



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

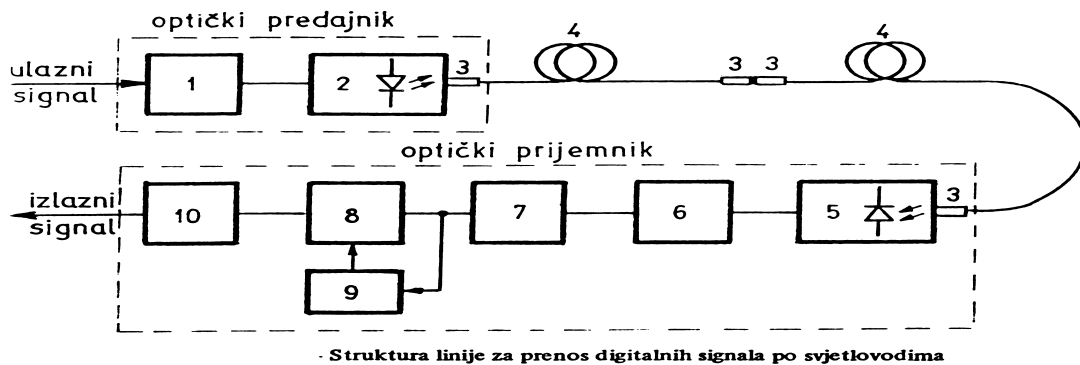
Digital Broadcasting and Broadband Technologies (Master Studies)
Erasmus+ Project No. 561688-EPP-1-2015-1-XK-EPPKA2-CBHE-JP

This project has been founded with support from the European Commission
This publication[communication] reflects the views only of the author, and
the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of
the information contained therein.

DBBT

Digital Broadcasting & Broadband Technologies

OPTIČKA VLAKNA I PRENOS SIGNALA PREKO FIBER OPTIČKOG TELEKOMUNIKACIONOG SISTEMA



Slika 1. Struktura linije za prenos digitalnih signala po svjetlovodima

- | | |
|---|--|
| <p>1 – ulazni stepen</p> <p>2 – pobuđivač izvora svjetlosti</p> <p>3 – optički konektori</p> <p>4 – optički kabl</p> <p>5 – fotodetektor</p> | <p>6 – prijemni pojačavač</p> <p>7 – ekvalizator (izjednačivač)</p> <p>8 – odlučivač</p> <p>9 – ekstraktor takta</p> <p>10 – izlazni stepen</p> |
|---|--|

- Ulazni digitalni električni signal nakon obrade na električnom nivou, kojom se usklađuju karakteristike predajnog signala sa karakteristikom linije za prenos po svjetlovodima, vrši pobudu izvora svjetlosti električnim signalom koji nosi informaciju. Na taj način vrši se modulacija optičkog signala, kojeg emituje izvor (laser, LED) električnim signalom koji nosi informaciju.

Prenos optičkih signala koje daje izvor vrši se preko optičkog kabla (vlakana) na ulaz optičkog prijemnika i to na detektor svjetlosti (fotodetektor: PIN ili lavinske fotodiode) gdje se vrši njegovo pretvaranje u električni signal. Dalje se proučava i obrađuje na način koji je sličan za sve prijemnike digitalnih signala.

Treba uočiti da je struktura optičkog prijemnika puno složenija nego što je optički predajnik i da se posebna pažnja posvećuje optimizaciji karakteristika prijemnog pojačavača i prijemnog filtra (ekvalizatora – 7).

Osnovni parametri koji karakterišu liniju sa slike 1 su :

- digitska brzina prenosa,
- talasna dužina optičkog signala,
- prenosne karakteristike izvora i detektora svjetlosti,
- prenosne karakteristike optičkog vlakna u sklopu optičkog kabla i
- prenosne karakteristike optičkih spojnih elemenata.

Opisani sistem predstavlja sistem “tačka – tačka” i **prva generacija** je imala sljedeće karakteristike :

- brzina prenosa 2-50 Mb/s,
- elektrooptičke komponente su radile na $\lambda = 810 - 860$ nm
- slabljenje optičkog kabla je 4-6 db/km i
- rastojanje između optičkih regeneratora (pojačavača) je bilo 5-10 km.

Druga generacija sistema “tačka – tačka” :

- talasna dužina, $\lambda = 1,3$ μm ,
- slabljenje optičkog kabla 1 db/km i
- rastojanje optičkih regeneratora je povećano za nekoliko puta.

Treća generacija sistema “tačka – tačka”:

- talasna dužina, $\lambda = 1,55$ μm ,
- brzina prenosa reda Gb/s i
- rastojanje optičkih regeneratora je preko 100 km.

S obzirom da je ograničena primjena prostiranja laserskog zraka kroz atmosferu zbog velikih gubitaka (gubici usljed molekularne apsorpcije, gubici usljed rasijavanja, gubici usljed turbulencije u atmosferi itd.) nametnula se misao o primjeni drugih medijuma za prenos optičkih informacija.

Te nove sisteme za prenos svjetlosnih signala obično **nazivamo svjetlosnim vodovima, svjetlovodima (ili optičkim kablovima)**. Konstruisani su različiti svjetlovodi i koristili se u različito vrijeme (svjetlovodi na principu refleksije, svjetlovodi

na bazi dijafragme, svjetlo vodi na bazi sočiva i ogledala itd.) sve do pojave staklenog vlakna. Na bazi stakla, a posebno na bazi Si – stakla ili kvarcnog stakla (SiO₂) izgrađena su optička vlakna koja imaju vrlo malo slabljenje optičkih signala koji se kroz njih prenose – prostiru.

Obično prozorsko staklo ima slabljenje 10⁴ dB/km, a primjenom specijalne tehnologije proizvodnje stakla danas se postižu slabljenja 1dB/km, a u komercijalnoj primjeni već imamo vlakno čije je slabljenje 0,2 dB/km.

Danas se optička vlakna masovno koriste u telekomunikacijama, tako da se magistralni pravci, u mnogim zemljama, isključivo grade od ovih vlakana – kablova.

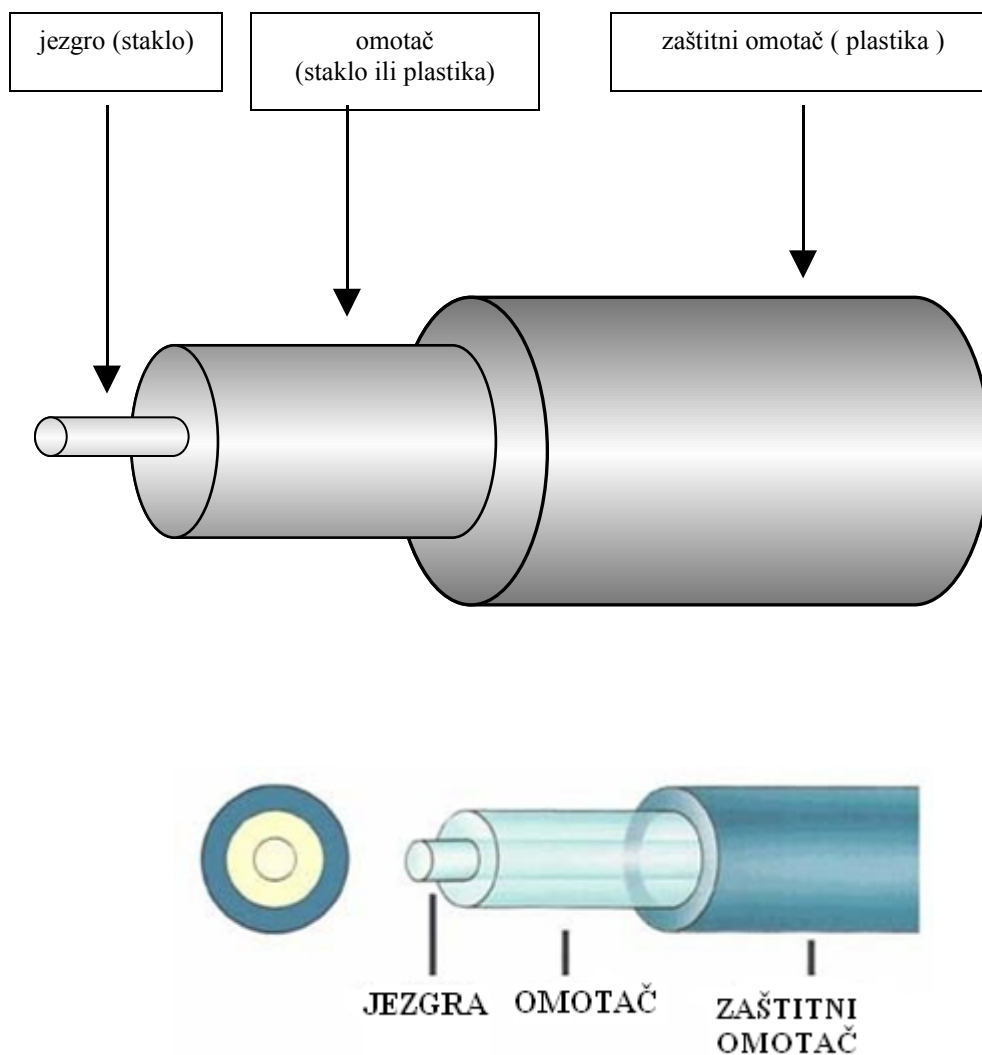
Prednost ovih kablova je višestruka u odnosu na metalne :

