

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko
Katedra za telekomunikacije
Laboratorij za sevanje in optiko

Optične komunikacije

as. mag. Boštjan Batagelj

Usposabljanje Inštalaterjev Tk Kabelskih Sistemov
Ljubljana, 21. november 2003

Literatura:

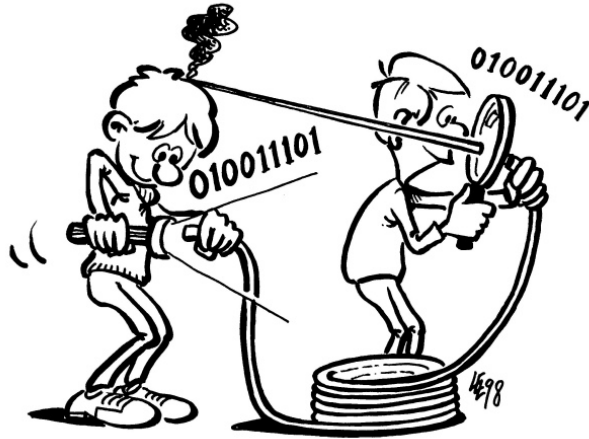
- Jožko Budin, "**Optične komunikacije**", založba FE, Ljubljana 1993
- "**6. strokovni seminar optične komunikacije**", Ljubljana, 10.-12. februar 1999, FE, LOK
- "**7. strokovni seminar optične komunikacije**", Ljubljana, 2.- 4. februar 2000, , FE, LOK
- "**8. strokovni seminar optične komunikacij** ", Ljubljana, 24.- 26. januar 2001, FE, LOK
- "**9. strokovni seminar optične komunikacije**", Ljubljana, 30.1.2002 - 1.2. 2002, , FE, LOK
- Boštjan Batagelj, Matjaž Vidmar, "**Optične komunikacije-laboratorijske vaje**", FE, Ljubljana 2003
- "**10. strokovni seminar optične komunikacije**", Ljubljana, 29.-31. januar 200, FE, LOK

Kratka predstavitev predavatelja:

Boštjan Batagelj je diplomiral leta 1997 na smeri telekomunikacije na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani in leta 2000 na isti fakulteti magistriral. Od leta 1997 je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko, Katedra za telekomunikacije v laboratoriju za optične komunikacije. Kot asistent vodi avditorne in laboratorijske vaje pri nekaterih telekomunikacijskih predmetih. Je avtor številnih doma in v tujini objavljenih člankov in sodeluje v domačih in mednarodnih projektih s področja optičnih komunikacij. Njegovo raziskovalno delo je povezano z optičnim dostopovnim omrežjem, optičnim transportnim omrežjem in nelinearnimi optičnimi pojavi.

Vsebina

- **uvod v komunikacije po optičnem vlaknu**
- **optično vlakno**
 - lastnosti
 - pojavi
 - parametri
 - standardi
 - meritve
- **viri svetlobe**
- **optični detektorji**
- **vrste optičnih zvez**



Laboratorij za sevanje in optiko

Optične komunikacije, komaj 30 let stara tehnologija, se odzivajo na naglo rastoče potrebe po vedno večjih prenosnih zmogljivostih in doživljajo razvoj, ki nima primerjave v prejšnjih obdobjih. Po več desetletjih uspešnih raziskav in po dobrem desetletju pospešenega uvajanja v prakso postajajo optične komunikacije osnovni in prevladujoč prenosni medij za zveze na dolge in srednje razdalje. Ob vseh potencialnih prednostih je samo vprašanje časa, kdaj bodo optične zveze postale osnovni prenosni medij tudi za zveze kratkega dosega in bodo segle do hišnega praga oziroma pisarniške mize.

Hkrati z množičnim uvajanjem sistemov v prakso pospešeno potekajo raziskave in razvoj novih naprav in sistemov. Vsako leto se zvrsti toliko novosti, da se zdi, kot bi optične komunikacije prehitevale same sebe. Potrebe po sprotnem izobraževanju na tem področju so torej toliko večje.

Optične komunikacije imajo pred do sedaj znanimi tehnologijami prenosa nekatere prednosti in specifične lastnosti, ki izvirajo iz uporabljenega optičnega spektra.

Optične komunikacije obsegajo generacijo svetlobe, modulacijo in obdelavo optičnega signala, prenos po optičnem vlaknu, optično ojačevanje, frekvenčno konverzijo, detekcijo, demodulacijo in odločanje o sprejetem signalu.

Sistemi v optičnih komunikacijah so zgrajeni iz optičnega vlakna, ki povezuje oddajno terminalno opremo s sprejemno terminalno opremo. Vsi elementi optičnih zvez so še vedno deležni mnogih razvojnih sprememb.

Glede na uporabljene elemente (optično vlakno, vire svetlobe in optične detektorje) lahko izdelamo po dosegu in prenosni kapaciteti različne optične zveze. Njihova raznolikost sega od preprostih in kratkih nizkokapacitivnih zvez do zvez visokega dosega, ki uporabljajo najnovejšo razvojno tehnologijo prenosa.

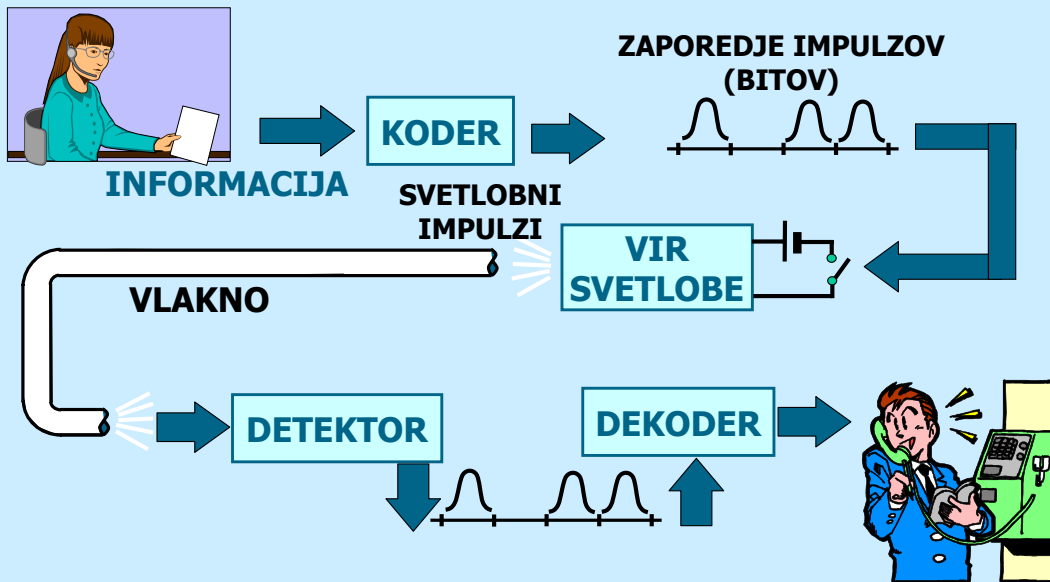
Začetek optičnih komunikacij

- Stari Grki so uporabljali zrcala in sončno svetlobo
- Ameriški Indijanci so uporabljali dimne signale
- Obramba pred udori Turkov
- Signalne svetilke med ladjami



Laboratorij za sevanje in optiko

Telekomunikacije - telefon



Laboratorij za sevanje in optiko

Prenosne poti v optičnih komunikacijah

BREZVRVIČNE ZVEZE:

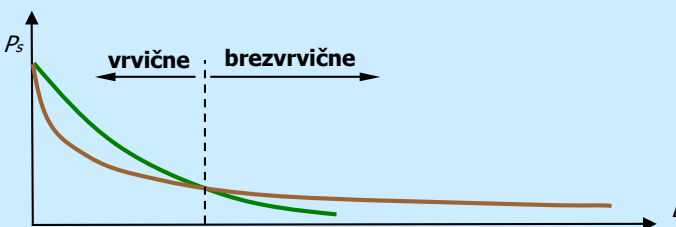
- ozračje ($\alpha > 0,5$ dB/km)
- prazen prostor ($\alpha \approx 0$ dB/km)

$$P_s = \frac{P_o \cdot \alpha}{L^2}$$

VRVIČNE ZVEZE:

- plastična vlakna ($\alpha > 100$ dB/km)
- steklena vlakna ($\alpha > 0,2$ dB/km)

$$P_s = P_o \cdot e^{-\alpha \cdot L}$$



Laboratorij za sevanje in optiko

V optičnih komunikacijah se lahko za prenosno pot svetlobnega žarka uporablja prostozračni sistem ali prenos po optičnem vlaknu. Slabosti NEUSMERJENIH prostozračnih zvez so:

- majhna zmogljivost zveze (počasen prenos informacij),
- občutljivost na motnje (domet in kvaliteta prostozračne optične zveze sta odvisna od atmosferskih pogojev),
- pogoji razširjanja svetlobe.

Enostavne prostozračne optične zveze so zanimive predvsem za komuniciranje na krajših razdaljah do nekaj deset metrov (brezžične slušalke, daljinsko upravljanje televizorja, razne protivlomilske naprave, komunikacija med GSM telefonom in računalnikom,...). Z uporabo zbiralnih leč na obeh straneh se domet takšne zveze lahko poveča na velikostni razred enega kilometra, z uporabo močnejšega polprevodniškega laserja namesto IR LED pa se lahko doseže še večje razdalje. V zadnjem času se odpirajo možnosti uporabe prostozračnih optičnih povezav kot podaljšek popolnoma optičnega omrežja na mestih, kjer je polaganje optičnega kabla nemogoče ali predrago.

Optične komunikacije v praznem prostoru (komunikacija med sateliti v vesolju) dosegajo še boljše rezultate, ker tu ni prisotna absorpcija svetlobe. Problem pa je izdelava ustreznega fokusirnega sistema. Valovanje v prostoru se z razdaljo razpršuje in pri tem izgublja na moči. Domet je pri prosto razširjajočem valovanju omejen z mehanizmom razširjanja, ki pa ni prisoten pri vrvičnih komunikacijah, kjer je žarek ujet v valovod. Pri vrvičnih komunikacijah je domet omejen le s snovnimi izgubami.

Osnovni material enorodovnega in mnogorodovnega vlakna v komunikacijah (transportnem in pristopnem omrežju) je kremenovo steklo SiO_2 s primesmi. Lomni količnik stekla je odvisen od vrste in koncentracije primesi. Pravo revolucijo v optičnih komunikacijah je povzročil izum steklenega optičnega vlakna, ki predstavlja optični valovod, po katerem vodimo svetlobo. Njegova največja prednost so majhne izgube, ki so v nekaterih primerih tudi samo 0,2 dB/km.

Za zelo kratke povezave (do 300m) so iz praktičnih razlogov potencialno zanimiva cenena mnogorodovna plastična vlakna. Ta vlakna naj bi imela primerno mehansko odpornost in omogočala predvsem veliko praktičnost ter uporabnost v hišnem okolju. V praksi je vrednost slabljenja takega vlakna $\approx 0,1$ dB/m @ 580 nm, kar je zelo visoko v primerjavi s SiO_2 vlakni.

Primerjava optičnih vlaken z električnimi valovodi

	bakrena parica, koaksialni vodnik	optično vlakno
izgube	velike	majhne
frekvenčni pas	majhen	velik
občutljivost na EM motnje	velika	neobčutljivost
komunikacijska oprema	enostavna	zahtevnejša

Laboratorij za sevanje in optiko

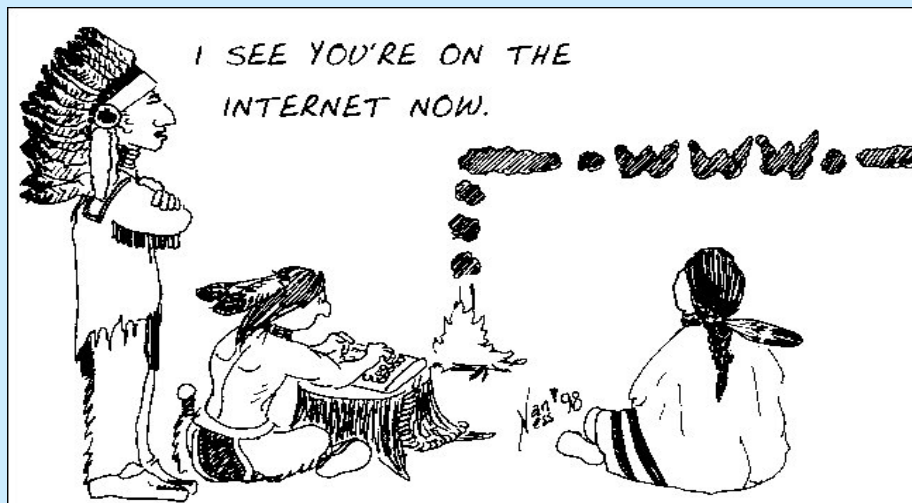
Optični kabel je bil najprej namenjen dolгим prekooceanskim in zemeljskim zvezam. Danes nadomešča bakrene in koaksialne vodnike v lokalnih telefonskih omrežjih, kabelskih televizijskih sistemih in računalniških omrežjih.

Pred drugimi vrstami komunikacij imajo optične komunikacije vsaj tri velike systemske prednosti, zaradi katerih izrivajo druge tekmece (klasično bakreno parico in koaksialni vod) na področju fiksni zvez:

1. **Slabljenje prenosnega medija** - optičnega vlakna - je neprimerljivo manjše kot v kovinskih vodnikih, kar omogoča doseganje velikih razdalj ob zelo majhnem razmerju napačno sprejetih bitov (BER - Bit Error Rate).
2. **Širina prenosnega spektra** lahko znaša gigaherce ali desetine gigahercev, kar omogoča digitalni prenos z zelo veliko bitno hitrostjo bit/s, oziroma prenos velike količine informacij. Po optičnem vlaknu lahko prenašamo spektre, ki obsegajo celotno radiofrekvenčno in mikrovalovno področje in še mnogo več.
3. **Občutljivost na zunanje motnje** je pri optičnem prenosu neopazna, zato lahko dosežemo tudi ekstremno nizko vrednost BER, potrebno za prenos podatkov z zelo veliko zanesljivostjo. Za inštalaterje je bistvena prednost predvsem v neobčutljivosti na elektromagnetne motnje, kar pomeni, da se optični vodniki vsaj v teoriji lahko polagajo kjerkoli.

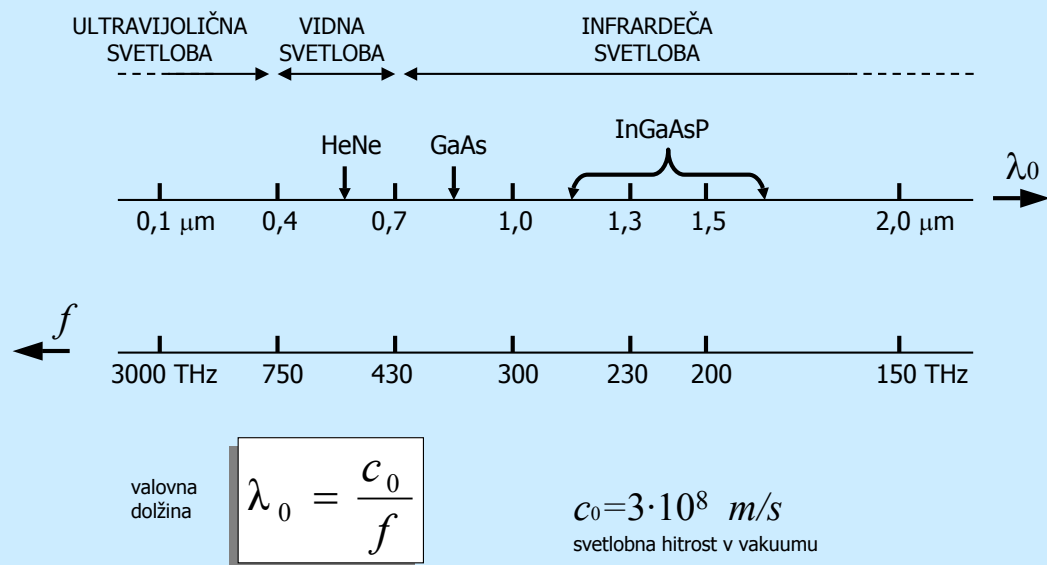
Edina prednost, ki jo zaenkrat še imajo bakreni sotekmeci, je enostavnejša komunikacijska oprema, kar pomeni tudi cenejša. V zadnjih letih se razvoj posveča predvsem možnostim izdelave cenene terminalne opreme za optične komunikacije. V zvezah kratkega dosega precej obetajo laserske diode s pokončno resonančno votlino.

Tehnologija preteklosti in storitve sedanjosti



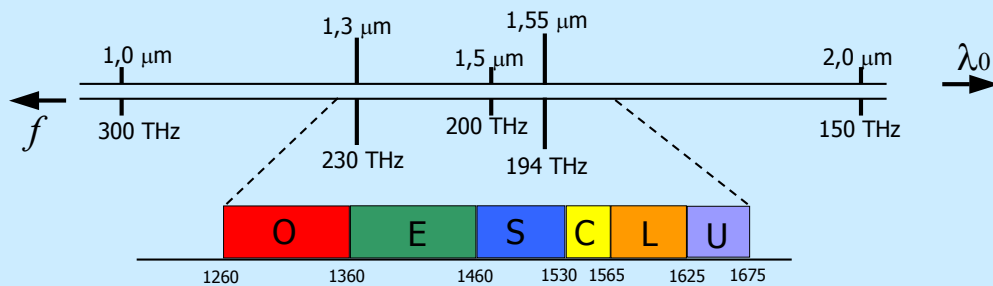
Laboratorij za sevanje in optiko

Optični spekter



Laboratorij za sevanje in optiko

Spekter optičnih komunikacij



$$B_f \approx \frac{f^2}{c_0} \cdot B_\lambda = \frac{c_0}{\lambda_0^2} \cdot B_\lambda$$

$B_f \equiv$ frekvenčna pasovna širina

$B_\lambda \equiv$ valovnodolžinska pasovna širina

frekvenčna in valovnodolžinska pasovna širina pri $\lambda_0 = 1,55 \mu\text{m}$ in $f = 194 \text{ THz}$

B_λ	100 nm	10 nm	1 nm	0,1 nm	0,8 nm	0,08 nm	8 pm	0,8 pm	0,08 pm
B_f	12,5 THz	1,25 THz	125 GHz	12,5 GHz	100 GHz	10 GHz	1 GHz	100 MHz	10 MHz

Svetloba je elektromagnetno valovanje v mikrometerskem (μm) valovnem področju. Vidni del svetlobnega spektra obsega oktavno valovno področje v razmerju valovnih dolžin 1:2 med vijolično ($\lambda=0,38 \mu\text{m}$) in rdečo ($\lambda=0,76 \mu\text{m}$) svetlobo. Pripadajoče frekvenčno področje obsega pas med 400 THz in 800 THz.

V svetlobni spekter štejemo poleg vidne še nevidno infrardečo ($\lambda>0,76 \mu\text{m}$) in ultravijolično ($\lambda<0,38 \mu\text{m}$) svetlobo. Infrardeči spekter se razteza vse do milimetrskih ali submilimetrskih valov radijskega spektra, ultravijolični spekter pa vse do žarkov X. V tako širokem frekvenčnem spektru se energija fotonov razlikuje za mnogo velikostnih razredov, zato so fizikalni učinki odvisni od vrste svetlobe in različni od področja do področja.

Danes se optične komunikacije izvajajo v bližnjem infrardečem področju. Delijo se na tri področja (spektralna okna), ki so se uveljavila iz praktičnih razlogov ter zaradi nekaterih optimalnih lastnosti kremenovega stekla. Uveljavili so se pasovi okoli valovnih dolžin 850 nm, 1300 nm in 1550 nm.

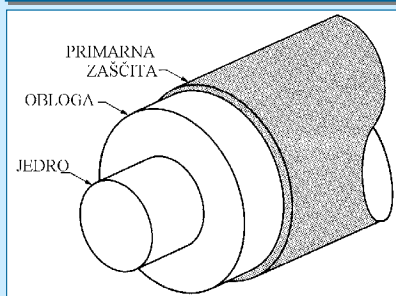
Področje 850 nm (prvo spektralno okno) se je uveljavilo v zgodnjem razvoju optičnih komunikacij zaradi obstoječe tehnologije izdelave polprevodniških GaAs laserjev za to valovno dolžino. Področje 1300 nm (drugo spektralno okno) se je uveljavilo zaradi ničelne snovne disperzije vlakna. Področje 1550 nm (tretje spektralno okno) se je uveljavilo zaradi najmanjšega slabljenja optičnega vlakna na tem področju.

Omenjene valovne dolžine veljajo zgolj za prazen prostor in v približku tudi za zrak, v steklu pa ne veljajo več, zato je bolje uporabljati enoveljavno določeno frekvenčno skalo. Preslikava iz valovne dolžine v frekvenco poteka preko svetlobne hitrosti, ki znaša 300 milijonov m/s.

Tako kot radijski je tudi optični spekter dragocena naravna dobrina. Z naraščanjem potrebe po množičnih komunikacijskih medijih in z razvojem novih tehnologij in materialov, bo v prihodnje potrebno in mogoče izkoriščati širši spekter.

Tipi optičnih vlaken

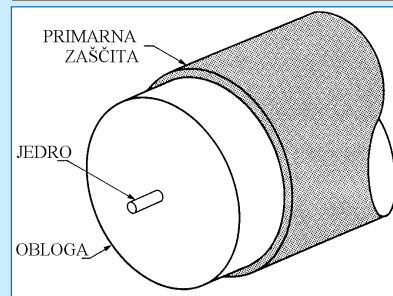
MNOGORODOVNO



50 μm (62,5 μm) / 125 μm / 250 μm ± 3 μm

ITU-T **G.651**

ENORODOVNO



9 μm / 125 μm / 250 μm

ITU-T **G.652, G.653, G.654, G.655**

Laboratorij za sevanje in optiko

Optična vlakna uporabljamo kot dielektrične valovode. Ker je valovna dolžina svetlobe zelo majhna, so zelo majhne tudi prečne izmere ustreznih valovodov. Optična vlakna za komuniciranje so izdelana iz zelo čistega kremenčevega stekla in njihov zunanji premer je standardiziran na 125 μm . Za lažje rokovanje so optična vlakna zaščitena vsaj s primarno zaščito premera 250 μm in običajno še s sekundarno zaščito različnih premerov. Za zaščito steklenih optičnih vlaken se uporabljajo umetne plastične mase.

Mnogo ljudi misli, da je optično vlakno izdelano iz povsem enotnega homogenega stekla. V resnici je sestavljeno iz dveh različnih stekel. Centralno področje imenujemo jedro, zunanje obloga. Celotna struktura pa je še vedno steklo, ki pa ima različne lomne količnike. Lomni količnik jedra je večji od lomnega količnika obloge.

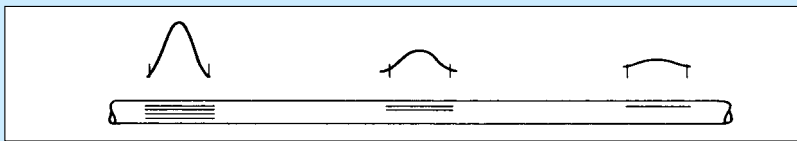
V osnovi poznamo dva različna tipa vlaken: enorodovno in mnogorodovno vlakno.

Pri enorodovnem vlaknu ima jedro premer samo 9 μm in dovoljuje širjenje samo enega rodu svetlobnega valovanja. Standardno enorodovno vlakno je dimenzionirano za prenos pri 1300 nm. Disperzijsko premaknjeno vlakno pa je dimenzionirano za prenos pri 1550 nm. To omogoča aplikacije od lokalnih pristopnih omrežij (analognih in digitalnih) do dolgih visokokapacitetnih zvez.

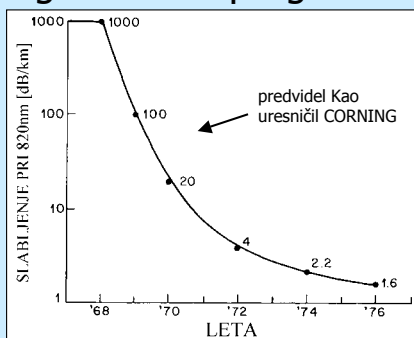
Pri mnogorodovnem vlaknu je premer jedra skoraj polovica celotnega premera in znaša 50 μm ali 62,5 μm . Dovoljuje širjenje nekaj sto rodovom svetlobnega valovanja. Večja velikost jedra omogoča lažje spajanje vlaken in usmerjanje svetlobe iz izvorov (LED, VSEL, laser,...). Čeprav se uporaba mnogorodovnega vlakna krči na uporabo v lokalnih omrežjih in računalniških omrežjih, se razvoj mnogorodovnega vlakna ni ustavil. Trend je predvsem v izboljšanju proizvodnih toleranc za področje 850 nm (VCSEL). Mnogorodovno vlakno je ključno za tehnologijo Gigabitnega ethernet.

Tako enorodovno kot tudi mnogorodovno vlakno ima zunanjo oblogo, ki jo imenujemo primarna zaščita. Le-ta služi za izboljšanje mehanskih lastnosti vlakna.

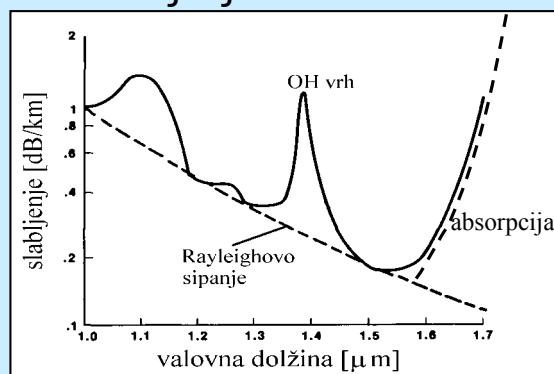
Slabljenje optičnega vlakna



zgodovinski pregled



slabljenje Si vlakna



Laboratorij za sevanje in optiko

Novejša zgodovina optičnih komunikacije se začne leta 1968 oziroma še nekoliko prej – leta 1966. Slabljenje vlakna je takrat zanašalo nekaj 1000 dB/km. V tem času sta pionirja optičnih komunikacij, Angleža Kao in Hockham, objavila članek, v katerem sta teoretično predvidela možnost uporabe optičnega vlakna kot prenosnega informacijskega medija, če bi bilo slabljenje le-tega pod 20 dB/km.

Leta 1970 so vlakno izboljšali iz obstoječih 1000 dB/km na 20 dB/km, kar je bila predvidena meja za začetek optičnih komunikacij. Prvi je to uspelo ameriški firmi Corning, ki je še danes ena vodilnih proizvajalcev optičnega vlakna. Izboljšave vlakna so se nato še vrstile in v letu 1976 privedle do 1,6 dB/km pri valovni dolžini 820 nm.

Kasneje so prišli do ugotovitve, da je mogoče doseči še manjše slabljenje pri večjih valovnih dolžinah. Pojav se imenuje Rayleighovo sipanje po lordu Rayleighu, ki je fizikalni pojav odkril. Z naraščanjem valovne dolžine slabljenje optičnega vlakna pada in teoretično lahko pride do izredno nizkih slabljenj pri visokih valovnih dolžinah. V praksi pa se pri večjih valovnih dolžinah pojavi absorpcija svetlobe v steklu.

V optičnem vlaknu sta prisotna dva mehanizma, ki povzročata slabljenje:

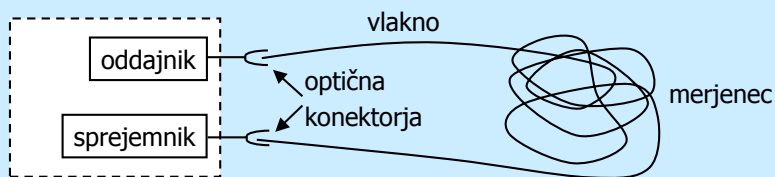
- Rayleighovo sipanje, ki razprši svetlobo, ki potem izhaja iz vlakna.
- absorpcija, ki svetlobo pretvarja v toploto.

Obstaja pa še tretji problem in to je absorpcija zaradi Hidroksidnih (OH) ionov, ki so prisotni v steklu. Prisotni so le določeni ioni, ki imajo izrazite absorpcijske vrhove. Najbolj značilen vrh je pri 1400 nm, ki ločuje drugo in tretje spektralno okno. Danes je tehnološko že mogoče izdelati vlakno, ki nima tega OH absorpcijskega vrha.

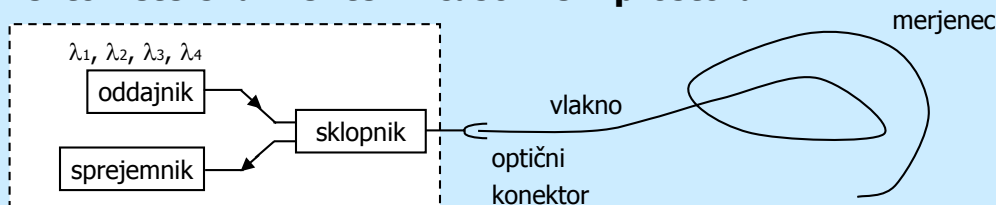
Minimalno slabljenje optičnega vlakna nastopi pri valovni dolžini 1550 nm in to je tudi razlog za nastanek tretjega spektralnega okna v optičnih komunikacijah.

Merjenje slabljenja optičnega vlakna

izvor in merilnik moči



reflektometerska meritev v časovnem prostoru



Laboratorij za sevanje in optiko

Pri merjenju slabljenja optičnega vlakna si pomagamo z merilnikom moči, ki ga priključimo na izhodni konec optičnega vlakna. Pri tem v vlakno posvetimo z optičnim signalom znane moči. Iz razlike med oddano in sprejeto optično močjo izračunamo slabljenje vlakna.

Pri meritvah optičnih zvez sta si oba konca optičnega vlakna lahko več kilometrov narazen, torej običajno nista dostopna na istem mestu. Za meritev optične zveze zato želimo postopek, ki zna izmeriti optično vlakno v vkopnem kablu z dostopom na enem samem koncu optične zveze. Takšno meritev imenujemo reflektometerska meritev. Izvedemo jo tako, da v vlakno pošljemo na enem koncu znan signal in opazujemo, kaj se po določenem času zaradi različnih odbojev vrne na istem koncu vlakna.

Pri reflektometerski meritvi v časovnem prostoru v vlakno pošljemo časovno kratek impulz svetlobe. Svetlobni impulz se odbije predvsem na odprtem koncu vlakna in na konektorskih spojih. Precej slabotnejše je Rayleigh-ovo sipanje svetlobe v steklu vzdolž celotne dolžine vlakna. Odboji na zvarih so običajno zanemarljivo majhni, vendar tudi opazni.

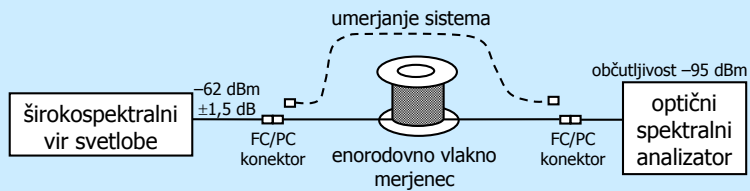
Posamezne odbite signale ločimo med sabo po času prihoda v sprejemnik, saj mora vsak signal preteči najprej pot od oddajnika do točke odboja in se potem po isti poti vrniti nazaj. Iz izmerjenega časa med oddajo impulza in sprejemom odboja lahko potem izračunamo mesto nepravilnosti ali položaj napake vzdolž vlakna.

Ustrezen merilnik, ki vsebuje oddajnik optičnih impulzov, smerni sklopnik, optični sprejemnik in prikazovalnik rezultata meritve, imenujemo optični reflektometer v časovnem prostoru ali OTDR (angl. Optical Time-Domain Reflectometer). Glavna omejitev optičnega reflektometra je uporaben domet, saj mora signal reflektometra isto pot prepotovati dvakrat.

Poleg tega so odboji slabotni: najmočnejši odboj na prostem koncu vlakna znaša komaj 4% moči vpadne svetlobe, odboji dobrih konektorjih so še manjši. Najslabotnejše je Rayleigh-ovo sipanje svetlobe, saj predstavlja glavni mehanizem izgub kakovostnih optičnih vlaknih, ki ga skušamo čimbolj zmanjšati z izbiro primerne valovne dolžine svetlobe. Od celotne sipane moči se je večji delež razprši izven vlakna in le manj kot 1% sipane moči se nazaj "ujame" v optični valovod.

V reflektometer v časovnem prostoru zato vgradimo laser s čimvečjo izhodno močjo, vendar je ta omejena s konstrukcijo polprevodniškega laserja in nastopom nelinearnih pojavov v samem vlaknu pri močeh 10 do 100mW. Pri določanju dometa ne smemo pozabiti niti na izgube v smernem sklopniku. Ker je smerni sklopnik recipročen sestavni del, znašajo te izgube najmanj 6dB (3dB na oddaji in še 3dB na sprejemu).

Merjenje slabljenja optičnega vlakna

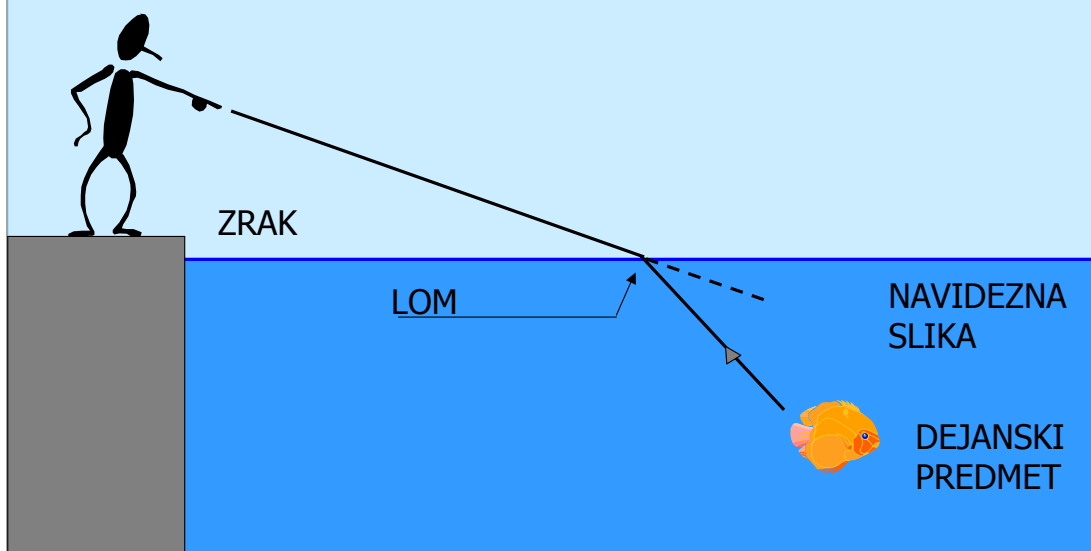


spektralni potek
slabljenja
optičnega
enorodovnega
vlakna



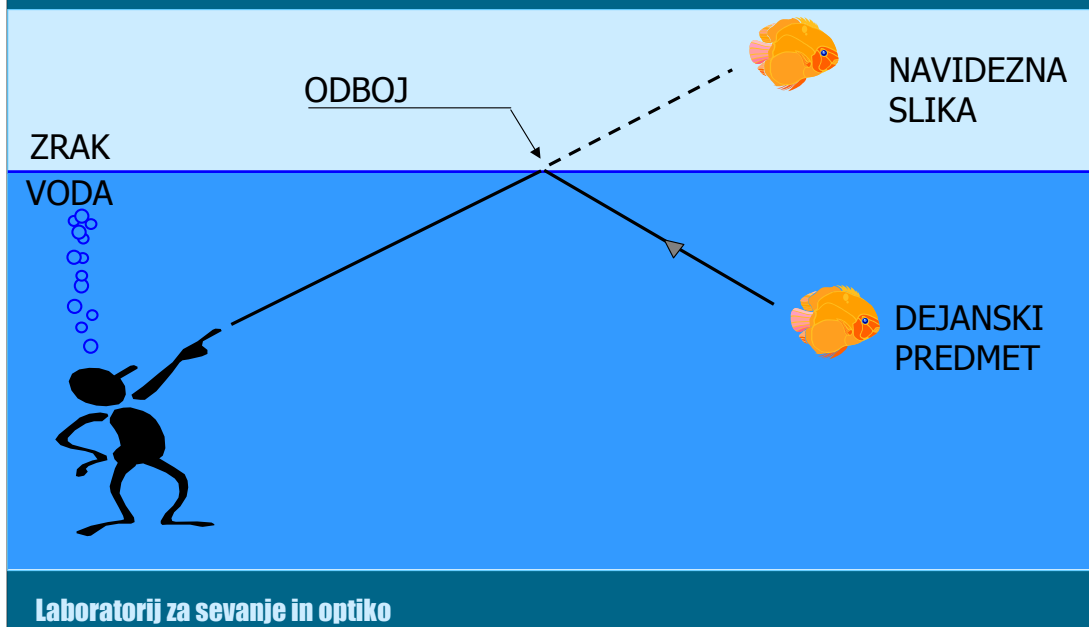
enorodovno vlakno dolžine 29520 m

Lom svetlobe

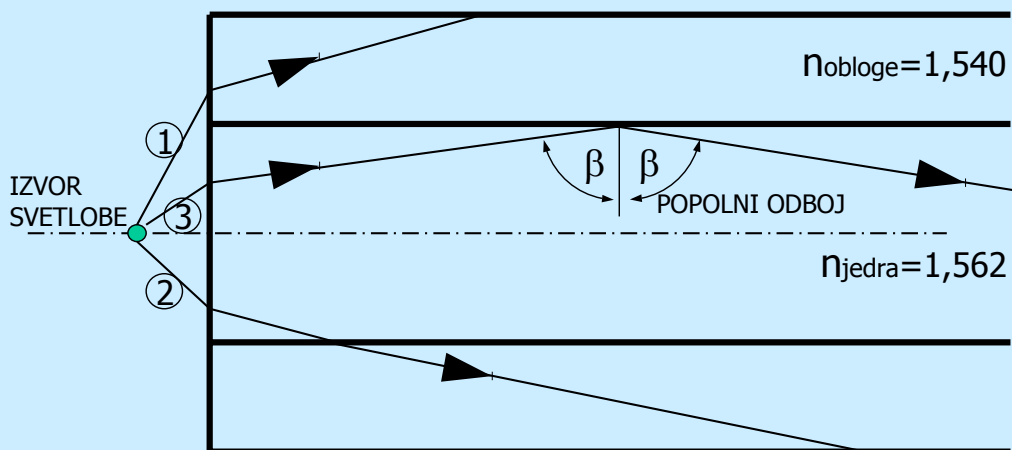


Laboratorij za sevanje in optiko

Odboj svetlobe



Vstop svetlobe v optično vlakno



Laboratorij za sevanje in optiko

Model geometrijske optike običajno uporabljajo pri izdelovanju optičnih predmetov kot so leče in zrcala in je dokaj dober približek, ko so fizične dimenzije veliko večje v primerjavi z valovno dolžino.

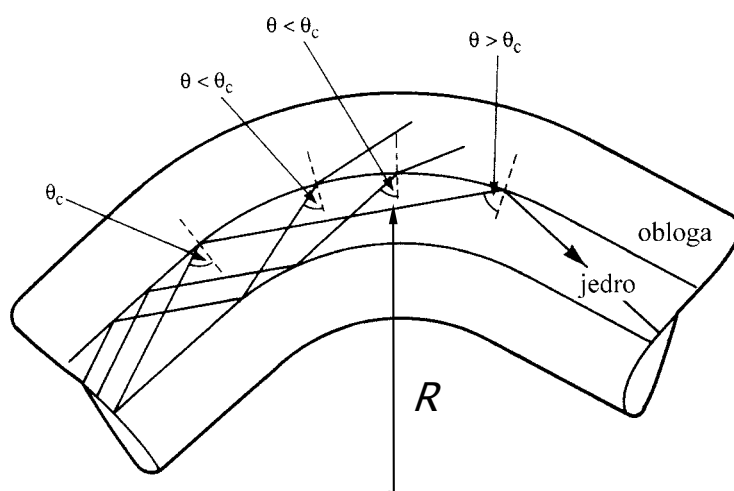
Vlakno je sestavljeno iz jedra in obloge. Njuna lomna količnika se rahlo razlikujeta (približno za procent). Jedro je vedno iz stekla, ki ima večji lomni količnik, zato svetloba v jedru potuje počasneje kot v oblogi. Hitrost svetlobe v vakuumu znaša 300 milijonov m/s, v ostalih snoveh pa je skalirana za lomni količnik snovi, po kateri se širi. Lomni količnik stekla je tipično okrog 1,5, kar pomeni, da svetloba potuje v steklu z 2/3 hitrosti v vakuumu (200 milijonov m/s).

Žarek št. 1 prihaja iz svetlobnega izvora in vpade na oblogo optičnega vlakna. Valovanje vpade iz zraka z lomnim količnikom približno 1 na steklo, ki ima večji lomni količnik. Spodnji del valovanja prej zadene steklo. Ker se svetloba v steklu širi počasneje kot v zraku, spodnje valovne fronte zaostajajo in svetlobni žarek spremeni smer. Ta žarek zadene primarno zaščito in se v njej absorbira, torej je izgubljen.

Žarek št. 2 zadene jedro optičnega vlakna. Zaradi enakega razloga kot pri prvem žarku se na meji zrak-steklo lomi in potuje do obloge. Tu se ponovno lomi in potem, ko preleti oblogo, se tudi on absorbira.

Žarek št. 3. vpade v jedro pod bolj strmim kotim. Potem, ko se lomi na meji zrak-steklo, prileti na mejo jedro-obloga. Ker je vpadni kot (β) tega žarka precej velik, pride do totalnega odboja in žarek se v celoti odbije nazaj v jedro. Na ta način je žarek ujet v jedro vlakna in po cik-cak metodi potuje v smeri vlakna.

Slabljenje na krivinah vlakna



minimalen
dovoljen
krivinski radij
 $\approx 25 \text{ mm}$

Laboratorij za sevanje in optiko

Ujet žarek se širi po vlaknu in tudi prispe do cilja bolj ali manj oslavljen v odvisnosti od slabljenja vlakna, ki znaša pri valovni dolžini 1550 nm približno 0,2 dB/km. Na prenosni poti pa se lahko pojavi še slabljenje na krivinah optičnega vlakna.

Če vlakno ukrivimo tako, da ima krivinski radij R , lahko pride pri močni ukrivitvi do zelo izrazitega slabljenja.

Zaradi izredno položnega kota pri totalnem odboju na mejo med jedrom in oblogo vlakna se lahko zgodi, da po upognitvi vlakna niso več izpolnjeni pogoji za popolni notranji odboj na zunanji krivini vlakna. To pomeni, da žarek uhaja iz jedra, vlakno seva v okolico, val v vlaknu pa se močno oslabi.

Svetlobni žarek, ki pride do krivine optičnega vlakna, ima vpadni kot manjši od kota za totalni odboj, kar pomeni, da uide v oblogo in je za nas izgubljen. Žarki, ki vpadejo na krivino pod še ustrežajočim kotom, lahko obidejo ukrivljenost.

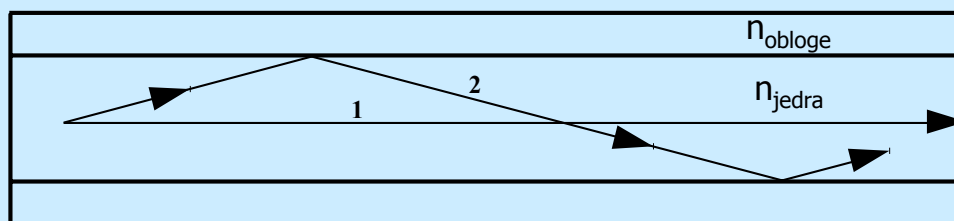
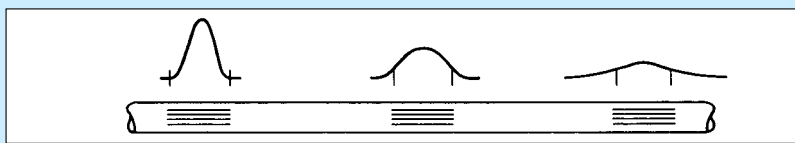
Pojav uhajanja dela optične moči na krivinah je še posebno izrazit pri šibkolomnih valovodih, kjer je razlika med lomnim količnikom jedra n_1 in obloge n_2 razmeroma majhna. Pri vlaknih je vsekakor pomemben minimalni krivinski radij, ki znaša približno 25 mm. To je krivinski radij, pri katerem bo svetloba začela uhajati iz optičnega vlakna. Krivinsko slabljenje je sicer odvisno od točne notranje izvedbe dielektričnega valovoda.

Krivinski radij, pri katerem se optično vlakno trajno deformira, pa je še za desetkrat manjši od radija, pri katerem pride do krivinskega slabljenja. Torej znaša le nekaj mm.

Pri vgradnji optičnih vlaken moramo zato vedno paziti, da vlaken mehansko ne obremenimo na tak način, ki bi povzročal krivine z majhnim polmerom.

Krivine ne vnašajo samo slabljenja, temveč povečujejo polarizacijsko disperzijo, ki je pomemben omejevalni dejavnik pri prenosnih sistemih z visoko bitno hitrostjo.

Razširitev impulza - DISPERZIJA



vlakno dolžine
100 km



$t_2 - t_1 \approx 5 \mu\text{s}$



zmogljivost zveze < 200 kbit/s

Laboratorij za sevanje in optiko

Pri potovanju optičnega impulza skozi vlakno pride še do ene nevšečnosti. Svetlobni impulz, ki naj po dogovoru predstavlja logično enico pri digitalni zvezi, se pri potovanju skozi vlakno razširi. V vlakno je vstopal lep oblikovan digitalni optični impulz, iz vlakna pa dobimo razširjen impulz. Ta pojav je moteč predvsem pri velikih bitnih pretokih, ko so časovne razdalje med impulzi dokaj majhne. Po razširitvi pride namreč do prekrivanja impulzov, kar poveča verjetnost narobe sprejetega bita.

Pojavu razširitve impulza strokovno pravimo disperzija. Ker imamo opravka z mnogorodovnim optičnim vlaknom, je to mnogorodovna disperzija.

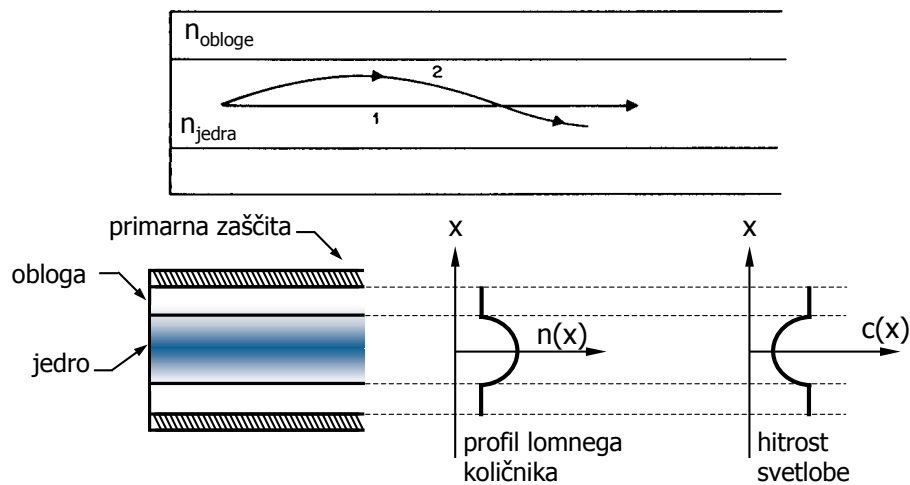
Snovno-geometrijski parametri mnogorodovnega optičnega vlakna dopuščajo, da se v vlaknu širi mnogo rodov (žarkov). Vsak rod ima svojo fazno hitrost, kar si lahko razlagamo z različno dolžino poti.

Svetlobni žarek, ki se med potovanjem odbija od sten, opravi v primerjavi z direktnim svetlobnim žarkom daljšo pot, zato pride na izhod vlakna zakasnen. Vhodni optični impulz se torej razmaže po časovnem prostoru.

Obstajata dve rešitvi za odpravljanje mnogorodovne disperzije.

Če omogočimo, da se bo po optičnem vlaknu širil le direktn svetlobni žarek, do razširitve optičnega impulza ne more priti. To naredimo tako, da zmanjšamo premer jedra optičnega vlakna toliko, da se bo po njem širil samo osnovni rod svetlobnega valovanja. Na ta način dobimo enorodovno vlakno.

Vlakno z gradientnim lomnim likom



vlakno dolžine 100 km \Rightarrow $t_2 - t_1 \approx 50$ ns \Rightarrow zmogljivost zveze < 20 Mbit/s

Laboratorij za sevanje in optiko

Drugi način je, da izdelamo takšno optično vlakno, da se mu lomni količnik iz sredine zvezno znižuje proti oblogi. Takemu vlaknu pravimo gradientno vlakno oziroma vlakno z gradientnim lomnim likom (GI – Gradient Index). Takšno vlakno ima še vedno razmeroma debelo jedro ($50 \mu\text{m}$ ali $62,5 \mu\text{m}$), vendar se profil lomnega količnika spreminja zvezno po skrbno izbrani krivulji, da so hitrosti razširjana različnih rodov med seboj čimbolj podobne, če že ne enake.

Želeni obliki lomnega lika jedra takšnega vlakna se zelo približa parabolični profil lomnega količnika. Za parabolični lomni lik obstaja analitična rešitev za polje v valovodu.

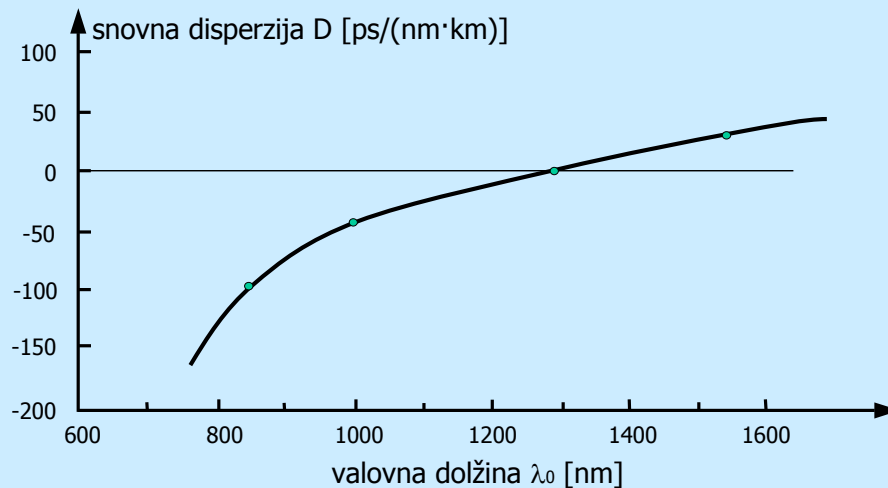
V optičnem vlaknu z gradientnim lomnim likom se nedirektni žarki ne lomijo več pod ostrim kotom, ampak se zvezno obračajo proti sredini vlakna. Na prvi pogled smo s tem bolj malo pridobili, ker opravi drugi žarek še vedno daljšo pot kot prvi. To je sicer res, vendar moramo upoštevati, da potuje žarek na obodu, kjer je manjši lomni količnik, z večjo hitrostjo. V primeru, da ima profil lomnega količnika obliko parabole, so hitrosti žarkov sinhronizirane tako, da ne pride do zakasnitev.

Gradientno vlakno je treba seveda izdelati. Zaenkrat še ni znan postopek, ki bi sam od sebe težil k zelenemu lomnemu liku jedra optičnega vlakna. Želeni lomni lik je zato rezultat nanašanja velikega števila plasti (40 do 70 slojev) s skrbno izbranim lomnim količnikom (GeO_2), da dobimo na koncu preform in iz njega izvlečemo željeno optično vlakno.

Mnogorodovna disperzija je parameter optičnega vlakna, ki je v veliki meri odvisen od natančnosti pri izdelavi vlakna. Kontrola končnega izdelka zato vključuje meritev mnogorodovne disperzije v obliki frekvenčne pasovne širine.

Novejši razvoj mnogorodovnega optičnega vlakna omogoča selektivno vzbujanje rodov (vzbuditev rodov, ki ne "čutijo" obloge), kar omogoča še dodatno znatno izboljšanje pasovne širine.

Snovna disperzija SiO₂ vlakna



Laboratorij za sevanje in optiko

Mnogorodovna disperzija in snovna disperzija sta dva po fizikalnem principu delovanja povsem ločena pojava. Nezaželen učinek razširitve optičnega impulza pa je pri obeh enak.

Snovna disperzija pride tem bolj do izraza, čim širši optični spekter ima svetlobni vir. Pojavlja se v snovi, katere lomni količnik je odvisen od frekvence (valovne dolžine).

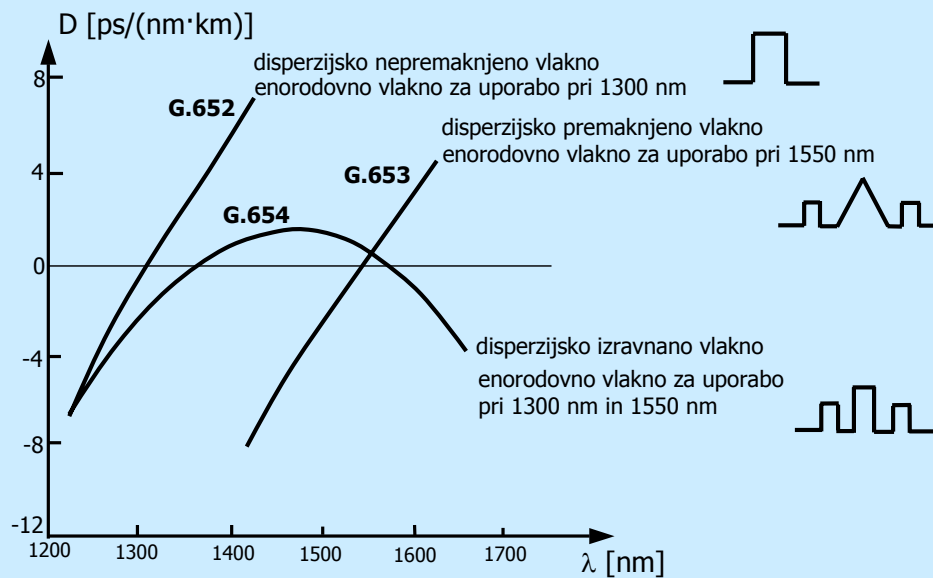
Snovne disperzija je sicer pojav, ki se ga lahko tudi koristno izrablja za razločevanje posameznih komponent svetlobe v prizmi. Gre torej za pojav, ko ima svetloba pri potovanju skozi steklo različne hitrosti glede na njeno valovno dolžino. To je posledica tega, da je lomni količnik stekla frekvenčno odvisen.

Iz grafa je razvidno, da snovna disperzija SiO₂ stekla narašča z naraščanjem valovne dolžine. Posebej naj pri tem poudarim točko ničelne disperzije, ki za SiO₂ vlakno nastopi pri 1300 nm. To je torej razlog za nastanek drugega spektralnega okna v optičnih komunikacijah.

Kot oceno velikostnega reda navedimo disperzijski koeficient čistega silicijevega stekla SiO₂ v ps/(nm·km). Le-ta zavzame vrednosti približno:

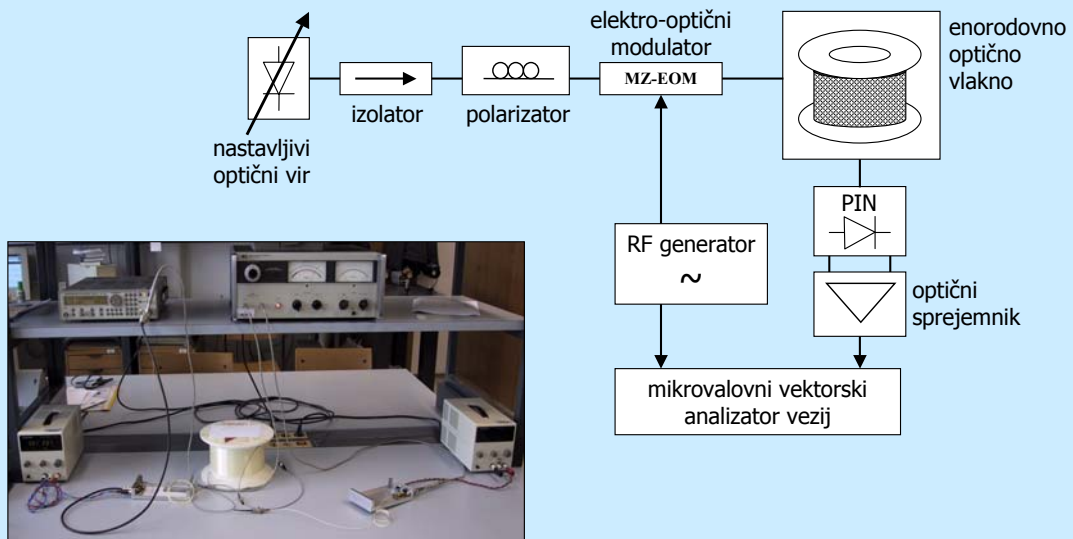
- 100 ps/(nm·km) pri $\lambda=0,85 \mu\text{m}$,
- 40 ps/(nm·km) pri $\lambda=1 \mu\text{m}$,
- 0 ps/(nm·km) pri $\lambda=1,28 \mu\text{m}$ in
- 20 ps/(nm·km) pri $\lambda=1,55 \mu\text{m}$.

G.652, G.653 in G.654



Laboratorij za sevanje in optiko

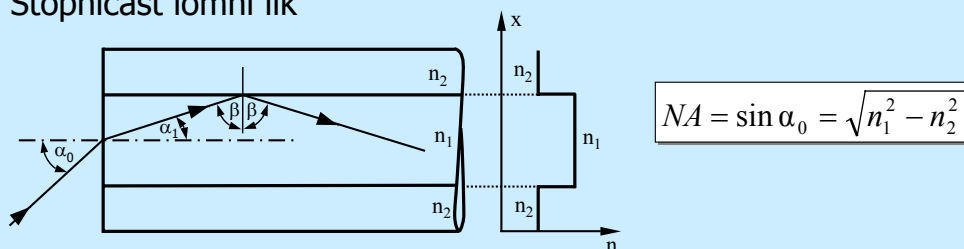
Meritev disperzije



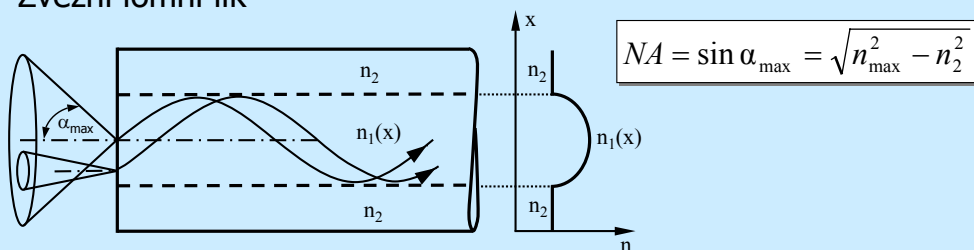
Laboratorij za sevanje in optiko

Numerična apertura (odprtina)

Stopničast lomni lik



Zvezni lomni lik



Laboratorij za sevanje in optiko

Eden najpomembnejših podatkov kakršnegakoli dielektričnega valovoda je numerična apertura (NA). Pove nam, kolikšna je kotna odprtina, skozi katero žarki vstopajo v vlakno in so v njem ujeti. To so tisti žarki, ki zadovoljujejo pogoj notranjega odboja na meji med jedrom in oblogo. Vlakno lahko sprejme le tiste žarke, ki vanj vstopajo dovolj položno. Žarki, ki vpadajo bolj strmo, izstopajo iz jedra v oblogo.

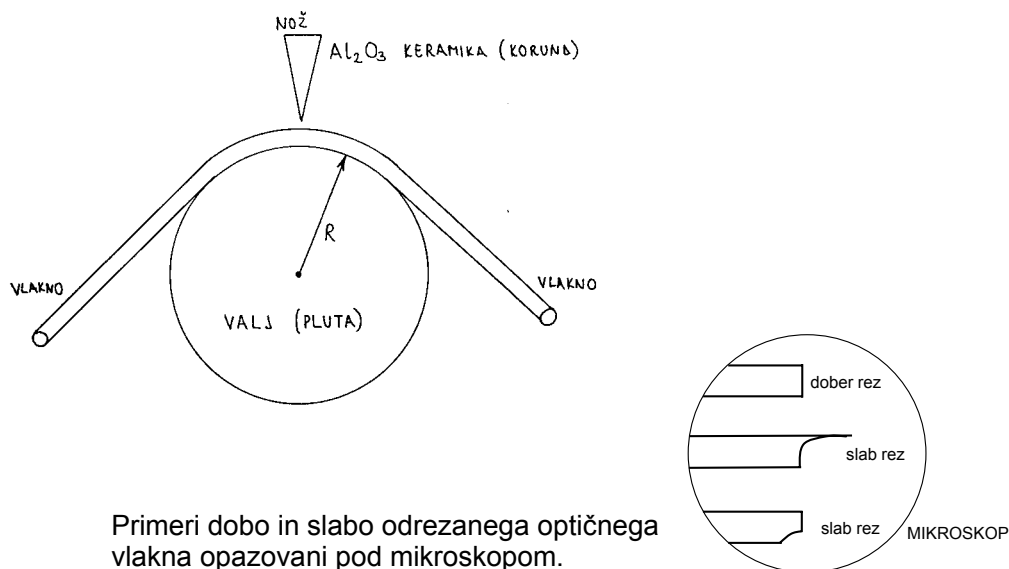
Numerična apertura povezuje lomni količnik jedra in lomni količnik obloge v pomembno veličino, ki opisuje elektromagnetne lastnosti optičnega vlakna. V mnogorodovnih optičnih vlaknih, v katerih se lahko širi zelo veliko število rodov, je numerična apertura preprosto sinus največjega vstopnega kota svetlobe, ki še izpolnjuje pogoj popolnega odboja na meji med jedrom z lomnim količnikom n_1 in oblogo z lomnim količnikom n_2 .

Numerična apertura se vedno podaja kot sinus vpadnega kota svetlobe v praznem prostoru (lomni količnik enak enoti). Na ta način je numerična apertura enoveljavno podana za katerokoli optično vlakno. Pri spajanju dveh mnogorodovnih vlaken s stopničastim lomnim likom so izgube spoja majhne, ko sta premer jedra in numerična apertura izstopnega vlakna večja ali enaka primeru jedra in numerični aperturi vstopnega vlakna.

Gradientno optično vlakno ima običajno parabolični lomni lik. Numerična apertura je v tem primeru funkcija razdalje od osi vlakna in doseže največjo vrednost na sami osi vlakna. Kot podatek gradientnega vlakna se zato navaja premer jedra in maksimalna numerična apertura na osi vlakna. Tudi v primeru spajanja gradientnih vlaken so izgube majhne, ko sta premer jedra in maksimalna numerična apertura izstopnega vlakna večja ali enaka premeru jedra in maksimalni numerični aperturi vstopnega vlakna.

Šibkolomna vlakna imajo pri $n_1 \approx 1,45$ in $(1 - n_2/n_1)$ je od 0,001 do 0,01 kotno odprtino od približno 4 do 12 stopinj in numerično odprtino od 0,065 do 0,21.

Rezanje optičnega vlakna



Primeri dobo in slabo odrezanega optičnega vlakna opazovani pod mikroskopom.

Laboratorij za sevanje in optiko

Zunanji premer vlakna ($125\ \mu\text{m}$) in lomna količnika jedra in obloge so standardizirani, kar omogoča medsebojno spanje vlaken različnih proizvajalcev. Vlakna se med seboj povezujejo s spojkami. Razlikujemo med trdimi (varjenimi) in razstavljivimi spojkami.

Ne glede na vrsto spoja morata biti konca vlaken skrbno pripravljena za spoj. Najprej je potrebno odstraniti različne sloje zaščite. Le-to se lahko naredi mehansko, kemično ali toplotno. Vsako stekleno optično vlakno ima vsaj primarno akrilatno zaščito zunanjega premera $250\ \mu\text{m}$, ki stekleni del mehansko ščiti. Po odstranitvi zaščitnih slojev vlakno odrežemo z ustreznim keramičnim nožem.

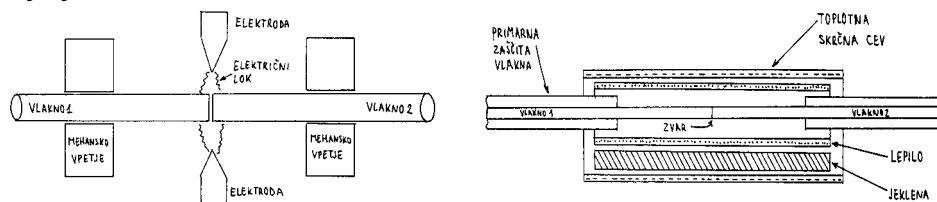
Pri rezanju vlakna uporabljamo lastnost stekla, da se vlakno pod napetostjo lomi. V ta namen v vlakno najprej s keramičnim nožkom naredimo majhno zarezo (1 mikro meter). Nato vlakno upognemo na pluti in naša majhna zareza se podaljša v rez.

Pri rezanju in obdelavi koncev optičnih vlaken moramo biti zelo previdni, ker imamo opraviti z zelo majhnimi deli. Paziti moramo tudi na čistočo, saj že zrnce prahu povsem pokvari spoj dveh optičnih vlaken. Končno pazimo na to, da se nam tanko optično vlakno oziroma različni odrezki na mizi ne zapičijo v kožo, saj je odstranjevanje steklenih drobcev iz kože zelo boleče.

Prečni premik, vzdolžni razmik in zasuk sicer enakih vlaken lahko povzročijo nedopustno visoko stično slabljenje. Za prakso je predvsem pomembno, da je slabljenje vlakenskih spojk dovolj nizko zaradi velikega števila le-teh na dolžini vlakna.

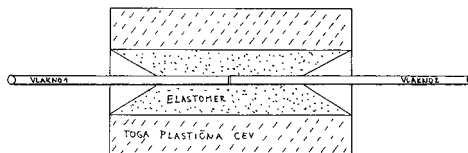
Spajanje optičnih vlaken (1)

- Varjenje



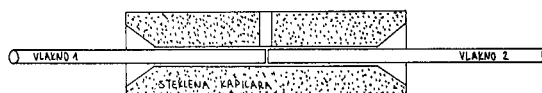
- Skrči gumica

(primerna za spajanje mnogorodovnega vlakna)



- Steklana kapilara

(primerna tudi za spajanje enorodovnega vlakna)



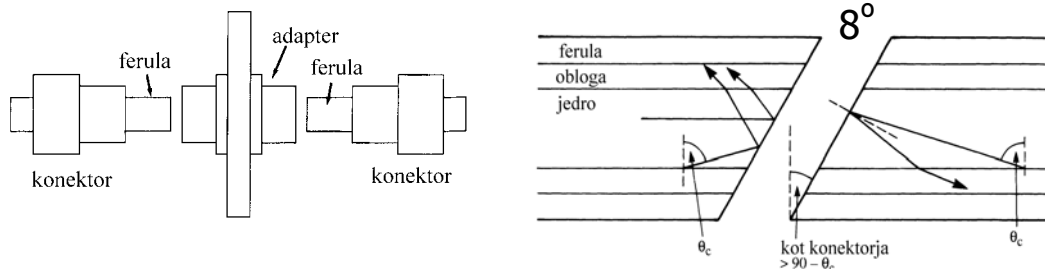
Laboratorij za sevanje in optiko

Najboljša in trajna rešitev spajanja dveh vlaken je zvar. S sodobnimi varilnimi in merilnimi pripravami, ki omogočajo submikronsko nastavitev lege vlakna, je mogoče dobiti razmeroma nizko slabljenje spoja, manjše od 0,01 dB. Ker si spoji sledijo na odsekih, ki imajo tipično dolžino nekaj km, je dodatno slabljenje spojev preračunano na km dolžine že skoraj nepomembno.

Mesto zvara je potrebno takoj zaščititi, ker sta zvarjena konca vlakna brez vsakršne zaščite, zvar sam pa je v vsakem primeru mehansko najbolj oslajeno mesto. Zvar zaščitimo s toplotno skrčno cevjo, ki jo navlečemo preko zvara in golih koncev obeh vlaken. Skrčna cev vsebuje lepilo in jekleno opornico, ki bo zaščitila zvar pred lomljenjem.

V primeru, ko ne potrebujemo trajne rešitve spajanja, izvedemo začasne spoje tako, da pravilno odrezana konca vlaken le približamo z elastomerom ali kapilarno cevko. Takšen spoj vlaken ni niti trajen niti mehansko trden in vnaša večje izgube od zvara. Upoštevati je treba tudi odboj svetlobe na prehodu steklo-zrak-steklo med konci vlaken. Odboj na vsaki od mej zrak steklo je 4%, tako da se lahko v najslabšem primeru nazaj odbije 16%. Odboj znatno oslabimo z uporabo gela, ki ima podoben lomni količnik kot steklo.

Spajanje optičnih vlaken (2) - KONEKTORJI



		optično povratno slabljenje	
physical contact	polish	PC	-30dB
ultra physical contact	polish	UPC	-50dB
angled physical contact	polish	APC	-60dB

Laboratorij za sevanje in optiko

Pri meritvah in v operativnih napravah potrebujemo spoje, ki jih lahko poljubno razstavljamo in sestavljamo s smiselno mero ponovljivosti. Takšen spoj lahko dosežemo le s konci vlaken, ki so vgrajeni v konektorje. Na tržišču obstaja cela vrsta optičnih konektorjev. Za spajanje optičnih vlaken je bilo do danes razvitih večje število različnih vrst konektorjev, med njimi tudi komplicirani z lečami in takšni, ki so potrebovali sprotno mazanje z mastjo za izenačevanje lomnih količnikov in s tem preprečevanje odbojev na koncih vlaken.

Po večini so vsi optični konektorji moškega spola, zaradi enostavnejšega čiščenja. Moški konektorji za medsebojno spajanje potrebujejo določene adapterje. Konektorji so po načinu spajanja lahko navojni (naprimer FC), bajonetni (promer ST) ali plastični zatični (naprimer SC).

Od vseh vrst konektorjev so se v optičnih komunikacijah najbolj uveljavili FC konektorji. Osnova FC konektorja je ferula - natančno brušena cevka iz jekla ali keramike z notranjim premerom $125\ \mu\text{m}$ in zunanjim premerom $2.500\ \text{mm}$ (toleranca $\pm 0.5\ \mu\text{m}$).

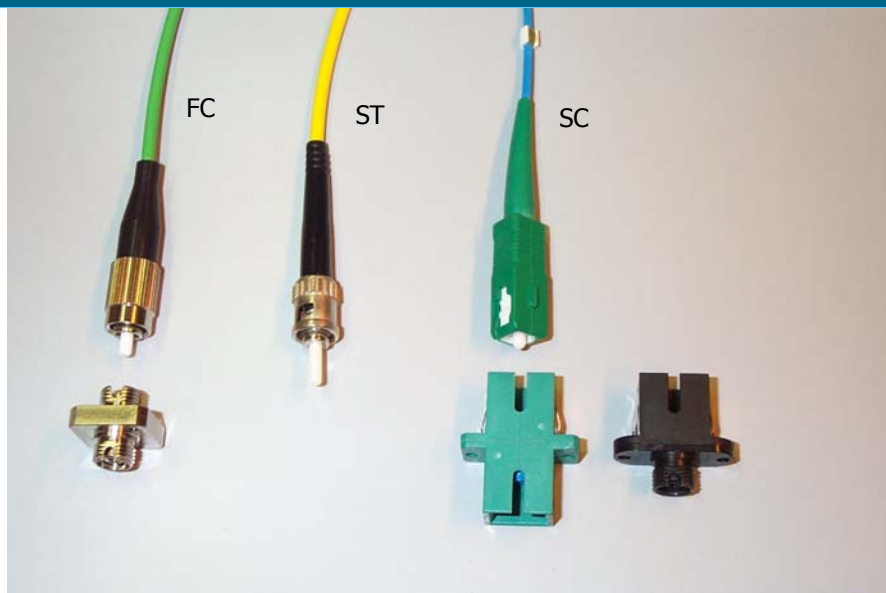
V notranjost ferule zalepimo golo optično vlakno, dve feruli pa spojimo s pomočjo okrogle vzmeti v spojnem konektorju. FC konektorji omogočajo izredno majhne izgube pod $0,5\ \text{dB}$ tudi pri spajanju zahtevnih enorodovnih vlaken z jedrom manjšim od $10\ \mu\text{m}$. Izgube spoja so pravzaprav primerljive s samim odbojem svetlobe na meji steklo-zrak-steklo. Razen tega sama zasnova FC konektorja omogoča povsem kompaktne izboljšave, kot so FC-PC konektorji ali najnovejši, poševno brušeni konektorji za zmanjševanje vpliva odbitih valov.

Za posebne aplikacije (CA TV) pa obstajajo tudi konektorji (AC), ki imajo sprednjo ploskev brušeno pod kotom nekaj stopinj (8°). Na ta način se izognemo povratnim odbojem od konektorja.

Najpogostejši optični konektorji

konektorji

adapterji



Laboratorij za sevanje in optiko

Optični kabli

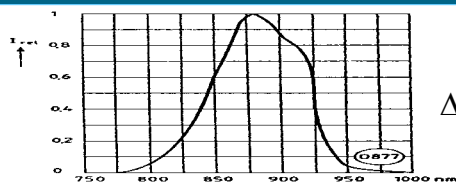
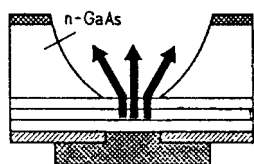
samonosilni kabli brez tesne zaščite



kabel s tesno zaščito (nylon) – se uporablja pri krajših ožičenjih

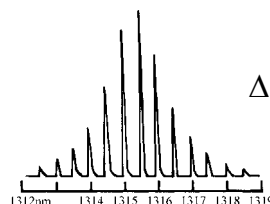
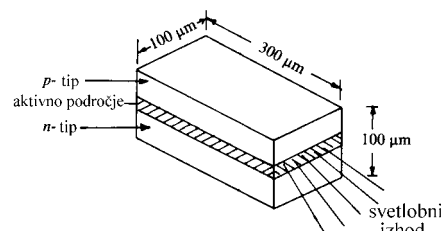
Viri v optičnih komunikacijah

LED



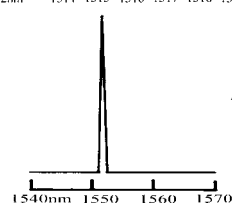
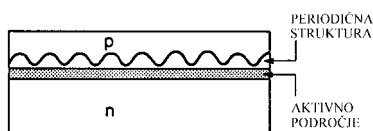
$$\Delta\lambda \approx 100 \text{ nm}$$

FP LASER



$$\Delta\lambda \approx 10 \text{ nm}$$

DFB LASER



$$\Delta\lambda \approx 1 \text{ nm}$$

Laboratorij za sevanje in optiko

Med zelo raznovrstnimi optičnimi viri uporabljamo v optičnih komunikacijah predvsem polprevodniške vire, v katerih nastaja v p-n spoju svetloba.

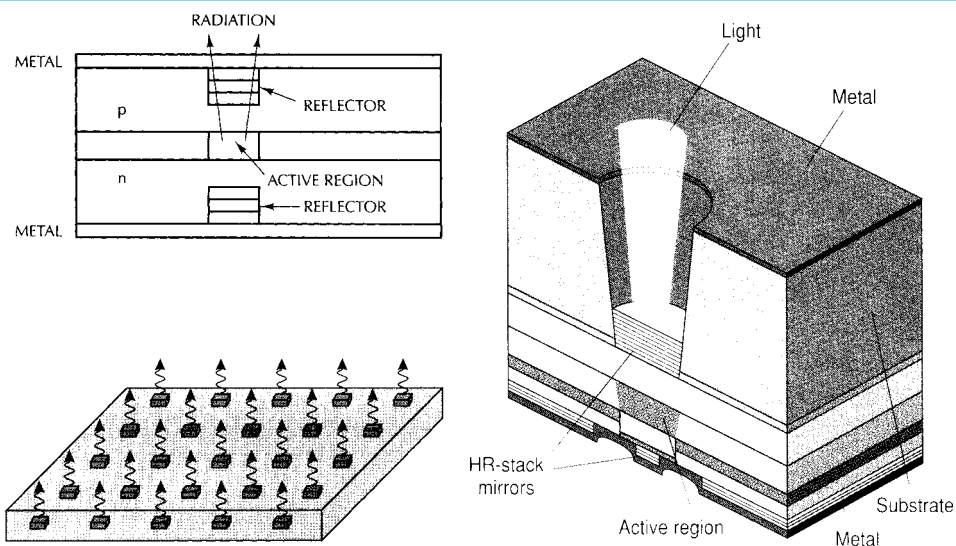
Svetleča dioda (LED) je vir nekoherentne svetlobe, ki s spontano emisijo nastaja v p-n spoju polprevodnika. Svetleča dioda ne uporablja resonatorja, ki bi dal povratno vez, potrebno za oscilator, zato štejemo svetlečo diodo kot šumni vir. Širina spektra svetleče diode znaša tipično $\lambda \approx 100 \text{ nm}$ oziroma $\Delta f \approx$ nekaj deset tisoč GHz. Zaradi te neprimerne širine spektra, ki je značilna za nekoherentno svetlobo, se svetleča dioda v optičnih komunikacijah uporablja zgolj za zelo kratke zveze.

Laserska dioda je vir delno koherentne ali nekoherentne svetlobe, ki nastaja s stimulirano (spodbujeno) emisijo v spoju p-n v območju resonatorja. Polprevodniški laser je dvojna heterostruktura, ki ima v območju spoja hkrati povišano koncentracijo nosilcev in svetlobnega polja. To omogoča učinkovito rekombinacijo parov elektron-vrzel in s tem nastajanje fotonov v območju močnega resonatorskega polja, kar je pogoj za nastanek plazovnega fotonskega pojava (lasing). Spoj deluje hkrati kot aktivna snov za vzdrževanje stimulirane emisije in kot planarni valovod za vodenje svetlobnega polja.

Bistveni element laserske diode je resonator, ki opravlja nalogo povratnega sklopa, potrebnega za vzdrževanje oscilacij, in je hkrati frekvenčno selektiven element, potreben za dodatno ožjenje frekvenčnega spektra stimulirane emisije. Po načinu, kako v resonatorju dosegamo resonančni pojav in vzdržujemo povratni sklop, razlikujemo:

- Lasersko diodo FP (Fabry-Perot): Resonator ima dolžino, ki znaša nekaj sto valovnih dolžin, in je na koncih omejen s planparalelnima frekvenčno neselektivnima zrcaloma (meja med snovjo GaAs aktivne plasti in zrakom). Laser niha na resonančnih valovnih dolžinah longitudinalnih rodov, kjer je dovolj veliko ojačenje aktivne snovi laserja. Spekter laserja je torej mnogorodoven.
- Lasersko fotodiodo na porazdeljen povratni sklop (DFB - Distributed Feed-Back): V planarnem valovodu resonatorja je vgrajena periodična motnja lomnega količnika, ki učinkuje kot periodična struktura, na kateri se valovi sklapljajo v povratno smer, tako da odbiti valovi konstruktivno interferirajo. V tem primeru laser niha na valovni dolžini, ki je enaka dvakratni periodi vgrajene strukture.

VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Diode) Polprevodniški laserji z vertikalno resonančno votlino



Laboratorij za sevanje in optiko

Izboljšane lastnosti komunikacijskih VCSEL glede na obstoječe komunikacijske laserje:

- majhne dimenzije,
- majhna vhodna moč za krmiljenje laserja,
- zelo nizek pragovni tok (do 0,1 mA) in nizek delovni tok (3mA pri 2,3V),
- visoka učinkovitost pretvorbe (do 47%),
- večje izhodne moči (do 50mW),
- velika spektralna čistost in hiter odziv (enorodovni izhod – do 2,7mW, stranski pasovi nižji za >20dB),
- daljša življenjska doba,
- učinkovitejši sklop čipa z optičnim vlaknom,
- sevalni diagram je krožen,
- možnost integracije v matrice 2x2 do 8x8,
- nižji stroški izdelave.

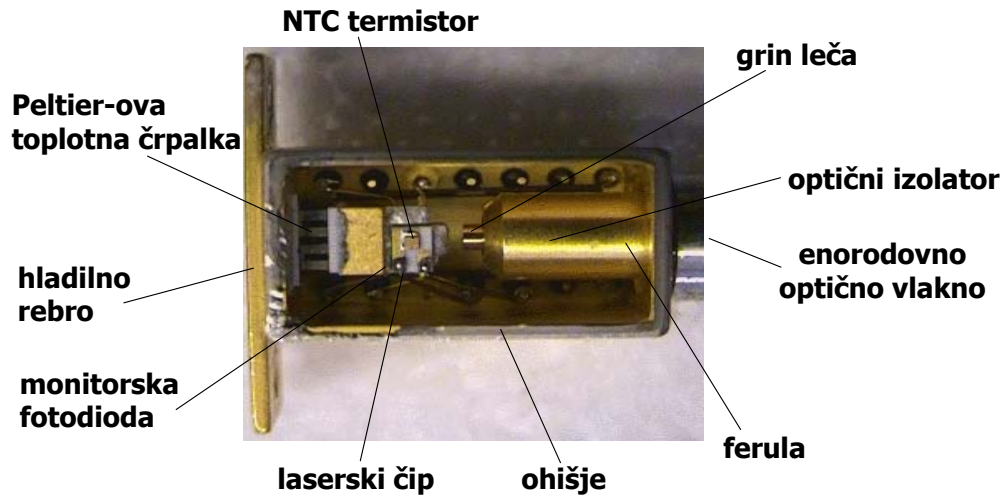
Značilnosti trenutnih praktičnih izvedb VCSEL z omenjenimi prednostmi:

- obstaja le za valovne dolžine med 750nm in 950nm,
- izvedene aktivne kvantne jame temeljijo na InAlGaAs,
- optikasilna zrcala so izdelana iz GaAs substrata (morajo biti termično in električno prevodna),
- zanimive VCSEL strukture obstajajo tudi za 600nm,
- velike izgube valenčnega pasu aktivnega materiala.

Trenutne aktivnosti glede razvoja VCSEL potekajo na področju:

- zmanjšanja sistemskega šuma,
- zmanjšanje občutljivosti na povratni vpliv (refleksije),
- nadzora rodov in polarizacije izhodnega žarka,
- razširitve prenosnih zmogljivosti in paralelnega prenosa.

DFB laserska dioda



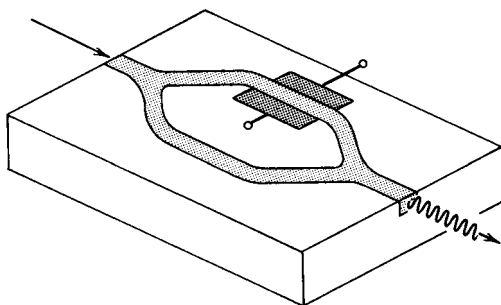
Laboratorij za sevanje in optiko

V zahtevnejših optičnih povezavah prevladujejo laserji s porazdeljeno povratno vezavo (DFB – distributed-feedback), katere odlikuje zelo ozek spekter. Optične zveze izdelane z takimi laserji so precej manj občutljive na disperzijo.

Vendar je zaradi zgradbe in uporabljenih materialov pri tovrstnih laserjih izhodna valovna dolžina odvisna od temperature laserskega čipa. Temperaturna sprememba valovne dolžine pri DFB laserju je manjša od temperaturnega koeficienta FP laserja in znaša tipično $0,08 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$, lahko pa je v mejah od $0,02 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ do $0,1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ [20]. Zato je pri tovrstnih laserjih nujna uporaba dragega pakiranja v 14-pinsko »butterfly« ohišje s termoelektričnim Peltier-ovim hladilnikom, ki prepreči drsenje valovne dolžine.

Intenzitetna modulacija v optičnih komunikacijah

- direktna modulacija laserskega vira do **1 Gbit/s**
- zunanja modulacija laserskega žarka
 - InP WQW elektro-absorpcijski modulator
 - Mach-Zehnderjev LiNbO₃ modulator do **40 Gbit/s**



Laboratorij za sevanje in optiko

Za optične zveze se pogosto uporabljajo preprosti analogni sistemi z direktno intenzitetno modulacijo (D-IM Direct Intensity Modulation) optičnega nosilnika.

Večina sedanjih optičnih zvez uporablja neposredno modulacijo napajalnega toka skozi LED ali lasersko diodo. Izhodna moč laserja je v tem primeru modulirana v ritmu prenašanega analognega ali digitalnega signala. Pri tem je zelo pomembno, da je karakteristika P-I laserja kolikor mogoče linearna. S primerno konstrukcijo polprevodniških svetlobnih izvorov je mogoče doseči hiter odziv (1 ns) in razmeroma linearno krivuljo izhodne svetlobne moči v odvisnosti od krmilnega toka. Za digitalne optične zveze do hitrosti 1 Gbit/s je takšna rešitev povsem zadovoljiva.

Za višje hitrosti in za prenos analognih signalov, naprimer več deset TV programov po enem optičnem vlaknu, je odziv laserskih diod prepočasen. Poleg tega modulacija izredno razširi optični spekter tudi najboljših laserjev s porazdeljeno povratno vezavo (DFB). Posledica razširjenega optičnega spektra je močno povečana disperzija, na kar so optične zveze pri hitrostih 2,5 Gbit/s in več še posebej občutljive.

Smiselna tehnična rešitev je zunanja modulacija. Pri tem se uporablja ločen modulator, tako da dela DFB laser v stabilnem režimu. Od vseh znanih fizikalnih pojavov, s pomočjo katerih lahko moduliramo svetlobni žarek, ima dovolj hiter odziv in dovolj veliko občutljivost za električne krmilne signale le elektrooptični pojav. Značilnost elektrooptičnega pojava je, da je lomni količnik snovi odvisen od zunanjega enosmernega ali nizkofrekvenčnega električnega polja. Za elektrooptične naprave je najprimernejši kristal litijevega niobata (LiNbO₃), v katerem so s pomočjo difuzije titana (Ti) izdelani planarni svetlovodi.

Ker uporablja večina sistemov optičnih zvez nekoherentne sprejemnike, ki so občutljivi le na amplitudo signala, fazni modulator vgradimo v interferometersko strukturo. Elektrooptični modulator ni brezizgubna naprava. Izgube v planarnem svetlovodu LiNbO₃ znašajo okrog 0,1 dB/cm. Poleg tega se po 1 dB izgubi v vsakem smernem sklopniku in še po 1 dB v vsakem spoju optičnega vlakna na LiNbO₃ kristal. Najmanjše ustavitveno slabljenje modulatorja je zato okoli 5 dB, z ustreznimi krmilnimi napetostmi na elektrodah pa to slabljenje le še povečamo.

Detektorji v optičnih komunikacijah

- PIN fotodioda
- APD fotodioda
- Si, Ge, InGaAs
- nizkoimpedančni
- integracijski
- transimpedančni

Laboratorij za sevanje in optiko

Bistveni sestavni del sprejemniškega sistema je optični detektor (fotodetektor). To je sprejemni element, s katerim pretvarjamo optično moč v električno in s tem spreminjamo optični signal v električnega. Dober sprejemnik optičnega signala mora imeti sledeče lastnosti:

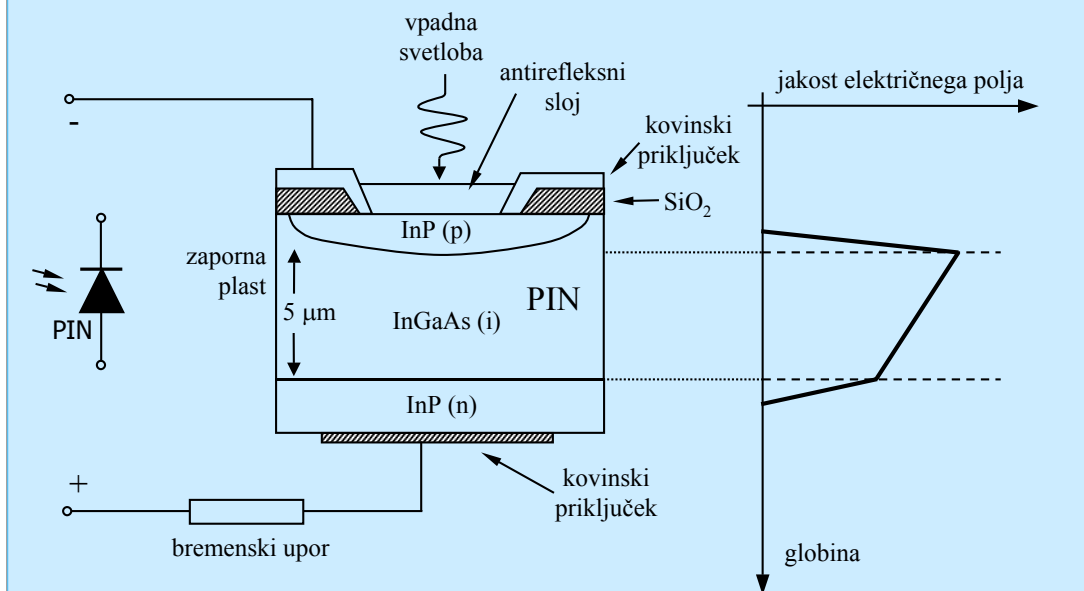
- visoka občutljivost,
- širok frekvenčni pas detektiranega signala,
- nizka raven lastnega šuma,
- kratek odzivni čas,
- linearnost detekcije.

Edini praktično uporaben pretvornik za pretvorbo svetlobnih signalov v električne za komunikacije po optičnih vlaknih so fotodiode različnih vrst. Pri vseh ostalih pretvornikih imamo počasen odziv, majhno občutljivost in slabo razmerje signal/šum.

Vse fotodiode za optične komunikacije se uporabljajo v zapornem režimu delovanja, kar pomeni, da imajo razmeroma debelo zaporno plast. Skoraj vsak foton vpadne svetlobe se v zaporni plasti pretvori v par elektron/vrzel in tako prispeva k električnemu toku, ki je izhodni signal fotodiode. Sodobne fotodiode imajo visok kvantni izkoristek, običajno preko 80%, kar pomeni, da se več kot 80% vpadnih fotonov pretvori v pare elektron/vrzel in prispeva k izhodnemu toku.

Za delovanje v področju valovnih dolžin od 1300 nm do 1550 nm ne moremo več uporabljati silicijevih fotodiod, v poštev pridejo le germanijeve fotodiode in fotodiode iz III-V polprevodnikov (InGaAs).

Izvedba in delovanje PIN fotodiode



Laboratorij za sevanje in optiko

Najenostavnejša fotodiode je PIN fotodiode. Fotodiode PIN je polprevodniški spoj, ki ima med plastema p in n visoke koncentracije primesi, široko vmesno osiromašeno plast z nizko koncentracijo primesi. Z reverzno napetostjo, s katero vsilimo plasti p negativni, plasti n pa pozitivni potencial, povzročimo drsenje fotoioniziranih parov elektron-vrzel. Pari elektron vrzel nastanejo z notranjim fotoelektričnim pojavom. Ko na fotodiode vpadne foton, ki ima dovolj veliko energijo, se njegova energija porabi za nastanek para elektron-vrzel. Fototok je sorazmeren vhodni moči.

Fotodiode je izdelana iz materiala InGaAs, ki je primeren za sprejem svetlobe na valovnih dolžinah drugega in tretjega spektralnega okna, in ima kvantni izkoristek fotoionizacije (razmerje med številom parov elektron-vrzel in številom fotonov) 0,8. Kvantni izkoristek fotodiode izboljšujeta debela zaporna plast in antirefleksni sloj na površini diode.

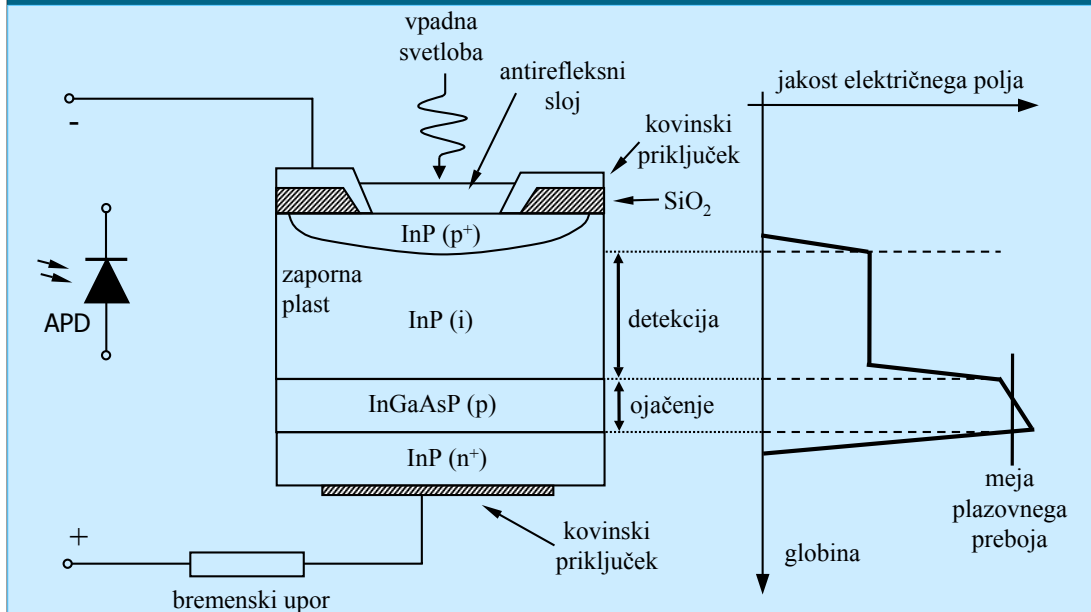
Poleg fototoka, ki ga vzbuja vpadna svetloba, teče v fotodiode v odvisnosti od zunanje svetlobe takoimenovani temni tok, ki je posledica notranjih termičnih procesov. Temni tok določa prag občutljivosti sprejema, zato želimo, da bi bil čim manjši. Omenjena fotodiode InGaAs ima temni tok 5 nA.

Izhodna električna moč detektiranega signala na delovnem bremenu R je sorazmerna kvadratu vhodne optične moči. To pomeni, da ima sprememba optične moči za, na primer, 1 dB za posledico spremembo električne moči za 2 dB.

Detektirani signal ojačujemo v radiofrekvenčnem ojačevalniku. Velika vrednost upornosti R delovnega bremena fotodetektorja je potrebna za to, da vhodni signal ojačevalnika dvignemo na čim višjo raven.

Za fotodetekcijo je potrebna nizka napetost zunanega vira (reda 1 V). Fotodiode PIN se uporablja v optičnih zvezah, ki imajo optični ojačevalnik za ojačevanje svetlobnega signala, in v koherentnih optičnih zvezah.

Izvedba in delovanje plazovne fotodiode



Laboratorij za sevanje in optiko

Občutljivost optičnih sprejemnikov omejuje šum električnega ojačevalnika, ki ojačuje signal s fotodiode. Problem ni rešljiv z uporabo boljšega nizkošumnega ojačevalnika, ker je že izhodna impedanca same fotodiode zelo neugodno visoka vrednost z veliko kapacitivno komponento.

Občutljivost optičnega sprejemnika s fotodiode lahko zato izboljšamo edino tako, da vhodni signal ojačimo preden se pretvori v električni tok zunaj diode. V ta namen se poslužimo ojačevanja v sami fotodiode z uporabo plazovnega pomnoževanja nosilcev elektrine.

Razmeroma šibek fototok je mogoče ojačiti, če v diodi ustvarimo pogoje za nastanek notranjega ojačevanja tako, da sprožimo plazovni pojav fotoioniziranih parov elektron-vrzel. Notranje ojačenje dosežemo z udarno ionizacijo, ki jo povzročijo močno pospešeni nosilci v plasti, v kateri je prisotno močno električno polje.

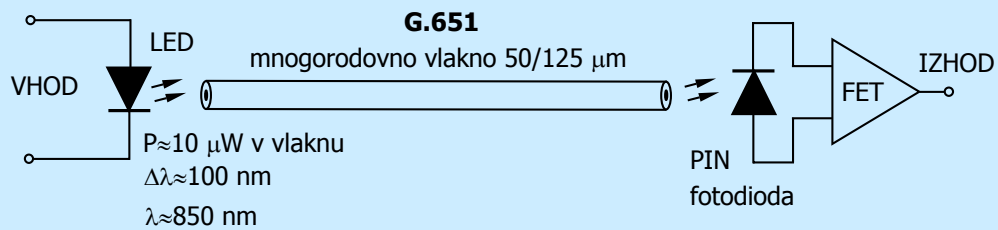
Žal predstavlja plazovno ojačenje in plazovni preboj dodaten izvor šuma, ki lahko v neustreznih okoliščinah pokvari razmerje signal/šum sprejemnika. Fotodiode z grajenim plazovnim ojačenjem (Avalanche Photo Detector) je zato načrtovana tako, da dosežemo čim večje ojačenje signala in proizvedemo čim manj šuma.

V plazovni fotodiode je zaporna plast ločena na dva sloja:

- v gornjem sloju pride do detekcije svetlobe,
- v spodnjem sloju pa do plazovnega ojačenja nosilcev elektrine.

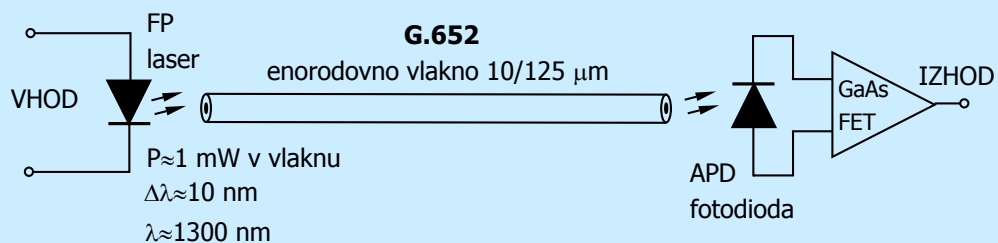
Ločitev detekcije in plazovnega ojačenja omogoča boljše razmerje signal/šum, ker na ta način plazovni mehanizem ne ojačuje nekaterih izvorov temnega toka fotodiode. Ločitev detekcije od plazovnega ojačenja dosežemo z uporabo različnih polprevodnikov v zaporni plasti, ki so izbrani tako, da električno polje preseže mejo plazovnega preboja samo v spodnji (ojačevalni) plasti, v zgornji plasti (detekcija) pa ne pride do plazovnega preboja. Vrednost plazovnega ojačenja lahko nastavljamo tudi od zunaj, z izbiro zaporne napetosti na fotodiode.

Optična vlakenska zveza z LED oddajnikom



domet $\approx 1 \text{ km}$
zmogljivost = 100 Mbit/s

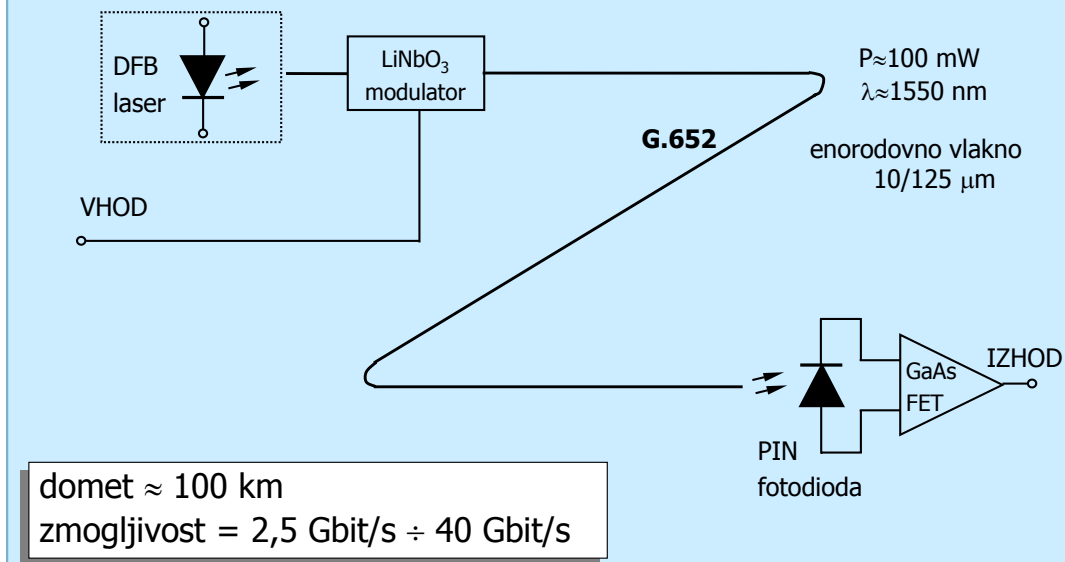
Optična vlakenska zveza s FP laserjem



domet $\approx 100 \text{ km}$
zmogljivost = 1 Gbit/s

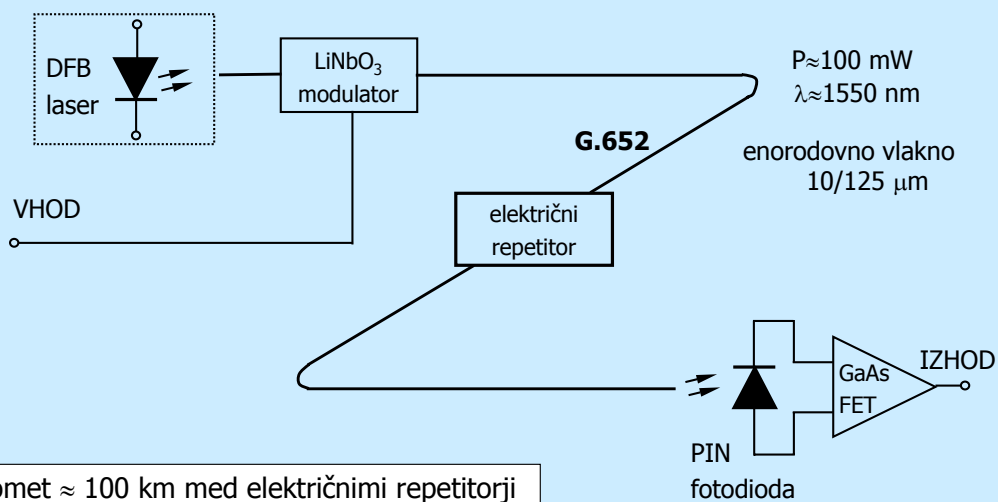
Laboratorij za sevanje in optiko

Optična vlakenska zveza z zunanjo modulacijo



Laboratorij za sevanje in optiko

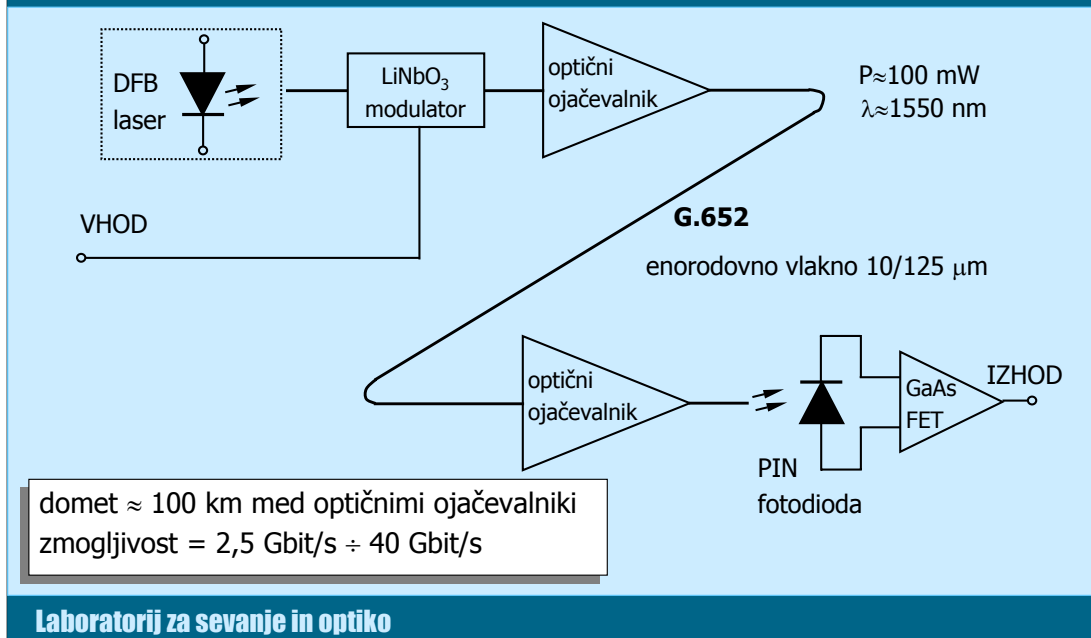
Optična vlakenska zveza z električnimi repetitorji



domet $\approx 100 \text{ km}$ med električnimi repetitorji
zmogljivost = $2,5 \text{ Gbit/s} \div 40 \text{ Gbit/s}$

Laboratorij za sevanje in optiko

Optična vlakenska zveza z optičnimi ojačevalniki

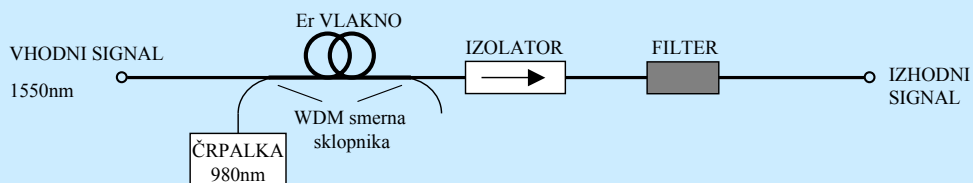


EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) vlakenski ojačevalnik s primesjo erbijske



LASTNOSTI:

Širina spektra: 36,9 nm
Ojačenje > 20 dB



Laboratorij za sevanje in optiko

Erbijev vlakenski ojačevalnik je bil izumljen leta 1987 in po letu 1990 so optični ojačevalniki pomembno zaznamovali razvoj optičnih komunikacij in izjemno vplivali na kakovost ter doseg optične zveze. Ojačevanje EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) znaša od 30 dB do 40 dB v pasu od 1535 nm do 1565 nm.

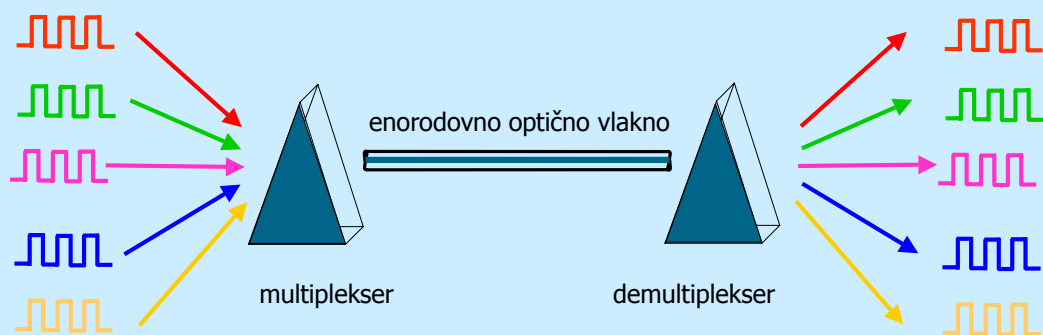
Ključni sestavni del Erbijevega vlakenskega ojačevalnika je vlakno dolžine približno 10m, ki ima zelo tanko jedro in je obogaten z ioni Er^{+} (snov iz skupine elementov redkih zemelj). Poleg erbijskega vlakna je EDFA sestavljen še iz naslednjih elementov:

- Črpalni laser: 980 nm ali 1480 nm
- Optični vlakenski izolator
- WDM smerni sklopnik
- Optični filter - dolga periodična struktura

Energetske nivoje erbijevih ionov se črpa s svetlobo črpalnega signala. Kot črpalka se zlasti uporablja optični vir na valovni dolžini 980 nm ali 1479 nm. Pri prehodu delcev iz metastabilnega na osnovni nivo nastane stimulirana emisija (signal) in spontana emisija (šum) svetlobe v področju valovne dolžine 1550 nm. Ojačevalni proces je porazdeljen na celotni dolžini aktivnega vlakna. Hkrati s koristnim signalom ojačuje ojačevalnik tudi lasten šum, ki neizogibno nastaja s spontano emisijo v aktivnem delu vlakna, to pa je ob vseh prednosti tudi edina večja pomanjkljivost tega ojačevalnika.

WDM tehnologija (Wavelength Division Multiplexing)

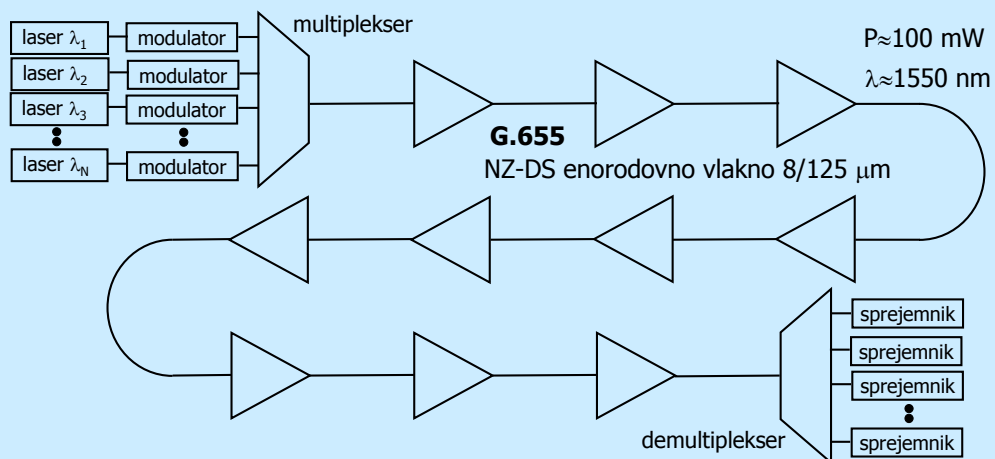
razvrščanje valovnih dolžin



Valovno multipleksiranje omogoča **dodatna** povečanja prenosne kapacitete posameznega vlakna čez meje časovnega multipleksiranja.

Laboratorij za sevanje in optiko

Zveza z valovno-dolžinskim razvrščanjem

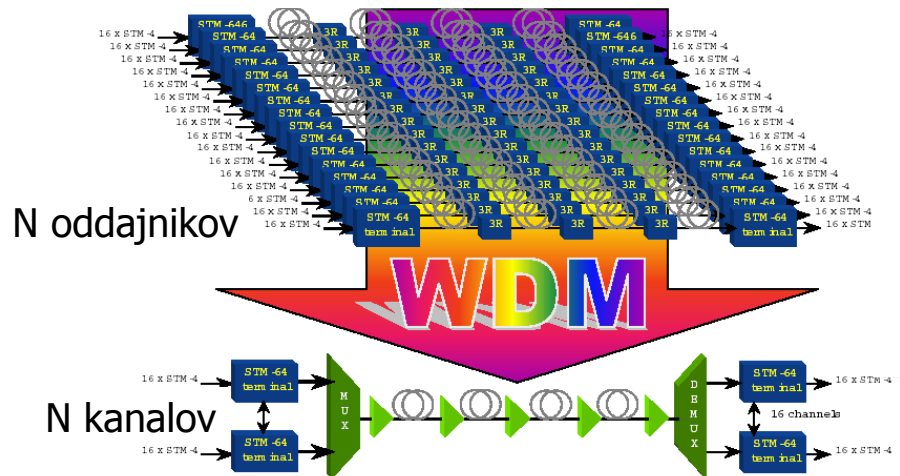


domet $\approx 80 \text{ km}$ med optičnimi ojačevalniki

zmogljivost = $N \cdot 2,5 \text{ Gbit/s} \div N \cdot 10 \text{ Gbit/s} \Rightarrow \textbf{Tbit/s}$

Laboratorij za sevanje in optiko

Ekonomski razlogi za uvedbo WDM



Namesto uporabe večjega števila optičnih vlaken, se v eno optično vlakno uvede več valovnih dolžin (kanalov).

Laboratorij za sevanje in optiko

Hvala za pozornost!



bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

<http://antena.fe.uni-lj.si>



**Laboratorij za sevanje in optiko, Katedra za telekomunikacije
Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani**