

Digitalni sistemi prenosa

Profesor dr Miroslav Lutovac

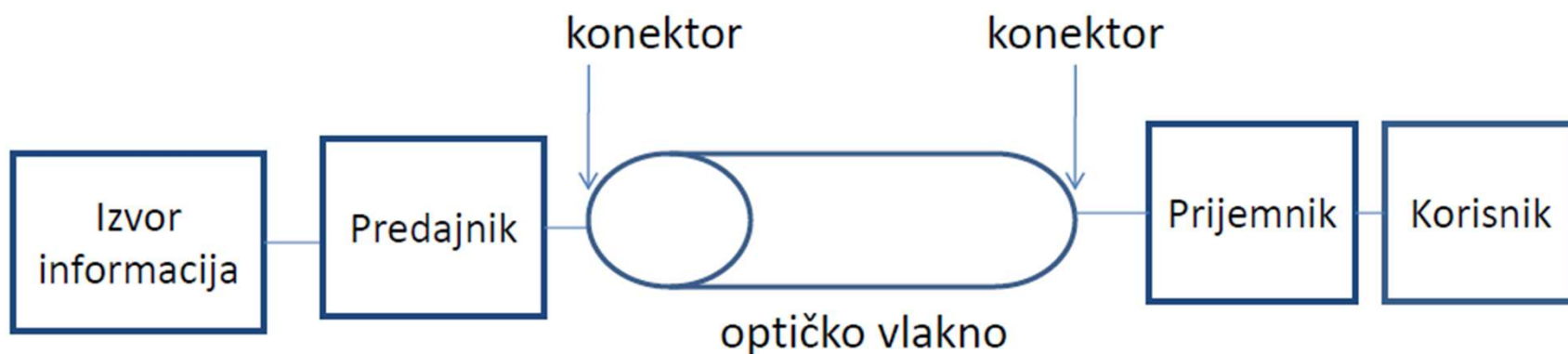
- Optički sistemi prenosa
- mr Danilo Lalović
- Preporučena knjiga:
Telekomunikacioni sistemi
Vladanka Aćimović-Raspopović, Slobodan Lazović

Karakteristike optičkih sistema

- Glavna karakteristika optičkih sistema prenosa jeste potencijalna mogućnost prenosa velikog broja informacija u jedinici vremena
- Optički talasovod predstavlja medijum za prenos optičkih signala
- Za optičke komunikacije koristi se dielektrični talasovod cilindrične strukture, koji se naziva optičko vlakno

Blok šema optičke komunikacione veze

- Medijum za prenos signala je optičko vlakno koje je putem konektora spojeno sa predajnikom i prijemnikom
- Predajnik emituje signal koji je prilagođen prenosu po optičkom vlaknu, dok prijemnik prima oslabljen signal i konvertuje ga u formu potrebnu krajnjem korisniku



Opis komunikacije optičkim signalom

- U predajniku se električni signal pretvara u optički putem elektrooptičkog pretvarača; koriste se dioda koja emituje svetlost (LED , Light Emitting Diode) ili laserska dioda (LD, Laser Diode); intenzitet svetlosti izvora moduliše se binarno impulsno modulisanom strujom diode i svetlost izračene snage P se ubacuje u vlakno
- Pošto se prenese optičkim vlaknom, u prijemniku se svetlost konvertuje nazad u električni signal posredstvom detektora , čiji je glavni element optoelektrični pretvarač koji je fotodioda tipa PIN (p-Intrinsic-n) ili APD (Avalanche Photodiode)
- Ukoliko je potrebno, duž optičke deonice je moguće regenerisati signal ili ga samo pojačati u optičkom pojačavaču.

Osobine optičkog komunikacionog kanala

- Veliki informacioni kapacitet
- Mala vrednost podužnog slabljenja
- Imunost na elektromagnetne smetnje usled dielektričnog karaktera optičkog vlakna
- Zaštićenost od ometanja i prisluškivanja
- Male dimenzije i masa optičkog kabla koji može da obezbedi veliki broj vlakana (144)
- Dug životni vek

Istorijat razvoja optičkih komunikacija

- Pronalazak lasera 1960. godine je bio ključan za razvoj optičkih sistema. Laser predstavlja izvor koherentne svetlosti (elektromagnetni talasi međusobno u istoj fazi i šire se u istom smeru), stabilne monohromatske svetlosti (jedna talasna dužina usmerena u uskom snopu) i obezbedio je funkcije koje ima elektronski oscilator, samo u domenu optike.
- 1966. godine je zaključeno da, do tada utvrđeni veliki gubici u optičkom vlaknu, nastaju zbog malih nečistoća unutar stakla, a ne zbog unutrašnjeg ograničenja samog stakla. U to vreme silicijumska staklena vlakna su imala slabljenje od 1000 dB/km

Istorijat razvoja optičkih komunikacija

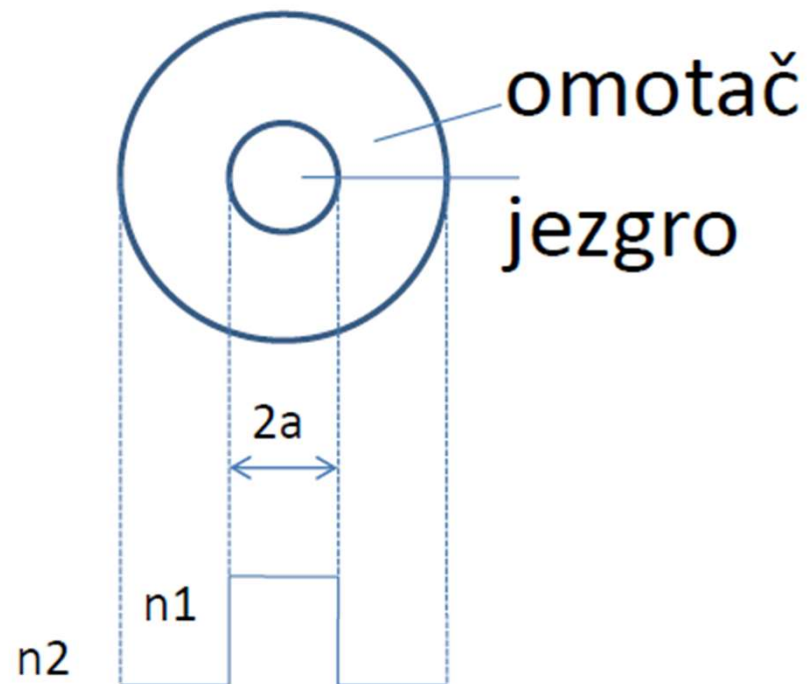
- 1970. godine firma “Corning Glass” je uspela da proizvede optičko vlakno čije je podužno slabljenje manje od 20 dB/km, a 2 godine kasnije i vlakno koje je na talasnoj dužini 850 nm imalo slabljenje od 4 dB/km
- Prvi optički kablovi za prenos telefonskog signala su instalirani tokom 1976. i 1977. godine
- 1979. godine za prenos po optičkim vlaknima je počeo da se koristi deo spektra koji obuhvata talasnu dužinu 1310 nm i talasnu dužinu 1550 nm i obezbedi znatno manje podužno slabljenje optičkog vlakna

Struktura optičkog vlakna

- Optičko vlakno je cilindrični dielektrični talasovod kružnog poprečnog preseka, a struktura mu je projektovana za vođenje svetlosti duž puta koji ne mora bit prav
- Optičko vlakno se sastoji od dva koncentrična sloja, unutrašnjeg koji se naziva jezgro i spoljašnjeg koji se naziva omotač
- Jezgro može biti homogena ili nehomogena dielektrična struktura
- Omotač optičkog vlakna je čvrste dielektrične homogene strukture

Struktura optičkog vlakna

- Optičko vlakno čine jezgro, čiji je indeks prelamanja n_1 i omotač sa nešto manjim indeksom prelamanja n_2



Indeks prelamanja

- Indeks prelamanja za neki medijum se definiše kao odnos brzine svetlosti u vakumu i tom medijumu
- Svetlosni zrak se prostire sporije kroz optički “gušću” sredinu, onu sredinu čiji je indeks prelamanja veći
- U optičkom vlaknu indeks prelamanja n se menja duž poprečnog preseka vlakna i njegova zavisnost od radijusa $n=n(r)$ predstavlja profil indeksa prelamanja
- Prostiranje svetlosnog zraka u vlaknu je zasnovano na totalnoj refleksiji i zavisi od profila indeksa prelamanja

Indeks prelamanja

$$n(r) = n_1 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^\alpha \right]^{\frac{1}{2}}, \text{ za } r < a, \text{ unutar jezgra}$$
$$n(r) = n_2, \quad n_2 = \text{const}, \quad \text{ za } r > a,$$

gde je :

n_1 – indeks prelamanja duž ose vlakna
u centru jezgra

Δ – normalizovana razlika indeksa

$$\text{prelamanja } \Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2}$$

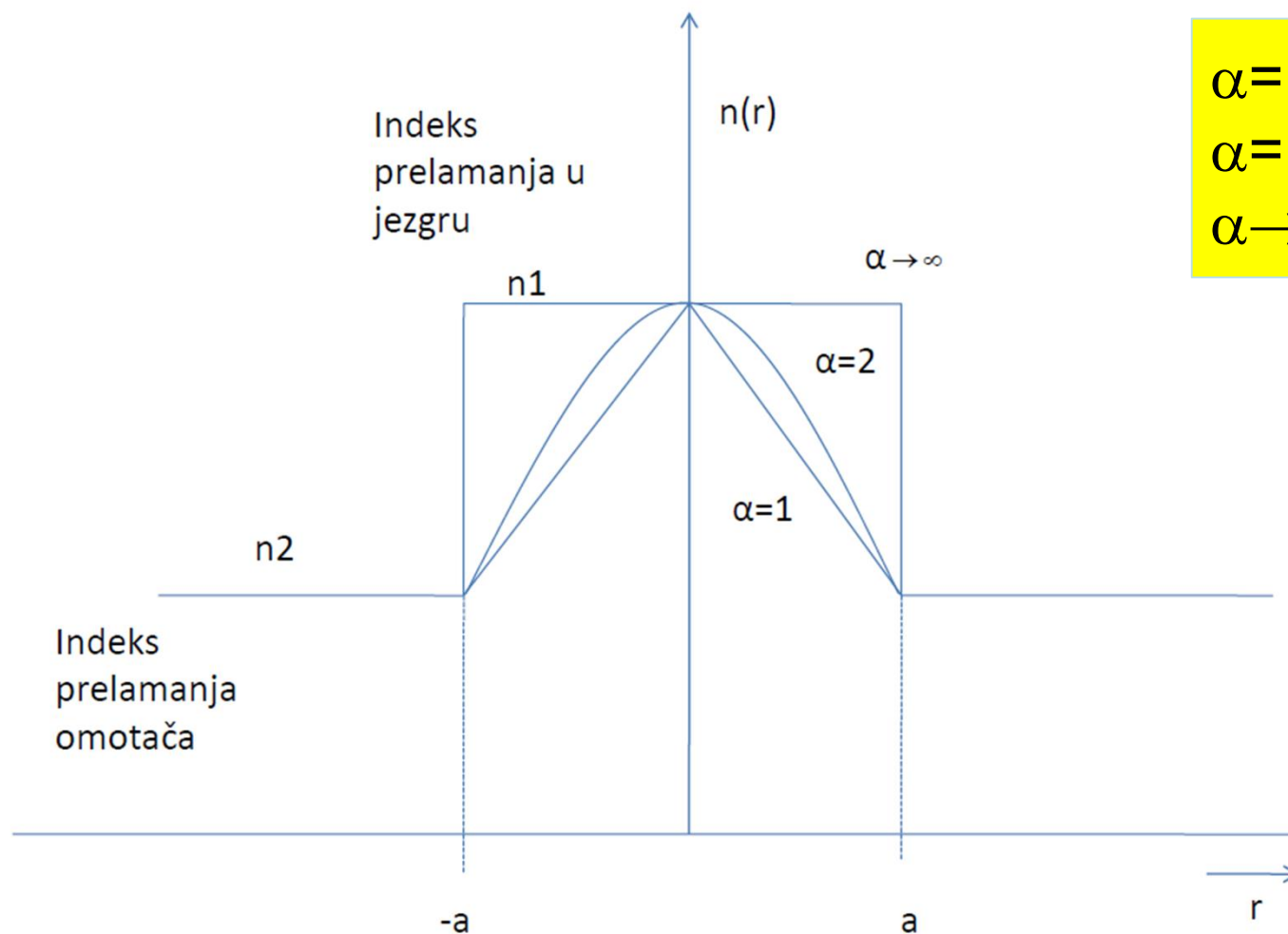
r – rastojanje od ose vlakna (μm)

a – radijus jezgra (μm)

α – parametar profila

n_2 – indeks prelamanja u omot.

Profil indeksa prelamanja u jezgru i omotaču



$\alpha = 1,$
 $\alpha = 2,$
 $\alpha \rightarrow \infty$

- Vrednost parametra α je, u praksi, za multimodna vlakna sa gradijentnim indeksom prelamanja, oko 1.92, a profil indeksa prelamanja je vrlo blizak paraboli
- Na osnovu varijacija u strukturi materijala od kojeg je izgrađeno jezgro optičkog vlakna dolazi do razlika u raspodeli profila indeksa prelamanja, tako da se na osnovu toga optička vlakna mogu podeliti na dva tipa
 1. Vlakno: jezgro ima uniformnu raspodelu indeksa prelamanja n_1 i na granici sa omotačem dolazi do naglog smanjenja indeksa prelamanja na vrednost n_2 koja predstavlja indeks prelamanja omotača; ovo su vlakna se skokovitim profilom indeksa prelamanja (step index)
 2. Vlakno: dolazi do postepene promene indeksa prelamanja polazeći od centra jezgra, te se radijalno ta vrednost smanjuje, da bi na mestu prelaza u omotač bio jednak indeksu prelamanja omotača; ovo su vlakna sa gradijentnim profilom indeksa prelamanja (graded index)

- Optička vlakana se mogu podeliti zavisno od toga koliki se broj modova prostire kroz optička vlakna na
 - monomodna i
 - multimodna
- Kroz jezgro monomodnog vlakna se prostire samo jedan mod, dok se kroz jezgro multimodnog vlakna može prostirati i više hiljada modova
Monomodna vlakna se koriste u telekomunikacionim mrežama na svim nivoima
Izgradnja transportnih mreža je bazirana na monomodnim vlaknima sa sve većim binarnim protocima i dugim regeneratorskim sekcijama
U cilju većeg iskorišćenja dostupnog propusnog opsega realizovani su i WDM/DWDM (Wavelength Division Multiplexing/Dense WDM) sistemi
- Glavni tipovi monomodnih vlakana su:
 - Non – Dispersion Shifted Fiber, ITU-T G.652
 - Dispersion Shifted Fiber, ITU-T G.653
 - Non Zero Dispersion Shifted Fiber, ITU-T G.655

- Multimodna vlakna ITU-T G.651 (sa gradijentnim indeksom prelamanja), se koriste za kraća rastojanja gde mogu da odgovore zahtevima za binarnim protocima
- Ova vlakna imaju veliko jezgro i na taj način se obezbeđuje efikasno spajanje sa predajnikom
- Proizvodnja multimodnih vlakana je jednostavnija od proizvodnje monomodnih vlakana

Prostiranje svetlosti u optičkom vlaknu

- Prostiranje svetlosti je utemeljeno na:
 - Geometrijskoj optici
 - Talasnoj (elektromagnetnoj) teoriji
- Prvu teoriju korpuskularne prirode svetlosti je postavio Newton: svetlost je tok materijalnih korpuskula koje lete od izvora svetlosti velikom brzinom
- Heigens je postavio talasnu teoriju po kojoj je svetlost talas koji se prostire velikom brzinom od izvora kroz prostor ispunjen hipotetičkom elastičnom sredinom pod nazivom etar
- Ove teorije su mogle da objasne samo jednostavnije pojave vezane za svetlost kao što su refleksija i refrakcija
- Fresnel je početkom 19. veka objasnio pojave kao što su interferencija i polarizacija u okviru talasne teorije, pa je korpuskularna teorija odbačena.

