



# Prenosové médiá 05

doc. Ing. Ľuboš Ovseník, PhD.

([lubos.ovsenik@tuke.sk](mailto:lubos.ovsenik@tuke.sk); tel. 421 55 602 4336)

[https://data.kemt.fei.tuke.sk/PM\\_PS\\_Prenosove\\_media/](https://data.kemt.fei.tuke.sk/PM_PS_Prenosove_media/)

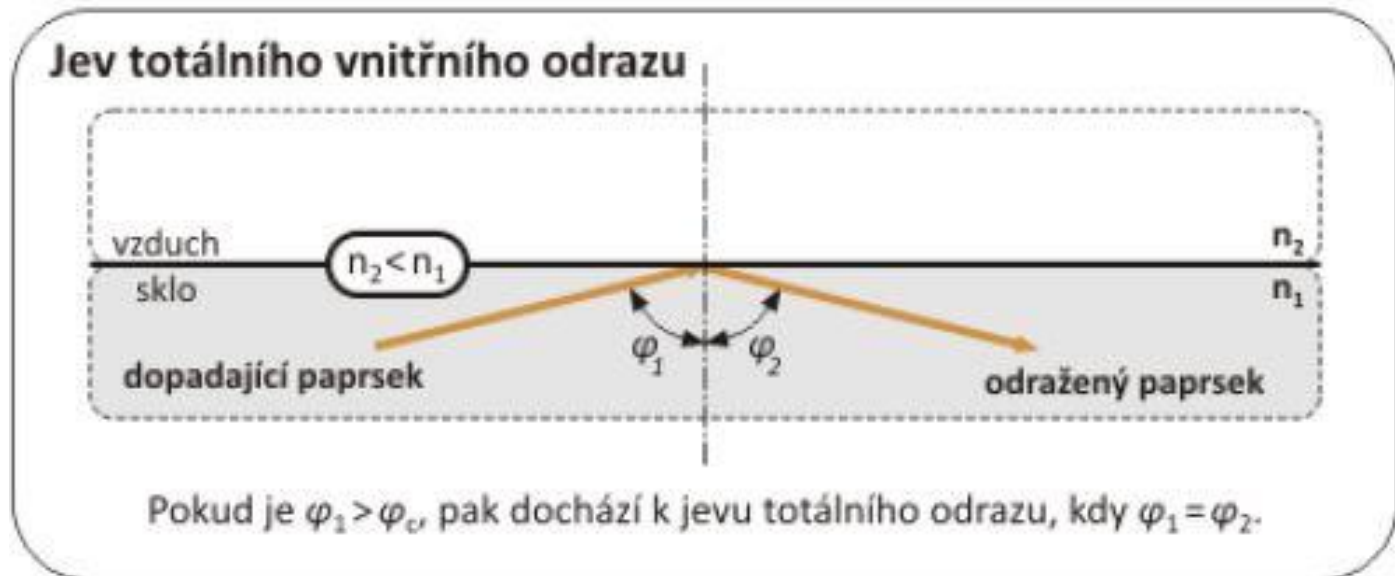
# PEVNÉ OPTICKÉ PRENOSOVÉ MÉDIÁ 2

## (PRENOSOVÉ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKIEN)

- Rozbor prenosových vlastností optických médií
  - Numerická apertúra
  - Akceptačný uhol
  - Vid (mód)
- Javy limitujúce použitie optických vlákien
  - Útlm (tlmenie, straty)
  - Disperzia
  - Šírka prenosového pásma
- Aplikačné parametre OV
  - SI SM
  - SI MM
  - GI MM

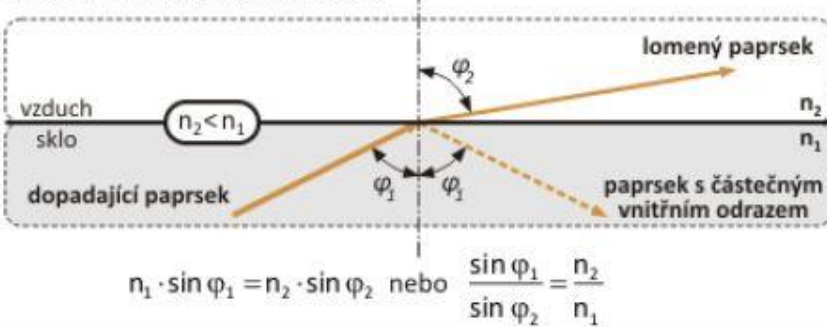
# Rozbor prenosových vlastností optických médií

- **princíp šírenia** optického signálu v jadre optického vlákna je založený na **totálnom odraze lúča** na rozhraní jadro-plášť OV, teda musia byť splnené nasledovné podmienky
  - index lomu jadra musí byť väčší ako index lomu plášťa ( $n_1 > n_2$ )
  - dopad lúča na rozhranie jadro-plášť musí byť pod uhlom väčším ako je kritický uhol dopadu ( $\varphi_1 > \varphi_c$ )

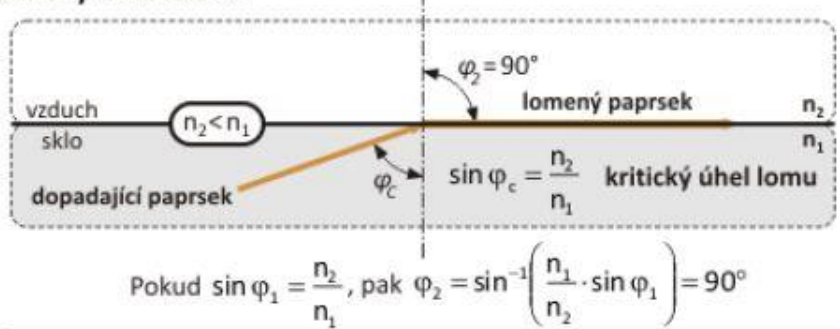


# opakovanie k princípu šírenia optického signálu

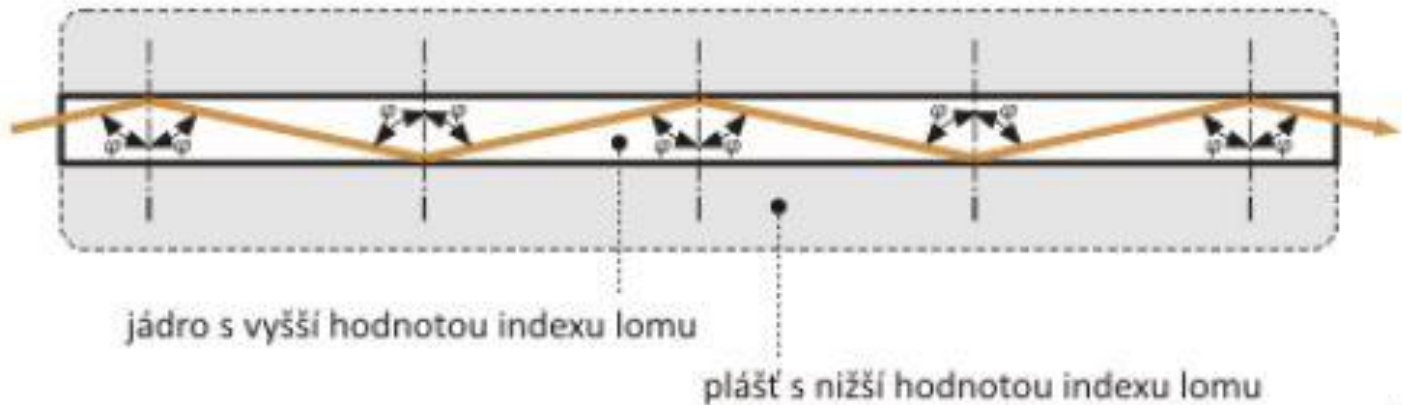
## Snellův zákon odrazu a lomu



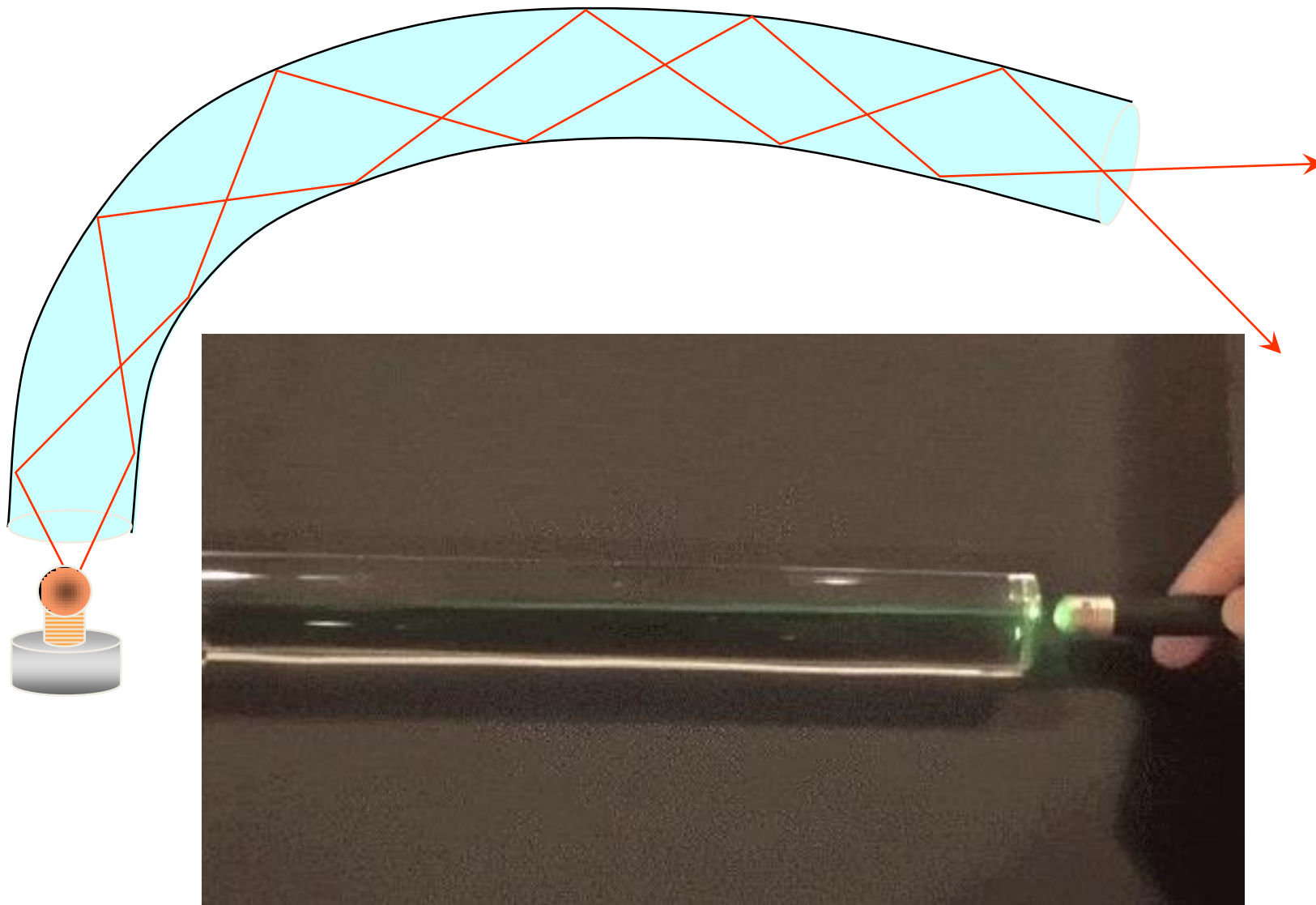
## Kritický úhel lomu



## Přenos optického svazku v ideálním optickém vlákně



# Princíp vedenia svetla optickým vláknom



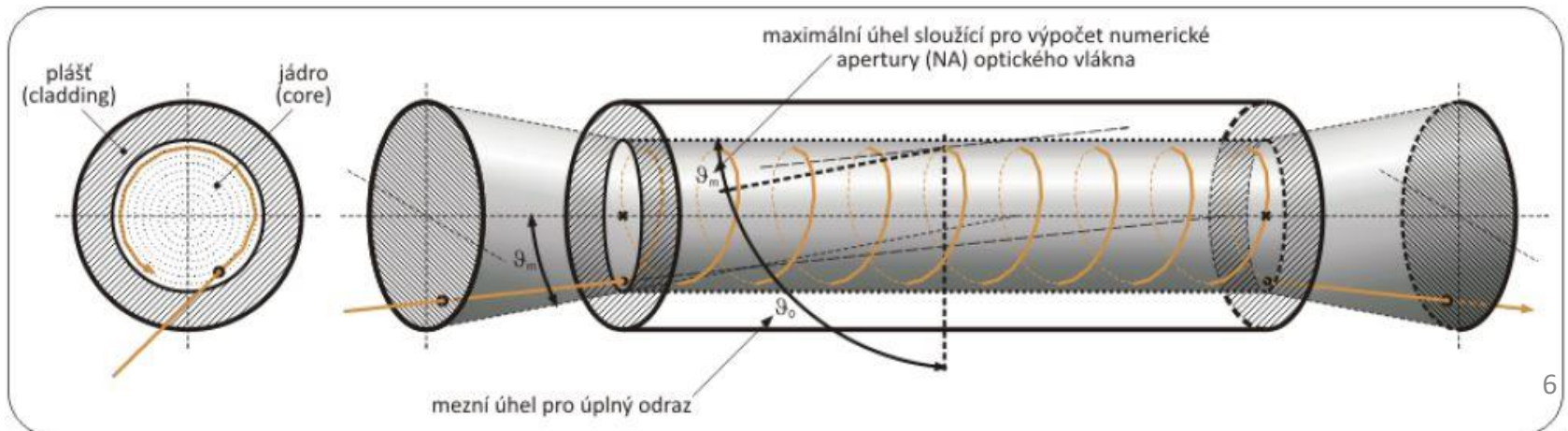
# Numerická apertúra (NA)

