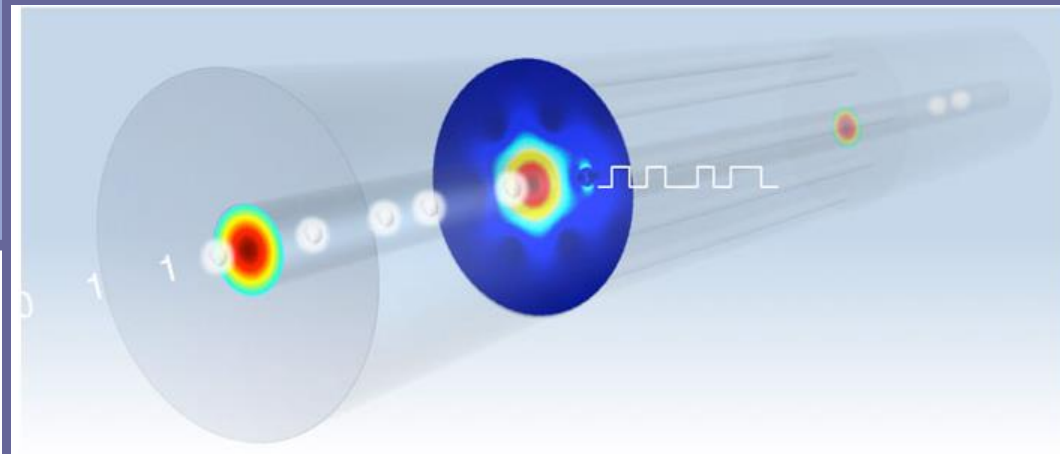


Kako zarobiti svetlost



Pogled na globalnu komunikaciju danas

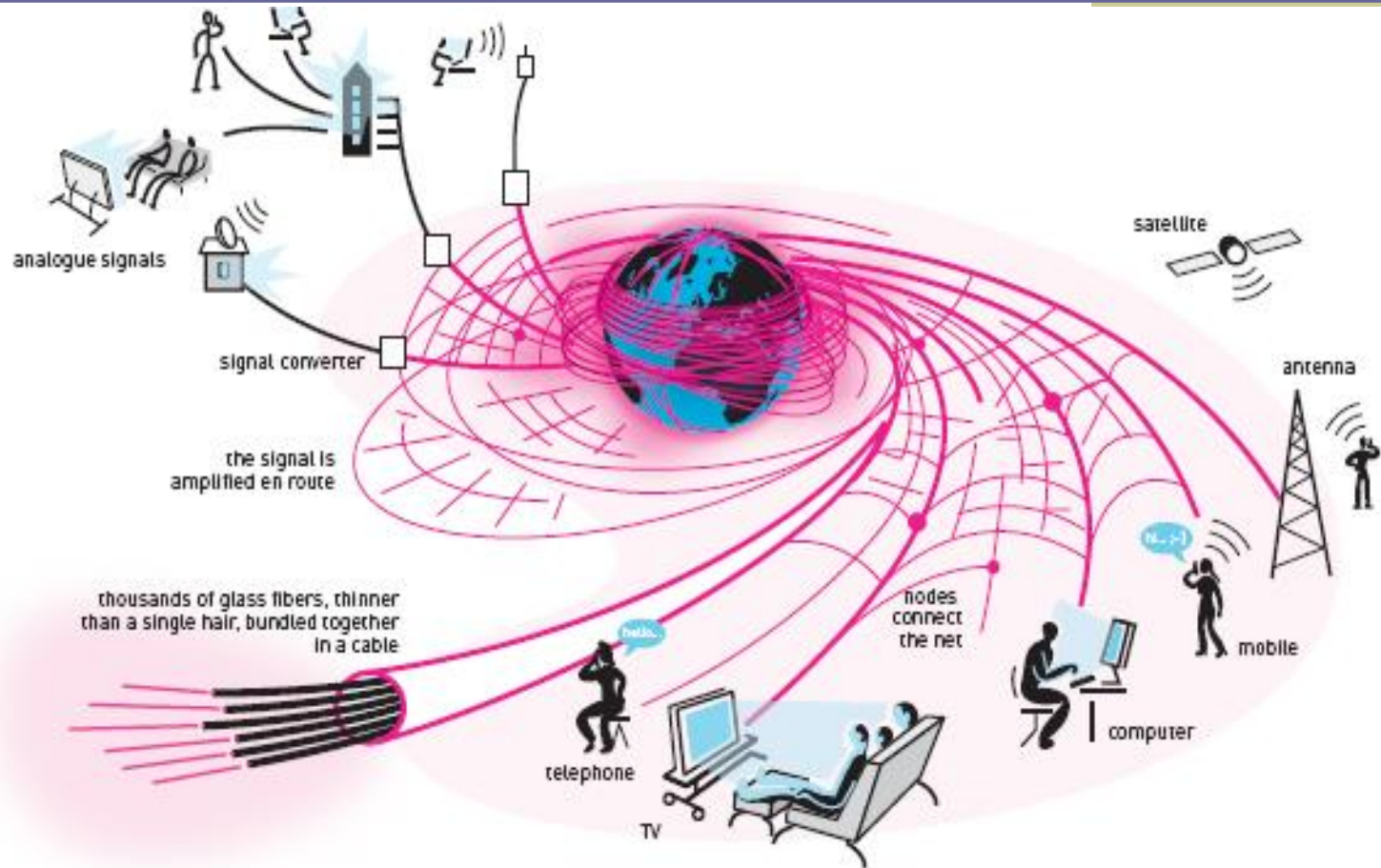
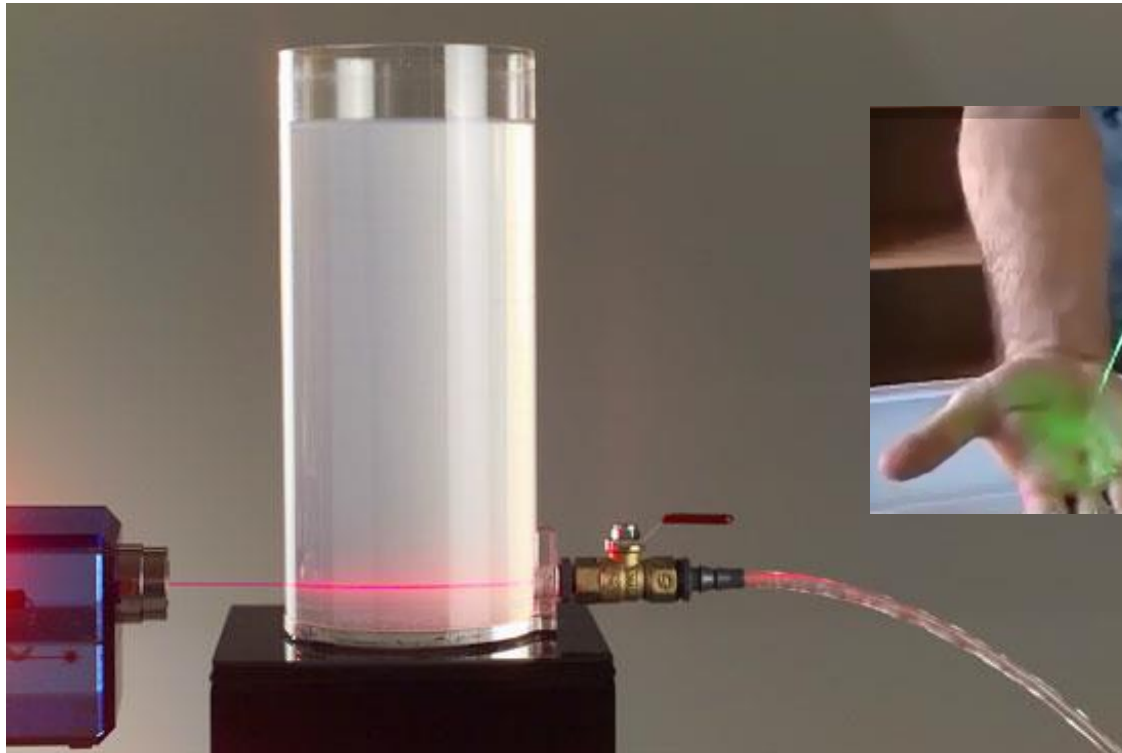


Figure 1. Optic fibers made of glass make up the circulatory system of our communication society. There is enough fiber to encircle the globe more than 25 000 times.

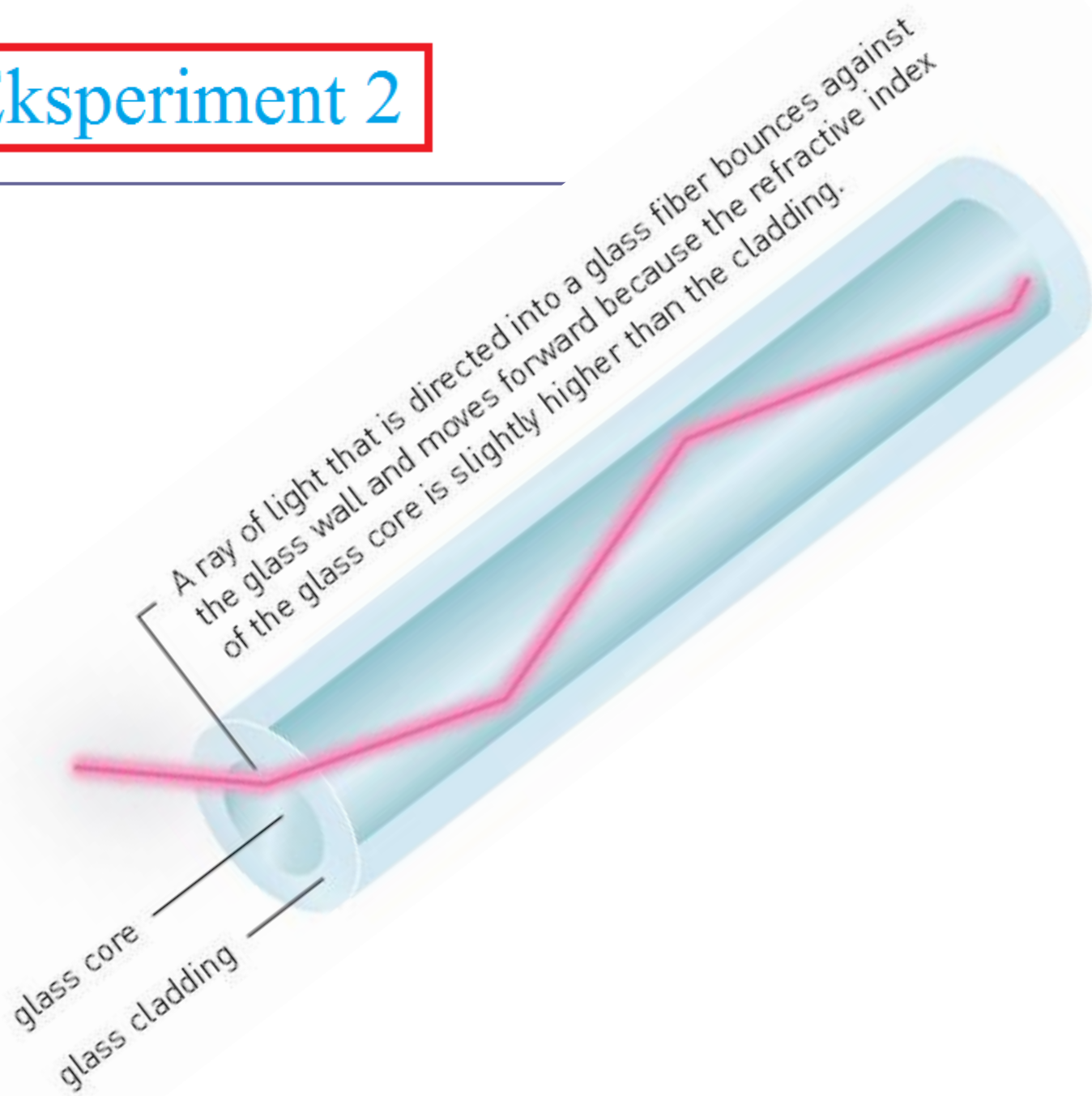
Umesto uvoda

Eksperiment 1



Check out bending the light part II.

Eksperiment 2



Kontrolisano prostiranje svetlosti

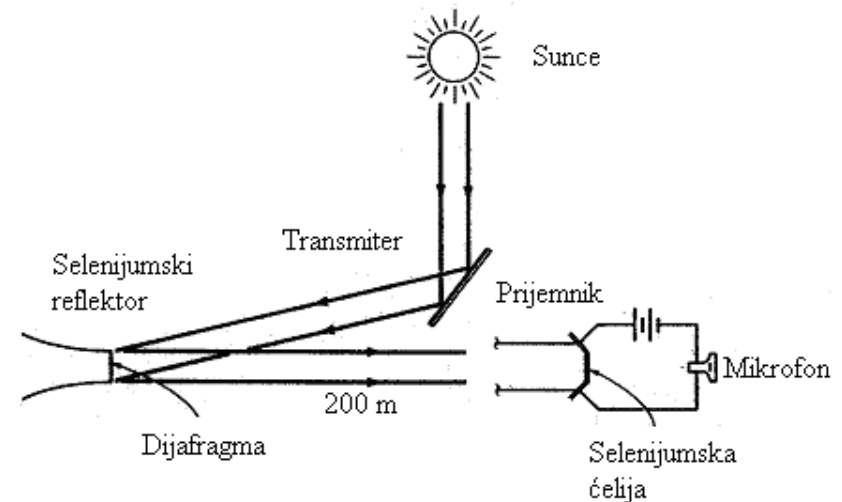
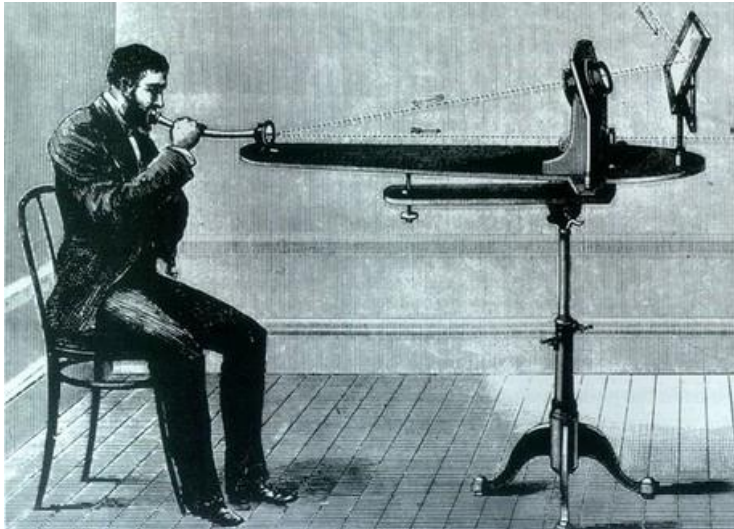
- Mnogo godina je trebalo da prođe da bi ljudi bili u mogućnosti da **kontrolišu svetlost** na takav način da pomoću nje mogu slati različite kodirane poruke ka više primalaca i to istovremeno!
 - Tehnologija je zahtevala brojne izume, kako velike, tako i manje, kako bi postavila temelje modernog informatičkog društva.
 - Tehnologija optičkih vlakana je zahtevala razvoj novih tehnologija izrade stakla i plastike.
 - Takođe je bio potreban i pouzdan izvor svetlosti, do čega se došlo razvojem poluprovodnika.
 - Konačno, bila je potrebna i ogromna mreža koja bi bila sastavljena još od tranzistora, pojačavača, skretnica, predajnika i prijemnika, kao i mnogih drugih elemenata koji bi radili simultano.

Istorijski razvoj ideje

- **1841:** Diskusija o vođenju svetlosti kroz razne sredine, po zadanom putu:
D. Colladon na Univerzitetu u Ženevi, demonstrirao je pojavu prostiranja svetlosti u vodenom mlazu, dok je u isto vreme, J. Babinet u Francuskoj napravio sličnu demonstraciju, otišao i čak dalje sa idejom da se svetlost može voditi kroz zakrivljenu staklenu cev.
- **1854:** Ideja o vođenju svetlosti se često pripisuje J. Tyndall-u, koji je demonstrirao ovu pojavu prostiranja svetlosti kroz mlaz vode na Royal Society in London.
- **1889:** Velika svetska izložba u Parizu slavila je stogodišnjicu Francuske buržoaske revolucije. Izvanredna igra svetlom koja je tada priređena bila je fontana koja je ispuštala mlazove vode obasjane raznim bojama. Izvor ove inspiracije bio je u ranijim pokušajima iz sredine XIX veka da se naprave svetlosni zraci koje bi nosila voda. Ovi pokušaji su pokazali da, kada se mlaz vode obasja Sunčevom svetlošću, svetlost putuje kroz njega i prati njegov oblik.

... nastavak ...

- **1880:** G. A. Bell je patentirao optički telefon, tzv. photophone: pojavila se ideja o mogućnosti prenosa informacije (glasa) posredstvom svetlosti.



**“I have heard articulate speech by sunlight!
I have heard a ray of the sun laugh and cough and sing!”**
—[Alexander Graham Bell](#), in a letter to his father.

Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, USA

...nastavak...

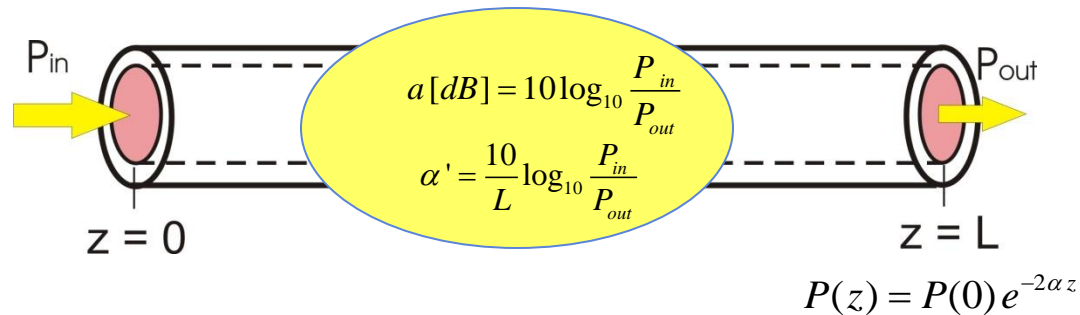
- **1930:** Prve ideje o primenama vođene svetlosti u golim staklenim vlaknima (*bare glass fibers*). Motivacija za ovo bile su: medicinske primene (gastroscope), odbrana (fleksibilni periskop, imaging scrambler) i prve ideje televizije.
- **1950:** Ideja o strukturi vlakna jezgro-omotač (*core-cladding*). U isto vreme H.H.Hopkins i N.S.Kapany na Imperial College, London, uspešno su napravili snop od nekoliko hiljada vlakana **dužine 75 cm** i demonstrirali dobre osobine ovog snopa za transmisiju slike [*Nature* **173, 39 (1954)**].
- **1960:** N.S. Kapany daje teoriju prostiranja svetlosti kroz vlakno; kasnije ova teorija je unapređena od strane E. Snitzer-a [*J. Opt.Soc. Am.* **51,491, (1961)**].
- **1960:** Otkriće lasera (Nobelova nagrada 1964: C.H. Towns, N.G. Basov i A.M. Prokhorov)... Ovo je bio novi podstrek naučnicima za istraživanja u oblastih optičkih komunikacija.

...

... **Početak intenzivnih istraživanja za najpogodnijim materijalima za vođenje svetlosti.**

... nastavak...

- **1960-te:** Optička vlakna su još uvek bila po strani zbog velikih gubitaka svetlosti u njima (1000 dB/km). Za prva vlakna gubitak je bio oko 1000 dB/km, što znači da je samo oko 1 % od ulazne svetlosti stiglo na drugi kraj vlakna dužine 20 m.



- Mnoge druge opcije za fokusiranje svetlosti, kao što su usmeravanje svetlosti kroz niz sočiva ili kroz gasne cevi sa gradijentom temperature su predlagane i testirane, ali bez većeg uspeha.
- Proučavanje raznih optičkih talasovoda: A.E Karbowski (STL, Harlow, UK) i J.C. Simon i E. Spitz (GSF, France) shvatili su da prostiranje pojedinih talasnih modova unutar talasovoda (na primer, tankih filmova) trebali bi biti od koristi za optičke komunikacije, smanjujući disperziju i gubitke pri prostiranju svetlosti.

...nastavak...

- Na Tohoku University, Japan, (J.-I. Nishizawa, I. Sasaki) istovremeno i u Bell Laboratories, USA, (S.A. Miller) prvi put je predloženo vlakno sa promenljivim indeksom prelamanja, tzv. gradijentno vlakno (*graded-index fibers*). Gradijent indeksa prelamnaja samnuje disperziju svetlosti u poređenju sa “*step-index*” vlaknima.
- Ovo su bila prva generacija vlakana, i radila su na 870 nm. Međutim, još uvek nije bilo zadovoljavajćeg rešenja primarnog zadatka kako smanjiti ukupne gubitke svetlosti u vlaknu.

Prva istraživanja optičkih vlakana u STL

(The Standard Telecommunication Laboratories, Harlow, UK)

- **Charles K. Kao**, pod rukovodstvom Karbowiak-a, počinje da se bavi istraživanjima na polju optičkih komunikacija. Ubrzo postaje vođa jedne male istraživačke grupe, koja je na početku imala samo još jednog člana, G.A. Hockham-a.
- Zajedno, Kao i Hockham, su detaljno ispitivali fundamentalne osobine optičkih vlakana u vezi sa optičkim komunikacijama. Pored fizičkog aspekta optičkih talasovoda oni takođe pažnju posvećuju i izučavanju osobina gradivnog materijala sa aspekta uticaja na prostiranje svetlosti u njima.
- Njihove zaključke prezentovao je C.K. Kao u Londonu početkom 1966. godine i publikovao [**C.K. Kao, G.A. Hockham**, "*Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies*", **Proc. IEE, Vol. 113, No.7, July 1966.**]

The masters of light

*The 2009 Nobel Prize in Physics honors three scientists, who have had important roles in shaping modern information technology, with one half to **Charles Kuen Kao** and with **Willard Sterling Boyle** and **George Elwood Smith** sharing the other half. Kao's discoveries have paved the way for optical fiber technology, which today is used for almost all telephony and data communication. Boyle and Smith have invented a digital image sensor – CCD, or charge-coupled device – which today has become an electronic eye in almost all areas of photography.*

"for groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication"

"for the invention of an imaging semiconductor circuit – the CCD sensor"



Optička vlakna danas

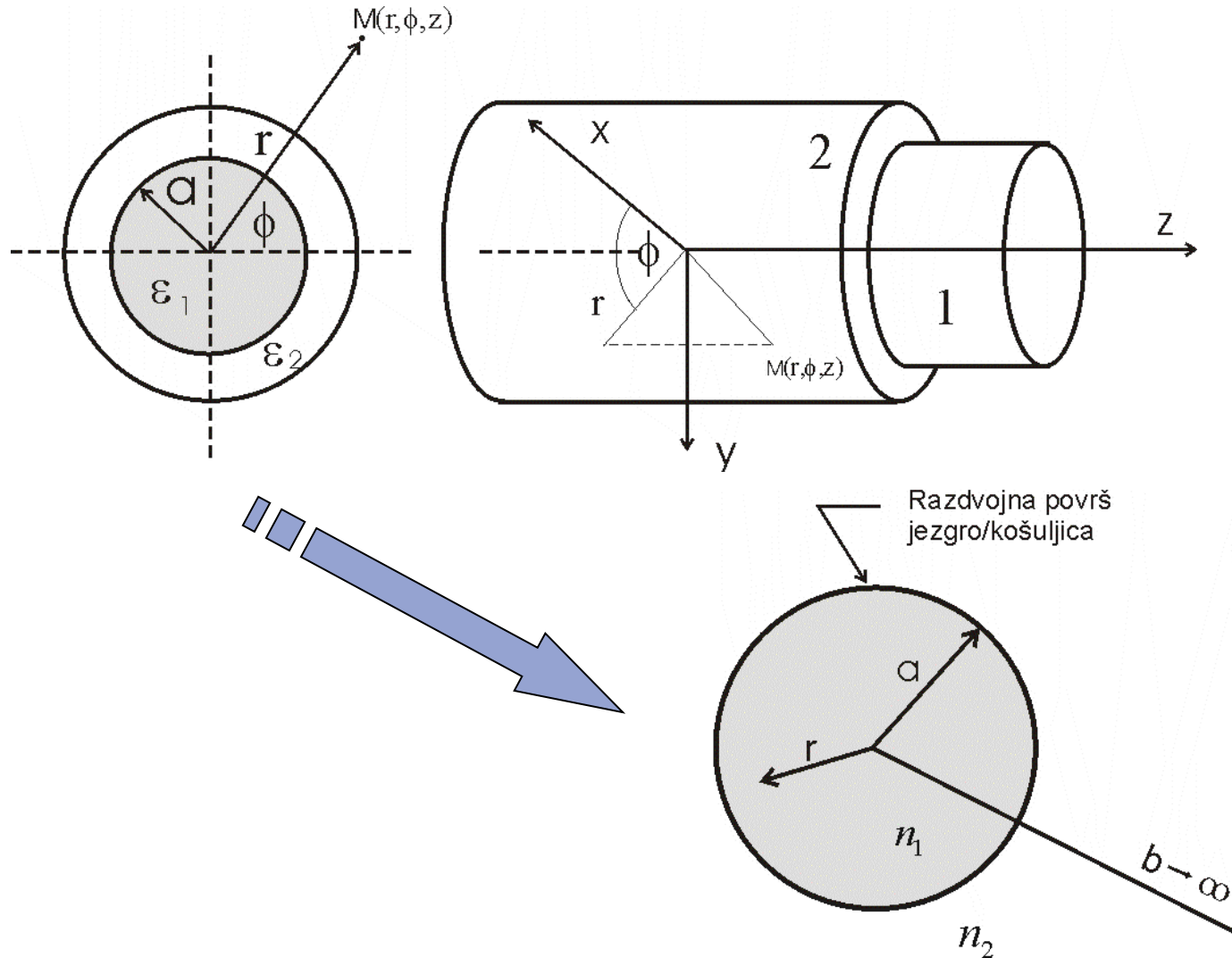
- Trebalo je poprilično vremena da bi se Zemlja povezala optičkim vlaknima.
- **1988.** godine, prvi optički kabl je provučen ispod dna Atlantskog okeana, između Amerike i Evrope. Bio je 6000 kilometara dugačak.
- Danas, telefonski signali i podaci putuju mrežom optičkih staklenih vlakana čija ukupna dužina iznosi oko **1 milijardu kilometara**.
- Ako bi se ova dužina obmotala oko naše planete, načinila bi oko 250 hiljada namotaja, a treba imati u vidu i da se količina optičkih vlakana koja stupaju u upotrebu povećava iz minuta u minut..

WORLDWIDE UNDERSEA FIBEROPTIC ROUTES PLANNED AND IN PLACE



Optičko vlakno

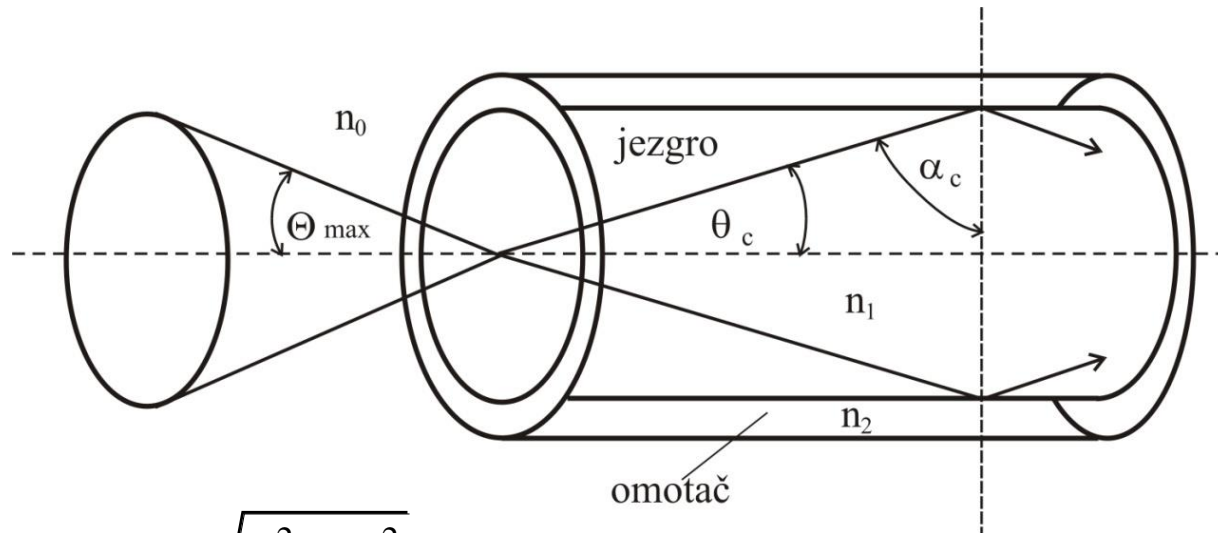
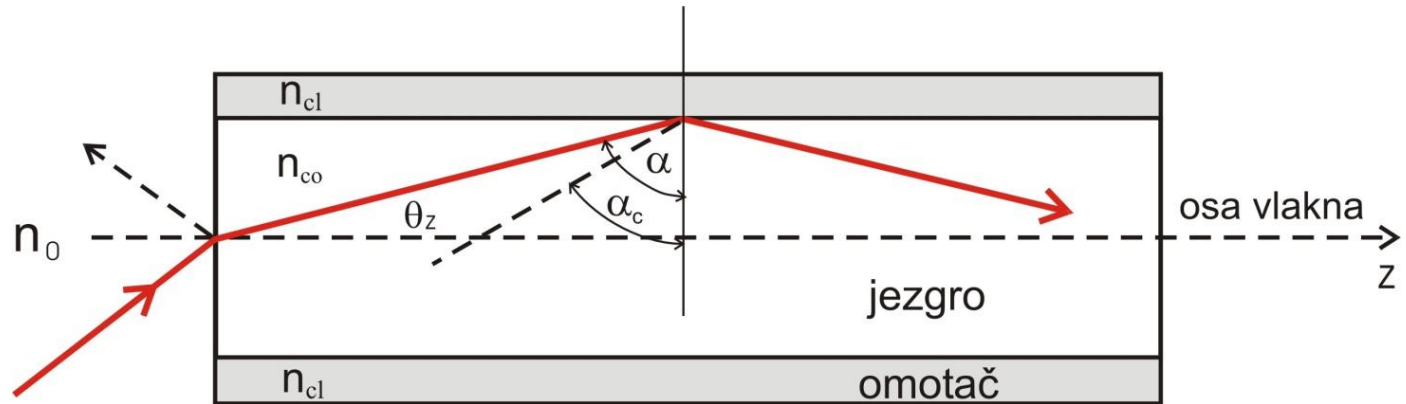
Veličine, primenjeni koordinatni sistem i **MODEL** koji se koristi u analizi



Fizički princip

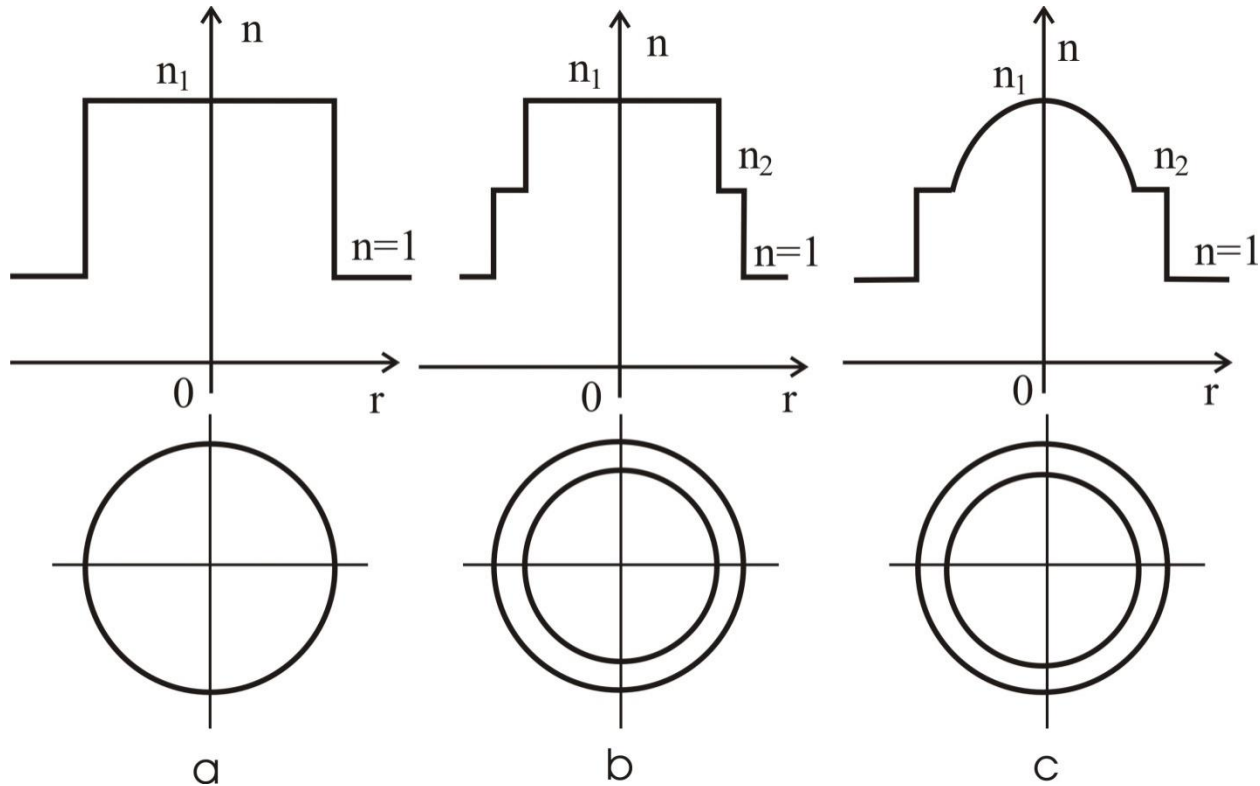
$$\alpha_c = \sin^{-1}(n_{cl} / n_{co})$$

$$\theta_c = \cos^{-1}(n_{cl} / n_{co})$$



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

Tipovi optičkih vlakana: a) i b) talasovodi sa stepenastim profilom indeksa prelamanja (koji se još zovu i homogeni), jednoslojni i dvoslojni, respektivno; c) gradijentni talasovod bez izmene znaka gradijenta.



$$V = (2\pi a / \lambda) \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

dimenzije – staklena i plastična vlakna

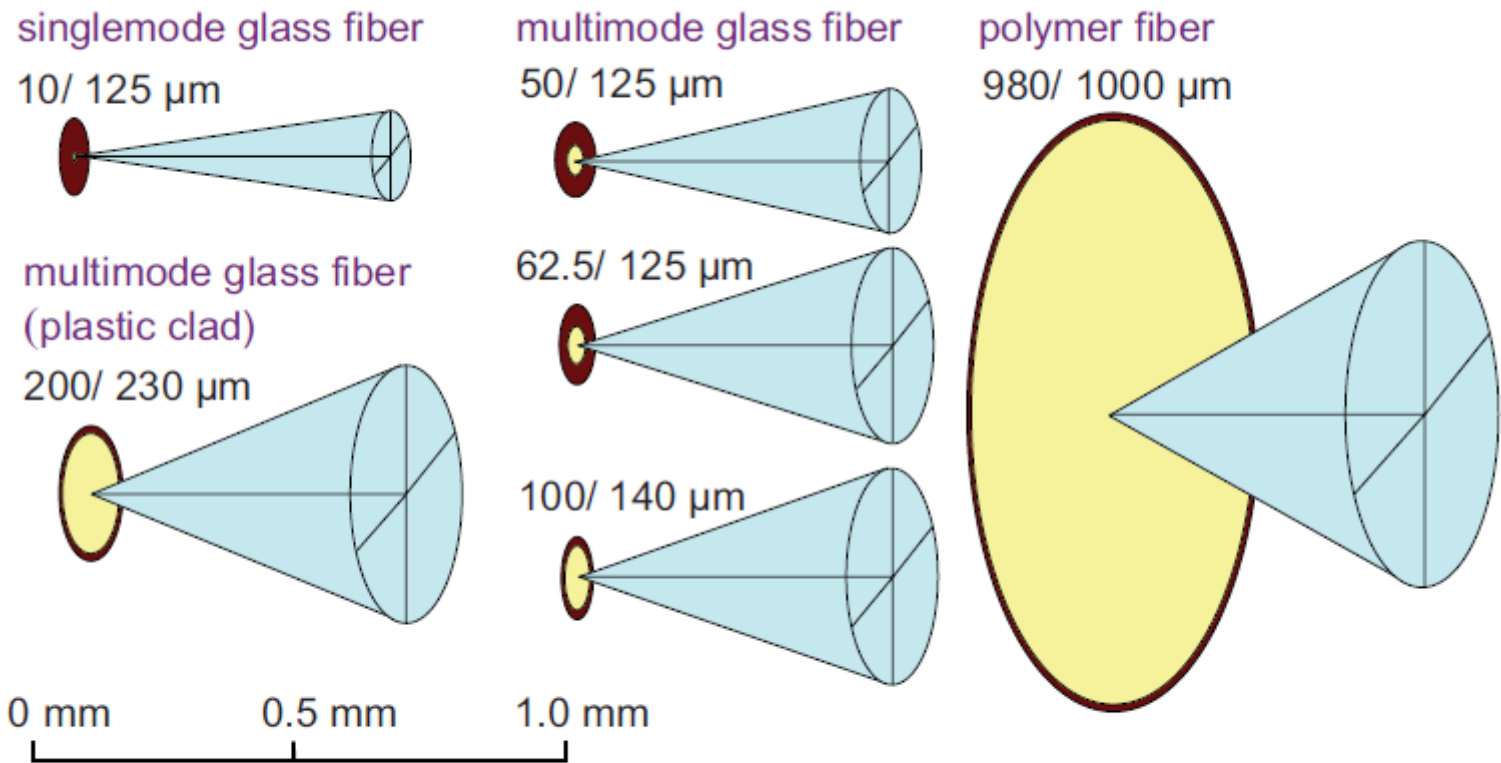


Fig. 2.5: Aperture angle and core diameter of glass fibers and polymer fibers

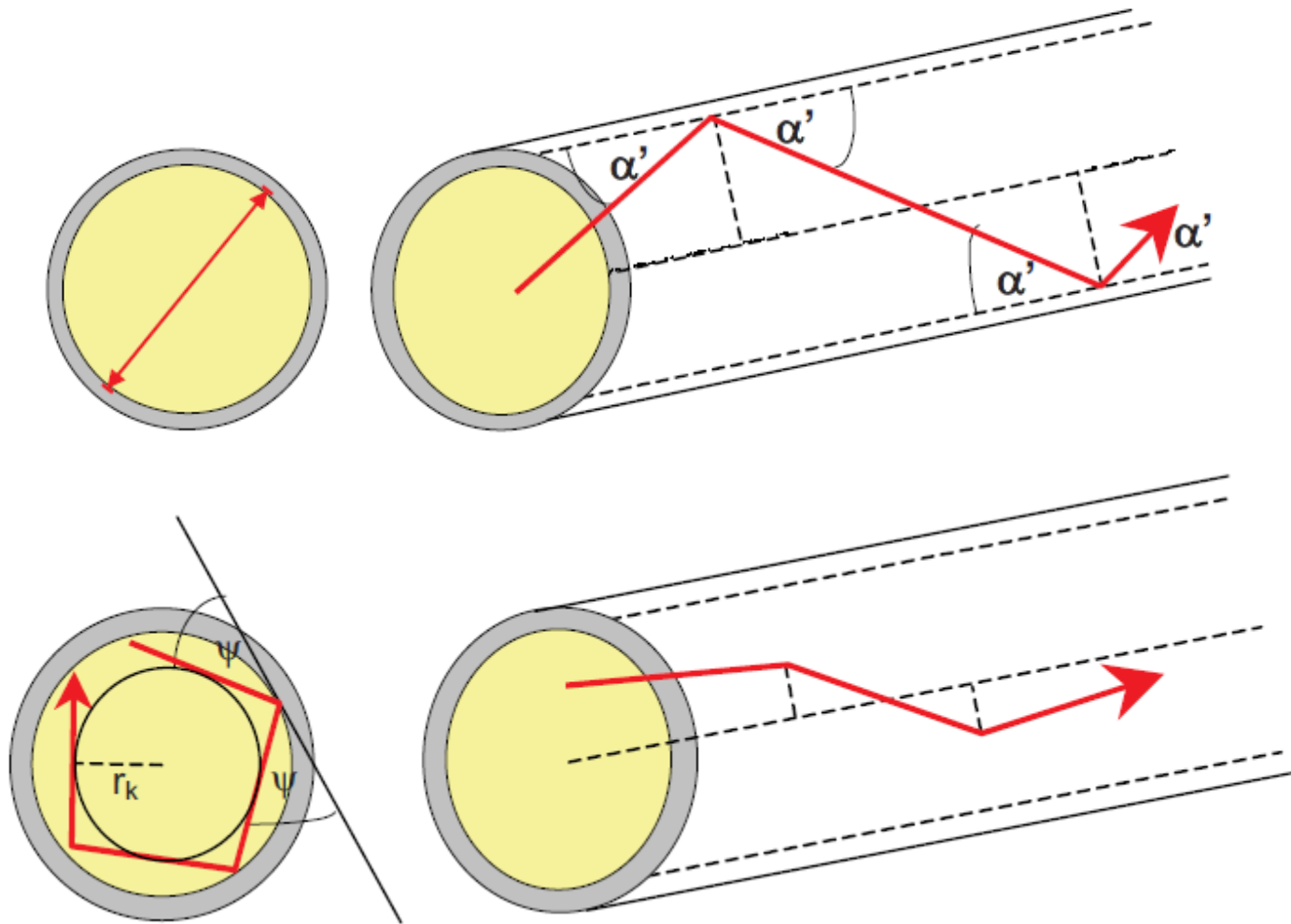
Metode za analizu optičkih vlakana

- geometrijska optika – prati se istorija zrak po zrak (*ray tracing*)
- elektromagnetni pristup (talasna teorija) – primena osnovnih zakona elektrodinamike rešavanjem Maxwell-ovih jednačina
- model kontinuma - rešavanju Gloge-ove jednačine

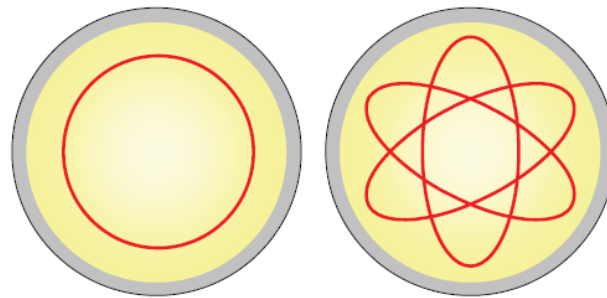
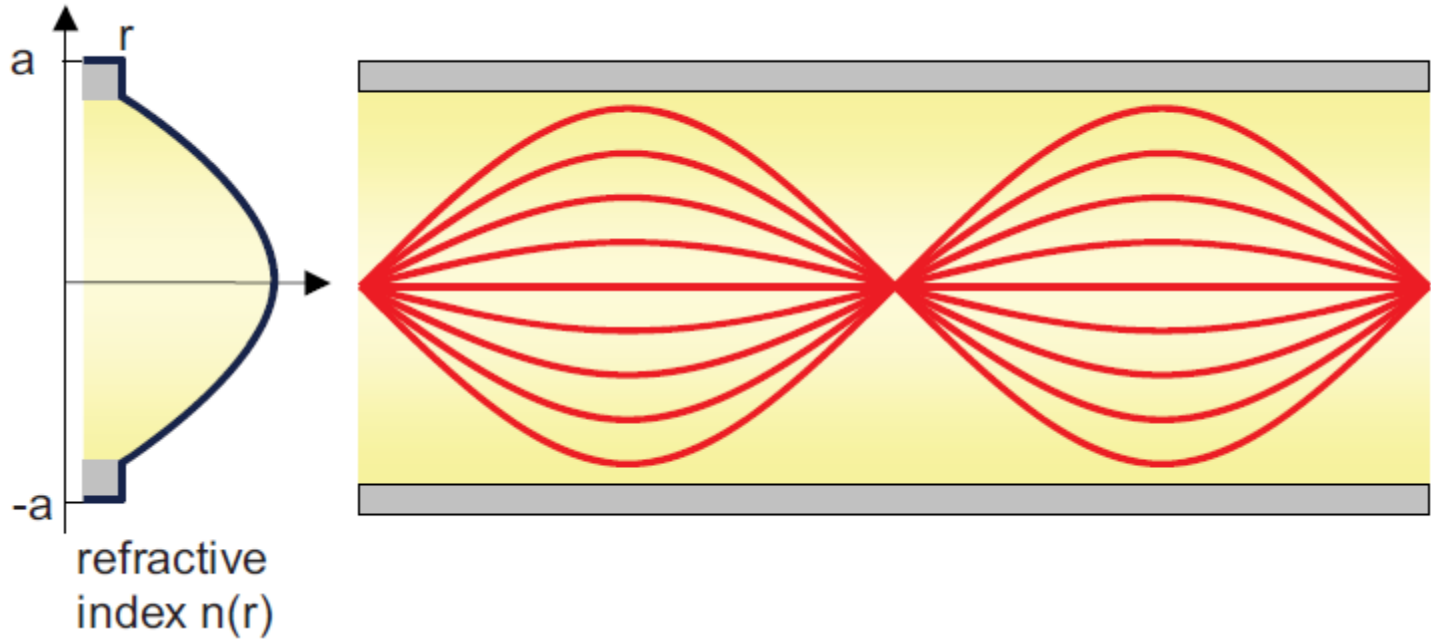
$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\alpha(\theta)P + (\Delta\theta)^2 \frac{1}{\theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left[\theta d(\theta) \frac{\partial P}{\partial \theta} \right]$$

$$P = P(z, \theta)$$

trajektorija svetlosti kroz vlakno sa stepenastim indeksom prelamanja



trajektorija svetlosti kroz vlakno sa gradijentnim indeksom prelamanja

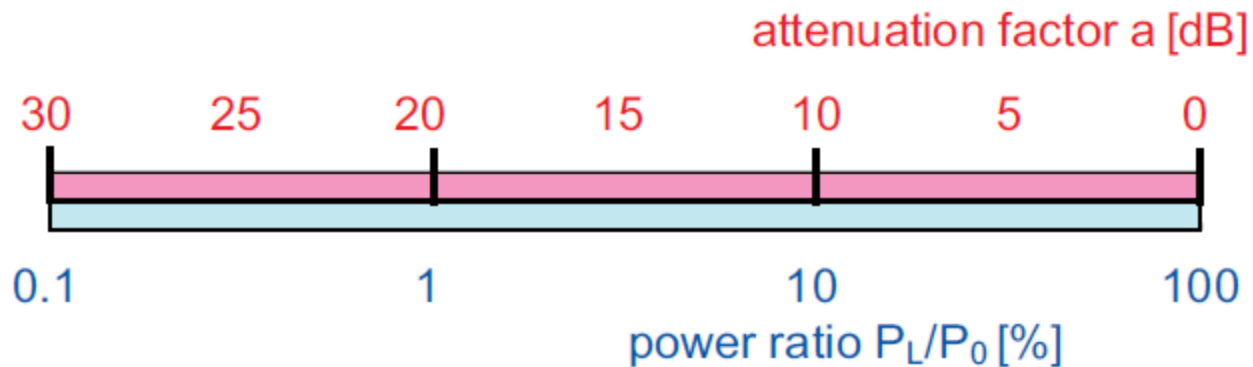


Slabljenje svetlosti u optičkim vlaknima

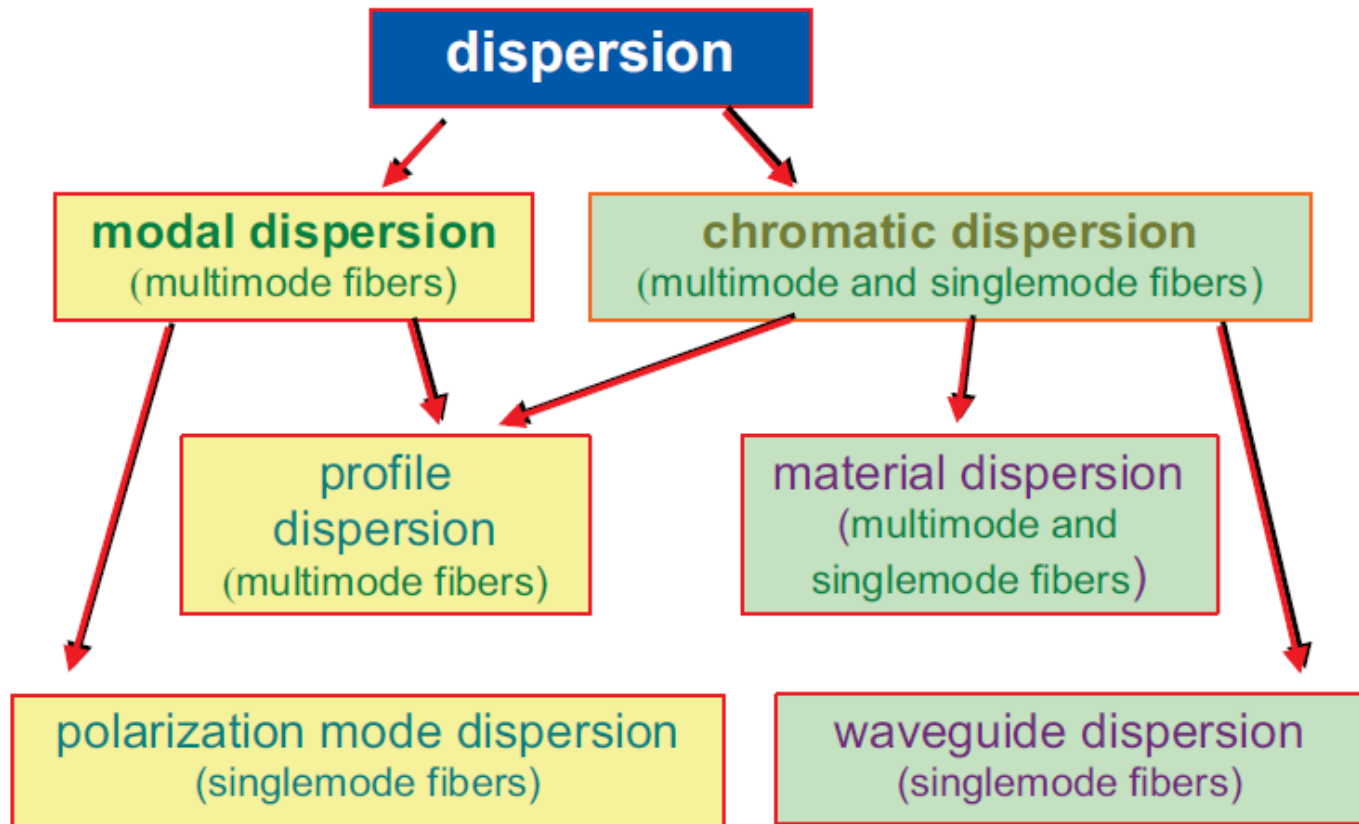


$$P_L = P_0 \cdot e^{-\alpha' \cdot L}$$

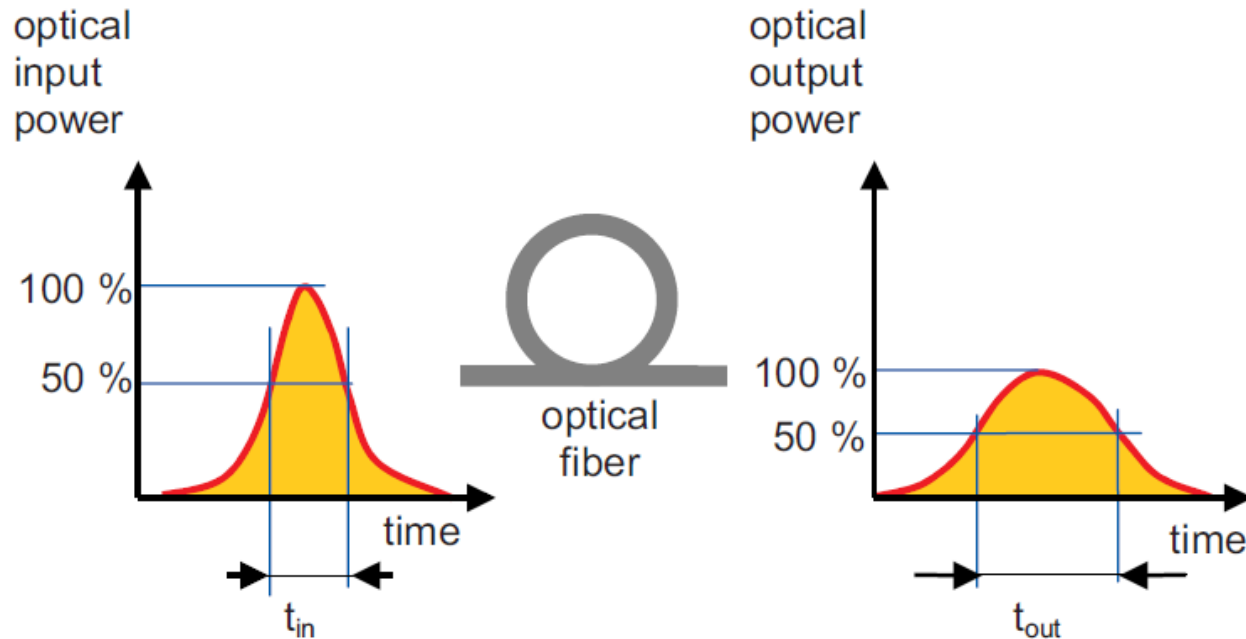
$$\alpha = \frac{10}{L} \cdot \log \frac{P_0}{P_L} = 4,343 \cdot \alpha'$$



Disperzija svetlosti u optičkom vlaknu



usled disperzije

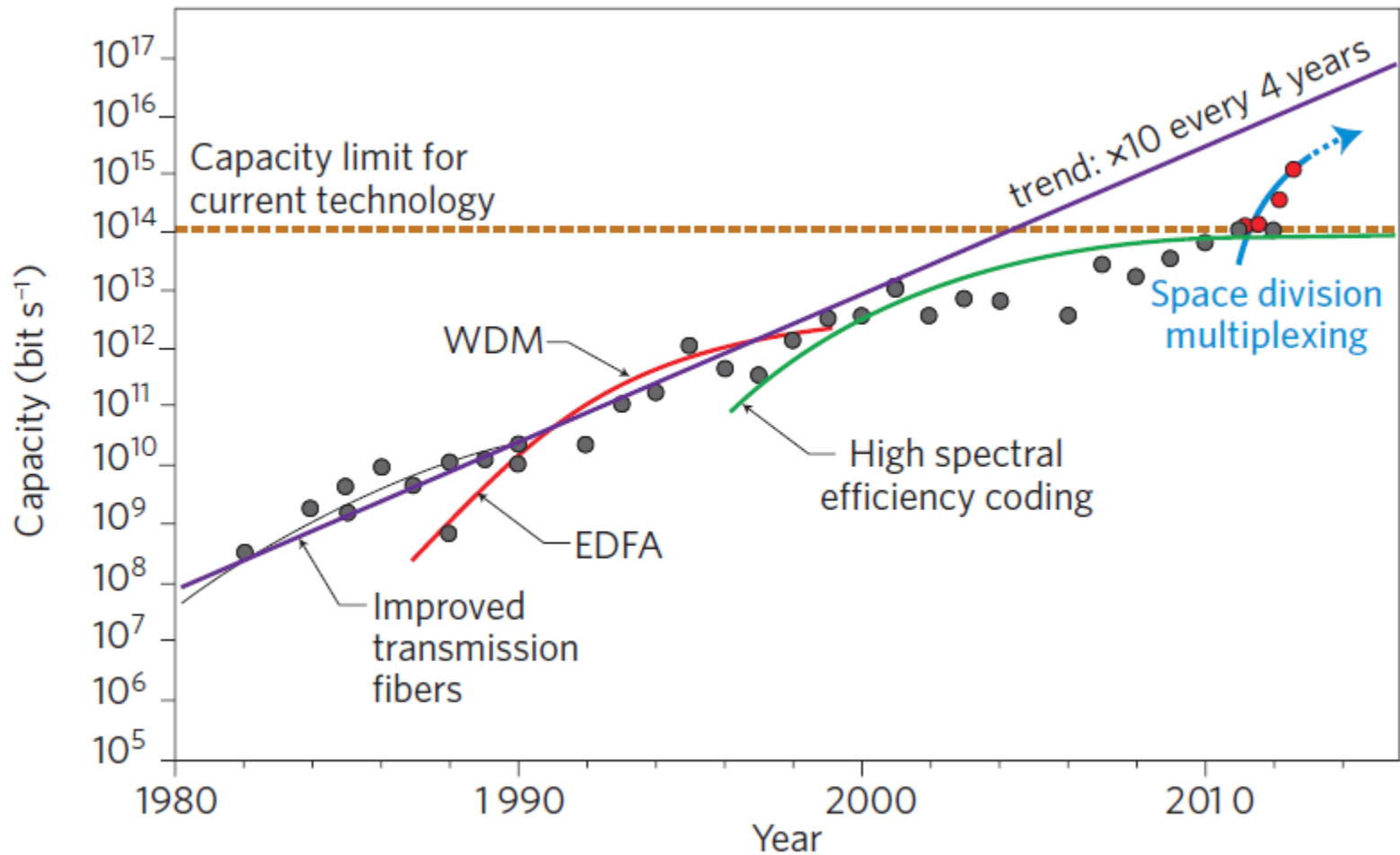


$$\Delta t = \sqrt{t_{out}^2 - t_{in}^2}$$

$$B \cdot L \approx \frac{0.44}{\Delta t} \cdot L$$

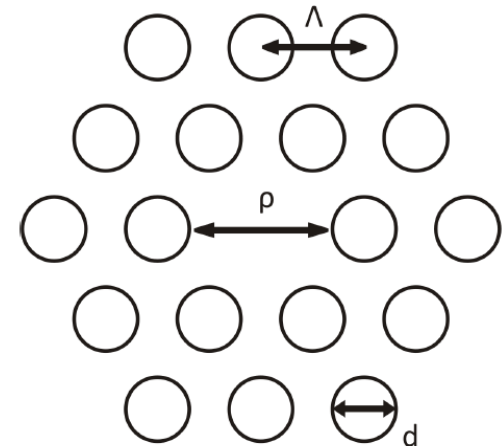
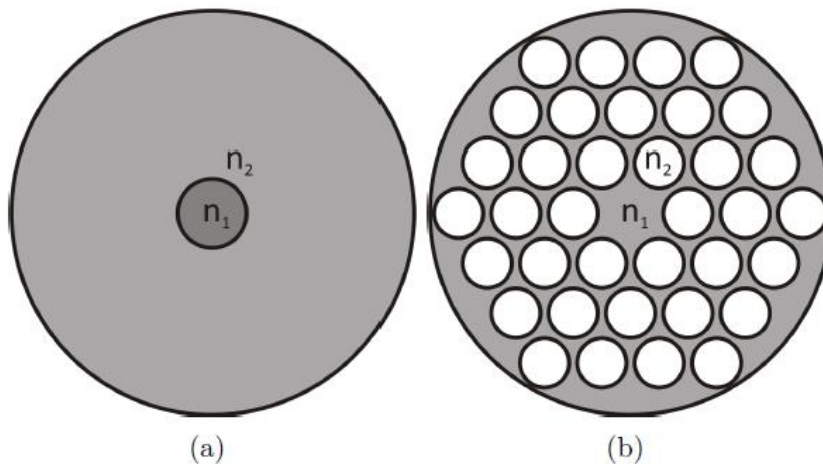
Figure 1 | The evolution of transmission capacity in optical fibres as evidenced by state-of-the-art laboratory transmission demonstrations.

NATURE PHOTONICS | VOL 7 | MAY 2013 | www.nature.com/naturephotonics



Novi način vođenja svetlosti

- 1990-tih godina pojavila se ideja o optičkim vlaknima sa periodičnom promenom indeksa prelamanja u dve dimenzije – ova vlakna su poznata kao mikrostrukturirana, šuplja ili fotonsko kristalna optička vlakna.
 - (*Photonic Crystal Fibers (PCFs) or “holey” or microstructured fibers*)



Photonic crystal fibres

Jonathan C. Knight

NATURE | VOL 424 | 14 AUGUST 2003 | www.nature.com/nature

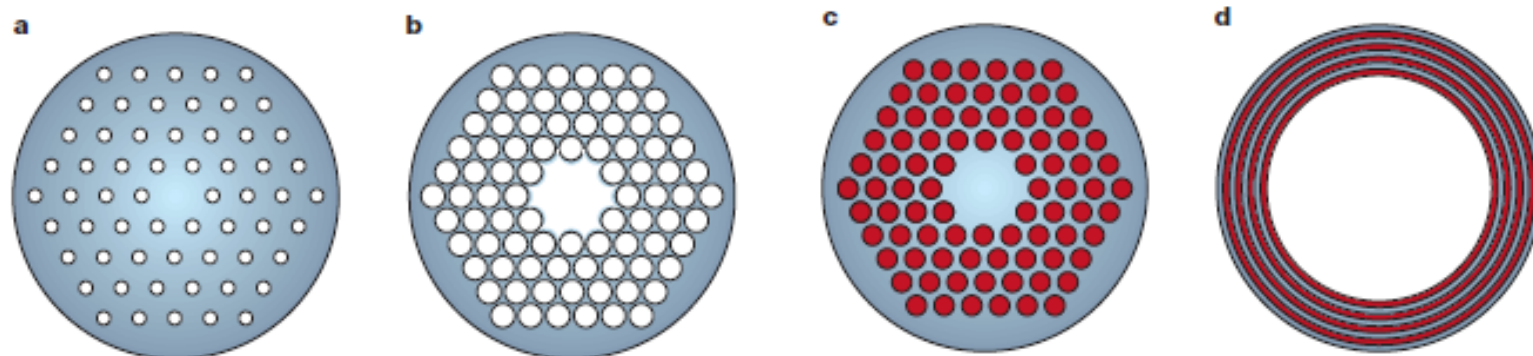


Figure 3 Different designs of PCF waveguide. **a** shows a single-mode fibre with a pure silica core surrounded by a reduced-index photonic crystal cladding material. The guidance is by modified total internal reflection. **b** is an air-guiding fibre in which light is confined to a hollow core by the bandgap of the 2D air-glass photonic crystal cladding. In **c**, the light is confined to a low-index region by a photonic bandgap, but the core is made of pure silica while the holes in the cladding are filled with a high-index liquid. **d** shows a hollow cylindrical multilayer fibre with an all-solid cladding. In these pictures, white represents air, blue represents a low-index solid such as silica and red represents a high-index material.

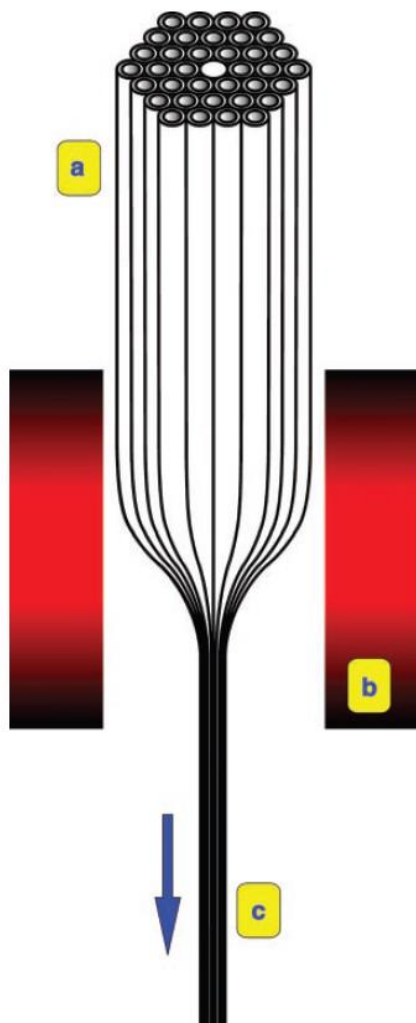


Fig. 1. A stack of glass tubes and rods (a) is constructed as a macroscopic “preform” with the required photonic crystal structure. It is then fused together and drawn down to fiber (c) in two stages using a standard fiber drawing tower. To soften the silica glass, the furnace (b) runs at 1800° to 2000°C.

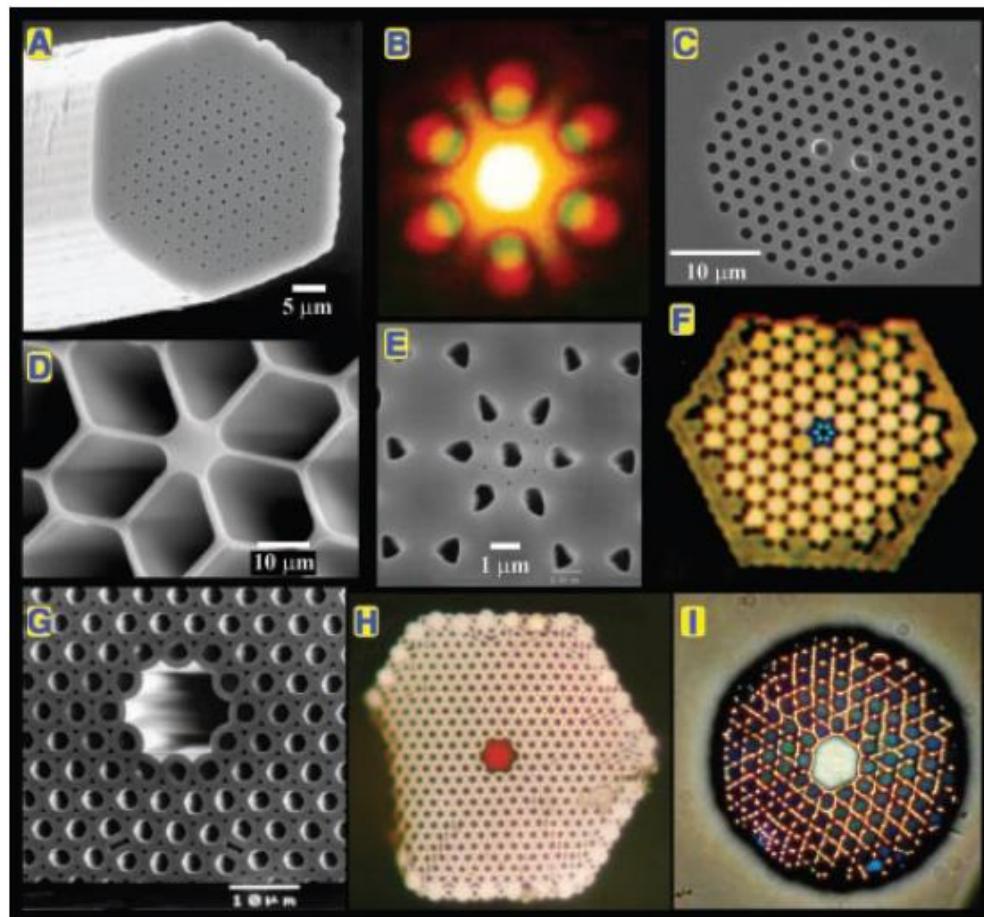
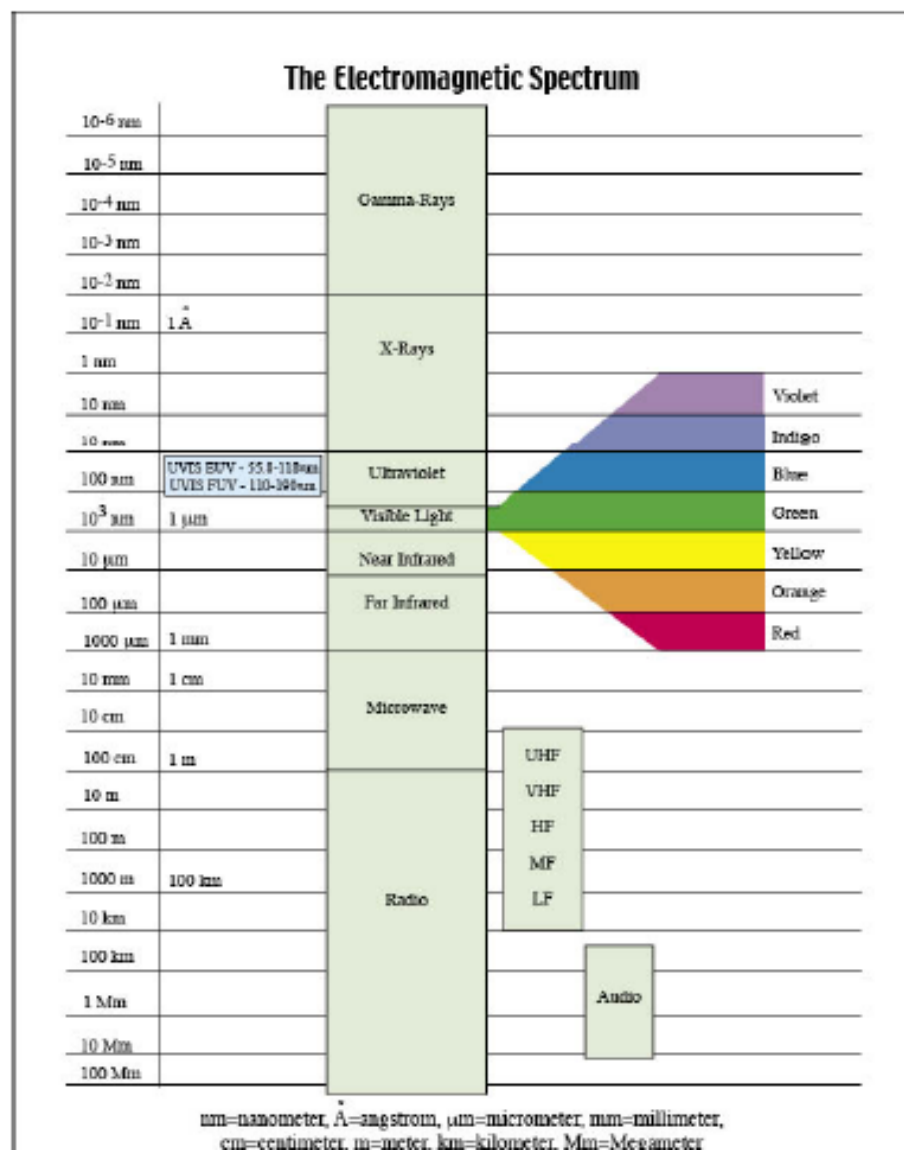


Fig. 3. An assortment of optical (OM) and scanning electron (SEM) micrographs of PCF structures. (A) SEM of an endlessly single-mode solid core PCF. (B) Far-field optical pattern produced by (A) when excited by red and green laser light. (C) SEM of a recent birefringent PCF. (D) SEM of a small (800 nm) core PCF with ultrahigh nonlinearity and a zero chromatic dispersion at 560-nm wavelength. (E) SEM of the first photonic band gap PCF, its core formed by an additional air hole in a graphite lattice of air holes. (F) Near-field OM of the six-leaved blue mode that appears when (E) is excited by white light. (G) SEM of a hollow-core photonic band gap fiber. (H) Near-field OM of a red mode in hollow-core PCF (white light is launched into the core). (I) OM of a hollow-core PCF with a Kagomé cladding lattice, guiding white light.

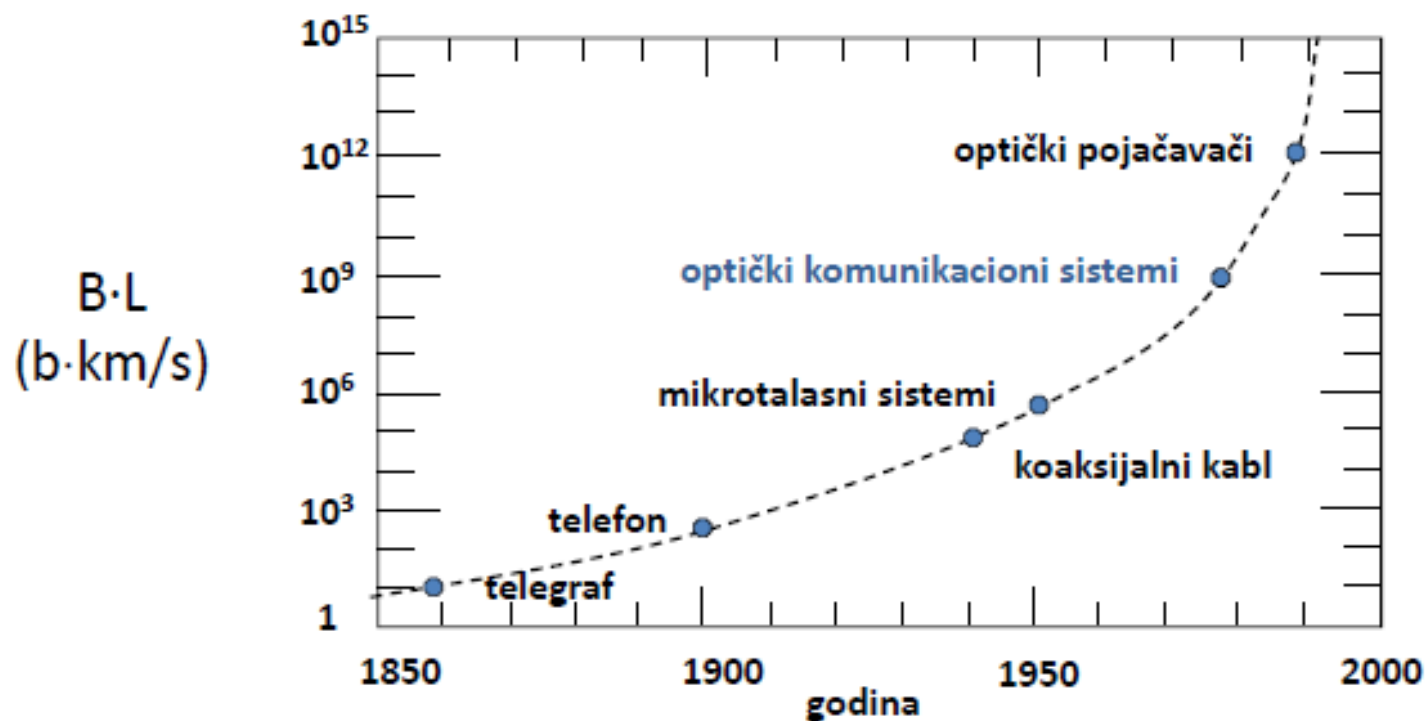
Optički komunikacioni sistemi

- Komunikacioni sistemi prenose informacije s jednog mesta na drugo, bez obzira da li je rastojanje nekoliko kilometara ili transokeansko rastojanje.
- Nosilac informacije je elektromagnetski talas čija frekvencija varira od nekoliko megaherca (MHz) do nekoliko stotina teraherca (100THz).

Nosilac: \longrightarrow
 elektromagnetno zračenje



Uobičajeno korišćena veličina za karakterizaciju komunikacione sisteme je proizvod dužine i bitskog protoka **B·L**.



Evolucija optičkih komunikacionih sistema

- Prva generacija optičkih komunikacionih sistema, puštena je u komercijalnu upotrebu 1980. godine, radila je na talasnoj dužini $\lambda=0.8 \mu\text{m}$ sa protokom od 45 Mb/s i dometom do 10 km.
- Druga generacija sistema, radi na talasnoj dužini $\lambda=1.3 \mu\text{m}$ pri protoku do 1.7 Gb/s i sa dometom oko 50 km. Puštena je u komercijalnu upotrebu 1987. godine.
 - Gubici na $1.3 \mu\text{m}$ su 0.5 dB/km. Na $1.55 \mu\text{m}$ oni iznose 0.2 dB/km, ali je ovde velika disperzija.
 - Problem disperzije je rešen korišćenjem vlakna sa pomećenom disperzijom i ograničavanjem spektra signala iz lasera na samo jedan longitudinalni mod.

Evolucija optičkih komunikacionih sistema

- 1990. godine pojavljuje se **treća generacija sistema** na 1.55 μm , protoka 2.5 Gb/s i dometa preko 100 km.
 - Mana treće generacije je u tome što je signal obnavljan periodično, svakih 60 - 70 km uz pomoć repetitora, koji su konvertovali optički signal u električni i obrnuto i time ograničavali brzinu i povećavali cenu celog sistema.
- **Četvrta generacija optičkih sistema** koristi optičke pojačavače i tehniku multipleksiranja po talasnim dužinama (WDM – *wavelength – division multiplexing*) čime se protok značajno povećava.
 - Takođe, iskorišćena su erbijum (Er) dopirana vlakna čime su smanjeni gubici.
 - Mogućnost prenosa podataka preko 21 000 km brzinom 2.5 Gb/s, odnosno 14 300 km brzinom 5 Gb/s korišćenjem kružne konfiguracije.
 - Ovim rezultatom se došlo na ideju interkontinentalne komunikacije.

Evolucija optičkih komunikacionih sistema

- Naglasak četvrte generacije je bio na povećanju kapaciteta sistema prenosom više kanala preko WDM tehnike.
- Jedna demonstracija je pokazala prenos 20 kanala po 5 Gb/s preko 9 100 km što ukupno daje protok od 100 Gb/s i proizvod B·L od 910 (Tb/s)·km.

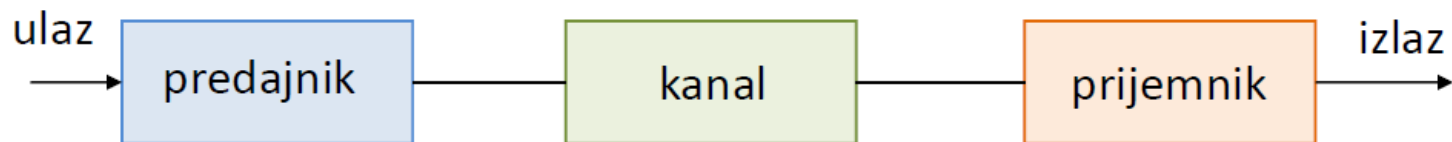


Evolucija optičkih komunikacionih sistema

- Peta generacija fiber - optičkih komunikacionih sistema se najviše bavila problemom disperzije u vlaknu.
- Novi koncept su optički solitoni, tj. optički impulsi koji zadržavaju svoju formu pri propagaciji tako što se kompenzuju uticaj disperzije kroz nelinearne efekte vlakna.
- Do 1994. godine solitoni su omogućavali prenos preko 35 000 km na 10 Gb/s protoka i preko 24 000 km na 15 Gb/s protoka.
- Značajan je i eksperiment korišćenja solitona za prenos signala na razdaljinu od 9 400 km pri protoku od 70 Gb/s, multipleksirajući sedam kanala na 10 Gb/s.

Optički komunikacioni sistemi

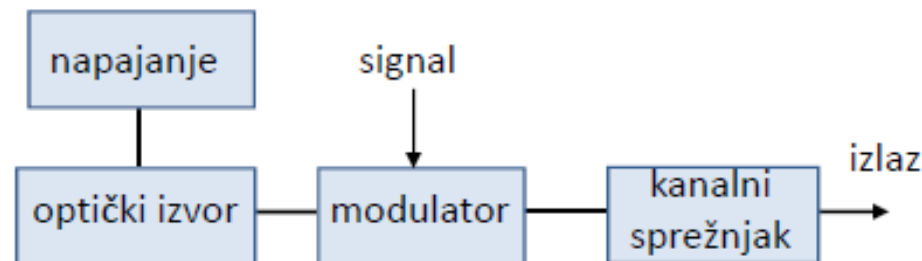
- Komponente fiber - optičkog komunikacionog sistema su:
 - *optičko vlakno*,
 - *optički predajnik*,
 - *optički prijemnik*
- **Optičko vlakno:**
 - Većina optičkih komunikacionih sistema koriste optička vlakna kao kanal čime se omogućava prenos sa vrlo malim **gubicima** snage korisnog signala. Pored gubitaka, važna odlika vlakna jeste **disperzija**.



Optički komunikacioni sistemi

Optički predajnik:

- Zadatak optičkog predajnika jeste konverzija električnog signala u optičku formu i transmisija optičkog signala u optičko vlakno.



- Poluprovodnički laseri i/ili LED diode se koriste kao optički izvor.
- Optički signal se moduliše direktno ili pomoću modulatora.
- Sprežnjak (coupler) je najčešće mikrosočivo kojim optički signal pobuđuje vlakno.

Optički komunikacioni sistemi

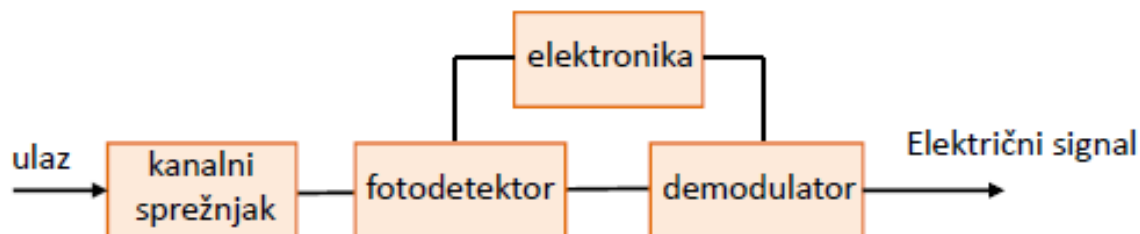
- Snaga signala kojim se pobuđuje vlakno, izražava se u dBm, po formuli:

$$snaga \text{ (dBm)} = 10 \log_{10} \left(\frac{snaga}{1mW} \right)$$

- Za LED diode tipične snage su manje od -10 dBm, a za poluprovodničke lasere vrednost je oko 10 dBm.
- Kako su LED diode takođe limitirane u pogledu mogućnosti modulacije, najčešće korišćeni optički izvori su poluprovodnički laseri.

Optički komunikacioni sistemi


- **Optički prijemnik** konvertuje primljeni optički signal na kraju vlakna u originalni električni signal.



- Sprežnjak fokusira i izdvaja optički signal na fotodetektor.
- Fotodetektor konvertuje optički signal u električni.
- Struktura demodulatora zavisi od modulacionog formata signala.
- Često, primljeni signal je u formi impulsa i on se direktno konvertuje u električnu struju. Ova tehnika je poznatija kao **IM/DD** (*intensity modulation with direct detection*) u kome predajnik koristi intenzitetsku modulaciju, a na prijemu se vrši direktna detekcija optičkog signala.

- **Nobel Prize in Physics awarded to light pioneers, *Nature* 461, 707 (2009)**
-Fibre optics will also have a pivotal role in the world's largest science experiment, the Large Hadron Collider (LHC) at CERN, Europe's particle-physics centre near Geneva, Switzerland. The LHC's largest detectors create around a million gigabytes of raw data every second. The cables then shepherd the data to nearby servers and on to thousands of scientists in 33 countries through an ultrafast computer grid. **"The whole infrastructure is based on optical fibre," says Ian Bird, the grid's project leader. "There's no way that our data rates could be sustained without it."**

Why Physics?



- Physics is interesting
- Physics is useful.
- Physics opens the door to many career options.
- Physics is challenging.
- Physics Will Help You Get into College, Get a Job, and **Find Love !** (You'll just have to trust us on that last one).

<http://www.pmf.kg.ac.rs/forg/>

University of Kragujevac
Faculty of Science
Department of Physics

Fiber Optics Research Group

[Home](#)

[Research](#)

[People](#)

[Publications](#)

[Links](#)

[Contact](#)



Hvala na pažnji

Welcome to the Fiber Optics Research Group
homepage

[Home](#) | [Research](#) | [People](#) | [Publications](#) | [Links](#) | [Contact](#)

www.pmf.kg.ac.rs

Nobel Prize in Physics awarded to light pioneers, *Nature* 461, 707 (2009)



Willard

Boyle and George Smith developed charge-coupled devices. Alcatel-Lucent/Bell Labs

...The detectors also made space-based astronomy a reality, says Matt Mountain, director of the Space Telescope Science Institute in Baltimore, Maryland, which coordinates science for the Hubble Space Telescope. "It made telescopes like the Hubble possible," he says. "You could now put large electronic detectors in space that could beam down digital pictures of some of the faintest objects human beings have ever seen."