- Staklo je jeftiniji materijal od bakra, osim toga ima ga puno više u prirodi nego Cu ili Al.
- Stakleno vlakno ima znatno manje slabljenje nego Cu – vod.
- Stakleno vlakno ima manji prečnik od Cu-voda pa time i manju zapreminu i težinu, što je veoma bitno (npr. u vazduhoplovstvu).
- Stakleno vlakno je izolator za razliku od Cu pa je otporno na razne elektromagnetne smetnje.

POJAM I VRSTE OPTIČKIH VLAKANA

Optičko vlakno predstavlja dielektrični talasovod koji “radi” (prenosi signale) na optičkim učestanostima, odnosno optičkim talasnim dužinama ($\lambda = 10^{-7} - 10^{-3}$ m).

Svako optičko vlakno sastoji se od jezgra čiji je indeks prelamanja (n_1) i omotača sa indeksom prelamanja n_2 , ($n_1 > n_2$).

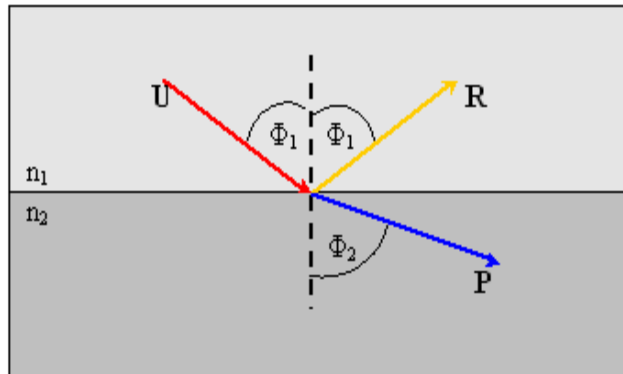


Slika 2. Struktura optičkog vlakna – svjetlovoda

Osnovni pojmovi i zakonitosti geometrijske optike

- Poznato je iz optike da se svjetlosni zrak pri prelasku iz jedne optičke sredine, koja ima indeks prelamanja (n_1) u drugu optičku sredinu sa indeksom prelamanja svjetlosti (n_2), lomi i reflektuje na granici ovih dviju sredina (slika 3). Upadni ugao (Φ_1) jednak je odbojnom uglu (reflektovanog zraka), dok za prelomni ugao (Φ_2) važi **Snelov (W. Snellius) zakon** :

$$n_1 \sin \Phi_1 = n_2 \sin \Phi_2 \Rightarrow \frac{\sin \Phi_1}{\sin \Phi_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (1)$$



Slika 3. Prelamanje i refleksija svjetlosti

Apsolutni indeks prelamanja (n) neke sredine definiše se kao :

$$n = \frac{c}{v}$$

gdje je: c – brzina svjetlosti u vakuumu

v – brzina prostiranja svjetlosti u toj sredini

Kako je za sve supstance $v < c \Rightarrow n > 1$.

