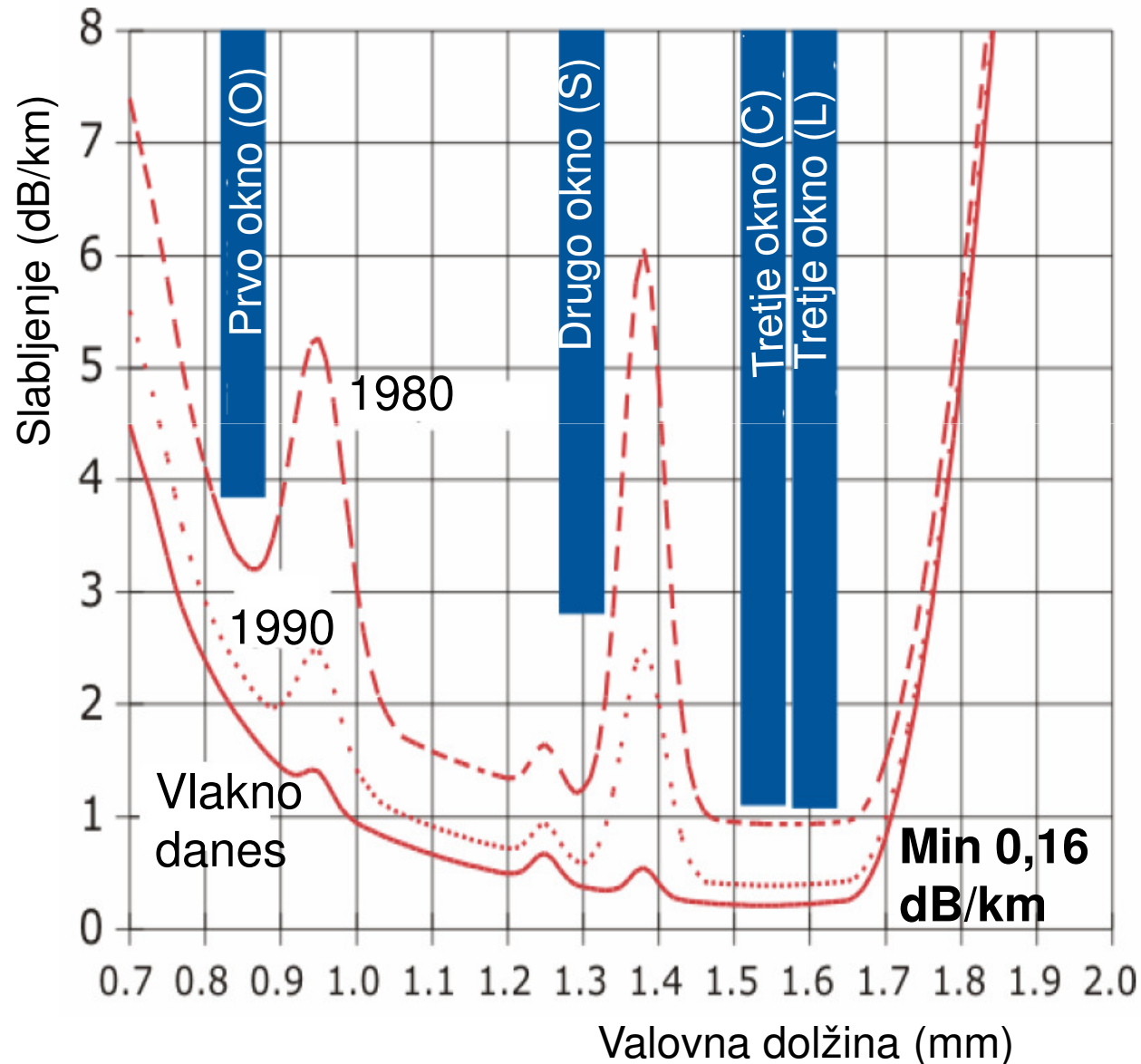


Slabljenje v vlaknu



Mobitel d.d.,
izobraževanje

2. 4. 2010,
predavanje 4

Prof.dr.Jožko
Budin

Ponovitev:

Predavanje 3
Optično vlakno

Optično prenosno vlakno, ključne lastnosti

3

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 $\alpha = 0,16$ 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 $A_{\text{ef}} > 80$ μm^2 (posebna vlakna)
-

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.

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: | 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: | 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 vlakno za dostop, LAN in MAN
- b vlakno za dostop, LAN in MAN
- c vlakno, očiščeno OH ionov (min. slabljenje), CWDM
- d vlakno, očiščeno OH ionov (min. slabljenje), CWDM

Parametri optičnega vlakna - pregled

6

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

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

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

u in v: $w = |k_{2e}| a = a \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}.$

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 :

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

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

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.

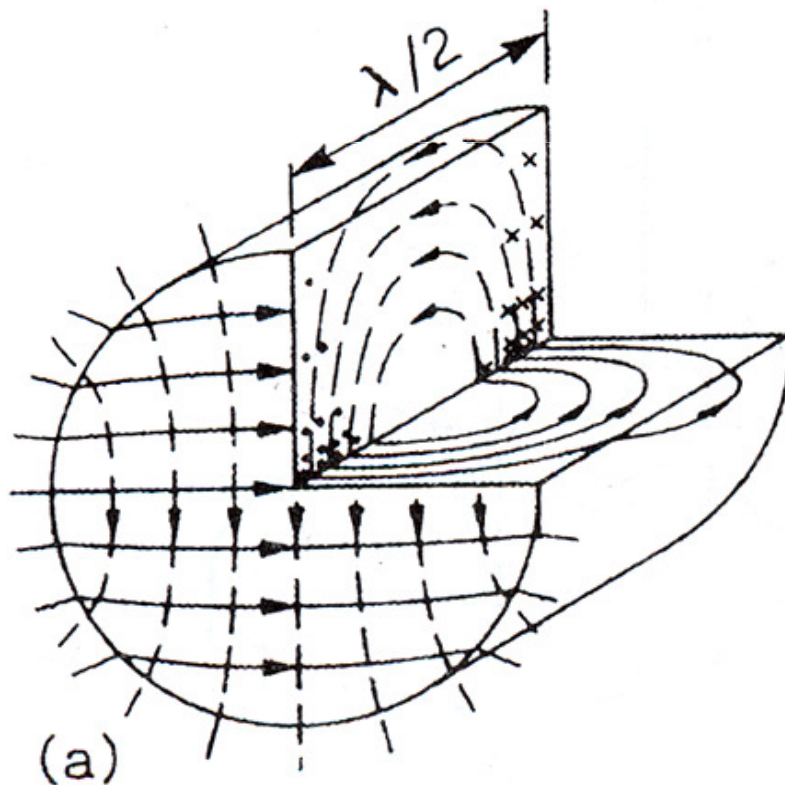
Slabljenje in disperzija standardnih vlaken

| 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 |

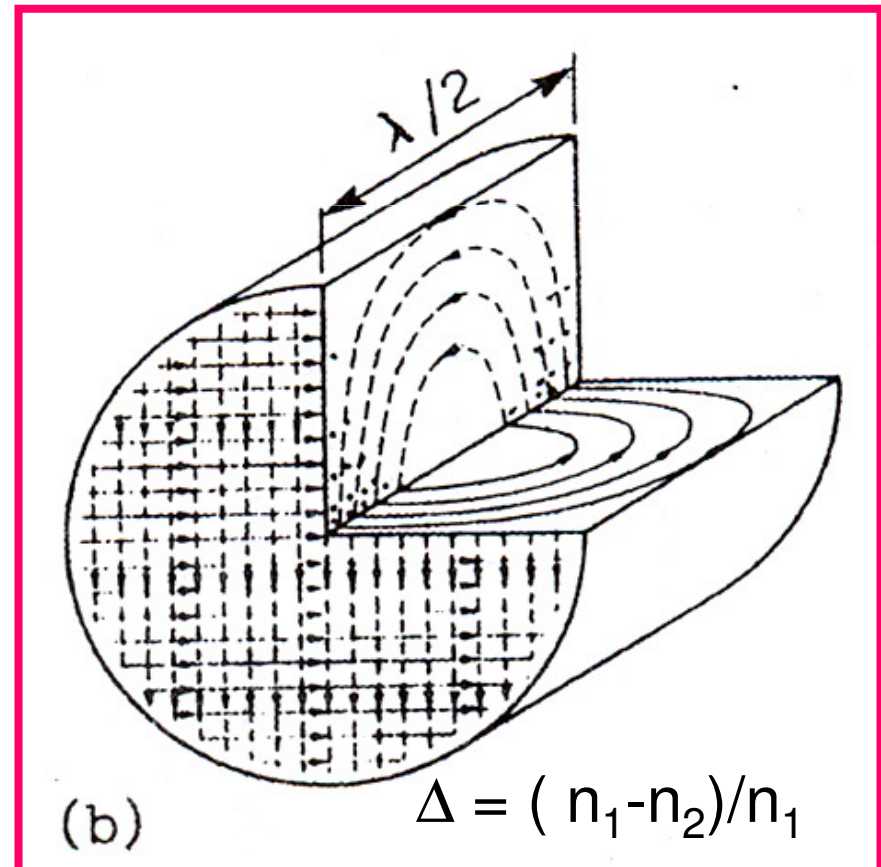
G.652 standardno enorodovno vlakno (SSMF – Standard Single-Mode Fiber) ima standardno vrednost slabljenja in standardno vrednost disperzije ter je v praksi najpogostejše vlakno (npr. Corning-28).

Polje osnovnega rodu HE_{11}

Rod HE_{11} – polje v jedru
(poljubna vrednost Δ)

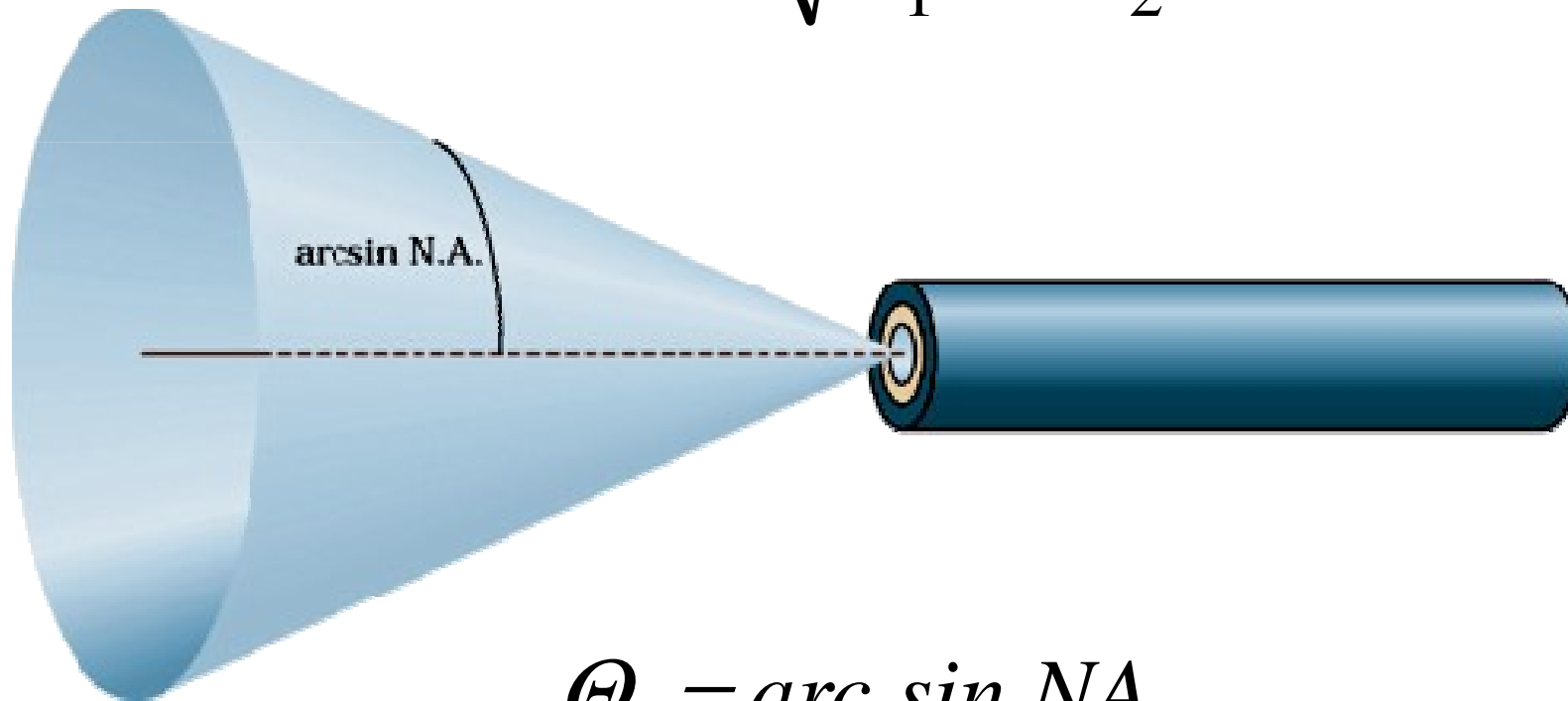


Rod HE_{11} (LP_{01}) - polje v jedru
(šibkolomni približek $\Delta < 0,01$)



Numerična odprtina vlakna

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



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

Normirana frekvenca V

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA$$

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

$V \leq 2,405$ *pogoj enorodovnosti*

$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1 < 0,01$ *šibek lom*

- Efektivna površina

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

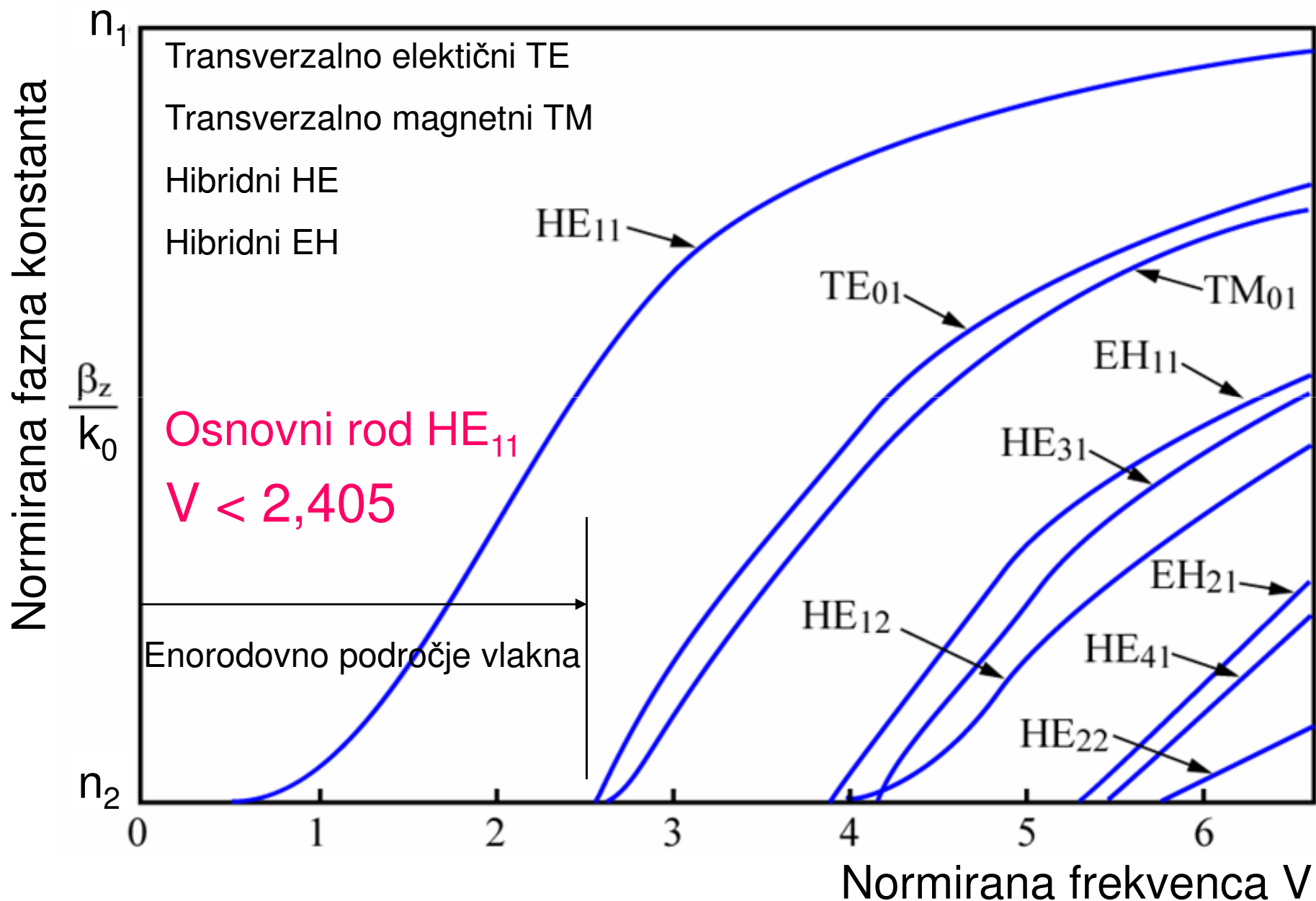
Efektivna površina daje podatek, kako je sredica vlakna izkoriščena za prenos svetlobe

Efektivna površina je pomembna za nelinearne pojave v vlaknu

- Efektivni lomni količnik

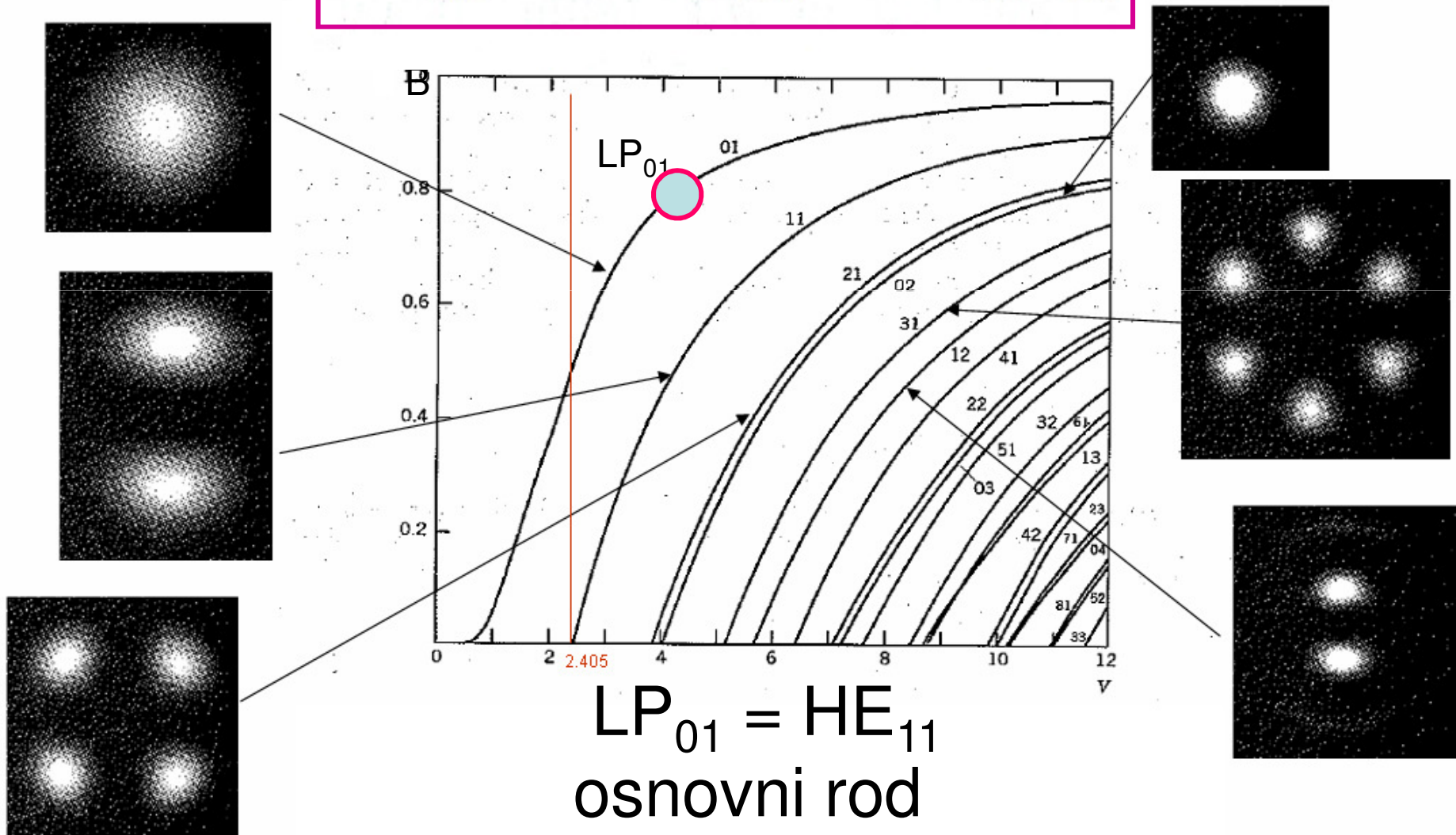
$$n_{ef} = \beta_z / k_0, \quad n_1 < n_{ef} < n_2$$

Hibridni rodovi v optičnem vlaknu



LP rodovi v optičnem vlaknu

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



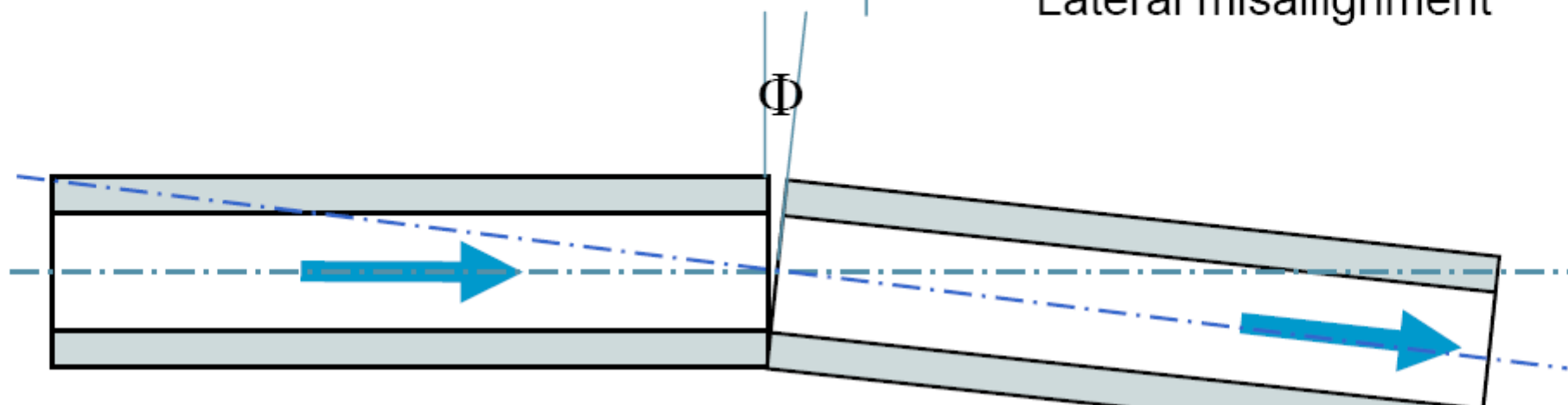
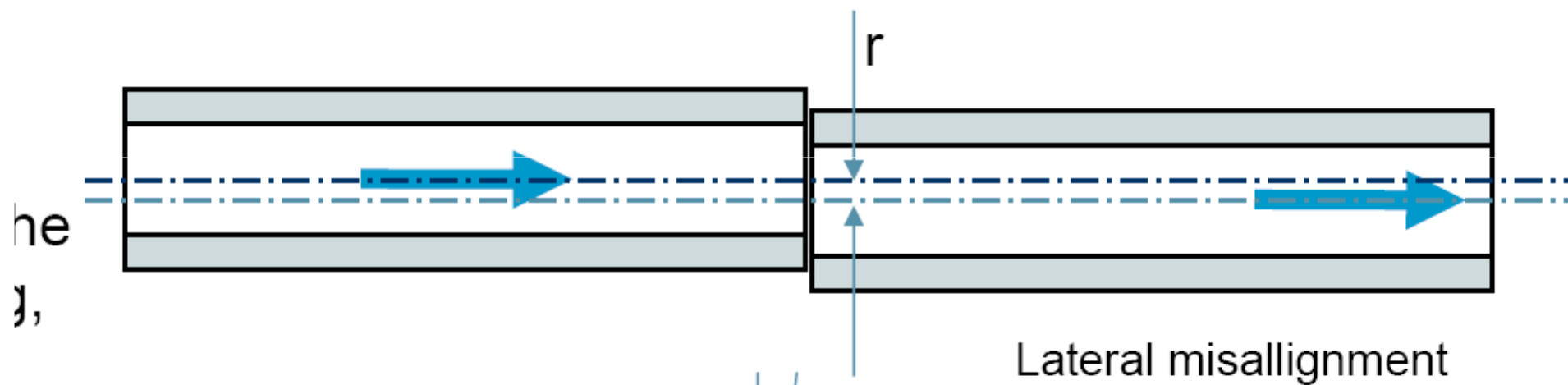
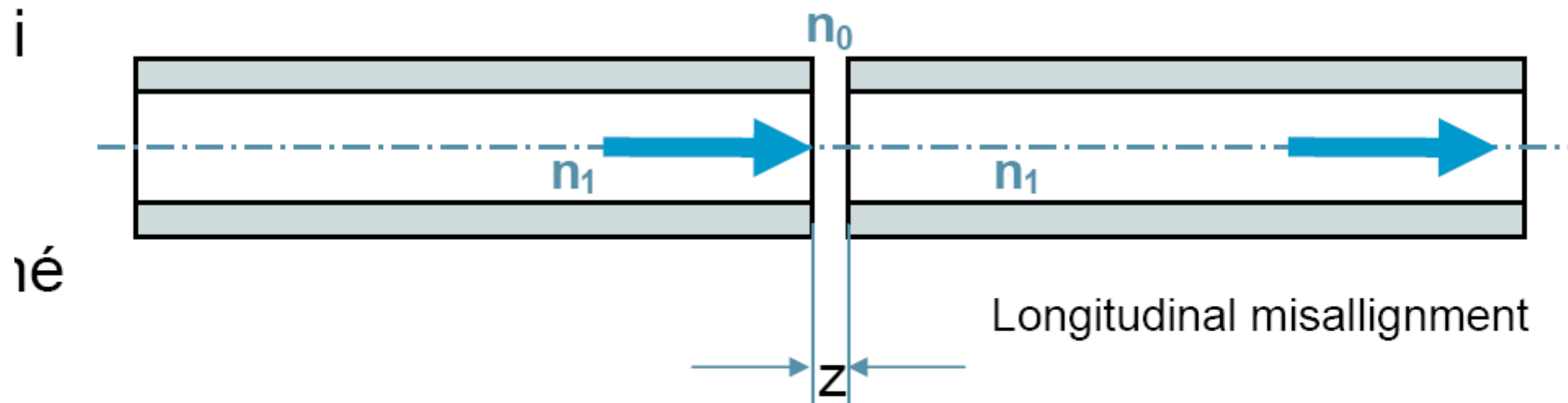
Slabljenje in disperzija

1. Slabljenje:

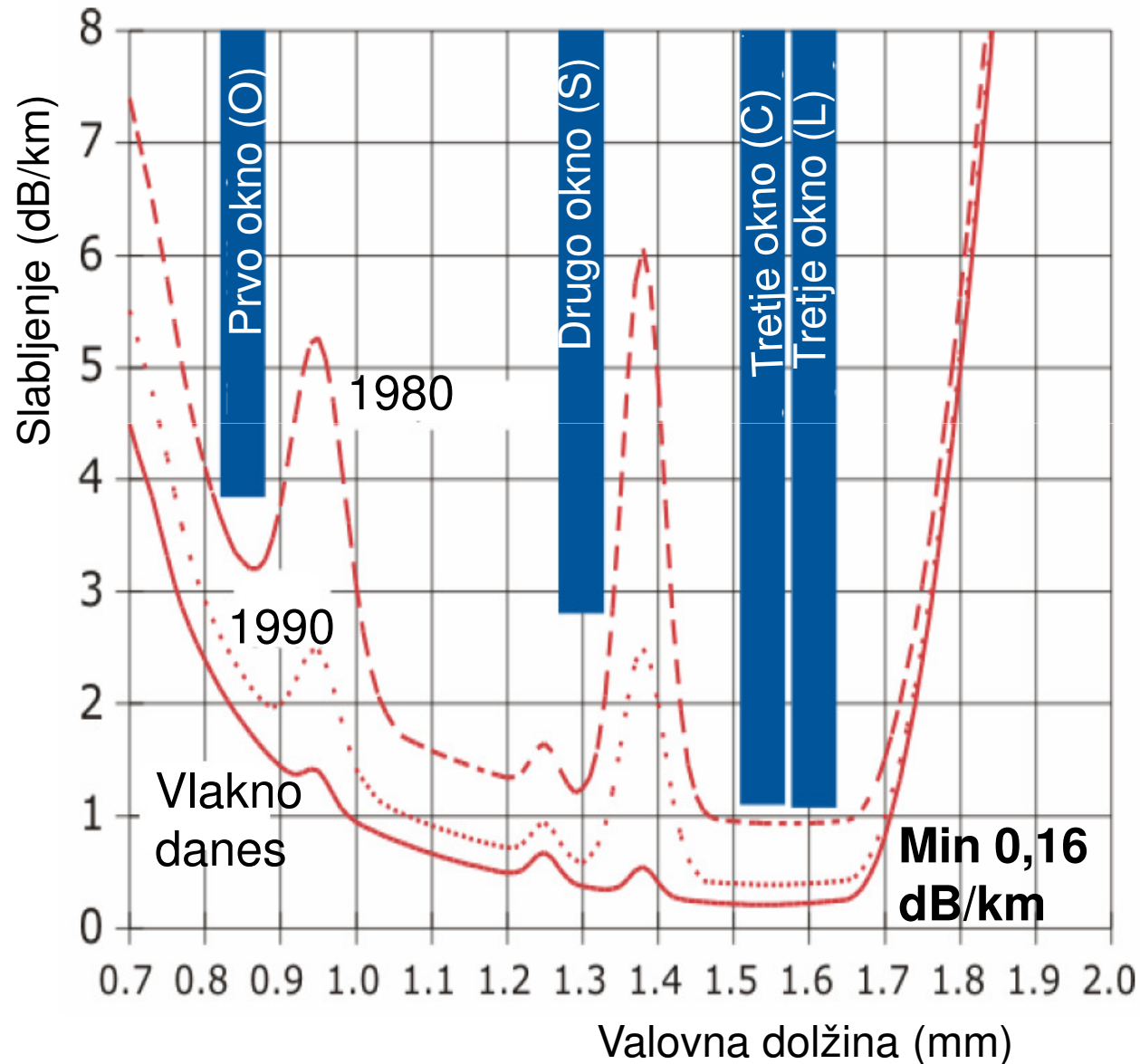
- Linearno (Rayleigh-jevo) sipanje
- Absorpcija (infrardeča, ultravijolična)
- Slabljenje na makro in mikro krivinah

2. Disperzija:

- Kromatska (barvna)
- Polarizacijska (rodovna) disperzija



Slabljenje v vlaknu



Mobitel d.d.,
izobraževanje

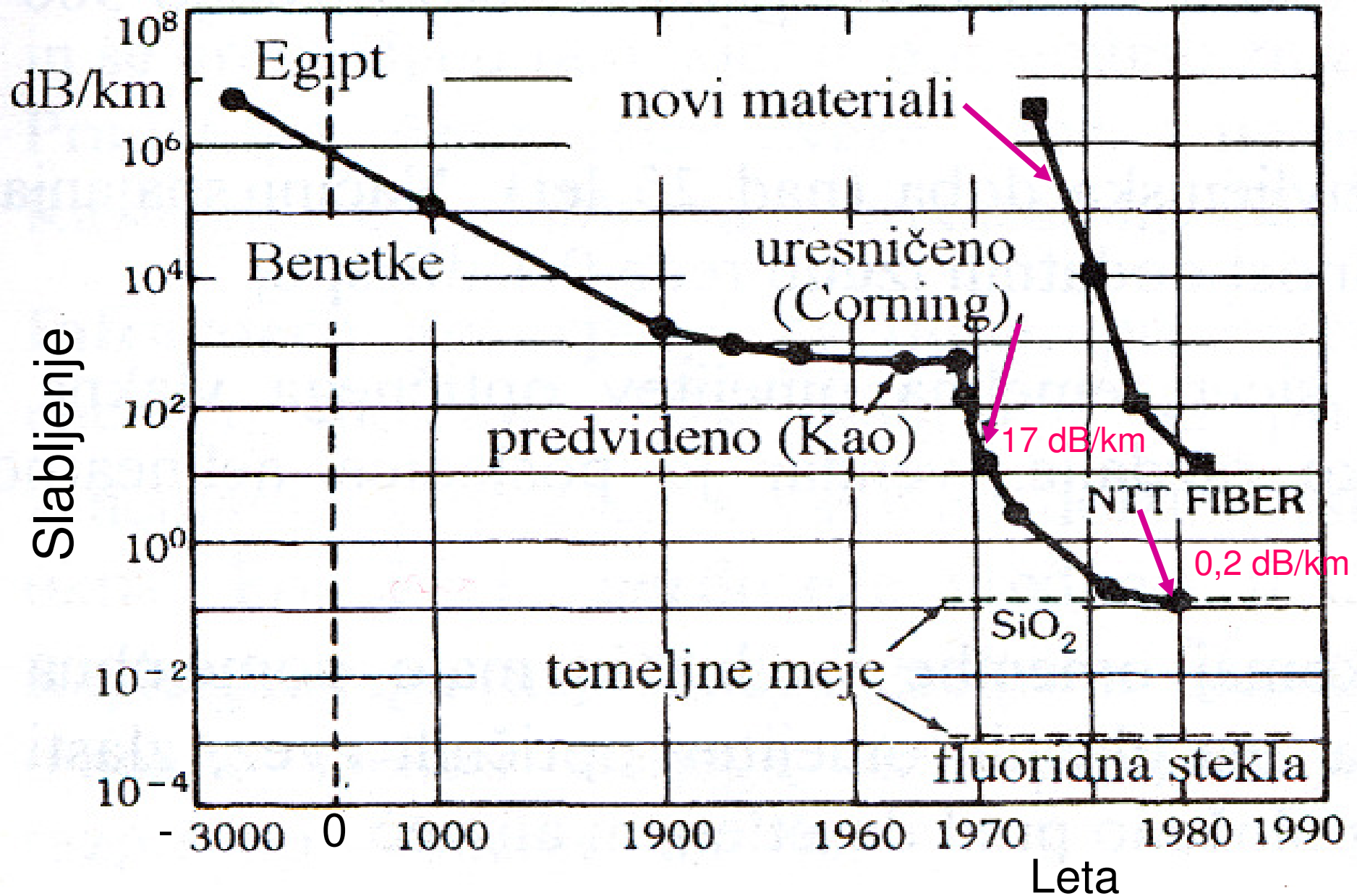
2. 4. 2010,
predavanje 4

Prof.dr.Jožko
Budin

Vsebina

1. Slabljenje v vlaknu - splošno
2. Karakteristike slabljenja v prenosnem vlaknu
3. Glavni snovni povzročitelji slabljenja:
 - sipanje na nanometrskih nehomogenostih vlakna
 - infrardeča absorpcija
 - ultravijolična absorpcija
4. Drugi povzročitelji slabljenja (mikro- in makrokrivine)
5. Slabljenje na stiku vlaken, na konektorjih in spojih
6. Elastično in neelastična slabljenja
7. Primer standardnega enorodovnega vlakna SSMF-Corning-28, podatki
8. Alternativni materiali.

Zgodovina stekla



Slabljenje v kremenovem vlaknu

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

- **Rayleighovo razpršilno slabljenje** (linearna razpršitev svetlobe na drobnih nehomogenostih stekla) je prevladujoče slabljenje v področju valovnih dolžin $0,5 - 1,7 \mu\text{m}$. Rayleighovo 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.

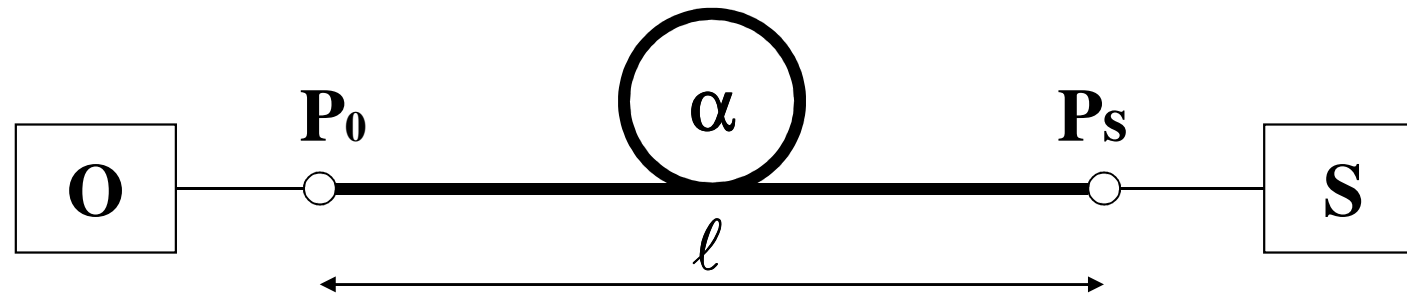
2. Drugi pojavi slabljenja vlakna:

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

so posledica tehnoloških pomanjkljivosti in je nanje mogoče vplivati.

Optične komunikacije - slabljenje

21



$\alpha = 0,2 \text{ dB/km}$, vlakno SSMF (jedro iz materiala $\text{SiO}_2 - \text{GeO}_2$)

$\alpha_{\min} = 0,16 \text{ dB/km}$, vlakno PSCF (jedro iz materiala SiO_2 brez primesi)

$l = 10 \text{ km}$, $L = \alpha l = 2 \text{ dB}$ SSMF, $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$

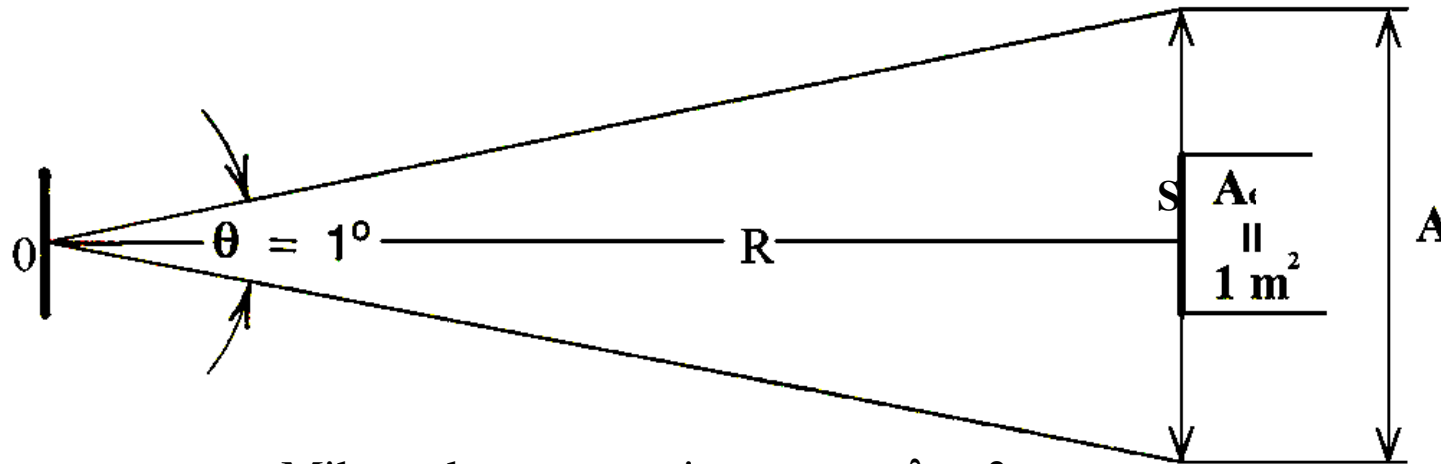
$l = 100 \text{ km}$, $L = \alpha l = 20 \text{ dB}$ SSMF, $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$

$l = 300 \text{ km}$, $L = \alpha_{\min} l = 45 \text{ dB}$ PSCF, $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$

(>300 km je največja dosežena razdalja brez vmesne prekinitve)

Pravilo: podvojitve dolžine vlakna daje podvojitve slabljenja v dB

Radijske komunikacije - slabljenje 22



Mikrovalovna usmerjena zveza, $\lambda = 3 \text{ cm}$

| razdalja | površina osvetlitve | osnovno slabljenje | slabljenje |
|-------------------------|--|--------------------------------------|--------------------------------|
| R | $A = R^2 \theta_{st}^2 \frac{\pi}{4} \left(\frac{\pi}{180} \right)^2$ | $L = 20 \log \frac{4\pi R}{\lambda}$ | $L = 10 \log \frac{A}{A_{ef}}$ |
| $R = 10 \text{ km}$ | $A = 2,4 \cdot 10^4 \text{ m}^2$ | $L = 132,5 \text{ dB}$ | $L = 43,8 \text{ dB}$ |
| $R = 100 \text{ km}$ | $A = 2,4 \text{ km}^2$ | $L = 152,5 \text{ dB}$ | $L = 63,8 \text{ dB}$ |
| $R = 40.000 \text{ km}$ | $A = 3,8 \cdot 10^5 \text{ km}^2$ | $L = 204,5 \text{ dB}$ | $L = 115,8 \text{ dB}$ |

Pravilo: podvojitvev razdalje R daje za 6 dB večje slabljenje L

ENORODOVNO VLAKNO - pasovi in standardizacija ²³

- Valovni pasovi in spekter slabljenja:

O (1260 - 1360 nm)

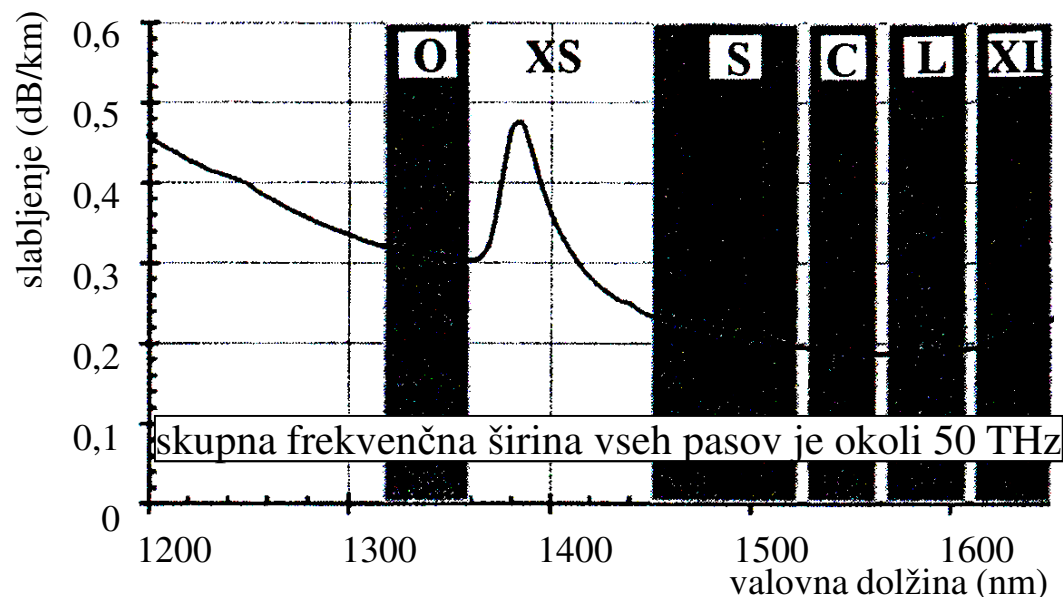
XS (1360 - 1460 nm)

S (1460 - 1530 nm)

C (1530 - 1565 nm)

L (1565 - 1625 nm)

XL (1625 - 1675 nm)



- Standardizacija:

- **G.652 - Standardno enorodovno vlakno (SSMF).** Podatki pri $\lambda = 1550$ nm:

- SSMF (D = 17 S = 0,057 $\alpha = 0,2$ $A_{ef} = 80$)

- **G.655 - Disperzijsko premaknjeno enorodovno vlakno nenične (pozitivne ali negativne) disperzije (NZDSF).** Podatki pri $\lambda = 1550$ nm:

- Tera Light (D = 8 S = 0,058 $\alpha = 0,2$ $A_{ef} = 65$)

- True Wave - RS (D = 4,2 S = 0,045 $\alpha = 0,2$ $A_{ef} = 55$)

- Pure Guide (D = 8 S = 0,06 $\alpha = 0,15$ $A_{ef} = 65$)

- LEAF (D = 4,2 S = 0,085 $\alpha = 0,2$ $A_{ef} = 72$)

- All Wave (vlakno očiščeno OH ionov)

Enote: D(ps/nm/km), S(ps/nm²/km), α (dB/km), A_{ef} (μm^2) pri $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$

Karakteristike prenosnega vlakna

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

$$L_{ef} \text{ (km)} = \int_0^L e^{-\alpha l} dl = \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha L}) \doteq \frac{1}{\alpha} = \frac{4,343}{\alpha \text{ (dB/km)}} \quad L_{ef} \doteq 20 \text{ km}$$

kjer je α koeficient slabljenja vlakna.

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

$$A_{ef} \text{ (}\mu\text{m}^2\text{)} = 2\pi \frac{\left(\int_A |E|^2 r dr \right)^2}{\int_A |E|^4 r dr} \quad A_{ef} = 60 - 80 \mu\text{m}^2$$

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

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

$$\gamma \text{ (W}^{-1}\text{km}^{-1}\text{)} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{n_2}{A_{ef}} \quad \gamma \doteq 2,7 \text{ (Wkm)}^{-1}$$

kjer je n_2 Kerrov koeficient nelinearne refrakcije.

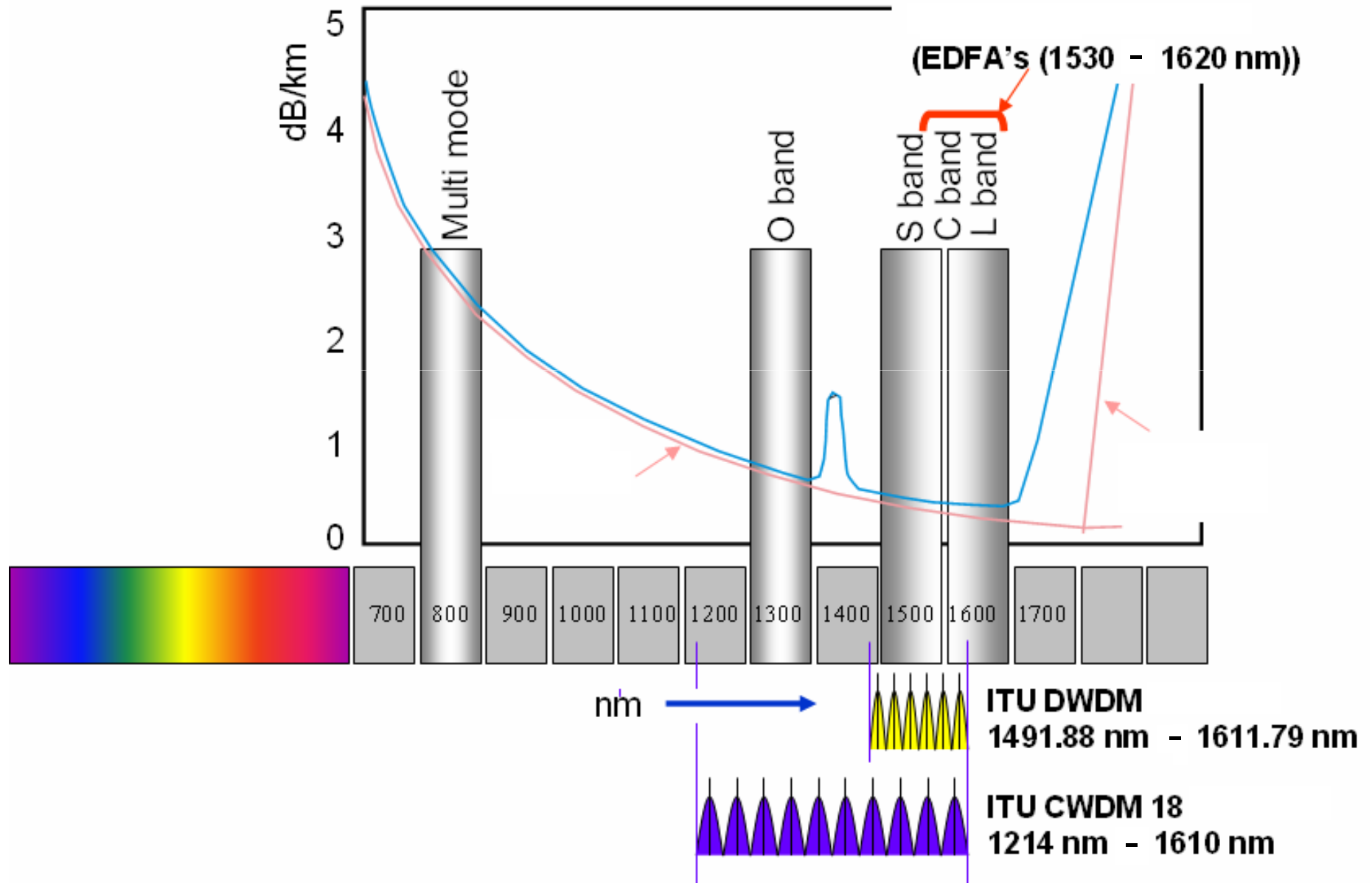
- **Ojačevalni koeficient stimuliranega sipanja** (gain coefficient of stimulated (Raman, Brillouin) scattering):

$$g \text{ (mW}^{-1}\text{)} = \frac{A_{ef}}{P_s P_c} \frac{dP_s}{dz} \quad g_R \doteq 10^{-13} \text{ m/W}$$

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

kjer je P_s moč signala in P_c moč črpalke.

Primer valovnega multipleksa



Pojemanje moči na poti skozi vlakno



$$P(z) = P(0)e^{-\alpha_p z}$$

$P(0)$ [dBm] $P(l) = P(0)e^{-\alpha_p l}$

$z=0$ → z $z=l$

$$\alpha[\text{dB/km}] = \frac{10}{l} \log \left[\frac{P(0)}{P(l)} \right] = 4.343 \alpha_p [1/\text{km}]$$

$$P(l)[\text{dBm}] = P(0)[\text{dBm}] - \alpha[\text{dB/km}] \times l[\text{km}]$$

Slabljenje optičnega vlakna

$$\frac{dP}{dz} = -\alpha P$$

$$P_{out} = P_{in} \exp(-\alpha L)$$

$$\alpha(dB/km) = -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

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

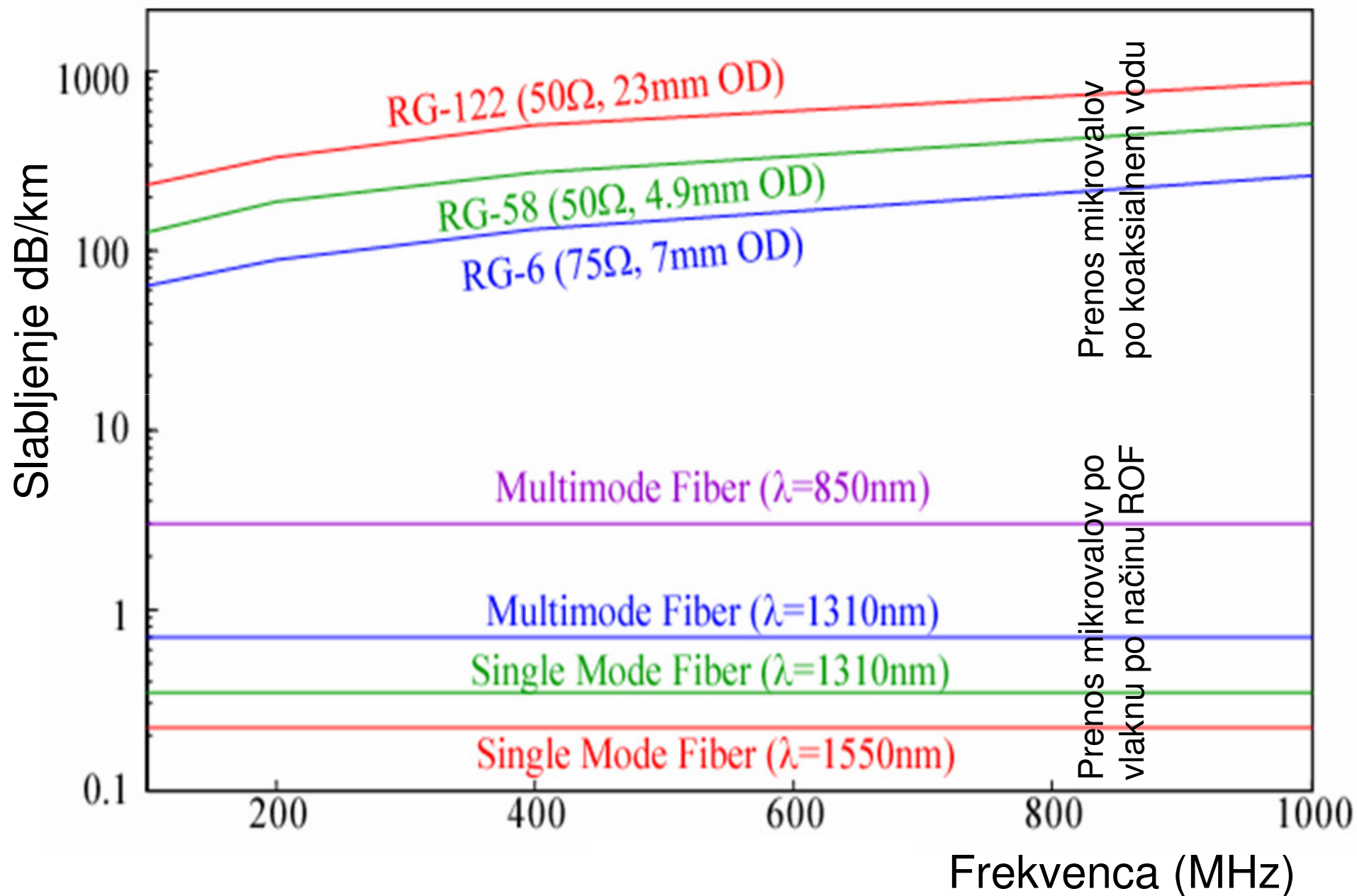
$$= -\frac{10}{L} \log_{10} \left(\frac{P_{in} e^{-\alpha L}}{P_{in}} \right)$$

$$P = 27 \text{ dBm} = 1 \text{ mW} \left(10^{\frac{27}{10}} \right) = 501 \text{ mW}$$

$$= -\frac{10}{L} (-\alpha L) \log_{10}(e)$$

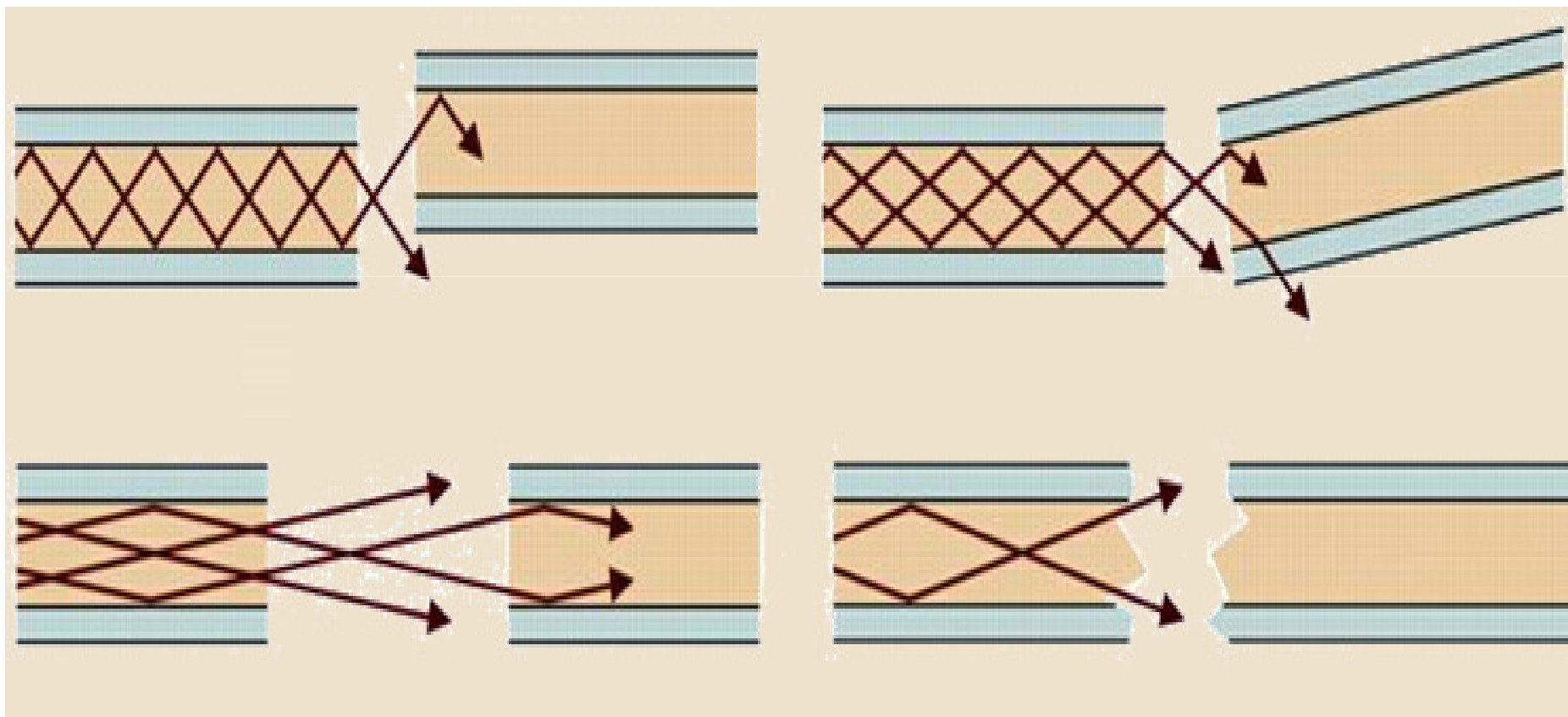
$$= 4.34\alpha$$

Radio po vlaknu in radio po koax.

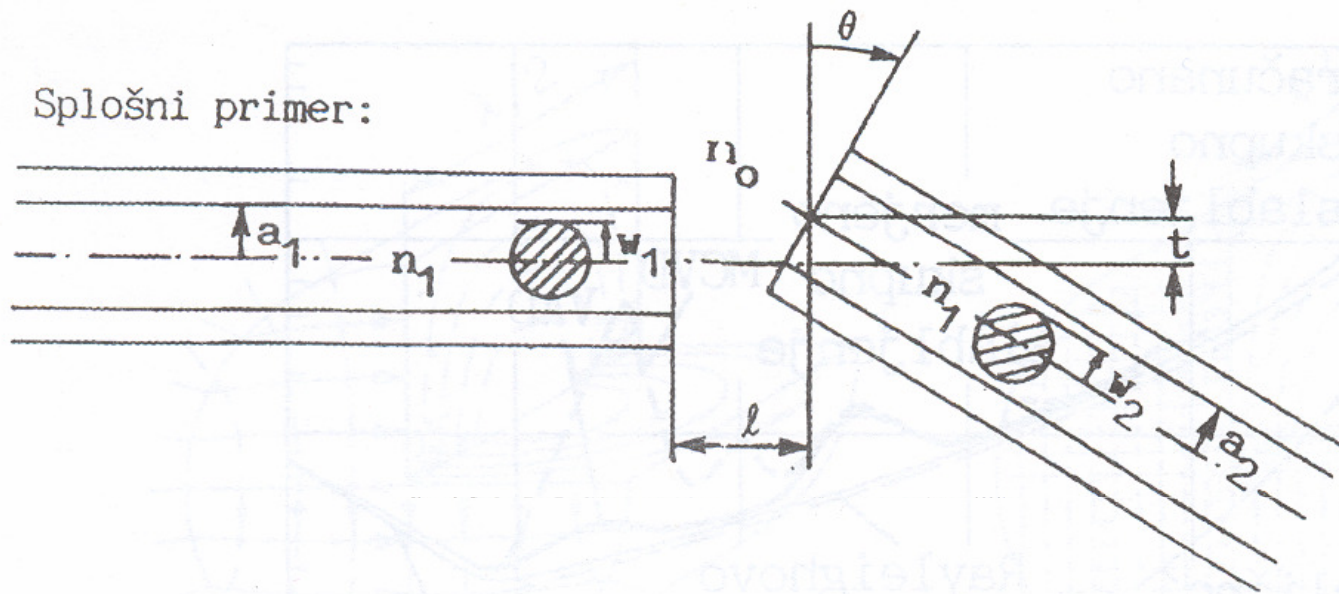


Slabljenje na stiku dveh vlaken

Primeri sklopa na stiku vlaken



Slabljenje na stiku dveh vlaken 1/2³¹

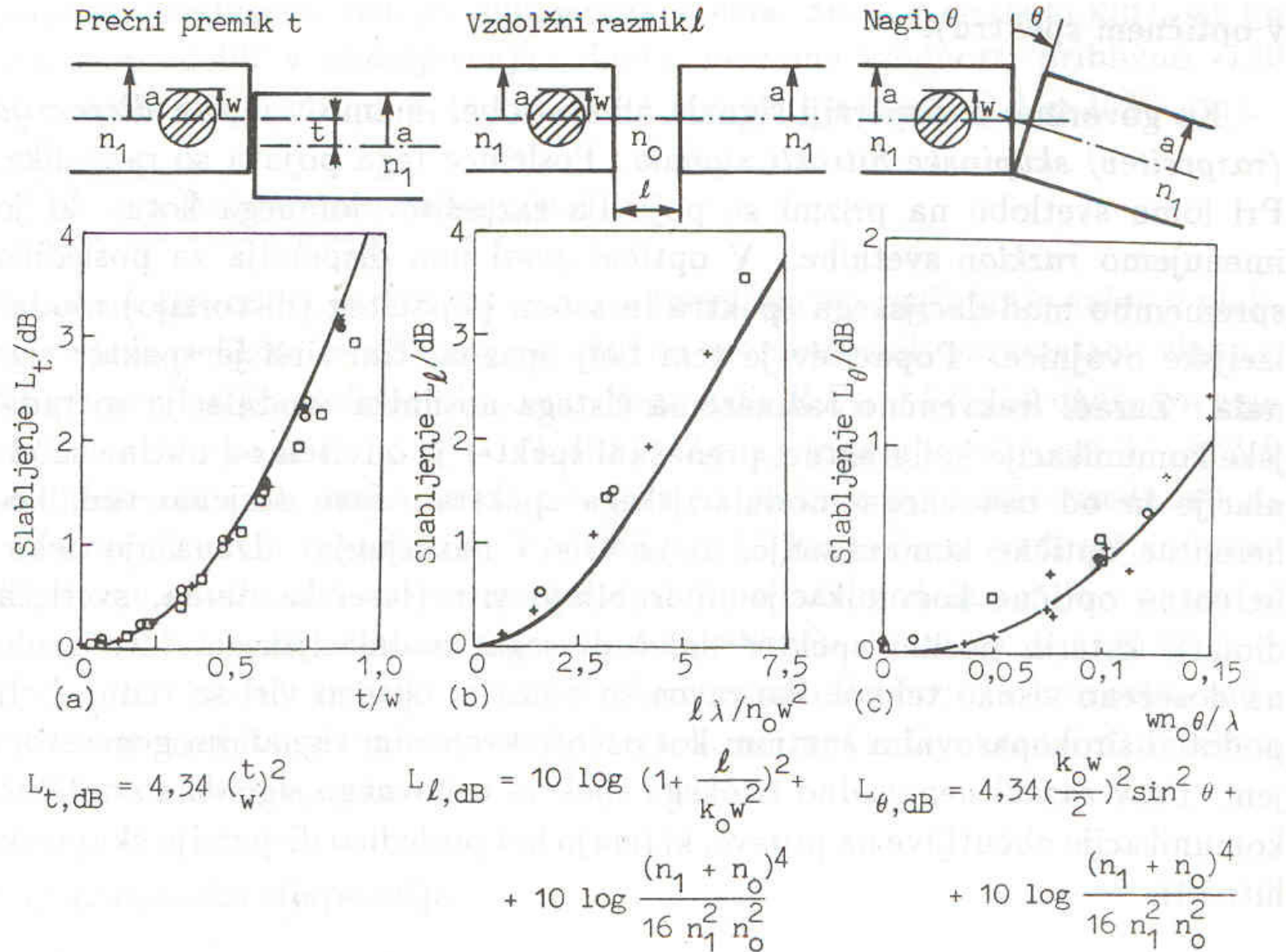


$$L_{dB} = 10 \log \left\{ \frac{q(n_1 + n_0)^4}{16 n_1^2 n_0^2 \sigma} e^{\frac{ps}{q}} \right\}, \quad p = \frac{(k_o w_1)^2}{2}, \quad q = G^2 + \left(\frac{\sigma + 1}{2} \right)^2$$

$$s = (\sigma + 1)T^2 + 2\sigma G \sin \theta \cos \gamma + \sigma \left(G^2 + \frac{\sigma + 1}{4} \right) \sin^2 \theta$$

$$T = \frac{t}{k_o w_1^2}, \quad G = \frac{l}{k_o w_1^2}, \quad \sigma = \left(\frac{w_2}{w_1} \right), \quad k_o = \frac{2\pi n_0}{\lambda}$$

Slabljenje na stiku dveh vlaken 2/2³²



Vrste slabljenja v optičnem vlaknu ³³

1. Razpršilno slabljenje (sipanje)

- Interakcija svetlobe s podvalovno oz. nano nehomogenostjo snovi (Rayleigh)

2. Absorpcijsko slabljenje

- infrardeče (IR) – interakcija s fononi
- ultravijolično (UV) – interakcija z elektroni

3. Slabljenje na krivinah

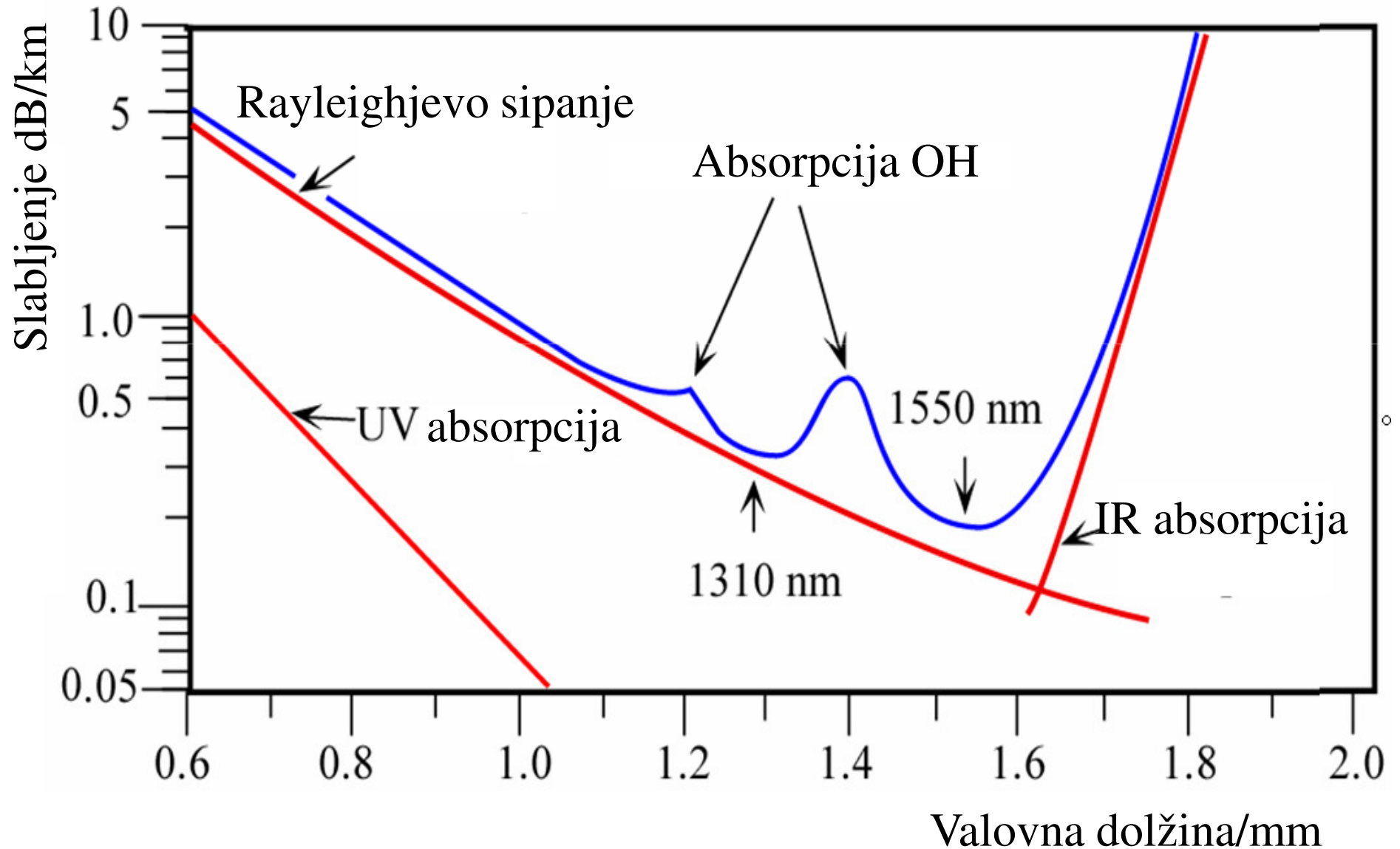
- slabljenje na makrokrivinah (upognitev)
- slabljenje na mikrokrivinah

4. Slabljenje na ionih OH (je odpravljivo)

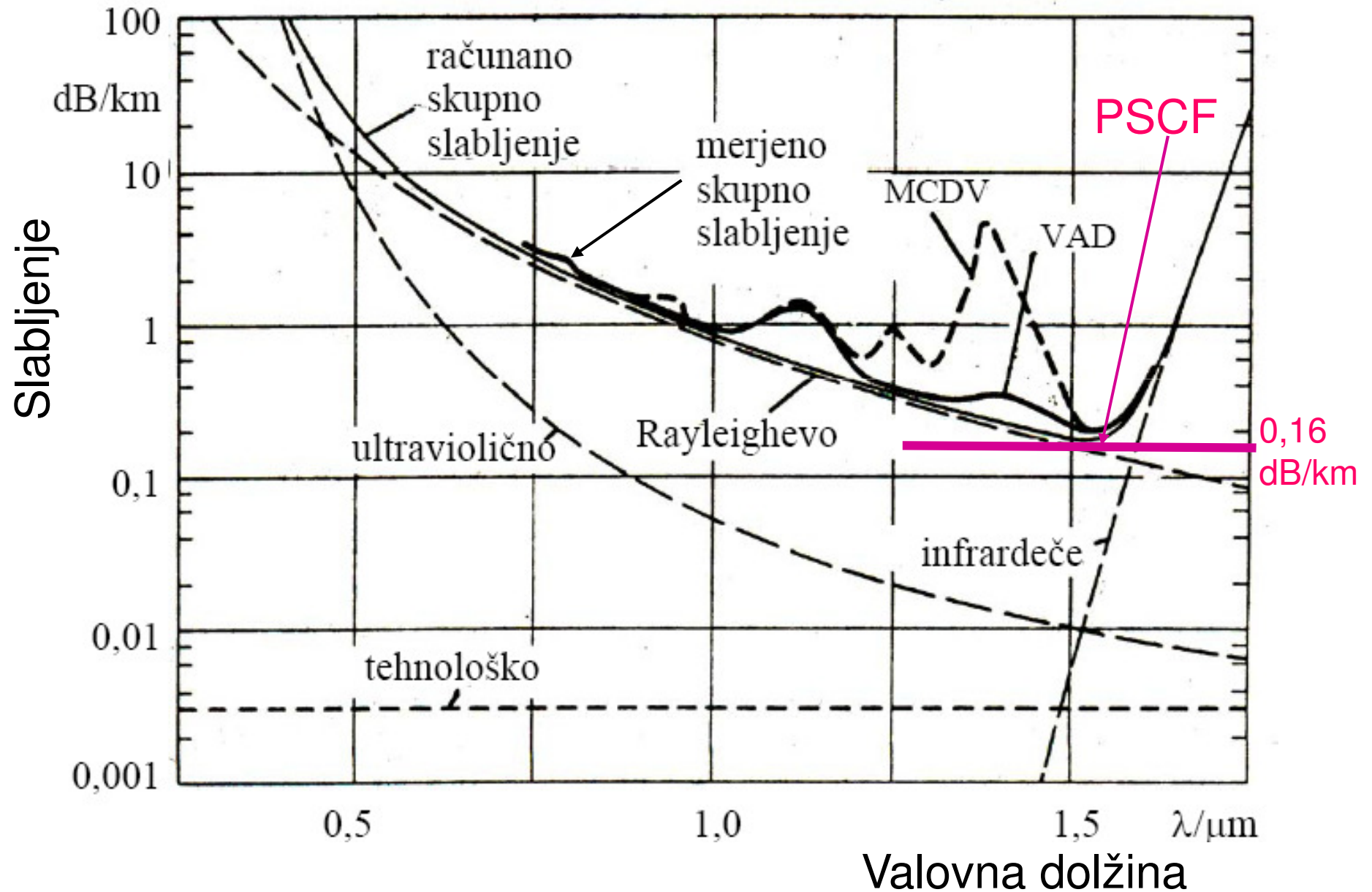
5. Slabljenje na primeseh in nečistočah

6. Slabljenje zaradi strukturnih nepravilnosti

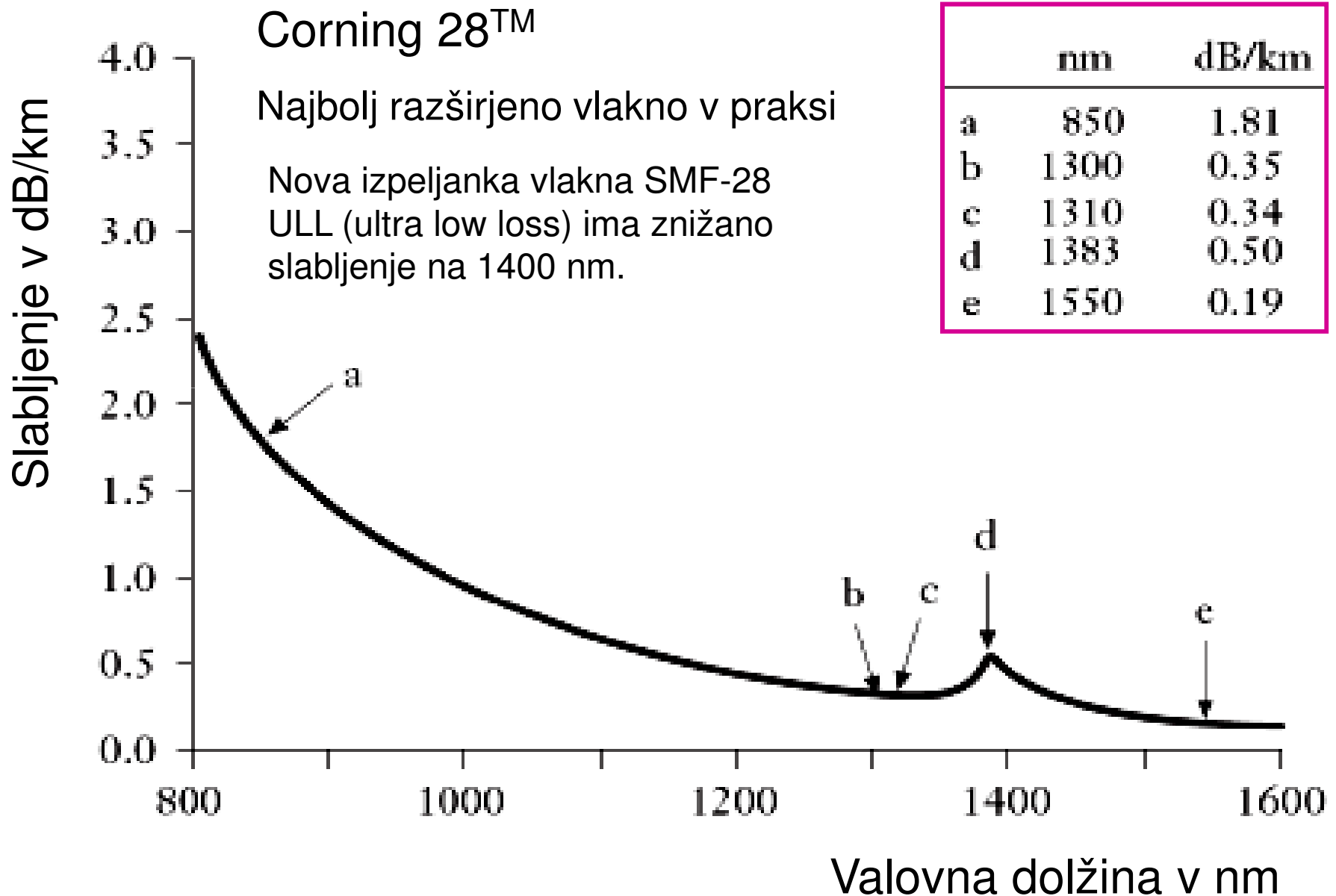
Spekter slabljenja vlakna



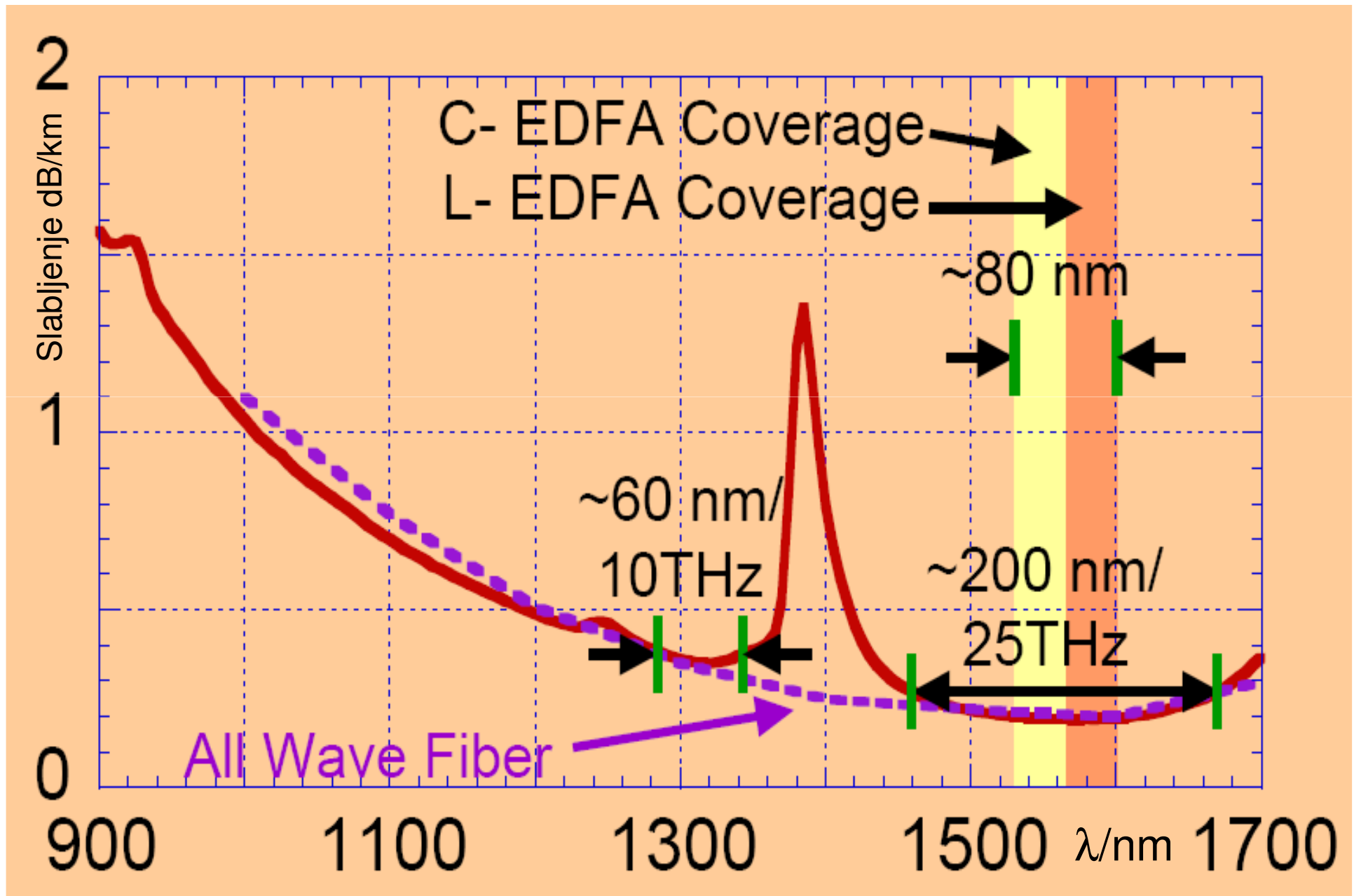
Spekter sestavin slabljenja



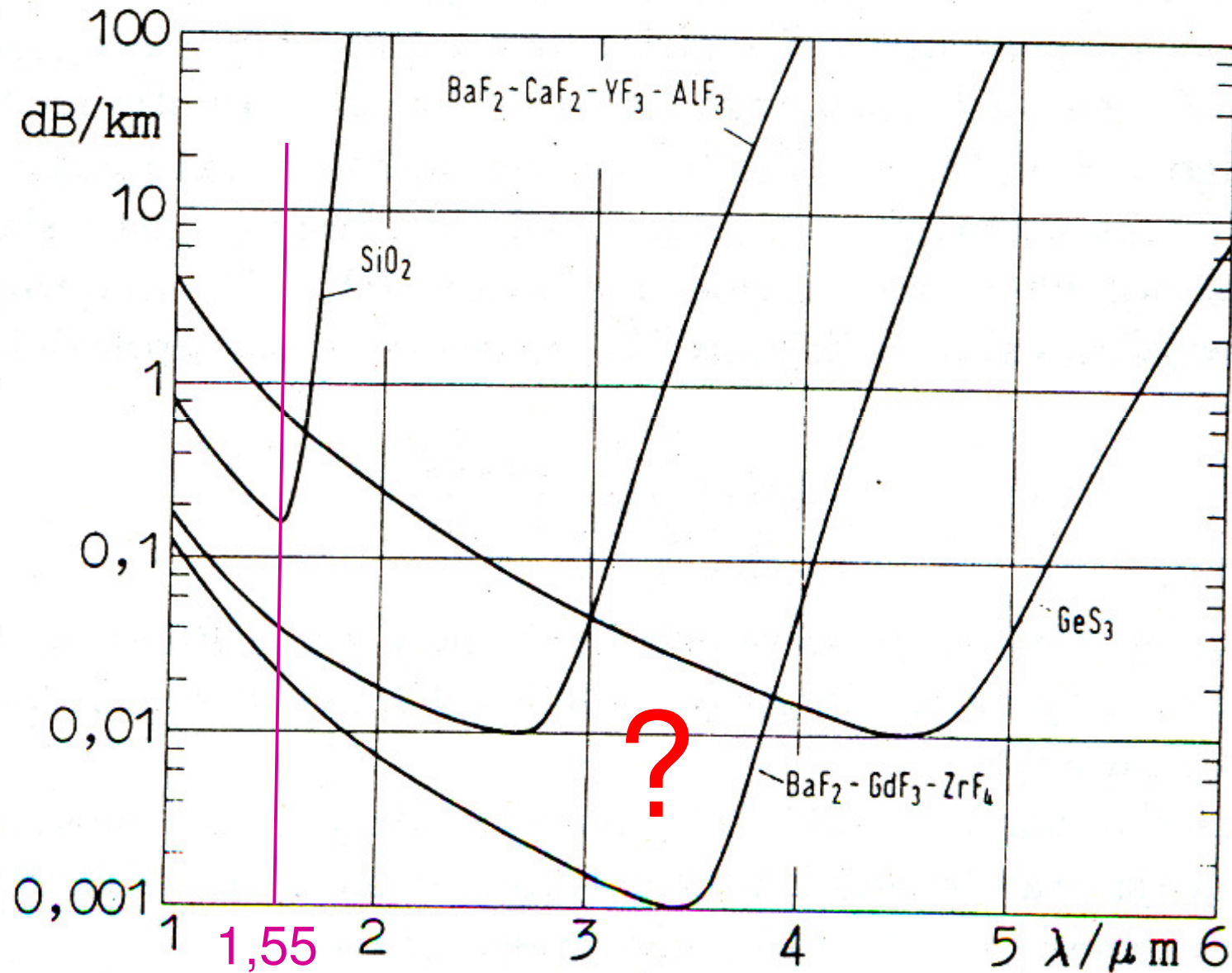
SMF-28 – spekter slabljenja



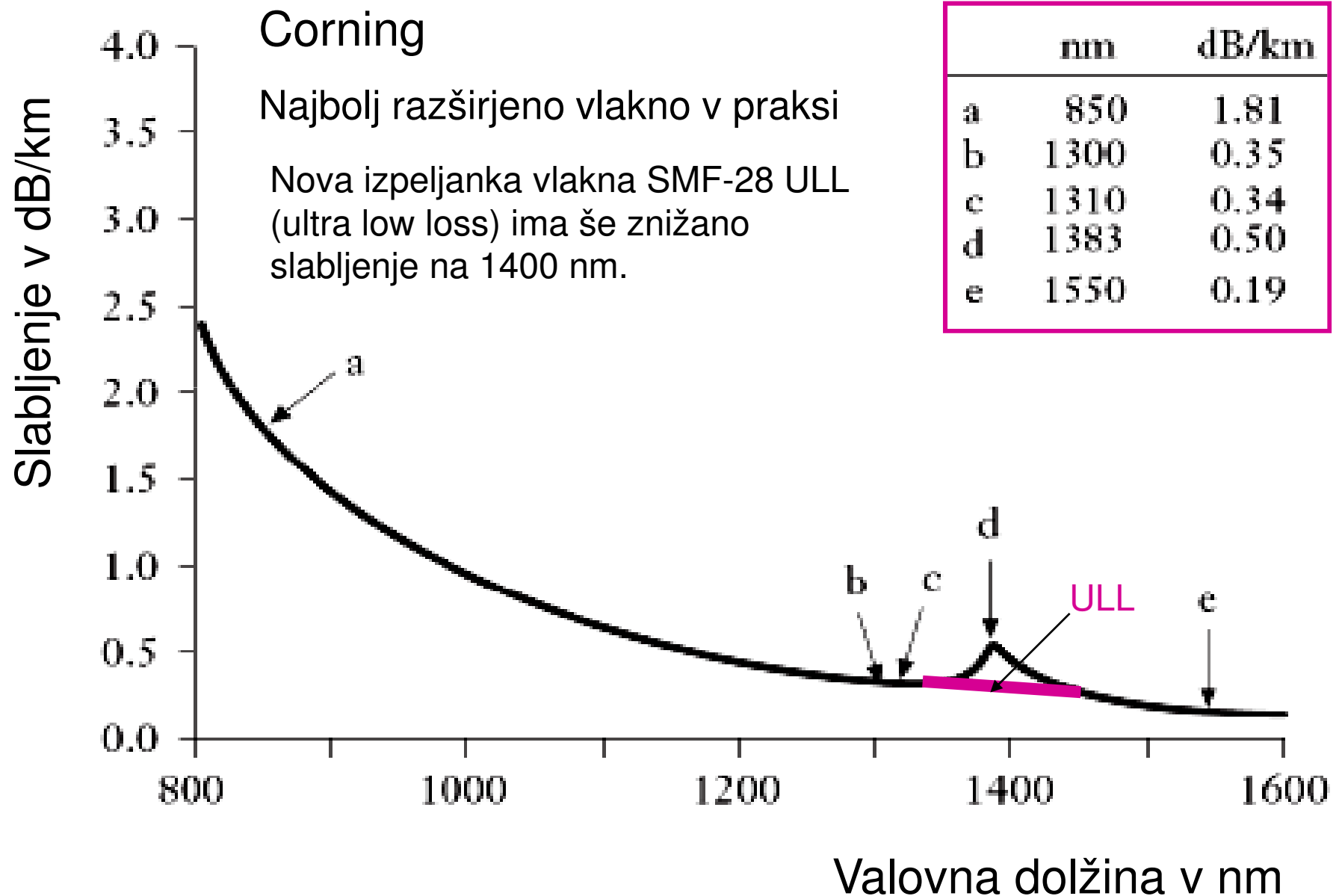
Vlakno All Wave



Slabljenje vlaken iz novih materialov??³⁸



SMF-28 ULL – spekter slabljenja



Slabljenje vlakna - primerjava

enorodovno

mnogorodovno

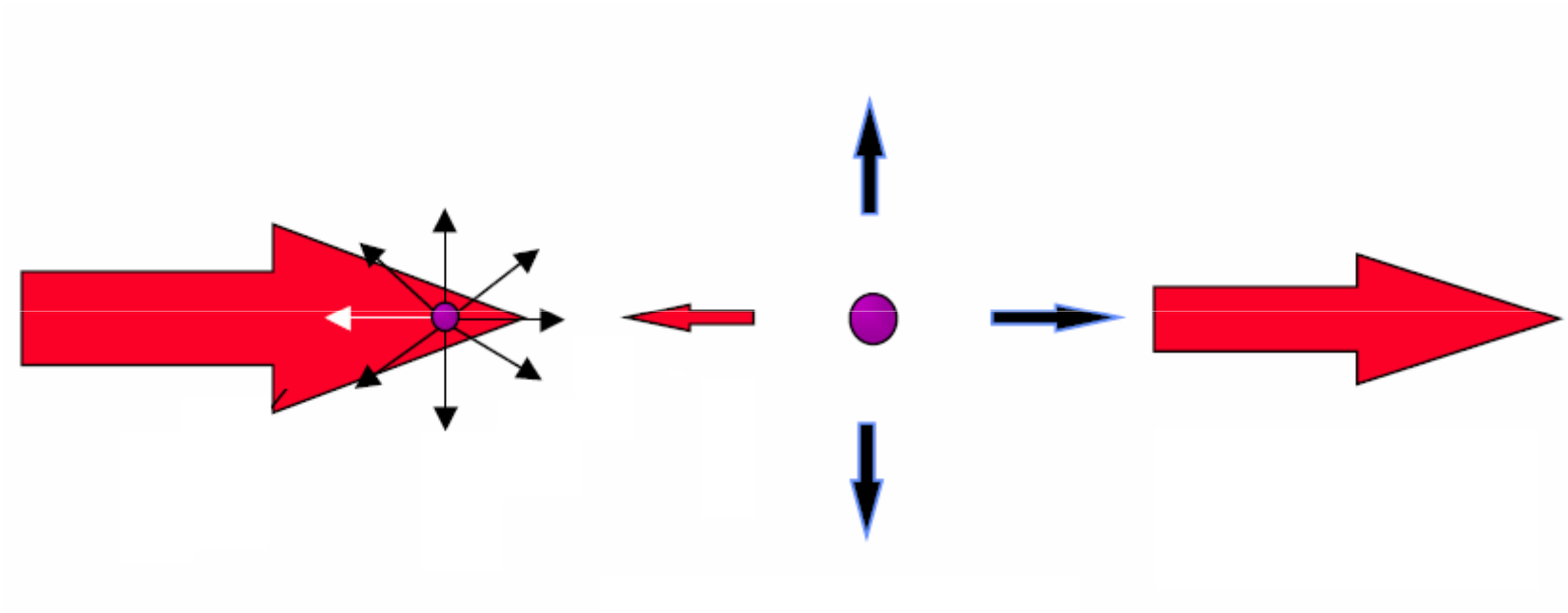
| Valovna dolžina | SMF28 | 62.5/125 |
|------------------------|--------------|-----------------|
| 850 nm | 1.8 dB/km | 2.72 dB/km |
| 1300 nm | 0.35 dB/km | 0.52 dB/km |
| 1380 nm | 0.50 dB/km | 0.92 dB/km |
| 1550 nm | 0.19 dB/km | 0.29 dB/km |

Praktične vrednosti slabljenja konektorjev, spojev in vlaken

| | Tipična vrednost slabljenja | Največja vrednost slabljenja |
|----------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Konektor, minimalno | 0.1 – 0.2 dB | 0.75 dB |
| Konektor, maksimalno | 0.3 – 1.0 dB | 1.0+ dB |
| Varjeni spoj | 0.05 dB | 0.3 dB |
| Mehanski spoj | 0.1 dB | |
| G.652 @ 1310nm | 0,35 dB/km | |
| G.652 @ 1550nm | 0,2 dB/km | |
| G.655 @ 1310nm | 0,35 dB/km | |
| G.655 @ 1550nm | 0.2 dB/km | |
| | | |

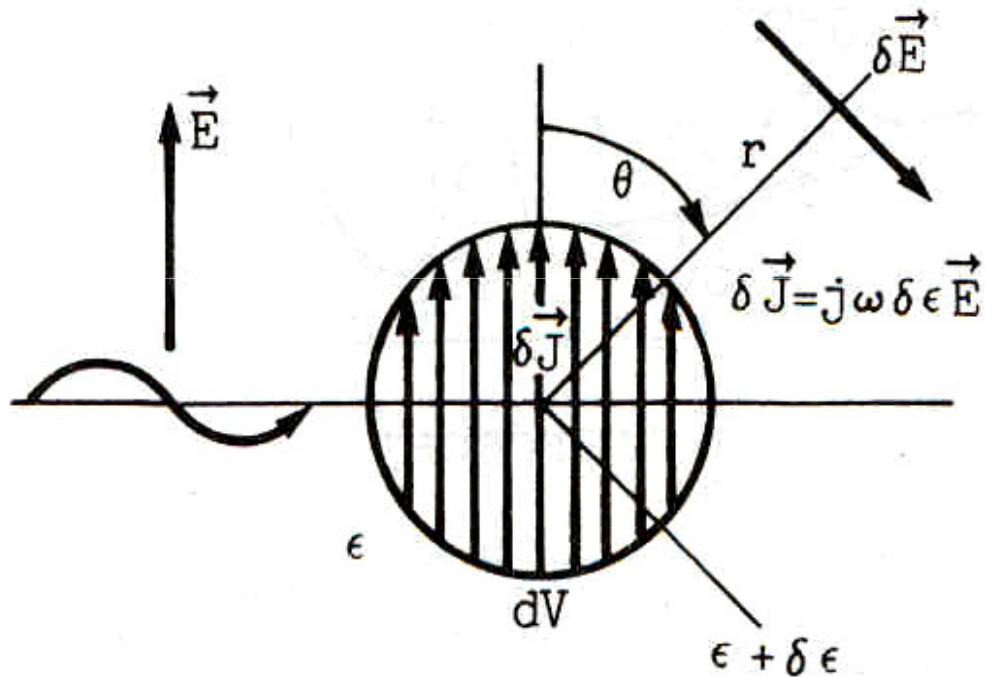
Rayleighjevo razpršilno in absorpcijsko slabljenje

Razprševanje svetlobe na delcih



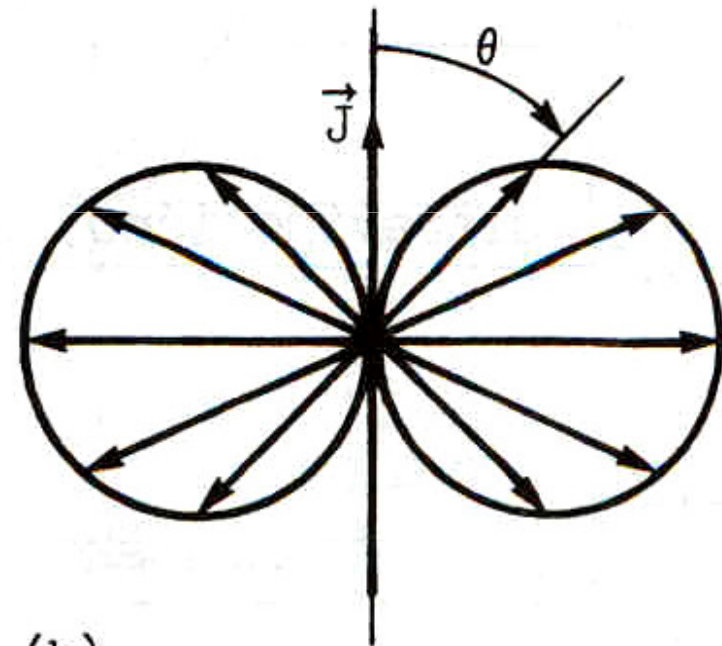
Dipolski model Rayleigh-jevega sipanja

$$\delta E = jZ_0 \frac{\delta J \delta V}{2\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} \sin \theta \quad \text{polje dipola}$$



(a)

Prostorninski element povišane dielektričnosti deluje kot elementarni električni dipol.



(b)

Smerni diagram dipolskega polja predstavlja razpršeno polje.

Electric dipole radiation

Incident oscillating electric field: $\vec{E}_i(t) = \vec{E}_0 \cos \omega_0 t$

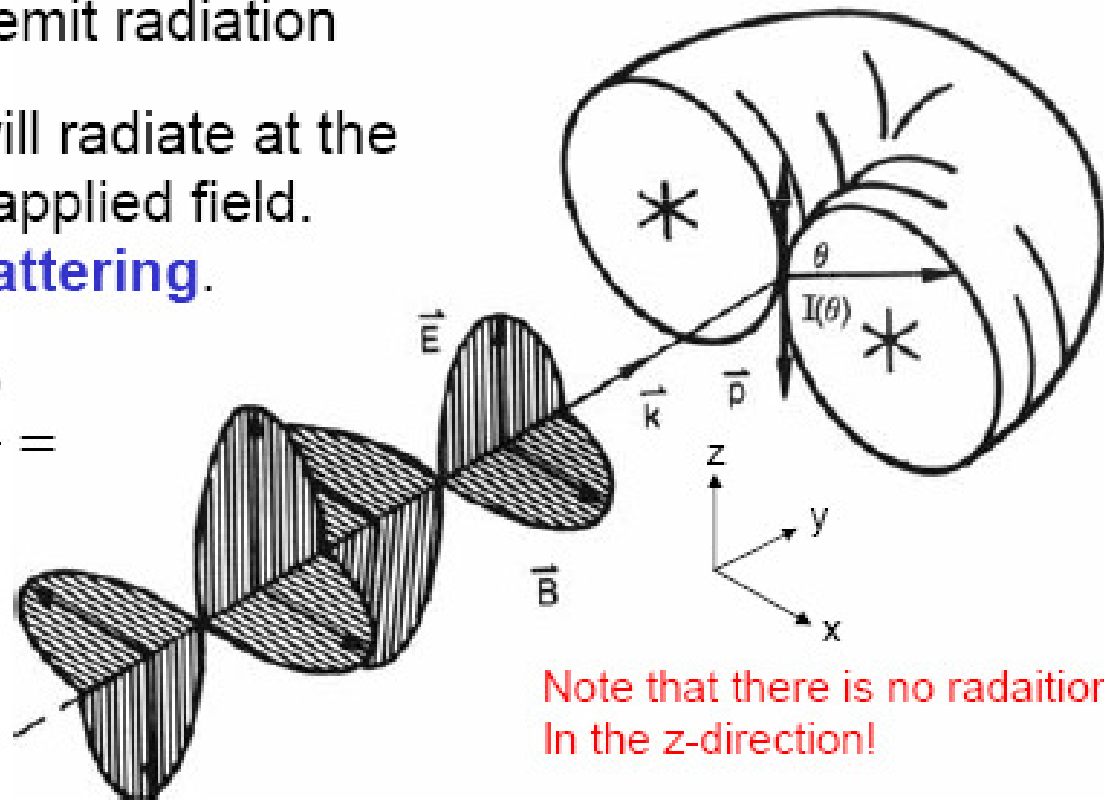
⇒ Induced oscillating dipole moment: $\vec{p}(t) = \alpha \vec{E}_i(t)$

Accelerating charges can emit radiation

⇒ the oscillating dipoles will radiate at the same frequency as the applied field.
This is the **Rayleigh scattering**.

$$I_s(\theta) = \frac{p^2 \omega^4}{32 \pi^2 c^3 \epsilon_0} \frac{\sin^2 \theta}{r^2} =$$

$$\frac{\pi^2 c p^2}{2 \epsilon_0 \lambda^4} \frac{\sin^2 \theta}{r^2} \quad (1)$$



Note that there is no radiation
In the z -direction!

Rayleighjevo razpršilno slabljenje

$$\alpha = (0,75 + 66\Delta n)\lambda^{-4} \text{ dB/km}$$

$$\Delta n = n_1 - n_2$$

$$\lambda \text{ v } \mu\text{m}$$

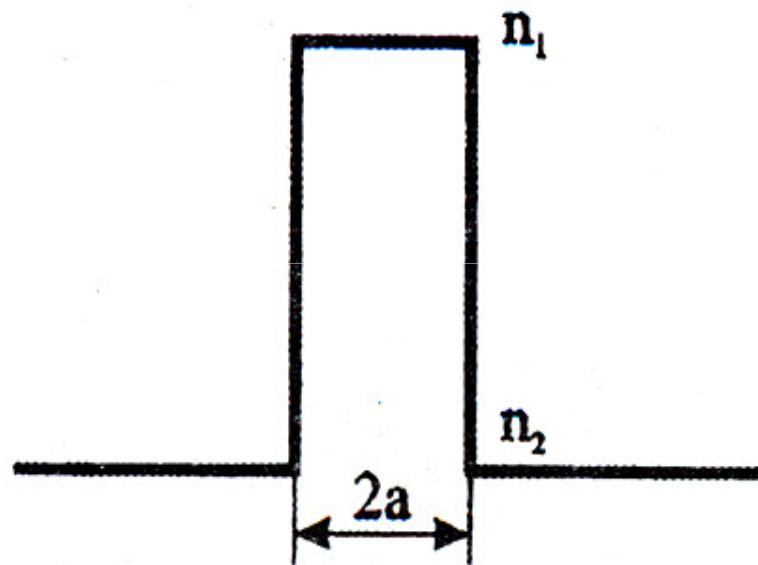
primes Ge

Rayleighjevo razpršilno slabljenje

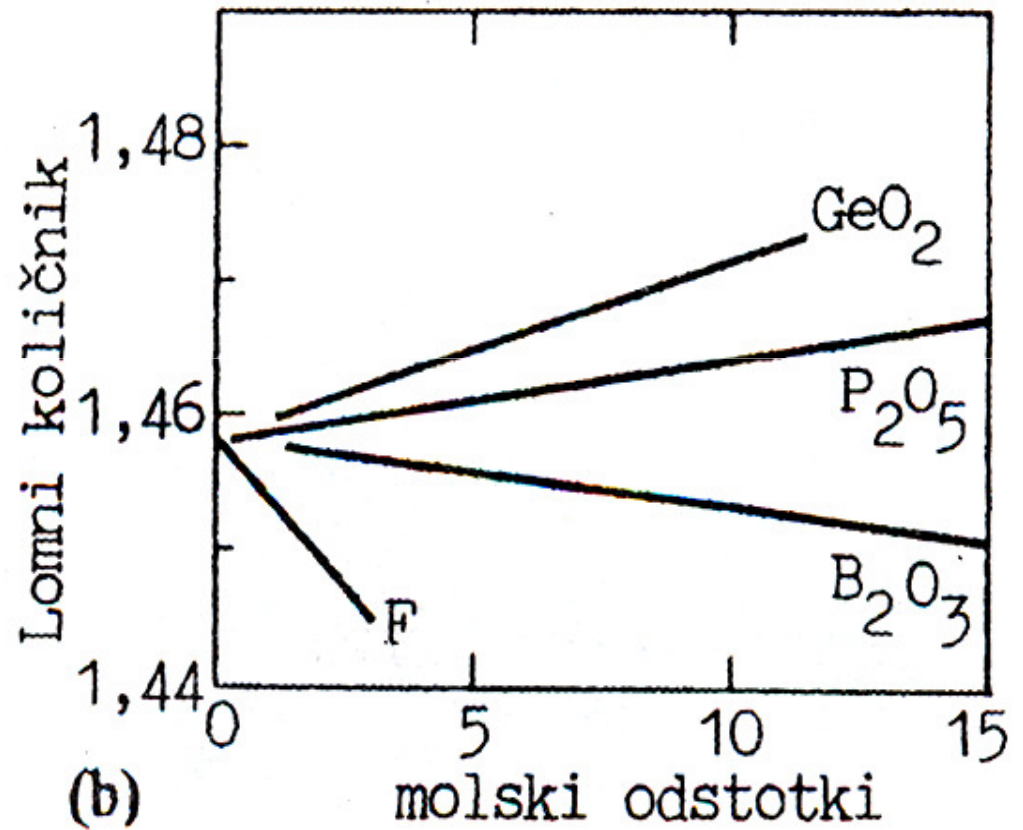
$$\alpha_{scat} \propto \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) \right]^{-1}$$

$h = 6.626 \times 10^{-34}$ Js, $k_B = 1.3806 \times 10^{-23}$ JK⁻¹, T : Temperature

Zvišan in znižan lomni količnik



(a)



(b)

Absorpcijsko slabljenje

1. Infrardeča absorpcija

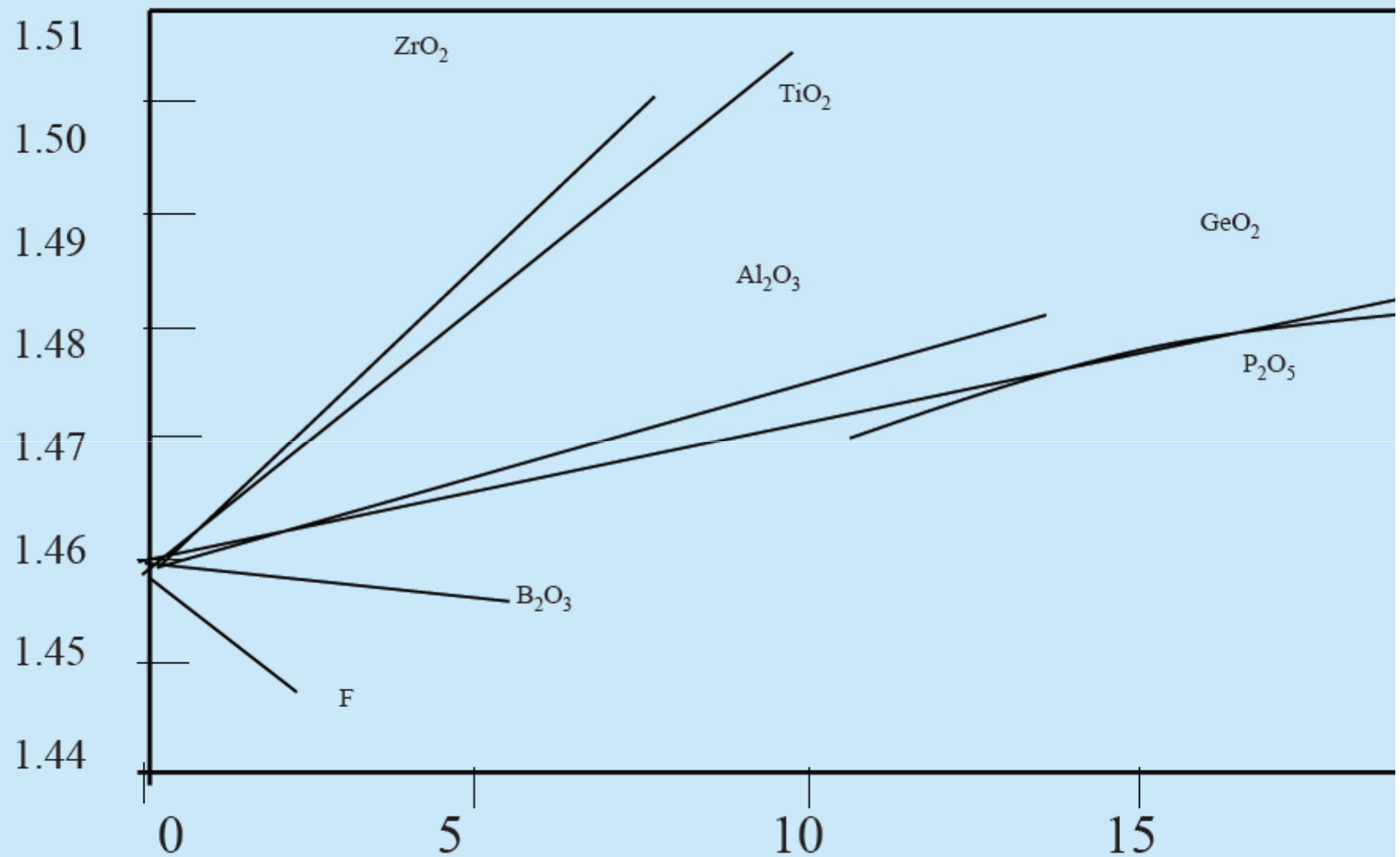
$$\alpha = 7,81 \cdot 10^{11} e^{-\frac{48,48}{\lambda}}$$

2. Ultravijolična absorpcija

$$\alpha = \frac{15,42\Delta n}{446\Delta n + 60} e^{-\frac{4,63}{\lambda}}$$

Slabljenje na (makro)krivini vlakna

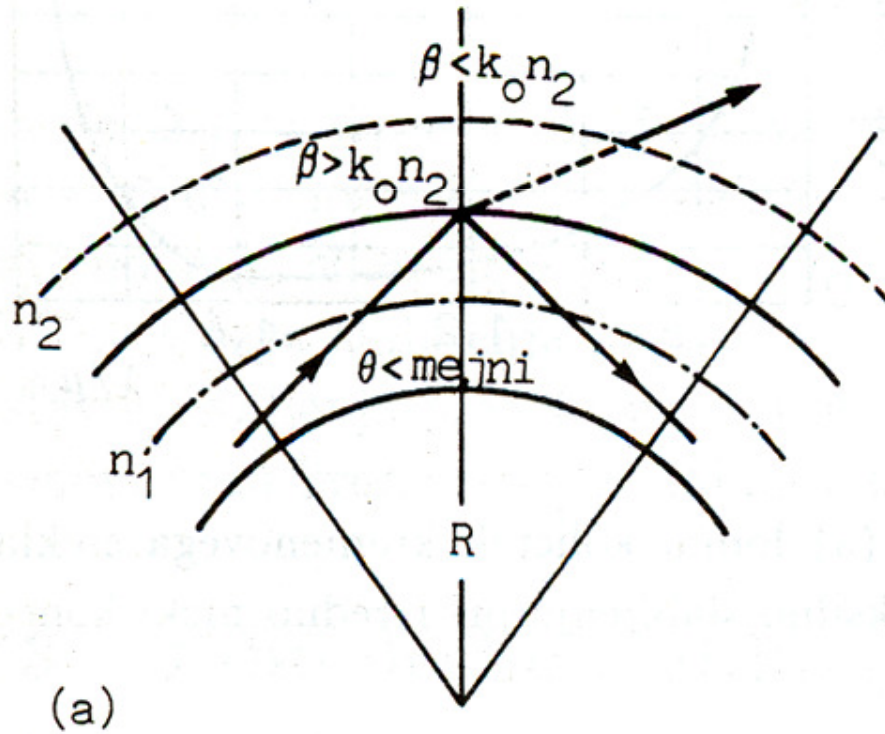
Refractive Index



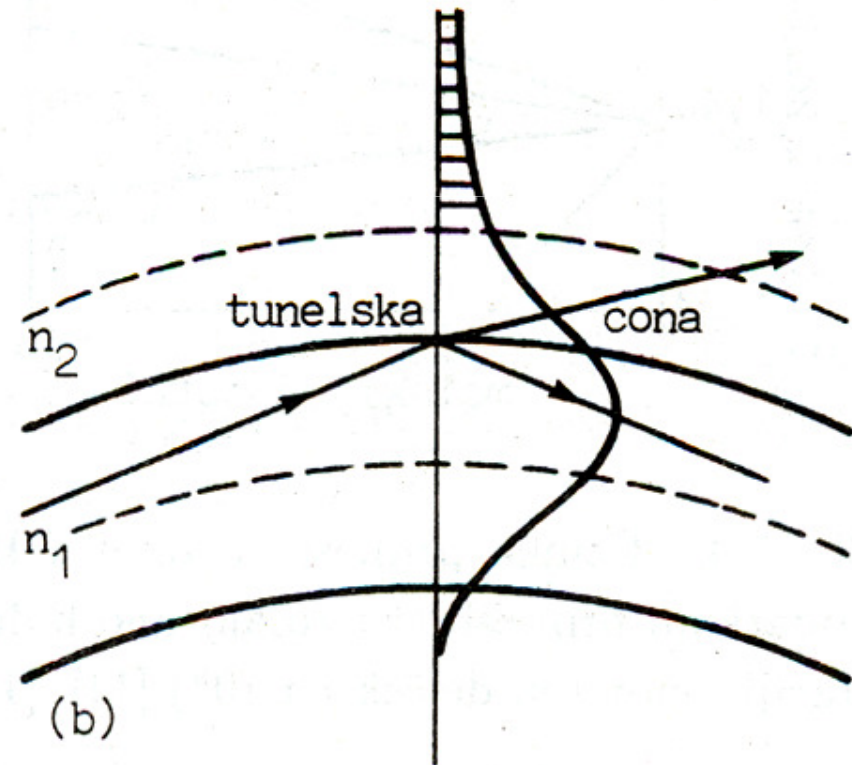
Oxide addition (mol%) in silica host

Pojasnitev slabljenja na krivini

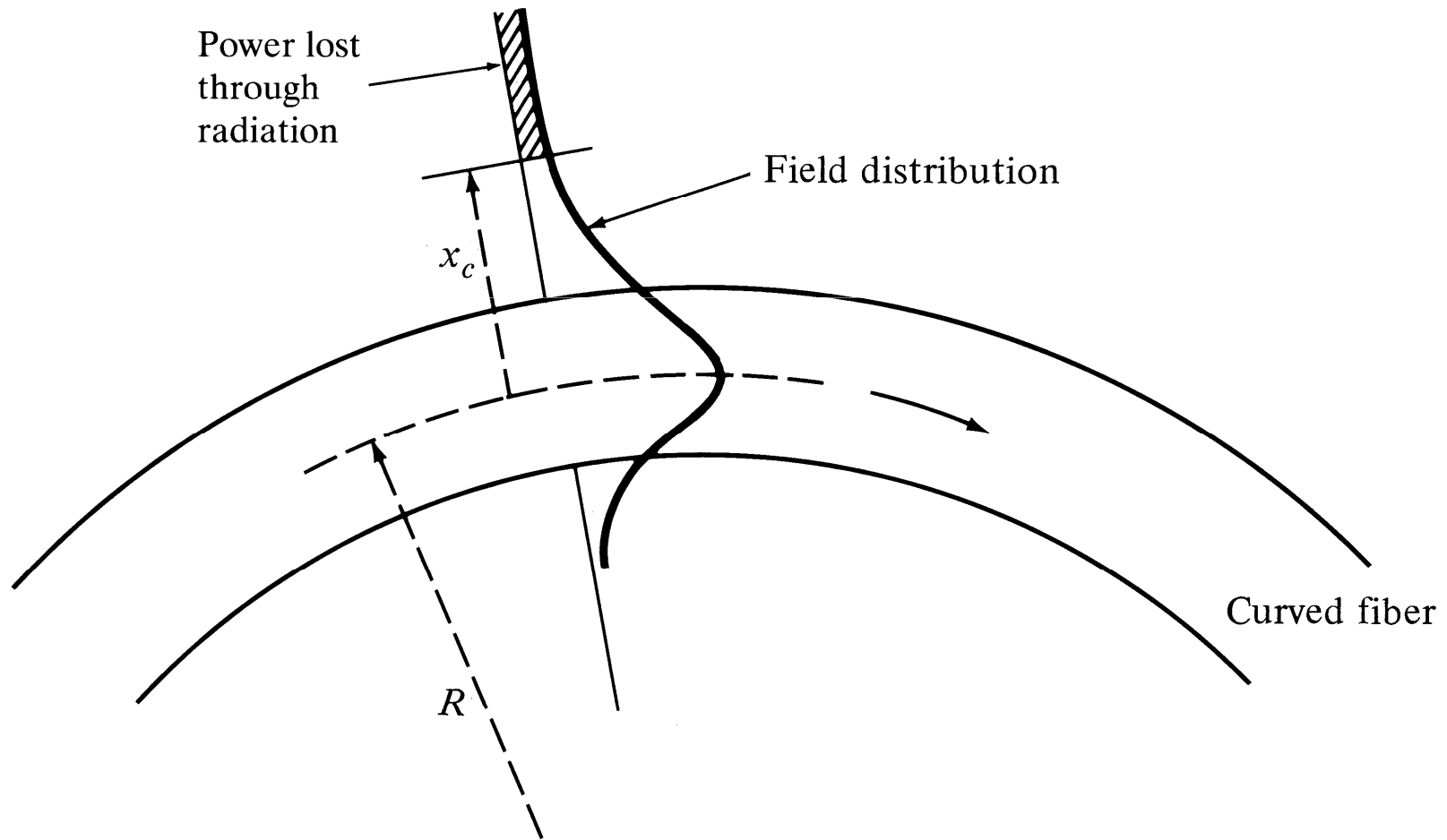
Prenehanje pogoja za totalni odboj



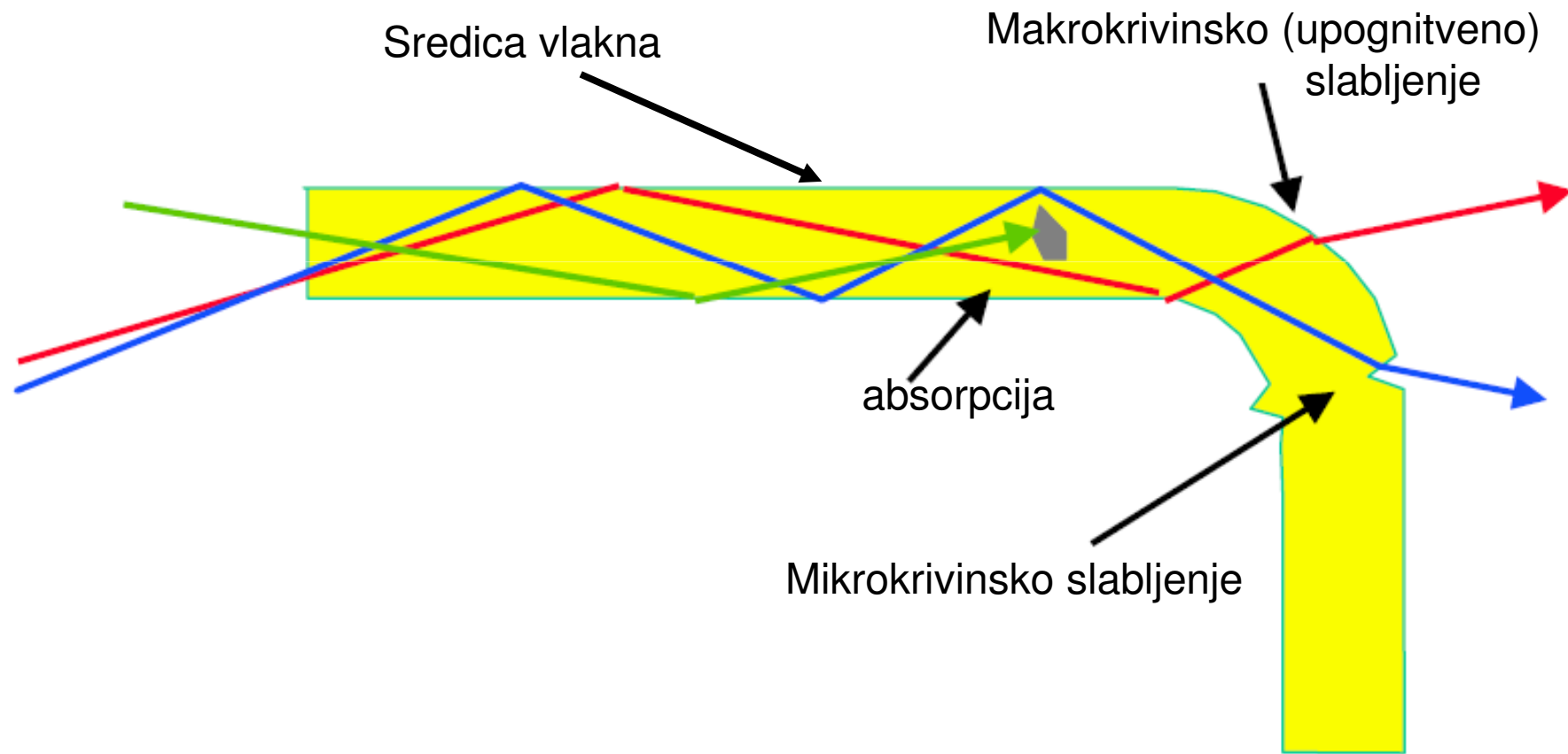
Optični tunelski pojav v oblogi



Izgubno sevanje na krivini



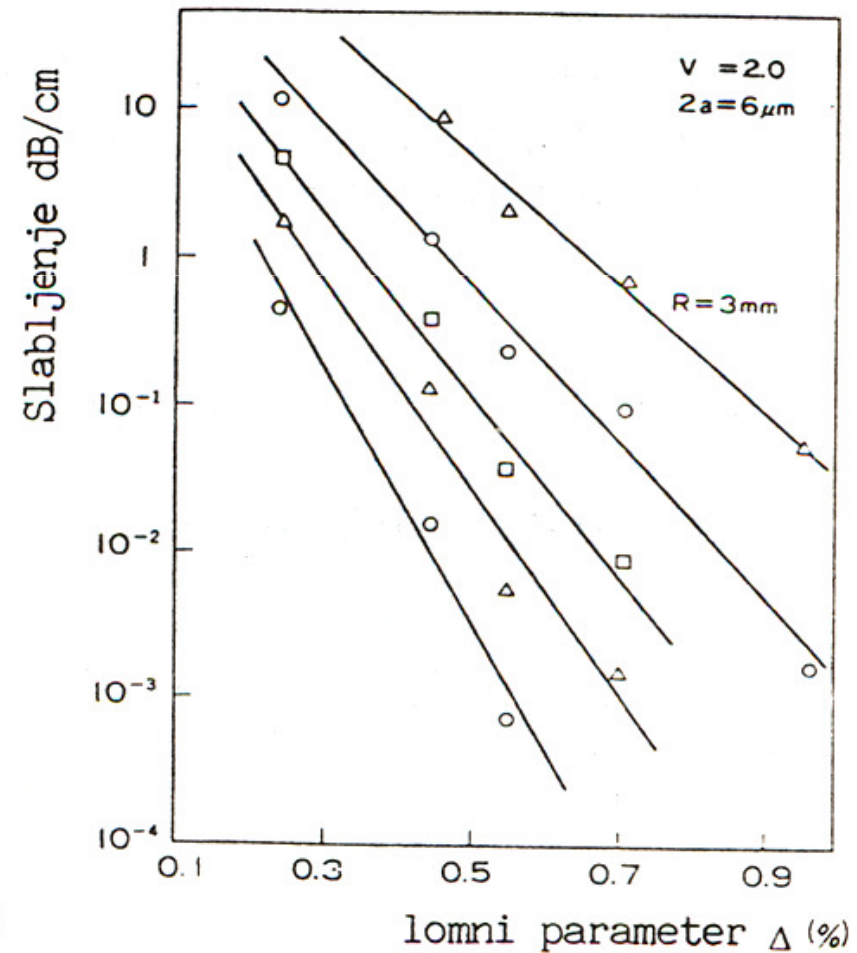
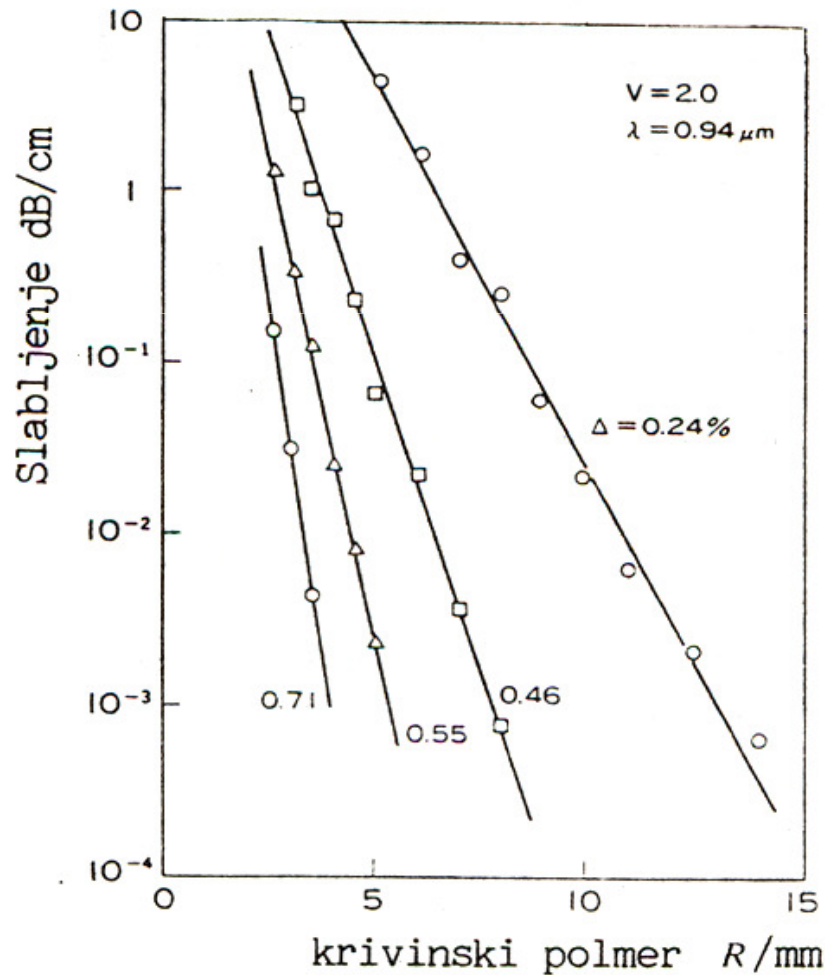
Slabljenje na krivini



Slabljenje na makrokrivini vlakna

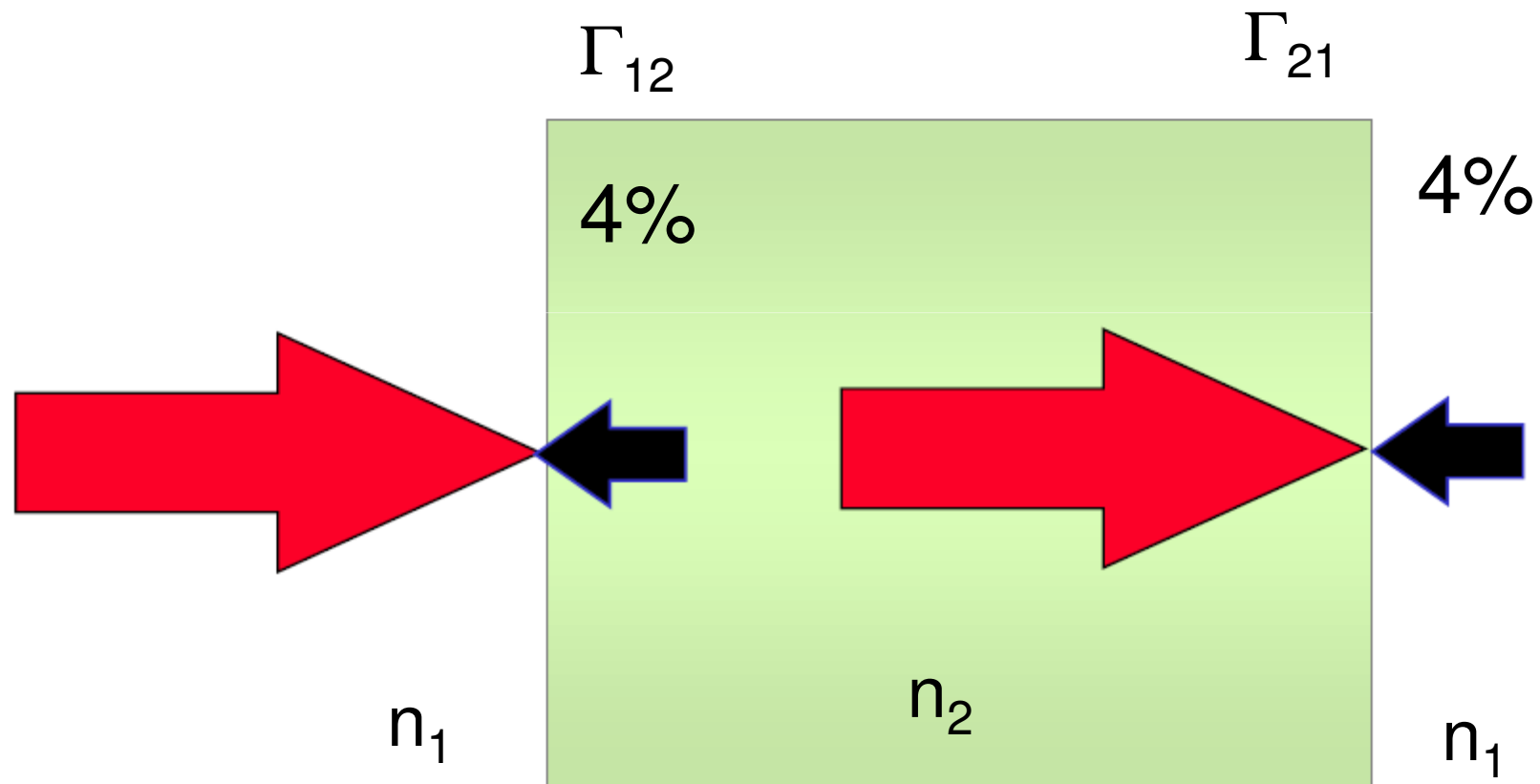
$$\alpha = \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{R a w^3} \right)^{1/2} \left(\frac{u}{V K_1(w)} \right)^2 e^{-\frac{4\Delta w^3 R}{3aV^2}}$$

R krivinski
polmer vlakna



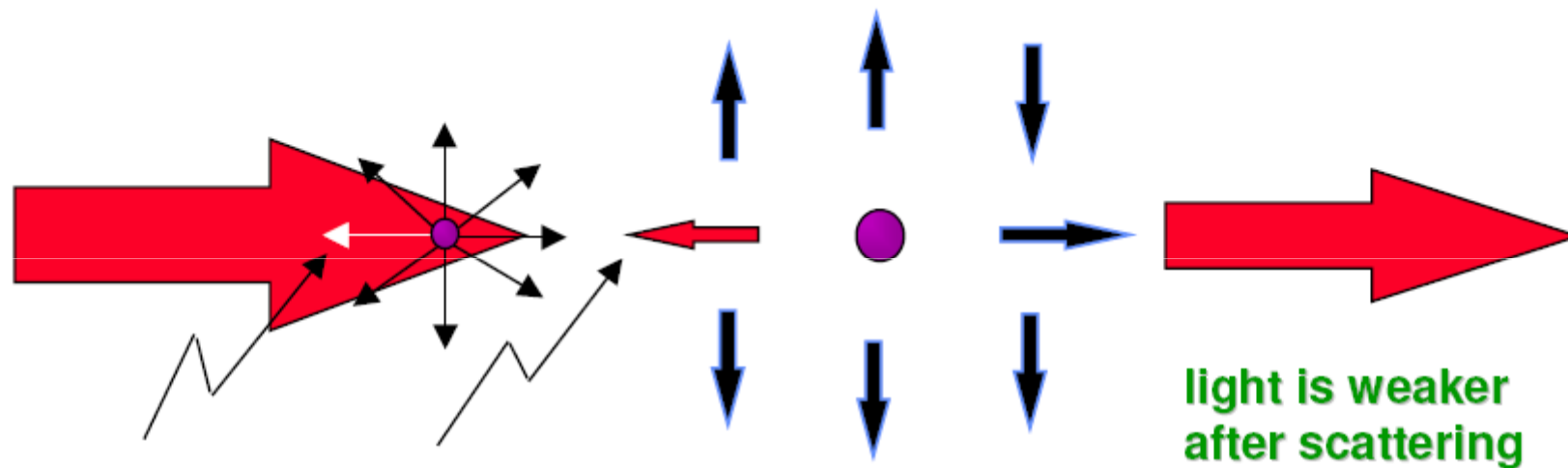
Odboj od konca vlakna

Odboj na začetku in koncu vlakna



Linearno in nelinearno sipanje

Optical Raleigh Scattering.



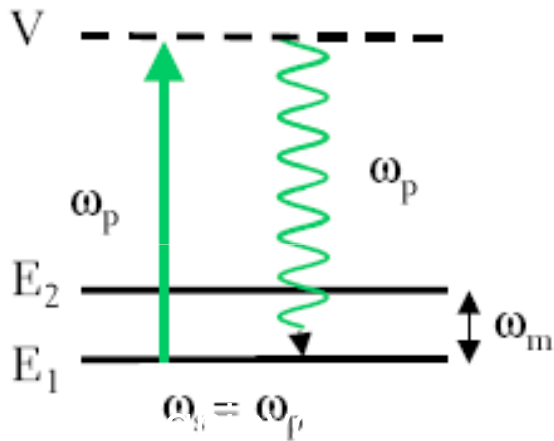
Backscatter

As light passes through a particle part of it is *scattered* in all directions. The part that returns to the source (about 0.0001%) is called **BACKSCATTER**.

Linearno in nelinearno sipanje

Rayleighjevo sipanje:

$V =$ virtualni nivo

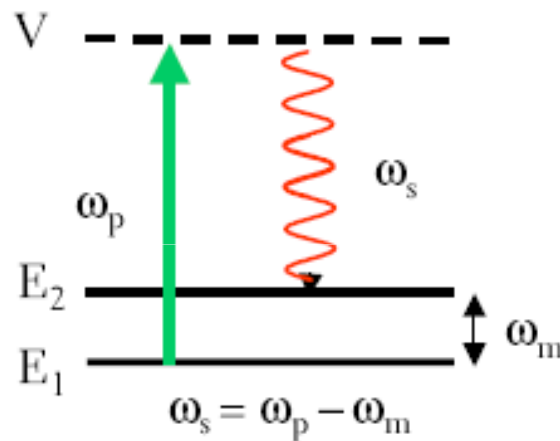


Linearno sipanje

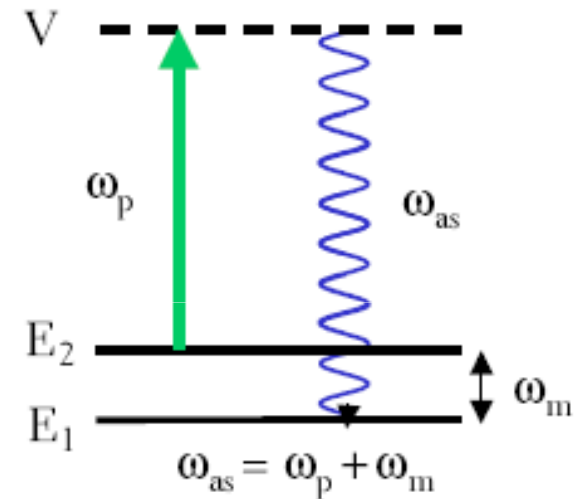
Fotoni se sipajo v vse smeri
(dipolsko sevanje)

Spontano Ramanovo sipanje:

Stokes



anti-Stokes



Nelinearno sipanje

Fotoni se sipajo v poljubnih smereh

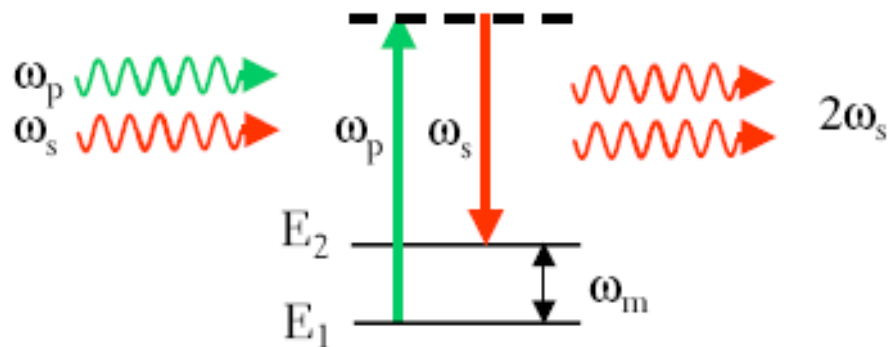
$N_2 = N_1 e^{-\hbar\omega_m / kT}$ število fotonov na E_2 in E_1

Sevanje anti-Stokes mnogo šibkejše.

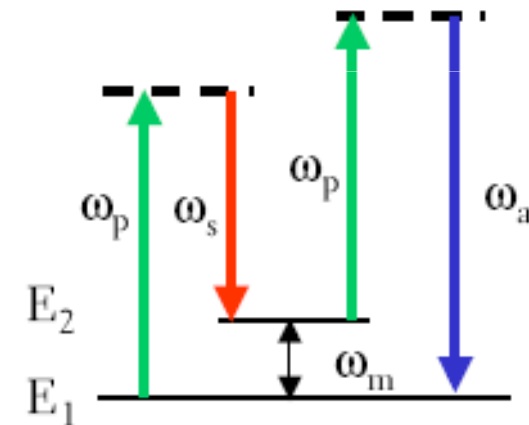
Stimulirano Ramanovo sipanje

- Pri močni črpalki se število sevanih Ramanovih fotonov močno poveča. Zato:

Stimulirajo koherentno Ramanovo sevanje v smeri širjenja črpalke in s tem signal ojačujejo.



$$\hbar\omega_p + \hbar\omega_s = 2\hbar\omega_s + \hbar\omega_m$$



Stokesov in anti-Stokesov signal imata lahko primerljivo intenziteto.

Konec