Prostiranje svetlosti u optičkom vlaknu

- Teorija elektromagnetnih talasa koja ne zahteva postojanje etra je razvijena od strane Maxwela u drugoj polovini 19. veka
- Priroda vidljivog svetlosnog talasa se identifikuje sa elektromagnetnim talasom čije su talasne dužine od 370 do 770nm
- Emisija elektromagnetnog talasa vezana je sa oscilatornim kretanjima naelektrisanja u atomima i molekulima
- Početkom dvadesetog veka Planck je postavio kvantnu teoriju elektromagnetnih procesa, a Einstein kvantnu teoriju svetlosti, koja svetlost predstavlja kao tok svetlosnih korpuskula-fotona
- Energija fotona je $E=h \cdot \nu$, gde je $h=6.625 \times 10^{-34}$ Js Planckova konstanta, a ν je učestanost koja je karakteristika talasnog kretanja
- Svi fotoni imaju brzinu svetlosti $c = 3 \times 10^8$ m/s, masa im je konačna i energija definisana formulom

- Priroda svetlosti je dualna. Samo pomoću korpuskularne (kvantne) i talasne teorije se mogu objasniti sve pojave vezane za svetlost.
- Geometrijska optika daje predstavu mehanizma propagacije svetlosti kroz vlakno uz refleksiju i refrakciju. Čestica ima definisanu diskretnu putanju kroz vlakno.
- Talasna teorija posmatra svetlost kao elektromagnetni talas koji se prostire kroz vlakno i zahteva rešenje Maxwellovih jednačina uz granične uslove na cilindričnoj površini vlakna.
- Za objašnjenje pojava kao što su absorpcija, disperzija i emisija svetlosti neophodna je kvantna teorija

Geometrijska optika

- Veliki broj optičkih eksperimenata mogu se objasniti ako pretpostavimo da se svetlosna energija prostire duž uske putanje koju nazivamo zrakom. Ovi zraci se koriste da opišu optičke efekte uz pomoć geometrije, tako da ovu zračnu teoriju nazivamo geometrijska optika. Kada se kaže da se zrak prostire određenom brzinom ili je reflektovan od prepreke, podrazumeva se da se energija svetlosnog talasa prostire određenom brzinom ili je reflektovana od prepreke
- Pri prolazku kroz različite materijale svetlosni zrak se prostire različitim brzinama. Odnos brzina prostiranja svetlosnog zraka kroz vakum i kroz neku drugu sredinu se naziva indeks prelamanja n te sredine:

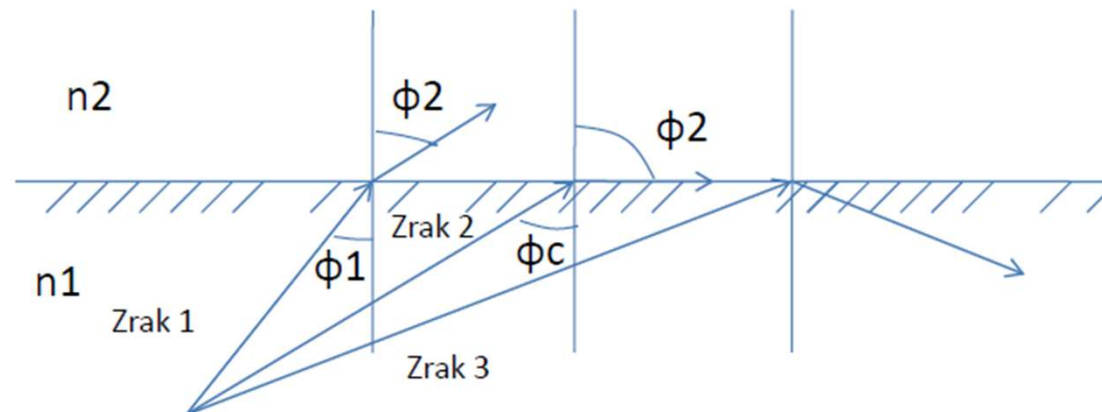
$$n = \frac{c}{v}, \text{ gde je } c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

- Indeks prelamanja kvarcnog stakla koji se koristi za izradu optičkog vlakna je oko 1.5 (preciznije, ova vrednost je u intervalu od 1.46 do 1.48).
- Indeks prelamanja zavisi od više faktora kao što su temperatura i talasna dužina.
- Na razdvojnoj površini sredina različitih indeksa prelamanja, Snel-ov zakon definiše odnos upadnog i prelomljenog ugla zraka kao

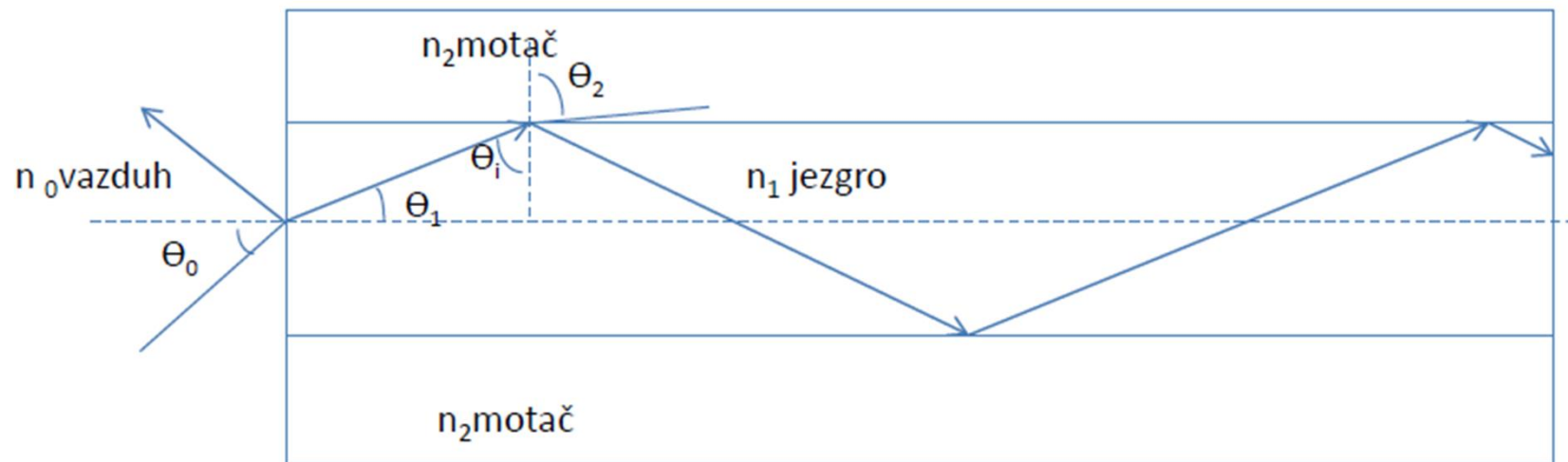
$$n_1 \sin \phi_1 = n_2 \sin \phi_2$$

Prelamanje svetlosnog zraka

- Prolazkom svetlosnog zraka iz sredine većeg indeksa prelamanja u sredinu manjeg indeksa prelamanja $n_1 > n_2$ dobija se da porastom ugla ϕ_1 raste i prelomljeni ugao ϕ_2 svetlosnog zraka
- Pošto je ugao ϕ_2 uvek veći od ugla ϕ_1 , ugao ϕ_2 će pre dostići 90° nego ugao ϕ_1 . Kritičan ugao $\phi_1 = \phi_c$, je onaj ugao koji će dovesti do toga da se svetlosni zrak ne prelama u drugu sredinu
- Ako je upadni ugao ϕ_1 veći od kritičnog ugla ϕ_c , svetlosni zrak neće preći u drugu sredinu, već će se odbiti od razdvojne površine i ostaće u materijalu iz kojeg dolazi
- Ovaj princip totalne refleksije omogućuje optičkim vlaknima da provode svetlosni snop.



Prostiranje svetlostnog zraka u vlaknu sa step indeksom prelamanja



- Zrak koji dolazi na graničnu površinu jezgro – spoljašna sredina pod uglom θ_0 u odnosu na osu vlakna se jednim delom reflektuje pod istim uglom, dok se deo prenosi u jezgro i prelama pod uglom $\theta_1 < \theta_0$ s obzirom da važi $n_0 < n_1$
- Ovaj deo zraka pri nailasku na površinu jezgro omotač pod uglom θ_i se delimično reflektuje pod istim uglom i nastavlja put kroz jezgro, a delimično prodire kroz omotač, uz prelamanje, pod uglom θ_2 , gde je $\theta_2 > \theta_i$ jer je $n_2 < n_1$. Ovaj deo je slabo ograničen u omotaču i može da se izrača ako je θ_i manje od nekog $\theta_{\text{kritično}}$
- Ako je θ_i veće od nekog $\theta_{\text{kritično}}$ doći će do totalne refleksije. Prema Snell-ovom zakonu: $n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1$
- Kada dođe do totalne refleksije $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$, $\sin \theta_i = \frac{n_2}{n_1}$

- Za slučaj da zrak svetlosti dolazi na graničnu površinu jezgro-spoljašna sredina pod uglom θ_0 koji je veći od $\theta_{\max}$, taj zrak biva refraktovan u omotač i izračen
- Prema tome da bi se zrak svetlosti prostirao vlaknom uz totalnu unutrašnju refleksiju unutar jezgra vlakna, mora da na jezgro vlakna iz spoljašnje sredine padne pod incidentnim uglom koji je manji od maksimalnog ugla $\theta_{\max}$ za koji zrak na površinu jezgro-omotač dolazi pod $\theta_{\text{kritično}}$

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

- Uz pretpostavku da je spoljašna sredina vazduh, $n_0 = 1$
- NA je numerički otvor ili numerička apertura. Kako je sa druge strane:

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ za } \Delta \ll 1$$

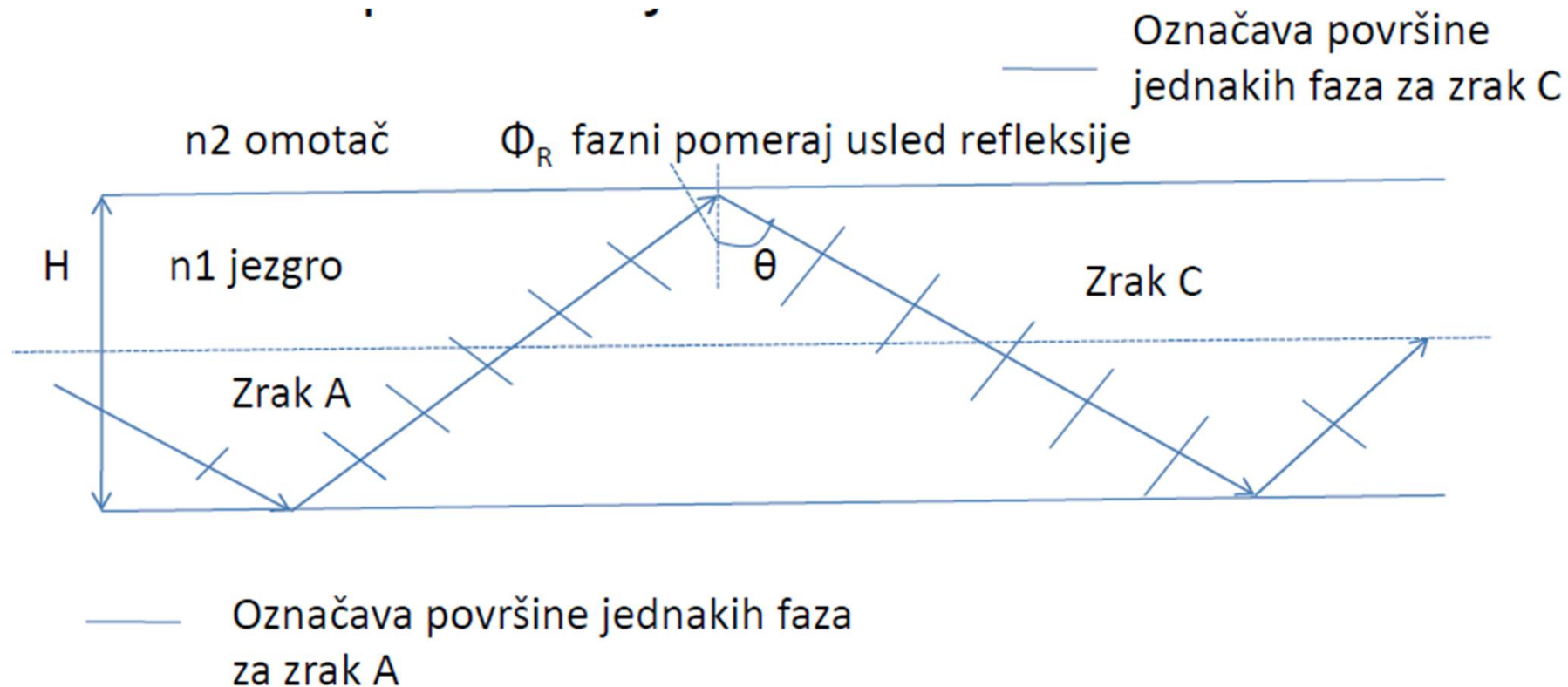
- Sledi: $NA = n_1 \sqrt{2\Delta}$
- Numerička apertura definiše konus prihvatanja unutar koga su sadržani svi zraci koji se prenose vlaknom
- To je veoma dobra mera za sposobnost vlakna da “uhvati” svetlost od izvora
- Generalno važi da što je NA veće to je veća i efikasnost povezivanja izvor-vlakno
- Uobičajena vrednost za NA je oko 0.2, a maksimalna vrednost za komercijalno dostupna vlakna je 0.29

Talasna teorija

- Teorija zraka ne daje objašnjenja važnih pojava pri prostiranju svetlosti kao što su propagacioni modovi
- Teorija zraka dozvoljava postojanje mogućih zraka u kontinuumu od normalnog upadanja na poprečnu površinu vlakna do kritičnog ugla; činjenica je da se u vlaknu prostiru diskretne talasne forme, odnosno modovi.
- Maxwell-ove jednačine daju striktnu interpretaciju talasne prirode svetlosti
- Za analizu se može koristiti ravanski talas koji je karakterisan svojim smerom (vektor upravan na talasni front), amplitudom i talasnom dužinom. U dielektričnom medijumu talasna dužina se može odrediti kao

$$\lambda = \frac{c}{n f}, \quad \lambda \text{ talasna dužina, } c \text{ brzina svetlosti u vakumu,}$$

n indeks prelamanja, f frekvencija



Faze zraka A i C mogu da se razlikuju samo za ceo broj 2π

$$\frac{4\pi H}{\lambda} \cos \theta - 2\Phi_R = 2M\pi, \quad M = 0, 1, 2, \dots$$

$$\frac{4\pi H}{\lambda} \cos \theta - 2\Phi_R = 2M\pi, \quad M = 0, 1, 2, \dots$$

- Jednačina nema rešenja za bilo koju vrednost M , već za specificirano M , najviše jedna vrednost θ daje rešenje ove jednačine. Rešenja za $M=0, 1, 2, \dots$ su diskretni uglovi zraka koji su dozvoljeni po teoriji zraka.
- Iz jednačine sledi da je broj modova koji mogu da se prostiru u talasovodu ograničen (M ne može da uzima vrednosti za koje je $\cos\theta > 1$)
- Ako je struktura vlakna takva da je $H/\lambda \gg 1$, jednačina ima više rešenja sa veoma gusto rasporedjenim dozvoljenim vrednostima za θ . Veliki broj gusto raspoređenih modova se može uporediti sa kontinualnom familijom zraka, koja se opisuje u teoriji zraka.
- Može se pokazati da modalna jednačina ima uvek rešenje za svaku talasnu dužinu ako je $M=0$, a na ovaj način je definisan osnovni mod talasovoda
- Talasna dužina za koju isčezava rešenje modalne jednačine naziva se talasna dužina “cut off”-a. Kada se optičko vlakno pobudi sa talasom čija je talasna dužina veća od talasne dužine cut-off-a, kroz vlakno se prostire samo osnovni mod i vlakno je tipa singlemode-jednomodno. Kada se optičko vlakno pobudi talasom čija je talasna dužina manja od talasne dužine cut-off, vlakno je multimodno

- Stepen do kog je elektromagnetni talas prisutan u vlaknu opisuje se karakteristikom koja se naziva normalizovana učestanost vlakna i koja se definiše kao:

$$V = ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

gde je $k=2\pi/\lambda$, dok je a prečnik jezgra.

- V je funkcija i dimenzija i indeksa prelamanja i jezgra i omotača, a pokazuje koliko će se modova prostirati vlaknom
- Kada V raste, raste i broj modova koji se prostiru vlaknom
- Za $V \leq 2.405$ vlaknom će se prostirati samo jedan mod i takva vlakna se nazivaju monomodna vlakna
- Za $V > 2.405$, vlakna su multimodna.
- Kada je vlakno monomodno, deo energije se prostire kroz omotač

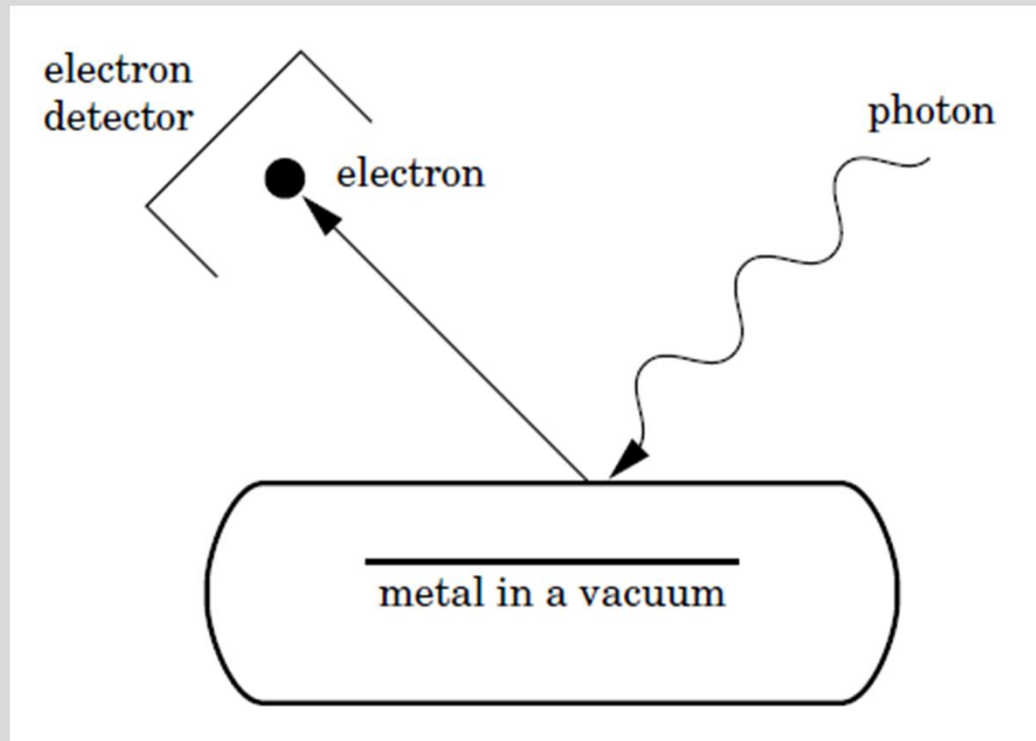
Glavne karakteristike optičkih vlakana

- Karakteristike prenosa optičkih vlakana uslovljene su njihovom strukturnim karakteristikama i osobinama materijala od kog su izradjena
- Struktura vlakna utiče na njegov kapacitet prenosa i utiče na ponašanje vlakna kada je ono izloženo spoljašnjim uticajima
- Osobine materijala direktno utiču na slabljenje optičkog signala koji se prostire kroz optičko vlakno
- Prednosti optičkih vlakana u odnosu na druge medijume su:
 - Veliki propusni opseg i malo slabljenje
 - Mali prečnik i mala masa
 - Neosetljivost na elektromagnetne uticaje
 - Odsustvo preslušavanja

- Zbog navedenih osobina njihova primena je raznovrsna: telekomunikacije, računarske mreže, merenja, industrija, upravljački sistemi, vojna primena ...
- Optičko vlakno mora biti otporno na sledeće klimatske uslove:
 - Visoku temperaturu
 - Nisku temperaturu
 - Varijacije temperature
 - Vlažnost
- Provera klimatskih karakteristika vrši se merenjem dodatnog slabljenja vlakna na minimalnoj i maksimalnoj temperaturi iz predviđenog radnog opsega, odnosno posle ciklusa promene klimatskih uslova

- Dozvoljene temperature okruženja za optičke kablove su:
 - Pri polaganju od -5°C do $+40^{\circ}\text{C}$
 - U toku skladištenja i eksploatacije od -20°C do $+50^{\circ}\text{C}$
- Kvalitet materijala za izradu optičkih vlakana mora biti takav da vlakna imaju osobine koje se traže tehničkim uslovima
- Proizvođač je dužan da navede vrstu materijala od koga su vlakna proizvedena. Optičko vlakno mora biti jednolično izvučeno, bez ispupčenja, udubljenja, preloma, pukotina i pohabanih površina. Provera optičkog vlakna se vrši pomoću optičkog reflektometra, kriva dobijena na ekranu instrumenta ne sme imati diskontinuitete duž samog vlakna koji unose slabljenje veće od 0.1 dB.
- U pogledu korišćenja optičkih vlakana za prenos signala, najvažnije karakteristike su podužno slabljenje i disperzija

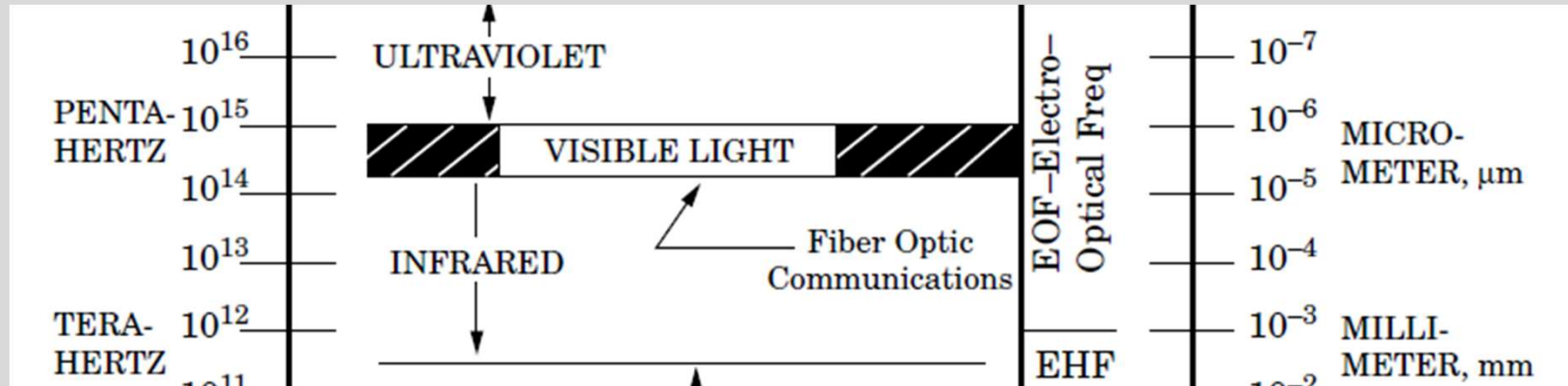
The photoelectric effect illustrates the transfer of light energy to an electron and demonstrates the particle nature of light.

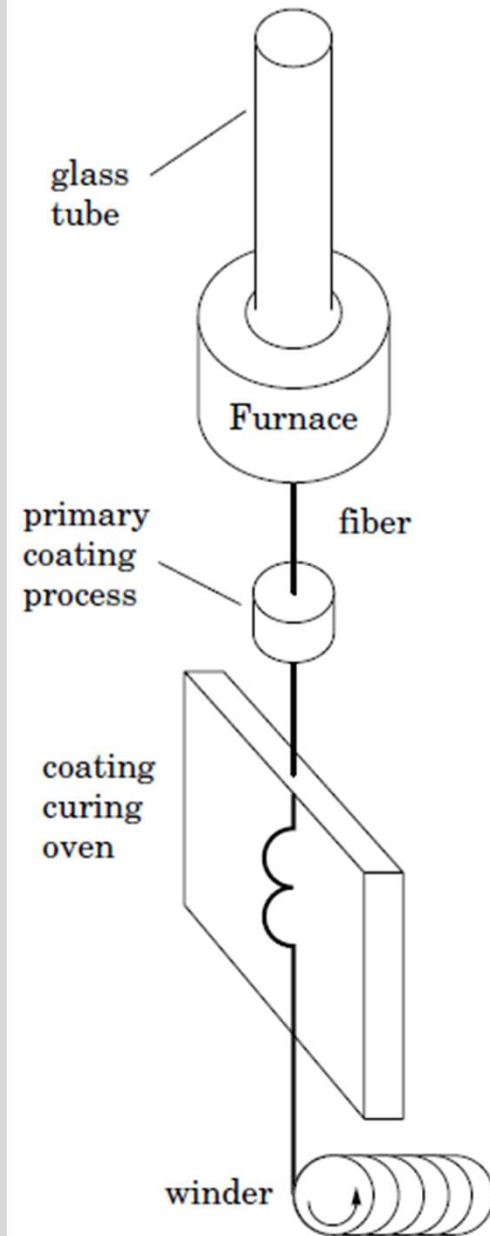


Deploying
Optical
Networking
Components

GIL HELD

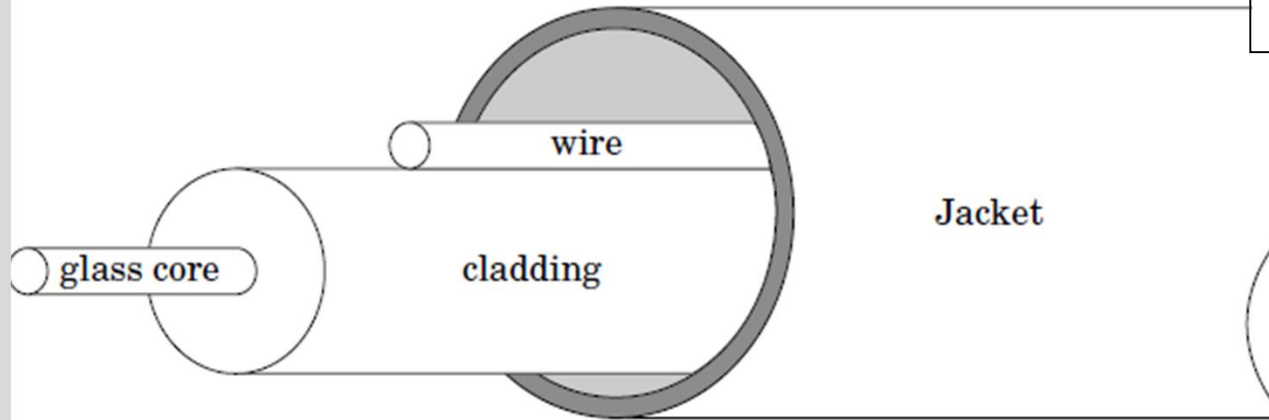
Known frequency spectrum



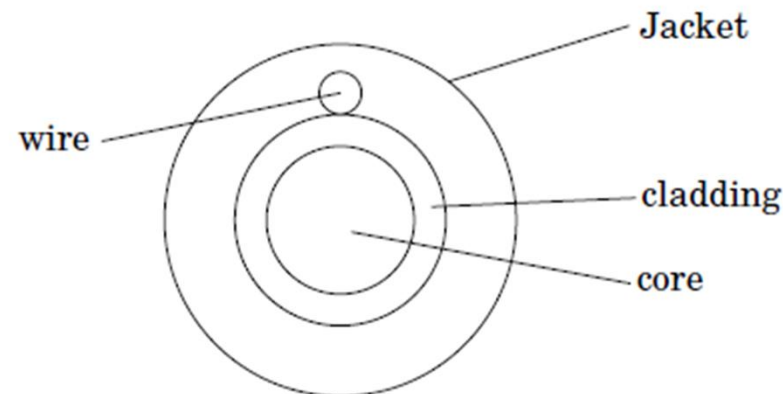


A popular method of manufacturing fiber strands employs a fiber-drawing tower through which a glass compound is heated, stretched, and spooled

The components of a basic fiber-optic cable.

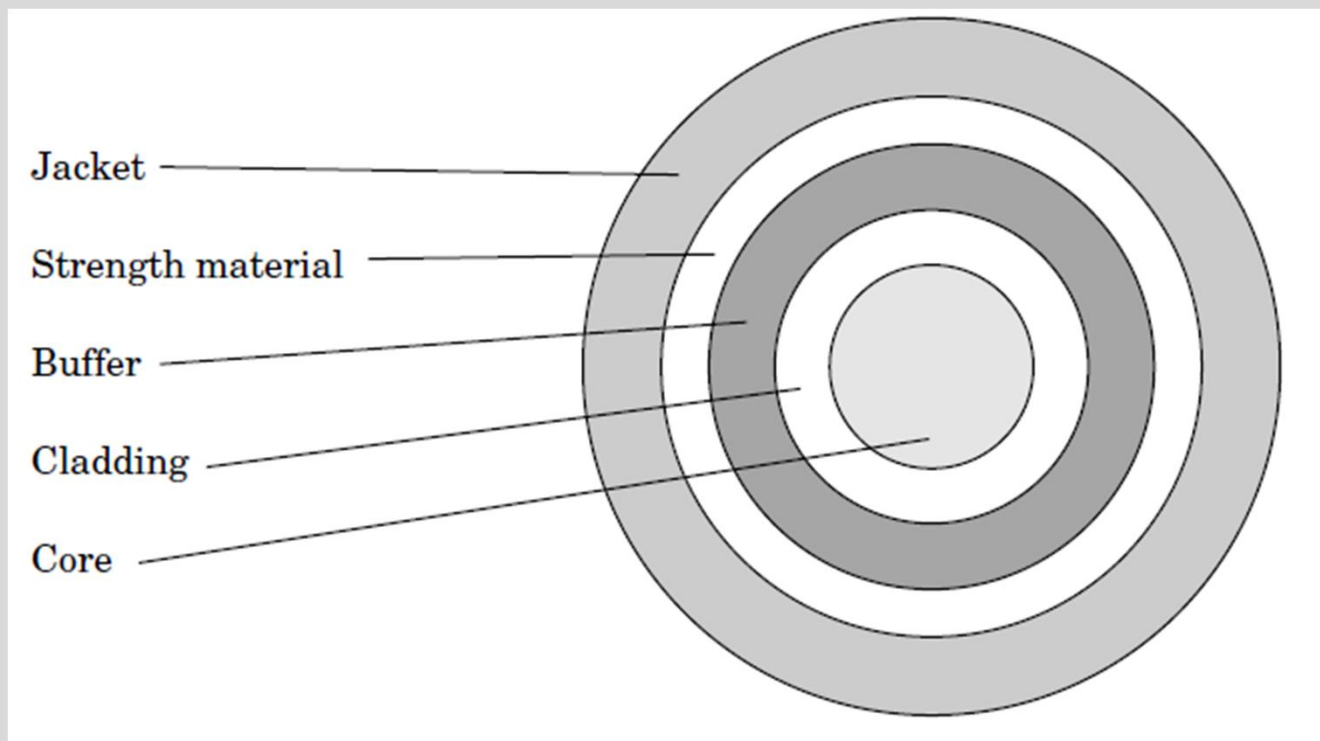


3-dimensional view

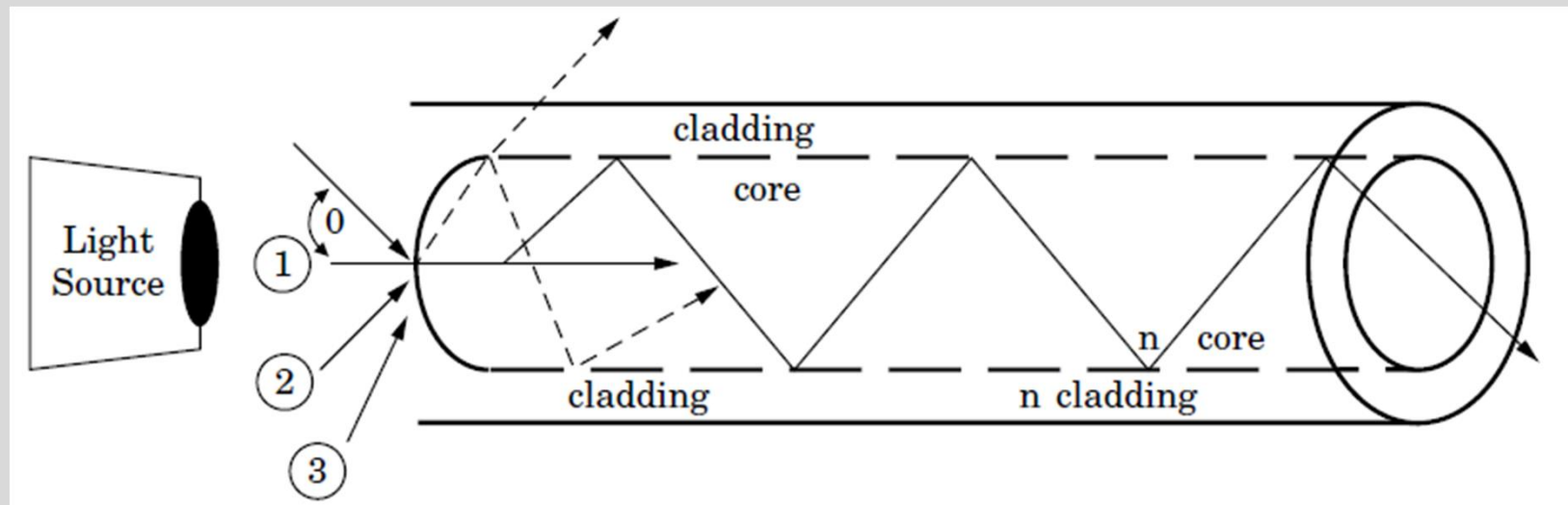


Cross section view

A cross-sectional view of a popular revision to the basic fiberoptic cable.

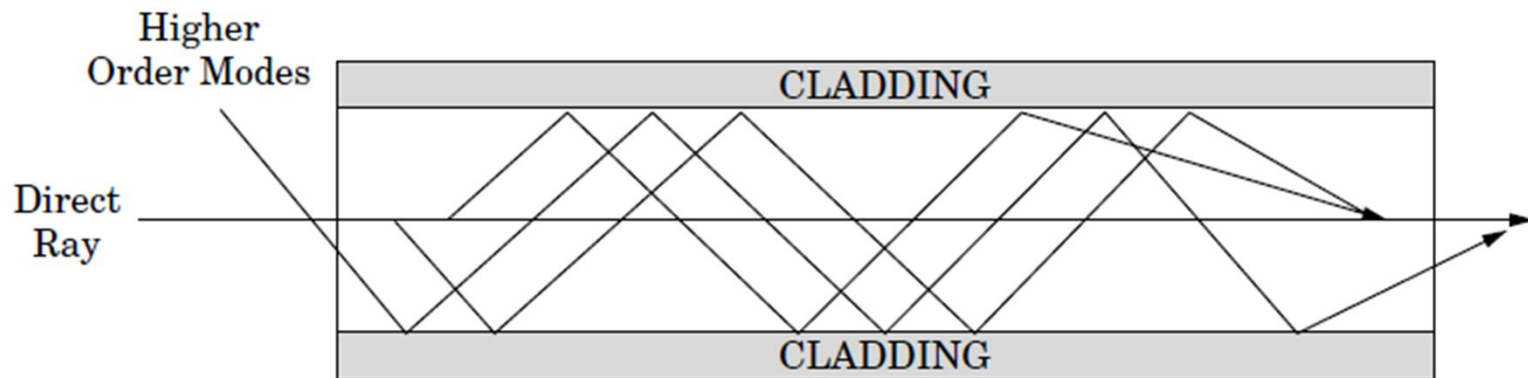


The flow of light rays into and through an optical fiber.

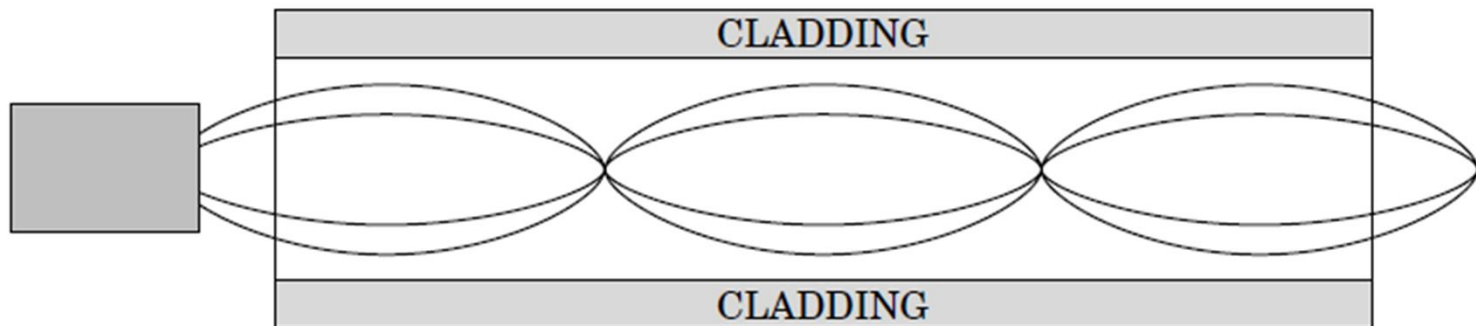


Comparison between light flow in multimode step-index and graded fibers.

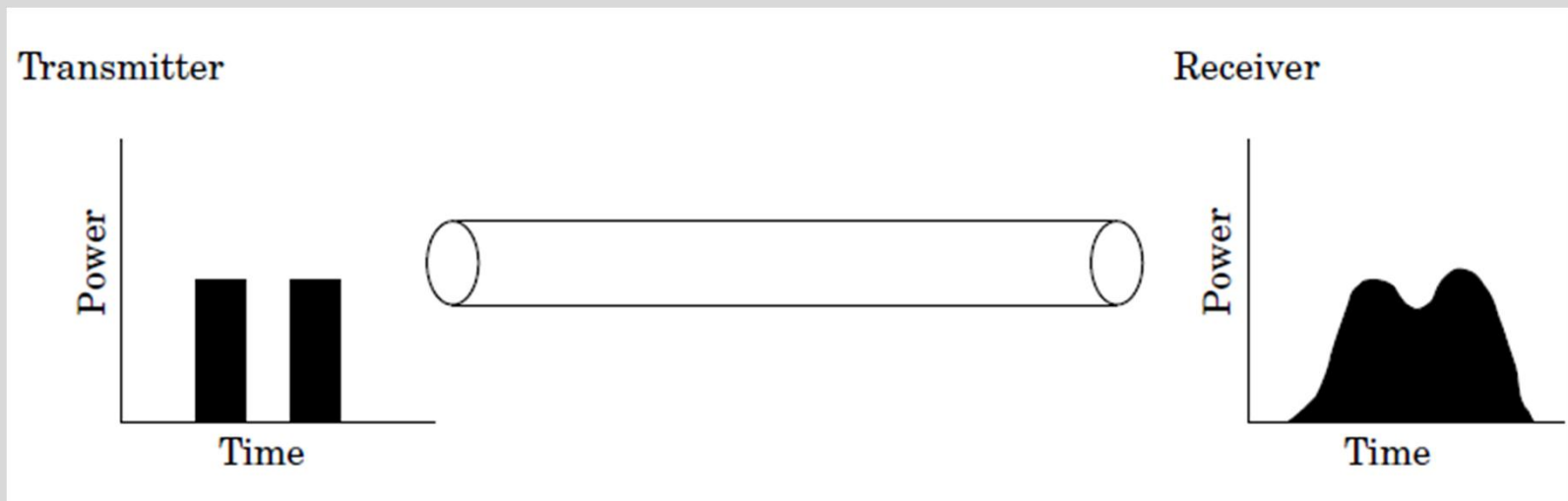
a. Multimode step-index fiber.



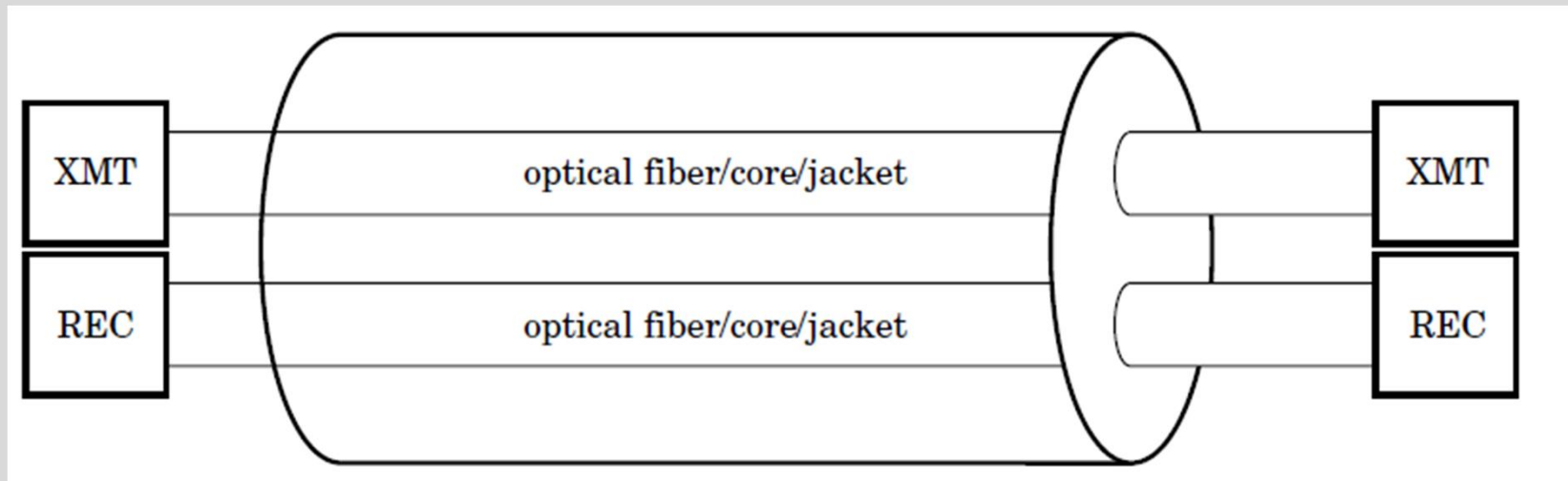
b. Multimode graded-index fiber.



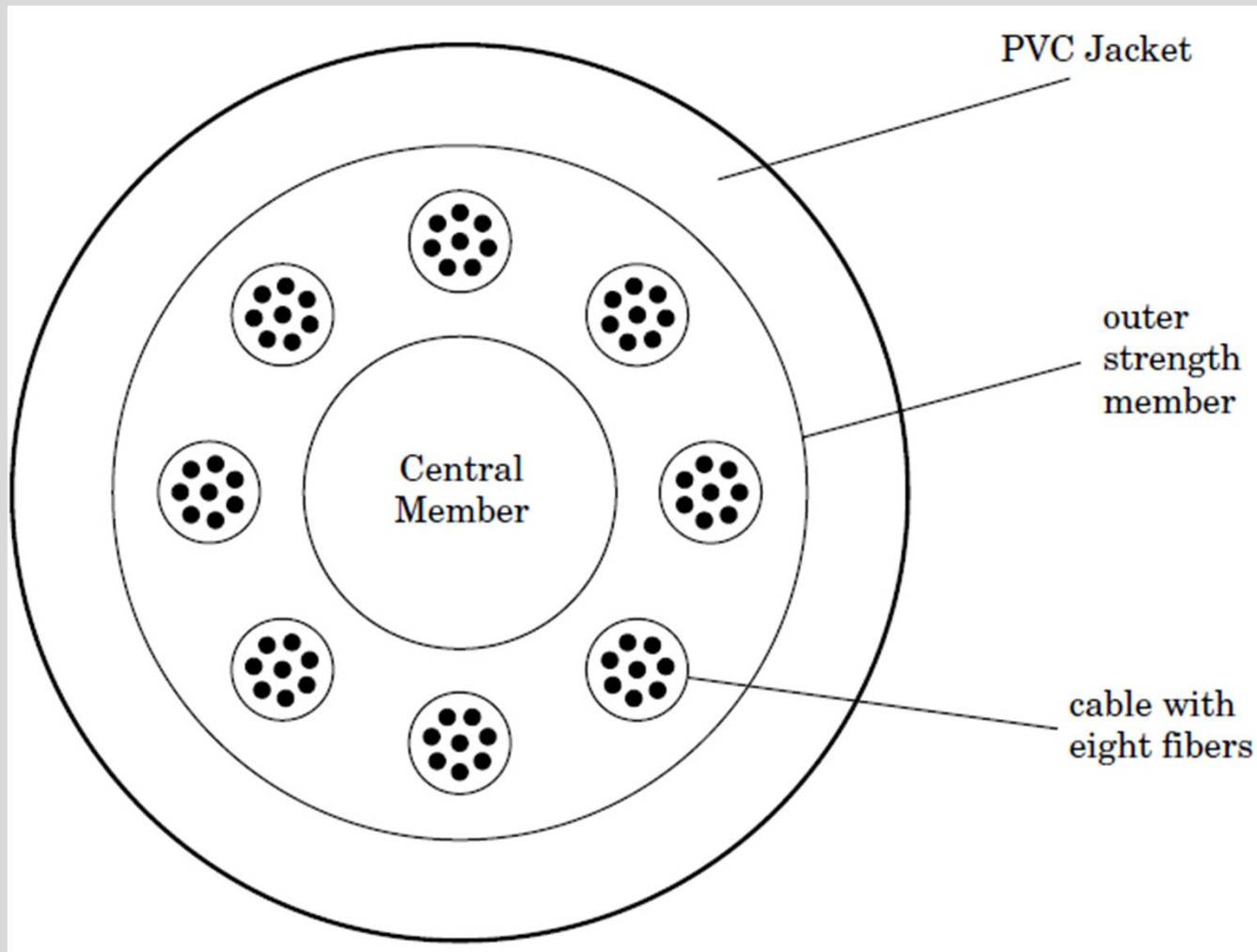
Dispersion in an optical fiber results in the spreading of pulses in the time domain.



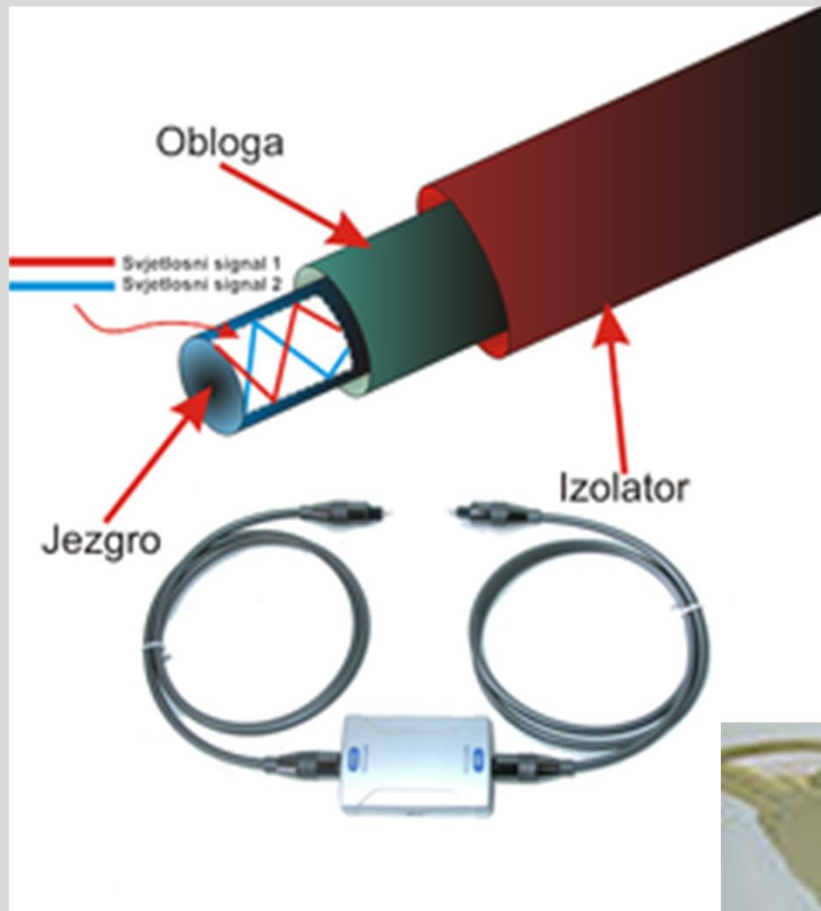
Most fiber-optic cables include one or more pairs of fibers, with each pair supporting two-way full-duplex communications.



Multiple-fiber cable. This fiber bundle provides eight fiber cables, each with eight fibers, resulting in 64 fibers becoming available for use.



Fiber optički kabl. LC (top) and ST (bottom) optical fiber connectors, both with protective caps in place.



Profesor dr Miroslav Lutovac
mlutovac@viser.edu.rs

Ova prezentacija je nekomercijalna.

Slajdovi mogu da sadrže materijale preuzete sa Interneta, stručne i naučne građe, koji su zaštićeni Zakonom o autorskim i srodnim pravima.

Ova prezentacija se može koristiti samo privremeno tokom usmenog izlaganja nastavnika u cilju informisanja i upućivanja studenata na dalji stručni, istraživački i naučni rad i u druge svrhe se ne sme koristiti –

Član 44 - Dozvoljeno je bez dozvole autora i bez plaćanja autorske naknade za nekomercijalne svrhe nastave:

(1) javno izvođenje ili predstavljanje objavljenih dela u obliku neposrednog poučavanja na nastavi;

- ZAKON O AUTORSKOM I SRODNIM PRAVIMA

("Sl. glasnik RS", br. 104/2009 i 99/2011)