Relativni indeks prelamanja sredine u koju svjetlost ulazi (druge sredine) u odnosu na sredinu kroz koju se ona prostire prije nailaska na graničnu površinu (prva sredina) dat je relacijom :

$$n_{2/1} = \frac{v_1}{v_2}$$

gdje su :

v_1 i v_2 – brzine prostiranja svjetlosti u prvoj i drugoj sredini

ili

$$n_{2/1} = \frac{n_2}{n_1}$$

gdje su:

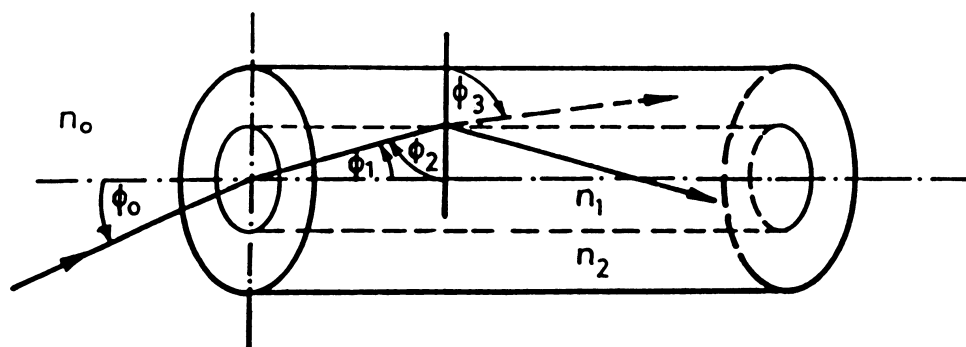
n_1 i n_2 – apsolutni indeksi prelamanja druge i prve sredine

Ako upadni zrak (U) prelazi iz optički gušće sredine u optički rjeđu ($n_1 > n_2$), tada se prelomni zrak (P) više otklanja, jer je $\sin \phi_2 > \sin \phi_1$, odnosno $\phi_2 > \phi_1$. Pretpostavimo da ugao (ϕ_1) raste, u tom slučaju nastupiće trenutak kada je $\sin \phi_2 = 1$, odnosno $\phi_2 = 90^\circ$.

Ugao (ϕ_1) pri kojem je $\phi_2 = 90^\circ$ nazivamo **kritičnim upadnim uglom**. Pošto $\sin \phi_2$ ne može biti veći od 1 očigledno je da će pri kritičnom uglu prelomni zrak (P) kliziti po granici između dviju optičkih sredina. Ukoliko je (ϕ_1) veći od kritičnog ugla, $\sin \phi_2$ treba da bude veći od (1), a što je nemoguće, pa u tom slučaju postoje samo upadni (U) i reflektovani (R) zrak, pa tada govorimo o **totalnoj refleksiji**.

$$\gamma = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \quad \begin{array}{l} \gamma - \text{granični ugao totalne refleksije} \\ n_1 \text{ i } n_2 - \text{aps. indeks prel. optički gušće i rjeđe sredine} \end{array}$$

Naravno, sva ova razmatranja važe u oblasti (granicama) geometrijske optike. Upravo na pojavi totalne refleksije konstruisane su razne vrste optičkih vlakana.



Slika 4: Kretanje svjetlosnog zraka kroz dvoslojno vlakno i određivanje numeričke aperture

n_0 – index prelamanja spoljne sredine (obično je to vazduh, pa je $n_0 = 1$)

n_1 – index prelamanja jezgra

n_2 – index prelamanja omotača

Maksimalna vrijednost ugla (ϕ_0) pri kojem na granici jezgro – omotač u vlaknu još uvijek dolazi do totalne refleksije, određuje veličina koju **nazivamo numerička apertura (otvorenost vlakna) – NA**.

$$NA = n_0 \sin \phi_{om} \quad (2)$$

gdje je: ϕ_{om} – maksimalni upadni ugao pri kojem još uvijek nastaje totalna refleksija na granici sredina sa indeksima prelamanja n_1 i n_2 . S obzirom na to da je:

$$\begin{aligned} n_0 \sin \phi_0 &= n_1 \sin \phi_1 \\ n_1 \sin \phi_2 &= n_2 \sin \phi_3 \\ \sin \phi_2 &= \cos \phi_1 \end{aligned}$$

Što se jasno vidi sa slike 4, možemo napisati za slučaj totalne refleksije ($\phi_3 = 90^\circ$), da je:

$$n_1 \sin \phi_{2m} = n_2 \quad \text{ili} \quad n_1 \cos \phi_{1m} = n_2 \quad \Rightarrow \quad \cos \phi_{1m} = \frac{n_2}{n_1}$$

Iz posljednje četiri jednačine imamo da je za optičko vlakno sa **stepenastim indeksom prelamanja da je:**

$$\sin^2 \phi_1 = 1 - \cos^2 \phi_1 = 1 - \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2 = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2}$$

kao i na osnovu jednačine (2):

$$NA = n_0 \sin \phi_{om} = n_1 \sin \phi_{1m} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Odnosno numerička apertura za vlakno sa stepenastim indeksom prelamanja je:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (3)$$

Numerička apertura (NA) za gradijentno vlakno sa paraboličnim profilom indeksa prelamanja je :

$$NA(r) = NA(0) \sqrt{1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2} \quad (4)$$

gdje je: $NA(0) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$ i predstavlja NA na osi vlakna.

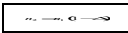
r – rastojanje u odnosu na osu vlakna prema periferiji ($0 < r < a$);

a – poluprečnik vlakna;

Indeks prelamanja za gradijentno optičko vlakno sa paraboličnim profilom, računa se kao:

$$n = n_1 \left[1 - \Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right] \quad (5)$$

gdje je: Δ – razlika indexa prelamanja i obično iznosi 0.01 – 0.02;
 n_1 – index prelamanja u osi (centru) vlakna

 , $\Delta \ll 1$ – i za vlakno sa stepenastim indeksom prelamanja;

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (6)$$

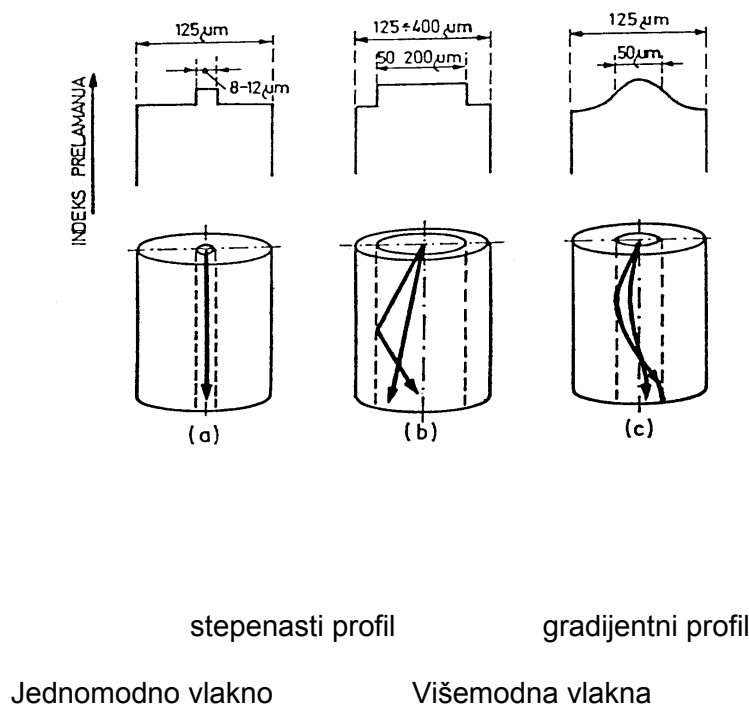
Vrste optičkih vlakana

Prema broju modova optička vlakna se dijele na:

- jednomodna (monomodna) i
- višemosdna (multimodna, polimodna) vlakna.

Prema prostornoj raspodjeli indeksa prelamanja jednomodna i višemosdna optička vlakna dijele se na :

- gradijentna i
- sa stepenastim indeksom prelamanja

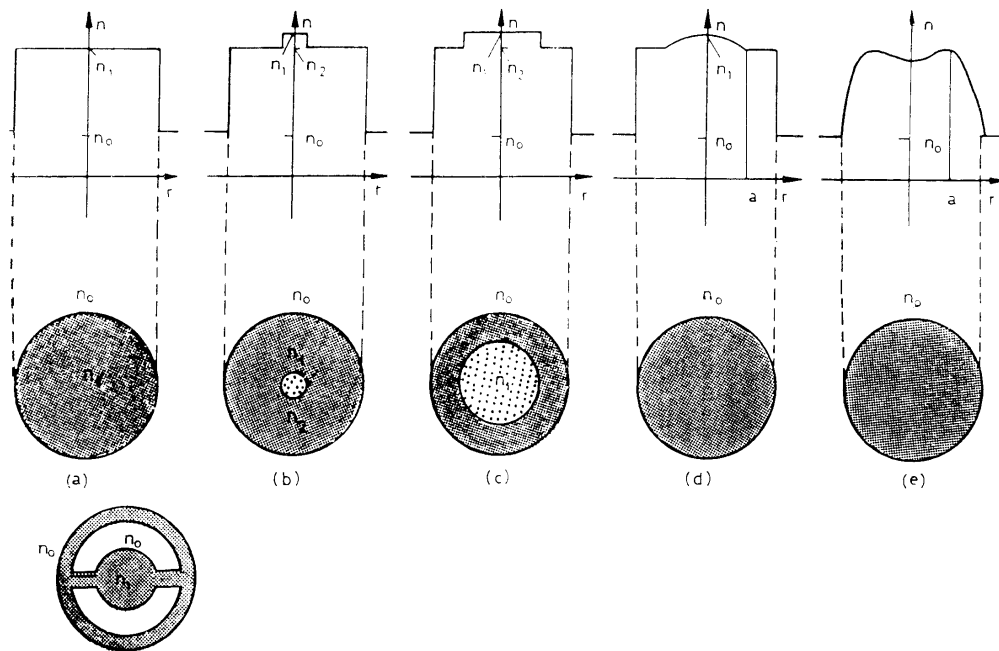


Slika 5. Tipovi optičkih vlakana

Ova dva tipa optičkih vlakana mogu se podijeliti na jednomodna (monomodna) i višemosdna (multimodna) optička vlakna, zavisno od toga koliki broj modova se prostire kroz njih. Jednomodna vlakna podržavaju prostiranje samo jednog-osnovnog moda, dok se kroz višemosdna vlakna može prostirati i više hiljada modova. Na slici 5. predstavljen je primjer jednomodnog vlakna, sa stepenastim profilom indeksa prelamanja i tipičnim dimenzijama prečnika jezgra, što može poslužiti za

prvu komparaciju geometrijskih karakteristika višemodnih i jednomodnih optičkih vlakana.

Kao što je napomenuto u prethodnom poglavlju, talasnoj predstavi jednog moda kod jednomodnih vlakana odgovarala bi predstava geometrijske optike o prostiranju samo jednog zraka. Ali, imajući u vidu dimenzije prečnika jezgra vlakna sa slike 5 i veličinu talasne dužine svjetlosti koja se prostire kroz njega ($\lambda \sim 1\mu m$), odmah se vidi da nisu ispunjeni osnovni uslovi za primjenu metoda geometrijske optike u analizi karakteristika jednomodnih optičkih vlakana, pa se za tu svrhu koristi isključivo talasna teorija.



Slika 6: Različiti tipovi optičkih vlakana: a) - obično, čiji prečnik iznosi $75\ \mu m$; b) - monomodno sa stepenastim indeksom prelamanja, prečnik približno $75\ \mu m$; c) - višemodno sa stepenastim indeksom prelamanja, prečnik približno $100\ \mu m$; d) - gradijentno sa prečnikom od $100\ \mu m$; e) - gradijentno sa kontinualnim n i prečnikom od $100\ \mu m$; f) - od homogenog stakla, prečnika $100\ \mu m$. Na slici su prikazani i dijagrami promjene indeksa prelamanja n .

Višemodna optička vlakna nude nekoliko prednosti u odnosu na jednomodna vlakna. Prva od njih je da veći prečnik jezgra višemodnih vlakana omogućuje njihovo lakše nastavljajanje i spajanje, kao i efikasnije uvođenje svjetlosti iz izvora svjetlosti. Druga prednost je što višemodna vlakna, osim laserskih dioda, omogućuju korišćenje svjetlećih dioda (LED) kao izvora svjetlosti pri prenosu, dok jednomodna vlakna mogu efikasno raditi samo u kombinaciji sa laserskim diodama, što u principu usložnjava i poskupljuje čitav prenosni sistem i tamo gdje to nije potrebno.

Međutim, jednomodna optička vlakna imaju jednu, ali vrlo značajnu prednost - omogućuju prenos mnogo veće količine informacija u jedinici vremena u poređenju sa višemodnim optičkim vlaknima. Ta prednost posljedica je znatno većeg propusnog opsega (opsega učestanosti koje se mogu prostirati kroz vlakno).

Naime, propusni opseg višemodnih optičkih vlakana umanjen je pojavom takozvane "međumodne" disperzije, koja kod jednomodnih vlakana ne postoji, pošto se radi samo o jednom modu. Međumodna disperzija nastaje usljed različitih grupnih brzina pojedinih modova, što ima za posljedicu razliku u vremenima njihovog dolaska na

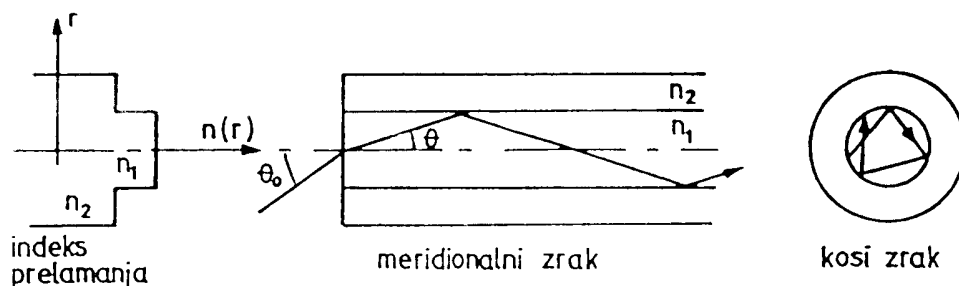
prijemnu stranu. Stoga se javlja i određena "inercija" u prenosu, koja ograničava prenosnu brzinu. Povezujući pojmove modova i zraka, to znači da međumodna disperzija nastaje usljed različitih putanja pojedinih zraka koji zbog toga neće u isto vrijeme stići na mjesto prijema. Međumodna disperzija višemodnih optičkih vlakana direktno zavisi od oblika profila indeksa prelamanja u jezgri. Zbog toga se može govoriti o pojmu "optimizacija profila indeksa prelamanja" sa stanovišta minimiziranja međumodne disperzije.

Međumodna disperzija nije jedini ograničavajući faktor propusnog opsega višemodnih optičkih vlakana. Drugu komponentu ukupne disperzije čini tzv. "unutarmodna" disperzija, koja je, inače, karakteristična i kao ograničavajući faktor propusnog opsega jednomodnih optičkih vlakana. O međumodnoj i unutarmodnoj disperziji biće riječi kasnije.

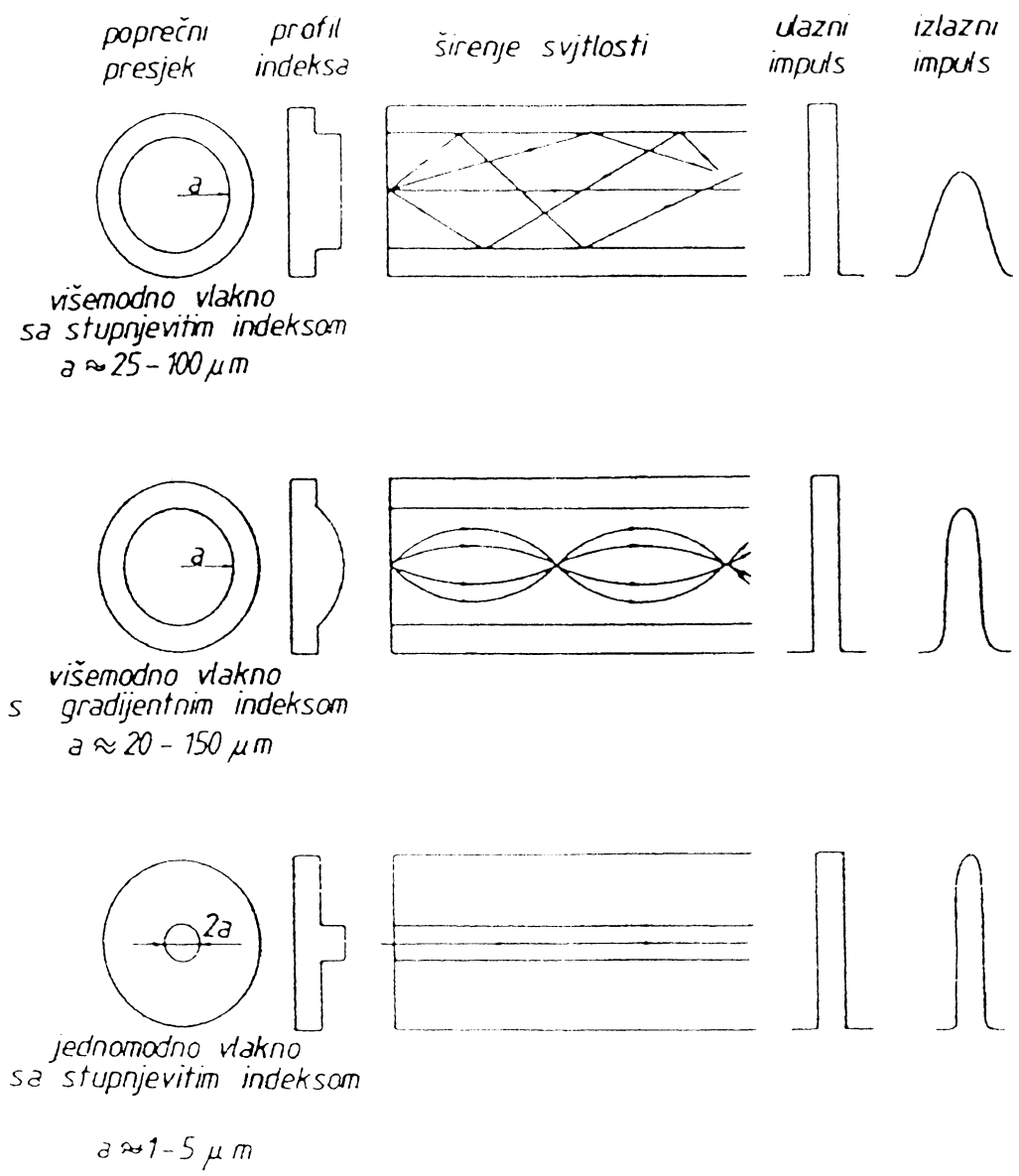
Vrste svjetlosnih zraka koji se mogu prostirati kroz optička vlakna sa stepenastim i gradijentnim indeksom prelamanja su :

Meridionalni zraci – koji se prostiru samo u jednoj ravni u kojoj leži i uzdužna osa optičkog vlakna. Oni se u toku prostiranja reflektuju od granice jezgro – omotač, presjecajući pri tome svaki put osu vlakna.

Kosi zraci – su zraci koji pri refleksiji ne sijeku osu vlakna već se prostiru po cik – cak putanji odbijajući se od granice jezgro – omotač.



Slika 7. – Optičko vlakno sa step – indeksom, koncept meridionalnih i kosih zraka



Slika 8: Osnovne konstrukcije optičkih vlakana



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Digital Broadcasting and Broadband Technologies (Master Studies)
Erasmus+ Project No. 561688-EPP-1-2015-1-XK-EPPKA2-CBHE-JP

This project has been founded with support from the European Commission
This publication[communication] reflects the views only of the author, and
the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of
the information contained therein.

DBBT

Digital Broadcasting & Broadband Technologies