

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MARTINA MIKULIĆ

SVJETLOVODI

Završni rad

Osijek, 2014.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



MARTINA MIKULIĆ

SVJETLOVODI

Završni rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku radi stjecanja zvanja
prvostupnice fizike

Osijek, 2014.

„Ovaj rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom Prof. dr. sc. Branka Vukovića i Maje Varga Pajtler, prof. asistent u sklopu Sveučilišnog preddiplomskog studija fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.“

Sadržaj

Sažetak	VI
Abstract	VII
1. UVOD	1
2. POVIJESNI RAZVOJ	2
3. ZAKONI OPTIKE	4
3.1. Zakon odbijanja (refleksije) svjetlosti	4
3.2. Zakon loma svjetlosti (Snellov zakon)	4
3.3. Totalna refleksija	5
4. SVJETLOVODI ILI VODIČI SVJETLA	8
4.1. Princip rada svjetlovoda	8
4.2. Građa svjetlovoda	9
4.3. Karakteristike svjetlovoda	10
4.3.1. Prigušenje	10
4.3.2. Intenzitet	10
4.3.3. Interferencija	10
4.3.4. Numerički otvor	10
4.3.5. Mod	11
4.3.6. Disperzija	11
4.4. Podjela	12
4.5. Polaganje svjetlovoda	13
4.6. Optička pojačala	14
4.7. Primjeri svjetlovodnih vlakana i kabela	14
4.7.1. LWPF	14
4.7.2. NZDSF	14
4.7.3. OM3	15
4.7.4. J-V(ZN)H	15
4.7.5. U-DQ(ZN)BH	15
4.7.6. Figure 8	16
4.8. Korištenje svjetlovoda	17
4.8.1. Rasvjeta	17
4.8.2. Komunikacija	18
4.8.3. Računalne mreže	19

4.8.4. Telefoni	19
4.8.5. Medicina.....	20
4.9. Colladonov pokus.....	21
5. ZAKLJUČAK	22
LITERATURA.....	23
ŽIVOTOPIS	24

SVJETLOVODI

MARTINA MIKULIĆ

Sažetak

Svjetlovod ili optičko vlakno je prozirna nit (cilindrično oblikovana) kroz koju se prenosi svjetlost. Izrađuje se od vrlo čistog stakla ili polimernog materijala. Primjenjuje se u komunikaciji, računalnim mrežama, medicini (endoskopi), rasvjetnim tijelima. Svjetlovodi se sastoje od jezgre i zaštitnog sloja, a neki imaju i omotač. Svjetlovodi se izrađuju različitih debljina, pri čemu promjer jezgre od 10 μm do 1 mm. Promjenom indeksa loma svjetlost se lomi, reflektira i usmjerava svjetlovodom. Promjena indeksa loma može biti postupna ili nagla, od središta svjetlovoda prema rubu. Svjetlovodi se sastoje od više optičkih niti. Zrake svjetlosti se provode od izvora do odredišta različitim putovima, što za posljedicu ima slabljenje svjetlosnog signala. Jednim svjetlovodom mogu se prenositi stotine različitih informacija na različitim frekvencijama, npr. više telefonskih razgovora istodobno, televizijski programi, internetski sadržaji, itd.

(24 stranice, 17 slika, 15 literaturnih navoda)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: komunikacija / svjetlovod / totalna refleksija

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Branko Vuković

Sumentor: Maja Varga Pajtler, prof. asistent

Ocjenjivači:

Rad prihvaćen:

OPTIC FIBERS

MARTINA MIKULIĆ

Abstract

Optic fiber is a transparent thread (of a cylindrical shape) through which light is being carried. It is made of glass of high level purity or a polymer based material. It is used in communications, computer networks, medicine (endoscopes) and illumination devices. Optic fibers consist of a core and a protective layer, and some of them have outer shell. Optic fibers are made in various sizes, with a core diameter ranging from 10 μm to 1 mm. When changing refractive index, light refracts, reflects and is directed through optic fibers. Change of the refractive index can be gradual or rapid from the center of the optic fiber towards the edge. Optic fibers are made of multiple optical threads. Light rays are being conducted from the source through different paths, consequence of which is weakening of the light signal. Hundreds of different information on different frequencies can be transmitted through one optic fiber, for example, multiple phone conversations, television programs, internet content, etc.

(24 pages, 17 figures, 15 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: communications / optic fiber / total reflection

Supervisor: Izv. prof. dr. sc. Branko Vuković

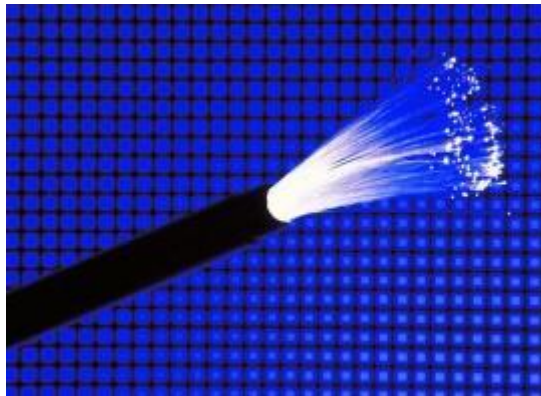
Co-mentor: Maja Varga Pajtler, prof. asistent

Reviewers:

Thesis accepted:

1. UVOD

Svjetlovodi su telekomunikacijski vodovi sadašnjosti i budućnosti. To su širokopolasni vodovi koji prenose signale frekvencija od 10^{14} do 10^{15} Hz, a izrađuju se od kvarca (silicijevog dioksida). Svjetlost je jedini elektromagnetski val kojeg prenose. Prednosti svjetlovoda su to što ne prenose elektricitet i opasna zračenja, u usporedbi s električnim vodičima prenose manju količinu infracrvenog i ultraljubičastog zračenja, mogu doći u kontakt s vodom te su neosjetljivi na elektromagnetski utjecaj (nema prisluškivanja i ometanja prijenosa podataka). Primjer svjetlovoda je prikazan na Slici 1.



Slika 1. Fotografija svjetlovoda [1]

2. POVIJESNI RAZVOJ

Ljudi su oduvijek imali ideje o prijenosu informacija na daljinu, između ostalog i putem svjetlosti, međutim, prva su se optička vlakna pojavila tek u drugoj polovici 20. stoljeća. 1790. godine francuski izumitelj C. Chappe napravio je „optički telegraf“, koji se sastojao od niza semafora postavljenih na tornjeve. Na tornjevima su stajali ljudi i putem semafora odašiljali poruke od jednog do drugog tornja. Taj sustav u 19. stoljeću zamijenio je električni telegraf. A. G. Bell 1880. godine patentirao je optički telefonski sustav „*Photophone*“, koji bi signal prenosio pomoću svjetlosti kroz atmosferu (kao u slučaju bakrene žice i električnog signala), ali je takav sustav bio nepouzdan zbog raspršenja svjetlosti. Telefon je bio mnogo praktičnije rješenje, tako da je „*Photophone*“ ostao samo eksperimentalni izum.

