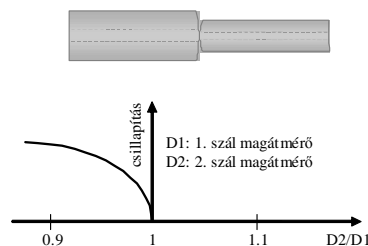
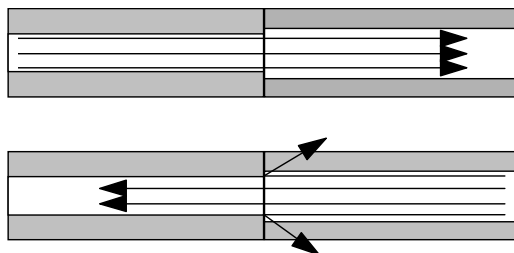
- Tengelyhiba
- Szögeltérés
  - Határa az akceptancia szög, melynél nagyobb eltérés esetén már csak pár %-nyi fény jut át a rendszeren
- Légrés
  - PC, 1mm légrés => 30dB csillapítás
  - Pl. a rosszul illesztett csatlakozó nem fekszik fel rendesen és így nem lehet szorosan illeszteni
  - a kilépő fény nyílásszöge okozza
    - Ha párhuzamosan lépne ki az anyagból a fény, akkor elméletileg csak a ki és belépés veszteségével kellene számolni
    - A numerikus apertúra miatt ez az érték a távolság növelésével arányosan nő



## Csatlakoztatási hibák – eltérő szálak

- Különböző NA
- Különböző törésmutató profil
- Különböző magátmérő => „slag” hatás
  - SM-MM =>  $a=20\text{dB}$  (99%)
  - 50/125-62.5/125 =>  $a>3\text{dB}$

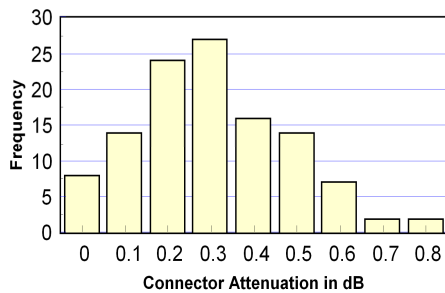
Egy kábelszakaszon a két irányban mért csillapítás érték nem feltétlenül egyezik meg!





## Csatlakozás - megismételhetőség

- Csatlakoztatás csillapítása véletlenszerű
  - Azonos típusú csatlakozóknak eltérő a csillapítása
  - Azonos csatlakozók minden csatlakoztatásnál eltérő csillapítás

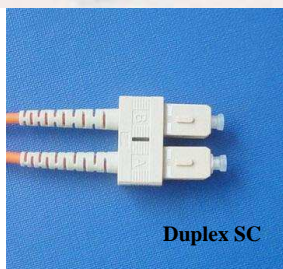


ST csatlakozó  
 Átlag: 0.35 dB  
 Normális szórás: 0.17 dB  
 Maximum: 0.81 dB

## Csatlakozó - típusok

Rengeteg típus. A legismertebbek:

- 2.5mm ferrule => ST, FC, SC, Euro2000
- 1.25mm ferrule => LC
- Duplex



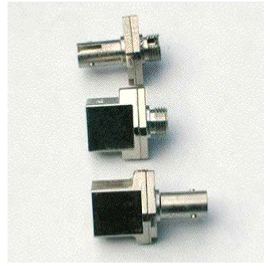
## Különböző csatlakozótípusok illesztése

### Connector Mix-Match

ST-FC

SC-FC

SC-ST



FOA Reference For Fiber Optics  
©2008, The Fiber Optic Association, Inc.

15

## Csatlakozó szerelés

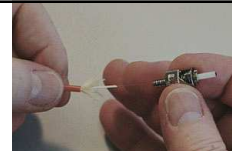
Üveg és gumi alátét  
Gumi polírozó pad  
Üveg munkafelület

Polírozó tárcsa  
Polírozó fóliák

Leírás  
Tisztítószer  
Crimp fogó  
Kézi mikroszkóp

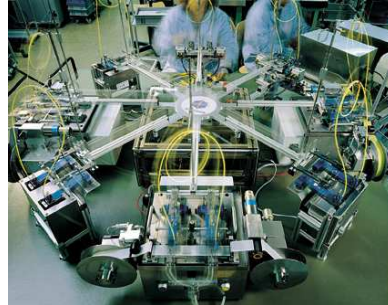
Törlőkendő  
Fecskendő és tű  
Szálpattintó  
Szál tisztító  
EPO-TEK Epoxy ragasztó

Kb. 500EUR (+csatlakozók:7-10EUR, szál:4-5EUR/m)

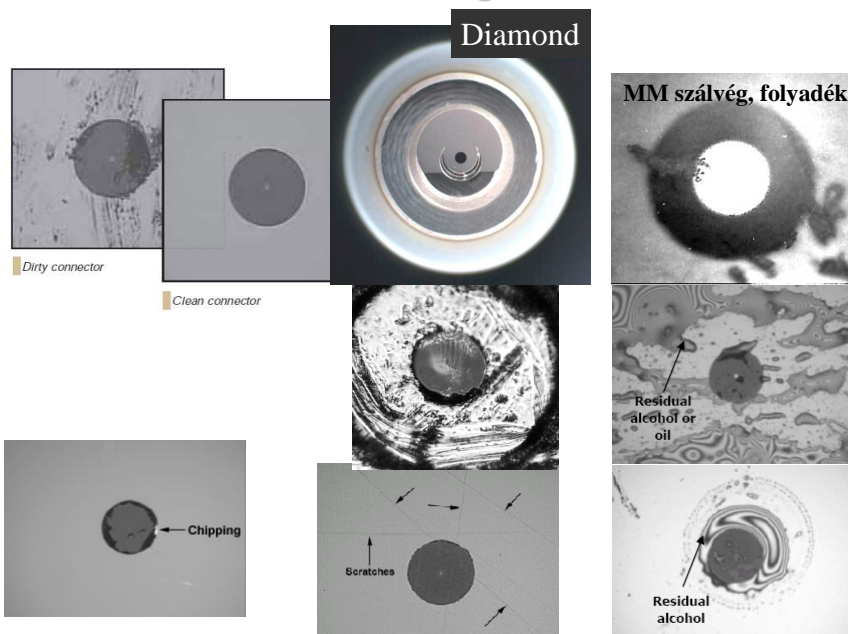


## Csatlakozó szerelés – gépesítés

- Védelem eltávolítás
- Ragasztó adagolás
- Kemence
- Polírozás
- Mérés



## Tisztaság!



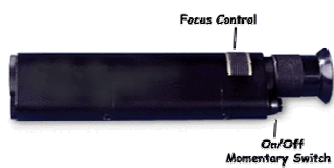
## Optikai csatlakozók tisztítása

33



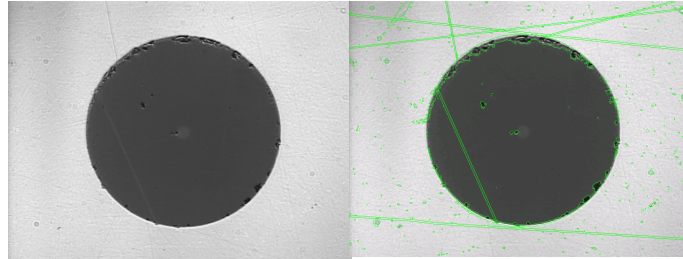
## Optikai csatlakozók ellenőrzése

34

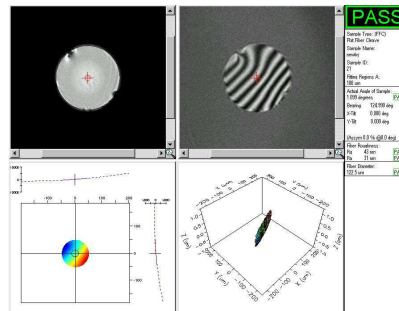


## Szálvég automatizált ellenőrzése

Mikroszkóp



Interferométer



## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVA05)

### Optikai adó, fényforrás

2015.02.23.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu

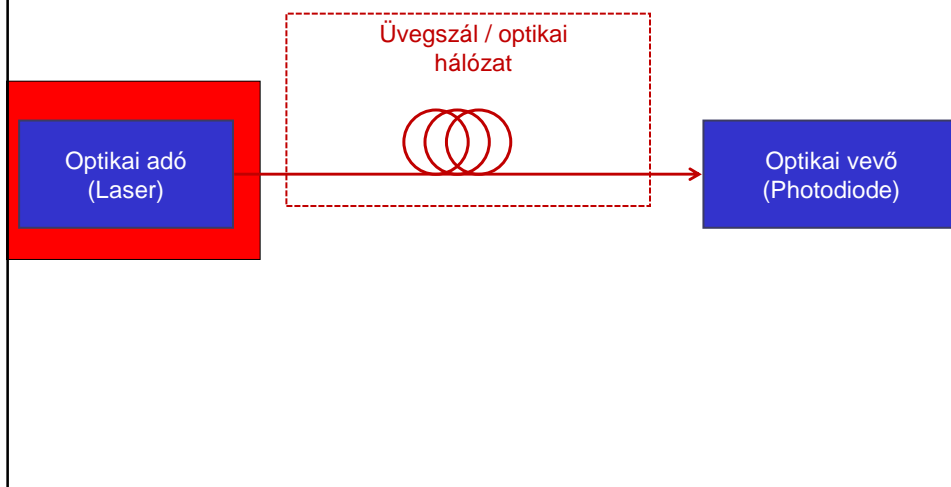


Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



## Optikai összeköttetés (egyszerűsített) blokkvázlata

2



## Fényforrások

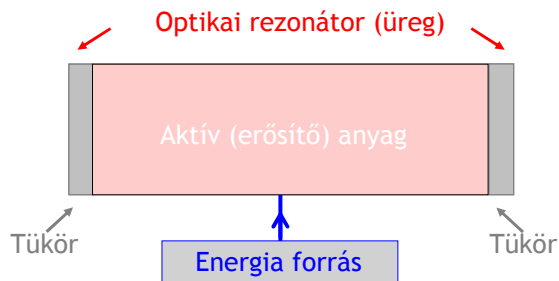
- Számos fényforrás
  - LED (Light Emitting Diode)
  - Solid state lasers
  - Gáz lézer
  - Szál lézer
  - Félvezető lézer
  - Stb.
- Távközlési alkalmazásokban: félvezető lézer
  - Elektromos táplálás
  - Elektromos jelet közvetlenül optikai jellé alakítja
  - Koherens fény
- Félvezető lézer tulajdonságai
  - Nagy modulációs sávszélesség ( $> 10$  Gbit/s)
  - Kis méret
  - tokozott:  $\sim 2 \times 1 \times 1$  cm
  - tokozatlan:  $0.5 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$
  - Egy térbeli módus
  - Energia hatákonyság
  - Keskeny vonalszélesség
  - Lehet: Monokromatikus (egy hosszanti módus)
  - Megbízható működés
  - Integrálható

## LASER

### Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (magyar szakirodalomban gyakran: lézer)

- Optikai erősítő közegre van szükség
- Fény-anyag kölcsönhatási folyamatok (Abszorpció, Spontán emisszió, Indukált/stimulált emisszió) közül az indukált emisszió legyen a domináns folyamat
- Ehhez populáció inverzió / inverz populáció szükséges (magasabb energiaszintek betöltöttsége nagyobb)
- Termikus egyensúlyban az alacsonyabb energiaszint betöltöttsége a nagyobb  $\Rightarrow$  nem az indukált emisszió domináns  $\Rightarrow$  nincs lézerműködés (nem jön létre populáció inverzió)  $\Rightarrow$  Külső gerjesztésre van szükség a lézerműködéshez

## LASER felépítése

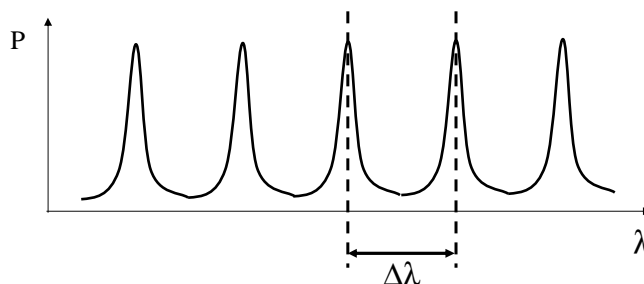


Erősítő anyag => erősítés  
 Pozitív visszacsatolás => rezonátor } → oszcillátor



## Lézerműködés feltétele

- Amplitúdó feltétel
  - Lézerműködés beindulásához: az erősítés nagyobb a veszteségnél
  - Egyensúlyi állapot: erősítés = veszteségek (rezonátorban körülfutó fénycsugár amplitúdója nem változik)
  - Veszteségek: fényelnyelés, szóródás, tükrök
- Fázisfeltétel: rezonátorban körülfutó fénycsugár fázistolása  $2\pi$  többszöröse kell legyen => A rezonátor módusai



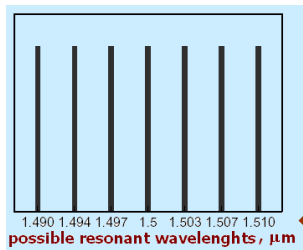
$$\frac{2nL}{\lambda} = m$$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL}$$



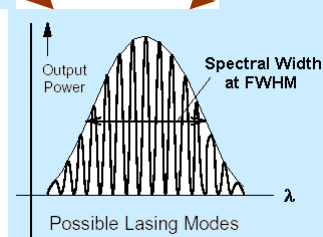
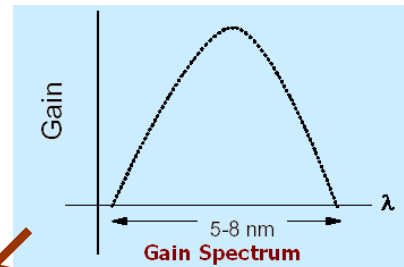
## Lézerműködés feltétele

fázisfeltétel



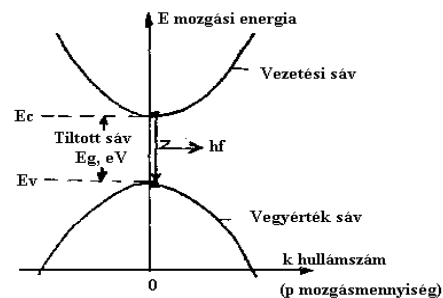
$$n \cdot d = \frac{m \cdot \lambda}{2}$$

amplitudófeltétel

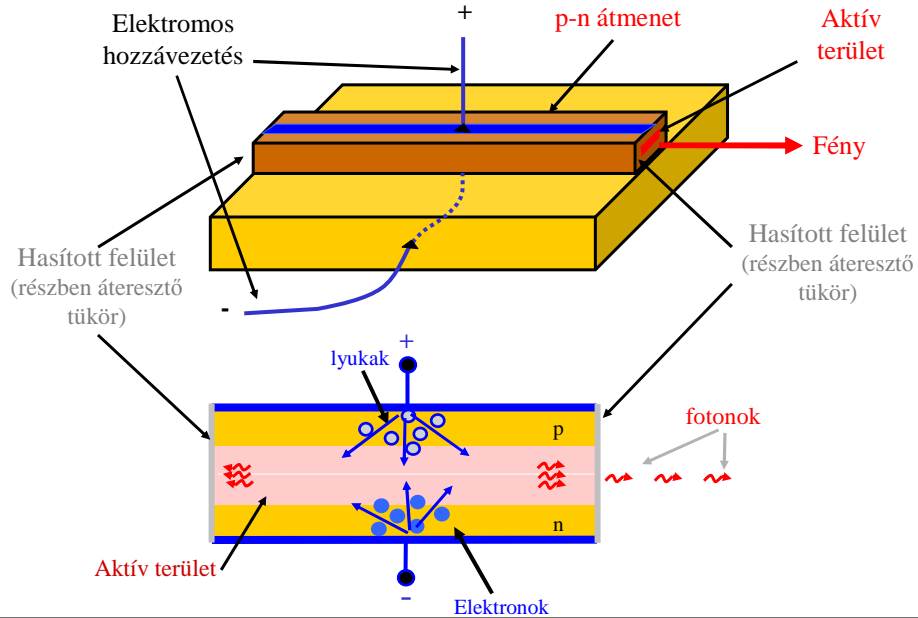


## Félvezető lézer / lézer dióda

- Elektromos gerjesztés (áram)
- Két elfajult szennyezettsgű félvezetőből kialakított p-n átmenet
- A fény hullámhosszát a félvezető anyaga határozza meg (tiltott sáv)
  - GaAs => 870nm
  - AlGaAs => 850nm
  - InGaAsP => 1100-1670nm  
(a komponensek aránya határozza meg a pontos hullámhosszt)

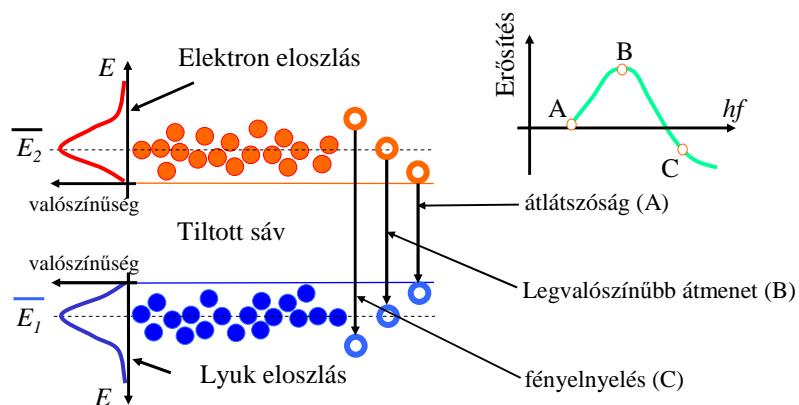


## Félvezető lézer / lézer dióda

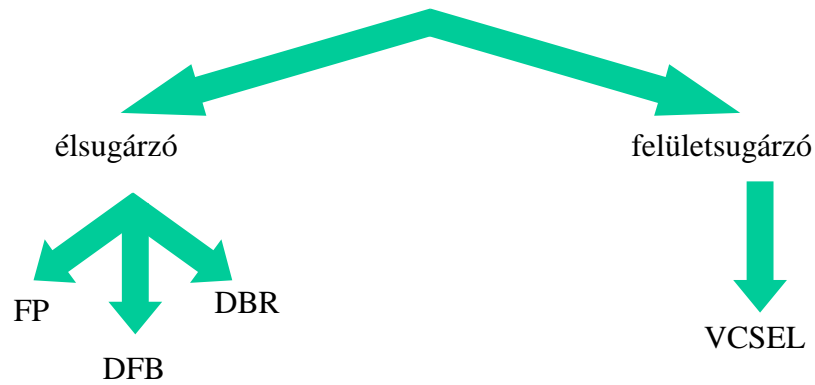


## Erősítés sávzélessége

- Nem energiaszintek, hanem sávok
- Lézer működés széles hullámhossz tartományban létrejöhet

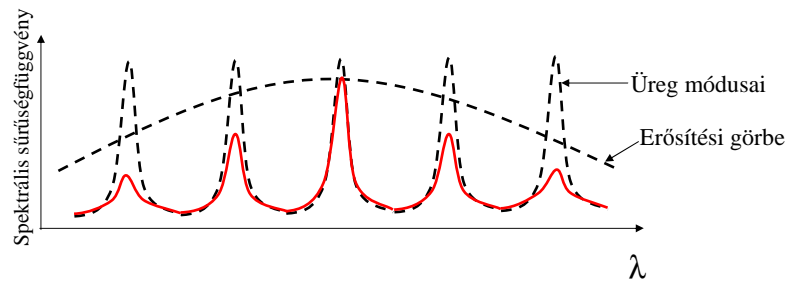


## Félvezető lézer típusok



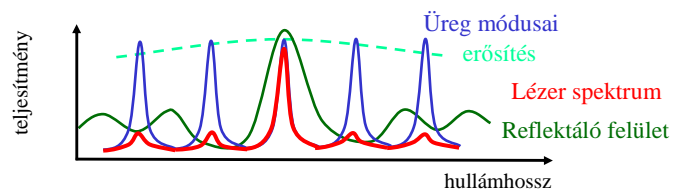
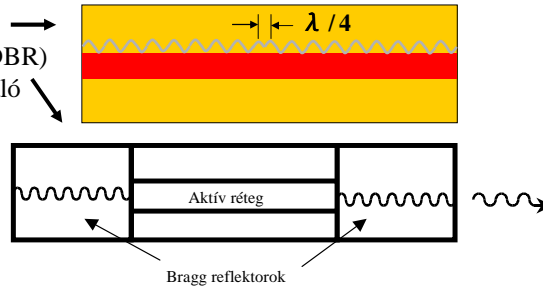
## Fabry-Perot (FP)

- A rezonátort a félvezető chip hasított felülete biztosítja  
=> tökéletes síkpárhuzamos tükör  
=> kb. 30%-os fényvisszaverés ( $n_{\text{levegő}}=1$ ,  $n_{\text{GaAs}}=3.5$ )
- Max. 2Gbit/s
- 850, MMF
- 1310nm, 1550nm
- Nagyobb zaj
- Nagy spektrális szélesség, megoldás:
  - Nagyobb rezonátor hossz (külső rezonátor)
  - Hullámhossz-szelektív tükör

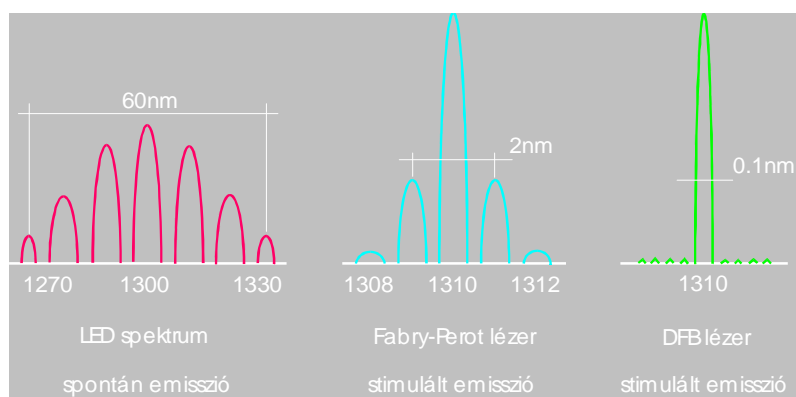


## DFB, DBR

- Distributed Feed Back (DFB)
- Distributed Bragg Reflector (DBR)
- Hullámhossz-szelektív reflektáló felület
- 1310nm, 1550nm
- < 4Gbit/s



## Élsugárzó optikai adók spektrumképe



## VCSEL

Függőleges rezonátorú felületsugárzó lézer (1992-től)  
(VCSEL - Vertical Cavity Surface Emitting Laser)

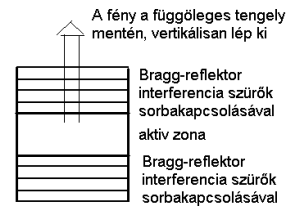
- A rezonátor a félvezetőben vertikális irányban kerül kialakításra
- ⇒ A lézer működéséhez nem szükséges a félvezető szelet feldarabolása.

- ⇒ Alacsony ár
- ⇒ könnyebb a lézer tokozása
- ⇒ könnyebb más áramkörökhöz való integrálása

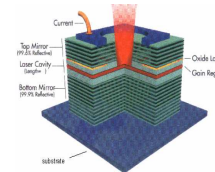
- 850-980 nm-es hullámhossz: olcsó eszköz

- ⇒ multimódusú átvitel
- ⇒ módus diszperzió
- ⇒ kb. 0,5 GHz-es kapacitás

- 1310 és 1550 nm-en is kapható



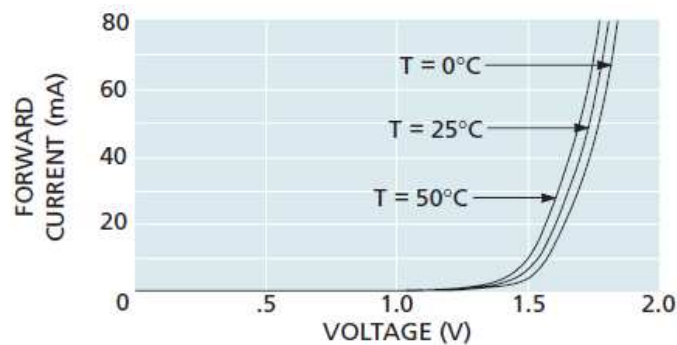
VCSEL-vertikális üregű lézer felépítése  
(keskeny spektrumu, felületsugárzó elem)



## LASER karakterisztikák

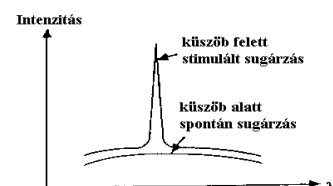
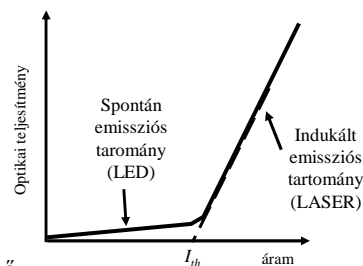
## Áram – feszültség karakterisztika

- Lézerdióda: p-n átmenet
- Felépítése rendkívül bonyolult is lehet => elektromos karakterisztikája eltérhet a megszokott dióda karakterisztikától
- Modell: belső dióda & soros ellenállás
- Fénykibocsátást az áram határozza meg



## Optikai teljesítmény - áram karakterisztika

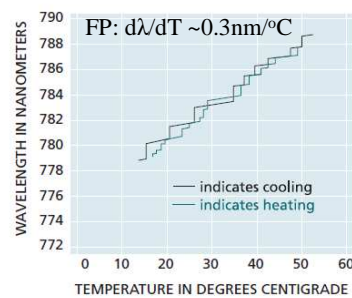
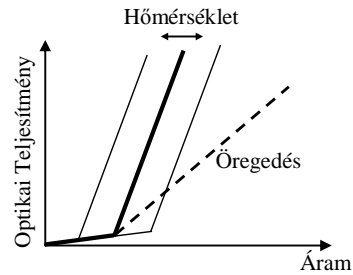
- küszöbáram alatt:
  - a spontán emisszió a domináns folyamat
  - LED viselkedéséhez hasonló működés
  - Széles sugárzási spektrum
- küszöbáram felett: lézer működés
  - lineáris kapcsolat az áram és az optikai teljesítmény között
  - A görbe meredeksége a konverziós tényező vagy nyereség
    - nem képes minden elektronból foton előállítani, a konverziós veszteség adja meg, hogy hány %-os az átalakítás
    - hány mW fényt teljesítmény-változás következik be 1 mA áramváltozásra
  - Keskeny sugárzási spektrum (vonalszélesség)
  - Koherens fény



b. ábra

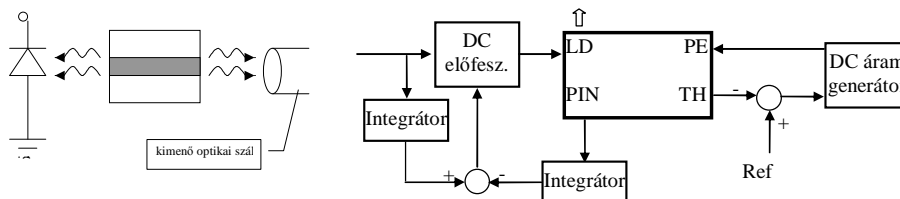
## Teljesítmény és hullámhossz ingadozás

- A lézerciódák kimenő optikai teljesítménye és hullámhossza működés közben változhat
- optikai hírközlő hálózatokban az állandó jelszint biztosítása alapfeltétel
- Több optikai jelet használó rendszerekben a hullámhossz értékét is tartani kell
- A külső feltételeknek pillanatszerű változásai
  - Hőmérséklet
  - Tápellátás
  - Melegedési folyamatok
  - Kompenzálás: vezérlő áramkörökkel
- öregedési folyamatok
  - A lézert hatásfoka ( a görbe meredeksége) csökken
  - Kompenzálás: az áram nagyságának növelése
  - A lézert cserélni kell, amikor az eredeti kétszerese lesz az áramérték
- A lézerek élettartama 5 - 15 év
  - Típusfüggő
  - kimenő teljesítmény függő
  - Környezeti paramétereiktől is függ (hőmérséklet, páratartalom, stb.)

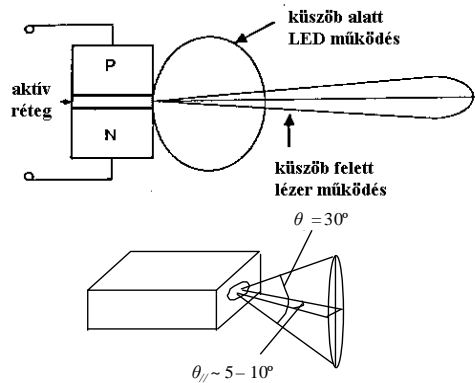


## Lézer karakterisztika - kompenzálás

- Folyamatos karbantartás
- A hatást kompenzálni képes szabályzó elektronika alkalmazása
  - Munkapont beállítást vezérlő hurok
    - A lézerciódával közös chip-re integrált monitor dióda
    - Referencia értéket szolgáltató elem
    - Vezérlő elektronika
  - hőmérsékletet vezérlő hurok
    - hőmérséklet érzékelő (tipikusan egy termisztor, amely ellenállása hőmérsékletfüggő)
    - a referenciaértéket szolgáltató elem (pl. egy ellenállás, amely megadja a termisztor szükséges ellenállásértékét)
    - Peltier elem és meghajtó áramköre



## Iránykarakterisztika



Az emittáló felület a hullámhosszal összemérhető nagyságú

=> kilépő nyaláb erősen divergens

Az emittáló felület téglalap keresztmetszetű

=> kilépő fény nyílásszöge a különböző irányokban nem azonos

## Lézer – szál illesztés

- Az optikai szál és a lézer chip eltérő felépítésű => nehéz az optikai jel becsatolását megvalósítani
- Nem lehet az optikai szálát a chip-hez közvetlenül rögzíteni
  - elrontaná a végtükrök fénytörési tulajdonságait
  - a chip sérüléséhez vezethet
- Az optikai szálak és a sugárzó felület közé sokszor speciális fókuszáló lencsét helyeznek. (nem azonos a fókusz horizontális illetve vertikális síkban).
- Az üvegszál vége is lehet lencsével ellátott (lensed fiber)

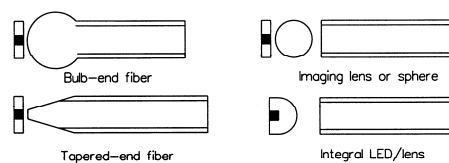


Figure 5.29 Source-fiber coupling using lenses.



# Tokozás

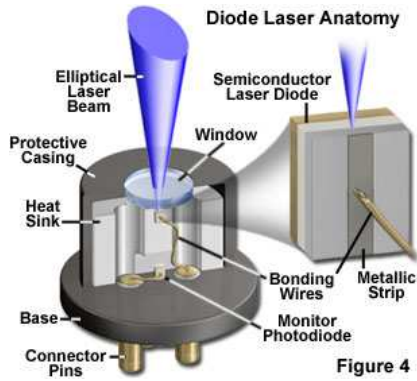


Figure 4

# lézer dióda adatlap

**Features:**

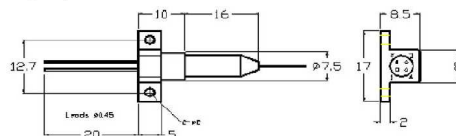
- Analog bandwidth higher than 1800MHz
- High-reliability DFB laser chip at 1550nm
- Built-in InGaAs monitor photodiode
- Built-in optical isolator
- 4-pin coaxial pigtailed package, single mode FC/APC or SC/APC

**Applications:**

- Fiber optical repeater systems in mobile communication networks
- CATV transmission systems (return paths/links)
- Other analog applications

Parameter	Symbol	Unit	Min	Type	Max	Test condition
<b>Electrical Characteristics</b>						
Operating Voltage	$V_{op}$	V	-	-	1.7	
Threshold Current	$I_{th}$	mA	-	-	40	Over temperature
Analog Bandwidth	BW	MHz	1800	-	-	-3dB
3 <sup>rd</sup> order distortion	CTB	dBc	-	-	-80	$f_1=872\text{MHz}$ , $f_2=874\text{MHz}$ , over temperature
Monitor Current	$I_m$	$\mu\text{A}$	100	-	-	CW, $V_{fb}=5\text{V}$ , at rated $P_o$
Monitor Dark Current	$I_d$	nA	-	-	10	CW, $V_{fb}=5\text{V}$ , over temperature
<b>Optical Characteristics</b>						
Optical Output Power	$P_o$	mW	-	2	-	CW, $I_f=I_{th}+20\text{mA}$
Slope Efficiency	SE	W/A	0.09	0.1	-	-
Central Wavelength	$\lambda_c$	nm	1530	1560	1570	CW
Spectral Width	$\Delta\lambda$	nm	-	-	1	CW, -20dB
Side Mode Suppression Ratio	SMSR	dB	30	-	-	-
Tracking Error	$\Delta F_r$	dB	-1	-	1	CW, over temperature $I_m=\text{const}@P_r(\text{th}+20\text{mA})$ , APC
Monitor PD Capacitance	C	pF	-	-	10	$V_{fb}=5\text{V}$ , $f=1\text{MHz}$
Connector Repeatability	-	dB	-1.0	-	1.0	-

**Package Outline (in mm):**



Pin	Description
1	LD (anode)(CASE)
2	LD (cathode)
3	Detector (cathode)
4	Detector (anode)

## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVA05)

### Optikai vevő

2015.03.02.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



## Ideális fotovevő tulajdonságai

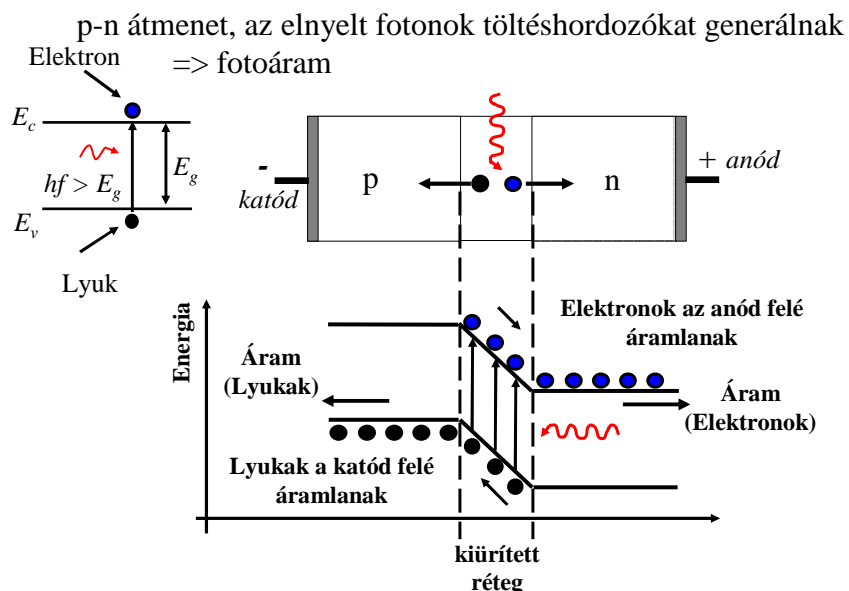
2

- Nagy érzékenység a működési hullámhossz tartományban és alacsony érzékenység ezen kívül => magas hullámhossz szelektivitás
- Gyors válaszidő => nagy sáv szélesség
- Alacsony zaj
- Hőmérsékletre érzéketlen működés
- Kis fizikai méret
- Hosszú működési élettartam
- Elfogadható ár

=> Optikai távközlési rendszerekben csak fotodiódát alkalmazunk (Fototranzisztor, Fotoellenállás nem teljesíti a feltételeket)

## O/E átalakítás alapjai

3

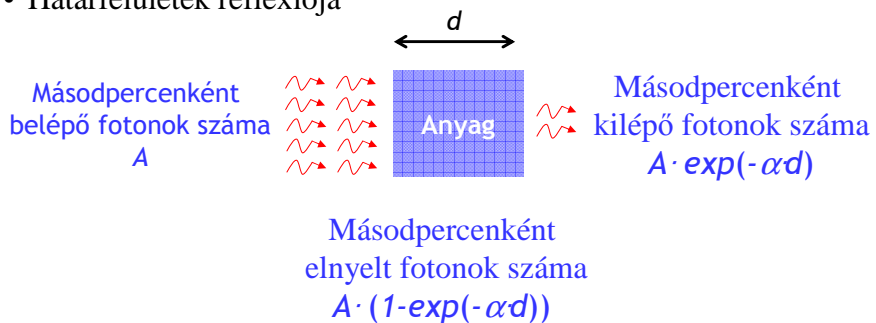


## Fényelnyelés

4

Valószínűsége függ

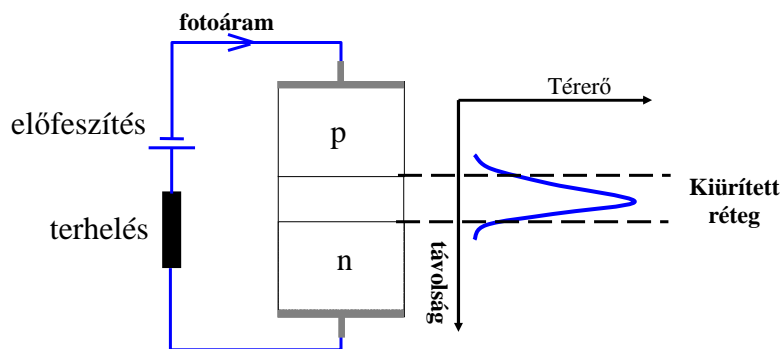
- Kiürített réteg vastagsága,  $d$
- Az anyag abszorpciós együtthatója,  $\alpha$
- A belépő fény hullámhossza,  $\lambda$
- A fotonok mekkora hányada jut el a kiürített rétegig
- Határfelületek reflexiója



## Záró irányú előfeszítés

5

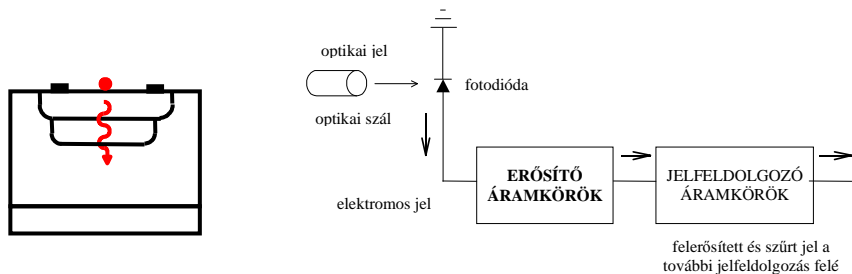
- Záró irányú előfeszítés => Növeli az elektromos mező szintjét a kiürített rétegben
  - Gyorsabb töltéshordozó mozgás
    - Növeli a sebességet => töltéshordozók hamarabb kijutnak az eszközből => kisebb veszteség
  - Növeli a kiürített réteg vastagságát
    - Csökkenti a kapacitást => növeli a sebességet => nagyobb adatátviteli sávszélesség
    - Több foton jut be => növeli az érzékenységet



## Vevő

6

- Optikai-elektromos átalakítás
- Általában fotodióda + erősítő, jelfeldolgozó áramkörök
- a beérkező fotonokat elnyeli (abszorpció), elektromos töltéshordozók keletkeznek => áram
- Tipikusan nagyobb méretű, mint a lézerdíóda
  - Kisebb a kicsatolási veszteség, mint a becsatolási
  - Könnyebb illeszteni

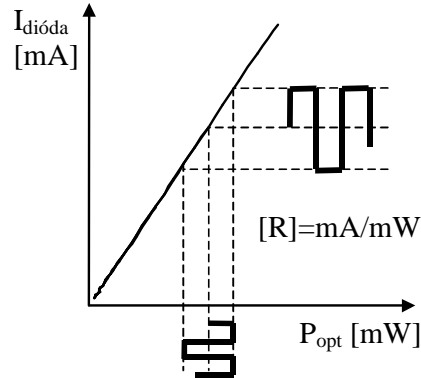


## Optikai detektor - jellemzők 1.

7

- Kvantumhatásfok (egy foton átlagosan hány töltéshordozót generál),  $\eta$ 
  - Külső és belső kvantumhatásfok

$$\eta = \frac{n_c}{n_p} = \frac{\frac{I_p}{e}}{\frac{P_{opt}}{h \cdot \nu}} = \frac{h \cdot c}{e \cdot \lambda} \cdot \frac{I_p}{P_{opt}}$$



- Bejövő optikai teljesítmény-generált fotoáram karakterisztika

- Responsivity, érzékenység (a karakterisztika meredeksége), R
  - 1mW belépő optikai teljesítmény hatására hány mA fotoáram keletkezik

$$R = \frac{I_p}{P_{opt}} \left[ \frac{A}{W} \right] = \frac{e \cdot n_c}{P_{opt}} = \frac{e \cdot \eta \cdot n_p}{P_{opt}} = \frac{e \cdot \eta \cdot \frac{P_{opt}}{h \cdot \nu}}{P_{opt}} = \frac{\eta \cdot e}{h \cdot \nu} = \frac{\eta \cdot e \cdot \lambda}{h \cdot c} = \eta \cdot \frac{\lambda [\mu m]}{1.24}$$

## Optikai detektor - jellemzők 2.

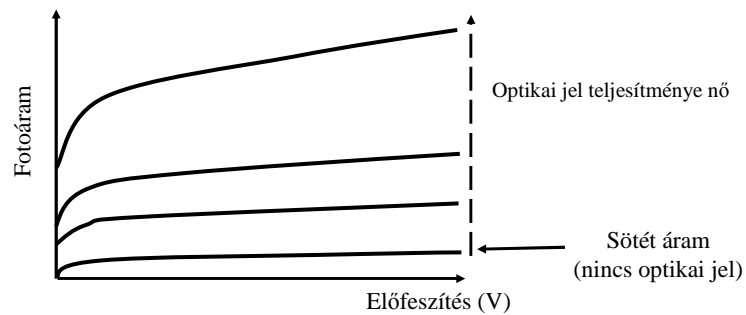
8

- A vevő által hozzáadott zajt
  - NEP: Noise Equivalent Power
  - Az az optikai teljesítmény, amit a vevőre adva a zajjal megegyező egységnyi sávszélességre eső elektromos teljesítményt kapnánk a kimeneten.
- Sensitivity, érzékenység, S
  - milyen kis szintű jelet képes még detektálni a vevő (BER=10<sup>-9</sup>)
- Sötétáram (megvilágítás nélkül áram)

## Sötétáram

9

- Sötétáram (áram, bejövő optikai jel nélkül)
- Bejövő fényteljesítmény – fotoáram : lineáris kapcsolat

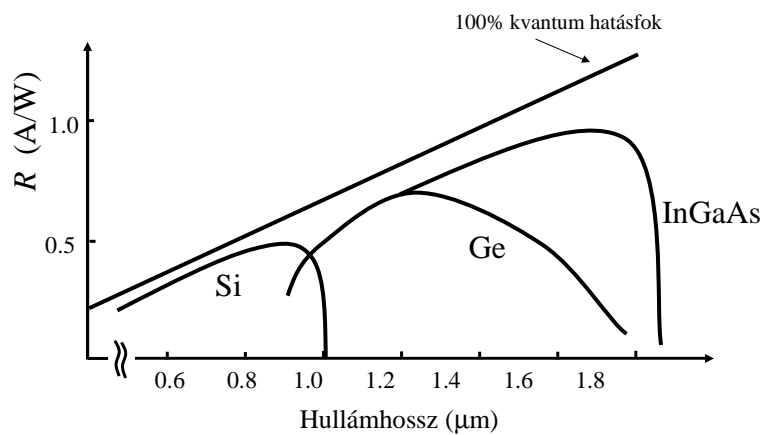


## Érzékenység hullámhosszfüggése

10

Eszköz anyaga szabja meg

- Si: alacsony ár, jó paraméterek, rövid hullámhosszra
- Ge: a teljes hullámhossztartományt lefedi, magas sötétáram (kis tiltott sáv miatt)
- InGaAs: 1550 és 1310nm-en a legjobb tulajdonságok, nagy sebesség, alacsony zaj, drága

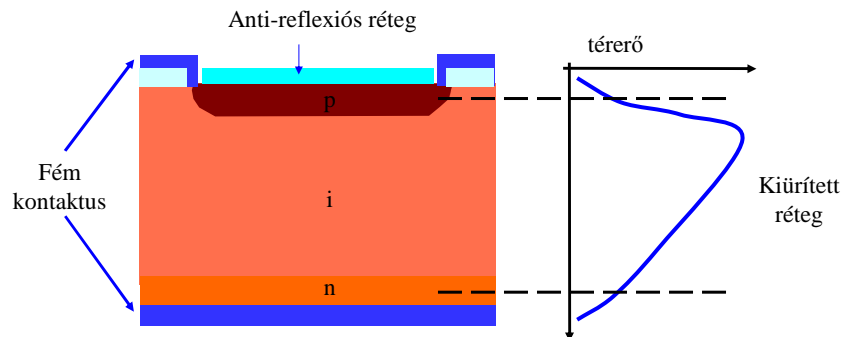


## Fotodióda típusok

- Positive-Intrinsic-Negative (*pin*)
- Avalanche Photo Diode (*APD*) – lavina dióda

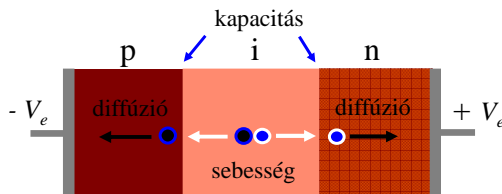
## PIN dióda

- p-n átmenet nem biztosít elég nagy kvantum hatásfokot
- szennyezetlen (intrinsic) réteg
  - Nő a p-n átmenet kiürített rétege
  - Nő az elnyelt fény mennyisége
  - Nő a kvantumhatásfok
- Erősen lineáris működés, alacsony sötétáram, alacsony zajszint, stabil karakterisztika



## PIN dióda

- Működési sebesség: maximális detektálható modulációs sebesség (frekvencia válasz)
- Sebességet korlátozza:
  - A töltéshordozók sebessége a kiürített rétegben => a kiürített rétegen való átjutási idő
  - A töltéshordozók diffúziós ideje a kiürített rétegen kívül
  - p-n kapacitás időállandója
  - Fotodetektor terhelő ellenállása
- Intrinsic réteg növelése
  - Vételi hatásfok nő
  - a reakcióidő lecsökken => korlátot jelent a nagysebességű átvitelnél



Fotoáram:

$$I_p = \eta \cdot P_0 \cdot \frac{q}{h \cdot \nu}$$

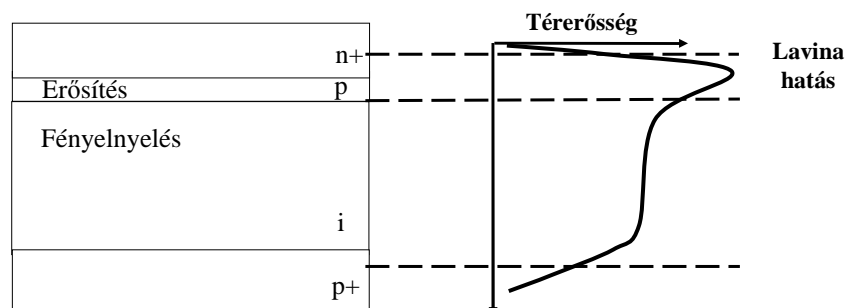
Levágási frekvencia:

$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)} \mu\text{m}$$

## Lavina dióda

Erősítési terület – nagyobb belső elektromos térerősség

- Gyorsabb töltéshordozók => több mozgási energia
- A nagy energiájú ütközés elektronokat szabadít fel
- A szabad elektronok ütköznek => további elektronok szabadulnak fel  
=> áram erősítés





## Lavina dióda

15

- belső erősítéssel rendelkező fotodióda
- zárófeszültség növelése => egy bizonyos értéktől kezdve megindul a töltéshordozók sokszorozódása, a sokszorozódás lavinaszerűen felgyorsul
- a fotoáram nemcsak a megvilágítás, hanem az alkalmazott záróirányú feszültség növekedésével is emelkedik.
- M: sokszorozási tényező (nagyságrendje 10<sup>4</sup>)
- Ma már az eredeti 50-400V-os előfeszítés helyett 15-25V-os előfeszítés
- a sokszorozás miatt nő a sörétzaj értéke is => plusz zaj
- nehéz gyártani, nagy előfeszítést igényel, zajt termel és a működés erősen hőmérsékletfüggő, ezért körültekintő tervezést igényel a használata
- Nagy sebességű és nagy érzékenységű vevőkben

Fotoáram: 
$$I_p = \eta \cdot P_0 \cdot \frac{q}{h \cdot \nu} \cdot M$$

Érzékenység:  $R_{APD} = R_{PIN} \cdot M$

## Fotodetektorok összehasonlítása

16

Paraméter	PIN fotodióda	Lavina (Avalanche)
Anyag	Si, Ge(1310nm), InGaAs (1310 & 1550nm)	Szilícium, Germánium, InGaAs
Sáv szélesség	DC - 20GHz	DC - 20 GHz
Hullámhossz	600-1800 nm	600-1800 nm
Érzékenység	0.5 - 1.0 A/W	0.5 - 100 A/W
Szükséges áramkörök	-	Nagy feszültség, Hőfok stabilizálás
Ár (tokozott+szál)	\$1 - \$500	\$100 - \$2,000
	Nincs áramerősítés => Alacsonyabb érzékenység Alacsony feszültség Kiseb zaj és sötétáram Könnyű használni Olcsóbb	Áramerősítés => Nagyobb érzékenység => gyengébb optikai jel detektálása Nagy meghajtó feszültség Nagyobb zaj, Nagyobb sötétáram Nagyobb hőmérséklet és előfeszítés érzékenység Drága

## Fotódióda adatlap példa



### Applications

- Forward-Path and Return-Path Broadband Video Transport
- FTTx Receivers
- EDFA and Network Monitors

### Features

- Low Cost Package
- Low Capacitance,  $\leq 0.4$  pF
- Low Dark Current  $\leq 50$  nA at  $+65^\circ\text{C}$
- 1 GHz Flat Response,  $\pm 0.5$  dB
- Extended Bandwidth Option
- High Responsivity
  - $\geq 0.90$  A/W at 1310 nm, typ.
  - $\geq 0.98$  A/W at 1550 nm, typ.

### Performance Highlights

	Min	Typ	Max	Units
Operating Case Temperature	-40	25	+85	$^\circ\text{C}$
Wavelength	1100	-	1600	nm
Responsivity, 1310 nm	-	0.90	-	A/W
1550 nm	-	0.98	-	A/W
Dark Current, $25^\circ\text{C}$	-	-	5	nA
$65^\circ\text{C}$	-	-	50	nA
Capacitance	-	0.35	0.4	pF
Bandwidth, 2051A	-	-	1000	MHz
2051E	-	-	3000	MHz

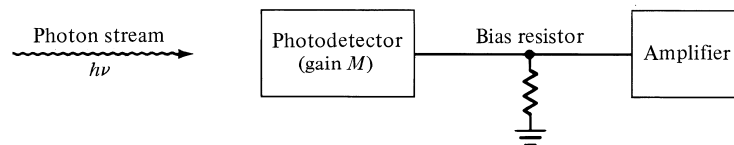
Parameter	Symbol	Min	Max	Unit
Operating Temperature Range	$T_{\text{op}}$	-40	85	$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	$T_{\text{stg}}$	-40	85	$^\circ\text{C}$
Input Power Saturation	$P_{\text{IN}}$	-	10	mW
Reverse Voltage	$V_{\text{R}}$	-	30	V
Forward Current	$I_{\text{F}}$	-	10	mA

### DC/Optical Characteristics

Parameter	Condition	Min	Typ	Max	Unit
Wavelength	-	1100	-	1600	nm
Responsivity	1310 nm	0.85	0.90	-	A/W
1550 nm	0.95	-	-	-	A/W
Dark Current	$25^\circ\text{C}$	-	-	5	nA
$65^\circ\text{C}$	-	-	-	50	nA
Capacitance	-	-	0.35	0.4	pF
Optical Return Loss	-	-	-	-40	dB
Bias Voltage	-	10	12	15	V
Fiber Buffer	-	-	900	-	$\mu\text{m}$
Fiber Core / Cladding	-	-	9/125	-	$\mu\text{m}$

## Vevő kimenetén fellépő zajtípusok

- Adó zaja
  - Lézer RIN
- Sörétzaj (kvantumzaj)
  - A foton számának kvantáltsága miatt, Poisson eloszlású
- Sötétáram
  - Beeső fényteljesítmény nélkül megjelenő áram
- Vevőáramkörök termikus zaja
  - Ellenállás, erősítő, stb.
- Erősítés zaja
  - APD sokszorozás statisztikus folyamat

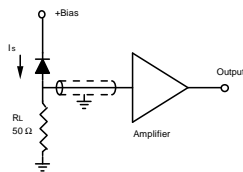


- Photon detection quantum noise (Poisson fluctuation)
- Bulk dark current
- Surface leakage current
- Statistical gain fluctuation (for avalanche photodiodes)
- Thermal noise
- Amplifier noise

## Vevő struktúrák

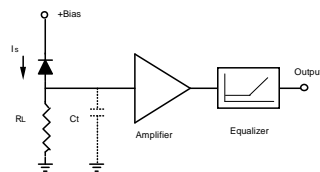
Fotodióda kapacitása + terhelő ellenállás => RC kör  $f_{\max} = 1/(2 \cdot \pi \cdot R_L \cdot C_j)$   
 Termikus zaj:  $\langle i_T^2 \rangle = 4K_B T B / R_L$  (kis zaj => nagyobb érzékenység)

Előerősítő típusai: kisimpedanciás, nagyimpedanciás, transzimpedanciás



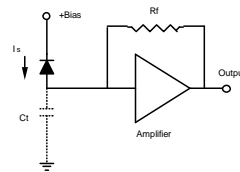
### Kis impedanciás

R tipikusan: 50Ω  
 Alacsony érzékenység  
**Nagy sávszélesség**  
 Könnyű elkészíteni



### Nagy impedanciás

**Nagy érzékenység**  
 Kis sávszélesség  
 Alacsony dinamika tartomány  
 Magasabb frekvenciákon  
 kiegyenlítő áramkör



### Transzimpedanciás

(negatív visszacsatolás)  
 Nagy érzékenység  
 Nagy sávszélesség  
 Nagy dinamika tartomány  
 Stabilitási probléma

$$B \leq \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot R_f \cdot C_T}$$

## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVA05)

### Moduláció

2015.03.09.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



2

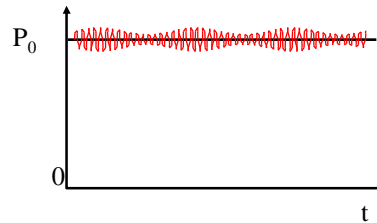
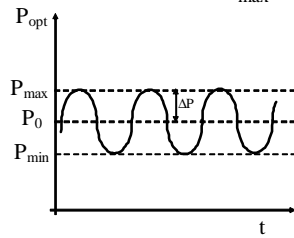
### Moduláció

- Elvileg: az optikai vivő valamely tulajdonsága (amplitúdó, frekvencia, fázis) arányos az átvinni kívánt tartalommal
- Gyakorlatilag: intenzitásmoduláció ( a fényjel teljesítménye arányos az átvinni kívánt információval)
- Információ
  - analóg
  - digitális
- Megvalósítás
  - Közvetlen/direkt moduláció
  - Külső modulátor

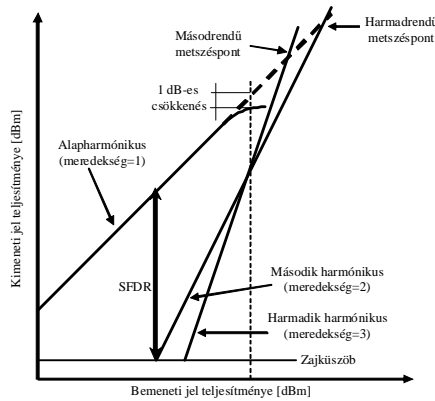
## Analóg moduláció

- Munkaponti teljesítmény körül folytonos moduláció
- Gyakran mikrohullámú vivőn digitális információ (nem analóg információ, de az elektromos vivő miatt optika számára analógnak minősül)
- Gyakran frekvenciatartománybeli multiplexálás
- Pl. videó jelek (CATV), rádió jelek (GSM, UMTS, WiFi, stb.)
- Paraméter: modulációs mélység
- Alakhű átvitel => Linearitásra érzékeny => Modulációs mélység < 10%

$$m = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} = \frac{\Delta P}{P_0}$$



## Analóg moduláció - Linearitás

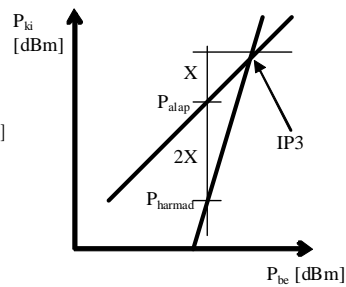


- 1 dB-es kompressziós pont
- IP3 (Third order intercept point)
- Zavarmentes/torzítás mentes dinamika tartomány, SFDR (Spurious Free Dynamic Range)

$$SFDR^{[dB]} = P_{\text{alap}}^{[dBm]} - P_{\text{harmad}}^{[dBm]}, \text{ ha } P_{\text{zaj}} = P_{\text{harmad}}$$

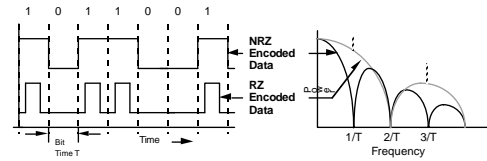
$$SFDR^{[dB]} = \frac{2}{3} \cdot (IP3 - P_{\text{zaj}})^{[dB]}$$

$$SFDR = \left( \frac{IP3}{P_{\text{zaj}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$

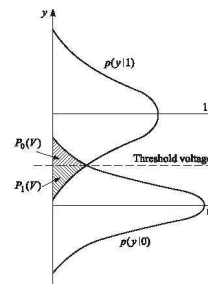
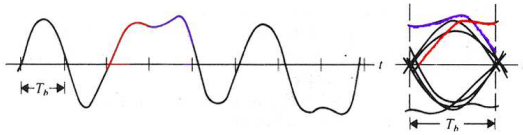


## Digitális moduláció

- Alapsávi digitális (bináris)
- On/off keying (OOK, ki-be kapcsolás)
  - NRZ
    - a kisugárzott vivő nem hordoz információt => feleslegesen terheli az optikai erősítőket
    - Érzékeny PMD-re
  - RZ: nagy távolságú összeköttetés
    - Vivő kisugárzásra kerül
    - Előnyösebb PMD szempontból
- Egyéb modulációs módszerek
- Paraméterek (adott adatsebesség, hossz)
  - Modulációs mélység
  - Extinction ratio (kioltási tényező) =  $P_1 / P_0$
  - Bit Error Rate (BER) =  $N_{hibás} / N_{összes}$ 
    - Szabványok:  $1E-9 \dots 1E-12$
    - Fénytvájközlő rendszer:  $< 1E-15$
  - Szemábra
  - Jósági tényező (Q)
- Analízis
  - Adott BER-hez, SNR és összeköttetés vesztesége (link power budget)
  - Diszperzió, felfutási idő vizsgálata (rise-time budget)



## Digitális moduláció - paraméterek



- Szemábra magassága, stb.
- Optimális mintavételi idő: bitidő közepe
- Optimális döntési küszöb ( $\mu$ )
- Jósági tényező (Q): szemábra nyitottságának mértéke
- BER

$$\mu = \frac{\sigma_0 \cdot \mu_1 + \sigma_1 \cdot \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 - \sigma_0} \quad BER = \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu - \mu_0}{\sqrt{2}\sigma_0} \right) + \frac{1}{4} \operatorname{erfc} \left( \frac{\mu_1 - \mu}{\sqrt{2}\sigma_1} \right)$$

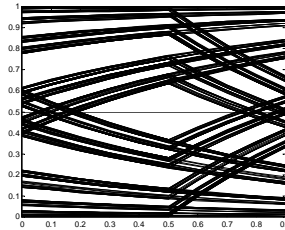
- $\mu_1$ : a logikai '1'-es szint,  $\mu_0$ : a logikai '0' szint átlagos értéke,
- $\sigma_1$  és  $\sigma_0$ : az '1'-s és a '0'-ás szint normál szórása

## Digitális moduláció – felfutási idő

- Adó, átviteli közeg, vevő határozza meg

$$\Delta t = \sqrt{\Delta t_{adó}^2 + \Delta t_{szál}^2 + \Delta t_{vevő}^2}$$

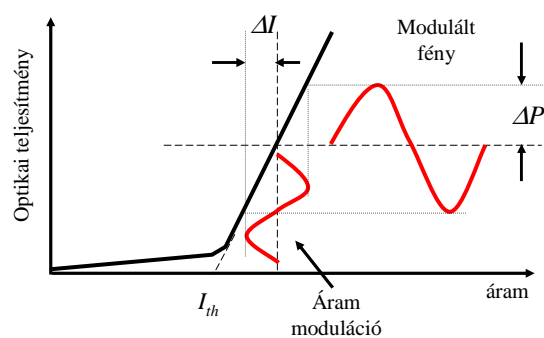
- A felfutási idő meghatározza a maximális adatátviteli sebességet
  - Maximum NRZ adatsebesség =  $0.7/(\Delta t)$   
Pl. 10 Gbit/s NRZ :  $\Delta t < 70$  ps !
  - Maximum RZ adatsebesség =  $0.35 /(\Delta t)$



## Intenzitás moduláció - megvalósítás

- Direkt/közvetlen moduláció
- Külső modulátor

## Direkt / közvetlen moduláció



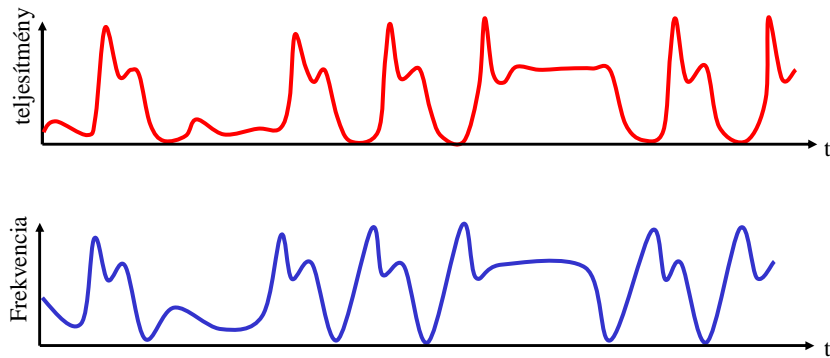
## Direkt / közvetlen moduláció

- Alacsony ár
- Egyszerű áramkör
- Alacsony teljesítményigény
- Alacsonyabb sebesség (<4Gbit/s)
- Chirp (intenzitás moduláció hullámhossz ingadozást okoz)
  - szélesíti a spektrumot => diszperzió következtében csökkenti az alkalmazható modulációs sávszélességet
  - Többcsatornás rendszerekben probléma
- OOK: nem kapcsoljuk ki teljesen a lézert, csak küszöbáramig csökkentjük
  - a lézertióda feléledése hosszú ideig tart és komoly sebességkorlátot jelentene
  - Lézertióda élettartamát csökkentené



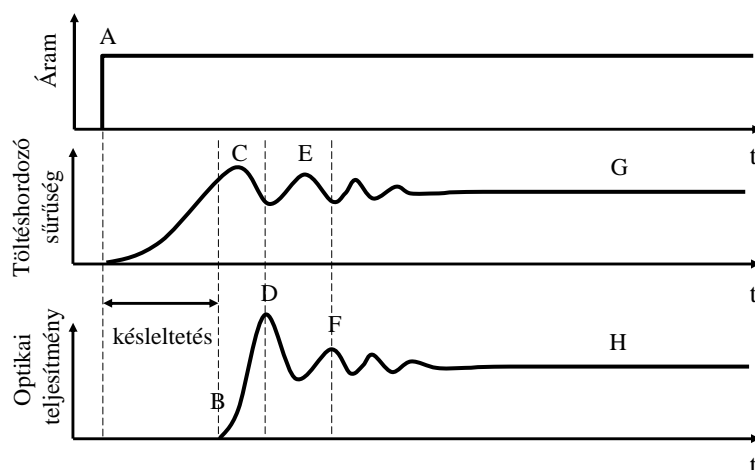
## Chirp

- Lézer közvetlen modulációja nem csak a fény intenzitását változtatja, hanem a frekvenciáját is
- Chirp: ez a nem kívánt frekvencia/fázis moduláció
- Jel spektrálisan kiszélesedik miatta => kromatikus diszperzió hatása nő



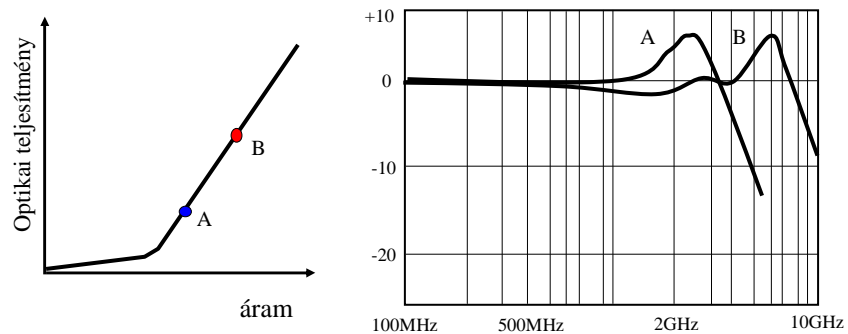
## Bekapcsolás jelensége

Késleltetés az áram injektálás és a fénykibocsátás között



## Modulációs sáv szélesség

- Meghatározza a maximális közvetlen modulációs sebességet
- az optikai és az elektromos mágneses tér közti kölcsönhatás
  - Fotonok és töltéshordozók száma közti összefüggés
  - a kondenzátor és a tekercs közti kölcsönhatás miatti rezgésre hasonlít
  - A határfrekvenciát a rezonancia (relaxációs oszcillációs frekvencia) szabja meg
- Munkapont függő (előfeszítő áram függvényében növekszik)  
=> csökken a lézer élettartama
- Nagyságrendileg  $n \cdot \text{GHz}$

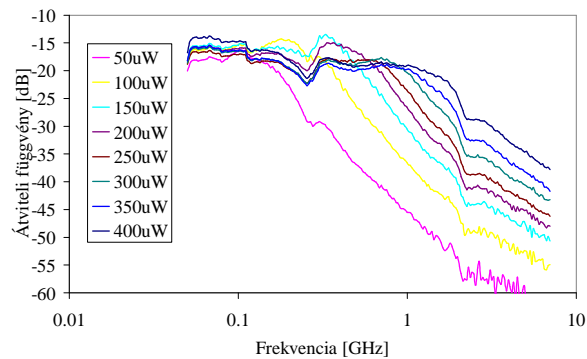


## Modulációs sáv szélesség mérése



Feltétel:  $B_{O/E} > B_{LD}$

$$\text{átvitel} = 10 \cdot \log \left( \frac{P_{RFki}}{P_{RFbe}} \right)$$



## Lézer zaj

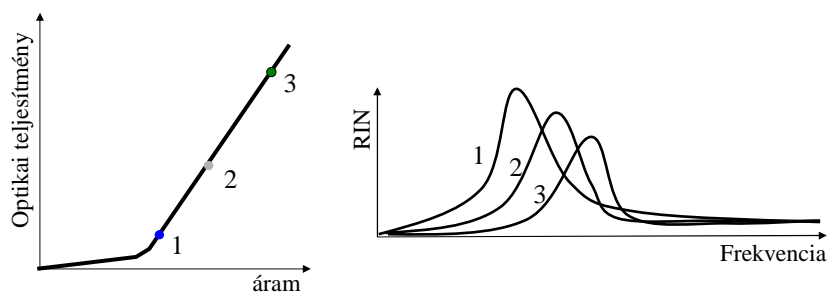
- Az előállított teljesítmény és frekvencia soha nem tökéletesen állandó, hanem véletlenszerűen ingadozik.
- Oka: a fotonok létrehozása diszkrét folyamat, véletlenszerűen, nem egyforma mennyiségben keletkeznek.
- RIN (Relative Intensity Noise)
  - A zaj spektrális sűrűségfüggvénye.
  - A zaj fényvívőhöz viszonyított teljesítményét adja meg egységnyi frekvenciára vonatkoztatva.
  - a relaxációs oszcillációs frekvenciánál zaj csúcserték található. A rezonancia frekvencia fölött a zajszint lecsökken, de a jelszint is csökken. Összességében a jel/zaj viszony romlik

$$RIN(f) = \frac{(\Delta P^2(f))}{P_L^2}$$

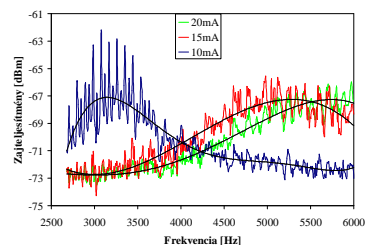
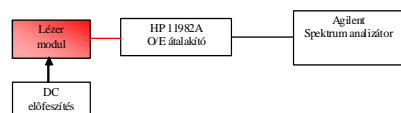
$P_L$  : a lézer állandósult állapotbeli kimenő optikai teljesítménye

$\Delta P^2(f)$  : a lézer optikai teljesítmény fluktuáció négyzetének spektrális sűrűsége

## Lézer zaj

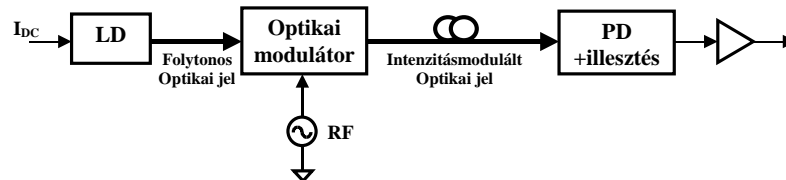


Mérés:



## Külső modulátor

- A lézerdíoda előfeszítése állandó => modulálatlan, folytonos optikai jelet bocsát ki
- Az intenzitásmodulációt a külső modulátor biztosítja (a fényáteresztő képességét változtatja a moduláló jel függvényében)
- Jellemzők:
  - nagy sebesség (> 4GHz)
  - Chirp-mentes megoldás is létezik
  - Drága optikai eszköz
  - nagy beiktatási csillapítás
  - nagyszintű moduláló jelet igényel



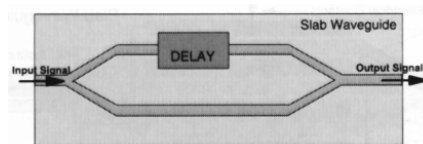
## Modulátor típusok

- **Elektrooptikai** és **Magnetrooptikai**
  - Elektromos vagy mágneses tér hatására az anyag változtatja optikai tulajdonságait
    - Fázisváltozás => speciális elrendezés szükséges
- **Elektroabszorpció**
  - Elektromos mező hatására változik az anyag fényelnyelő képessége
- **Akusztóoptikai**
  - Kristályban vagy planár hullámvezetőben a nagy frekvenciájú hang visszaveri a fényt

## Pockels hatás

- elektro-optikai anyag (tipikusan LiNbO<sub>3</sub>)
- Pockels-effektus
  - elektromos tér hatására elektrooptikai effektus: megváltozik az anyag  $\epsilon$  dielektromos állandója, tehát az optikai törésmutatója, így megváltozik a fény terjedési sebessége a anyagban
  - a hullámvezető kimenetén megjelenő jel fázisa változik
- Fázismoduláció
  - Nem használható közvetlenül modulálásra, mert drága és komplikált koherens vételi rendszert igényel

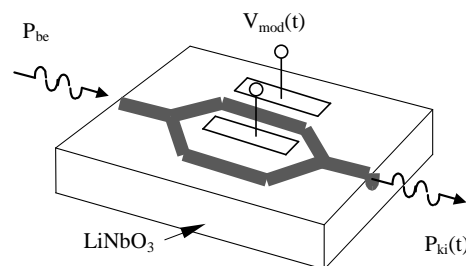
## Mach-Zehnder interferométer (MZI) (fizika)



- A két ág hulláma a kimenet előtt újra egybevezetve interferál egymással
- A két ág közti késleltetés/fázistolás függvényében konstruktív vagy destruktív az interferencia

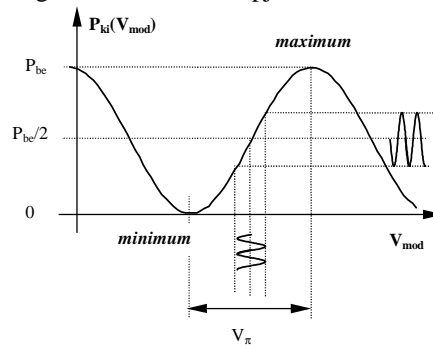
## MZ modulátor felépítése

- A lézerdiódából kijövő fényt optikai tápvonalban vezetve egy Y elágazással kettéválasztjuk, majd újra egyesítjük.
- V0 feszültséget kapcsolva az elektródákra, az egyik fényhullám fázistolást szenved a másikhoz képest
- A két ág hulláma újra egybevezetve, interferál egymással
- A két ág közti fázistolás függvényében a kimenő optikai teljesítményben modulációt figyelhetünk meg.



## MZ modulátor átviteli függvénye

- A kimeneten megjelenő optikai teljesítmény a moduláló feszültség függvényében.
- A modulátorra kapcsolt feszültséggel egyenesen arányos a fázistolás
- A fázistolás:  $[-\pi, +\pi]$
- modulálójel => intenzitásmoduláció a kimeneten.
- Meredek függvény => kis feszültségváltozásra nagyot változik a fénytelsítmény
- Az átviteli függvény szinuszos jellegű => erősen nemlineáris
- $V_\pi$ : az a feszültség, amelyet a modulátorra kell adni, hogy  $\pi$  (180°) fázistolás jöjjön létre az egyik ágban, azaz kioltás lépjen fel a kimeneten

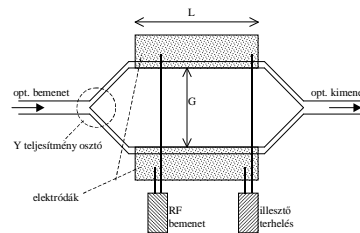


## MZ modulátor - push-pull elektróda elrendezés

- A gyakorlatban általában kételektrodás elrendezést alkalmaznak, amely „push-pull” működést jelent
- A két ágban egyidőben, ellentétes irányú fázistolást szenved az adott ágba vezetett fénycsugár.
- Fáziseltérés= $2\Delta\Phi$ , kimeneti optikai teljesítmény= $P_{ki}$

$$2\Delta\Phi = \pi \frac{V_0}{V_{\Pi}} = \pi \frac{V_0}{\frac{\lambda G}{2\Gamma n_e^3 r_{33} L}} \quad (\Rightarrow \Delta\Phi \sim V_0 \cdot L)$$

L: elektróda hossz  
 G: elektródatávolság  
 $r_{33}$ : elektrooptikai együttható  
 $\lambda$ : fény hullámhossz  
 $\Gamma$ : átfedési integrál  
 $n_e$ : az anizotrop LiNbO<sub>3</sub>-nak a „különleges irány”-hoz tartozó törésmutatója



$$P_{ki} = \frac{1}{2} (|E_A| - |E_B|)^2 + 2|E_A||E_B| \cdot \cos^2 \Delta\Phi = \frac{P_{be}}{2} \left\{ \frac{(1 - \sqrt{r_p})^2}{1 + r_p} + \frac{4\sqrt{r_p}}{1 + r_p} \cos^2 \left[ \frac{\pi V_0}{2 V_{\Pi}} \right] \right\}$$

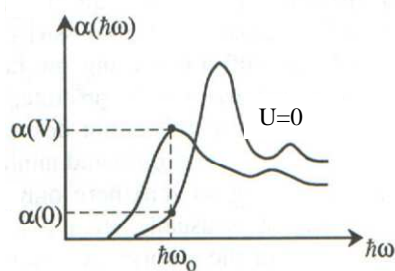
## MZ modulátor tulajdonságai

- a modulációhoz nagyobb szintű RF teljesítményt igényel, mint közvetlen modulációnál
- A modulátor nagy impedanciájú, ezért feszültségforrás típusú táplálást igényel
- jelentős optikai veszteség (kb. 10dB beiktatási csillapítás), optikailag illeszteni kell a jelforráshoz a modulátort
- sávzélessége több 10 GHz, míg közvetlen moduláció esetén általában csak 4-6 GHz
- Push-pull elrendezésnél „Chirp” nem jelentkezik
- drága, különleges anyagú (LiNbO<sub>3</sub>) eszközt igényel (külső modulátor ára: 5000-10000 USD, távközlési lézer: néhány száz USD)
- a vezérlőfeszültség és a kimeneti optikai jel szintje közötti nem lineáris összefüggés miatt a működés során a nemlinearitás erősebb hatással jelentkezik.

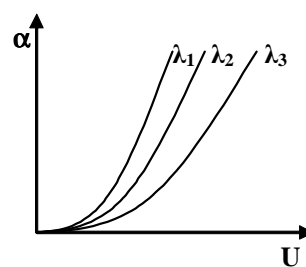
## Elektroabszorpciós modulátor

- Félvezető alapú (kvantumvölgyes struktúra)
- Veszteséges modulátor
- A ráadott előfeszítő feszültség függvényében változtatja az anyag abszorpciós együtthatóját
- Fényelnyelő tulajdonsága változik (bemeneti fény intenzitását különböző mértékben nyeli el)
- elektroabszorpciós hatás: a fény vesztesége változik az elektromos jel függvényében

## EAM – anyag fényelnyelő képessége



belépő fény  
hullámhossza

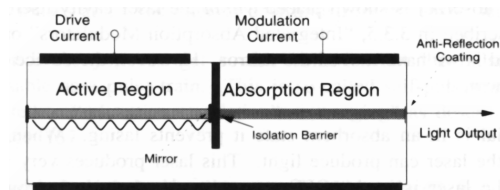


az eszköz előfeszítő  
feszültsége



## Elektroabszorpciós modulátor tulajdonságai

- Az elektro-optikai modulátorokkal összehasonlítva
  - alacsonyabb meghajtó jelet igényel, gyakorlatilag pár voltra van szükség (EO: több száz voltos feszültségigény)
  - A belső folyamatok nagyon gyorsan zajlanak le (ps), az eszköz sebességét a meghajtó feszültség változási sebessége korlátozza, ezt tipikusan a külső áramkör ellenállás-kapacitás határozza meg. Ennek megfelelően a modulációs sávszélesség párszor tíz GHz nagyságrendjébe esik, tipikusan 40Gbit/s sebességig használható.
  - Nagy előnye, hogy félvezető alapú, így könnyen integrálható egyéb elektrooptikai eszközökkel (lézerdióda, fotodetektor).
  - Rosszabb kioltási tényező



## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVMA05)

### Passzív optikai elemek

2015.03.30.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>

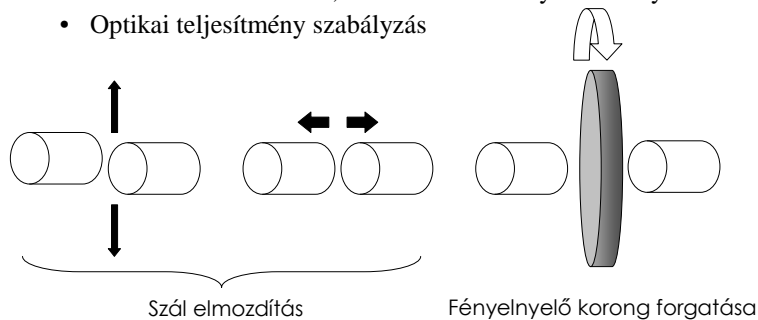


## Optikai távközlés - elemek

- Passzív komponensek
  - Fényvezető szál (pigtail, patchcord, kábel)
  - Csillapító
  - Osztó (splitter)
  - Csatoló (coupler)
  - Izolátor, cirkulátor
  - Multiplexer, demultiplexer, optikai szűrő (fix, hangolható)
- Aktív komponensek
  - Lézer (fix, hangolható) + modulátor
  - Fotodetektor => fotovevő
  - Optikai erősítő

## Optikai csillapító

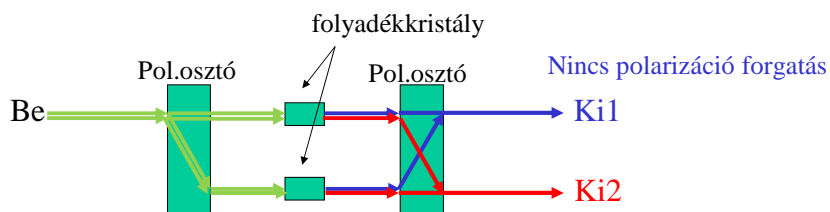
- Tulajdonságok
  - Beiktatási csillapítás
  - Reflexió (Return loss)
  - Működési hullámhossz tartomány (széles sáv)
  - Fix / Hangolható (hangolási tartomány, sebesség)
- Alkalmazás
  - WDM csatornák egyforma jelszintjének biztosítása
  - Vevő telítés elkerülése, dinamik tartományba szabályzás
  - Optikai teljesítmény szabályzás



## Vezérelhető optikai csillapító

Pl. folyadékkristályos kapcsoló

- Polarizációs hatás alapján, + polarizációs osztók
- Folyadékkristály: feszültség nélkül nem változtat, előfeszítő feszültséggel  $90^\circ$ -ot forgat a polarizáción
- Vezérelhető optikai csillapítás, ha folyadékkristályos cellát nem digitálisan vezéreljük



## Csatolók

Fényt csatol a bemeneti szál(ak)ból kimeneti szál(ak)ba

- Osztó (Splitter): az optikai jelet szétosztja több ágra
- Összegző (Coupler): összegzi az optikai jeleket
- Kereskedelemben rendelkezésre áll:
  - 1x2, 1x3 (osztó)
  - 2x2 (iránycsatoló)
  - 2x1, 3x1 (összegző)
  - Nagyobb méretek még fejlesztés alatt (kaszád megoldás)
- típusok:
  - 50% / 50% (3 dB) (3 vagy 4 port)
  - 1%, 5% vagy 10% taps (általában 3 port) => optikai jel monitorozás



## Fontos karakterisztikák

- Reflexió (Return loss, RL)
  - Az optikai eszköz a fény egy részét reflektálja
  - 0-100%
  - A visszavert teljesítmény [dB]
- Beiktatási csillapítás (Insertion loss)
  - Az eszközben való terjedés során fellépő jelvesztés
- Többlet veszteség (Excess loss)
  - Az elméleti minimumon felüli veszteség
  - Nincs tökéletes eszköz

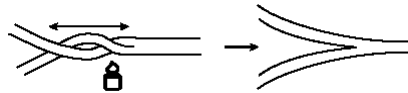
$$EL = -10 \cdot \log_{10} \frac{\sum P_{out}}{P_{in}}$$



## Beccatolás (2x1)

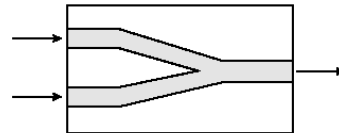
- Szál-összeolvasztás (FBT: Fused Biconic Taper Fiber)

– szál alapú technológia: csavarás, húzás, fűtés



- Planár hullámvezető

– technológia: integrált optika



## Kicsatolás (1x2)

- Osztók

– jel többszörözés

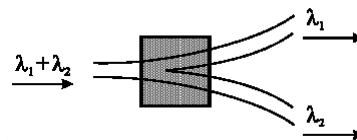
– pl.2 szeres osztó



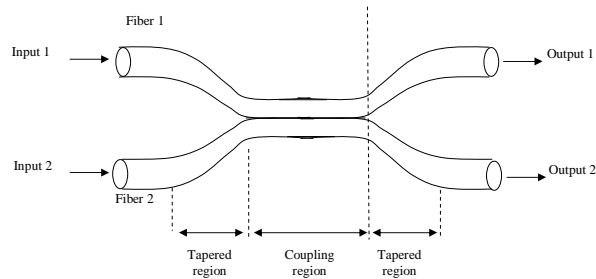
- (Szűrők)

– hullámhossz-alapú szétválasztás

– fix vagy hangolható



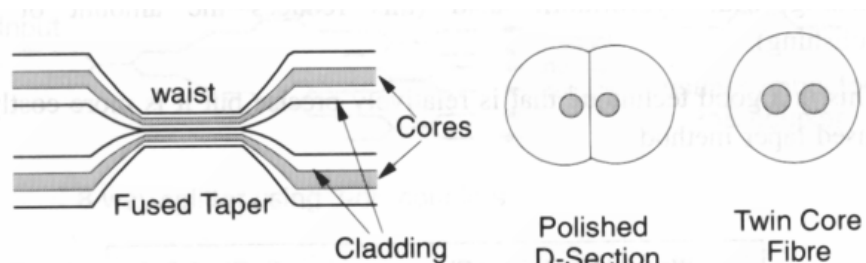
## Íránycsatoló (2x2)



- Leggyakoribb: 3 dB-es csatoló (felezi a teljesítményt)
  - Csak egy bemeneten van jel => osztóként működik
  - Mindkét bemeneten van jel => Mindkét kimeneten mindkét bemeneti jel megjelenik (fele teljesítménnyel)
  - Ha csak az egyik kimenetet használjuk => összegzőként működik

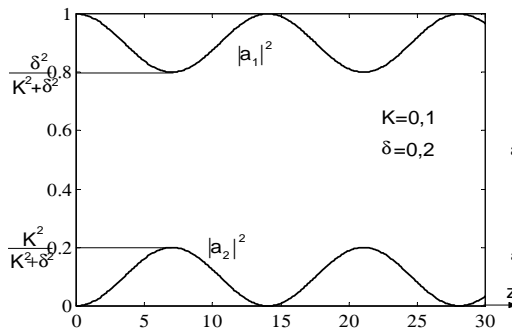
## Íránycsatoló - Gyártási módszer

- Szál alapú
  - Két egymódusú szálát összeillesztenek, melegítik és meghúzzák
  - A mag és a héj keskenyebb lesz
  - Nehéz nagy pontossággal szabályozni
  - Régóta ismert technológia
  - Olcsó
- Integrált optikai



## Íránycsatoló (2x2)

- Egyirányban haladó csatolt módusok teljesítménye a hely függvényében.
- $\delta = (\beta_1 - \beta_2)/2$  : aszinkronitás (szinkrontól való eltérés) mértéke
  - $\delta = 0$  , azaz azonos fázissebesség esetén periódikusan teljes energiacsere jön létre ,
- $|a_1|^2 + |a_2|^2$  : a szállított teljesítmény z-től független
- K: csatolási tényező,  $K=0 \Rightarrow$  nincs csatolás



Állapotegyenlet:

$$\frac{da_1}{dz} = -j\beta_1 a_1 - jK a_2 \quad \frac{da_2}{dz} = -jK a_1 - j\beta_2 a_2$$

$a_1(0)=1, a_2(0)=0$  peremfeltételekre érvényes megoldás:

$$a_1(z) = e^{-j\frac{\beta_1+\beta_2}{2}z} \left[ \cos\sqrt{K^2 + \delta^2}z + j\frac{\delta}{\sqrt{K^2 + \delta^2}} \sin\sqrt{K^2 + \delta^2}z \right]$$

$$a_2(z) = -je^{-j\frac{\beta_1+\beta_2}{2}z} \frac{K}{\sqrt{K^2 + \delta^2}} \sin\sqrt{K^2 + \delta^2}z$$

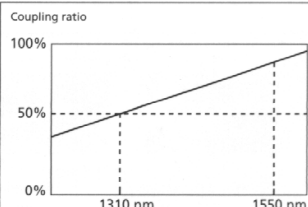
## Teljesítmény osztók

Teljesítmény  
osztók

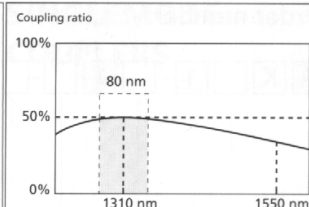
Standard-Singlemode-Couplers (SSC)

Wavelength-Flattened Couplers (WFC)

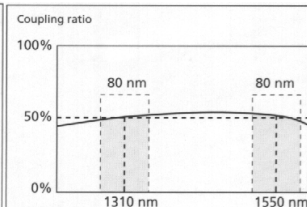
Wavelength-Independent Couplers (WIC)



Wavelength dependence of coupling ratio of a symmetrical SSC for 1310 nm



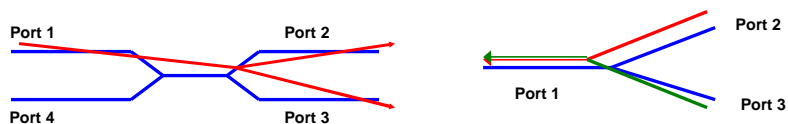
Wavelength dependence of coupling ratio of a symmetrical WFC for 1310 ± 40 nm



Wavelength dependence of coupling ratio of a symmetrical WIC

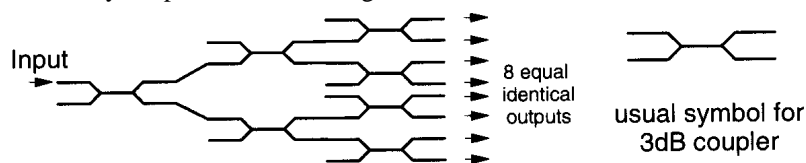
## Reciprocitás

- Mindkét irányba szimmetrikusan működnek
- Pl. Iránycsatoló
  - 1. bemeneti jel fél-fél teljesítménnyel jut a két kimenetre (2. és 3. port)
  - 2. portra („kimenet”) kapcsolt jel fél-fél teljesítménnyel jut a két „bemenetre” (1. és 4. port)
- Pl. osztó (Y splitter)
  - 1. bemeneti jel fél-fél teljesítménnyel jut a két kimenetre (2. és 3. port)
  - 2. portra („kimenet”) kapcsolt jel csillapodva (50% =>3 db) jut a „bemenetre” (1. port)
  - Lehet összegzőként is használni, de minden jel teljesítménye csillapodik 50%-ot



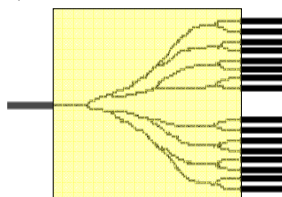
## Nagyméretű csatolók

- Hagyományos 3dB iránycsatolók kaszkádba kapcsolásával hozható létre (n-way splitting)
- 3dB veszteség lépésenként
  - 8 way coupler: 9 db veszteség minden kimenetre



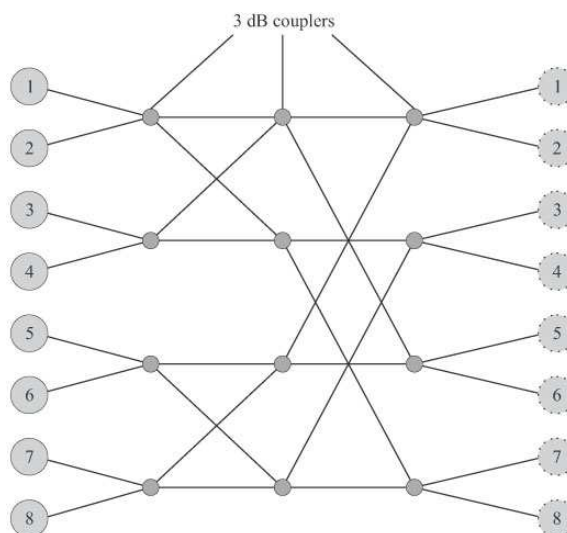
8-way splitter using 3-dB couplers

- Integrált optikai kivitel





## 8x8 csillag csatoló (star coupler)

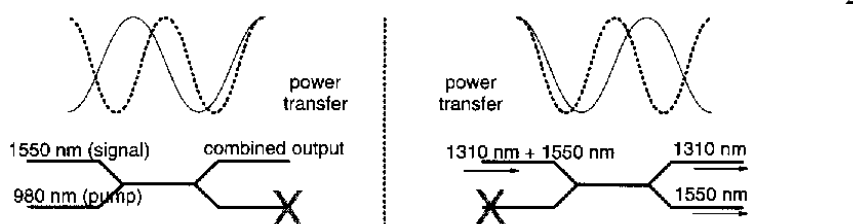


Minden bemenetről egyenletes teljesítmény elosztás minden kimenetre

## Hullámhossz szelektív csatolók

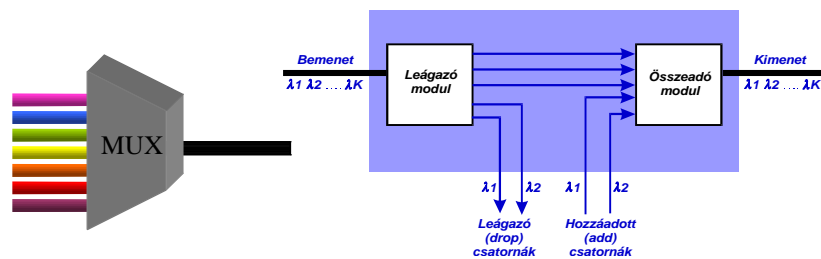
Wavelength-division multiplexers (WDM) / Standard Single mode Couplers (SSC)

- 3 port (4. port nincs kivezetve)
- reciprok – alkalmazható mint multiplexer és mint de-multiplexer
- Két különböző hullámhosszú optikai jel be- vagy kicsatolása ugyanazon szálba/ból
  - 1310 / 1550 nm (klasszikus/egyszerű WDM csatoló)
  - 1480 / 1550 nm és 980 / 1550 nm (EDFA pumpáló jel becsatolása)
  - 1550 / 1625 nm (hálózat monitoring, WDM rendszer management csatorna)
- Tulajdonságok
  - Kis csillapítás (< 1 dB) a hasznos hullámhosszon
  - Nagy csillapítás (20 to 50 dB) a többi hullámhosszra



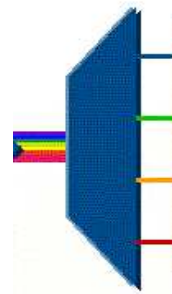
## Multiplexerek

- Optikai végződő multiplexer (OTM)
- Optikai leágazó multiplexer (OADM)
  - Fix
  - Dinamikusan vezérelt



## Optikai csatornák szétválasztása

- Optikai DEMUX, hullámhossz szétválasztás
- Optikai szűrő
- Paraméterek:
  - Szelektivitás, áthallás
  - Beiktatási csillapítás, polarizáció függés
- Megvalósítás
  - Száloptikai
  - Integrált optikai (planár hullámvezető)

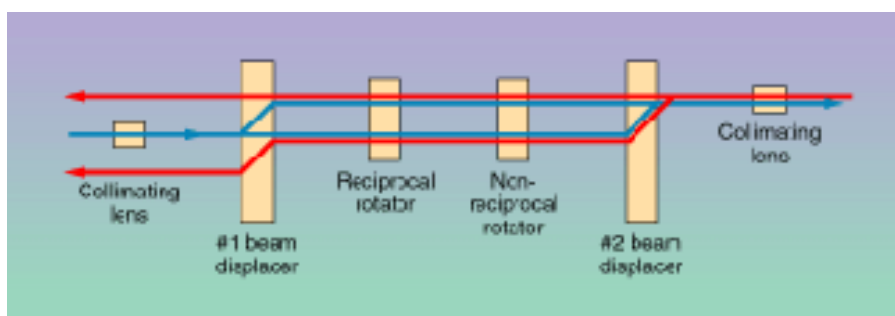


## Optikai Izolátor

- A fény számára egyirányú terjedést tesz csak lehetővé (nem reciprok, passzív eszköz)
- Alkalmazás: reflexió káros hatásainak megelőzésére
  - Lézer reflexiótól való védelme (nagyobb élettartam, frekvencia stabilitás, ideálshoz közelebb teljesítmény-áram görbe, egyenletesebb kimeneti teljesítmény)
  - Lézerek egymástól való védelme (pl. EDFA)
- Működés alapja: Faraday hatás (magnetro-optikai forgató) + polarizáció szűrő
  - Asszimetrikusan forgatja a polarizációs állapotot
  - Erős mágneses mező szükséges, Negyedhullámú lemez
- Tulajdonságok
  - Izoláció: csillapítás kimenetről bemenetre (20-40 dB, két fokozattal 40-80 dB)
  - Beiktatási csillapítás (0.2 – 2dB, tip. 0.5dB)
  - Reflexió (csatlakozók nélkül:  $RL > 60\text{dB}$ )



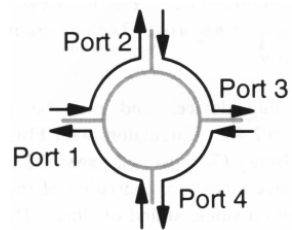
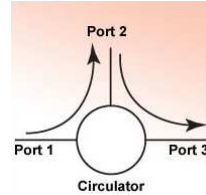
## Polarizáció érzéketlen Optikai izolátor



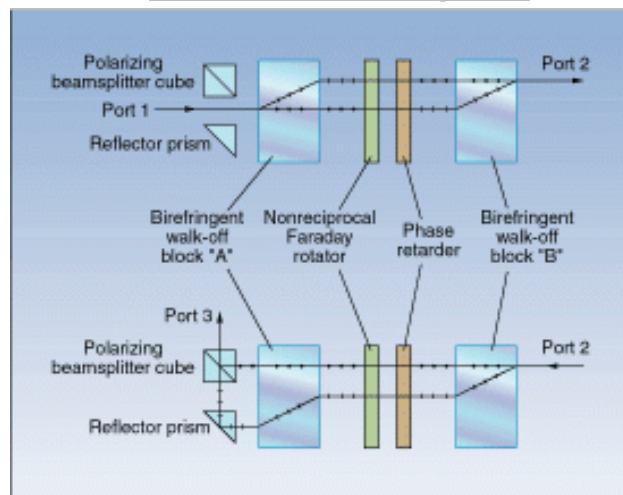
7-FCH-6 Fig 3

## Cirkulátor

- 3 / 4 port
- Nem reciprok
- Kétirányú jelterjedés szétválasztása
- Tulajdonságok
  - Beiktatási csillapítás (tip. <1dB) 1-2, 2-3
  - Izoláció (tip. >40dB) 2-1, 3-2
  - Irányítottság, Directivity (tip. >50dB) 1-3
  - Return loss (tip. >50dB)
- Alkalmazás
  - DWDM hálózatok
  - Polarizáció diszperzió kompenzálás
  - Optikai add-drop multiplexer (OADM)
  - Optikai erősítők
  - Száloptikai érzékelők
  - OTDR



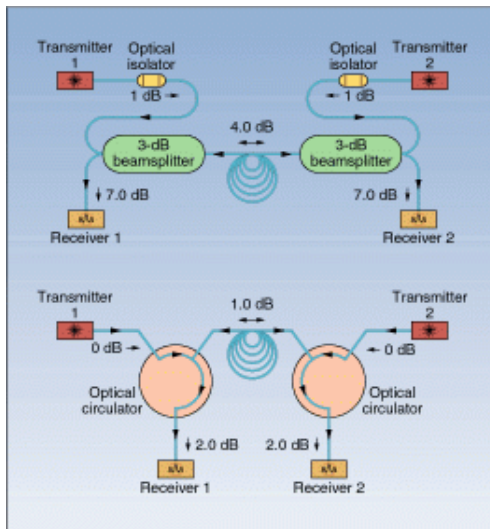
## Cirkulátor - felépítés



11-FFA-6 Sidebar Figure

## Cirkulátor - alkalmazás

Kétirányú átvitel egy optikai szálon

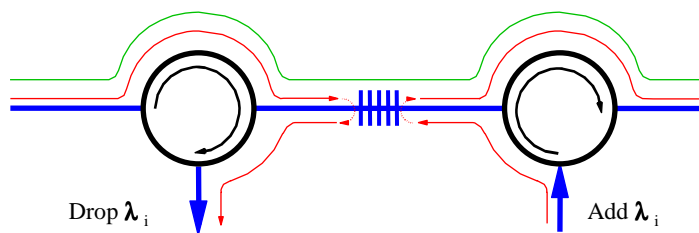


- Minden jelút tartalmaz:  
2 db 3-dB iránycsatolót  
1 db izolátort  
=> nagy csillapítás (>7dB)

- Minden jelút 2 db optikai izolátort tartalmaz (kb. 2dB csillapítás)

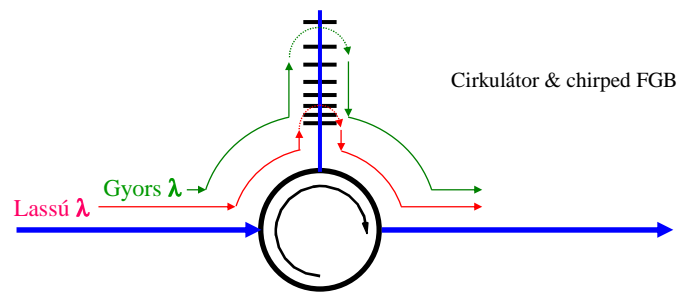
## Cirkulátor – alkalmazás

Add/drop



## Cirkulátor - alkalmazás

Kromatikus diszperzió kompenzálás



## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVMA05)

### Optikai erősítők

2015.03.16.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu



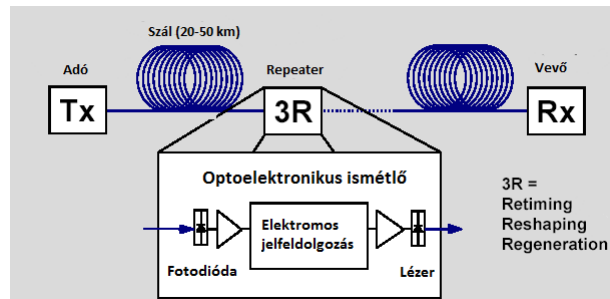
Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



## Összeköttetés hosszának növelése

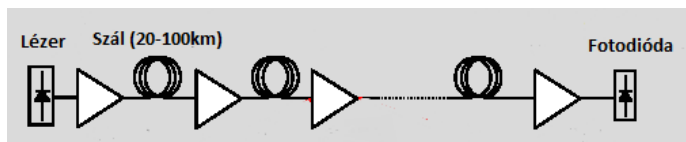
- Nagyobb adóteljesítmény (1mW – 50mW)
- Nagyobb vevőérzékenység
  - Anyag megválasztása
  - Lavinadióda használata
  - Zajszint csökkentése: kisimpedanciás vagy transzimpedanciás vevőstruktúra
- Kisebb átviteli csillapítás
  - Hullámhossz megválasztása
  - Speciális, kis csillapítású fényvezető szál
- Ismétlőállomás
  - Elektro/optikai ismétlő
  - Optikai erősítő

## Csillapítás kompenzálása Hagyományos rendszer



- ✗ Komplikált, sok elemet tartalmaz (minden hullámhosszra külön ág)
  - ✗ Drága
  - ✗ Nagy karbantartási igény
  - ✗ Nagy teljesítmény igény
- ✗ Nem átlátszó optikailag
  - ✗ Sebességet elektronikus rész korlátozza
  - ✗ Moduláció nem változtatható flexibilisen
- ✓ 3R

## Optikai erősítő rendszer

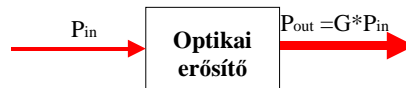


- ✓ Nem igényel modulációfüggő elektronikát
  - ✓ Moduláció, sebesség változtatható (flexibilitás)
- ✓ Több csatorna együttes erősítése (DWDM)
  - ✓ Csatornaszám változtatható (flexibilitás)
- ✓ Kétirányú átvitel (gyakorlatban nem használt)
- ✓ Megbízhatóság
- ✓ Alacsonyabb ár (nagy csatornaszám esetén)
- ✓ Több típus, alkalmazástól függ melyik optimális
- ✗ Csatornák közti áthallás
- ✗ 1R



## Optikai erősítő

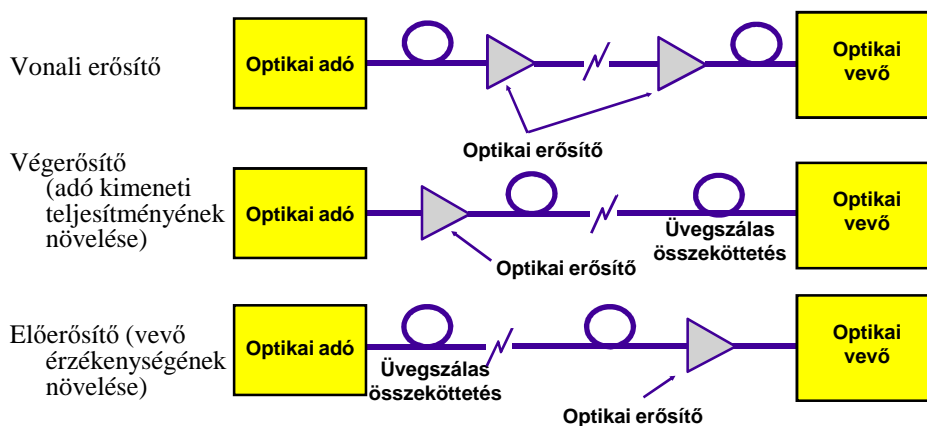
Közvetlen optikai tartományban O-E és E-O átalakítás nélkül



- Erősítés,  $G^{[dB]} = 10 * \log(P_{out}/P_{in})$
- Zaj (F), ASE – erősített spontán emisszió (előre és vissza irányú)
- Telítődés ( $P_{outsat}$ ), maximális kimeneti teljesítmény
- Sávszélesség, B (3dB-es pontok)

## Optikai erősítő - alkalmazás

Alkalmazás: csillapítás limitált rendszerekben (nem diszperzió korlátozza a max. távolságot) az optikai veszteségek kompenzálása



## OA alkalmazás

### *Előerősítő*

Nagyon alacsony bemeneti jelszint => alacsony zajú erősítő  
 Kimeneti jele közvetlenül a vevőre jut => korlátozott erősítés  
 Általában nincs visszacsatolásos vezérlés, hiszen telítetlen üzemmódban működik

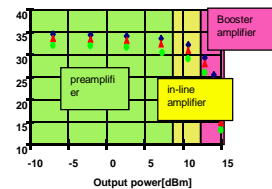
### *Végerősítő*

DFB lézerek kimeneti teljesítménye kb. 2 mW  
 Üvegszálaban 100 - 200 mW összteljesítmény felett korlátoznak a nemlineáris hatások  
 <+17 dBm kimeneti optikai teljesítmény  
 Kábel TV rendszerekben is használják

### *Vonali erősítő*

Nagy erősítés, nagy kimeneti jelszint és alacsony zajtényező  
 Tulajdonképpen kaszkádba kapcsolt előerősítő és végerősítő  
 (a modern vonali erősítők tényleg ezen az elven működnek: többszekciós erősítő izolátorral elválasztva)  
 30-70 km-enként installálják a rendszerbe  
 Tengeralatti összeköttetésnél távolról táplált (200km-nél hosszabb link, elektronikus hozzáférés nem megoldható)

Tipus	Erősítés	Maximum kimeneti teljesítmény	Zajtényező
Végerősítő	Nagy	Nagy	Nem fontos
Vonali erősítő	Közepes	Közepes	Jó
Előerősítő	Alacsony	Alacsony	alacsony (< 5 dB)



## Optikai erősítő - Típusok

- Száloptikai erősítő
  - Adalékolt optikai szál
    - EDFA-Erbium Doped Fiber Amplifier (1990-től)
  - Nemlineáris hatások
    - Raman (2000-től)
    - Brillouin
- Félvezető optikai erősítő (SOA, SLA)

## Adalékolt üvegszál

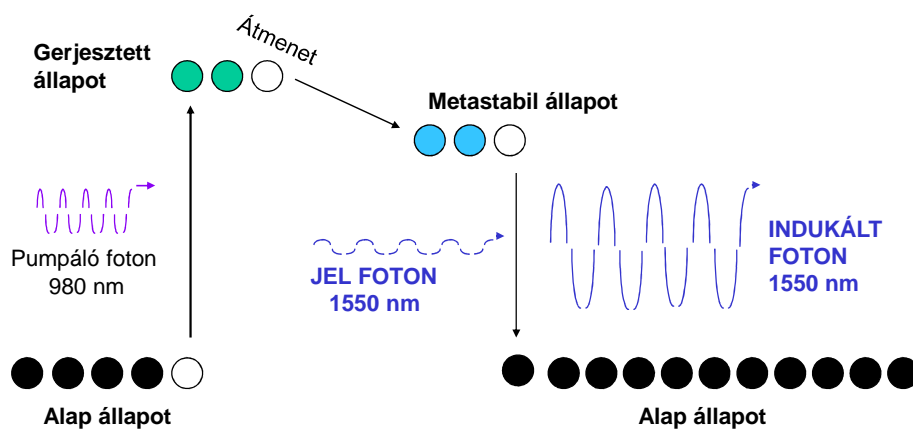
- Hagományos Si üvegszál közel földfémmel adalékolva
- Működési hullámhosszt az adalékanyag határozza meg
- Adalékoló anyagok:
  - Erbium => EDFA, 1555nm
  - Holmium
  - Neodémium 1060, 1310nm
  - Túlium
  - Itterbium
  - Prazeodimium 1300nm

## Adalékolt üvegszál – működés alapja

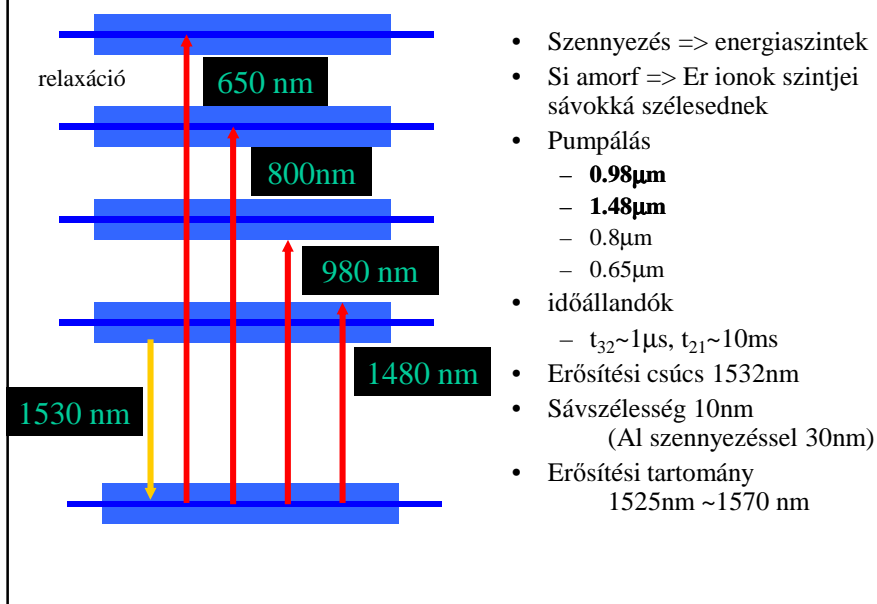
Inverz populáció

=> Indukált emisszió a domináns folyamat => optikai erősítés

Spontán emisszió => zaj

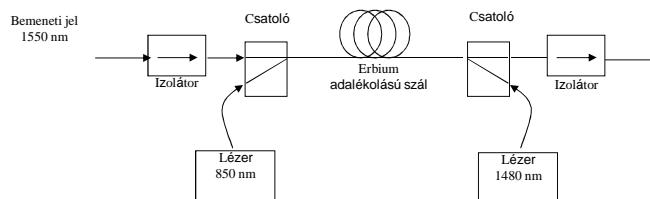


## EDFA - energiaszintek

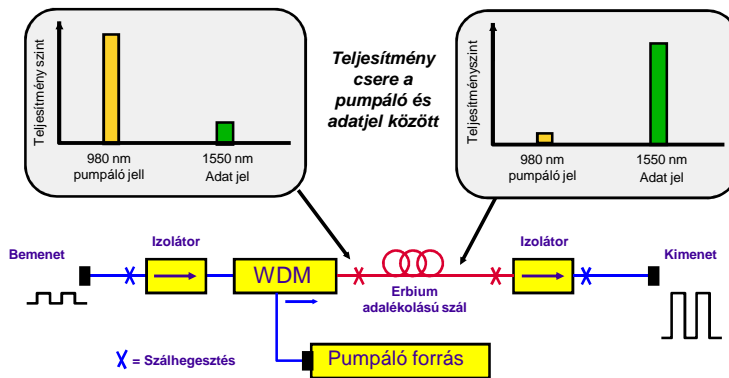
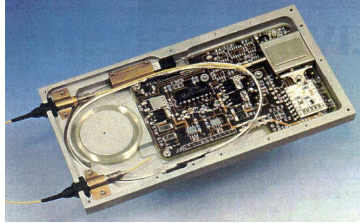


## EDFA – pumpálási módok

- Egyirányú
  - Szál elején nagyobb pumpáló intenzitás
  - Alacsony zajtényező
- Ellentétes irányú
  - Szál végén nagyobb pumpáló intenzitás
  - Nagy kimeneti teljesítmény
- Kétirányú
  - Egyenletes pumpálás, egyenletes populáció inverzió => erősítő hossza mentén egyforma erősítés
  - Alacsony zajtényező & nagy kimeneti teljesítmény
  - Két pumpáló lézer

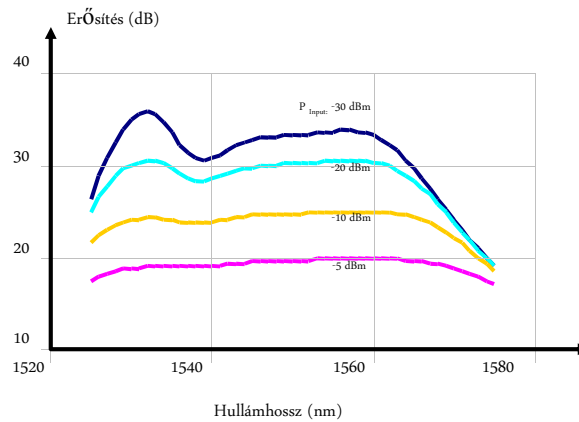


## EDFA

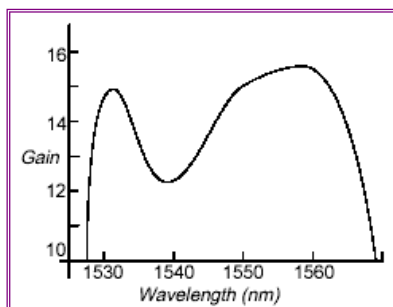


## Optikai erősítés (G)

- $G = P_{Ki} / P_{Be}$   
 $P_{Ki}$ : Kimeneti optikai teljesítmény (erősítő zajteljesítménye nélkül)  
 $P_{Be}$ : Bemeneti optikai teljesítmény
- Függ a bemeneti optikai teljesítménytől (telítés)
- Függ a bejövő jel hullámhosszától



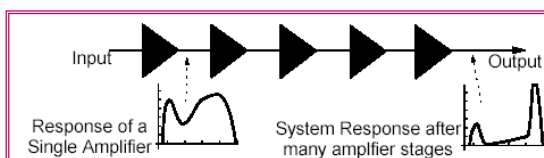
## EDFA erősítés



Az erősítés hullámhosszfüggő  
1560 nm-en 3 dB-lel magasabb, mint  
1540 nm-en (ez kétszer nagyobb  
kimeneti jelteljesítményt jelent).

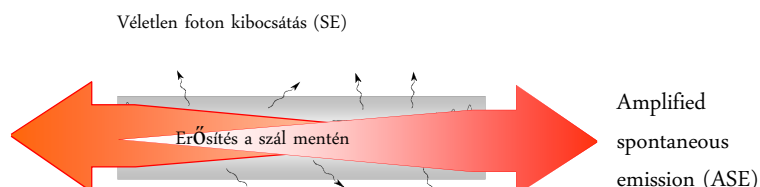
Ez nem mindig nagy korlátozás  
(egycsatornás rendszer vagy kevés  
erősítő rendszerben)

**A nagy távolságú WDM  
rendszerek nagy számú  
csatornát használnak, a jel sok  
erősítőn halad át. Tehát a  
különbségek összeadódnak.**



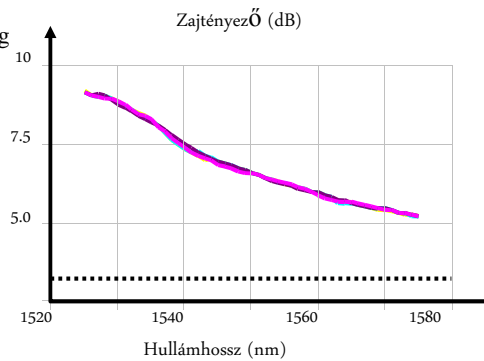
## Erősített spontán emisszió (ASE)

- Véletlenszerű fotonkibocsátás(1520 ... 1570 nm)
  - Spontán emisszió (SE) nem polarizált és nem koherens
  - SE foton további fotonokat generál az indukált emisszió miatt
  - Ha nincs bemeneti jel, akkor csak a spontán emisszió miatt van fénykibocsátás
  - Bemeneti jel fogyasztja az elektronokat → kisebb ASE



## Zajtényező (F)

- $F = P_{ASE} / (h \cdot \nu \cdot G \cdot B_{OSA})$ 
  - $P_{ASE}$ : ASE teljesítmény (OSA-val mérhető)
  - $h$ : Plank állandó
  - $\nu$ : Optikai frekvencia
  - $G$ : EDFA erősítés
  - $B_{OSA}$ : Optikai sávzélesség [Hz] (OSA sávzélessége)
- Függ a bemeneti optikai teljesítménytől
- Függ a bejövő jel hullámhosszától
  - Telített esetben elsősorban ettől függ
- Elméleti határ: 3dB

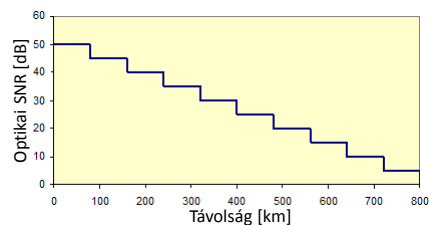
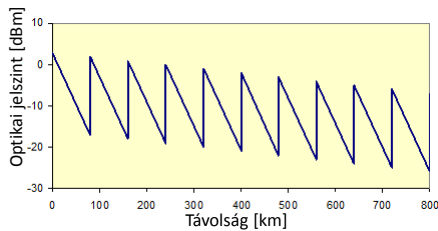


## Zaj - kaszkádba kapcsolt erősítő



Optikai erősítő

Szálszakasz



Szálszakasz:  $a=0.25$  dB/km, 80 km

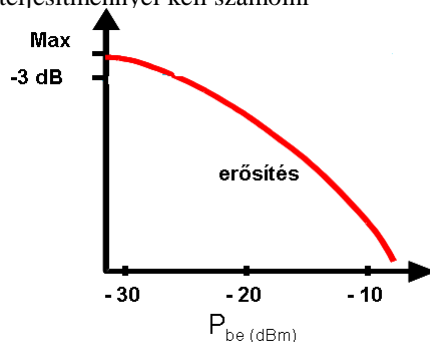
Erősítő:  $G=19$  dB,  $F=5$  dB

Adó: SNR=50 dB

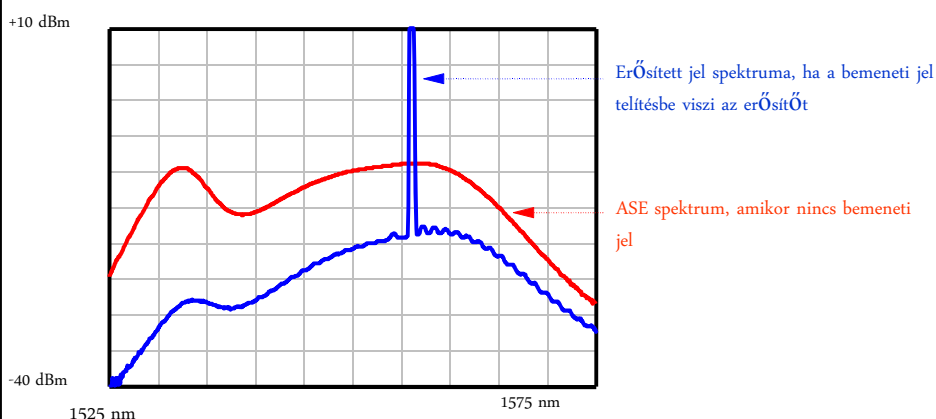
Ha SNR=30 dB szükséges, akkor az összeköttetés maximális hossza: 300 km

## Telítés

- Telítésben az erősítés következtében az erbium ionok elfogynak => nem képes az eszköz további erősítésre
- Telítési tartományban a teljes kimeneti teljesítmény közel állandó, független a bejövő jel teljesítményének változásától
- Telítésben kisebb a zajtényező (kisebb ASE értéke is)
- Általában az erősítés szintjének változása nem tudja követni a moduláció változását (EDFA időállandó  $\approx$ ms, moduláció sebessége  $>$ kHz), ezért az átlag optikai teljesítménnyel kell számolni



## Kimeneti spektrum





## Egyenletes erősítés – megoldási lehetőségek

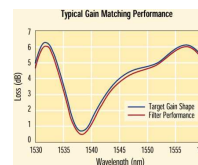
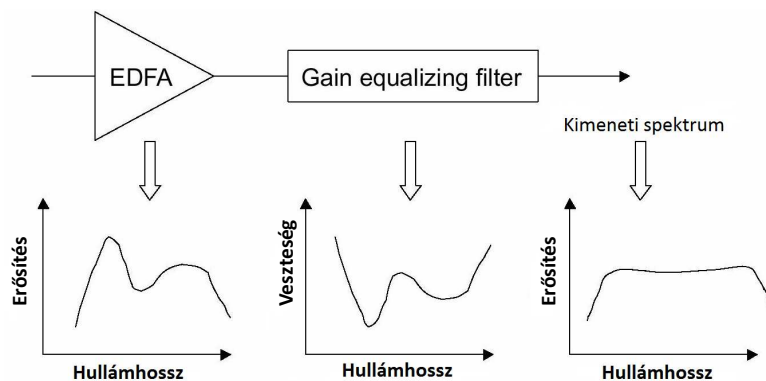
Eszköz szinten:

- 77° K-on (kb.-196C) működik az eszköz => sokkal jobb (egyenletesebb) spektrum  
Nem praktikus megoldás
- Egyéb adalékoló anyagok alkalmazása az erbium mellett (pl. aluminium, ytterbium).
- Az erősítő hossza is befolyásolja a görbe ingadozását
- Visszacsatoló hurkon keresztül vezéreljük a pumpáló forrást, így csökkentjük ASE-t
- Helyileg egy extra WDM csatornát adunk az erősítőre, ezzel korlátozzuk az erősítést ("gain clamping").
- Az erősítőben a hullámvezető alakjának manipulálása

Rendszer szinten:

1. FBG szűrő => csökkenti a frekvenciaválasz csúcsát
2. Későbbi erősítő karakterisztikája kompenzálja a frekvenciafüggést

## Egyenletes erősítés FBG-vel



## Hagyományos EDFA

- Leginkább egycsatornás rendszerben az 1550 nm-es ablakban
- Alkalmazható: előerősítő, végerősítő és vonali erősítő
- DWDM rendszerekbe nem elegendő az egyenletes erősítéshez tartozó sávszélesség (1545-1558nm)  
=> speciális EDFA-ra van szükség

Erbium Doped Fibre Amplifier		EDFA-14	EDFA-16	EDFA-19
Wavelength Range	nm	1525-1565	1525-1565	1525-1565
Saturation Power	dBm	14	16	19
Maximum Gain in Small Signal	dB	>35	>38	>40
Optimum Gain Flatness (1545-1558nm)	dB	0.6	0.6	0.6
Noise Figure	dB	<6	<6.5	<6
Min. Isolation at Input and Output	dB	30	30	30
Connectors		FC/APC	FC/APC	FC/APC

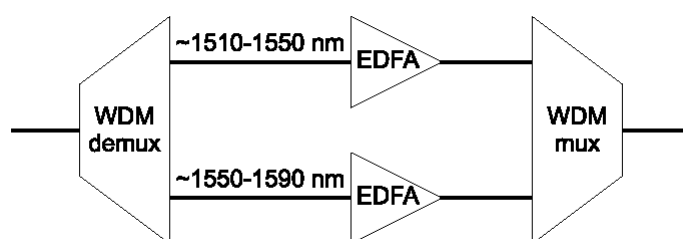
## Egyenletes erősítési spektrum

- Feltétel: erősítés ingadozása < 1 dB (1530-1565 nm)  
–ITU-T DWDM C sáv: 1530 - 1567 nm
- Tulajdonságok változása  
–Kisebb működési sáv, de azon belül egyenletesebb erősítés  
–Kisebb telítési teljesítmény  
–Kisebb erősítés

Flat Gain EDFA		EDFA-FG13	EDFA-FG15	EDFA-FG18
Wavelength Range	nm	1530-1560	1530-1560	1532-1560
Saturation Power	dBm	13	15	18
Gain Value	dB	>20	>22	>25
Optimum Gain Flatness (1530-1560nm)	dB	<1	<1	<1
Noise Figure	dB	<6.0	<6.5	<6.0
Min. Isolation at Input and Output	dB	30	30	30
Connectors		FC/APC	FC/APC	FC/APC

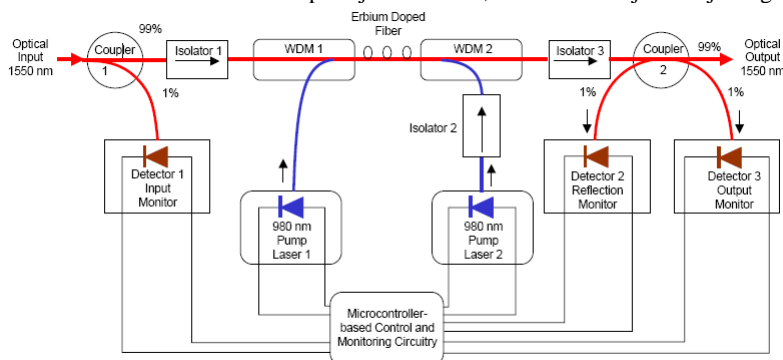
## Kéttablakos erősítő

- Speciális esetben nem elegendő a C sáv használata
- Kéttablakos erősítés
  - Két erősítő
  - MUX & DEMUX
- Igyekszünk kerülni (gyakorlatban jelenleg nem alkalmazott)



## „valódi” eszköz - Biztonsági megoldások

- Bemeneti teljesítmény monitorozás
  - A vezérlő elektronika lekapcsolja a pumpáló forrást, ha a bemeneti jel szintje több, mint 2-20  $\mu$ s-ig meghalad egy küszöbszintet => erősítő védelme
  - A bemeneti jel szintje túl alacsony => EDFA lekapcsol
- Reflexió szintjének monitorozása
  - lezáratlan csatlakozó a kimeneten => lézer biztonsági kockázat
  - Egyenes határfelületű (PC) csatlakozó tipikusan a fény 4%-át reflektálja
  - A vezérlő elektronika lekapcsolja az erősítőt, ha a reflektált jel szintje magas



## EDFA korlátok

- Sávszélesség (35nm)
- Zaj ( $F > 3\text{dB}$ )
- Diszkrét pontban nagy teljesítmény növelés  
=> EDFA utáni szakaszon nagyobb nemlinearitás

## Raman erősítő

- Raman Fibre Amplifier (RFA)
- Üvegszál belső nemlinearitását használjuk ki
- Az erősítő működési hullámhossza
  - Függ a pumpáló jel hullámhosszától
  - Pl. 1500nm-es pumpáló jel => 1560-1570 nm erősítési sáv
- Önállóan vagy EDFA-val együtt
- 2005-2008 - tól

## Stimulált Raman Szórás (SRS)

fotonok és optikai fononok közötti kölcsönhatás

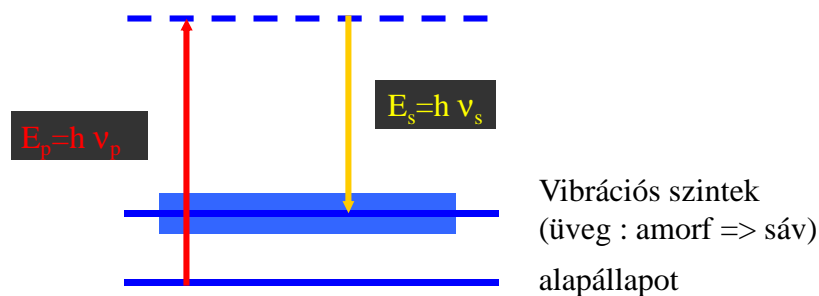
Si szálon erős pumpáló foton energiája

=> más frekvenciájú új foton

=> elnyelődik, molekuláris vibráció, optikai fonon

(atomrács mechanikus rezgése)

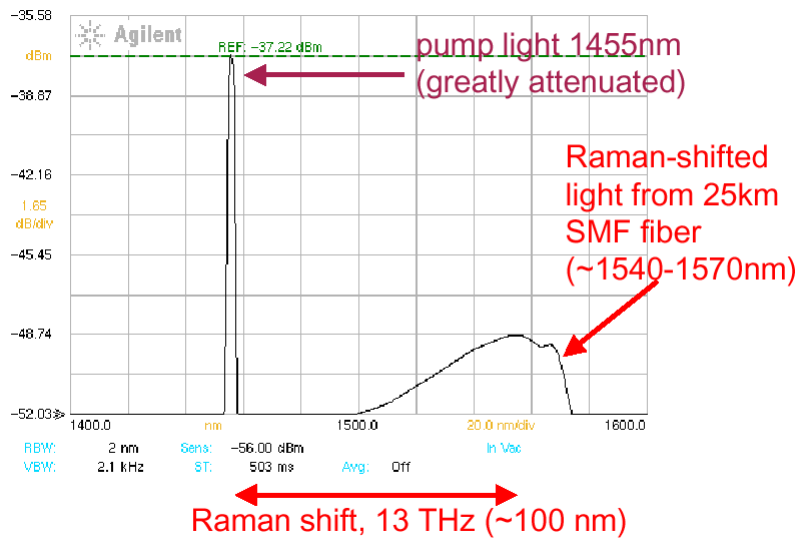
Eredeti hullám: pumpáló hullám, szórt hullám: stokes hullám



## Stimulált Raman Szórás (SRS)

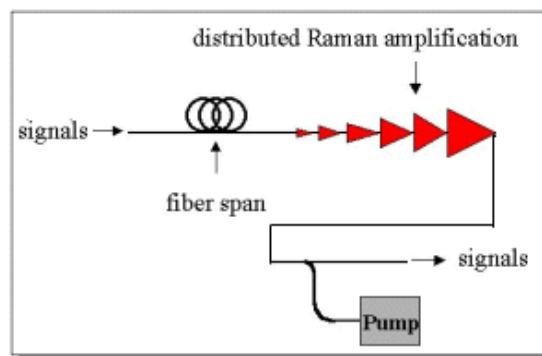
- Két fényyaláb közötti kölcsönhatás
- Optikai küszöb teljesítmény:
  - Függ: eszköz felépítés, lézer vonalszélesség, moduláció, stb
  - Tipikusan : 1-1.5 W (egycsatornás rendszer, keskeny CW forrás, SMF-28)  
( $P[\text{W}] = 5.9 \cdot 10^{-2} \cdot d^2[\mu\text{m}] \cdot \lambda[\mu\text{m}] \cdot a[\text{dB/km}]$ )
  - *kritikus csatornák közötti távolsággal rendelkező WDM rendszerben csak ~1 mW (!)*
- $\approx 13$  THz pump és jel frekvenciája között (hullámhosszban  $\approx 100\text{nm}$ )
- $\approx 6$  THz Sáv szélesség (vibrációs sáv szélessége)
- Eszköz hossza  $\sim 1.3\text{km}$
- $g \approx 10^{-11} \text{ cm/W} \Rightarrow$  erősítés  $\approx 30\text{dB}$
- Hatása: jelcsillapítás, csatornák közötti áthallás (WDM)
- A jel terjedési irányában és ellentétesen is jelentkezik

## Raman erősítés



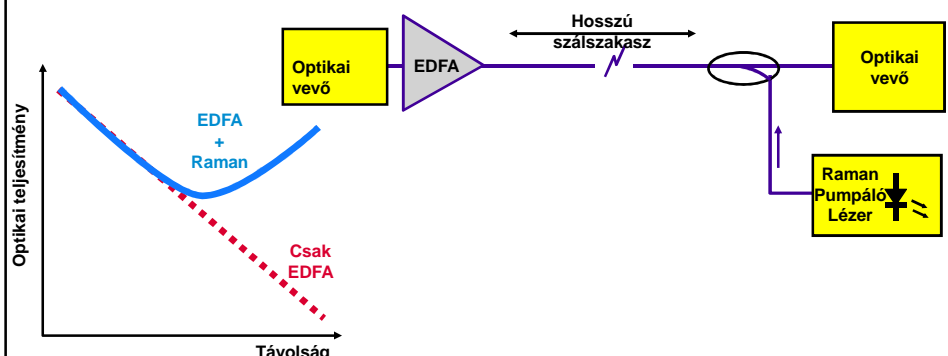
## Elosztott Raman erősítés

- Raman erősítésre az adattovábbításra használt üvegszál-szakaszt használjuk
- Raman pumpálás ellentétes irányú, a vevő oldalon helyezkedik el
- Az erősítés maximális a vevő közelében és csökken az adó irányába



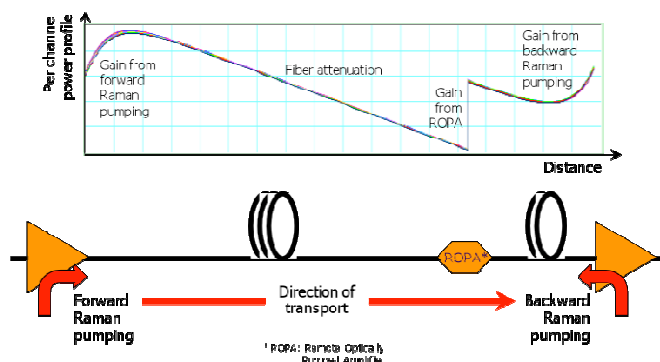
## EDFA & Raman együttes használata

- Ha csak az adó oldalon alkalmazunk egy EDFA-t, akkor a szál mentén csökken a jel teljesítménye
- EDFA (az adó oldalon) és Raman erősítő (a vevőoldalról) együttes alkalmazásával a minimális optikai teljesítmény nem a szálszakasz végén lesz

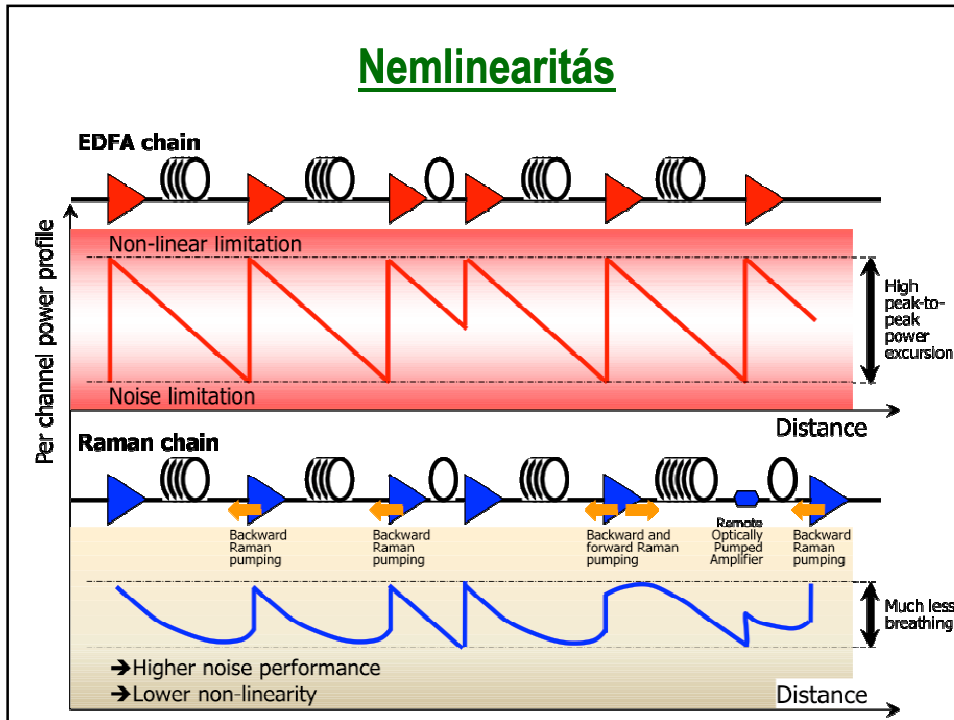


## EDFA & Raman együttes használata

- Raman előre irányban: üvegszál mentén nő a teljesítmény
  - EDFA: diszkrét ponton hirtelen teljesítmény növelés
  - Raman visszirányú: üvegszál mentén nő a teljesítmény
  - Üvegszál: csillapítás
- ⇒ a minimális optikai teljesítmény nem a szálszakasz végén lesz
- ⇒ kisebb teljesítmény ingadozás a link mentén => nemlinearitás hatása kisebb

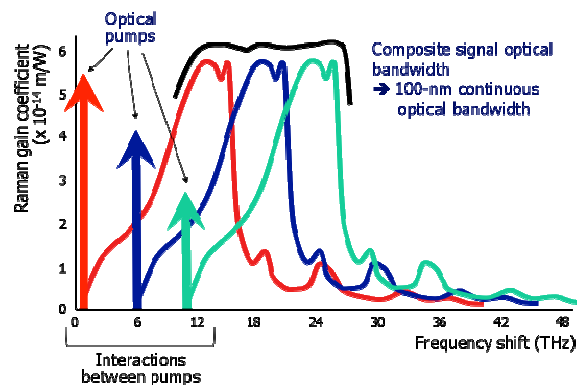


## Nemlinearitás



## Szélessávú erősítés

- Rendkívül széles erősítési spektrummal rendelkezhet
- Több nagyteljesítményű pumpáló lézer használatával nagy hullámhossz sávban nagy erősítést lehet megvalósítani
- 2 pumpáló forrással 93 nm sávszélességű erősítést is demonstráltak már
- Kérdés mekkora a max. megvalósítható sávszélesség (400 nm megvalósítható?)

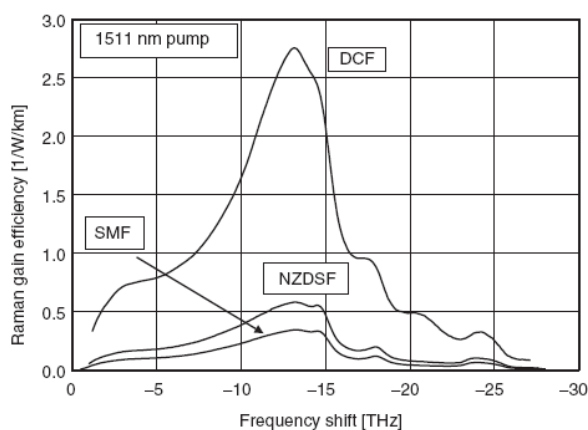




## RAMAN erősítő tulajdonságai

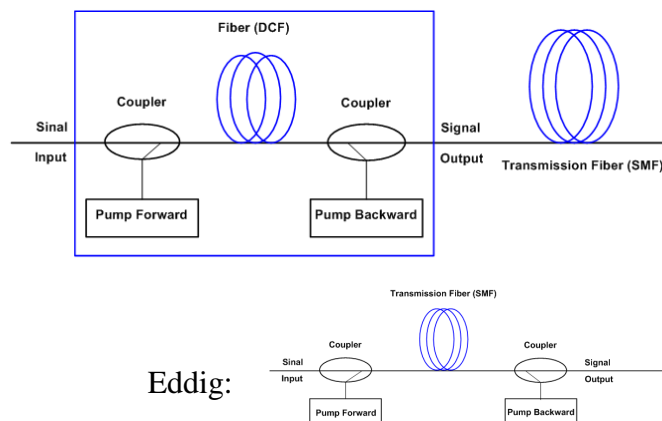
- Előnyök
  - Tetszőleges hullámhossztartományban működőképes (ha van hozzá megfelelő pumpáló forrás)
  - Nagyon nagy sávszélességű működés lehetséges (ha van hozzá megfelelő pumpáló forrás)
  - Kompatibilis a használt SMF szálakkal
  - EDFA-val együtt, „kiterjesztett EDFA”-ként használható
  - Elosztott erősítés, az erősítőegység előtt kilométerekkel elkezd erősíteni
  - Kisebb zaj
- Hátrányok
  - Nagy pumpáló teljesítmény igények
    - Nagy méret, komplikált elrendezés, nehéz kezelhetőség
    - Régebben: csak 1310nm (pumpáló forrás miatt)
    - Jelenleg már 1550nm-re is van megfelelő pumpáló forrás
  - Kifinomult erősítés vezérlés szükséges

## Raman – alkalmazott szál hatása



## Adalékolt Raman erősítő

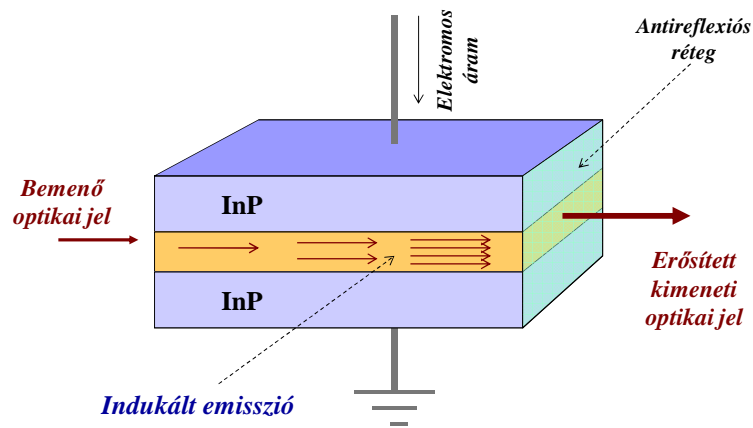
- Nagyobb Raman hatás érdekében adalékolás (Ge vagy foszfor)
- 1-2 km szál
- Nem hagyományos SMF => nem a hasznos összeköttetés hosszából



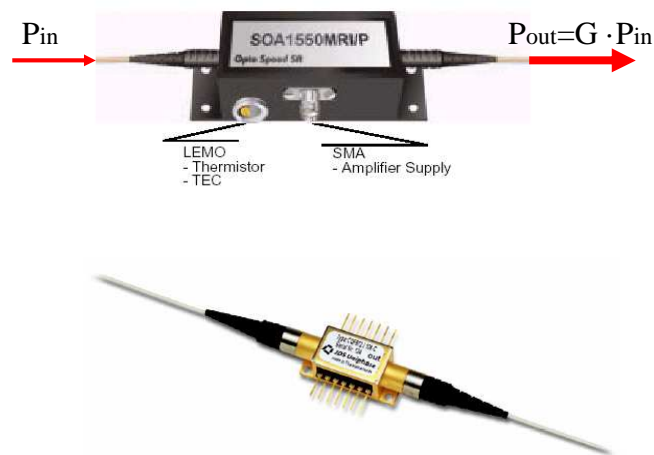
## Félvezető Optikai Erősítők (SOA, SLA)

- Felépítés, működés: mint félvezető lézer
- Különbség: Reflexió <math>< 10^{-5}</math>
  - Antireflexiós réteg
  - Ferde határfelület
  - Ablak terület
- Optikai reflexió => izolátorok

## Félvezető Optikai Erősítők (SOA, SLA)



## Félvezető Optikai Erősítők (SOA, SLA)



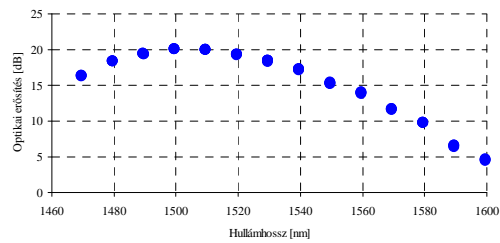
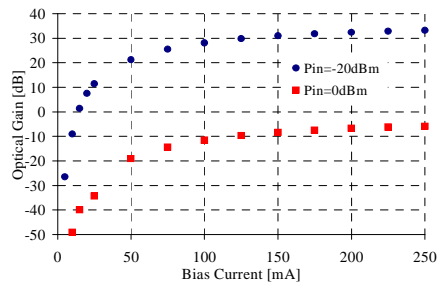
## Kezdeti technológiai problémák

- Nagy maradék reflexió
  - Jelentős erősítés ingadozás (FP-SOA)
  - Jelenleg <0.5dB (antireflexiós réteg, ferde határfelület, ablak réteg)
- Polarizációfüggő erősítés
  - Aktív réteg felépítése =>  $\Gamma_{TE} > \Gamma_{TM} \Rightarrow G_{TE} > G_{TM}$
  - Geometriai megoldás ( $\Delta G \approx 0,2\text{dB}$ )
    - soros elrendezés
    - Párhuzamos elrendezés
    - plusz optikai eszközök
  - Technológiai megoldás ( $\Delta G \approx 1,5\text{dB}$ )
    - aktív réteg vastagságának növelése (egymódusú!  $w=0,4\mu\text{m}$ ,  $d=0,25\mu\text{m}$ )
    - Large Optic Cavity (LOC)

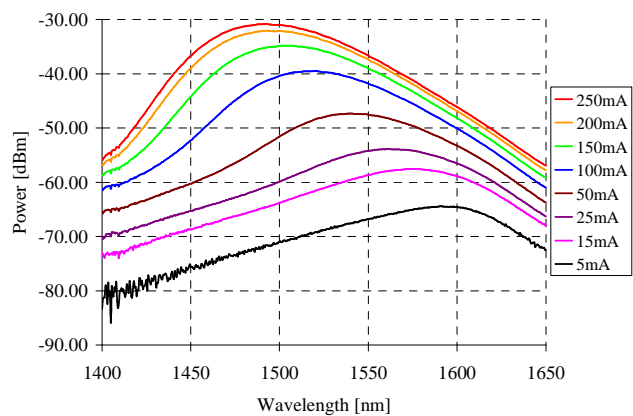
## Félvezető Optikai Erősítők (SOA, SLA)

- ✓ Kis méret
- ✓ Könnyű integrálhatóság
- ✓ Kis elektromos pumpálás, előfeszítés (100-500mA)
- ✓ Széles hullámhossztartományban alkalmazható (pl. InGaAs/InGaAsP: 40-80 nm, 1250-1650 nm)
- ✗ ASE => zaj
- ✗ Kisebb erősítés
- ✗ Kisebb telítési teljesítmény
- ✗ Ki-, becsatolási veszteségek
- ✗ Polarizáció érzékenység
- ✗ Nagyobb nemlinearitás

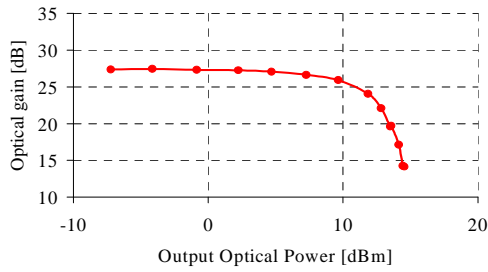
## SOA – Optikai erősítés



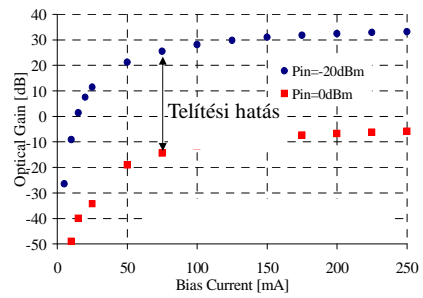
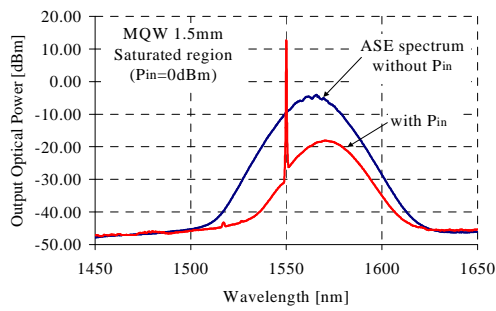
## SOA – Optikai zajspektrum



## SOA – Telítődés



$$G_s = \exp(\gamma L) = \exp\left(\frac{\gamma_0 L}{1 + \frac{I_{out}}{I_{sat}}}\right)$$



## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVMA05)

### Hullámhossz szelektív eszközök

2015.03.30.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

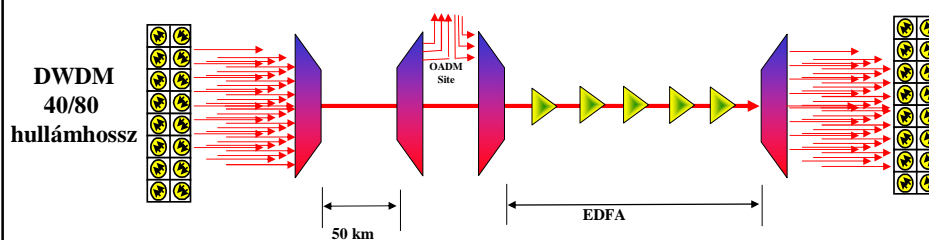
udvary@mht.bme.hu



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



## Többszatornás rendszerek



Több optikai vivő



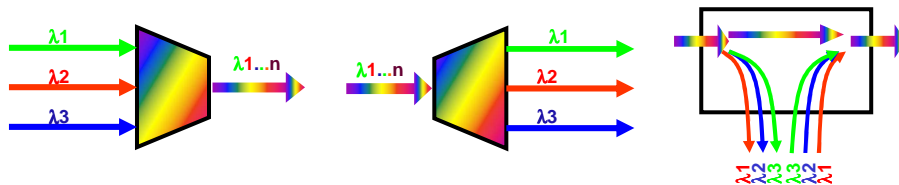
csatornák összegzése & szétválasztása



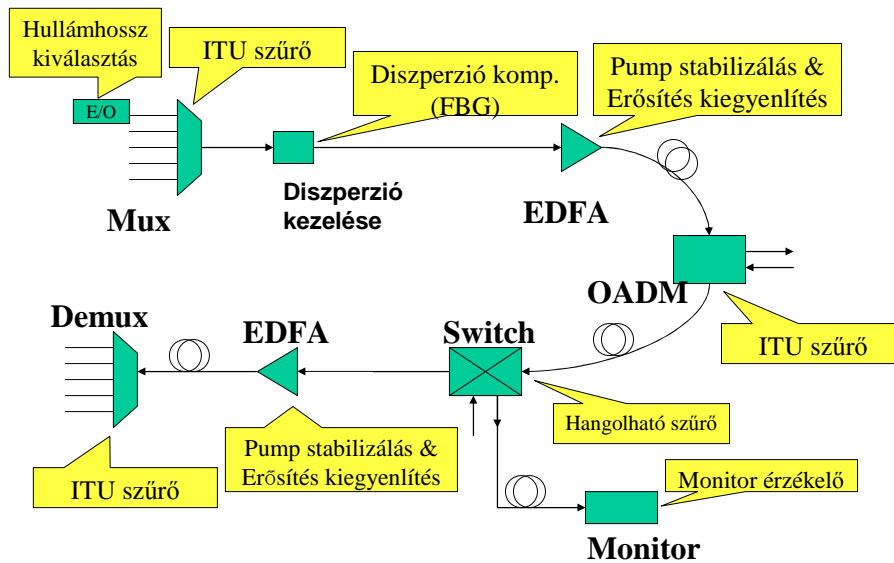
hullámhossz szelektív eszközök

## Optikai szűrők feladatai

- Hullámhossz (sáv) kiválasztása vagy eltávolítása
- MUX / DEMUX és hangolható vevő alkotóeleme, OADMs
- Zajszűrés (OA)
- egyenletes erősítés biztosítása
- MLM=> SLM
- diszperzió kompenzálás
- SSB SCM rendszerben
- stb.



## Optikai szűrők a hálózatban



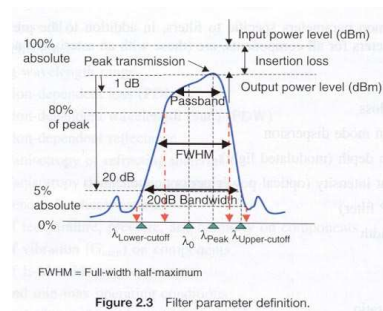
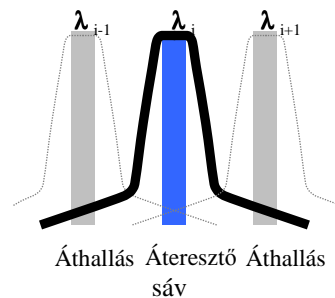


## Szűrők csoportosítása

- Hangolhatóság
  - Fix
  - hangolható
- Típusok (interferometrikus vagy diffrakciós elv)
  - Rács
    - Átvitel vagy reflexió
    - Fiber Bragg (FBG), Arrayed Waveguide (AWG), diffrakciós rács
  - Fabry-Perot (lézer üreg)
  - Multilayer Dielectric Thin-Film (MUX)
  - Mach-Zehnder Interferometer (Moduláció)
  - Akusztó-Optikai (hangolható)

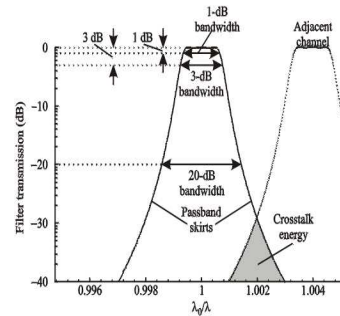
## Szűrő karakterisztikák

- Áteresztő sáv
  - Beiktatási csillapítás
  - Hullámzás
  - Hullámhossz (csúcs, központi, határ)
  - Sávszélesség (0.5 dB, 3 dB, ..)
  - Polarizáció függés
- Záró sáv
  - Áthallás elnyomása
  - Sávszélesség (20 dB, 40 dB, ..)



## Követelmények

- Kis beiktatási csillapítás
- Alacsony polarizációtól való függés => hullámvezető geometria
- Robosztus, környezeti paraméterekre (elsősorban hőmérsékletre) érzéketlen működés
- Idő függvényében stabil működés
- Egyenletes átviteli sáv
- Meredek sávhatár
- Nagy elnyomás a zárósávban
  - szomszédos csatorna elnyomás
  - Nem szomszédos csatorna elnyomás
- Alacsony ár (integrált hullámvezető)
- Sorozatban gyártható legyen
- Hangolhatóság (hangolási tartomány, hangolási idő)



## Típusok

- Fabry-Perot (lézer üreg)
- Multilayer Dielectric Thin-Film
- Mach-Zehnder Interferometer (Moduláció)
- Arrayed Waveguide (AWG), diffrakciós rács, általánosított MZ
- Fiber Bragg (FBG)
- Akusztó-Optikai (hangolható)

## Fabry-Perot (síkpárhuzamos tükrök)

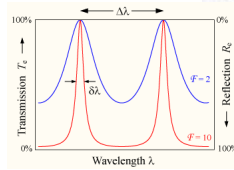
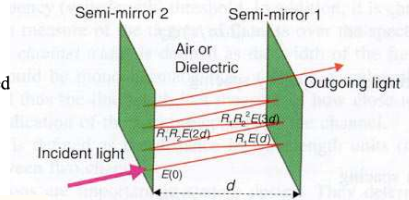
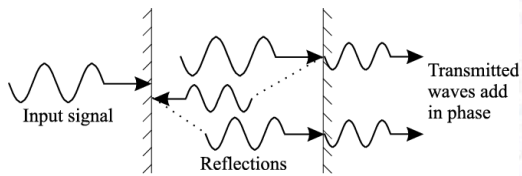
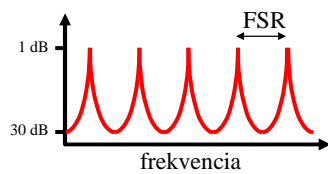
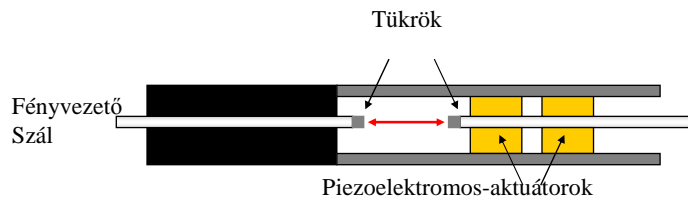


Figure 2.4 Principles of a Fabry-Perot interferometer.

- Szűrő karakterisztika
  - Ismétlődő áteresztősávok (Lorentzi profillal), rezonancia:  $d = k \cdot \lambda/2$
  - Free Spectral Range ( $\Delta\lambda$ , FSR)  $FSR = c / 2 \cdot n \cdot d$ , (d: üreg hossza)
  - Sávszélesség ( $\delta\lambda$ , BW): féltértékszélesség
  - Finesz,  $F = FSR / BW$ , (BW: 3 dB sávszélesség)
- Tipikus specifikáció 1550 nm-es alkalmazásokra
  - FSR: 4 THz - 10 THz, F: 100 - 200, BW: 20 - 100 GHz
  - Beiktatási csillapítás: 0.5 - 35 dB

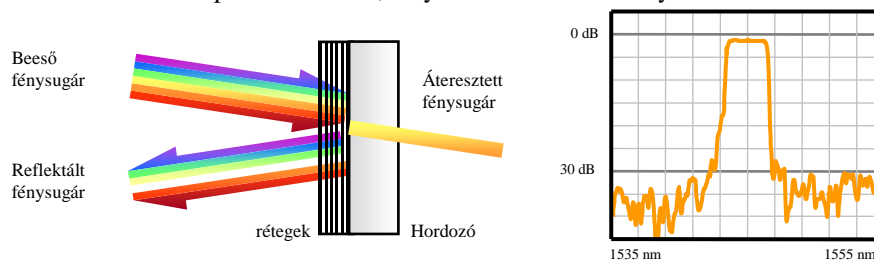
## Hangolható Fabry-Perot szűrő



Hangolás: üreg hosszával

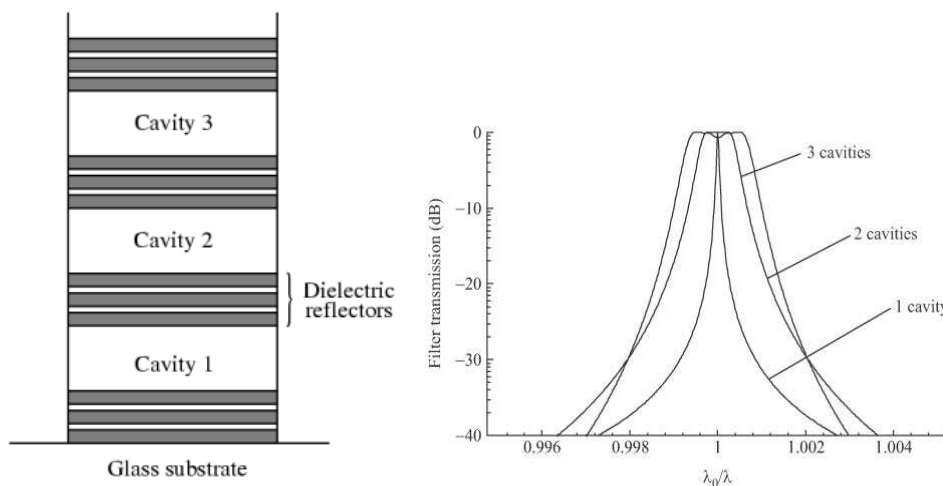
## Dielektromos szűrő

- Vékony film (Thin-film) üregek
  - FP etalon, ahol a tükröket több vékony határátmenet alkotja
  - A rétegek vastagsága határozza meg az áteresztő sávot
  - Váltakozva különböző törésmutatójú vékony film rétegek
  - Többszörös reflexiók konstruktív és destruktív interferenciát okoznak
  - Változatos szűrő meredekség és sávszélesség megvalósítható
  - Beiktatási csillapítás 0.2 - 2 dB, elnyomás a zárótartományban: 30 - 50 dB

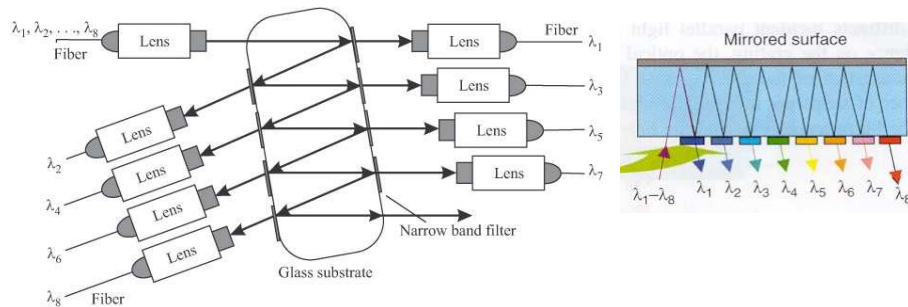


## Thin-Film Multilayer Filters (TFMF) MDTF

üregek száma  $\geq 2$   
Keskenyebb sávban működik



## MUX/DEMUX kaszkádba kapcsolt TFMF-ek



- Minden szűrő 1 csatornát átenged, a többiit reflektálja
- Egyenletes átviteli sáv, meredek határ

## Mach-Zehnder Szűrő

MZ: Fáziskésés + interferencia

- Késleltetés

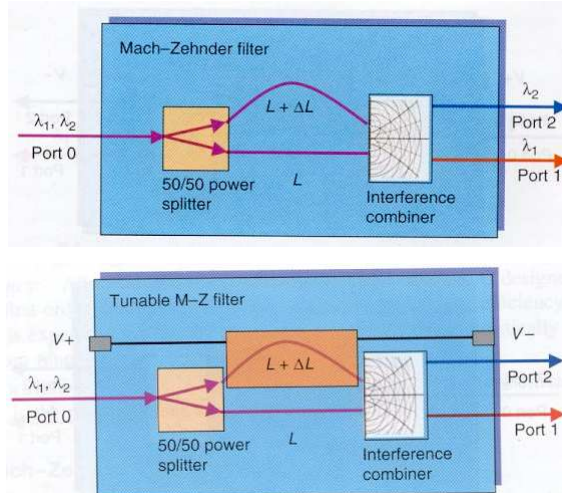
=> hullámhosszfüggő

fáziskésés

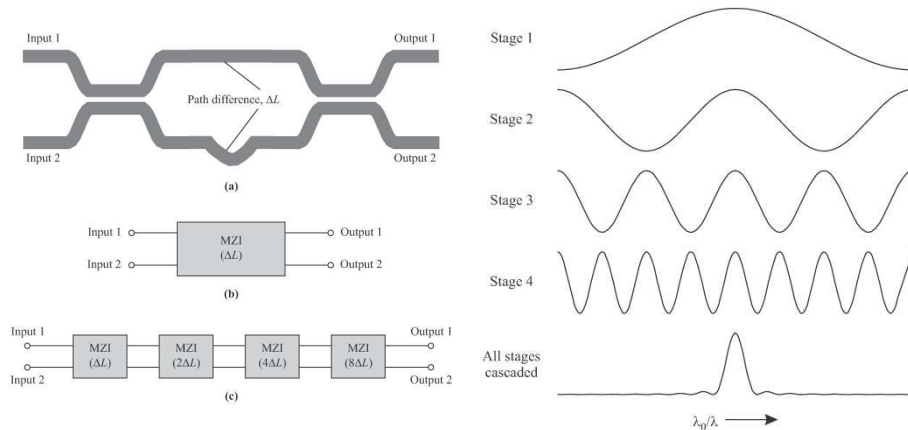
- Szélessávú szűrő
- Áthallás, nem egyenletes spektrum, lassú átmenet

Hangolható

- Hőmérséklettel
- EO hatással
- Sebesség: kb. ms

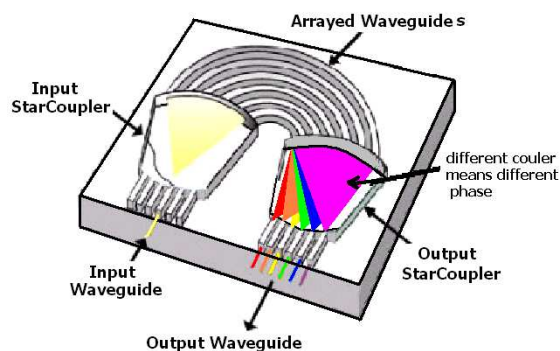


## Kaszádba kapcsolt MZ szűrők

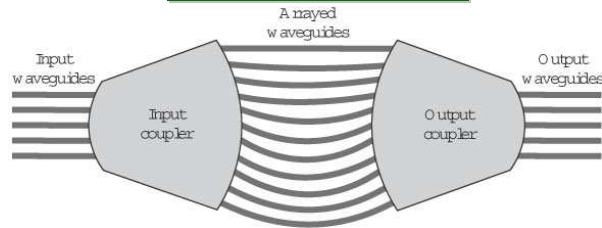


## Arrayed Waveguide Grating (AWG)

- általánosított MZ
  - a jelet számos ágra osztjuk
  - Eltérő hosszúságú hullámvezetők
  - Fáziskésleltetett jeleket összegezzük => konstruktív/destruktív interferencia az egyes kimeneteken
- $1 \times N \Rightarrow$  DEMUX,  $N \times 1 \Rightarrow$  MUX

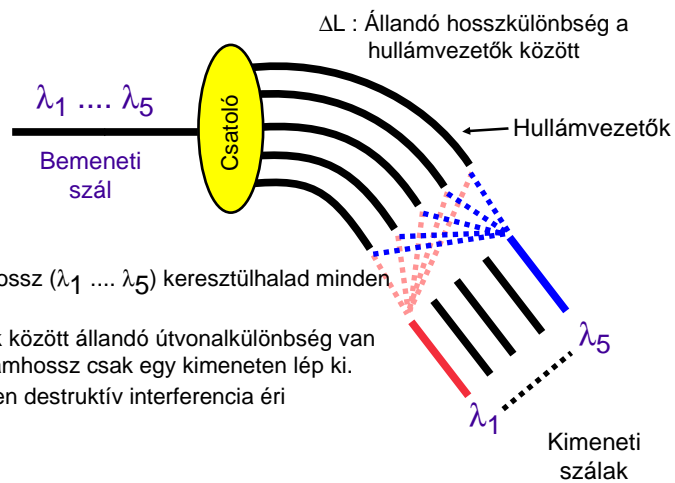


## AWG működése



- Az első (általában szabadtéri) csatolón keresztül a bemeneti fénysugár az egyes hullámvezetőkbe kerül, ami diszkrét fázis késleltetőként működik
- Konstans hullámvezető hossz különbségek
- A második (általában szabadtéri) csatolóban a fénysugarak hullámhossztól függően különböző kimeneti pontokba fókuszálódnak
- Alacsonyabb csillapítás (kb. 6dB) és egyenletesebb áteresztő sáv, mint kaszkádba kapcsolt MZI
- Hőmérséklet szabályzásra van szükség

## AWG DEMUX



- Minden hullámhossz ( $\lambda_1 \dots \lambda_5$ ) keresztülhalad minden hullámvezetőn
- A hullámvezetők között állandó útvonalkülönbség van => egy adott hullámhossz csak egy kimeneten lép ki.
- A többi kimeneten destruktív interferencia éri

## Fiber Bragg Grating (FBG)

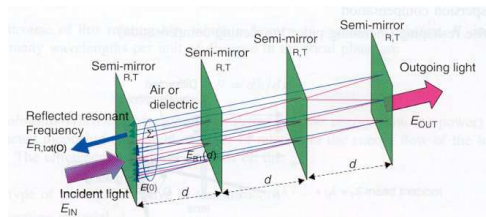
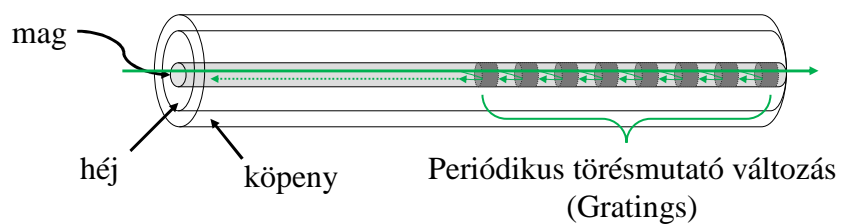
- Feltaláló: [Communication Research Center, Ottawa, Canada, 1978](#)
- Alapanyag: fényvezető szál
- SMF (mindenátteresztő) szálból hullámhossz szelektív szál
- Az alap konstrukció egy szál alapú sávzáró szűrő
- Periodikus törésmutató változás a magban=> rács
- Elosztott Bragg reflektor a szálban => hullámhossz függő tükör



## Fiber Bragg Grating

A fényvezető szál magjának törésmutatója periodikusan változik a hossz mentén.

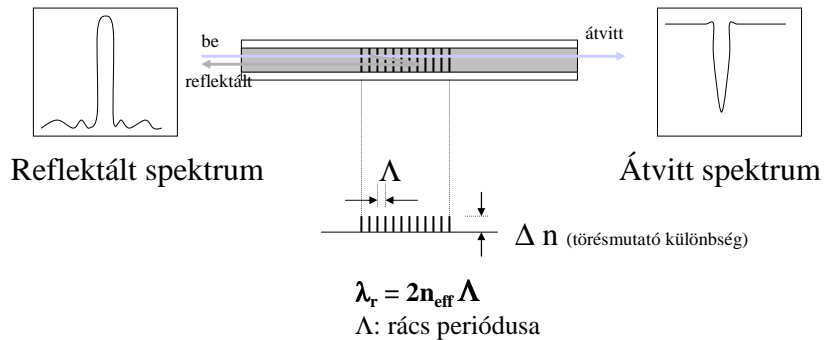
Mintha részben átteresztő tükrök sorozata lenne





## FBG működése

Ha a rács periódusa fele a belépő fény hullámhosszának, a fény koherensen reflektálódik .

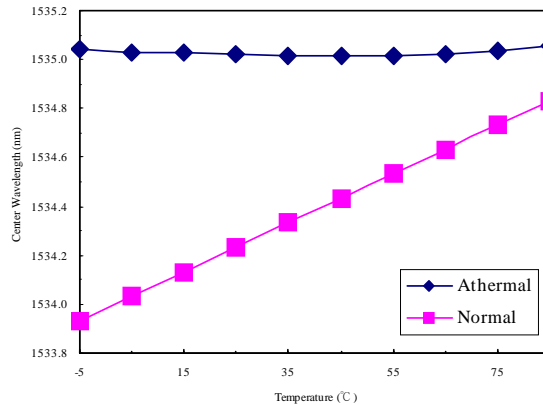


## FBG tulajdonságai

- reflexiós szűrő
    - A keresett hullámhosszt reflektálja, nem átereszt
  - Hőkezelés után stabil szerkezet
    - Állandó rácsszerkezet a szálban
    - A reflektált spektrum stabil az idő függvényében
  - Átlátszó az áteresztő sávban
    - Az átmenő forgalmat nem torzítja, nagyon alacsony a csillapítása
  - Szál alapú, ezért könnyű optikai rendszerekbe integrálni
  - Alacsony ár
  - Polarizációra nem érzékeny
  - Egyszerű „csomagolás”
  - Hangolható (hőmérséklet, feszítés: piezoelektromos, mágneses, stb.)
  - Paraméterek
    - Törésmutató modulációja:  $10^{-7} \dots 10^{-2}$
    - Hossz: mm...m
    - Periódus:  $0.5 \mu\text{m} @ 1550\text{nm}$
- Reflexió: 0.01%...99.9999999%
- 3dB sáv: pm...nm
- Központi hullámhossz: 500...1700nm

## FBG - hőmérsékletfüggés

- Az üvegben fellépő termo-optikai hatás miatt a szálban kialakított rács hőmérséklet érzékeny (10pm/°C)
- Kompenzálás
  - Hőmérsékletre érzéketlen hullámvezető tervezése ☹
  - Mechanikai megoldás: kisebb hőtágulással rendelkező anyaghoz rögzítve



## Példa: Hőmérséklet érzékenység

DWDM rendszer, Csatorna távolság=100 GHz => 0.8 nm=800 pm  
 Mekkora hőmérséklet változás hatására hangolódik el annyira a szűrő, hogy a hasznos csatornát elnyelje?

$$\frac{\partial \lambda}{\partial T} = \frac{\lambda}{nL} \left( \frac{\partial(nL)}{\partial T} \right) = \frac{\lambda}{nL} \left( n \frac{\partial L}{\partial T} + L \frac{\partial n}{\partial T} \right) = \lambda \left( \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right) = \lambda \left( \alpha + \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial T} \right)$$

$$\frac{\partial n}{\partial T} = 7.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

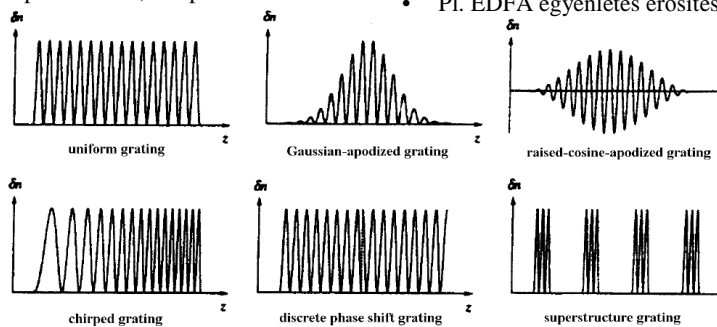
$$\alpha = 2.63 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow d\lambda/dT = 12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$$

(800/2)/12=33°! => hőfokstabilizálás szükséges  
 =>aktív áramkör egy passzív eszközhöz ☹

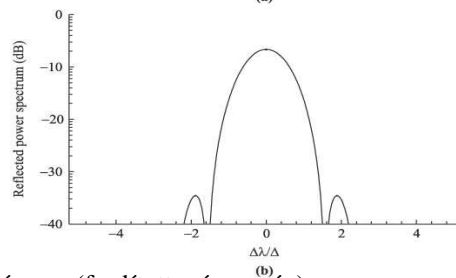
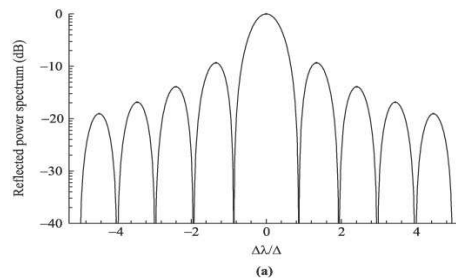
## FBG típusok

- Uniform
- Nem uniform
  - Apodized (amplitudóban modulált: Gauss, emelt koszinuszos, sinc, tanh, Blackman, stb.)
  - Chirped (diszp. kompenzálás + fázisvezérelt antennarendszereknél jel fázisát változtatjuk)
  - Superstructure, sampled
- Rövid periódus (max. 0.5  $\mu\text{m}$ )
  - Alacsony csillapítás (0.1dB)
  - $\lambda$  pontosság (0.05nm)
- Hosszú periódus (max. pár mm)
  - A héjban terjedő módusokba csatolódik át a teljesítmény (nem reflexiós elvű működés) => fény kicsatolódik, nem reflektálódik a kívánt sávban (majd gyorsan csillapodik)
  - Pl. EDFA egyenletes erősítés



## Átviteli karakterisztikák

- Uniform
- Apodized (amplitudó modulált)
  - Oldalsávok levágva
  - Fő áteresztő sáv szélesebb

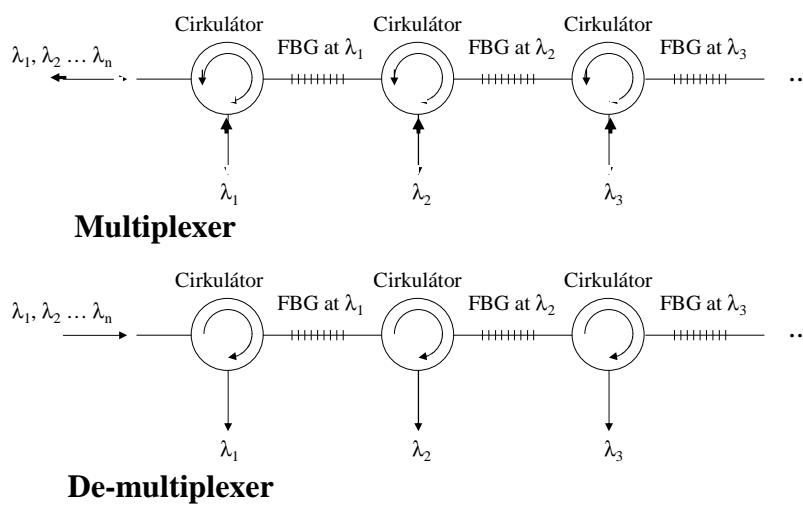


Sávszélesség: 1nm, eszköz hossz: pár mm (fordított arányosság)

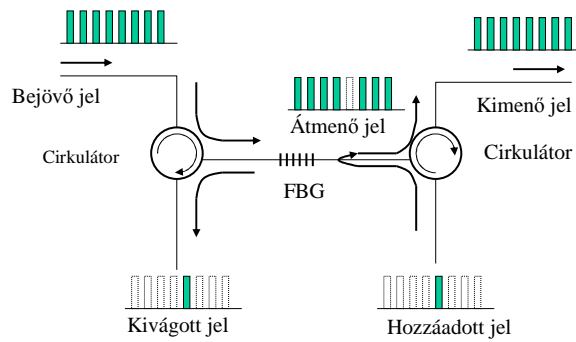
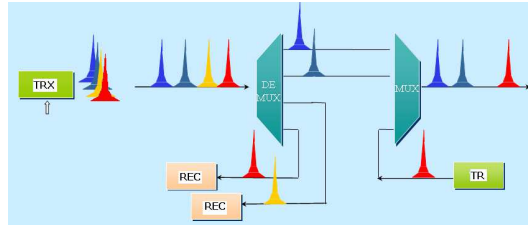
## FBG alkalmazási lehetőségek

- DWDM szűrő
- OADM
- EDFA Pump lézer stabilizálás
- Optikai erősítő erősítési spektrumának kiegyenlítése
- Hangolható szűrő
- Távoli monitorozás
- Érzékelő (pl. hőmérséklet szenzor)
- ....

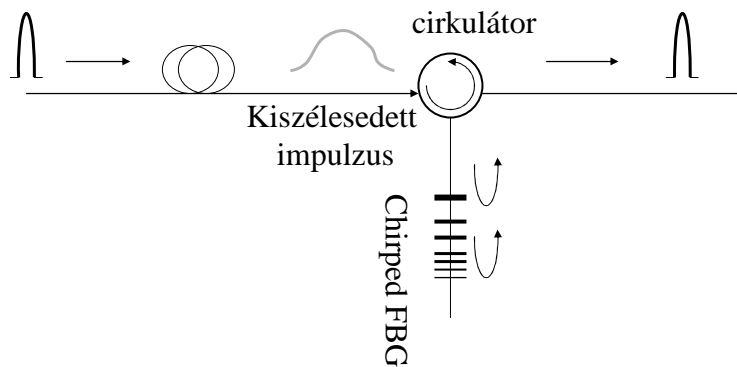
## MUX/DEMUX



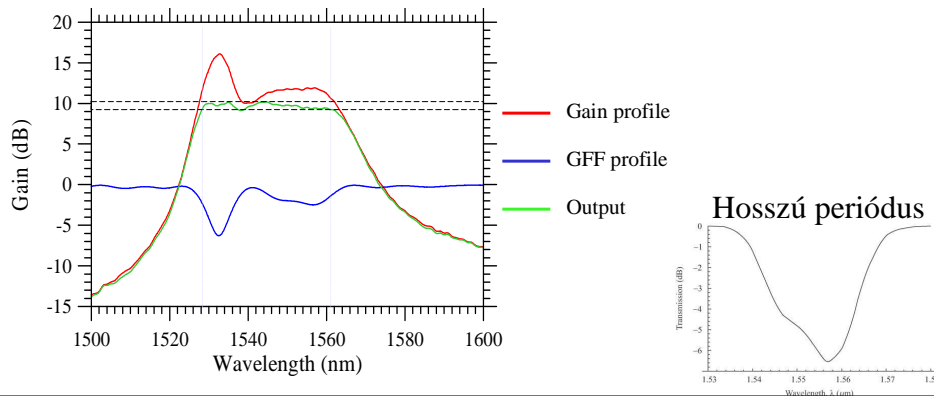
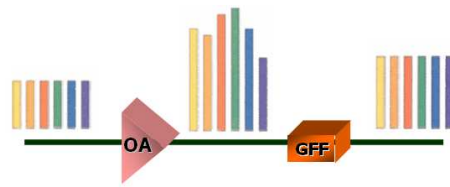
## OADM



## Diszperzió kompenzálás



## Egyenletes erősítési spektrum (Gain Flattening Filter)



## Technológiák összehasonlítása (MUX)

Típus	Előny	Hátrány
Vékony film	Teljesen passzív Hőmérsékletre érzéketlen Flexibilis (tetszőleges csatorna) Széles sávú (max. 16 csatorna) Jó optikai paraméterek (izoláció, beiktatási csillapítás)	Ár arányos a csatornaszámmal Csatornaszámtól függő csillapítás Sűrű csatornatávolságnál probléma
FBG	Meredek karakterisztika Jó optikai paraméterek (izoláció, beiktatási csillapítás)	Ár arányos a csatornaszámmal Keskenysávú (40-80GHz) Hőmérsékletre érzékeny (hőfokstabilizálást igényel)
AWG	Ár nem arányos a csatornaszámmal (nagy csatornaszám esetén kedvező) Relatív alacsony csillapítás (nagy csatornaszámra) Kis méret Integrálható	Kevésbé meredek karakterisztika Magas nem szomszédos csatorna áthallás Hőfokstabilizálás szükséges Magas polarizáció függő csillapítás (PDL) Magas polarizáció mód diszperzió (PMD)

## Hangolható szűrők

Típus	Hangolási tartomány	Hangolási idő
Mechanikus	500 nm	1-10 ms
Hőmérséklettel	> 10 nm	1-10 ms
Acousto-optic	≈ 100 nm	≈ 10 μs
Electro-optic	10-15 nm	1-10 ns

## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVA05)

### Optikai jelalakformálás

2015.04.13.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu



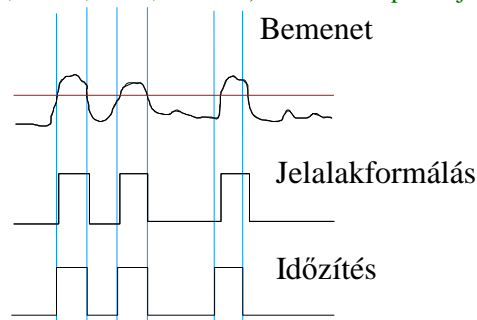
Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



## Átviteli jel torzulásának kezelése

2

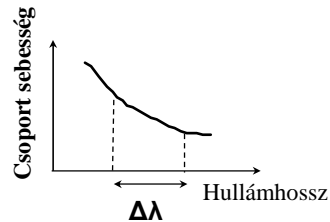
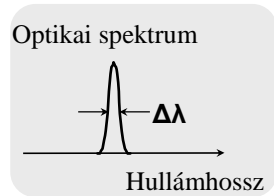
- Regenerálás (1R, 2R, 3R)
  - Csillapítás => optikai erősítés (széles sávú, egyszerre több hullámhosszra)
  - Jelalak torzulása
    - Kromatikus diszperzió => diszperzió kompenzálás
    - Sávon belüli optikai zaj (pl. ASE) => tisztán optikai jelfeldolgozás
    - Nemlineáris jelenségek, csatornák közti áthallás (SRS, SBS, FWM, SPM, XPM...) => tisztán optikai jelfeldolgozás
  - Időzítés



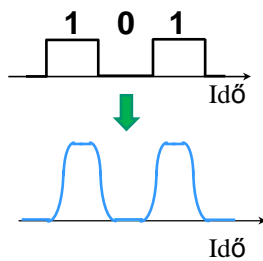


## Kromatikus diszperzió - emlékeztető

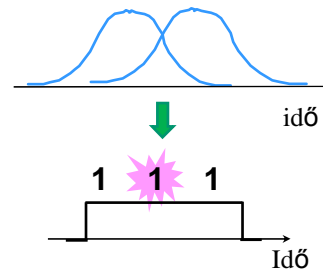
3



Adó:



Vevő:



## Diszperzió kompenzációs technikák

4

- Módus diszperzió
  - GI szál
  - SM szál
- Kromatikus diszperzió
  - Adóoldalon:
    - **Előtorzítás (elektromos/optikai)**
    - Kódolás
    - Moduláció (SSB)
  - Vevőoldalon:
    - Jel analízis
    - Döntésküszöb optimalizálás
  - Szál:
    - DSF
    - DCF
  - Szűrők: FBG
  - Összeköttetés közepén jel invertálás

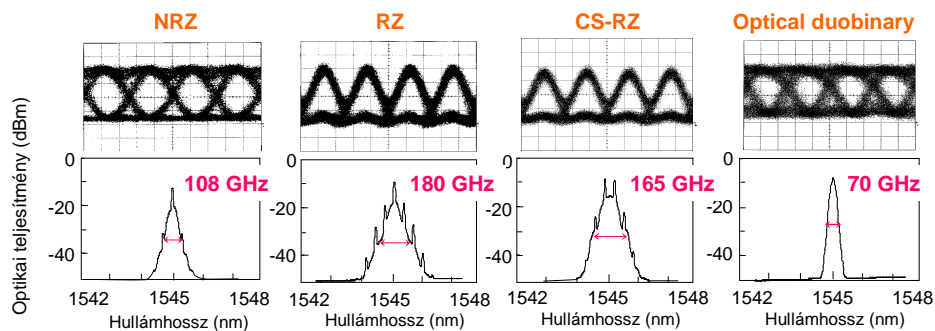
## Diszperzió kompenzációs technikák

5

- Módus diszperzió
  - GI szál
  - SM szál
- Kromatikus diszperzió
  - Adóoldalon:
    - Előtorzítás (elektromos/optikai)
    - **Kódolás (RZ v. NRZ, OOK v. duóbináris kód)**
    - Moduláció (SSB)
  - Vevőoldalon:
    - Jel analízis
    - Döntésküszöb optimalizálás
  - Szál:
    - DSF
    - DCF
  - Szűrők: FBG
  - Összeköttetés közepén jel invertálás

## Modulációs formák (40Gbps)

6

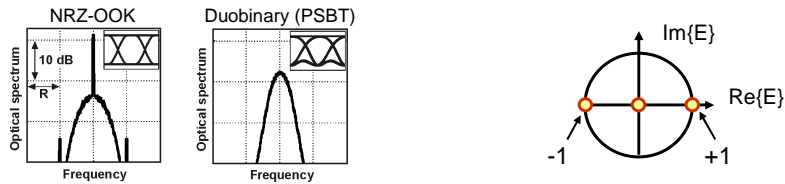


### Átvitel szempontjából fontos paraméterek

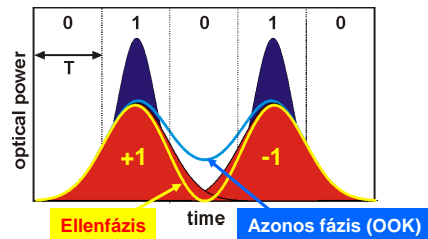
- Kromatikus diszperzió túrés
- Szál nemlinearitás túrés (Maximális bemeneti teljesítmény)
- Spektrális túrés (Szűrés hatása)

## Duobináris kód

7



Duobinary (DB, PSBT) +1 +1 0 -1 -1 0 0 -1



## Diszperzió kompenzációs technikák

8

- Módus diszperzió
  - GI szál
  - SM szál
- Kromatikus diszperzió
  - Adóoldalon:
    - Előtorzítás (elektromos/optikai)
    - Kódolás
    - **Moduláció (SSB)**
  - Vevőoldalon:
    - Jel analízis
    - Döntésküszöb optimalizálás
  - Szál:
    - DSF
    - DCF
  - Szűrők: FBG
  - Összeköttetés közepén jel invertálás

## Diszperzió kompenzációs technikák

9

- Módus diszperzió
  - GI szál
  - SM szál
- Kromatikus diszperzió
  - Adóoldalon:
    - Előtorzítás (elektromos/optikai)
    - Kódolás
    - Moduláció (SSB)
  - Vevőoldalon:
    - **Jel analízis**
    - **Döntésküszöb optimalizálás**
  - Szál:
    - DSF
    - DCF
  - Szűrők: FBG
  - Összeköttetés közepén jel invertálás

## Diszperzió kompenzációs technikák

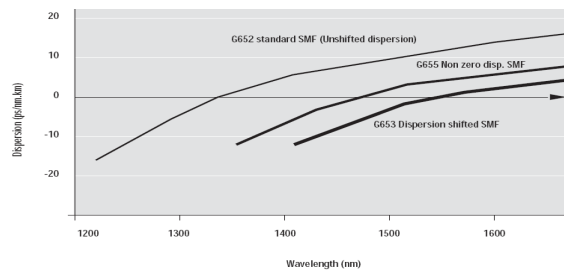
10

- Módus diszperzió
  - GI szál
  - SM szál
- Kromatikus diszperzió
  - Adóoldalon:
    - Előtorzítás (elektromos/optikai)
    - Kódolás
    - Moduláció (SSB)
  - Vevőoldalon:
    - Jel analízis
    - Döntésküszöb optimalizálás
  - Szál:
    - **DSF**
    - DCF
  - Szűrők: FBG
  - Összeköttetés közepén jel invertálás

## Eltolt diszperziójú szál

11

Type of Fiber	Typical Dispersion at 1550 nm	Typical Slope at 1550 nm	C-Band Dispersion Range 1530 to 1565 nm	L-Band Dispersion Range 1570 to 1620 nm
Conventional SMF-28	17.0 ps/nm-km	0.057 ps/nm <sup>2</sup> -km	15.9 to 17.8 ps/nm-km	18.1 to 21.0 ps/nm-km
NZDSF (early) – type 1	2.6 ps/nm-km	0.067 ps/nm <sup>2</sup> -km	1.3 to 3.6 ps/nm-km	3.9 to 7.3 ps/nm-km
NZDSF (early) – type 2	3.5 ps/nm-km	0.067 ps/nm <sup>2</sup> -km	2.2 to 4.6 ps/nm-km	4.8 to 8.2 ps/nm-km
NZDSF (large eff. area)	3.8 ps/nm-km	0.100 ps/nm <sup>2</sup> -km	1.8 to 5.3 ps/nm-km	5.8 to 10.8 ps/nm-km
NZDSF (reduced slope)	4.4 ps/nm-km	0.045 ps/nm <sup>2</sup> -km	3.5 to 5.1 ps/nm-km	5.3 to 7.5 ps/nm-km
NZDSF (new large eff. area)	4.2 ps/nm-km	0.085 ps/nm <sup>2</sup> -km	2.6 to 5.5 ps/nm-km	5.9 to 10.1 ps/nm-km
NZDSF (new light fiber)	8.0 ps/nm-km	0.057 ps/nm <sup>2</sup> -km	6.8 to 8.9 ps/nm-km	9.1 to 12.0 ps/nm-km



## Diszperzió kompenzálási technikák

12

- Módus diszperzió
  - GI szál
  - SM szál
- Kromatikus diszperzió
  - Adóoldalon:
    - Provizórikus előtorzítás (elektromos/optikai)
    - Kódolás (RZ v. NRZ, OOK v. duóbinális kód)
    - Moduláció (SSB)
  - Vevőoldalon:
    - Jel analízis, utótorzítás
    - Döntésküszöb optimalizálás
  - Szál:
    - DSF
    - **DCF**
  - Szűrők: FBG
  - Összeköttetés közepén jel invertálás

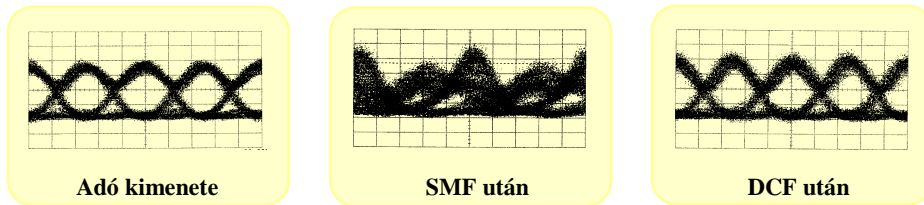
## Dispersion compensating fiber (DCF)

13



Lassabb  $\leftarrow$  Hosszabb hullámhossz  $\rightarrow$  Gyorsabb  
 Gyorsabb  $\leftarrow$  Rövidebb hullámhossz  $\rightarrow$  Lassabb

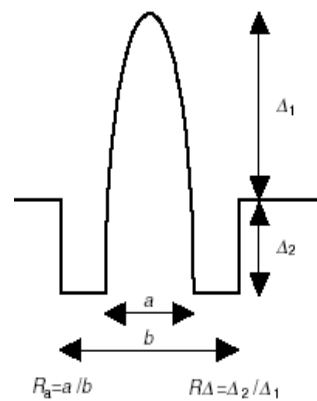
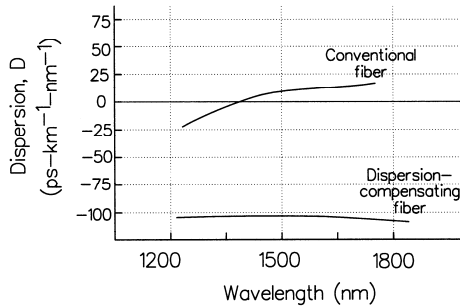
### 40 Gb/s optikai jelfolyam



## DCF

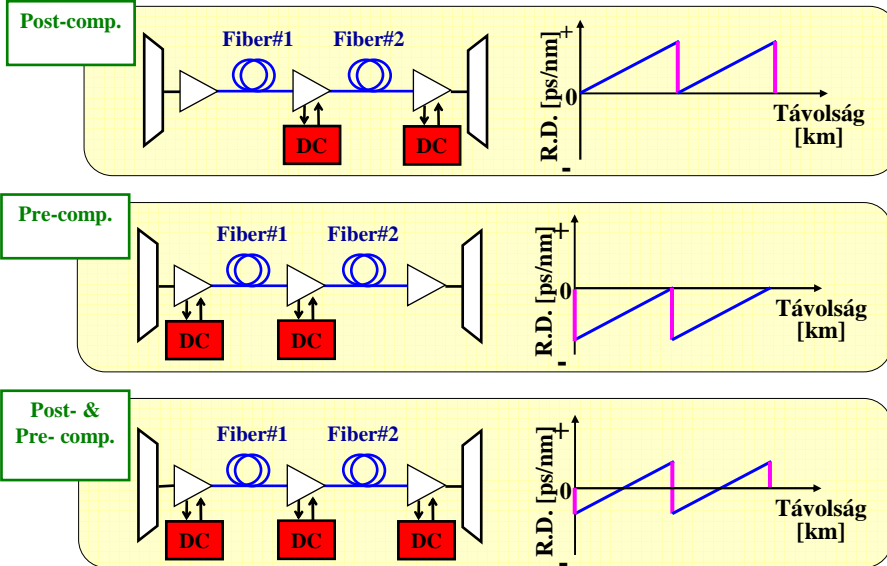
14

- Kisebb mag  $\rightarrow$  Nemlineáris hatás
- Nagyobb veszteség a megfelelő törésmutató profil kialakításához szükséges germánium adalékolás miatt
- Diszperziós görbe meredekségére nincs illesztve



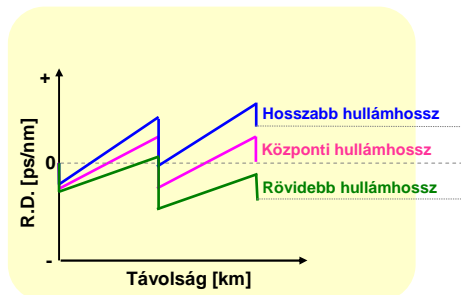
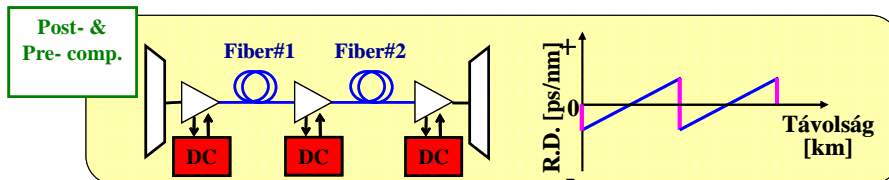
## DCF elhelyezése

15



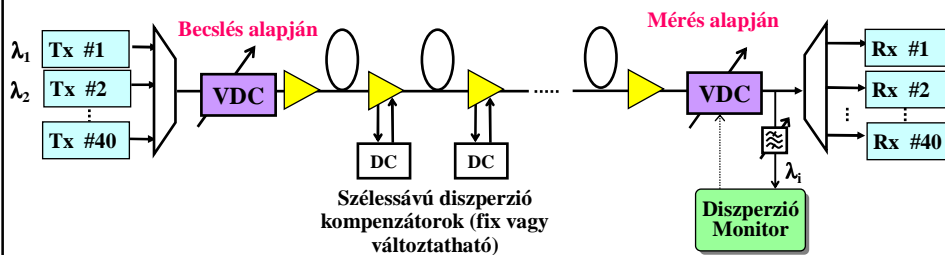
## Maradék diszperzió

16



## Automatikus diszperzió kompenzálás

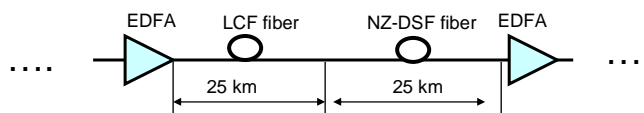
17



Maradék diszperzió kompenzálására csatornánként:  
hangolható keskenysávú kompenzátor

## Speciális eset: Tenger alatti összeköttetés

18

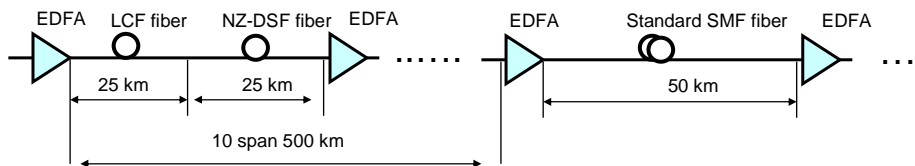


- LCF (Large core fiber)
  - Kromatikus diszperzió:  $-2 \text{ ps/km.nm}$
  - Nagy effektív terület  $75 \sim 80 \text{ um}^2$
  - Nagyobb diszperziós meredekség
  - Kisebb nemlineáris hatás
  - A nagyobb teljesítmény miatt az első szakaszon használjuk
- NZ-DSF fiber (eltolt diszperziójú szál)
  - Kromatikus diszperzió:  $-2 \text{ ps/km.nm}$
  - kisebb diszperziós meredekség
  - A kisebb teljesítményű második szakaszon használják
  - Csökkenti a felhalmozott kromatikus diszperzió szintjét



## Speciális eset: Tenger alatti összeköttetés

19



- 500km (10 szakasz) után beiktatnak egy Standard egymódusú szálszakaszt (SMF), hogy a negatív kromatikus diszperzió hatását kompenzálják
- $500\text{km} \cdot (-0.2 \text{ ps/nm} \cdot \text{km}) = -100 \text{ ps/nm}$
- $50\text{km} \cdot 20 \text{ ps/nm} \cdot \text{km} = 100 \text{ ps/nm}$
- Az eltérő diszperzió meredekség miatt elő és utótorzításra van szükség az adó és a vevő oldalon

## Diszperzió kompenzációs technikák

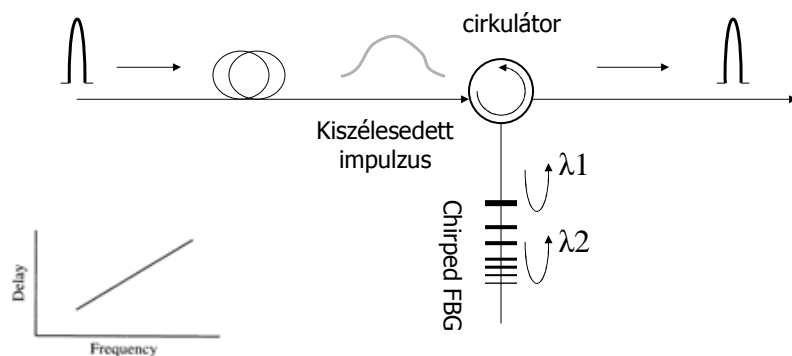
20

- Módus diszperzió
  - GI szál
  - SM szál
- Kromatikus diszperzió
  - Adóoldalon:
    - Előtorzítás (elektromos/optikai)
    - Kódolás
    - Moduláció (SSB)
  - Vevőoldalon:
    - Jel analízis
    - Döntésküszöb optimalizálás
  - Szál:
    - DSF
    - DCF
  - Szűrők: **FBG**
  - Összeköttetés közepén jel invertálás

## FBG

21

Hullámhossz szelektív tükrök sorozata



100ps időképletés/cm

## FBG

22

- Egyszerű, könnyen gyártható
- Olcsó (SMF-28 szálból, periodikus törésmutató változás a magban=> rács)
- Kis csillapítás (~1dB, 80km kompenzálása esetén)
- rövid eszköz (~10-15cm) => kis nemlineáris hatás
- Kis működési sáv szélesség (~0.1-5nm)

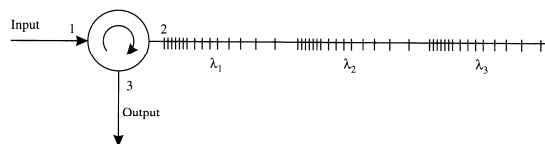


Figure 5.22 Chirped fiber Bragg gratings for compensating three wavelengths in a WDM system.

## Diszperzió kompenzációs technikák

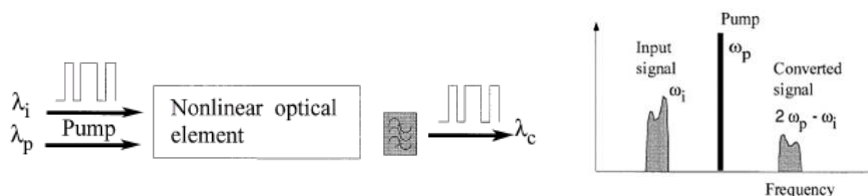
23

- Módus diszperzió
  - GI szál
  - SM szál
- Kromatikus diszperzió
  - Adóoldalon:
    - Előtorzítás (elektromos/optikai)
    - Kódolás
    - Moduláció (SSB)
  - Vevőoldalon:
    - Jel analízis
    - Döntésküszöb optimalizálás
  - Szál:
    - DSF
    - DCF
  - Szűrők: FBG
  - **Összeköttetés közepén jel invertálás**

## Összeköttetés közepén jel invertálás

24

- Összeköttetés közepén invertáljuk a spektrumot
- A konvertált jel hordozza az eredeti jelek fázis és amplitúdó információját
- Megvalósítás: optikai keverés (FWM)
  - Megvalósítás problémái
  - alacsony átalakítási hatások (nemlineárisabb optikai elem kellene)
  - nagy pumpáló teljesítmény



## FWM

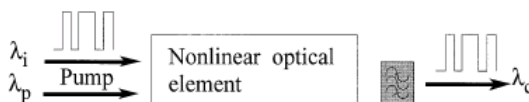
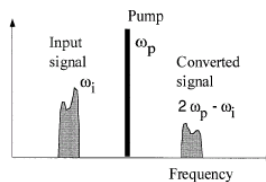
25

Nemlinearitás => keverés

A konvertált jel hordozza az eredeti jelek fázis és amplitúdóját

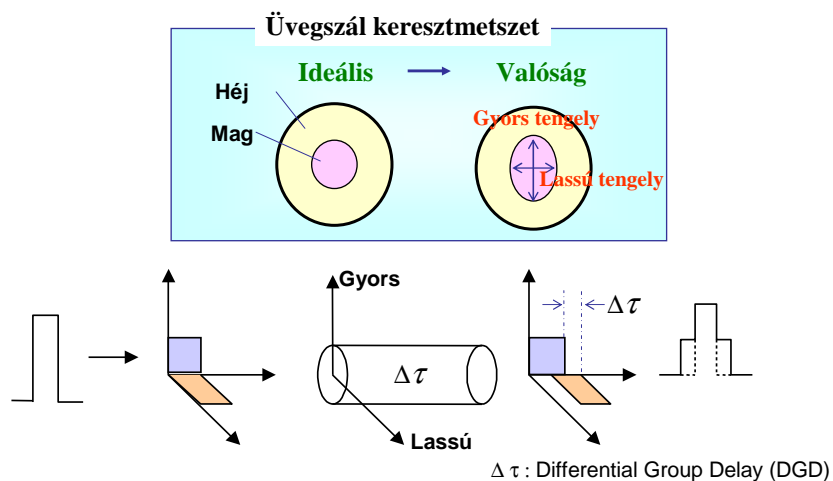
Hullámhossz konverzió és diszperzió kompenzálás

- ✓ nagyon gyors (100Gbit/s)
- ✓ minden modulációs mód, átlátszóság
- ✓ WDM csatornákat egyszerre
- ✗ **alacsony átalakítási hatások (-20dB)**
- ✗ pumpáló teljesítmény igény: 10-20dBm
- ✗ Polarizáció érzékenység
- ✗  $\lambda$ konvertált függ  $\lambda_{\text{pump}}$  &  $\lambda_{\text{input}}$ -tól => hangolható pumpáló lézer



## Polarizációs mód diszperzió(PMD) emlékeztető

26



## PMD túrés

Előre nem tervezhető

Elkerülhetetlen (gyártási pontatlanság és környezeti feltételek változása)

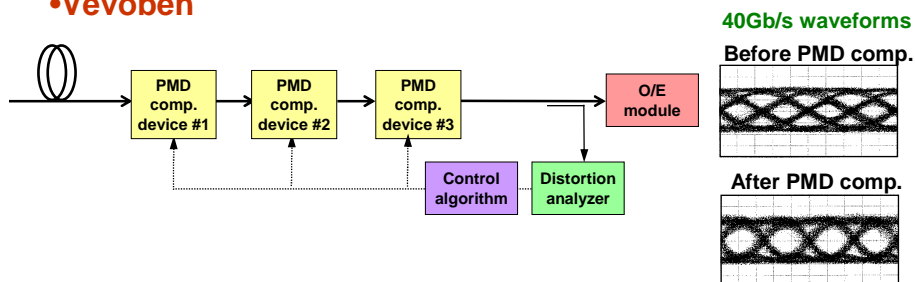
Kis szintű PMD-t elvisel a rendszer

Tűrés függ a sebességtől (tipikusan a bitidő 10%-a)

SDH	SONET	Transmission Rate	Bit Time	PMD Limit'
	OC-1	51.84 Mb/s	19.29 ns	2 ns
STM-1	OC-3	155.52 Mb/s	6.43 ns	640 ps
STM-4	OC-12	622.08 Mb/s	1.61 ns	160 ps
	OC-24	1,244.16 Mb/s (1.2 Gbps)	803.76 ps	80 ps
STM-16	OC-48	2,488.32 Mb/s (2.5 Gbps)	401.88 ps	40 ps
STM-64	OC-192	9,953.28 Mb/s (10 Gbps)	100.47 ps	10 ps
STM-256	OC-768	39,318.12 Mb/s (40 Gbps)	25.12 ps	2.5 ps

## Automatikus PMD kompenzálás

- Értéke előre nem ismert
- Vevőben



PMD változása lassú a “normál” környezeti változások hatására (pl. hőmérséklet)

A változás gyors is lehet (pl. szál „fogdosás”)

➔ Nagy sebességű PMD kompenzáló eszköz & intelligens vezérlő szoftver szükséges

## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVA05)

### Optikai kapcsolók

2015.04.20.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

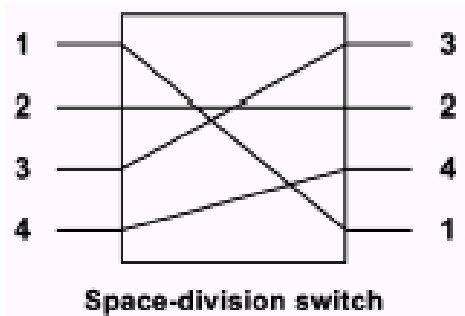
udvary@mht.bme.hu



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>

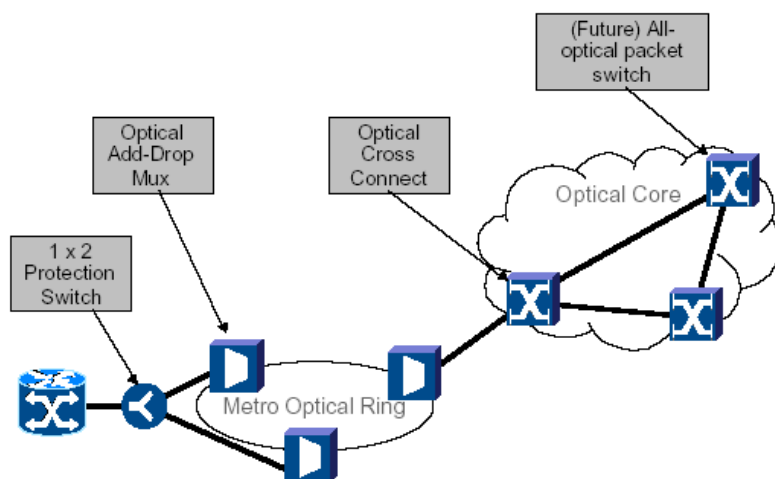


### Optikai térkapcsoló



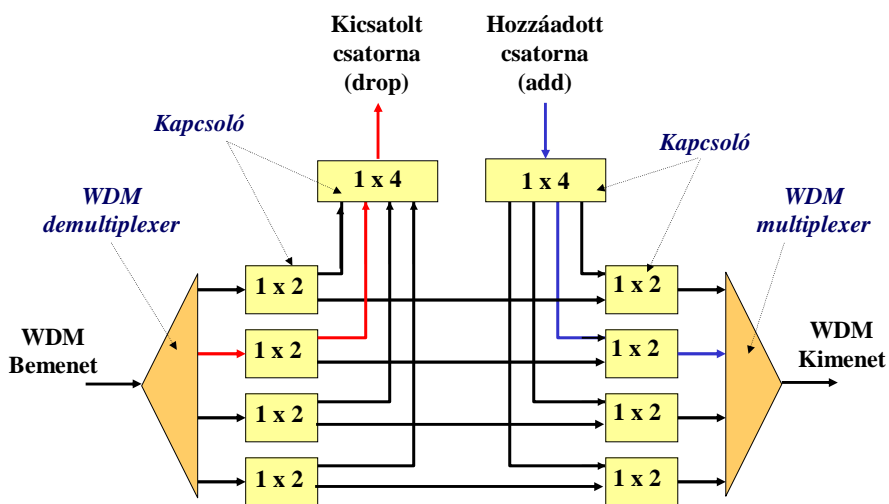
- Egy optikai hálózati elem, amely nagy számú bemeneti jelet irányít a nagyszámú kimenet bármelyikére

## Optikai kapcsolók a hálózatban



Optical Spectral Monitoring (OSM)

## Példa: Add/Drop WDM rendszerben (1 x 2 és 1 x 4 kapcsolók)



## Optikai kapcsolók paramétere

- Beiktatási csillapítás  
(kicsi és útvonal független legyen => változtatható optikai csillapítás a veszteségek kiegyenlítésére)
- Áthallás/Crosstalk: a nem kívánt kimenet(ek)re is jut jel (legrosszabb értékkel jellemzik)
- Polarizáció függés (PDL: polarization dependent loss)
- Kapcsolási állapot monitorozási képesség
- Megbízhatóság (több millió kapcsolat)
- Tápellátás megszűnése esetén tartsa a kapcsolási állapotot
- Kapcsolási sebesség

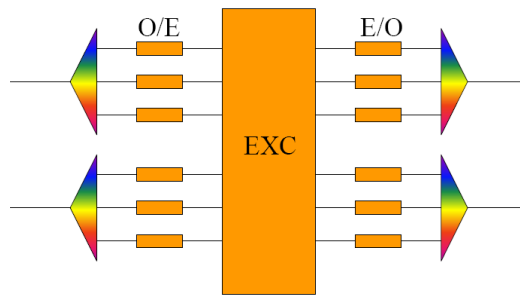
## Optikai kapcsolók

- O/E átalakítás
- Optikai kapcsolók
  - Elektromos vezérlés, OEO (jelen)
    - Hullámhossz független
      - Mechanikai kapcsoló
      - Termo-optikai
      - Elektrooptikai (pl. iránycsatoló)
      - Semiconductor optical amplifier (SOA)
      - Buborék
      - folyadékkristály
      - MEMS
    - Hullámhossz szelektív
      - Prizma, AWG
      - Holografikus
      - Akusztó-optikai
  - Optikai vezérlés, OOO (jövő?)
    - optikai vezérlésű optikai kapu
    - XGM, XPM, FWM...
    - Fejlesztés alatt



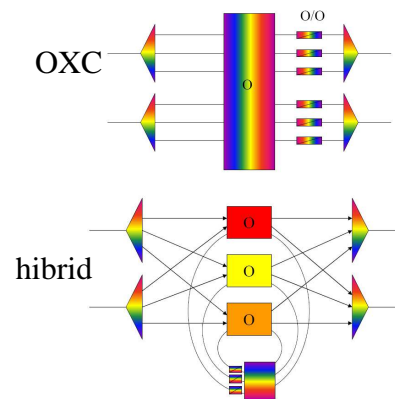
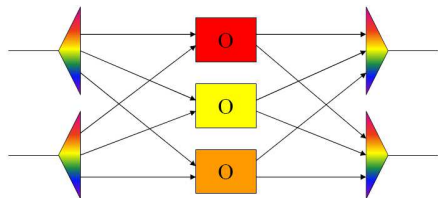
## Optikai-elektromos átalakítás

- ✓ Tisztán elektronikai kapcsoló, mindent átalakít az elektronikai rétegbe és ott kapcsol.
- ✓ teljes hullámhossz-konverziós képesség
- ✓ bárhonnan bárhova kapcsol tetszőleges add/drop lehetőség
- ✓ egyszerű, olcsó az EXC
- nem transzparens (a fényút megszakad)
- drága az E/O egység
- lassú



## Tisztán optikai kapcsolás

- ✓ nincs elektronika a kapcsolásban
- ✓ transzparens, gyors kapcsolás
- ✓ Gyors kapcsolási sebesség, elektromos sebesség korlátozás kiküszöbölése
- nincs hullámhossz-konverzió
- nincs leágaztatás és hozzáadás (add/drop)
- OXC: optikai rendező, minden kimeneten van hullámhosszváltási lehetőség is



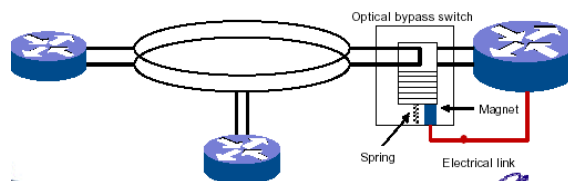
## Optikai kapcsolók

- O/E átalakítás
- Optikai kapcsolók
  - Elektromos vezérlés, OEO (jelen)
    - Hullámhossz független
      - Mechanikai kapcsoló
      - Termo-optikai
      - Elektrooptikai (pl. iránycsatoló)
      - Semiconductor optical amplifier (SOA)
      - Buborék
      - folyadékkristály
      - MEMS
    - Hullámhossz szelektív
      - Prizma, AWG
      - Holografikus
      - Akusztó-optikai
  - Optikai vezérlés, OOO (jövő?)
    - optikai vezérlésű optikai kapu
    - XGM, XPM, FWM...
    - Fejlesztés alatt

## Mechanikai kapcsolók

A fizikai útvonal átkonfigurálását egy fizikai eszköz (szál, prizma, stb) mechanikai mozgásával érjük el

- Történelmileg ez volt az első kapcsolótípus
- Lassú kapcsolás (10-50ms)
- Drága kapcsolómező => kis port számnál alkalmazott (max.10)
- Általában karbantartási, javítási, tartalék útvonalra kapcsolás esetén (pl. Bypass FDDI gyűrű esetén) => védelmi kapcsolás
- Csillapítás: 2-3dB, áthallás: 30-40dB
- Mozdó alkatrész => alacsony megbízhatóság



## Vezérelt iránycsatoló

- Elektrooptikai vezérlés  
LiNbO<sub>3</sub>,  $t < ns$
- thermooptikai vezérlés  
Szilícium vagy polimer hordozón,  $t = \text{pár ms}$   
Si:  $dn/dt = 1 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$ , Polimer:  $dn/dt = -1 \times 10^{-5} \text{ 1/K}$
- vezérlés hatására változik a törésmutató  
=> változik az optikai úthossz
- Cross - Bar állapotok közti kapcsolás
- 2x2 elemekből nagyméretű NxN kapcsolómező

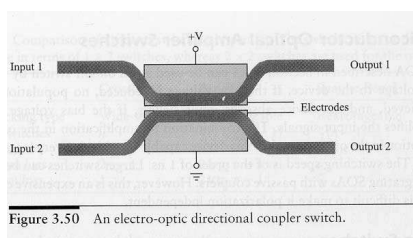
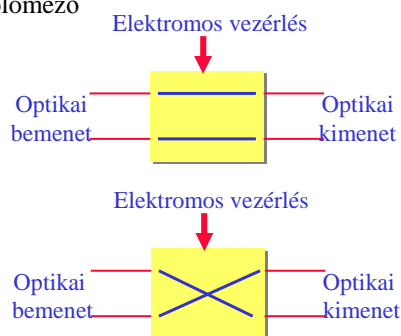
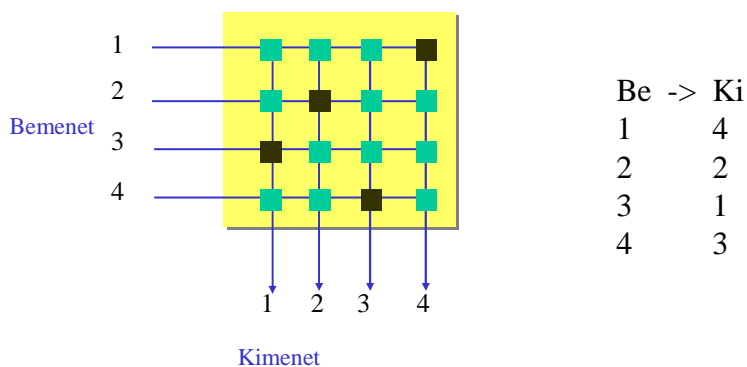


Figure 3.50 An electro-optic directional coupler switch.



## 2x2 => NxN : pl. Crossbar



$N^2$  blokk ( $N \times N$  kapcsolómátrixhoz)

Bővíthető, nincs ütközés a jelek között

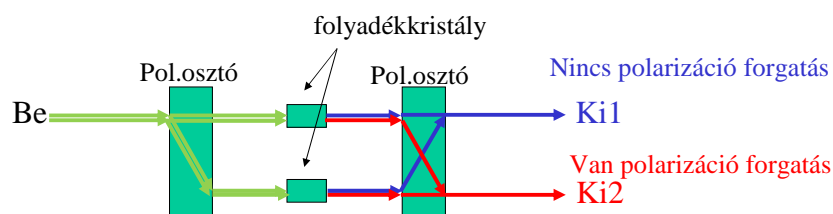
Nagy veszteség, nagy áthallás

Útvonalfüggő csillapítás

Legrövidebb út=1 elem, Leghosszabb út=2n-1 elem

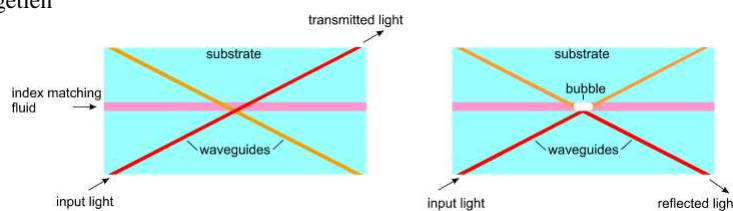
## Folyadékkristályos

- Polarizációs hatás alapján, + polarizációs osztók
- Folyadékkristály : feszültség nélkül nem változtat, előfeszítő feszültséggel  $90^\circ$ -ot forgat a polarizációt
- Vezérelhető optikai csillapítás, ha folyadékkristályos cellát nem digitálisan vezéreljük
- Kapcsolási sebesség: pár ms
- Alacsony ár
- Kis csillapítás
- Minimális csatornák közti áthallás



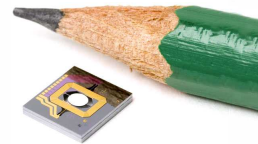
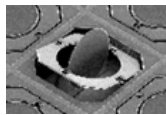
## Bubble Switch (buborékkapcsoló)

- Hullámvezetők kereszteződésében lévő folyadékot melegítve egy levegő buborék keletkezik
- Inkjet nyomtatók technológiája alapján (Agilent)
- Kétállapotú / digitális
- Alacsony kapcsolási sebesség (kb. 10ms)
- Kis áthallás (<50dB)
- Kis csillapítás (pár dB)
- Könnyen gyártható
- Olcsó, kis méret
- 2x2-es kapcsoló (max. 32x32 kapcsolómező)  
2001-ben már demonstrálták
- Nincs mozgó alkatrész
- Optikailag átlátszó
- Polarizáció független
- Hullámhossz független



## MEMS kapcsoló

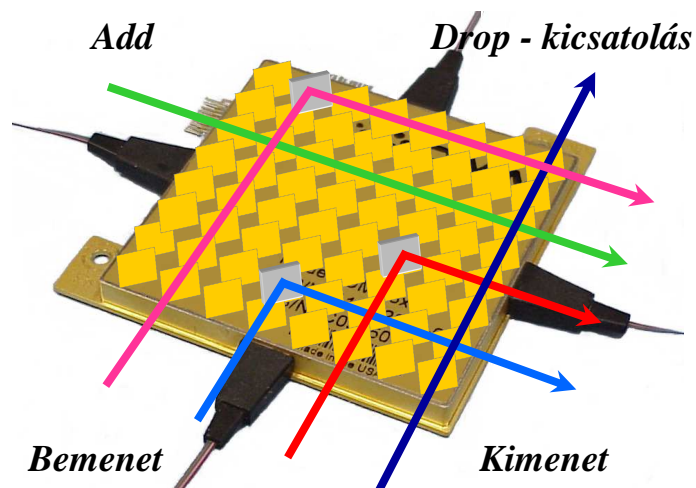
- MEMS: Micro Electro-Mechanical System
- MEMS kapcsoló
  - vezérelhető mikrotükör tömb
  - a fénysugarat a bemeneti kapukról közvetlenül a kimeneti kapukra irányítja
  - System-in-a-chip
- Integrált eszköz, amely egy része mozog elektrosztatikus, elektro-mágneses vagy hőmérséklet hatásra (félvezető technológia, mikrotükrök torziós mozgása 2D vagy 3D)
- Projektorokban is használt
- Mechanikai kapcsoló, de a gyártási eljárás és a miniatúr mérete miatt eltérő tulajdonságú, mint a mechanikai kapcsolók
- Szabadtéri terjedés => polarizációtól független működés
- => nanométeres pontosság
  
- Nagyszámú port (jelenleg 256)
- Adatsebességtől, hullámhossztól, protokolltól független működés
- Monolitikus technológia => olcsó, kompakt, könnyű, kis méret (256 tükörből álló mátrix < 7cm<sup>2</sup>)
- 100ns-10ms kapcsolási sebesség
- Kis teljesítményigény
- Kis áthallás (<60dB)
- Mechanikai hatásra (rázás) érzékeny



## MEMS tükör

- 2D MEMS:
  - Digitális (bináris) => két pozíciójú tükör: on(1), off (0)
  - Limitált méret (max. 32 x 32)
  - Tükrök száma:  $N^2$  ( $N \times N$  esetén)
  - Eltérő optikai útvonal hosszak és csillapítás
  - Egyszerű digitális vezérlés
  - Jelenleg is elérhető technológia

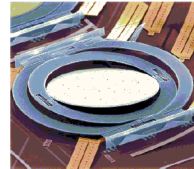
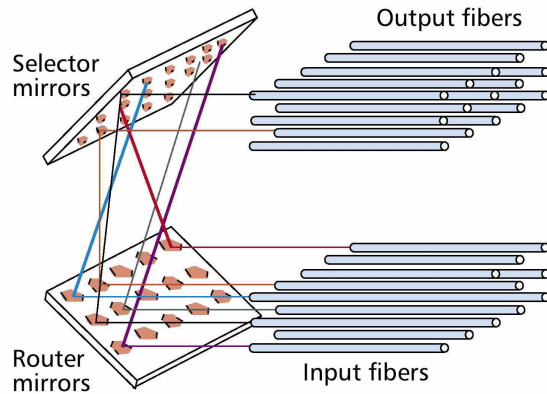
## Példa: Add/drop MUX, 2D MEMS



## MEMS tükör

- 2D MEMS:
  - Digitális (bináris) => két pozíciójú tükör: on(1), off (0)
  - Limitált méret (max. 32 x 32)
  - Tükrök száma:  $N^2$  ( $N \times N$  esetén)
  - Eltérő optikai útvonal hosszak és csillapítás
  - Egyszerű digitális vezérlés
  - Jelenleg is elérhető technológia
- 3D MEMS:
  - 2-nél több stabil állapota (vagy analóg mozgástere) van a tükörnek (2 tengely mentén)
  - Komplex, komplikált vezérlés (bonyolultabb pozicionálás)
  - Nagyszámú port (> 1000 bemeneti és kimeneti kapu)
  - Tükrök száma:  $2N$  ( $N \times N$  esetén)
  - Azonos optikai útvonal hosszak és csillapítás (4-5dB)
  - még kutatás alatt

## 3D MEMs rendszer



Lucent WaveStar  
LambdaRouter, 1999

## Félvezető Optikai Erősítő

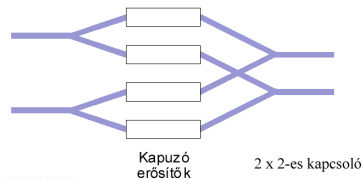
Passzív optikai eszköz

+ SOA kapcsoló (előfeszítő áram kapcsol, on-off)

A beérkező jelet kettéosztjuk, mindkét ágban SOA-ra jut a jel

- az egyik SOA-t nem feszítjük elő => lezár
- A másik SOA-t előfeszítjük => erősít

A másik bejövő jel útjában lévő SOA-kat ellentétesen vezéreljük => A kimeneti hullámvezetőkre csak egy jel jut



Gyors kapcsolás (100ps-1ns)

Kis számú kimenet

Nagy kapuszám esetén SOA-k integrálva csatolókkal

=> drága, nehéz polarizáció független működést megvalósítani

ASE

## Összefoglalás

Technológia	Működés	Előny	Hátrány	Alkalmazás
Mechanikai	Fizikai eszköz elmozdulása	Optikai tulajdonságok Ismert technológia	Sebesség, méret Skálázhatóság	Védelmi kapcsolás
MEMS	Mikrotükrök elmozdulása	Skálázhatóság méret	Megbízhatóság tokozás	OXC, OADM
Termo-optikai	Hőmérséklettel törésmutató változás	Integrálhatóság gyártás	Optikai tulajdonságok Teljesítmény felvétel Sebesség, skálázhatóság	OXC, OADM
Folyadékkristály	Polarizációs állapot forgatása	Megbízhatóság Optikai tulajdonságok	skálázhatóság Hőmérséklet függés	Védelmi kapcsolás, OADM
Buborék	Melegítéssel buborék	Moduláris skálázható	Nem tisztázott megbízhatóság Nagy csillapítás	OADM, OXC
Elektro-optikai	Elektromos térrel törésmutató változás	sebesség	Nagy csillapítás Polarizáció függés Skálázhatóság, Drága	OADM, OXC
SOA	Előfeszítéssel ON/OFF	Sebesség Csillapítás kompenzálása	Zaj skálázhatóság	OXC

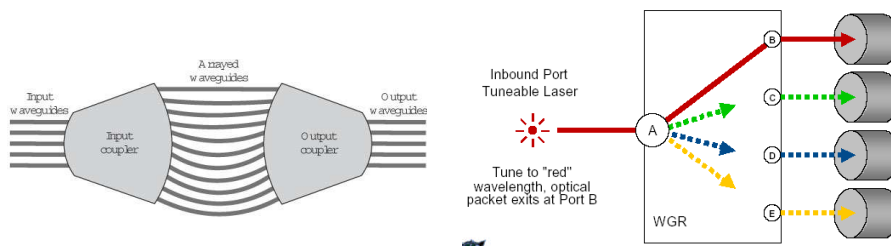
## Optikai kapcsolók

- O/E átalakítás
- Optikai kapcsolók
  - Elektromos vezérlés, OEO (jelen)
    - Hullámhossz független
      - Mechanikai kapcsoló
      - Termo-optikai
      - Elektrooptikai (pl. iránycsatoló)
      - Semiconductor optical amplifier (SOA)
      - Buborék
      - folyadékkristály
      - MEMS
    - Hullámhossz szelektív
      - Prizma, AWG
      - Holografikus
      - Akusztó-optikai
  - Optikai vezérlés, OOO (jövő?)
    - optikai vezérlésű optikai kapu
    - XGM, XPM, FWM...
    - Fejlesztés alatt



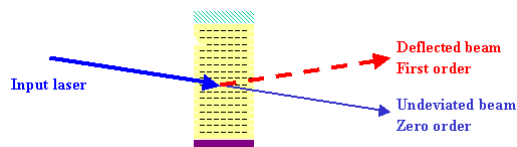
## Interferometrikus (AWG)

- Prizmához hasonlóan hullámhossz határozza meg a fény irányát
- Gyors kapcsolás (ns) => csomagkapcsolás
- Közepes ár
- Működés (optikai szűrőknél már tanultuk): általánosított MZ
  - a jelet számos ágra osztjuk
  - Eltérő hosszúságú hullámvezetők
  - Fázisképletetett jeleket összegezzük => konstruktív/destruktív interferencia az egyes kimeneteken
  - Eltérő hullámhosszakra eltérő kimeneten lesz konstruktív interferencia



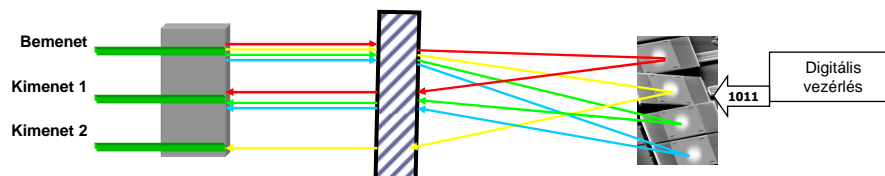
## Akusztó-optikai

- Működés (optikai szűrőknél és modulátornál már tanultuk): Fény és hang közti kölcsönhatás, a hangot arra használjuk, hogy rácyszerkezetet alakítsunk ki a hullámvezetőben, ami befolyásolja a fényterjedést
- Hullámhosszfüggően reflektál vagy átenged (fényterjedés iránya változik)
- Könnyen hangolható RF frekvencia szabja meg a törésmutató változás jellegét => elektromos vezérlés



## 1D MEMS + diszperzív elem

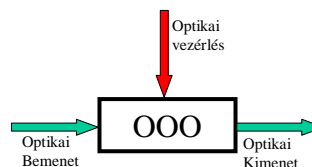
- 1-bemenet 2-kimenet, 4 hullámhossz



- 1-D MEMS + diszperzív elem
  - Diszperzív elem választja szét a hullámhosszakat (DEMUX)
  - MEMS hullámhossztól függetlenül működik
  - Diszperzív elem összegzi a kapcsolt jeleket

## Optikai kapcsolók

- O/E átalakítás
- Optikai kapcsolók
  - Elektromos vezérlés, OEO (jelen)
    - Hullámhossz független
      - Mechanikai kapcsoló
      - Termo-optikai
      - Elektrooptikai (pl. iránycsatoló)
      - Semiconductor optical amplifier (SOA)
      - Buborék
      - folyadékkristály
      - MEMS
    - Hullámhossz szelektív
      - Prizma, AWG
      - Holografikus
      - Akusztó-optikai
  - Optikai vezérlés, OOO (jövő?)
    - optikai vezérlésű optikai kapu
    - XGM, XPM, FWM...
    - Fejlesztés alatt



## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVA05)

### Hangolható optikai eszközök

2015.04.27.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu



Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>

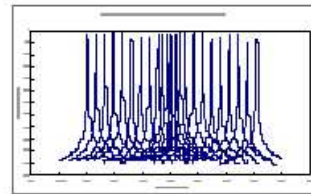


## Hangolható eszközök

- Hangolható lézer
- Hangolható optikai szűrő

## Hangolható lézer – fontosabb paraméterek

- Hangolási tartomány (35nm, akár 100nm is)
- Kimenő teljesítmény (10mW)
- Hangolási sebesség (<ms)
  - Lassú hangolás => tartalék
  - Gyors hangolás => jövő gyors kapcsolói
- Hosszú élettartam
- Stabil működés, megbízhatóság
- Egyszerű vezérlés
- Egyszerű gyártási technológia
- Olcsó
- Stb.

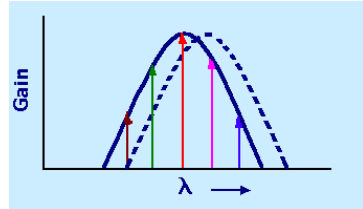


## Hangolható adó – típusok

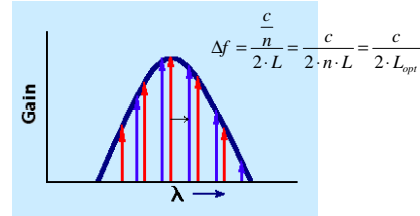
- Diszkrét DFB vagy DBR lézerek sorozata
  - Legegyszerűbb (ismert technológia)
  - Drága (sok lézer)
  - Monitorozni kell idő és hőmérséklet hatására nem hangolódott-e el
  - Fix hullámhosszú lézerek tömbje
- Diszkrét lézer hullámhossz hangolása
  - Mechanikus (külső rezonátor)
  - EO hatás (10-15nm)
  - Hőmérséklet (kb. 1nm)
  - Előfeszítés
- Többhullámhosszú lézer tömb
  - Hangolható lézer tömb (több MQW DFB lézer azonos hordozón)
  - „Spectral slicing”: Szélessávú optikai forrás + hullámvezető grating => optikai „comb”

## Diszkrét lézer hullámhossz hangolása

Meg kell változtatni az üreg erősítési karakterisztikáját



Az erősítés hullámhosszfüggésének megváltoztatása



A lézerüreg optikai hosszának megváltoztatása

$$n'_{eff} L$$

- Fizikai hossz változtatása
- Törésmutató változtatása  
=> terjedési sebesség változtatás

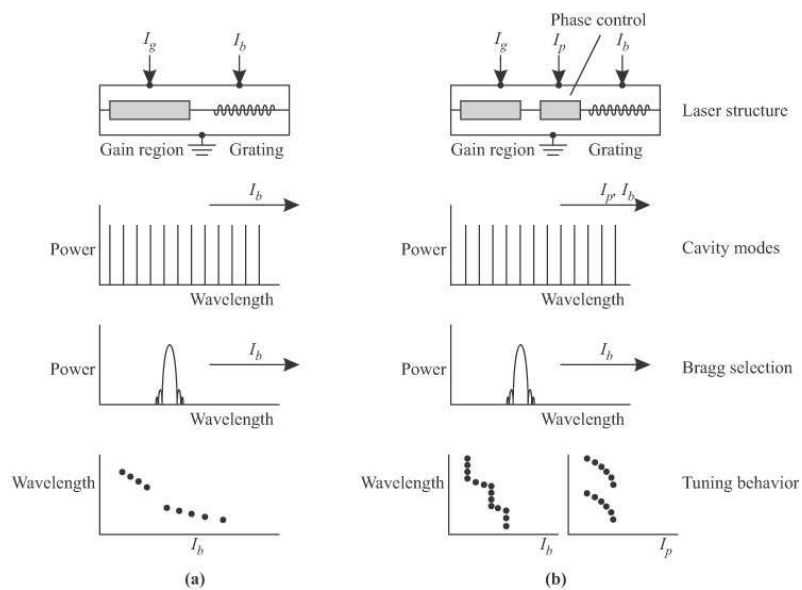
## Diszkrét lézer hangolása

- Mechanikai hangolás:
  - Külső rezonátor: Az erősítő anyagot Fabry-Perot üreg veszi körül
  - A két tükör távolságát változtatjuk
- Törésmutató változtatás az erősítő anyagon kívül, a rezonátoron belül
  - Elektro-optikai hangolás:
    - Elektromos tér hatására változik az anyag törésmutatója a külső üregben
  - Akusztó-optikai hangolás:
    - Elektromos jel hatására változik a törésmutató a külső üregben
- Törésmutató változtatás az erősítő anyagon belül
  - Előfeszítő árammal hangolás
    - Előfeszítő áram változása => töltéshordozó sűrűség változás az erősítő anyagban => törésmutató változás
  - Hőmérséklettel hangolás
    - Hőmérséklet változása => töltéshordozó sűrűség változás az erősítő anyagban => törésmutató változás

## Diszkrét lézer hangolása

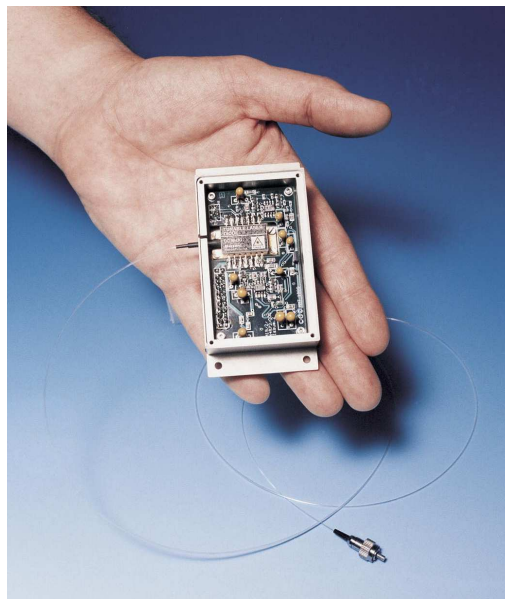
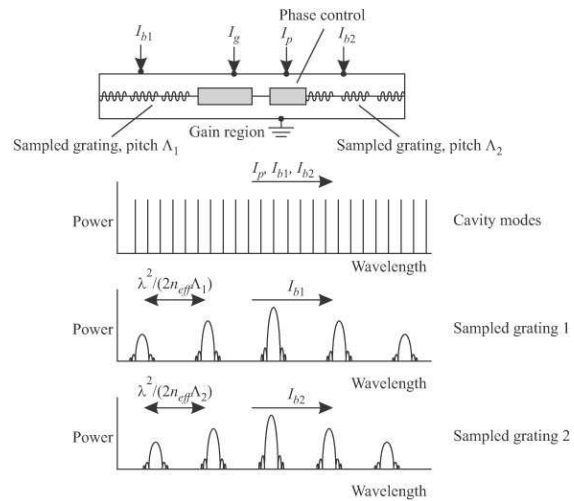
- Többszekciós lézer - előfeszítő árammal hangolás:
  - Az erősítő anyagban vagy azon kívül diffrakciós rácsot hozunk létre, (a hullámvezető hossza mentén periódikusan változik a törésmutató)
  - Csak azok a hullámhosszak jelennek meg, amelyek a rács periódusával és törésmutatójával illesztve vannak
  - Az áram hatására változik a rács (pl. törésmutató)
  - DFB (Distributed Feedback) Laser:  
a rács az erősítő anyagon belül található
  - DBR(Distributed Bragg Reflector) Laser:  
a rács az erősítő anyagon kívül található

## Két és három szekciós DBR



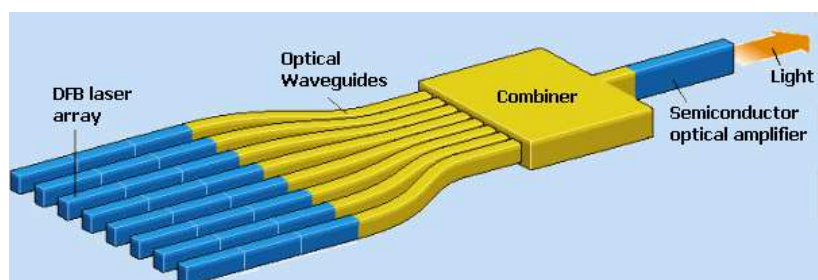
## Sampled Grating DBR

Nagyobb hangolási tartomány



## Hangolható lézer tömb

- Több lézer egy hordozón, amelyek kimenetét összegezzük
- Egy kiválasztott lézert kapcsolunk be
- Hőmérséklettel hangoljuk a pontos hullámhosszra
- A kimeneti jelet általában erősíteni kell
- A működést szoftveres úton vezéreljük
- Lézerek száma limitált

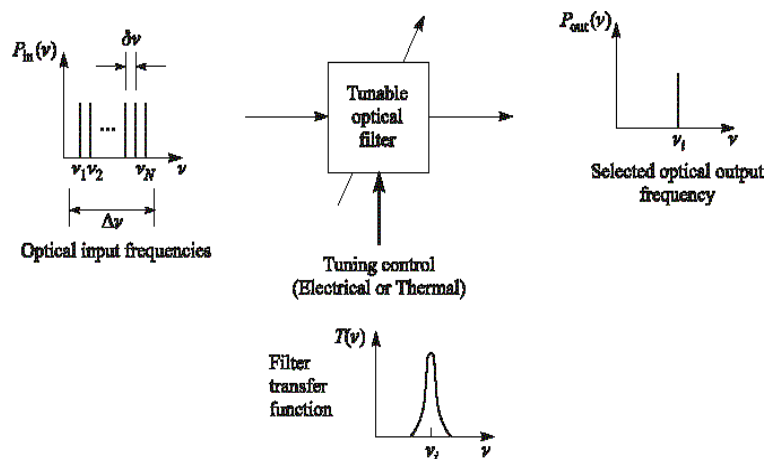


## Hangolható lézer típusok összehasonlítása

Típus	Hangolási tartomány	Hangolási idő	Megjegyzés
Mechanikus hangolás	Lézer teljes tartományában (10-20...500nm)	1-500ms	FP külső rezonátor méretének mechanikus hangolása
Akusztó-optikai hangolás	Lézer teljes tartományában	$n * 10 \mu s$	Csomagkapcsolt alkalmazásokban
Elektro-optikai hangolás	10nm	1-10ns	Gyors, de limitált hangolási tartomány
Előfeszítő áram hangolás	4nm	0.5-10 ns	Limitált hangolási tartomány
Kapcsolt források	Kapcsolás	< 65 ps	Integrálás növeli a funkcionalitást és a sebességet
Tömb források (AWG)	Tip. 16 csatorna, csatornatávolság: 200 GHz	100-200 ms	A teljes tömb hőmérséklettel hangolható
Tömb források (DFB)	A tömb elemeinek száma limitálja	1-10 ns	Független DFB lézerek, elhangolódás, áthallás



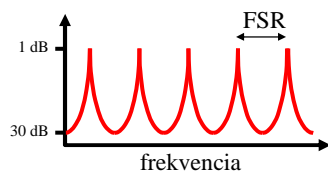
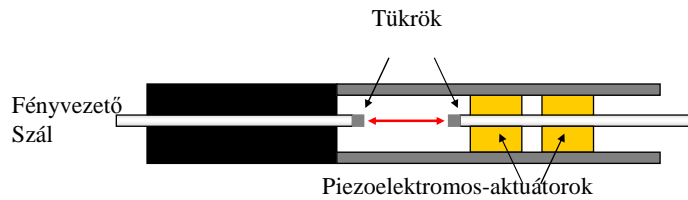
## Hangolható szűrő feladata



## Paraméterek

- Hangolási tartomány:
  - 25 THz (200nm) a teljes 1330 nm ... 1500 nm sávra (?)
  - C sáv  $\Delta\lambda = 35$  nm, 1550 nm körül (EDFA)
- Hangolási sebesség:
  - Jelenlegi rendszerekben tipikusan: ms
- Sávszélesség
- Beiktatási csillapítás
- Polarizáció függő csillapítás (PDL)
- Szomszédos és nem szomszédos csatorna elnyomása
  - tipikusan >30 dB

## Hangolható Fabry-Perot szűrő (mechanikai hangolás)



Hangolás: üreg hosszával

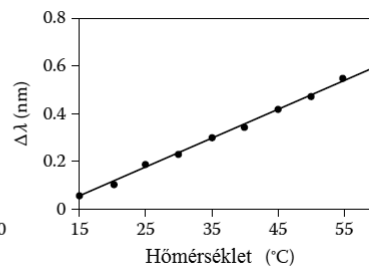
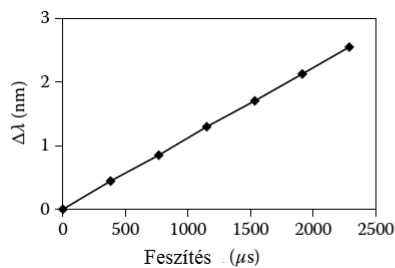
## Hangolható FBG (hőmérséklet, mechanikus)

$$2\Lambda n_{\text{eff}} = \lambda_B, \Lambda: \text{rácsállandó}, n_{\text{eff}}: \text{effektív törésmutató}$$

- Rácsállandó változtatása hangolja a reflexió hullámhosszt

- Hőmérséklettel
- Nyújtással (mechanikus)

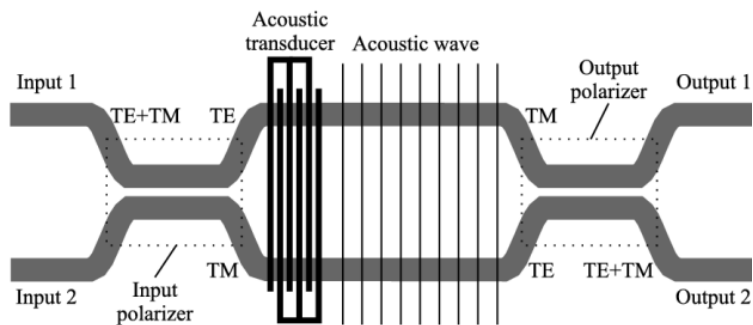
Csatorna távolság=100 GHz=>0.8 nm=800 pm  
Silica-on-silicon drifts: 12 pm/°C  
66 °C változás => 800pm elhangolás





## Akusztó-optikai

- Fény és hang közti kölcsönhatás, a hangot arra használjuk, hogy rácsszerkezetet (Bragg rács) alakítsunk ki a hullámvezetőben
- Akusztikus és fényhullám ellentétes irányba halad
- RF frekvencia szabja meg a törésmutató változás jellegét
- RF frekvencia könnyen hangolható



## Folyadékkristályos

- Folyadékkristály elektromos vezérlés  
=> törésmutató változás
- FP etalonban elhelyezve => hangolás

## Hangolható szűrők összehasonlítása

Típus	Hangolási tartomány	Hangolási idő	
Mechanikus (pl. FP)	500 nm	1-10 ms	Üvegszálás megvalósítással lehetséges
Hőmérséklettel - FBG	10 nm	1-10 ms	Hőmérséklet, vagy feszítés
- AWG	40 nm	10 ms	
Electro-optic	10-15 nm	1-10 ns	
Kaszkáád MZ	4nm	50ns	
Acousto-optic	≈ 100 nm	≈ 10 μs	
Folyadékkristály	30-40 nm	0.5-10 μs	FP etalonban Alacsony fogyasztás (<1mW)
Félvezető (SOA vagy LD)	5 nm	0.1-1 ns	Kis csatornaszám

## Optikai hálózatok elemei (BMEVIHVA05)

### Optikai jelfeldolgozás eszközei

### All optical signal processing

2015.05.03.

**Gerhátné Dr. Udvary Eszter**

udvary@mht.bme.hu

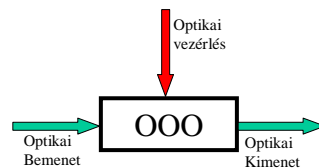


Budapest University of Technology and Economics  
Department of Broadband Infocommunication Systems  
<http://www.mht.bme.hu/omt>



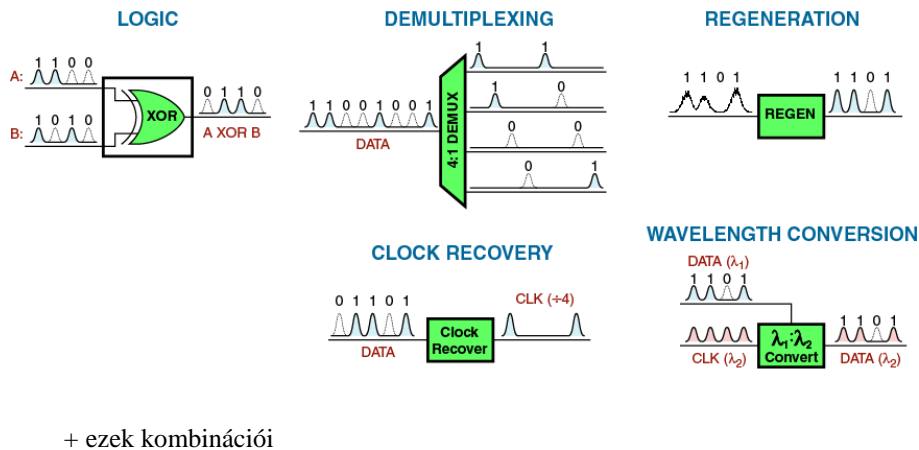
## Tisztán optikai jelfeldolgozás

- Közvetlenül optikai tartományban végzett jelfeldolgozás, jelalakformálás
- Optikai vezérlésű optikai kapu (fényt vezérlünk fénnel)



- Optikai nemlineáris jelenségek
  - SOA
    - Kompakt, hatékony, zaj termel
  - Nemlineáris üvegszál
    - Nagyobb teljesítmény, nagyobb hossz
    - Nemlinearitás paramétere:  $\gamma = 2\pi n^2 / (\lambda A_{\text{eff}})$
    - Nemlineáris üvegszál:  $\gamma > 10$  1/kmW

## Megvalósítható feladatok



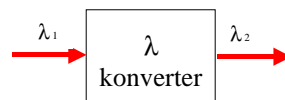
## Tulajdonságok

- Sebesség
    - Optikai nemlineáris jelenségek => gyorsabb működés, mint a leggyorsabb elektronika
    - Rövid optikai impulzusokat könnyebb létrehozni, mint a rövid elektromos impulzusokat (fs) => nagy sebességű megoldások
  - Ár / Egyszerűség (?)
    - Nincs drága O-E-O átalakítás a rendszerben
    - Csak a hálózat határán van O-E vagy E-O átalakítás
  - RF hatásokra nem érzékeny
  - Kis jelveszteség (?)
- DE
- A megvalósítható feladatok komplexitása korlátozott

## Hullámhossz konverzió

### Hullámhossz átalakító típusok

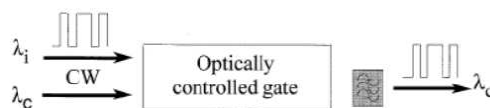
- Optoelektronikus - JELEN
- Tisztán optikai – JÖVŐ (de mikor?)



- Lézer
- Koherens Four Wave Mixing (FWM)
  - Nemlinearitás => keverés
  - nagyon gyors (100Gbit/s)
- Optikailag vezérelt optikai kapu

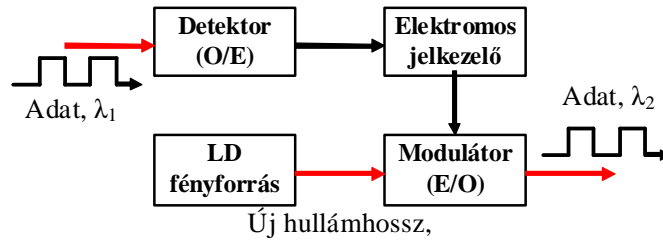
- XGM

- XPM



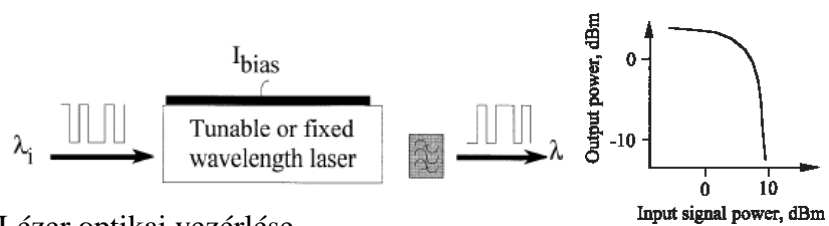


## Optoelektronikus



- ✓Egyszerű megvalósítás (jól ismert elemek)
- ✓polarizáció független
- ✓nagy bemeneti dinamika tartomány
- ✓3R
- ✗nagy teljesítményfelvétel (2W)
- ✗nagy sebesség => teljesítmény fogyasztás & ár nő
- ✗sebességét az elektronikus áramkörök limitálják

## Lézer



Lézer optikai vezérlése

bejövő jel => Erősítés telítődés => vezérli a lézer oszcillációt

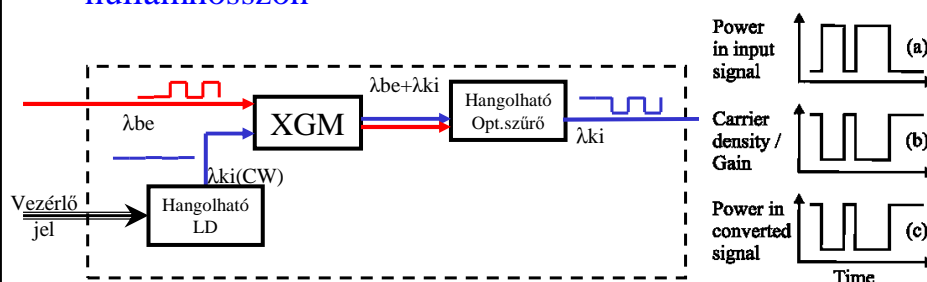
- ✓egyszerű felépítés
- ✓bemeneti teljesítmény 0-10dBm
- ✗polarizáció függés
- ✗chirp
- ✗lézer rezonancia frekvencia => max sebesség=10Gbit/s
- ✗csak Intenzitás Moduláció

## XGM - Cross Gain Modulation

A bemeneti jel ( $\lambda_{be}$ ) erősítés (és fázis) modulációt okoz

A folytonos optikai bemenet ( $\lambda_{ki}$ ) modulált erősítést lát

Az erősítés modulációja ellenfázisban van a bejövő jel modulációjával => Invertált adat jelenik meg  $\lambda_{ki}$  hullámhosszon



## XGM

töltéshordozó dinamika

=> sebesség

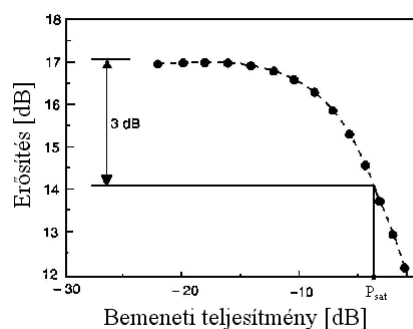
- nagy áram
- nagy optikai jelszint
- nagy anyagerősítés

✓ egyszerű

✗ SOA => ASE => SNR és kioltási tényező romlás

negatív meredekségű görbe => invertált kimeneti jel

$\lambda_{ki}$  a SOA erősítési sávján belül bármilyen hullámhossz lehet



## XPM - Cross Phase Modulation

$\lambda_{in}$  fázismodulációt okoz a SOA-ban

$\lambda_{in} \Rightarrow$  töltéshordozó sűrűség változás  $\Rightarrow$  törésmutató változás

$\lambda_{out}$  jel fázismodulációt szenved

törésmutató változás  $\Rightarrow$  terjedési sebesség változás  $\Rightarrow$  fáziskülönbség

Az interferométer a fázismodulációt intenzitásmodulációba konvertálja (destruktív/konstruktív interferencia)

SOA interferometrikus hullámvezető elrendezésbe integrálva

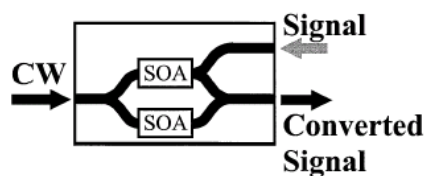
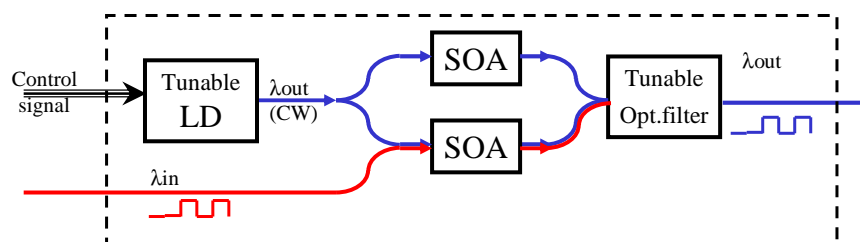
- MachZehnder interferométer
- Michelson interferométer

Invertált és nem invertált kimenő jel is lehetséges

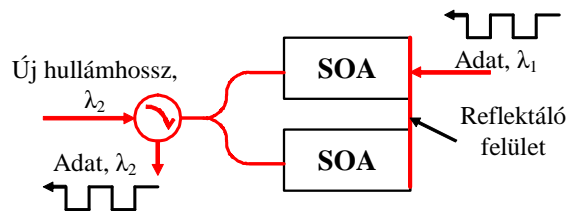
Jelregenerálás megvalósítható

Pontos előfeszítő feszültség és hőmérséklet vezérlés szükséges, mert a fázis erősen függ a munkaponttól

## 3-port Mach-Zehnder interferometer - XPM



## Michelson interferometer - XPM



## XGM – XPM összehasonlítás

- XGM
  - ✓ Egyszerű felépítés
  - ✗ Invertált adat
  - ✗ Nagy chirp és zajszint (ASE) => kaszkádba csatlakozhatóság?
  - ✗ Sebesség  $< = >$  kioltási tényező
- XPM
  - ✗ Komplikált felépítés és vezérlés
  - ✗ Planár hullámvezető és SOA integrálása
  - ✓ Invertált és **nem invertált adat**
  - ✓ Jelvisszaállítás

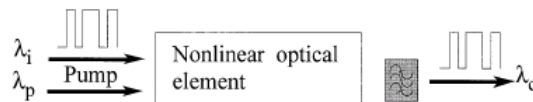
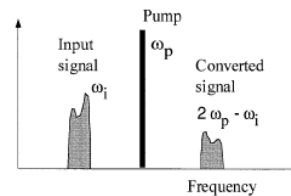
## FWM

Nemlinearitás => keverés

A konvertált jel hordozza az eredeti jelek fázis és amplitúdóját

Hullámhossz konverzió és diszperzió kompenzálás

- ✓ nagyon gyors (100Gbit/s)
- ✓ **minden modulációs mód, átlátszóság**  
(fázisinformációt is megőrzi)
- ✓ WDM csatornákat egyszerre
- ✗ **alacsony átalakítási hatások (-20dB)**
- ✗ pumpáló teljesítmény igény: 10-20dBm
- ✗ Polarizáció érzékenység
- ✗  $\lambda_{\text{konvertált}}$  függ  $\lambda_{\text{pump}}$  &  $\lambda_{\text{input}}$  -tól => hangolható pumpáló lézer



## Optikai logikák

## Optikai logikai kapuk

Az optikai számítógépek alap építőeleme

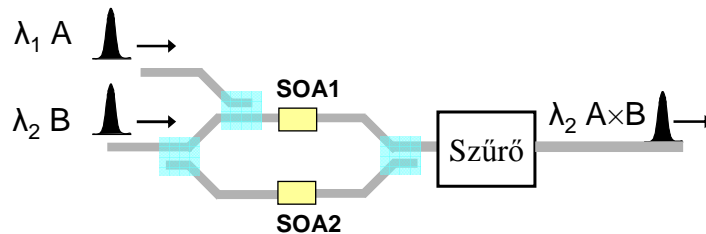
- Tisztán optikai
- Teljes logikai funkcionalitás – NAND, AND, stb.
- Ultra gyors
- Chip hordozón megvalósítható
- Alacsony teljesítmény disszipáció
- Alacsony ár

## Logikai kapu (pl. optikai AND kapu)

A/B	0	1
0	0	0
1	0	1

**Megvalósítás:**

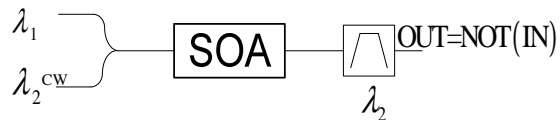
Optikai interferométer + optikai nemlineáris eszköz (XPM)



Alapállapotban MZI zárva (két ág ellenfázisban találkozik)

**NOT (XGM)**

IN



**AND (FWM)**

IN1

$\lambda_1$

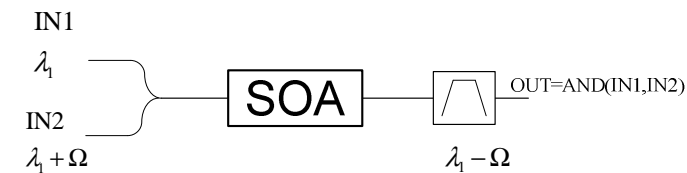
IN2

$\lambda_1 + \Omega$

SOA

$\lambda_1 - \Omega$

OUT=AND(IN1,IN2)



**NOR (XGM)**

IN1

$\lambda_1$

CW signal

$\lambda_2$

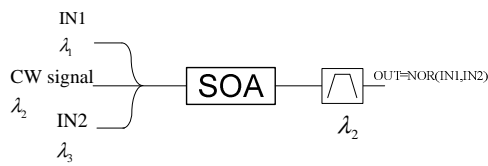
IN2

$\lambda_3$

SOA

$\lambda_2$

OUT=NOR(IN1,IN2)



**OR (XPM)**

IN1

$\lambda_1$

IN2

$\lambda_3$

CW

$\lambda_3$

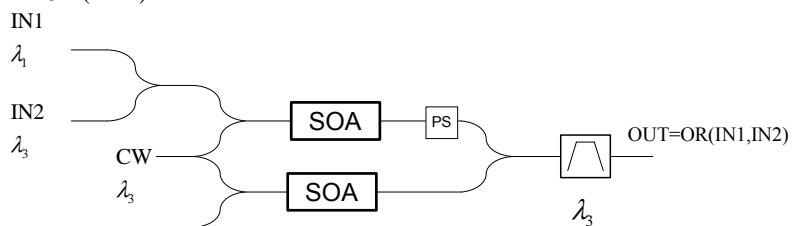
SOA

PS

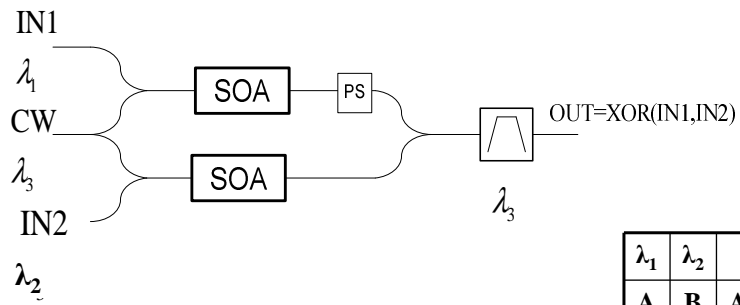
SOA

$\lambda_3$

OUT=OR(IN1,IN2)



## XOR (XPM)

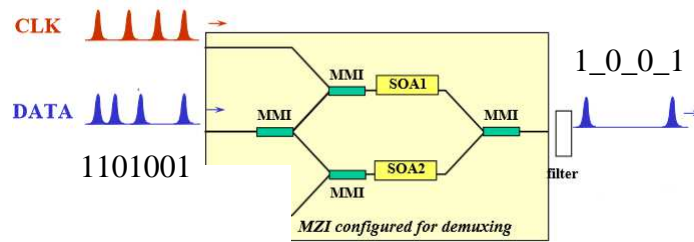


$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$
A	B	A XOR B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

## demultiplexálás



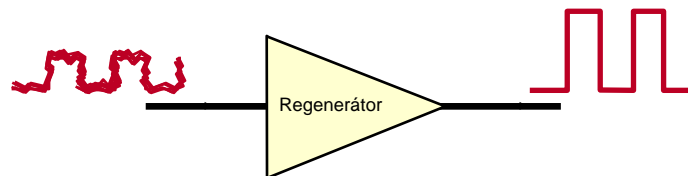
## TDM DEMUX



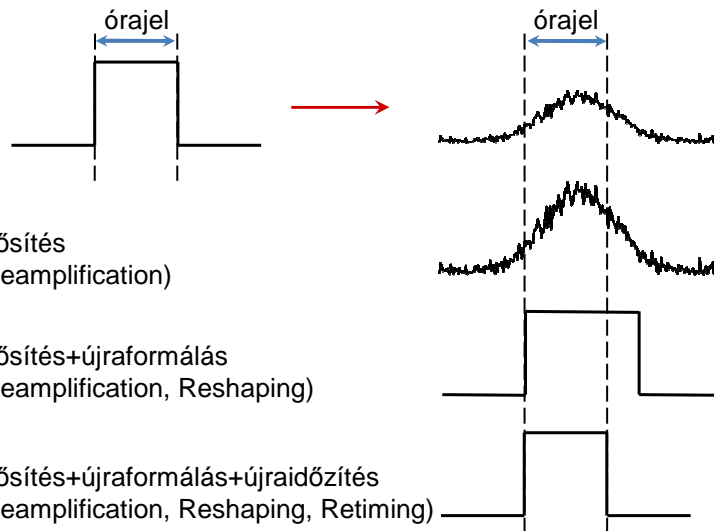
2R Tisztán optikai jelregenerálás

## Optikai jelalakformálás

- Optikai regenerálás: optikai tartományban (OEO nélkül)
  - 3R regenerátor: Reamplification, Reshaping, Retiming
  - 2R regenerátor: Reamplification, Reshaping
- Az optikai erősítő kompenzálja a szál veszteségeit
  - 1R
  - ASE zaj hozzáadása + timing jitter
- A DCF kompenzálja a diszperzió miatt jelalak torzulást
  - OA+DCF => „1.5R”
- Optikai jelalakformálás: nemlineáris feladat
  - Optikai nemlineáris jelenségek használata (SPM, XPM, FWM)
  - Elektromos áramkörök sebesség limitje nem korlátozó (160G+)
  - Moduláció független működés
  - Alacsonyabb fogyasztás

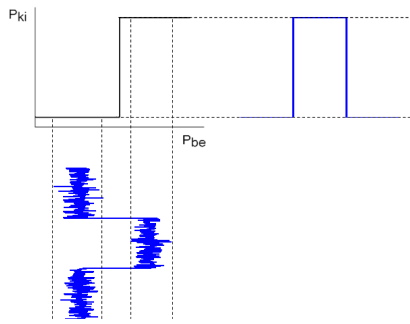


## Regenerálás lépései

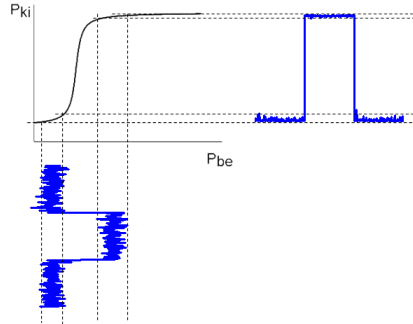


## 2R

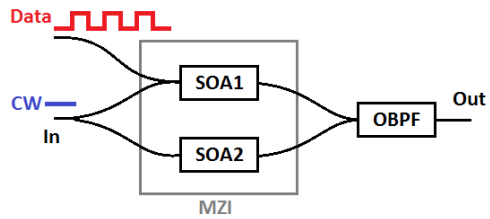
Ideális átviteli függvény



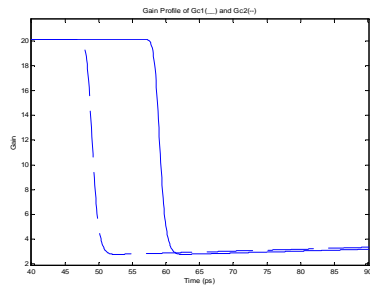
valós átviteli függvény



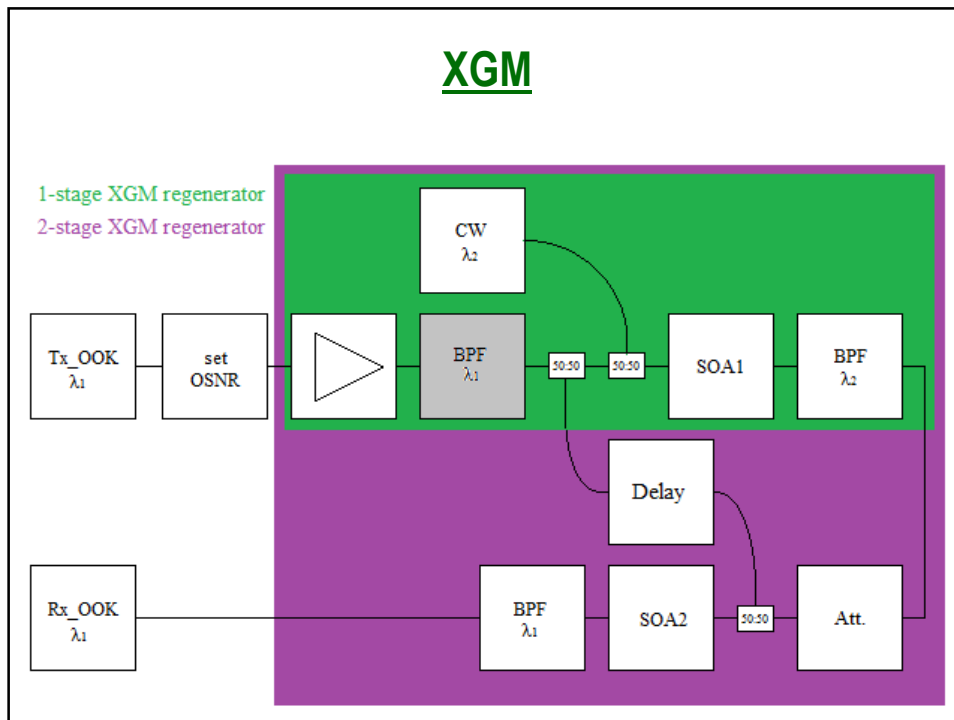
## XPM



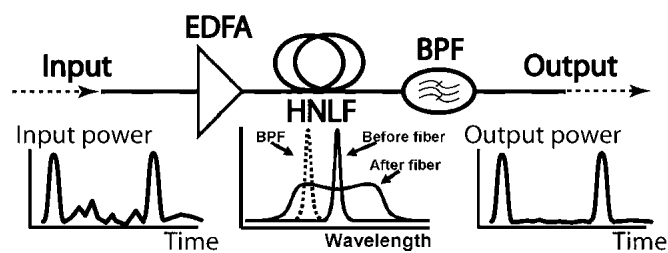
- Aktív MZ interferrométer



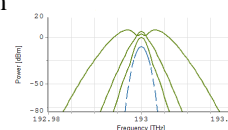
## XGM



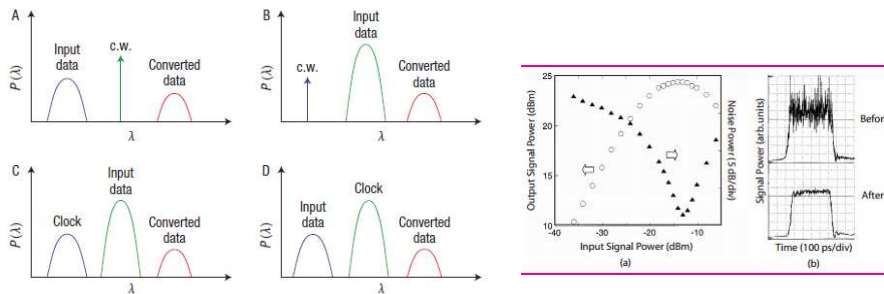
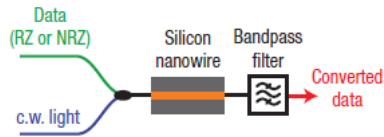
## SPM



- Ötlet: 1988
- SPM => kiszélesíti a spektrumot (speciális, nagy nemlinearitású szál)
  - A zajspektrum változatlan marad, nem szélesedik ki
- Optikai szűrő kiválaszt egy keskeny spektrum tartományt (kb. 1nm), amely tartalmazza az információt, de az eredeti zajt nem
  - „0”: a zajt a szűrő eltávolítja
  - „1”: lépcsős átviteli függvény csökkenti a zajt



## FWM



## Optikai órajel visszaállítás



- Impulzus lézer szükséges (rövid impulzusokat bocsát ki)
  - Self Pulsating Laser
  - Mode Lock Laser
- Adatfolyammal szinkronizáljuk
- 40 Gbit/s sebességig megvalósítható

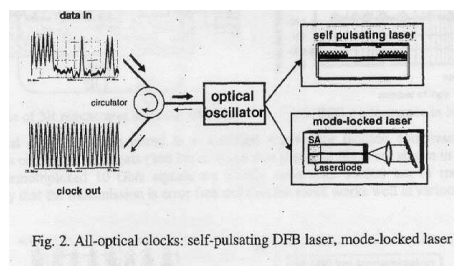


Fig. 2. All-optical clocks: self-pulsating DFB laser, mode-locked laser