Z predchádzajúcej úvahy vyplýva, že v dôsledku opakovaných úplných (totálnych) odrazov, ktoré prebiehajú bez akýchkoľvek strát (ideál), svetelný lúč sleduje dráhu jadra optického vlákna, t.j. lúč je jadrom vedený

- rozsah (rozmedzie) uhlov, pod ktorými môže svetelný lúč dopadať na OV tak, aby bol ním tento lúč následne vedený, definuje NA
  - vedenie lúča môžeme stotožniť s množstvom naviazanej energie do OV

$$NA = n_0 \sin \vartheta_m = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

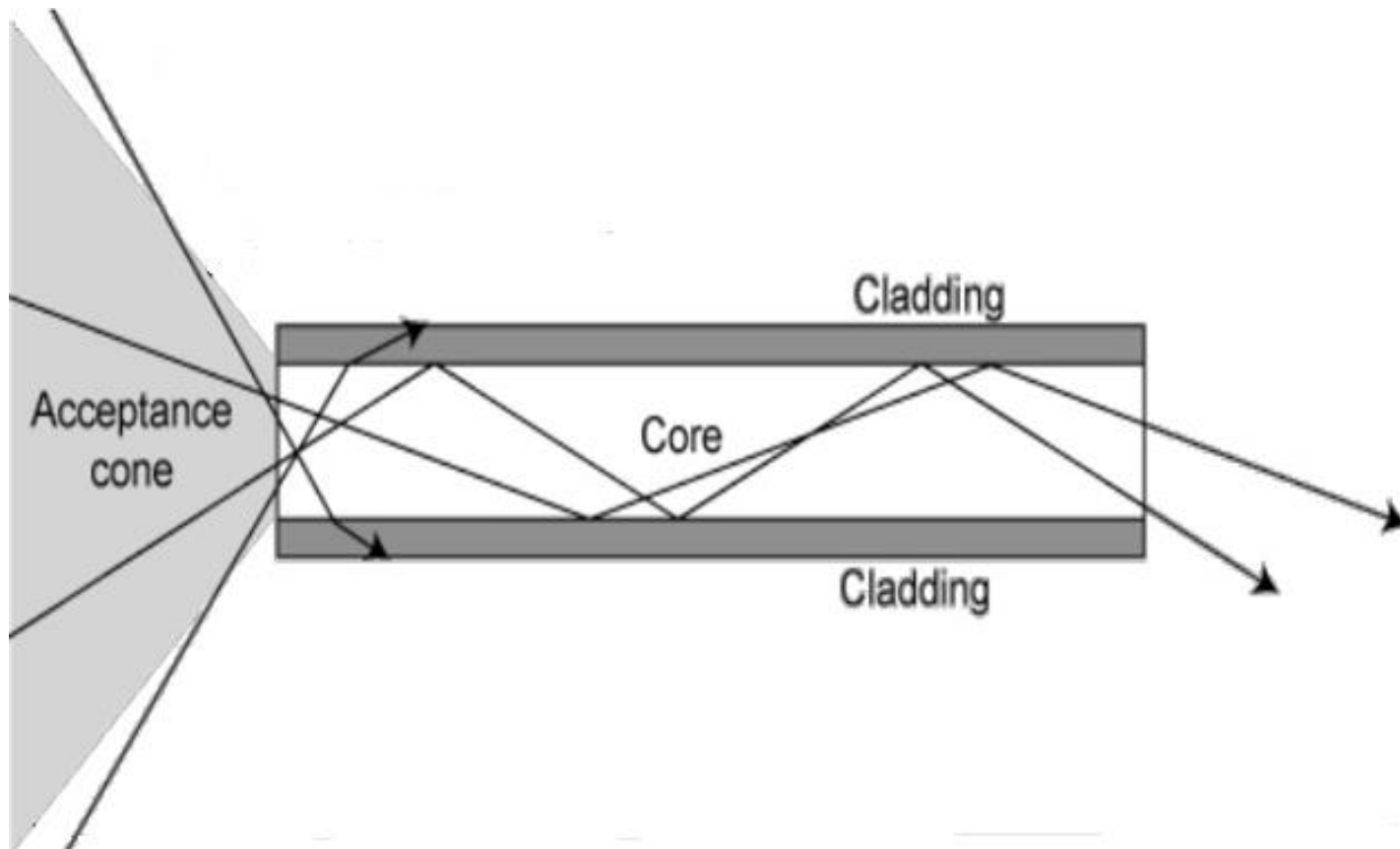
$n_0$  je index lomu prostredia,  $n_1$  je index lomu jadra OV a  $n_2$  je index lomu plášťa OV



# Akceptačný uhol ( $\vartheta_m$ )

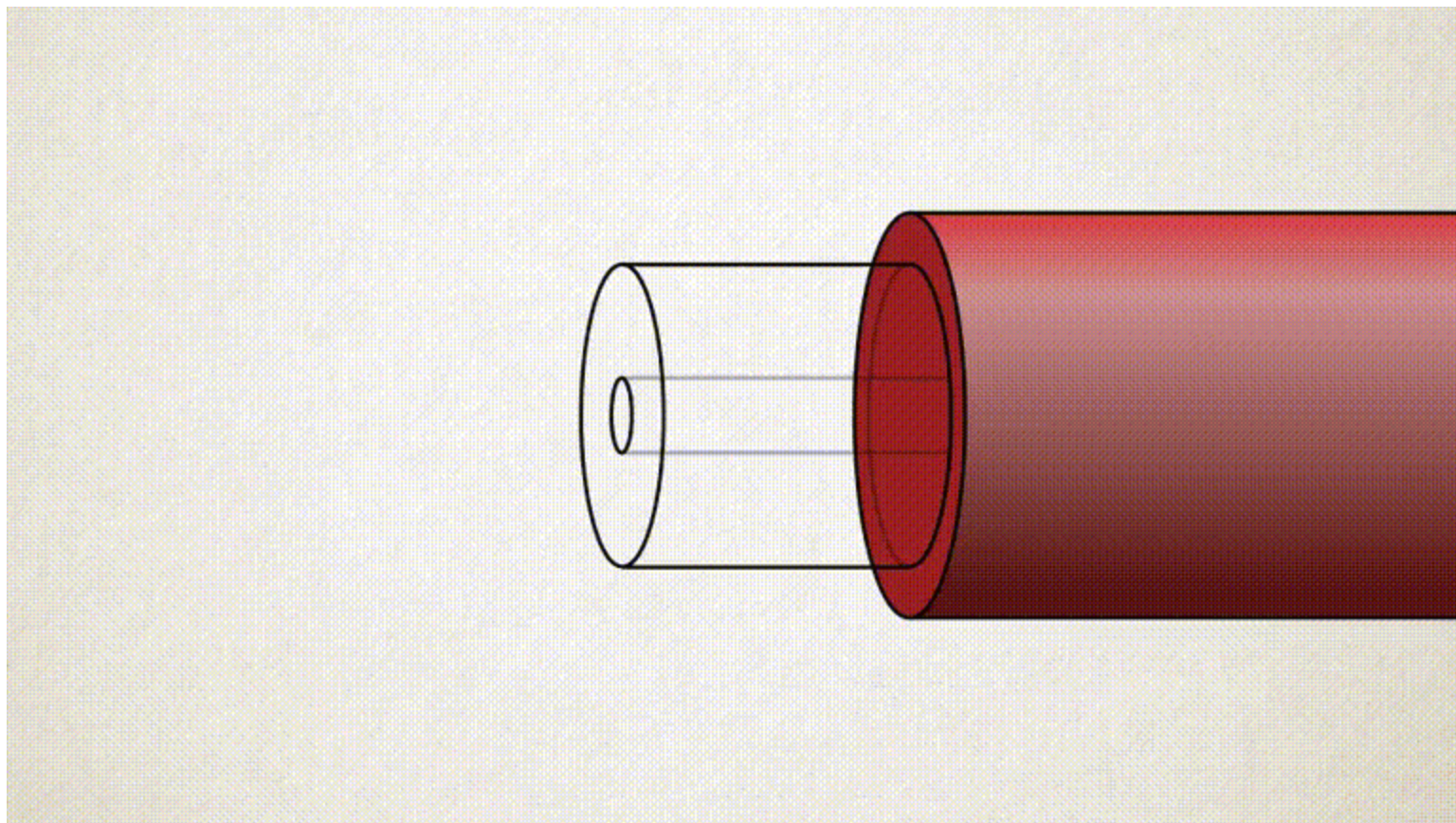
Maximálny uhol, v ktorom môžu vonkajšie svetelné lúče dopadnúť na čelo optického vlákna (rozhranie vzduch/sklo) a **lúče budú vedené jadrom** OV

- ostatné lúče nebudú vedené





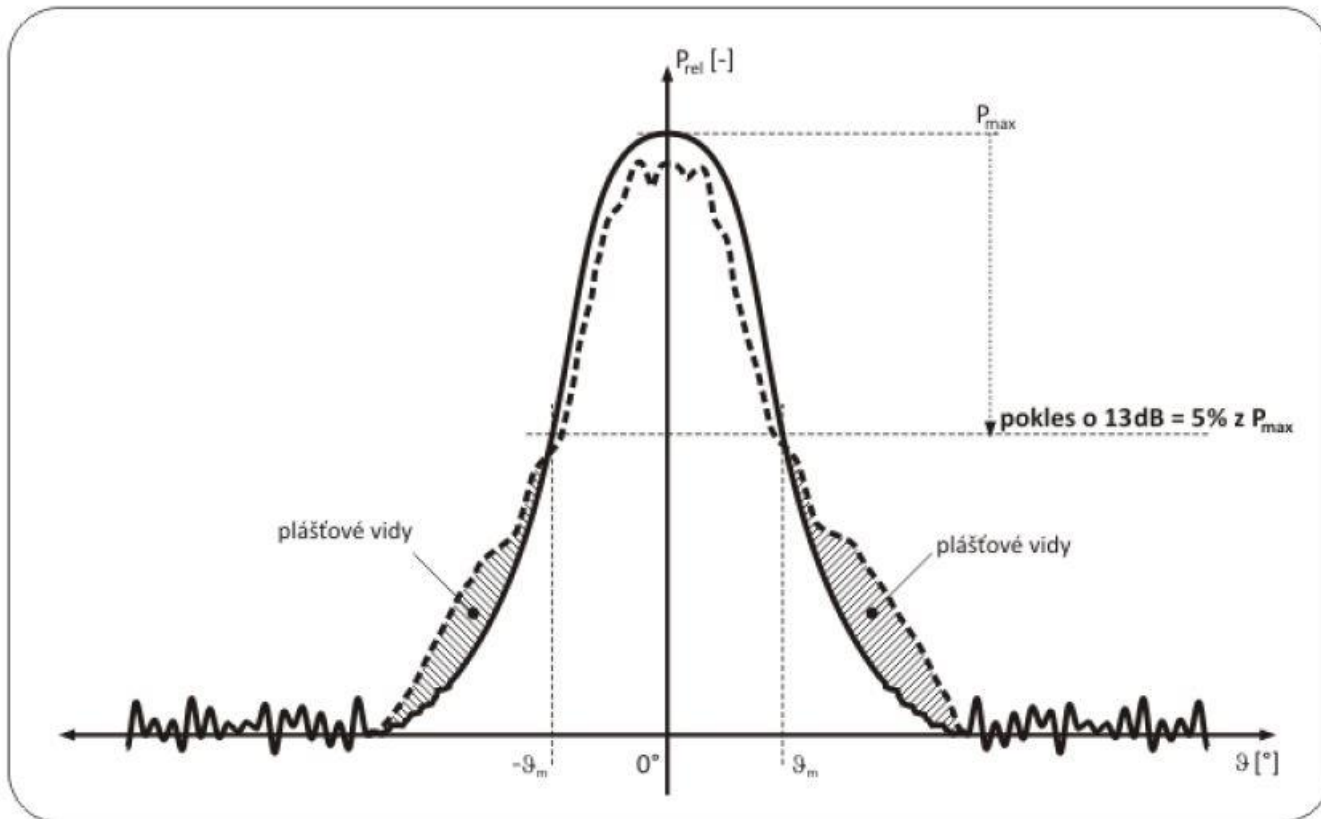
## Naviazanie optického signálu (žiarenia) do OV





# Vyžarovacia charakteristika OV

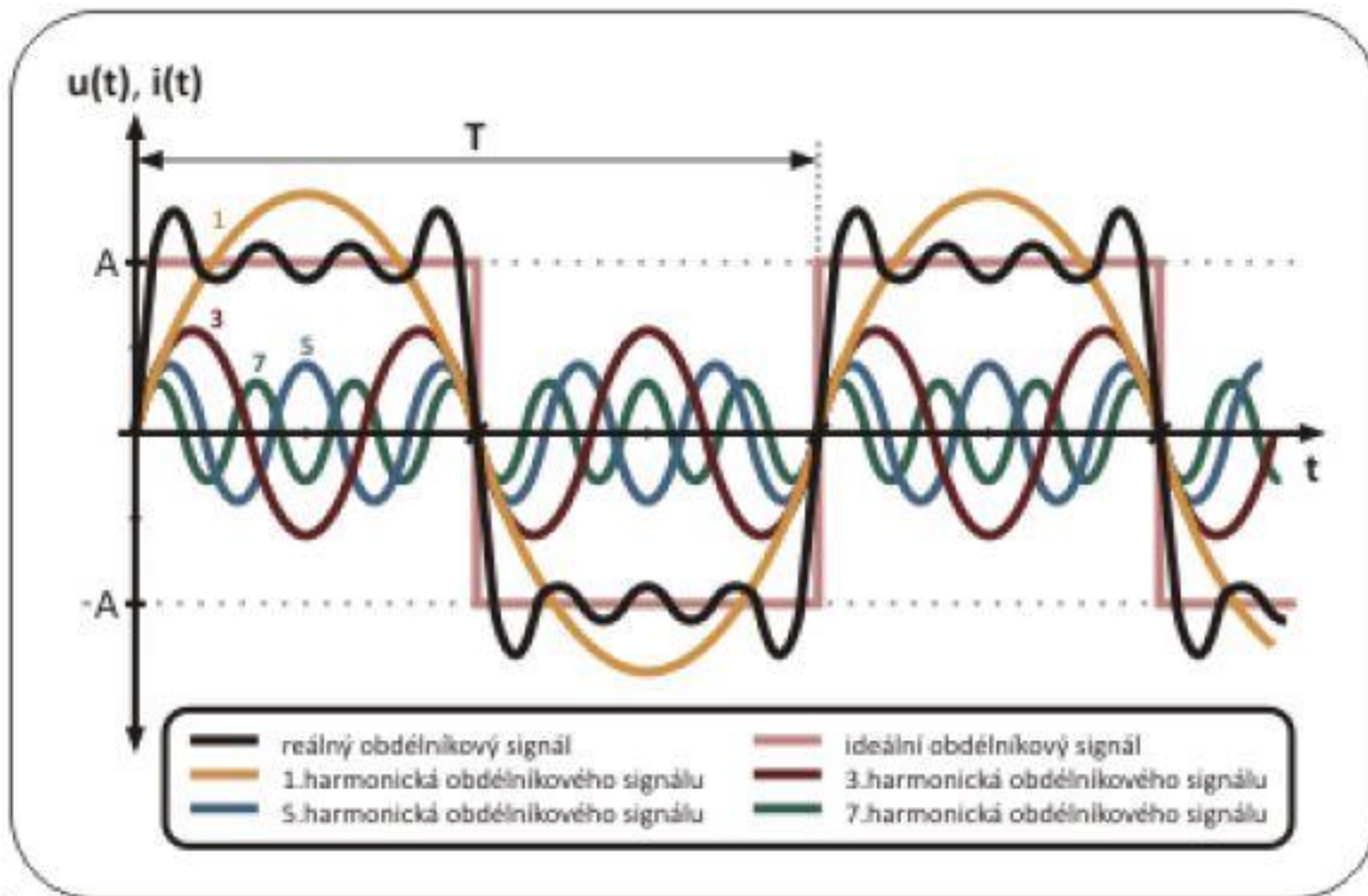
- SI SM (9/125 $\mu\text{m}$ ): NA=0,08 až 0.1 ( $\vartheta_m=4.6^\circ$  až  $5.75^\circ$ )
- SI MM (50/125 $\mu\text{m}$ ): NA=0,3 až 0.4 ( $\vartheta_m=17.45^\circ$  až  $23.6^\circ$ )
- GI MM (50/125 $\mu\text{m}$ ): NA=0,2 ( $\vartheta_m=11.5^\circ$ )
- GI MM (62.5/125 $\mu\text{m}$ ): NA=0,26 až 0.27 ( $\vartheta_m=15.1^\circ$  až  $15.7^\circ$ )



# Pojem vid (mód)

- každý **periodický signál** ľubovoľného tvaru sa dá rozložiť na **súčet** nekonečného množstva **harmonických signálov** s charakteristickou frekvenciou, resp. začiatočnou fázou a amplitúdou
  - akýkoľvek **nepárny periodický signál** sa dá matematickými operáciami rozložiť (popísať) na **sínusové zložky** - harmonické zložky
  - akýkoľvek **párny periodický signál** sa dá matematickými operáciami rozložiť (popísať) na **kosínusové zložky**
    - platí, že frekvencie týchto harmonických zložiek sú **celistvými násobkami** základnej frekvencie signálu
    - **párne funkcie**, tzn. ( $f(x)=f(-x)$ ) sú všetky členy  $b_k=0$  → len cosinusové členy
    - **nepárne funkcie**, tzn. ( $f(x)=-f(-x)$ ) sú všetky členy  $a_k=0$  → len sinusové členy

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx)$$



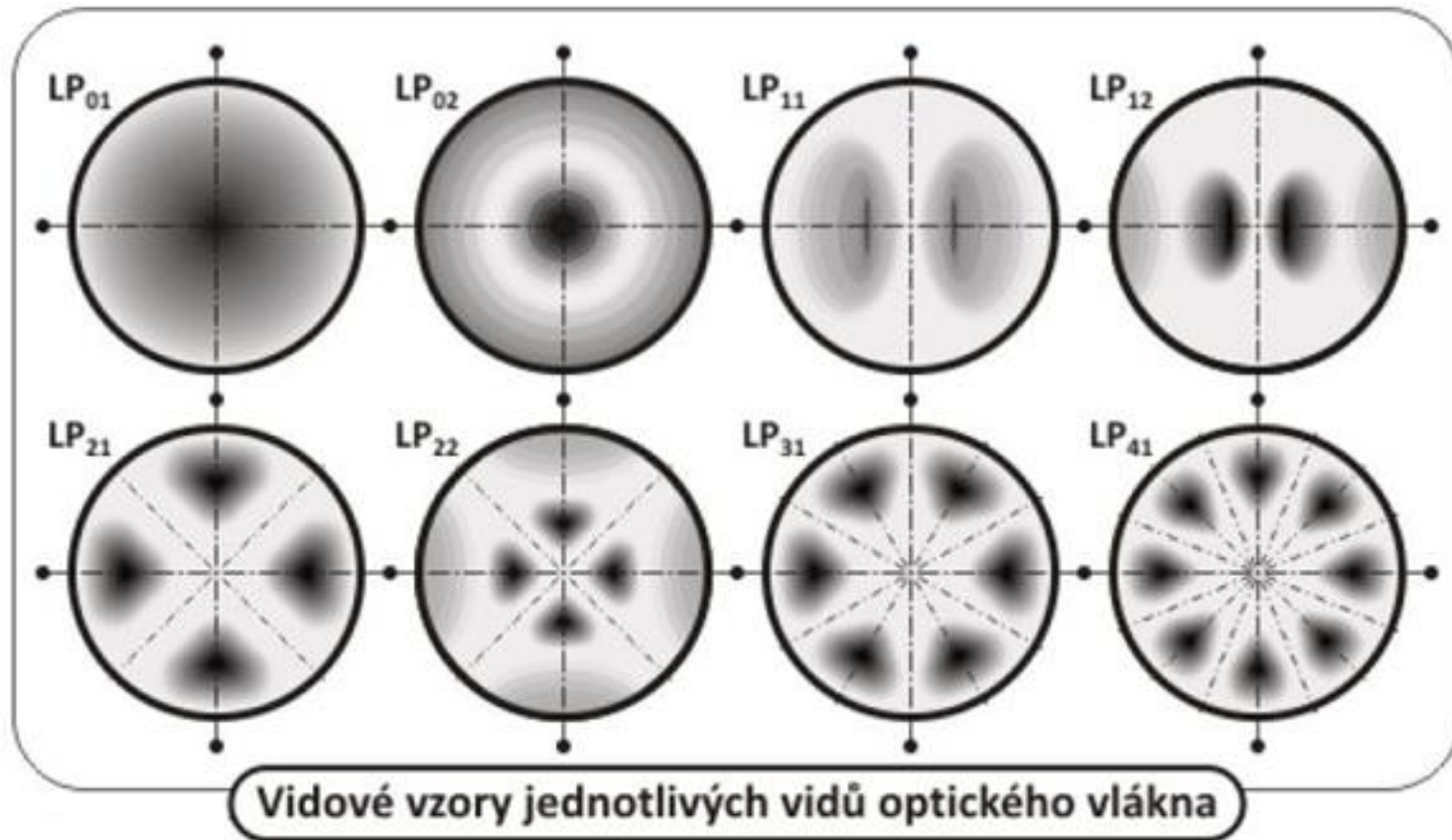
- počet vidov prenášaných OV stanovujeme pomocou, tzv. **normalizovanej (normovanej) frekvencie**
  - normalizovaná frekvencia zohľadňuje konkrétnu **vlnovú dĺžku** a **materiál**, z ktorého je vyrobené OV
  - normalizovaná frekvencia **určuje**, či je OV **SM** alebo **MM**
  - pre **jednovidové** OV (SM) platí  **$V \leq 2.405$**

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

kde  $a$  je polomer jadra OV a NA je numerická apertúra OV

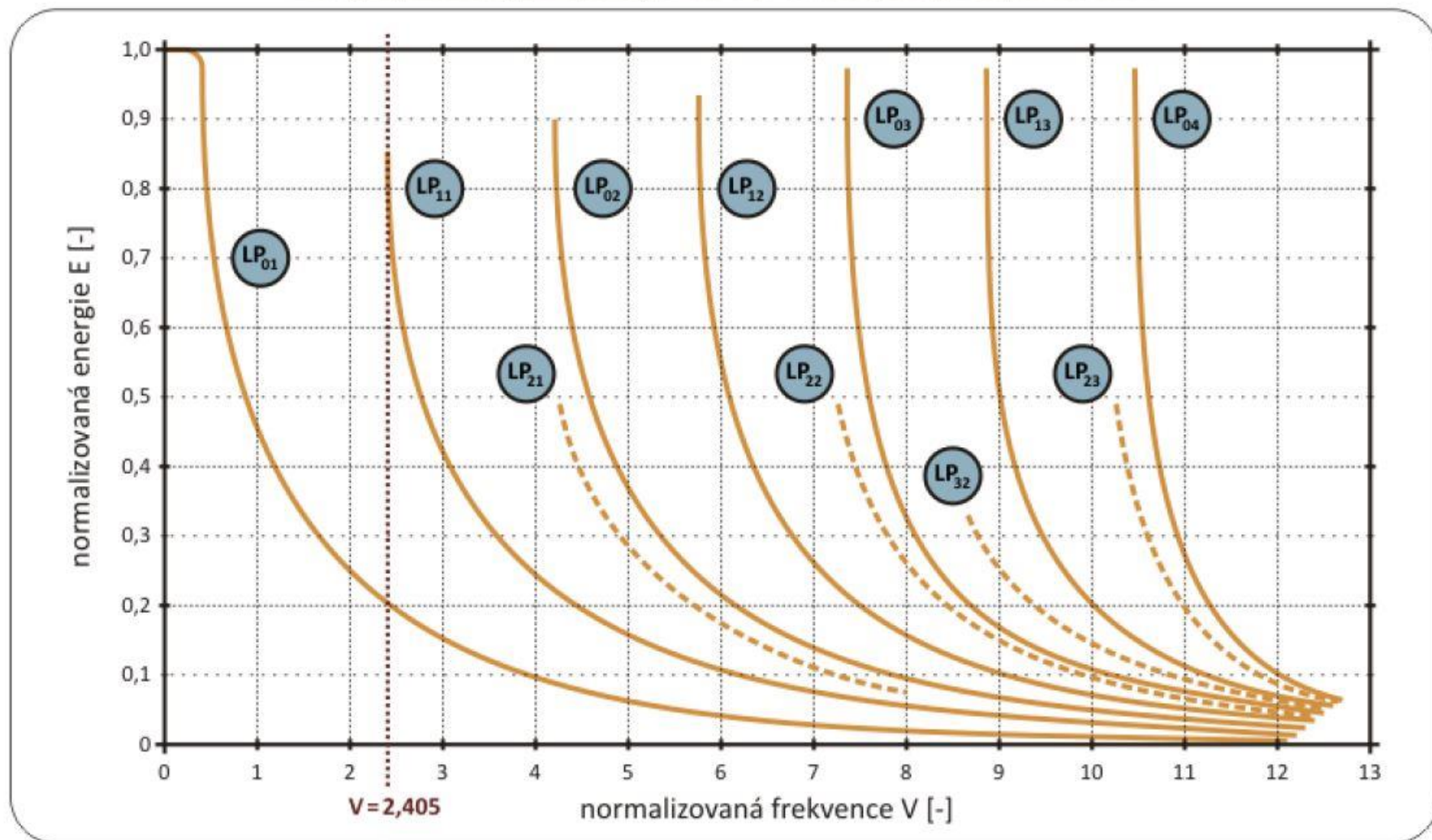
- pokiaľ potrebujeme **znižiť počet prenášaných vidov** v OV musíme:
  - **zmenšiť priemer jadra** OV
    - preto majú SM vlákna priemer jadra  $9\mu\text{m}$
  - **zmeniť** použitú pracovnú **vlnovú dĺžku**
  - alebo **znižiť NA**
    - zmenšiť rozdiel indexov lomu  $n_1$  a  $n_2$

# Obr. Vidové vzory jednotlivých vidů OV



# Obr. Vidová energetická bilancia

Energie jednotlivých optických vidů přenášených optickým vláknem



# Javy limitujúce použitie optických vlákien

- **nepriaznivý vplyv** na optické prenosové médiá z hľadiska prenosovej kapacity a dosahu prenosu má hlavne:
  - **tlmenie** optického vlákna
    - straty materiálovou absorpciou
      - vlastná absorpcia
      - nevlastná absorpcia
    - straty rozptylom
      - lineárny rozptyl (Rayleighov rozptyl, Mieho rozptyl )
      - nelineárny rozptyl (Ramanov r. (SRR), Brillouinov r. (SBR), vlastná fázová modulácia (SPM), krížová fázová modulácia (XPM, CPM), nosnou indukovaná fázová modulácia (CIP) a štvorvlňové zmiešavanie (FWM)
    - straty ohybom OV
      - mikroohyb
      - makroohyb
  - **disperzia** optického vlákna
    - medzividová (medzimódová) disperzia (dominuje hlavne v MM vláknach)
    - vnútrovidová (vnútromódová) disperzia
      - chromatická (materiálová) disperzia (prejavuje sa najvýznamnejšie)
      - vlnovodná disperzia (zanedbateľná voči chromatickej disperzii)
      - polarizačná módová (vidová) disperzia (prejavuje sa pri veľkých prenosových rýchlostiach)
  - **šírka prenášaného pásma** v závislosti od dĺžky optického vlákna



# Tlmenie optických vlákien

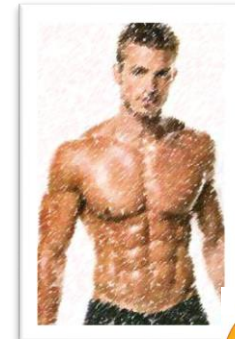
Útlm optických vlákien - dá sa konštatovať, že s narastajúcou vzdialenosťou od zdroja (dĺžkou OV) postupne klesá výkon prenášaného optického signálu



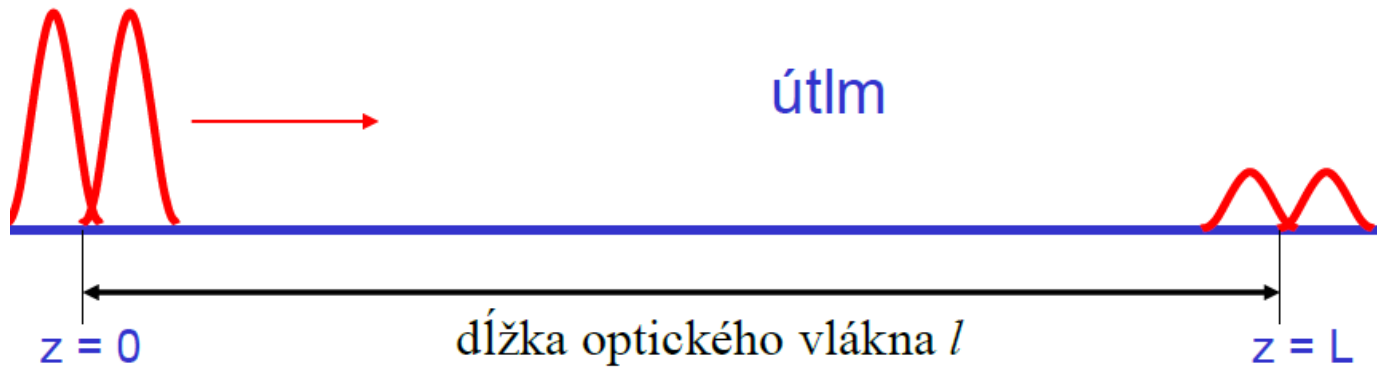
Dlhé optické vlákno



- **tlmenie** vravíme javom všetkého druhu, ktoré vedú k tomu, že sa **znižuje sila šíreného signálu**, ale zároveň **nemajú vplyv na jeho tvar!!!**



Dlhé optické vlákno

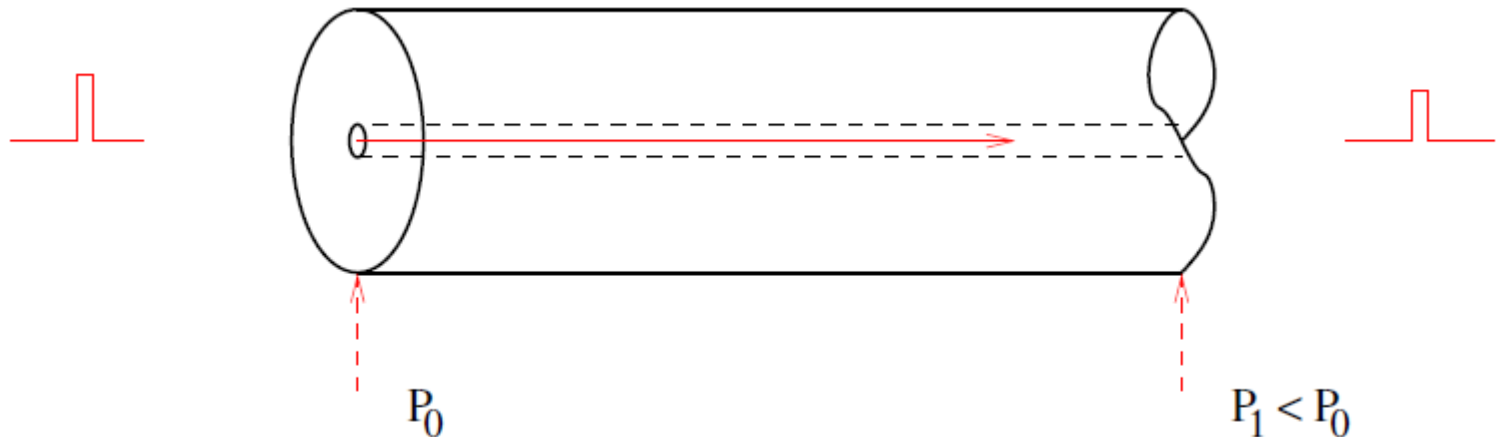


- vzťah pre výpočet celkového útlmu (tlmenia, strát) optického vlákna

$$\alpha = 10 \log \frac{P_o}{P_i} \text{ [dB]}$$

- vzťah pre výpočet tlmenia optického vlákna na jednotku dĺžky

$$\alpha_{dB} = \frac{1}{L} 10 \log \frac{P_o}{P_i} \text{ [dBkm}^{-1}\text{]}$$



- treba si uvedomiť, že:
  - 3 dB znamená pokles na polovicu
  - 10 dB znamená pokles na desatinu
  - 20 dB znamená pokles na stotinu
  - 30 dB znamená pokles na tisícinu

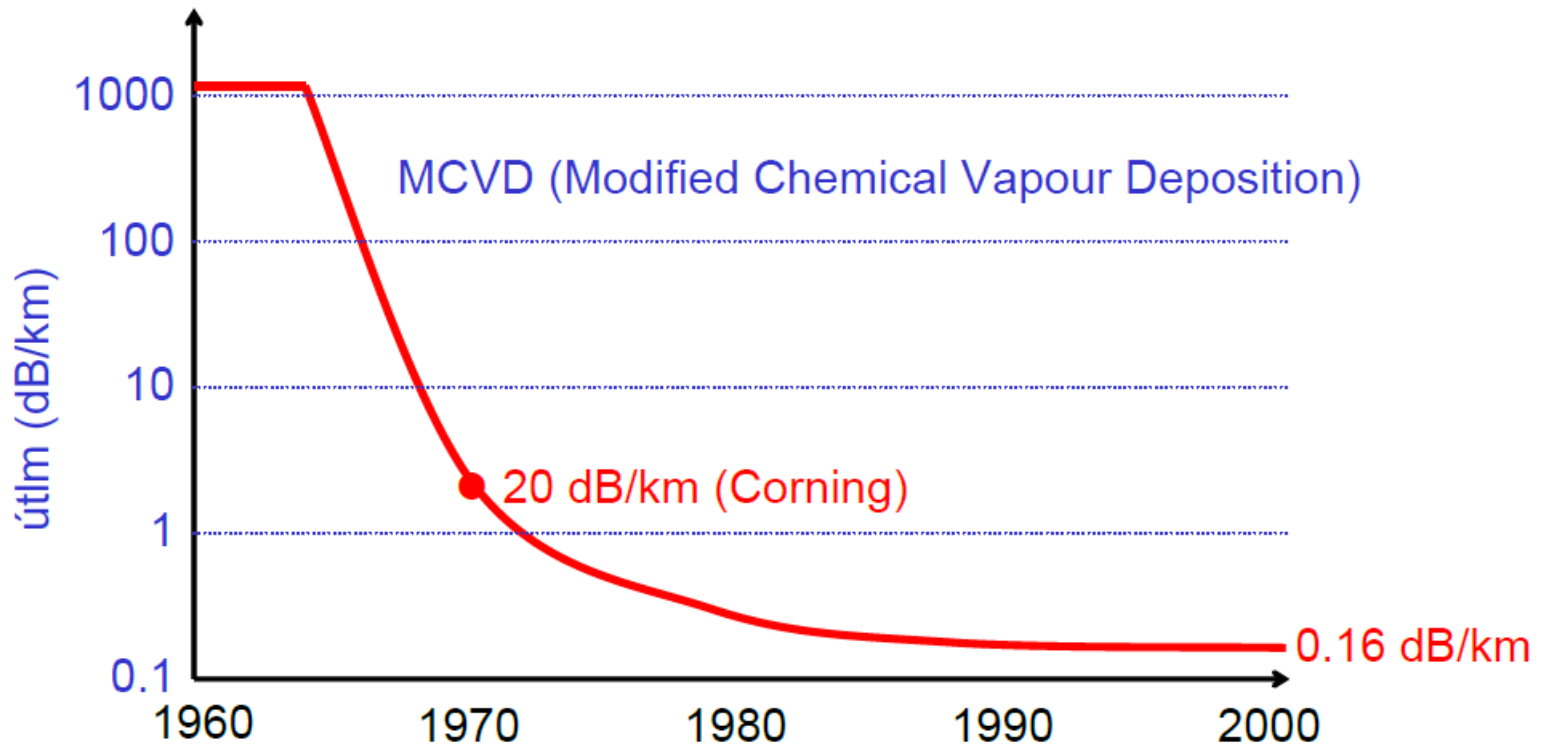
■ tlmenia rôznych materiálov

| <b>Materiál</b> | $\alpha_{dB}$<br>(dBkm <sup>-1</sup> ) | <b>3 dB dĺžka</b><br>(m) |
|-----------------|--|--------------------------|
| Okenné sklo     | 50 000                                 | 0.06                     |
| Optické sklo    | 3000                                   | 1                        |
| Hustá hmla      | 500                                    | 6                        |
| Atmosféra       | 10                                     | 300                      |
| Optické vlákno  | 0.3                                    | 10 000                   |

■ historický vývoj tlmenia optických vlákien

| <b>Rok</b> | <b>Vlnová dĺžka</b><br>$\lambda(\mu m)$ | <b>Tlmenie</b><br>$\alpha_{dB}(dBkm^{-1})$ |
|------------|---|--|
| 1970       | 0.850                                   | 20   |
| 1973       | 0.850                                   | 5  |
| 1976       | 1.310                                   | 0.5  |
| 1980       | 1.550                                   | 0.3  |

# Obr. Vývoj minimálneho dosiahnutého útlmu optického signálu v sklenených vláknach

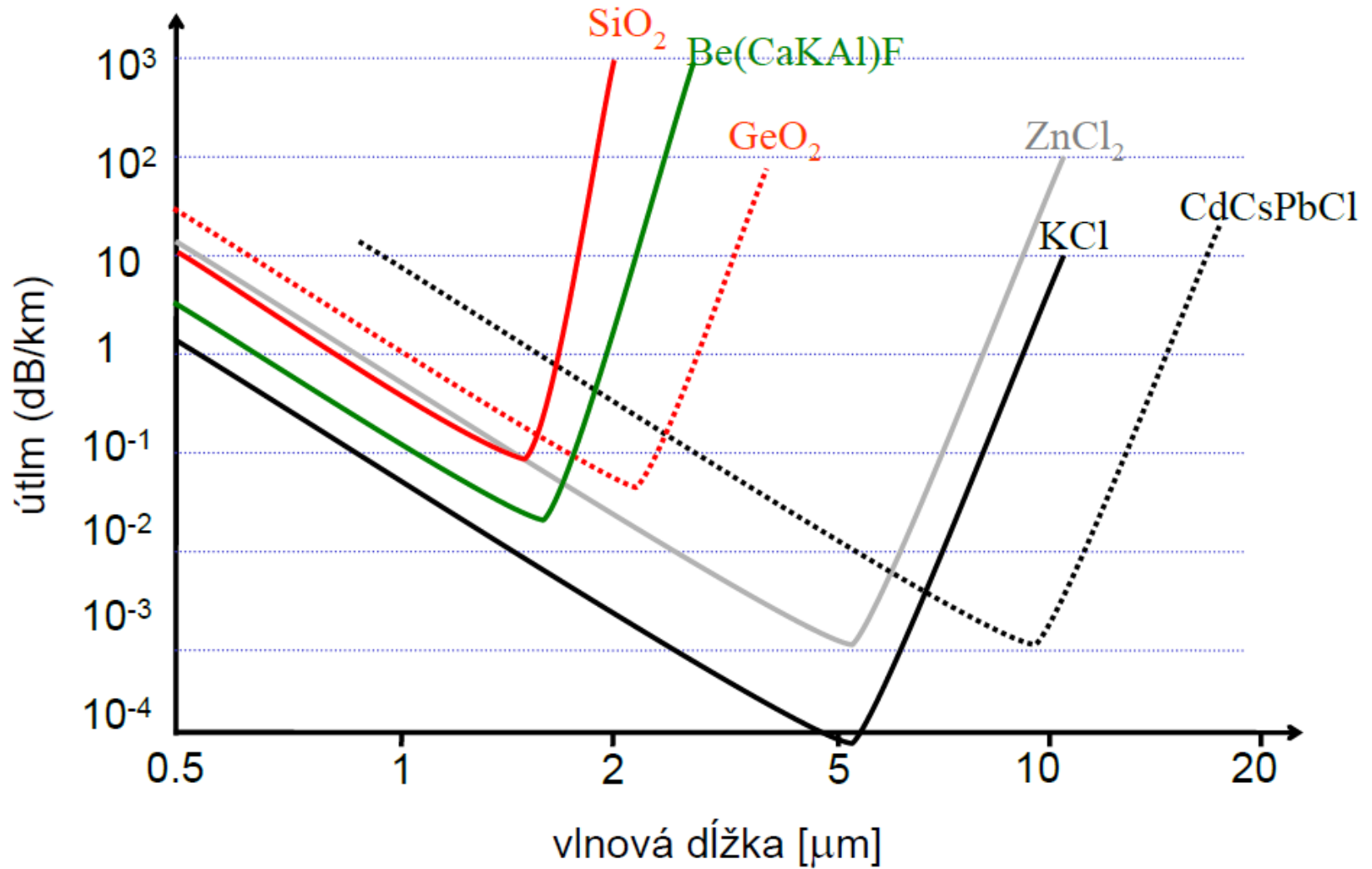


**Postupný pokles útlmu OV so zdokonaľovaním technológie výroby**

## Obr. Typické straty v komunikačných optických vláknach SiO<sub>2</sub>

| Optické vlákno |     | Optické straty – útlm [dB/km] |           |           |           |
|----------------|-----|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| rozmery        | typ | 780nm                         | 850nm     | 1300nm    | 1550nm    |
| 9/125μm        | SM  | 3,0                           | 2,5       | 0,5 ÷ 0,8 | 0,2 ÷ 0,4 |
| 50/125μm       | MM  | 3,5 ÷ 7,0                     | 2,7 ÷ 6,0 | 0,7 ÷ 4,0 | 0,6 ÷ 3,5 |
| 62,5/125μm     | MM  | 4,0 ÷ 8,0                     | 3,0 ÷ 7,0 | 1,0 ÷ 4,0 | 1,0 ÷ 4,0 |
| 100/140μm      | MM  | 4,5 ÷ 8,0                     | 3,5 ÷ 7,0 | 1,5 ÷ 5,0 | 1,5 ÷ 5,0 |
| 110/125μm      | MM  |                               | 15        |           |           |
| 200/230μm      | MM  |                               | 12        |           |           |

Obr. Nové materiály pre optické vlákna





## Tlmenie optických vlákien je spôsobené:

- **vlastnou absorpciou:** tepelné straty na vlastných molekulách optického materiálu OV – prevádzka na troch vlnových dĺžkach (850, 1310 a 1550 nm)
- **nevlastnou absorpciou:** straty optického výkonu na nečistotách (molekuly kovov, ióny  $\text{OH}^-$  (OV na báze  $\text{SiO}_2$ ), resp.  $\text{CH}^-$  (POF))
- **lineárny rozptyl:** materiál jadra a plášťa OV nie je ideálne homogénny
  - je to hlavná zložka útlmu OV
  - jeho veľkosť rastie so štvrtou mocninou pracovnej vlnovej dĺžky
- **nelineárny rozptyl:** dochádza ku zmene vlnovej dĺžky a z hľadiska spracovania vlnovej dĺžky je táto časť energie stratená
- **straty mikroohybmi:** (rádovo mm a menšie) sú kritické pre SM OV
- **straty makroohybmi:** (rádovo desiatky mm) vznikajú pri manipulácii s OV

**Materiálová absorpcia** predstavuje straty, ktoré súvisia s materiálom, z ktorého je vyrobené OV a s procesom jeho výroby.

**Znižuje optický výkon vplyvom premeny na teplo**

- **vlastná absorpcia:** je spôsobená interakciou svetla prechádzajúceho optickým materiálom a základnými stavebnými prvkami (atómami) optického materiálu (OV)
  - je to absorpcia v **infračervenej oblasti**
    - je to spôsobené **kmitaním celých molekulových útvarov**
    - s touto absorpciou **sa dá čiastočne** pracovať, pretože ak sú molekulové útvary ťažšie, svetlo ich nerozkmitá a to sa práve využíva k posunutiu IR absorpcie k nižším vlnovým dĺžkam
    - musí sa síce opustiť veľmi dobrý materiál  $\text{SiO}_2$ , ale u nových materiálov je absorpcia zase o niečo nižšia
  - absorpcia v **ultrafialovej oblasti**
    - je to spôsobené **absorpciou s valenčnými elektrónmi** a z technologického hľadiska je to zatiaľ **neodstrániteľný problém**
  - absorpcia **vlastným materiálom** (napr.  $\text{SiO}_2$ )
    - absorpcie materiálom  $\text{SiO}_2$  sú veľmi malé (závisia od vlnovej dĺžky)

- **nevlastná absorpcia:** je spôsobená prímiesami, ktoré sa dostali do materiálu na výrobu OV. Najväčší vplyv na absorpciu majú ióny vody  $\text{OH}^-$  (**hydroxilové skupiny**)
  - priebeh tlmenia iónov  $\text{OH}^-$  má dva základné vibračné módy
    - na  $2.7\mu\text{m}$
    - na  $4.2\mu\text{m}$
    - od týchto základných módov vznikajú ďalšie harmonické
      - na  $1.38\mu\text{m}$ ,  $0.95\mu\text{m}$  a na  $0.72\mu\text{m}$
      - a ich kombinačné zložky  $1.24\mu\text{m}$ ,  $1.13\mu\text{m}$  a  $0.88\mu\text{m}$
  - prímiesi iónov  $\text{OH}^-$  v skle vytvárajú mikrotrhlky, vďaka ktorým sú sklenené OV náchylné na praskanie
  - ďalšie prímiesi, ktoré zvyšujú tlmenie OV sú ióny kovov (pomer  $1:10^9$ )

| Ióny             | Vlnová dĺžka absorpcie (nm) | Tlmenie (dB/km) |
|------------------|-----------------------------|-----------------|
| $\text{Cr}^{3+}$ | 625                         | 1.6             |
| $\text{C}^{2+}$  | 685                         | 0.1             |
| $\text{Cu}^{2+}$ | 850                         | 1.1             |
| $\text{Fe}^{2+}$ | 1100                        | 0.68            |
| $\text{Fe}^{3+}$ | 400                         | 0.15            |
| $\text{Ni}^{2+}$ | 650                         | 0.1             |
| $\text{Mn}^{3+}$ | 460                         | 0.2             |
| $\text{V}^{4+}$  | 725                         | 2.7             |

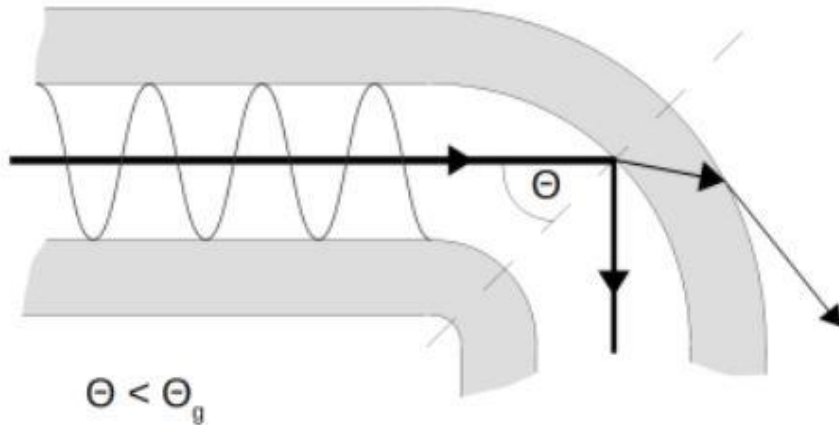
**Materiálový rozptyl** predstavuje straty, ktoré súvisia s prechádzajúcim svetelným lúčom (signálom) v jadre OV

- **lineárny rozptyl:** má za dôsledok lineárny prechod časti optického výkonu obsiahnutého v jednom vide do vidu nového (druhého)
  - **Rayleighov rozptyl** je dominujúci v optických prenosových oknách (Je priamo úmerný 8 mocnине indexu lomu  $n_1$  a klesá so 4 mocninou vlnovej dĺžky  $\lambda$ )
    - vzniká **tepelnými kmitmi** kryštalickej mriežky materiálu OV
    - je dôsledkom **malých náhodných nehomogenít** atómovej štruktúry OV (v porovnaní s vlnovou dĺžkou použitého prenášaného optického signálu)
    - tento **jav sa nedá odstrániť** ani podchladením OV na absolútnu nulu!!!
      - pri abs. „0“ dôjde k „zamrznutiu“ jednotlivých pozícií atómov v kryštalickej mriežke, ale svetlo sa potom okolo týchto útvarov ohýba a vznikajú straty rozptylom
    - dajú sa **čiastočne eliminovať** posunutím pracovnej frekvencie do IR oblasti
  - **Mieho rozptyl** vzniká na nehomogenitách veľkosťou porovnateľných s  $\lambda$ 
    - **je spôsobený** nedokonalosťou valcovitej štruktúry vlnovodu, kolísaním priemeru jadra OV, napätím v OV, mikroskopickými bublinami a ďalšími aspektmi porovnateľnými s vlnovou dĺžkou
    - rozptyl sa zvyšuje významne pokiaľ geometrické nepravidelnosti **prekročia  $1/10 \lambda$**
    - **dá sa čiastočne eliminovať**
      - zdokonalením výrobného procesu OV
      - odstránením nerovnomerností pri výrobe (ťahaní OV), atď.

- **nelineárny rozptyl:** je to interakcia prechádzajúceho svetla s molekulami materiálu OV
  - **Ramanov rozptyl** je spôsobený interakciou svetelnej vlny s kmitmi molekúl svetlovodného materiálu (OV)
    - rozptýlená svetelná vlna sa šíri oboma smermi
    - frekvenčný posun je taktiež v oboch (dopredu aj dozadu) smeroch
  - **Brillouinov rozptyl** je spôsobený interakciou akustických vln v svetlovode (jadre OV) a svetelnej vlny o nadkritickom výkone
    - frekvenčný posun je v oboch (dopredu aj dozadu) smeroch
  - **stimulovaný rozptyl** je jav, pri ktorom dochádza k rozptylu svetelnej vlny v dôsledku zrážok s tepelne kmitajúcimi atómami materiálu OV
    - frekvenčný posun je v do-prednom smere
  - **štvorvlnové zmiešavanie** je jav, pri ktorom interakciou dvoch a viacerých signálov rôznych vlnových dĺžok, vznikajú signály s novými vlnovými dĺžkami

**Straty ohybom** predstavuje straty, ktoré súvisia s prechádzajúcim svetelným lúčom (signálom) v jadre OV

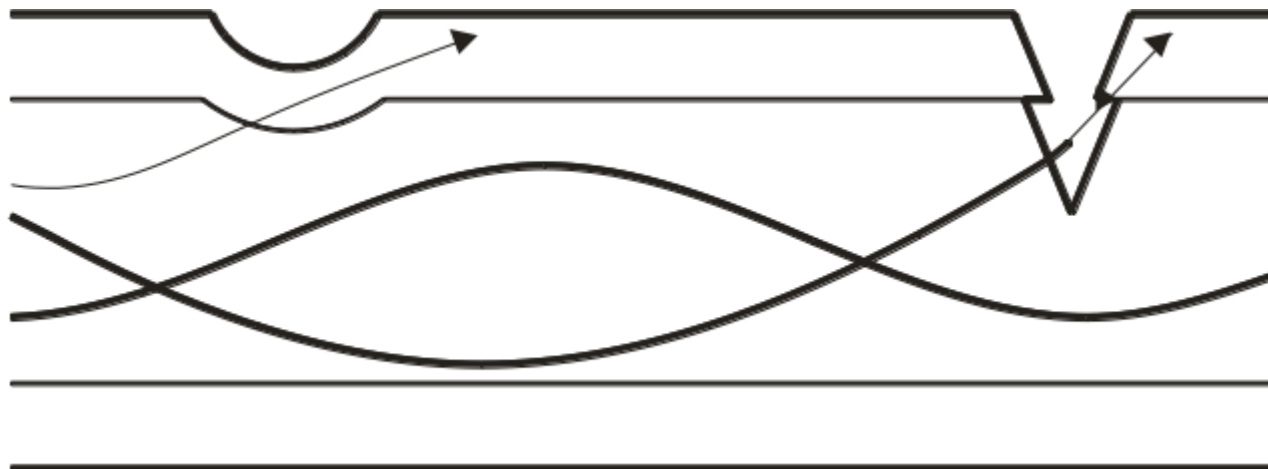
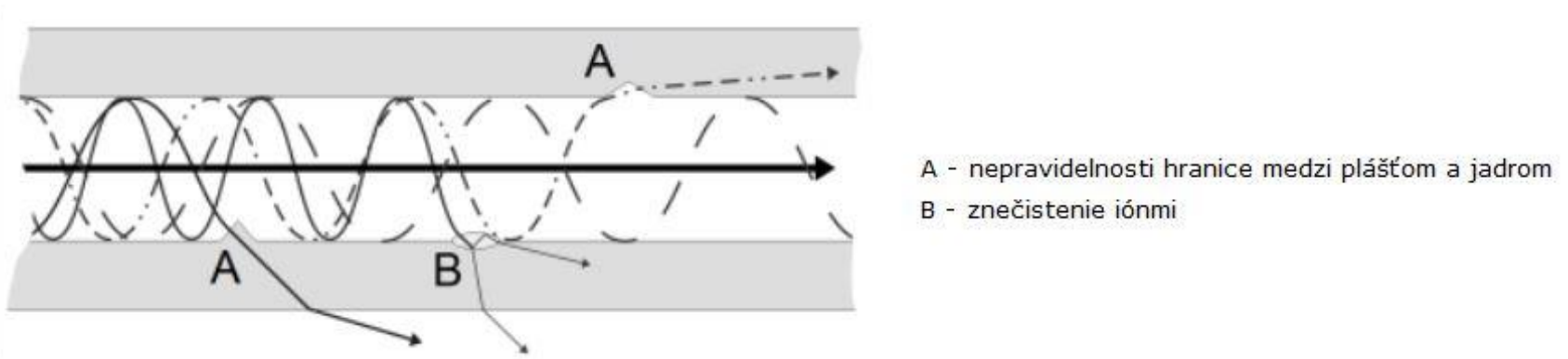
- **makroohyby**: časť vidu (lúča), ktorá sa nachádza na **vonkajšej strane** ohybu OV by sa musela šíriť **väčšou rýchlosťou** ako je rýchlosť svetla v danom prostredí, aby bola splnená podmienka kolmosti vlnoplochy ku smeru šírenia
  - toto nie je možné a časť energie je teda z vlákna vyviazaná (vyžiarená) von
  - **kritický polomer pri montáži!!!!**



$\theta$  - uhol dopadu čela svetelnej vlny na hranici jadro-plášť v ohybe optického vlákna

$\theta_g$  - hraničný uhol pre celkový vnútorný odraz

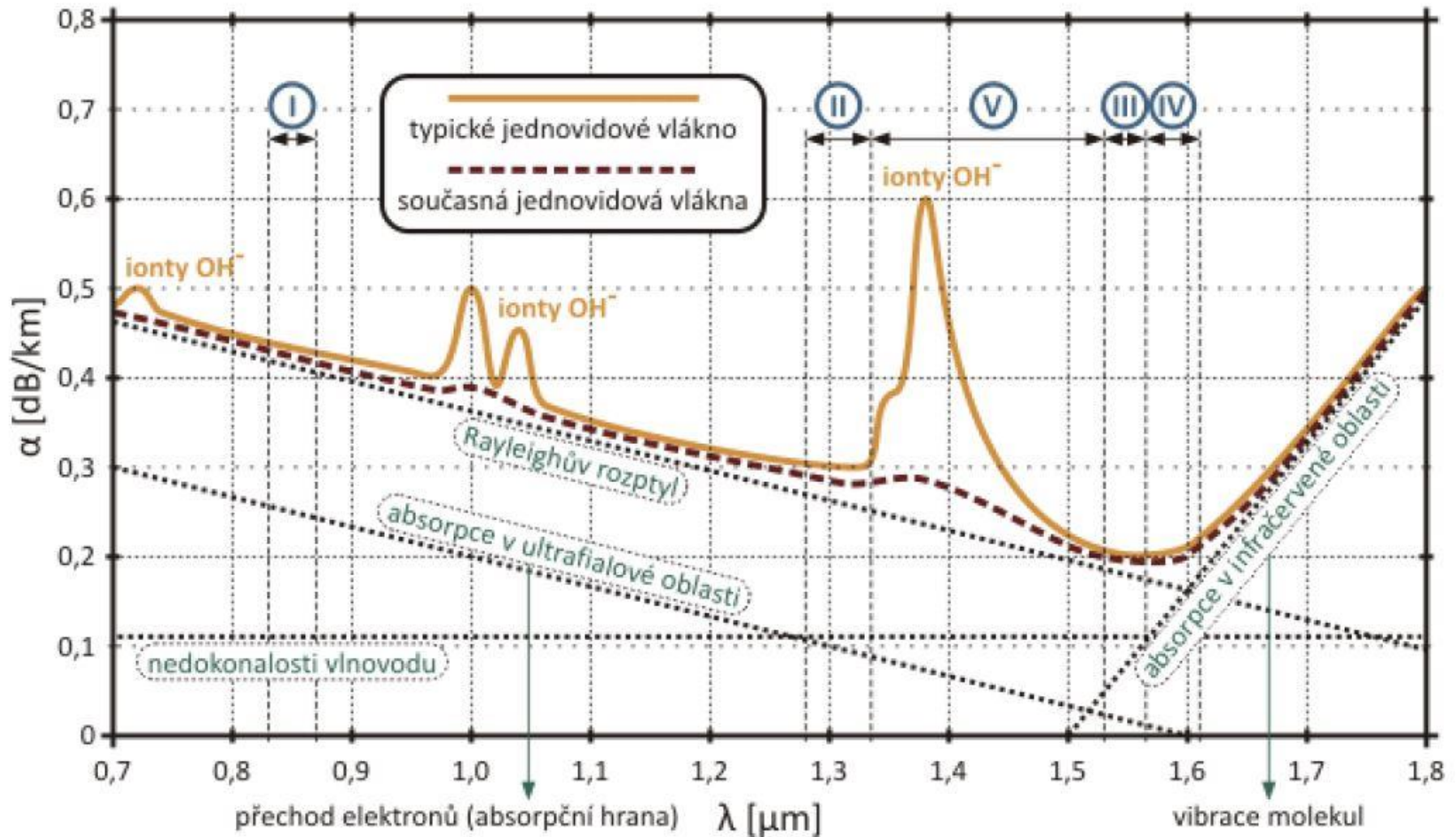
- **mikroohyby**: sú spôsobené existenciou drobných nedokonalostí povrchu OV, ktoré vznikajú napr. **pri výrobnom procese**
  - tieto straty (útlm, tlmenie) sú **závislé na vlnovej dĺžke svetla** a platí, že čím väčšia je  $\lambda$  tým väčšie sú straty
  - veľmi ťažko sa takéto tlmenie počíta, väčšinou sa určuje experimentálne





# Útlm optických vláken

## ■ spektrální závislost tlmenia optických vláken



Pri prenose signálu OV sa využíva niekoľko prenosových „okien“

■ **I. okno (okolo 850nm):**

- útlmová charakteristika je tu veľmi klesajúca a dosahované hodnoty merného tlmenia sú, pre využitie hlavne pre diaľkové prenosy, príliš vysoké
- ako zdroje optického signálu sa väčšinou používajú LEDky

■ **II. okno (1280 až 1335nm):**

- prenosové okno využiteľné pre SI SM vlákna (9/125 $\mu$ m)
- dosahované hodnoty merného útlmu sú pod hodnotami 0.35dB/km, a preto je to okno vhodné pre stredne dlhé prenosy (do cca 60km)

■ **III. okno (1530 až 1565nm):**

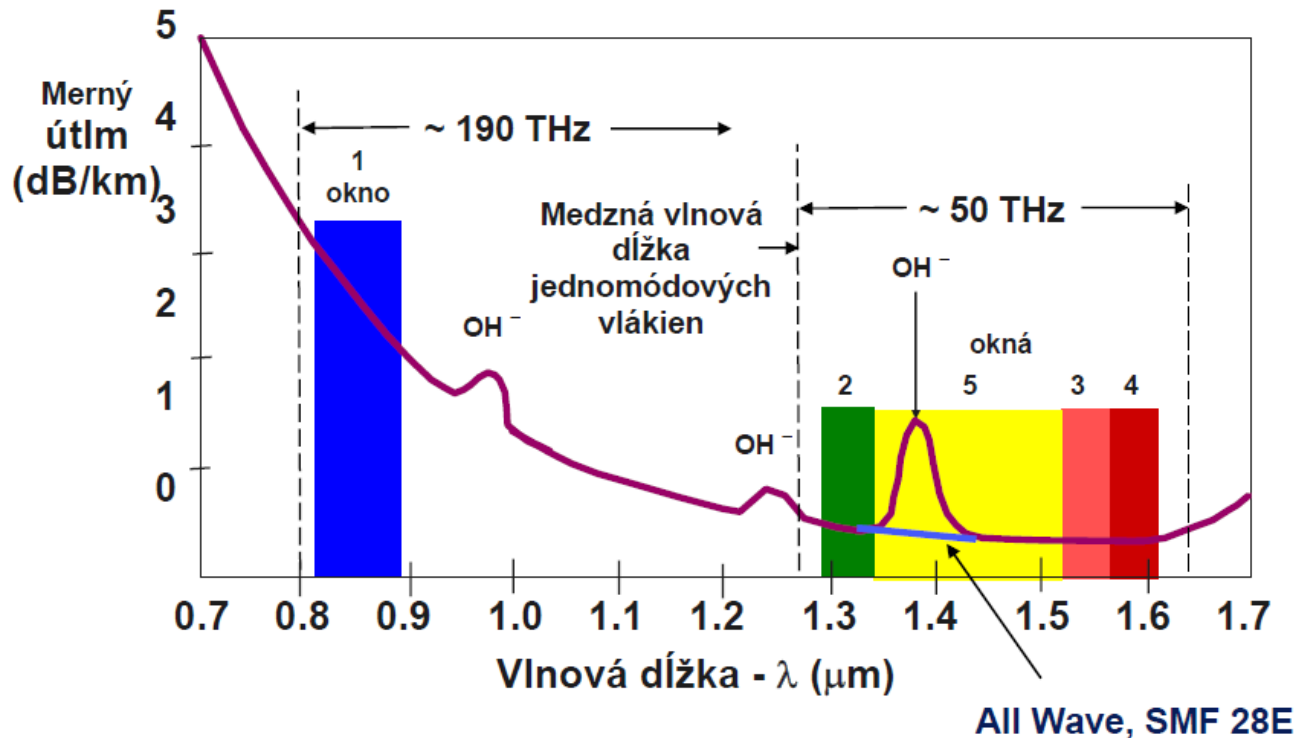
- v tomto okne je pre kremíkové SI SM vlákna minimum vloženého tlmenia (cca 0.2dB/km)
- použiteľné pre diaľkové prenosy (SI SM, LD) nad 60km

■ **IV. okno (1565 až 1610nm):**

- okno sa nachádza za absolútnym minimom merného tlmenia, ale hodnoty tlmenia sa od III. okna príliš nelíšia
- využitím WDM systémov sa dá pre diaľkové prenosy zdvojnásobiť prenosová kapacita kanála (systému)

## ■ V. okno (1335 až 1530nm):

- pre prenosy s OV u ktorých bola zvládnutá výroba OV **eliminujúcich prímеси OH<sup>-</sup> iónov** natoľko, že sa stráca hlavné lokálne maximum na vlnovej dĺžke 1380nm
- spojené prenosové okná **III. až V.** potom tvoria súvislý prenosový kanál o **šírke pásma 50THz**



# Disperzia optických vlákien

Disperzia optických vlákien - dochádza k deformácii tvaru impulzu

Vstupný impulz



Optické vlákno

Disperzné  
prostredie

Skreslený výstup



Vstupný impulz



Optické vlákno

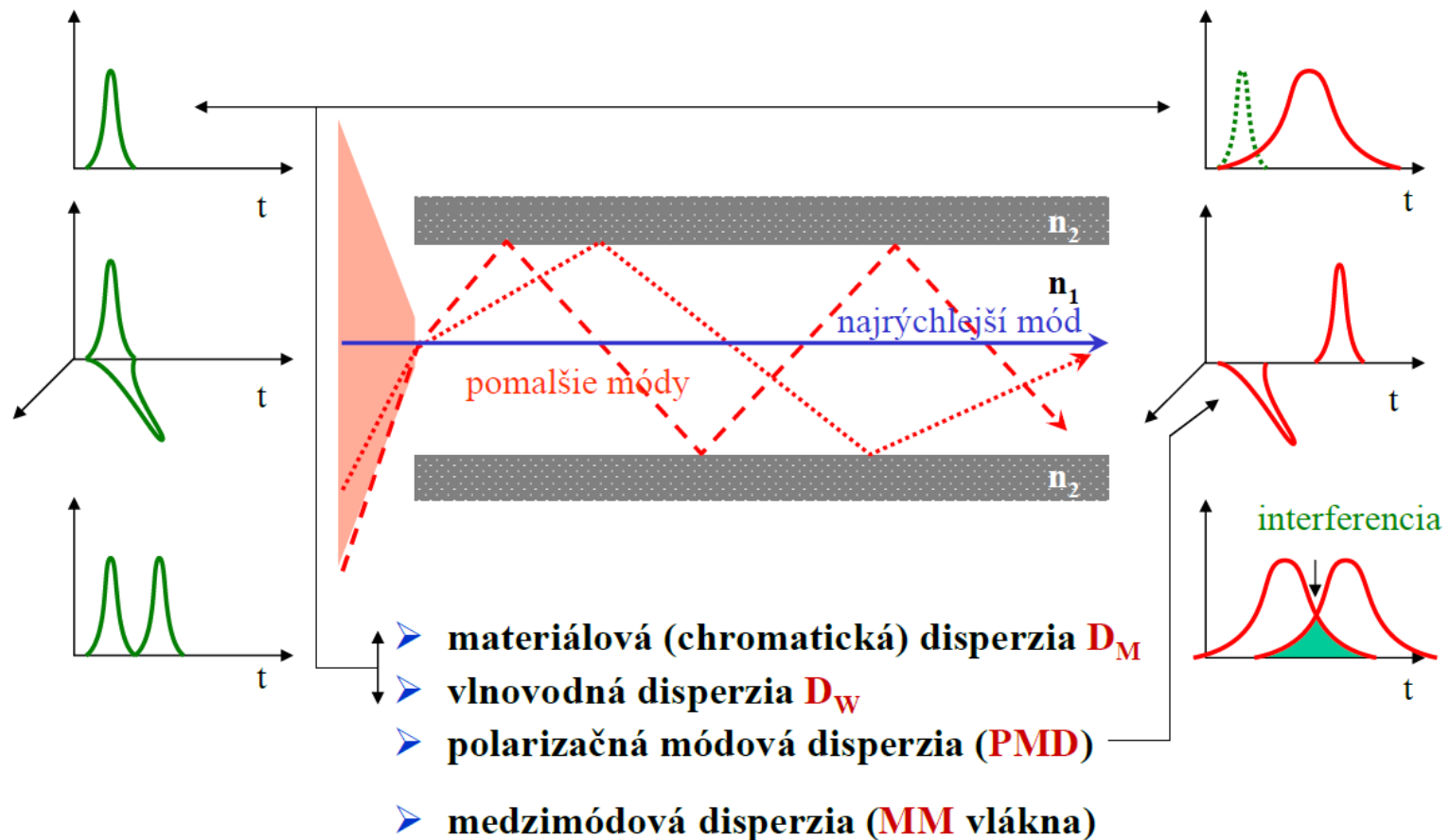
Disperzné  
prostredie

Skreslený výstup

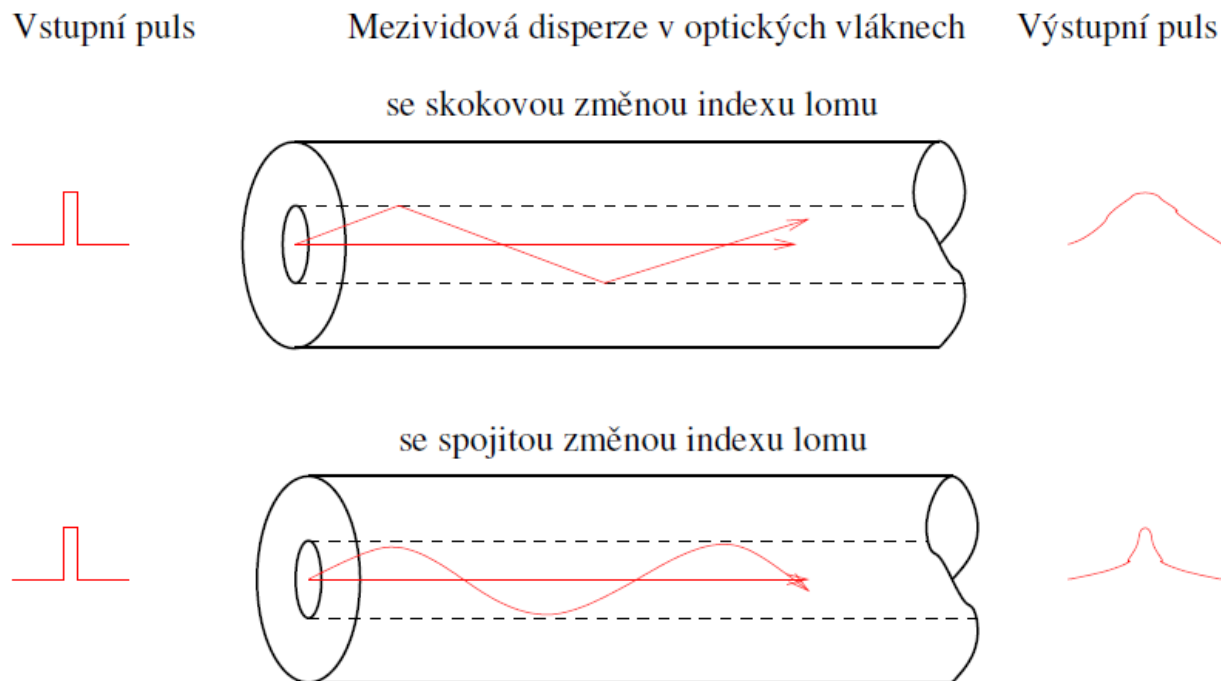


- typy disperzie:
  - medzividová (medzimódová) disperzia (dominuje hlavne v MM vláknach)
  - vnútrovidová (vnútromódová) disperzia
    - materiálová disperzia (prejavuje sa najvýznamnejšie) (chromatická)
    - vlnovodná disperzia (zanedbateľná voči materiálnej disperzii)
    - profilová disperzia (je pomerne malá a zanedbateľná)
  - polarizačná módová (vidová) disperzia (prejavuje sa pri veľkých prenosových rýchlostiach)
  
- disperzia je jav, pri ktorom sa najviac ovplyvňujú prenosové vlastnosti OV (max. dosiahnuteľnú prenosovú rýchlosť)

- **disperzia** má za následok **rozširovanie impulzov** prechodom cez OV
  - **zmenšuje sa** jeho **veľkosť** (amplitúda) a **zväčšuje sa** jeho **šírka**
  - tento jav sa volá **medzisymbolová interferencia**
    - môže dôjsť k prekrytiu impulzov, t.j. nadajú sa správne interpretovať log „0“ a log „1“



# MEDZIVIDOVÁ DISPERZIA MNOHOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKIEN



- šířka impulzov  $\Delta\tau$  a šířka prenášaného pásma  $B$  pre SI MM vlákna

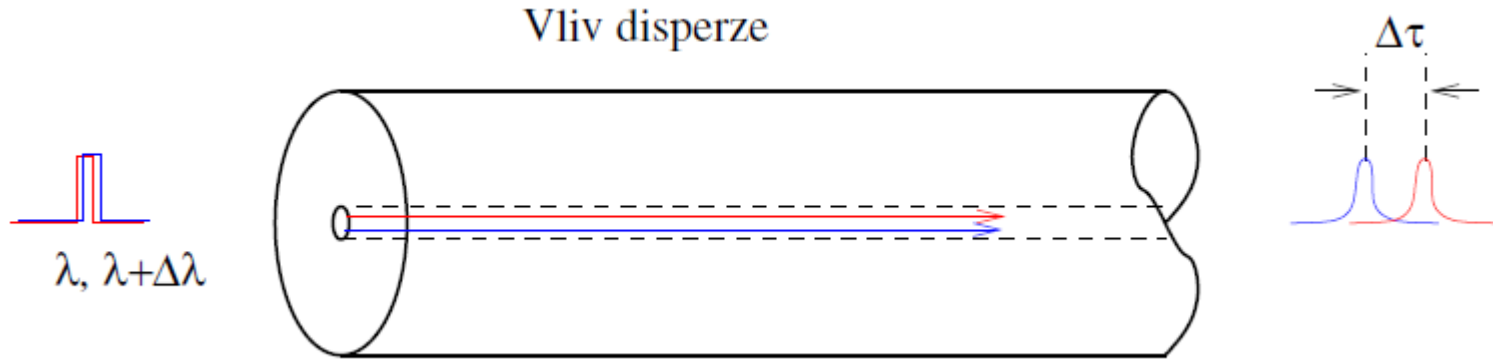
$$\Delta\tau \approx 50 \text{ nskm}^{-1} \rightarrow B \sim \frac{1}{\Delta\tau} = 20 \text{ MHzkm}$$

- šířka impulzov  $\Delta\tau$  a šířka prenášaného pásma  $B$  pre GI MM vlákna

$$\Delta\tau \approx 500 \text{ pskm}^{-1} \rightarrow B \sim \frac{1}{\Delta\tau} = 2 \text{ GHzkm}$$



# DISPERZIA JEDNOVIDOVÝCH OPTICKÝCH VLÁKIEN



- šírka impulzov  $\Delta\tau$  a šírka prenášaného pásma  $B$  pre SI MM vlákna

$$D = \frac{1}{\alpha} \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} = \frac{1}{c} \frac{\Delta N}{\Delta\lambda} \text{ [pskm}^{-1}\text{nm}^{-1}\text{]}$$

$N = n - \lambda \frac{dn}{d\lambda}$  je skupinový index lomu

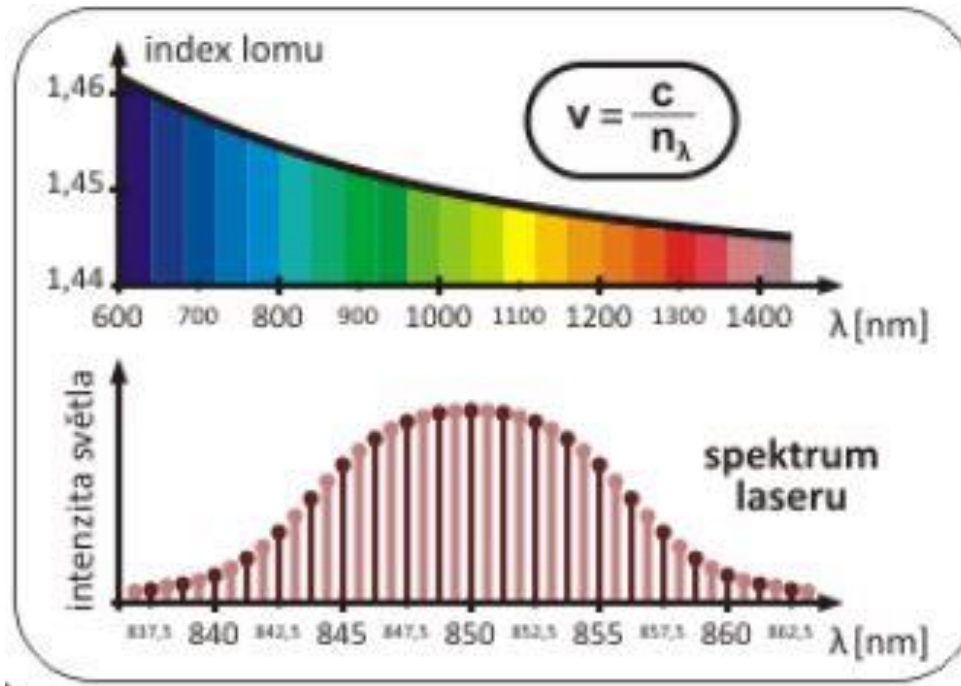
- čistý  $\text{SiO}_2$

| Vlnová dĺžka<br>$\lambda(\mu\text{m})$ | Index lomu | Skupinový<br>index lomu | Disperzia<br>( $\text{pskm}^{-1}\text{nm}^{-1}$ ) |
|--|------------|-------------------------|---|
| 0,850                                  | 1,45250    | 1,46572                 | -84   |
| 1,310                                  | 1,44680    | 1,46164                 | 4   |
| 1,550                                  | 1,44402    | 1,46260                 | 22  |

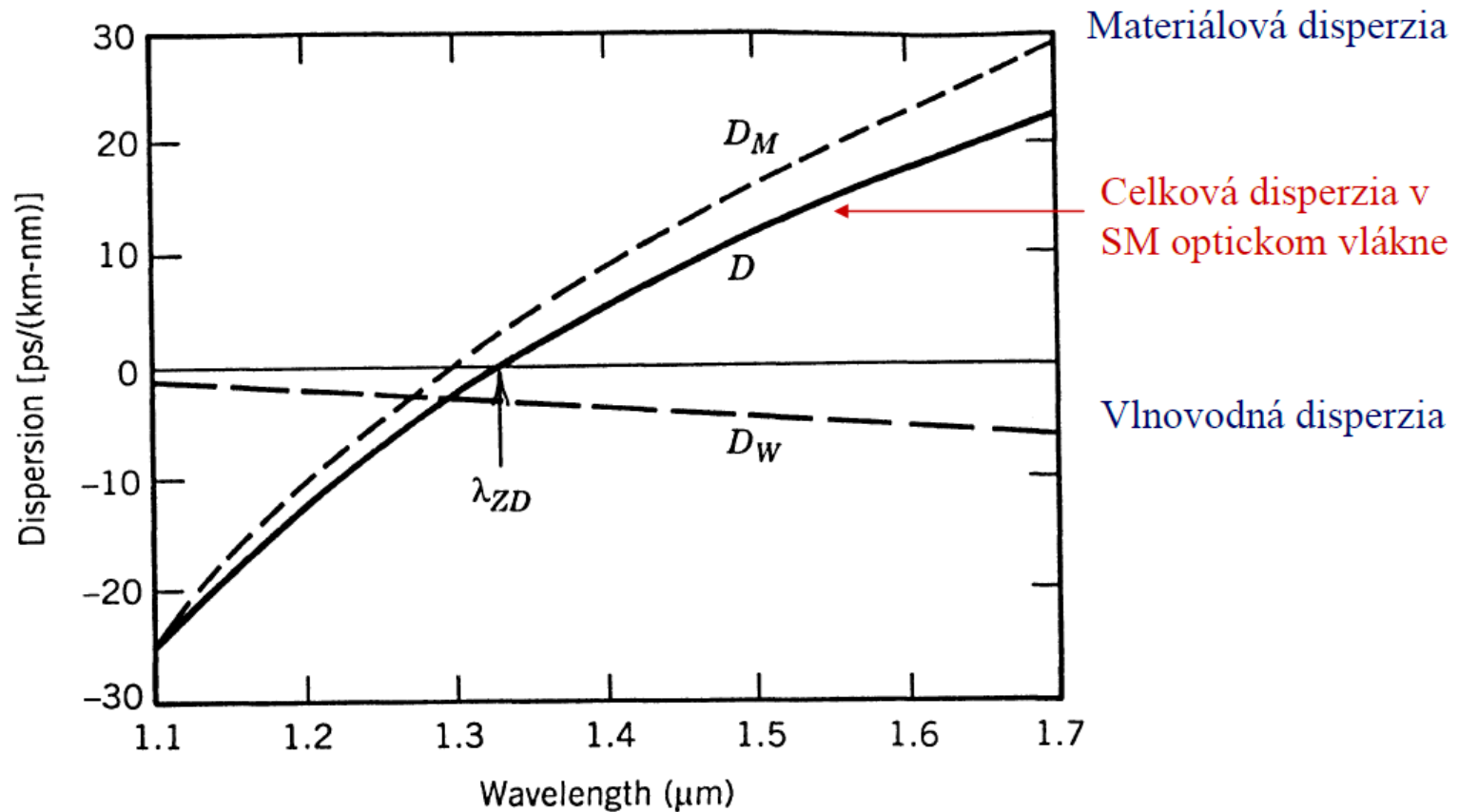


**Materiálová disperzia** je zapríčinená tým, že prenášaný svetelný lúč je zložený z veľkého počtu rôznych vlnových dĺžok a tieto jednotlivé vlnové dĺžky (čiastkové zložky) sa **šíria rôznou rýchlosťou**