Otkrivanjem dualne prirode svjetlosti nastali su prvi laseri. Pojavom lasera povećala su se istraživanja u području optičkih vlakana jer se optičkom komunikacijom može prenijeti znatno veća količina podataka u odnosu na radio i telefonsku komunikaciju. Prvi problem bila je neefikasnost lasera napravljenih od jednog poluvodiča GaAs (galij – arsen). Takvi laseri nisu imali potrebnu snagu, brzo su se pregrijavali, bili su kratkog vijeka trajanja (svega nekoliko sati) i velike potrošnje električne energije za ostvarenje laserske reakcije (nije bila moguća na sobnoj temperaturi). Drugi problem bila je nemogućnost putovanja laserskog svjetla kroz slobodan prostor zbog raspršenja i potpunog gušenja svjetlosnog signala. Do raspršenja dolazi prilikom sudara elektromagnetskog vala (svjetlosti) s česticama u atmosferi, koje mogu biti različitih veličina (molekule, pelud, dim, kišne kapi). Čestice reflektiraju nešto energije ovisno o veličini i dielektričnosti. Ako je koncentracija čestica velika dolazi do potpunog gušenja tj. gubitka signala.

Korištenjem modificiranih GaAs spojeva, poput AlGaAs, djelovanje lasera ograničeno je unutar tankog sloja GaAs, što je omogućilo nastanak lasera „čvrstog stanja“, tj. poluvodičke naprave koja radi na sobnoj temperaturi, odnosno napravljena je prva svjetleća dioda (LED). LED je pouzdan izvor svjetlosti, a za razvoj komunikacije preostalo je još naći način kako svjetlosne signale prenijeti na velikim udaljenostima.

Karakteristika radio valova velikih valnih duljina je da putuju slobodno zrakom, prodirući s lakoćom kroz maglu i kišu. Za kratkovalno lasersko svjetlo utvrđeno je odbijanje od kapljica vodene pare i drugih čestica u atmosferi. Zbog odbijanja može doći i do potpunog gušenja, što znači da tijekom maglovitog i kišnog vremena komunikacija ne bi bila moguća. Stoga je za

prijenos informacija putem svjetlosti na velike udaljenosti trebalo napraviti vodiče analogne telefonskim linijama.

1966. godine C. Kao i G. Hockham iz *Telecommunications Laboratories* u Engleskoj objavili su članak u kojem su prikazali kako visoki gubici, koji karakteriziraju postojeća optička vlakna, nastaju zbog nečistoća unutar stakla, a ne zbog samog stakla te razradili ideju vlakna puno veće prozirnosti.

1970. godine D. Keck, P. Schultz i R. Maurer uspješno su izradili prvo optičko vlakno duljine stotinu metara s niskim gubicima (manje od 20 dB/km) i kristalne čistoće kakvu su predložili Kao i Hockham.

1985. godine na engleskom Sveučilištu u Southamptonu, fizičar S. B. Poole otkrio je da je dodavanjem male količine erbija u staklo za izradu optičkih vlakana moguće napraviti pojačala koja imaju samo optičke elemente. Kada kratki stakleni pramen, s dodanim erbijem ugrađenim u optičko vlakno, primi energiju od vanjskog svjetlosnog izvora ponaša se kao laser, pojačavajući na takav način optički signal bez korištenja elektronike. D. Payne, P. J. Mears i E. Desurvire iz *Bell Laboratories* počeli su primjenjivati ovo otkriće na praktična pojačala signala u optičkim vlaknima.

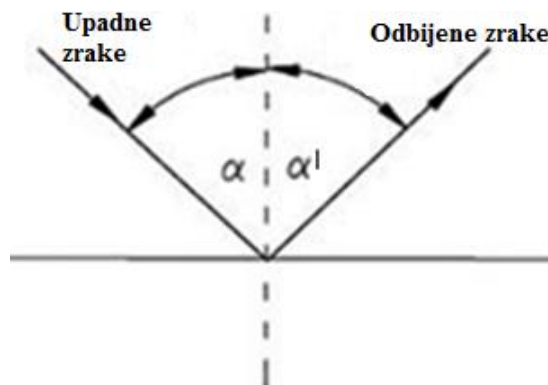
1991. godine istraživači iz *Bell Laboratories* pokazali su da potpuno optički sustavi mogu imati 100 puta veći kapacitet od sustava s elektronskim pojačalima. U kratkom su roku europske i američke komunikacijske tvrtke postavile potpuno nove svjetlovode preko Atlantskog i Tihog oceana te ih pustile u rad 1996. godine.

3. ZAKONI OPTIKE

Prolazak zraka svjetlosti kroz optička vlakna temelji se na dva od četiri zakona geometrijske optike. To su zakon odbijanja ili refleksije svjetlosti i zakon loma ili refrakcije svjetlosti.

3.1. Zakon odbijanja (refleksije) svjetlosti

Prilikom upada snopa paralelnih zraka svjetlosti na ravnu uglađenu plohu nekog materijala snop se odbija od plohe i ostaje u ravnini okomitoj na nju. Upadne i odbijene zrake leže u upadnoj ravnini koja je određena upadnom zrakom i normalom na plohu. Drugi dio zakona kaže da je upadni kut zrake α (kut između upadne zrake i normale na plohu) jednak kutu odbijene zrake α' (kut između odbijene zrake i normale na plohu) tj. $\alpha = \alpha'$. Ilustracija zakona refleksije prikazana je Slikom 2.



Slika 2. Zakon refleksije; kut upadnih zraka α jednak je kutu odbijenih zraka α' , upadne i odbijene zrake leže u istoj ravnini koja je određena upadnom zrakom i normalom na plohu

3.2. Zakon loma svjetlosti (Snellov zakon)

Kada snop paralelnih zraka svjetlosti prolazi kroz ravnu graničnu plohu dvaju homogenih izotropnih dioptrijskih sredstava, dolazi do promjene smjera širenja svjetlosti; to je pojava loma ili refrakcije svjetlosti (Slika 3). Ploha koja dijeli dva dioptrijska sredstva naziva se dioptrijska ploha. U prvom sredstvu svjetlost se širi brzinom v_1 , dok je u drugom brzina v_2 . Valna ravnina, koja je okomita na upadne zrake, nakon prolaska snopa svjetlosti kroz dioptrijsku plohu se zakreće.

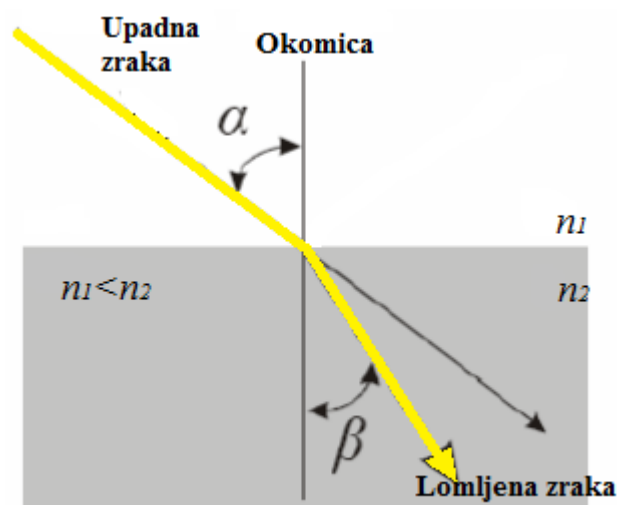
Parametar koji karakterizira dioptrijska sredstva je indeks loma svjetlosti, n , a definira se kao omjer brzine svjetlosti u vakuumu i brzine svjetlosti u promatranom sredstvu, tj. $n = \frac{c}{v}$.

Zakon loma može se zapisati izrazom

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1},$$

gdje se $n_{2,1}$ naziva relativni indeks loma.

Pri prijelazu zraka iz sredstva većeg indeksa loma u sredstvo manjeg indeksa loma ($n_1 > n_2$) zraka se lomi od normale, dok se pri prijelazu iz sredstva manjeg indeksa loma u sredstvo većeg indeksa loma ($n_1 < n_2$) lomi prema normali. Za sredstva s većim indeksom loma se kaže da su optički gušća. Indeks loma plinova razmjernan je gustoći plina. Budući da je brzina svjetlosti c najveća moguća, n je uvijek veći od 1, tj. za vakuum iznosi 1. Zraka koja upada pod kutom od 90° (okomito) se ne lomi, tj. nema otklona zrake od upadnog smjera. Pri prijelazu svjetlosti iz jednog sredstva u drugo mijenjaju se brzina svjetlosti i valna duljina, dok frekvencija ostaje ista.



Slika 3. Zakon refrakcije; zraka se na granici dvaju sredstava lomi, α je kut upadnih, a β je kut lomljenih zraka, upadna i lomljena zraka leže u istoj ravnini.

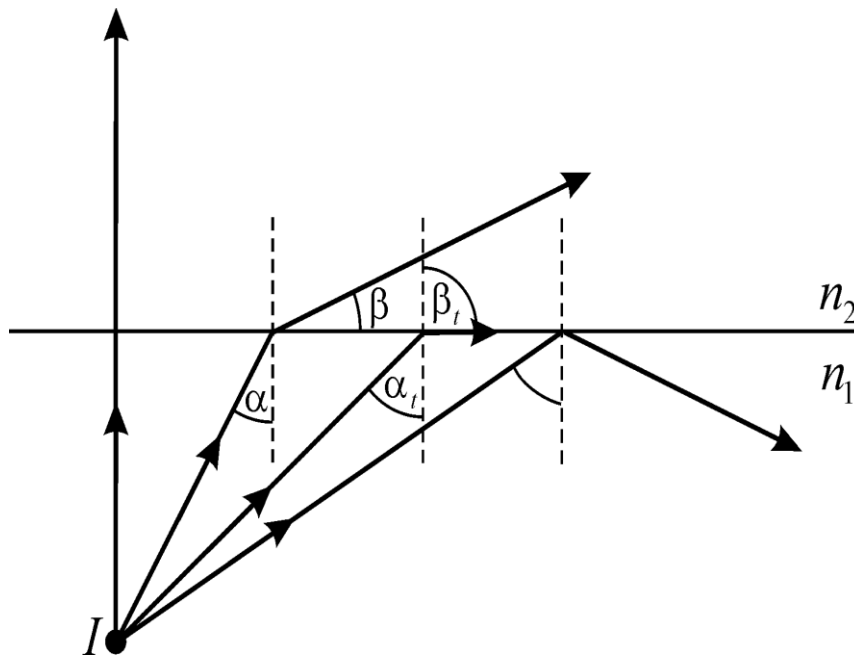
3.3. Totalna refleksija

Kada svjetlost upada na dioptrijsku plohu iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo, $n_1 > n_2$, onda se u drugom sredstvu svjetlost otklanja od normale. Povećavanjem upadnog kuta povećava se i kut loma. Kada lomljena zraka postane tangencijalna na granicu sredstava, onda je

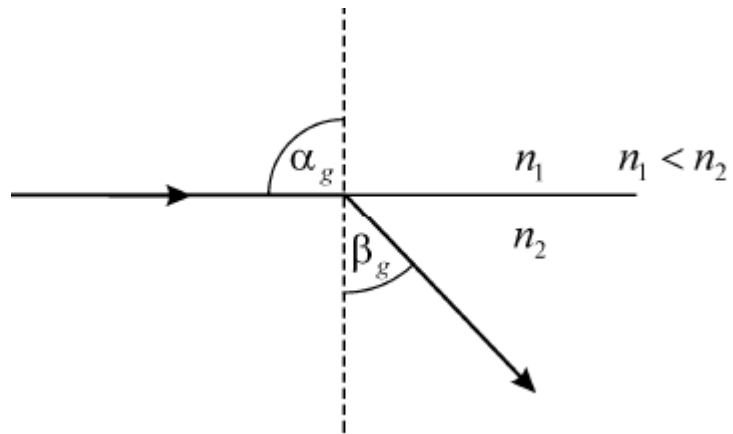
kut loma $\beta_t = \frac{\pi}{2}$, a upadni kut je poprimio neku vrijednost α_t (Slika 4) koja ovisi o relativnom indeksu loma. Naime, iz zakona loma slijedi $\sin \alpha_t = n_{2,1}$. Zrake koje upadaju pod kutom α_t ili većim od njega ne prelaze u drugo sredstvo, već se lome tangencijalno u prvo sredstvo. α_t se naziva kutom totalne refleksije, a ovu pojavu zovemo totalna refleksija.

Pri prijelazu zrake svjetlosti iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo, $n_1 < n_2$, zraka se lomi prema normalni. Kada je upadna zraka tangencijalna na granicu sredstava, onda lomljena zraka zatvara kut β_g prema normalni, koji se naziva granični kut loma (Slika 5).

Totalna refleksija se primjenjuje u optičkim uređajima da bi se svjetlost skrenula u drugi smjer. Totalna refleksija učinkovitija je od refleksije na običnom zrcalu jer pri totalnoj refleksiji nema gubitaka svjetlosti uzrokovane apsorpcijom svjetlosti, koja se javlja pri odbijanju svjetlosti na zrcalu. Totalna refleksija omogućava da svjetlost prolazi uzduž prozirne plastične ili staklene niti višestruko se reflektirajući na unutrašnjoj strani površine niti. Slika 6. prikazuje primjer totalne refleksije.



Slika 4. Totalna refleksija, gdje je $n_1 > n_2$, I je izvor svjetla, a α_t je kut totalne refleksije [1]



Slika 5. Upadna zraka je tangencijalna, a lomljena zraka zatvara kut β_g s normalom, β_g je granični kut loma [1]

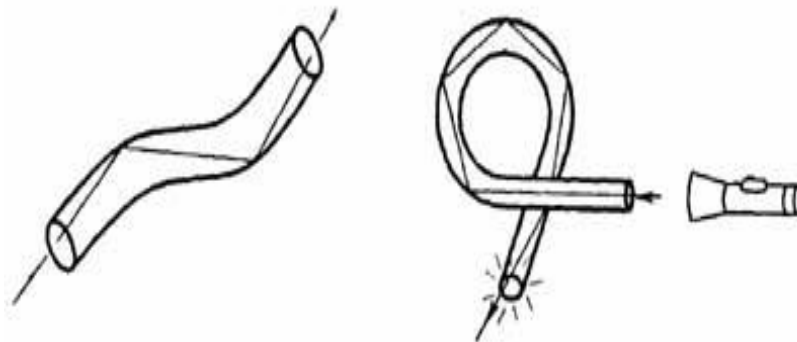


Slika 6. Fotografija totalne refleksije, snop svjetlosti se reflektira kroz polimerni medij

4. SVJETLOVODI ILI VODIČI SVJETLA

4.1. Princip rada svjetlovoda

Svjetlovodi su staklena ili plastična vlakna, koja se sastoje od jezgre i omotača. Vlakna su promjera do 100 μm , s indeksom loma središnje jezgre 1,63 i omotača 1,52. Različiti indeksi loma koriste se kako bi zrake svjetlosti bile vođene, a prolazak zrake svjetlovodom prikazan je na Slici 7. Upadne zrake se dolaskom na jezgru lome, zatim putuju jezgrom svjetlovoda, a kad stignu na granicu jezgre i omotača, reflektiraju se prema zakonu loma opet u jezgru. Zrake putuju svjetlovodom po već spomenutim zakonima optike. U slučaju idealnog svjetlovoda zrake bi mogle beskonačno dugo putovati, ali zbog nečistoća u materijalima dio zraka gubi se u omotaču, a ostale zrake se prigušuje i nakon nekog vremena u potpunosti gube. Da bi svjetlost bila vođena cijelom dužinom svjetlovoda bez gubitaka, koriste se optička pojačala.



Slika 7. Shematski prikaz prolaska zrake kroz svjetlovod [3]

Vlakna su pasivni elementi, tj. ne koriste energiju i ne prenose elektricitet. Mogu doći u kontakt s vodom ili se postaviti pod vodu, ne propuštaju opasna zračenja (količina infracrvenog i ultraljubičastog zračenja je zanemariva), mogu se rezati ili savijati, a pri tome ostaju siguran vodič. Budući da su vlakna krta, većina se polomi pri izradi te se zaštićuju teflonskom izolacijom. Polimerna vlakna ne moraju se izvlačiti u duljinama koje su nam potrebne, već se mogu nastavljati korištenjem specijalnih elemenata i gela za izjednačavanje indeksa loma svjetlosti.

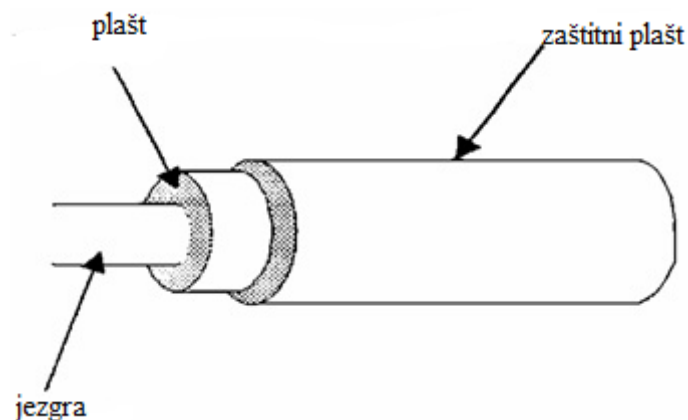
Svjetlovodi su ograničeni količinom energije koja prolazi medijem bez obzira koja je koncentracija energije plasirana u njega. Upotrijebi li se jači izvor, očekivala bi se veća količina svjetla na drugom kraju, ali to neće biti ostvareno. Fizikalno je nemoguće da sva svjetlovodna vlakna u svjetlovodu dobiju jednaku količinu svjetla iz istog izvora (svjetlost nije homogeno raspoređena).

Prednosti svjetlovoda u usporedbi s električnim vodičima veliki su propusni frekvencijski opseg, niska cijena materijala, svojstvo da ne prenosi elektricitet, neosjetljivost na elektromagnetske valove, malo prigušenje, male dimenzije, mala masa, velika savitljivost, otpornost na visoke temperature i ne zapaljivost. Loše značajke su osjetljivosti na udarce i ionizirana zračenja te složeno spajanje.

4.2. Građa svjetlovoda

Svjetlovodi se sastoje od jezgre, odraznog plašta, zaštitnog plašta (koji se sastoji od primarne zaštite i sekundarne zaštite). Građa svjetlovoda prikazana je na Slici 8. Jezgru čini cilindrično oblikovana leća izrađena od kvarca ili stakla, a služi za prijenos signala. Odradni plašt služi za odbijanje svjetlosnog signala natrag u jezgru, ima različit (manji) indeks loma svjetlosti od jezgre. Primarna zaštita služi za mehaničku zaštitu jezgre i odraznog plašta. Načinjena je od polimera (plastična masa), a nanosi se pri proizvodnji vlakana u vrlo tankom sloju. Sekundarna zaštita služi za dodatnu mehaničku zaštitu i za zaštitu od vlage i kemikalija, također je polimerna zaštita, nanosi se u vrlo debelom sloju na primarnu zaštitu. Može se nanijeti vrlo čvrsto ili labavo, a može imati punjenje ili biti bez punjenja.

Razlike u kvaliteti svjetlovoda dolaze od postotka nečistoće i rafiniranosti sirovina s kojima se prerađuje i o samom načinu proizvodnje. Bitno je naglasiti da se vlakna proizvode za točno određenu namjenu.



Slika 8. Građa svjetlovoda

4.3. Karakteristike svjetlovoda

4.3.1. Prigušenje

Optička se snaga u svjetlovodu prigušuje transmisijom u svjetlovodnoj niti. Prigušenje nastaje zbog gubitka svjetlosti, čiji uzrok može biti unutrašnji (nečistoće zbog kojih dolazi do apsorpcije u materijalu) ili vanjski (savijanje svjetlovoda, koje mijenja put zrake).

Prigušenje se mjeri pomoću monokromatskog svjetla, tj. lasera, svjetleće diode ili kalibriranog svjetlosnog izvora, a izražava se u dB/km. Prigušenje se odnosi na jediničnu valnu duljinu i odgovarajuću boju, što znači da istovremeno možemo izmjeriti drugačiju vrijednost prigušenja za plavi spektar, a drugo za crveni. Za bijelu svjetlost možemo odrediti prosječnu vrijednost, jer na promjenu boje svjetla utječu i vrsta žarulje koju koristimo kao izvor te njezina starost i vrsta materijala od kojeg je načinjen svjetlovod. Podatak o prosječnom prigušenju, tj. prigušenju bijele svjetlosti je bezvrijedan. Najčešći gubici iznose od 3% do 10% po metru duljine. Kako bi se smanjilo prigušenje, koristi se pojačalo svjetlosnog signala, koje se postavlja na svakih 10 km ili više.

4.3.2. Intenzitet

Ljudsko oko ne razlikuje postupnu promjenu intenziteta. Promjenu možemo opaziti jedino ako vlakno gledamo sa strane i pojedinačno krajeve, a ne cjelinu. Optimalan intenzitet postiže se odabirom kontrastne pozadine (boja svjetlosti je u kontrastu sa bojom pozadine).

4.3.3. Interferencija

Svjetlovodi su neosjetljivi na elektromagnetsku interferenciju (EMI) i radio frekvencijsku interferenciju (RFI). Budući da su utjecaji svjetlosne interferencije i interferencije zbog visokog napona eliminirani, svjetlovodi su pogodni za korištenje na mjestima gdje dolazi do naponskih udara i elektrostatskog pražnjenja.

4.3.4. Numerički otvor

Numerički otvor (NA) se definira kao sinus maksimalnog kuta prihvata θ_{max} , a ovisi o indeksima loma svjetlosti jezgre (n_1) i plašta (n_2).

Može se pokazati da vrijedi

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

gdje je NA numerički otvor, θ_{max} , maksimalni kut, n_1 indeks loma jezgre, a n_2 indeks loma plašta.

4.3.5. Mod

Modovi rada svjetlovoda predstavljaju polja elektromagnetske energije. Prilikom totalne refleksije svjetlosnih zraka i vraćanja zraka natrag kroz centar svjetlovoda javljaju se elektromagnetska polja različitih energija. Broj modova rada vlakana ovisi o numeričkom otvoru (NA), valnoj duljini na kojoj rade (λ) i promjeru jezgre (a) svjetlovoda. Vrijedi:

$$V = (2\pi * NA * a) / \lambda ;$$

gdje je NA numerički otvor, a je promjer jezgre, λ je valna duljina i V je broj modova (frekvencijski parametar).

4.3.6. Disperzija

Disperzija je pojava da se impuls svjetlosti pri prijenosu po svjetlovodu proširuje i tako ograničava širinu propusnog opsega. Ukupna disperzija posljedica je dviju vrsta disperzije, kromatske (koja ovisi o valnoj duljini) i nekromatske (koja ne ovisi o valnoj duljini), pri čemu nekromatska disperzija može biti multimodna i polarizacijska.

Kromatska disperzija nastaje zato što indeks loma materijala ovisi o valnoj duljini svjetla, a očituje se proširenjem impulsa.

Multimodna disperzija je nekromatska disperzija nastala zbog širenja zraka putovima različitih duljina. Različiti modovi imaju različite fazne brzine što za posljedicu daje različito vrijeme dolaska signala, tj. proširuje impuls.

Polarizacijska disperzija je nekromatska disperzija koja nastaje zato što jezgra svjetlovoda nije idealni valjak nego je eliptična.

Izražava se u ns/km, a ovisi o tipu svjetlovoda, o tome je li promjena indeksa loma svjetlosti diskretna ili kontinuirana te o tome jesu li svjetlo vodi jednomodni ili višemodni.

4.4. Podjela

Svjetloводе možemo podijeliti prema vrsti materijala od kojih su izrađeni jezgra i plašt, prema promjeni indeksa loma i broju modova te broju vlakana.

1. Prema vrstama materijala od kojih su izgrađene jezgre i plaštevci razlikujemo tri vrste svjetlovoda:

a) svjetlo vodi kojima su i jezgra i plašt od kvarcnog stakla (SiO_2) ili višekomponentnog stakla (smjesa stakla s dodatkom alkalijskih ili zemnoalkalijskih elemenata ili kovinskih oksida);

b) svjetlo vodi kojima je jezgra od kvarcnog stakla, a plašt od plastične mase (polimera);

c) svjetlo vodi kojima su i jezgra i plašt izrađeni od polimera.

Staklena vlakna pogodna su za korištenje pri visokim temperaturama i radijaciji, otporna su na većinu otapala i ulja. Zaštićuju se polimernom izolacijom, a za spoj na krajevima koristi se ljepilo, koje vremenom tamni i apsorbira veću količinu topline, što dovodi do razaranja strukture svjetlovoda. Vlakna su mehanički vrlo osjetljiva.

Za izradu polimernih vlakana koristi se manje plastike nego pri izradi staklenih vlakana. Kvaliteta svjetla na većoj udaljenosti je bolja, cijenom su pristupačniji i lakši su od staklenih. Nedostatak polimernih vlakana je njihova radna temperatura, koja ne bi smjela prijeći 60°C .

Prosječno trajanje polimernih vlakana je 20 godina, a krajevi mogu i kraće trajati. Staklena vlakna nemaju rok trajanja, ali završetci, koji se premazuju ljepilom, se oštete.

2. Prema broju vlakana razlikujemo:

a) svjetlo vode s jednim vlaknom, kod kojih je vlakno zaštićeno izolacijom, promjera od 3 do 25 mm;

b) svjetlo vode s više vlakana, koji sadrže do nekoliko stotina vlakana grupiranih i obloženih izolacijom, promjera 0,75 mm i 1,00 mm;

c) svjetlo vode s više upletenih vlakana, kod kojih se u proizvodnji vlakna pletu u pletenice, a onda se manje pletenice pletu u veću pletenicu. Takvi svjetlo vodi imaju veće

gubitke po jedinici duljine i svjetlost prolazi kroz plašt, tako da intenzitet svjetla na kraju svjetlovoda slabi.

3. Svjetlovide možemo razlikovati i prema promjeni indeksa loma jezgre u odnosu na indeks loma omotača, a koja može biti:

- a) skokovita;
- b) kontinuirana (gradijentna).

Indeks loma svjetlosti se mijenja od centra jezgre do omotača.

4. Prema broju modova (broj frekvencija koje mogu prenositi) razlikuju se:

a) jednomodni svjetlovodi (SMF – *single mode fiber*), kod kojih ulaskom zraka u svjetlovod ne dolazi do razdvajanja zraka, nego se snop svjetlosti giba centralnom osi. SMF svjetlovodi imaju promjer jezgre od 8 do 10 μm i promjer plašta 125 μm , a izgrađuju se od silicijevog stakla. Koriste se za povezivanje globalnih mreža gdje je potrebna velika brzina i kapacitet prijenosa podataka.

b) Višemodni svjetlovodi (MMF – *multi mode fiber*). Promjer jezgre može biti 50, 62,5 i 85 μm uz plašt od 125 μm . Modovi se mijenjaju s gradijentnim indeksom loma. Kod višemodnih svjetlovoda dolazi do disperzije i prigušenja svjetlosti.

