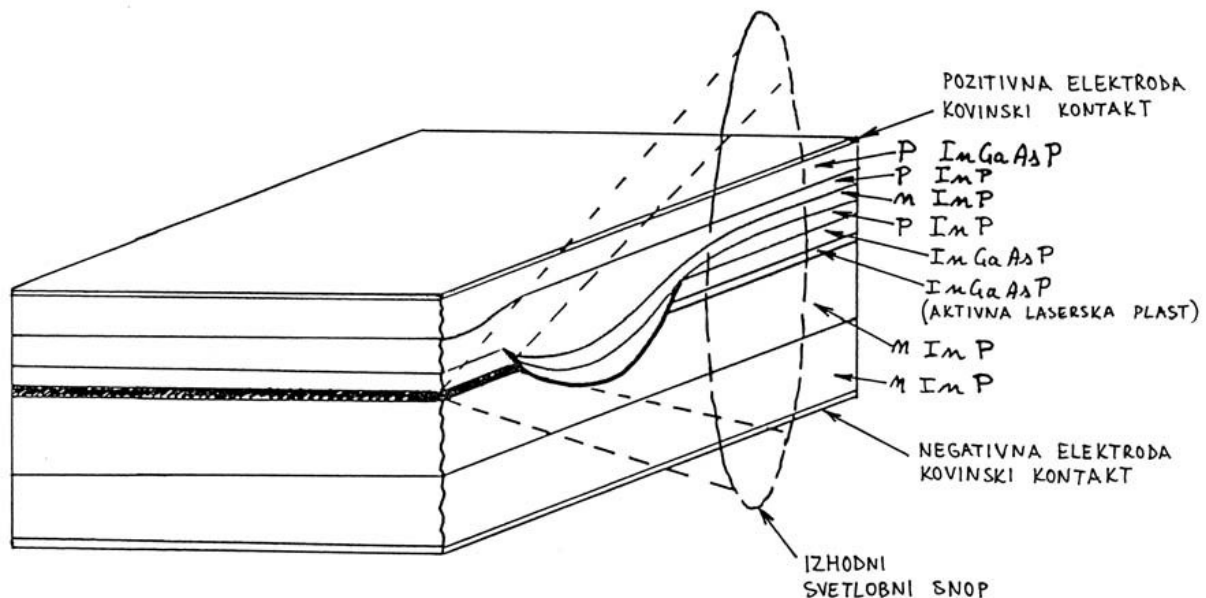


Polprevodniški laser

Osnovni svetlobni izvori za vse vrste optičnih komunikacij so polprevodniške svetleče diode in laserji. Vsi polprevodniški izvori za optične komunikacije sevajo v bližnjem infrardečem področju. Tehnološko je najlažje izdelati GaAs svetleče diode in GaAlAs laserje za področje valovnih dolžin od 800nm do 900nm. Ker steklena optična vlakna dosegajo nižje slabljenje in manjše popačenje signalov na daljših valovnih dolžinah, so v ta namen razvili tehnološko zahtevnejše svetleče diode in laserje iz kombiniranih polprevodnikov InGaAsP za valovne dolžine 1300nm in 1550nm. Prerez komunikacijske laserske diode za 1300nm (ali 1550nm) je prikazan na sliki 14.1. Za razliko od običajne svetleče diode je treba izpolniti pri laserski diodi še nekaj pogojev, da naprava deluje kot laser. Za doseganje inverzne naseljenosti energijskih nivojev so potrebne velike gostote toka v polprevodniku. Aktivno področje, ki je sposobno ojačevati svetlobo, se mora hkrati obnašati kot optični valovod. Da hkrati zadosti vsem pogojem, je laserska dioda izdelana kot heterostruktura iz različnih polprevodnikov.

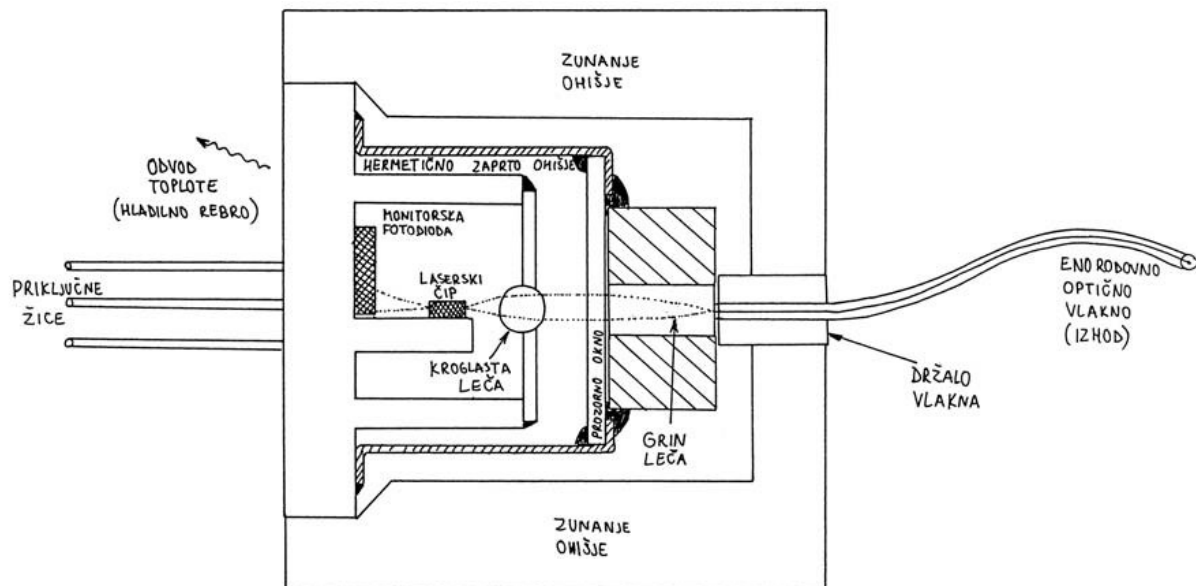


Slika 14.1. – Prerez 1300nm laserske diode.

Presek aktivne laserske plasti je zelo majhen: laserska plast je trak debeline komaj $0.5\mu\text{m}$, širine $3\mu\text{m}$ do $5\mu\text{m}$ in dolžine nekaj $100\mu\text{m}$. Ker imajo uporabljeni polprevodniki visok lomni količnik (okoli 3.5), za povratno vezavo zadošča že sam odboj svetlobe na obeh koncih laserskega čipa. Glede na vrsto rezonatorja imenujemo takšne laserje tudi Fabry-Perot (FP) laserji. Ker ima takšen laser dve enaki zrcali na obeh koncih čipa, se celotna proizvedena svetlobna moč deli na dva snopa, ki izhajata vsak na svojem koncu laserskega čipa.

Za razliko od plinskih (HeNe, Ar-ioni) laserjev imajo polprevodniški laserji razmeroma dober izkoristek pretvorbe električne energije v svetlobno, ki lahko pri nekaterih vrstah laserjev preseže 20%. Polprevodniške laserje tudi enostavno moduliramo z elektičnim tokom, ki teče skozi lasersko diodo, vse do frekvenc nekaj GHz. Podobno kot plinski laserji pa tudi polprevodniški FP laserji nihajo hkrati na več rezonančnih črtah in pri amplitudni modulaciji preskakujejo med različnimi načini nihanja. Zaradi manjših dimenzij rezonatorja je frekvenčni spekter svetlobe dosti širši kot pa pri plinskih laserjih. Za praktično uporabo v optičnih komunikacijah se polprevodniški laserji

vgrajujejo v laserske module, ki poleg laserske diode vsebujejo vsaj še monitorsko fotodiodo in leče za prilagoditev laserskega izhoda na optično vlakno, kot je to prikazano na sliki 14.2. Ker ima aktivna plast v laserju obliko traku, izhodni svetlobni snop ni rotacijsko simetričen in zahteva komplicirano optiko iz dveh leč za prilagoditev na optično vlakno. Svetloba, ki izhaja na drugem koncu laserskega čipa je seveda izgubljena, zato jo delno izkoristi le monitorska fotodioda.



Prerez polprevodniškega laserskega modula.

Pri sodobnih laserjih je pragovni tok nižji in znaša tudi do 5mA. Pragovni tok se veča z višanjem temperature. Za običajne polprevodnike je nevarna povišana temperatura. Pri znižanju temperature pri istem toku laser odda večjo optično moč in lahko pride do zažiga zrcal in s tem uničenje laserja. Za polprevodniške laserje je torej nevarnejša nižja temperatura.

Akustooptični modulator

Akustooptika je področje na meji med akustiko in optiko, ki temelji na akustooptičnem pojavu v snovi, torej na interakciji med zvokom ter svetlobo v snovi.

Pri širjenju akustičnega vala se v snovi pojavljajo napetosti, ki se odražajo kot zgoščine (višji lomni količnik) in razredčine (nižji lomni količnik). Zvočni valovi povzročajo uklon svetlobe v snovi.

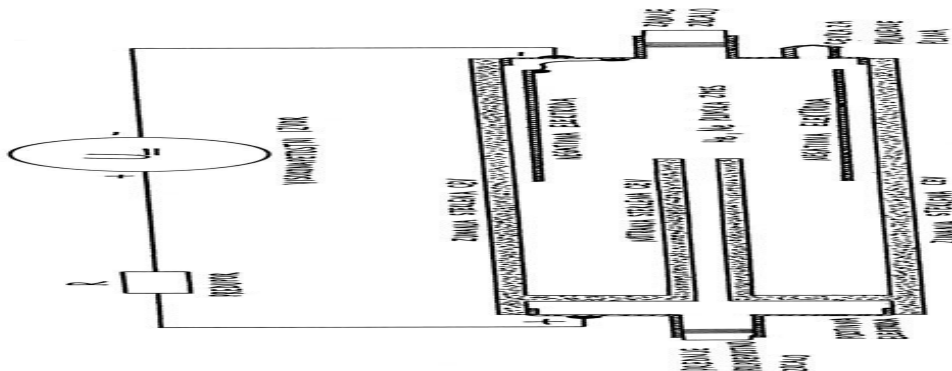
Interakcija med zvočnim in svetlobnim valovanjem nastane zaradi krajevno-časovne odvisnosti lomnega količnika, ki jo povzroča zvok in ki lahko bistveno vpliva na širjenje svetlobe skozi snov.

Helij-neonska laserska cev

Čeprav se helij-neonski laser običajno ne uporablja za optične komunikacije po svetlovodih, je delovanje te vrste laserja zelo podobno drugim vrstam laserjev. Za razliko od polprevodniških laserjev je helij-neonski laser mnogo večji, je ponavadi v steklenem ohišju in običajno oddaja vidno svetlobo. Zaradi slednjega lahko konstrukcijo laserja in vse pojave opazujemo kar s prostim

očesom. Poleg tega se helij-neonski laser uporablja kot izvor zelo kvalitetne svetlobe za celo vrsto poskusov v optiki. Zaradi velike dolžine optičnega rezonatorja (okoli 30000 valovnih dolžin) je frekvenčni spekter HeNe laserja zelo ozek, dosti ožji od polprevodniških laserjev.

Da dosežemo samostojno nihanje laserja, moramo aktivno lasersko snov vstaviti v rezonator, ki daje na določenih frekvencah zadosti močno povratno vezavo. Rezonator sestavimo iz dveh zrcal na obeh koncih cevi. Zrcala so izdelana iz stekla, ki je na notranji strani prevlečeno z več plastmi različnih dielektrikov. Debeline in lomni količniki teh plasti so tako izbrani, da dosežemo odboj na želeni valovni dolžini in preprečimo odboj na drugih valovnih dolžinah.



1. **Od česa je odvisna barva svetlobe, ki jo oddaja HeNe laser?** Barva laserja je odvisna od zrcal, plina, položaja zrcal in točnosti.
2. **Kakšna je polarizacija svetlobe, ki izhaja iz rotacijsko simetričnega HeNe laserja?** Polarizacija iz rotacijsko simetričnega laserja je nedoločena.
3. **Kako dosežemo, da laser oddaja točo določeno linearno polarizirano svetlobo?** Da dosežemo točno določeno linearno polarizacijo svetlobe, zrcala damo pod Brewsterjevim kotom.

Popolni odboj valovanja

Ko valovanje vpada na mejo dveh različnih snovi, se del valovanja lahko odbije nazaj v izvorno snov, drugi del valovanja pa se lahko lomi v drugo snov. V najbolj splošnem slučaju opazimo oba pojava, lom in odboj valovanja. Pri tem smatramo, da so valovni impedanci in hitrosti razširjanja valovanja v različnih snoveh različne med sabo, kot tudi da je meja med dvema različnima snovema ostro določena.

1. **Zakaj se lomljeni žarek razmaže v podolgovato liso preden izgine?** Zato ker ni neskončno ozek.
2. **Kako bi potekal poskus, če bi bila prizma prevlečena z antirefleksnim slojem na vseh straneh?** Potem nebi bilo stranskih odbojev.

Odboj svetlobe na površini stekla

Povezavo med koti vpadnega, odbitega in lomljenega žarka na meji dveh različnih snovi opisuje Snell-ov zakon. $n_1/n_2 = \sin \alpha_L / \sin \alpha_V$
 Snell-ov zakon ni odvisen od polarizacije elektromagnetnega valovanja (povsem enak zakon velja tudi za vzdolžna valovanja, naprimer za lom zvočnega valovanja), zato lomne

lastnosti različnih snovi preprosto opišemo z lomnim količnikom.

1. **Kje se uporablja Bravster-jevo okno?** Uporablja se za polarizacijo laserja.

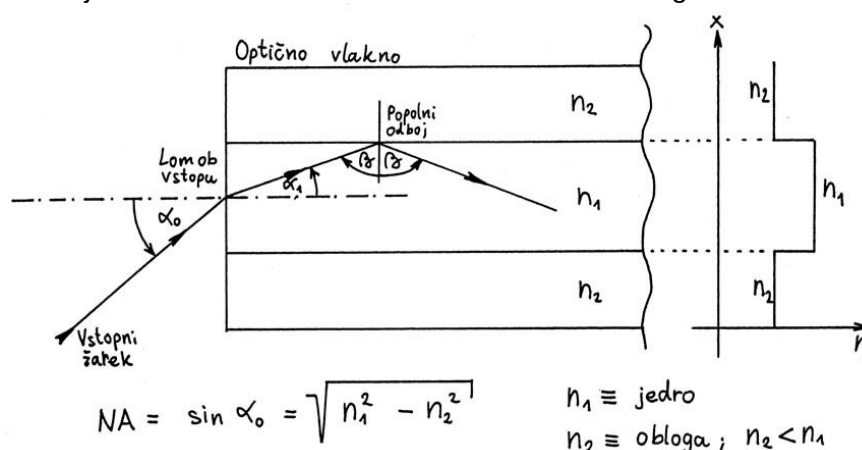
Mnogorodovna optična vlakna

Optična vlakna uporabljamo kot dielektrične valovode. Ker je valovna dolžina svetlobe zelo majhna, so tudi prečne mere ustreznih valovodov zelo majhne. Optična vlakna za komunikacije z majhnimi izgubami so izdelana iz zelo čistega kremenčevega stekla in njihov zunanji premer (sredica z oblogo) je standardiziran na $125\mu\text{m}$. Za lažje rokovanje so optična vlakna zaščitena vsaj s primarno zaščito premera $250\mu\text{m}$ in običajno še s sekundarno zaščito različnih premerov. Za zaščito steklenih optičnih vlaken se uporabljajo umetne plastične mase.

Prvotna optična vlakna so imela stopničast lomni lik in zelo debelo sredico, pri uporabi v frekvenčnem področju vidne in bližnje infrardeče svetlobe pa se je po njih širilo zelo veliko število valovodnih rodov. Pri stopničastem lomnem liku se različni valovodni rodovi širijo z zelo različnimi hitrostmi, kar močno omejuje pasovno širino prenosne poti. Premer sredice in zunanji premer stopničastih vlaken ni bil standardiziran, v uporabi so bila vlakna različnih premerov.

Naslednja tehnična izboljšava je bilo gradientno vlakno. Takšno vlakno ima sicer še vedno razmeroma debelo sredico ($50\mu\text{m}$ ali $62.5\mu\text{m}$), vendar se profil lomnega količnika spreminja zvezno po skrbno izbrani krivulji, da so hitrosti razširjanja različnih rodov med sabo čim bolj enake. Zunanji premer vlakna je standardiziran na $125\mu\text{m}$. Standardizirani so tudi lomni količniki sredice in obloge, kar omogoča medsebojno spajanje vlaken različnih proizvajalcev. Končna stopnja razvoja so sicer tehnološko najbolj zahtevna enorodovna vlakna različnih lomnih likov. Premer sredice znaša $10\mu\text{m}$ ali manj, premer obloge pa je tudi v slučaju enorodovnih vlaken standardiziran na $125\mu\text{m}$. Lomni količniki in lomni liki enorodovnih vlaken so standardizirani na nekaj vrednosti, kar spet omogoča spajanje podobnih vlaken različnih proizvajalcev.

Eden najpomembnejših podatkov kakršnegakoli dielektričnega valovoda je numerična apertura (NA). Numerična apertura povezuje lomni količnik sredice 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 sredico z lomnim količnikom n_1 in oblogo z lomnim količnikom n_2 .



1. **Kako je polarizirana svetloba na vhodu mnogorodovnega vlakna?** Na vhodu je polarizacija linearna
2. **Kako je polarizirana svetloba na izhodu mnogorodovnega vlakna?** Na izhodu je polarizacija nedoločena.
3. **V čem se razlikujeta vzorca na zalonu pri vlaknu s stopničastim lomnim likom in paraboličnim lomnim likom.** Pri stopničastem bi bila NA (numerična apertura) večja in porazdelitev rodov bi bila povsod enaka.

Enorodovno optično vlakno

Kljub skrbni izbiri oblike lomnega lika in izdelavi mnogorodovnega optičnega vlakna z gradientnim lomnim likom se mnogorodovne disperzije nikakor ne moremo povsem znebiti. Optične komunikacije na velike razdalje in z velikimi bitnimi hitrostmi omogočajo le enorodovna vlakna. Vsa enorodovna vlakna za telekomunikacije imajo premer obloge standardiziran na $125\mu\text{m}$, glede na vrsto jedra pa jih razdelimo v več skupin.

Najpreprostejše enorodovno komunikacijsko vlakno ima stopničast lomni lik ter premer sredice med $8\mu\text{m}$ in $10\mu\text{m}$. Takšno vlakno ima najmanjšo disperzijo v okolici valovne dolžine $1.3\mu\text{m}$, kjer valovodna disperzija osnovnega rodu natančno izniči učinek snovne (barvne) disperzije stekla. Zato je premer jedra izbran tako, da je $1.3\mu\text{m}$ hkrati približno zaporna valovna dolžina za višje valovodne rodove (parameter $V=2.405\dots$). Na ta način ohranimo visoko slabljenje vseh višjih rodov in hkrati dosežemo najnižje slabljenje osnovnega valovodnega rodu.

Ker je slabljenje optičnih vlaken najnižje pri nekoliko daljših valovnih dolžinah, okoli $1.55\mu\text{m}$, se izdelujejo tudi enorodovna vlakna s še manjšim jedrom oziroma bolj kompliciranim lomnim likom (W-vlakna). Takšna vlakna imenujemo disperzijsko premaknjena (angl. dispersion-shifted - DS) vlakna. Pri DS vlaknih s primerno izbrano obliko lomnega lika dosežemo izničenje snovne disperzije z valovodno disperzijo v okolici zanimive valovne dolžine $1.55\mu\text{m}$ oziroma hkrati na obeh zanimivih valovnih dolžinah $1.3\mu\text{m}$ in $1.55\mu\text{m}$. Za posebne namene se izdelujejo tudi drugačna enorodovna vlakna. V sklopnikih laserskih vlakenskih ojačevalnikov potrebujemo vlakno, ki ostane enorodovno v širokem razponu valovnih dolžin (od 980nm /črpalka do 1550nm /signal). Takšno vlakno ima zelo majhno jedro premera komaj $3\mu\text{m}$, toda zelo visoko razliko lomnih količnikov.

Posebna zvrst enorodovnih vlaken so tudi **dvolomna vlakna**, ki se od običajnih vlaken razlikujejo po tem, da niso rotacijsko simetrična. Dvolomnost običajno dosežemo z dodatki v oblogi, ki nesimetrično stiskajo jedro vlakna. Dvolomna vlakna ohranjajo polarizacijo svetlobe, da se izognemo polarizacijski disperziji.

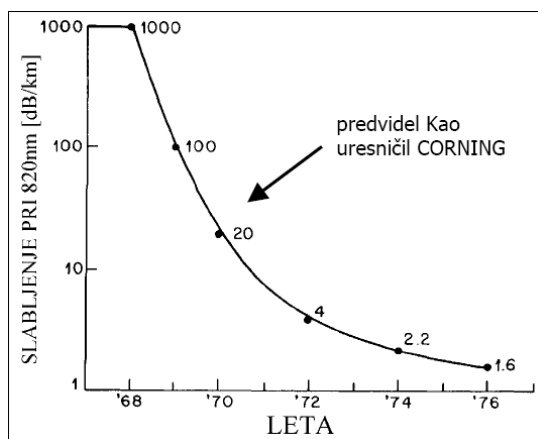
Rezonator polprevodniškega laserja

Osnovni svetlobni izvori za večino optičnih komunikacij so polprevodniški laserji z vgrajenim rezonatorjem. Čip polprevodniške laserske diode vsebuje dielektrični valovod pravokotnega prereza, kot je to prikazano na sliki 17.1. Številne dodatne plasti različnih polprevodnikov morajo zagotoviti delovne pogoje laserja. Obloga valovoda mora imeti nižji lomni količnik in širši prepovedan energijski pas, da ne pride do izgub fotonov, ki so nastali v aktivni plasti. Dodatna izolacijska plast poskrbi, da se celoten enosmerni tok

napajanja usmeri skozi ozko aktivno plast.

Rezonator polprevodniškega laserja je lahko zaključen z zrcali na obeh koncih čipa (Fabry-Perot) oziroma vsebuje porazdeljeno povratno vezavo (angl. Distributed Feed Back - DFB). Vrsta povratne vezave vpliva na vzdolžne rodove laserja, sama porazdelitev polja po preseku valovoda pa je v obeh slučajih enaka. Pri vseh komunikacijskih laserjih sta valovod sam (angl. index-guided laser) oziroma dovod enosmernega toka (angl. gain-guided laser) načrtovana tako, da laser niha samo na osnovnem prečnem rodu s polarizacijo TE (električno polje vzporedno s sloji polprevodnika). DFB laserji seveda nihajo samo na enem vzdolžnem TE rodu.

Slabljenje optičnega vlakna

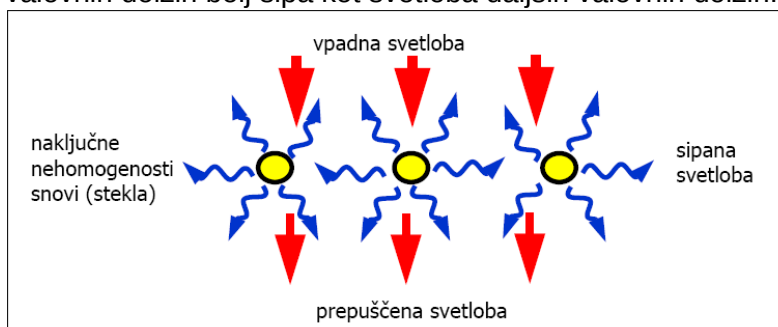


Rayleighovo sipanje

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. Rayleighovo sipanje razprši svetlobo, ki potem izhaja iz vlakna, kot prikazuje slika 31.2.

Za razliko od loma in odboja, kjer se svetlobno valovanje po pojavu odbije samo v eno smer, se pri sipanju razprši svetloba v vse smeri. Sipanje svetlobe se vrši na naključno porazdeljenih delcih (molekulah) snovi, ki je v našem primeru steklo.

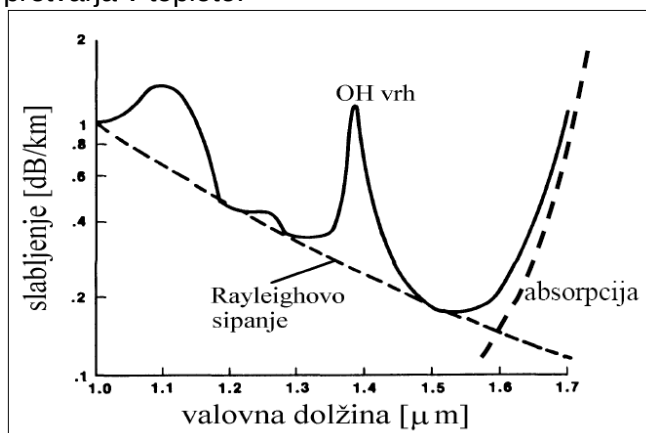
Selectivno sipanje ali Rayleighovo sipanje se pojavi, ko imajo delci snovi lastnost, da bolj učinkovito sipajo svetlobo izbrane valovne dolžine. Običajno je tako, da se svetloba krajših valovnih dolžin bolj sipa kot svetloba daljših valovnih dolžin.



V vidnem delu svetlobnega spektra je svetloba z najkrajšo valovno dolžino vijolična oziroma modra. Ker se ta svetloba najbolj sipa na molekulah v atmosferi, vidijo naše oči nebo modre barve.

Za razliko od Rayleighovega sipanja poznamo tudi Mieovo sipanje, ki povzroča belo barvo oblakov. Vodne kapljice v oblaku s polmerom približno 20 μm so dovolj velike, da sipajo vse valovne dolžine vidne svetlobe bolj ali manj enako. To pomeni, da bo skoraj vsa svetloba, ki vstopi v oblak, razpršena. Ker so sipane vse valovne dolžine, vidimo oblake bele barve. Ko so oblaki zelo debeli, prehaja skozi njih vse manj vstopne sončne svetlobe, kar daje oblaku črno barvo.

Z naraščanjem valovne dolžine slabljenje optičnega vlakna pada in teoretično lahko pride do izredno nizkih slabljenj pri visokih valovnih dolžinah, kot prikazuje slika 31.3. V praksi pa se pri večjih valovnih dolžinah pojavi absorpcija svetlobe v steklu, pri čemer se svetloba pretvarja v toploto.



Obstaja 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.

Mnogorodovna disperzija v gradientnem vlaknu

Prvotna optična vlakna so imela stopničast lomni lik in zelo debelo sredico predvsem zaradi enostavnejše izdelave, spajanja vlaken med sabo in boljšega sklopnega izkoristka na nekoherenten svetlobni izvor. Pri uporabi v vidnem in bližnjem infrardečem področju se po takšnih vlaknih širi veliko število valovodnih rodov. Pri stopničastem lomnem liku se različni valovodni rodovi širijo s precej različnimi hitrostmi, kot je to prikazano na sliki 9.1, kar zelo omejuje pasovno širino prenosne poti.

Pomembno tehnično izboljšavo mnogorodovnega vlakna predstavlja gradientno vlakno. Takšno vlakno ima sicer še vedno razmeroma debelo sredico (standardizirano 50 μm oziroma 62.5 μm), vendar se profil lomnega količnika spreminja zvezno po skrbno izbrani krivulji, da so hitrosti razširjanja različnih rodov med sabo čim bolj enake.

AKUSTO-OPTIČNI POJAVI

Uklon svetlobe na zvočnem valovanju

Zvočno (akustično) valovanje je vzdolžno (longitudinalno) mehansko valovanje

v plinih, tekočinah in trdnih snoveh. Vsako valovanje opisujeta dve veličini: tok in napetost na električnem vodju, električno in magnetno polje za elektromagnetni val v praznem prostoru ter hitrost delcev snovi in pritisk v snovi za zvočno valovanje.

Lomni količnik snovi za svetlobo je odvisen od gostote snovi in je zato tudi funkcija mehanskega pritiska v snovi. Odvisnost lomnega količnika tekočin in trdnih snovi od pritiska je sicer zelo majhna za praktično izvedljive pritiske. Ker pa je valovna dolžina svetlobe zelo majhna, je dolžina poti svetlobe v snovi običajno zelo velika v primerjavi z valovno dolžino. Velike spremembe faze svetlobnega valovanja zato lahko dosežemo tudi z majhnimi spremembami lomnega količnika, če je le dolžina poti zadosti velika.

Zvočno valovanje predstavlja skupino zgoščin in razredčin, ki se širijo po snovi. Za svetlobo predstavljajo zgoščine področja, kjer je lomni količnik snovi nekoliko večji, razredčine pa področja, kjer je lomni količnik nekoliko manjši od srednjega lomnega količnika snovi. Če se zvočni val širi približno pravokotno na smer širjenja svetlobe, pride do uklona svetlobe na zvočnem valovanju.

Pri Raman-Nath-ovem uklonu privzamemo, da je pot svetlobe skozi snov zadosti kratka, da se snov z zvočnim valom obnaša kot enostavna uklonska mrežica, ki modulira fazo vstopajočega svetlobnega žarka. Na izstopu iz uklonske mrežice dobimo šop žarkov. Odkloni žarkov so funkcija zvočne valovne dolžine, ki je kar perioda uklonske mrežice.

TEMPERATURNNA ODVISNOST PRAGOVNEGA TOKA LASERJA

Polprevodniški laserski moduli

Za razliko od plinskih laserjev, naprimer helij-neonskega laserja, je delovanje laserjev v trdnih snoveh zelo nestabilno in močno odvisno od temperature aktivne laserske snovi. Vsi polprevodniški laserji so zelo odvisni od temperature polprevodnika. Z rastočo temperaturo se niža ojačenje aktivne laserske snovi, večajo se izmere rezonatorja in spreminja se valovna dolžina laserskega ojačenja v snovi. Zato so prvi polprevodniški GaAlAs laserji delovali le pri zelo nizkih temperaturah, s pomočjo umetnega hlajenja in še to le v impulznem režimu.

Sodobni polprevodniški laserji, GaAlAs za 800-900nm in InGaAsP za 1300nm ali 1550nm, delujejo v enosmernem režimu pri sobni temperaturi, vse lastnosti laserja pa so še vedno močno odvisne od točne vrednosti temperature čipa. Pri vseh vrstah polprevodniških laserjev s temperaturo hitro narašča pragovni tok laserja. V enostavnih FP laserjih (z zrcali na koncih rezonatorja) s spreminjanjem temperature preskakuje valovna dolžina delovanja med različnimi rodovi rezonatorja. V polprevodniških laserjih s porazdeljeno povratno vezavo (angl. Distributed Feed Back - DFB) lahko s spreminjanjem temperature laserskega čipa celo zvezno uglašujemo laser, v ozkem območju okoli 5nm, na želeno valovno dolžino.

Za praktično uporabo v optičnih komunikacijah se polprevodniški laserji vgrajujejo v laserske module, ki poleg laserske diode vsebujejo vsaj še monitorsko fotodiodo in leče za prilagoditev laserskega izhoda na optično vlakno. Monitorska dioda običajno izkorišča svetlobo, ki izhaja na drugem koncu laserskega čipa. Preko monitorske diode lahko preverjamo delovanje laserja in spremembe pragovnega toka laserske diode popravljamo z nastavljanjem delovnega toka diode. Monitorska dioda žal nič ne pove o valovni dolžini, na kateri dela laser, niti o rodovih v rezonatorju. Signal iz monitorske diode zato ni niti povsem sorazmeren s sklopljeno močjo v optično vlakno in ga lahko uporabljamo le kot pripomoček za vpogled v delovanje

laserja, ne pa za točne meritve.

Za delovanje v širšem temperaturnem območju oziroma za zahtevnejše polprevodniške laserje vsebujejo laserski moduli poleg laserja, monitorske fotodiode in optike še Peltier-ovo toplotno črpalko in termistor za merjenje temperature laserskega čipa. Izvedba takšnega popolnejšega laserskega modula je prikazana na sliki 18.1. Toplotna črpalka je izdelana kot baterija termočlenov, ki ohlajajo oziroma segrevajo laser glede na smer enosmerne električnega toka.

MERJENJE POGOSTNOSTI NAPAK V OPTIČNI ZVEZI

Merila za kvaliteto optične zveze

Zvezo po optičnem vlaknu ovrednotimo na enak način kot vsako drugo vrsto zveze. V slučaju analognega prenosa je merilo kvalitete zveze razpoložljivo razmerje signal/šum in popačenje zelenega signala. V slučaju digitalnega prenosa je merilo še enostavnejše: pri prenosu digitalnih podatkov nas zanima predvsem verjetnost pojavljanja napak v prenosu oziroma pogostnost, s katero se bojo pojavljale napake.

Pogostnost napak (angl. Bit Error Rate ali BER) je zato merilo kvalitete vsake digitalne zveze. V slučaju zveze po optičnem vlaknu je edini upravičen vzrok pojavljanja napak kvantni oziroma toplotni šum sprejemnika, saj so tu pojavi presihanja polja, motenj ipd, ki jih običajno srečamo v radijskih zvezah, povsem odsotni. Zveze po optičnih vlaknih zato vedno odlikuje izredno nizka pogostnost napak, ki se natančno pokorava enostavnemu statističnemu zakonu šuma.

Obljubljeno kvaliteto zveze po optičnem vlaknu je treba seveda dokazati, se pravi izmeriti pogostnost napak na resnični, obstoječi zvezi. Zvezo enostavno preizkusimo tako, da po njej pošljemo znano sporočilo in na drugem koncu zveze preverimo, kaj smo sprejeli ter preštejemo napake. Ker je pogostnost napak v optičnih zvezah zelo majhna številka, tudi manj kot 10^{-9} , mora biti sporočilo zadosti dolgo, da bomo sploh lahko opazili napako.

Poleg tega je treba pri izbiri sporočila paziti tudi na to, da bomo v njegovi vsebini lahko sploh opazili napako. Naprimer, če vsebuje sporočilo same logične ničle, ne bomo v njem nikoli opazili pokvarjene logične enice, ki se je zaradi napake spremenila v ničlo. Preizkusno sporočilo mora biti zato zelo skrbno izbrano, da vsebuje vse dopuščene bitne vzorce.

LiNbO₃ ELEKTROOPTIČNI AMPLITUDNI MODULATOR

Modulacija svetlobnih izvorov

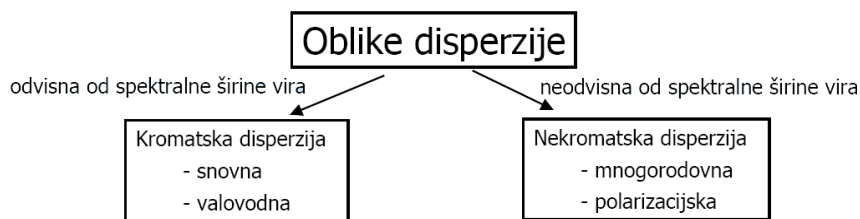
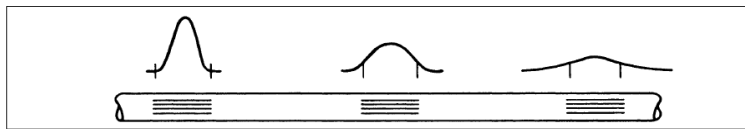
Večina sedanjih optičnih zvez uporablja neposredno modulacijo napajalnega toka skozi LED ali lasersko diodo. S primerno konstrukcijo polprevodniških svetlobnih izvorov se da doseči hiter odziv (1ns) in razmeroma linearno krivuljo izhodne svetlobne moči v odvisnosti od krmilnega toka. Za digitalne optične zveze do hitrosti približno 1Gb/s je takšna rešitev povsem zadovoljiva.

Za še višje hitrosti oziroma za prenos analognih signalov, naprimer več deset TV programov po enem samem optičnem vlaknu, opisana rešitev več ne zadošča. Odziv laserskih diod je prepočasen, poleg tega pa 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 2.5Gb/s in več še posebno občutljive.

Edina smiselna tehnična rešitev je zato ločen modulator, da lahko dela DFB laser v stabilnem enosmernem režimu z izredno ozko spektralno črto. Od vseh znanih fizikalnih pojavov, s pomočjo katerih lahko moduliramo svetlobni žarek, ima dovolj hiter odziv in dovolj veliko občutljivost za električne krmilne signale elektrooptični pojav.

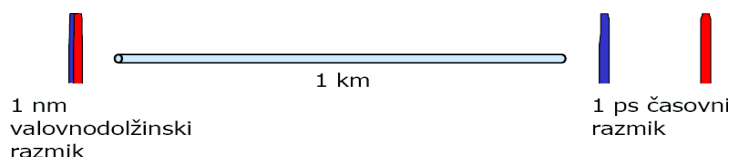
Elektrooptični pojav pomeni v grobem, da je lomni količnik snovi odvisen od zunanega enosmernega ali nizkofrekvenčnega električnega polja. Za elektrooptične naprave je najprimernejša snov kristal litijevega niobata (LiNbO₃), v katerem lahko z difuzijo titana (Ti) povečamo lomni količnik in tako naredimo planarne svetlovođe. Najenostavnejša elektrooptična naprava je optični fazni sukalnik

Disperzija optičnega vlakna:



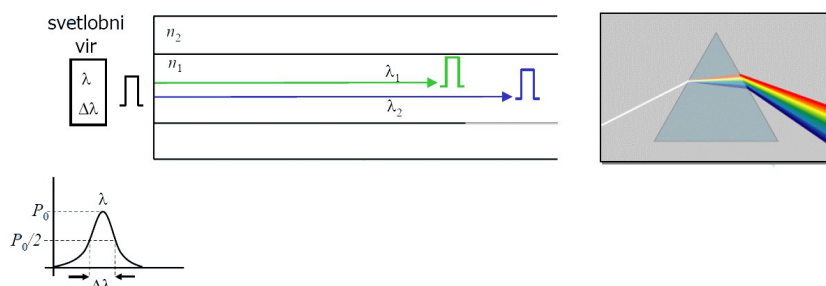
Kromatska disperzija oziroma barvna disperzija

- Signali različnih valovnih dolžin potujejo z različnimi hitrostmi.
- Enota ps/(nm·km) pomeni, da pri disperziji 1ps/(nm·km) dva sočasna impulza z valovno dolžinskim razmikom 1nm, ki potujeta preko razdalje 1km, prideta časovno zamaknjena za 1ps.



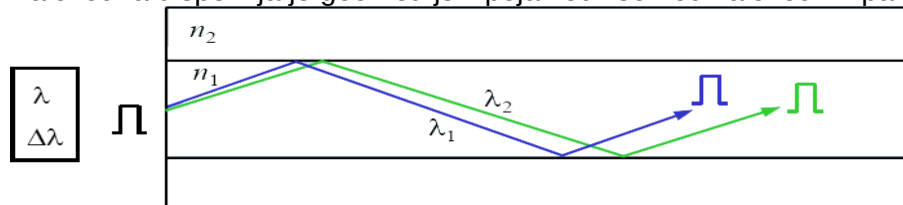
Snovna disperzija

Lomni količnik stekla je frekvenčno odvisen.



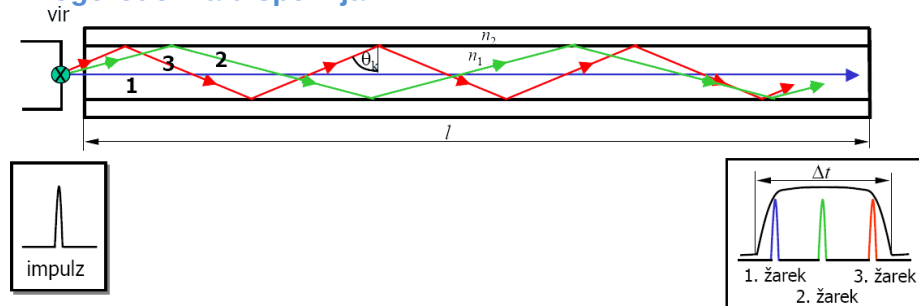
Valovodna disperzija

Valovodna disperzija je geometrijski pojav odvisen od valovodnih parametrov.



Vhodni impulz pride na konec ob različnem času, tudi če je snov nedisperzna.

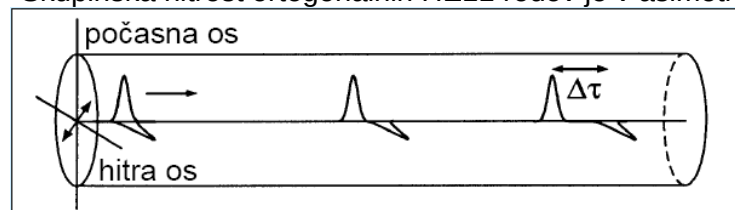
Mnogorodovna disperzija:



Ker je lomni količnik jedra večji od lomnega količnika obloge, je čas potovanja 3. Žarka večji od časa potovanja direktnega žarka.

Polarizacijska disperzija

- Polarizacijska rodovna disperzija – PMD (Polarization Mode Dispersion)
- Zaradi polarizacijsko odvisnega lomnega količnika (dvolomnost) se po t.i. enorodovnih optičnih vlaknih v resnici širita dva ortogonalno polarizirana HE11 rodova.
- Skupinska hitrost ortogonalnih HE11 rodov je v asimetričnem vlaknu različna.



Vlakno za kompenzacijo disperzije (DCF)

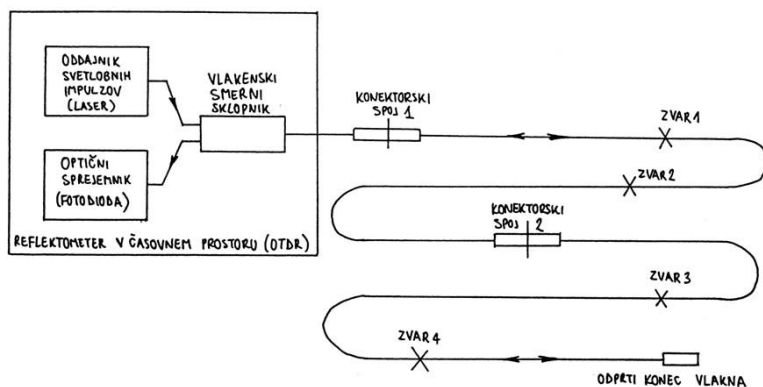
- Delujejo na enak način kot disperzno premaknjena vlakna
- DC vlakno mora generirati dovolj negativne disperzije (-80ps/nmkm)
- Da dosežemo znatno večjo valovodno disperzijo, moramo uporabiti večji Δn jedra in obroča, ter večjo globino (prostornino) jaška
- To se odraža v zmanjšanju Aeffna praktične vrednosti med 15-20 μm^2 , vendar zaradi visoke disperzije nelinearnosti niso omejitveni faktor
- Naklon in κ sta odločilna parametra, ki pogojujeta zahtevnost širokopasovnega kompenzacijskega sistema
- Proizvajalci ne prodajajo vlakna temveč module, kjer je vlakno navito a primeren premer, ki omogoča enorodovnost

OPTIČNI REFLEKTOMETER V ČASOVNEM PROSTORU (OTDR)

Reflektometerske meritve optične zveze

Pri meritvah resničnih optičnih zvez sta si oba konca zveze nekaj deset do nekaj sto kilometrov narazen, torej običajno nista dostopna hkrati. Za meritev optične zveze bi zato želeli postopek, ki zna izmeriti optično vlakno v vkopanem kablju 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.

Reflektometerska meritev v časovnem prostoru je prikazana na sliki 13.1. 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 zanemarljivo majhni.



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. Signal reflektometra se sicer širi po istem vlaknu kot signal resnične optične zveze, toda signal reflektometra mora isto pot preteči dvakrat!

VPRAŠANJA

Pregledal 2 naključni vaji/poročili, če so vsi izračuni in grafi(v primeru, da kaj manjka zna znižat oceno)

Zastavil 3 standardna vprašanja:

- Katere vrste laserjev poznamo ter katera temperatura laserjem bolj škoduje in zakaj.
- Katero napravo bi uporabil za prepoznavanje karakteristike položenega vlakna in kako deluje.
- Koliko svetlobe se odbije pri prehodu zrak/steklo.

ODGOVORI

1. Mamo plinske laserje (HeNe laser), laserje s periodično strukturo (DFB) ter polprevodniške laserje. Za laserje je bolj nevarna nizka temperatura saj, če ob istem toku temperaturo zmanjšamo lahko pride do sežiga zrcal in s tem uničenja laserja.

2. Naprava OTRD s katero merimo na terenu (recimo kje je kabel precvikan). Tam kjer je ta pretrgan lahko odčitamo s te naprave, tam se tudi odbije te 4% svetlobe nazaj. Smo delali na lab vajaz z njim, če se kaj spomneš.

3. Odbojnost ja. Prehod svetlobe iz zraka v steklo. Po tej formuli k si napisu in dabiš odbojnost=0,2 in potem to kvadriraš in dobiš 4%.

VPRAŠANJA IN ODGOVORI

Mene je Batagelj vprašal:

- katere laserje poznamo, kakšne lastnosti imajo posamezni laserji (v zapiskih)
- kako bi ugotovili kaj se dogaja z optično povezavo od nas do ELES-a, ki gre preko Telekoma... (OTDR)
- kaj je bilo prej, mnogorodovno ali enorodovno vlakno (mnogorodovno itak, ker ga je tudi lažje narediti)
- kako izgleda frekvenčni spekter laserja (kot črte na različnih frekvencah - glavnik)
- kaj vpliva na to, na kateri frekvenci niha laser (rezonator)
- koliko svetlobe se odbije na izhodu iz optičnega vlakna (izračunati sem moral odboj na meji steklo-zrak, in potem to odbojnost kvadrirati, saj gre za odbito moč = $0,2$ na kvadrat = 4%)
- kaj je glavna slabost mnogorodovnih vlaken, zakaj smo sploh si želeli enorodovna (predvsem zaradi mnogorodovne disperzije)
- katere vrste disperzij poznamo (snovna, valovodna, mnogorodovna, polarizacijska)

Pri modulacijah je mogoče pomembno samo to, katere vrste poznamo:

- direktne, ki jih delamo na samem laserju
- zunanje (elektrooptične, akustooptične, mehanske, elektroabsorpcijske), ki jih naredimo za laserjem s posebnim modulatorjem

****PROFESOR JE RAZLOŽU NA USTNEM:** da je mnogorodovno vlakno TEŽJE narediti kot enorodovno, kljub temu da so najprej naredili mnogorodovno. Težje ga je pa narediti zato ker ko vlakno vlečejo morjo poskrbet, da je v steklu več plasti z različnimi lomnimi količniki (da se širi več rodov, lahko tudi več 100) in zaradi tega je mnogorodovno vlakno težje narediti kot enorodovno, ki ima samo eno plast z enim lomnim količnikom.

Pregledal 2 naključni vaji/poročili, če so vsi izračuni in grafi (v primeru, da kaj manjka zna znižati oceno)

Zastavil 3 standardna vprašanja:

- Katere vrste laserjev poznamo ter katera temperatura laserjem bolj škoduje in zakaj.
- Katero napravo bi uporabil za prepoznavanje karakteristike položenega vlakna in kako deluje.
- Koliko svetlobe se odbije pri prehodu zrak/steklo.

1.)sam sm si zbral kaj bi rad bil prašan...sm reku da ne vem..mogoče kak OTDR pa sm mogu povedat:

-da je za merjenje dolžine

-za določanje lokacije motenj (na konektorjih, na zvarih niti ne, ker dober zvar ma prešvoh slabljenje, dolžino vlakna-s pomočjo končnega odboa steklo/zrak, kjer se z odbojem vrne 4% signala)

-lahko izmerimo tudi sipanje-ČE imamo res DOBRO fotodiodo

-lahko merimo tudi disperzijo-ko pošlemo signal, je vrnejen signal širši kot poslani=zaradi mnogorodovne disp.... in iz širine vrnjenega signala lahko vidmo kaka je disperzija

2.)spet mi je reku, kaj bi še rad bil prašan...sam sm reku da ne vem, ker mam usa področja pokrita..se je zasmeju in reku "aha..raj vidte da sm jst kriv, če naute znal"...sm reku ja, tko da mi je on postavu:

"Zakaj uporabljamo DFB laserje in ne FB?" =>ker je DFB boljši, ker ima ožji spekter...

"Zakaj je ožji spekter boljši?" => ker imamo potem manj valovnih dolžin, ki potujejo z različnimi hitrostmi in imamo tako manj barvne (kromatske) disperzije

dubu sm pa 8/9, ker mi je mogu "mal nakazat" pr OTDR da sm se spomnu da lahko tut sipanje (ker jst sm reku da je prešvoh sipanje, da bi ga lahko meril, pa je reku da na lab. vajah so naše fotodiode res preslabe, sam da dobre pa lahko to merijo) in disperzijo merimo, pa k sm mal mutil predn sva skupi pršla do ugotovitve, da ožji spekter pomeni manj valovnih dolžin in s tem manj barvne disp....sicer sm v pravi smeri govoru, sam nism mu zanl tkole v enmu stavku povedat...

1.)kako bi s pomočjo svetlobe izmeril razdaljo med objektom ter njemu nasprotnim objektom?

To bi naredil z OTDR-jem... Se pravi poslal bi nek svetlobni signal proti objektu, nato pa bi opazoval odbitke na sprejemniku (na fotodiodi)

no to govorim kr neki z glave...lohk da sem čist mim useku

2.)kaj v He-Ne laserju določa polarizacijo?

polarizacijo določamo z zrcali ki jih damo pod Brewsterjev kot

3.)zakaj v enorodovnem optičnem vlaknu dobimo 3 rodove?

pri enorodovnem vlaknu se širi samo en rod pri določeni lambdi, če lambdo zmanjšamo se bo po njem začelo širiti več rodov. Št. rodov je odvisno od debeline jedra.

4.)ali je za laser nevarnejša visoka ali nizka temperatura ter kakšna je odvisnost kolenskega in pragovnega toka od temperature?

za laser je nevarnejša nizka temperatura, ker laser pri manjši temperaturi pri istem toku odda večjo optično moč, zato lahko pride do zažiga zrcal, uničenja laserja.

Pragovni tok pa se večja z višanjem temperature

5.)katera merilna metoda je alternativa OTDR ter kako jo uporabljamo?

Alternativa za OTDR je Mach-Zehnderjev interferometer.

-OTDR je Optični reflektometer v časovnem prostoru in se ga uporablja za ugotavljanje, dolžine optičnega vlakna, takrat ko lahko dostopaš do vlakna samo na enem koncu(vhodu). Primer: Ko je zakopan, kabel pod zemljo in ga recimo en stroj-bager pri delu "nevede" preseka. Takrat uporabimo Optični reflektometer OTDR in pošljemo signal v vlakno ter opazujemo kaj se zgodi po določenem času. 4% od poslanega impulza se nam od drugega konca vlakna odbije nazaj.

Resolucija pa nam pove na koliko natančno lahko ugotovimo kje je bilo vlakno pretrgano.

6.)za katere meritve se uporablja OTDR?

OTDR se uporablja za meritve slabljenja optičnega vlakna, oz s to meritvijo lahko izmerimo na natančno 1 meter kje je bil kabel presekan.

OTDR je Optični reflektometer v časovnem prostoru in se ga uporablja za ugotavljanje, dolžine optičnega vlakna, takrat ko lahko dostopaš do vlakna samo na enem koncu(vhodu). Primer: Ko je zakopan, kabel pod zemljo in ga recimo en stroj-bager pri delu "nevede" preseka. Takrat uporabimo Optični reflektometer OTDR in pošljemo signal v vlakno ter opazujemo kaj se zgodi po določenem času. 4% od poslanega impulza se nam od drugega konca vlakna odbije nazaj.

Resolucija pa nam pove na koliko natančno lahko ugotovimo kje je bilo vlakno pretrgano.

7.)kaj so odkrili prej, mnogorodovno ali enorodovno optično vlakno?

prej so odkrili mnogorodovno optično vlakno saj je bilo lažje za izdelat. Enorodovno je težje izdelat ker ima zelo majhno jedro.

IZPISKI IZ PROSOJNIC(KAR ŠE NI BLO PREJ)

PREDNOSTI OPTIČNIH KOMUNIKACIJ

Pred drugimi vrstami komunikacij imajo optične komunikacije vsaj štiri velike systemske prednosti,

zaradi katerih izrivajo druge električne tekmece 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 (angl. Bit Error Rate - BER).
2. Pri električnih vrvicah lahko znaša širina prenosnega spektra do nekaj gigahercev ali deset gigahercev, kar omogoča digitalni prenos z dokaj 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, kar je za približno tisočkrat več, kot pri najboljših električnih vrvicah.
3. Občutljivost na zunanje motnje je pri optičnem prenosu neopazna, zato lahko dosežemo tudi ekstremno nizko vrednost BER, kar je potrebno za prenos podatkov z zelo veliko zanesljivostjo. Za inštalaterje je bistvena prednost predvsem neobčutljivost na elektromagnetne motnje, kar pomeni, da se optični vodniki vsaj v teoriji lahko polagajo kjerkoli.
4. Pri povezovanju komunikacijskih naprav imamo nemalokrat probleme zaradi različnih potencialov, kar ločujemo s galvanskimi ločitvami. Pri električnih vrvicah je potrebno galvansko ločitev izvesti posebej z ločilnimi transformatorji. V optičnih komunikacijah, kjer je optično vlakno neprevodni dielektrik, je galvanska ločitev vedno avtomatsko prisotna.

SVETLOVODI

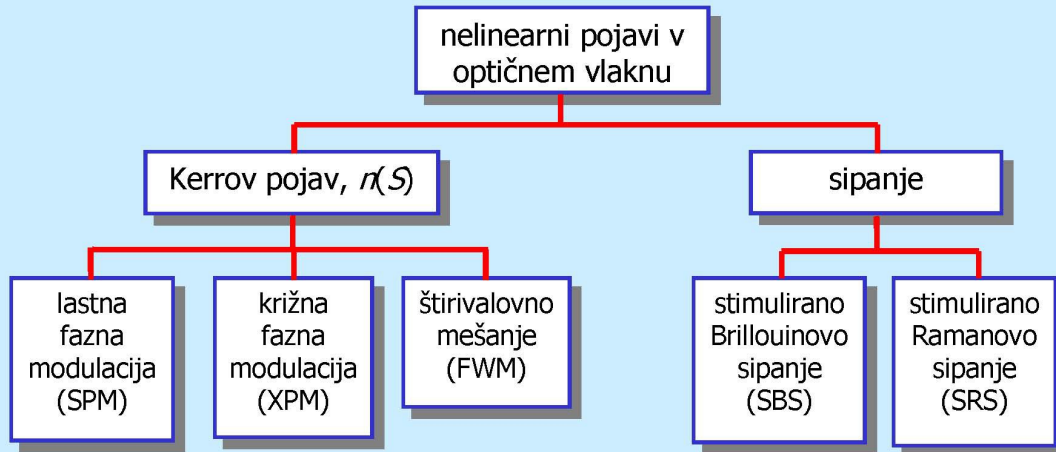
Svetlovodi so dielektrične naprave, ki omogočajo vodenje svetlobe s pomočjo fizikalnega pojava popolnega odboja. Upravljanje svetlobe je brezizgubno, ker je popolni odboj povsem brezizguben pojav. Izgube lahko nastanejo samo ob vstopu in izstopu žarka iz naprave. Žal dielektriki niso brezizgubni in je potovanje svetlobe skozi dielektrik deležno izgub, ki pa so v večini primerov zelo majhne v primerjavi z ostalimi prenosnimi potmi. Dielektrike lahko oblikujemo v različne oblike naprav za vodenje svetlobe. Po obliki svetlovoode v osnovi ločimo na planarne in krožnosimetričo

Optična nelinearnost:

Linearni sistem: izhod je linearno sorazmeren vходу

Nelinearni sistem: izhod ni linearno v razmerju z vhomom

Tipi nelinearnih pojavov



Laboratorij za sevanje in optiko

Nelinearnosti je mogoče izkoristiti za kompenzacijo disperzije, optično časovno demultipleksiranje in pretvorbo valovne dolžine.

Nelinearnosti so zelo pomembne pri velikih razdaljah in visoki optični moči.

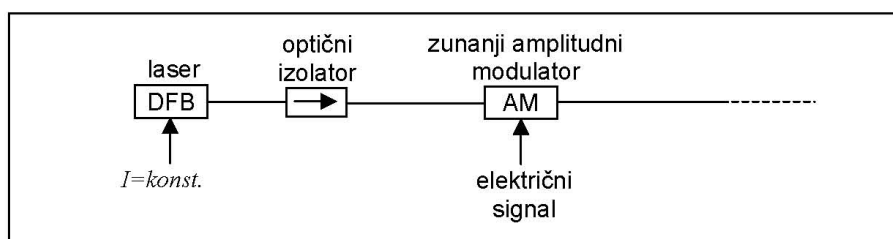
Natančno merjenje n_2 je potrebno za opredelitev optičnega omrežja v prihodnosti

MODULACIJE

12. Svetlobni modulatorji

Ko je direktna modulacija laserja prepočasna, je potrebno izvesti zunanjo modulacijo s pomočjo zunanjega svetlobnega modulatorja. Zunanja modulacijska tehnika se izogne velikemu drhtenju optičnega signala, ki spremlja hitre direktne modulacijske tehnike, kar pogosto omejuje sistemske prenosne zmožnosti. V dandanašnjih optičnih modulacijah se uporablja amplitudna modulacija, zato si bomo v tem poglavju podrobneje ogledali zunanje amplitudne modulatorje. Zunanje svetlobne modulatorje delimo po izvedbi na:

- Mehanske modulatorje, ki so zasnovani kot zaslonke. Največkrat so zelo počasni (1 kHz) in se uporabljajo v meritvah.
- Akustooptične modulatorje, ki izkoriščajo interakcijo svetlobe in zvoka.
- Elektrooptične modulatorje, pri katerih je lomni količnik snovi funkcija modulacijske napetosti $n(U_m)$.
- Elektroapsorpcijske modulatorje, pri katerih se spreminja slabljenje snovi v odvisnosti od modulacijske napetosti $a(U_m)$.



Slika 1: Priključitev zunanjega amplitudnega modulatorja.

12.1. Akustooptični modulator

Akustooptika je področje na meji med akustiko in optiko, ki temelji na akustooptičnem pojavu v snovi, torej na interakciji med zvokom ter svetlobo v snovi.

Pri širjenju akustičnega vala se v snovi pojavljajo napetosti, ki se odražajo kot zgoščine (višji lomni količnik) in razredčine (nižji lomni količnik). Zvočni valovi povzročajo uklon svetlobe v snovi.

Interakcija med zvočnim in svetlobnim valovanjem nastane zaradi krajevno-časovne odvisnosti lomnega količnika, ki jo povzroča zvok in ki lahko bistveno vpliva na širjenje svetlobe skozi snov.

12.1.1. Raman-Nathov uklon svetlobe

Raman-Nathov uklon svetlobe se izvede v zelo ozki Raman-Nathovi celici, ki si jo lahko predstavljamo kot ozko fazno uklonsko mrežico. Po prehodu skozi tako celico postane optično polje fazno modulirano. Podobno kot na amplitudni uklonski mrežici polje po izstopu iz mrežice interferira konstruktivno v smereh, danih z enačbo

$$\sin \alpha_m = m \cdot \frac{\lambda}{\Lambda} \quad (1)$$

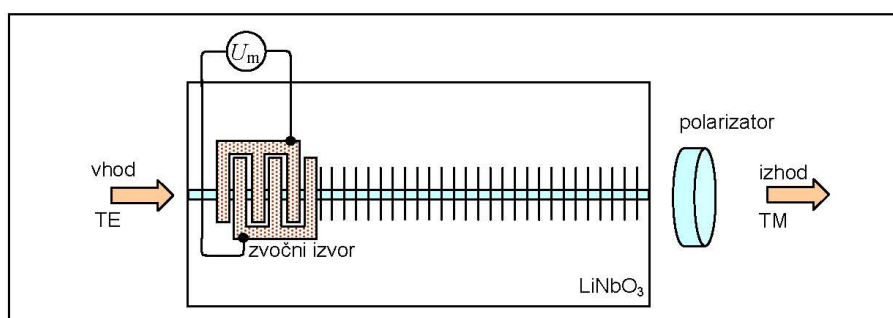
Raman-Nathov uklon svetlobe je v plinu zelo majhen in zato mnogo lažje izvedljiv v tekočini ali trdni snovi. V trdni snovi se širi zvok s frekvenco od 100 MHz do 1 GHz, v tekočinah pa s frekvenco od 10 MHz do 100 MHz.

Perioda valovitosti valovne fronte svetlobnega žarka na izhodu iz zvočne celice je odvisna od lomnega količnika zgoščin in razredčin. Moč modulacijskega signala P_m vpliva na nagrbančenost valovnih front, kar pomeni odklon žarka α .

12.1.3. Akustooptični filter

Akustooptični filter je izredno prilagodljiva naprava in edini spremenljivi filter, ki lahko obenem izloči več valovnih dolžin. Pri širjenju akustičnega vala se v snovi pojavljajo napetosti katerih posledica je sprememba lomnega količnika snovi. Akustooptični filter je izdelan na LiNbO_3 substratu. Z dopiranjem Ti je izdelan valovod, ki omogoča širjenje samo nižjim rodovom TE in TM valovanja. LiNbO_3 je dvolomni kristal, pri čemer je $n_{\text{TE}}=2,05$ in $n_{\text{TM}}=2,2$.

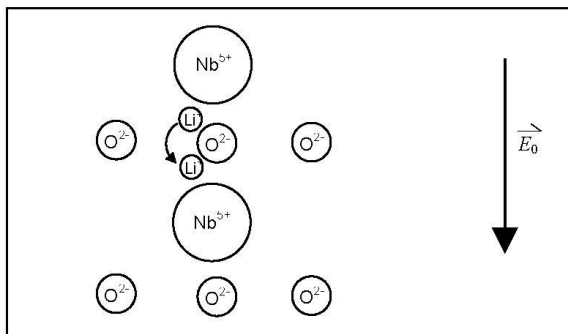
LiNbO_3 ima piezoelektrične lastnosti. Akustično valovanje v valovodu ustvari zgoščine in razredčine v obliki Braggove periodične strukture. Pravimo, da ima akustooptični pojav lastno frekvenčno selektivnost, ki temelji na faznem sinhronizmu. Ko je pogoj faznega sinhronizma porušen, pride do oslavitve izhodnega signala.



Slika 4: Akustooptični filter.

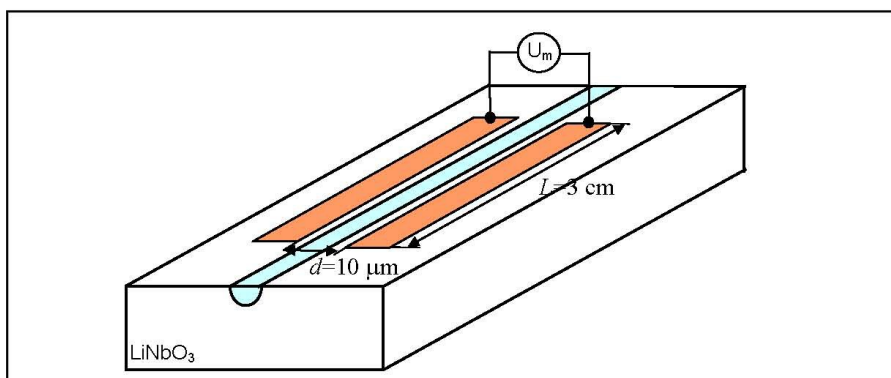
12.2. Elektrooptični modulator

Elektrooptični modulatorji se izdelujejo iz elokrooptičnega materiala, največkrat iz litijevega nijobata LiNbO_3 . Nijobijevi ioni so veliki v primerjavi z ostalimi elementi v kristalu. Litij je majhen atom s samo tremi elektroni in ima možnost dveh stabilnih leg. Na položaj Li atoma lahko vplivamo z zunanjim električnim poljem. LiNbO_3 se lahko naelektri podobno kot se namagnetni feromagnetik.



Slika 5: Kristal LiNbO_3 v električnem polju.

Na tem substratu je valovod izdelan z difuzijo titana, ki poveča lomni količnik. Slabljenje takega svetlovaloda znaša približno $0,1 \text{ dB/cm}$.



Slika 6: Fazni modulator na LiNbO_3 .

Pod vplivom električnega polja se spremeni lomni količnik.

$$n = n_0 + n_1 E, \quad (1)$$

linearni lomni količnik n_1 znaša $3 \cdot 10^{-11} \text{ m/V}$.

Primer:

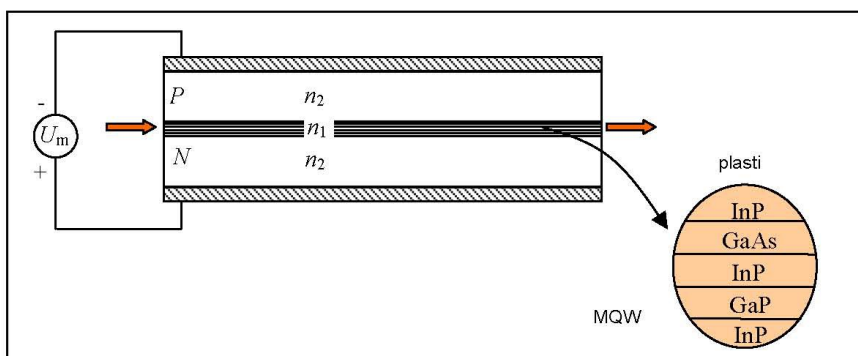
Vir z modulacijsko napetostjo $U_m = 10 \text{ V}$ priključimo na elektrodi, ki sta razmaknjene za $d = 10 \mu\text{m}$. Za koliko se spremeni lomni količnik LiNbO_3 , če linearni lomni količnik n_1 znaša $3 \cdot 10^{-11} \text{ m/V}$.

$$E = \frac{U_m}{d} = \frac{10 \text{ V}}{10 \mu\text{m}} = 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}}$$

$$\Delta n = n_1 \cdot E = 3 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}}{\text{V}} \cdot 10^6 \frac{\text{V}}{\text{m}} = \underline{\underline{3 \cdot 10^{-5}}}$$

12.3. Elektroabsorpcijski modulator

Elektroabsorpcija (EA) je pojav, pri katerem se absorpcija snovi pod vplivom električnega polja spremeni. Elektroabsorpcijski modulator je osnovan na Franz-Keldyshovem pojavu v dvojni heterostrukturi ali kvantnemu utesnjenemu Starkovemu pojavu v strukturah z več kvantnimi jamami. Svetloba, katero želimo modulirati, mora imeti takšno valovno dolžino, da je energija njenih fotonov manjša od širine prepovedanega pasu.

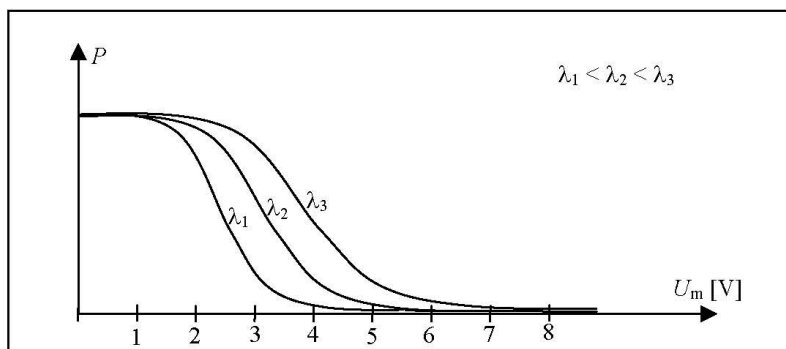


Slika 11: Zgradba elektroabsorpcijskega modulatorja.

Elektroabsorpcijski polprevodniški modulator ima enako zgradbo kot polprevodniški laser, kar omogoča njuno integracijo na isti čip, če sta medsebojno električno izolirana. Glavna razlika med njima je način delovanja. Laser je priključen v prevodni smeri, torej tok teče skozenj, modulator pa je priključen v zaporni smeri, kot, na primer, PIN fotodetektor.

Če na modulator ne priključimo nobene napetosti, je energijski pas velik. Če priključimo napetost, se energijski pas zmanjša, torej se poveča absorpcija.

Modulator je transparenten, ko ni priključen na napetost. Ko pa nanj priključimo napajanje, absorbira svetlobo, ki jo daje laser. Na laser je običajno priključeno konstantno napajanje, medtem ko je modulator krmiljen z vhodnim signalom. Takšni modulatorji so tudi zelo hitri in omogočajo visoke modulacijske frekvence, saj je elektroabsorpcija pojav, ki ni vezan na injekcijo nosilcev naboja zelo hiter pojav.



Slika 12: Absorpcijske krivulje za različne valovne dolžine.

LABORATORIJSKE VAJE

1. VAJA: Helij-neonski laser

Pri HeNe plinskem laserju lahko enostavno opazujemo ter izmerimo prag laserja. Prag laserja je tista moč vzbujanja laserja, ki ravno zadošča za nihanje laserja. Pri laserjih z električnim vzbujanjem (plinski, polprevodniški) običajno definiramo tok praga laserja. Če laser vzbujaemo z manjšim tokom od praga, bo ojačenje laserja premajhno za vzdrževanje laserskega nihanja in naprava bo oddajala le običajno svetlobo tlivke ali svetleče diode. Električni ekvivalent te zadnje vrste svetlobe je šum ojačevalnika, ki ima preslabotno povratno vezavo, da bi nihal kot oscilator.

- Od česa je odvisna barva svetlobe, ki jo oddaja HeNe laser?
- Na koliko spektralnih črtah, običajno, niha HeNe laser?
- Kakšna je polarizacija svetlobe, ki izhaja iz rotacijsko simetričnega HeNe laserja?
- Kako dosežemo, da laser oddaja točo določeno linearno polarizirano svetlobo?
- Izmeri pragovni in delovni tok HeNe laserske cevi!
- Oцени izkoristek laserske cevi!

Barva svetlobe, ki jo oddaja He-Ne laser je odvisna od frekvenšno odvisnih zrcal, s katerimi dosežemo nihanje laserja tudi na drugih valovnih dolžinah v vidnem spektru (oranžna, rumena ali zelena svetloba). Zaradi rotacijsko-simetrične konstrukcije laserske cevi je polarizacija HeNe laserja nedoločena. Zaradi pozitivne povratne vezave v laserju bo tudi najmanjša dvolomnost zrcal povzročila, da bo laser rajši nihal z določeno polarizacijo. Ravnina polarizacije je nestabilna in se s segrevanjem laserske cevi počasi spreminja. Delovanje HeNe laserja s povsem določeno linearno polarizacijo dosežemo z vgradnjo steklene ploščice v rezonator, ki mora biti nagnjena za Brewster-jev kot glede na smer žarka v rezonatorju.

VAJA 15. - MERITVE POLARIZACIJE SVETLOBE

POLARIZACIJA

Svetloba je elektromagnetno valovanje. Elektromagnetno valovanje spada v družino prečnih (transverzalnih) valovanj. Medtem ko je lega vzdolžnih (longitudinalnih) valovanj v prostoru (na primer zvočnega valovanja) natančno opisana s smerjo razširjanja valovanja, potrebujemo za vsa prečna valovanja še dodaten podatek za opis lege in orientacije valovanja v prostoru. Ta dodatni podatek imenujemo polarizacija valovanja.

Čeprav obstaja neskončno mnogo različnih polarizacij za vsako prečno valovanje, lahko poljubno polarizacijo vedno sestavimo kot uteženo vsoto dveh izbranih pravokotnih (ortogonalnih) polarizacij. Najenostavnejša polarizacija je linearna polarizacija. Pri linearni polarizaciji imajo vektorske veličine (na primer električno ali pa magnetno polje) eno samo smer v prostoru. Pri linearni polarizaciji ima pojem pravokotne polarizacije tudi neposreden geometrijski pomen: dve pravokotni polarizaciji imata enakovredni vektorski veličini (električni ali pa magnetni polji) med sabo pravokotni.

Polarizacija valovanja je običajno odvisna le od izbire izvora valovanja in se pri prehodu skozi večino snovi ne spreminja. Polarizacija elektromagnetnega valovanja se naprimer ne spreminja pri prehodu skozi prazen prostor ali skozi homogene snovi, ki imajo skalarno dielektričnost in permeabilnost.

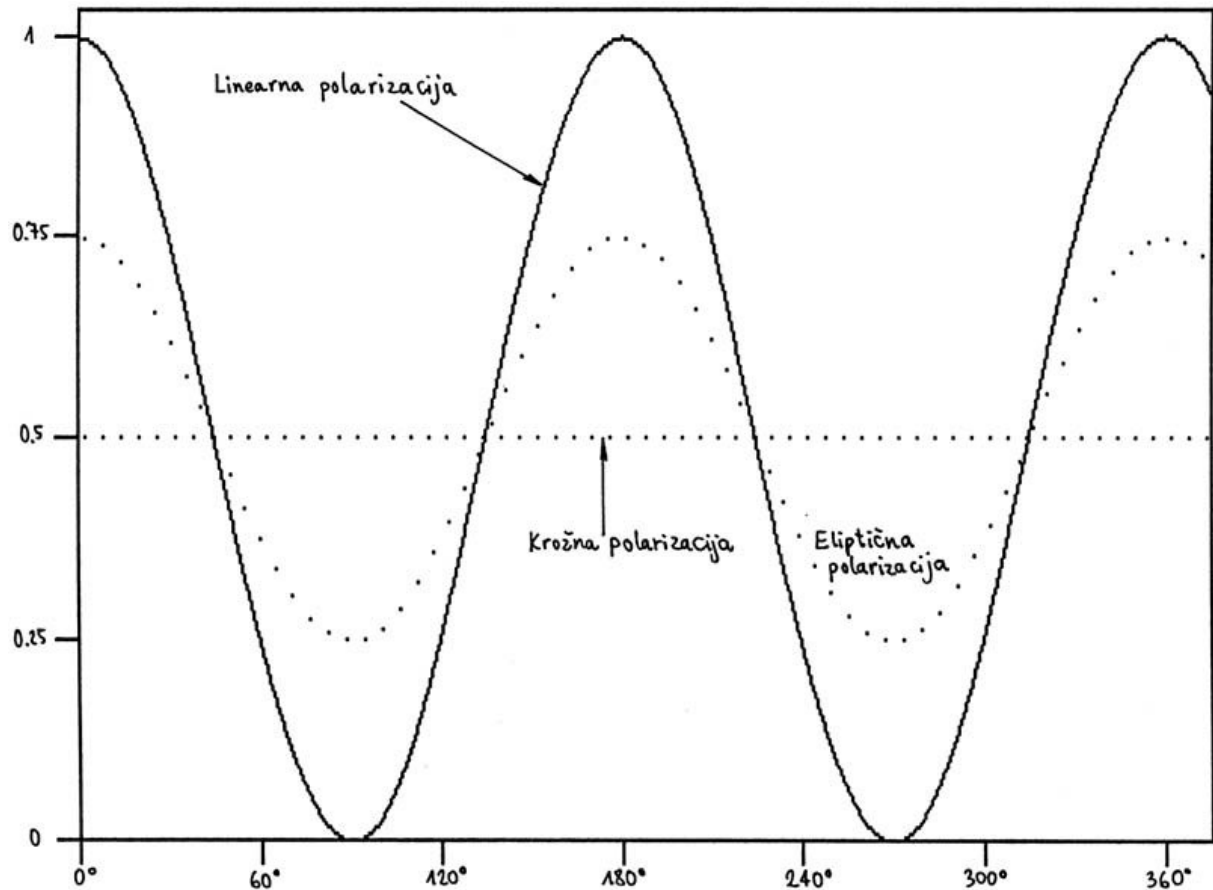
Polarizacija se lahko spremeni pri odboju valovanja na meji dveh snovi z različnima valovnima impedancama. Pri poševnem vpadu valovanja na takšno mejo dveh snovi se odbojnost razlikuje za različne polarizacije vpadnega valovanja. Pri določenem vpadnem kotu (Brewster-jev kot) je odbito valovanje povsem linearno polarizirano ne glede na polarizacijo vpadnega valovanja.

Polarizacija valovanja se seveda spreminja pri prehodu valovanja skozi neizotropne snovi. Naprimer, polarizacija elektromagnetnega valovanja se spreminja pri prehodu skozi snovi, kjer sta ali dielektričnost ali permeabilnost ali obe tenzorski veličini.

V frekvenčnem področju vidne svetlobe je relativna permeabilnost večine uporabnih snovi praktično enaka 1. Različne snovi se zato razlikujejo le po različni dielektričnosti, ki je lahko skalarna ali pa tenzorska veličina.

Napravo za spreminjanje polarizacije svetlobe, se pravi polarizator ali analizator, lahko izdelamo tudi samo z uporabo snovi s skalarno dielektričnostjo in odboja pri Brewster-jevem kotu, vendar ima takšen polarizator ali analizator polarizacije velike izgube svetlobe in je uporaben samo v omejenem področju vpadnih kotov svetlobe.

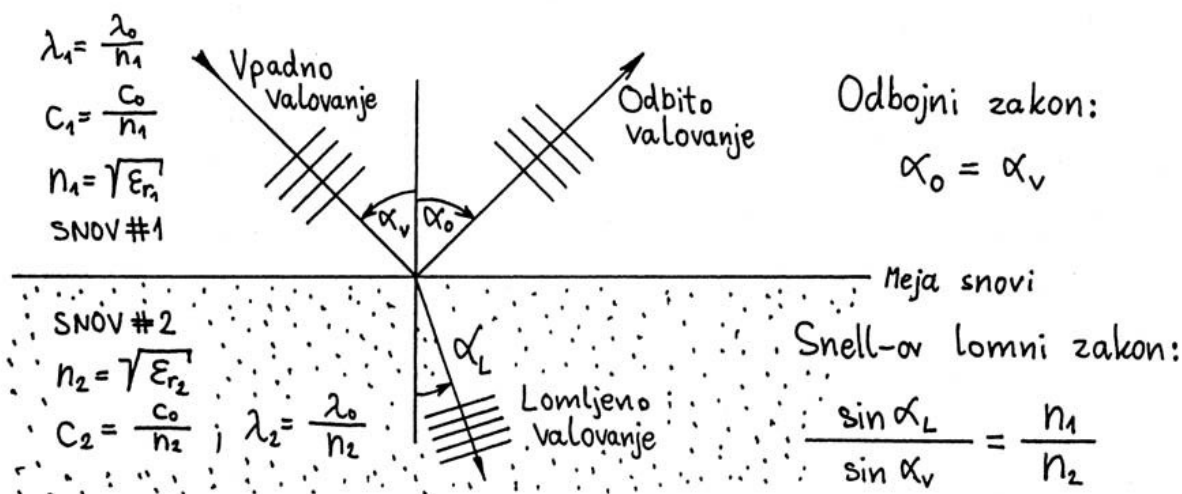
Sodobni polarizatorji so izdelani iz (organskih) snovi, ki imajo neizotropne izgube. Za polarizator izberemo takšno snov, ki ima samo v eni smeri visoke dielektrične izgube. Pri prehodu valovanja skozi takšno snov je ustrezna linearno polarizirana komponenta močno dušena, nanjo pravokotna linearna komponenta pa prehaja skozi snov z majhnimi izgubami.



VAJA 2. - MERJENJE LOMNEGA KOLIČNIKA PREKO POPOLNEGA ODBOJA

2.1. Popolni odboj valovanja

Ko valovanje vpada na mejo dveh različnih snovi, se del valovanja lahko odbije nazaj v izvorno snov, drugi del valovanja pa se lahko lomi v drugo snov. V najbolj splošnem slučaju opazimo oba pojavi, lom in odboj valovanja, kot je to prikazano na sliki 2.1. Pri tem smatramo, da so valovni impedanci in hitrosti razširjanja valovanja v različnih snoveh različne med sabo, kot tudi da je meja med dvema različnima snovema ostro določena.



Povezavo med smermi razširjanja vpadnega, odbitega in lomljenega valovanja dobimo iz zahteve, da je fazni zamik med vpadnim, odbitim in lomljenim valovanjem enak v katerikoli točki mejne ploskve med različnima snovema. Kot odbitega žarka mora zato biti enak kotu vpadnega žarka. Povezavo med kotom vpadnega žarka in kotom lomljenega žarka daje Snell-ov lomni zakon. Svetloba je elektromagnetno valovanje, torej prečno (transverzalno) valovanje. Lastnosti snovi pri svetlobnih frekvencah določa v glavnem dielektričnost, saj je magnetna permeabilnost večine snovi enaka permeabilnosti praznega prostora pri svetlobnih frekvencah. Dielektričnost običajno edina določa hitrost razširjanja svetlobe v snovi, ki jo podajamo z lomnim količnikom, ter valovno impedanco snovi.

V nekaterih primerih ne dobimo odboja valovanja na meji dveh različnih snovi. Odboj izgine, ko sta valovni impedanci dveh različnih snovi med sabo enaki. Odboj lahko izgine tudi takrat, ko meja med snovema ni ostra, pač pa se snovni parametri zelo počasi spreminjajo (glede na valovno dolžino). Končno lahko odboj izgine v posebnih slučajih, naprimer pri vpadu prečnega valovanja z izbrano polarizacijo pod točno določenim kotom (Brewster-jev kot). Ko valovanje prehaja iz (gostejše) snovi z manjšo hitrostjo razširjanja valovanja (višjim lomnim količnikom) v (redkejšo) snov z večjo hitrostjo razširjanja valovanja (nižjim lomnim količnikom), se lahko zgodi, da ne moremo poiskati smeri lomljenega valovanja, ki bi zadostila pogoju, da je medsebojna faza med vpadnim, lomljenim in odbitim valovanjem enaka v katerikoli točki mejne ploskve. Ko ne dobimo lomljenega valovanja, imenujemo pojav popolni odboj. Pogoj za popolni odboj je dovolj velik vpadni kot valovanja glede na pravokotnico na mejno ploskev.

Popolni odboj valovanja na meji dveh dielektrikov je pojav, ki ga najpogosteje izkoriščamo v različnih optičnih napravah. Ena od možnih uporab popolnega odboja je tudi natančno merjenje lomnega količnika snovi. Ko preide navaden odboj na meji dveh dielektrikov v popolni odboj, lomljeni žarek izgine.

Ker ima večina snovi večji lomni količnik od zraka za vidno svetlobo, je treba najprej dovesti svetlobni žarek v merjeno snov, saj lahko popolni odboj dosežemo le pri izhodu žarka iz snovi z večjim lomnim količnikom v snov z manjšim lomnim količnikom. Da lahko na izstopni ploskvi merjenca dosežemo popolni odboj, izstopna ploskev ne sme biti vzporedna z vstopno ploskvijo. Zato pride za merjenec vpoštev oblika prizme.

Merjenec za to vajo ima obliko prizme z enakokrakim pravokotnim trikotnikom

kot osnovno ploskvijo. Stranice prizme so zato pod kotom 45 ali 90 stopinj. Za opazovanje popolnega odboja izberemo ploskev ob hipotenuzi osnovne ploskve, svetlobni žarek pa naj vstopa skozi ploskev ob kraku osnovne ploskve

Kako bi potekal poskus, če bi bila prizma prevlečena z antirefleksnim slojem na vseh stranicah?

Če bi imela prizma tanek antirefleksni sloj na površini, ta sloj ne bi vplival na rezultat merjenja. Kadar pa prizma ni prevlečena z antirefleksnim slojem, dobimo vrsto odbojev tudi na vstopnih in izstopnih ploskvah, kar da skupaj celo pahljačo žarkov, ki se sučejo z vrtenjem prizme.

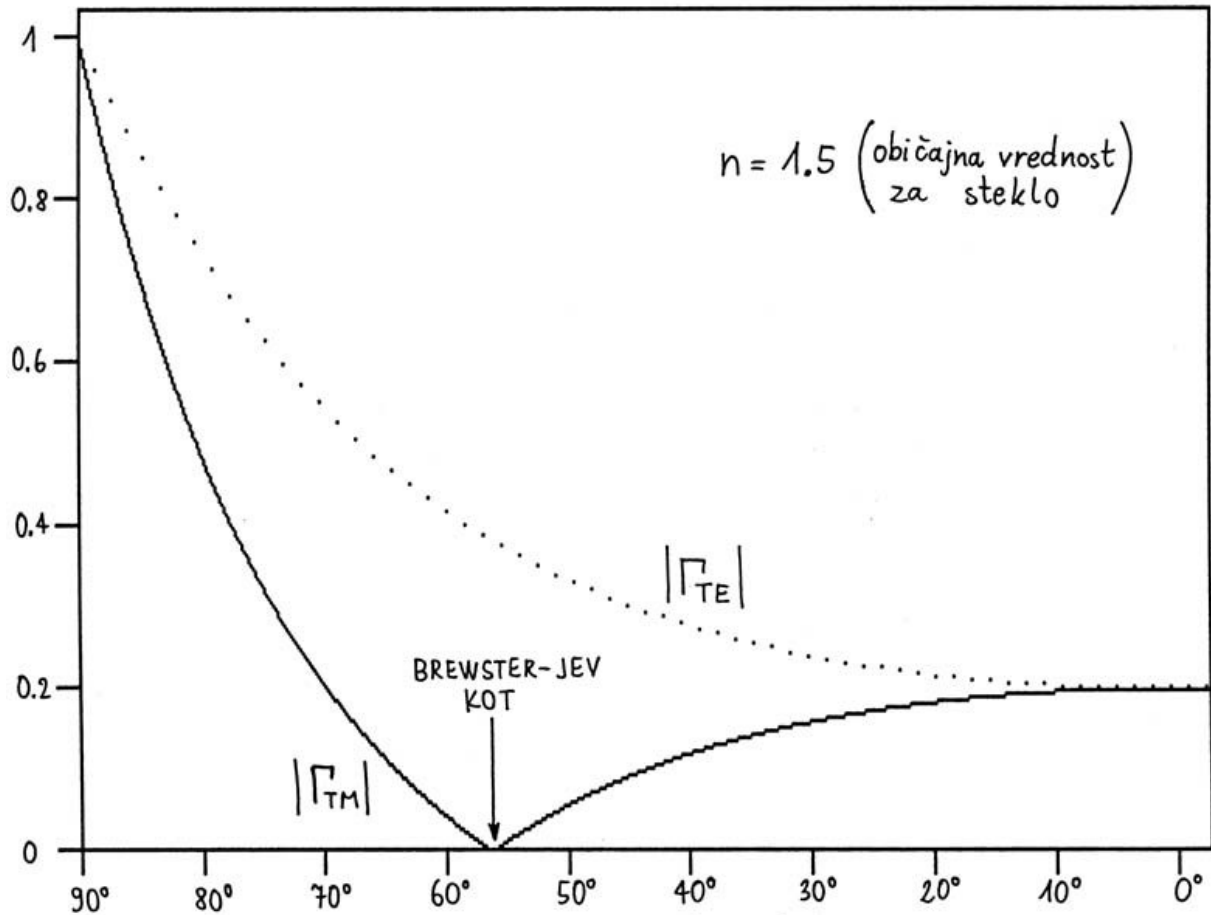
VAJA 3. – Merjenje lomnega količnika iz Brewster-jevega kota

slučaju meje dveh dielektrikov (z enakima magnetnima permeabilnostima, običajno obema enakima ena) opisujeta delitev moči (Fresnel-ova) izraza na sliki 3.1. Izraza se razlikujeta glede na polarizacijo svetlobe. Definiciji TE in TM polarizacije sta zapisani skladno z definicijami v valovodih. V TE slučaju je vektor električnega polja (E) vzporeden z mejo snovi. V TM slučaju pa je vektor magnetnega polja (H) vzporeden z mejo snovi.

Potek velikosti obeh odbojnosti (za TE in TM) za običajno vrednost lomnega količnika (1.5) je prikazan na sliki 3.2. Odbojnost za TM polarizacijo pri določenem kotu upade na nič v slučaju brezizgubnih snovi oziroma doseže minimum. Kot, pri katerem doseže odbojnost za TM polarizacijo minimum, imenujemo Brewster-jev kot.

X=kot,

y =odbojnost, x =vpadni kot



Za svetlobo prozorne snovi imajo zelo majhne izgube, zato je minimum odbojnosti pri Brewster-jevem kotu zelo globok in zelo ozek ter ga lahko na enostaven način natančno izmerimo. Odsotnost odbitega žarka pri Brewsterjevem kotu in pravilni polarizaciji izkoriščamo v različne namene: izdelava enostavnih polarizatorjev svetlobe, izdelava oken z majhnimi izgubami svetlobe (laserji) ter preprečevanje odbojev povsod tam, kjer škodijo delovanju naprave.

4. VAJA: Pojavi v mnogorodovnem optičnem vlaknu

4.5. Vprašanja in naloge vaje

1. Kako je polarizirana svetloba na vhodu mnogorodovnega vlakna?
2. Kako je polarizirana svetloba na izhodu mnogorodovnega vlakna?
3. Izmeri numerično odprtino mnogorodovnega vlakna in podaj njeno pomembnost!
4. V čem se razlikujeta vzorca na zaslonu pri vlaknu s stopničastim lomnim

likom in paraboličnim lomnim likom.

Mnogorodna vlakna so rotacijsko simetrična optična vlakna in ne ohranjo polarizacije svetlobe, kar lahko hitro preverimo s polarizatorjem, ki ga vstavimo med konec vlakna in laser oziroma zaslon. V ukrivljenem vlaknu povzročijo mehanske sile pojav dvolomnosti v sicer amorfne steklu. Ker je vlakno zmotano v svitek, je končni učinek dvolomnosti skoraj nepredvidljiv. Posebna vrst enorodovnih vlaken pa so dvolomna vlakna, ki se od običajnih vlaken razlikujejo po tem, da niso rotacijsko simetrična. Dvolomnost običajno dosežemo z dodatki v oblogi, ki nesimetrično stiskajo jedro vlakna. Dvolomna vlakna ohranjajo polarizacijo svetlobe. Vzorca na zaslonu pri vlaknu s stopničastim lomnim likom in paraboličnim lomnim likom se razlikujeta po tem, da ima vzorec s paraboličnim lomnim likom pike na zaslonu enakomernejše debeline in so bolj simetrično razporejene kot pri vzorcu s stopničastim lomnim likom.

11. Stično slabljenje med mnogorodnima vlaknoma

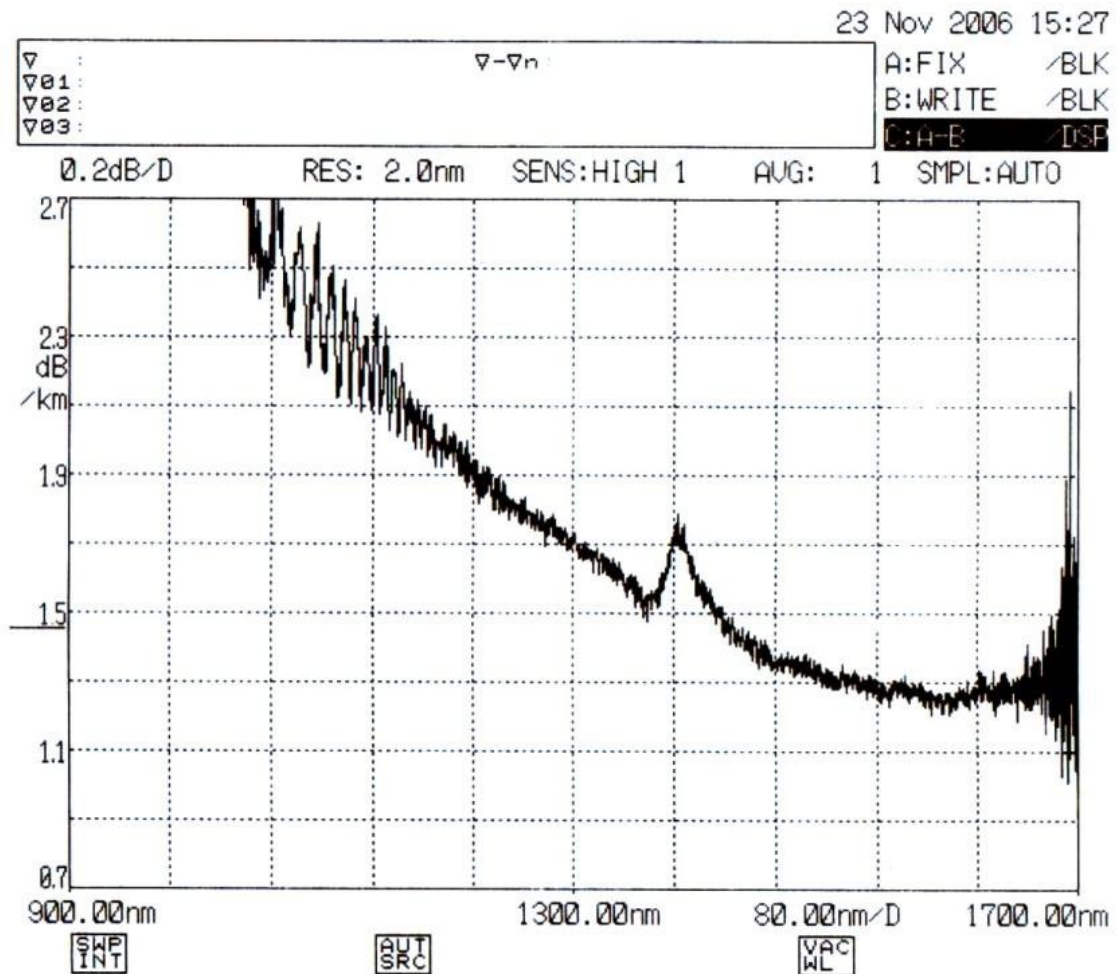
Najprej smo poskušali poiskati čim večji optični sklop med fokusiranim žarkom, ki sveti v vlakno in pri konektorju na konektor. Nato smo pričeli z meritvijo slabljenja mnogorodnega vlakna po vzdolžnem premiku. Ko je bil ta del vaje končan, smo nadaljevali z meritvijo slabljenja s prečnim premikom, brez vzdolžnega premika, kasneje pa tudi z vzdolžnim premikom in sicer, za 200 μm . V spodnji tabelli so navedeni rezultati meritev, na naslednji strani pa tudi grafa, ki še enkrat grafično prikazujeta dobljene rezultate.

Odgovori na vprašanja:

Na relativno moč najbolj vpliva rečni premik vlaken, kar je tudi lepo razvidno iz grafa. Na podlagi dobljenih grafov smo ocenili, da je premer jedra mnogorodnega vlakna okoli 50 μm .

39. VAJA: Meritev slabljenja optičnega delilnika

Pri tej vaji smo merili slabljenje optičnega vlakna s pomočjo optičnega spektralnega analizatorja (OSA). Za širokospektralni vir svetlobe smo uporabili žarnico od grafoskopa in seveda zgoraj omenjen OSA, ki nam je kot rezultat na listu papirja sprintal spektralno odvisnost slabljenja optičnega vlakna (slika 1.1).

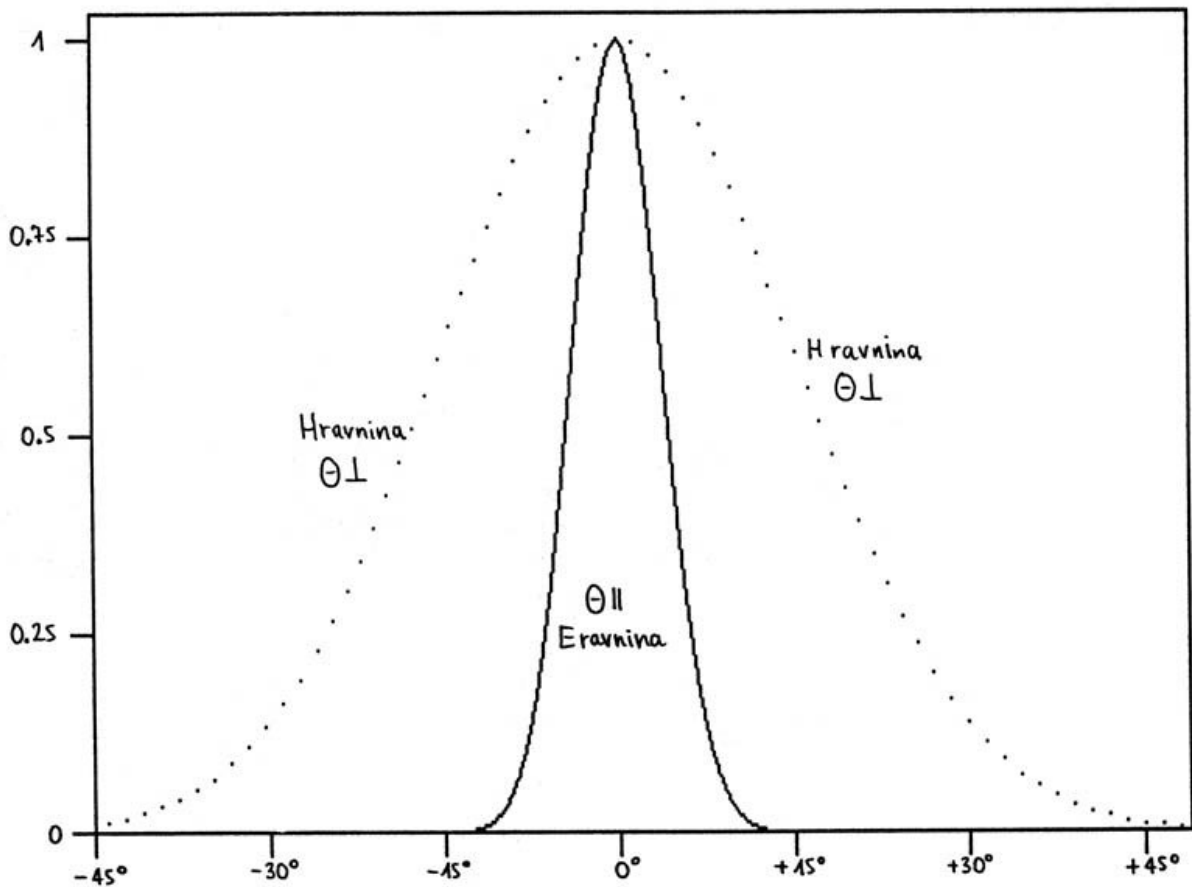


Odgovori na vprašanja:

Slabljenje optičnega vlakna ni enako pri vseh valovnih dolžinah zato, ker imajo delci delci snovi lastnost, da bolj učinkovito sipajo svetlobo izbrane valovne dolžine. 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, pri čemer se svetloba pretvarja v toploto. Razlog za nastanek tretjega spektralnega okna v optičnih komunikacijah je ta, da minimalno slabljenje optičnega vlakna nastopi pri valovni dolžini 1550 nm. Glavna prednost meritve slabljenja optičnega vlakna z OTDR merilnikom je ta, da za meritev potrebujemo samo eno vlakno. Glavne slabosti meritve slabljenja optičnega vlakna z OSA merilnikom predstavlja potreba po visokospektralnem viru in dveh optičnih vlaknih.

8. Smerni diagram sevanja polprevodniškega laserja

Pri vaji je bilo potrebno izmeriti oz. narisati smerni diagram sevanja polprevodniškega laserja v dveh ravninah (E-ravnina in H-ravnina). To smo storili s pomočjo polprevodniške diode in laserja. Laser pa je pritrjen še na dodatno napravo (vrtljak), ki ga horizontalno vrtil v območju od -45° do 45° . Najprej smo fotodiodo nastavili na ustrezno višino in oddaljenost od laserja tako, da smo dobili maksimum smernega diagrama, nato pa smo izvedli prvo meritev. Po izrisu grafa smo laser obrnili za 90° ponovili postopek iskanja maksimuma smernega diagrama in izvedli še drugo meritev. Na koncu vaje pa smo še preverili polarizacijo laserske svetlobe, kar smo izvedli tako, da smo med laserjem in fotodiodo postavili polarizator.



Odgovori na vprašanja:

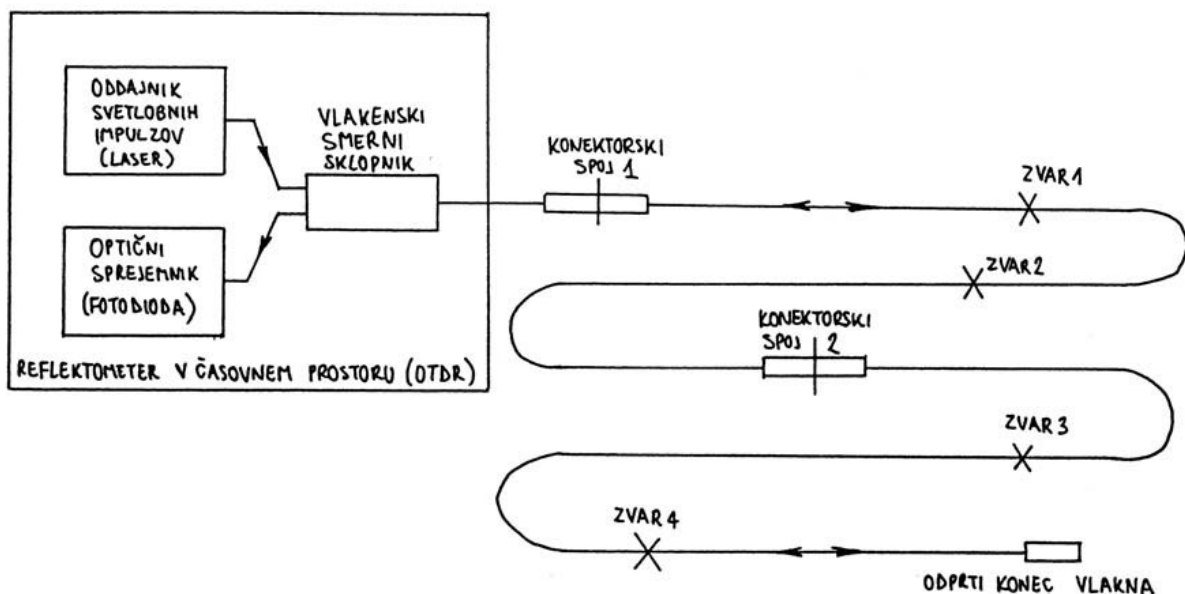
Snop izhodne svetlobe polprevodniškega laserja je sploščen v pahljačo (elipso). Pahljača je sploščena v E-ravnini in razširjena v H-ravnini. Pri laserju, ki niha na več rodovih bi dobili smerni diagram, pri katerem bi bila prereza E-ravnine in H-ravnine zelo podobna. Ugotovili smo, da je laserska svetloba električno polarizirana.

VAJA 13. - OPTIČNI REFLEKTOMETER V ČASOVNEM PROSTORU (OTDR)

13.1. Reflektometerske meritve optične zveze

Pri meritvah resničnih optičnih zvez sta si oba konca zveze nekaj deset do nekaj sto kilometrov narazen, torej običajno nista dostopna hkrati. Za meritev optične zveze bi zato želeli 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.

Reflektometerska meritev v časovnem prostoru je prikazana na sliki 13.1. 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 (glej sliko 13.2). Odboji na zvarih so zanemarljivo majhni.



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. Pri brezhibni optični zvezi vedno opazimo tudi odboj na drugem, prostem koncu 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. Signal reflektometra se sicer širi po istem vlaknu kot signal resnične optične zveze, toda signal reflektometra mora isto pot preteči 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).

Dometa reflektometra povečamo tudi s povprečenjem večjega števila meritev, končni rezultat pa običajno ponazorimo v logaritemski skali, kot je to prikazano na sliki 13.2 spodaj. Ker je Rayleigh-ovo sipanje dobro poznan pojav, predvsem pa se vzdolž vlakna ne spreminja, lahko iz naklona krivulje v logaritemski skali enostavno določimo slabljenje zveze.

Edina preostala spremenljivka je trajanje svetlobnega impluza. S krajšim impulzom dosežemo boljšo natančnost določanja mesta odboja, a hkrati zmanjšamo dometa reflektometra.

Ker nam je merilo za dometa reflektometra možnost opazovanja Rayleighovega sipanja, je reflektometer za valovno dolžino 850nm razmeroma enostaven, za valovno dolžino 1300nm je zahtevnejši in za valovno dolžino 1550nm je reflektometer v časovnem prostoru tehnološko zelo zahtevna naprava.

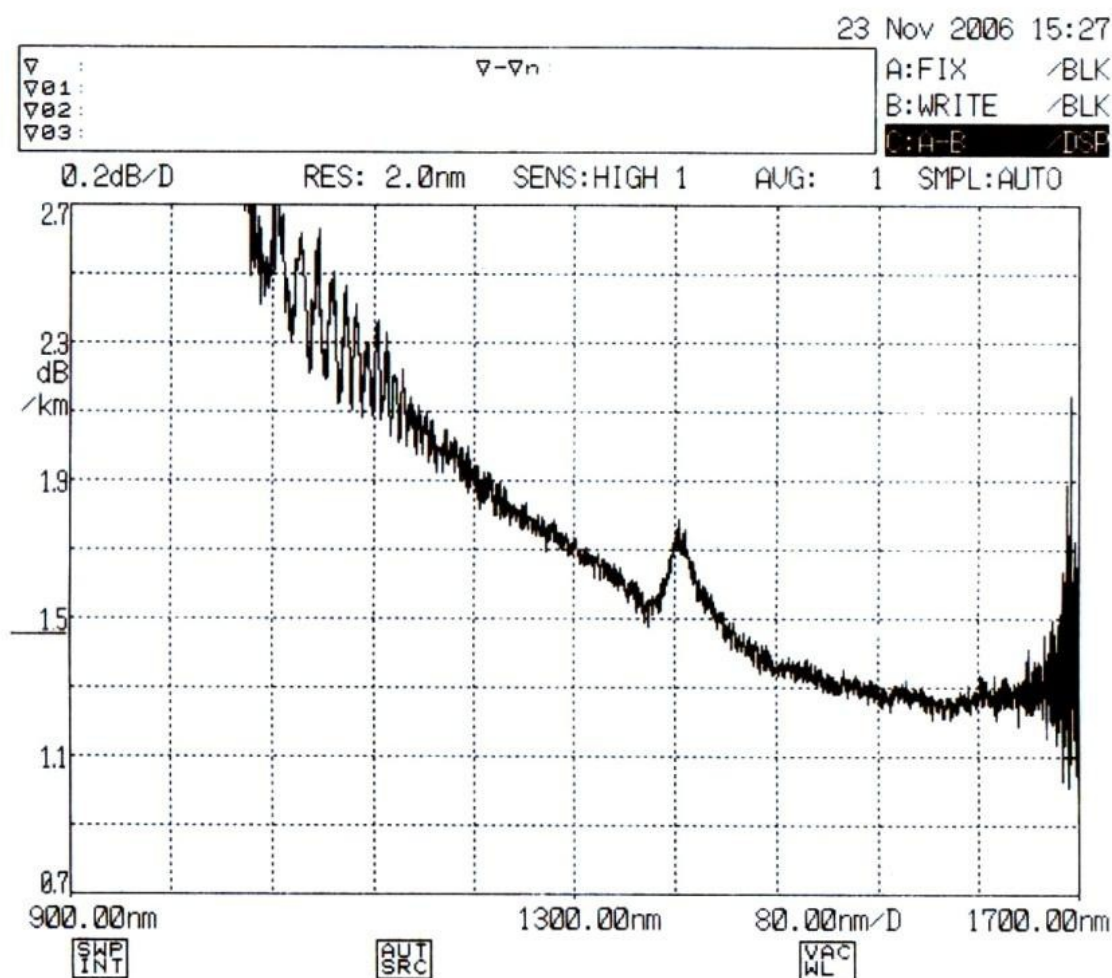
Pri vaji smo s pomočjo generatorja impulzov, laserskega oddajnika, PIN-FET sprejemnika, osciloskopa in še z ostalimi potrebnimi sestavnimi deli vezja izmerili dolžino in ločljivost merjenega optičnega vlakna. To Izvedemo jo tako, da v vlakno pošljemo na enem koncu znan signal in opazujemo, kaj se po določenem času zaradi različnih odbojev vrne na istem koncu vlakna. Po vklopu na osciloskopu dobimo tri impulze, kateri predstavljajo sledeče: Prvi impulz je odboj na konektorjih sklopnika oziroma presluh sklopnika. Drugi impulz je na konektorskem spoju, ki povezuje svitek vlakna in je zaradi dobrega sklopa običajno majhen. Tretji impulz pa je odboj na prostem koncu svitka vlakna. Glede na trajanje uporabljenih impulzov v velikostnem razredu 0.5 μ s, znaša ločljivost reflektometra okoli 50m v optičnem vlaknu. Za izračun dolžine optičnega vlakna smo uporabili spodaj navedeno formulo in izmerjene časovne intervale med impulzi na zaslonu osciloskopa.

Odgovori na vprašanja:

Na podlagi dobljene slike treh impulzov na zaslonu osciloskopa in uporabljene formule, smo izračunali, da je dolžina koluta optičnega vlakna 800m. V našem primeru je ločljivost 200m. Ugotovili smo, da sta si dometa in ločljivost reflektometra v obratnem sorazmerju, npr. daljši, kot je impulz, večji je dometa, vendar manjša ločljivost reflektometra.

10. Meritev slabljenja optičnega vlakna

Pri tej vaji smo merili slabljenje optičnega vlakna s pomočjo optičnega spektralnega analizatorja (OSA). Za širokospektralni vir svetlobe smo uporabili žarnico od grafoskopa in seveda zgoraj omenjen OSA, ki nam je kot rezultat na listu papirja sprintal spektralno odvisnost slabljenja optičnega vlakna (slika 1.1).



Odgovori na vprašanja:

Slabljenje optičnega vlakna ni enako pri vseh valovnih dolžinah zato, ker imajo delci delci snovi lastnost, da bolj učinkovito sipajo svetlobo izbrane valovne dolžine. 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, pri čemer se svetloba pretvarja v toploto. Razlog za nastanek tretjega spektralnega okna v optičnih komunikacijah je ta, da minimalno slabljenje optičnega vlakna nastopi pri valovni dolžini 1550 nm. Glavna prednost meritve slabljenja optičnega vlakna z OTDR merilnikom je ta, da za meritev potrebujemo samo eno vlakno. Glavne slabosti meritve slabljenja optičnega vlakna z OSA merilnikom predstavlja potreba po visokospektralnem viru in dveh optičnih vlaknih.

13. Frekvenčni pas mnogorodovnega gradientnega vlakna

Pri vaji smo morali izmeriti dve veličini: frekvenčno pasovno širino danega svitka optičnega vlakna in dolžino vlakna v svitku. Ker smo merili pri frekvencah do 1GHz, smo morali upoštevati tudi frekveni odziv laserskega oddajnika in APD sprejemnika. Zato smo najprej povezali APD-FET sprejemnik naravnost na izhod laserja in izmerili frekvenčni odziv samega oddajnika, sprejemnika in voltmetra. Nato smo vstavili še svitek vlakna in meritev ponovili. Frekvenčni odziv vlakna je seveda kvocient obeh meritev. Meritev frekvenčnega odziva motijo predvsem odboji na številnih električnih konektorjih in spojih optičnih vlaken, zato je rezultat precej nagrbčena krivulja, kot je prikazana na grafu na nasledni strani. Meritev moramo zato opraviti na zadosti velikem številu frekvenc, da lahko skozi izmerjene točke potegnemo smiselno krivuljo in določimo frekvenčno mejo, kjer odziv upade za 3dB. Nato smo izmerili še dolžino vlakna preko meritve faze visokofrekvenčnega signala.

16. Temperaturna odvisnost pragovnega toka laserja

Pri vaji smo uporabili laserski modul s toplotno črpalko in ustreznim zaščitnim vezjem. Toplotna črpalka je izdelana kot baterija termočlenov, ki ohlajajo oziroma segrevajo laser glede na smer enosmerne električne toka. Za meritev temperature smo uporabili NTC upor, ki zaznava temperaturne spremembe Peltier-ove toplotne črpalke. Pred začetkom meritev smo najprej umerili vodoravno skalo za tok laserske diode na osciloskopu. Pri merjenju smo morali sproti prevajati upornost v temperaturo, iz izmerjene upornosti določiti temperaturo laserske diode s pomočjo ustrezne krivulje na podanem diagramu, ki prikazuje upornost termistorja kot funkcijo temperature. Po priključitvi toplotne črpalke smo takoj opazili spreminjanje upornosti NTC termistorja in premikanje kolena tokovne krivulje laserja. Temperatura laserske diode se je ustalila šele čez kakšno minuto, nakar smo odčitali upornost termistorja in pragovni tok laserja. Kot prag laserja smo vzeli točko, v kateri bi podaljšek poševnega dela krivulje na osciloskopu sekal ordinatno os.

Odgovori na vprašanja:

Monitorska dioda običajno izkorišča svetlobo, ki izhaja na drugem koncu laserskega čipa. Preko monitorske diode lahko preverjamo delovanje laserja in spremembe pragovnega toka laserske diode popravljamo z nastavljanjem delovnega toka diode. Signal iz monitorske diode ni povsem sorazmeren s sklopljeno močjo v optično vlakno in ga lahko uporabljamo le kot pripomoček za vpogled v delovanje laserja, ne pa za točne meritve.

17. Meritev jakostnega šuma polprevodniškega laserja

Pri vaji smo merili razmerje signal/šum v optični zvezi z majhnim slabljenjem na prenosni poti. Kot merjenec smo uporabili Fabry-Perot-ovo (FP) lasersko diodo za 1300nm in DFB lasersko

diodo za 1550nm. Za prikaz optičnega spektra smo uporabili spektralni analizator zato, da slika pri počasnejšem mehanskem skeniranju optičnega rezonatorja ne utripa.

18. LiNbO₃ Elektrooptični amplitudni modulator

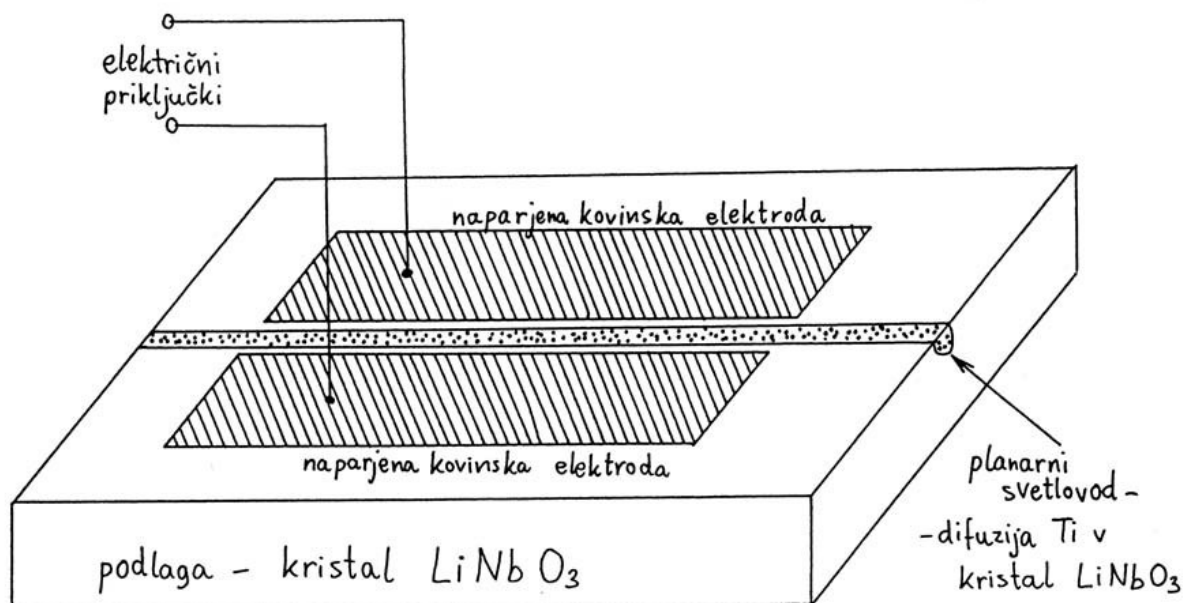
Pri vaji smo merili napetostno razliko med maksimumom in minimumom odziva modulatorja (U_{π}) za BIAS vhod pri obeh polarizacijah (TM in TE) in pri dani valovni dolžini 1300nm. Polprevodniški laserji so sicer vsi linearno polarizirani, vendar se ravnina polarizacije hitro spreminja v običajnih rotacijsko-simetričnih optičnih vlaknih. Zato vgradimo med laserski oddajnik in elektrooptični modulator polarizacijski sukelnik, s katerim lahko nastavimo poljubno polarizacijo ter izmerimo krivuljo modulatorja za obe TE in TM polarizaciji. S pomočjo $U_{\pi TE}$ in $U_{\pi TM}$ smo nato izračunali polarizacijsko občutljivost modulatorja.

22.1. Modulacija svetlobnih izvorov

Večina sedanjih optičnih zvez uporablja neposredno modulacijo napajalnega toka skozi LED ali lasersko diodo. S primerno konstrukcijo polprevodniških svetlobnih izvorov se da doseči hiter odziv (1ns) in razmeroma linearno krivuljo izhodne svetlobne moči v odvisnosti od krmilnega toka. Za digitalne optične zveze do hitrosti približno 1Gb/s je takšna rešitev povsem zadovoljiva. Za še višje hitrosti oziroma za prenos analognih signalov, naprimer več deset TV programov po enem samem optičnem vlaknu, opisana rešitev več ne zadošča. Odziv laserskih diod je prepočasen, poleg tega pa 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 2.5Gb/s in več še posebno občutljive.

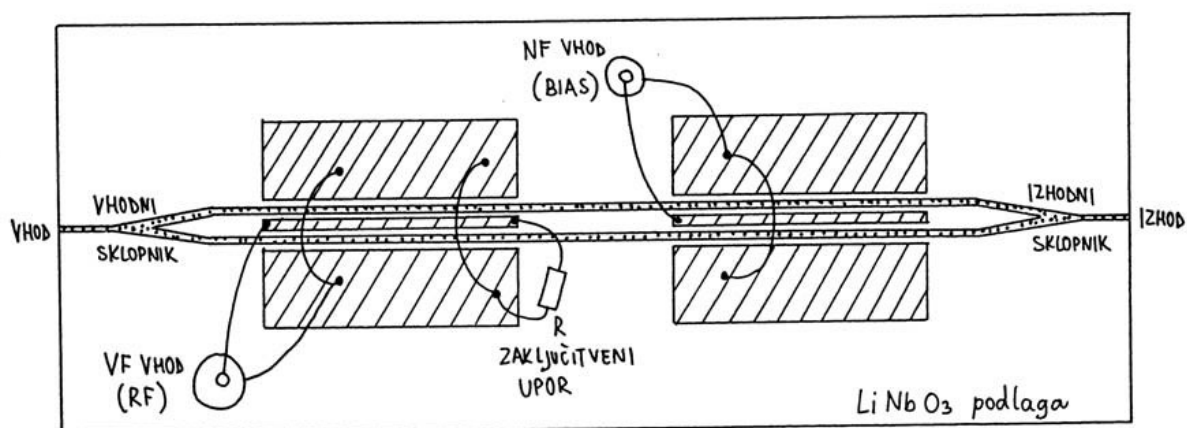
Edina smiselna tehnična rešitev je zato ločen modulator, da lahko dela DFB laser v stabilnem enosmernem režimu z izredno ozko spektralno črto. Od vseh znanih fizikalnih pojavov, s pomočjo katerih lahko moduliramo svetlobni žarek, ima dovolj hiter odziv in dovolj veliko občutljivost za električne krmilne signale elektrooptični pojav.

Elektrooptični pojav pomeni v grobem, da je lomni količnik snovi odvisen od zunanega enosmernega ali nizkofrekvenčnega električnega polja. Za elektrooptične naprave je najprimernejša snov kristal litijevega niobata (LiNbO₃), v katerem lahko z difuzijo titana (Ti) povečamo lomni količnik in tako naredimo planarne svetlovode. Najenostavnejša elektrooptična naprava je optični fazni sukelnik, ki je prikazan na sliki 22.1.



Ker uporablja večina sistemov optičnih zvez nekoherentne sprejemnike, ki so občutljivi le na amplitudo signala, sam optični fazni sukelnik ni kdovekako uporabna naprava. Fazno modulacijo pretvorimo v amplitudno tako, da fazni sukelnik vgradimo v en krak interferometra. Še večji učinek dosežemo takrat, če vgradimo dva fazna sukelnika v oba kraka Mach-Zehnderjevega interferometra ter ju krmilimo s protifaznimi signali.

Ker so optični interferometri zelo občutljive naprave, je edina tehnično smiselna rešitev amplitudnega modulatorja vgradnja celotnega MZ interferometra z obema faznima sukelnikoma v eno samo optično integrirano vezje na podlagi iz litijevega niobata, kot je to prikazano na sliki 22.2. Prikazani modulator vsebuje v resnici štiri fazne sukelnike, po dva ločena v vsakem kraku interferometra, predvsem zaradi enostavnejše praktične uporabe.



Če stranski elektrodi ozemljimo ter privedemo modulacijski signal na srednjo elektrodo, smo z geometrijsko razporeditvijo elektrod enostavno dosegli krmiljenje faznih sukelnikov v protifazi. Krmiljenje elektrod postane zahtevnejše, ko postane dolžina elektrod primerljiva z valovno dolžino modulacijskega signala. Delovanje modulatorja v širokem frekvenčnem pasu dosežemo z vzbujanjem potujočega električnega vala na elektrodah. Z zaključitvenim uporom preprečimo nastanek stojnega vala.

Pri modulatorju s potujočim električnim valom seveda ni več vseeno, kje je

optični vhod in kje optični izhod. Veliko pasovno širino dosežemo le takrat, ko se optični signal širi v isti smeri in s približno enako hitrostjo kot električni val. Tej zadnji zahtevi težko ugodimo, ker je lomni količnik LiNbO_3 približno 2.2 za svetlobo in okoli 4 za nizke frekvence v radijskem spektru. Večjo pasovno širino modulatorja lahko dosežemo le s krajšimi elektrodami oziroma z nanosom sloja SiO_2 med površino LiNbO_3 in kovinske elektrode, kar poveča hitrost modulacijskega vala. Oba ukrepa za zvečanje pasovne širine žal zelo zmanjšata občutljivost modulatorja.

Večina LiNbO_3 elektrooptičnih modulatorjev vsebuje dva para faznih sukalnikov. Prvi par je visokofrekvenčni par, elektrode imajo obliko VF prenosnega voda in zaključitveni upor. Drugi par je nizkofrekvenčni oziroma enosmerni par, brez kakršnihkoli zaključitvenih uporov. Z nizkofrekvenčnim parom nastavimo želeno delovno točko modulatorja (BIAS) ter popravimo odstopanja simetrije interferometra. Na ta način preprečimo veliko izgubo moči v zaključitvenem uporju VF elektrod, ki bi segrevala občutljivi LiNbO_3 kristal. Elektrooptični modulator ni brezizgubna naprava. Izgube v planarnem svetlovodu v LiNbO_3 znašajo okoli 0.1dB/cm oziroma 10000dB/km. Poleg tega se po 1dB izgubi v vsakem sklopniku in še po 1dB v vsakem spoju optičnega vlakna na LiNbO_3 kristal. Najmanjše vstavitevno slabljenje modulatorja je zato okoli 5dB, z ustreznimi krmilnimi napetostmi na elektrodah pa lahko to slabljenje le še večamo.

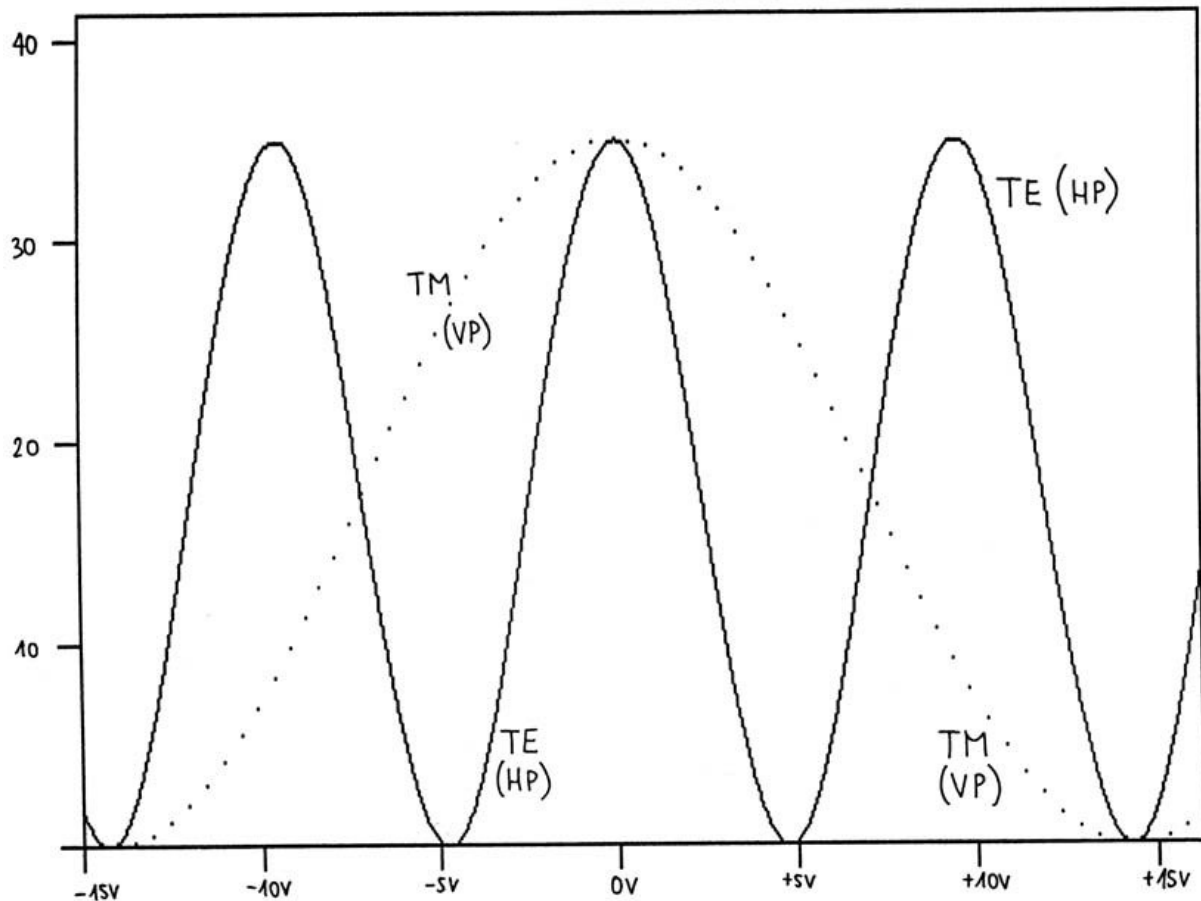
Kristal LiNbO_3 je močno dvolomen in tudi elektrooptični pojav ni enak za različne polarizacije vhodnega signala. Ploščica LiNbO_3 v modulatorju je tako izrezana iz kristala, da je elektrooptični pojav največji za TE polarizacijo (HP). Elektrooptični pojav za TM polarizacijo (VP) je približno trikrat manjši oziroma zahteva trikrat večjo krmilno napetost na elektrodah. Elektrooptični modulator je zato vsaj na vhodu opremljen z močno dvolomnim optičnim vlaknom, ki zadržuje polarizacijo vhodnega signala.

Polprevodniški laserji so sicer vsi linearno polarizirani, vendar se ravnina polarizacije hitro spreminja v običajnih rotacijsko-simetričnih optičnih vlaknih. Zato vgradimo med laserski oddajnik in elektrooptični modulator polarizacijski sukalnik, s katerim lahko nastavimo poljubno polarizacijo ter izmerimo krivuljo modulatorja za obe TE in TM polarizaciji.

Če nimamo sukalnika, si pomagamo s približno 10m enorodovnega optičnega vlakna, ki ga navijemo na premer 10-12cm. S premikanjem enega ali več ovojev lahko dosežemo poljubno polarizacijo izhodnega signala, kar nazorno vidimo na osciloskopu.

Slika 22.4. – Odziv LiNbO_3 elektrooptičnega amplitudnega modulatorja.

Napetost



19. Merjenje pogostosti napak v optični zvezi

Pri vaji smo merili odvisnost pogostosti napak od vhodne optične moči. Izhod polinomskega generatorja (+15dBm) smo povezali preko 10dB slabilnika, kar da primerno moč (+5dBm) za krmiljenje laserskega oddajnika, pri bitni hitrosti 20Mb/s. To pomeni, da se celoten vzorec ponavlja 153-krat v sekundi oziroma da je razmak med posameznimi spektralnimi črtami komaj 153Hz. Število napak smo prešteli z digitalnim števcem (digitalnim frekvencometrom). Poleg frekvencometra pa sta nas na napake opozarjala še piskač in rdeča LED, ki sta zaradi počasnosti naših ušes in oči krmiljena preko primernih časovnih konstant. Spodaj je podana tabela izmerjenih podatkov, na nasledni strani pa tudi logaritmični graf pogostosti napak (BER) kot funkcija vhodne optične moči (graf 1.1). Pogostnost napak (angl. Bit Error Rate ali BER) je zato merilo kvalitete vsake digitalne zveze in se pri našem primeru izračuna po spodaj navedeni formuli:

Odgovori na vprašanja:

Svitek optičnega vlakna oziroma vlakno v resnični zvezi vnaša veliko zakasnitev. Ker uporabljeni sprejemnik ne zna sam izluščiti takta iz signala, privedemo do njega takt iz polinomskega generatorja preko faznega sukalnika. Ker je takt periodičen signal s frekvenco 20MHz, zadošča nastavljanje zakasnitve v območju od 0 do 50ns, kar ustreza fazi takta od 0 do 360°. Fazo takta seveda izberemo tako, da dobimo minimalno število napak.