

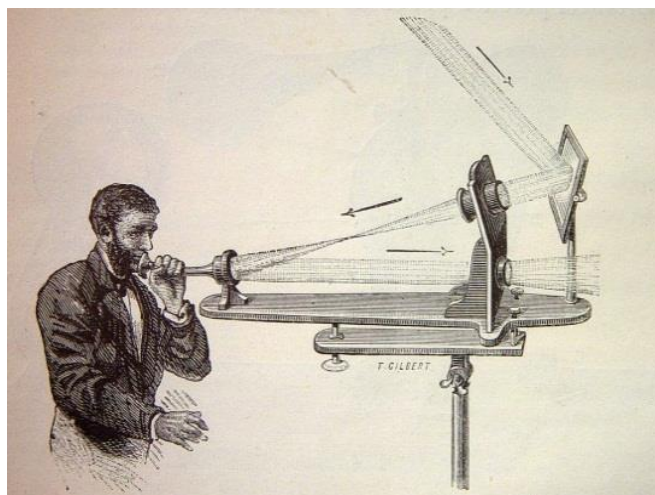
Optička vlakna (fiveri)

Kada je potrebno preneti informacije (npr. govor, slike ili podatke) na veliku daljinu, koristi se koncept komunikacije pomoću nosećih talasa. U takvim sistemima, informacija koja se šalje moduliše elektromagnetni talas (radio-talas ili mikrotalas) koji služi kao nosač. Modulirani talas se onda šalje kroz odgovarajući kanal do prijemnika, koji ga demoduliše da bi se dobila poslata informacija. Na primer, AM (amplitude-modulated) radio mreža koristi talase frekvencija u intervalu od 600 kHz do 2 MHz. Ako pretpostavimo da je najveća frekvencija povezana sa muzikom 20 kHz, onda se oko noseće frekvencije od 1,5 MHz formira propusni interval 1,48-1,52 MHz frekventne širine od 40 kHz. Odavde sledi da je u celom AM radio području moguće formirati do tridesetak prenosnih kanala (svaki nosi radio signal različite stanice). Sa druge strane, u prenosu TV signala, šalje se znatno više informacija, jer se istovremeno prenose i slika i govor, tako da je širina kanala mnogo veća, reda 5MHz. Sada je znatno veća i noseća frekvencija, u intervalu od 500-900 MHz.

Pošto optički (svetlosni) snop ima frekvenciju u oblasti 10^{14} - 10^{15} Hz, korišćenje takvog snopa kao nosača informacija bi dovelo do neverovatnog povećanja sposobnosti prenosa informacija u odnosu na sisteme sa radio- i mikrotalasima. Na primer, kroz par žica u običnom telefonskom kablju, moguće je istovremeno obaviti 48 razgovora. Sa druge strane, u optičkom komunikacionom sistemu, koji koristi staklena vlakna kao prenosnu sredinu i svetlosne talase kao noseće talase, moguće je poslati preko 1Tbit informacija (što odgovara obavljanju 15 miliona simultanih razgovora) kroz optičko vlakno debljine vlasi kose (urađeno 2001. godine).

Ideja o korišćenju svetlosnog zraka za prenos informacija nije nova. Ona potiče od Aleksandra Grahama Bela koji je konstruisao prvi fotofon davne 1880. U ovom neverovatnom eksperimentu, govor je transmitovan modulacijom sunčeve svetlosti pomoću dijafragme. Tako modifikovan zrak se prostirao kroz vazduh do prijemnika povezanog na slušalicu. Prijemnik je bio udaljen oko 200 m.

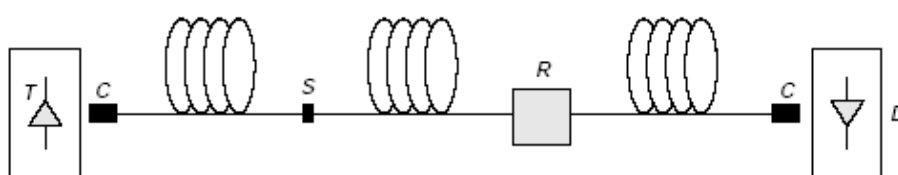
Dakle, osnovna ideja fotofona je bila da se moduliše svetlosni zrak. U tu svrhu je korišćeno vibrirajuće ogledalo: tanko ogledalo koje menja svoj oblik iz konkavnog u konveksni, i obrnuto. Na taj način je poslati svetlosni snop fokusiran ili dispergovan, što je rezultiralo varijacijom osvetljenosti prijemnika. Promena osvetljenosti je dovodila do promene otpora selenske foto – ćelije i promene napona u kolu prijemnika, koja se zatim običnom telefonom slušalicom demoduliše u zvuk.



Slika 1. Fotofon konstruisan 1880. godine.

Graham Bel je do kraja života fotofon smatrao svojom najvećom inovacijom koju je ikad napravio, većom i od telefona. Ali, za razliku od telefona, fotofon nikad nije dostigao široku upotrebu i komercijalnu vrednost.

Prvi savremeni eksperimenti sa optičkim sistemima su koristili prostiranje laserske svetlosti kroz slobodnu atmosferu. Vrlo brzo je utvrđeno da na taj način ne može biti poslata informacija na veliku daljinu, jer laserski zrak bude apsorbovan i izobličen u atmosferi. Kao najbolja sredina za prenošenje svetlosnih signala na velike daljine se pokazalo optičko vlakno napravljeno od stakla (od silike, SiO_2). Šema jednog takvog optičkog sistema je predstavljena na slici 2.



Slika 2. Tipičan komunikacioni sistem sa optičkim vlaknima. Sastoji se od emitera (transmitter) T koji može biti laserska dioda ili LED (light emitting diode), čija se svetlost uvodi u optičko vlakno pomoću konektora C. Duž puta kojim se prostire vlakno, nalaze se spojevi (splices) S koje su čvrsta veza između delova vlakna, kao i repetitor R koji pojačava signal i koriguje sva izobličenja koja su se nakupila duž optičkog vlakna. Na kraju linka se koristi kupler C za prenos svetlosti iz vlakna na fotodetektor D koji dospelu svetlost ponovo vraća u početni signal.

Totalna refleksija

Srce optičkog komunikacionog sistema predstavlja optičko vlakno koje služi kao prenosni kanal koji nosi svetlosni zrak sa jednog mesta na drugo. Kao što je pomenuto, vođenje svetlosnog snopa (kroz optičko vlakno) je moguće zahvaljujući fenomenu totalne unutrašnje refleksije TIR (Total Internal Reflection). Zrak koji nailazi iz optički gušće sredine (indeksa prelamanja n_1) na granici se prelama od normale u ređoj sredini (indeksa prelamanja n_2), i upadni ugao pri kome je prelomni ugao jednak 90° se zove granični (kritični) ugao:

$$\alpha_g = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

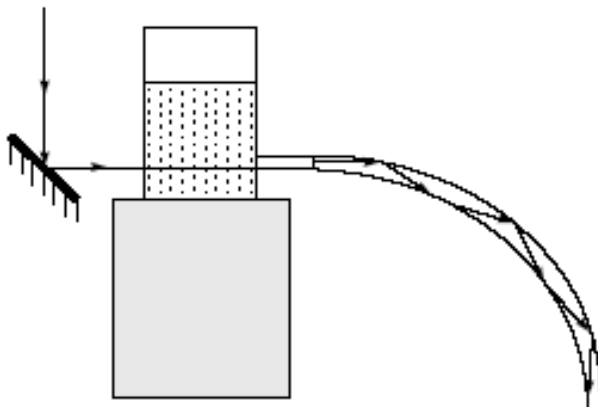
Primer 1. Za granicu staklo-vazduh, $n_1=1.5$ i $n_2=1.0$, kritični ugao ima vrednost:

$$\alpha_g = \arcsin\left(\frac{1.0}{1.5}\right) \approx 41.8^\circ.$$

Sa druge strane, za granicu staklo-voda, $n_1=1.5$ i $n_2=3/4$,

$$\alpha_g = \arcsin\left(\frac{4/3}{1.5}\right) \approx 62.7^\circ.$$

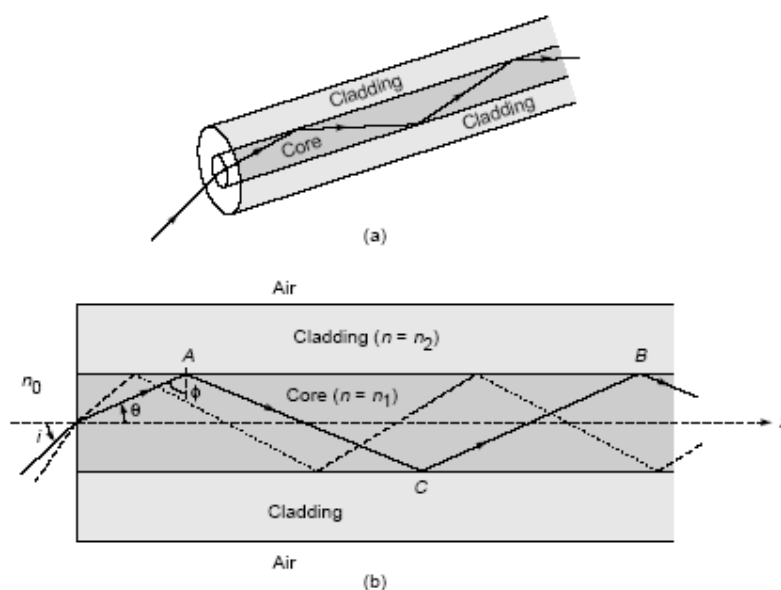
Prvi eksperimentalna demonstracija totalne unutrašnje refleksije je izvedena slanjem svetlosnog zraka u vodeni mlaz. To su demonstrirali Daniel Colladon 1841. godine i Jacques Babinet 1842. godine. Šema te demonstracije je predstavljena na slici 3. Svetlost se totalno reflektuje na granici voda-vazduh i putuje duž zakrivljenog mlaza vode, koja curi iz posude.



Slika 3. Vođenje svetlosti kroz mlaz vode, demonstracija fenomena totalne unutrašnje refleksije. Prvi put demonstrirao Daniel Colladon, 1841. godine.

OPTIČKO VLAKNO (FIBER)

Na slici 4 je predstavljeno optičko vlakno, koje se sastoji od (cilindričnog) centralnog dielektričnog jezgra, oko koga se nalazi omotač od materijala sa manjim indeksom prelamanja (manji u odnosu na indeks prelamanja jezgra).



Slika 4. (a) Stakleno vlakno se sastoji od cilindričnog jezgra u centru, obmotanog materijalom sa manjim indeksom prelamanja. (b) Svetlosni zraci koji upadnu na granicu jezgro-omotač pod uglom većim od kritičnog (graničnog) su zarobljeni u jezgru optičkog vlakna. Prečnik omotača je uglavnom 125 μm . Za multimodne fibre, dijametar jezgra D je obično u intervalu 25 do 50 μm . Za single-mode fibre, taj dijametar je između 5 i 10 μm .

Za opisivanje indeksa prelamanja optičkog vlakna uvodi se parametar Δ , kroz jednačinu:

$$\Delta \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} .$$

U slučaju staklenih multi-modnih vlakana (silica fibers), $D \approx 25 \mu\text{m}$, $n_2 \approx 1.45$ (čista silika), indeks prelamanja jezgra $n_1 \approx 1.465$ i $\Delta \approx 0.01$. Omotač je obično od čiste silike, dok je jezgro od silike dopirane germanijum (što dovodi do povećanja indeksa prelamanja.)

Zašto staklena optička vlakna?

Da citiramo profesora W. A. Gambling, koji je jedan od pionira na polju fiber optike: “Zapazimo da je staklo izuzetan materijal koji se u “čistoj” formi koristi već 9000 godina. Sastav se vrlo malo promenio tokom milenijuma a njegovo korišćenje je svuda prošireno.

Tri glavne karakteristike stakla koje ga čine izuzetno vrednim materijalom su:

1. Prvo, postoji široki opseg dostupnih temperatura unutar koga se viskoznost stakla može kontrolisano menjati, za razliku od ostalih materijala, npr. metala koji hladjenjem naglo prelaze iz čvrstog u tečno stanje. Staklo, sa druge strane, ne očvršćava na nekoj određenoj temperaturi, nego postepeno postaje čvršće i može lako biti izvučeno u tanka vlakna (fibere).
2. Druga važna osobina je da se čista silika karakteriše ekstremno niskim gubicima, to jest izuzetno je prozirno (transparentno). Većina komercijalno dostupnih staklenih vlakana prenosi 96% početne snage kroz vlakno dužine 1km.
3. Treća važna osobina je unutrašnja snaga stakla. Stakleno vlakno koje se koristi u telefonskim mrežama sa prečnikom od 125 μm , što su dve debljine ljudske vlasi, može da izdrži opterećenje od približno 18 kg (load of 40 lb).“

Numerička apertura

Vratimo se ponovo slici 4 i razmotrimo zrak koji upada na ulaznu aperturu optičkog vlakna pod uglom i u odnosu na osu vlakna. Neka prelomljeni zrak zahvata ugao θ sa osom vlakna. Predpostavljajući da spoljašnja sredina ima indeks prelamanja n_0 (spoljna sredina je uglavnom vazduh, $n_0 = 1$), dobijamo:

$$\frac{\sin i}{\sin \theta} = \frac{n_1}{n_0}$$

ako taj zrak treba da bude totalno reflektovan na granici jezgro-omotač, treba da bude zadovoljen uslov:

$$\sin \phi (= \cos \theta) > \frac{n_2}{n_1}, \text{ ili}$$

$$\sin \theta < \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}, \text{ odakle sledi:}$$

$$\sin i < \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2}} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Dakle, ako svetlosni konus upada na jedan kraj optičkog vlakna, on će biti vođen kroz vlakno ako je ispunjen uslov da je polu-ugao konusa manji od i_m . Veličina $\sin i_m$ je poznata pod imenom NUMERIČKA APERTURA vlakna i ona je mera snage prikljupljanja svetlosti optičkog vlakna. Na osnovu ranije rečenog, sledi:

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

Primer:

Za tipičan multimodni fiber, sa $n_1 = 1.45$ i $\Delta \approx 0.01$, dobijamo $\sin i_m = 0.205$ i $i_m = 12^\circ$.

Slabljenje signala u optičkom fiberu

Slabljenje i izobličenje (disperzija) impulsa predstavljaju dve najvažnije karakteristike optičkog vlakna koje ujedno određuju sposobnost prenosa informacija fiber-optičkog komunikacionog sistema. Očigledno je, da što je manje slabljenje (takođe i disperzija) impulsa, veće je potrebno rastojanje između repetitora (slika 2) i stoga će i cena komunikacionog sistema biti niža.

Slabljenje optičkog snopa se obično izražava u decibelima (dB). Ako ulazna snaga P_{input} proizvodi snagu P_{output} na izlazu, gubitak u decibelima je dat izrazom:

$$\alpha = 10 \log \left(\frac{P_{input}}{P_{output}} \right)$$

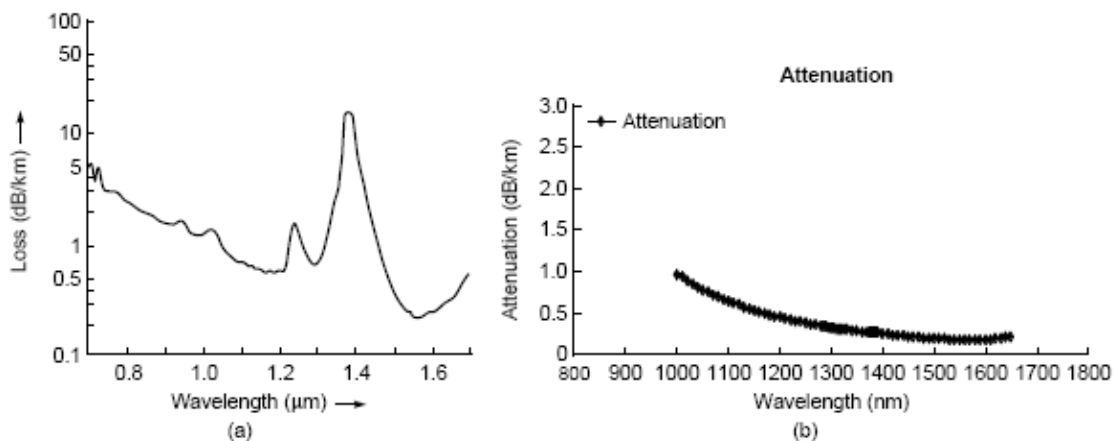
Znači:

- Ako je izlazna snaga jednaka ulaznoj, onda je gubitak = 0 dB.
- Ako je izlazna snaga jednaka desetom delu ulazne, onda je gubitak = 10 dB.
- Ako je izlazna snaga jednaka stotom delu ulazne, onda je gubitak = 20 dB.

- Ako je izlazna snaga jednaka hiljaditom delu ulazne, onda je gubitak = 30 dB.

Slično, ako je snaga na izlazu jednaka polovini ulazne snage, slabljenje je ≈ 3 dB. Sa druge strane, ako je 96% svetlosti propušteno kroz vlakno, ukupan gubitak je oko 0.18 dB.

Na slici 5(a) je predstavljena varijacija koeficijenta gubitka (to jest, gubitak po jedinici dužine) u funkciji talasne dužine, za tipično vlakno od silike. Treba istaći dve zone sa znatno smanjenim gubicima, na 1300 i 1550 nm. Tipične vrednosti na tim talasnim dužinama su 0.3 do 0.4 dB/km (1300 nm) i oko 0.25 dB/km (1500 nm). To je jedan od razloga zašto većina fiber-optičkih sistema radi u oblastima talasnih dužina oko 1300 ili 1550 nm.



Slika 5. (a) Tipična zavisnost gubitaka od talasne dužine za stakleno vlakno (silica fiber).

Maksimumi krive slabljenja oko talasnih dužina 1.25 i 1.40 μm su uzrokovani prisustvom malih količina vode i ostalih nečistoća. Treba istaći da najmanji gubitak nastaje na 1550 nm.

(b) Korišćenjem sofisticiranih tehnika, moguće je odstraniti tragove vode i ostalih nečistoća. Gubici su onda manji od 0.4 dB/km u celom intervalu talasnih dužina od 1250 nm do 1650 nm.

Disperzija impulsa u optičkim vlaknima

U digitalnim komunikacionim sistemima, informacija koja se šalje se najpre kodira u formi impulsa svetlosti a onda se ti impulsi salju od transmitora (emitera) do prijemnika (receiver) gde se informacija dekodira. Što je veći broj impulsa koji se može poslati u jedinici vremena, a da se pri tome još uvek mogu razdvojiti u prijemniku, veći je prenosni kapacitet sistema. Svetlosni impuls poslat kroz optičko vlakno se širi u vremenu tokom prostiranja. Ovaj

fenomen je poznat kao disperzija (izobličenje) impulsa i uglavnom nastaje zbog sledećih mehanizama:

1. U multimodnim vlaknima, različiti zraci putuju različito vreme kroz datu dužinu fibera. U terminologiji talasne optike, ova pojava je poznata kao *intermodalna disperzija* zato što nastaje zbog različitih brzina prostiranja različitih modova EMG talasa.
2. Kao što je ranije pomenuto (kod uvođenja grupe brzine), svetlosni izvori emituju određeni interval talasnih dužina, i zbog disperzije materijala od koga je načinjeno vlakno (zavisnost indeksa prelamanja od talasne dužine) svetlost različite talasne dužine putuju različito vreme duž istog puta. Ovaj tip disperzije je poznat kao *materijalna disperzija (disperzija usled sredine)* i prisutna je i kod multimod i kod singlemod fibera.