4.5. Polaganje svjetlovoda

Manje dimenzije i težina svjetlovoda u odnosu na električne vodiče, omogućuju lakše rukovanje i brže polaganje. Polaganje svjetlovoda slično je kao i polaganje električnih vodiča, ali je potrebna prilagodba opreme za polaganje svjetlovoda. Za polaganje su bitni tvornička duljina (najveći gubici svjetlosti su na spoju), najmanji dopušteni polumjer savijanja (da bi svjetlost bila vođena) i najveća dopuštena vučna sila (da ne bi došlo do pucanja). Pri polaganju svjetlovoda u zemlju potrebno je postaviti posebnu zaštitu od udaraca, opterećenja i glodavaca.

4.6. Optička pojačala

Pojava optičkih pojačala promijenila je proračun optičkog prijenosa. Prije se optički signal obnavljao elektroničkom regeneracijom tako da se primaoptički signal, koji bi se pretvarao u električni i opet u optički signal prije slanja. Takav način pojačanja je neisplativ jer se usporava prijenos signala. Optička pojačala imaju širi pojas pojačanja, tj. primjenjivi su na više signala. Osnovni mehanizam koji koriste je stimulirana emisija u prisutnosti optičkog signala. Pod utjecajem ulaznog signala frekvencije f_c atomi prelaze iz nižeg u više energijsko stanje, pri čemu dolazi do apsorpcije fotona, dok pri prijelazu iz višeg u niže energetske stanje dolazi do emisije fotona iste frekvencije. Ako češće dolazi do emisije nego do apsorpcije fotona, doći će i do pojačanja signala.

4.7. Primjeri svjetlovodnih vlakana i kabela

4.7.1. LWPF

LWPF (Low Water Peak Fiber) je jednomodno vlakno, bez disperzijskog pomaka, namijenjeno proširivanju upotrebljivih pojasa s 1310 nm na 1530 nm. Napravljen je s niskom razinom hidroksida (OH) kako bi se reducirao vršak prigušenja u 1400 nm pojasu valnih duljina (E – pojas). Upotrebljava se za spektar od 1260 nm do 1625 nm. Omogućavaju korištenje jeftinijih lasera i prijenos većeg broja kanala. Domet transmisije limitiran je prigušenjem na valnoj duljini 1310 nm.

Ovo se vlakno upotrebljava za međumjesne i gradske linije te pretplatničke priključke, a dopuštena vanjska temperatura je od -60°C do $+85^{\circ}\text{C}$.

4.7.2. NZDSF

NZDSF (Non – zero dispersion – shifted fiber) je jednomodno vlakno s nenultim disperzijskim pomakom, optimizirano za više kanalni prijenos u 1550 nm pojasu. Podržava prijenos 10 Gb/s bez kompenzacije disperzije za udaljenost od 200 km. Ovo vlakno se upotrebljava za međumjesne linije i gradske linije. Dopuštena vanjska temperatura je od -60°C do $+85^{\circ}\text{C}$.

4.7.3. OM3

OM3 vlakno je gradijentno, višemodno svjetlovodno vlakno debljine jezgre 50 μm , pogodno za visoke brzine prijenosa od 10 Gb/s (duljina veze od 300 m) do 100 Gb/s (duljina veze do 100 m). Koristi se u LAN sustavima s video, podatkovnim i glasovnim uslugama. Optimizirano je za 850 nm laserske izvore.

4.7.4. J-V(ZN)H

J-V(ZN)H (Slika 9) je *Tight buffer* kabel za unutarnju primjenu, s aramidnim ojačanjem, vodonepropustan, s bezhalogenim plaštem. Kabel čini od 2 do 24 vlakna s čvrstim odbojnikom, vodonepropusne membrane i plašta od bez halogenih smjesa, otpornog na UV zračenje. Radna temperatura ovog kabela je u rasponu od -20°C do $+70^{\circ}\text{C}$. Ovaj distribucijski kabel može se upotrebljavati za različite unutrašnje aplikacije, kao što su LAN i WAN okosnice sustava, veze među centralnim uredima, okosnice u informacijskim centrima, itd. Kabel je vodonepropustan i otporan na UV zračenje pa se u kraćim dijelovima može upotrebljavati i vani. Može se postavljati u kableske kanale i na police. Poboljšanih je svojstava u slučaju požara.



Slika 9. J-V(ZN)H kabel [9]

4.7.5. U-DQ(ZN)BH

U-DQ(ZN)BH (Slika 10) je *Central loose tube* svjetlovodni kabel za univerzalnu primjenu (unutarnju i vanjsku), s ojačanjem i zaštitom od glodavaca. Kabel je načinjen od 2 do 24 vlakna s obojanom primarnom zaštitom (labava cijev od elastomera ispunjena gelom), zaštite od glodavaca, vodonepropusne trake i plašta od bezhalogene smjese. Ovaj se kabel može upotrebljavati za LAN i WAN okosnice sustava, telekomunikacijske priključne linije, FTTB (*fibre to the business, fibre to the building*) priključne vodove, kao i za FTTH (*fibre to the home*) kućne priključke. Budući da ima vatrootporan, vodonepropustan i UV otporan plašt, idealan je za miješane unutarnje i vanjske instalacije te se može instalirati u cijevi upuhivanjem. Staklene niti

daju mu otpornost na vlačna istezanja (pogotovo verzije kabela za 1,5 i 3,0 kN) i u određenoj mjeri štite od glodavaca. Verzije kabela za 1,5 i 3,0 kN mogu se polagati direktno u zemlju, s odgovarajućom pješčanom podlogom.



Slika 10. U-DQ(ZN)BH kabel [9]

4.7.6. Figure 8

Figure 8 (Slika 11) je samonosivi svjetlovodni kabel s labavim cijevima (*stranded loose tube*) za vanjsku primjenu, s nosivim čeličnim užetom. Kabel čine od 4 do 12 vlakana po cijevi (što dalje ukupno do 72 vlakna), čelično nosivo uže, labava cijev od PBT elastomera ispunjena s tiksotropičnim gelom, centralno nosivi element FRP (staklenim nitima ojačana plastika), vodonepropusna zaštita, vanjski nosivi element i plašt. Ovaj se kabel može upotrebljavati za instalaciju u telekomunikacijske mreže te za povezivanje izdvojenih objekata kod kojih se ne može izvesti podzemna instalacija. Predviđen je za vanjsku primjenu, vodootporan je i otporan na UV zračenje.



Slika 11. Figure 8 kabel [9]

4.8. Korištenje svjetlovoda

U medicinskoj dijagnostici svjetlo vodi se primjenjuju kao endoskopi i služe za promatranje unutrašnjih organa. Također se primjenjuju u informatici, televizorima, telekomunikacijama, računalnim mrežama te video nadzoru, a služe za prijenos binarnih signala uz korištenje moduliranog laserskog snopa svjetlosti. Svjetlo vodi svoju primjenu nalaze i u petrokemijskim postrojenjima, vojnoj industriji i avio industriji.

4.8.1. Rasvjeta

Kako svjetlo vodi ne pružaju dovoljnu količinu svjetla za osvjetljavanje prostora potrebno je koristiti neki drugi sustav. Prednosti korištenja svjetlovoda treba maksimalno iskoristiti da bi se sustav isplatio. Budući da se svjetlovodom svjetlost usmjerava na točno određeno mjesto, on se koristi za osvjetljavanje manjeg prostora, kojeg nije moguće osvjetliti žaruljom, ili tamo gdje je dodatno zagrijavanje štetno. Pogodan je za osvjetljavanja osjetljivih izložaka u muzejima te nužnih izlaza u kazalištima i kinima. Dizajneri i arhitekti ga koriste u označavanju staza, mostova, vrtova, itd.

Primjer primjene svjetlovoda u rasvjeti je svjetlovodna lampa, koja se koristi u dekorativne svrhe, što je prikazano na Slici 12. Sastavljena je od perjanice (skup svjetlovodnih vlakana), izvora svjetlosti (halogena žarulja), motora (koji pokreće dio za promjenu boje) i kotača s bojama. Slika 13 prikazuje unutrašnjosti svjetlovodne lampe s vidljivom halogenom žaruljom i motorom. Kako motor okreće kotač s bojama, mijenja se boja svjetlosti i svjetlovodna lampa svijetli drugačijom bojom.



Slika 12. Fotografija dekorativne lampe, primjer svjetlovodne rasvjete

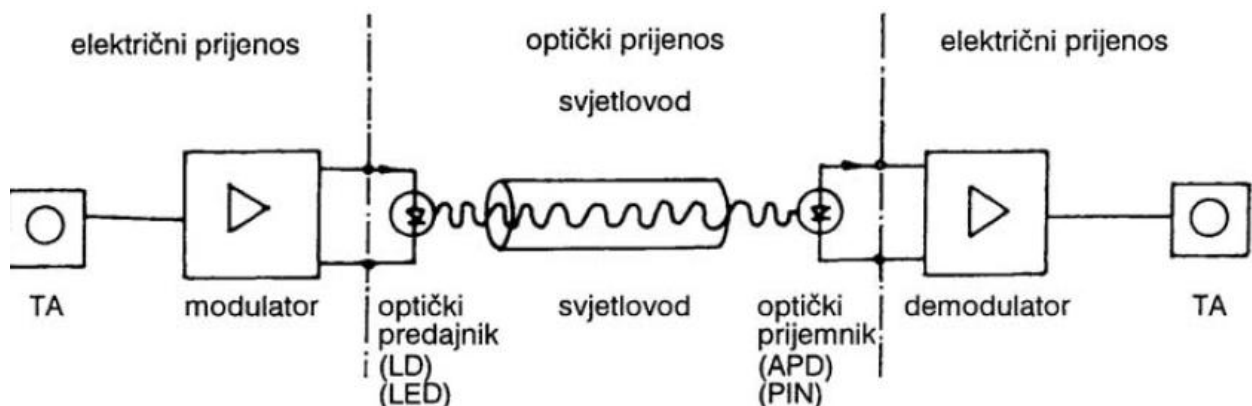


Slika 13. Fotografija unutrašnjosti lampe, halogena žarulja i motor

Svjetlo vodi se mogu koristiti i za postizanje vizualnih efekata, kao što su efekt „trčanja“ svjetlosti te svemirski efekti. Efekt da svjetlost „trči“ kroz vlakna postiže se korištenjem optičkog priključka u projektoru. Zvezdano nebo je instalacija od svjetlovodnih vlakna koju čini niz sitnih izvora svjetlosti istog promjera. Moguće je pomoću nekoliko tisuća vlakana izvesti simulaciju kometa, supernova, spiralnih galaksija, itd.

4.8.2. Komunikacija

Osnovni komunikacijski sustav se sastoji od predajnika (izvor signala), koji generira poruku, prijenosnog medija i prijavnika (detektora signala), koji izvlači informaciju iz signala. Većina modernih komunikacijskih sustava je digitalna. Informacija se kodira u niz binarnih brojeva, koji se pretvara u električni signal, pri čemu jedinici odgovara električni puls, a nuli nepostojanje električnog pulsa. Električni signali pretvaraju se u svjetlosne signale, tj. niz bljeskova koji se prenose medijem do prijavnika, gdje se opet bljeskovi pretvaraju u električni signal. Pretvorba električnih pulseva u svjetlosne bljeskove obavlja se pomoću lasera (poluvodički laseri). Princip prijenosa signala pomoću svjetlosti prikazan je Slikom 14.



Slika 14. Princip prijenosa signala pomoću svjetlosti[13]

Optički predajnik je izvor koncentrirane svjetlosti, čiju je jačinu moguće promijeniti. Danas se kao predajnici koriste LD (*Laser diode*) i LED (*Light emitting diode*). LD je izvor koherentne, a LED nekoherentne svjetlosti. U odnosu na LD, LED je slabiji, ali pouzdaniji i jeftiniji od LD.

Optički prijamnik treba imati osjetljiv detektor svjetlosti, a pretvara svjetlosni signal u električni. Danas se koriste PIN (P – jako dotirani poluvodič, I – nedotirani poluvodič, N – jako dotirani poluvodič) i APD (*Avalansh photo diode*) svjetlosne diode. APD ima širi propusni opseg od PIN diode.

Medij kroz koji prolazi signal od optičkog predajnika do prijamnika treba biti što prozirniji kako bi se smanjili gubici, a najčešće je načinjen od polimera ili stakla. Budući da je neosjetljiv na elektromagnetski utjecaj, ne može doći do prisluškivanja ili ometanja prijenosa podataka. Svjetlovodna nit omogućuje značajno veće brzine (100 puta) u usporedbi sa sadašnjim bakrenim mrežama (ADSL).

Kako su svjetlosne frekvencije puno veće od frekvencije radiovalova i mikrovalova, a količina informacija ovisi o frekvenciji signala svjetlosni komunikacijski sustavi mogu prenijeti mnogo više digitalnih informacija.

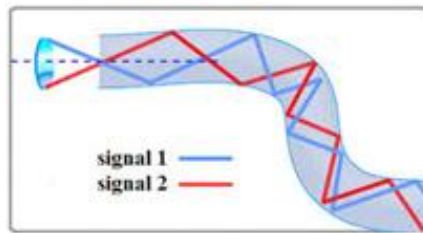
4.8.3. Računalne mreže

Korištenjem svjetlovoda za izradu računalnih mreža omogućuje se brže i kvalitetnije preuzimanje podataka (*download*) te skraćuje vrijeme potrebno za prijenos podataka od korisnika prema mreži (*upload*). Moguće je korištenje više različitih aplikacija preko iste svjetlovodne niti. Korištenjem svjetlovodnih niti u računalnim mrežama omogućen je razvoj novih aplikacija (rad na daljinu, e – učenje, e – uprava i sl.). Svjetlovodi prenose televizijski signal HD kvalitete, a moguć je i prijenos 3D televizijskog signala.

4.8.4. Telefoni

Od 1977. godine svjetlovodi se koriste u telefonskim sustavima. Standardnim električnim vodičima moguće je prenijeti najviše 32 razgovora odjednom, dok se svjetlovodima mogu prenijeti milijuni razgovora. U radu telefona prije se koristila istosmjerna struja. Mikrofon pod djelovanjem tlaka zvučnih valova (govora) mijenja električni otpor i modulira istosmjernu struju, a slušalica mijenja titranje membrane (izazvano istosmjernom strujom) u govor. Danas telefoni

koriste svjetlovođe i informacija se šalje kao niz bljeskova. Primjer neometanog prolaska dvaju signala prikazuje Slika 15.

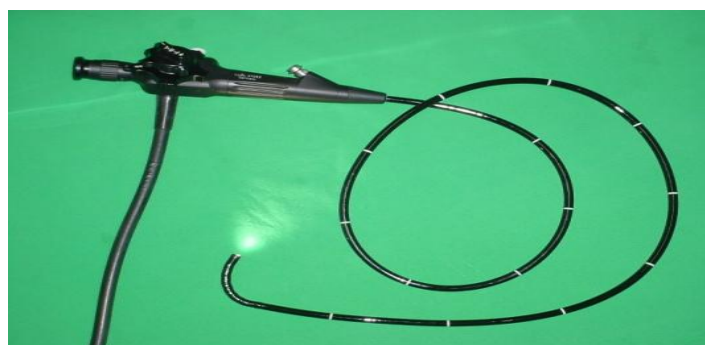


Slika 15. Primjer neometanog prolaska dvaju signala [14]

Na prvi razgovor (signal 1) ne utječu drugi razgovori. Razgovor se odvija kao niz infracrvenih bljeskova i svjetlost putuje po već spomenutim zakonima optike. Kod starih telefona dolazi do smetnji i miješanja signala, što je sad onemogućeno.

4.8.5. Medicina

Endoskop (Slika 16) je uređaj s optičkim nitima koji služi za promatranje unutarnjih organa, koji nisu dostupni oku. Konstrukcija endoskopa se prilagođava s obzirom na vrstu organa koji se promatra. Endoskop se sastoji od više snopova svjetlovodnih vlakana. Jedan snop vlakana prenosi svjetlost iz vanjskog izvora u unutrašnjost organa i osvjetljava ju, a drugi snop prenosi sliku liječniku, koji promatra na okularu. Slika se prenosi tako da svaka nit u vlaknu prenosi po dio slike. Duljina i broj optičkih niti unutar snopa ovisi o tipu i veličini endoskopa, a broj niti kreće se od 5000 do 40000. Polumjer snopa je između 0,5 i 3 mm. Endoskop je fleksibilan, može doći do najsitnijih šupljina u organu i omogućeno je kretanje u svim smjerovima.

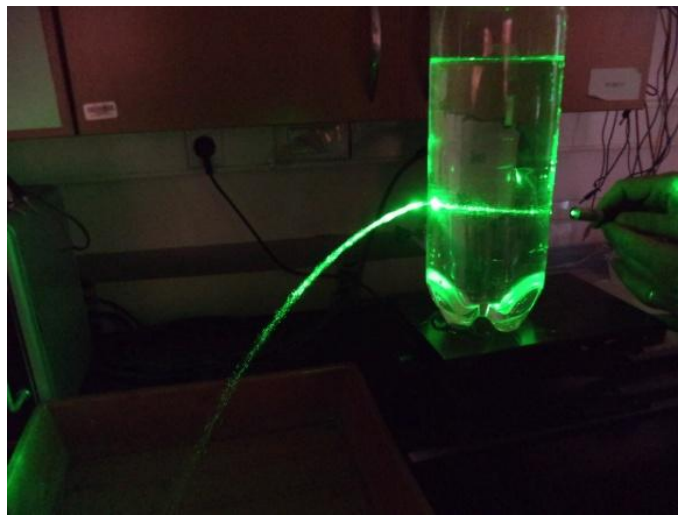


Slika 16. Endoskop [15]

4.9. Colladonov pokus

Colladonov pokus se temelji na višestrukoj totalnoj refleksiji i najjednostavniji je primjer svjetlovoda; to je tzv. „vodeni svjetlovod“. Za izvođenje pokusa potrebni su probušena plastična boca i laser kao izvor svjetlosti.

Laser se postavi iza boce (Slika 17), tako da je snop svjetlosti usmjeren na bocu točno u visini otvora kroz koji istječe voda (snop svjetlosti obasjava otvor iz kojeg istječe voda). Primjećuje se da je unutrašnjost mlaza vode osvijetljena. Mlaz vode služi kao svjetlovod, tj. mlaz je nit po kojoj svjetlost putuje.



Slika 17. Fotografija Colladonovg pokus;, laser se nalazi iza boce u ravnini s otvorom, a mlaz vode služi kao svjetlovod

5. ZAKLJUČAK

Svjetlovodi se izrađuju od kvarca, kojeg ima u prirodi i kojem cijena pada (za razliku od bakra kojem cijena raste). Svjetlovodi imaju široku primjenu u svakodnevnom životu, od rasvjete do komunikacije. Korištenje svjetlovoda omogućava brži prijenos podataka i upotrebu velikog broja veza. Prijenosni kapacitet svjetlovoda je velik. Danas se svjetlovodi koriste za izradu računalnih mreža i omogućavaju prijenos podataka na sve veće udaljenosti.

LITERATURA

- [1] <http://www.mojkvart.hr/Rijeka/Zamet/Elektroinstalacije-grijanje-ventilacija/ELEKTROINSTALACIJE-SMARTELEKTRO/Svjetlovodni-sustavi-S8108>
- [2] Planinić, J., Osnove fizike 3, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku Filozofski fakultet, Osijek, 2005.
- [3] http://eskola.hfd.hr/hokus_pokus/svjetlost/422_svakodnevice.htm
- [4] Skupina autora, Katalog Ellaba, prosinac 2012.
- [5] Skupina autora, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, <http://www.enciklopedija.hr>, pristup ostvaren u srpnju 2014.
- [6] Skupina autora, 100 pitanja i 100 odgovora, HAL d.o.o., Varaždin
- [7] Skupina autora, Sigurnost i svjetlost, CARNet CERT u suradnji s LS & S, broj 195, lipanj 2007.
- [8] Paschotta, R., How Fibers Really Work, Tech Feature, veljača 2014.
- [9] Skupina autora, Katalog kabela i vodiča, Tim Kabel
- [10] Skupina autora, Informatička tehnologija, Schrack technik
- [11] Krauskopf, K. B., Beiser, A., The Physical Universe, The McGraw Hill Compaines, 2006.
- [12] Paar, V., Fizika 3, udžbenik za treći razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb, 2009.
- [13] <http://www.fpz.unizg.hr/ztos/prsus/svjetlovodi.pdf>
- [14] <http://maturski.org/FIZIKA/Totalna-refleksija-novo.html>
- [15] <http://de.wikipedia.org/wiki/Endoskop>

ŽIVOTOPIS

Rođena sam 22. studenog 1991. godine u Saveznoj Republici Njemačkoj. Osnovnu i srednju školu sam završila u Osijeku. 2010. godine upisala sam se kao redovita studentica na preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku.