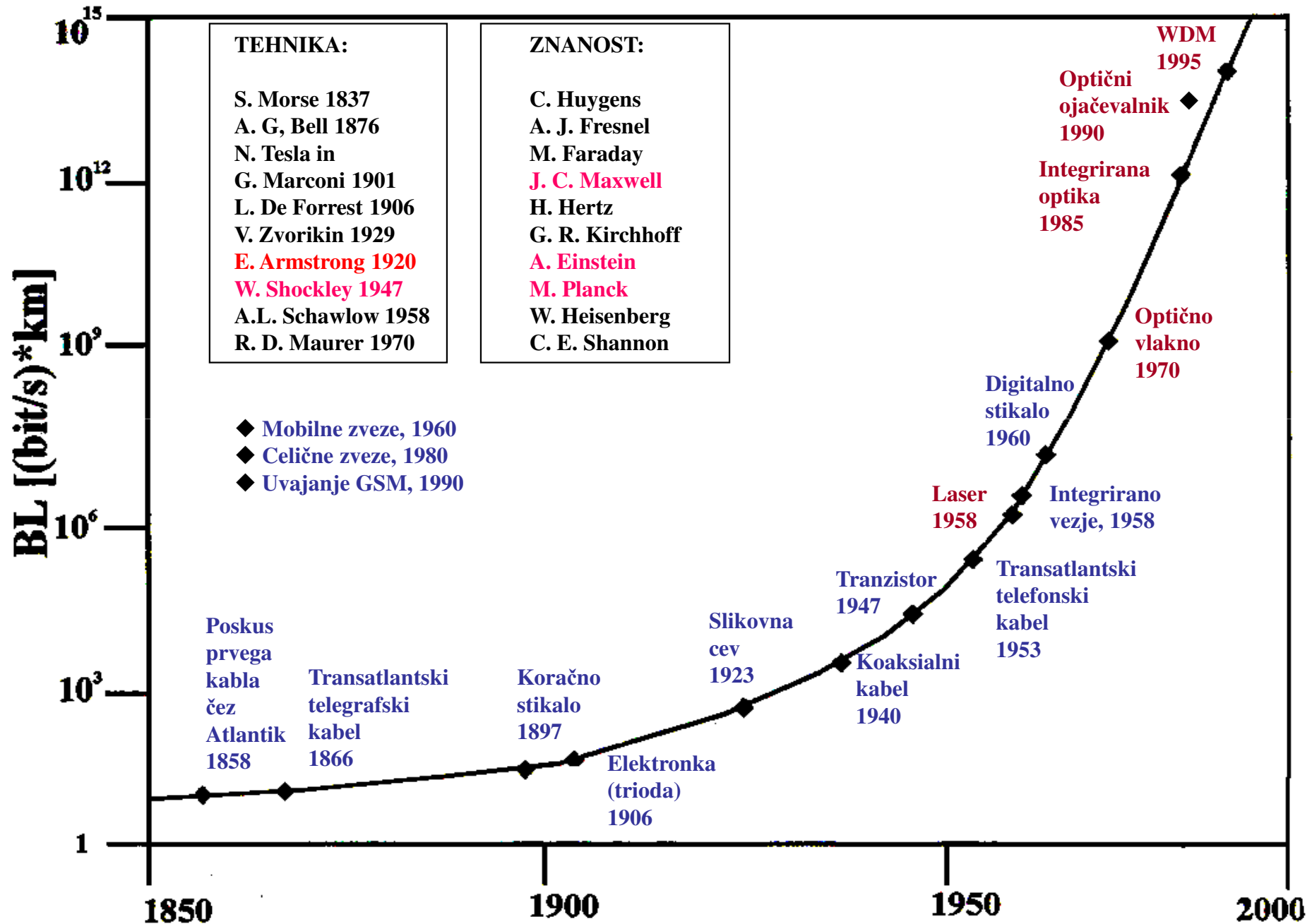


Ponovitev

Predavanje 2
Optični pojavi

Kronologija



Prenosne zmožnosti

1. Število telefonskih kanalov po 64 kb/s:

- enokanalni prenos po vlaknu:

- $B = 1 \text{ Gb/s}$ • $N = 1,5 \cdot 10^4$
- $B = 10 \text{ Gb/s}$ • $N = 1,5 \cdot 10^5$
- $B = 40 \text{ Gb/s}$ • $N = 6 \cdot 10^5$

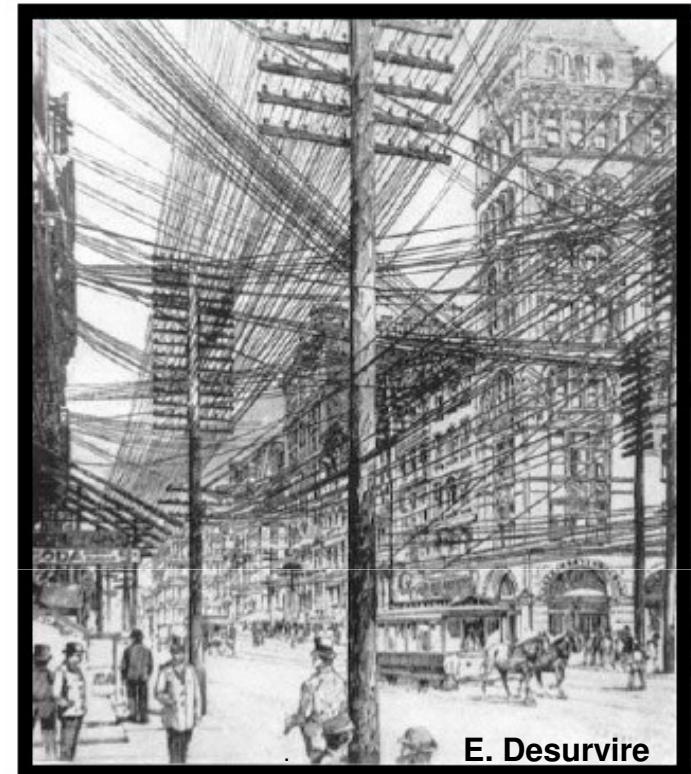
- prenos WDM po vlaknu:

- $B = 0,1 \text{ Tb/s}$ • $N = 1,5 \cdot 10^6$
- $B = 1 \text{ Tb/s}$ • $N = 1,5 \cdot 10^7$
- $B = 10 \text{ Tb/s}$ • $N = 1,5 \cdot 10^8$

2. Število prenašanih strani besedila v sekundi:

Knjiga s 1000 stranmi s po 5.000 znakov na stran ima skupno $5 \cdot 10^9$ znakov. Pri 8 bitih /znak, dobimo skupno $40 \cdot 10^6$ bitov na knjigo. Pri različnih bitnih hitrostih dobimo prenos:

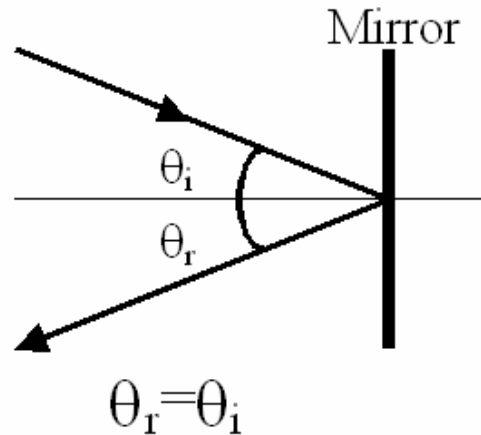
- | | | | |
|-------------------------|--------|-----------------|------------|
| • $B = 40 \text{ Mb/s}$ | prenos | 1 | knjiga / s |
| • $B = 1 \text{ Gb/s}$ | prenos | 25 | knjig / s |
| • $B = 1 \text{ Tb/s}$ | prenos | $25 \cdot 10^3$ | knjig / s |
| • $B = 4 \text{ Tb/s}$ | prenos | $1 \cdot 10^4$ | knjig / s |



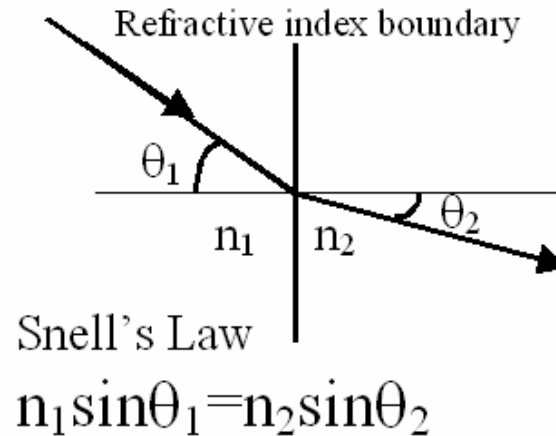
NY Broadway
1890

Pojavi valovne optike

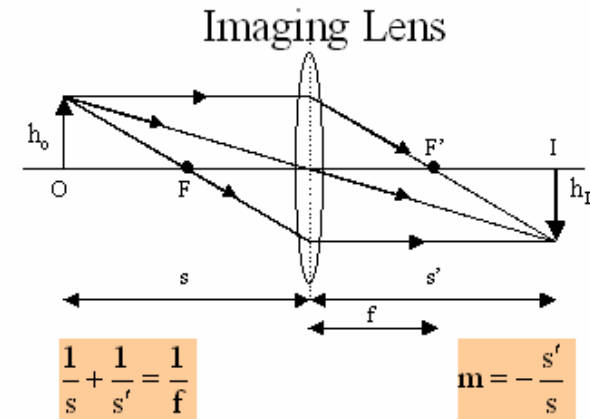
REFLECTION



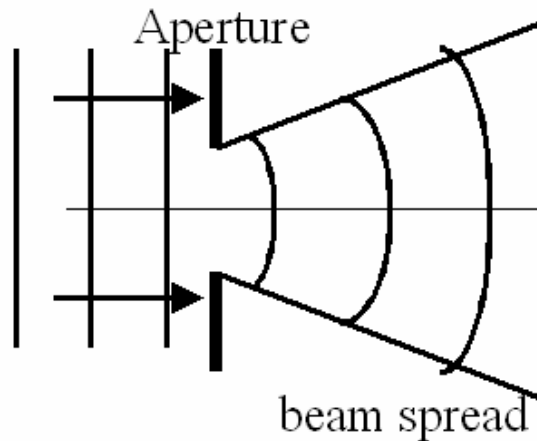
REFRACTION



IMAGING

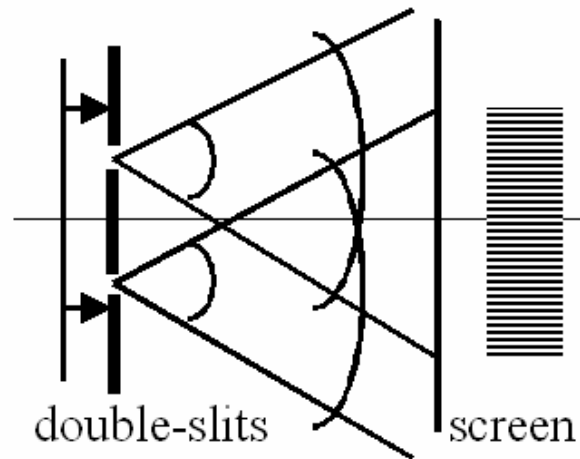


DIFFRACTION



Continuum of waves

INTERFERENCE

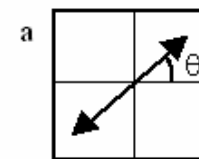


Finite no. of waves

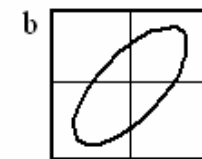
POLARISATION

Linear polarised

Elliptically polarised



$$\underline{E} = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{pmatrix} \cos(\omega t)$$



$$\underline{E} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \cos(\omega t) \\ \cos(\omega t - \pi/4) \end{pmatrix}$$

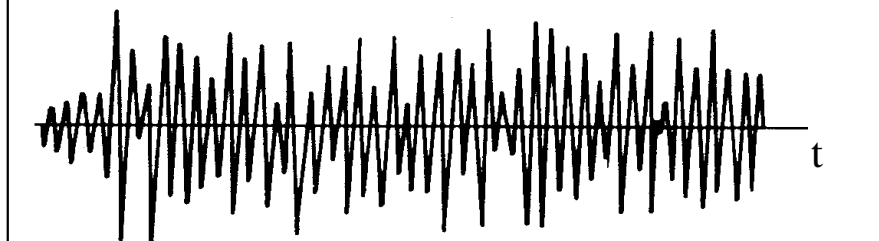
EM-theory

Principi in koncepti

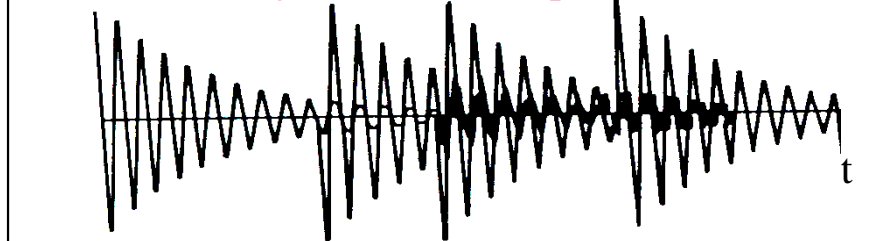
- Princip superpozicije (interferenca)
- Huygensov princip (uklon)
- Princip stacionarne faze (propagacija)
- Fermatov princip (odboj in lom)
- Razpršitev skupinske hitrosti (disperzija)
- Princip prečne resonance (valovod)

Statistične in spektralne lastnosti svetlobe

Mnogofrekvenčni signal



Seštevek naključnih sevalnih paketov atomov



Vrsta svetlobe:

- enofrekvenčna (enobarvna, monokromatska) svetloba- zelo ozek spekter, koherentna svetloba (idealni sig.)
- večfrekvenčna (večbarvna, polikromatska) svetloba- ozek spekter, delno koherentna svetloba (realni signal)
- mnogofrekvenčna (mnogobarvna, polikromatska) svetloba- zelo širok spekter, nekoherentna svetloba (šum)

Spektri pri $\lambda = 1550 \text{ nm}$ (frekvenci $1,935 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 193,5 \text{ THz}$), kot na primer (poljubna delitev):

- | | | | |
|--------------------------------------|----------------------------------|--|----------------------------|
| • (skoraj) enofrekvenčna svetloba | $\Delta\nu < 1,25 \text{ MHz}$, | $\Delta\lambda < 0,00001 \text{ nm}$, | izjemno čist signal, laser |
| • zelo ozkopasovna | $\Delta\nu < 12,5 \text{ MHz}$, | $\Delta\lambda < 0,0001 \text{ nm}$ | zelo čist signal, laser |
| • ozkopasovna svetloba | $\Delta\nu < 125 \text{ MHz}$, | $\Delta\lambda < 0,001 \text{ nm}$, | čist signal, laser |
| • ozkopasovna svetloba | $\Delta\nu < 1,25 \text{ GHz}$, | $\Delta\lambda < 0,01 \text{ nm}$, | realni signal, laser |
| • širokopasovna svetloba | $\Delta\nu > 1,25 \text{ THz}$, | $\Delta\lambda > 10 \text{ nm}$, | šum, LED |
| • (ekstremno) širokopasovna svetloba | $\Delta\nu > 12,5 \text{ THz}$, | $\Delta\lambda > 100 \text{ nm}$, | beli šum, spontana emisija |

$$\Delta\nu = -\frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \quad \text{ali} \quad \Delta\nu_{\text{GHz}} = 3 \cdot 10^2 \frac{\Delta\lambda_{\text{nm}}}{\lambda_{\mu\text{m}}^2}$$

Valovni širini spektra 1 nm
ustreza frekvenčna širina
spektra 125 GHz pri $\lambda = 1550$
nm

Pomembno za telekomunikacije:

Primerjava širine spektra svetlobe (nosilnika) $\Delta\nu$ s širino modulacijskega spektra $\Delta f = B/2$ pri NRZ:

$\Delta\nu \ll \Delta f$ prevladuje modulacijski spekter
 $\Delta\nu \gg \Delta f$ prevladuje optični spekter vira

Vir:

Saleh-Teich, Fundamentals of Photonics

Slide 6

JB1

Joško Budin; 16.3.2010

Statistična optika - koherenca polja

$E(r,t) = A(r,t)e^{j\phi(r,t)}$, kompleksna časovna fluktuacija amplitude in faze skalarne polja

$E_{tren}(r,t) = \text{Re}[E(r,t)e^{j\omega t}]$, trenutna vrednost poljske jakosti

Stopnja koherence:

Normirana časovna korelacija polj E_1 in E_2 v točkah prostora r_1 in r_2 in ob času t_1 in t_2 s presledkom τ :

$$\gamma(r_1, r_2, \tau) = \frac{\overline{E_1(r_1, t + \tau) E_2^*(r_2, t)}}{\sqrt{\overline{E_1(r_1, t) E_1^*(r_1, t)} \overline{E_2(r_2, t) E_2^*(r_2, t)}}}$$

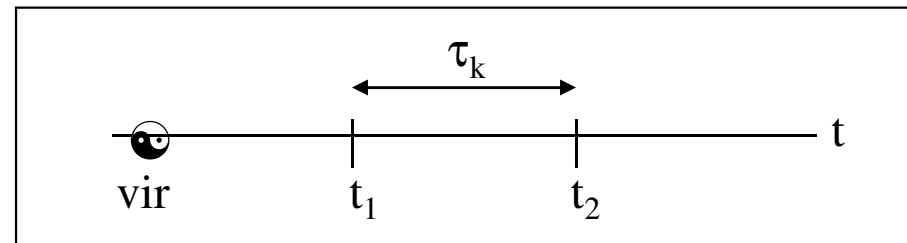
Posebna primera:

- korelacija v dveh časih $\gamma(t_1, t_2)$
- korelacija v dveh točkah $\gamma(r_1, r_2)$

• časovna koherenca:

Polje spektralne širine $\Delta\nu$ ohranja koherenco v dani točki prostora v koherentnem času τ_k :

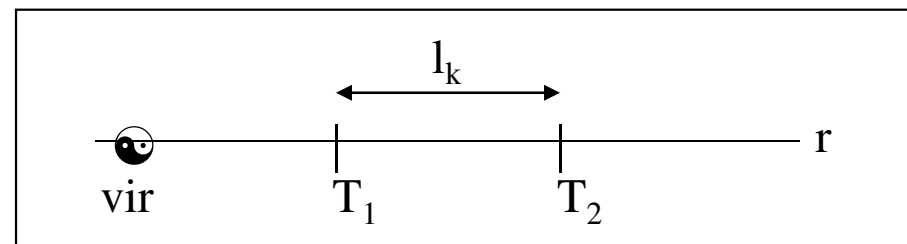
$$\tau_k = \frac{1}{\Delta\nu}, \text{ koherentni čas}$$



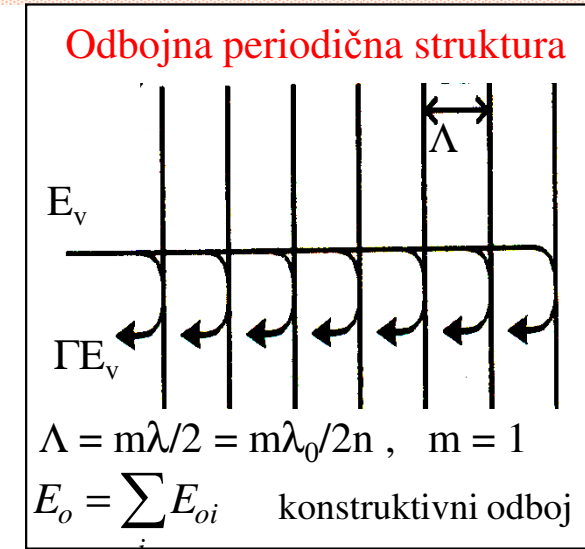
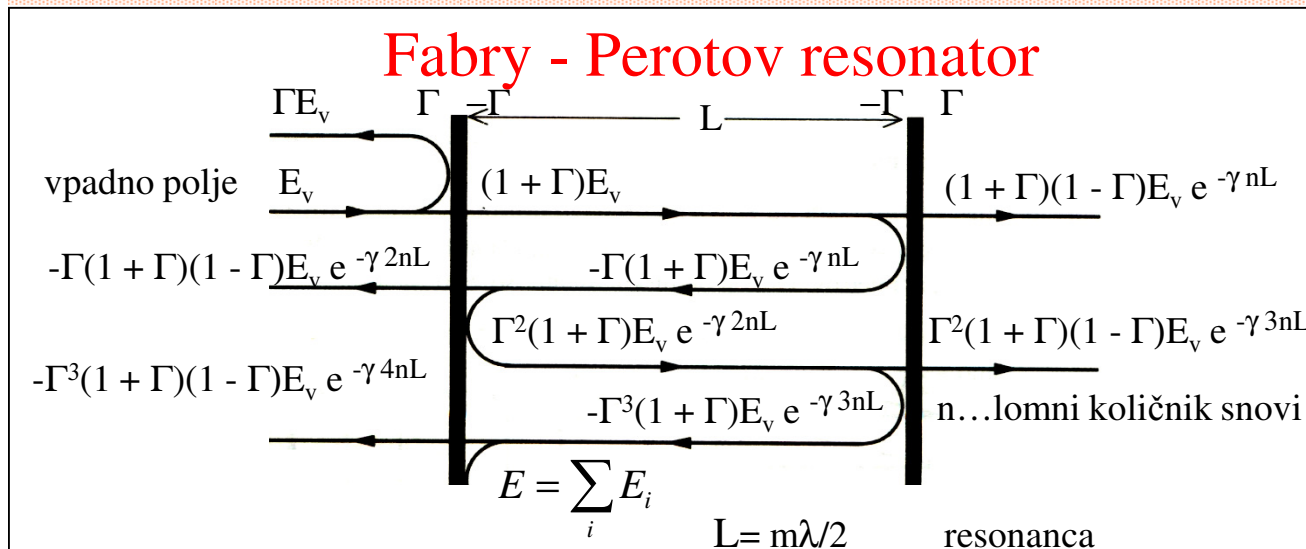
• vzdolžna koherenca:

Polje spektralne širine $\Delta\nu$ ohranja koherenco v okolici dane točke prostora na vzdolžni koherentni dolžini l_k v smeri širjenja:

$$l_k = c\tau_k = \frac{c}{\Delta\nu} = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \text{ koherentna dolžina}$$



Interferenca in vzdolžna koherenčna dolžina



Med seboj interferirajo valovi, ki se v poti razlikujejo za manj, kot znaša vzdolžna koherenčna dolžina.

$$L \leq \frac{\bullet}{N} \quad \begin{array}{l} N \text{ mnogokratnik poti} \\ L \text{ dolžina resonatorja} \end{array}$$

$$\Lambda \leq \frac{\bullet}{2N} \quad \begin{array}{l} \Lambda \text{ presledek med} \\ \text{odbojnimi mesti} \end{array}$$

Vzdolžna koherenčna dolžina pri nekaterih virih svetlobe

Laser He - Ne	$\Delta\nu = 10 \text{ MHz}$	$l_k = 30 \text{ m}$
Laser DFB	$\Delta\nu = 0,1 \text{ GHz}$	$l_k = 3 \text{ m}$
Laser FP	$\Delta\nu = 10 \text{ GHz}$	$l_k = 3 \text{ cm}$
vidna svetloba	$\Delta\nu = 300 \text{ THz}$	$l_k = 1 \text{ }\mu\text{m}$

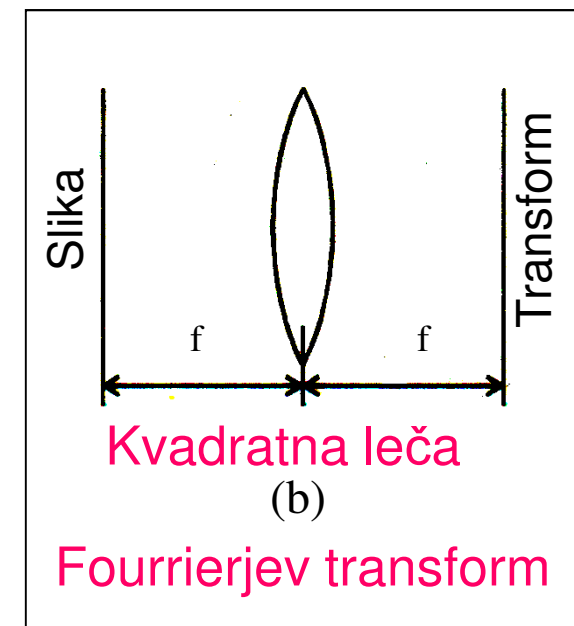
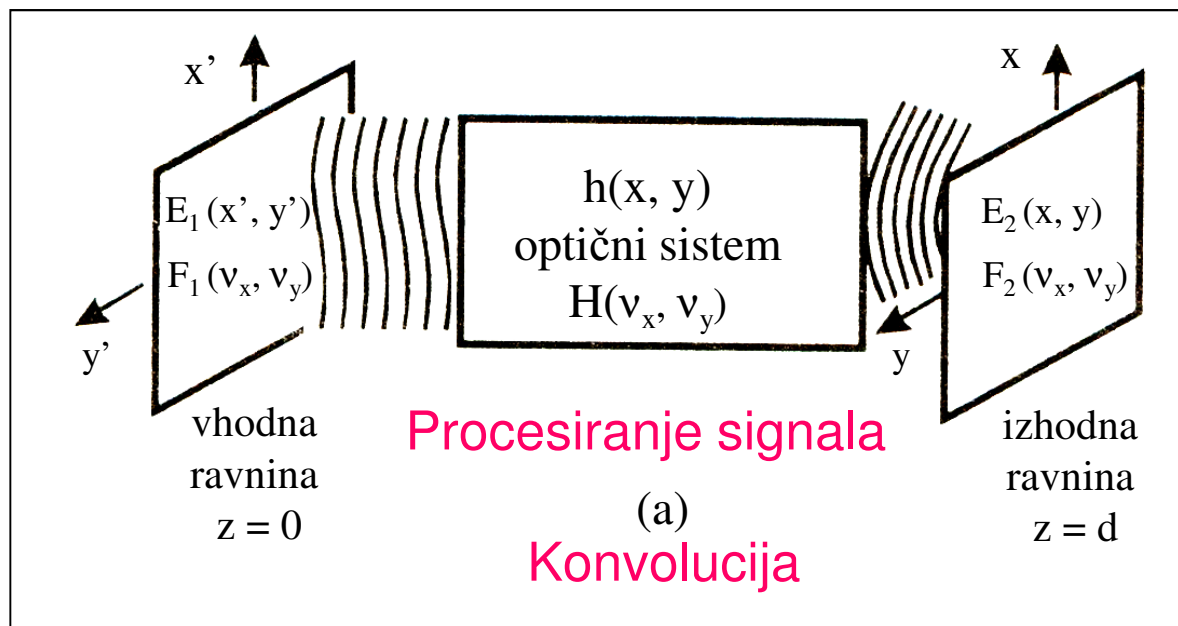
Zadnji podatek pojasnjuje interferenco vidne svetlobe na tankih plasteh tekočine (barva tankih plasti, mavrična barva svetlobe, odbite od CD). Ekstremno velika koherenčna dolžina gre v km.

Interferometri: dvovalovni (Mach - Zehnder, Michelson)

Resonatorji: mnogovalovni (Fabry - Perot, Bragg)

Fourierova optika - optični linearni sistem

Po zgledu na signale in spektre v elektrotehniko lahko obravnavamo širjenje svetlobe v prostoru med dvema ploskvama kot optični linearni sistem.

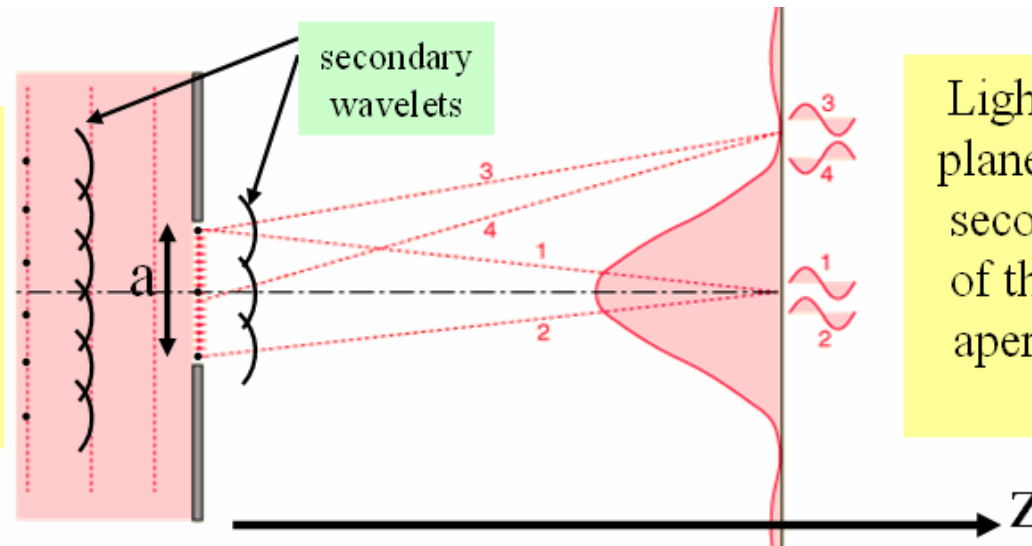


- pretvorba vhodnega polja $E_1(x', y')$ v izhodno polje $E_2(x, y)$ v prostoru med vhodno in izhodno ravnino je **prostorska konvolucija** vhodnega polja z optičnim odzivom točkastega vira (slika a)
- pretvorba vhodnega polja $E_1(x', y')$ v izhodno polje $E_2(x, y)$ postane **Fourier-jev transform**, če vmes postavimo tanko lečo, ki vnaša kvadratno fazo, in namestimo vhodno in izhodno ravnino na goriščno razdaljo leče (slika b)

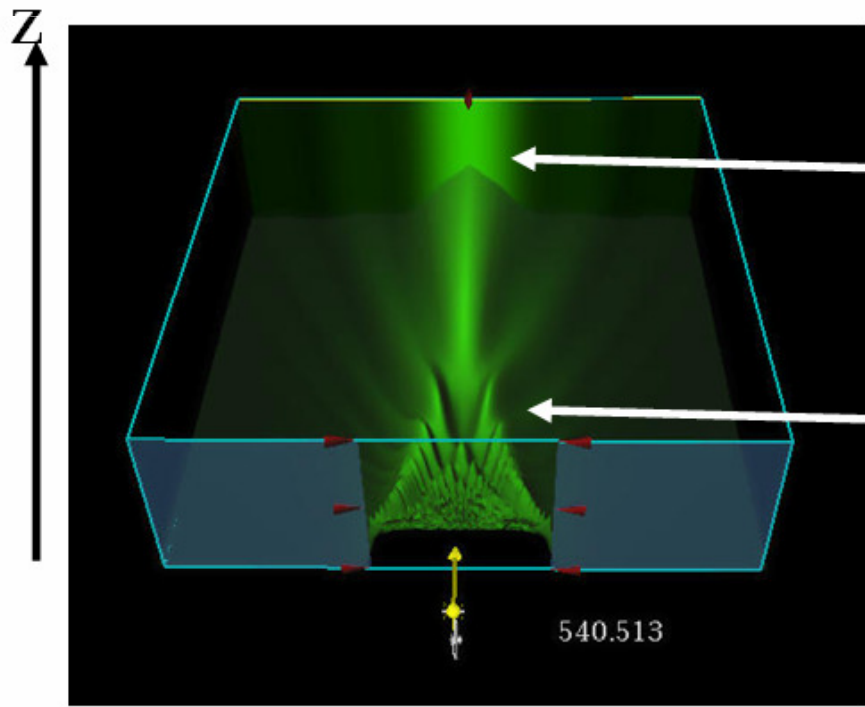
Uporaba: prostorsko filtriranje, optično razpoznavanje vzorcev, procesiranje optičnega signala

Difrakcija, Fresnel ali Fraunhofer

Aperture (width a)
causes light to
spread
(diffraction)



Light pattern at any
plane z is the sum of
secondary wavelets
of the unobstructed
aperture (including
phases)

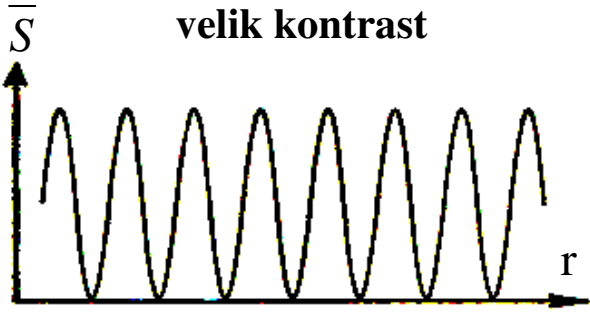
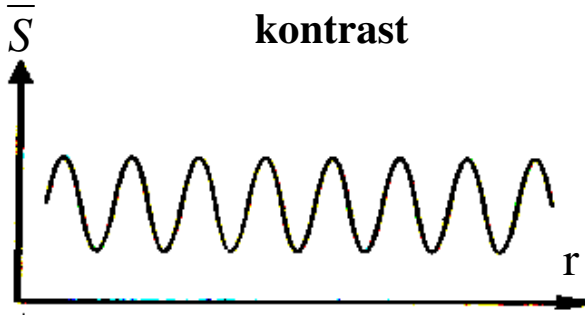
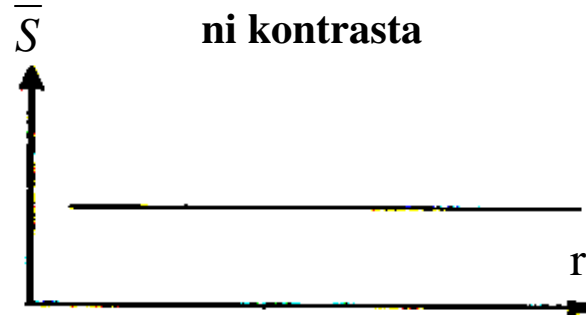


Far-field ($z \gg a^2/\lambda$) =
Fraunhofer diffraction
(simpler mathematical form
= Fourier Transform)

Near-field ($z < a^2/\lambda$) =
Fresnel diffraction
(complex mathematical form
= convolution)

Interferenca in aditivnost

Superpozicija polja virov 1 in 2. Zapis kompleksne amplitude polja: $E(r,t) = A(r,t)e^{j\phi(r,t)}$

Koherentno polje	Delno koherentno polje	Nekoherentno polje
$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} = \max$ $\gamma = 1$ $\overline{S} = \overline{S_1} + \overline{S_2} + 2\sqrt{\overline{S_1 S_2}} \cos \phi$	$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} \neq 0$ $0 < \gamma < 1$ $\overline{S} = \overline{S_1} + \overline{S_2} + \frac{1}{Z_0} \operatorname{Re} \left[\overline{E_1 E_2^*} \right]$	$E = E_1 + E_2$ $\overline{E_1 E_2^*} = 0$ $\gamma = 0$ $\overline{S} = \overline{S_1} + \overline{S_2}$
 <p>velik kontrast</p>	 <p>kontrast</p>	 <p>ni kontrasta</p>

KOHERENCA: aditivnost po polju (ni aditivnosti po moči)

NEKOHERENCA: aditivnost po polju in aditivnost po moči

Snellov lomni zakon

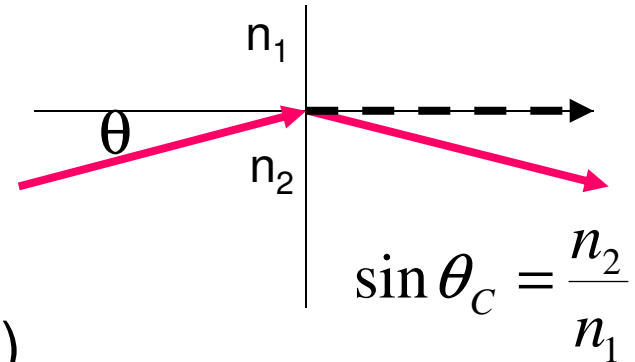
$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2)$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

Mejna kota odboja in loma

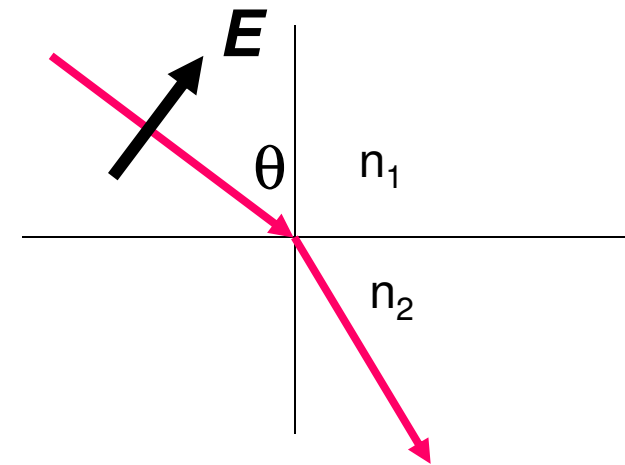
- Tyndallov kot popolnega notranjega odboja ($n_1 < n_2$)

$$\theta = \arcsin n_2/n_1$$



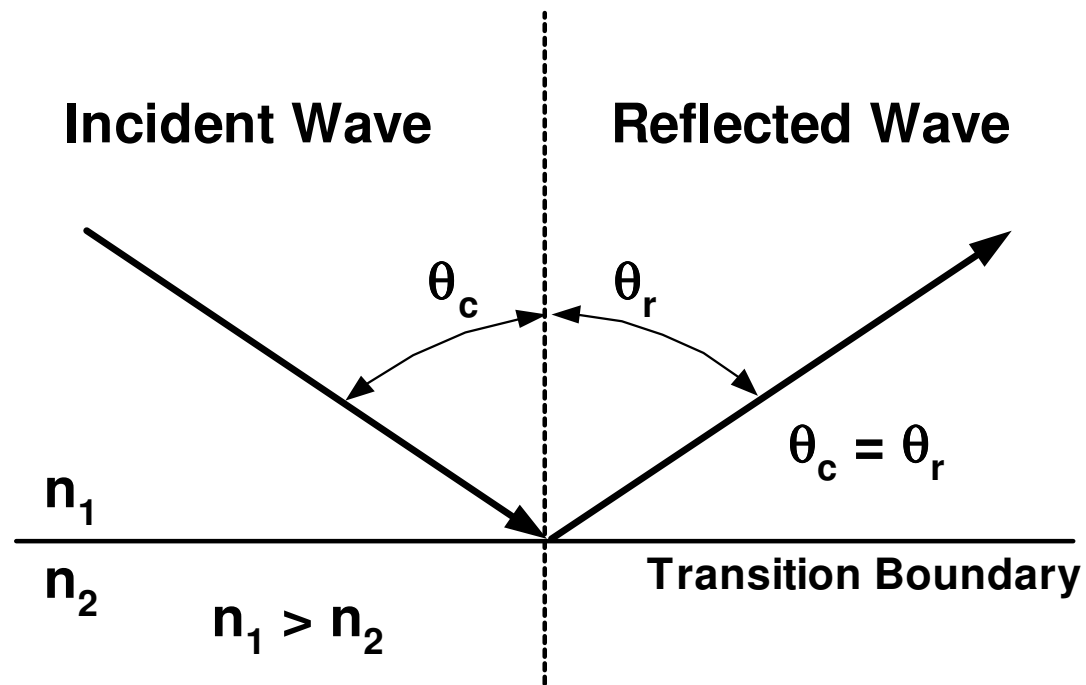
- Brewstrov kot popolnega loma ($n_1 < n_2$)
brez odboja

$$\theta = \arctg n_2/n_1$$



pri vertikalni polarizaciji polja (vektor E v vpadni ravnini)

Kot totalnega odboja



$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

Spekter

Zveza med frekvenčno in časovno širino pasu:

$$|\Delta \nu| = \left(\frac{c}{\lambda^2} \right) |\Delta \lambda|$$

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{-c}{\lambda^2}$$

100 GHz frekvenčnega pasu
ustreza

0,8 nm valovnega pasuna
valovni dolžini $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

125 GHz frekvenčnega pasu
ustreza

1,0 nm valovnega pasu
na valovni dolžini $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Pojavi kvantne optike



Energijski nivoji:

$$W_n = (n + 1/2) h\nu \quad n \text{ število fotonov}$$

Ničelna energija:

$$W_0 = 1/2 h\nu \quad \text{prostor brez fotonov, vakuumsko polje}$$

Gostota energije kvantnega šuma: $w_k = dP_k/d\nu = 1/2 h\nu$

moč kvantnega šuma : $dP_k = 1/2 h\nu d\nu$ $h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js, Planckova konstanta}$

Kvantni šum predstavlja minimalno nedoločeno svetlobnega polja in je temeljna lastnost monokromatske koherentne svetlobe

Načelo nedoločljivosti:

$$\Delta f \Delta t \geq \frac{1}{4\pi}$$

načelo nedoločljivosti po Fourierovi transformaciji

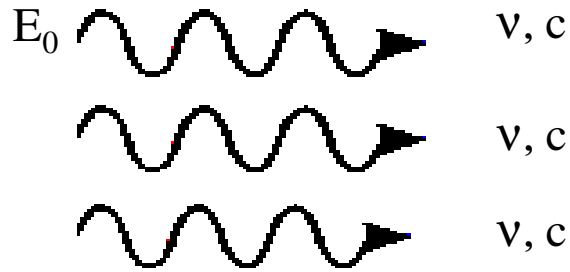
$$\Delta n \Delta \phi \geq \frac{1}{2} \quad \text{razpršenost števila fotonov in faze}$$

$$\Delta W \Delta t \geq \frac{h}{4\pi} = \frac{\hbar}{2}$$

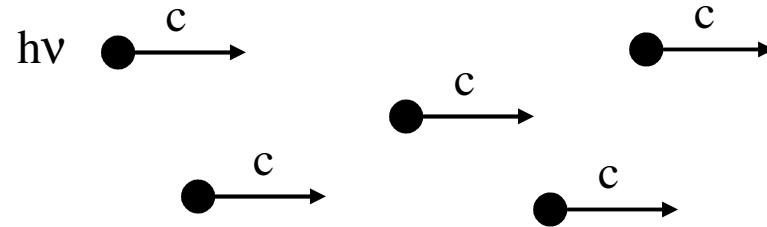
razpršenost energijskega nivoja in časovnega intervala

$$\Delta k \Delta x \geq \frac{1}{2} \quad \text{razpršenost gibalne količine in koordinate (Heisenbergovo načelo nedoločljivosti)}$$

Foton



Val elektromagnetnega polja



Energijski kvant (foton) polja

- $\vec{E}(\vec{r}, t) = \hat{1}_E E_0 e^{j(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$ električna poljska jakost monokromatskega ravninskega vala
- $\bar{S} = \frac{1}{2Z_0} E_0 E_0^*$ povprečna gostota moči
- $p(\vec{r}, t) dA dt = S dA dt$ verjetnost nahajanja fotona na ploskvi dA v času dt

- $W = h\nu = \hbar\omega, \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$ energija fotona
- $h = 6,624 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ Planckova konstanta

- $G = \hbar k = \frac{h}{\lambda} = \frac{W}{c}$ gibalna količina fotona
- $\Gamma = \pm h$ vrtilna količina fotona ustreza desni oz. levi krožni polarizaciji

Srednje število fotonov na sekundo:

Vidna svetloba:

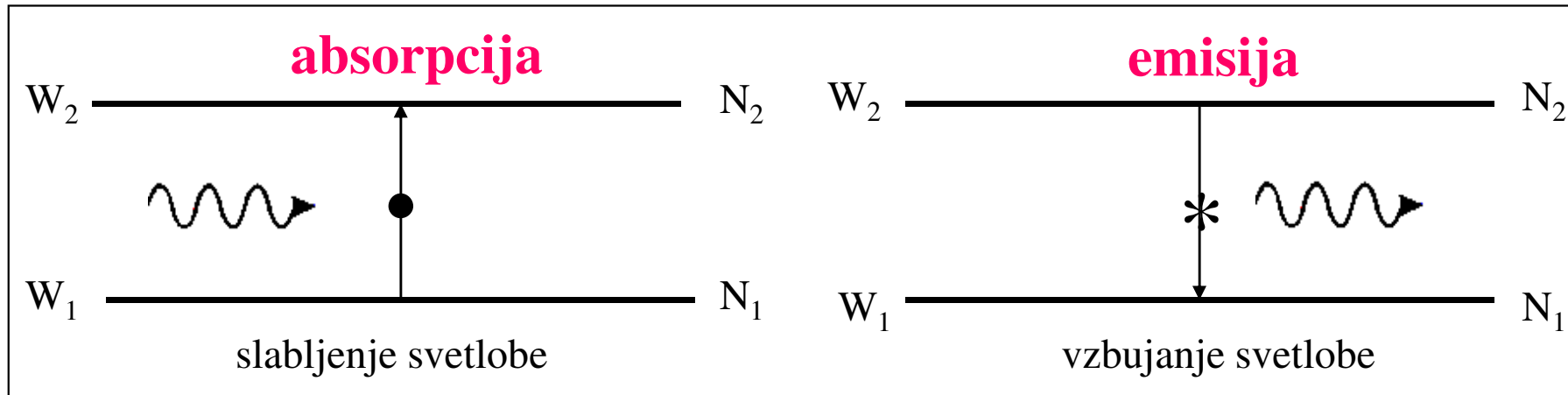
- sončna svetloba skozi ploskev 1 m^2 , $\bar{n} = 10^{21} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$
- sončna svetloba skozi odprtino zenice $\bar{n} = 10^{15} \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-2}$
- zvezdna svetloba skozi odprtino zenice $\bar{n} = 10^8 \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-2}$



$\lambda = 1,55 \mu\text{m}$:

- vlakno, moč 0 dBm $\bar{n} = 10^{16} \text{ s}^{-1}$
- sprejemnik občutljivosti -40 dBm $\bar{n} = 10^{12} \text{ s}^{-1}$
- sprejemnik občutljivosti -40 dBm , 1 Gb/s $\bar{n} = 10^3 \text{ bit}^{-1}$
- hipotetična kvantna meja sprejema $\bar{n} = 10 \text{ bit}^{-1}$

Absorpcija in emisija



$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}N_1\rho$$

- dvig na višji nivo
- slabilna snov

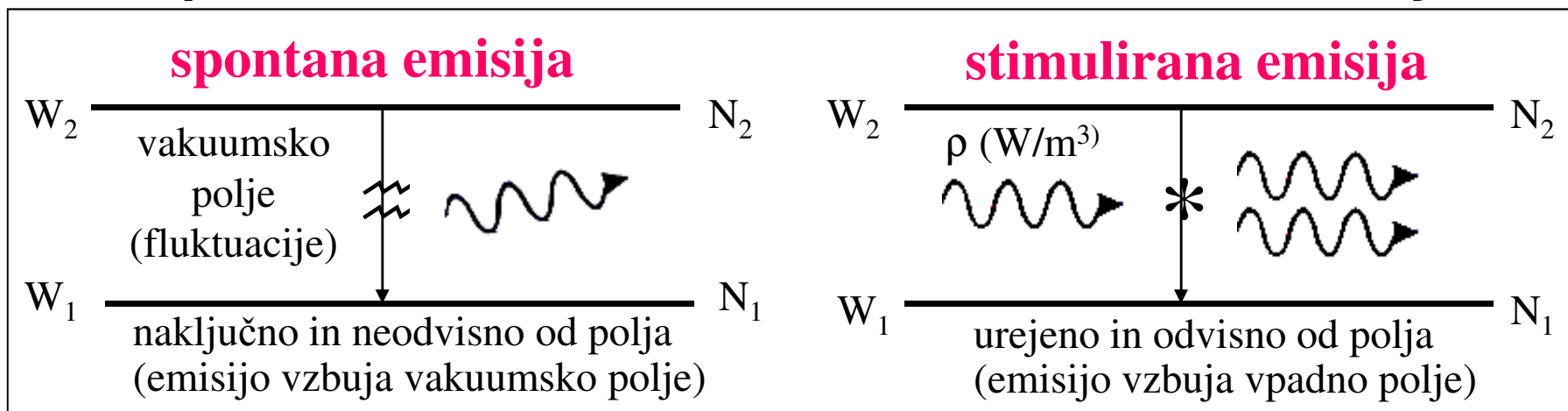
$$\frac{dN_2}{dt} < 0$$

- spust na nižji nivo
- aktivna snov

Valovna dolžina absorbirane ali emitirane svetlobe pri dvigu ali spustu med energijskima nivojema W_1 in W_2

$$\lambda_{\mu m} = \frac{1,987 \cdot 10^{-19}}{\Delta W_J} = \frac{1,2398}{\Delta W_{eV}}, \quad \Delta W = W_2 - W_1$$

Spontana in stimulirana emisija



$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2$$

- Generacija **naključnega** fotona:
 - nekoherentno sevanje
 - naključna frekvenca v širokem pasu
 - naključna polarizacija
 - naključna smer širjenja
 - brez vpliva vpadnega polja

- **Pogoj za emisijo:**

$$N_2 > N_1 \text{ (inverzija naseljenosti)}$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}N_2\rho$$

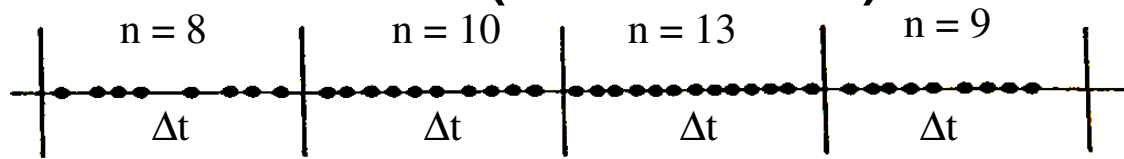
- Generacija **spodbujenega** fotona:
 - koherentno sevanje
 - ozek frekvenčni pas
 - enaka polarizacija
 - enaka smer širjenja
 - sorazmerno gostoti energije ρ polja

- **Parameter inverzije:**

$$\mu = \frac{N_2}{N_2 - N_1}$$

Statistika zrnatosti (fotonov)

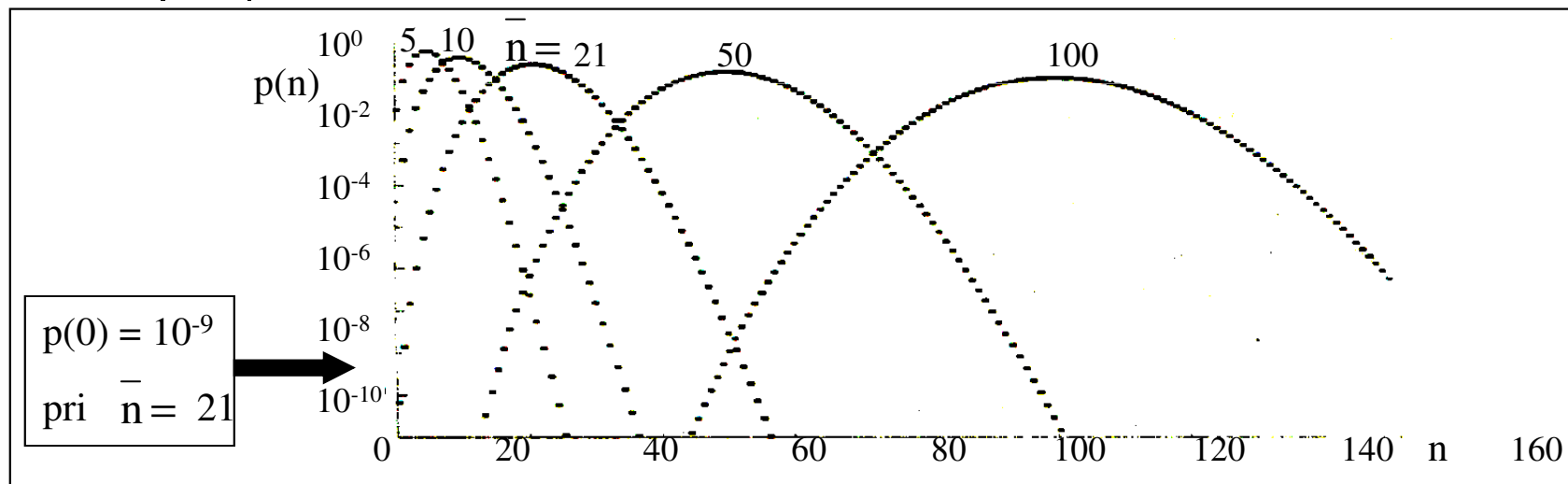
- **Pojav: zrnatost fotonov v curku**



Neenakomeren pretok fotonov povzroča nedoločenoštevilo fotonov v časovnem intervalu, fluktuacijo in šum

- **Statistika: Poissonova porazdelitvena verjetnost**

$$p(n) = \frac{1}{n!} \left(\frac{P\Delta t}{h\nu} \right)^n e^{-\frac{P\Delta t}{h\nu}}, \quad \bar{n} = \frac{P\Delta t}{h\nu} \quad \text{srednje število fotonov v intervalu } \Delta t$$



- Varianca števila fotonov $\sigma^2 = \bar{n}$
- Fluktuacija števila fotonov v intervalu $\sigma = \sqrt{\bar{n}}$
- Optično razmerje: $S/N = \bar{n} / \sigma = \sigma$
- **Kvantni šum:** $i_k^2 = \left(\frac{e}{\Delta t} \right)^2 \sigma^2 = 2eI\Delta f$

Pri $\bar{n} = 21$ je verjetnost, da v časovnem intervalu ne prestrežemo nobenega fotona, enaka 10^{-9} . S to verjetnostjo napake je teoretično možen sprejem NRZ impulzov z 10 - 11 fotoni!

Optične komunikacije - prednosti

→ Izjemno širok prenosni spekter in izjemno visoka prenosna zmogljivost

Potencialni prenosni pas vlakna v področju nizkega slabljenja obsega 50 THz. Dosežena (l. 2009) največja prenosna zmogljivost vlakna je 30 Tb/s (1 Tb/s je ekvivalent za 15 milijonov telefonskih pogovorov po 64 kb/s).

→ Nizko slabljenje in znatna prenosna razdalja

Z vlaknom slabljenja 0,2 dB/km je mogoče premostiti razdaljo 100 km pri oslabitvi signala za 20 dB. Z optičnim ojačevanjem in regeneracijo je mogoče doseči čezoceanske razdalje.

→ Odpornost na motnje in visoka zanesljivost prenosa

Optično vlakno je vase zaprt prenosni vod, ki se ne sklaplja z zunanjimi optičnimi ali električnimi polji oz. motnjami. BER v optičnih komunikacijah je običajno 10^{-9} in je lahko 10^{-12} do 10^{-15} .

→ Gospodarnost in cenenost

Uporabljeni materiali in tehnologije omogočajo razvoj svetovnega TK omrežja.

Optične komunikacije - omejitve

→ Omejitev moči v vlaknu pod največ 1 do 10 mW

Pri večjih močeh se pojavlja nelinearnost vlakna s številnimi škodljivimi posledicami.

→ Visoka raven optičnega šuma

Kvantni šum v optični zvezi s plazovno fotodiodo in šum ojačene spontane emisije v ojačevani optični zvezi sta poleg osnovnega kvantnega šuma dodatna optična šuma, ki močno prevladujeta nad termičnim šumom. Za sprejem potrebujemo visoko moč na ravni -40 do -20 dBm.

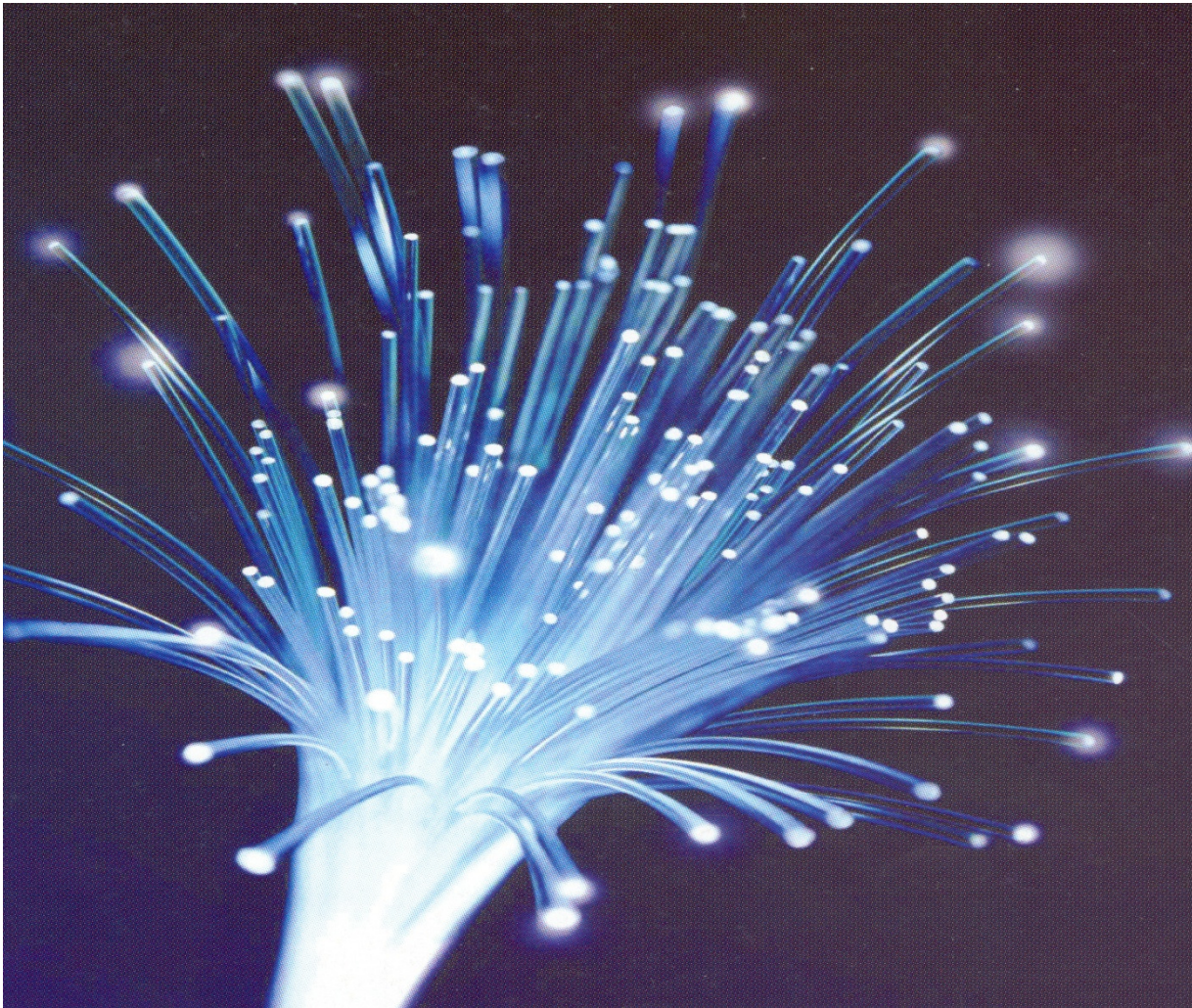
→ Nizek spektralni izkoristek $\eta = 0,4$ do 1 b/s/Hz (v prihodnje do $\eta = 10!$)

Optične komunikacije uporabljajo intenzitetno modulacijo (IM) in direktno detekcijo (DD). Digitalni modulacijski formati, OFDM in zlasti **koherentni sprejem** so nove tehnologije, ki bistveno spreminjajo izkoristek spektra.

→ Omejitev bitne hitrosti zaradi kromatske in polarizacijske rodovne disperzije

Potrebni so posebni ukrepi za kompenzacijo obeh disperzij zlasti nad 10 Gb/s oziroma 40 Gb/s. Nove tehnologije razrešujejo vprašanje disperzije.

Optična vlakna



Mobitel d.d.,
izobraževanje

17. 3. 2010,
predavanje 3

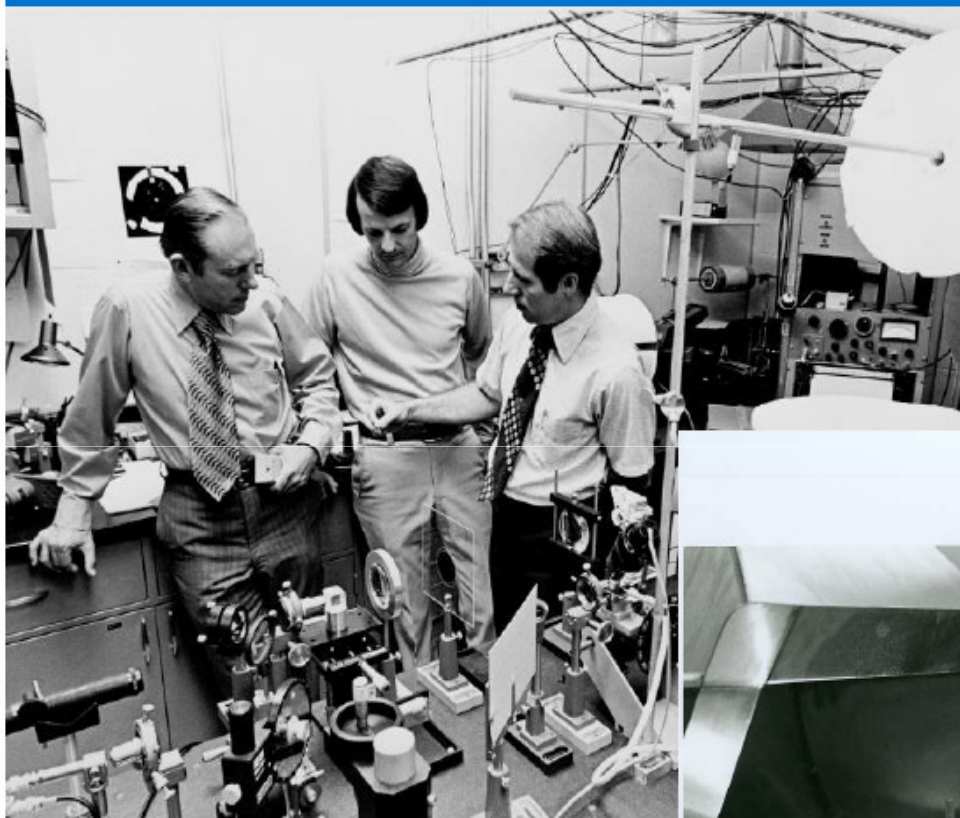
Prof. dr. Jožko
Budin

Vsebina

- Razvoj in standardizacija vlakna
- Spekter optičnega vlakna
- Parametri optičnega vlakna
- Vrste enorodovnega vlakna in podatki za SMF-28
- Vstop svetlobe v vlakno
- Lomni lik
- Efektivna dolžina in efektivna površina ter drugi parametri vlakna
- Elektromagnetna obravnava vlakna
- Analiza polja v vlaknu, valovna enačba, hibridni rodovi
- Enorodovno in mnogorodovno vlakno
- Slabljenje in disperzija ter druge karakteristike

Ob rojstvu optičnega vlakna

revolutionizing the telecommunications industry



r
Robert Mauer
Peter Schultz
Donald Keck

Kapron

Then the attenuation is:

$$\alpha_c = \frac{10 \log \frac{40}{3.54}}{29 \text{ meters}} = 17 \text{ dB/km} \quad \text{Whoa!!}$$

Must measure this to check!

Left laser and electronics running during lunch, signal is holding constant @ 158 mV. Noise is definitely lower. Maximized input and found I had to decrease the HV to 850.
 HV = 850, RC = 100, R_L = 100 KΩ.

Break fiber:
 S = 42.2 mV S_{inj} = 158 input in fiber
 S = 48.7 S_{inj} = 159 (lower exp. slight)

S_{inj} = 158
 28.1 meters

$$\frac{2.5}{2.2} = 18.2 \text{ dB/km}$$

$\alpha_c = 22$, so we guide and on the output and get

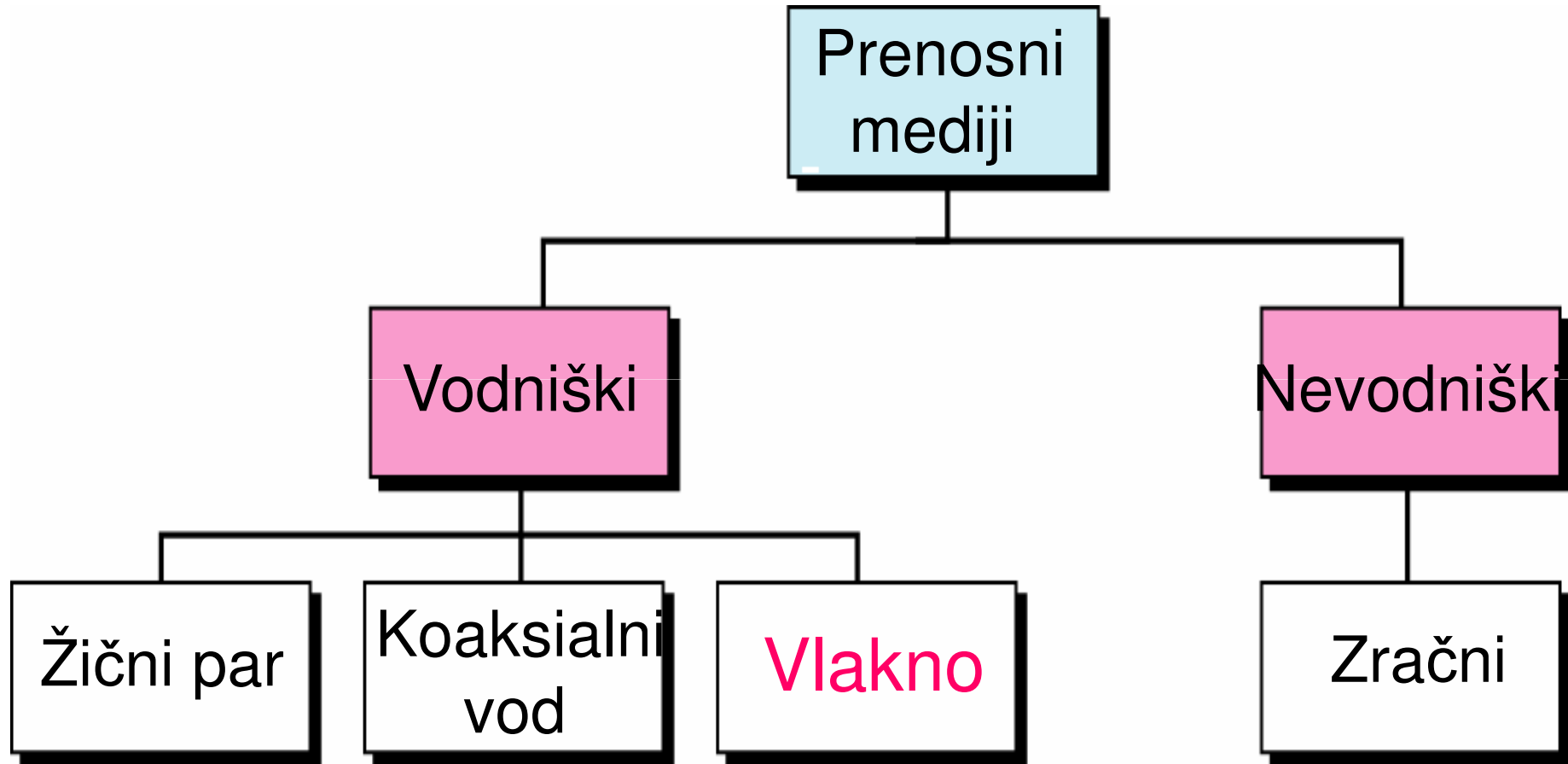
2 patterns for it are on
 $d(m_1^2 - m_2^2)^{1/2} = 0.376$
 bc had a value of 0.36 with
 3.7 μm. This predicts
 a value can then be

$$\alpha_c = \frac{\pi(3.7)}{0.6728} \left[(1.408)^2 - (1.957)^2 \right]^{1/2}$$

SEE PROTECTIVE GLASS !!!

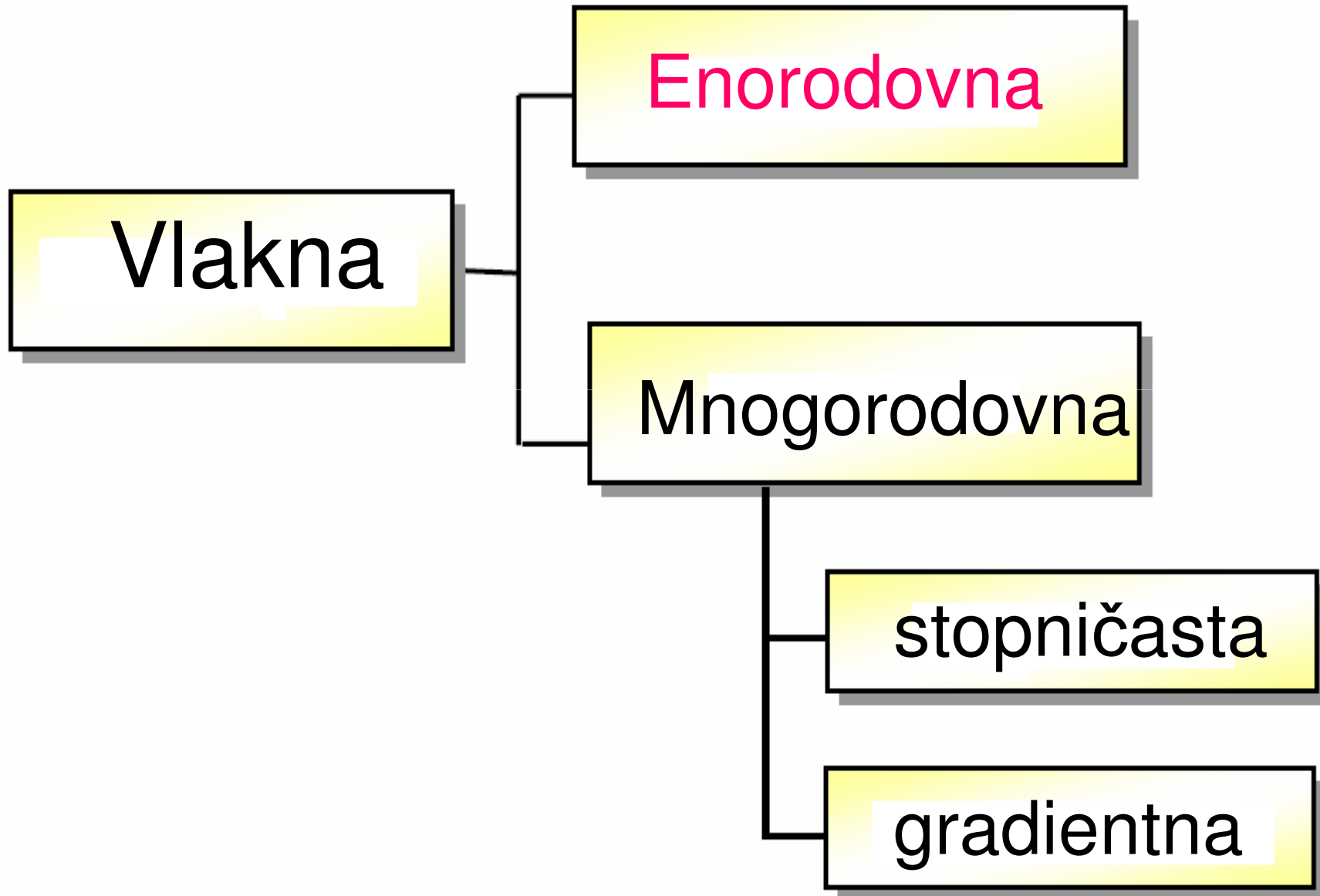


Prenosni mediji



Kovinski valovodi in dielektrični planarni svetlovodi rabijo za sestavne dele vezij in jih ne prištevamo med prenosne vodnike.

Vlakenska optika



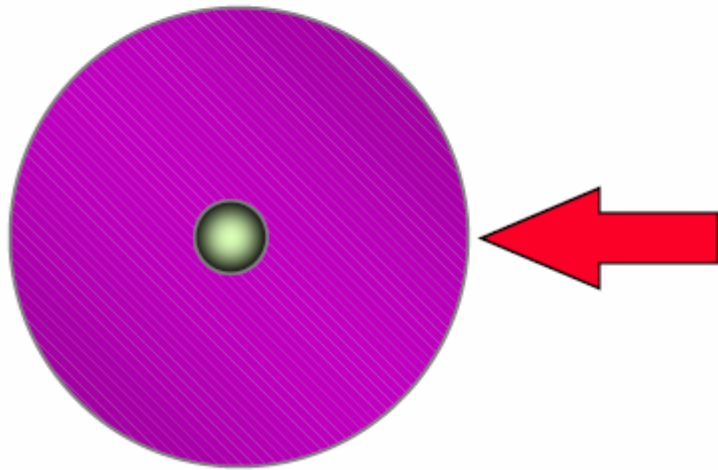
Enorodovno in mnogorodovno vlakno

Enorodovno vlakno:

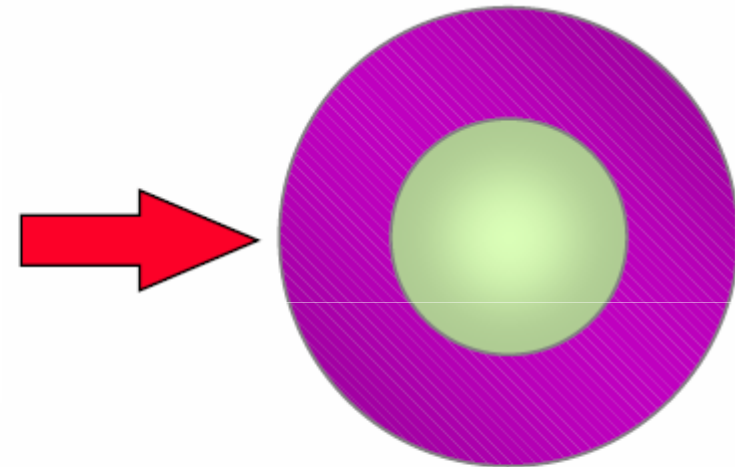
Premer 8-9 μm /125 μm .

Uporaba za vsa omrežja
vključno z dostopom.

Material SiO_2 s primesmi.



Mnogorodovno vlakno:



Premer 50, 62,5, 100 μm /
/125, 250 μm .

Uporaba za notranja
omrežja.

Material SiO_2 , plastika.

Optična vlakna – pregled 1/2

A. Optična vlakna na osnovi kremenovega stekla SiO_2

- ekstremno nizko slabljenje okoli $\lambda = 1550$ nm
- velika trpežnost in razširjenost materiala
- temperaturna stabilnost

1. Enorodovna optična vlakna:

1.1. Prenosna optična vlakna:

- **enorodovna optična vlakna z jedrom iz SiO_2 s primesmi:**

- *standardno enorodovno optično vlakno G.652a (SMF ali SSMF)*
- *disperzijsko premaknjeno enorodovno vlakno G.655 (\pm NZDSF)*

- **enorodovno optično vlakno z jedrom iz čistega SiO_2 brez primesi**

- standardno enorodovno optično vlakno G.652 (PSCF)

- **enorodovna optična vlakna očiščena ionov OH**

- standardno enorodovno optično vlakno G.652 c/d z jedrom SiO_2 s primesmi, očiščeno ionov OH (All Wave, Pure Guide)
- *standardno enorodovno optično vlakno z jedrom iz čistega SiO_2 brez primesi, očiščeno ionov OH*

Optična vlakna – pregled 2/2

1.2. Posebna optična vlakna:

- kompenzacijska vlakna za izravnavo disperzije
- ojačevalna vlakna z aktivnimi primesmi
- polarizacijsko stalna vlakna
- sukana vlakna za nizko vrednost PMD
- vlakna velike efektivne površine za nizko nelinearnost

2. Mnogorodovna optična vlakna:

- mnogorodovno optično vlakno stopničastega lomnega lika
- mnogorodovno optično vlakno gradientnega lomnega lika

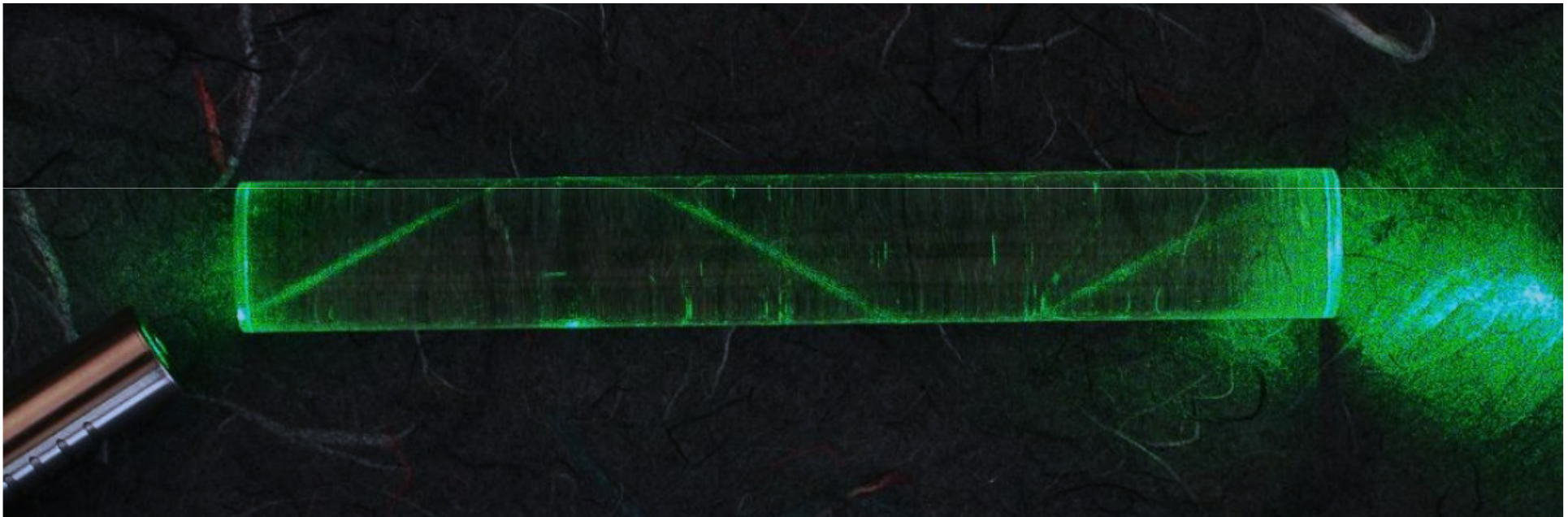
B. Optična vlakna na osnovi plastičnih materialov:

- srednje do (zelo) visoko slabljenje
- temperaturna odvisnost
- velika trpežnost pri rokovanju in primernost za široko uporabo
- nizka cena
- primernost za dostopovna omrežja v notranjih prostorih

1. mnogorodovno polimerno vlakno stopničastega lomnega lika

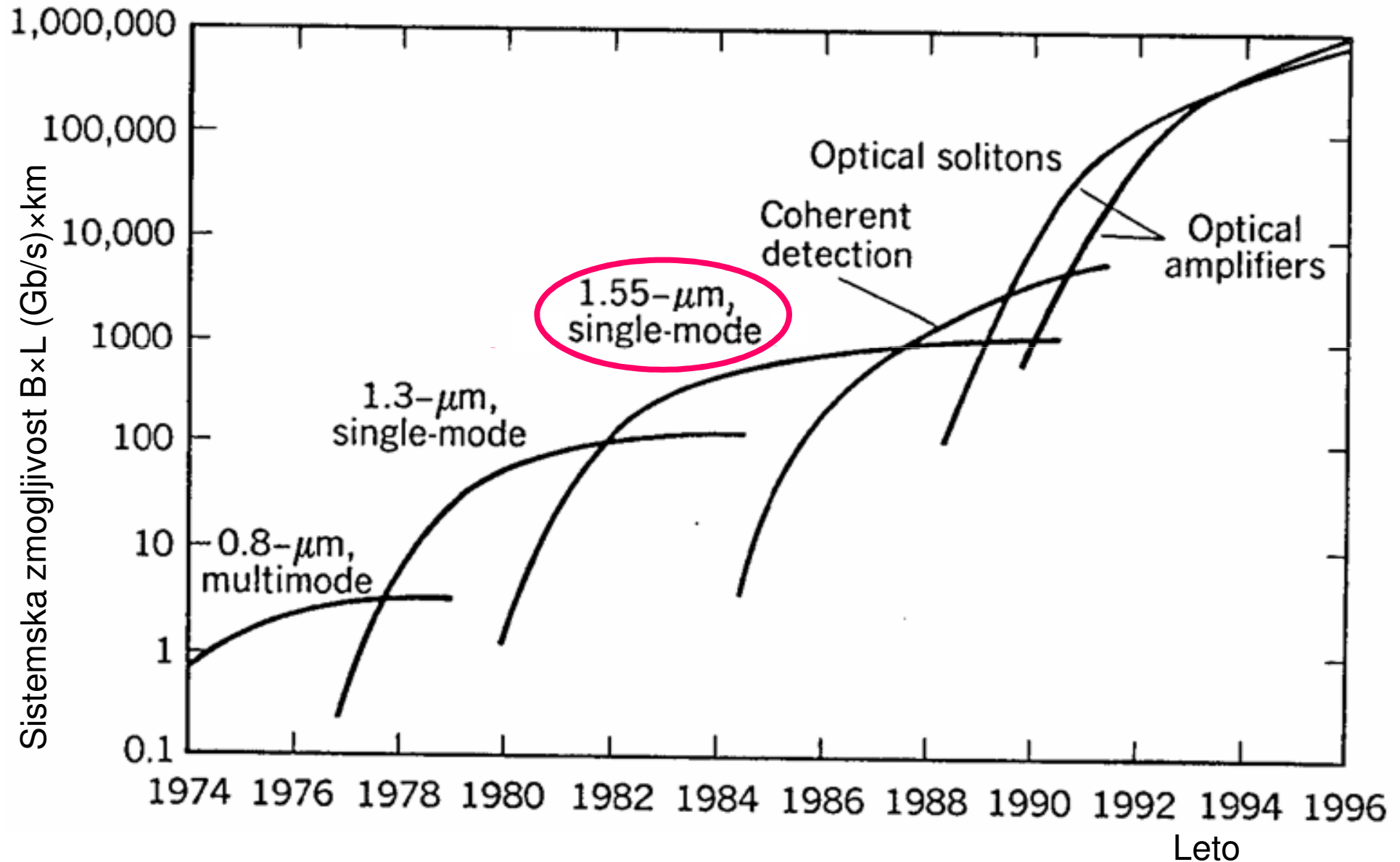
2. *mnogorodovno polimerno vlakno gradientnega lomnega lika*

Žarek v gradientnem vlaknu



Prispevek vlakna k prvemu dvigu $B \times L$

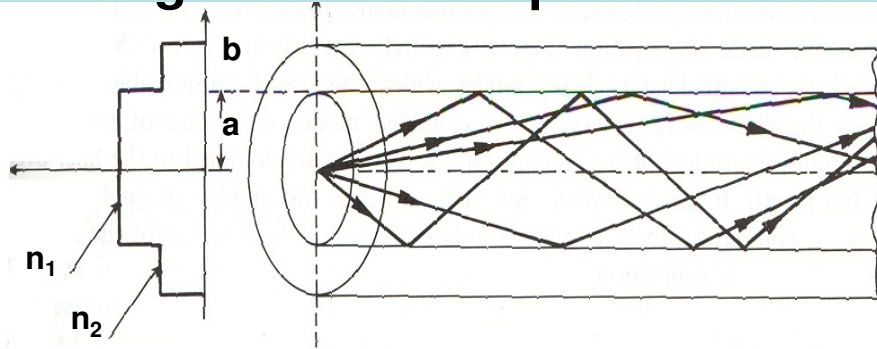
Sistemska zmogljivost $B \times L$ (Gb/s) \times km je kriterij za primerjavo sistemov



Vrsta vlaken po načinu širjenja

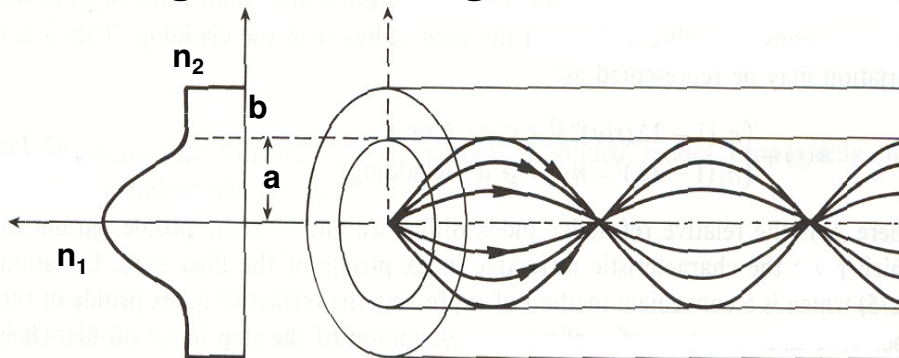
V optičnih komunikacijah obstajajo tri vrste optičnih vlaken:

▪ mnogorodovno stopničasto vlakno (se ne uporablja)



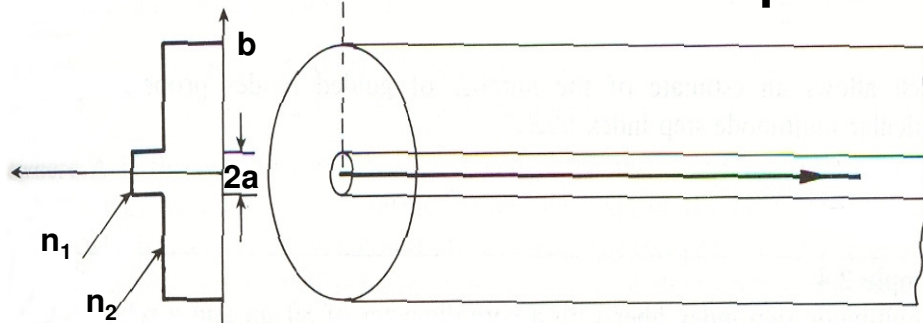
- $2a = 50 \mu\text{m}$ · se ne uporablja v prenosu OK
- $2b = 125 \mu\text{m}$ · visoka disperzija
- prenos ozkih spektrov

▪ mnogorodovno gradientno vlakno



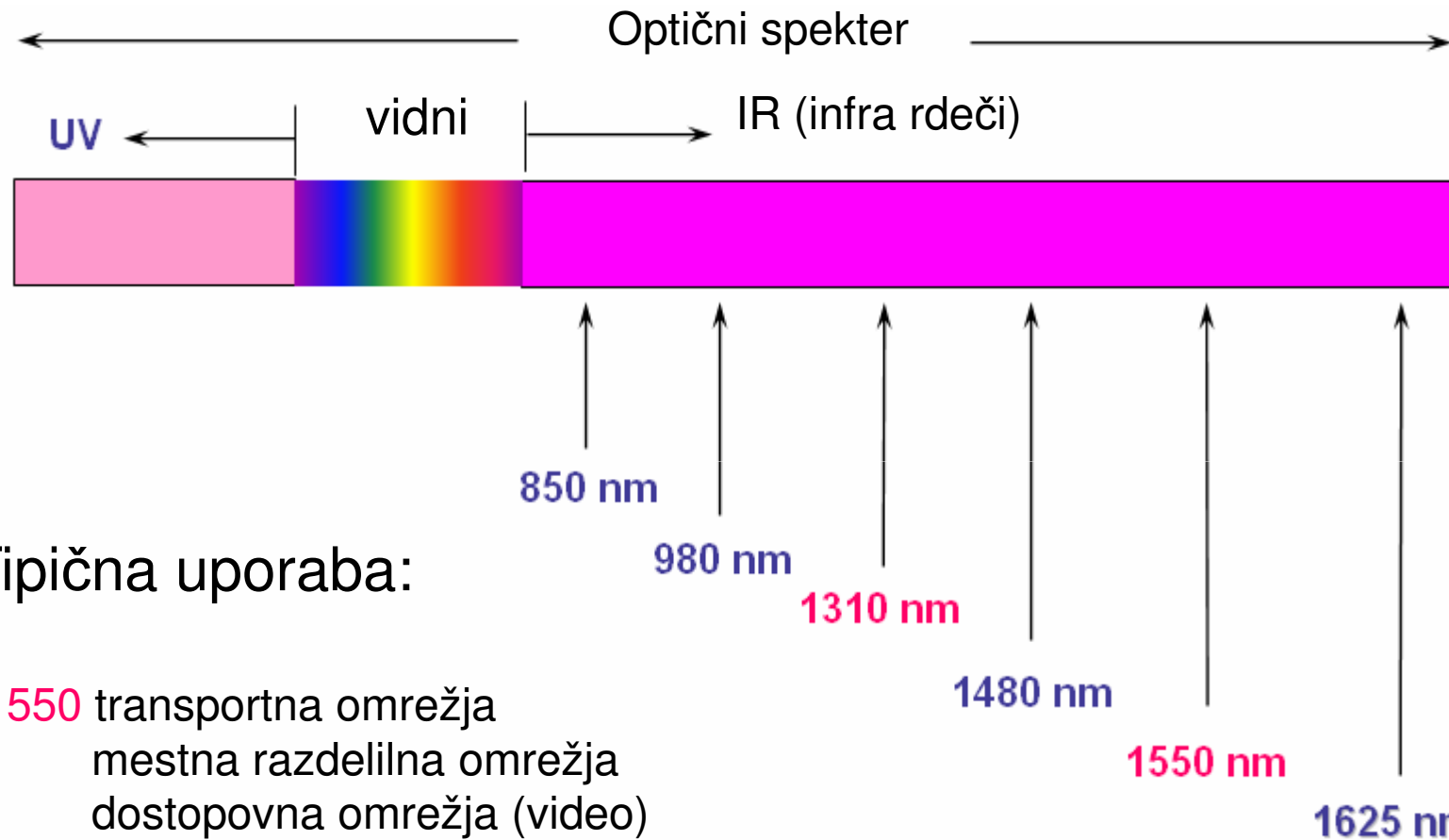
- $2a = 50 \mu\text{m}$ · se uporablja v manj zahtevnih zvezah
- $62,5 \mu\text{m}$ · srednje visoka disperzija
- $85 \mu\text{m}$ · prenos srednje širokih spektrov
- $100 \mu\text{m}$ · prenos širokih spektrov
- $2b = 125 \mu\text{m}$ · digitalni pretok z megabitno hitrostjo (100 do 1.000 Mb/s)

▪ enorodovno standardno ali posebno vlakno



- $2a = 9 \mu\text{m}$ · glavna vrsta prenosnega vlakna
- nizka do srednja disperzija, odvisno od vrste vlakna
- prenos širokih do zelo širokih spektrov
- $2b = 125 \mu\text{m}$ · digitalni pretok z gigabitno hitrostjo (10 do 1.000 Gb/s)

Valovne dolžine v optičnih komunikacijah



Tipična uporaba:

- **1550 nm** transportna omrežja
mestna razdelilna omrežja
dostopovna omrežja (video)
- 1480 nm dostopovna omrežja (zveza navzdol)
- **1310 nm** dostopovna omrežja (zveza navzgor)

Optično prenosno vlakno, ključne lastnosti

1. Slabljenje vlakna:

1. Slabljenje pri $\lambda = 1550$ nm:
 - koeficient slabljenja $\alpha = 0,19$ do $0,22$ dB/km (jedro SiO_2 + primesi, obloga SiO_2)
 - koeficient slabljenja $\alpha = 0,15$ do $0,17$ dB/km (jedro SiO_2 , obloga SiO_2 + primesi)
2. Slabljenje v pasovih S, C, L:
 - koeficient slabljenja $\alpha < 0,4$ dB/km (vlakno, očiščeno OH ionov)

2. Disperzija:

- koeficient kromatske disperzije $D = 17$ ps/nm/km (standardno vlakno SSMF)
- koeficient kromatske disperzije $D_{\text{opt}} = 4 - 8$ ps/nm/km (disperzijsko premaknjeno vlakno NZDSF)
- strmina disperzije $S < 0,07$ ps/nm²/km
- koeficient polarizacijske rodovne disperzije PMD $< 0,1$ ps/km^{1/2}, celo $< 0,01$ ps/km^{1/2}

3. Nelinearnost:

- efektivna površina $A_{\text{ef}} = 50 - 80$ μm^2 (NZDSF in SSMF)
- efektivna površina $A_{\text{ef}} > 80\mu\text{m}^2$ (posebna vlakna)

4. Kompromis:

- efektivna površina in strmina disperzije sta med seboj povezani karakteristiki. Ni hkrati mogoče doseči velike efektivne površine in majhne strmine, izbiramo kompromis.
-

Polimerno optično vlakno

1. Lastnosti:

- slabljenje pri $\lambda = 1550$ nm je 10 do 20 dB/km (laboratorijsko dosežena vrednost)
- tržno dosegljiva vlakna imajo slabljenje $\alpha = 100$ do 150 dB/km

2. Podatki:

- bitna hitrost je nekaj Gb/s pri dolžini do 500 m
- premer jedra 120 – 500 μm , tudi do 1 mm
- premer obloge 1 mm ali več
- numerična odprtina $NA = 0,8$
- temperaturno območje – 20°C do 100°C

3. Druge lastnosti:

- velika trpežnost (načelo: naredi si sam)
 - preprosto spajanje in stikanje (konektorji in mehanski stiki)
-

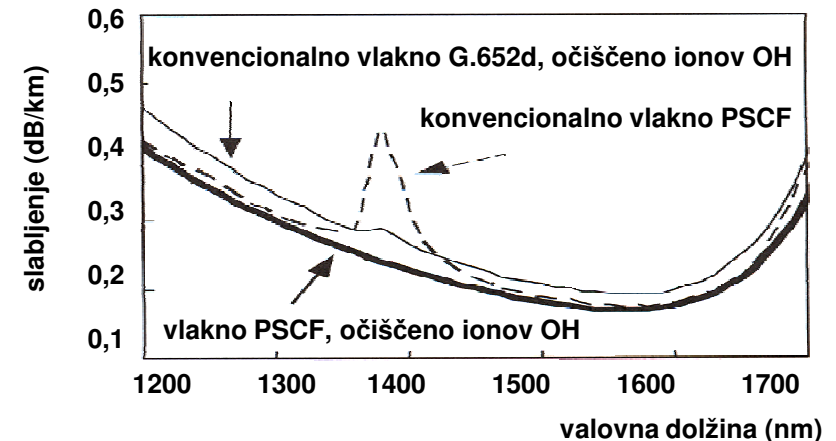
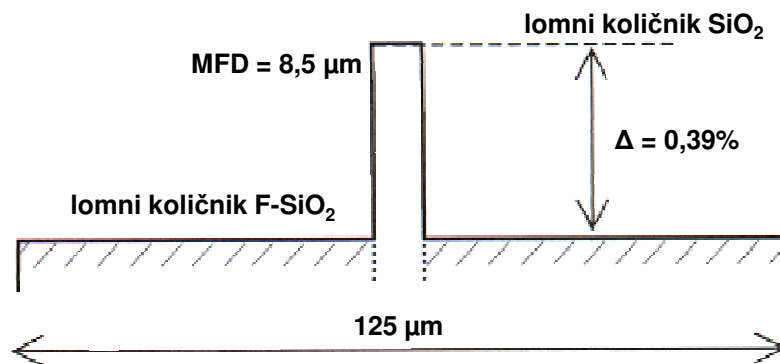
Enorodovno optično vlakno - jedro iz SiO₂

Vlakno PSCF (Pure Silica Core Fiber) očiščeno ionov OH

Lastnosti:

- vlakno brez primesi v jedru in brez nečistoč
- najnižja možna vrednost slabljenja v vseh valovnih pasovih. Rekordno nizka vrednost slabljenja je 0,16 dB/km pri $\lambda = 1550$ nm
- približno standardna vrednost disperzije in disperzijske strmine
- približno standardna vrednost Ramanovega ojačevalnega koeficienta

1. Lomni lik in slabljenje:



Lomni lik vlakna PSCF – snovne lastnosti:

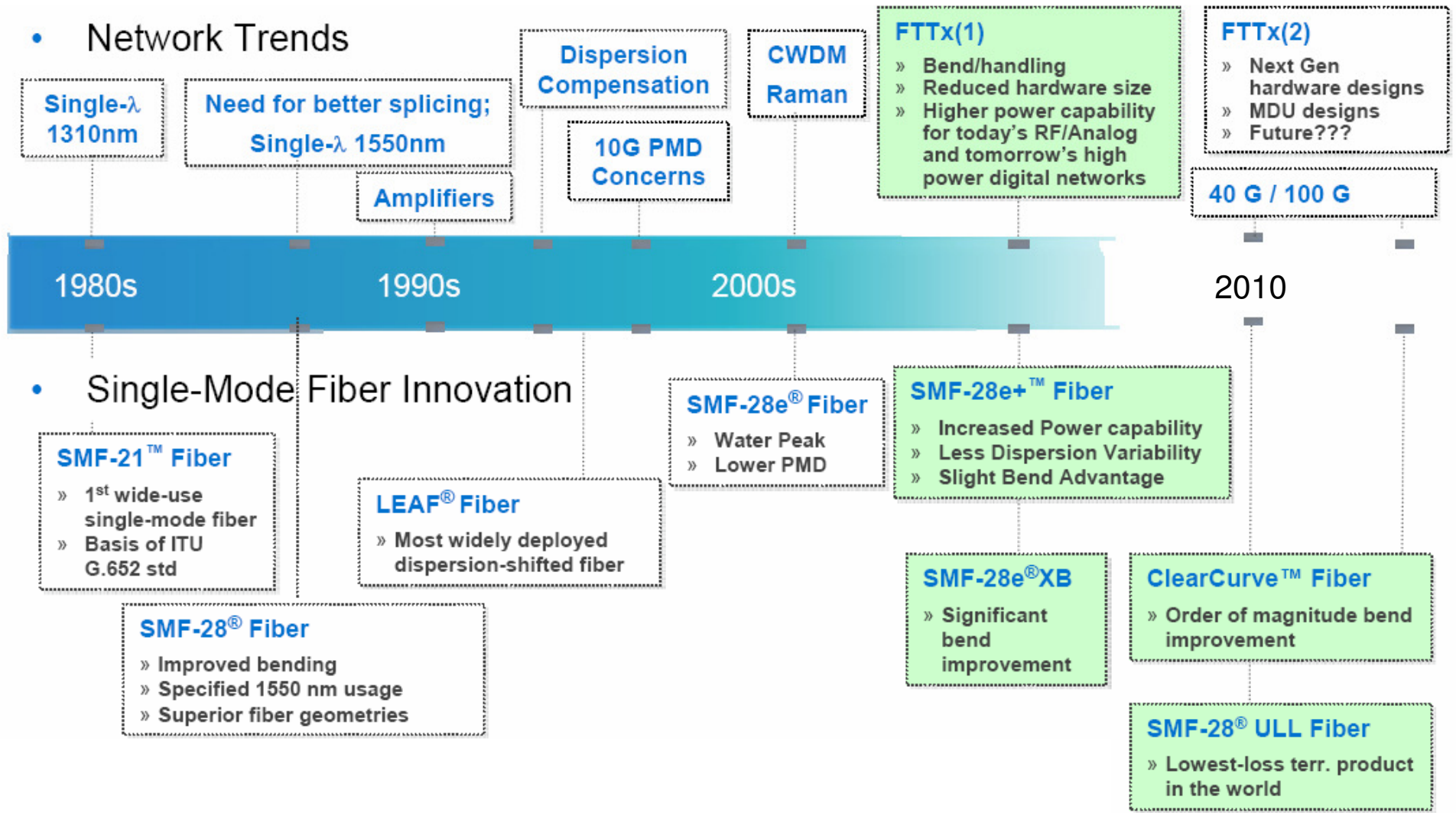
- jedro SiO₂ brez primesi
- obloga SiO₂ + fluor
- snov brez ionov OH

Yamamoto, ECOC 04

Spekter slabljenja v dB/km:

- konvencionalno, očiščeno, vlakno G.652d
- konvencionalno vlakno PSCF
- očiščeno vlakno PSCF

Vlakna in sistemi – inovacije 1980-2010



Mehanizmi vodenja svetlobe

- **Optični valovodi – svetlovodi:**

- planarni svetlovodi (integrirana tehnika)
- vlakenski svetlovodi (prenos, različne naprave)

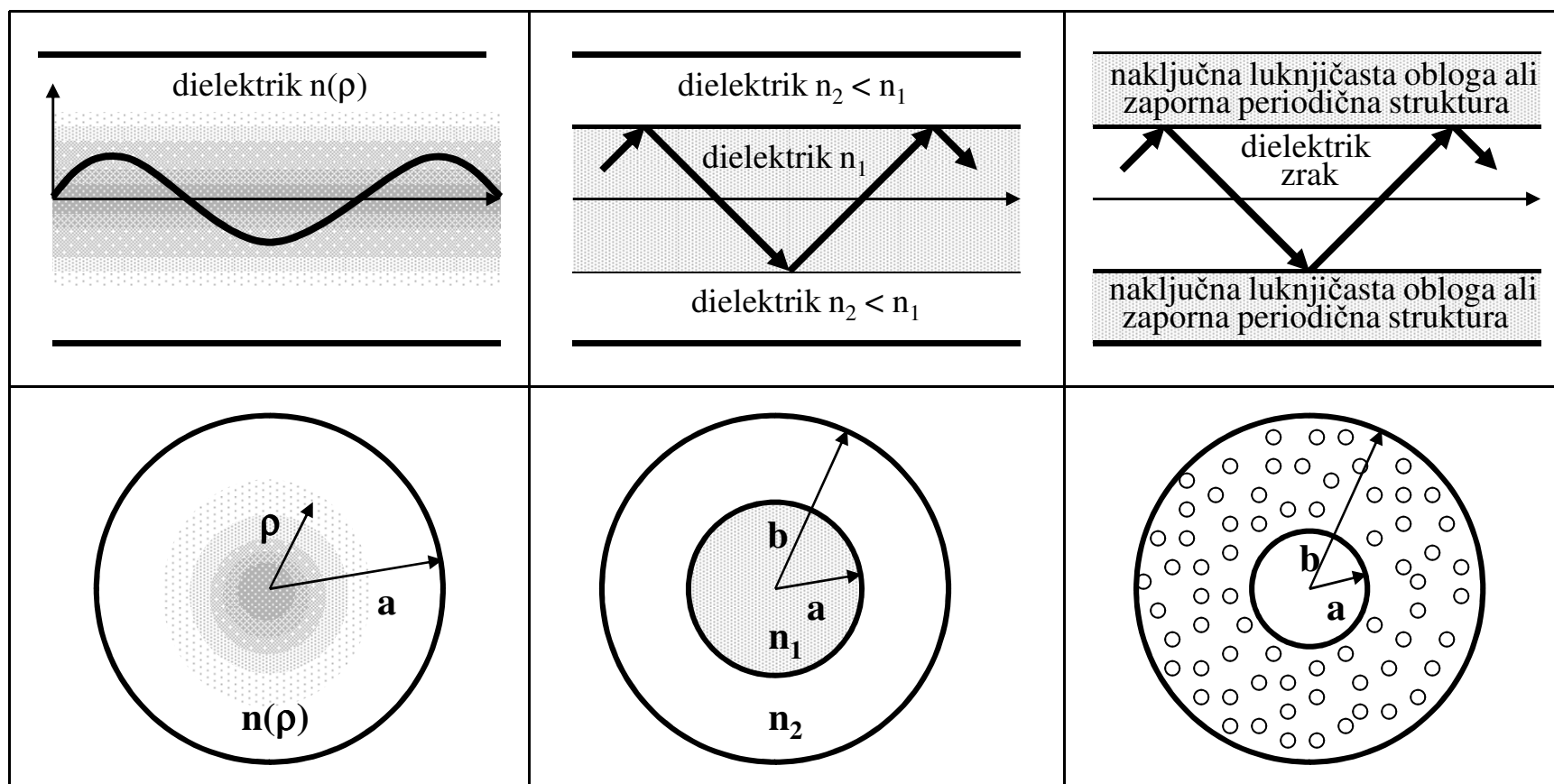
- **Mehanizmi vodenja valovanja po svetlovodu:**

- LOM

- POPOLNI NOTRANJI ODBOJ

- n_{ef} OBLOGE ali

- ZAPORNI PAS



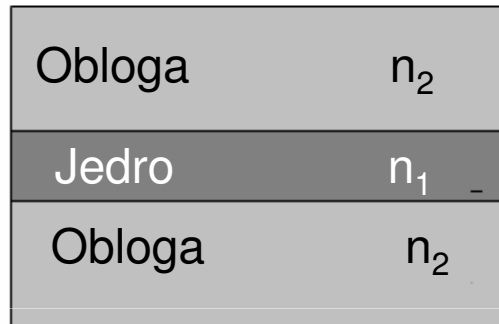
Valovni rodovi: hibridni HE ali EH (valovi TE in TM so poseben primer, TEM ne obstaja)

Dielektrični valovodi – planarni in vlakna

Planarni valovodi

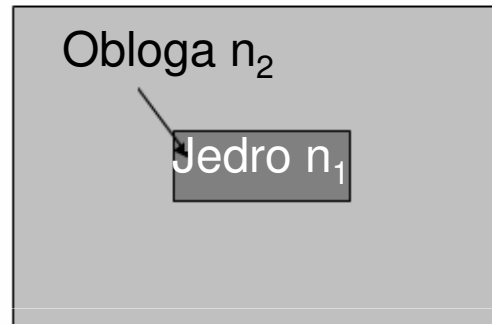
Enodimenzionalni

plastni

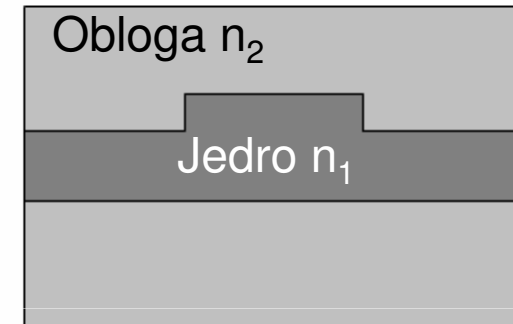


Dvodimenzionalni

trakast

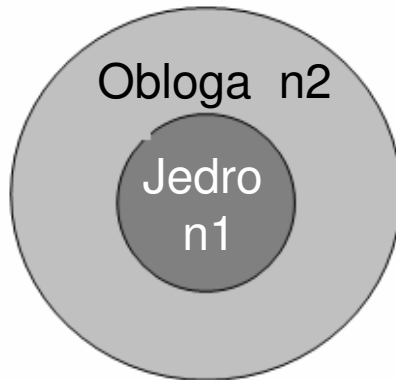


grebenast/rebrast

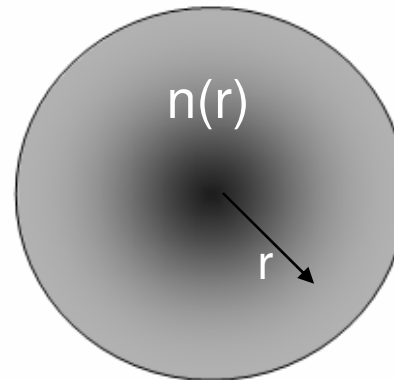


Cilindrični valovodi (vlakna)

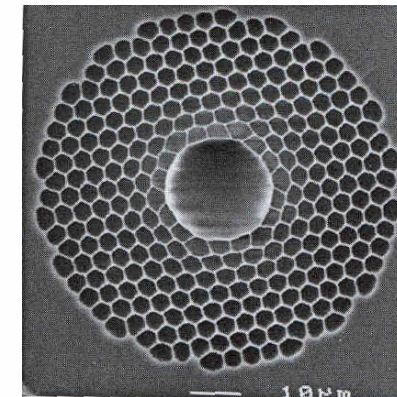
Stopničasti lomni lik



Gradientni lomni lik (GRIN)

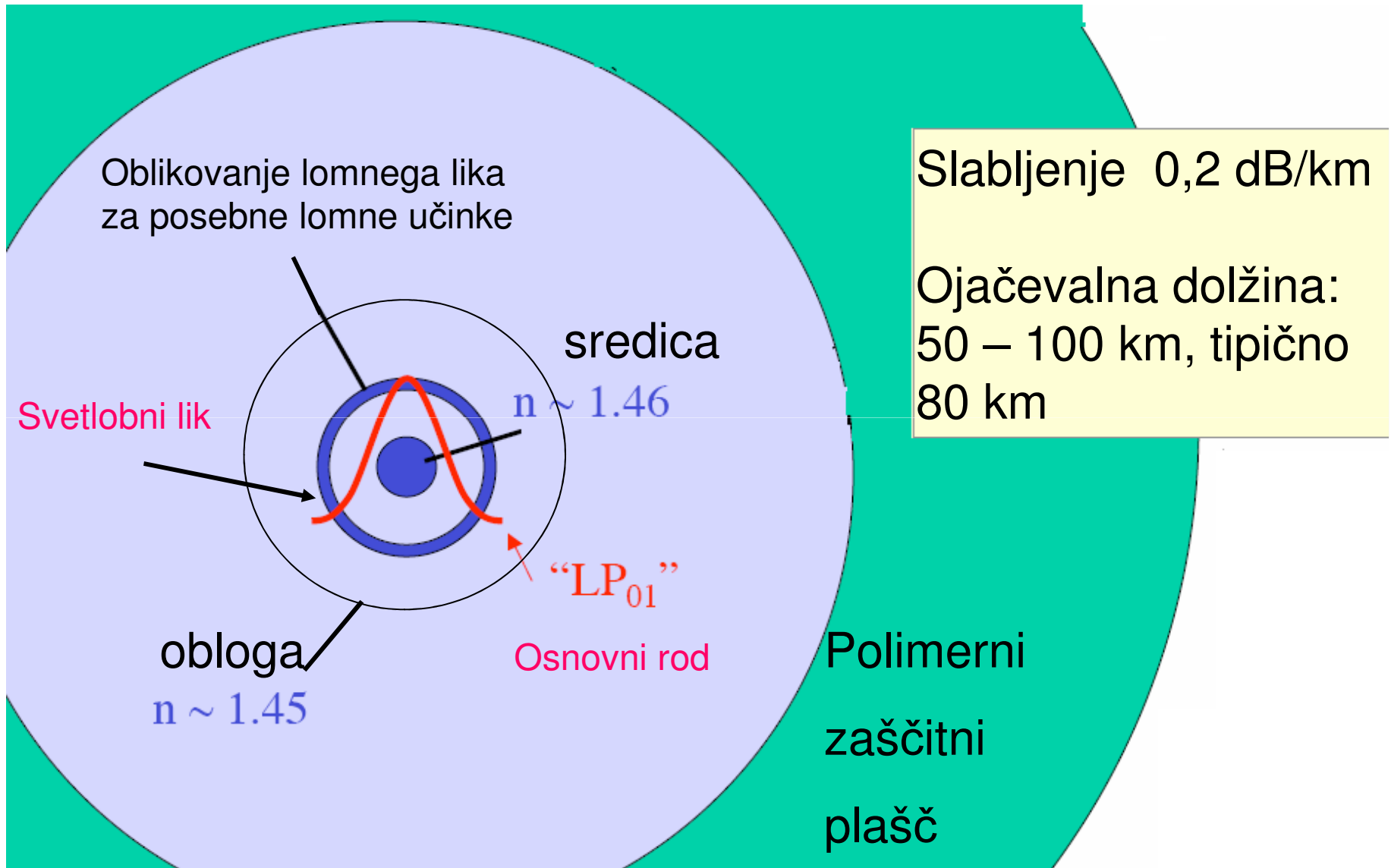


Mikrostrukturno vlakno

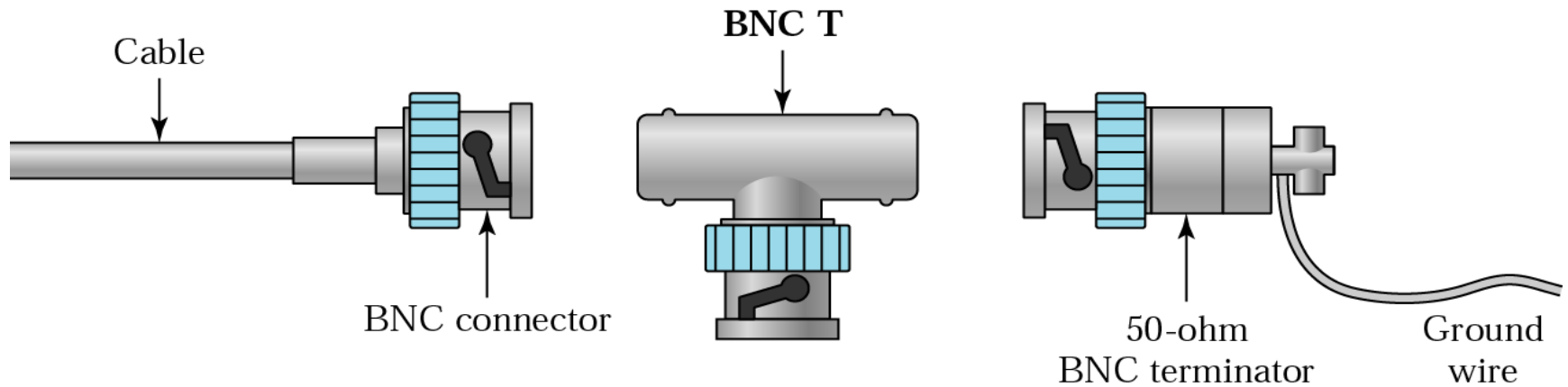
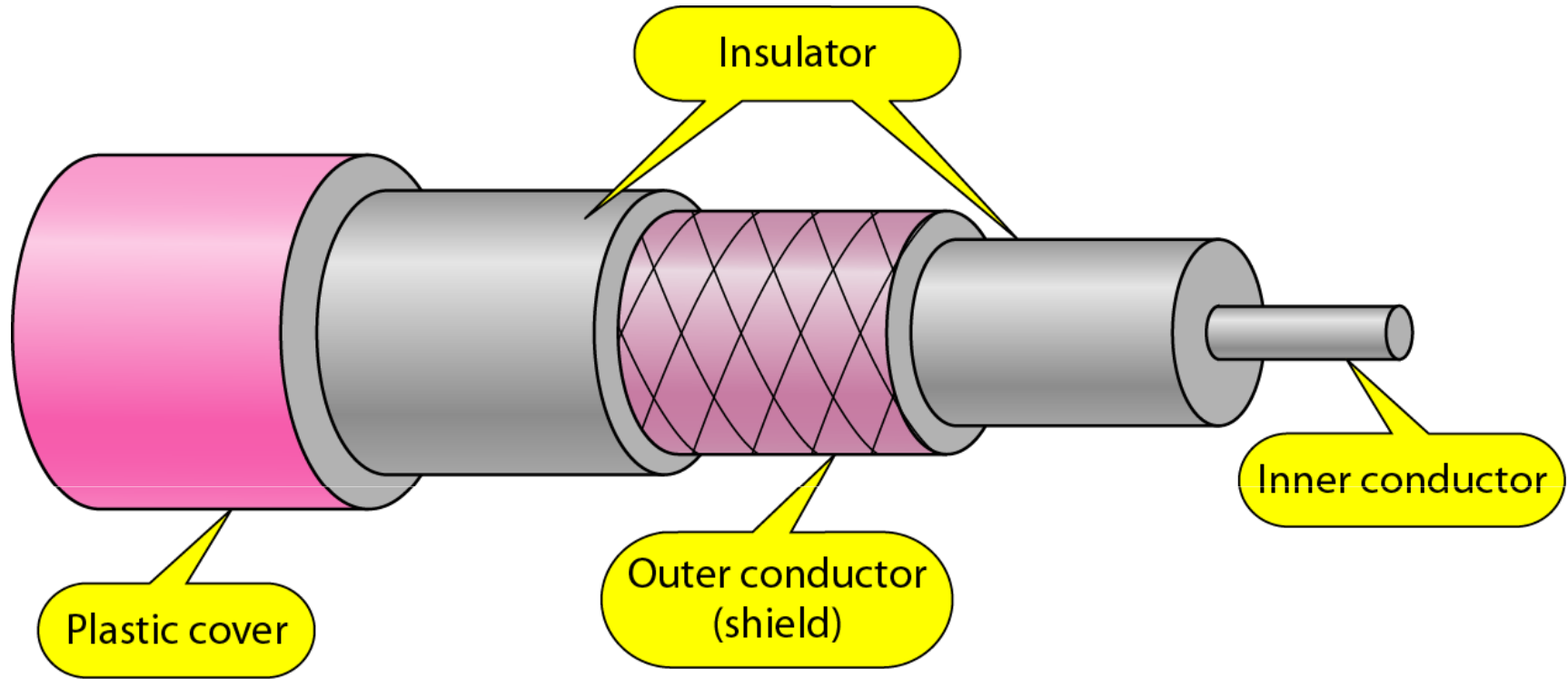


Valovod je vsaka kovinsko-dielektrična struktura, ki ima v prečnem preseku **defekt**.

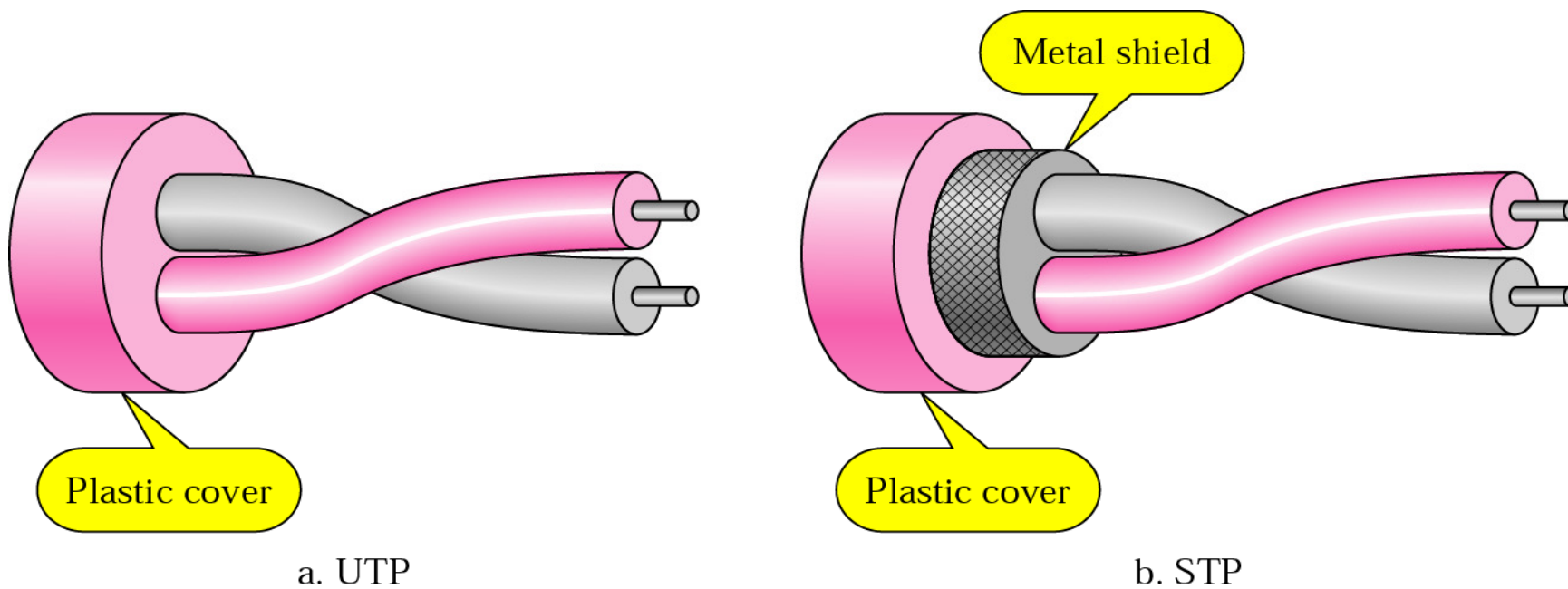
Optično vlakno, splošno



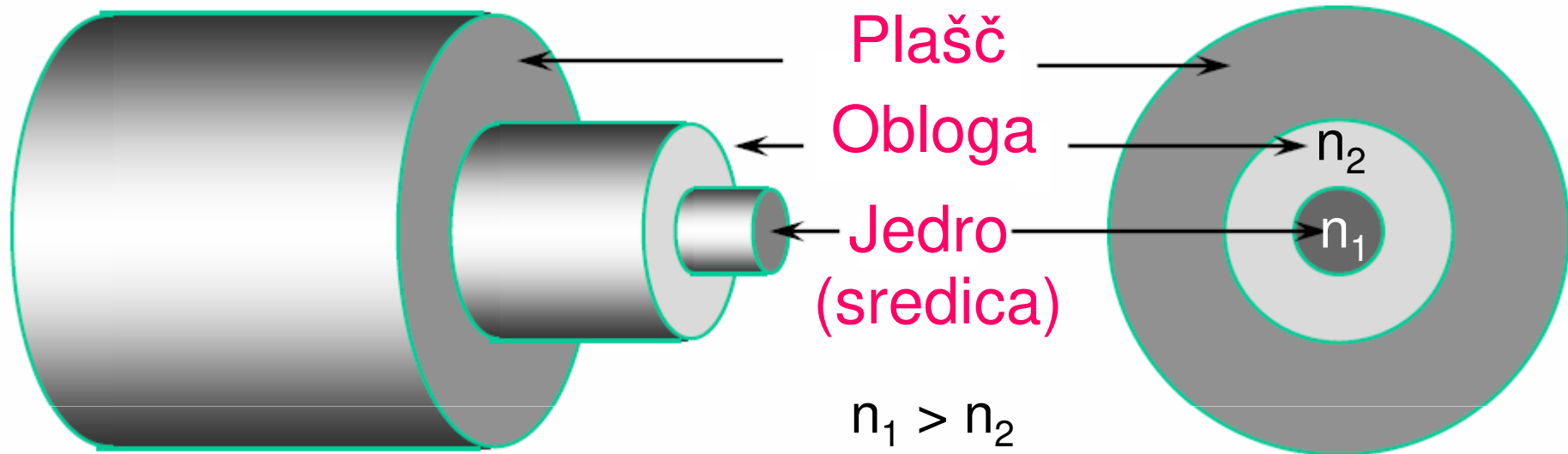
Koaksialni kabli



Žični par



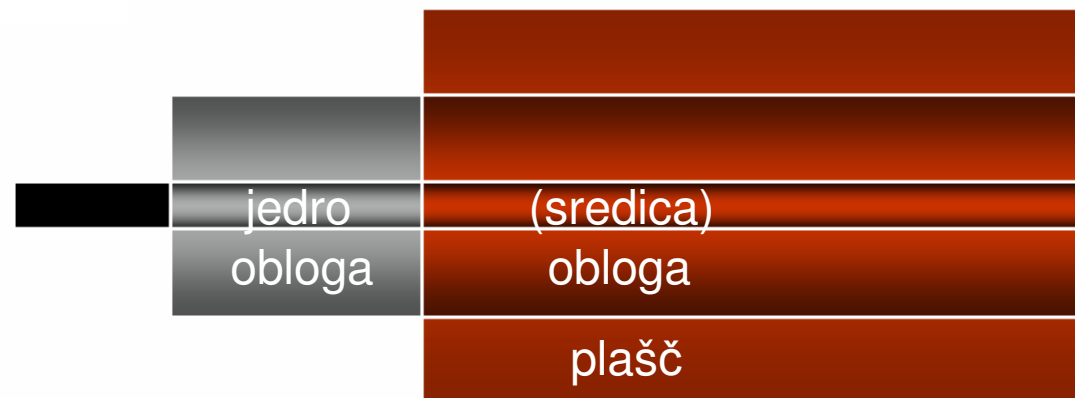
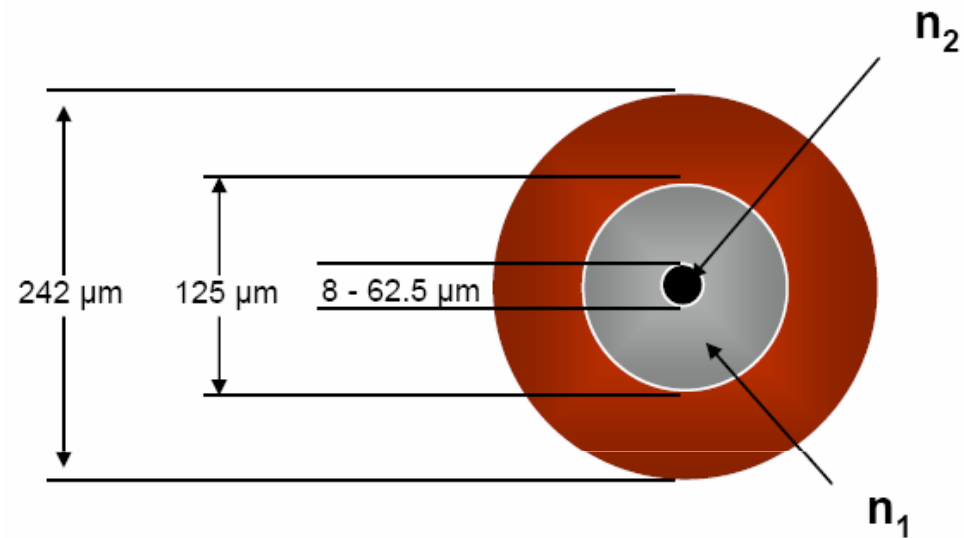
Optično vlakno



- Skozi jedro se širi velika večina prenašane optične moči; snov jedra odloča o slabljenju vlakna
- Obloga ščiti svetlobo v jedru pred vplivom okolice; v njej se v smeri vlakna širi radialno evanescentno polje
- Plašč rabi za mehansko zaščito vlakna; zaščitnih plaščev je lahko več.

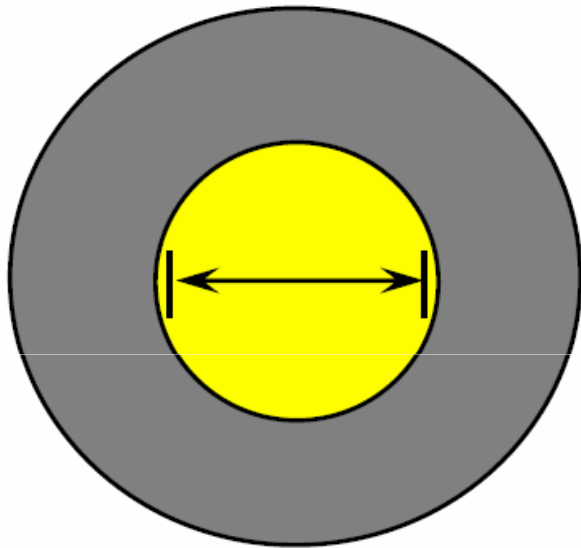
Zgradba optičnega vlakna

- Jedro (sredica)
prevaja svetlobo
 SiO_2 s primesmi (GeO_2)
 SiO_2 brez primesi
- Obloga
varuje svetlobo v jedru
 SiO_2 brez primesi
 SiO_2 s primesmi (F)
- Plašč
varuje vlakno
zaščitna plastika
akrilat



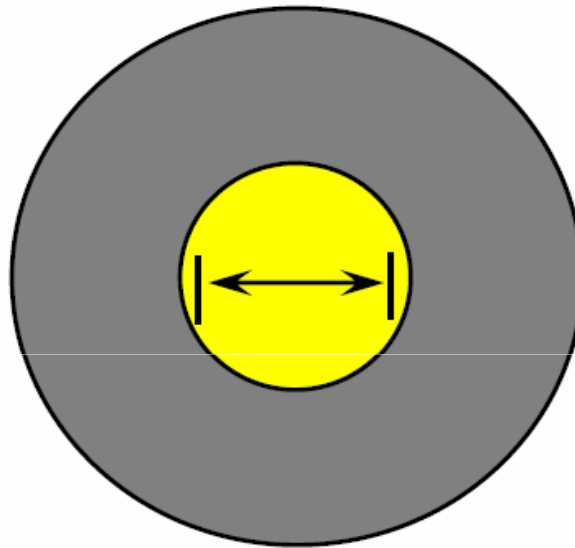
Vrsta vlaken po premeru jedra

Mnogorodovno



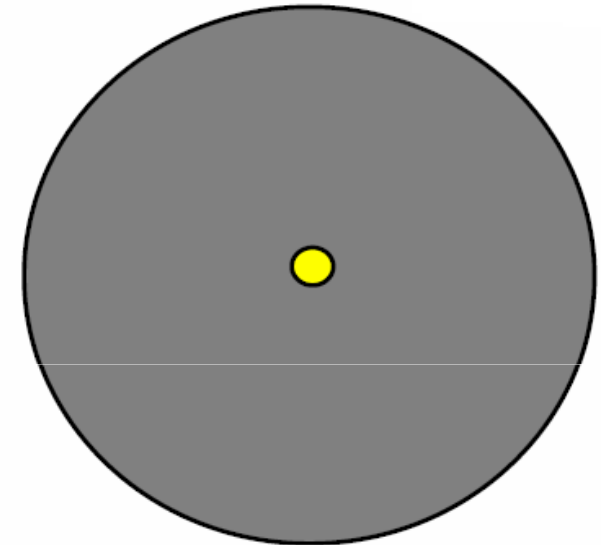
62,5 μm

Mnogorodovno



50 μm

Enorodovno

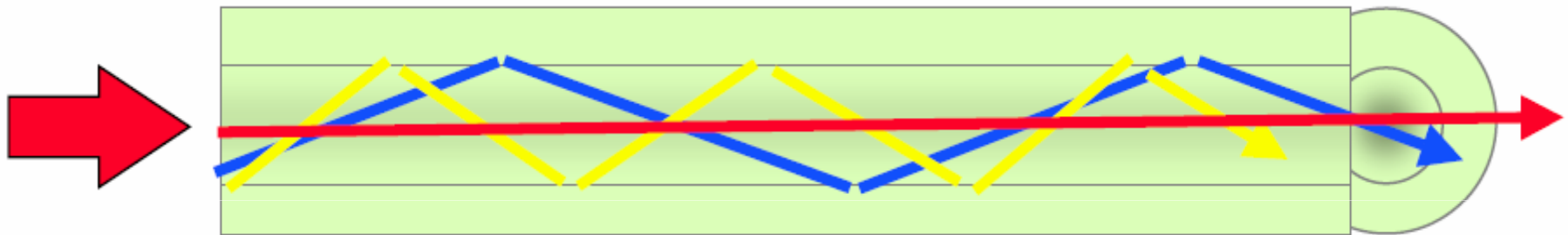


8,3 μm

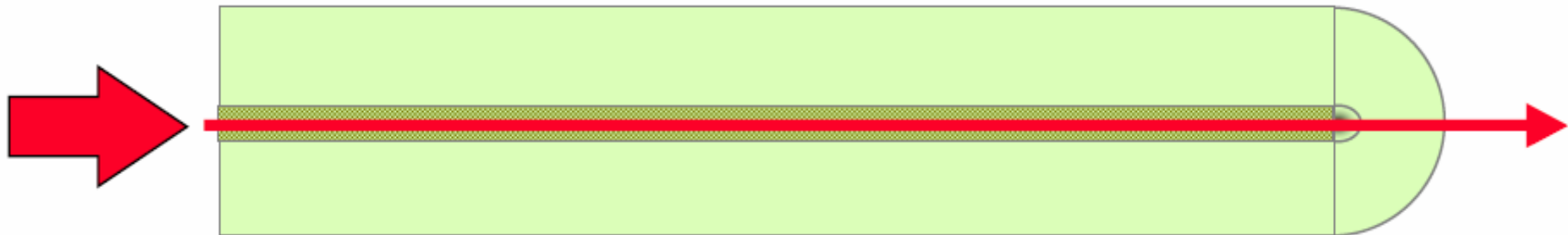
- Mnogorodovna vlakna imajo zaradi večjega premera jedra boljše mehanske in manipulativne lastnosti ter slabše prenosne lastnosti.
- Enorodovna vlakna imajo zaradi mnogo manjšega premera jedra slabše toda obvladljive mehanske in manipulativne lastnosti ter mnogo boljše prenosne lastnosti.

Mnogorodovno in enorodovno vlakno

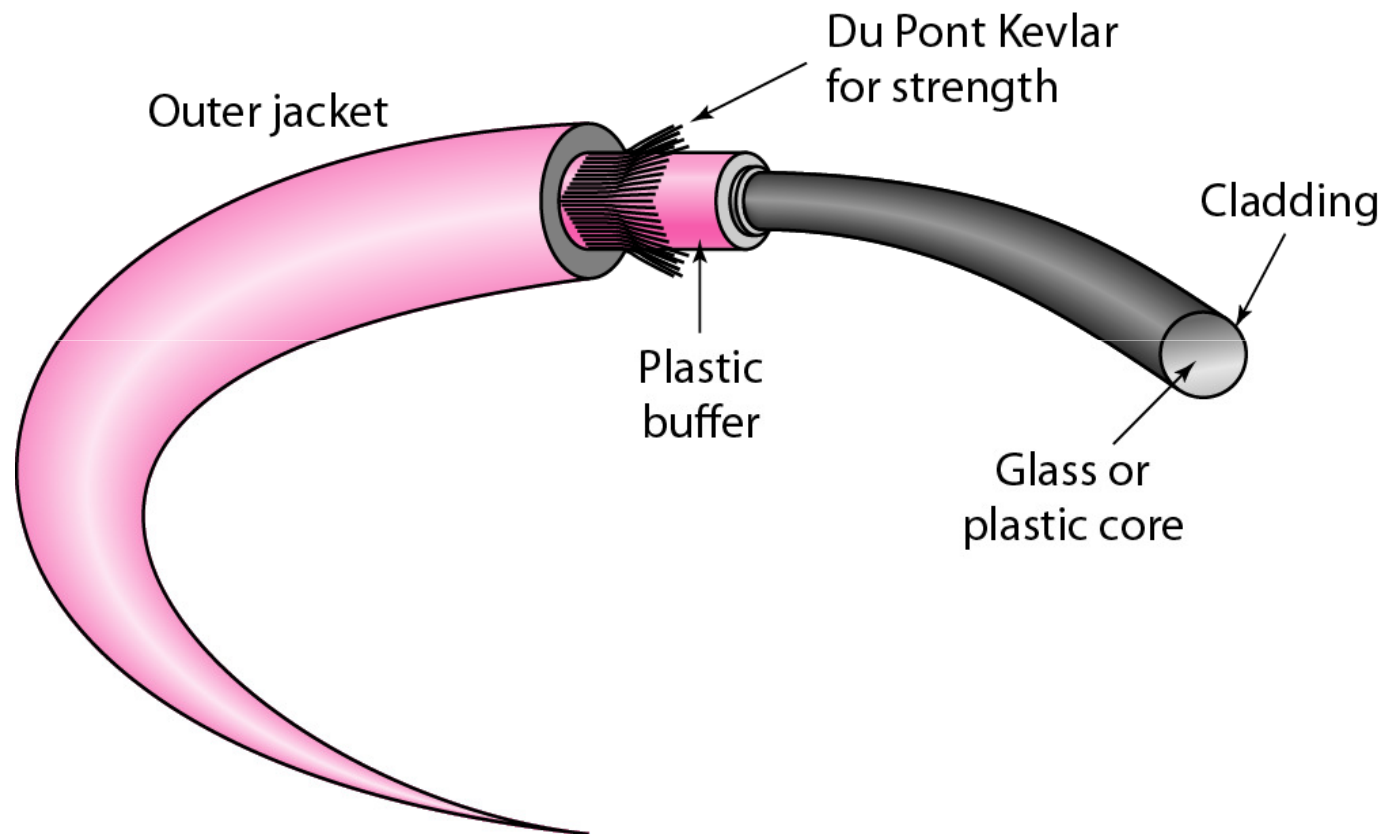
Mnogo rodov valovanja v jedru vlakna
velikega premera



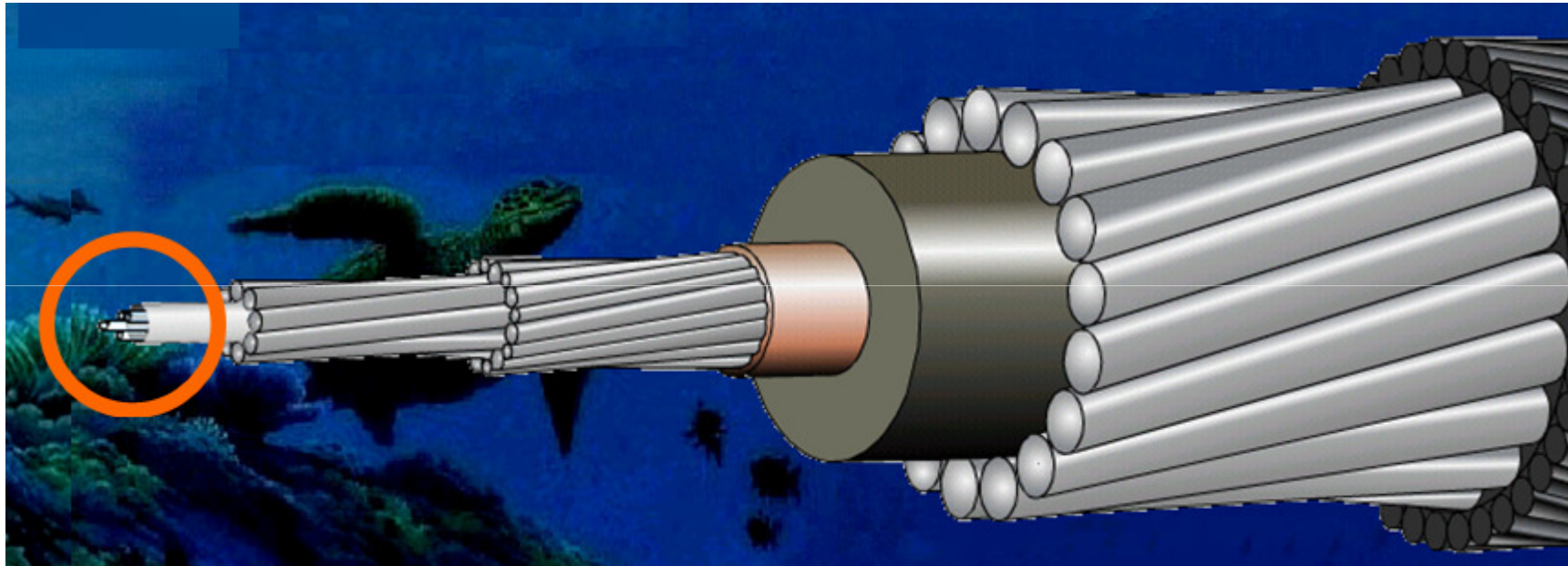
En rod valovanja v tankem jedru vlakna



Zaščita optičnega vlakna

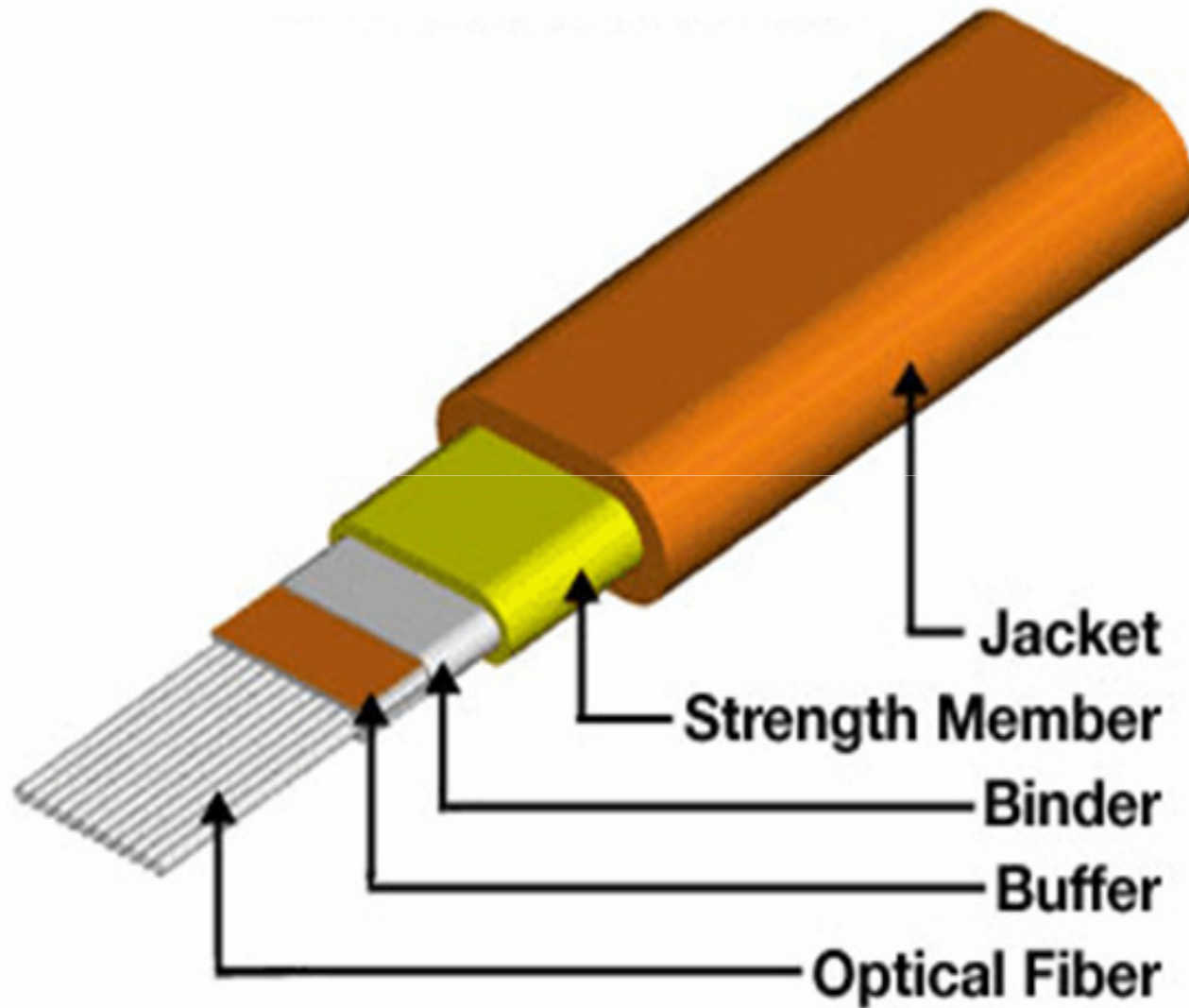


Zaščita podmorskega optičnega kabla



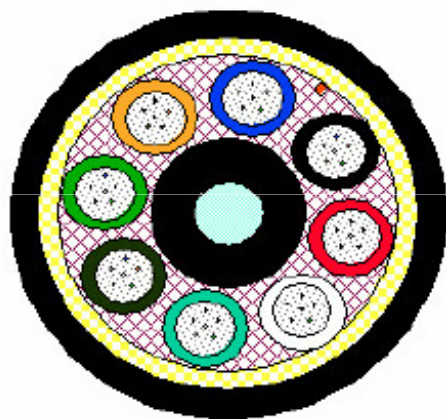
Večkratna mehanska (plastična in kovinska) zaščita vlakna

Optični trakasti kablovi

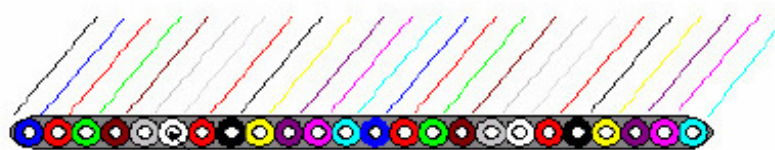
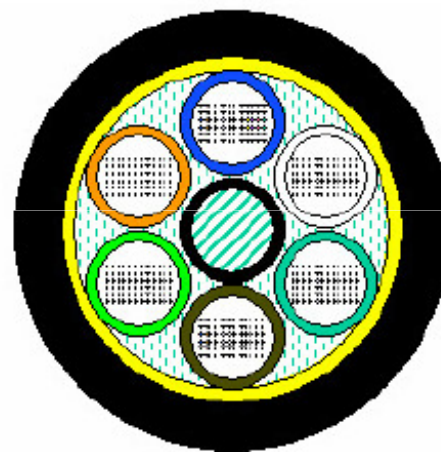


Kabliranje vlaken

Posamezna vlakna
v cevkah



Posamezni vlakenski
trakovi v cevkah



Standardizacija

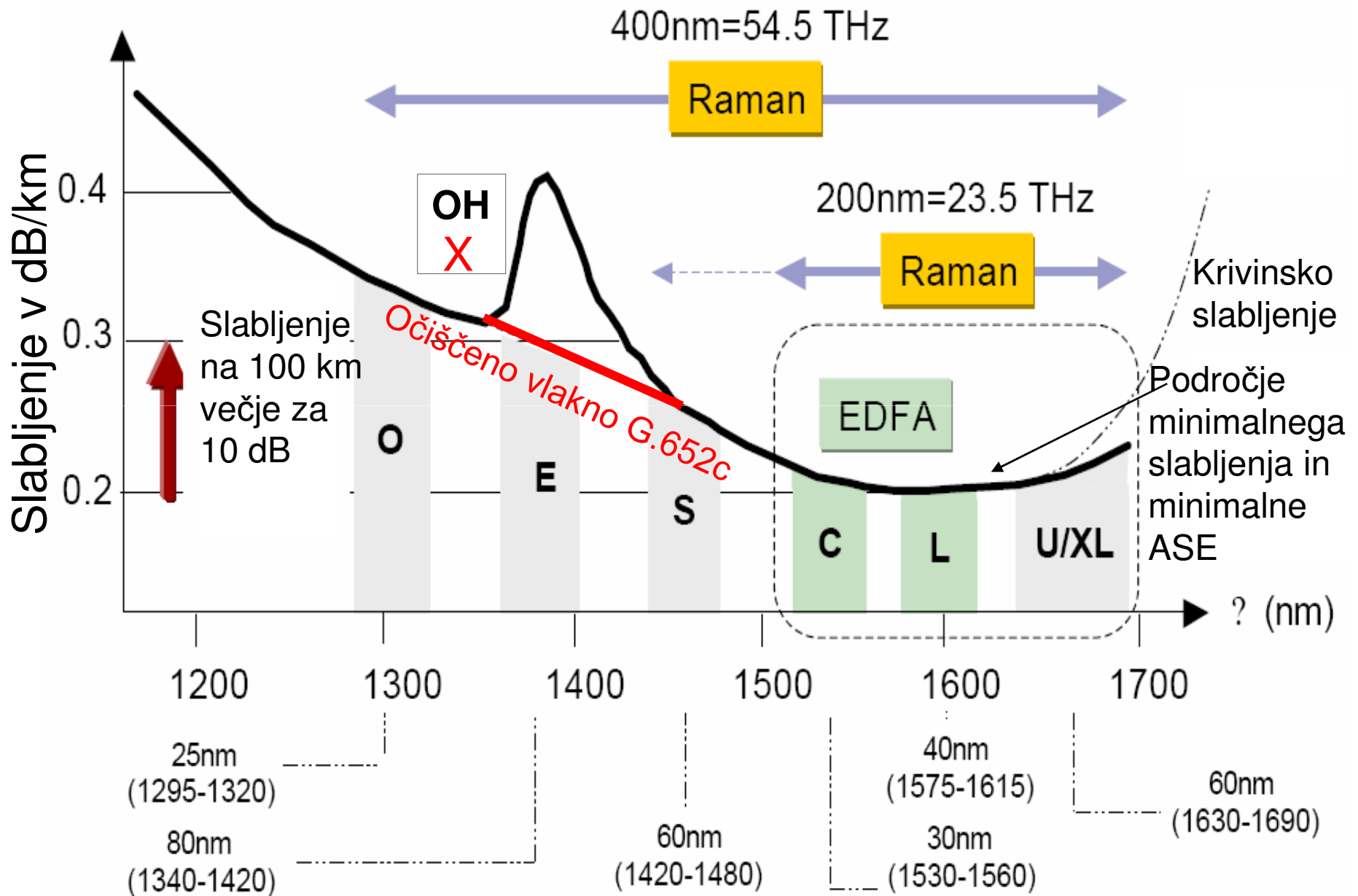
Standardizirani valovni pasovi

<i>Band</i>	<i>Wavelength (nm)</i>
<i>O</i>	1260 – 1360
<i>E</i>	1360 – 1460
<i>S</i>	1460 – 1530
<i>C</i>	1530 – 1565
<i>L</i>	1565 – 1625
<i>U</i>	1625 – 1675

konvencionalni
pas

razširjeni
pas nizkega
slabljenja

Spekter optičnega vlakna G.652



ITU-T standardizacija optičnega vlakna

- G.651 Mnogorodovno optično vlakno (MMF)
- G.652 Standardno enorodovno optično vlakno (SSMF)
- G.653 Enorodovno vlakno nične disperzije na 1550nm
- G.654 Enorodovno vlakno s premaknjeno mejno λ_c
- G.655 Enorodovno vlakno nenične disperzije na 1550 nm
- G.656 Enorodovno vlakno nenične disperzije na 1550 nm za širokopasovne transportne sisteme
- G.657 Enorodovno optično vlakno neobčutljivo na krivine za notranje instalacije.

Posebna vlakna

- **Vlakno znižane disperzijske strmine (RSF)**
- **Disperzijsko kompenzacijsko vlakno (DCF):**
 - velika negativna vrednost koeficienta disperzije in koeficienta disperzijske strmine ($D = -100$ do -150 , $S = -0,15$ do $-0,40$)
 - velika vrednost slabljenja, majhna vrednost efektivne površine, povišana vrednost nelinearnega količnika in povišana vrednost Ramanovega ojačevalnega koeficienta ($\alpha = 0,5$ do $0,7$, $A_{\text{ef}} = 15$ do $25 \mu\text{m}^2$, $n_2 = 3,9 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$, $g_{\text{R}} = 10^{-12} \text{ m/W}$)
- **Ojačevalno vlakno (AF):**
 - snov vlakna
(SiO_2 , Al - Ge - SiO_2 , tellurit, ZBLAN)
 - ojačevalna primes
(Er^{3+} , Yb^{3+} , La^{3+} , Tu^{3+} , Pr^{3+} , Nd^{3+})
- **Vlakno povečane efektivne površine (LEAF):**
 - $A_{\text{ef}} = 70 - 150 \mu\text{m}^2$ (in več eksperimentalno)

Posebne vrste enorodovnih vlaken

ITU-T G.652 a, b, c ,d:	Standardno enorodovno optično vlakno (SSMF)
ITU-T G.653 a, b:	Optično vlakno nične disperzije na $\lambda=1,55 \mu\text{m}$
ITU-T G.654 a, b, c:	Optično vlakno s premaknjeno mejno valovno dolžino λ_m
ITU-T G.655 a, b, c:	SLO: Optično vlakno nenične disperzije na $\lambda=1,55 \mu\text{m}$
ITU-T G.656:	Optično vlakno z nenično disperzijo na $\lambda=1,55 \mu\text{m}$ za širokopasovni prenos

ITU-T G.652 a, b, c ,d:	Single-mode optical fibre (Standard fibre!)
ITU-T G.653 a, b:	Dispersion-shifted single-mode optical fibre
ITU-T G.654 a, b, c:	ANGL: Cut-off shifted single-mode optical fibre
ITU-T G.655 a, b, c:	Non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre
ITU-T G.656:	Non-Zero Dispersion for Wideband Optical Transport

A

a vlakno za dostop, LAN in MAN

b

b vlakno za dostop, LAN in MAN

c vlakno, očiščeno OH ionov (min. slabljenje), CWDM

d vlakno, očiščeno OH ionov (min. slabljenje), CWDM

Vlakno SMF-28 (Corning)

Podatki o disperziji:

Cable Cutoff Wavelength (λ_{ccf})

$$\lambda_{ccf} \leq 1260 \text{ nm}$$

Mode-Field Diameter

$$9.2 \pm 0.4 \text{ } \mu\text{m at } 1310 \text{ nm}$$

$$10.4 \pm 0.8 \text{ } \mu\text{m at } 1550 \text{ nm}$$

Dispersion

Zero Dispersion Wavelength (λ_0):

$$1302 \text{ nm} \leq \lambda_0 \leq 1322 \text{ nm}$$

Zero Dispersion Slope (S_0):

$$\leq 0.092 \text{ ps}/(\text{nm}^2 \cdot \text{km})$$

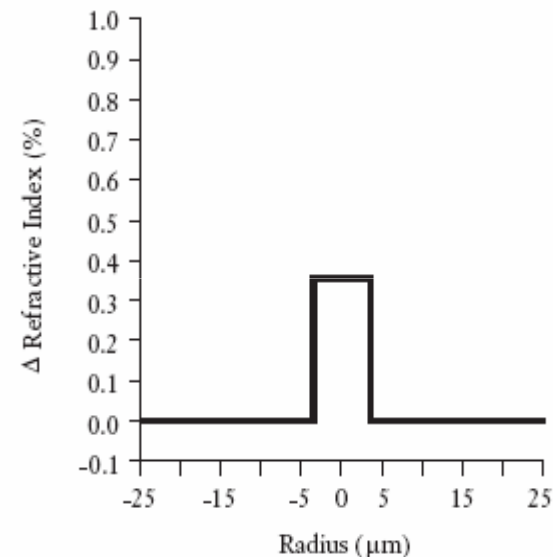
$$\text{Dispersion} = D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left[\lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right] \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km}),$$

$$\text{for } 1200 \text{ nm} \leq \lambda \leq 1600 \text{ nm}$$

λ = Operating Wavelength

SMF-28 je v praksi najpogosteje uporabljano optično vlakno

Refractive Index Profile (typical fiber)



Polarization Mode Dispersion

Fiber Polarization Mode Dispersion (PMD)

	Value ($\text{ps}/\sqrt{\text{km}}$)
PMD Link Value	$\leq 0.1^*$
Maximum Individual Fiber	≤ 0.2

Vlakno SMF-28 (Corning)

Podatki o slabljenju:

Attenuation

Wavelength (nm)	Attenuation* (dB/km)	
	Premium	Standard
1310	≤0.34	≤0.35
1550	≤0.20	≤0.22

*Alternate attenuation values available upon request

Point Discontinuity

No point discontinuity greater than 0.10 dB at either 1310 nm or 1550 nm.

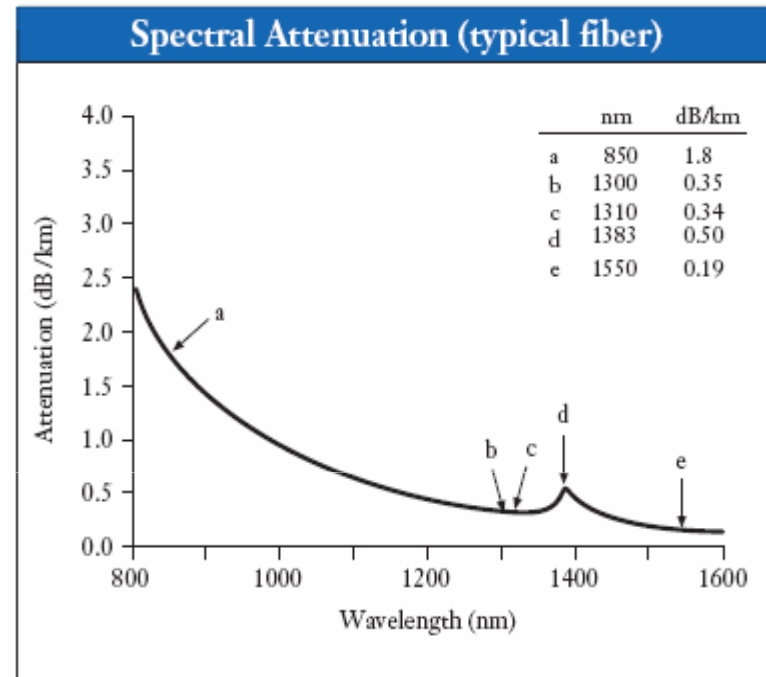
Attenuation at the Water Peak

The attenuation at 1383 ± 3 nm shall not exceed 2.1 dB/km.

Attenuation vs. Wavelength

Range (nm)	Ref. λ (nm)	Max. α Difference (dB/km)
1285 - 1330	1310	0.05
1525 - 1575	1550	0.05

The attenuation in a given wavelength range does not exceed the attenuation of the reference wavelength (λ) by more than the value α .



Attenuation with Bending

Mandrel Diameter (mm)	Number of Turns	Wavelength (nm)	Induced Attenuation* (dB)
32	1	1550	≤0.50
50	100	1310	≤0.05
50	100	1550	≤0.10
60	100	1550	≤0.05

*The induced attenuation due to fiber wrapped around a mandrel of a specified diameter.

Vlakno SMF-28 (Corning)

Environmental Specifications

Environmental Test Condition	Induced Attenuation 1310 nm/1550 nm (dB/km)
Temperature Dependence -60°C to +85°C*	≤0.05
Temperature-Humidity Cycling -10°C to +85°C*, up to 98% RH	≤0.05
Water Immersion, 23±2°C*	≤0.05
Heat Aging, 85±2°C*	≤0.05

*Reference temperature = +23°C

Operating Temperature Range

-60°C to +85°C

Dimensional Specifications

Length (km/reel): fiber lengths available up to 50.4*

* Longer spliced lengths available at a premium.

Glass Geometry

Fiber Curl: ≥ 4.0 m radius of curvature

Cladding Diameter: 125.0 ± 0.7 μm

Core-Clad Concentricity: ≤ 0.5 μm

Cladding Non-Circularity: ≤ 1.0%

Defined as: $\left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$

Coating Geometry

Coating Diameter: 245 ± 5 μm

Coating-Cladding Concentricity: <12 μm

Mechanical Specifications

Proof Test

The entire fiber length is subjected to a tensile proof stress ≥ 100 kpsi (0.7 GN/m²)*.

* Higher proof test levels available at a premium.

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter: 8.2 μm

Numerical Aperture: 0.14

NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): 1313 nm

Zero Dispersion Slope (S_0): 0.086 ps/(nm²·km)

Refractive Index Difference: 0.36%

Effective Group Index of Refraction, (N_{eff} @ nominal MFD):

1.4677 at 1310 nm

1.4682 at 1550 nm

Fatigue Resistance Parameter (n_d): 20

Coating Strip Force:

Dry: 0.6 lbs. (3N)

Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)

Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns pulse width):

1310 nm: -77 dB

1550 nm: -82 dB

Vlakno SMF-28 (Corning)

Splošni podatki:

Operating Temperature Range

-60°C to +85°C

Dimensional Specifications

Length (km/reel): fiber lengths available up to 50.4*

* Longer spliced lengths available at a premium.

Glass Geometry

Fiber Curl: ≥ 4.0 m radius of curvature

Cladding Diameter: 125.0 ± 0.7 μm

Core-Clad Concentricity: ≤ 0.5 μm

Cladding Non-Circularity: $\leq 1.0\%$

Defined as: $\left[1 - \frac{\text{Min. Cladding Diameter}}{\text{Max. Cladding Diameter}} \right] \times 100$

Coating Geometry

Coating Diameter: 245 ± 5 μm

Coating-Cladding Concentricity: <12 μm

Performance Characterizations

Characterized parameters are typical values.

Core Diameter: 8.2 μm

Numerical Aperture: 0.14

NA is measured at the one percent power level of a one-dimensional far-field scan at 1310 nm.

Zero Dispersion Wavelength (λ_0): 1313 nm

Zero Dispersion Slope (S_0): 0.086 ps 2 /(nm 2 ·km)

Refractive Index Difference: 0.36%

Effective Group Index of Refraction, (N_{eff} @ nominal MFD):

1.4677 at 1310 nm

1.4682 at 1550 nm

Fatigue Resistance Parameter (n_d): 20

Coating Strip Force:

Dry: 0.6 lbs. (3N)

Wet, 14-day room temperature: 0.6 lbs. (3N)

Rayleigh Backscatter Coefficient (for 1 ns pulse width):

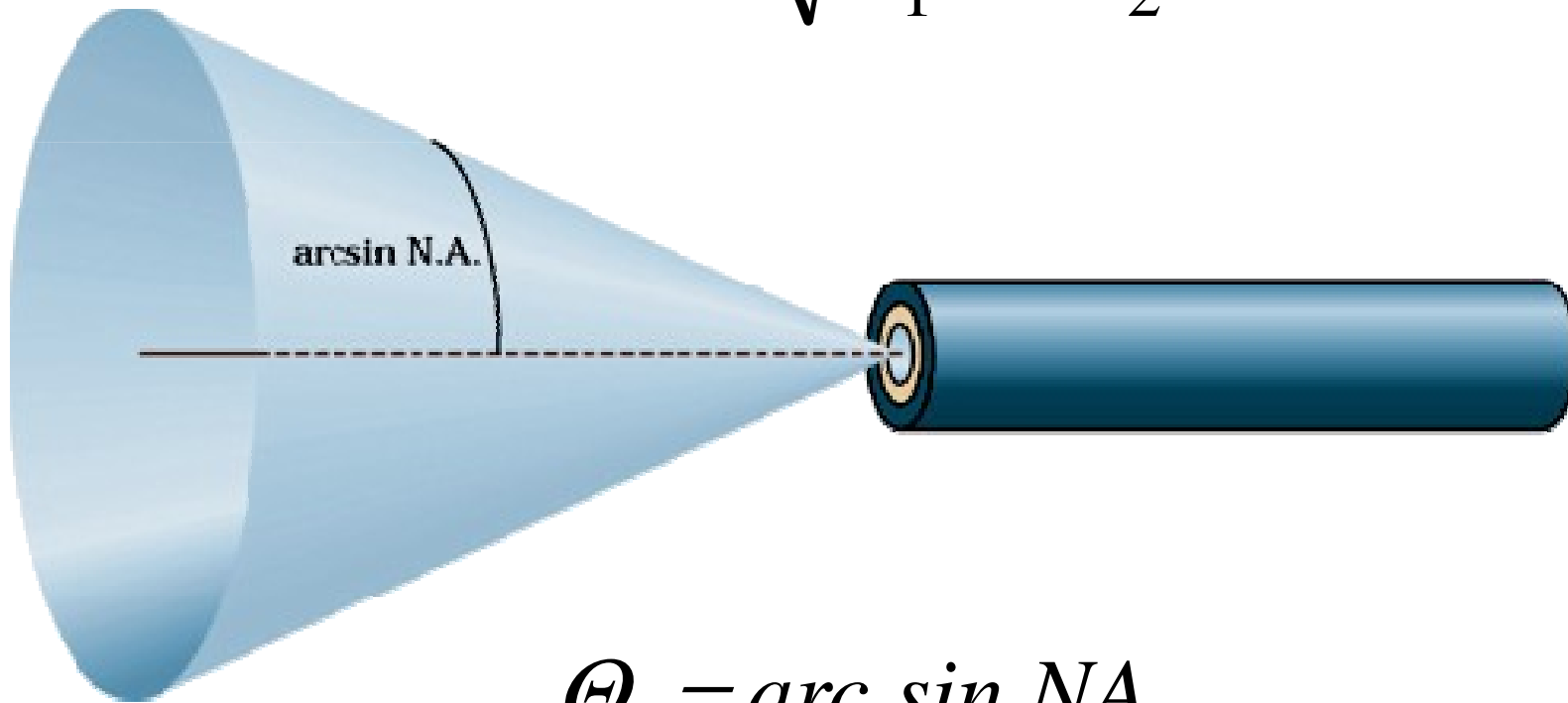
1310 nm: -77 dB

1550 nm: -82 dB

Parametri vlakna

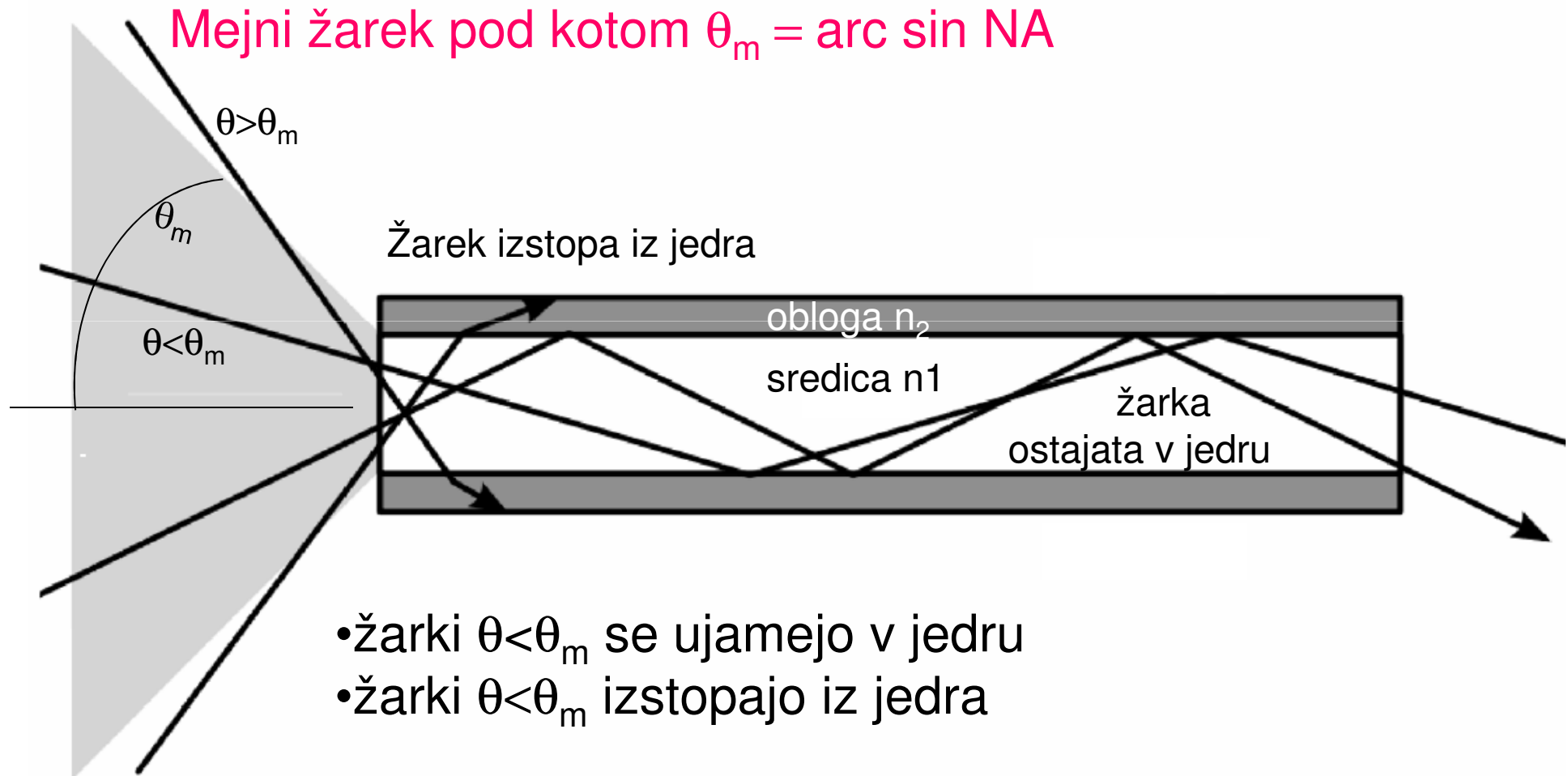
Numerična odprtina vlakna

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

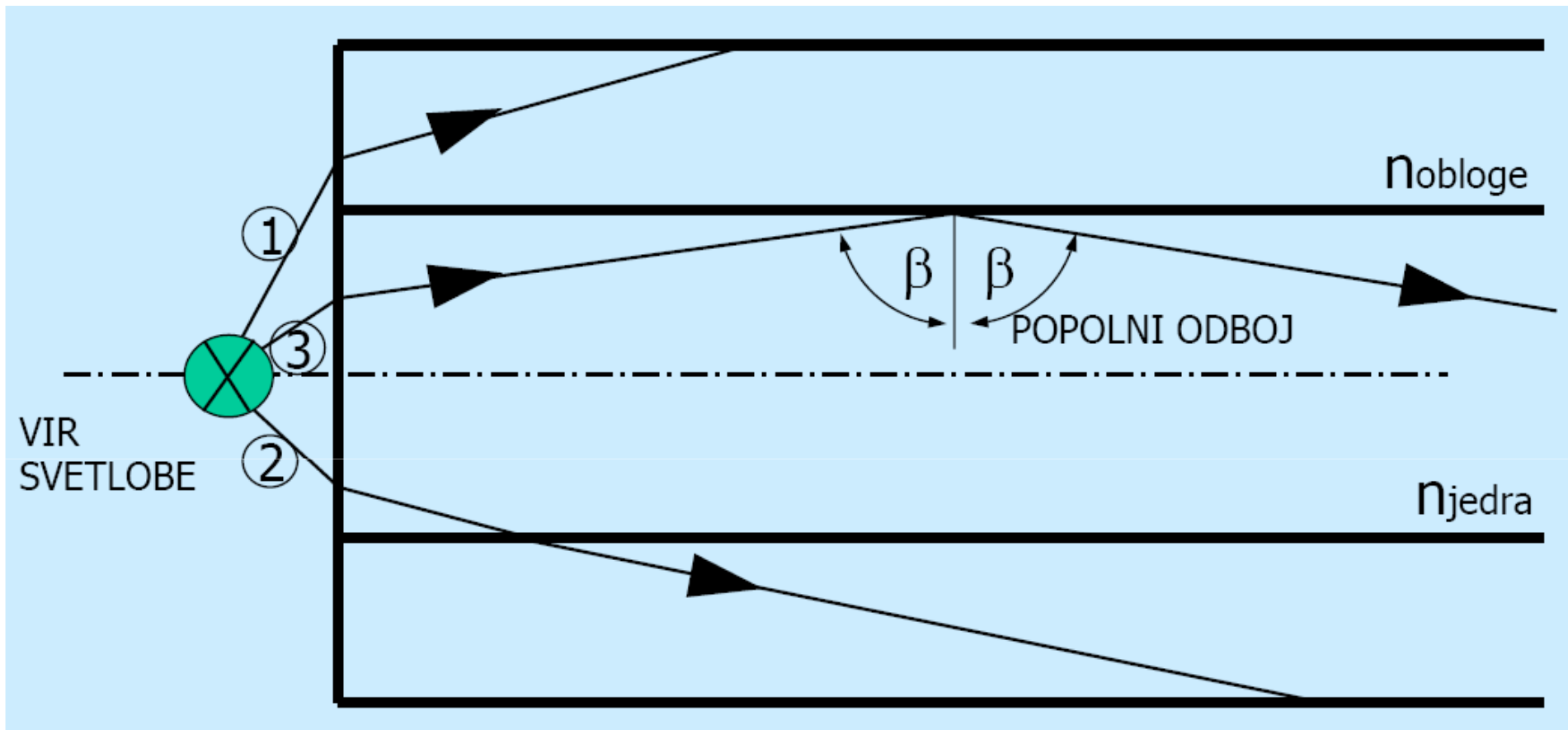


$$\Theta = \text{arc sin } NA$$

Vstop in ujetje žarkov v jedru



Vstop svetlobe v vlakno



1. Žarek se sklaplja v oblogo, svetloba je izgubljena.
2. Žarek se sklaplja z jedrom, oblogo zadene pod prevelikim kotom in se izgubi v oblogo.
3. Žarek se sklaplja z jedrom, oblogo zadene pod položnim kotom in ostaja ujet v jedru.

Pomembni parametri optičnega vlakna

Numerična odprtina: $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

Normirana frekvenca: $V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA$ $V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

Število rodov: $\# \text{ Modes} \approx \frac{4}{\pi^2} V^2$ $V \gg 1$

Mejna valovna dolžina: $\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \times NA$

Efektivna površina

$$A_{ef} = 2\pi \frac{\left(\int_0^{\infty} |E(r)|^2 r dr \right)^2}{\int_0^{\infty} |E(r)|^4 r dr}$$

Efektivna površina daje podatek, kako je sredica vlakna izkoriščena za prenos svetlobe

Je fizikalna definicija za določitev efektivne velikosti jedra.

Nekateri podatki

	Effective area (μm^2)	MFD (μm)
SMF G652	80	10.5
NZDSF G655 (LEA)	72	9.4
NZDSF G655 (RS)	52	8.3

Efektivna površina

Rodovni premer

	Cable Cutoff
Standard SMF (G652)	$\leq 1260\text{nm}$
NZDSF (655) (LEA)	$\leq 1480\text{nm}$
NZDSF (655) (RS)	$\leq 1260\text{nm}$

Mejna valovna dolžina

	RDS (1/nm)
NZDSF (LEA) (G655)	0.01
NZDSF (RS) (G655)	0.02
SMF (G652)	0.0035
Standard DCF	0.0022
Wideband DCF	0.0035
NZDSF DCF	0.0064
True wave RS fiber DCF	0.01

Strmina disperzije

Mnogorodovno vlakno

Gradientni lomni lik

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha}$$

Število rodov:

$$M = \frac{\alpha}{\alpha + 2} (akn_1)^2 \Delta$$

α ... potenca upadanja, običajno $\alpha = 2$

α ... zelo velik \rightarrow stopničasto vlakno

Karakteristike prenosnega vlakna

- **Efektivna dolžina (effective length):**

$$L_{ef} \text{ (km)} = \int_0^L e^{-\alpha l} dl = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}) \doteq \frac{1}{\alpha} = \frac{4,343}{\alpha \text{ (dB/km)}}$$

$$L_{ef} \doteq 20 \text{ km}$$

kjer je α koeficient slabljenja vlakna.

- **Efektivna površina (effective area):**

$$A_{ef} \text{ (}\mu\text{m}^2\text{)} = 2\pi \frac{\left(\int_A |E|^2 r dr \right)^2}{\int_A |E|^4 r dr}$$

$$A_{ef} = 60 - 80 \mu\text{m}^2$$

kjer je $E(r)$ porazdelitev polja po prečnem prerezu vlakna.

- **Nelinearni koeficient (non - linear coefficient):**

$$\gamma \text{ (W}^{-1}\text{km}^{-1}\text{)} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{n_2}{A_{ef}}$$

$$\gamma \doteq 2,7 \text{ (Wkm)}^{-1}$$

kjer je n_2 Kerrov koeficient nelinearne refrakcije.

- **Ojačevalni koeficient stimuliranega sipanja** - gain coefficient of stimulated (Raman, Brillouin) scattering:

$$g \text{ (mW}^{-1}\text{)} = \frac{A_{ef}}{P_s P_c} \frac{dP_s}{dz}$$

$$g_R \doteq 10^{-13} \text{ m/W}$$

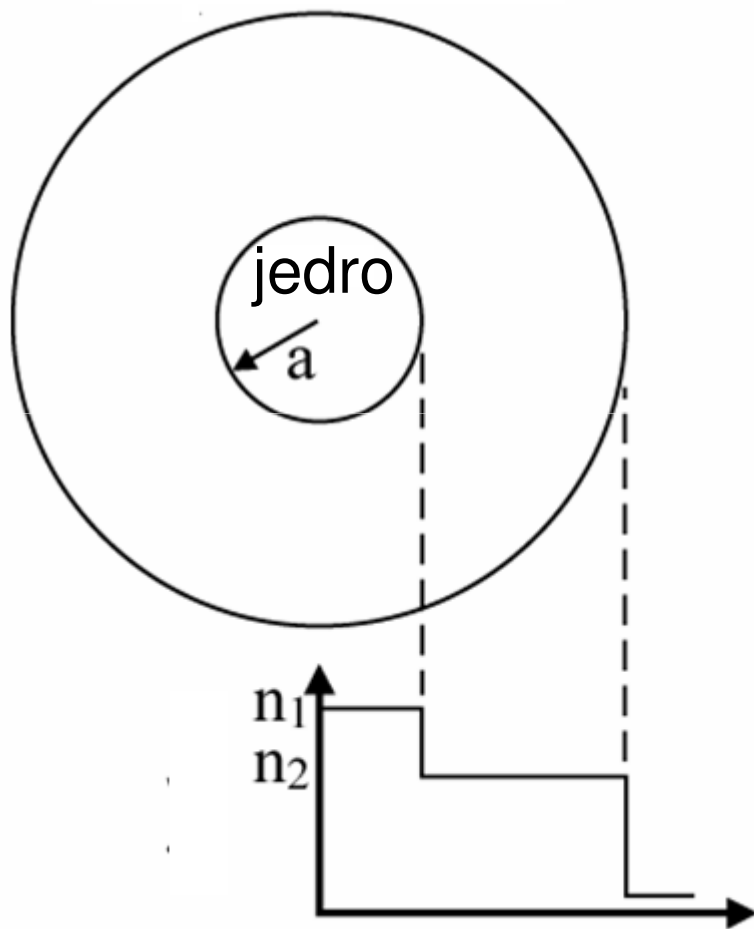
$$g_R \doteq 5 \cdot 10^{-11} \text{ m/W}$$

kjer je P_s moč signala in P_c moč črpalke.

Lomni liki

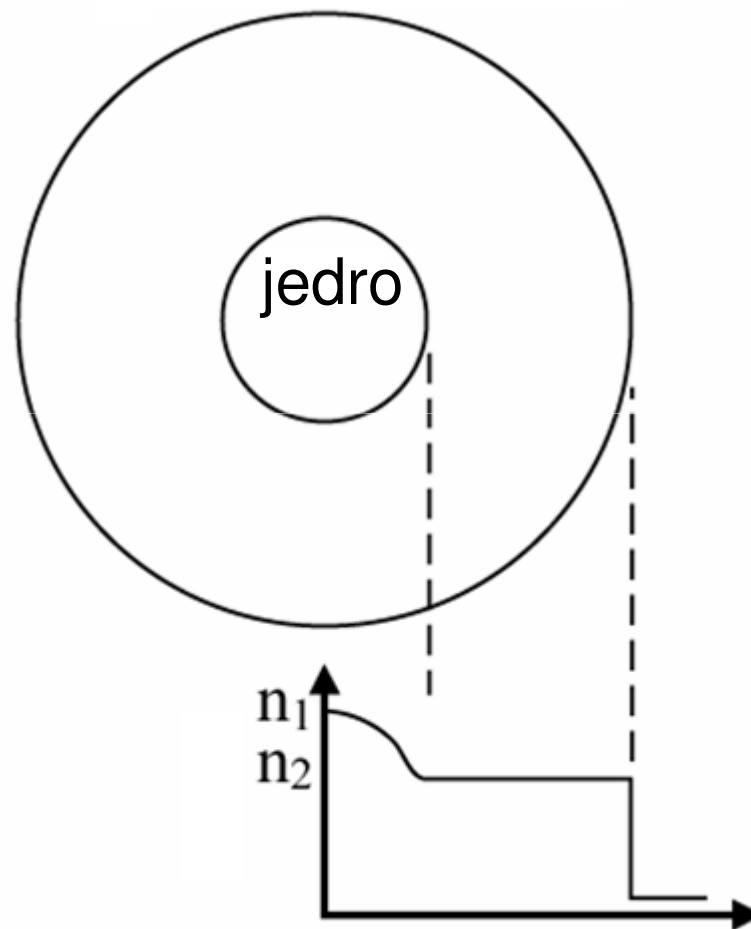
Lomni lik vlakna

Stopničasto vlakno



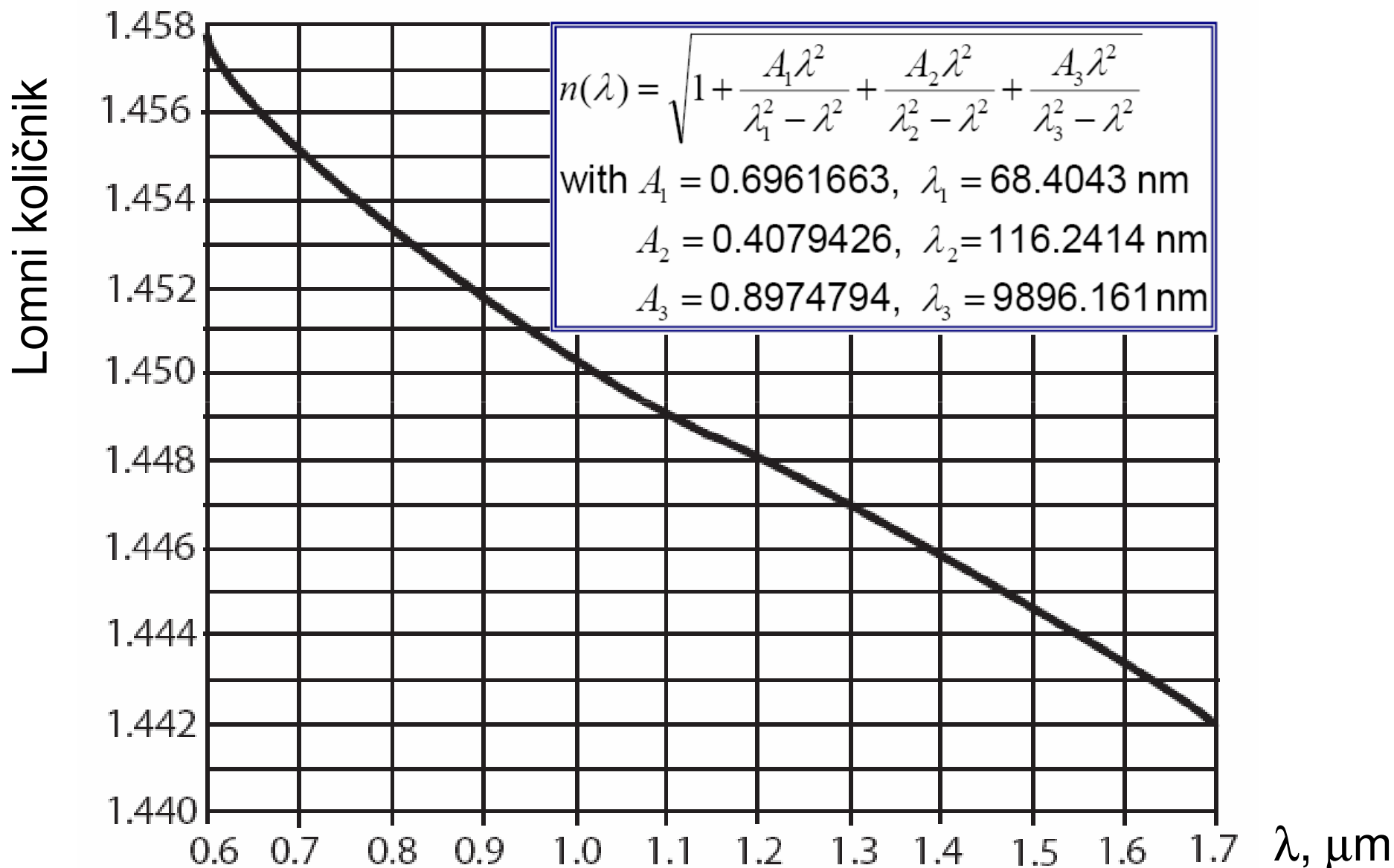
Stopničasti lomni lik

Gradientno vlakno



Gradientni lomni lik

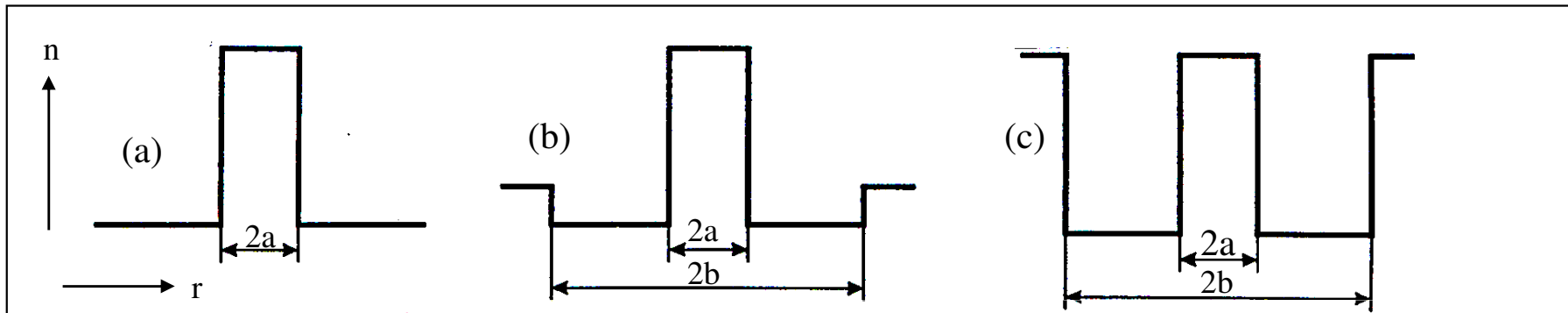
Lomni količnik čistega taljenega SiO₂



Lomni liki enorodovnega vlakna

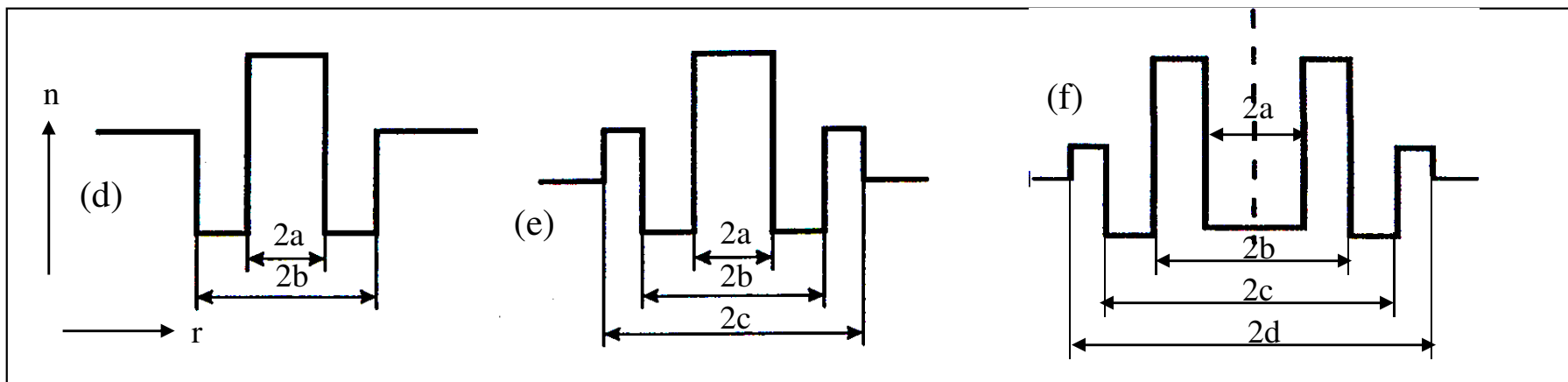
• Model lomnega lika za vlakno G.652:

- (a) običajni lomni lik (jedro $\text{SiO}_2 - \text{GeO}_2$, obloga SiO_2), matched cladding
- (b) pogreznjena obloga (jedro $\text{SiO}_2 - \text{GeO}_2$, obloga $\text{SiO}_2 - \text{F}$), depressed cladding
- (c) vlakno firme Sumitomo (jedro SiO_2 , obloga $\text{SiO}_2 - \text{F}$) - **najnižje slabljenje**



• Model lomnega lika za posebna vlakna:

- (d) troplastno vlakno oblike W
- (e) štiriplastno vlakno
- (f) vlakno s "cevastim" jedrom - **največja efektivna površina**

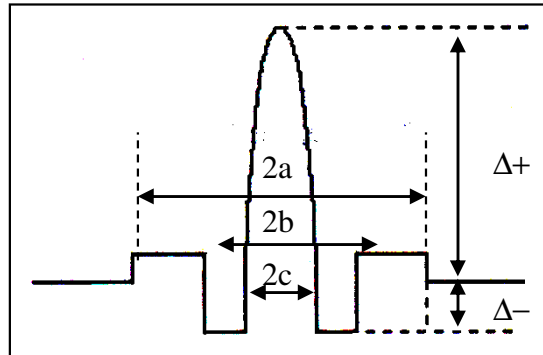


Optična vlakna za posebne aplikacije

1. Disperzijsko kompenzacijsko vlakno zelo velike negativne disperzije (T. Yokokawa et al., OFC, FK5, 2003)

abscisa:
radialna
koordinata

ordinata:
lomni količnik



Karakteristike pri $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Disperzija $D = -330 \text{ ps/nm/km}$

Strmina $S = -0,62 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$

Slabljenje $\alpha = 1,05 \text{ dB/km}$

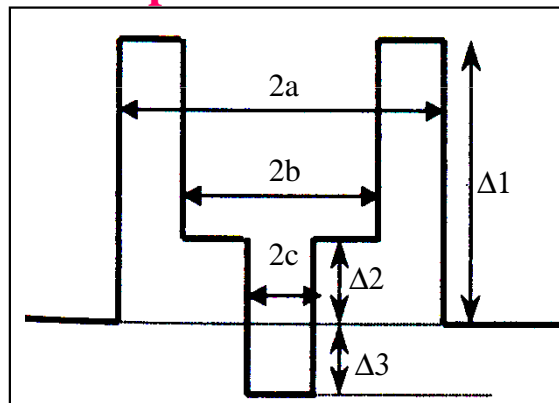
Ef. Površina $A_{\text{ef}} = 18 \mu\text{m}^2$

PMD $D_p < 1 \text{ ps/km}^{1/2}$

2. Vlakno velike efektivne površine za zveze velikega dosega (K. Mukesa et al., OFC, TuB, 2003)

abscisa:
radialna
koordinata

ordinata:
lomni količnik



Karakteristike pri $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Disperzija $D = 12,3 \text{ ps/nm/km}$

Strmina $S = 0,065 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$

Slabljenje $\alpha = 0,245 \text{ dB/km}$

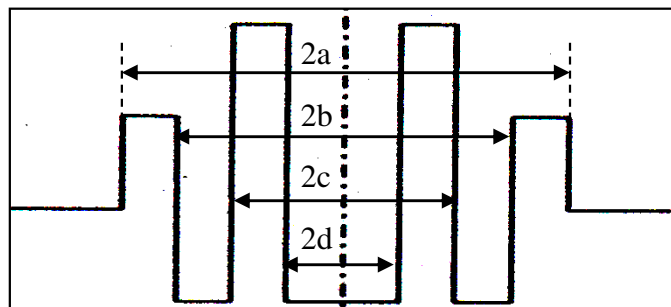
Ef. Površina $A_{\text{ef}} = 157 \mu\text{m}^2$

PMD $D_p = 0,04 \text{ ps/km}^{1/2}$

3. Vlakno nizke nelinearnosti (povečane A_{ef}) (L. Expert et al., ECOC, Th2.3.6, 2003)

abscisa:
radialna
koordinata

ordinata:
lomni kol.



Karakteristike pri $\lambda = 1550 \text{ nm}$

Disperzija $D = 10 \text{ ps/nm/km}$

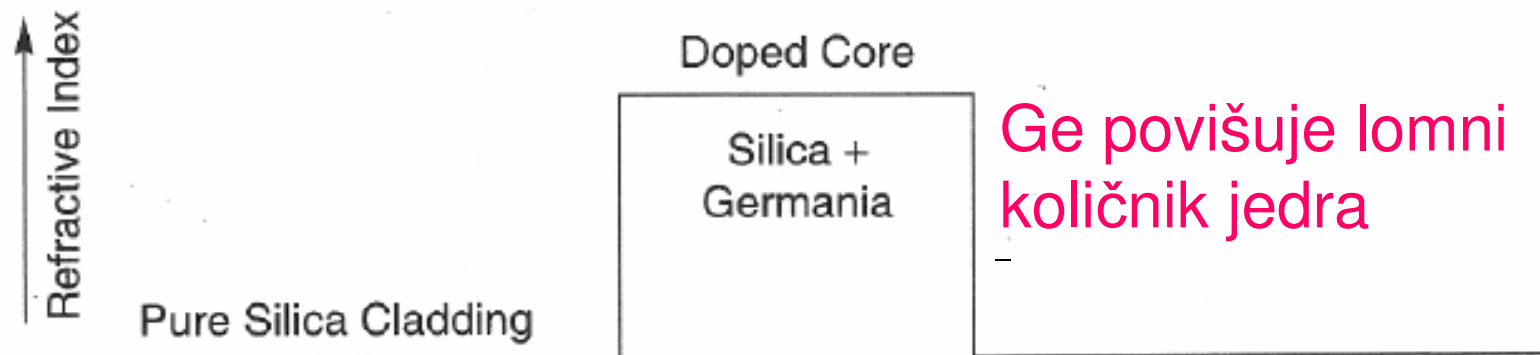
Strmina $S = 0,059 \text{ ps/nm}^2/\text{km}$

Slabljenje $\alpha = 0,225 \text{ dB/km}$

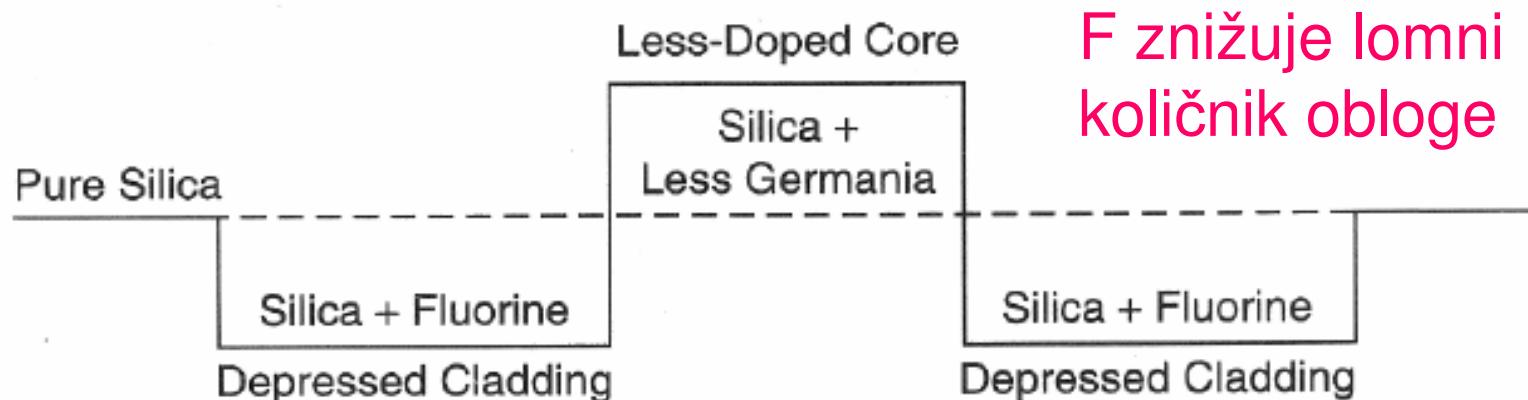
Ef. Površina $A_{\text{ef}} = 102 \mu\text{m}^2$

Najpogostejši lomni lik G.652

Vlakno z izravnano oblogo



Vlakno z ugreznjeno oblogo



Viri slabljenja

Slabljenje v kremenovem vlaknu

1. Trije osnovni pojavi slabljenja v steklu SiO_2 s primesmi:

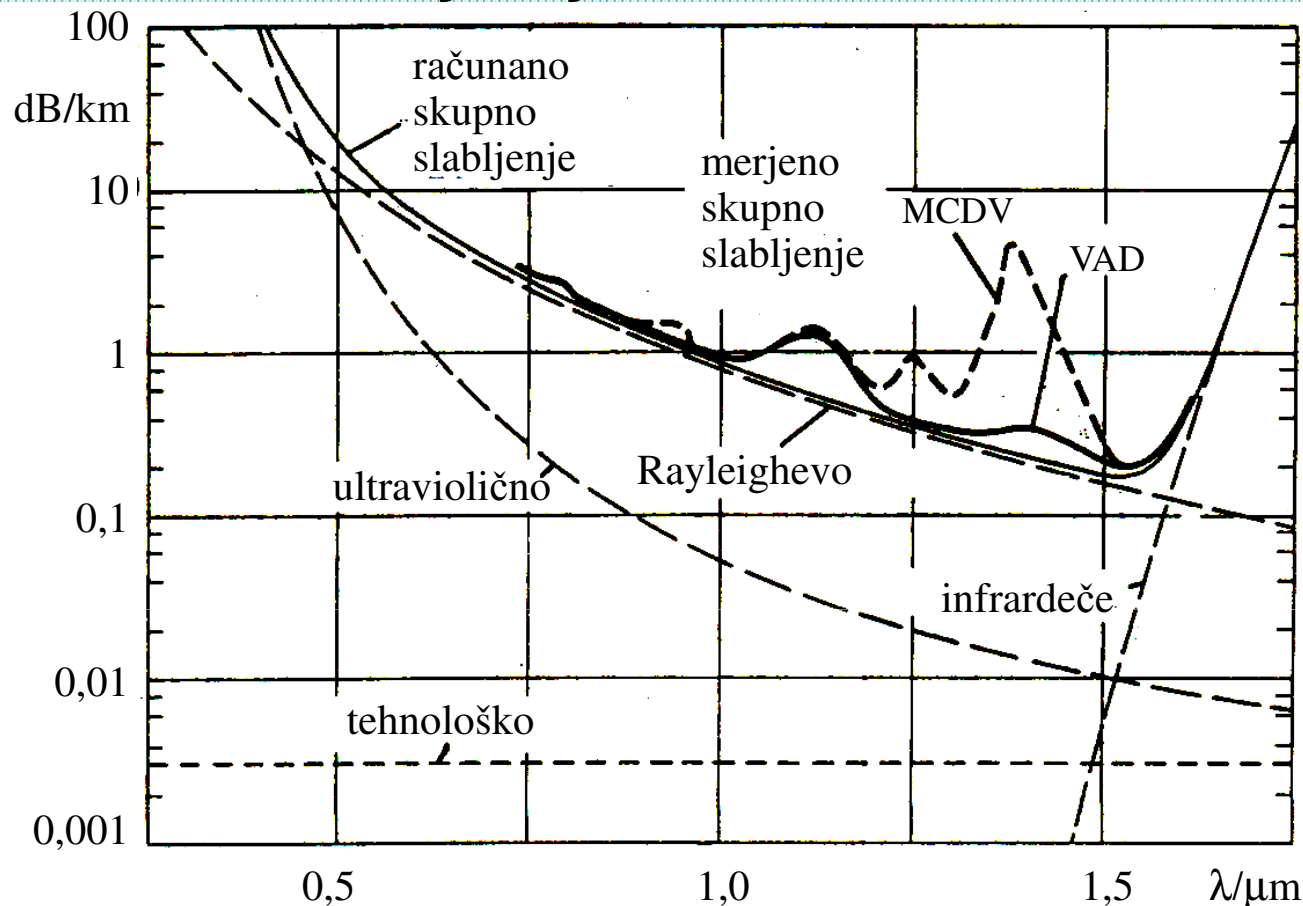
- **Rayleighjevo razpršilno slabljenje** (linearna razpršitev svetlobe na drobnih nehomogenostih stekla) je prevladujoče slabljenje v področju valovnih dolžin $0,5 - 1,7 \mu\text{m}$. Rayleighjevo slabljenje je izrazito odvisno od (četrte potence) λ . Minimalna vrednost slabljenja pri $\lambda = 1550 \text{ nm}$ v steklu SiO_2 brez primesi je $0,13 \text{ dB/km}$. Primesi v vlaknu dvigujejo vrednost razpršilnega slabljenja.
- **Infrardeče slabljenje** (absorpcija svetlobe zaradi interakcije foton - fonon) je prevladujoče slabljenje pri valovnih dolžinah nad $\lambda = 1,7 \mu\text{m}$. Omejuje spekter optičnih komunikacij pri daljših valovnih dolžinah.
- **Ultravijolično slabljenje** (absorpcija svetlobe zaradi interakcije foton - elektron) je prevladujoče slabljenje pri valovnih dolžinah pod $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$. V infrardečem delu spektra ni pomembno.

2. Drugi pojavi slabljenja vlakna:

- slabljenje ionov OH pri $\lambda = 1,4 \mu\text{m}$
- **slabljenje na krivinah vlakna**
- slabljenje na mikrokrivinah vlakna

so posledica tehnoloških pomanjkljivosti in je nanje mogoče vplivati.

Spekter slabljenja v kremenovem vlaknu



Potek posameznih sestavin slabljenja in potek skupnega slabljenja v kremenovem vlaknu SiO_2 s primesjo GeO_2 v jedru.

Stanje: optično vlakno PSCF z jedrom iz čistega SiO_2 in oblogo s primesjo F ima minimalno slabljenje **0,16** dB/km. Običajna komercialna optična vlakna s primesmi v jedru imajo minimalno slabljenje 0,20 - 0,25 dB/km pri valovnih dolžinah okoli $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$. Z 20 dB skupnega slabljenja je mogoče premostiti razdaljo 80 do 100 km.

Pojavi - definicije in ocene

• **Snov:** $\varepsilon = \varepsilon_0(1 + \chi) = \varepsilon_0(1 + \chi' + j\chi'')$

$$k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu_0} = k_0\sqrt{1 + \chi' + j\chi''} \doteq k_0\left(1 + \frac{1}{2}(\chi' + j\chi'')\right)$$

• **Polje:** $E(z) = E_0e^{-jkz} = E_0e^{-j\beta z}e^{-(\alpha/2)z}$, $\beta = k_0\left(1 + \frac{\chi'}{2}\right)$, $\frac{\alpha}{2} = k_0\frac{\chi''}{2}$

• **Moč:**

$$P(L) = P(0)e^{-\alpha L}, \quad \alpha_{dB/km} = \frac{1}{L}10\log\frac{P(0)}{P(L)}, \quad \alpha_{dB/km} = 4,342\alpha$$

• **Efektivna dolžina vlakna:**

$$L_{ef} = \int_0^L e^{-\alpha z} dz = \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha L}) \doteq \frac{1}{\alpha} \quad \text{pri zadosti veliki dolžini } L$$

• **Dolžinski razpon zveze:**

Slabljenje omejuje razdaljo, na katero lahko prenašamo optični signal. Pri običajnem slabljenju vlakna 0,2 - 0,25 dB/km je s slabljenjem določen dolžinski razpon optične zveze enak 80 - 100 km, z ojačevanjem pa je mogoče premostiti čezoceanske razdalje.

Primer:



Pri slabljenju 500 dB (slabljenje na dolžini 1 km surovega okenskega stekla ali 2500 km običajnega vlakna) bi pri vhodni moči, enaki sevani moči sonca, dobili na izhodu komaj kak delček energije fotona na dan!!!

Slabljenje in disperzija standardnih vlaken

ITU-T Standard	Name	Typical Attenuation value (C-band)	Typical CD value (C-band)	Applicability
<i>G.652</i>	standard Single Mode Fiber	0.25dB/km	17 ps/nm-km	OK for xWDM
<i>G.652c</i>	Low Water Peak SMF	0.25dB/km	17 ps/nm-km	Good for CWDM
<i>G.653</i>	Dispersion-Shifted Fiber (DSF)	0.25dB/km	0 ps/nm-km	Bad for xWDM
<i>G.655</i>	Non-Zero Dispersion-Shifted Fiber (NZDSF)	0.25dB/km	4.5 ps/nm-km	Good for DWDM

G.652 standardno enorodovno vlakno (SSMF – Standard Single-Mode Fiber) ima standardno vrednost slabljenja in standardno vrednost disperzije ter je v praksi najpogostejše vlakno (npr. Corning-28).

Vlakno

Enorodovno vlakna – dve omejitvi

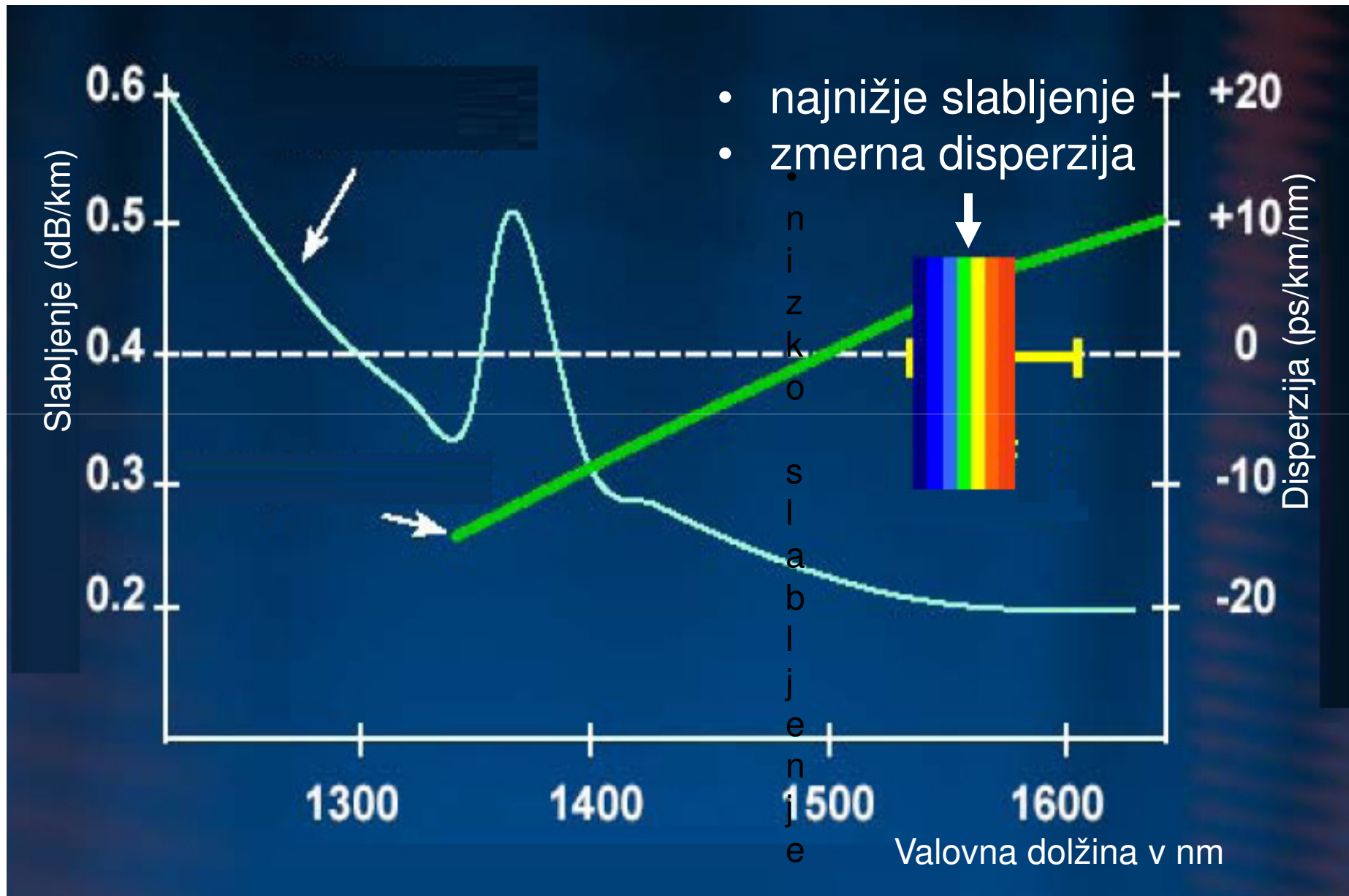
Slabljenje dB/km



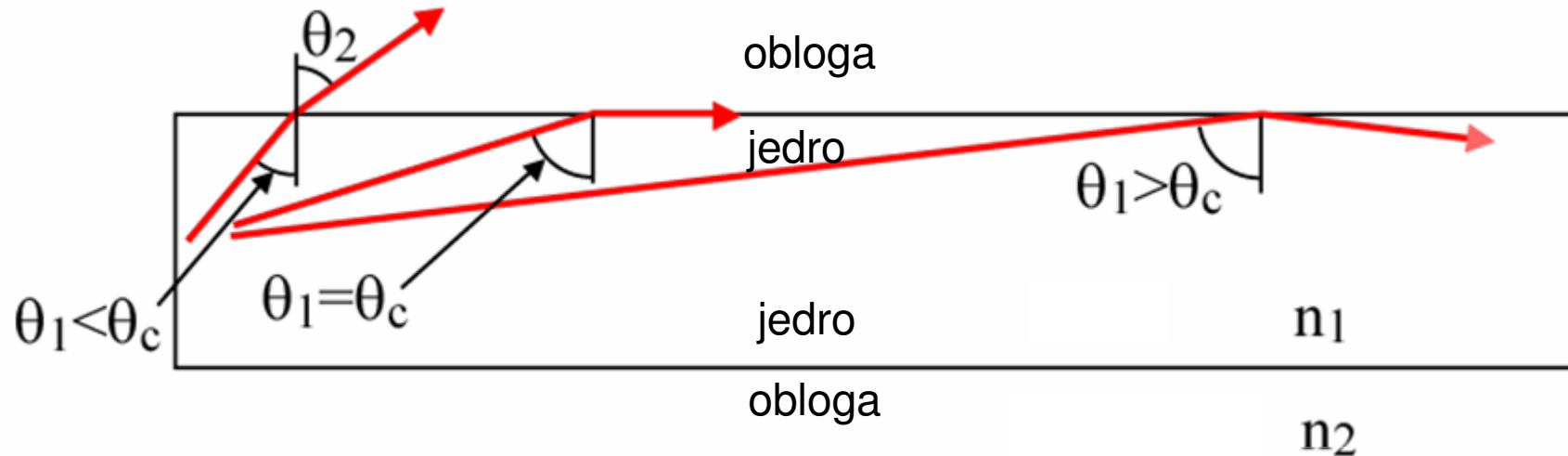
Disperzija ps/km/nm



Vlakno dolgega dosega (Long Haul)



Vstop svetlobe v vlakno



Lomni zakon

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

Lomni kot

$$\theta_2 = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_1 \right)$$

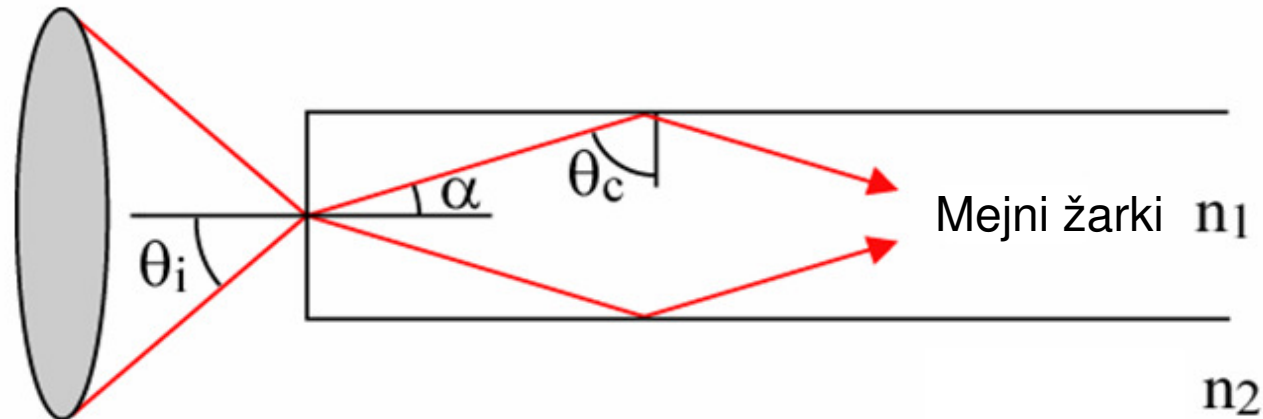
Mejni vpadni kot

$$\theta_1 > \theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Pogoj za ujetje
svetlobe v vlaknu

Numerična odprtina NA vlakna

Prostorski kot vstopnih žarkov pri mejnem kotu totalnega odboja v vlaknu



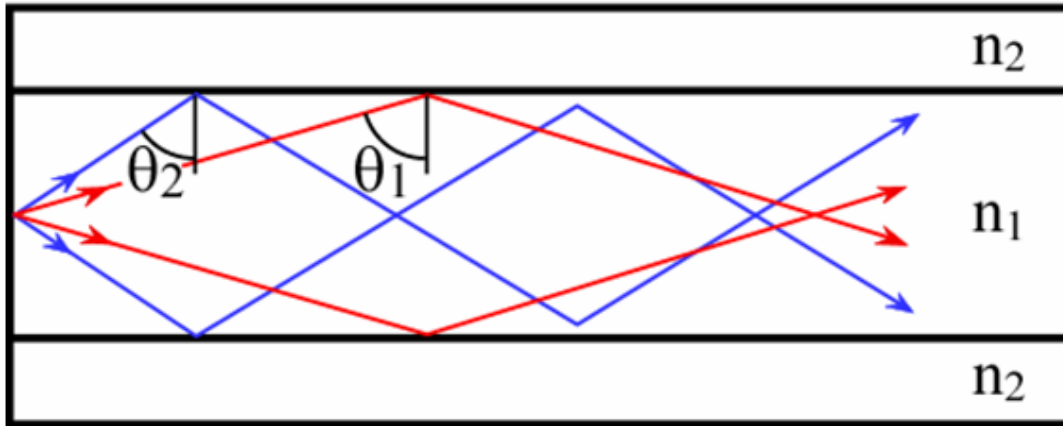
Numerična odprtina vlakna $NA = \sin(\theta_i) = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

Približki numerične odprtine vlakna:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sqrt{(n_1 - n_2)(n_1 + n_2)} \cong \sqrt{2n_1^2 \frac{n_1 - n_2}{n_1}}$$

$$NA \cong n_1 \sqrt{2 \Delta} \quad \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

Fazna konstanta valov v vlaknu



$$\beta_{z_i} = n_1 k_0 \sin(\theta_i)$$

$$n_2 k_0 < \beta_z < n_1 k_0$$

Efektivna površina

$$A_{ef} = 2\pi \frac{\left(\int_0^{\infty} |E(r)|^2 r dr \right)^2}{\int_0^{\infty} |E(r)|^4 r dr}$$

Efektivna površina daje podatek, kako je sredica vlakna izkoriščena za prenos svetlobe

Parametri optičnega vlakna

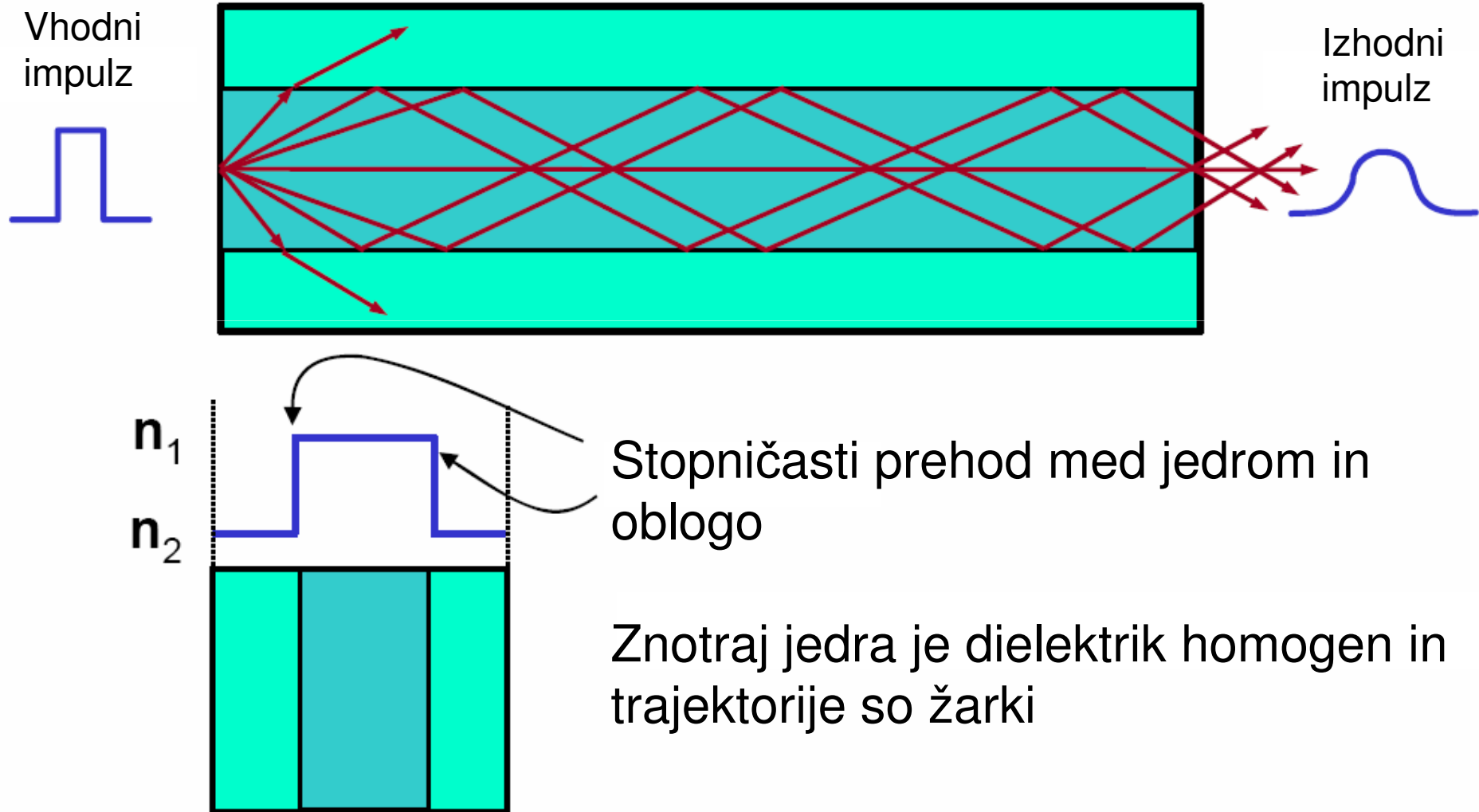
$$n_2 k < \beta_m(\omega) < n_1 k$$

$$\beta_m(\omega_c) = n_2 k$$

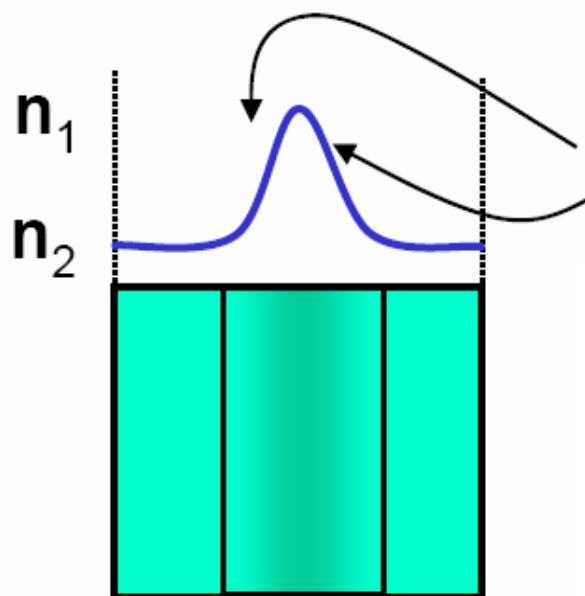
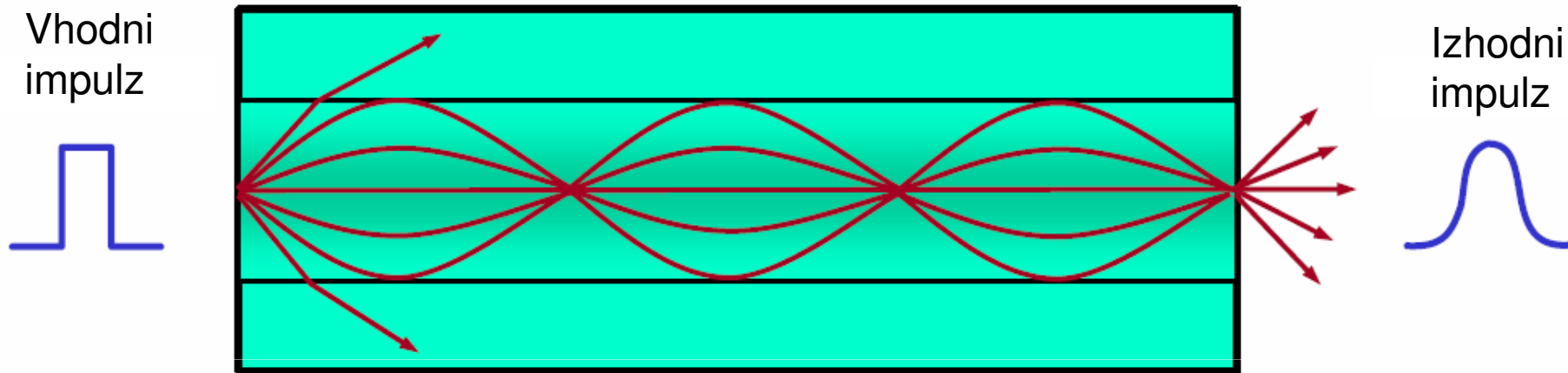
$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{2\pi a}{\lambda} \text{NA}$$

$$\# \text{ Modes} \approx \frac{4}{\pi^2} V^2 \quad V \gg 1$$

Trajektorije v enorodovnem stopničastem vlaknu



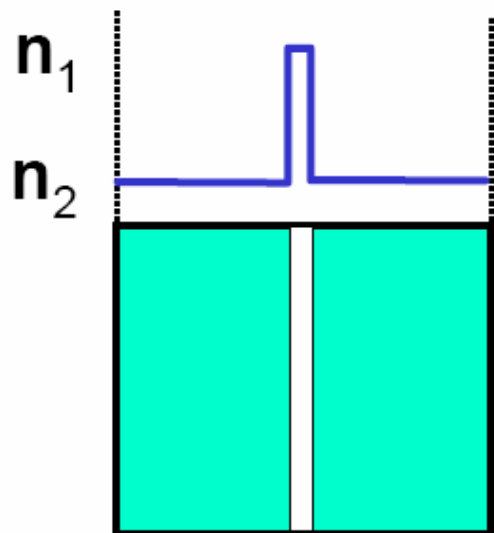
Trajektorije v mnogorodovnem gradientnem vlaknu



Položen prehod lomnega količnika iz jedra v oblogo

Znotraj nehomogenega dielektrika se trajektorije krivijo

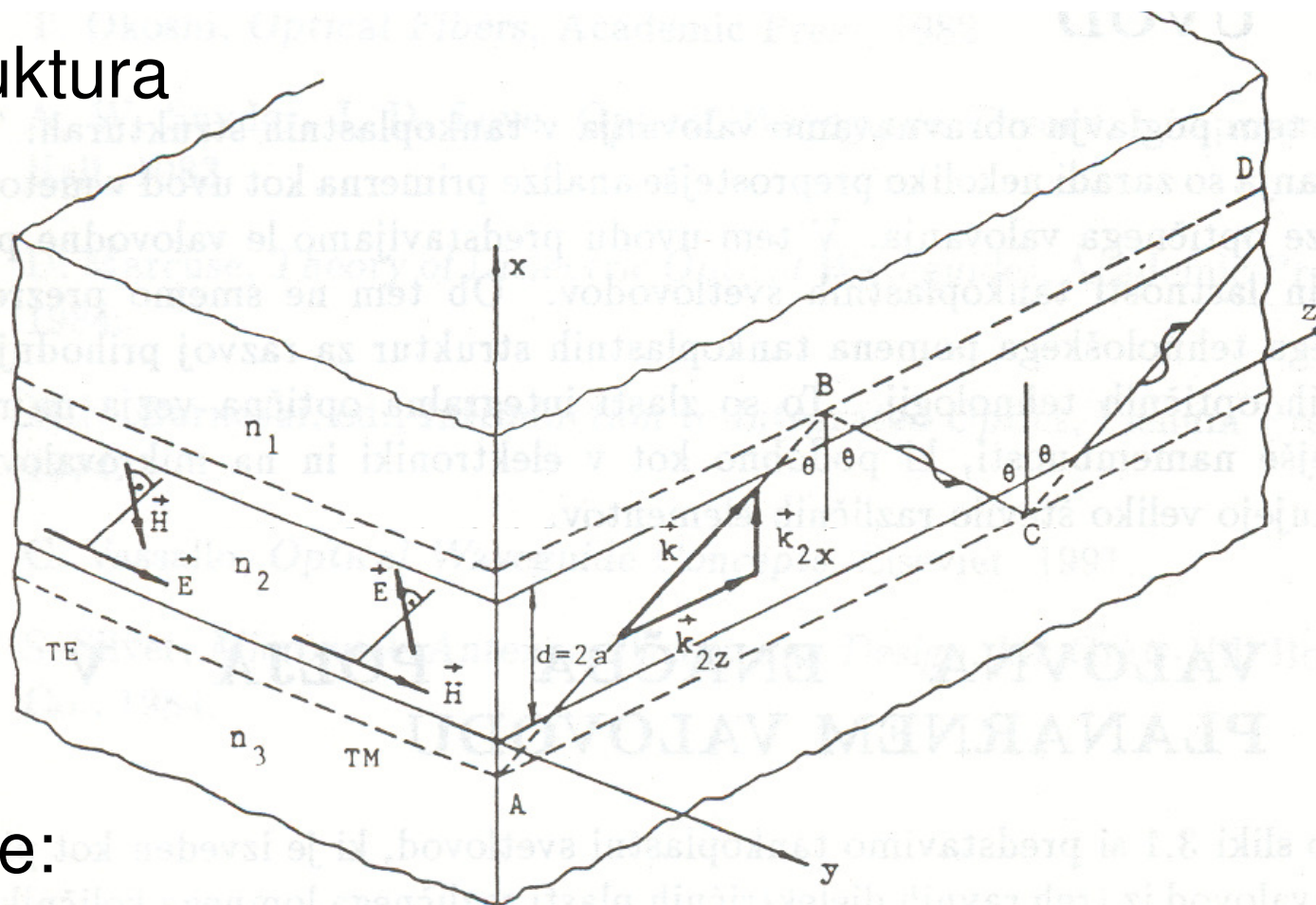
Trajektorija v enorodovnem vlaknu



Planarni
tankoplastni valovod

Troplastni planarni valovod

- Struktura

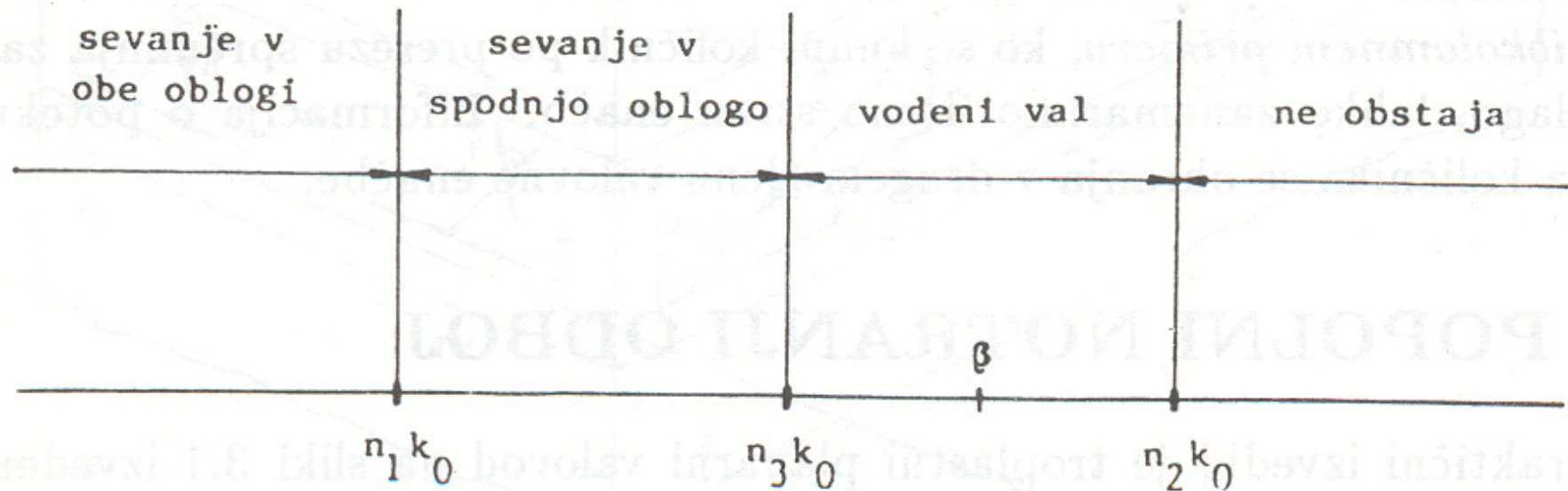
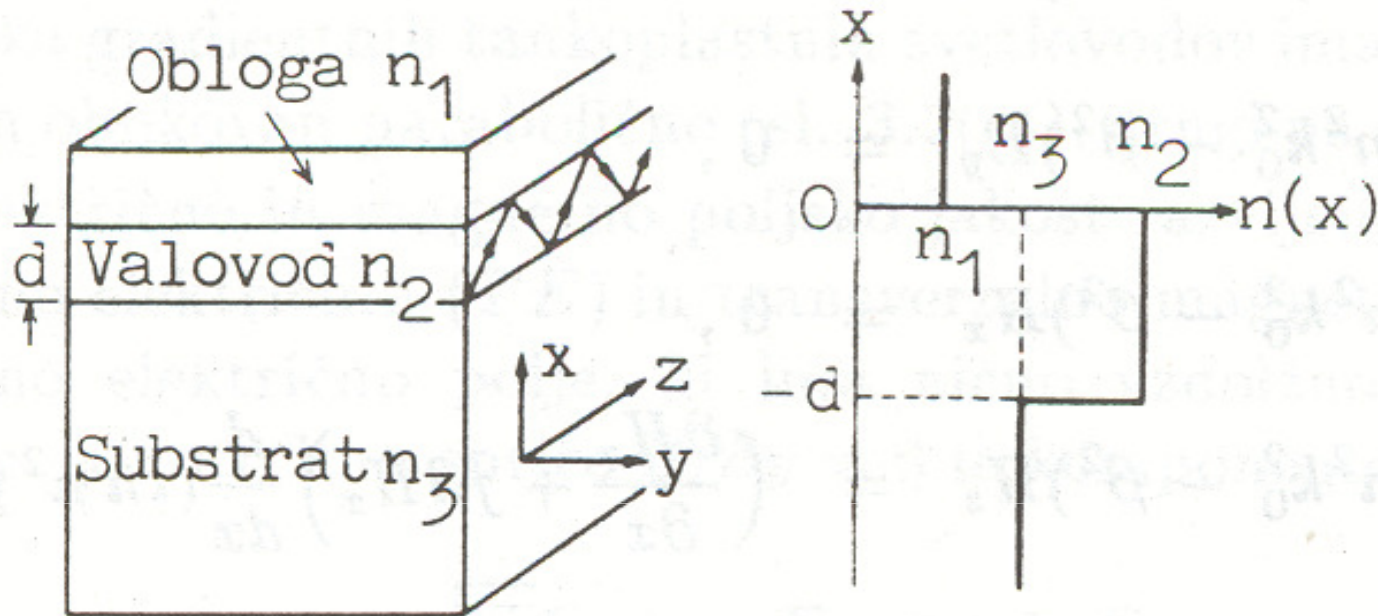


- Polje:

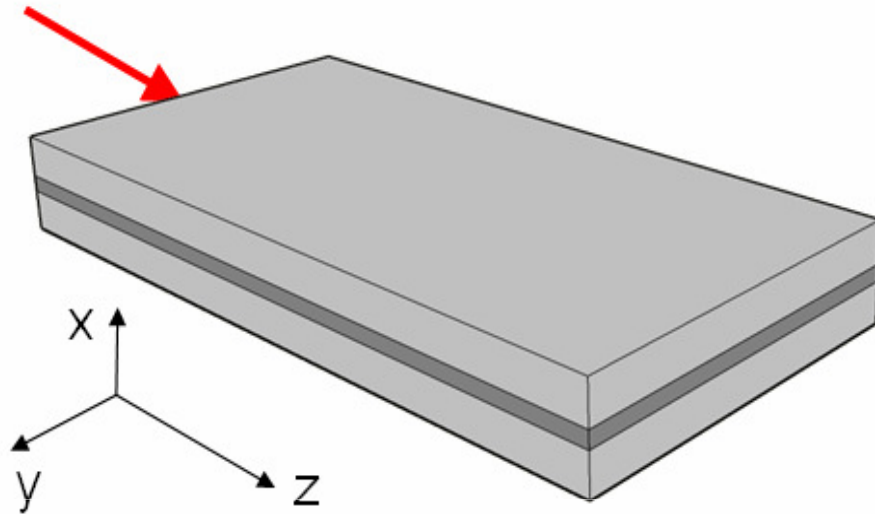
$$\boxed{\text{TM}} : \quad \mathbf{E} = 1_x E_x + 1_z E_z , \\ \mathbf{H} = 1_y H_y .$$

$$\boxed{\text{TE}} : \quad \mathbf{E} = 1_y E_y , \\ \mathbf{H} = 1_x H_x + 1_z H_z .$$

Planarni valovod



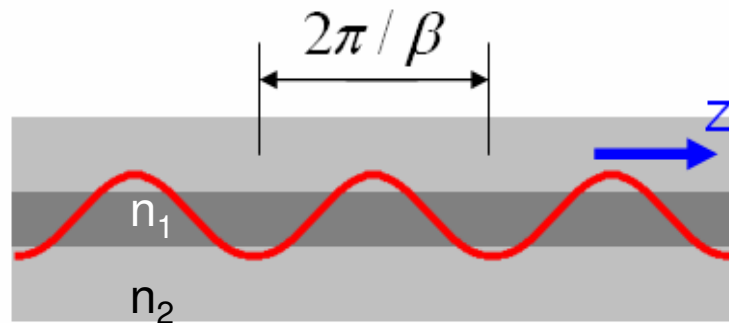
Valovna enačba planarnega valovoda



Valovna enačba: $(\nabla^2 - \frac{1}{n^2 c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}) \bar{E} = 0$

(TE) nastavek $E_y = U(x)e^{-i(\beta z - \omega t)}$

TE: Električno polje vzporedno z y



Konstanta širjenja β sledi iz disperzijske (karakteristične) enačbe planarnega valovoda

Helmholtzova diferencialna enačba:

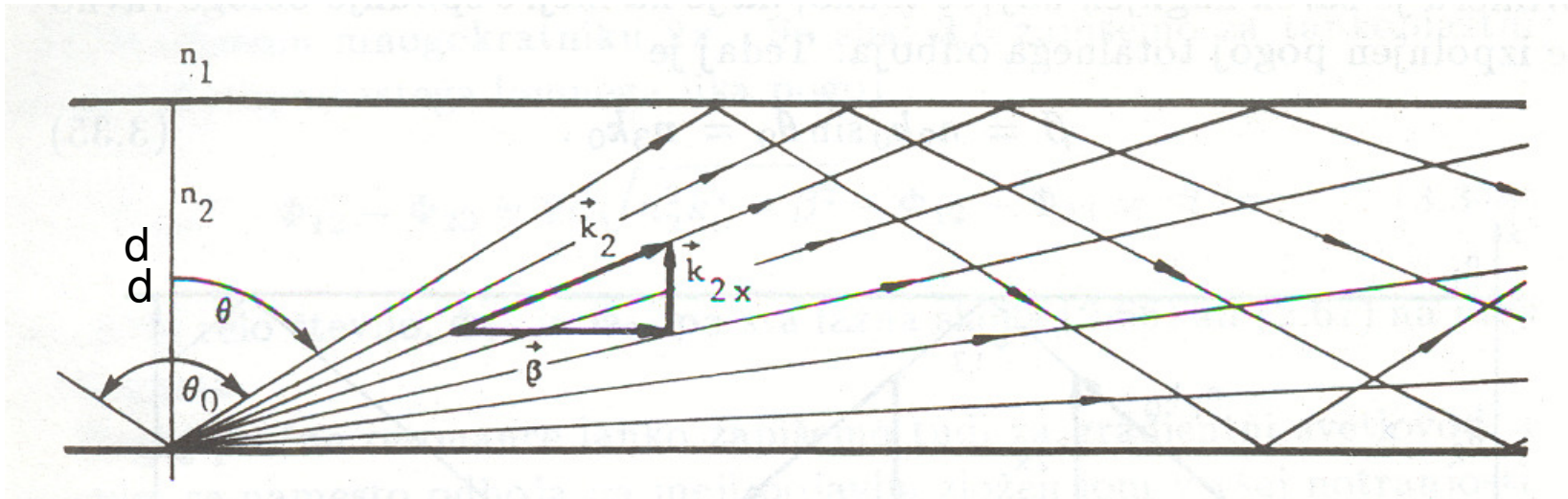
$$\left[\frac{d^2}{dx^2} + k^2 - \beta^2 \right] U(x) = 0$$

$$k = nk_0 = n\omega/c, \quad n = n_1, n_2$$

skupna konstanta širjenja $\beta = \underline{n_{\text{eff}}} k_0$

n_{eff} efektivni lomni količnik

Pogoj prečne resonance



Pogoj prečne resonance za homogeno snov:

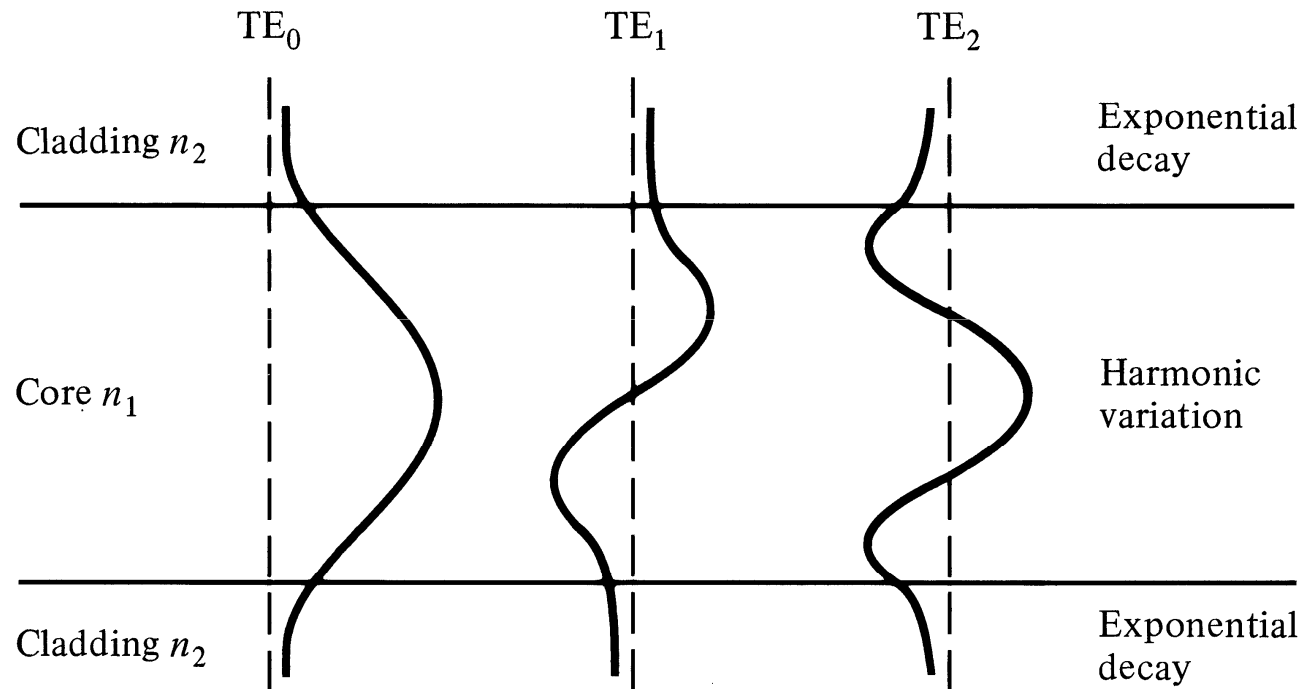
$$2k_{2x}d - \Phi_{12} - \Phi_{23} = 2d\sqrt{n_2^2k_0^2 - \beta^2} - \Phi_{12} - \Phi_{23} = m2\pi$$

Pogoj prečne resonance za nehomogeno snov:

$$2 \int_a^b \sqrt{n^2(x)k_0^2 - \beta^2} dx - \pi = m2\pi$$

V vlaknu se ohranjajo samo tisti žarki, ki izpolnjujejo pogoj prečne resonance.

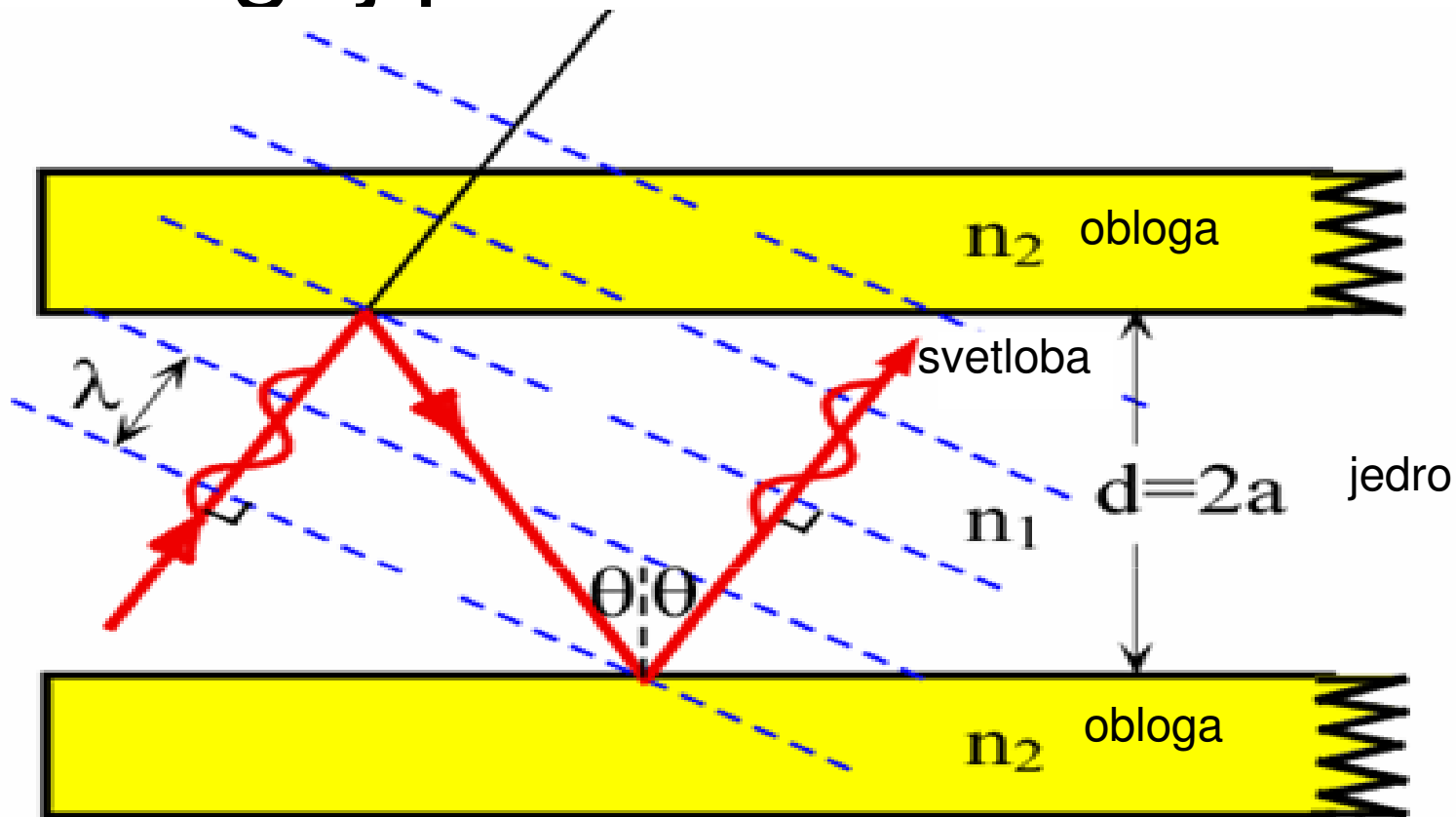
Prečno polje v planarnem valovodu



$$\vec{E}_m(x, y, z, t) = e_x f_m(y) \cos(\omega t - \beta_m z)$$

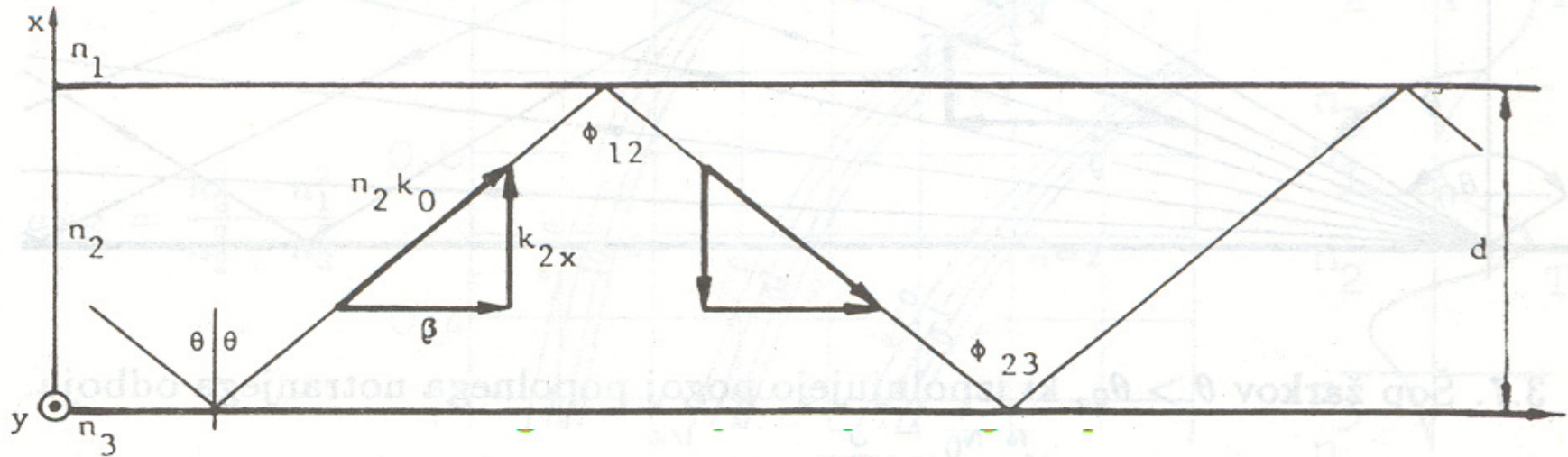
$m = 0, 1, 2, 3$ (mode number)

Pogoj prečne resonance



- V vzdolžni smeri se vzpostavlja potujoči val, faza katerega linearno upada kot $-\beta z$.
- V prečni smeri se vzpostavlja stacionarno polje v obliki stojnega vala (prečna resonanca). Fazni zaostanek zaradi širjenja v prečni smeri (vključno s spremembo faze pri odboju) mora biti enak mnogokratniku 2π . Pravilo velja za vse valovode.
- Žarki se odbijajo pri diskretnih vrednostih kota θ , ki so vsi večji od kota totalnega odboja. Po dvo- in večkratnem odboju je polje v fazi.
- Predstavitev velja za tankoplastni svetlovod in za vlakno.

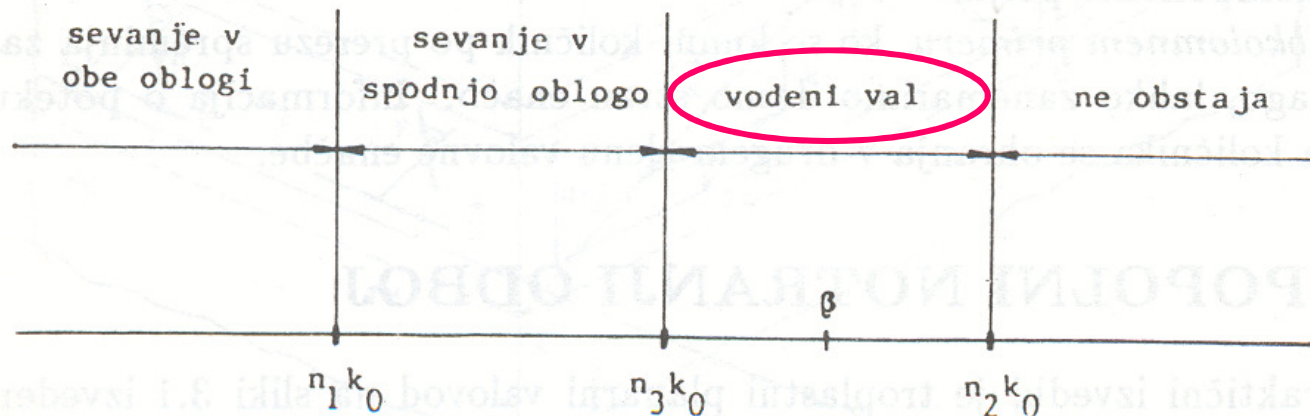
Planarni valovod, primeri konstante β



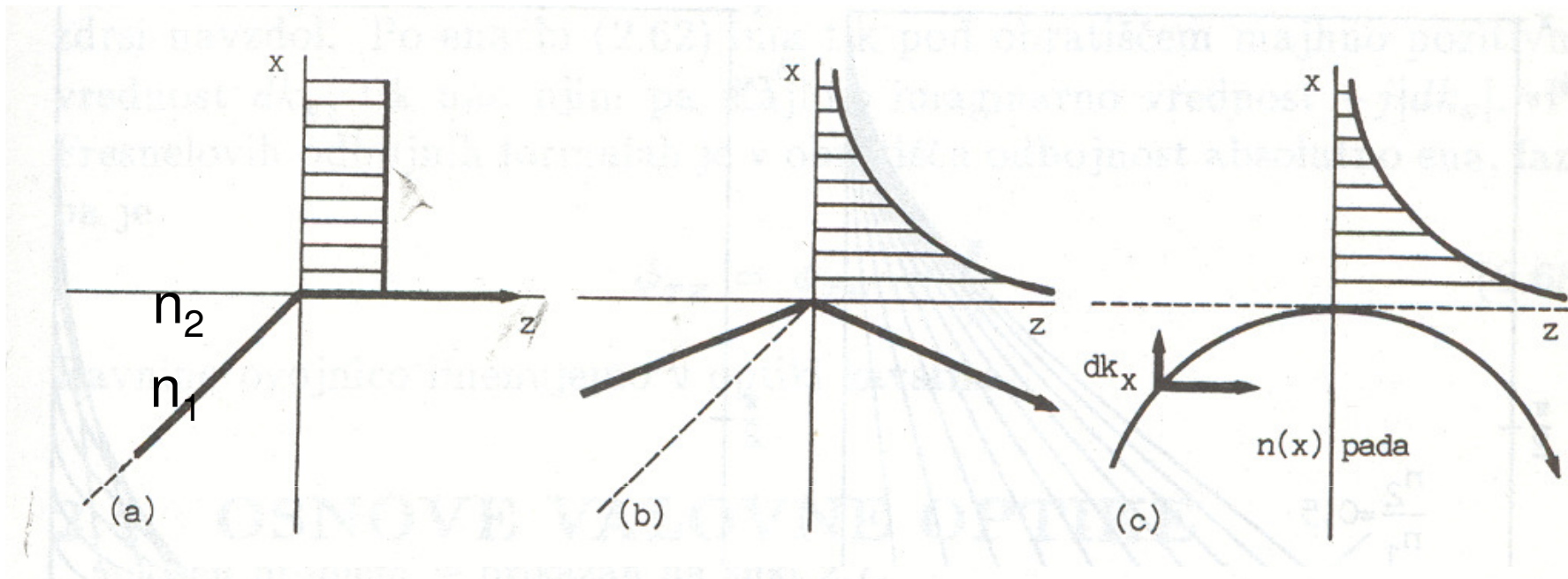
$$|k_{1x}| = (\beta^2 - n_1^2 k_0^2)^{1/2}, \quad \beta > n_1 k_0$$

$$k_{2x} = (n_2^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2}, \quad \beta < n_2 k_0$$

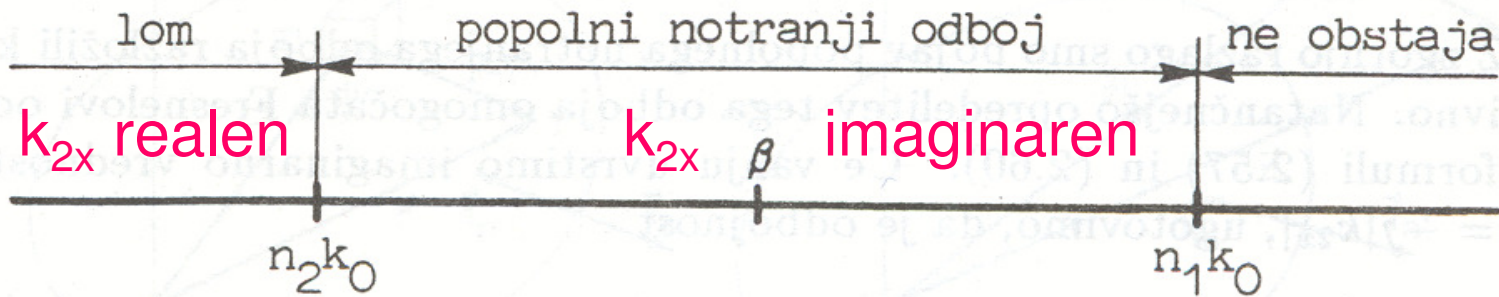
$$|k_{3x}| = (\beta^2 - n_3^2 k_0^2)^{1/2}, \quad \beta > n_3 k_0$$



Popolni notranji odboj



$$k_{2x} = \sqrt{n_2^2 k_0^2 - \beta^2} \quad (2.62)$$



Kvantna analogija planarnega valovoda

Analogija kvantne mehanike z valovno optiko

Kvantno mehanske in valovno optične enačbe so dualne. Oblika je enaka, pomen spremenljivk je različen. Lomni količnik je dualen s potencialom.

Quantum mechanics

- 1-d time-independent Schrödinger equation
$$\left[\frac{\hbar^2}{2m} \nabla_x^2 - V + E \right] \psi(x) = 0$$
- $\psi(x)$: time-independent wave function (time x-section)
- $-V(x)$: potential energy landscape
- $-E$: energy (eigenvalue)
- Time-dependent wave function (**energy eigenstate**)
$$\Psi(x, t) = \psi(x) \cdot \exp(-iEt)$$
- t : time evolution

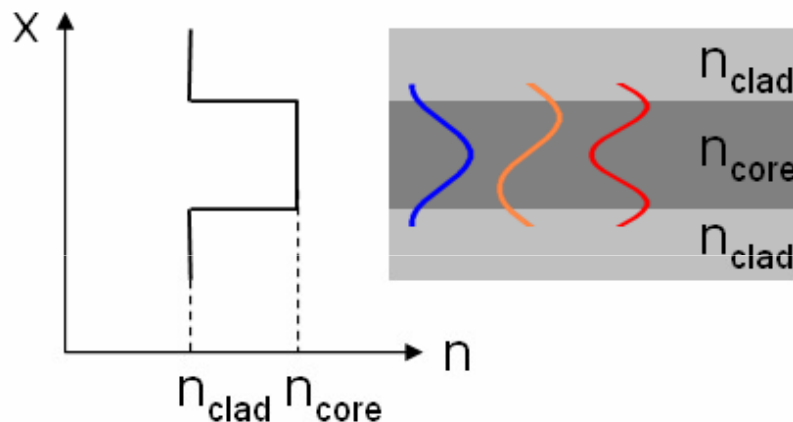
Guided wave optics

- Helmholtz equation in a slab waveguide
$$[\nabla_x^2 + k_0^2 n^2 - \beta^2] U(x) = 0$$
- $U(x)$: x-sectional optical mode profile (complex amplitude)
- $k_0^2 n(x)^2$: x-sectional index profile
- β^2 : propagation constant
- Electric field along z direction (**waveguide mode**)
$$E(x, z) = U(x) \cdot \exp(i\beta z)$$
- z : wave propagation

Analogija svetlovoda s kvantno jamo

Helmholtz equation:

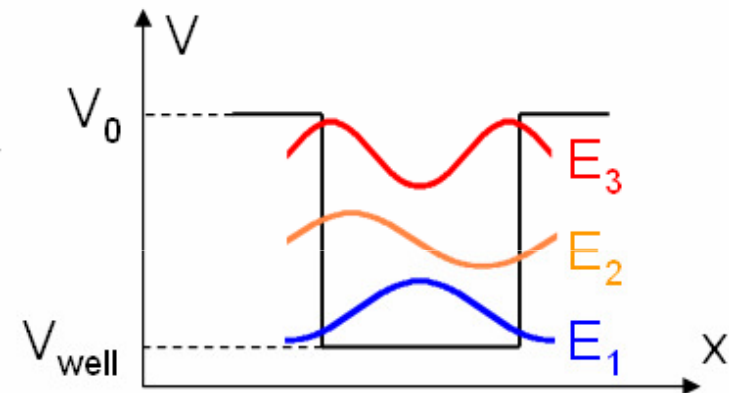
$$[\nabla_x^2 + k_0^2 n^2 - \beta^2]U(x) = 0$$



- Discretized propagation constant β values
- Higher order mode with **smaller** β have more nodes ($U = 0$)
- **Larger waveguides** with **higher index contrast** supports more modes
- Guided modes: $n_{\text{clad}} < n_{\text{eff}} < n_{\text{core}}$

Schrödinger equation:

$$\left[-\frac{1}{2m}\nabla_x^2 + V - E\right]\psi(x) = 0$$



1-d potential well (particle in a well)

- Discretized energy levels (states)
- Wave functions with **higher** energy have more nodes ($\psi = 0$)
- **Deeper and wider** potential wells gives more bounded states
- Bounded states: $V_{\text{well}} < E < V_0$

Analiza vlakna

Metoda analize

1. Hibridni rodovi HE_{mn} in EH_{mn} imajo poleg prečnih komponent hkrati obe vzdolžni komponenti E_z in H_z , ki imata konstantno smer in zato skalarni značaj.
2. Rešujemo razmeroma preprosto skalarno valovno enačbo za E_z oz. H_z . Splošna rešitev v valjnih koordinatah daje vsoto neodvisnih valov (načinov, rodov).
3. Prečne komponente polja E in H določimo na osnovi Maxwellovih enačb.
4. Izpolnimo pogoje za zvezen prehod tangencialnih komponent in dobimo karakteristično (disperzijsko) enačbo, ki odkriva prenosne lastnosti vlakna.

Maxwellove enačbe

Prva, druga in tretja enačba (četrte, ki je posledica prve, ne pišemo)

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \mathbf{J} + j\omega\epsilon \mathbf{E} = \mathbf{J} + j \frac{k}{Z} \mathbf{E} \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -j\omega\mu \mathbf{H} = -jkZ \mathbf{H}, \\ \operatorname{div} \epsilon \mathbf{E} &= \rho, \end{aligned}$$

Fazna konstanta in valovna impedanca:

$$k = \omega\sqrt{\epsilon\mu} \text{ in } Z = \sqrt{\mu/\epsilon}$$

Lomni količnik:

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} = \sqrt{\epsilon_r}$$

Valovna enačba

Valovni enačbi:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{E} + n^2 k_0^2 \mathbf{E} &\doteq 0, \\ \Delta \mathbf{H} + n^2 k_0^2 \mathbf{H} &\doteq 0.\end{aligned}$$

Valovne enačbe za prečne in vzdolžni komponenti polja:

$$\begin{aligned}\Delta \mathbf{E}_t + n^2 k_0^2 \mathbf{E}_t &= 0, \\ \Delta E_z + n^2 k_0^2 E_z &= 0, \\ \Delta \mathbf{H}_t + n^2 k_0^2 \mathbf{H}_t &= 0, \\ \Delta H_z + n^2 k_0^2 H_z &= 0.\end{aligned}$$

Komponente polja:

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= \mathbf{E}_t + \mathbf{1}_z E_z, \\ \mathbf{H} &= \mathbf{H}_t + \mathbf{1}_z H_z.\end{aligned}$$

Valovne enačbe za potujoči val v vzdolžni smeri širjenja z:

$$\begin{aligned}\Delta_t \mathbf{E}_t + (n^2 k_0^2 - \beta^2) \mathbf{E}_t &= 0, \\ \Delta_t E_z + (n^2 k_0^2 - \beta^2) E_z &= 0, \\ \Delta_t \mathbf{H}_t + (n^2 k_0^2 - \beta^2) \mathbf{H}_t &= 0, \\ \Delta_t H_z + (n^2 k_0^2 - \beta^2) H_z &= 0.\end{aligned}$$

Prečne komponente polja

Komponente v valjnih koordinatah:

$$E_{\rho} = -\frac{j}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial \rho} + kZ \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} \right),$$

$$E_{\phi} = -\frac{j}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} - kZ \frac{\partial H_z}{\partial \rho} \right),$$

$$H_{\rho} = -\frac{j}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial \rho} - \frac{k}{Z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_z}{\partial \phi} \right),$$

$$H_{\phi} = -\frac{j}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{1}{\rho} \frac{\partial H_z}{\partial \phi} + \frac{k}{Z} \frac{\partial E_z}{\partial \rho} \right).$$

Prečne komponente polja

Komponente v kartezičnih koordinatah:

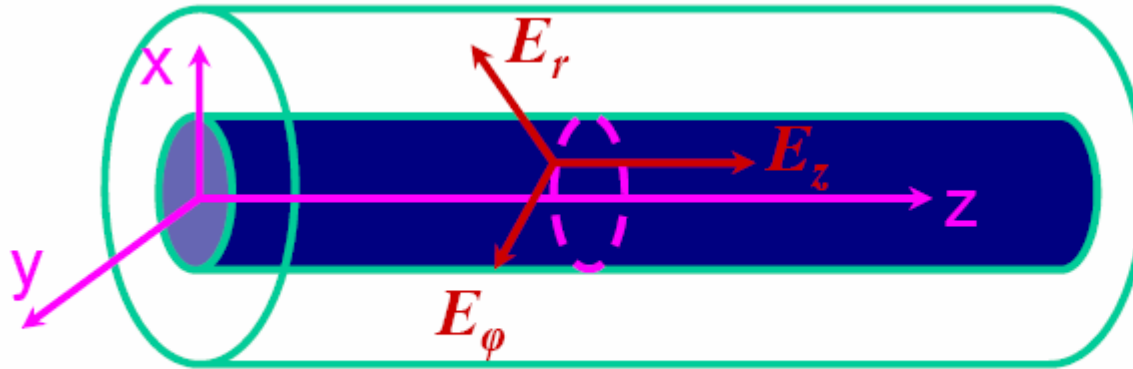
$$E_x = -\frac{j}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial x} + kZ \frac{\partial H_z}{\partial y} \right),$$

$$E_y = -\frac{j}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial E_z}{\partial y} - kZ \frac{\partial H_z}{\partial x} \right),$$

$$H_x = -\frac{j}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial x} - \frac{k}{Z} \frac{\partial E_z}{\partial y} \right),$$

$$H_y = -\frac{j}{k^2 - \beta^2} \left(\beta \frac{\partial H_z}{\partial y} + \frac{k}{Z} \frac{\partial E_z}{\partial x} \right),$$

Valovna enačba vzdolžne komponente



Vzdolžna komponenta je med komponentami edina, ki ima konstantno smer, torej je konstanten vektor. Zato zadovoljuje skalarno valovno enačbo

$$E(x, y, z, t) = U(x, y, z) e^{j\omega t} \quad \text{vzdolžna komponenta}$$

$$\nabla^2 U + n^2 k_0^2 U = 0 \quad \begin{cases} n = n_1 \text{ for } r \leq a \\ n = n_2 \text{ for } r > a \\ k_0 = 2\pi / \lambda \end{cases}$$

$$\lambda = \omega / c$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} + n^2 k_0^2 U = 0 \quad \begin{cases} n = n_1 \text{ for } r \leq a \\ n = n_2 \text{ for } r > a \\ k_0 = 2\pi / \lambda_0 \end{cases}$$

Skalarna valovna enačba

$U = U(r, \varphi, z) = U(r)U(\varphi)U(z)$ faktoriziran nastavek s separacijo spremenljivk

Privzamemo valovno rešitev v odvisnosti od koordinate z  $U(z) = e^{-j\beta z}$

$U(\varphi)$ periodična rešitev od f : $U(\varphi) = e^{-jl\varphi}$, $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ celo število

$$U(r, \varphi, z) = F(r)e^{-jl\varphi}e^{-j\beta z} \quad l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Nastavek uvrstimo v Helmholtzovo skalarno valovno enačbo:

$$\frac{d^2 F}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} + \left(n^2 k_0^2 - \beta^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) F = 0 \quad \begin{cases} n = n_1 & r \leq a \\ n = n_2 & r > a \\ k_0 = 2\pi / \lambda_0 \end{cases}$$

Fazno konstanto lahko izrazimo z efektivno vrednostjo lomnega količnika:

$$\beta = \frac{\omega}{c} n_{\text{eff}}, \quad n_2 < n_{\text{eff}} < n_1$$

Valovna enačba za jedro in oblogo

Val se širi pri pogoju: $n_2 k_0 \leq \beta \leq n_1 k_0$

$$\kappa^2 = (n_1 k_0)^2 - \beta^2$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - (n_2 k_0)^2$$

konstanten

$$\kappa^2 + \gamma^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) = k_0^2 NA^2$$

$$\kappa^2, \gamma^2 \geq 0$$

κ, γ : realen

Dobimo:

Valovna enačba za jedro in oblogo

$$\frac{d^2 F}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} + \left(\kappa^2 - \frac{l^2}{r^2} \right) F = 0 \quad r \leq a$$

$$\frac{d^2 F}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dF}{dr} - \left(\gamma^2 + \frac{l^2}{r^2} \right) F = 0 \quad r > a$$

Rešitev za sredico in oblogo

Rešitev izražamo z Besselovimi funkcijami, in sicer:

$$F_l(r) = J_l(\kappa r) \quad \rho \leq a \quad l = 0, 1, 2, \dots$$

J_l : Besselova funkcija reda l in argumenta κr

$$F_l(r) = K_l(\gamma r) \quad \rho > a \quad l = 0, 1, 2, \dots$$

K_l : Modificirana Besselova funkcija reda l in arg. γr

Pri tem so:

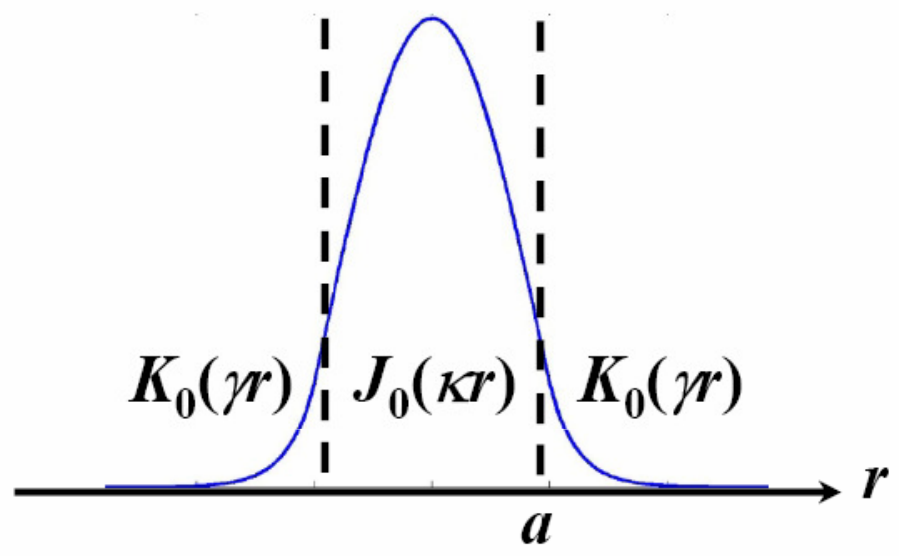
$$\kappa^2 = (n_1 k_0)^2 - \beta^2$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - (n_2 k_0)^2$$

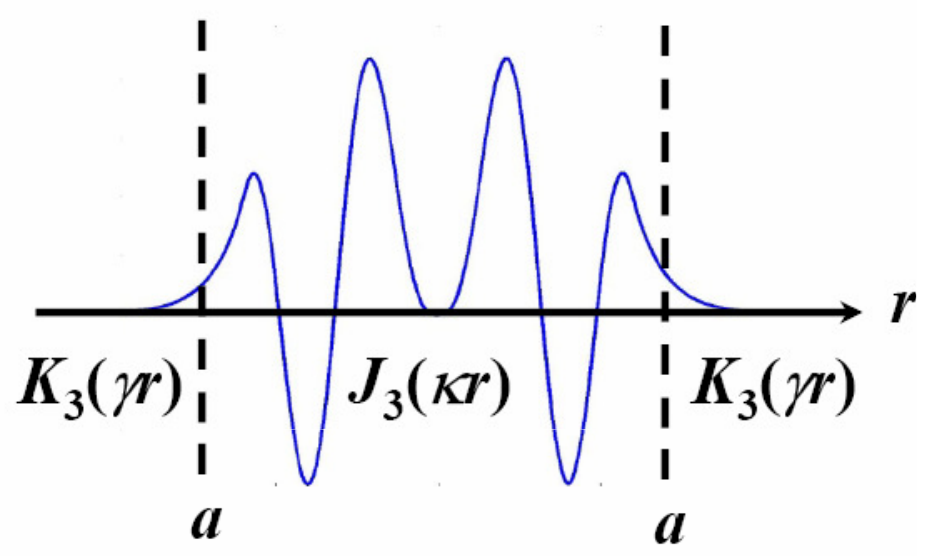
$$\kappa^2 + \gamma^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) = k_0^2 NA^2 \quad \text{konstanta}$$

Primer rešitve $l = 0$ in $l = 3$

$l=0$



$l=3$



$$F(r) \propto \begin{cases} J_0(\kappa r) & \text{for } r \leq a \\ K_0(\gamma r) & \text{for } r \gtrsim a \end{cases}$$

$$F(r) \propto \begin{cases} J_3(\kappa r) & \text{for } r \leq a \\ K_3(\gamma r) & \text{for } r \gtrsim a \end{cases}$$

Parametri optičnega vlakna

$$\rho < a : k_{1\rho} = (k_1^2 - \beta^2)^{1/2} = (n_1^2 k_0^2 - \beta^2)^{1/2}, \quad \beta < n_1 k_0,$$

$$\rho > a : |k_{2\rho}| = (\beta^2 - k_2^2)^{1/2} = (\beta^2 - n_2^2 k_0^2)^{1/2}, \quad \beta > n_2 k_0$$

Parametra u in v :

$$u = k_{1\rho} a = a \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2},$$

$$w = |k_{2\rho}| a = a \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}.$$

Normirana frekvenca vlakna V :

$$V = \sqrt{u^2 + w^2} = k_0 a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = k_0 a n_1 \sqrt{2\Delta},$$

Efektivni lomni količnik n_e in normirani lomni količnik B :

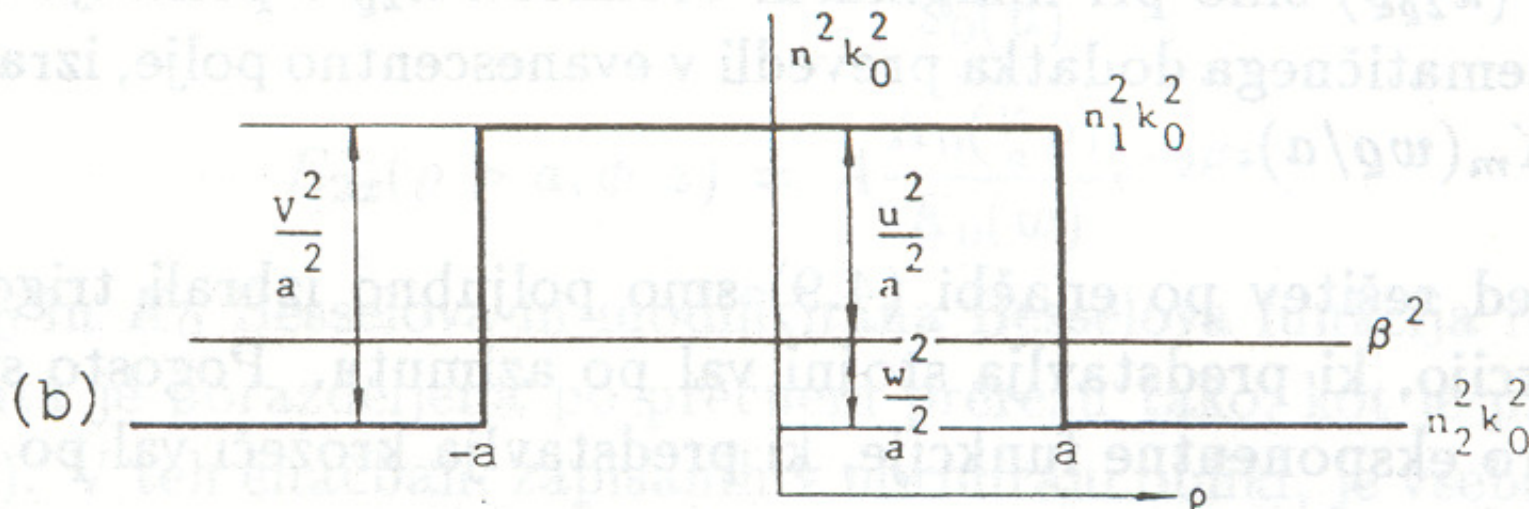
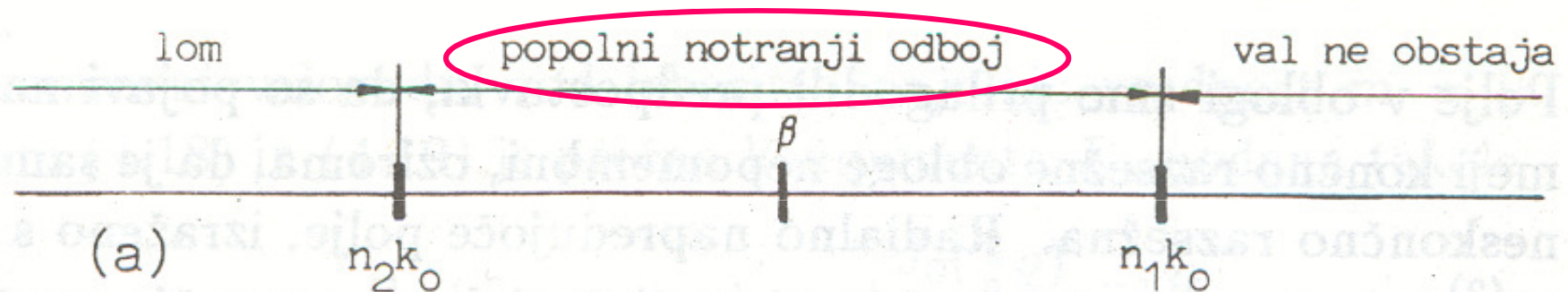
$$n_e = \frac{\beta}{k_0}, \quad n_2 < n_e < n_1,$$

$$B = \left(\frac{w}{V}\right)^2 = 1 - \left(\frac{u}{V}\right)^2 = \frac{n_e^2 - n_2^2}{n_1^2 - n_2^2} = \frac{\frac{\beta}{k_0} - n_2}{n_1 \Delta}.$$

Interval β za širjenje po vlaknu

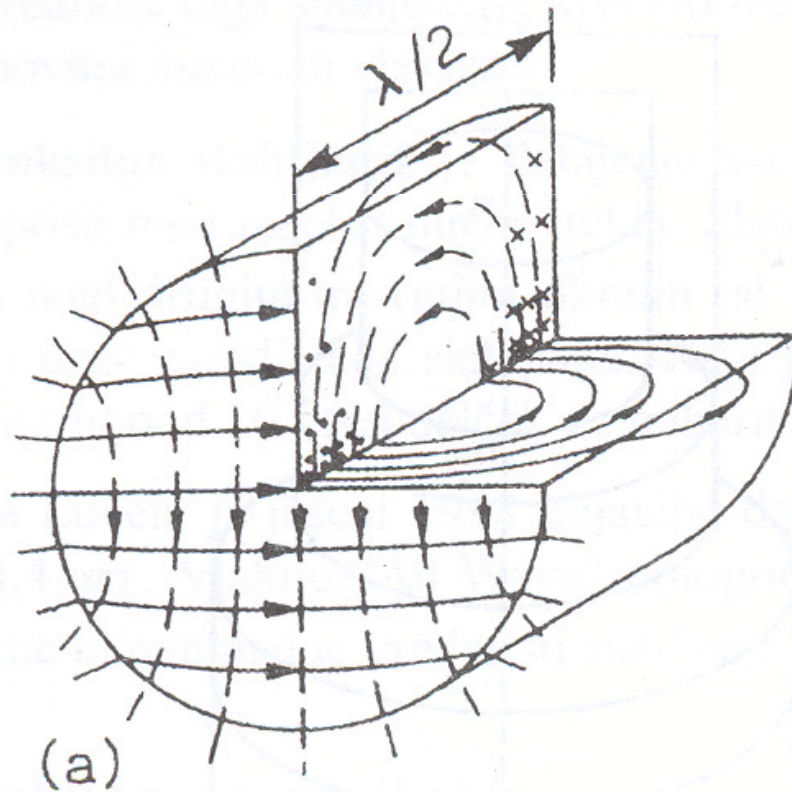
Splošna disperzijska enačba stopničastega vlakna:

$$\left(\frac{J'_m(u)}{uJ_m(u)} + \frac{K'_m(w)}{wK_m(w)} \right) \left(\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \frac{J'_m(u)}{uJ_m(u)} + \frac{K'_m(w)}{wK_m(w)} \right) = \left(\frac{m\beta}{k_0 n_2} \right)^2 \left(\frac{V}{uw} \right)^4$$

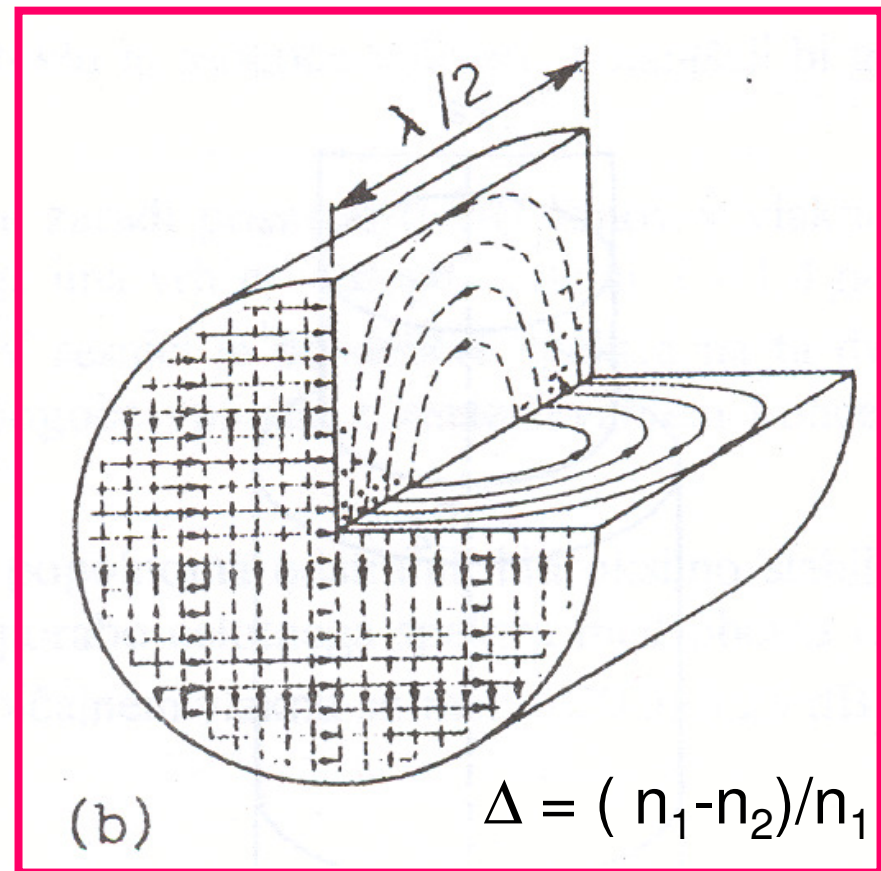


Polje osnovnega rodu HE₁₁

Rod HE₁₁ – polje v jedru
(poljubna vrednost Δ)



Rod HE₁₁ (LP₀₁) - polje v jedru
(šibkolomni približek $\Delta < 0,003$)



Prečne in vzdolžne komponente polja HE_{11} v šibkolomnem vlaknu ($\Delta < 0,01$)

Prečne (LP) komponente električnega polja v jedru in oblogi

$$E_{1x}(\rho < a, \phi, z) = A \frac{J_0\left(\frac{u}{a}\rho\right)}{J_0(u)}$$

$$E_{2x}(\rho > a, \phi, z) = A \frac{K_0\left(\frac{w}{a}\rho\right)}{K_0(w)}$$

Vzdolžne komponente električnega polja v jedru in oblogi

$$E_{1z}(\rho < a, \phi, z) = j \frac{A u}{\beta a} \frac{J_1\left(\frac{u}{a}\rho\right)}{J_0(u)} \cos \phi e^{-j\beta z}$$

$$E_{2z}(\rho > a, \phi, z) = j \frac{A w}{\beta a} \frac{K_1\left(\frac{w}{a}\rho\right)}{K_0(w)} \cos \phi e^{-j\beta z}$$

Disperzijska enačba osnovnega rodu

$$\left(\frac{J'_m(u)}{uJ_m(u)} + \frac{K'_m(w)}{wK_m(w)} \right) \left(\left(\frac{n_1}{n_2} \right)^2 \frac{J'_m(u)}{uJ_m(u)} + \frac{K'_m(w)}{wK_m(w)} \right) = \left(\frac{m\beta}{k_0 n_2} \right)^2 \left(\frac{V}{uw} \right)^4$$

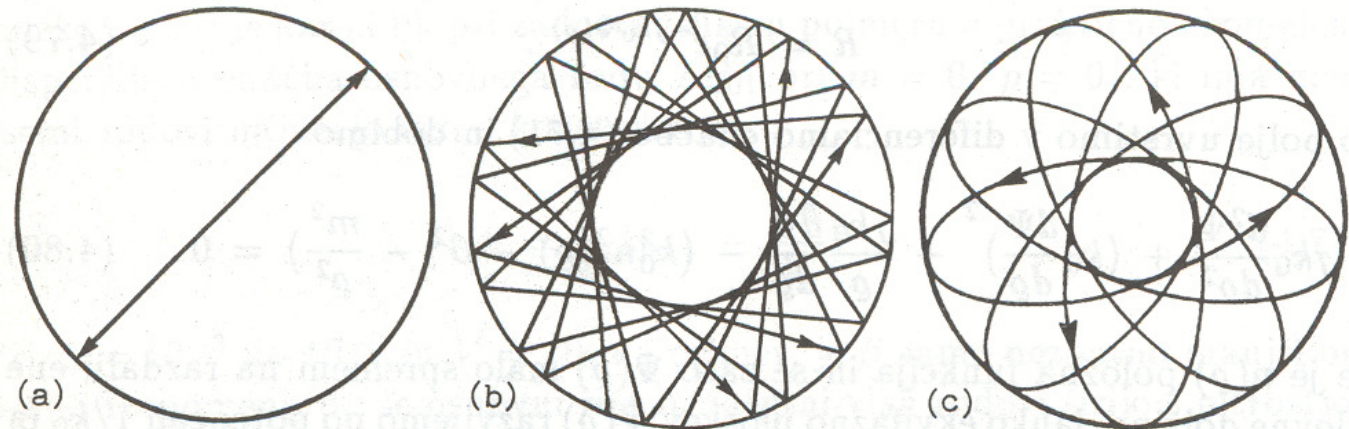
Osnovni rod HE_{11} šibkolomnem vlaknu ($\Delta < 0,01$)

$$\frac{uJ_1(u)}{J_0(u)} - \frac{wK_1(w)}{K_0(w)} = 0$$

Mnogorodovno vlakno

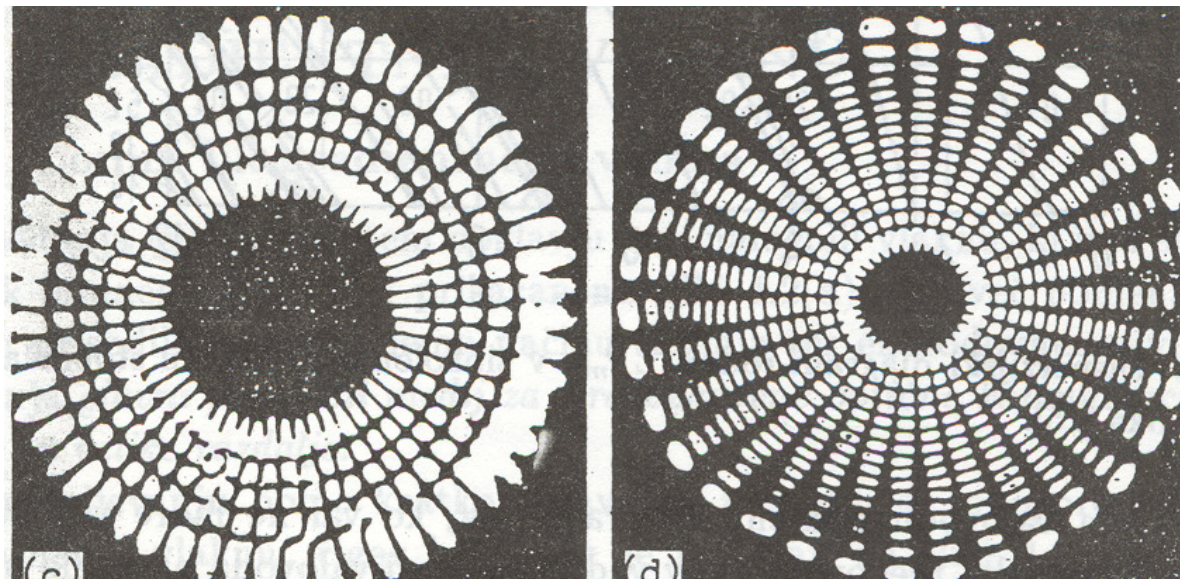
Trajektorije žarkov v vlaknu:

- (a) Rodovi TE in TM
- (b) Hibridni v stopničastem vlaknu
- (c) Hibridni v gradientnem vlaknu



Gostota moči v vlaknu:

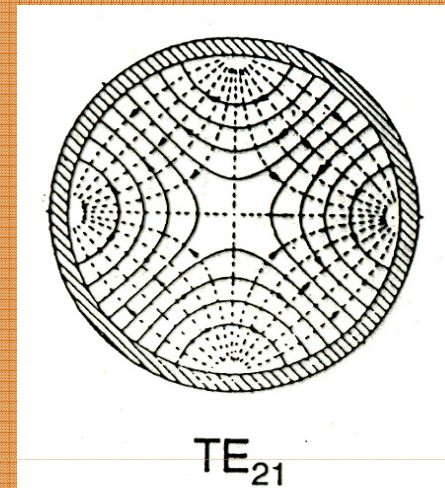
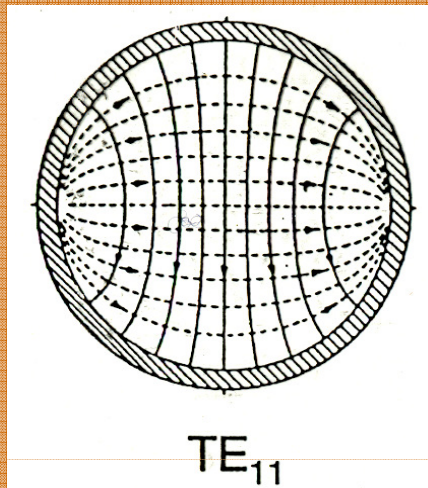
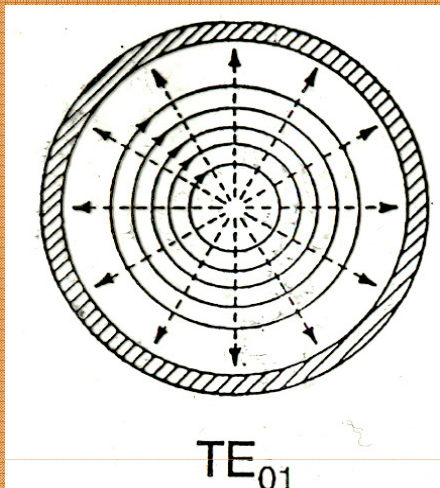
- (c) Rod $LP_{17,16}$
- (d) Rod $LP_{28,5}$



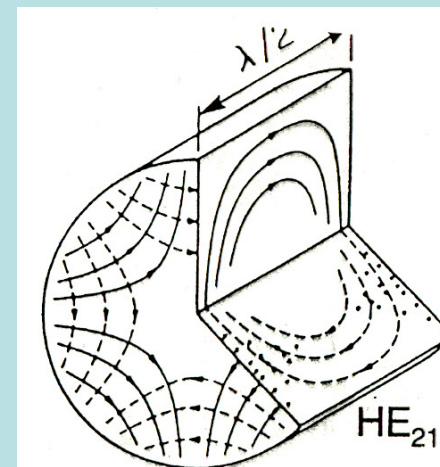
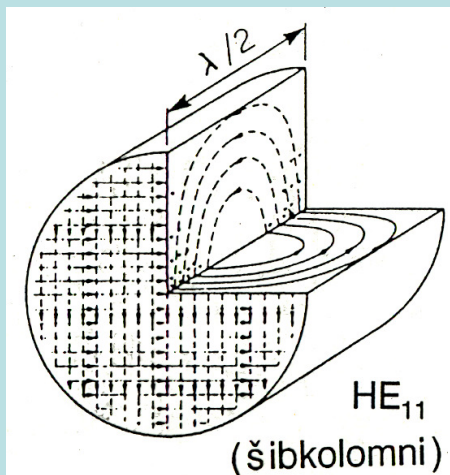
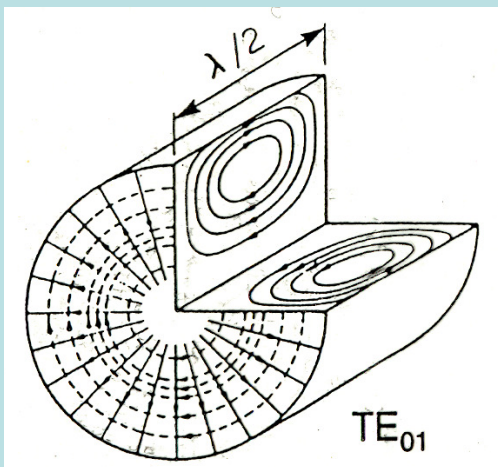
$$\frac{\mu J_1(u)}{J_0(u)} - \frac{w K_1(w)}{K_0(w)} = 0$$

kovinskem in dielektričnem valovodu

Kovinski valovod krožnega prereza

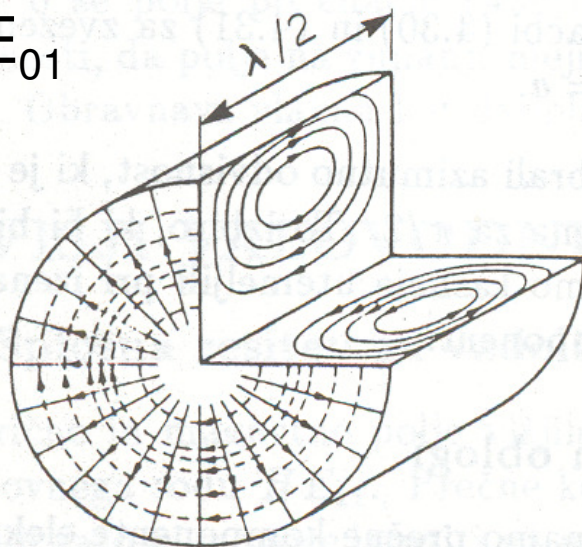


Dielektrični valovod (vlakno)



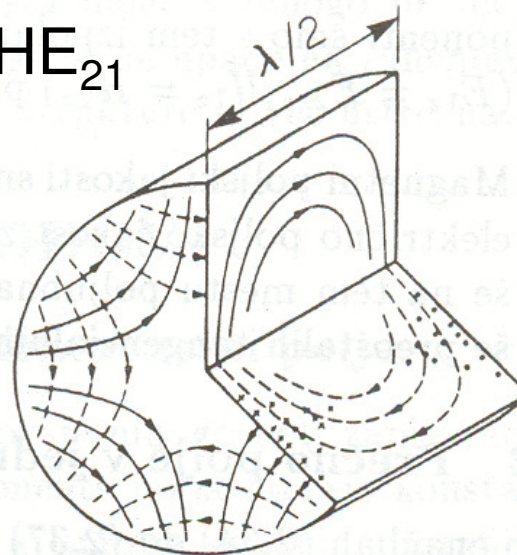
Polje nižjih rodov

TE_{01}



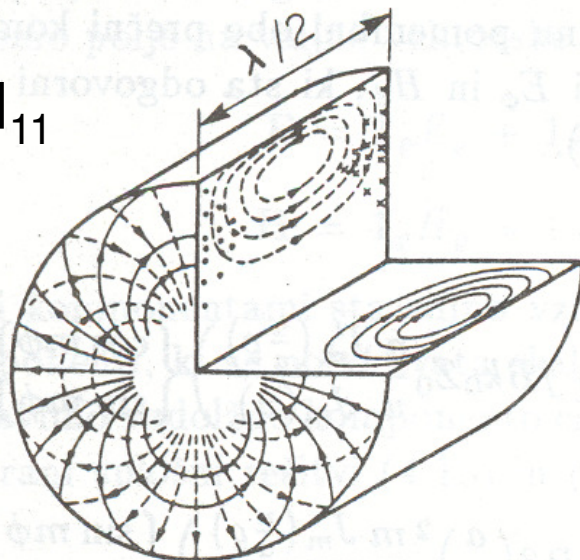
(a)

HE_{21}



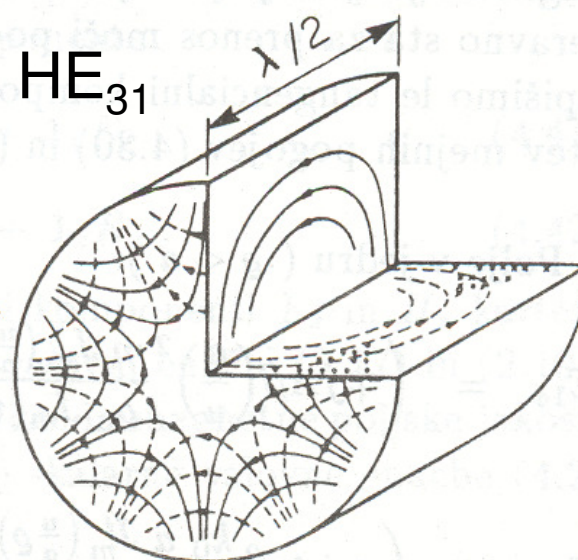
(b)

EH_{11}

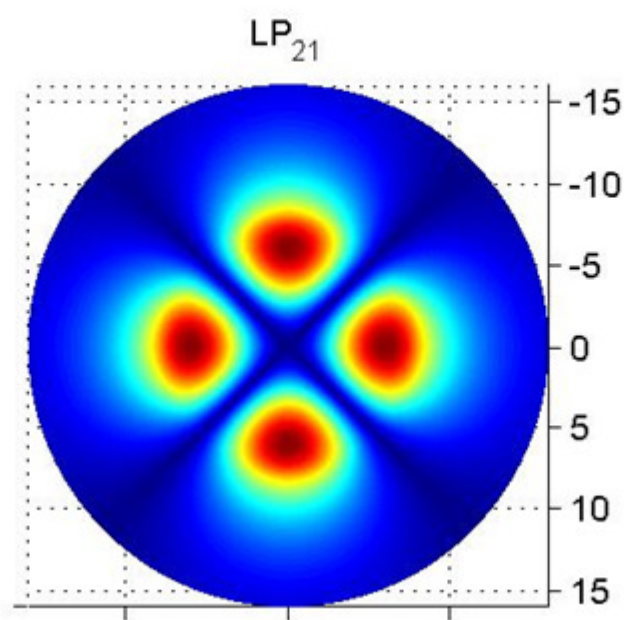
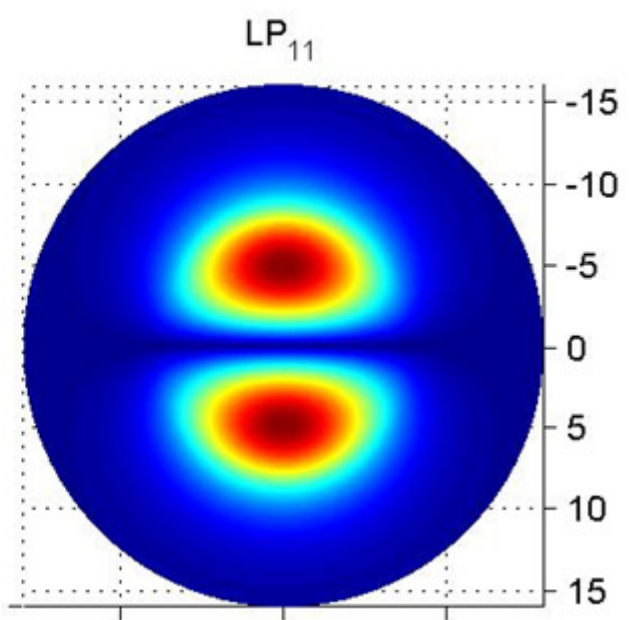
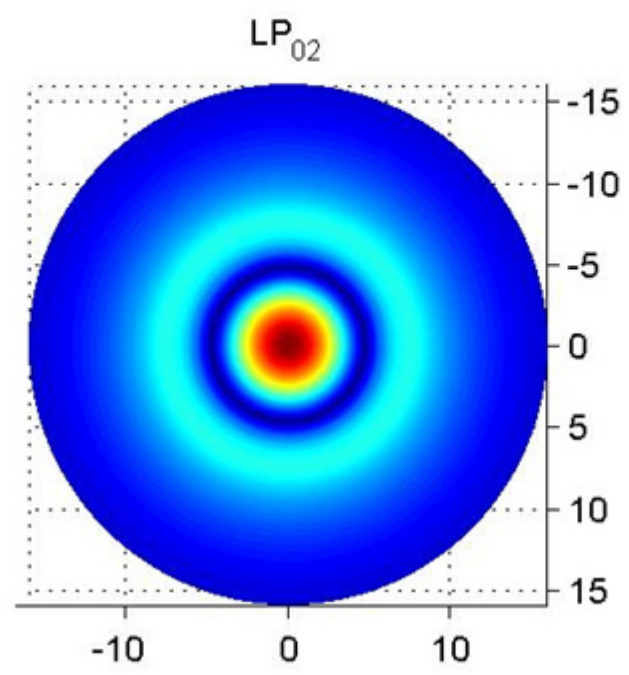
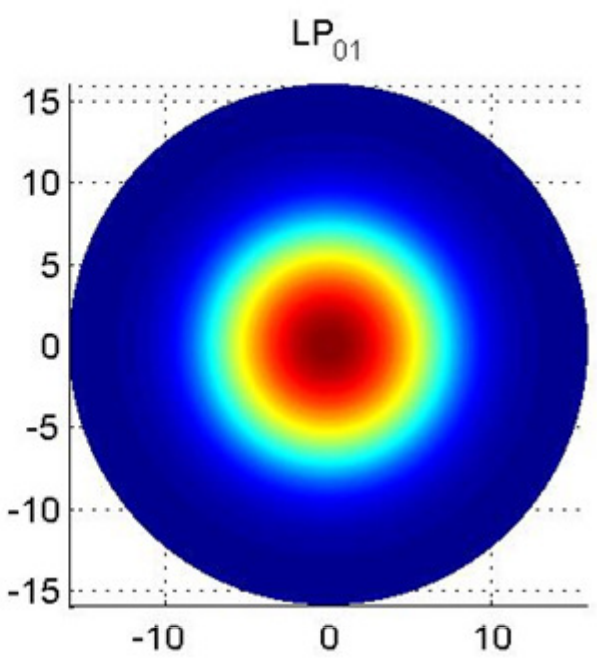


(c)

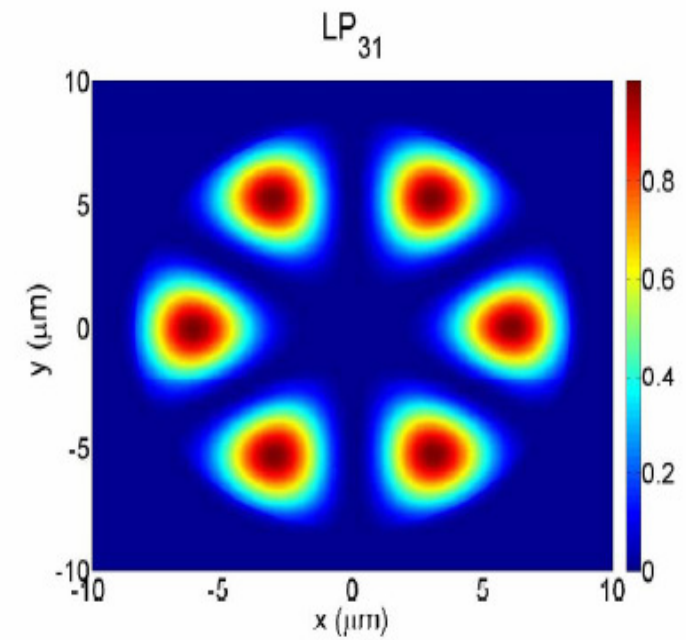
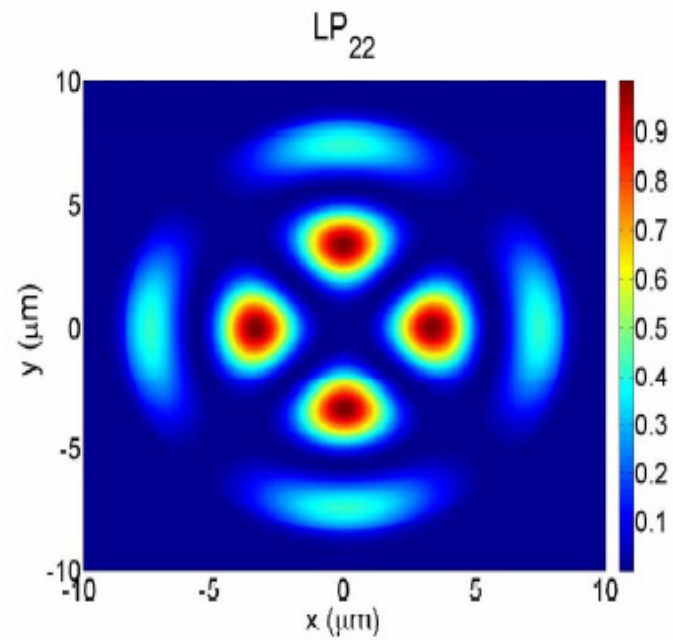
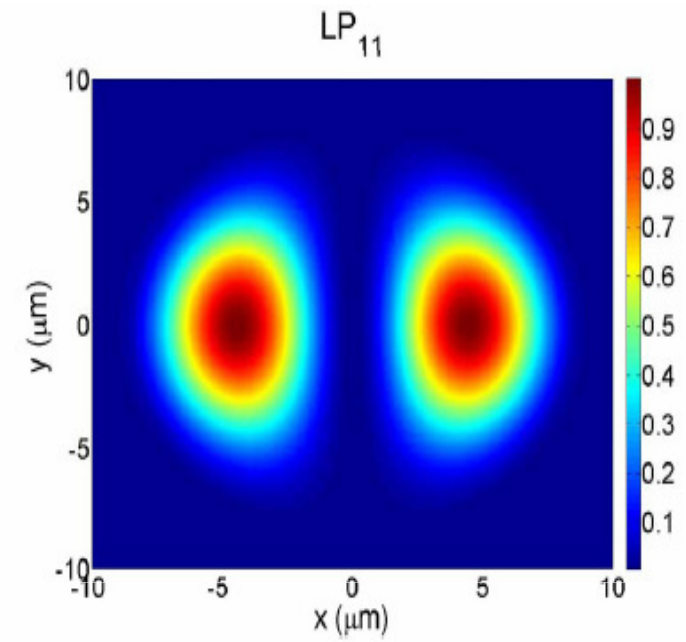
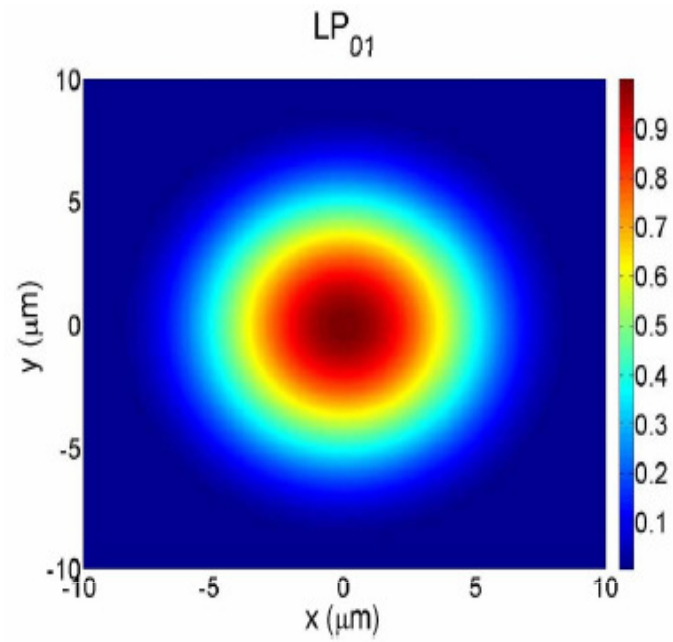
HE_{31}



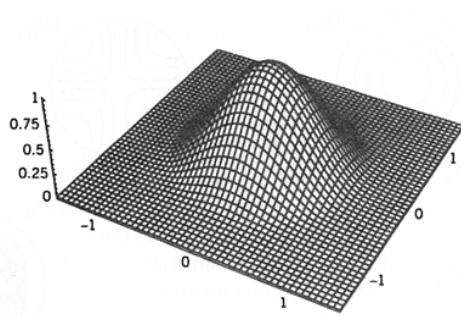
(d)



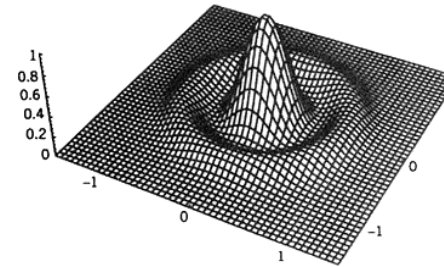
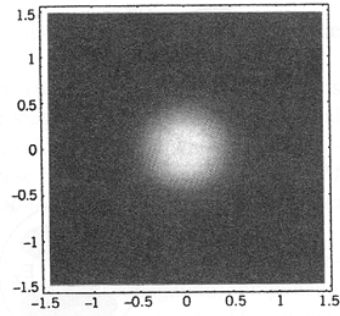
LP rodovi nižjega reda



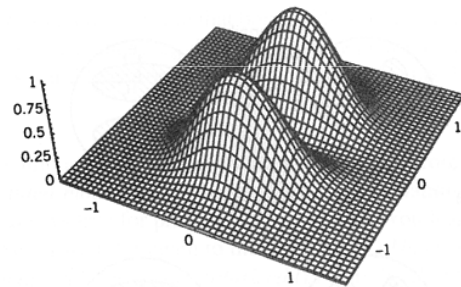
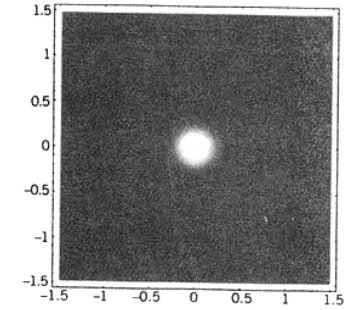
Vlakenski rodovi



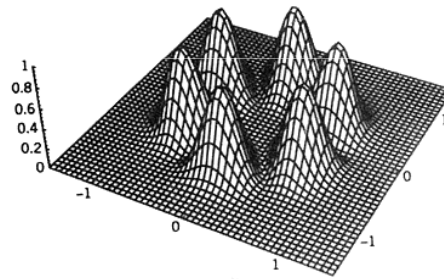
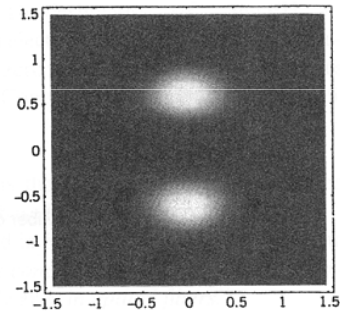
LP₀₁



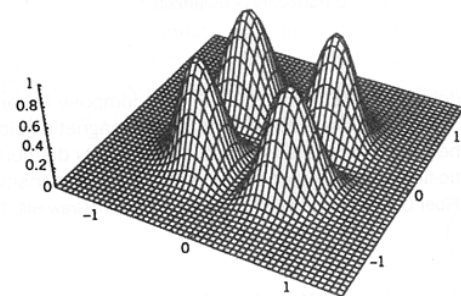
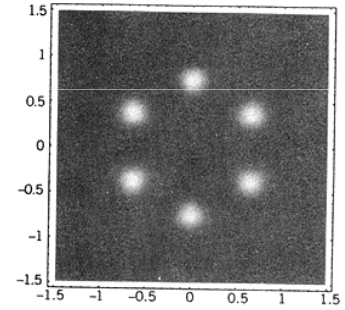
LP₀₂



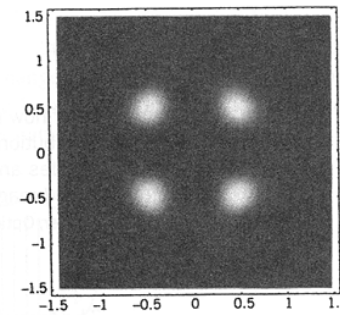
LP₁₁



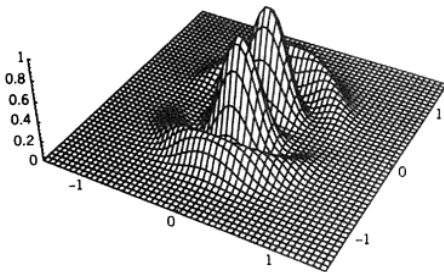
LP₃₁



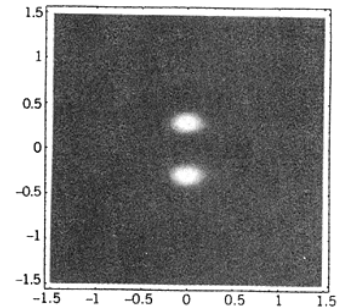
LP₂₁



a)

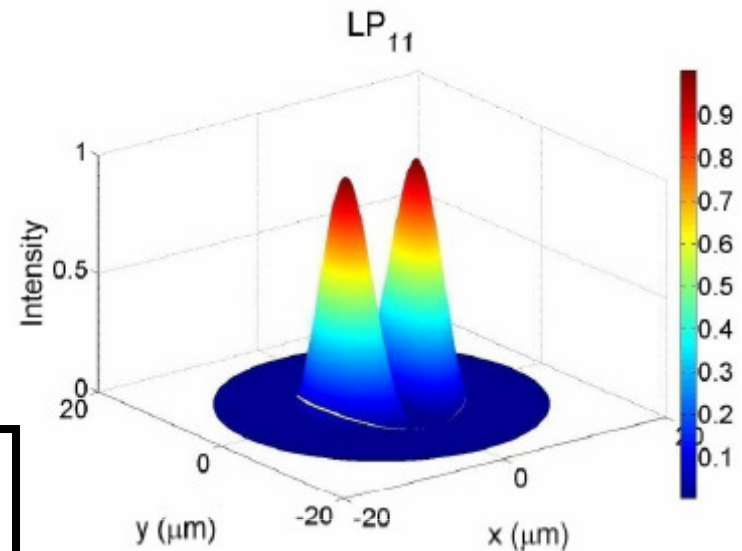
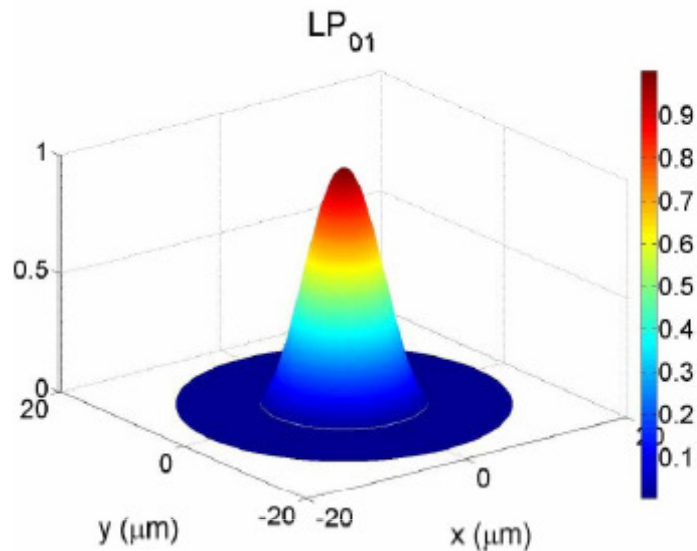


LP₁₂



b)

LP rodovi nižjega reda



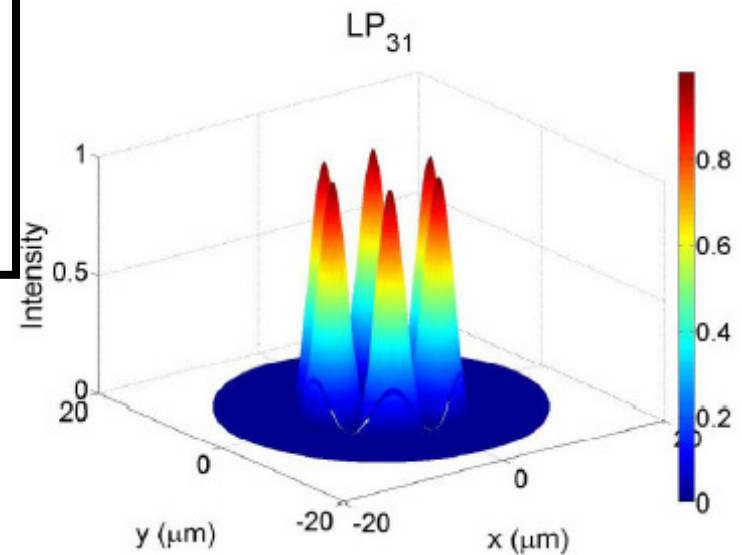
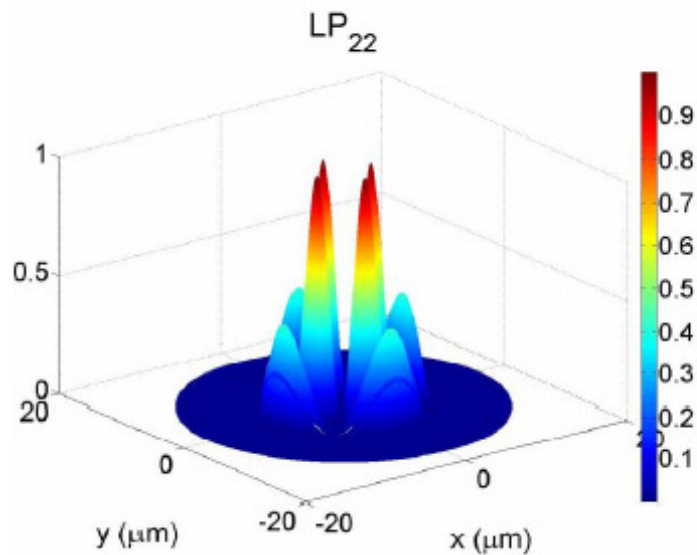
Podatki:

$$\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$$

$$a = 8,335 \mu\text{m}$$

$$n_1 = 1,46242$$

$$\delta = 0,034$$



Karakteristična enačba

Mejni pogoji za zvezen prehod tangencialnih komponent polja na meji med jedrom in oblogo dajejo naslednjo enačbo:

$$\left[\frac{J'_l(K)}{KJ_l(K)} + \frac{K'_l(\Gamma)}{\Gamma K_l(\Gamma)} \right] \times \left[\frac{n_1^2}{n_2^2} \frac{J'_l(K)}{KJ_l(K)} + \frac{K'_l(\Gamma)}{\Gamma K_l(\Gamma)} \right] = \frac{l^2 \beta_{lm}^2}{n_2^2 k_0^2} \left[\frac{1}{K^2} + \frac{1}{\Gamma^2} \right]^2$$

kjer je $K = a\kappa$ in $\Gamma = a\gamma$

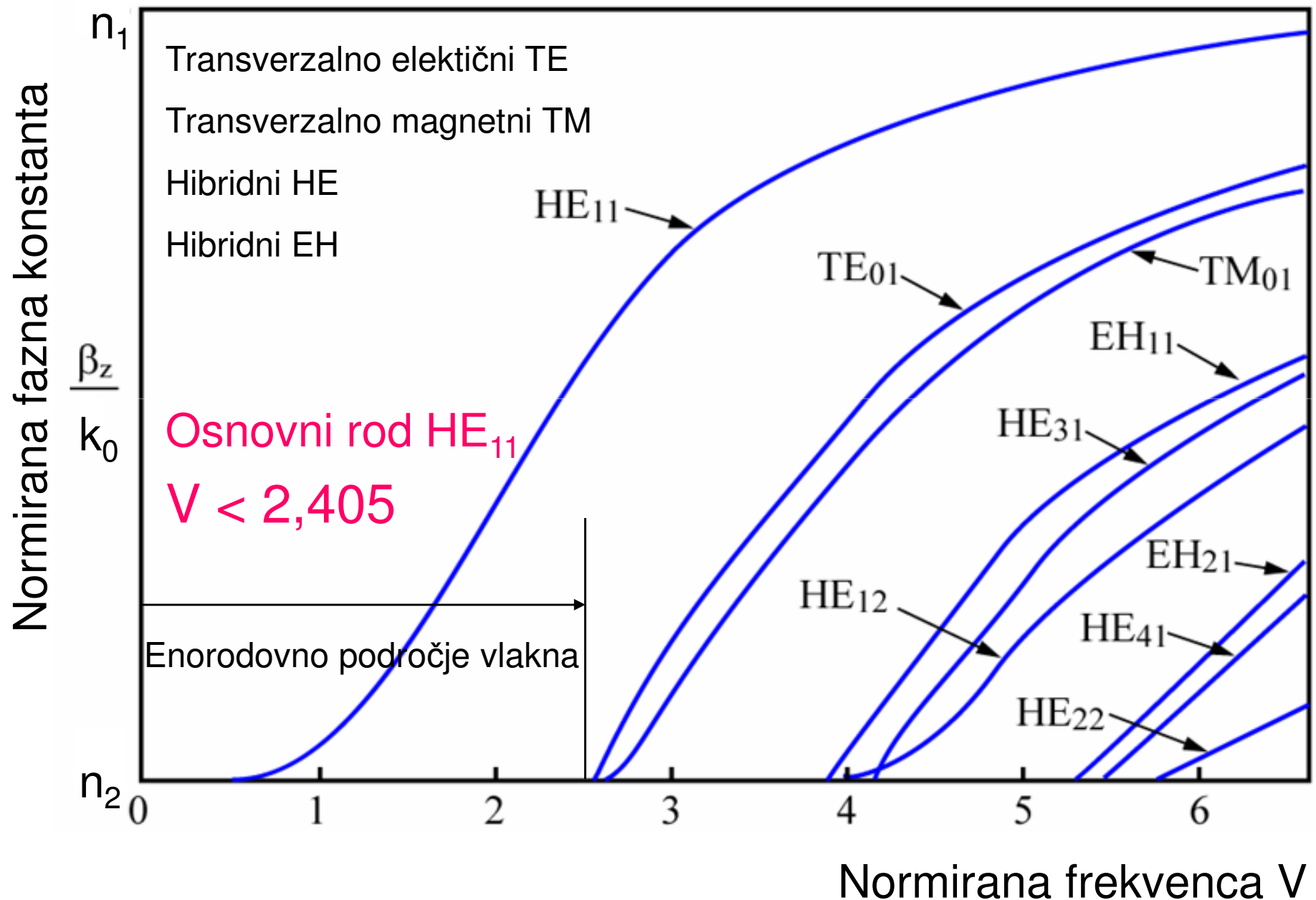
$$\kappa^2 = (n_1 k_0)^2 - \beta^2$$

$$\gamma^2 = \beta^2 - (n_2 k_0)^2$$

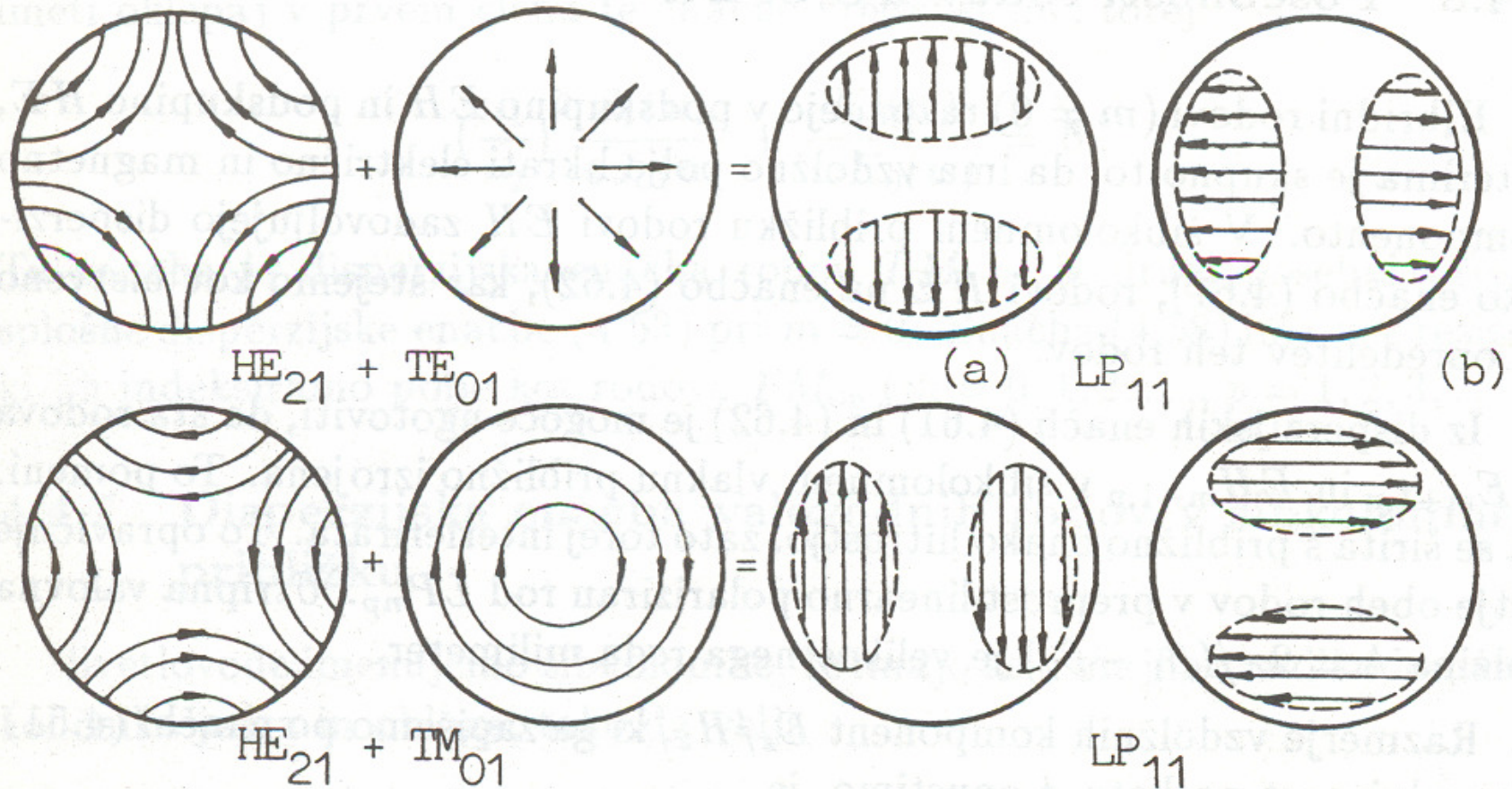
$$\kappa^2 + \gamma^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) = k_0^2 NA^2$$

Iz karakteristične enačbe sledi fazna konstanta β , ki je za širjenje najpomembnejši podatek

Hibridni rodovi v optičnem vlaknu

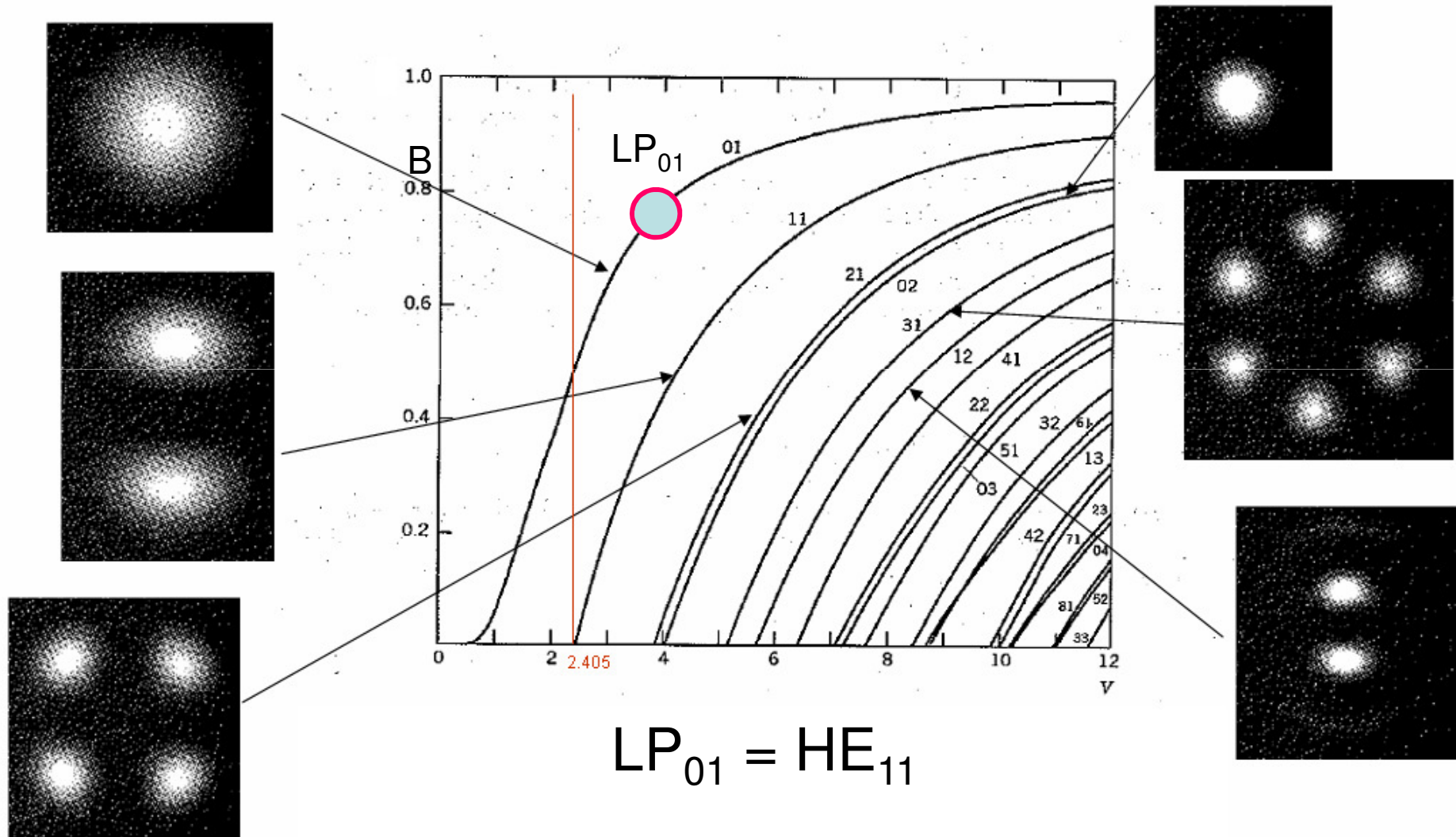


Linearno (ravno) polarizirani valovi



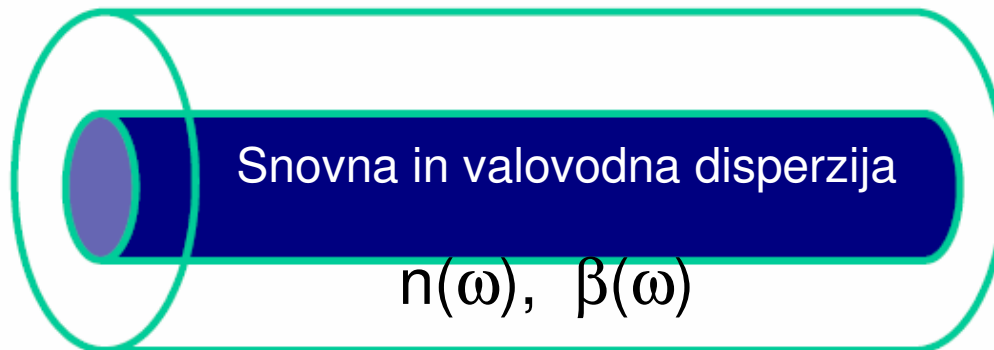
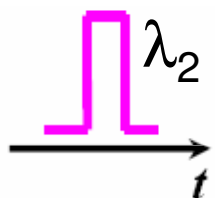
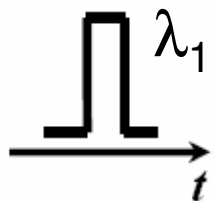
Rod LP_{11} je 4 krat degeneriran

Disperzijski diagram LP rodov



Disperzija

Snovna in valovodna disperzija



Razpršitev



Različne barve imajo različno zakasnitev, ki je vzrok za zakasnitev in intersimbolno interferenco.

Koeficient snovne disperzije $n = n(\omega)$:

$$D_s = -\frac{\lambda}{c} \frac{d^2 n}{d\lambda^2} \quad \text{ps/nm} \times \text{km}$$

Koeficient valovodne disperzije $\beta = \beta(\omega)$:

$$D_v = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d^2 \beta}{d\lambda^2} \quad \text{ps/nm} \times \text{km} \quad v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \left(-\frac{\lambda^2}{2\pi c} \frac{d\beta}{d\lambda} \right)^{-1}$$

Disperzija najpomembnejših vlaken

Našteta vlakna se pogosto uporabljajo v transportnih omrežjih.

Vrsta vlakna	Disperzija [ps/nmkm]	Naklon disperzije [ps/nm ² km]	κ [nm]
SMF	17	0.058	298
LEAF	4.2	0.085	50
TrueWave-RS	4.5	0.045	100
TeraLight	8	0.057	140
PureGuide	8	0.06	133

Valovodna disperzija

Valovodno disperzijo lahko izrazimo s polmerom w_0 svetlobnega jedra



Delež moči v jedru in oblogi se z λ spreminja.

$$w_0 = a \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad V = ak_0 NA = \frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Koeficient valovodne disperzije:

$$D_{\text{valovodna}} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) = \frac{\lambda}{2\pi^2 nc} \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{\lambda}{w_0^2} \right)$$

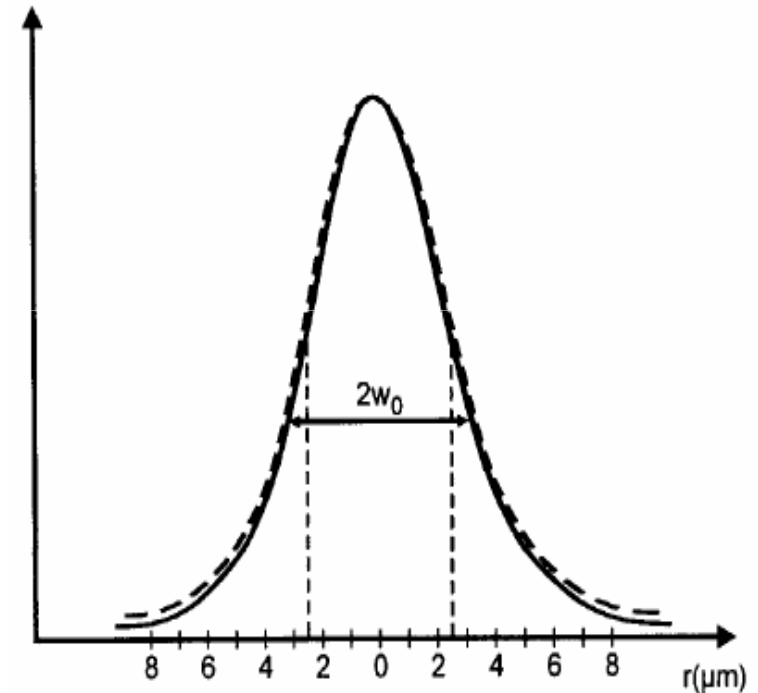
Polmer svetlobnega jedra

$$F(\rho) = C e^{-\left(\frac{\rho}{w_0}\right)^2}$$

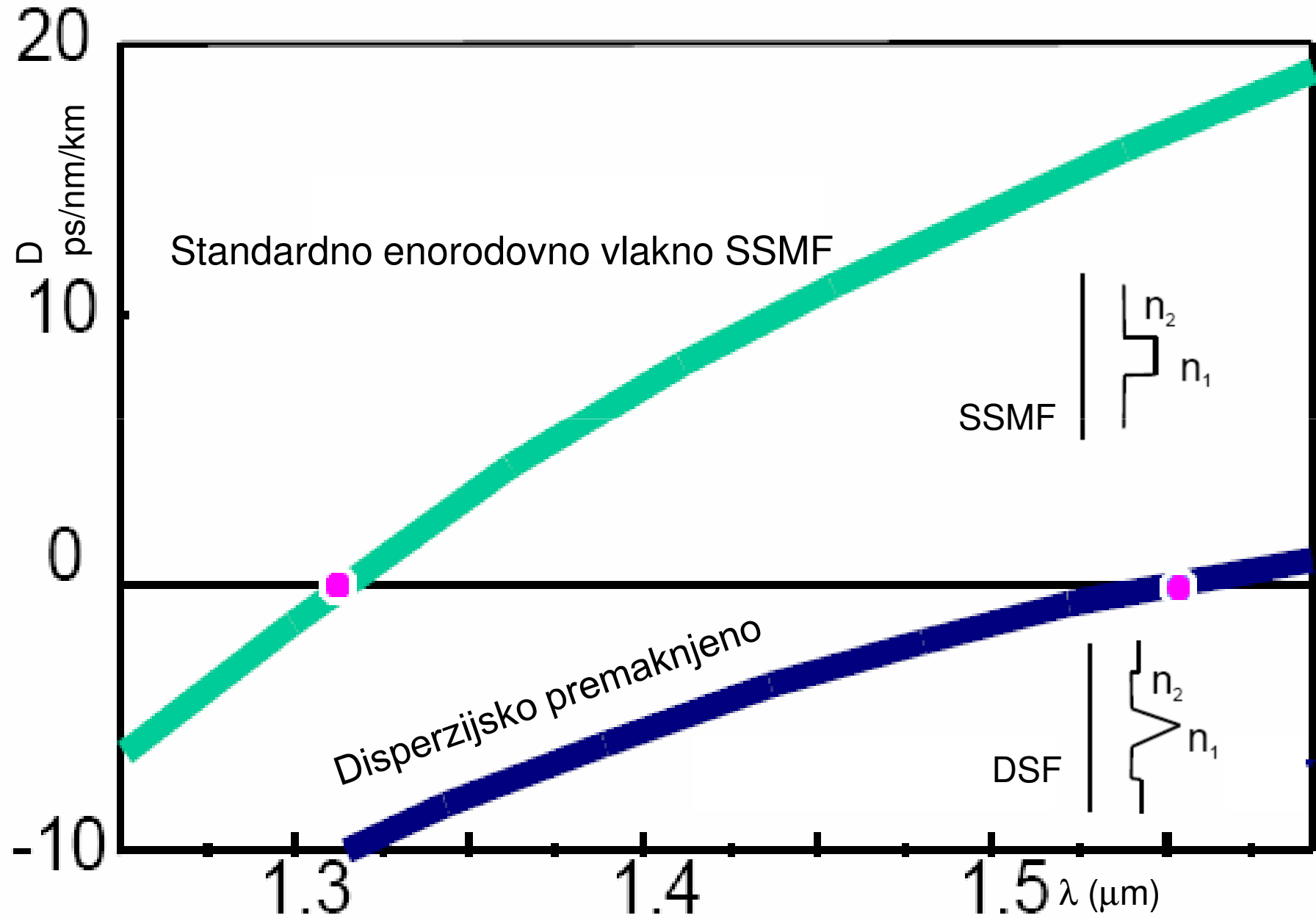
kjer je C konstanta in je w_0 polmer svetlobnega jedra:

$$w_0 = a \left(0.65 + \frac{1.619}{V^{3/2}} + \frac{2.879}{V^6} \right) \quad 1.2 < V < 2.4$$

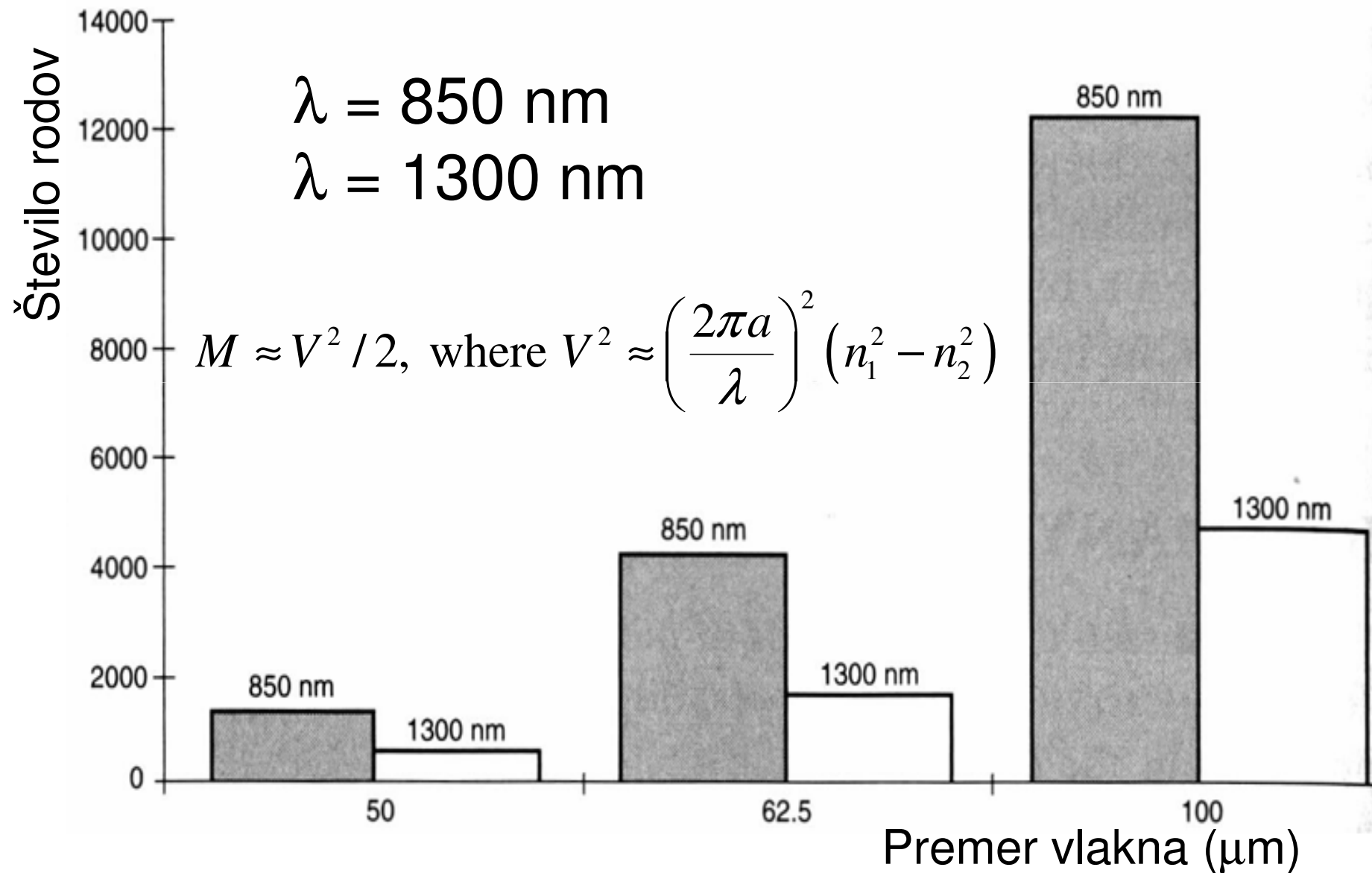
$$w_0 = \frac{a}{\sqrt{\ln(V)}} \quad V > 2.4$$



Disperzija v SSMF in DSF



Števílo rodov

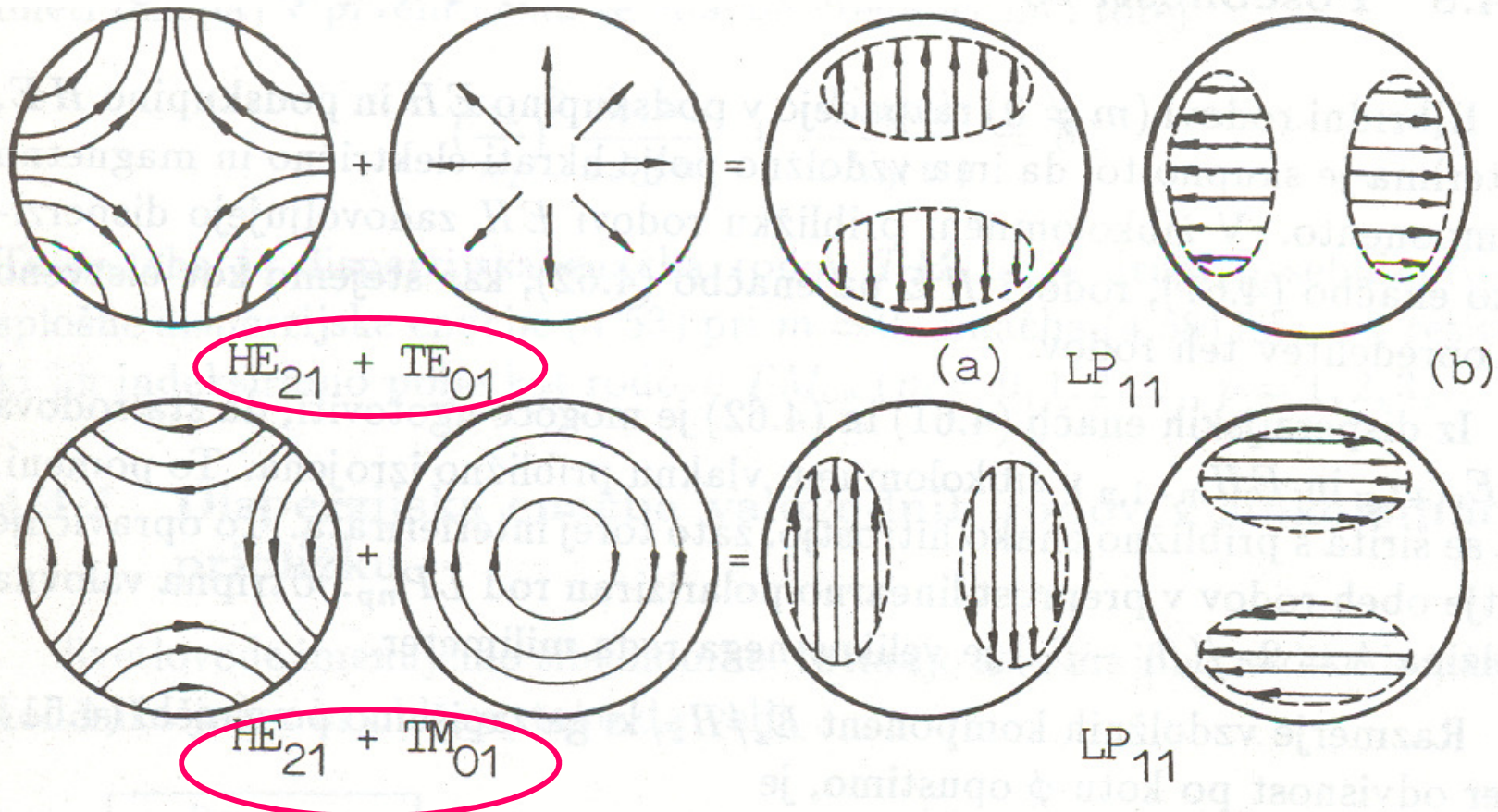


Linearno polariziran rod LP_{11}

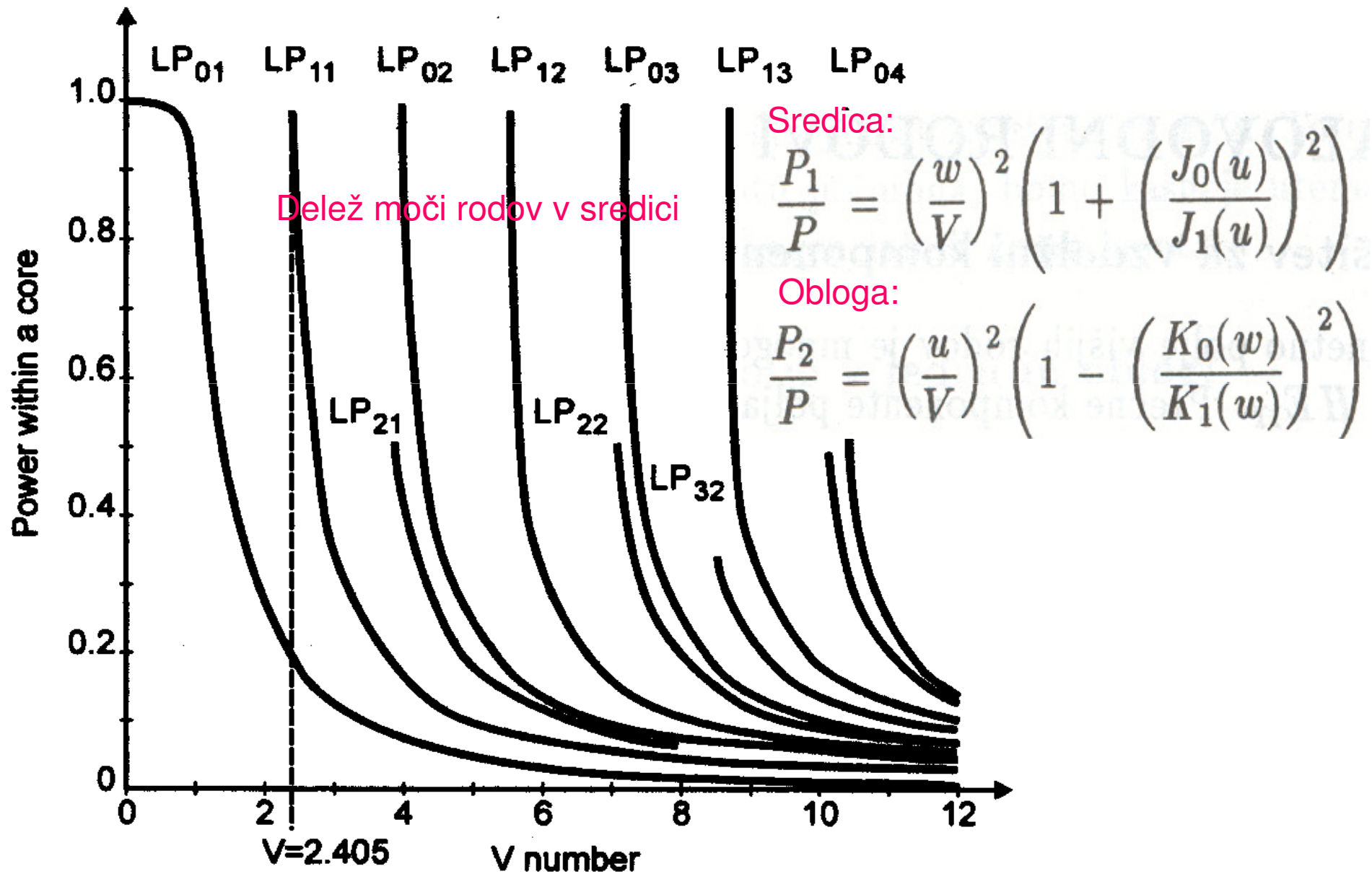
Splošna sinteza LP rodov iz hibridnih rodov:

$$LP_{m,p} = HE_{m+1,p} \pm EH_{m-1,p}$$

$$(LP_{01} = HE_{11})$$

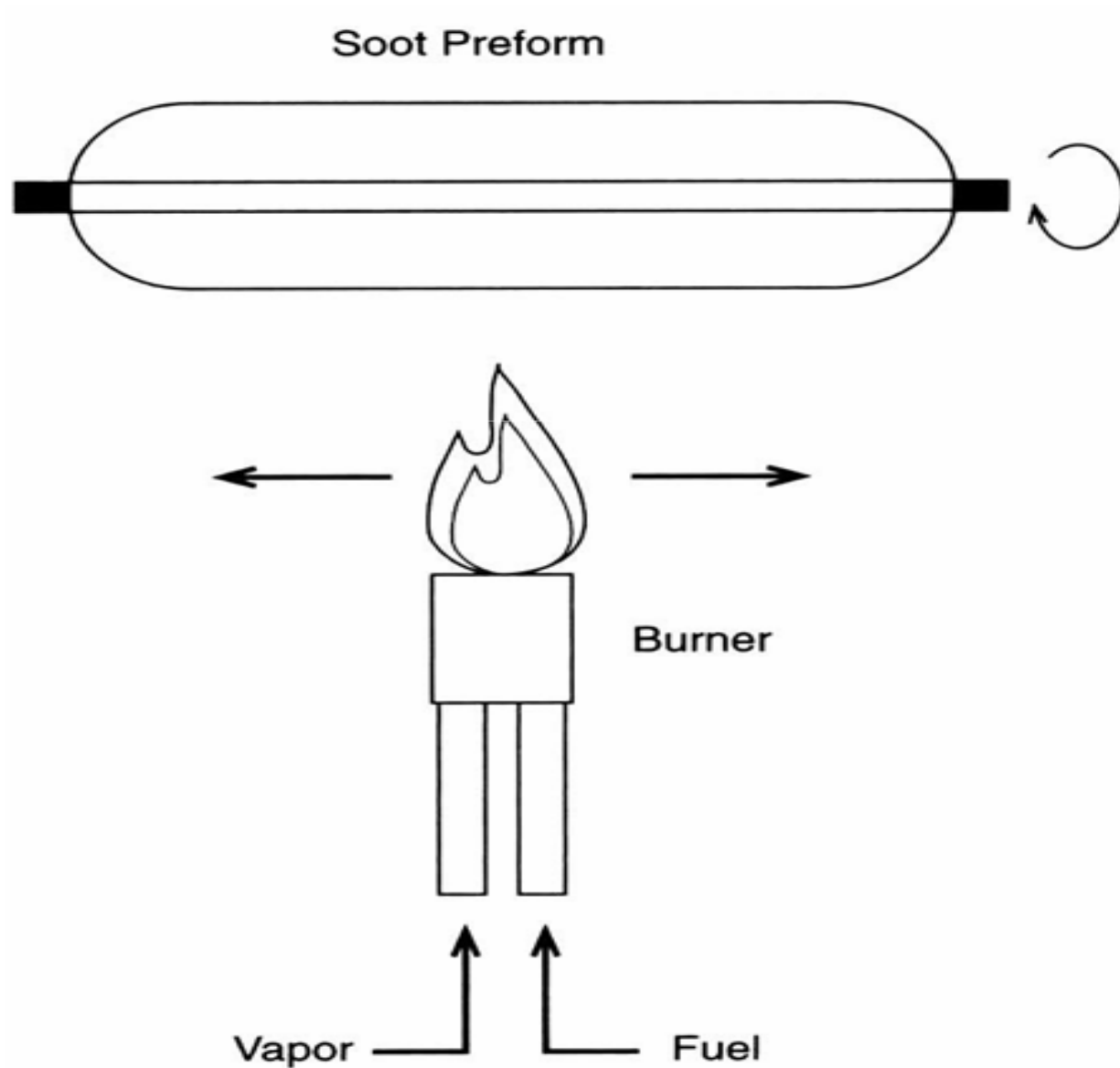


Delež moči v sredici in oblogi

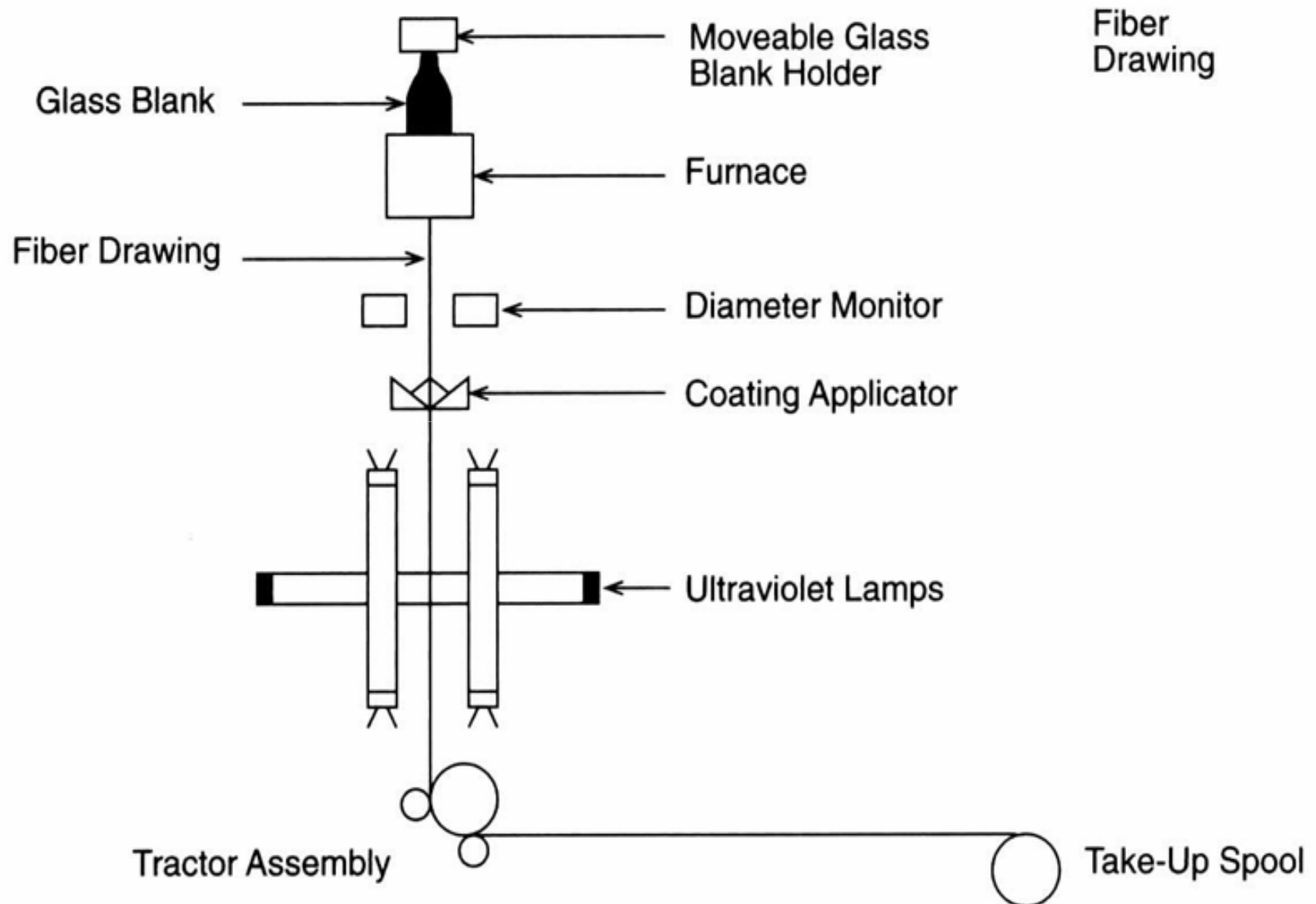


Tehnologija

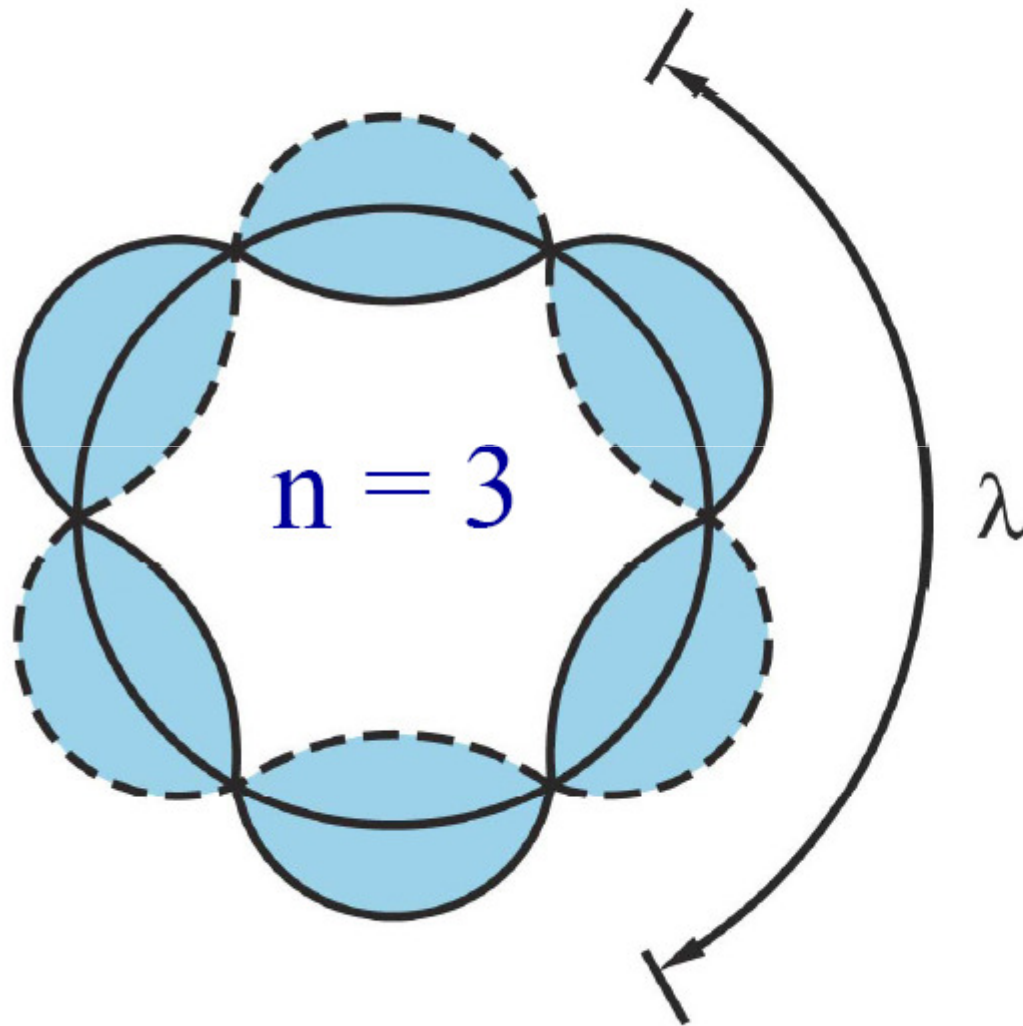
Priprava surovca



Vlečenje optičnega vlakna



Konec



Standing waves in H at
Constructive interference

$$n\lambda = 2\pi r$$

since $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$...

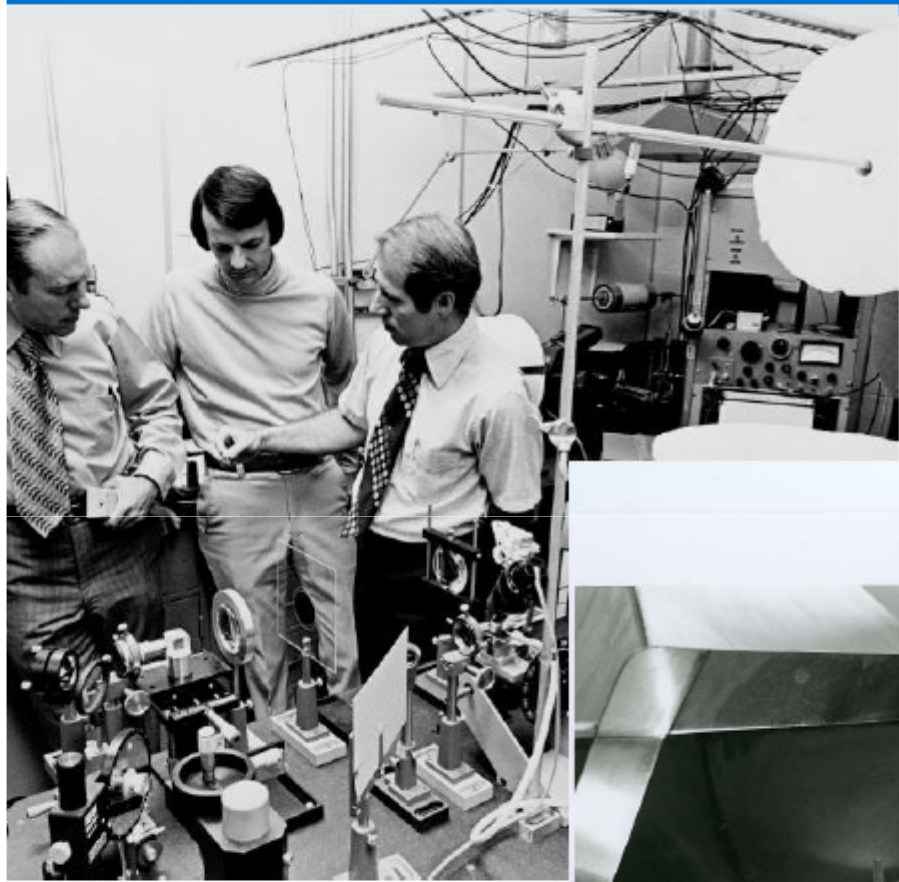
$$\Rightarrow \frac{nh}{mv} = 2\pi r$$

$$\Rightarrow \boxed{nh = mvr}$$

Angular momentum



ationizing the telecommunications industry



Robert Mauer
Peter Schultz
Donald Keck

Then the attenuation is:

$$\alpha_c = 10 \log \frac{40}{29} = 17 \text{ dB/km} \text{ Whoa!}$$

Must measure this to check!

Left laser and electronics running during lunch, signal is holding constant @ 158 mW. Noise is definitely lower. Maximized input and found I had to decrease the HV to 850.

HV = 850, RC = 100, R_L = 100 kΩ.

Break fiber: S = 42.2 mW S_{inj} = 158 input in fluid.
S = 49.7 S_{inj} = 159 (laser in air slightly)

$$\frac{75}{2.2} = 18.2 \text{ dB/km}$$

α_c = 22, no air guide, on the output end just

2 patterns for it are on d (m² - m²)^{1/2} = 0.376
 he had a value of 0.36 with 3.7 μm. This predicts a value can then be

$$\alpha_c = \frac{\pi(3.7)}{0.6328} \left[(1.404)^2 - (1.457)^2 \right]^{1/2}$$

SEE PROTECTIVE GLASS !!!

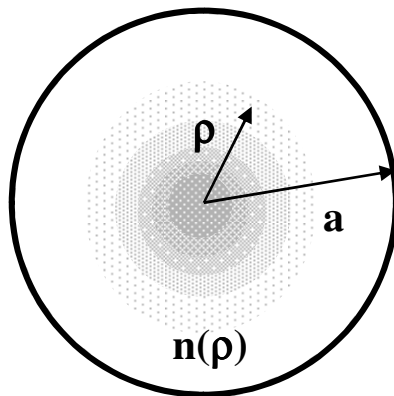
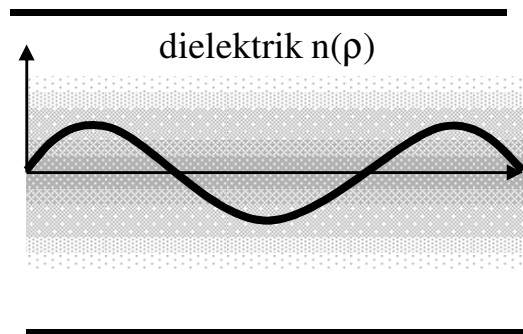


Vodeni ravninski valovi

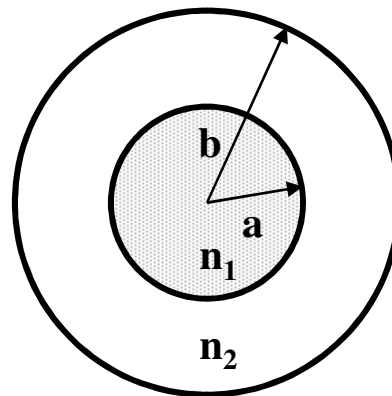
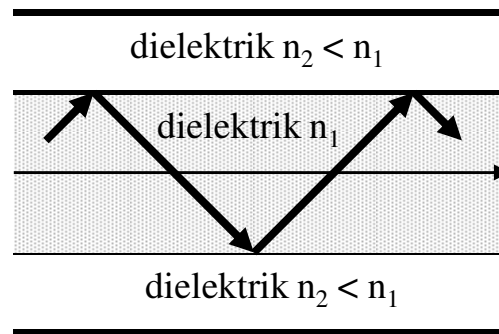
- Optični valovodi - svetlovodi
 - planarni svetlovodi (integrirana tehnika)
 - vlakenski svetlovodi (prenos, različne naprave)

• Mehanizmi vodenja valovanja po svetlovodu:

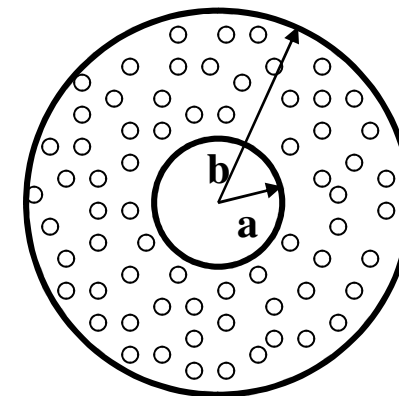
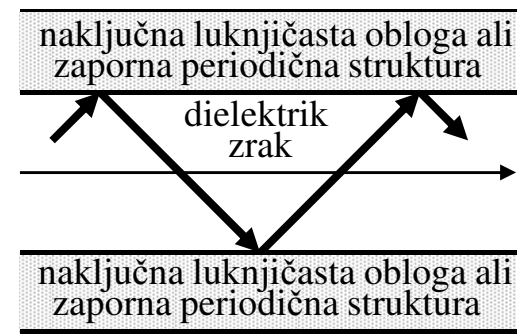
• LOM



• POPOLNI NOTRANJI ODBOJ



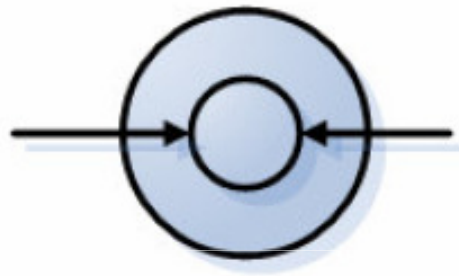
- n_{ef} OBLOGE ali
- ZAPORNI PAS



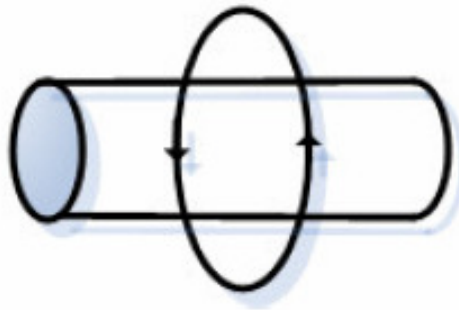
Valovni rodovi: hibridni HE ali EH (valovi TE in TM so poseben primer, TEM ne obstaja)

Neprimerna stanja optičnega vlakna

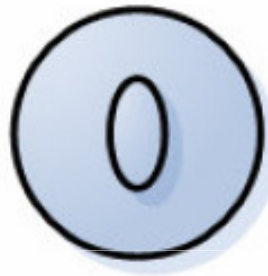
Pritisk obloge
na jedro



Zvoj



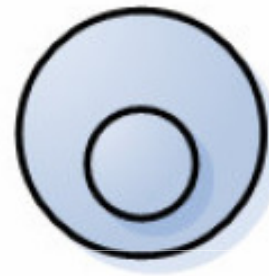
Eliptičnost



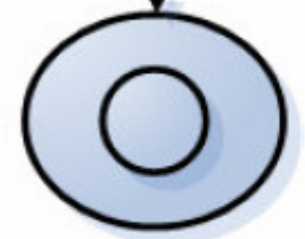
Krivina



Ekscentričnost



Zunanja sila



Mode number reduction caused by bending

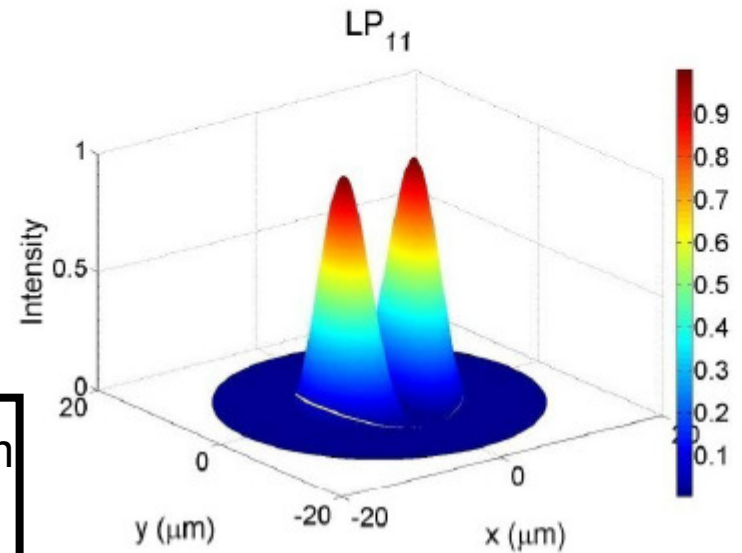
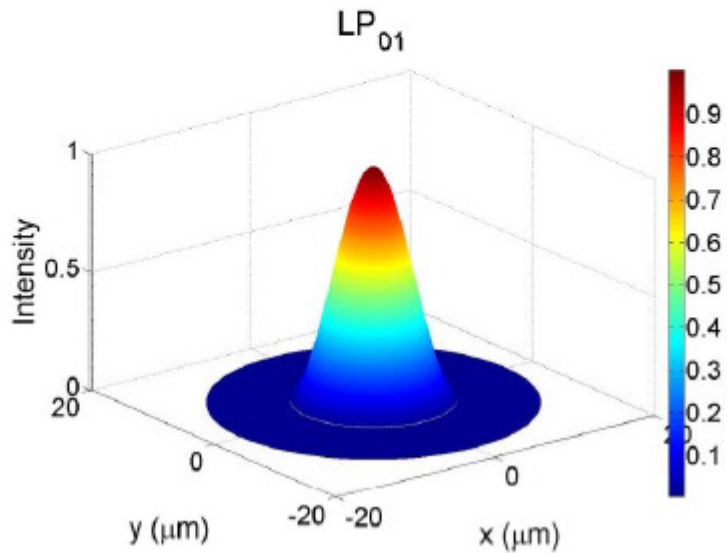
$$N_{bent} = N_{straight} \left\{ 1 - \frac{\alpha + 2}{2\alpha\Delta} \left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{3}{2n_2 k R} \right)^{2/3} \right] \right\}$$

Cut-off Wavelength

Definition: the wavelength below which multiple modes of light can be propagated along a particular fiber, i.e., $\lambda \geq \lambda_c$, single mode, $\lambda < \lambda_c$, multi-mode

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2.405} \times NA$$

$\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ $a = 8.335 \mu\text{m}$ $n_1 = 1.462420$ $\delta = 0.034$



Podatki:

$\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$
 $a = 8,335 \mu\text{m}$
 $n_1 = 1,46242$
 $\delta = 0,034$

