

1. Optikai átviteli közeg: optikai szálak működésének alapjai, csillapításokai, fontosabb típusok

Optikai átviteli közeg típusai:

- optikai szál (a rendszer zárt, külső zavaroktól mentes, a szál hullámvezetőként működik)
- szabadtéri átvitel (gondoskodni kell a fény fókuszálásáról, külső zavarok: köd, eső, légkör, nagy a közeg optikai csillapítása)

Az optikai szál alapanyaga nagyon erősen tisztított üveg. A szál optikai veszteségei két csoportra oszthatjuk. Egyrészt a szál anyagának tulajdonságaiból következő, a száltól elválaszthatatlan veszteségek, másrészt azok a veszteségek, amelyek abból erednek, hogy a fénysugár eltérül az ideális terjedési iránytól.

A szálban haladó fény csillapodásának három oka van:

- Az abszorpciós veszteség lényege, hogy a szál anyaga a fény egy részét elnyeli és hővé alakítja. A folyamat alapja, hogy az anyagban lévő töltéshordozók a fény elnyelésével magasabb energiaállapotba kerülnek, majd az elnyelt fényenergia relaxáció útján hővé alakul. Az abszorpció a szál csillapításának 10-20 %-ért felelős. 1700 nm-nél nagyobb hullámhosszak esetén az alkalmazott üveg csillapítása hirtelen megnő a SiO₂ vibrációs átmeneti miatt, így az üvegszálás távközlésre alkalmazható optikai frekvenciák alsó határát ez jelenti. Az anyag nagy abszorpcióval rendelkezik kis hullámhosszak esetén. Ez a jelenség az anyag elektronjainak sávszerkezetéből következik, abszorpciós élnek nevezik és ez szabja meg az optikai szál alkalmazhatóságát nagy frekvenciák esetén. Az üvegszál anyagában lévő szennyező OH⁻ ionok jelenléte okoz még abszorpciót, azonban a mai fejlett gyártástechnológiával számuk és így hatásuk is csökkenthető. A gyakorlatban a 850nm-es, 1300 nm-es illetve az 1550 nm-es hullámhosszakot alkalmazzák, az ott található csillapítási minimumok miatt.

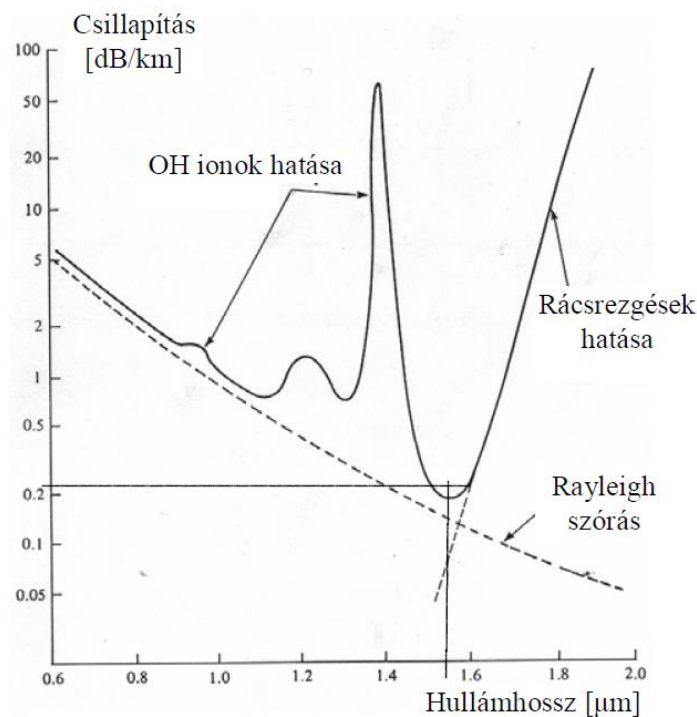
a szál sugárzási vesztesége (bending losses). Sugárzási veszteség általában akkor lép fel, ha a szál geometriai paraméterei hirtelen megváltoznak (pl. erős hajlítás), illetve a szál anyagába feszültség keletkezik gyártási hiba, vagy mechanikai behatás hatására (pl. a szál elliptikus keresztmetszetű). A sugárzási veszteség megfelelő technológiával gyártott és felszerelt szál esetén elhanyagolható.

Az üvegszál meghajlításakor a fénynek a külső élen gyorsabban kellene haladnia, azaz a fénysebességnél gyorsabban, ami nem lehetséges, ezért az ábrán fekete sátrózással jelölt rész sugárzás formájában leszakad. A hajlítás következtében fellépő veszteség mértéke függ a görbületi sugártól is.

- Rayleigh szórás (scattering). A Rayleigh szórás a csillapítás értékének 80-90 %-ért felelős. Létrejöttének oka, hogy az üvegszál törésmutatójának mikroszkopikus egyenetlenségei diffrakciót okoznak, vagyis a fényenergia bizonyos része minden irányba szétsugárzódik. A diffrakció mértéke akkor a legnagyobb, ha a fény hullámhossza összemérhető a mikroszkopikus egyenetlenségek nagyságával, így a szórás mértéke a hullámhossz növelésével csökken (az abszorpciós minimumok mellett, ez az oka annak, hogy az alkalmazott optikai frekvenciák 850 nm-es hullámhosszról eltolódtak az 1300 nm-es illetve az 1550 nm-es tartományba). A szóródás miatti csillapítási együttható fordítottan arányos a hullámhossz negyedik hatványával.

A következő ábra az optikai szál kilométerenkénti csillapítását mutatja a hullámhossz függvényében. Jól láthatóak az OH ionoknak köszönhető csúcsok 950 1240 és 1390 nm-nél. A rácsrezgések hatására 1700 nm környékén hirtelen csillapításnövekedés figyelhető meg. Tehát az optikai szál tényleges csillapítása igen erősen változik a hullámhossz függvényében. Ugyanakkor ez a jelleg erősen függ az átviteli anyagtól, pl. találtak olyan műanyagot, ahol az átviteli határ eltolódott és 10 μ m-en is jó csillapítást tudtak elérni.

Az ábrán látható, hogy a függvény minimuma 0.25dB/km értéknél van 1.55 μ m-es hullámhossz esetén. Ebből következik, hogy maximálisan kb. 100 km-t tudunk áthidalni erősítés nélkül. Ugyanakkor ne feledkezzünk meg arról, hogy tényleges optikai összeköttetés esetén veszteséget okoznak a szálillesztések, csatlakozók is. Mindezek ellenére a hagyományos fémvezető (koaxiális tápvonal) csillapítása minden frekvencián nagyobb, mint az üvegszál csillapítása, tehát sokkal sűrűbben van szükség ismétlő állomásokra is.

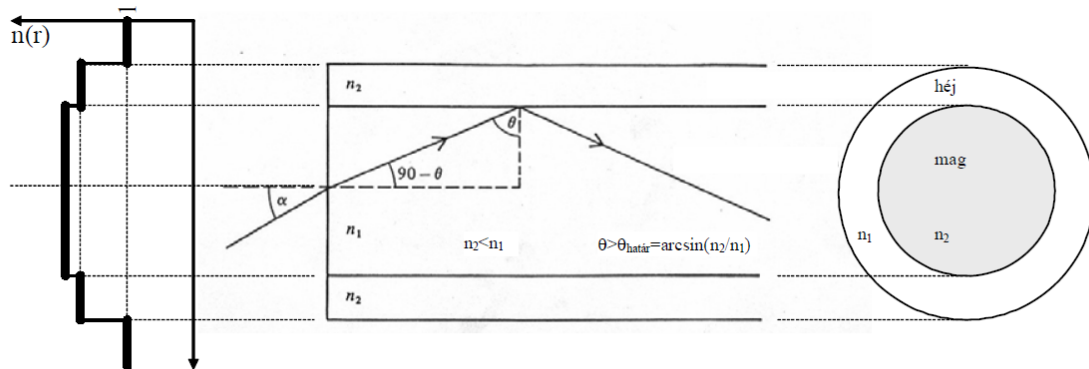


53. ábra optikai szál csillapítása

7.2. Optikai szálak felépítése

A szóródási jelenségek miatt homogén törésmutatójú üvegszál nem lenne alkalmas fényvezetőnek, ezért magból és ettől kis mértékben eltérő törésmutatójú héjból álló szerkezetet alakítanak ki. Beszélhetünk egymódusú ill. több módusú üvegszálról, amely a terjedni képes módusok számára utal. A különböző száltípusok eltérő törésmutató profillal jellemezhetőek.

7.2.1 Lépcsős indexű üvegszálak, STEP index

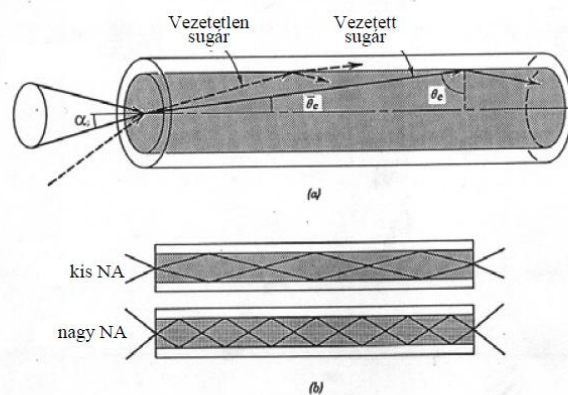


54. ábra STEP index szál felépítése

Ugrásszerű törésmutató változás van a keresztmetszetben, a nagyobb (n_1) törésmutatójú magot körbeveszi a kisebb (n_2) törésmutatójú héj. Így ha a beesési szög nagyobb a teljes reflexió határszögénél ($\theta_{\text{határ}}$), akkor a héj és a mag határfelületén fellépő teljes reflexió vezeti a fénycsugart.

A szál numerikus apertúrája (befogadó szöge) szabja meg, hogy mekkora az a beesési szög (α), amely alatt érkező hullámot még képes az optikai szál vezetni. Ennek a paraméternek a segítségével egy kúpot kapunk, amelyen belül érkező fénycsugarakat befogadja és vezeti a szál.

$$\alpha_{\text{max}} = \arcsin\left(\frac{NA}{n_0}\right), \quad NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (77)$$



55. ábra

7.2.1.1 Monomódus, STEP index

A lépcsős indexű szál mag keresztmetszetétől függ a terjedő módusok száma. Amennyiben elegendően kicsi a mag keresztmetszete (1310-1550nm-es hullámhossz esetén 9-10 μ m), akkor csak az alaplómódussal kell számolnunk, a magasabb módusok nem terjednek a hullámvezetőkben.

7.2.1.2 Multimódus, STEP index

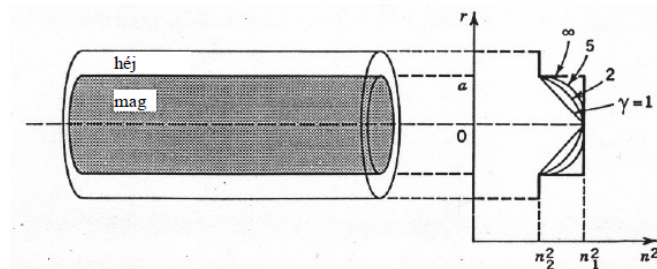
A többmódusú szál magmérete lényegesen nagyobb. Ennek a típusnak jelentős előnye az, hogy az optikai jel be/ki csatolása könnyen végrehajtható a nagyobb méretek miatt. Ugyanakkor a mag keresztmetszetének (d) növelésével a móduszám is nő. A módusok között különbség van hullámterjedési szempontból, azaz különböző módon terjednek. Az egyes módusok eltérő utat tesznek meg, nem azonos a terjedési idő, ezért a beadott egységugrás a kimeneten szétkenődik, eltorzulva jelenik meg, amely jelenség korlátozza az átviteli sebességet. (lásd. 7.3.3 fejezet, Módusdiszperzió)

7.2.2 Fokozatosan változó indexű (graded index) üvegszálak

A különböző módusok terjedési idejének kiegyenlítésére szolgál a folyamatosan változó indexű üvegszál. Működésének elve azon az ötleten alapul, hogy a fizikailag nagyobb úthosszt bejáró módusok terjedési sebességét növelni kell, ezzel el lehet érni, hogy az eltérő megtett távolság ellenére a terjedési idő azonos legyen. A fényterjedés sebességét a terjedési közeg törésmutatója határozza meg, tehát a törésmutatót kell lecsökkenteni a mag széle felé. A törésmutató a sugár függvényében:

$$n(r) = \sqrt{1 - 2 \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \left(\frac{r}{a}\right)^\gamma}, \quad (r < a) \quad (78)$$

A képletből látható, hogy γ kitevő határozza meg leginkább a törésmutató profilt. A következő ábra a törésmutató profil alakulását mutatja különböző γ paraméterek esetén. Jól láthatóan γ növekedtével egyre jobban domborodik a profil. Gyakorlatban megvalósított szálak esetén $\gamma=2..5$.



56. ábra

Ez az üvegszál nagy sebességnél is kedvező átvittel rendelkezik, viszont komplikáltabb az előállítás és ennek megfelelően drágább, mint a STEP index optikai szál. Éppen ezért a gyakorlatban elterjedtebb a monomódusú STEP index optikai szál, amelyben egyetlen módus terjed, tehát a többmódusú terjedés problémája fel sem lép.

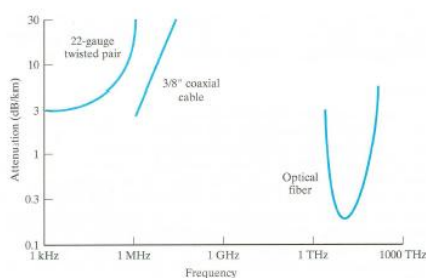
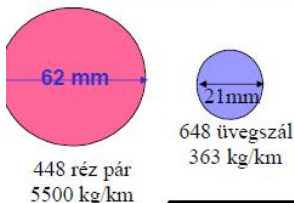
Üvegszál tulajdonságai

3

- SiO_2
- Kis átmérő
- Kis súly
- Kis csillapítás
- Nagy sávzélesség
- 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

4

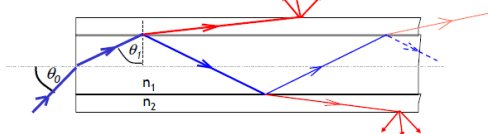


	Optikai szál	Koax (RG-19/U)
Csillapítás	0.3dB/km (kb. 7%/km)	22.6dB/km@100MHz (kb.99.5%/km)
súly	6kg/km (2.5mm kábelátmérő)	1110kg/km (d=28.4mm)

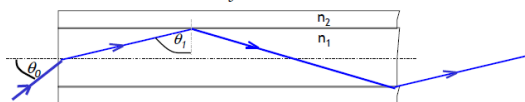
Fényvezetés - sugároptika

7

ha $\theta_i < \theta_c$ => a sugár részben törik részben reflektálódik a jel elszivárog (Leaky Mode)



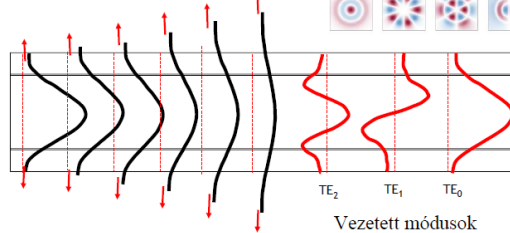
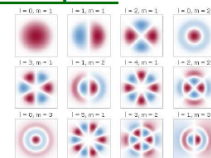
ha $\theta_i > \theta_c$ => teljes reflexió vezetett jel



Fényvezetés - hullámoptika

8

Maxwell egyenletek alapján véges számú vezetett módus végtelen számú szivárgó módus



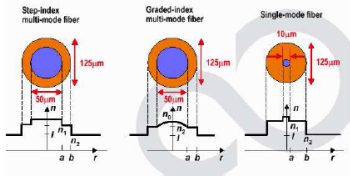
Fényvezető szál

egymódusú

- mag < 10λ
- mag átmérője=9 (8.3-10) μm
- héj átmérője=125μm
- SI

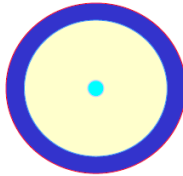
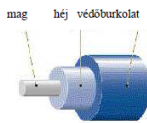
Többmódusú (rövid távolságra)

- mag = 50, 62.5, 100μm
- héj átmérője=125μm
- SI és GI

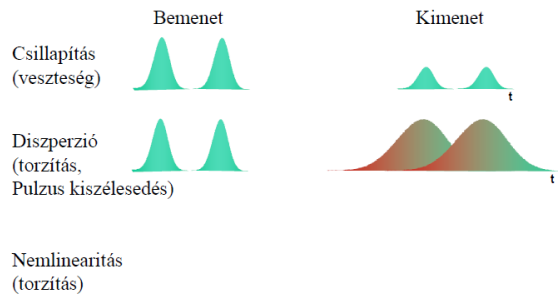


Fényvezető szál felépítése

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

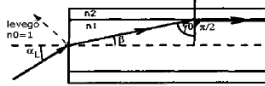


Minőségromló hatások



Fényvezetés elmélete

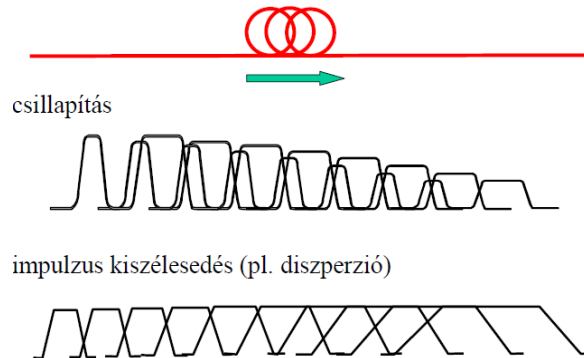
- Sugároptika: Teljes reflexió a mag és héj határán. Akkor ad pontos leírást, ha a szál méretei nagyobbak a fény hullámhossznál (MM szálak esete)



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

- α_L határszögénél, 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

Minőségromló hatások



Csillapítás



$$a = 10 \cdot \log \left(\frac{P_{ki}}{P_{be}} \right)$$

Okai:

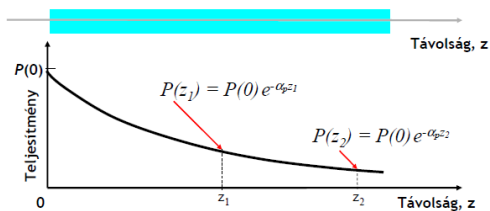
- Abszorpció (fényelnyelés)
- Szóródás (inhomogenitásokon)
 - Rayleigh szórás
- Fresnel reflexió (határatmeneten)
- Sugárzásos veszteség (hullámvezető deformáció)

Függ:

- Hullámhossz
- Hőmérséklet
- Anyag
- stb.

Csillapítás

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



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

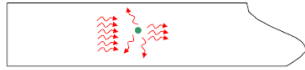
$$\alpha_{dB} = \frac{P_1^{[dBm]} - P_2^{[dBm]}}{z_2 - z_1}$$

Csillapítás okai

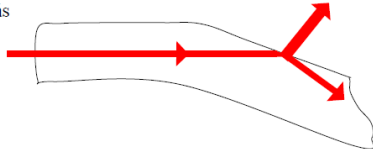
- Abszorpció



- Szórás

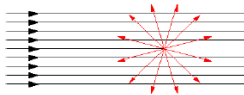


- Sugárzás



Rayleigh szórás

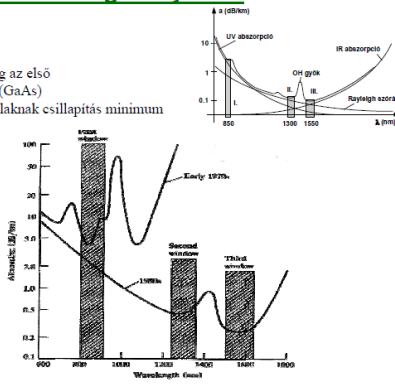
- a hullámhossznál kisebb ($< \lambda/4$) inhomogenitásokon való szóródás
 - mikro-repedések, buborékok
 - az adalekanyagok szabálytalan eloszlása
 - mechanikai feszültségek
 - alakváltozások, szálgörbület
- iránykarakterisztikája
 - a haladási iránykörtől forgásszimmetrikus.
 - Az előre és hátraszórás 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



Technológiai fejlődés

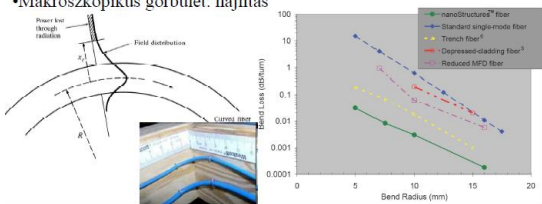
- 3 optikai ablak

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



Sugárzási veszteség

- Mikroszkopikus görbület
 - A szál tengelyvonalának kismértékű, véletlenszerű elmozdulása, hullámzása.
 - A szálak kábelzésekor fellépő feszültségek hatására keletkeznek, és jelentős veszteségeket okozhatnak
- Makroszkopikus görbület: hajlítás

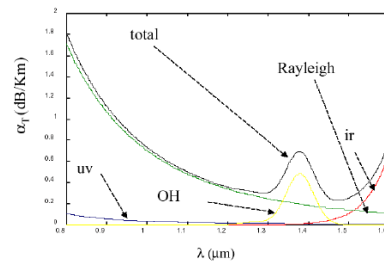


Abszorpció

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⁻ ionok miatt csillapítási csúcs
- a szál csillapításának 10-20 %-ért felelős

Abszorpció + Rayleigh szórás



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

(Látható fény: 360-760nm)
 $\lambda_1 = 800\text{nm} \Rightarrow f_1 = 375\text{ THz}$
 $\lambda_2 = 1700\text{nm} \Rightarrow f_2 = 176\text{ THz}$
 $\Rightarrow \Delta f \approx 200\text{ THz}$

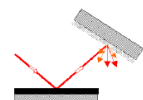
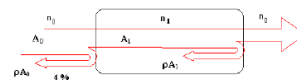
$f = c/\lambda$ ($\Delta f \neq c/\Delta \lambda = 333 \cdot 10^{12}$!!!!)

Fresnel reflexió + diffúz visszaverődés

- 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

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).

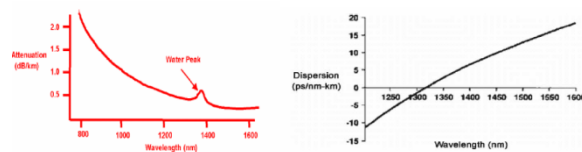
1550nm: Csillapítási minimum, diszperzió: $D_{\text{anom}} < 20$ (tip. 17) ps/nm*km

1310nm: nulla diszperzió

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

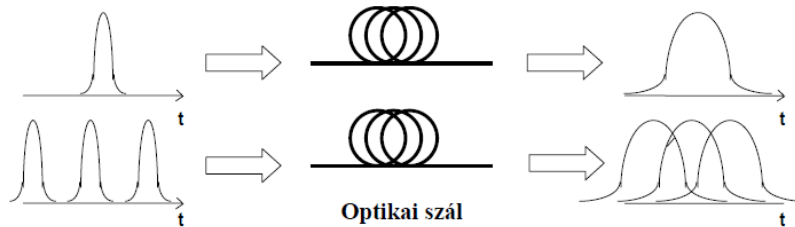
Alkalmazás: egycsatornás átvitel és TDM (1310nm)

DWDM (1550nm, diszperzió kompenzációval)



2. Optikai átviteli közeg: diszperzió típusai, nemlineáris jelenségek

Diszperzióknak azt a jelenséget hívják, hogy egy közegnek valamilyen tulajdonsága frekvenciafüggő. Ha ez befolyásolja az átvitt jelalakot, a diszperzió lineáris torzítást, jelátlapolódást okoz. Az optikai hullámvezetők diszperzióját elsősorban a terjedési sebesség frekvenciafüggése okozza.



57. ábra A diszperzió hatása

Az optikai átvitelben az impulzusok kiszélesedését használjuk a lineáris torzítás jellemzésére. Diszperzióval rendelkező tápvonalon terjedő impulzus szélessége megnő, amely kiszélesedés nagyságrendileg megegyezik az adott frekvenciasávban fellépő terjedési idő különbségével.

$$\Delta T = \frac{dT}{d\omega} \Delta\omega \quad (79)$$

$\Delta\omega$: az impulzus által elfoglalt frekvenciasáv,

T : az impulzus terjedési ideje

$$T = \frac{L}{v_g} \quad (80)$$

L : a szál hossza

Az optikai szál diszperziójának okai:

- Módusdiszperzió (különböző módusok különböző sebességgel terjednek)
- kromatikus diszperzió (különböző spektrális komponensek különböző sebességgel terjednek)
- Anyagi diszperzió, D_M (az átviteli közeg anyagának tulajdonságai miatt)
- hullámvezető diszperzió, D_W (a hullámvezető tulajdonságai miatt)
- Polarizációs diszperzió (különböző polarizációjú komponensek eltérő sebességgel terjednek). Hatása általában elhanyagolható.

A diszperziós paraméter (tehát β_2) egymódusú szálaknál két részből áll

- D_W : a hullámforma β -jének frekvenciafüggéséből
- D_M : a szál anyagának frekvenciafüggéséből

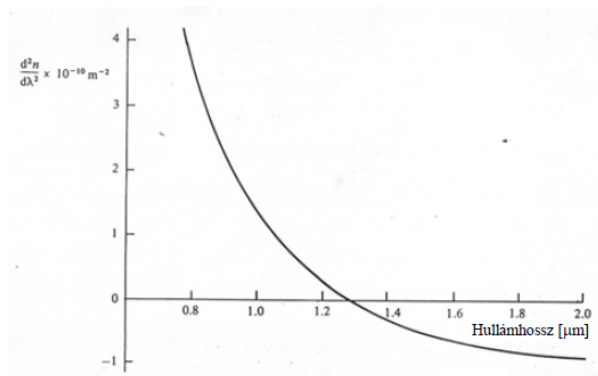
A diszperzió függ a törésmutató profiltól is, tehát attól, hogy a mag törésmutatója sugárirányban hogyan változik. A térerősség (energia sűrűség) eloszlása azért befolyásolja a terjedési sebességet, mert az átlagos törésmutató kiszámításánál n_1 -et és n_2 -t súlyozottan kell figyelembe venni attól függően, hogy a térerősségből mennyi jut a magba (alakból eredő diszperziós hatás). A frekvencia növelésével (hullámhossz csökkentésével) energia koncentrálódik a magba. Ugyanakkor, ha a frekvencia csökken, akkor szétkenődik az energia, egy idő után nem lesz alaplómódusú a terjedés.

7.3.1 Anyagi diszperzió

A közeg törésmutatója függ a hullámhossztól, így a különböző hullámhosszú nyalábok különböző sebességgel terjednek. Az anyag-diszperzióból származó diszperzió-paraméter az optikai távközlés szempontjából jelentős 800-1500 nm hullámhossz tartományban a szálak anyagát adó üvegre

$$D_M \approx 122 \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{ZD}}{\lambda}\right) \quad (104)$$

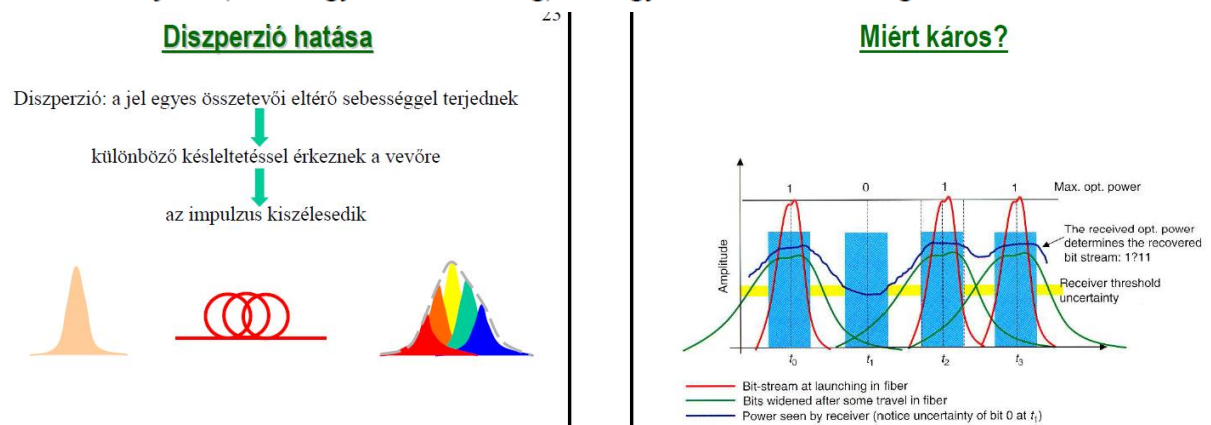
formulával számítható, ahol a λ_{ZD} nulla-diszperziójú hullámhossz 1,276 μm , ami bizonyos határok között az anyag összetételével is meg a hullámvezető méretével is változtatható. Ennél kisebb hullámhosszon D_M negatív, fölötte pozitív. Az ábra a törésmutató második deriváltját ábrázolja a hullámhossz függvényében. Látható hogy a függvény az 1,3 μm -es ablakban veszi fel a nulla értéket.



59. ábra

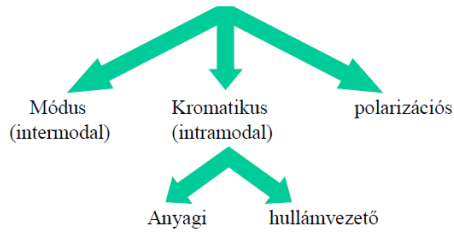
A régebbi optikai hálózatokban az 1,3 μm -es hullámhosszt használták, mert a diszperzió zérus értékű ($D=0$) és az optikai csillapításnak helyi minimuma van. 850nm hullámhosszon a diszperzió és az optikai szál csillapítása nagy, viszont az ilyen hullámhosszú lézerek lényegesen olcsóbbak. $\lambda=1.55\mu\text{m}$ -nél ellenkező előjelű, de kisebb értékű a diszperzió, ennek a hullámhossznak az az előnye, hogy az optikai szál csillapítása itt minimális.

Az impulzus torzulásának mértéke arányos a diszperzióval, a sávzélességgel és az áthidalt távolsággal. A diszperzió csökkentése akkor válik kritikussá, ha nagy sebességgel visszük át a jelet (azaz nagy a sávzélesség) és nagy az áthidalt távolság.



Diszperzió típusok

Diszperzió: a jel egyes összetevői eltérő sebességgel terjednek



Következmény: impulzus kiszélesedése

Módusdiszperzió

A módusoknak eltérő a csoportfutási ideje

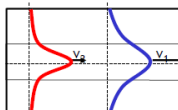
Eltérő terjedési idő: $t_{\min} = \frac{L}{c/n_1}$, $t_{\max} = \frac{L}{(c/n_2)}$

A késleltetés különbsége, időbeli impulzus kiszélesedés:

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

Kromatikus diszperzió

- Különböző hullámhosszú fénykomponensek kis mértékben eltérő sebességgel terjednek
- Kb. 1000-szer kisebb, mint a módusdiszperzió => SM szálakban jelentős
- Bitssebesség • Távolság < 1000 Gb/s • km
- Az adó jele nem monokromatikus
 - forrás vonalszélessége (LED: 30-40nm, LD: 2-5nm)
 - Chirp
 - modulációs sávszélesség
- 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 érkezel => nagyobb sebességgel terjed
 - Nagyobb hullámhossz: $n_{\text{eff}} - n_{\text{haj}}$
 - Kisebb hullámhossz: $n_{\text{eff}} - n_{\text{mag}}$



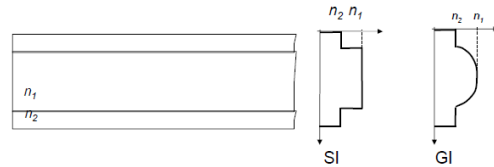
Diszperzió

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 csökkentése

- 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 közepében a 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

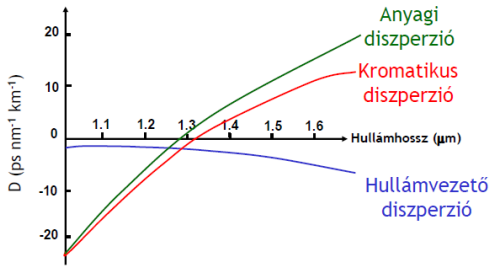
Kromatikus diszperzió leírása

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

- $\Delta \tau$: Impulzusszélesség növekedése (időben) [ps]
- D : Diszperziós együttható [ps/(nm • km)]
nem számítható, hanem mérhető $D = - \frac{2 \cdot \pi}{c \cdot \lambda^2} \cdot \frac{d^2 \beta}{dk^2} \left[\frac{ps}{nm \cdot km} \right]$
hullámhossz függő
- $\Delta \lambda$: Impulzus hullámhossz sávszélessége, 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.)

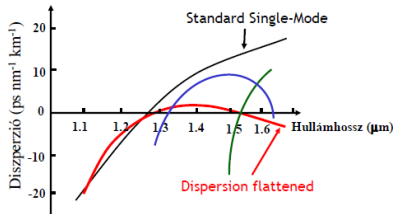
Kromatikus diszperzió



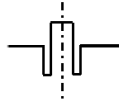
Kromatikus diszperzió változtatása

Bonyolultabb hullámvezető struktúrák

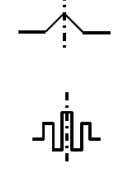
- Pl. Dispersion flattened fibers
 - 'W' mag struktúra
- „Háromszög” alakú profil



„W” törésmutató profil



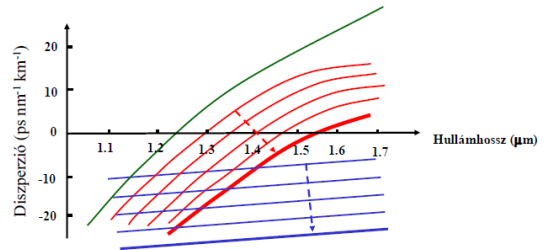
Háromszög profil



Kromatikus diszperzió változtatása

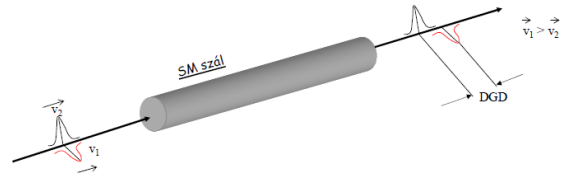
Eltolt diszperziójú szál (Dispersion shifted fiber)

- A mag átmérőjének és a törésmutatónak változtatásával a hullámvezető diszperzió szintje változik => kromatikus diszperzió null átmenete eltolódik

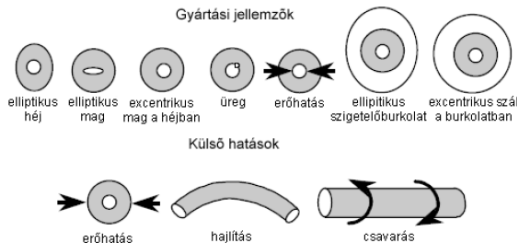


Polarizációs mód diszperzió

- A két polarizációs mód eltérő sebességgel terjed => eltérő terjedési idő : Differential Group Delay (DGD)
- PMD: a DGD átlagos értéke => PMD delay, $\Delta\tau$ [ps]
- => PMD delay coefficient, $\Delta\tau_c$ [ps/√km]
- CD-vel ellentétben értékét nem lehet előre kiszámolni, ezért hatását nem tudjuk könnyen kompenzálni
- Értéke idő (pl. szél hatása légkabeleknél) és hőmérséklet függő
- Nagy sebességű összeköttetésnél kritikus. Pl. Max. távolság @ 0.5ps/√km:
 - 2.5Gbps => 6400km
 - 10Gbps => 400km
 - 40Gbps => 25km



Polarizációs mód diszperzió (PMD) okai



7.3.2 Hullámvezető-diszperzió (waveguide dispersion)

A hullámvezetés mechanizmusából adódik, független a törésmutató hullámhossz-függésétől. Hatása csak akkor jelentős, ha monomódusú szálunkat használunk (nincs módusdiszperzió) 1310nm-es hullámhosszú fényel (nincs anyagi diszperzió). A hullámvezető-diszperzió szempontjából mérvadó $\beta(\omega)$ összefüggés a diszperzió-egyenlet megoldásából adódik. A szokásos méretű szálakra negatív az egész használt frekvenciatartományban. A diszperziós paraméter csak egyetlen frekvencián lehet nulla, λ_{ZD} környékén a diszperzió meredekségének van jelentősége, ami

$$S = \left(\frac{2\pi c}{\lambda^2}\right)^2 \beta_3 + \left(\frac{4\pi c}{\lambda^3}\right) \beta_2 \quad \left[\frac{ps}{km \cdot nm^2} \right] \quad (105)$$

β_3 : β -nak ω szerinti harmadik deriváltja.

A tápvonal diszperziója kiszélesíti az impulzusokat, ezzel határt szab a legnagyobb átvihető bit-sebességnek. Figyelembe kell venni az optikai adó frekvenciapontatlanságából származó sávszélességet is. A legnagyobb bitsebesség elég jól megbecsülhető a következő, tapasztalati képlettel:

$$L|D|\Delta\lambda / T_{\min} < 1 \quad (106)$$

illetve, ha $D=0$

$$L|S|(\Delta\lambda)^2 / T_{\min} < 1 \quad (107)$$

L: a tápvonal hossza

$\Delta\lambda$ az optikai forrás vonal-szélessége

$1/T_{\min}$ a legnagyobb bitsebesség

Mint látható, adott sebességű jel átvitelénél a regenerátorok távolságát a hullámvezető D és S paramétere, továbbá a generátor $\Delta\lambda$ paramétere szabja meg. Ezek a formulák közelítő jellegűek. Általánosabb érvényű összefüggést a jelalak ismerete nélkül nem is lehet adni.

7.3.3 Módusdiszperzió

Többmódusú szálakban jelentős a szerepe, ez a meghatározó nagyságrendű jelenség. Abból származik, hogy a különböző hullámformák csoportsebessége különbözik, azaz a különböző módusok különböző úton és különböző idő alatt érnek a szál egyik végéből a másikba. Nem függ a forrás vonalszélességétől, mert nem kromatikus diszperzió. Tipikus értéke körülbelül három nagyságrenddel nagyobb, tehát hatására általában jobban kiszélesedik az impulzus, mint a kromatikus diszperzió hatására.

$$[D_{MM}] = \frac{ns}{km} \quad (108)$$

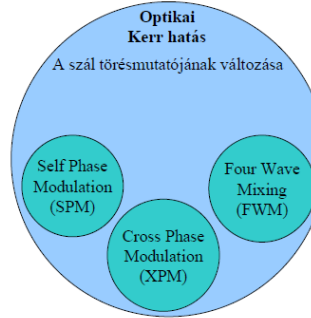
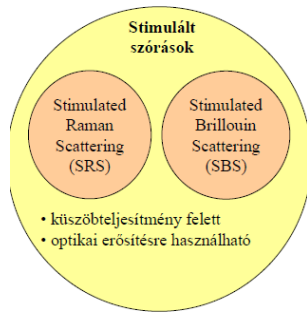
Az impulzus kiszélesedés

$$\Delta\tau = D_{MM} \cdot L \quad (109)$$

Vannak azonban olyan szálak, ahol kisebb az eltérés a kétféle diszperzió között (gradiens szál, a módusok közti sebességeltérés kiegyenlítésére), ekkor mindkettő hatását figyelembe kell venni az impulzuskiszélesedés számításánál

$$w = \sqrt{(\Delta\tau_{gc})^2 + (\Delta\tau_{gM})^2} \quad (110)$$

Nemlineáris jelenségek



Nemlineáris jelenségek

- Az optikai teljesítmény függvényében nem lineáris az üvegszál karakterisztikája
- Nagy teljesítmények esetén jelentősek
- Általában károsak, de egyes feladatok megvalósításánál hasznosakká tehetjük ezeket a jelenségeket
- Nemlineáris szórások
 - Stimulált/indukált Brillouin szórás (SBS)
 - **Stimulált/indukált Raman szórás (SRS)**
- Nemlineáris törésmutató változások
 - fázismoduláció
 - Ön fázismoduláció (SPM – Self Phase Modulation)
 - Kereszfázismoduláció (XPM – Cross Phase Modulation)
 - **Négyszögletű keverés (FWM - Four Wave Mixing)**

Stimulált Raman Szórás (SRS)

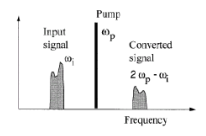
- Az optikai szálban haladó két optikai jel között jön létre kölcsönhatás, a fényt teljesítmény egyik sugárból a másik hullámhosszú sugárba csatolódik
- Oka: fotonok és optikai fononok közötti kölcsönhatás
- A működés feltételei:
 - A két jel körfrekvenciája közötti különbség: ~13 THz (0.06mm)
 - Működési sávzélesség: ~ 6 THz
 - Nagy teljesítménysűrűség
 - Egycsatornás rendszernél tipikusan : 1.5 W
 - DWDM esetén ~10 mW csatornánkénti teljesítmény is lehet!
- Hatása:
 - jelcsillapítás
 - csatornák közötti áthallás (WDM)
 - a kisebb hullámhosszú csatornák felől sztochasztikus jelleggel energia adódik át a nagyobb hullámhosszú csatornáknak, melynek következtében a csatornák jelszintjei megváltoznak, illetve zajossá válnak
- Felhasználás: Optikai erősítő

Nemlineáris fázismoduláció

- SPM: egycsatornás rendszer, saját intenzitásmodulációja okozza a fázismodulációt
- XPM: szomszédos csatorna okozza a fázismodulációt
- Hatása
 - az időben változó intenzitás időben változó törésmutató indexet hoz létre, amely időben változó fázisváltozást okoz.
 - Fázismoduláció => moduláció instabilitás & segéd moduláció => frekvencia tartományban új oldalsávok
 - Spektrum kiszélesedése => diszperzió hatása nő!
 - csatornák közötti áthallás (WDM)
- Felhasználás:
 - XPM
 - Hullámhossz átalakítás
 - Optikai vezérlési kapcsoló
 - Optikai logikák
 - Sfb.
 - SPM : szoliton

Four Wave Mixing (FWM)

- Oka: több foton kölcsönhatása
- Harmadrendű nemlineáritás => keverés $f_{FWM} = f_1 \pm f_2 \pm f_3$
- Kritikus optikai teljesítmény ~10 mW (G.653-as fényvezető szál) függ az optikai csatornák közötti távolságtól és a kromatikus diszperzió mértékétől
- Csak közeli hullámhosszak esetén jön létre
- Hatása:
 - csatornák közötti áthallás (parazitajelek jönnek létre, melyek egyenesen WDM csatornakiórtás esetén a hasznos jel hullámhosszára esik és ott zajt képeznek)
 - SNR romlás
 - a jel kiürülése
 - új komponensek megjelenése az optikai spektrumban
- Felhasználás:
 - Hullámhossz konverzió
 - Diszperzió kompenzáció (spektrum invertálása az összeköttetés közepén)



Stimulált Brillouin Szórás (SBS)

- Az optikai szálban haladó két optikai jel között jön létre kölcsönhatás, a fényt teljesítmény egyik sugárból a másik hullámhosszú sugárba csatolódik
- Oka: fotonok és akusztikus fononok közötti kölcsönhatás
- A működés feltételei:
 - A két jel körfrekvenciája közötti különbség: ~10 GHz
 - 1310nm: 13.2GHz, 1550nm: 11.1GHz (DWDM csatornatávolság: 50/100GHz)
 - Működési sávzélesség: ~ 100 MHz
 - Nagy teljesítménysűrűség
 - Egycsatornás rendszernél tipikusan : 100 mW
- Hatása:
 - jelcsillapítás
 - csatornák közötti áthallás (WDM)
- Felhasználás: Optikai erősítő

Nemlineáris fázismoduláció

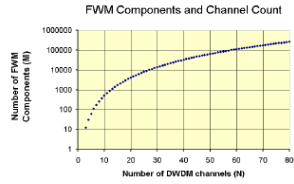
- Oka: optikai Kerr effektus, a törésmutató intenzitás-függése
- $$n = n_1 + n_2 \cdot |E|^2 = n_1 + n_2 \cdot I = n_1 + n_2 \cdot \frac{P}{A_{eff}}, \quad n_2 \approx 2.6 \cdot 10^{-20} \frac{m^2}{W}$$
 - n : törésmutató, n₁: a törésmutató eredeti értéke, n₂: nemlineáris térfüggő törésmutató
 - E : a térerősség értéke
 - I : Optikai intenzitás
 - P : az áthaladó optikai teljesítmény
 - A_{eff} az optikai szál effektív keresztmetszete, amely nagyságrendileg a geometriai keresztmetszettel megegyezik, annál valamivel nagyobb
- Törésmutató ingadozás => fázisváltozás
- Fázisváltozás mértéke függ:
 - idő
 - hullámhossz
 - terjedési hossz
 - optikai jelek teljesítménye
- Kritikus optikai teljesítmény: ~10 mW

$$\Delta\phi_i = \frac{2\pi n_2 z}{\lambda_i} \left[I_i(t) + 2 \sum_{i \neq j} I_j(t) \right]$$

SPM XPM

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:



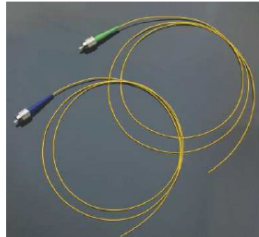
$$N_{max} = \frac{N^2 \cdot (N-1)}{2}$$



3. Optikai átviteli közeg: szálak illesztése, csatlakoztatás

Pigtail

- Egyik végén csatlakozó, másik végén szabad szálvég
- Eszközökhöz (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



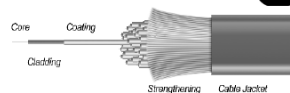
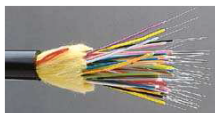
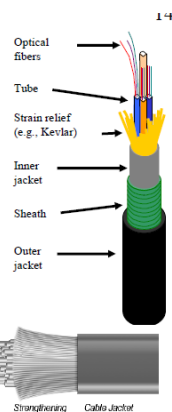
Szálak illesztése

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)

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 µm lakkréteg)
 - Másodlagos védelem (900 µm műanyag)
 - Kevlar (feszültség/feszítés könnyítése)
 - Kópeny (1.5-3mm): belső héj, burkolat, külső héj



Főbb paraméterek

- Beiktatási csillapítás
- Reflexió (RL: return loss)
 - A reflektált és beeső fényteljesítmény hányada
 - RL=10dB => a fény 10%-a reflektálódik
 - RL=20dB => a fény 1%-a reflektálódik
 - Hatása: Teljesítményvesztés, kábelTV rendszerben szellemkép, stb.

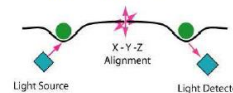
Szál & illesztés	Csillapítás (max)	Reflexió (min)
SM hegesztés	0.15 dB	50 dB
SM csatlakozó	1 dB	30 dB
MM hegesztés	0.25 dB	50 dB
MM csatlakozó	0.75 dB	25 dB

Szálhegesztés

Elektromos ív olvasztja össze a két szálvéget

Csatlakozókkal összehasonlítva:

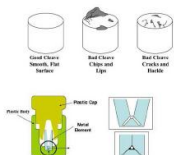
- Kisebbs csillapítás és reflexió
- Erősebb és olcsóbb
- Könnyebb gyártás (gyorsabb)
- Modem készülékek már egyszerre 12 szálal is képesek kezelni (szalagkábelnél)
- Drága berendezés



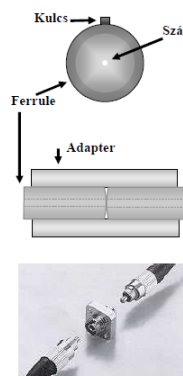
Csatlakoztatás

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

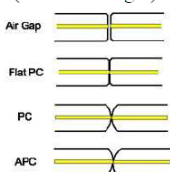
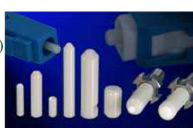


- Csap – adapter – csap
- Nagy pontosság
 - Optikai tengelyek között max $\pm 1 \mu\text{m}$ eltérés lehet (SM)
 - Fizikai kontaktus kell a határfelületeken
- Pontos csapátmérő és adapter belső átmérő
- Tökéletes felületi megmunkálás (szóródás)
- Csatlakozó tisztasága
 - Speciális tisztító és vizsgáló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



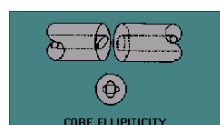
Csatlakozó – ferrule (csap)

- Ferrule biztosítja a szál mechanikai tartását
 - Leggyakrabban kerámia (merev) (Jétezik 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



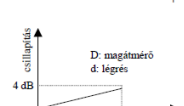
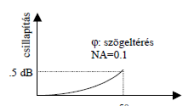
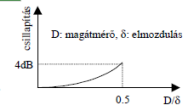
Csatlakoztatási hibák - szálhiba

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



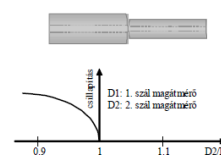
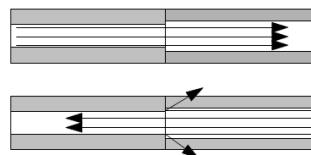
Csatlakoztatási hibák

- 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



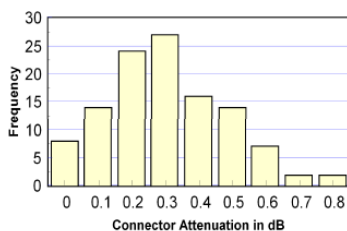
- Különböző NA
- Különböző törésmutató profil
- Különböző magátmérő => „slag” hatás
 - SM-MM => a=20dB (99%)
 - 50/125-62.5/125 => a>3dB

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

7.6. Csatlakozó típusok

Számos optikai csatlakozó ismert, de a monomódusú szálakat alkalmazó nagysebességű vagy nagy távolságú összeköttetések során két csatlakozótípus használata terjedt el.

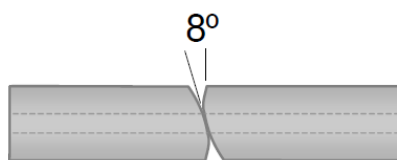
- PC (Physical Contact)



63. ábra PC csatlakoztatás

A két szálvég fizikailag érintkezik egymással. A szálak végei polírozottak, a terjedés irányára merőlegesek. Az elérhető minimális csillapítás 0.25dB, a return loss 40dB.

- APC (Angled Physical Contact)



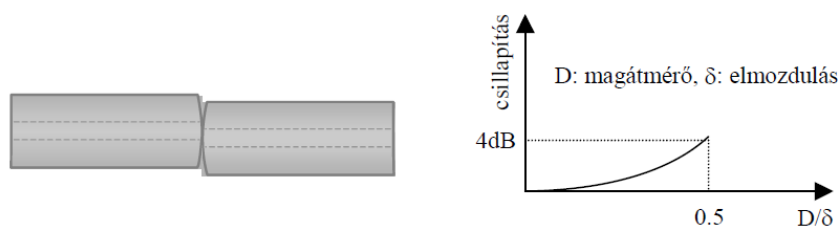
64. ábra APC csatlakoztatás

A PC csatlakozóhoz hasonló felépítésű csatlakoztatás, de a szálvégeket nem merőlegesre polírozzák, hanem ferde határfelületet alakítanak ki. Ezzel a megoldással jelentősen csökkenthető a csatlakoztatás reflexiója (return loss 60dB), tehát olyan rendszerekben van rá szükség, amely érzékeny a reflexió szintjére.

7.7. Csatlakoztatási hibák

Az optikai hullámvezető kis méretének következtében a szálak pontos illesztésére van szükség csatlakoztatás esetén. Csatlakoztatás során a következő tipikus hibák léphetnek fel:

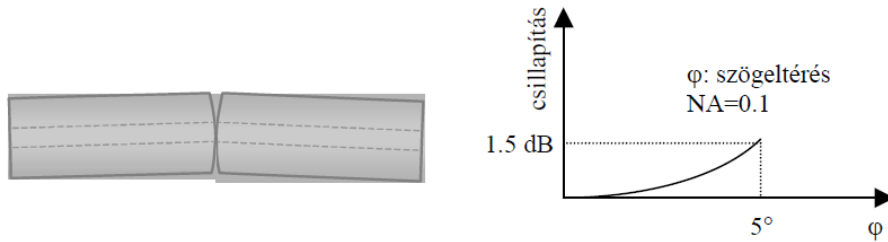
- Tengelyhiba. A két hullámvezető tengelye párhuzamos, de nem esnek egybe, sugár irányban eltolódnak.



65. ábra Sugár irányú eltolódás

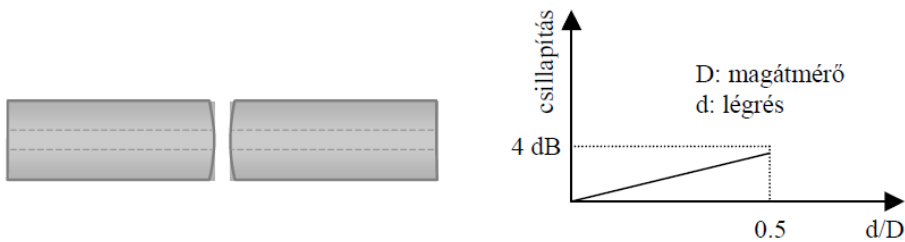
D: magátmérő, δ : elmozdulás

- Szögeltérés. A két hullámvezető tengelye szöget zár be egymással.



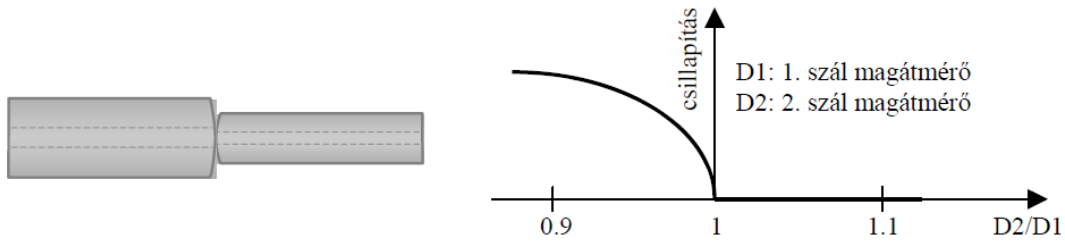
66. ábra Szögeltérés

- Légrés. A két hullámvezető párhuzamos és sugár irányú eltolódás sincs, de légrés van köztük.



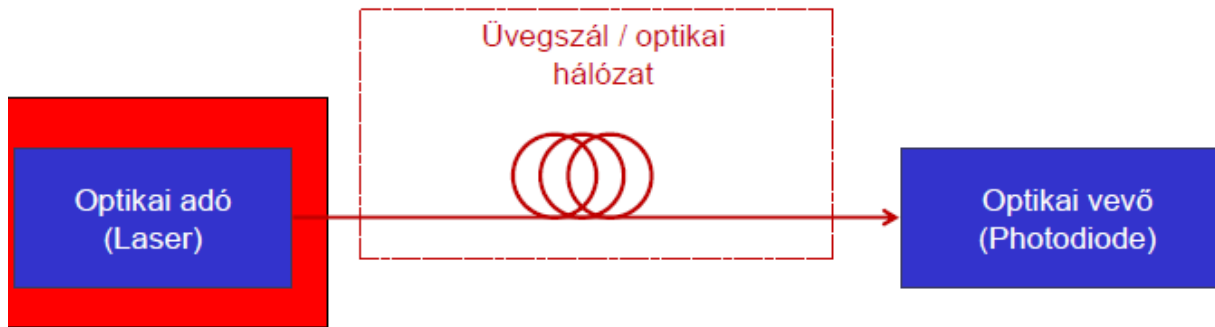
67. ábra Légrés hatása

- Eltérő szálak. A két szál felépítése különbözik, tipikusan más a magátmérő. A nagyobb átmérőjű szálból kisebb átmérőjű szálba csatlakozás jelentős optikai teljesítményvesztéssel jár



68. ábra Eltérő típusú szálak csatlakoztatása

4. Optikai adó: lézerek működésének alapjai, fontosabb típusok



Fényforrások

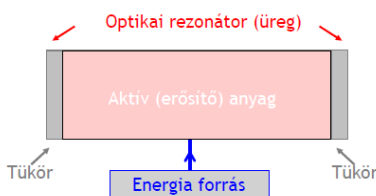
- Számos fényforrás
 - LED (Light Emitting Diode)
 - Solid state lasers
 - Gáz lézer
 - Szál lézer
 - Félvezető lézer
 - Stb.
- Távközlési alkalmazásokban: félvezető lézer
 - Elektromos táplálás
 - Elektromos jelet közvetlenül optikai jellé alakítja
 - Koherens fény
- Félvezető lézer tulajdonságai
 - Nagy modulációs sávszélesség (> 10 Gbit/s)
 - Kis méret
 - tokozott: ~ 2x1x1 cm
 - tokozatlan: 0.5mm x 200mm x 100mm
 - Egy térbeli módus
 - Energia hatékony
 - 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 => nem az indukált emisszió domináns => nincs lézerműködés (nem jön létre populáció inverzió) => Külső gerjesztésre van szükség a lézerműködéshez

LASER felépítése

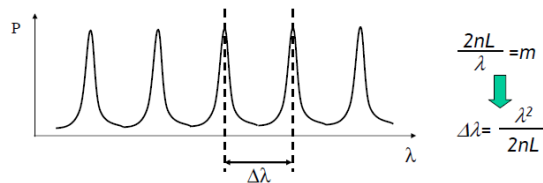


Erősítő anyag => erősítés
Pozitív visszacsatolás => rezonátor } → oszcillátor

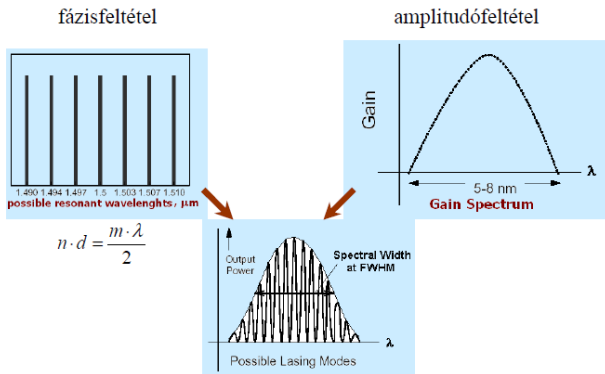


Lézerműködés feltétele

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

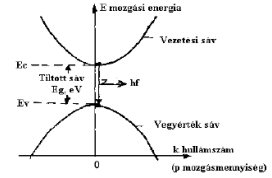


Lézer működés feltétele

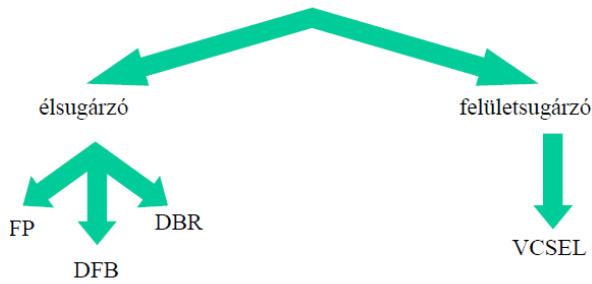


Félvezető lézer / lézer dióda

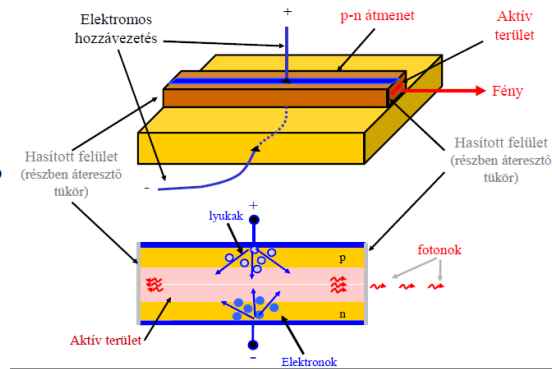
- Elektromos gerjesztés (áram)
- Két elfajult szennyezettégi félvezetőből kialakított p-n átmenet
- A fény hullámhosszát a félvezető anyaga határozza meg (tiltott sáv)
 - GaAs => 870nm
 - AlGaAs => 850nm
 - InGaAsP => 1100-1670nm (a komponensek aránya határozza meg a pontos hullámhosszt)



Félvezető lézer típusok

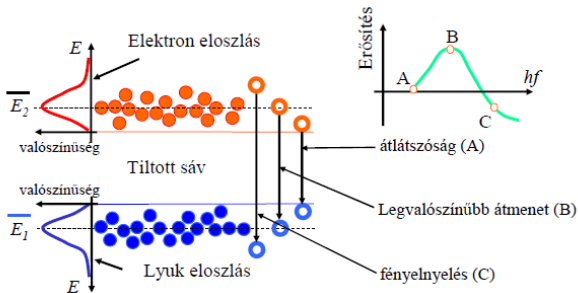


Félvezető lézer / lézer dióda



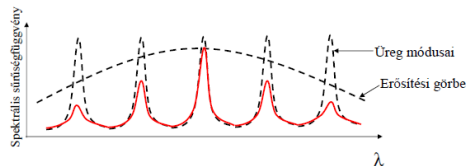
Erősítés sávzélessége

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



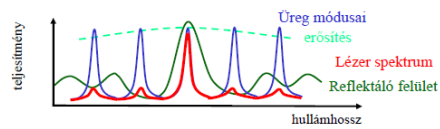
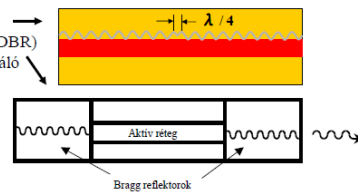
Fabry-Perot (FP)

- A rezonátort a félvezető chip hasított felülete biztosítja
=> tökéletes síkpárhuzamos tükrök
=> 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 tükrök



DFB, DBR

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

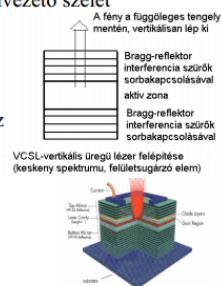


VCSEL

15

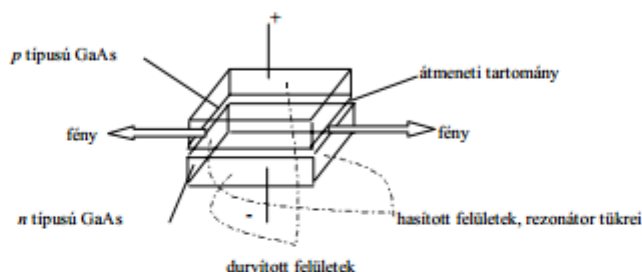
Függőleges rezonátorú felületsugárzó lézer (1992-től)
(VCSEL - Vertical Cavity Surface Emitting Laser)

- 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 áramkörökhez 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



5.3. Lézer felépítése

Az első félvezető lézert nyitó irányban előfeszített $p-n$ átmenetű GaAs-ból készítették. A hasított kristálytani felületek tökéletes sík-párhuzamos rezonátort képeznek, merőleges beesés esetén a felületek reflexiója a félvezető anyagok nagy törésmutatója miatt 30 – 40 %.



28. ábra Első működő félvezető lézer szerkezete

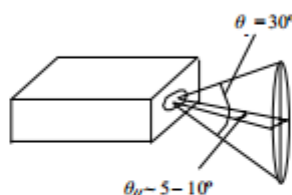
Az ilyen konstrukciójú lézerek esetén problémaként lépett fel, hogy a teljes fényteljesítményt nem lehet az aktív réteg belsejére korlátozni annak ellenére, hogy a nagy töltéshordozó-sűrűség megemeli az aktív réteg törésmutatóját és ezáltal hullámvezetőt képez a fény számára. A lézerműködéshez az erősítési feltételnek teljesülnie kell, ami a korai kialakítású eszközöknél szobahőmérsékleten csak nagy küszöbáram, illetve áramsűrűség (10^5 A/cm^2) esetén teljesült. A dióda védelmének érdekében alacsony működési hőmérsékletet kellett biztosítani, illetve szobahőmérsékleten csak impulzus üzemben volt képes működni a lézer. A szobahőmérsékleti folyamatos működtetéshez csökkenteni kellett a fényvesztéseget az eszközben, illetve meg kellett akadályozni a diffúziós töltéshordozó elvándorlást az aktív rétegből. Ehhez bonyolultabb szerkezetű, heteroátmenetes lézert kellett építeni. A heteroátmenet akkor jön létre, ha olyan félvezető anyagokat érintkeztetünk atomi közelségben, amelyeknél a tiltott sáv nagysága különbözik. A heteroátmenetes lézerek nagyobb hatásfokkal és egy nagyságrenddel kisebb áramsűrűséggel működnek. A következő két ábra ún. szimpla és dupla heteroátmenetek energiaszint-elrendezését mutatja be:

Szimpla heteroátmenet

Dupla heteroátmenet

Felfedezése óta megbízhatóság és élettartam szempontjából hatalmas fejlődésen ment keresztül a lézerdióda. A mai lézerdiódák akár 10^7 óra üzemidőt is képesek teljesíteni.

Az eszköz aktív rétege félvezető hasáb alakú optikai üregrezonátor. A hullámhosszal összemérhető emittáló felület miatt a félvezető lézerekből kilépő nyaláb erősen divergens, a divergencia szöge általában különbözik az átmenettel párhuzamos és merőleges irányban. A kilépő nyaláb általában asztigmatikus, elliptikus Gauss-nyaláb.

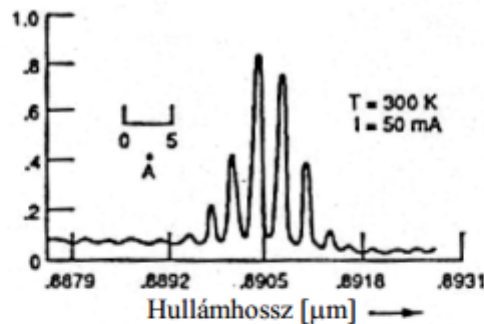


30. ábra Félvezető lézerekből kilépő nyaláb

Az optikai szál és a lézer chip eltérő felépítése miatt komoly feladatot jelent a lézerekből kilépő fény optikai szálba csatolása. Az érintkezést el kell kerülni, mert a chip sérüléséhez vezet. Ezt a feladatot a mai napig nem sikerült automatizálni. A feladat során külön problémát jelent a ragasztó hőtágulása is. A feladat nehézsége miatt gyakran már gyárilag elvégzik ezt az illesztést, ekkor úgynevezett Pig tail(ed) lézert kapunk, amelyben a félvezető chip egybe van építve az üvegszállal és az üvegszál végén mechanikai csatlakozó van. A csatolás minőségén javítani lehet, ha az üvegszál vége lencsével ellátott (Lensed fiber).

5.4.1 FP (Fabry-Perot)

A hagyományosan alkalmazott siktükrös rezonátort tartalmazó lézerek. Gondot okoz, hogy közelebből megvizsgálva a kibocsátott spektrum képét, jól látható, hogy valójában több módus keletkezik.



31. ábra FP lézer spektruma

Az optikai rendszerek fejlődésének következtében vannak olyan alkalmazások, amelyekben az ilyen eszközt nem használhatjuk (pl. WDM, azaz hullámhosszosztású összeköttetés).

5.4.2 DFB (Distributed Feed Back, Elosztott visszacsatolású lézer)

A jobb minőségű monokromatikus fényjel előállítására szolgálnak. A félvezető lézerektől azt várjuk el, hogy minél keskenyebb optikai spektrumú, "tiszta" jelet szolgáltatassanak, mint a jó elektronikus oszcillátorok. Ezekben a lézerekben a fénysugárzó rész oldalról is beágyazásra kerül, így olyan sugárzó felületű lézert kapunk, amelynek kiterjedése a két irányban, függőlegesen és vízszintes kevésbé tér egymástól. Nem csupán tükröző felülettel ellátott üregrezonátor szolgál a kívánt hullámhosszúságú domináns rezgő módus kiválasztására, hanem a rezgő rendszer hangolását optikai rács-hoz hasonló, periodikus szerkezetű bordázat szolgálja. Ebben az eszközben a bordázat visszaverődő elemeiről származó reflexiók úgy összegződnek, hogy végül egy adott hullámhosszúságú fényjelre nézve teljesül az, hogy a lézer aktív tartományában fennmaradhat a folyamatos rezgés. Ennek a folyamatnak a jellemzésére nevezik ezt a lézertípust elosztott visszacsatolásúnak (Distributed Feed-back Laser). Ezen lézerek spektruma nagymértékben tiszta, stabil és kis zajú. Zaj szempontból hasznos tulajdonság, hogy ezeknél az eszközöknél a FP lézerekkel ellentétben nem függ az eszköz zaja a moduláló jel, tehát a modulációs mélység nagyságától. Ugyanakkor természetesen drágább eszköz, hiszen komplikáltabb a felépítése és gyártása.

5.4.3 DBR (Distributed Bragg Reflector)

A DFB lézerhez hasonlóan nagy tisztaságú optikai spektrumot biztosít.

5. Optikai adó: lézerek karakterisztikái

4.1. Optikai adó

Optikai távközlő rendszerekben általában lézerdiódákat használunk a jel előállítására. Egyes alkalmazásokban, ahol a szükséges paraméterek megengedik, LED is előfordul.

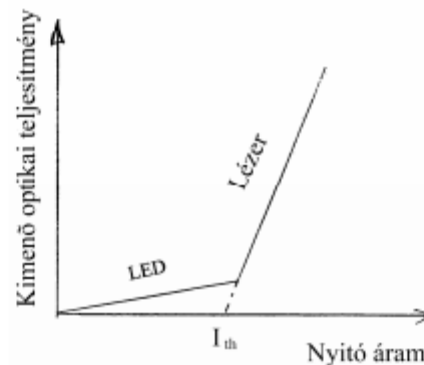
LED (Light Emitting Diode)

- nem koherens fényt bocsát ki, tehát nagy sugárzási kúppal rendelkezik, azaz nagy átmérőjű a kibocsátott fénysugár. Ennek következtében nagy lesz a becsatolási veszteség.
 - kis teljesítmény (100 μ W)
 - nagy vonalszélesség (50-100 nm)
 - olcsó
- A LED olcsó, sokmódusú szálaknál (tipikusan plasztik szál), kis távolságú összeköttetésekre (méteres nagyságrend), kis modulációs sebességnél (kb. 50Mbit/s) használható

LASER

- nagyobb teljesítmény
- keskeny emissziós spektrum
- drágább
- keskeny sugárzási kúp

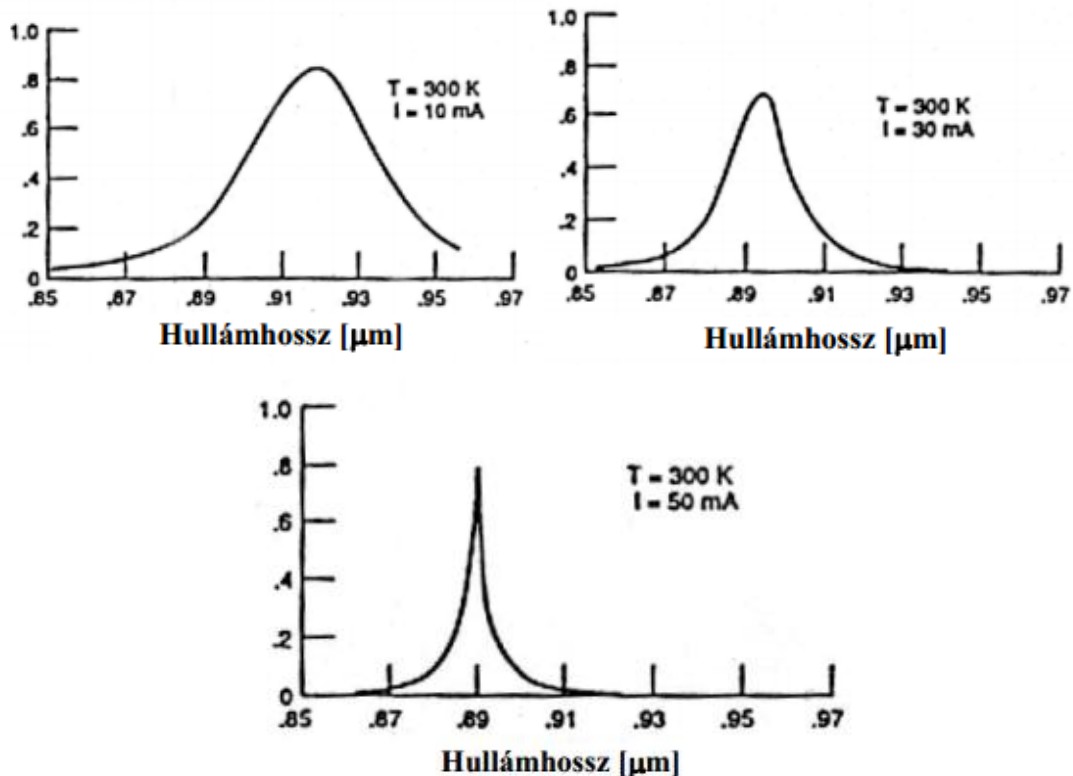
A továbbiakban csak a lézer vizsgálatával foglalkozunk. Az eszköz az előfeszítő áram hatására koherens fényt bocsát ki magából. Természetesen nem képes minden elektronból fotont előállítani, a konverziós veszteség adja meg, hogy hány %-os az átalakítás. A félvezető lézerek tipikus teljesítmény-áram karakterisztikája látható a következő ábrán.



16. ábra A lézerdióda kimenő teljesítménye a gerjesztő áram függvényében

A karakterisztika töréspontja (küszöbáram) feletti tartományban beszélhetünk lézer működésről. A küszöbáram alatt is van fénykibocsátás, de a spontán emisszió a domináns folyamat, az eszköz viselkedése a LED viselkedéséhez hasonló. A küszöbáram feletti lineáris szakasz meredeksége a konverziós tényező vagy nyereség, amely azt mutatja meg hány mW fénytjeljesítmény-változás következik be 1 mA moduláló áramingadozás hatására.

Az optikai spektrumban is jól látszik a lézerműködés beindulása. A következő ábrarozogat egy lézerdióda által kibocsátott optikai spektrum fejlődését mutatja be az előfeszítés függvényében. Kis árammal gerjesztve a diódát spontán emisszió lép fel, melynek széles a spektruma. A következő ábrán a gerjesztő áramot növelve (közeledés a könyökponthoz) a spektrum szűkül. Végül a gerjesztéssel a könyökpont fölé kerülve beindul a lézerműködés.



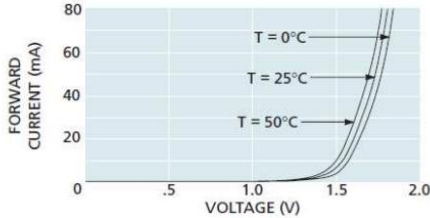
17. ábra A lézerműködés beindulása

Az átvitelre kerülő optikai jel spektruma ideális esetben egy vonalnak felelne meg, azonban a valóságban ennél zajosabb, ezért zajsáv szélességről beszélhetünk. Amikor a jelforrásokat jellemezzük fontos paraméter, hogy a vonalszélessége minél keskenyebb, kevésbé zajos legyen. Az adóteljesítmény növelésével csökken a vonalszélesség, de a fellépő nemlineáris hatások torzítást okozhatnak.

A lézer zaját az okozza, hogy a fotonok keltése diszkrét folyamat, tehát nem mindig ugyanannyi foton hagyja el a lézert, mindezt a RIN (Relative Intensity Noise) paraméterrel jellemezzük.

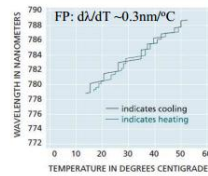
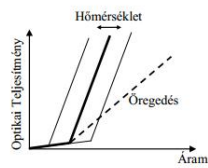
Aram – feszültség karakterisztika

- 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

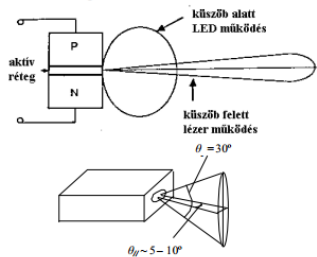


Teljesítmény és hullámhossz ingadozás

- A lézerdióda 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
 - Kompenzáció: vezérlő áramkörökkel
- öregedési folyamatok
 - A lézer hatásfoka (a görbe meredeksége) csökken
 - Kompenzáció: az áram nagyságának növelése
 - A lézert cserélni kell, amikor az eredeti kétszerese lesz az áramérték
- A lézerek élettartama 5 - 15 év
 - Tipusfüggő
 - kimenő teljesítmény függő
 - Környezeti paraméterektől is függ (hőmérséklet, páratartalom, stb.)



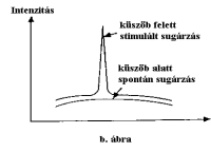
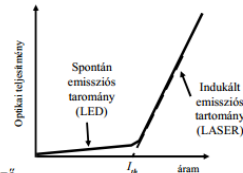
Íránykarakterisztika



- Az emittáló felület a hullámhosszal összemérhető nagyságú => kilépő nyaláb erősen divergens
- Az emittáló felület téglalap keresztmetszetű => kilépő fény nyílásszöge a különböző irányokban nem azonos

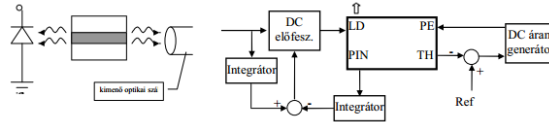
Optikai teljesítmény - áram karakterisztika

- 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 elektrontól 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



Lézer karakterisztika - kompenzáció

- Folyamatos karbantartás
- A hatást kompenzálni képes szabályzó elektronika alkalmazása
 - Munkapont beállítást vezérlő hurok
 - A lézerdiódaval közös chip-re integrált monitor dióda
 - Referencia érték 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



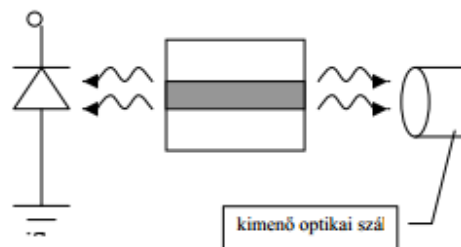
5.6. Lézer működésének hőmérsékletfüggése

Optikai hírközlő rendszerekben természetes követelmény, hogy a lézerdióda bizonyos határok között a rendszerben környezetfüggetlen elemként vegyen részt. Elvárjuk, hogy a működési feltételek (mint például a környezeti hőmérséklet) megváltozására, a működését leíró jelleggörbék változatlanok maradjanak. A lézerek hőmérséklet-függése az anyagukból és felépítésükből következően nagyon jelentős, ráadásul a hőmérsékletváltozás hatásai összetettek és szerteágazóak, ezek későbbi kompenzálása nem megoldható. Tehát a lézerdiódát beágyazó közeg hőmérsékletét kell folyamatosan kézben tartani. A kibocsátott optikai teljesítmény és a középhullámhossz a hőmérséklet függvényében elmozdulhat. Egy optikai jelet használó összeköttetés esetén a hullámhossz elmozdulása nem okoz problémát, mert a vevők szinte mindig széles sávúak. Ugyanakkor sűrű hullámhosszosztású rendszerekben (DWDM) interferencia léphet fel a szomszédos csatornával, ezért a DWDM rendszerben alkalmazott lézerek hőmérséklet stabilizáltak. Ha pontos optikai teljesítményszintre és működési frekvenciára van szükség, akkor gondoskodni kell az eszköz hőfokstabilizálásáról.

Ilyenkor hőmérsékletet vezérlő hurkot alkalmazunk melynek elemei: 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.

5.7. Teljesítményingadozás

A lézerdióda kimenő optikai teljesítménye működés közben változhat. Ennek több oka van. Egyrészt a külső feltételeknek pillanatszerű változásai okoznak ilyen jelenséget. Tehát a környezeti hőmérséklet megváltozása; a tápellátás megváltozása; a lézerdióda "melegedési folyamatai"; stb. Másrészt a lézerdióda öregedési folyamatai is megváltoztatják az eszköz által kibocsátott optikai teljesítmény szintjét. Minden félvezető alapú eszközre általánosan igaz, hogy tulajdonságaik adott üzemóra alatt meghatározott mértékben módosulnak. Az ilyen belső változások következményeként a lézerdióda kiadott optikai teljesítménye típusonként változó mértékben, az évek során leromlik. Ez a hatás, bár első ránézésre nem tűnhet jelentős mértékűnek, optikai hírközlő hálózatokban, ahol állandó jelszint biztosítása alapfeltétel, feltétlen kiküszöbölést igényel. Ez folyamatos karbantartással, vagy a hatást kompenzálni képes szabályzó elektronika alkalmazásával oldható meg. A lézer tokozása a lézerdiódával közös chip-re integrált monitor diódát is tartalmaz, amely segíti a szabályzó kör elkészítését.

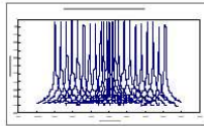
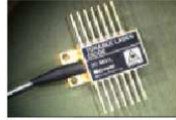


37. Ábra

6. Optikai adó: hangolható lézerek

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.



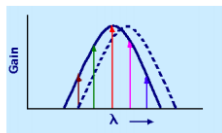
Hangolható adó – típusok

- 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”

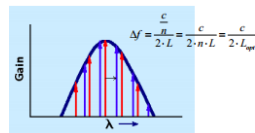
Diszkrét lézer hangolása

Diszkrét lézer hullámhossz hangolása

Meg kell változtatni az üreg erősítési karakterisztikáját



Az erősítés hullámhosszfüggésének megváltoztatása



A lézereg üreg optikai hosszának megváltoztatása

$$n'_{eff} L$$

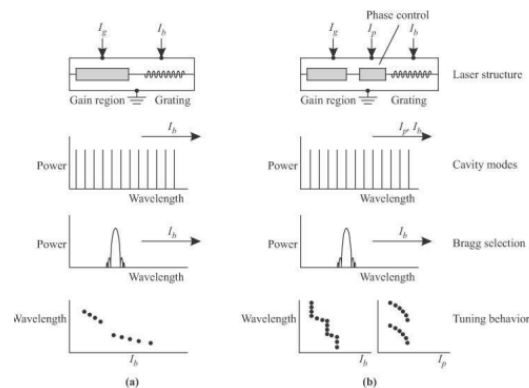
- Fizikai hossz változtatása
- Törésmutató változtatása => terjedési sebesség változtatás

- 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

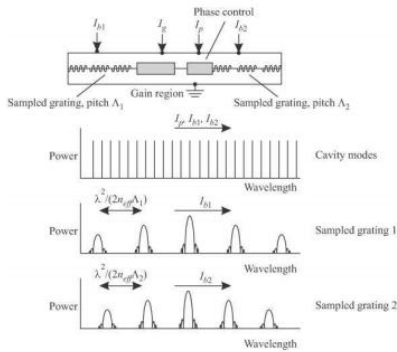
- Többszekciós lézer - előfeszítő árammal hangolás:
 - Az erősítő anyagban vagy azon kívül diffrakciós rácsot hozunk létre, (a hullámvezető hossza mentén periódikusan változik a törésmutató)
 - Csak azok a hullámhosszak jelennek meg, amelyek a rács periódusával és törésmutatójával illeszkednek
 - Az 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



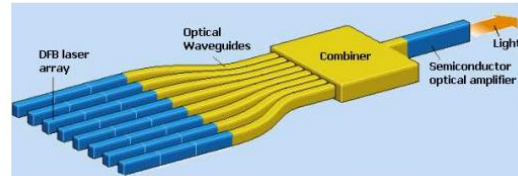
Sampled Grating DBR

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

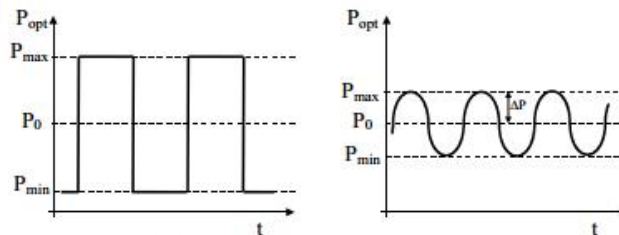
7. Optikai moduláció: közvetlen moduláció

4.2.4 Intenzitás moduláció

Egyszerűsége miatt a gyakorlatban intenzitásmodulációt használunk.

- **Közvetlen modulációs eljárás**
 - Egyszerű konstrukció
 - Közvetlenül lehet detektálni
 - Nagy teljesítményű mikrohullámú erősítőre lehet szükség
 - Korlátozott modulációs mélység
 - A modulációhoz szükséges teljesítményt egy meghajtó áramkör biztosítja;
- Az intenzitásmodulált optikai jel fontos paramétere a modulációs mélység vagy más néven modulációs index. Ez definíció szerint:

$$m = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} \quad (39)$$



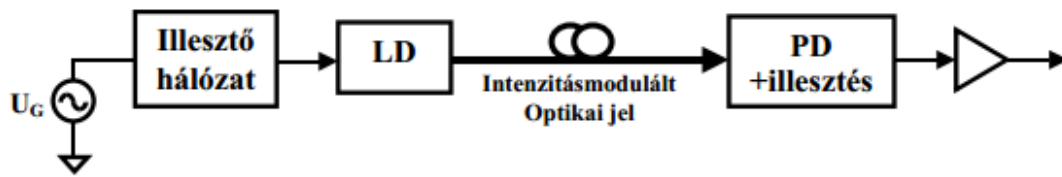
18. ábra A modulációs mélység meghatározása digitális és szinuszos moduláció esetén

Szinuszos moduláció esetén:

$$m = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} + P_{\min}} = \frac{\Delta P}{P_0}, \quad P_{\max} = P_0 + \Delta P \quad P_{\min} = P_0 - \Delta P \quad (40)$$

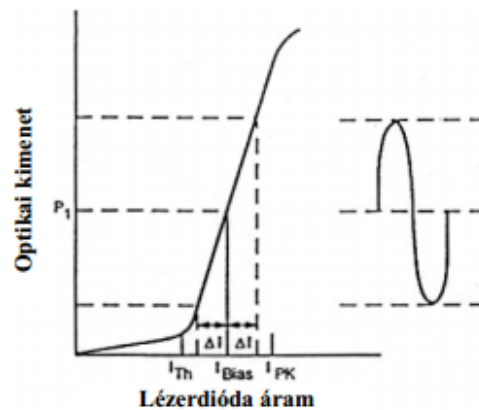
Intenzitásban modulált optikai jel előállítására két lehetőségünk van. Modulálhatjuk közvetlenül a lézer előfeszítő áramát, illetve használhatunk külső modulátort.

4.2.4.1 Direkt / Közvetlen moduláció



19. ábra A direkt modulációs összeköttetés

A fényforrás fontos paramétere a kimeneti optikai teljesítmény. Abban az esetben, amikor a lézergyő árama nem csak állandó, hanem modulációs tagot is tartalmaz, a moduláló áram határozza meg a kimenő teljesítmény időfüggését. Ebben az esetben közvetlen/direkt intenzitásmodulációról beszélünk. A digitális átvitel esetén alkalmazott on-off keying esetén sem kapcsoljuk ki teljesen a lézert, csak küszöbáramig csökkentjük, mert a lézergyő felélése hosszú ideig tart és komoly sebességkorlátot jelentene.



8.

Fontos, hogy a karakterisztika lineáris szakaszán moduláljuk a lézert. Ellenkező esetben az optikai teljesítmény modulációs tagja torzulni fog, a szinuszhullám teteje és alja a nemlinearitás miatt ellaposodik, közelít az egységugráshoz, amely felharmónikus tartalma igen nagy, ezért nagy sávzélesség kell továbbításához.

A közvetlen modulálásnál arra van szükség, hogy a lézer nagy frekvencián modulálható legyen. Erre a legalkalmasabbak a félvezető lézerek, melyekre a többi lézertípushoz képest kisebb parazita hatások jellemzőek, például kisebbek a nem kívánatos párhuzamos kapacitások. Ennek megfelelően az ilyen eszközöknek kisebb a méretük is, viszont emiatt nem számolhatunk túl nagy teljesítménnyel. A félvezető lézertiódák határfrekvenciáját az ún. relaxációs oszcillációs frekvencia szabja meg. A lézer dióda aktív rétegében a gerjesztett töltéshordozók fotonokat hoznak létre, minek következtében számuk lecsökken. Ekkor a fotonok gerjesztődésének üteme kis késéssel szintén csökkenni kezd. Ez viszont lehetővé teszi a gerjesztett töltéshordozók újbóli megszaporodását. Így a dolog kezdődik előlről, a fotonok száma ismét megszalad. Ez a rezgés a kondenzátor és a tekercs közti kölcsönhatásra hasonlít, csak itt az optikai és az elektromos mágneses tér vannak kölcsönhatásban. A rezonancia meghatározza az alkalmazható legnagyobb modulációs frekvenciát. Erősen függ a munkaponti áram nagyságától, ezért az átvitel görbéit azzal paraméterezni kell. A nagy munkaponti áram nagyobb sávzélességet eredményez, azonban lecsökkenti a lézer élettartamát, ezért annak megválasztásánál kompromisszumot kell kötni.

A relaxációs oszcilláció értéke a lézertióda felépítésétől függ, de gyakorlatban maximum 10GHz értékű, habár laborkörülmények között 34GHz-es értéket is elértek. A relaxációs oszcilláció meghatározza a maximális modulálási sebességet. A gyakorlatban a relaxációs rezonancia frekvencia harmadáig modulálják az eszközt.

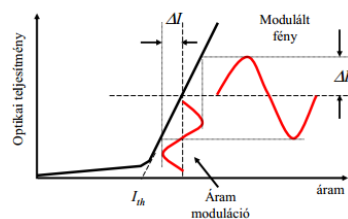
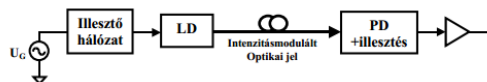
$$f_M = \frac{f_R}{3} \quad (41)$$

f_M : modulációs frekvencia maximális értéke

f_R : relaxációs rezonancia frekvencia

Problémát okoz a közvetlen moduláció esetén fellépő chirp (csipogás). Ugyanis az intenzitásmoduláció során az áram változásának hatására nem csak a kibocsátott optikai teljesítmény változik, hanem a lézer frekvenciája is, azaz frekvenciamoduláció is fellép. Ez a hatás szélesíti a spektrumot, amely az optikai átviteli közegen fellépő diszperzió következtében csökkenti az alkalmazható modulációs sávzélességet. Előnye viszont, hogy könnyen megvalósítható és olcsó, hiszen nem igényel új, drága optikai eszközt.

Direkt / közvetlen moduláció

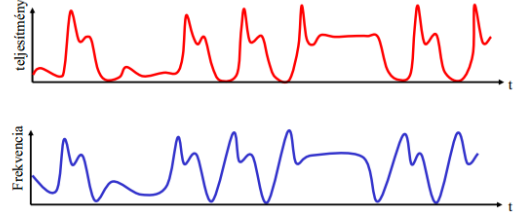


Direkt / közvetlen moduláció

- 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 sávzélességet
 - Többcsatornás rendszerekben probléma
- OOK: nem kapcsoljuk ki teljesen a lézert, csak küszöbáramig csökkentjük
 - a lézerdióda felélédeése hosszú ideig tart és komoly sebességkorlátot jelentene
 - Lézerdióda élettartamát csökkentené

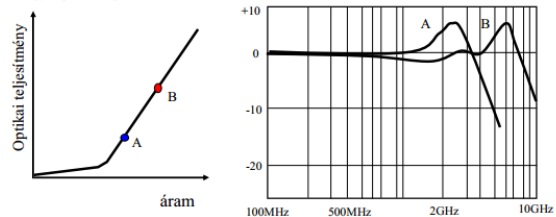
Chirp

- 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



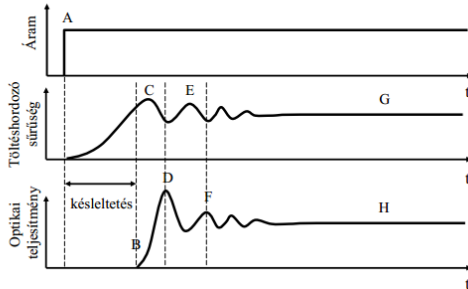
Modulációs sávzélesség

- 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 · GHz

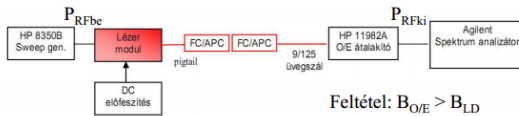


Bekapcsolás jelensége

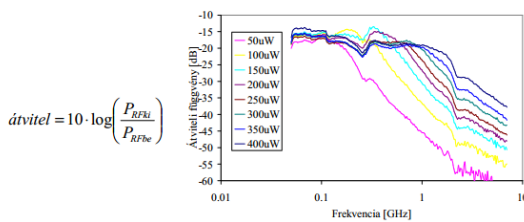
Késleltetés az áram injektálás és a fénykibocsátás között



Modulációs sávzélesség mérése



Feltétel: $B_{O/E} > B_{LD}$



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

Lézer zaj

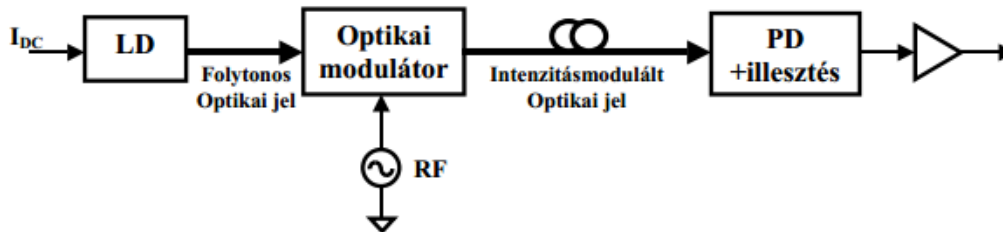
- Az előállított teljesítmény és frekvencia soha nem tökéletesen állandó, hanem véletlenszerűen ingadozik.
- Oka: a fotonok létrehozása diszkrét folyamat, véletlenszerűen, nem egyforma mennyiségben keletkeznek.
- RIN (Relative Intensity Noise)
 - A zaj spektrális sűrűségfüggvénye.
 - A zaj fényvívóhoz 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

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

PL : a lézer állandósult állapotbeli kimenő optikai teljesítménye
 $\Delta P^2(f)$: a lézer optikai teljesítmény fluktuáció négyzetének spektrális sűrűsége

9. Optikai moduláció: külső modulátor típusok

4.2.4.2 Külső modulátor



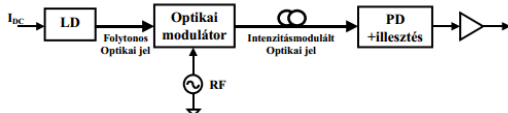
22. ábra Rádiófrekvenciás jel átvitele optikai külső modulátor alkalmazásával

Ebben az esetben a lézervedióda előfeszítése állandó, tehát modulálatlan, folytonos optikai jelet bocsát ki. Az intenzitásmodulációt külön eszköz, a külső modulátor végzi. Az optikai modulátor a fényáteresztő képességét változtatja a moduláló jel függvényében. Jellemzői:

- nagy sebesség
- nincs chirp
- drága
- nagy beiktatási csillapítással rendelkezik
- nagyszintű moduláló jelet igényel

Külső modulátor

- A lézervedióda 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



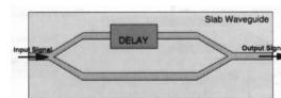
Pockels hatás

- elektro-optikai anyag (tipikusan LiNbO3)
- Pockels-effektus
 - elektromos tér hatására elektrooptikai effektus: megváltozik az anyag ϵ 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

Modulátor típusok

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

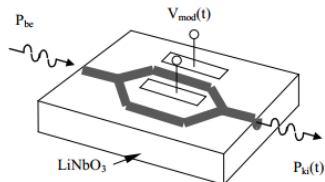
Mach-Zehnder interferométer (MZI) (fizika)



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

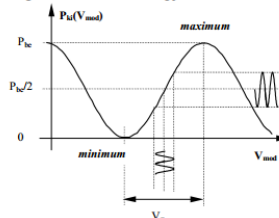
MZ modulátor felépítése

- 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 π (180°) fázistolás jöjjön létre az egyik ágban, azaz kioltás lépjen fel a kimeneten

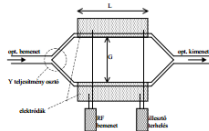


MZ modulátor - push-pull elektróda elrendezés

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

$$\Delta\Phi = \pi \frac{V_0}{V_{\pi}} = \pi \frac{V_0}{2r_p n_o L} \quad (\Rightarrow \Delta\Phi = V_0 \cdot L)$$

L: elektróda hossz
 G: elektródatávolság
 r_p : elektrooptikai együttható
 λ : fény hullámhossz
 \int : átfedési integrál
 n_o : az anizotrop LiNbO₃-nak a „különböző irány”-hoz tartozó törésmutatója



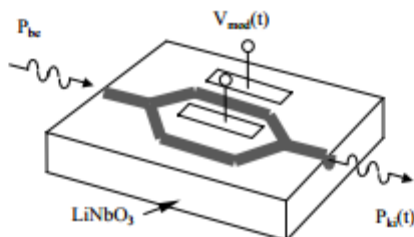
$$P_{ki} = \frac{1}{2} (|E_{s1}| - |E_{s2}|)^2 + 2|E_{s1}||E_{s2}| \cos^2 \Delta\Phi = \frac{P_{in}}{2} \left(\frac{(1 - \sqrt{r_p})^2}{1 + r_p} + \frac{4\sqrt{r_p}}{1 + r_p} \cos^2 \left[\frac{\pi V_0}{2 V_{\pi}} \right] \right)$$

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 (LiNbO₃) 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.

6.1. Mach-Zehnder modulátor

A modulátor elektro-optikai anyagból (tipikusan LiNbO₃) készül. A működés során a Pockels-effektust használja ki, tehát elektromos tér hatására elektrooptikai effektust produkál: megváltozik az anyag ϵ dielektromos állandója, tehát az optikai törésmutatója, így megváltozik a fény terjedési sebessége a anyagban.



45. ábra MZ modulátor felépítése

A lézerdiódából kijövő fényt optikai tápvonalban vezetve egy Y elágazással kettéválasztjuk, majd újra egyesítjük. V₀ feszültséget kapcsolva az elektródákra, a felső ágban vezetett fényhullám fázistolást szenved az alsó ágban terjedő fényhullámhoz képest, majd a két ág hulláma a kimenet előtt újra egybevezetve, interferál egymással. Így a két ág közti fázistolás függvényében a kimenő optikai teljesítményben modulációt figyelhetünk meg.

A következő ábrán a függőleges tengelyen a kimeneten megjelenő optikai teljesítményt látjuk a moduláló feszültség függvényében. A modulátorra kapcsolt feszültséggel egyenesen arányos a fázistolás, amely $-\pi$ től $+\pi$ ig terjed. Ha egy szinuszos jellel modulálunk a munkapont körül, akkor ez intenzitásmodulációként jelentkezik a kimeneten. Mivel a választott munkapontnál nagyon meredek a függvény, kis feszültség modulálásra nagyot változik a fénytelsítmény. Ugyanakkor jól látszik az átviteli függvény szinuszos jellege, tehát erős nemlinearitása. Fontos paraméter az a feszültség (V_{π}), amelyet a modulátorra kell adni, hogy π fázistolás jöjjön létre az egyik ágban, azaz kioltás lépjen fel a kimeneten. Tehát az a feszültség, amely 180° fázistoláshoz szükséges.

Összefoglalva, elmondható hogy a MZ modulátor használata a közvetlen modulációtól a következő szempontokban különbözik:

- a modulációhoz nagyobb szintű RF teljesítményt igényel
- A modulátor nagy impedanciájú, ezért feszültségforrás típusú táplálást igényel
- jelentős optikai veszteség (kb. 10dB beiktatási csillapítás), optikailag illeszteni kell a jelforráshoz a modulátort

45

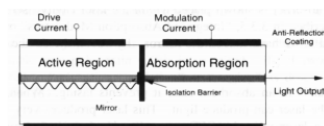
- sávszélessége több 10 GHz, míg közvetlen moduláció esetén általában csak 4-6 GHz
- „Chirp” nem jelentkezik
- drága, különleges anyagú (LiNbO₃) eszközt igényel (külső modulátor ára: 5000-10000 USD, távközlési lézer: néhány száz USD)
- a vezérlőfeszültség és a kimeneti optikai jel szintje közötti nem lineáris összefüggés miatt a működés során a nemlinearitás erősebb hatással jelentkezik.

Elektroabszorpciós modulátor

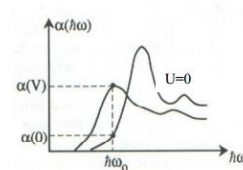
- Félvezető alapú (kvantumvölgyes struktúra)
- Veszteséges modulátor
- A ráadott előfeszítő feszültség függvényében változtatja az anyag abszorpciós együtthatóját
- Fényelnyelő tulajdonsága változik (bemeneti fény intenzitását különböző mértékben nyeli el)
- elektroabszorpciós hatás: a fény vesztesége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

Elektroabszorpciós modulátor tulajdonságai

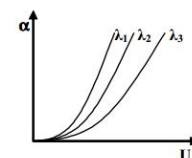
- Az elektro-optikai modulátorokkal összehasonlítva
 - alacsonyabb meghajtó jelet igényel, gyakorlatilag pár voltra van szükség (EO: több száz voltos feszültséigény)
 - A belső folyamatok nagyon gyorsan zajlanak le (ps), az eszköz sebességét a meghajtó feszültség változási sebessége korlátozza, ezt tipikusan 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 (lézertióda, fotodetektor).
 - Rosszabb kioltási tényező



EAM – anyag fényelnyelő képessége



belépő fény hullámhossza



az eszköz előfeszítő feszültsége

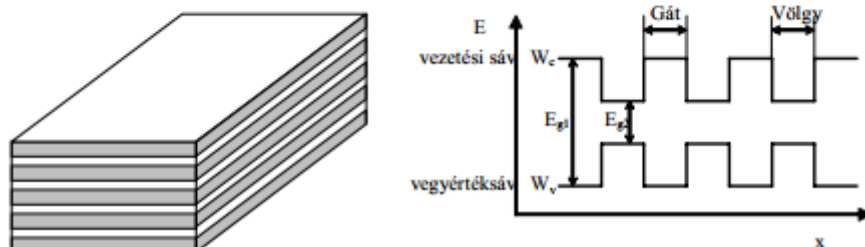
27

6.2. Elektro abszorpciós modulátor

Veszteséges modulátor, amely fényelnyelő tulajdonsága változik a rákapcsolt vezérlő jel hatására. Tehát egy olyan félvezető alapú eszköz, amely a ráadott előfeszítő feszültség függvényében változtatja az anyag abszorpciós együtthatóját, így a bemeneti fény intenzitását különböző mértékben nyeli el. A fény vesztesége változik az elektromos jel függvényében, ezért nevezzük elektroabszorpciós hatásnak.

Az abszorpciós spektrum elektromos mező alkalmazásakor a Franz-Keldysh hatás miatt változik. A jobb működési tulajdonságok elérése érdekében a kvantum határolt Stark (quantum confined Stark) hatásra is szükség van, amely Multi Quantum Well (MQW) struktúra esetén jelentkezik. Az eszköz csak a technológia fejlődésével került előtérbe, hiszen az epitaxiális / növesztési technológiák fejlődése tette lehetővé az ilyen keskeny rétegek kialakítását, ahol az összetétel és a sáv szerkezet hirtelen változik.

A kvantum völgy egy vékony ($d \approx 100$ Anström ≈ 30 atom), alacsony tiltott sáv szélességű anyag, amelyet két nagy tiltott sáv szélességű réteg vesz körül. Az ilyen vastagságú réteg kvantummechanikai tulajdonságokat mutat és a nevét is innen kapta. Multikvantumvölgyes szerkezetben tulajdonképpen két félvezető anyag vékony rétegei váltogatják egymást. Az anyag összetevőinek megfelelő megválasztásával változó tiltott sáv szélességet lehet elérni. Ugyanakkor a réteg rácsállandójának meg kell egyeznie a hordozó rácsállandójával. Azaz a szerkezet rácsillesztett (pl. InP hordozón InGaAsP megfelelő ötvözete).



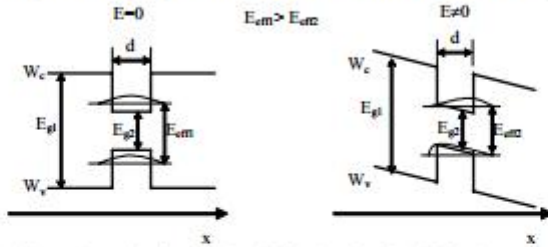
48. ábra MQW struktúra és sávdiagramja

A modulátor működésének lényege a sávdiagramon követhető a legjobban. Az anyagban a lyukak és az elektronok a kis tiltott sáv szélességű völgybe koncentrálnak, mert itt nagyobb a potenciális energiájuk. Pozíciójukat a völgy határozza meg, így energiájuk nem lehet egyenlő a saját völgyük minimális energiájával (Heisenberg bizonytalanság), tehát a töltéshordozóknak nullponti energiája van (E_{e0} : elektron nullponti energia és E_{h0} : lyuk nullponti energia). Amikor elegendő energiájú foton érkezik, akkor elnyelődik és elektront gerjeszt, ezáltal elektron-lyuk pár keletkezik (abszorpció). A fotonnak ehhez minimálisan az anyag effektív tiltott sáv szélességének megfelelő energiával kell rendelkeznie. Előfeszítetlen

állapotban, tehát amikor az eszközre kapcsolt térerő, $E=0$, akkor ez az effektív tiltott sáv szélesség (E_{eff}):

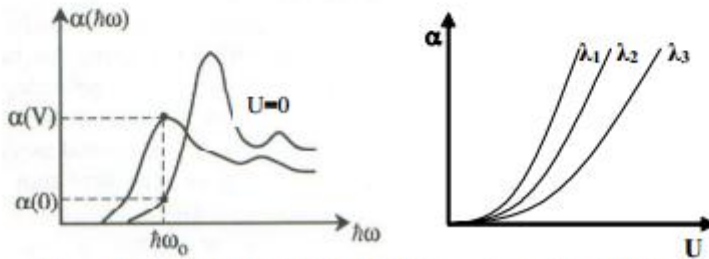
$$E_{eff} = E_{g2} + E_{e0} + E_{h0} \quad (75)$$

Előfeszítő feszültség esetén megváltozik a töltéshordozók által érzékelt potenciálvölgy. Ahogy nő a kvantumvölgy rétegeire merőleges elektromos mező, elmozdul az elektronok és lyukak hullámfüggvénye. A módosított hullámfüggvény alacsonyabb energiájú, ezért csökken a töltéshordozók nullponti energiája, csökken az effektív tiltott sáv szélesség is.



49. ábra QW sávdiagramja előfeszítetlen és előfeszített esetben

Az ismertetett folyamatok következtében az anyag fényelnyelő képessége változik a belépő fény hullámhossza és az eszköz előfeszítő feszültségének függvényében, ahogy az 50. ábrán is jól látható.

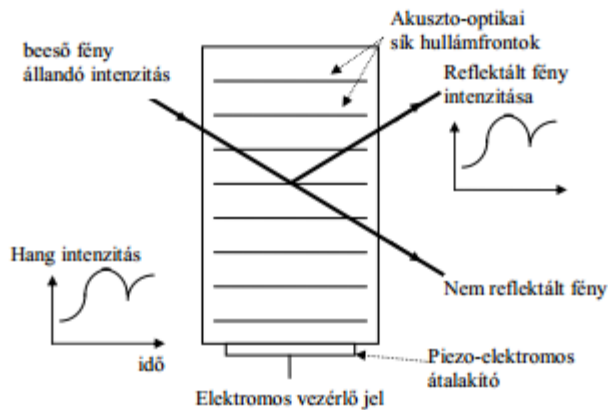


50. ábra Abszorpciós együttható a hullámhossz és az előfeszítő feszültség függvényében

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

6.3. Akusztó-optikai modulátor

Az akusztó-optika az akusztikus hullám és az optikai hullám kölcsönhatásával, a gyakorlatban a hanghullámoknak a fénycsugárakra való hatásával foglalkozik. Az akusztikus hullám által keltett törésmutató rács a beeső fény diffrakcióját vagy törését idézi elő. Az akusztó-optikai eszközök lehetnek térfogatiak (bulk) vagy felületiek (vezetett hullámú). Térfogati eszköz esetén a fény és a hang is a közeg teljes térfogatában, koncentráció nélkül terjed. Felületi eszköz (SAW) esetén a fény és hanghullámok is egy vékony felületi rétegben koncentrálnak. Az akusztó-optikai modulátor Bragg diffrakción alapuló eszköz. Kis akusztikus jel esetén egy Bragg cellában a reflektált fény intenzitása a vezérlő akusztikus jel intenzitásával arányos. Elektromosan szabályozható akusztikai átalakítót használva lineáris analóg modulátort kapunk. Az akusztikai teljesítményt növelve telítődés következik be, majdnem tökéletes reflexió érhető el. Ilyenkor az eszköz kapcsolóként működik, amely a hang ki- és bekapcsolásával a reflektált fényt is ki- és bekapcsolja.



51. ábra akusztó-optikai modulátor

10. Optikai vevő típusok (pin, lavina), zajkomponensek

Az optikai vevő feladata a vett fény-jel visszaalakítása a további feldolgozásra alkalmas szintű elektromos jellé. A fényenergiának elektromos energiává, a fényjelnek elektromos jellé történő alakítására több fizikai jelenség is ismeretes. A fotovevőket a felhasznált fényelektromos hatás alapján a következő csoportokba osztják: termikus-, pneumatikus fotovevők és fotoelektromos vevők. Számunkra a fotoelektromos vevők csoportja a legfontosabb, amelynek további csoportosítása látható a következő ábrán.

A működési paraméterek miatt az optikai távközlési rendszereken az optikai jel vételét mindig félvezető alapú belső emissziós eszközök végzik. Ez általában Si, Ge vagy egyéb III-V. ötvözeteket jelent.

8.1. Fotodetekció

Szinte az egész mai elektronika aktív alkatrészbázisa a p-n átmenetre épül. A záróirányban előfeszített p-n átmenet előnyös tulajdonságú fénydetektáló struktúra, ezért ezt a szerkezetet használjuk fotodetekcióra is. Az áram és a feszültség statikus kapcsolatára a dióda egyenlet érvényes:

$$i = i_0 \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right), \quad (114)$$

i_0 : a nyugalmi záróáram,
 q : a töltésegység,
 k : a Boltzmann-állandó,
 T : az abszolút hőmérséklet,
 V : a diódán eső feszültség.

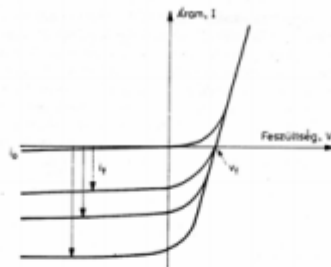
Ha a p-n átmenetre fény esik, abban a hullámhossz tartományban ahol a fényvezető anyag számottevő abszorpcióval rendelkezik, az elnyelt fény töltéshordozó párokat szabadít fel, amelyek megnövelik a vezetőképességet. Tehát a töltéshordozók gerjesztődnek, a p-n átmenetben jelenlévő töltés kettősréteg elektromos tere, azonban szétválasztja a hordozó párokat, a lyukakat a p-, az elektronokat az n-oldal felé sodorja. Ezek a töltéshordozók tehát hozzáadódnak a nyugalmi záróáramot létrehozó, termikusan generált töltéshordozók áramához. A fotoáram figyelembevételével a diódaegyenlet a következő alakot veszi fel (rövidre zárt üzemmódra).

$$i = i_0 \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right) - i_f, \quad (115)$$

i_f : fotoáram

Megszakítva az áramkört, a fotofeszültség

$$V_f = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{i_f}{i_0} + 1 \right). \quad (116)$$



70. ábra Fotodióda áram-feszültség karakterisztikája

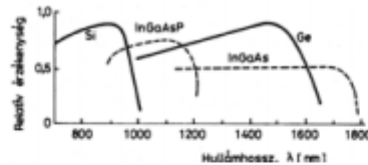
Valóságos fotodiódán megvilágítás nélkül is folyik át áram, ezt sötétáramnak nevezzük. Záróirányban a fotoáram párhuzamosan fut a sötétárammal, és független a feszültségtől. Ilyen üzemmódban tehát a fotoáram a beeső fényintenzitással arányos. A diódaegyenletből láthatóan a záróirányú előfeszítés ($V < 0$) esetén:

$$-i = i_0 - i_f \quad (117)$$

A fotodióda anyagának és konstrukciójának megváltoztatásával elérhető, hogy i_f egy meghatározott tartományban feszültségtől független, igen kis érték legyen. Ekkor a fotoáram gyakorlatilag lineáris függvénye a generált töltéshordozók számának.

A p-n átmenet kiürített rétege nem lehet túl kicsi, mert nehéz a fény becsatolása az eszközbe és gyenge hatásfokot eredményez. Ugyanakkor a túl nagy kiürített réteg is káros, mert a lassú drift miatt korlátozza az eszköz sebességét.

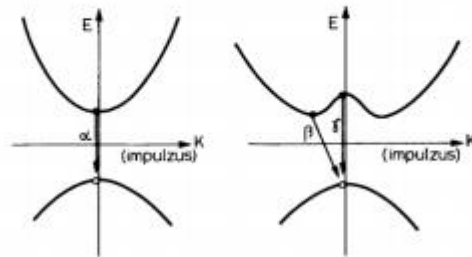
A folyamat frekvenciafüggő. Rövidebb hullámhosszak felé haladva, növekvő abszorpciós tényező esetén a növekvő felületi rekombináció miatt csökken az eszköz fotoválása. Növekvő hullámhosszal viszont az anyag egyre átlátszóbbá válik, ami a fotovezetés hullámhosszfüggvényében a tiltott sáv energiaértékének közel megfelelő maximumot eredményez. Azaz a tiltott sáv szélességet át kell hidalnia az elnyelt foton energiájának, tehát az anyag tiltott sáv szélessége meghatározza a detektálható minimális frekvenciát. A különböző félvezető anyagok eltérő tiltott sáv szélessége miatt különböző lesz az eszköz működési hullámhossztartománya.



71. ábra Különböző anyagok vételi érzékenysége

A félvezető anyagokat sáv szerkezeti típusuk alapján direkt és indirekt anyagoknak, pontosabban direkt és indirekt optikai átmenetekkel jellemezhetőeknek tekintjük. A direkt félvezető anyagokban a vezetési sáv minimuma és a vegyértéksáv maximuma azonos impulzusértéknél van. Az optikai átmenet közvetlenül (direkt) formában létrejöhet, az elektron-foton párra az impulzusmegmaradási követelmény automatikusan teljesül. Azokban a félvezető anyagokban, amelyekben a vezetési sáv minimuma és maximuma nem egyazon impulzusértéknél van, az impulzusmegmaradás érdekében az elektronnak a rekombináció során kölcsönhatásba kell lépnie a rácsrezgésekkel (indirekt átmenet, fonon segítségével jön létre). Az ilyen eszközök igen kis hullámhossztartományban alkalmasak detekcióra és a tiltott sáv szélessége sokkal nagyobb, tehát alacsonyabb hullámhossztartományban működnek, mint

a direkt átmenetű eszközök. Indirekt félvezetőre példa a szilícium, a germánium, míg direkt félvezetőkre a GaAs, InSb



72. ábra Direkt és indirekt átmenet

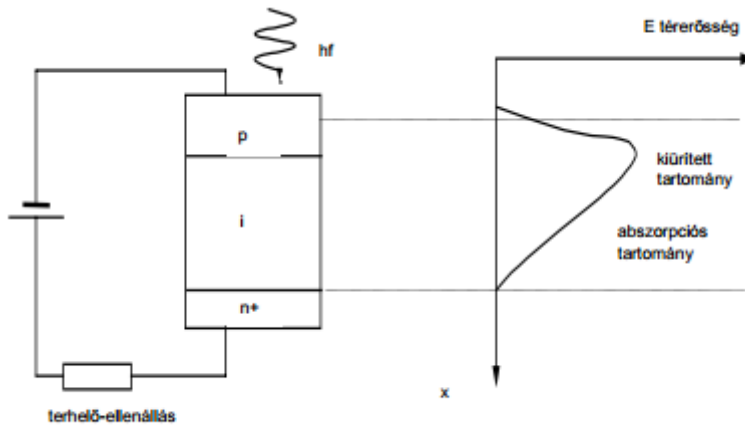
8.3. Fotodetektor típusok

8.3.1 PIN dióda

A p-n átmenet kiürített rétegének növelése érdekében egy szennyezetlen (intrinsic) rétegre van szükség az eszközben. Adott zárófeszültségnél a kiürített réteg a fajlagos ellenállás növelésével nő, tehát a gyengén adalékolt intrinsic tartomány a működtetés során teljes egészében kiürített lesz. A dióda vázlatos felépítésén látható, hogy az intrinsic tartományhoz képest az n és p típusú rétegek sokkal keskenyebbek, ebből következően a töltéshordozó párok keltése főleg a kiürített réteg tartományában történik. Ebben a rétegben a töltéshordozók rekombinációjának valószínűsége csekély, azaz a keletkező töltéshordozók közel teljes mértékben hozzájárulnak a fotoáramhoz. A működési sebességet a töltéshordozóknak a kiürített rétegen való átjutási ideje, a futási idő határozza meg. A PIN-diódák kiürített rétegében a kialakuló télerősség elegendően nagy ahhoz, hogy a töltéshordozók elérjék termikus határsebességüket és így minimális futási idejüket.

A PIN dióda ideális esetben minden beérkező foton hatására egy elektront bocsát ki. A dióda árama:

$$I_p = \eta \cdot P_0 \cdot \frac{q}{h \cdot \nu} \quad (123)$$



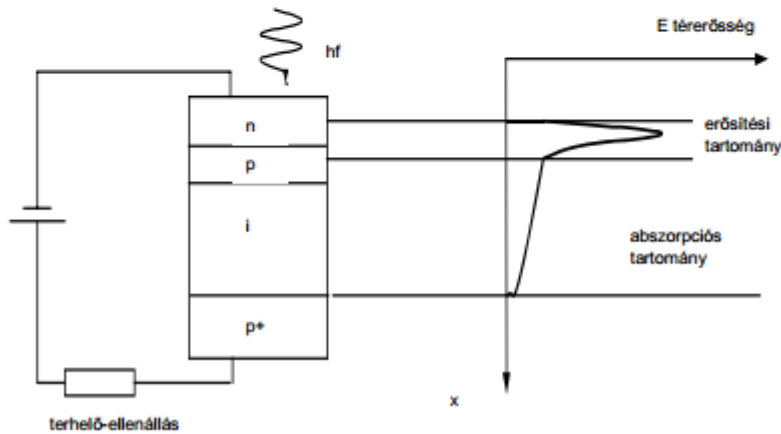
73. ábra PIN dióda

8.3.2 Lavina fotodióda

A lavina fotodióda belső erősítéssel rendelkező fotodióda. A zárófeszültség növelése során, annak egy bizonyos értékétől kezdve megindul a töltéshordozók sokszorozódása, és így a fotoáram nemcsak a megvilágítás, hanem az alkalmazott záróirányú feszültség növekedésével is emelkedik. A feszültség emelése kezdetben csak kismértékű változásokat eredményez, majd ahogy a sokszorozódás lavinaszerűen felgyorsul a kezdeti fotoáram több százszorosára, sőt ezerszeresére növekedhet. Tehát a lavina diódában egy foton hatására több elektron lép ki, az úgynevezett lavina-hatás következtében, ami a lavina letöréshez hasonló jelenség.

$$I_p = \eta \cdot P_0 \cdot \frac{q}{h \cdot \nu} \cdot M \quad (124)$$

M: sokszorozási tényező, megadja, hogy egy foton átlagosan hány elektron emisszióját okozza. Az egyítható nagyságrendje 10^2 . Ma már az eredeti 50-400V-os előfeszítés helyett 15-25V-os előfeszítéssel képesek elérni ezt az értéket.



74. ábra lavina dióda (APD)

Ideális fotovevő tulajdonságai

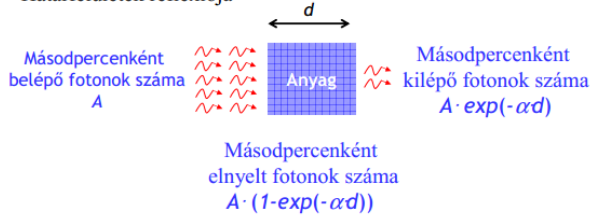
- Nagy érzékenység a működési hullámhossz tartományban és alacsony érzékenység ezen kívül => magas hullámhossz szelektivitás
- Gyors válaszidő => nagy sáv szélesség
- Alacsony zaj
- Hőmérsékletre érzéketlen működés
- Kis fizikai méret
- Hosszú működési élettartam
- Elfogadható ár

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

Fényelnyelés

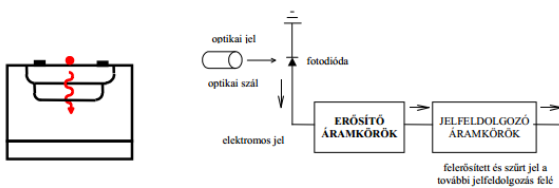
Valószínűsége függ

- Kiürített réteg vastagsága, d
- Az anyag abszorpciós együtthatója, α
- A belépő fény hullámhossza, λ
- A fotonok mekkora hányada jut el a kiürített réteggig
- Határfelületek reflexiója

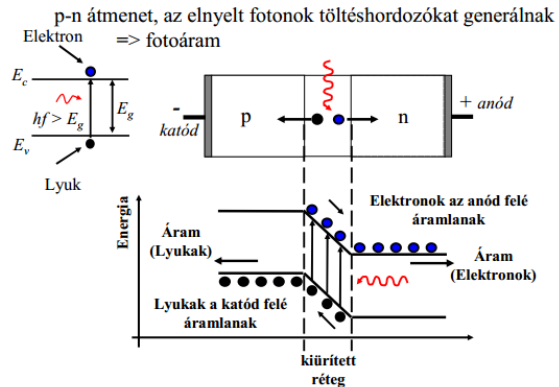


Vevő

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



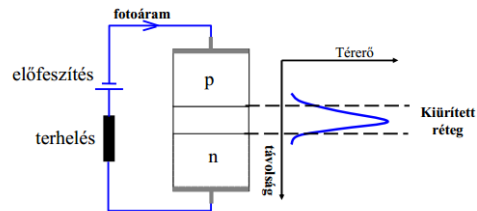
O/E átalakítás alapjai



4

Záró irányú előfeszítés

- 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 sáv szélesség
 - Több foton jut be => növeli az érzékenységet



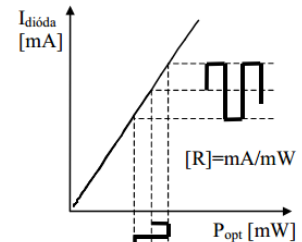
5

Optikai detektor - jellemzők 1.

- 6 • Kvantumhatásfok (egy foton átlagosan hány töltéshordozót generál), η

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

- Bejövő optikai teljesítmény-generált fotoáram karakterisztika



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

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

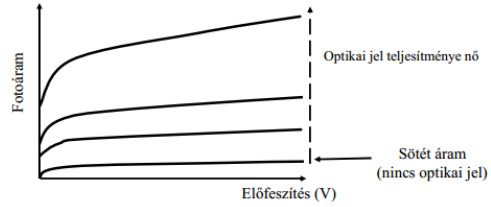
7

Sötétáram

9

Optikai detektor - jellemzők 2.

- 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=10⁻⁹)
- Sötétáram (megvilágítás nélkül áram)

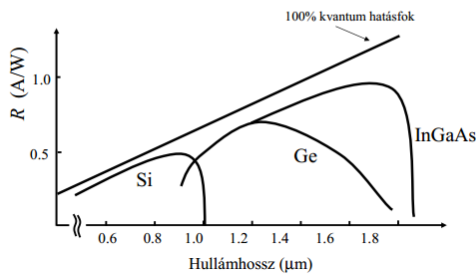


Érzékenység hullámhosszfüggése

10

Eszköz anyaga szabja meg

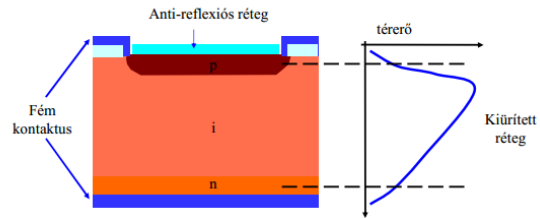
- Si: alacsony ár, jó paraméterek, rövid hullámhosszra
- Ge: a teljes hullámhossztartományt lefedi, magas sötétáram (kis tiltott sáv miatt)
- InGaAs: 1550 és 1310nm-en a legjobb tulajdonságok, nagy sebesség, alacsony zaj, drága



PIN dióda

12

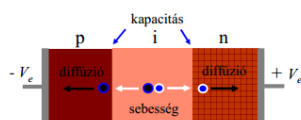
- p-n átmenet nem biztosít elég nagy kvantum hatásfokot
- szennyezetlen (intrinsic) réteg
 - Nő a p-n átmenet kiürített rétege
 - Nő az elnyelt fény mennyisége
 - Nő a kvantumhatásfok
- Erősen lineáris működés, alacsony sötétáram, alacsony zajszint, stabil karakterisztika



PIN dióda

13

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



Fotóáram:

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

Levágási frekvencia:

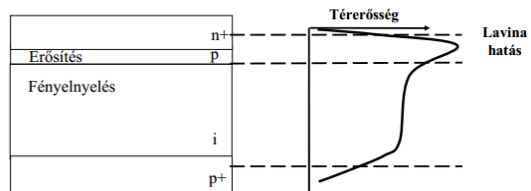
$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)} \mu\text{m}$$

Lávina dióda

14

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 10^4)
- 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

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

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

Fotodetektorok összehasonlítása

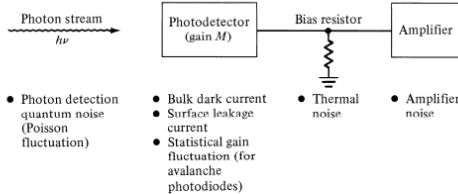
16

Paraméter	PIN fotodióda	Lavina (Avalanche)
Anyag	Si, Ge(1310nm), InGaAs (1310 & 1550nm)	Szilícium, Germánium, InGaAs
Sávszélesség	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

Vevő kimenetén fellépő zajtípusok

18

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

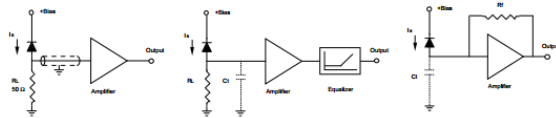


Vevő struktúrák

19

Fotodióda kapacitása + terhelő ellenállás => RC kör $f_{max} = 1/(2 \cdot \pi \cdot R_L \cdot C_j)$
Termikus zaj: $\langle i_i^2 \rangle = 4K_B T B / R_L$ (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
 $B \leq \frac{G}{2 \cdot \pi \cdot R_f \cdot C_f}$

11. Optikai mérések és mérőműszerek (csillapítás, reflexió, hibahely detektálás, diszperzió)

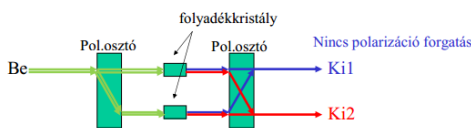
12. Passzív optikai eszközök (csillapító, csatoló, izolátor, cirkulátor)

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

Vezérelhető optikai csillapító

- Pl. folyadékkristályos kapcsoló
- Polarizációs hatás alapján, + polarizációs osztók
 - Folyadékkristály: feszültség nélkül nem változtat, előfeszítő feszültséggel 90°-ot forgat a polarizációt
 - Vezérelhető optikai csillapítás, ha folyadékkristályos cellát nem digitálisan vezéreljük



Fontos karakterisztikák

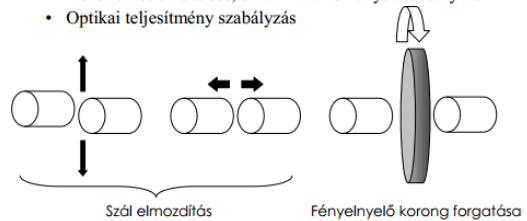
- Reflexió (Return loss, RL)
 - Az optikai eszköz a fény egy részét reflektálja
 - 0-100%
 - A visszavert teljesítmény [dB]
- Beiktatási csillapítás (Insertion loss)
 - Az eszközben való terjedés során fellépő jelvesztés
- Többlet veszteség (Excess loss)
 - Az elméleti minimumon felüli veszteség
 - Nincs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

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



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, dinamikatartományba szabályzás
 - Optikai teljesítmény szabályzás



Csatolók

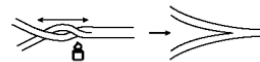
Fényt csatol a bemeneti szál(ak)ból kimeneti szál(ak)ba

- 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 (kaskád megoldás)
- típusok:
 - 50% / 50% (3 dB) (3 vagy 4 port)
 - 1%, 5% vagy 10% taps (általában 3 port) => optikai jel monitorozás

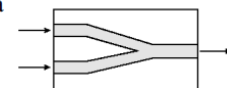


Becsatolás (2x1)

- Szál-összeolvasztás (FBT: Fused Biconic Taper Fiber)
 - szál alapú technológia: csavarás, húzás, fűtés



- Planár hullámvezető
 - technológia: integrált optika

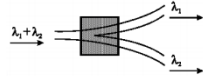


Kicsatolás (1x2)

- Osztók
 - jel többszörözés
 - pl.2 szeres osztó

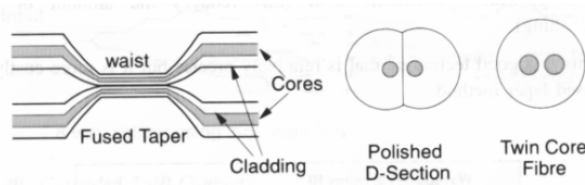


- (Szűrők)
 - hullámhossz-alapú szétválasztás
 - fix vagy hangolható

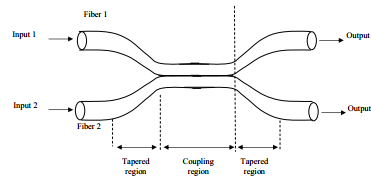


Íránycsatoló - Gyártási módszer

- 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



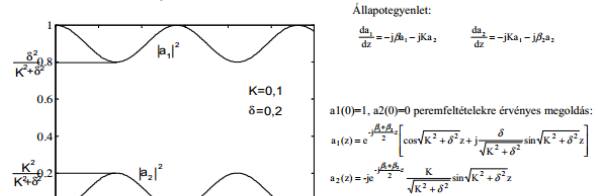
Íránycsatoló (2x2)



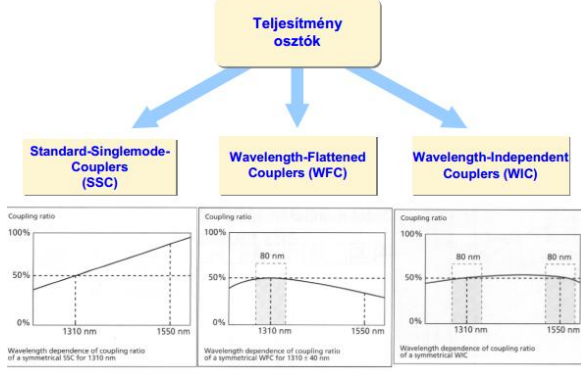
- Leggyakoribb: 3 dB-es csatoló (felezi a teljesítményt)
 - Csak egy bemeneten van jel => osztóként működik
 - Mindkét bemeneten van jel => Mindkét kimeneten mindkét bemeneti jel megjelenik (fele teljesítménnyel)
 - Ha csak az egyik kimenetet használjuk => összegzőként működik

Íránycsatoló (2x2)

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

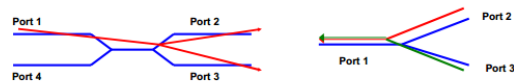


Teljesítmény osztók



Reciprocitás

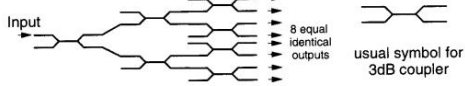
- Mindkét irányba szimmetrikusan működnek
- Pl. Íránycsatoló
 - 1. bemeneti jel fél-fél teljesítménnyel jut a két kimenetre (2. és 3. port)
 - 2. portra („kimenet”) kapcsolt jel fél-fél teljesítménnyel jut a két „bemenetre” (1. és 4. port)
- Pl. osztó (Y splitter)
 - 1. bemeneti jel fél-fél teljesítménnyel 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

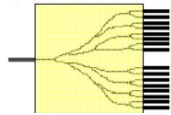
- Hagyományos 3dB iránycsatolók kaszkádba kapcsolásával hozható létre (n-way splitting)
- 3dB veszteség lépésenként

– 8 way coupler: 9 db veszteség minden kimenetre

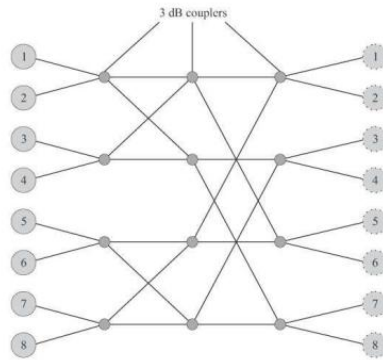


8-way splitter using 3-dB couplers

- Integrált optikai kivitel



8x8 csillag csatoló (star coupler)

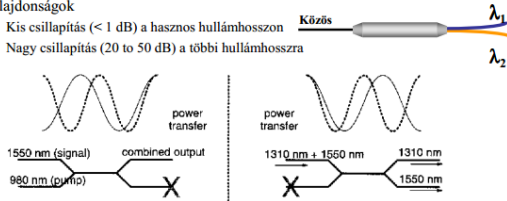


Minden bemenetről egyenletes teljesítmény elosztás minden kimenetre

Hullámhossz szelektív csatolók

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

- 3 port (4. port nincs kivézetve)
- 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 csatolna)
- Tulajdonságok
 - Kis csillapítás (< 1 dB) a hasznos hullámhosszon
 - Nagy csillapítás (20 to 50 dB) a többi hullámhosszra



Optikai csatornák szétválasztása

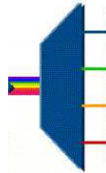
- Optikai DEMUX, hullámhossz szétválasztás
- Optikai szűrő

- Paraméterek:

- Szelektivitás, áthallás
- Beiktatási csillapítás, polarizáció függés

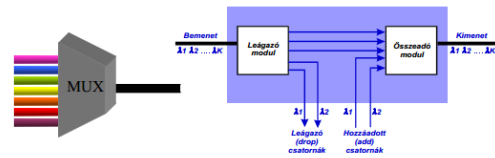
- Megvalósítás

- Száloptikai
- Integrált optikai (planár hullámvezető)



Multiplexerek

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



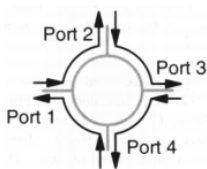
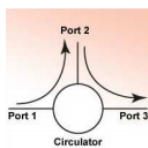
Optikai izolátor

- 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
 - Asszimmetrikusan 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>60dB)



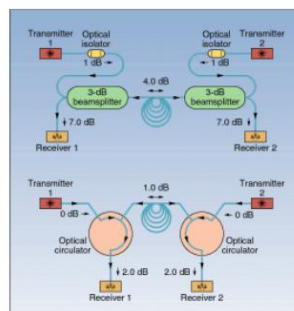
Cirkulátor

- 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 - alkalmazás

Kétirányú átvitel egy optikai szálon



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

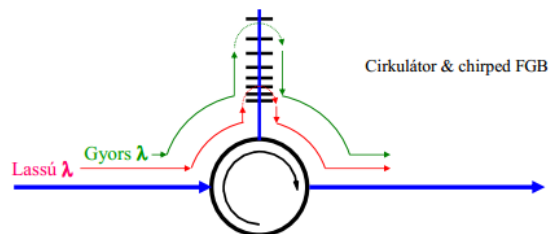
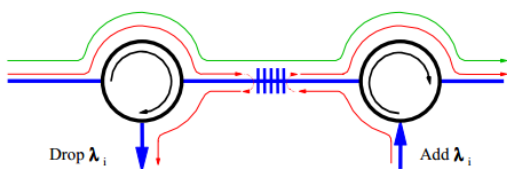
• Minden jelút 2 db optikai izolátort tartalmaz (kb. 2dB csillapítás)

Cirkulátor - alkalmazás

Cirkulátor – alkalmazás

Kromatikus diszperzió kompenzálás

Add/drop

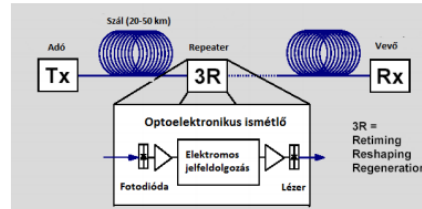


13. Optikai erősítő: fontosabb paraméterek, alkalmazási példák, típusok összehasonlítása

Összeköttetés hosszának növelése

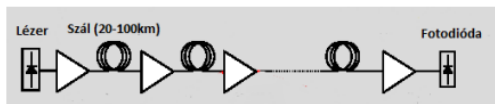
- Nagyobb adóteljesítmény (1mW – 50mW)
- Nagyobb vevőérzékenység
 - Anyag megválasztása
 - Lavinadióda használata
 - Zajszint csökkentése: kisimpedanciás vagy transzimpedanciás vevőstruktúra
- Kisebb átviteli csillapítás
 - Hullámhossz megválasztása
 - Speciális, kis csillapítású fényvezető szál
- Ismételőállomás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

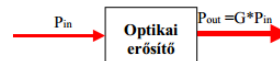
Optikai erősítő rendszer



- ✓ 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

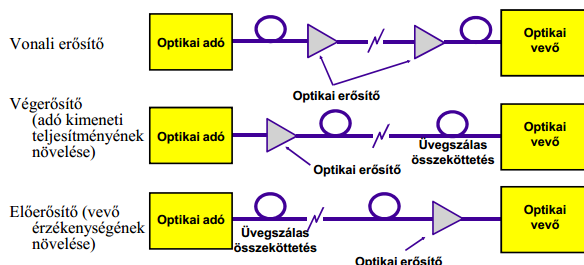
Közvetlen optikai tartományban O-E és E-O átalakítás nélkül



- 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



Előerősítő

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

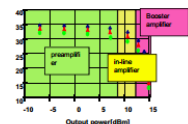
Végerősítő

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 kaskádúba 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)

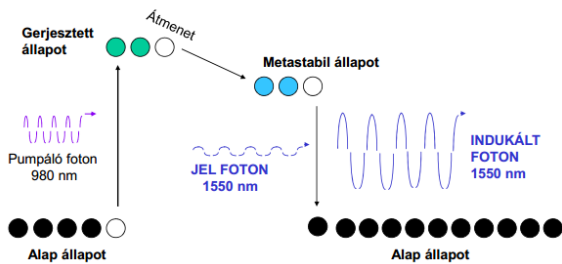


Optikai erősítő - Típusok

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

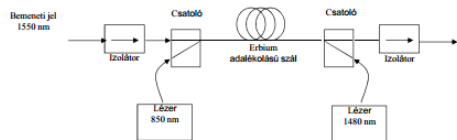
Adalékolt üvegszál – működés alapja

Inverz populáció
 ⇒ Indukált emisszió a domináns folyamat ⇒ optikai erősítés
 Spontán emisszió ⇒ zaj



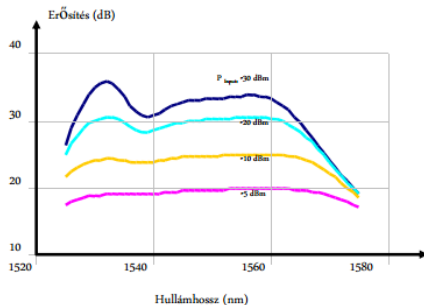
EDFA – pumpálási módok

- 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



Optikai erősítés (G)

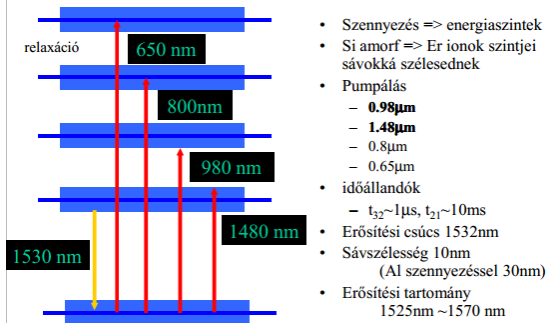
- $G = P_{Ki} / P_{Be}$
 P_{Ki} : Kimeneti optikai teljesítmény (erősítő zajteljesítménye nélkül)
 P_{Be} : Bemeneti optikai teljesítmény
- Függ a bemeneti optikai teljesítménytől (telítés)
- Függ a bejövő jel hullámhosszától



Adalékolt üvegszál

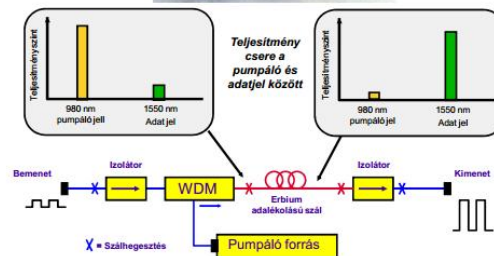
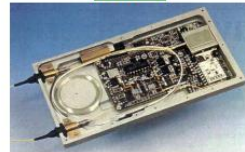
- Hagyományos Si üvegszál közel földfémekkel adalékolva
- Működési hullámhosszt az adalékanyag határozza meg
- Adalékoló anyagok:
 - Erbium ⇒ EDFA, 1555nm
 - Holmium
 - Neodímium 1060, 1310nm
 - Túlium
 - Itterbium
 - Prazeodímium 1300nm

EDFA - energiaszintek

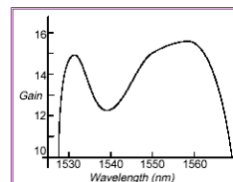


- Szennyezés ⇒ energiaszintek
- Si amorf ⇒ Er ionok szintjei sávokká szélesednek
- Pumpálás
 - 0.98μm
 - 1.48μm
 - 0.8μm
 - 0.65μm
- időállandók
 - $t_{32} \sim 1\mu s$, $t_{21} \sim 10ms$
- Erősítési csúcs 1532nm
- Sávszélesség 10nm (Al szennyezéssel 30nm)
- Erősítési tartomány 1525nm ~1570 nm

EDFA

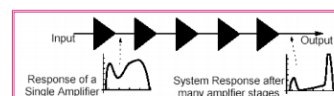


EDFA erősítés



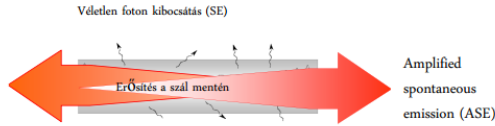
Az erősítés hullámhosszfüggő
 1560 nm-en 3 dB-lel magasabb, mint 1540 nm-en (ez kétszer nagyobb kimeneti jelteljesítményt jelent).
 Ez nem mindig nagy korlátozás (egycsatornás rendszer vagy kevés erősítő rendszerben)

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



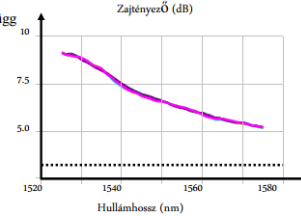
Erősített spontán emisszió (ASE)

- 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

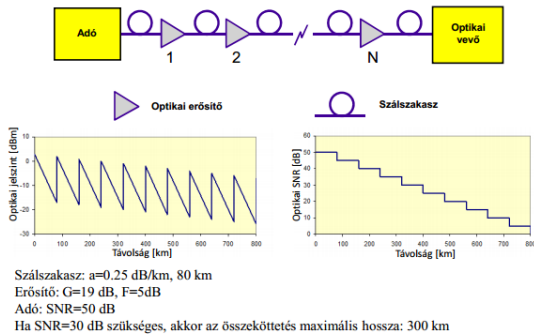


Zajtényező (F)

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

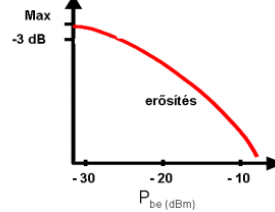


Zaj - kaszkádba kapcsolt erősítő

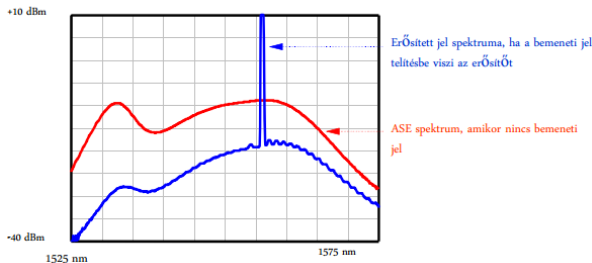


Telítés

- Telítésben az erősítés következtében az erbium ionok elfogynek => 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=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. alumínium, 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

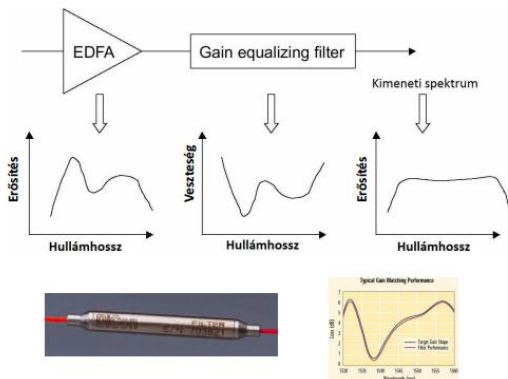
Rendszer szinten:

- FBG szűrő => csökkenti a frekvenciaválasz csúcsát
- Későbbi erősítő karakterisztikája kompenzálja a frekvenciafüggést

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

Egyenletes erősítés FBG-vel



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

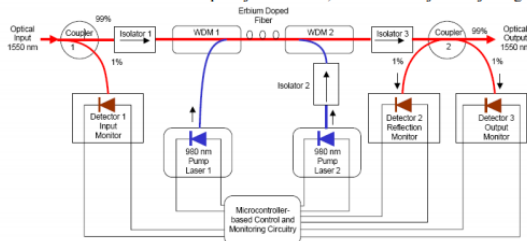
Egyenletes erősítési spektrum

- 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

„valódi” eszköz - Biztonsági megoldások

- Bemeneti teljesítmény monitorozás
 - A vezérlő elektronika lekapcsolja a pumpáló forrást, ha a bemeneti jel szintje több, mint 2-20 μ 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

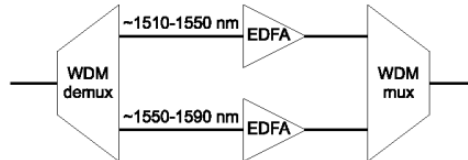


Raman erősítő

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

Kétablakos erősítő

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



EDFA korlátok

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

Stimulált Raman Szórás (SRS)

fotonok és optikai fononok közötti kölcsönhatás

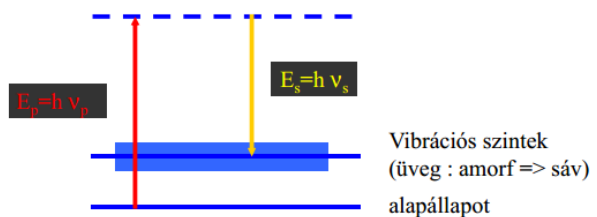
Si szálban erős pumpáló foton energiája

=> más frekvenciájú új foton

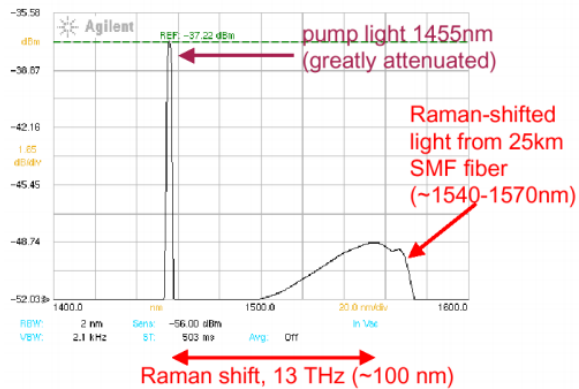
=> elnyelődik, molekuláris vibráció, optikai fonon

(atomrács mechanikus rezgése)

Eredeti hullám: pumpáló hullám, szórt hullám: stokes hullám



Raman erősítés

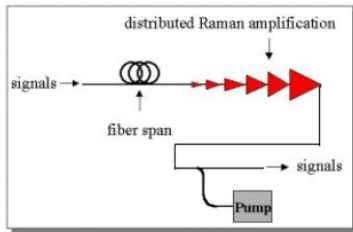


Stimulált Raman Szórás (SRS)

- Két fénynyaláb közötti kölcsönhatás
- Optikai küszöb teljesítmény:
 - Függ: eszköz felépítés, lézer vonalszélesség, moduláció, stb
 - Tipikusan: $1-1.5 \text{ W}$ (egycsatornás rendszer, keskeny CW forrás, SMF-28) ($P[W]=5.9 \cdot 10^2 \cdot d[\mu\text{m}] \cdot \lambda[\mu\text{m}] \cdot a[\text{dB/km}]$)
 - **kritikus csatornák közötti távolsággal rendelkező WDM rendszerben csak ~1 mW(!)**
- $\approx 13 \text{ THz}$ pump és jel frekvenciája között (hullámhosszban $\approx 100 \text{ nm}$)
- $\approx 6 \text{ THz}$ Sávzélesség (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

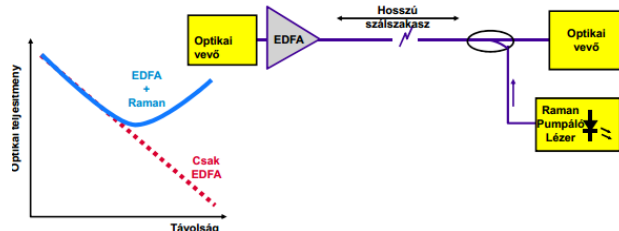
Elosztott Raman erősítés

- 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



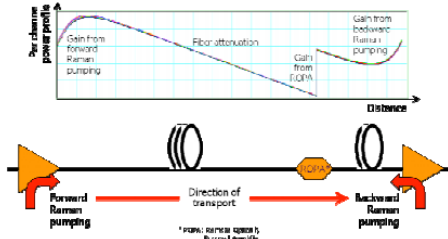
EDFA & Raman együttes használata

- 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

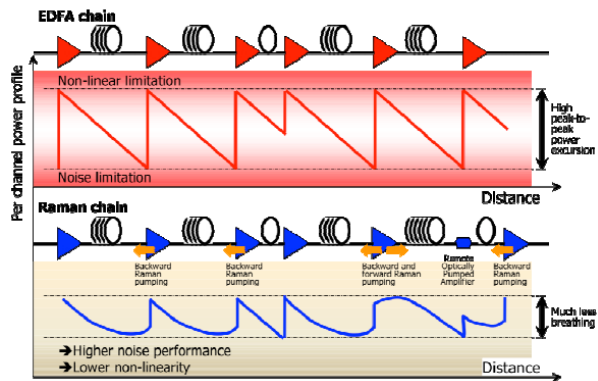


EDFA & Raman együttes használata

- Raman előre irányban: üvegszál mentén nő a teljesítmény
- EDFA: diszkrét ponton hirtelen teljesítmény növelés
- Raman vissz irányú: üvegszál mentén nő a teljesítmény
- Üvegszál: csillapítás
- \Rightarrow a minimális optikai teljesítmény nem a szálszakasz végén lesz
- \Rightarrow kisebb teljesítmény ingadozás a link mentén \Rightarrow nemlinearitás hatása kisebb

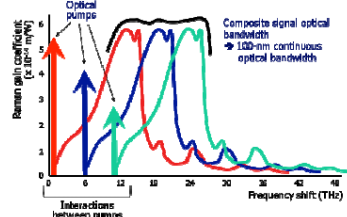


Nemlinearitás



Szélessávú erősítés

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

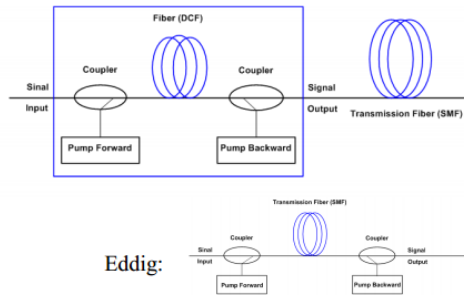


RAMAN erősítő tulajdonságai

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

Adalékolt Raman erősítő

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

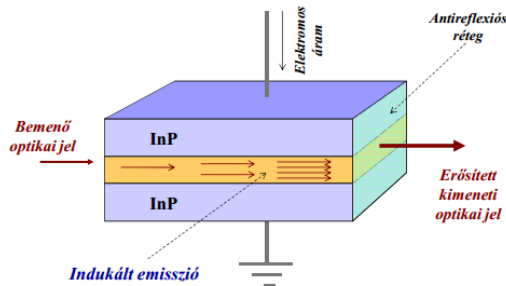


Félvezető Optikai Erősítők (SOA, SLA)

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

Kezdeti technológiai problémák

Félvezető Optikai Erősítők (SOA, SLA)



- Nagy maradék reflexió
 - Jelentős erősítés ingadozás (FP-SOA)
 - Jelenleg <math>< 0.5\text{dB}</math> (antireflexiós réteg, ferde határfelület, ablak réteg)
- Polarizációfüggő erősítés
 - Aktív réteg felépítése => $\Gamma_{TE} > \Gamma_{TM} \Rightarrow G_{TE} > G_{TM}$
 - Geometriai megoldás ($\Delta G = 0,2\text{dB}$)
 - soros elrendezés
 - Párhuzamos elrendezés
 - plusz optikai eszközök
 - Technológiai megoldás ($\Delta G = 1,5\text{dB}$)
 - 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)

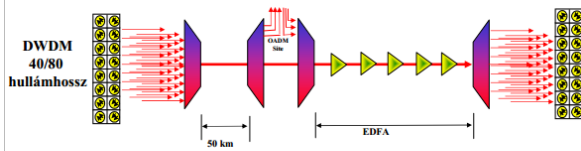
- ✓ Kis méret
- ✓ Könnyű integrálhatóság
- ✓ Kis elektromos pumpálás, előfeszítés (100-500mA)
- ✓ Széles hullámhossztartományban alkalmazható (pl. InGaAs/InGaAsP: 40-80 nm, 1250-1650 nm)
- ✗ ASE => zaj
- ✗ Kiseb erősítés
- ✗ Kiseb telítési teljesítmény
- ✗ Ki-, becsatolási veszteségek
- ✗ Polarizáció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

14. Optikai erősítő: EDFA

Az előző tételnél!

15. Optikai szűrők, hullámhossz multiplexálás, demultiplexálás (főbb típusok, jellemző tulajdonságok)

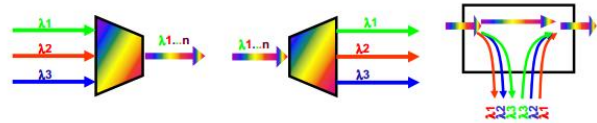
Többszatornás rendszerek



Több optikai vivő
 ↓
 csatornák összegzése & szétválasztása
 ↓
 hullámhossz szelektív eszközök

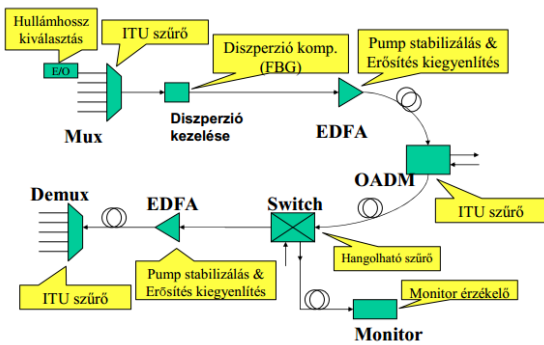
Optikai szűrők feladatai

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



Szűrők csoportosítása

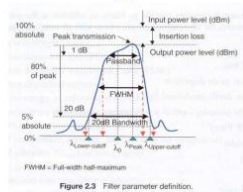
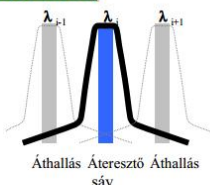
Optikai szűrők a hálózatban



- 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)

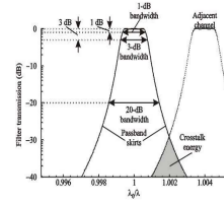
Szűrő karakterisztikák

- 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

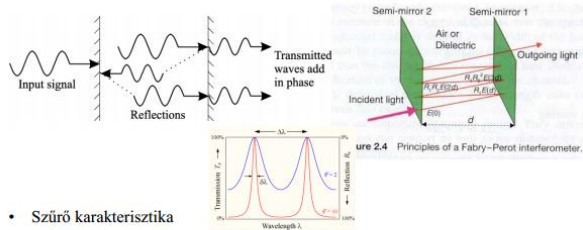
- Kis beiktatási csillapítás
- Alacsony polarizációtól való függés => hullámvezető geometria
- Robosztus, környezeti paraméterekre (elsősorban hőmérsékletre) érzéketlen működés
- Idő függvényében stabil működés
- Egyenletes átviteli sáv
- Meredek sávhatár
- Nagy elnyomás a zárósávban
 - szomszédos csatorna 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)

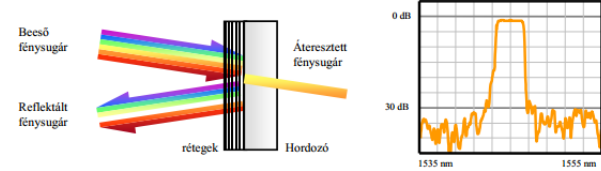
Fabry-Perot (síkparhuzamos tükrök)



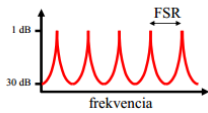
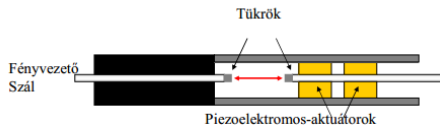
- Szűrő karakterisztika
 - Ismétlődő átresztősávok (Lorentzi profillal), rezonancia: $d = k \cdot \lambda / 2$
 - Free Spectral Range ($\Delta\lambda$, FSR) $FSR = c / 2 \cdot n \cdot d$ (d: üreg hossza)
 - Sávszélesség ($\delta\lambda$, BW): félerékszélesség
 - Finesz, $F = FSR / BW$, (BW: 3 dB sávszélesség)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

Dielektromos szűrő

- Vékony film (Thin-film) üregek
 - FP etalon, ahol a tükrököt több vékony határátmenet alkotja
 - A rétegek vastagsága határozza meg az átresztő sávot
 - Változtatva 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 zárartományban: 30 - 50 dB



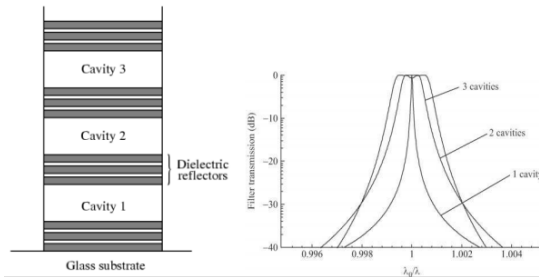
Hangolható Fabry-Perot szűrő



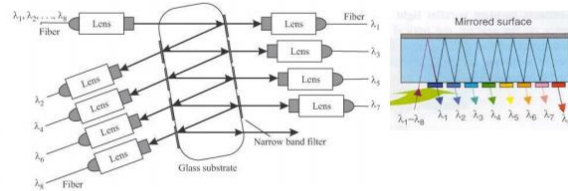
Hangolás: üreg hosszával

Thin-Film Multilayer Filters (TFMF) MDTF

üregek száma ≥ 2
Kese nyebb sávban működik



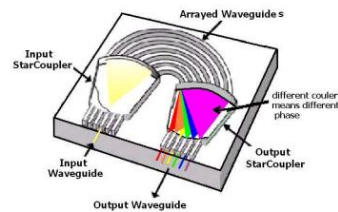
MUX/DEMUX kaszkádba kapcsolt TFMF-ek



- Minden szűrő 1 csatornát átenged, a többi reflektálja
- Egyenes átviteli sáv, meredek határ

Arrayed Waveguide Grating (AWG)

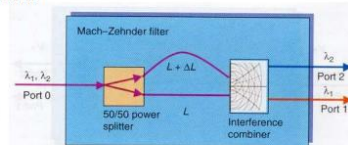
- általánosított MZ
 - a jelet számos ágra osztjuk
 - Eltérő hosszúságú hullámvezetők
 - Fázisképletet jeleket összegezzük => konstruktív/destruktív interferencia az egyes kimenetekén
- $1 \times N \Rightarrow$ DEMUX, $N \times 1 \Rightarrow$ MUX



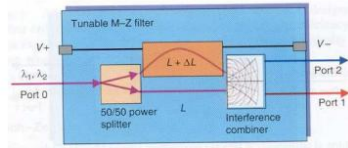
Mach-Zehnder Szűrő

MZ: Fáziskésés + interferencia

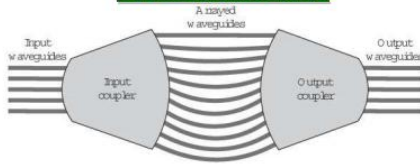
- Késleltetés => hullámhosszfüggő fáziskésés
- Szélessávú szűrő
- Áthallás, nem egyenesletes spektrum, lassú átmenet



- Hangolható
- Hőmérséklettel
- EO hatással
- Sebesség: kb. ms

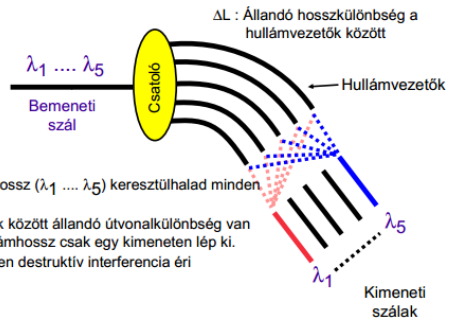


AWG működése



- 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) csatolón 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



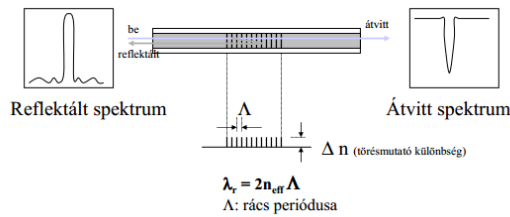
Fiber Bragg Grating (FBG)

- Feltaláló: Communication Research Center, Ottawa, Canada, 1978
- Alapanyag: fényvezető szál
- SMF (mindenáteresztő) 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 tükrő



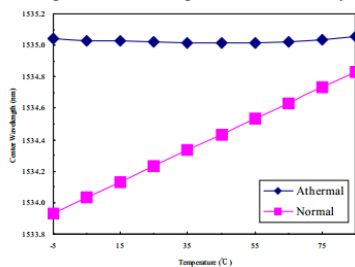
FBG működése

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



FBG - hőmérsékletfüggés

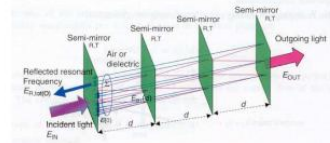
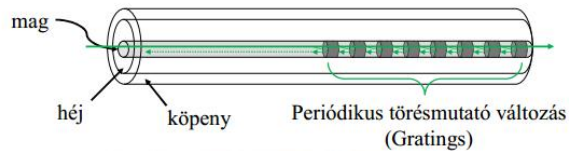
- Az üvegen fellépő termo-optikai hatás miatt a szálban kialakított rács hőmérséklet érzékeny ($10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$)
- Kompenzálás
 - Hőmérsékletre érzéketlen hullámvezető tervezése ☹
 - Mechanikai megoldás: kisebb hőtágulással rendelkező anyaghoz rögzítve



Fiber Bragg Grating

A fényvezető szál magjának törésmutatója periodikusan változik a hossz mentén.

Mintha részben áteresztő tükrök sorozata lenne



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: $10^{-7} \dots 10^{-2}$	Reflexió: 0.01%...99.9999999%
Hossz: mm...m	3dB sáv: pm...nm
Periódus: 0.5 μm@1550nm	Központi hullámhossz: 500...1700nm

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 csatormát elnyelje?

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

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

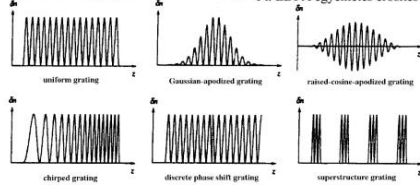
$$\alpha = 2.63 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$$

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

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

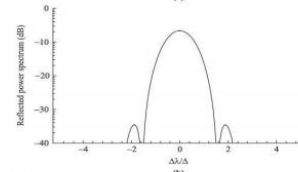
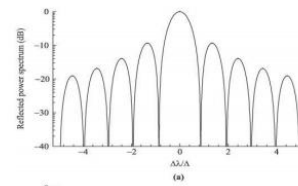
FBG típusok

- Uniform
- Nem uniform
 - Apodized (amplitúdóban modulált): Gauss, emelt koszinuszos, sinc, tanh, Blackman, stb.)
 - Chirped (diszp. kompenzáció + fázisvezérelt antennarendszereknél jel fázisát változtatjuk)
 - Superstructure, sampled
- Rövid periódus (max. 0.5 μm)
 - Alacsony csillapítás (0.1dB)
 - λ pontosság (0.05nm)
- Hosszú periódus (max. pár mm)
 - A héjban terjedő módusokba csatolódnak át a teljesítmény (nem reflexiók elvű működés) => fény kicsatolódik, nem reflektálódik a kívánt sávban (majd gyorsan csillapodik)
 - Pl. EDFA egyeneses erősítés



Átviteli karakterisztikák

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

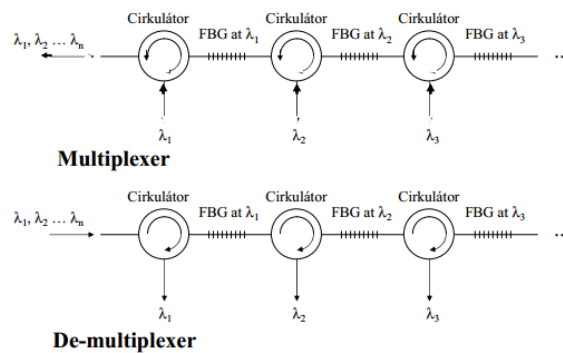


Sávszélesség: 1nm, eszköz hossz: pár mm (fordított arányosság)

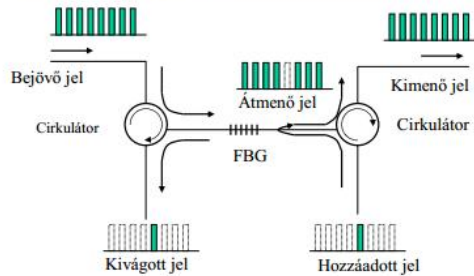
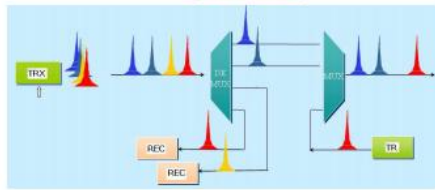
MUX/DEMUX

FBG alkalmazási lehetőségek

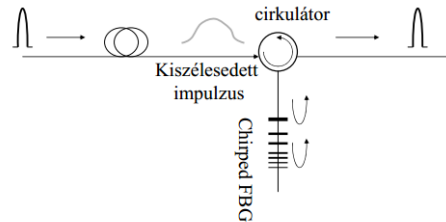
- DWDM szűrő
- OADM
- EDFA Pump lézer stabilizálás
- Optikai erősítő erősítési spektrumának kiegyenlítése
- Hangolható szűrő
- Távoli monitorozás
- Érzékelő (pl. hőmérséklet szenzor)
-



OADM



Diszperzió kompenzálás



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 Kis sávú (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)

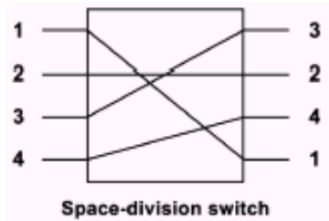
Hangolható szűrők

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

16. Hangolható optikai szűrők → előzőben!

17. Optikai kapcsolók típusai

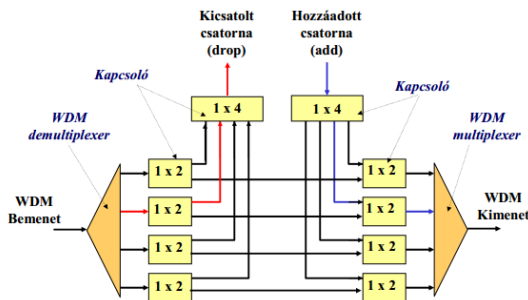
Optikai térkapcsoló



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

Példa: Add/Drop WDM rendszerben

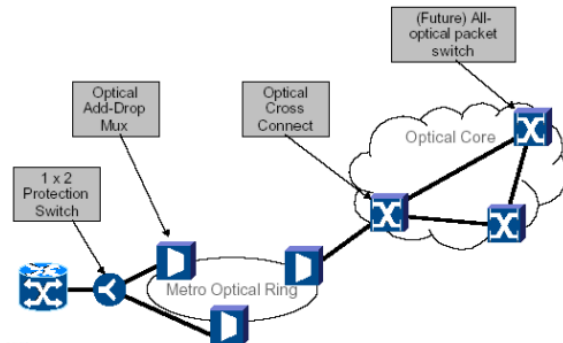
(1 x 2 és 1 x 4 kapcsolók)



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 kapcsolók a hálózatban



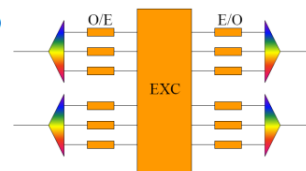
Optical Spectral Monitoring (OSM)

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 kapcsolás)
- Tápellátás megszűnése esetén tartsa a kapcsolási állapotot
- Kapcsolási sebesség

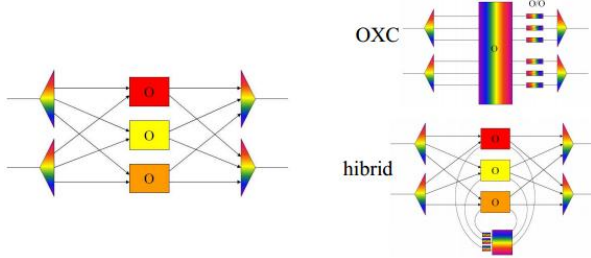
Optikai-elektromos átalakítás

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



Tisztán optikai kapcsolás

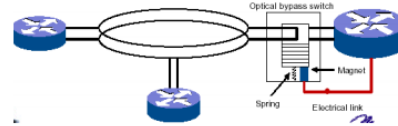
- ✓ nincs elektronika a kapcsolásban
- ✓ transzparens, gyors kapcsolás
- ✓ Gyors kapcsolási sebesség, elektromos sebesség korlátozás kiküszöbölése
- nincs hullámhossz-konverzió
- nincs leágztatás és hozzáadás (add/drop)
- OXC: optikai rendező, minden kimeneten van hullámhosszváltási lehetőség is



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
- Mozgó alkatrész => alacsony megbízhatóság



Vezérelt iránycsatoló

- Elektrooptikai vezérlés
LiNbO₃, t<ns
- thermooptikai vezérlés
Szilícium vagy polimer hordozón, t= pár ms
Si: dn/dt = 1 x 10⁻⁵ 1/K, Polimer: dn/dt = -1 x 10⁻⁵ 1/K
- vezérlés hatására változik a törésmutató
=> változik az optikai úthossz
- Cross - Bar állapotok közti kapcsolás
- 2x2 elemekből nagyméretű NxN kapcsolómező

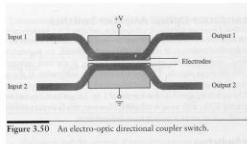
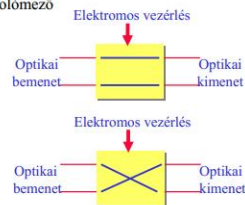
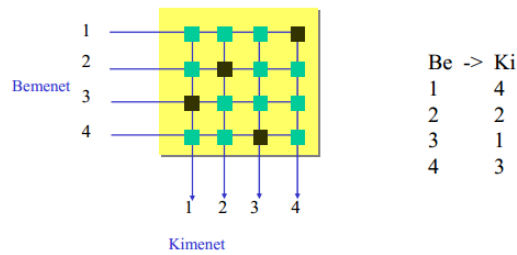


Figure 3.50 An electro-optic directional coupler switch.



2x2 => NxN : pl. Crossbar

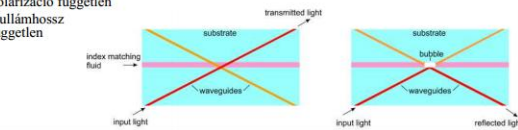


N² blokk (NxN kapcsolómátrixhoz)
Bővíthető, nincs ütközés a jelek között
Nagy veszteség, nagy áthallás
Útvonalfüggetlen csillapítás

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

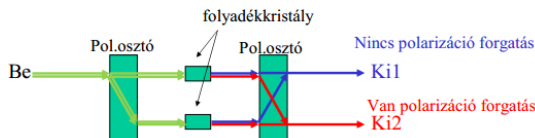
Bubble Switch (buborékkapcsoló)

- Hullámvezetők keresztvezetéseben 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



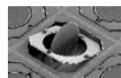
Folyadékkristályos

- Polarizációs hatás alapján, + polarizációs osztók
- Folyadékkristály : feszültség nélkül nem változtat, előfeszítő feszültséggel 90°-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



MEMS kapcsoló

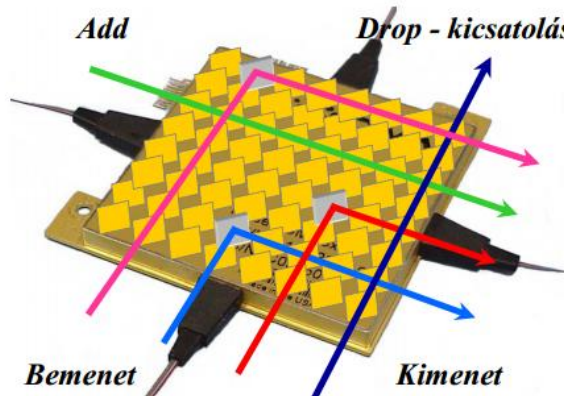
- MEMS: Micro Electro-Mechanical System
- MEMS kapcsoló
 - vezérelhető mikrotükör tömb
 - a fénysugarat a bemeneti kapukról közvetlenül a kimeneti kapukra irányítja
 - System-in-a-chip
- Integrált eszköz, amely egy része mozog elektrosztatikus, elektro-mágneses vagy hőmérséklet hatására (félvezető technológia, mikrotükrök torziós mozgása 2D vagy 3D)
- Projektorokban is használt
- Mechanikai kapcsoló, de a gyártási eljárás és a miniatűr mérete miatt eltérő tulajdonságú, mint a mechanikai kapcsolók
- Szabadtéri terjedés => polarizációtól független működés
- => nanométeres pontosság
- Nagyszámú port (jelenleg 256)
- Adatsebességtől, hullámhosszától, protokolltól független működés
- Monolitikus technológia => olcsó, kompakt, könnyű, kis méret (256 tükrökből álló mátrix < 7cm²)
- 100ns-10ms kapcsolási sebesség
- Kis teljesítményigény
- Kis áthallás (<60dB)
- Mechanikai hatásra (rázás) érzékeny



MEMS tükör

- 2D MEMS:
 - Digitális (bináris) => két pozíciójú tükrök: on(1), off(0)
 - Limitált méret (max. 32 x 32)
 - Tükrök száma: N² (N x N esetén)
 - Eltérő optikai útvonal hosszak és csillapítás
 - Egyszerű digitális vezérlés
 - Jelenleg is elérhető technológia

Példa: Add/drop MUX, 2D MEMS

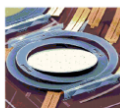
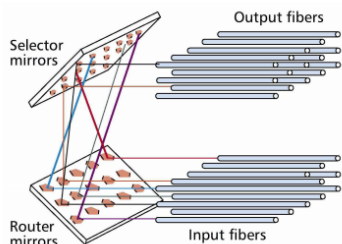


MEMS tükör

- 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 mozgáster) van a tükröknek (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

Félvezető Optikai Erősítő

3D MEMs rendszer



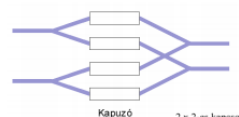
Lucent WaveStar
LambdaRouter, 1999

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

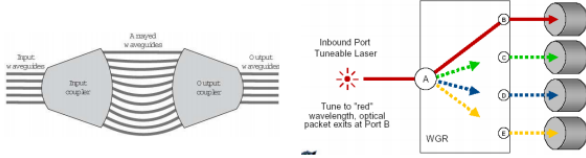
ASE

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

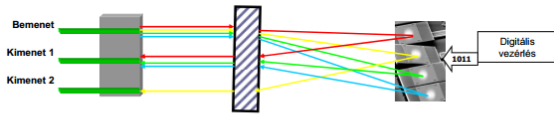
Interferometrikus (AWG)

- 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
 - Fáziskésleltetett jeleket összegezzük => konstruktív/destruktív interferencia az egyes kimeneteken
 - Eltérő hullámhosszakra eltérő kimeneten lesz konstruktív interferencia



1D MEMS + diszperzív elem

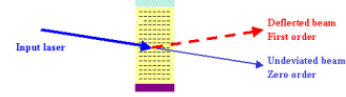
- 1-bemenet 2-kimenet, 4 hullámhossz



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

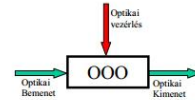
Akusztó-optikai

- Működés (optikai szűrőknél és moduláornál már tanultuk): Fény és hang közti kölcsönhatás, a hangot arra használjuk, hogy rácsszerkezetet 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



Optikai kapcsolók

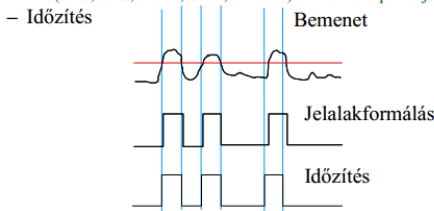
- O/E átalakítás
- Optikai kapcsolók
 - Elektromos vezérlés, OEO (jelen)
 - Hullámhossz független
 - Mechanikai kapcsoló
 - Termo-optikai
 - Elektrooptikai (pl. iránycsatoló)
 - Semiconductor optical amplifier (SOA)
 - Buborék
 - folyadékkristály
 - MEMS
 - Hullámhossz szelektív
 - Prizma, AWG
 - Holografikus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



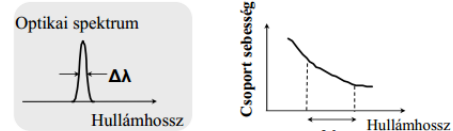
18. Diszperzió kompenzálás eszközei

Átviteli jel torzulásának kezelése

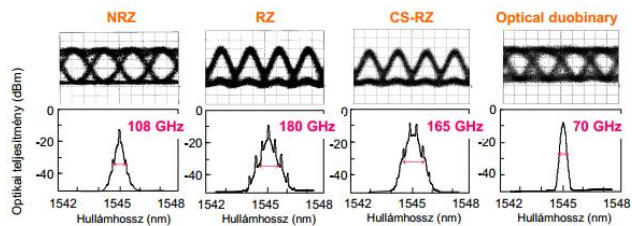
- Regenerálás (1R, 2R, 3R)
 - Csillapítás => optikai erősítés (széles sávú, egyszerre több hullámhosszra)
 - Jelalak torzulása
 - Kromatikus diszperzió => diszperzió kompenzálás
 - Sávon belüli optikai zaj (pl. ASE) => tisztán optikai jelfeldolgozás
 - Nemlineáris jelenségek, csatornák közti áthallás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



Kromatikus diszperzió - emlékeztető



Modulációs formák (40Gbps)



Diszperzió kompenzálási technikák

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

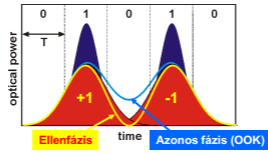
Átviteli szempontjából fontos paraméterek

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

Duobináris kód



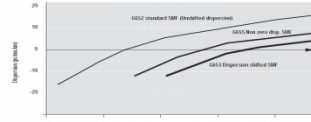
Duobinary (DB, PSBT) +1 +1 0 -1 -1 0 0 -1



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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -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 ² -km	6.8 to 8.9 ps/nm-km	9.1 to 12.0 ps/nm-km



DCF

14

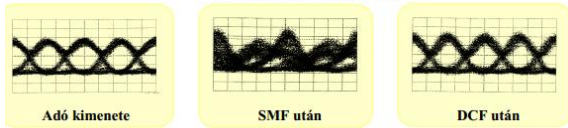
Dispersion compensating fiber (DCF)

13

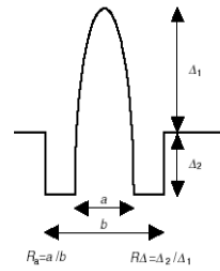
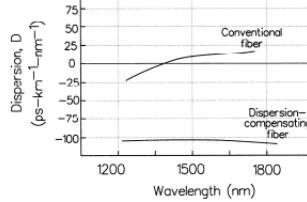


Lassabb <- Hosszabb hullámhossz >- Gyorsabb
Gyorsabb <- Rövidebb hullámhossz >- Lassabb

40 Gb/s optikai jelfolyam

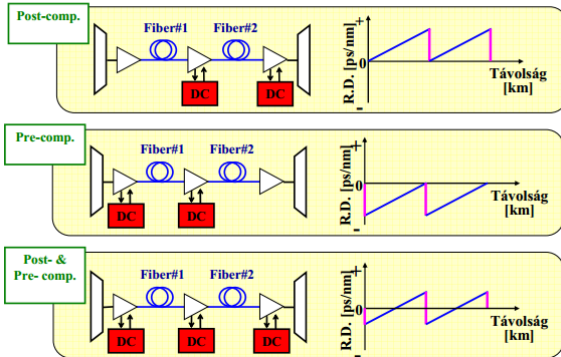


- Kisebb mag \Rightarrow Nemlineáris hatás
- Nagyobb veszteség a megfelelő törésmutató profil kialakításához szükséges germánium adalékolás miatt
- Diszperziós görbe meredekségére nincs illesztve



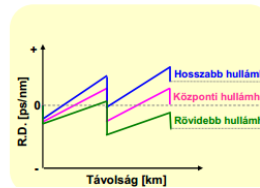
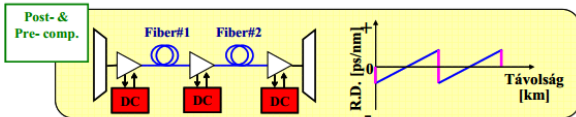
DCF elhelyezése

15



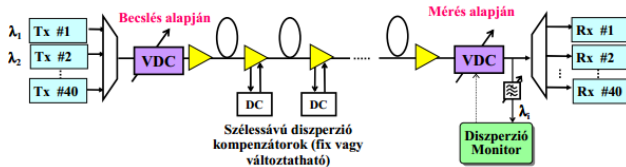
Maradék diszperzió

16



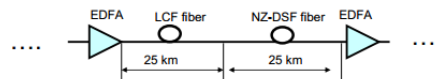
Automatikus diszperzió kompenzálás

17



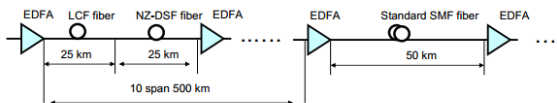
Maradék diszperzió kompenzálására csatománként: hangolható keskenysávú kompenzátor

Speciális eset: Tenger alatti összeköttetés



- LCF (Large core fiber)
 - Kromatikus diszperzió: -2 ps/km.nm
 - Nagy effektív terület 75 ~ 80 μm^2
 - Nagyobb diszperziós meredekség
 - Kisebb nemlineáris hatás
 - A nagyobb teljesítmény miatt az első szakaszon használjuk
- NZ-DSF fiber (eltolt diszperziójú szál)
 - Kromatikus diszperzió: -2 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

FBG

- 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 sávzélesség (~0.1-5nm)

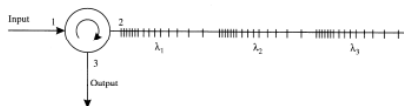


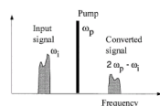
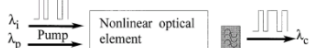
Figure 5.2.2 Chirped fiber Bragg gratings for compensating three wavelengths in a WDM system.

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
- ✓ WDM csatornákat egyszerre
- ✗ **alacsony átalakítási hatások (-20dB)**
- ✗ pumpáló teljesítmény igény: 10-20dBm
- ✗ Polarizáció érzékenység
- ✗ λ konverzió függ λ_{pump} & λ_{input} -tól => hangolható pumpáló lézer



PMD tűrés

Előre nem tervezhető

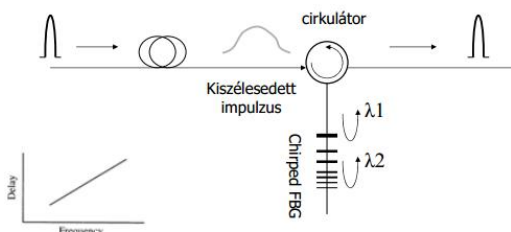
Elkerülhetetlen (gyártási pontatlanság és környezeti feltételek változása)
Kis szintű PMD-t elvisel a rendszer

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

SDH	SONET	Transmission Rate	Bit Time	PMD Limit ¹
	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	39,813.12 Mb/s (40 Gbps)	25.12 ps	2.5 ps

FBG

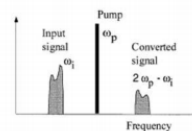
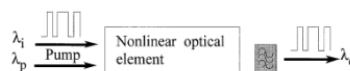
Hullámhossz szelektív tükrök sorozata



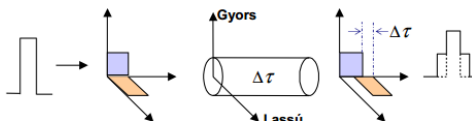
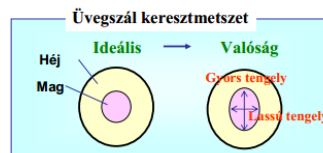
100ps időképletés/cm

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



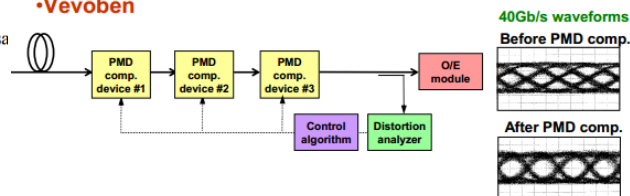
Polarizációmód diszperzió(PMD) emlékeztető ²¹



$\Delta \tau$: Differential Group Delay (DGD)

Automatikus PMD kompenzálás ²⁸

- 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

19. Fázismoduláció eszközei

46

Nemlineáris fázismoduláció

- Oka: optikai Kerr effektus, a törésmutató intenzitás-függése

$$n = n_1 + n_2 \cdot |E|^2 = n_1 + n_2 \cdot I = n_1 + n_2 \cdot \frac{P}{A_{\text{eff}}}, \quad n_2 \approx 2.6 \cdot 10^{-20} \frac{\text{m}^2}{\text{W}}$$

- n : törésmutató, n_1 : a törésmutató eredeti értéke, n_2 : nemlineáris tércerősségfüggő törésmutató
- E : a tércerősség értéke
- I : Optikai intenzitás
- P : az áthaladó optikai teljesítmény
- A_{eff} : az optikai szál effektív keresztmetszete, mely nagyságrendileg a geometriai keresztmetszettel megegyezik, annál valamivel nagyobb
- Törésmutató ingadozás => fázisváltozás
- Fázisváltozás mértéke függ:
 - idő
 - hullámhossz
 - terjedési hossz
 - optikai jelek teljesítménye
- Kritikus optikai teljesítmény: ~10 mW

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi n_2 L}{\lambda_1} \left[I_1(t) + 2 \sum_{j \neq 1} I_j(t) \right]$$

SPM XPM

Nemlineáris fázismoduláció

- SPM: egycsatornás rendszer, saját intenzitásmodulációja okozza a fázismodulációt
- XPM: szomszédos csatorna okozza a fázismodulációt
- Hatása
 - az időben változó intenzitás időben változó törésmutató indexet hoz létre, amely időben változó fázisváltozást okoz.
 - Fázismoduláció => moduláció instabilitás & segéd moduláció => frekvencia tartományban új oldalsávok
 - Spektrum kiszélesedése => diszperzió hatása nő!
 - csatornák közötti áthallás (WDM)
- Felhasználás:
 - XPM
 - Hullámhossz átalakítás
 - Optikai vezérlésű kapcsoló
 - Optikai logikák
 - Stb.
 - SPM : szoliton

SPM - self-phase-modulation (saját fázis moduláció)

A fázistényező is függ a teljesítménytől. a hullámvezetőn áthaladva a jel fázistolást szenved, járulékos, nemlineáris fázistolás is fellép. Tulajdonképpen az időben változó intenzitás időben változó törésmutató indexet hoz létre, amely időben változó fázisváltozást okoz. Így a pillanatnyi optikai frekvencia eltér a kezdeti értéktől, mivel a fázisingadozás intenzitásfüggő, így a jel különböző részei különböző fázistolást szenvednek. Az időfüggő fázistolás fázismodulációt okoz, eredményeként a jel spektruma kiterjed.

$$\beta = \beta_1 + k_0 \cdot n_2 \cdot \frac{P}{A_{\text{eff}}} \quad (112)$$

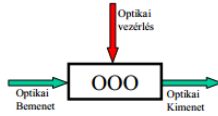
CPM – Cross-phase-modulation (kereszt fázismoduláció)

Több optikai jel esetén lép fel. Az egyik csatorna fázisát az összes többi is modulálja; ez egyrészt elég kicsire korlátozza a megengedhető teljesítményt - a gyakorlatban mintegy 1 mW-ra - másrészt a szomszédos csatornák között áthallást okozhat.

20. Tisztán optikai jelfeldolgozás eszközei

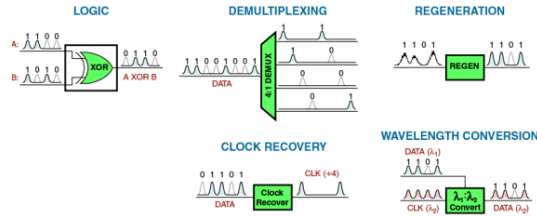
Tisztán optikai jelfeldolgozás

- 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: $\gamma = 2\pi n^2 / (\lambda A_{eff})$
 - Nemlineáris üvegszál: $\gamma > 10$ 1/kmW

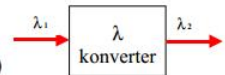
Megvalósítható feladatok



+ ezek kombinációi

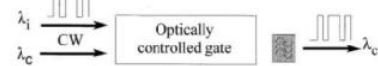
Hullámhossz átalakító típusok

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

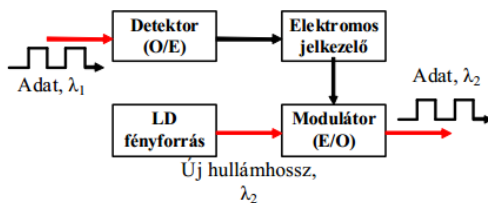


- Sebesség
 - Optikai nemlineáris jelenségek => gyorsabb működés, mint a leggyorsabb elektronika
 - Rövid optikai impulzusokat könnyebb létrehozni, mint a rövid elektromos impulzusokat (fs) => nagy sebességű megoldások
- Ár / Egyszerűség (?)
 - Nincs drága O-E-O átalakítás a rendszerben
 - Csak a hálózat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

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

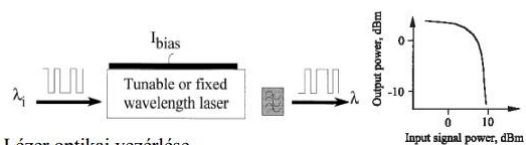


Optoelektronikus



- ✓ 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

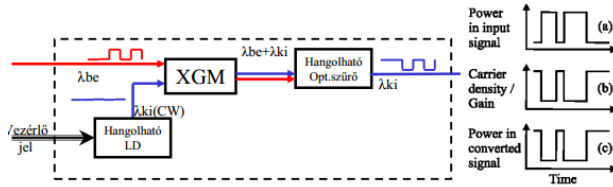
Lézer



- Lézer optikai vezérlése
- bejövő jel => Erősítés telítődés => vezérli a lézer oszcillációt
- ✓ egyszerű felépítés
- ✓ bemeneti teljesítmény 0-10dBm
- ✗ polarizáció függés
- ✗ chirp
- ✗ lézer rezonancia frekvencia => max bitsebesség=10Gbit/s
- ✗ csak Intenzitás Moduláció

XGM - Cross Gain Modulation

A bemeneti jel (λ_{be}) erősítés (és fázis) modulációt okoz
 A folytonos optikai bemenet (λ_{ki}) modulált erősítést lát
 Az erősítés modulációja ellenfázisban van a bejövő jel
 modulációjával => Invertált adat jelenik meg λ_{ki}
 hullámhosszon



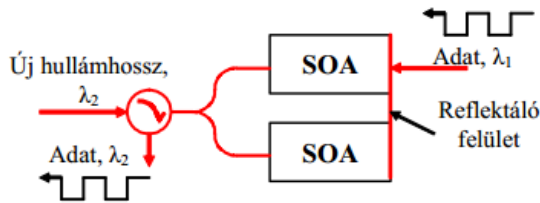
XPM - Cross Phase Modulation

λ_{in} fázismodulációt okoz a SOA-ban
 λ_{in} => töltéshordozó sűrűség változás => törésmutató változás
 λ_{out} jel fázismodulációt szenved
 törésmutató változás => terjedési sebesség változás => 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

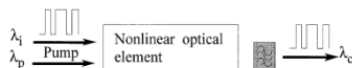
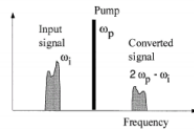
Michelson interferometer - XPM



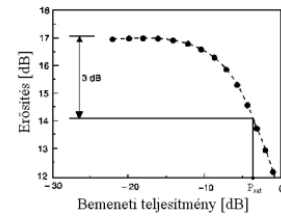
FWM

Nemlinearitás => keverés
 A konvertált jel hordozza az eredeti jelek fázis és amplitúdóját
 Hullámhossz konverzió és diszperzió kompenzálás

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



XGM



töltéshordozó dinamika
 => sebesség

- nagy áram
- nagy optikai jelszint
- nagy anyagerősítés

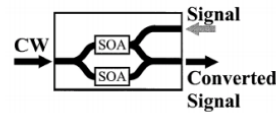
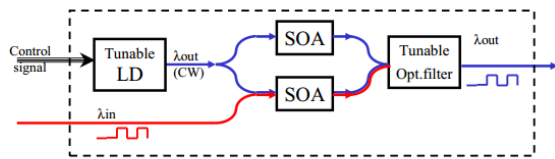
✓ egyszerű

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

negatív meredekségű görbe => invertált kimeneti jel

λ_{ki} a SOA erősítési sávján belül bármilyen hullámhossz lehet

3-port Mach-Zehnder 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

Optikai logikai kapuk

Az optikai számítógépek alap építőeleme

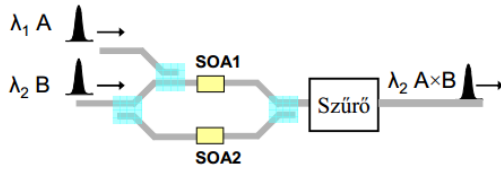
- Tisztán optikai
- Teljes logikai funkcionalitás - NAND, AND, stb.
- Ultra gyors
- Chip hordozón megvalósítható
- Alacsony teljesítmény disszipáció
- Alacsony ár

Logikai kapu (pl. optikai AND kapu)

A/B	0	1
0	0	0
1	0	1

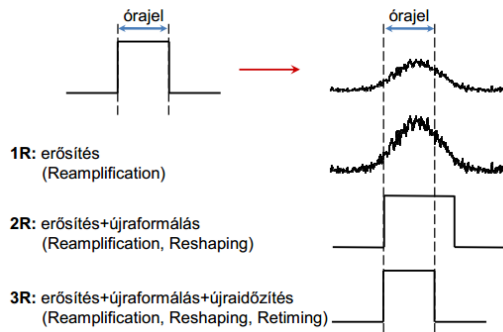
Megvalósítás:

Optikai interferométer + optikai nemlineáris eszköz (XPM)

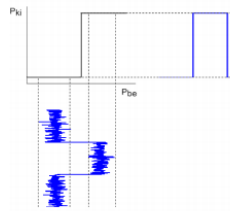


Alapállapotban MZI zárva (két ág ellenfázisban találkozik)

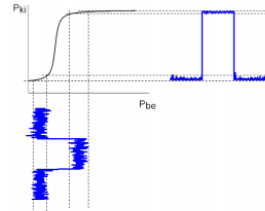
Regenerálás lépései



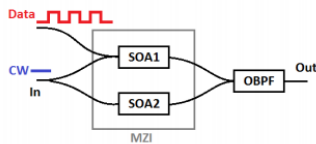
Ideális átviteli függvény



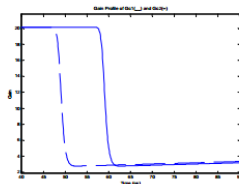
valós átviteli függvény



XPM

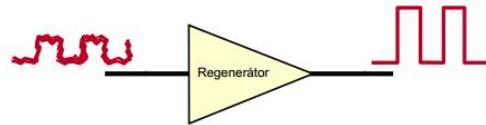


- Aktív MZ interferométer



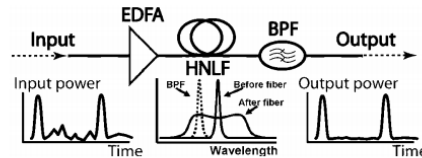
Optikai jelalakformálás

- 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



2R

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

