

ŠOLA OPTIKE
Ljubljana, 22. november 2010

Optične komunikacije

višji predavatelj dr. Boštjan Batagelj

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



Laboratorij za sevanje in optiko

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

Literatura:

- Jožko Budin, "Optične komunikacije", založba FE, Ljubljana 1993
 - Boštjan Batagelj, Matjaž Vidmar, "Optične komunikacije-laboratorijske vaje", FE, Ljubljana 2003
 - zbornik "10. strokovni seminar optične komunikacije", Ljubljana, 29.-31. januar 2003, FE, LOK
 - zbornik "11. seminar optične komunikacije", Ljubljana, 28.-30. januar 2004, FE, LOK
 - zbornik "12. seminar optične komunikacije", Ljubljana, 9.-11. februar 2005, FE, LSO
 - zbornik "13. seminar optične komunikacije", Ljubljana, 1.-3. februar 2006, FE, LSO
 - zbornik "14. seminar optične komunikacije", Ljubljana, 31. januar - 2. februar 2007, FE, LSO
 - zbornik "VITEL – 20. delavnica o telekomunikacijah: Optična dostopovna omrežja", Brdo pri Kranju, 5. november - 6. november 2007, EZS
 - zbornik "15. seminar optične komunikacije", Ljubljana, 30. januar - 1. februar 2008, FE, LSO
 - zbornik "16. seminar optične komunikacije", Ljubljana, 28. – 30. januar 2009, FE, LSO
 - zbornik "17. seminar optične komunikacije", Ljubljana, 27. – 29. januar 2010, FE, LSO
 - zbornik "18. seminar optične komunikacije", Ljubljana, 2. – 4. februar 2011, FE, LSO
- antena.fe.uni-lj.si

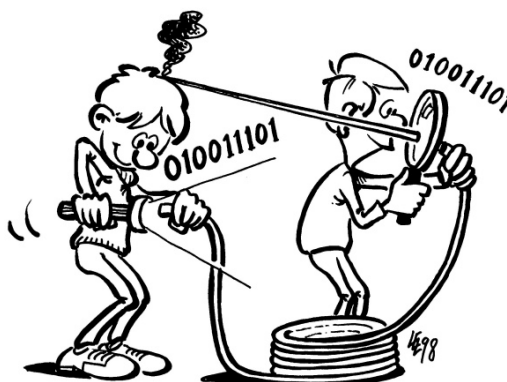
Kratka predstavitev predavatelja:

Boštjan Batagelj je diplomiral leta 1997 na smeri telekomunikacije na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Na isti fakulteti je leta 2000 magistriral ter leta 2003 doktoriral. Od leta 1997 je zaposlen na Fakulteti za elektrotehniko, Katedra za telekomunikacije v Laboratoriju za sevanje in optiko. Kot višji predavatelj in asistent predava ter 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 predstavitve



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



Optične komunikacije, 35 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 dveh desetletjih pospešenega uvajanja v prakso postajajo optične komunikacije osnovni in prevladujoč prenosni medij za zveze na dolge in srednje razdalje. V zadnjih letih zaradi potencialnih prednostih postajajo optične zveze tudi osnovni prenosni medij za zveze kratkega dosega in segajo 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 nizko-zmogljivih zvez do zvez visokega dosega, ki uporabljajo najnovejšo razvojno tehnologijo prenosa.

Začetek optičnih komunikacij



- stari Grki so uporabljali zrcala in sončno svetlobo
- Ameriški staroselci so uporabljali dimne signale
- obramba pred Osmanskim cesarstvom
- signalne svetilke med ladjami
- plinski laser (1960)
- optično vlakno (1970)

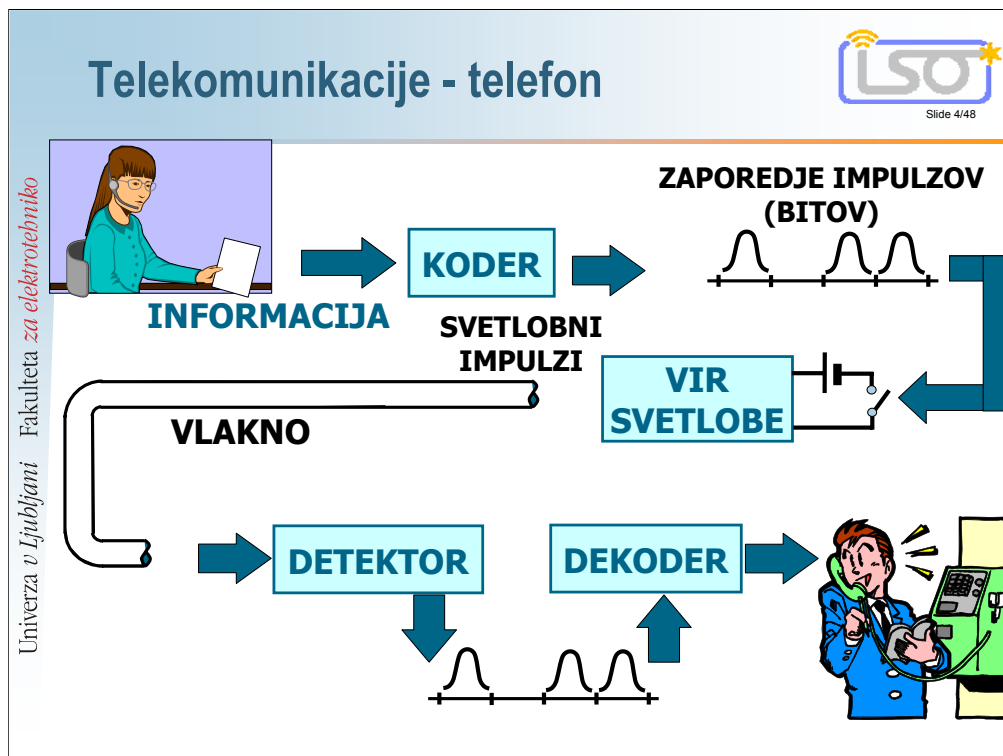


V optičnih komunikacijah se lahko za prenosno pot svetlobnega žarka uporablja prostozačni sistem ali prenos po optičnem vlaknu. Slabosti NEUSMERJENIH prostozačnih zvez so:

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

Enostavne prostozačne optične zveze so zanimive predvsem za komuniciranje na krajših razdaljah do nekaj deset metrov (brežžične 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 prostozačnih 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 v tem primeru 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.



Pravo revolucijo v optičnih komunikacijah je povzročil izum steklenega optičnega vlakna, ki danes predstavlja vodilni prenosni medij v transportnem in dostopovnem omrežju. Optični kabel je bil najprej namenjen dolgim prekooceanskim in zemeljskim zvezam. Danes nadomešča bakrene in koaksialne vodnike v lokalnih telefonskih omrežjih, kabelskih televizijskih sistemih in računalniških omrežjih.

Optično vlakno je optični valovod, po katerem vodimo svetlobo. Osnovni material komunikacijskega enorodovnega in mnogorodovnega vlakna je kremenovo steklo SiO_2 s primesmi. Lomni količnik stekla je odvisen od vrste in koncentracije primesi. Njegova največja prednost so majhne izgube, ki so v nekaterih primerih tudi samo $0,2 \text{ dB/km}$.

Za zelo kratke povezave (do 300 m) 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 $\approx 0,1 \text{ dB/m @ } 580 \text{ nm}$, kar je zelo visoko v primerjavi s SiO_2 vlakni.

Informacija se po optičnem vlaknu prenaša s pomočjo intenzitetno (jakostno) modulirane svetlobe, kar je najenostavnejši način modulacije.

Primerjava optičnih vlaken z električnimi vodi

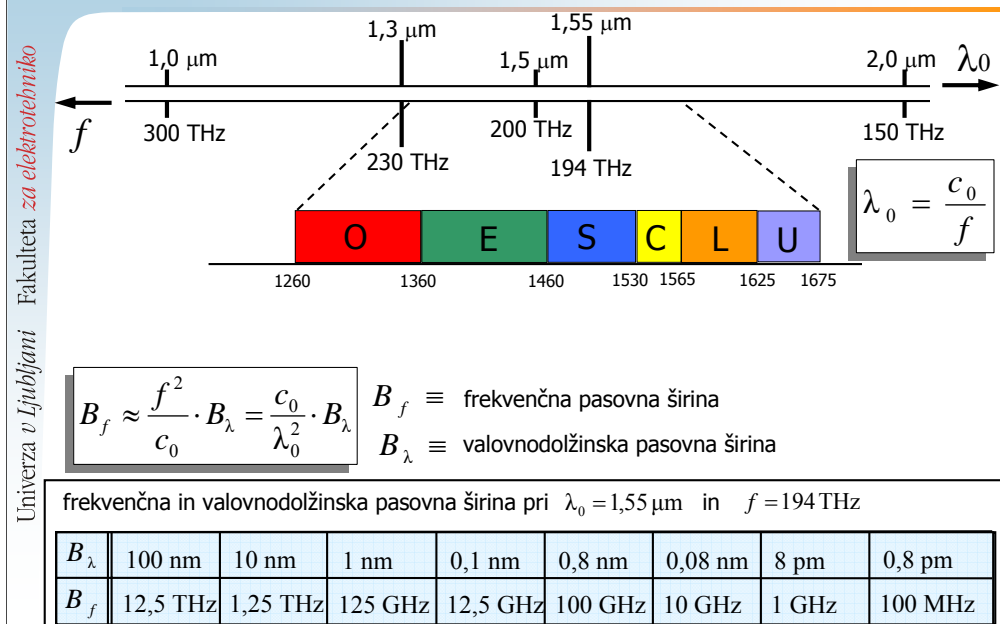


	bakrena parica, koaksialni vodnik	optično vlakno
izgube	velike	majhne
frekvenčni pas	majhen	velik
občutljivost na EM motnje	velika	neobčutljivost
galvanska ločitev	v posebnih primerih	vedno
komunikacijska oprema	zahtevnejša	enostavna
cena	cenejša	dražja

Pred drugimi vrstami komunikacij imajo optične komunikacije vsaj tri velike sistemske prednosti, zaradi katerih izrivajo druge tekmece (klasično bakreno parico in koaksialni vod) na področju fiksnih 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 (angl. Bit Error Rate – BER).
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.
4. **Galvanska ločitev** je pri uporabi optičnega vlakna naravna lastnost, saj je optično vlakno dielektrični izolator.
5. **Komunikacijska oprema** je bila do nedavnega za bakrene tekmece mnogo cenejša kot za optična omrežja, vendar se danes zaradi masovne uporabe vlakna v dostopovnem omrežju stvari spreminjajo. Komunikacijska oprema, ki jo danes uporabljajo bakreni sotekmeci, je mnogo bolj kompleksa kot optična komunikacijska oprema. 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.

Spekter optičnih komunikacij



Svetloba je elektromagnetno valovanje v mikrometerskem valovnem področju. Vidni del svetlobnega spektra obsega oktavno valvno 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 valvno 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.

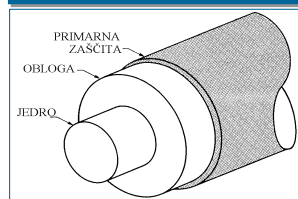
Omenjene valvne dolžine veljajo zgolj za prazen prostor in v približku tudi za zrak, v steklu pa ne veljajo več, zato je bolje uporabljati enoveljavno določeno frekvenčno skalo. Preslikava iz valvne dolžine v frekvenco poteka preko svetlobne hitrosti, ki znaša 300 milijonov m/s.

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.

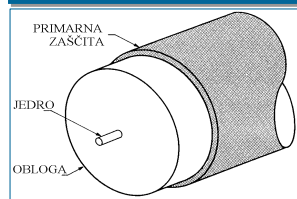
Tipi optičnih vlaken



MNORODOVNO



ENORODOVNO



jedro	50 μm (62,5 μm) $\pm 3 \mu\text{m}$	9 μm
obloga	125 μm	125 μm
zaščita	250 μm	250 μm
ITU-T standard	G.651	G.652, G.653, G.654, G.655, G.656, G.657
ISO razred:	OM1 (62,5/125), OM2 (50 ali 62,5/125), OM3 (50/125), OM4 "Optical Multimode"	ISO razred OS1, OS2 (9/125) "Optical Singlemode"

Optična vlakna uporabljamo kot dielektrične valovode. Ker je valovna dolžina svetlobe zelo majhna, so zelo majhne tudi prečne izmere ustreznih valvodov. 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 zaščiteni 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.

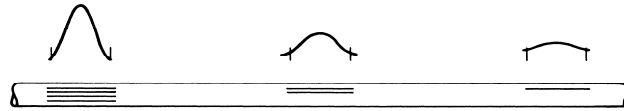
V osnovi poznamo dva različna tipa vlaken: enorodovno in mnogorodovno vlakno.

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.

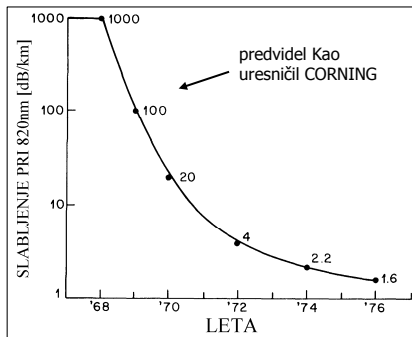
Pri mnogorodovnem vlaknu je premer jedra skoraj polovica celotnega premera in znaša 50 μm ali 62,5 μm . Dovoljuje širjenje nekaj sto rodovom svetlobnega valovanja. Večja velikost jedra omogoča lažje spajanje vlaken in usmerjanje svetlobe iz virov (LED, VCSEL, laser,...). Čeprav se uporaba mnogorodovnega 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.

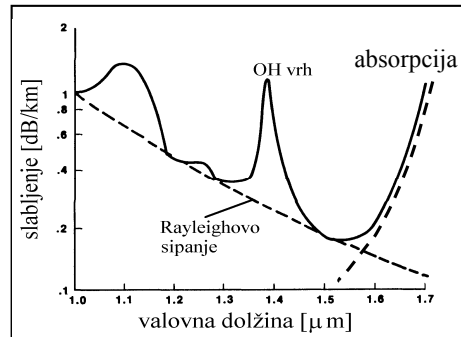
Slabljenje optičnega vlakna



zgodovinski pregled



slabljenje Si vlakna



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.

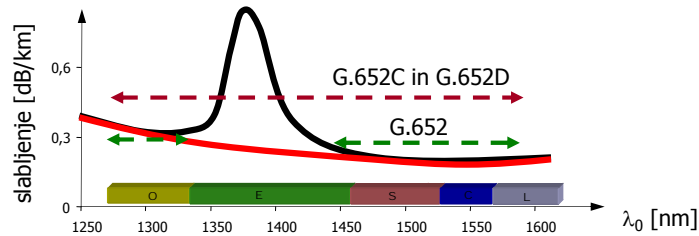
V optičnem vlaknu sta prisotna dva mehanizma, ki povzročata slabljenje:

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

Izboljšave standardnega enorodovnega vlakna – G.652



- Odstranitev vodnega vrha pri 1400 nm ter dolgoročna stabilizacija vlakna v smislu OH absorpcije (omogočitev popolnega CWDM) - ITU G.652C in G.652D.



valovna dolžina [nm]	največje slabljenje [dB/km]	
	ISO OS1	ISO OS2
1310	1,0	0,4
1383	ni določeno	0,4
1550	1,0	0,4

Poleg Rayleighovega sipanja in IR absorpcije povzročajo slabljenje v optičnem vlaknu tudi Hidroksidni (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 (ISO razred OS2).

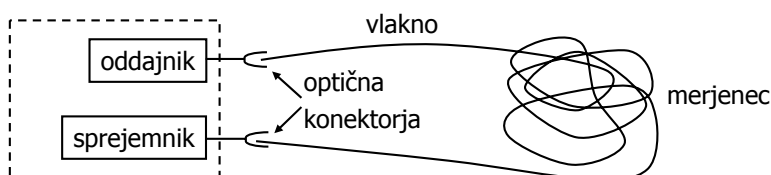
Minimalno slabljenje optičnega vlakna nastopi pri valovni dolžini 1550 nm in to je tudi razlog za nastanek tretjega spektralnega okna v optičnih komunikacijah.

Pri merjenju slabljenja optičnega vlakna si v praksi 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.

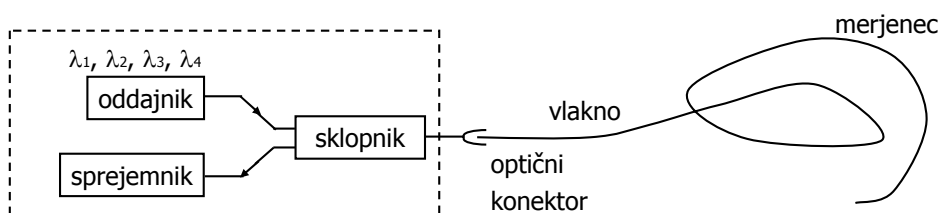
Merjenje slabljenja optičnega vlakna



■ izvor in merilnik moči



■ reflektometerska meritev v časovnem prostoru



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 vkopanem 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 konektorskih 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.

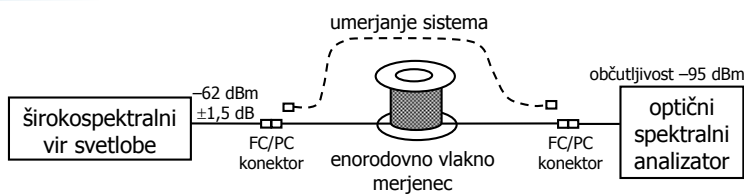
V reflektometer v časovnem prostoru zato vgradimo laser s čimvečjo izhodno močjo, vendar je ta omejena s konstrukcijo polprevodniškega laserja in nastopom nelinearnih pojavov v samem vlaknu pri močeh 10 do 100 mW.

Pri določanju dometa ne smemo pozabiti niti na izgube v smernem sklopniku. Ker je smerni sklopnik recipročen sestavni del, znašajo te izgube najmanj 6 dB (3 dB na oddaji in še 3dB na sprejemu).

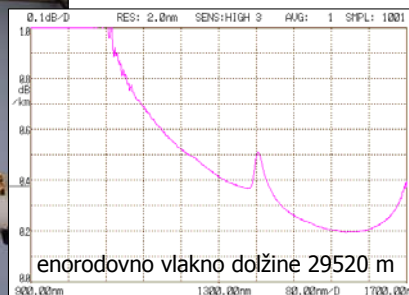
Merjenje slabljenja optičnega vlakna



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



spektralni potek slabljenja optičnega enorodovnega vlakna



Standard G.650 priporoča za merjenje slabljenja optičnega vlakna merilno metodo pri kateri moramo imeti oba konca vlakna na istem mestu. Takoj vodimo, da je tovrstna metoda bolj primerna za laboratorijsko testiranje optičnih elementov ali vlakna kot pa za terenske meritve že položenega vlakna.

Za to metodo obstajata dve izvedbi merilne vezave, pri čemer ena uporablja nastavljen laser in kalibriran merilnik moči, druga pa širokospektralni vir svetlobe in optični spektralni analizator. V obeh primerih dobimo kot rezultat spektralno odvisnost slabljenja optičnega vlakna.

V primeru, ko imamo znano dolžino optičnega vlakna, lahko izrišemo graf odvisnosti slabljenja na kilometer dolžine v odvisnosti od valovne dolžine, kot prikazuje zgornja slika.

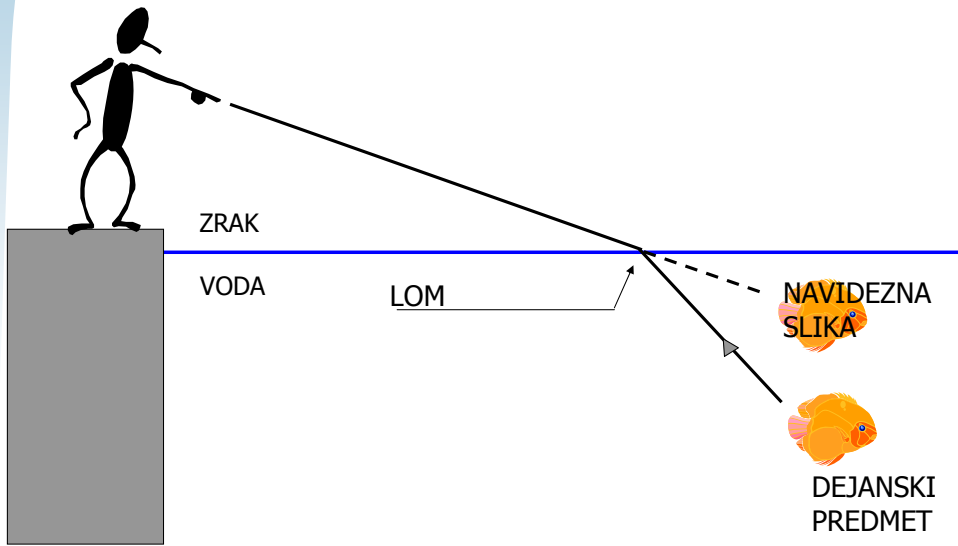
Pred začetkom meritve je nujna kalibracija, ki jo izvedemo tako, da svetlobni izvor povežemo direktno na detektor. Na ta način odpravimo vse morebitne vplive slabljenja priključnih vrvic ter spremembo izhodne moči optičnega izvora preko celotnega spektralnega merilnega področja.

Lom svetlobe



Slide 12/48

Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko

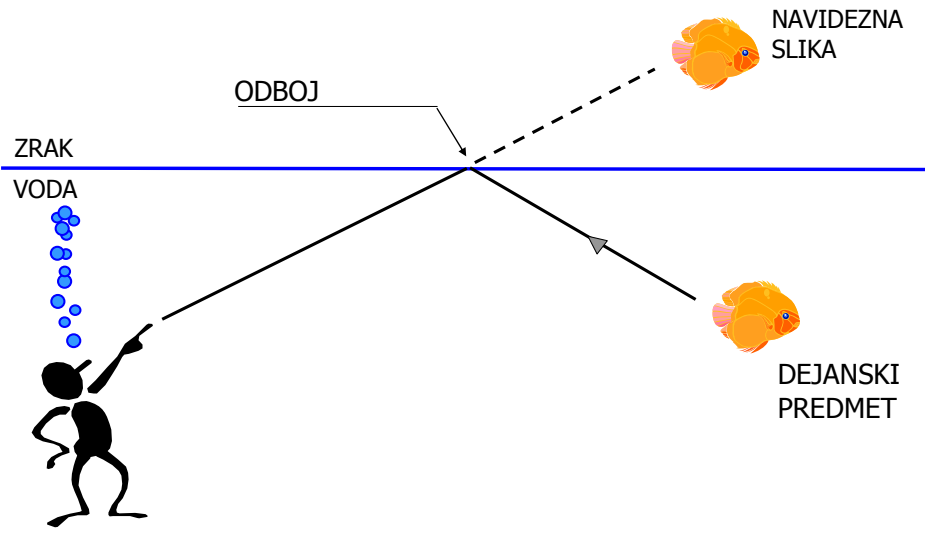


Odboj svetlobe

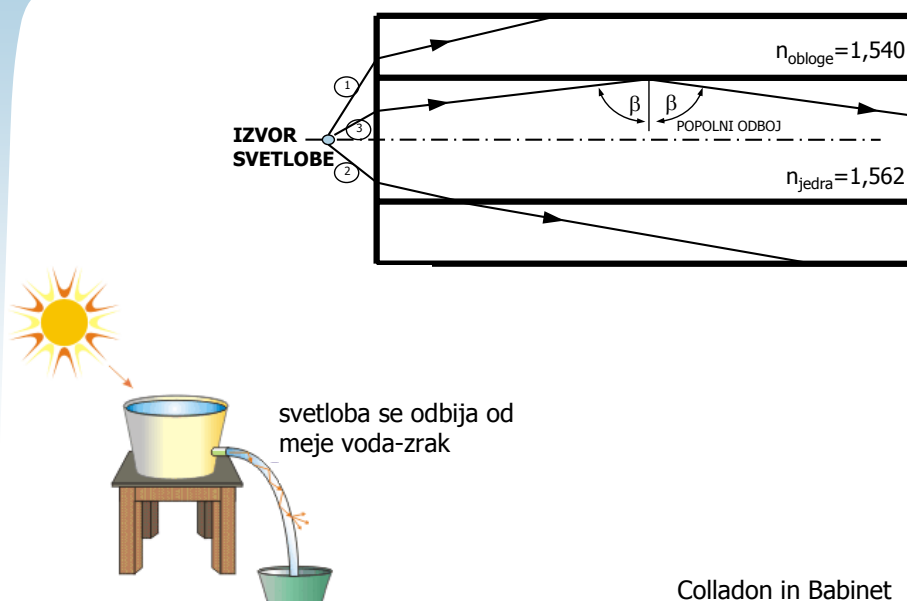


Slide 13/48

Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



Vstop in vodenje svetlobe v vlaknu



Colladon in Babinet

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. Vsaj pri mnogorodovnem optičnem vlaknu si lahko pomagamo z žarkovno optiko, saj je jedro samega vlakna za približno petdesetkrat večje od valovne dolžine uporabljenih svetlobe.

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 snovi je na ta način tudi definiran. 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.

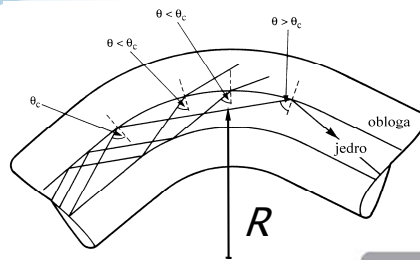
Žarek št. 3. vpade v jedro pod bolj strmim kotom. Potem, ko se lomi na meji zrak-steklo, prileti na mejo jedro-obloga. Ker je vpadni kot (β) tega žarka precej velik, pride do totalnega odboja in žarek se v celoti odbije nazaj v jedro. Na ta način je žarek ujet v jedro vlakna in po cik-cak metodi potuje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

Slabljenje na krivinah vlakna

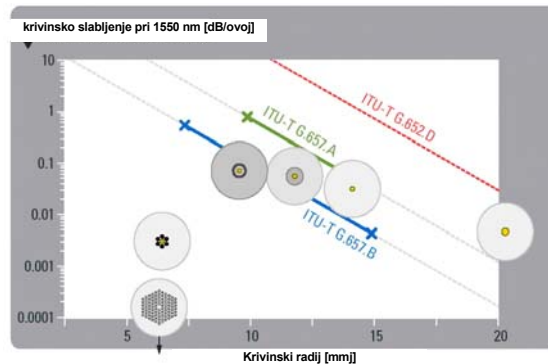


Slide 14/48

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



- vlakno G.657.A je kompatibilno z G.652
- vlakno G.657.B ni kompatibilno z G.652



Na prenosni poti se lahko pojavi še slabljenje zaradi krivin optičnega vlakna. Pri vlaknu ukrivljenem za krivinski radij R prihaja pri močnih ukrivitvah 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_2 in obloge n_1 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.

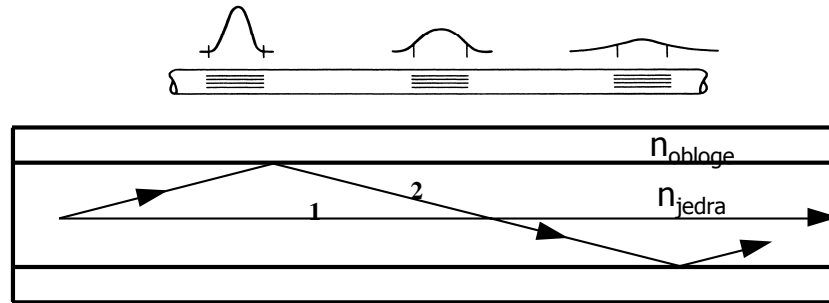
Pri vgradnji optičnih vlaken moramo zato vedno paziti, da vlaken mehansko ne obremenimo na tak način, ki bi povzročal krivine z majhnim polmerom. Krivine ne vnašajo samo slabljenja, temveč povečujejo polarizacijsko disperzijo, ki je pomemben omejevalni dejavnik pri prenosnih sistemih z visoko bitno hitrostjo.

Standardno enorodovno vlakno je znano pod ITU-T oznako G.652, vendar se za optična dostopovna omrežja priporoča vlakno G.657. Standard G.657 ima dve podskupini G.657A in G.657B. V obeh primerih je to vlakno dokaj odporno na krivinsko slabljenje, saj zanaša dovoljen krivinski polmer pri G.657A 10 mm, v primeru G.657B pa je dovoljen krivinski polmer še manjši in znaša 7,5 mm.

G.657A vlakno je primerno za prenos v O, E, S, C in L pasu (od 1260 nm do 1625 nm). Vlakna v tej kategoriji imajo enake prenosne in medsebojno povezovalne lastnosti kot G.652D vlakna, le da imajo izboljšano upogibno slabljenje (do polmera 10 mm).

Vlakno G.657B je primerno za prenos pri 1310 nm, 1550 nm in 1625 nm. Ta vlakna zahtevajo drugačno varjenje in imajo drugačne povezovalne lastnosti kot vlakno G.652. Vlakna G.657B so primerna za vgradnjo v stavbe, saj dovoljujejo zelo majhen upogibni polmer (do 7,5 mm)

Razširitev impulza – DISPERSZIJA



vlakno dolžine 100 km \rightarrow $t_2 - t_1 \approx 5 \mu\text{s}$ \rightarrow zmogljivost zveze < 200 kbit/s

ISO 11801 razredi: OM1 (62,5/125)	200 MHz·km @ 850 nm	500 MHz·km @ 1300 nm
OM2 (50 ali 62,5/125)	500 MHz·km @ 850 nm	500 MHz·km @ 1300 nm
OM3 (50/125)	1500 MHz·km @ 850 nm	500 MHz·km @ 1300 nm
OM4 (50/125)	4700 MHz·km @ 850 nm	500 MHz·km @ 1300 nm

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 lepo 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.

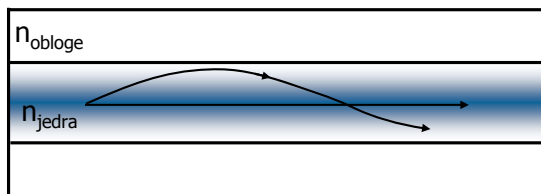
Snovno-geometrijski parametri mnogorodovnega optičnega vlakna dopuščajo, da se v vlaknu širi mnogo rodov (žarkov). Vsak rod ima svojo fazno hitrost, kar si lahko razlagamo z različno dolžino poti.

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 → $t_2 - t_1 \approx 50$ ns → zmogljivost zveze < 20 Mbit/s

ISO 11801 razreda: **OM3** (50/125) 2000 MHz·km

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 μm ali 62,5 μm), 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 parabolčni profil lomnega količnika. Za parabolčni 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 zeleno optično vlakno.

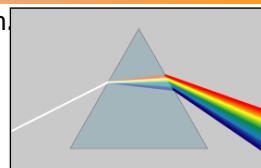
Mnogorodovna disperzija je parameter optičnega vlakna, ki je v veliki meri odvisen od natančnosti pri izdelavi vlakna. Kontrola končnega izdelka zato vključuje meritev mnogorodovne disperzije v obliki frekvenčne pasovne širine.

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

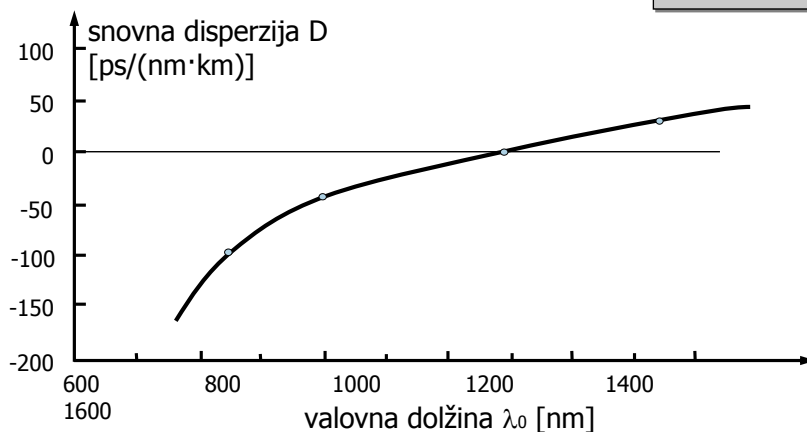
Snovna disperzija SiO₂ vlakna



Lomni količnik stekla je frekvenčno odvisen.



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



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).

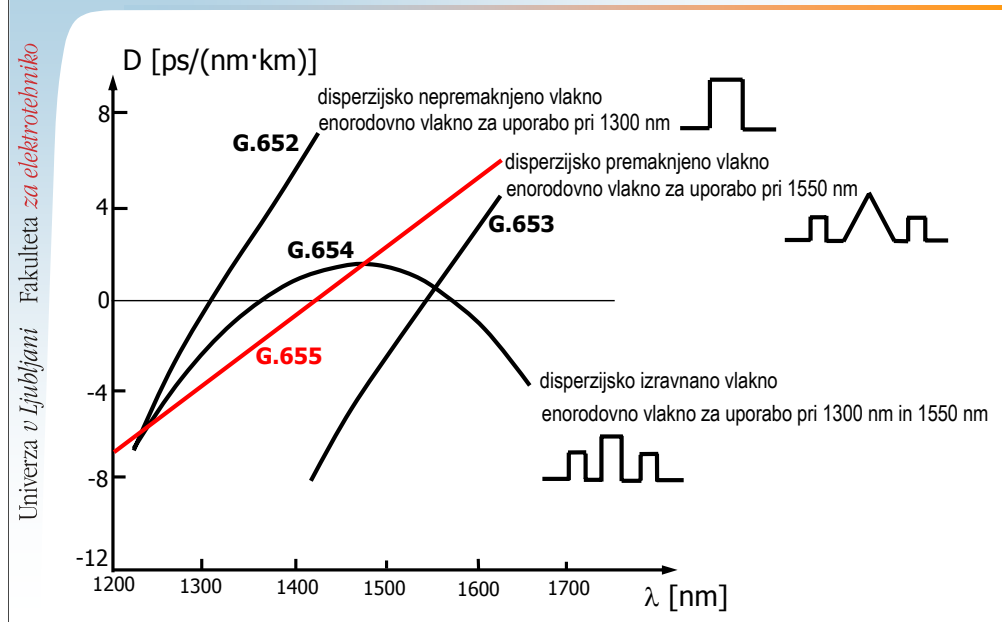
Snovna disperzija je sicer pojav, ki se ga lahko tudi koristno izrablja za razločevanje posameznih komponent svetlobe v prizmi. Gre torej za pojav, ko ima svetloba pri potovanju skozi steklo različne hitrosti glede na njeno valovno dolžino. To je posledica tega, da je lomni količnik stekla frekvenčno 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, G.654 in G.655



Snovna disperzija je nič pri valovni dolžini ≈ 1300 nm. Z obliko lomnega lika pri enorodovnem optičnem vlaknu lahko vplivamo na disperzijske lastnosti valovoda. S seštevkem snovne in valovodne disperzije lahko dobimo vlakno s skorajda poljubno disperzijo. Na zgornji sliki so prikazani standardizirani tipi enorodovnega optičnega vlakna.

Običajno G.652 vlakno ima standardni premer jedra $9 \mu\text{m}$. Skupna valovna dolžina se ne premakne veliko in je še vedno blizu 1300 nm. To vlakno je bilo prvo enorodovno vlakno in se še danes najpogosteje uporablja.

Disperzijsko premaknjeno vlakno G.653 je znatno premaknjeno v desno. Minimalna disperzija tovrstnega vlakna je v okolici 1550 nm, kjer je slabljenje najmanjše. Pri G.654 vlaknu sta snovna in valovodna disperzija tako izenačeni, da dobimo disperzijsko izravnano optično vlakno. Disperzija je pri tem vlaknu minimalna v drugem in tretjem spektralnem oknu. Kasnejši razvoj optičnih sistemov je pokazal, da zaradi nastanka nezaželenih nelinearnih pojavov za komunikacijo ni najbolj idealno področje z minimalno disperzijo. Iz tega razloga se je polaganje optična vlakna tipa G.653 in G.654 opustilo.

Najnovejša je vlakno z oznako G.655, ki ima v področju delovanja manjšo pozitivno disperzijo (od 4 do 8 ps/(nm·km)). Dobijo se v raznih izvedbah strmine in efektivne površine jedra, ki sta na žalost premasorazmerna parametra.

Prispodoba kromatske disperzije



Slide 19/48

Tekači z različnimi kondicijskimi pripravljenostmi tečejo različno hitro, kot signali različnih valovnih dolžin potujejo različno hitro.

start



Kondicija je prispodoba za različne valovne dolžine v signalu.



cilj



Zakasnitve tekačev na ciljni črti so prispodobe za kromatsko disperzijo.

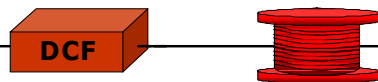
Kompensacija disperzije z DCF



Slide 20/48

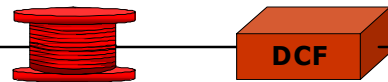
predkompensacija

prenosno vlakno



pokompensacija

prenosno vlakno



Skupna disperzija: $D_{sk} = D_{pr} + D_{DCF}$

Skupen naklon: $S_{sk} = S_{pr} + S_{DCF}$

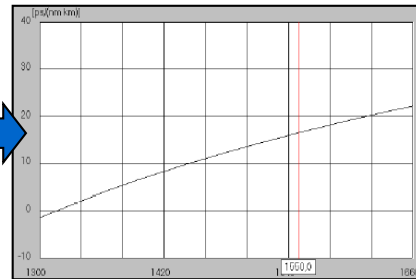
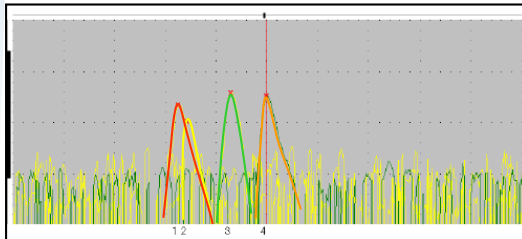
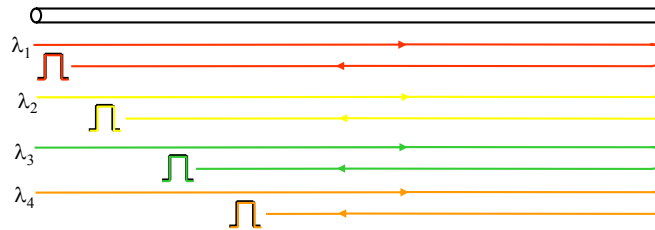
Da dosežemo popolno kompensacijo ($D_{sk} = 0$) znotraj širšega pasu, mora veljati tudi $S_{sk} = 0$.

κ prenosnega vlakna in vlakna za kompensacijo disperzije se morata ujemati znotraj celotnega ciljnega pasu valovnih dolžin (v nasprotnem primeru je možna popolna kompensacija le pri določeni valovni dolžini).

Meritev disperzije kot dodatna funkcija OTDR merilnika



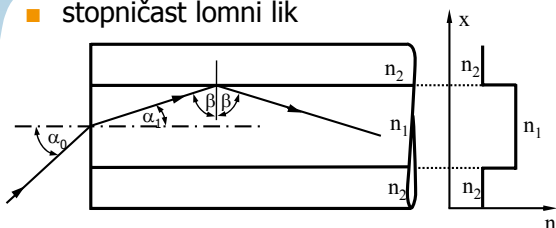
Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



Kadar disperzijo optičnega vlakna določamo preko meritve spektra skupinske zakasnitve, letega običajno izmerimo pri nekaj valovnih dolžinah. Nato poiščemo ustrezno funkcijo, ki se izmerjenim točkam po nekem kriteriju najbolj prilega. Za G.652 se uporablja tričlenska Sellmeierjeva funkcija.

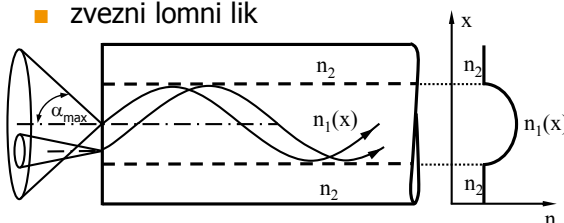
Numerična apertura (odprtina)

■ stopničast lomni lik



$$NA = \sin \alpha_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

■ zvezni lomni lik



$$NA = \sin \alpha_{\max} = \sqrt{n_{\max}^2 - n_2^2}$$

Vlakna z isto numerično odprtino se optično najboljše združujejo.

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.

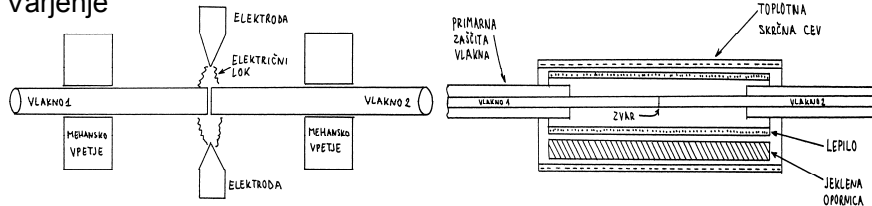
Gradientno optično vlakno ima običajno parabolični lomni lik. Numerična apertura je v tem primeru funkcija razdalje od osi vlakna in doseže največjo vrednost na sami osi vlakna. Kot podatek gradientnega vlakna se zato navaja premer jedra in maksimalna numerična apertura na osi vlakna. Tudi v primeru 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.

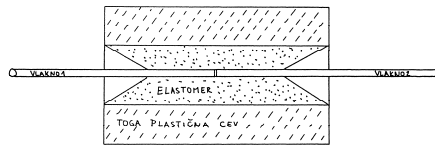
Spajanje optičnih vlaken (1)



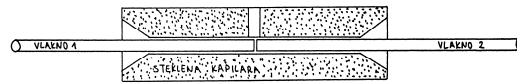
■ Varjenje



■ Skrči gumica (primerna za spajanje mnogorodovnega vlakna)



■ Steklena kapilara (primerna tudi za spajanje enorodovnega vlakna)



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

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 ($1\ \mu\text{m}$). 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 zmuce 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.

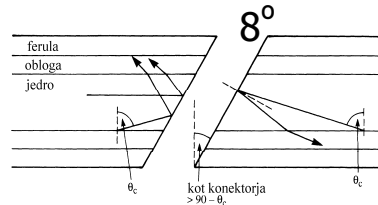
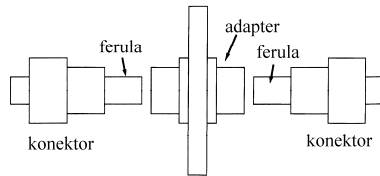
Prečni premik, vzdolžni razmik in zasuk sicer enakih vlaken lahko povzročijo nedopustno visoko stično slabljenje. Za prakso je predvsem pomembno, da je slabljenje vlakenskih spojk dovolj nizko zaradi velikega števila le-teh na dolžini vlakna.

Najboljša in trajna rešitev spajanja dveh vlaken je zvar. S sodobnimi varilnimi in merilnimi pripravami, ki omogočajo submikronsko nastavitve lege vlakna, je mogoče dobiti razmeroma nizko slabljenje spoja, manjše od $0,01\ \text{dB}$. 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 najbolj šibko 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	

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.

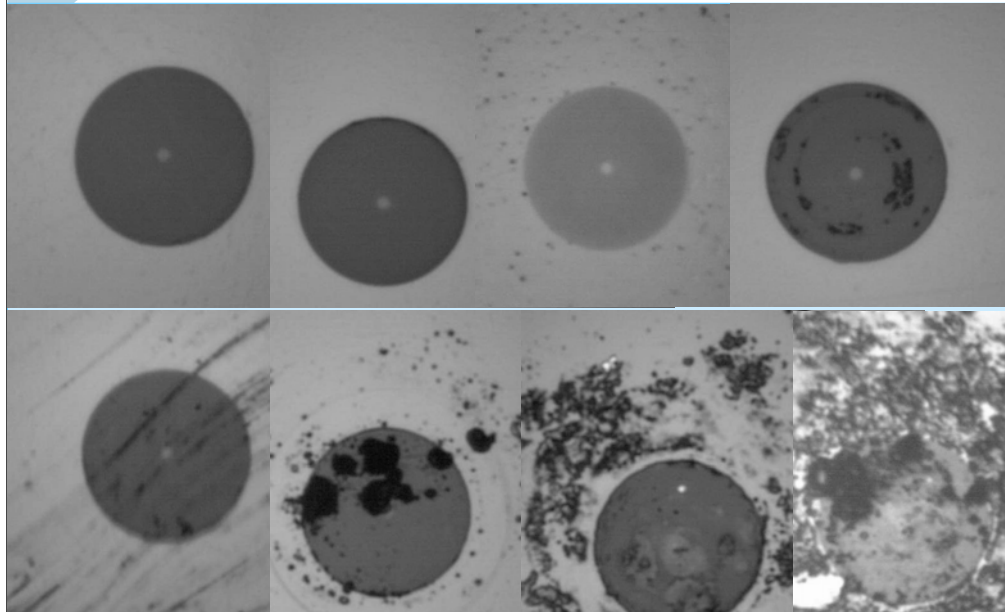
Po večini so vsi optični konektorji moškega spola, zaradi enostavnejšega čiščenja. Moški konektorji za medsebojno spajanje potrebujejo določene adapterje. Konektorji so po načinu spajanja lahko navojni (naprimer FC), bajonetni (promer ST) ali plastični zatični (naprimer SC).

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 μm in zunanjim premerom 2.500 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 dB tudi pri spajanju zahtevnih enorodovnih vlaken z jedrom manjšim od 10 μm . 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.

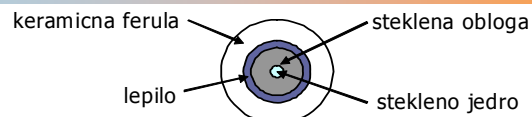
Primeri poškodovanih in umazanih optičnih konektorjev



Vidne poškodbe optičnih konektorjev



Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko



				zavrtnjen
oškrljeno jedro	zlomljeno vlakno	pocena celna stran	globoko popraskan	
praska	razbitki	popraskan zunaj mej	packe lepila	sprejemljiv
znotraj omejitev	znotraj omejitev	znotraj omejitev	popoln	

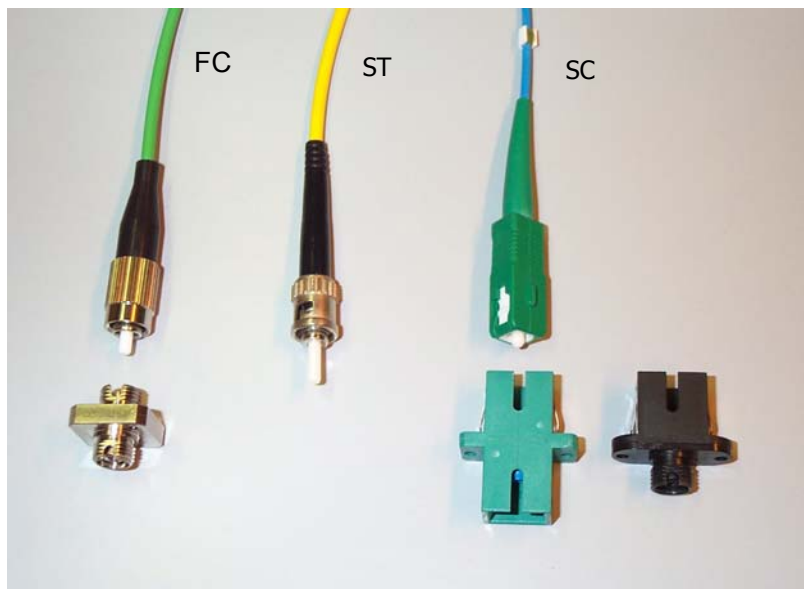
Najpogostejši optični konektorji



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko

konektorji

adapterji



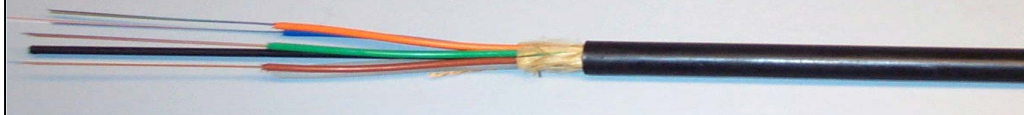
Opticni kabli



samonosilni kabli brez tesne zaščite



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



Ribbon kabli

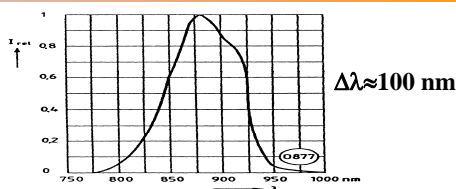
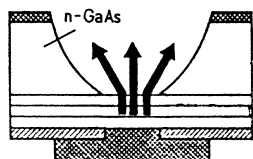


Viri v optičnih komunikacijah

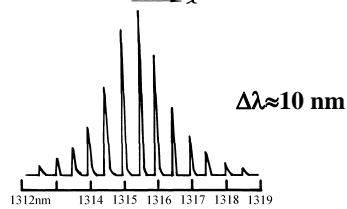
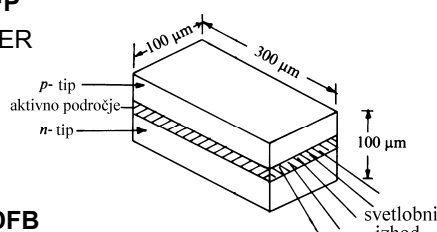


Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko

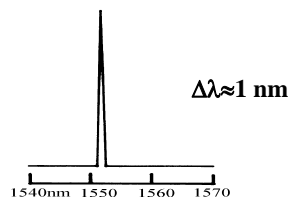
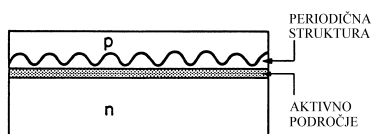
LED



FP LASER



DFB LASER



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 $\lambda \approx 100$ 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.

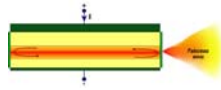
Bistveni element laserske diode je resonator, ki opravlja nalogo povratnega sklopa, potrebnega za vzdrževanje oscilacij, in je hkrati frekvenčno selektiven element, potreben za dodatno ožjenje frekvenčnega spektra stimulirane emisije. Po načinu, kako v resonatorju dosegamo resonančni pojav in vzdržujemo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

Primerjava proizvodnih stroškov laserjev

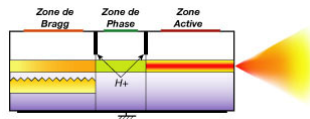


FP laser



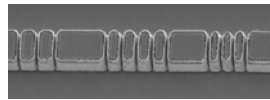
3 EUR

DFB laser



30 EUR

Super FP

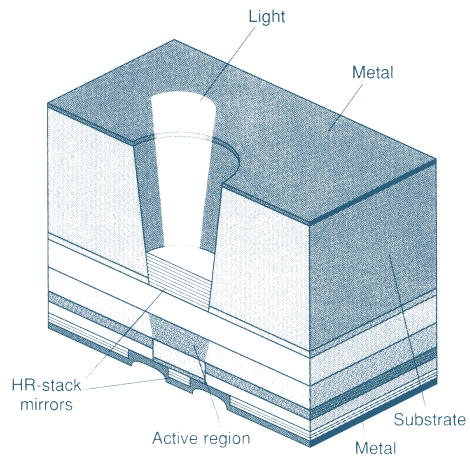
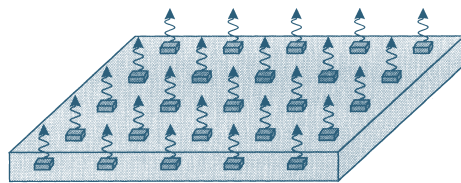
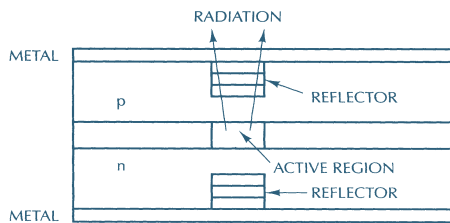


< 10 EUR

- ni potreben izolator
- ozek spekter



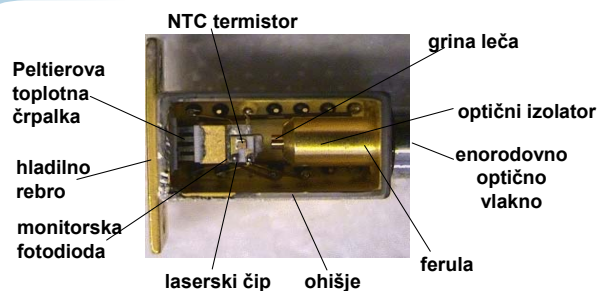
VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Diode) Polprevodniški laserji z vertikalno resonančno votlino



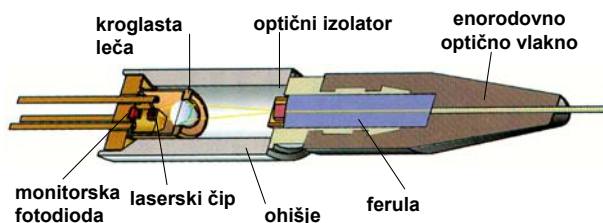
Laserska dioda za gosti WDM in preprosti WDM



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



DFB laserska dioda za DWDM



DFB laserska dioda za CWDM

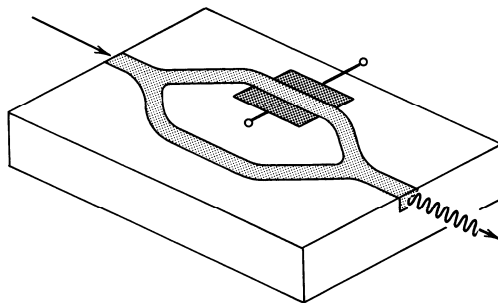
V zahtevnejših optičnih povezavah prevladujejo laserji s porazdeljeno povratno vezavo (DFB – distributed-feedback), katere odlikuje zelo ozek spekter. Optične zveze izdelane z takimi laserji so precej manj občutljive na disperzijo.

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**



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.

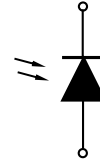
Smiselna tehnična rešitev je zunanja modulacija. Pri tem se uporablja ločen modulator, tako da dela DFB laser v stabilnem režimu. Od vseh znanih fizikalnih pojavov, s pomočjo katerih lahko moduliramo svetlobni žarek, ima dovolj hiter odziv in dovolj veliko občutljivost za električne krmilne signale le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

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.

- PIN fotodioda
- APD fotodioda

- Si, Ge, InGaAs

- nizkoimpedančni
- integracijski
- transimpedančni



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.

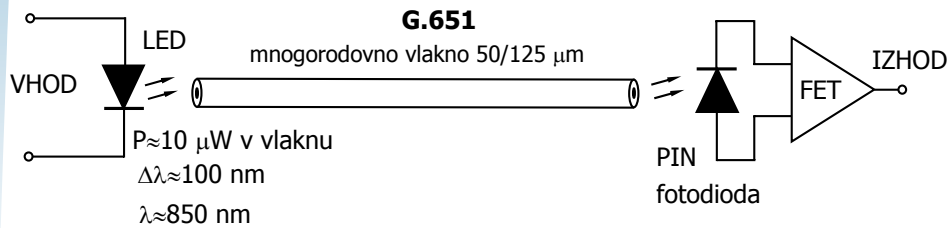
Vse fotodiode za optične komunikacije se uporabljajo v zapornem režimu delovanja, kar pomeni, da imajo razmeroma debelo zaporno plast. Skoraj vsak foton vpadne svetlobe se v zaporni plasti pretvori v par elektron/vrzel in tako prispeva k električnemu toku, ki je izhodni signal fotodiode. Sodobne fotodiode 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).

Optična vlakenska zveza z LED ali VCSEL oddajnikom



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko

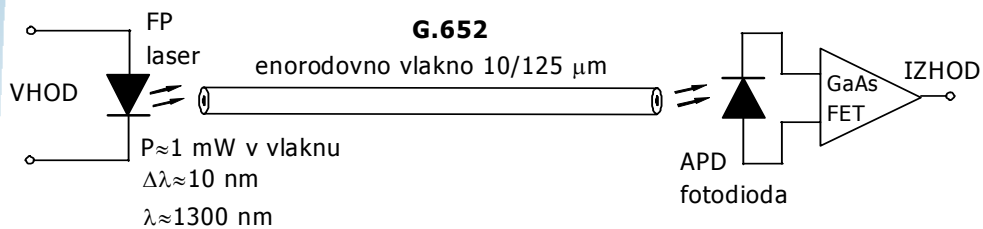


- domet $\approx 1 \text{ km}$
- zmogljivost = 100 Mbit/s

Optična vlakenska zveza s FP laserjem (FTTx)



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko

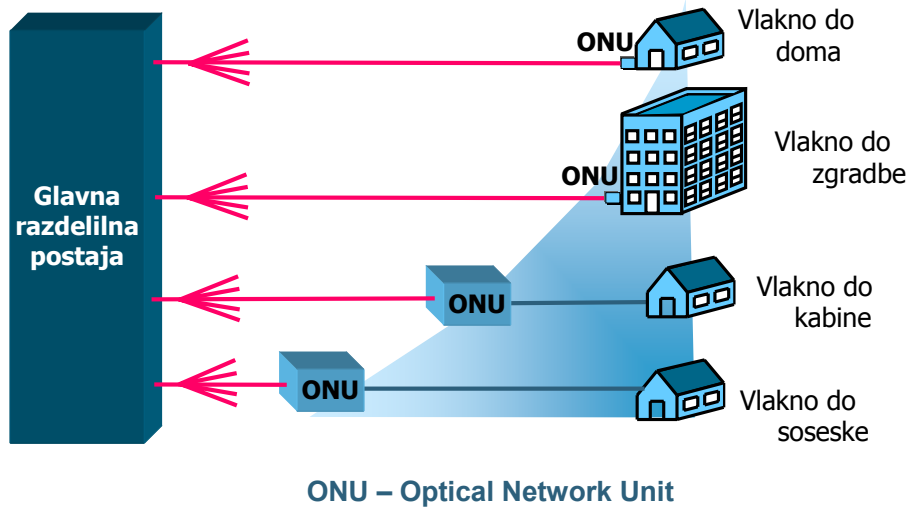


- domet $\approx 100 \text{ km}$
- zmogljivost = 1 Gbit/s

FTTx (Fiber To The x) tehnologija



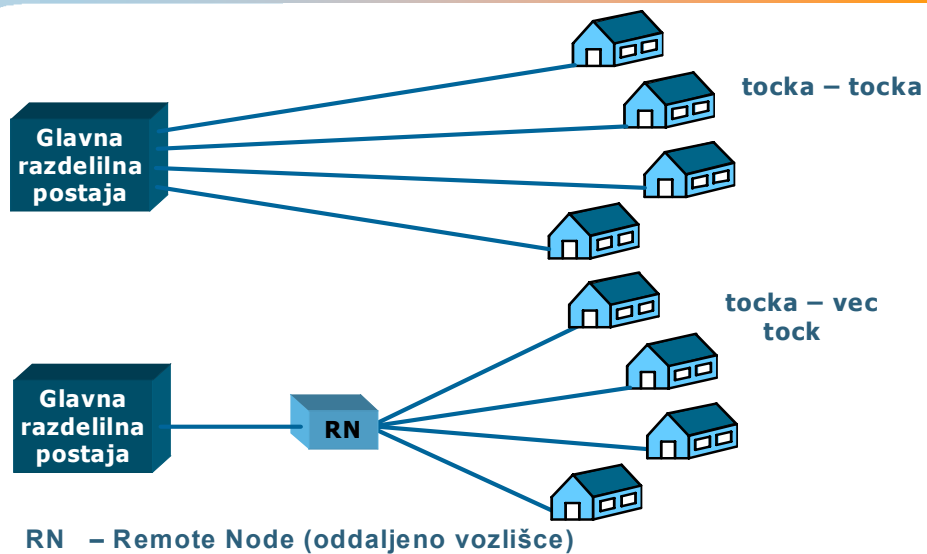
Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



Topologija optičnega dostopnega omrežja



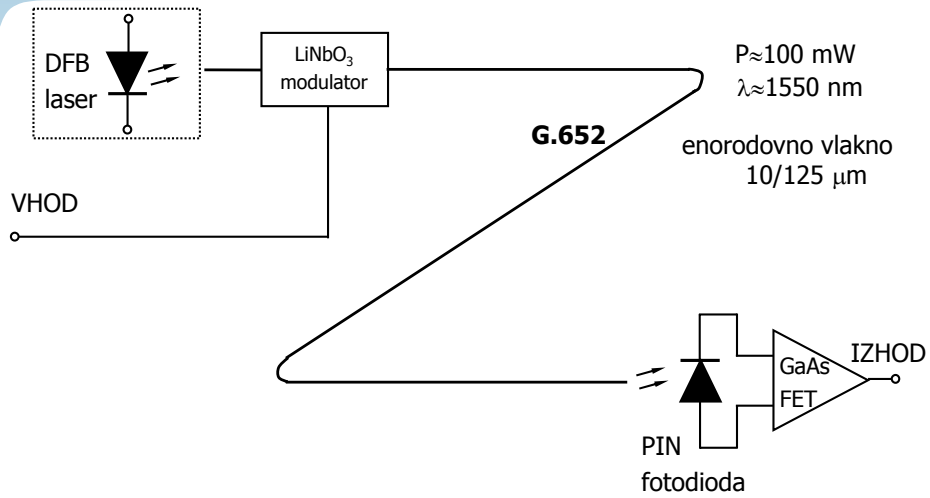
Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



Optična vlakenska zveza z zunanjo modulacijo



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko

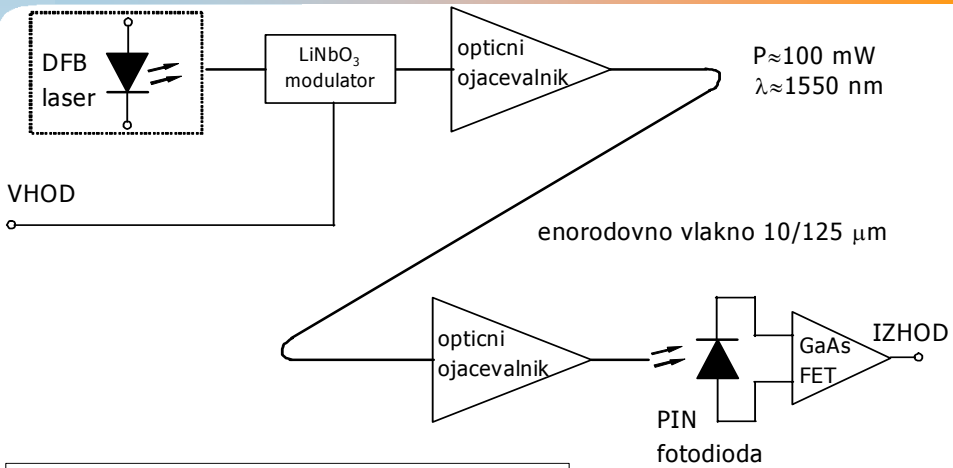


- domet $\approx 100 \text{ km}$
- zmogljivost = 2,5 Gbit/s do 40 Gbit/s

Optična vlakenska zveza z optičnimi ojačevalniki



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



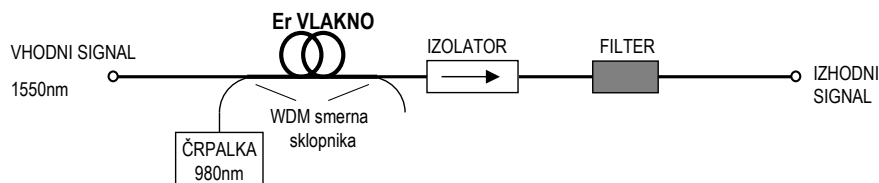
- domet $\approx 100 \text{ km}$ med optičnimi ojačevalniki
- zmogljivost = 2,5 Gbit/s do 40 Gbit/s

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



LASTNOSTI:

Širina spektra: 40 nm
Ojačenje > 20 dB



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.

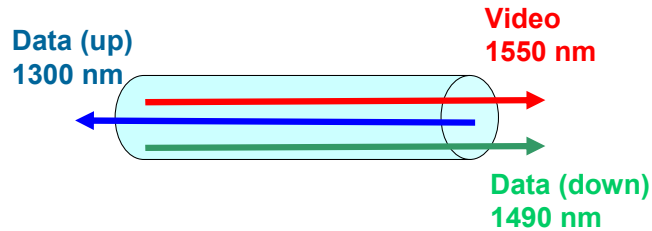
Ključni sestavni del Erbijevega vlakenskega ojačevalnika je vlakno dolžine približno 10m, ki ima zelo tanko jedro in je obogaten z ioni Er^{+} (snov iz skupine elementov redkih zemelj). Poleg erbijevega vlakna je EDFA sestavljen še iz naslednjih elementov:

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

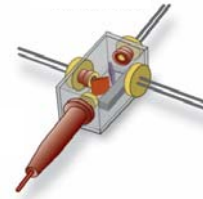
Energetske nivoje erbijevih ionov se črpa s svetlobo črpalnega signala. Kot črpalna se zlasti uporablja optični vir na valovni dolžini 980 nm ali 1479 nm. Pri prehodu delcev iz metastabilnega na osnovni nivo nastane stimulirana emisija (signal) in spontana emisija (šum) svetlobe v področju valovne dolžine 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.

Izbira valovnih dolžin

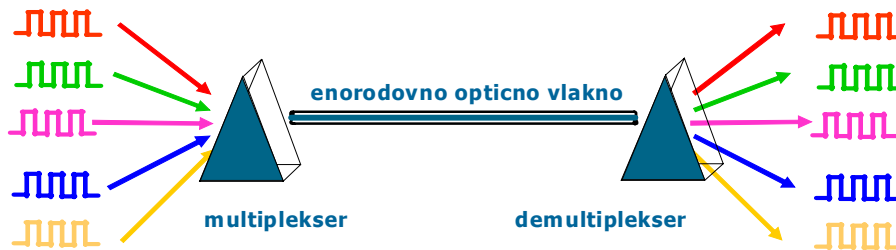
- Za distribucijo videa se uporablja 1550 nm (EDFA, S/N, deljenje)
- Za podatke k uporabniku se uporablja 1490 nm (laser z veliko močjo)
- Za podatke od uporabnika se uporablja 1300 nm (poceni FP laser)



Prostozračni triplekser



WDM tehnologija (Wavelength Division Multiplexing)



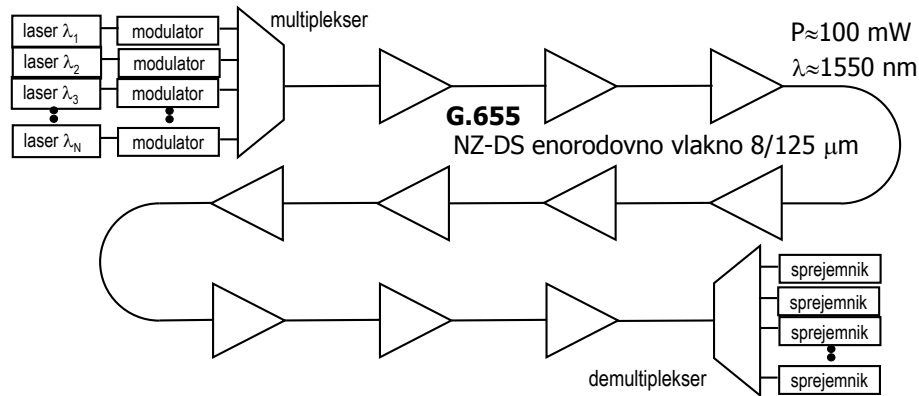
Valvno razvrščanje omogoča **dodatna** povečanja prenosne kapacitete posameznega vlakna čez meje časovnega multipleksiranja.

Zveza z valovno-dolžinskim razvrščanjem



Slide 36/48

Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



- doomet ≈ 80 km med optičnimi ojačevalniki
- zmogljivost = $N \cdot 2,5 \text{ Gbit/s} \div N \cdot 10 \text{ Gbit/s} \Rightarrow \text{Tbit/s}$

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

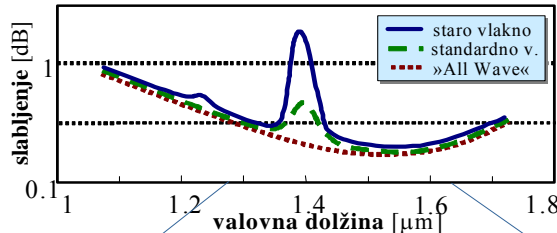
Spekter preprostega WDM-a



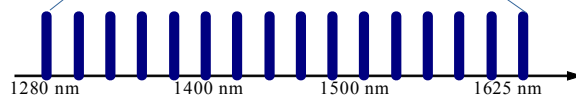
Slide 39/48

Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko

optični spekter



- < 0,40 dB/km @ 400 nm
- < 0,30 dB/km @ 300 nm
- < 0,25 dB/km @ 200 nm



- manjše število valovnih dolžin (do 16 kanalov)
- uporabljen širši optični spekter (350 nm)

- preprostejši laserski cipi
- nepotrebna temperaturna kontrola
- cenejši filtri in delilniki

Hvala za pozornost !



Univerza v Ljubljani Fakulteta za elektrotehniko



bostjan.batagelj@fe.uni-lj.si

Laboratorij *za sevanje in optiko*
<http://antena.fe.uni-lj.si>