1. *Intermodalna disperzija.* Kao što se može videti sa slike 4(b) zraci koji zaklapaju veće uglove sa osom fibera (prikazani isprekidanom linijom) imaju da pređu duži optički put i time im treba više vremena da dostignu izlaz iz fibera. Izvedimo izraz za intermodalnu disperziju. Na osnovu slike 4(a), zrak koji zaklapa ugao θ sa osom vlakna će preći rastojanje AB za vreme:

$$t_{AB} = \frac{AC + CB}{c/n_1} = \frac{AB/\cos\theta}{c/n_1} = \frac{n_1 AB}{c \cos\theta},$$

gde je c/n_1 predstavlja brzinu prostiranja svetlosti u sredini indeksa prelamanja n_1 . Na osnovu prethodne jednačine, sledi da će potrebno vreme da zrak pređe vlakno dužine L biti:

$$t_L = \frac{n_1 L}{c \cos\theta}.$$

Prethodni izraz pokazuje da je vreme prolaska kroz vlakno funkcija ugla θ koji zrak zaklapa sa osom jezgra vlakna, što dovodi do disperzije impulsa. Ako pretpostavimo da se svi zraci nalaze između $\theta=0$ i $\theta=\theta_c = \cos^{-1}(n_2/n_1)$ (što je granična vrednost da bi došlo do totalne refleksije na granici jezgro-omotač), sledi da će odgovarajuće minimalno i maksimalno vreme prostiranja kroz fiber dužine L biti:

$$t_{\min} = \frac{n_1 L}{c}, \quad \text{za ugao } \theta = 0,$$

$$t_{\max} = \frac{n_1^2 L}{c n_2}, \quad \text{za ugao } \theta = \theta_c = \arccos\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

Prema tome, ako su svi ulazni zraci poslani istovremeno, na izlaznom kraju vlakna će stići u nekom intervalu, trajanja:

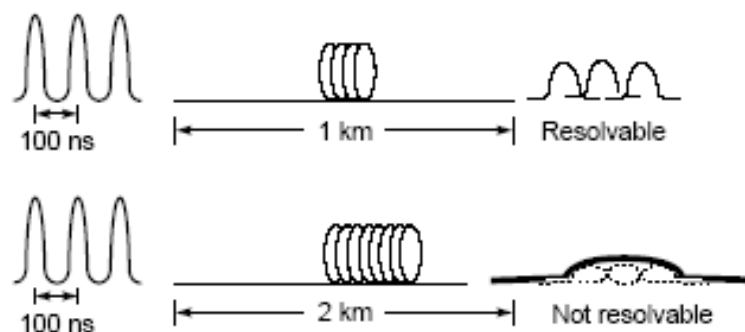
$$\Delta\tau_i = t_{\max} - t_{\min} = \frac{n_1 L}{c} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right), \quad \text{ili}$$

$$\Delta\tau_i = \frac{n_1 L}{c} \Delta \approx \frac{L}{2n_1 c} (NA)^2, \quad NA - \text{num. apertura.}$$

Veličina $\Delta\tau_i$ predstavlja disperziju impulsa uslovljenu činjenicom da se različiti zraci prostiru različito vreme kroz optičko vlakno, što predstavlja intermodalnu disperziju. Ako na ulazni kraj optičkog vlakna imamo svetlosni impuls trajanja τ_1 , onda će posle prostiranja kroz fiber dužine L isti taj impuls biti trajanja τ_2 , čija je vrednost aproksimativno data sa:

$$\tau_2^2 = \tau_1^2 + \Delta\tau_i^2.$$

Kao posledica, impuls se proširuje tokom prostiranja kroz vlakno. Dakle, iako su dva impulsa dobro razdvojena na ulaznom kraju vlakna, usled širenja, na izlazu to ne moraju više biti (slika 6).



Slika 6. Impulsi razdvojeni 100 ns na ulaznom kraju fibera, mogu se još uvek razdvojiti na izlazu iz optičkog vlakna dužine 1km. Isti impulsi ne mogu biti razdvojeni na izlaznom kraju vlakna dužine 2 km.

Primer:

Za tipičan multimodni fiber, ako uzmemo $n_1=1.5$ i $\Delta=0.01$, za dužinu $L=1\text{km}$, dobijamo $\Delta\tau_i = 50 \text{ ns/km}$, to jest, impuls koji pređe kroz vlakno 1km će biti proširen 50ns. Dakle, ako su impulsi razdvojeni međusobno 500ns na ulazu u vlakno, na izlazu posle 1km će i dalje biti dobro razdvojeni. Međutim, ako su uzastopni impulsi razdvojeni svega 10ns na ulazu, na izlazu će biti apsolutno nerazdvojjivi. Iz ove analize sledi da će u optičkom komunikacionom

sistemu od 1Mbit/s, gde imamo jedan impuls na svakih 10^{-6} s, zbog disperzije od 50 ns/km biti potreban repetitor na svakih 3-4km. Sa druge strane, u 1Gbit/s optičkom komunikacionom sistemu, koji zahteva slanje impulsa na svakih 10^{-9} s (1ns), disperzije od 50 ns/km će dovesti do neprihvatljivog širenja čak unutar 50m, što je veoma neefikasno i neekonomično sa stanovišta korišćenja takvog sistema. Rešenje za ovaj problem je uvođenje single-mode fibera.

2. *Materijalna disperzija.* Kao što je ranije pomenuto, svi izvori emituju svetlosti u određenom intervalu talasnih dužina (spektralna širina izvora). Na osnovu izraza za grupnu brzinu prostiranja talasnog paketa:

$$v_g = v_f \left[1 + \frac{\lambda}{n} \frac{dn}{d\lambda} \right],$$

gde je v_f – fazna brzina prostiranja svetlosti, a λ -talasna dužina u vakuumu, sledi da će postojanje materijalne disperzije sredine, koje je opisano zavisnošću indeksa prelamanja od od talasne dužine $n(\lambda)$, dovesti do toga da će različite talasne komponente impulsa poslatog kroz optičko vlakno putovati različito vreme. Uvedimo vreme potrebno impulsu da pređe optičko vlakno dužine L:

$$\tau = \frac{L}{v_g} = \frac{L}{c} \left[n + \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right],$$

gde izraz u zagradama predstavlja grupni indeks prelamanja, Ng . Pošto vreme zavisi od talasne dužine svetlosti, sledi da će širenje impulsa biti jednako:

$$\Delta\tau_m = \frac{d\tau}{d\lambda} \Delta\lambda = -\frac{L\Delta\lambda}{\lambda c} \left[\lambda^2 \frac{d^2n}{d\lambda^2} \right].$$

Odnosno, impuls koji je na ulazu u fiber bio širine τ_1 će, zbog postojanja materijalne disperzije, posle prolaska kroz fiber dužine L, imati trajanje τ_2 dato izrazom:

$$\tau_2^2 = \tau_1^2 + \Delta\tau_m^2.$$

Primer. U prvoj generaciji optičkih komunikacionih sistema, korišćene su LED diode sa talasnom dužinom $\lambda=850$ nm i spektralnom širinom $\Delta\lambda=25$ nm, što dovodi do širenja od $\Delta\tau_m=2.1$ ns/km. U četvrtoj generaciji optičkih komunikacionih sistema se koriste laserske

diode (LD) koje emituju na $\lambda=1.55 \mu\text{m}$, sa spektralnom širinom $\Delta\lambda=2\text{nm}$, što uzrokuje širenje od $\Delta\tau_m=43 \text{ ps/km}$.

Na osnovu predstavljenih primera je očigledno da materijalna disperzija ima mnogo manji uticaj na izobličenje signala u odnosu na intermodalnu disperziju. To još jedan od razloga zašto je bolje koristiti single-mod fibere, kod kojih je prisutna samo materijalna disperzija.