- **na konci OV** sa jednotlivé zložky spektra **skladajú s časovými rozdielmi**, tzn. s **iným časovým priebehom** ako na jeho **začiatku**

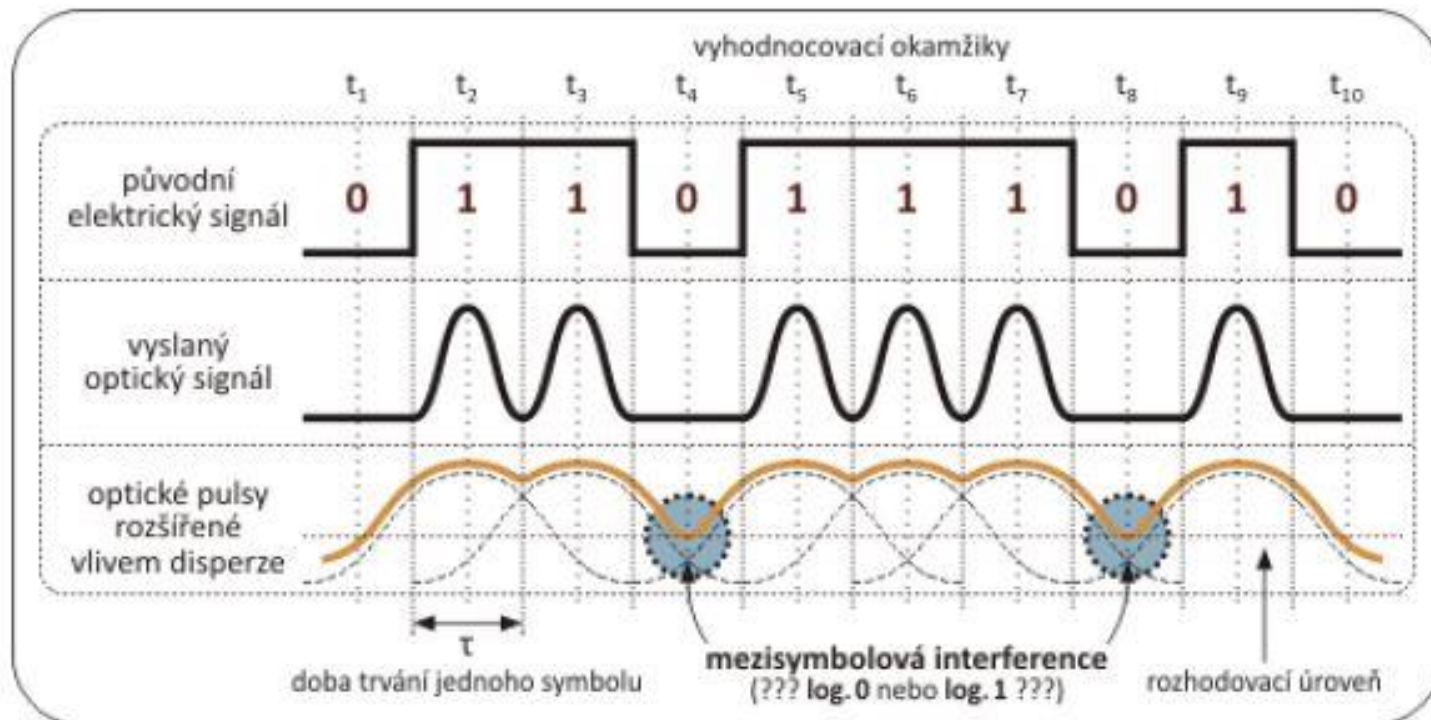


## ■ spektrálna závislosť disperzie v SM vlákne



- **minimum súhrnnej disperzie** je na inej vlnovej dĺžke (**1310 nm**) ako je **minimum útlmu (1550 nm)!!!**

- všeobecne sa dá povedať, že **čím je kratšia vlnová dĺžka tým pomalšie sa lúč šíri**
- nenulová šírka spektra je typická vlastnosť optických signálov
  - postranné spektrálne čiary laserov (PD) majú pôvod vo fyzikálnej podstate činnosti lasera



**Vlnodová disperzia** vzniká v dôsledku zmeny tvaru vidu v závislosti od vlnovej dĺžky

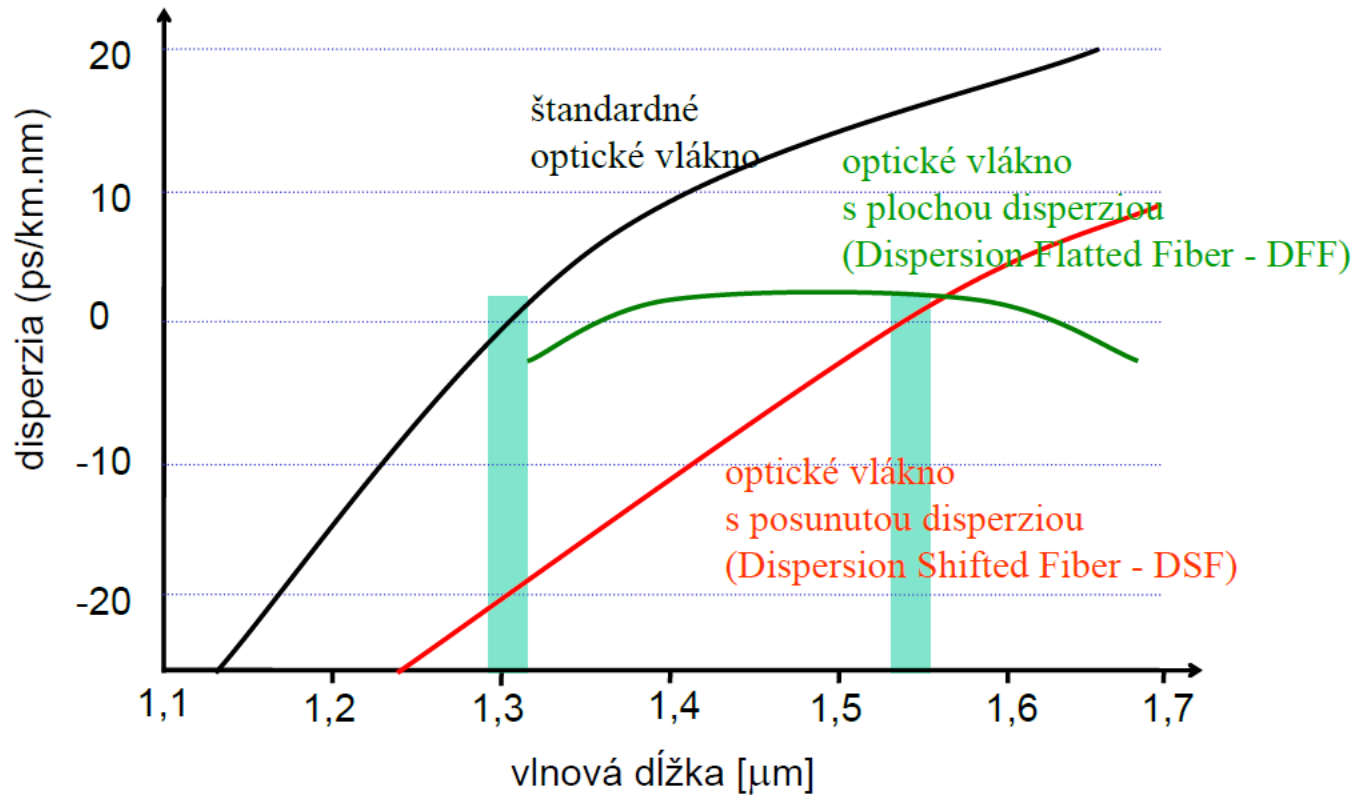
- **zanedbateľná u MM** vlákien ale **podstatná u SM** vlákien
- tento parameter je **vždy záporný** a umožňuje nám teda kompenzovať materiálovú disperziu, pretože **celková disperzia je súčtom** **materiálovej, vlnodovej a profilovej disperzie**

**Profilová disperzia** je **závislosť relatívneho** (pomerného) **rozdielu indexov lomu** jadra a plášťa OV **od vlnovej dĺžky**

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$$

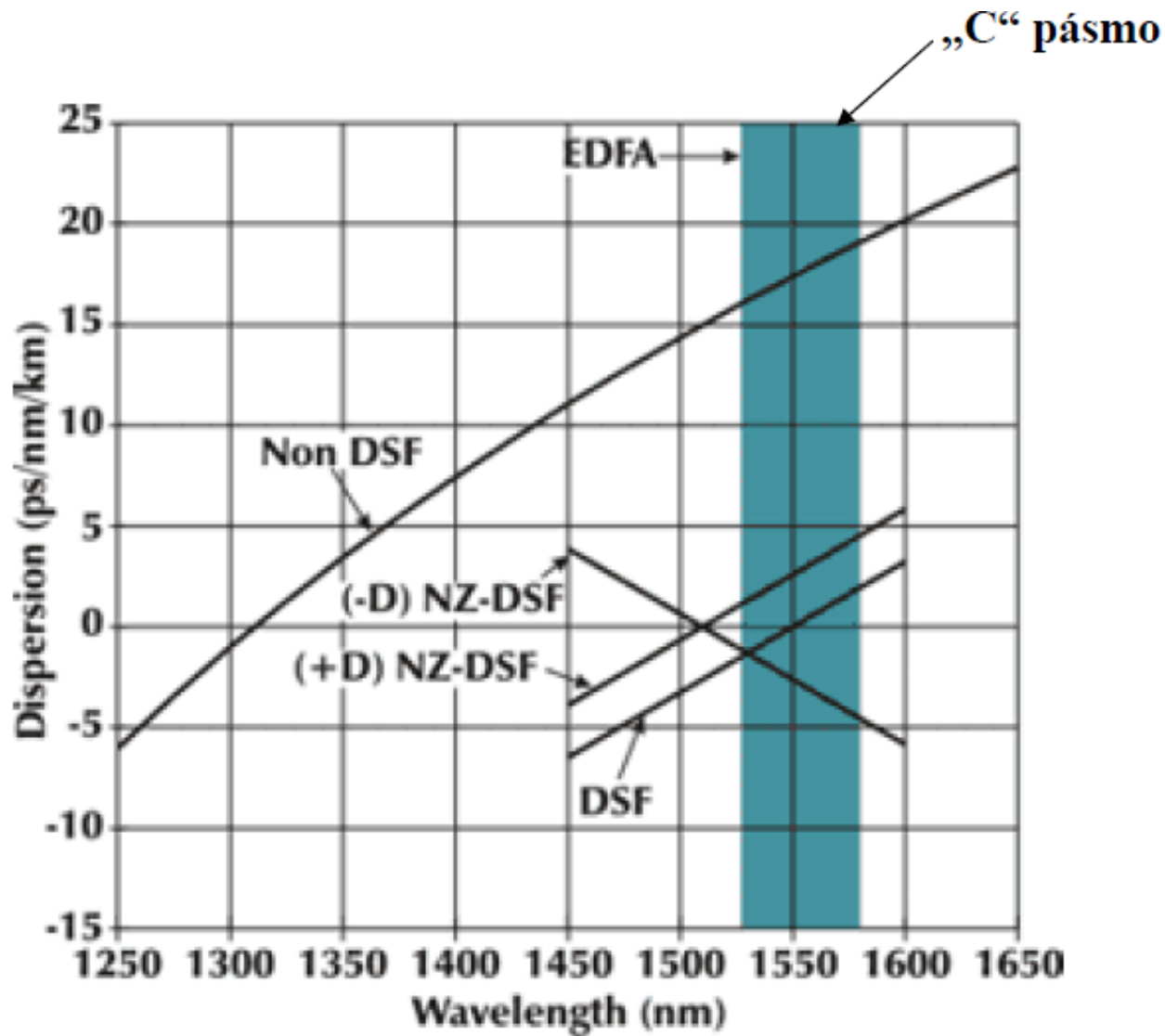
- je pomerne malá a zanedbateľná

■ spektrálna závislosť SM vlákna s upravenou disperziou

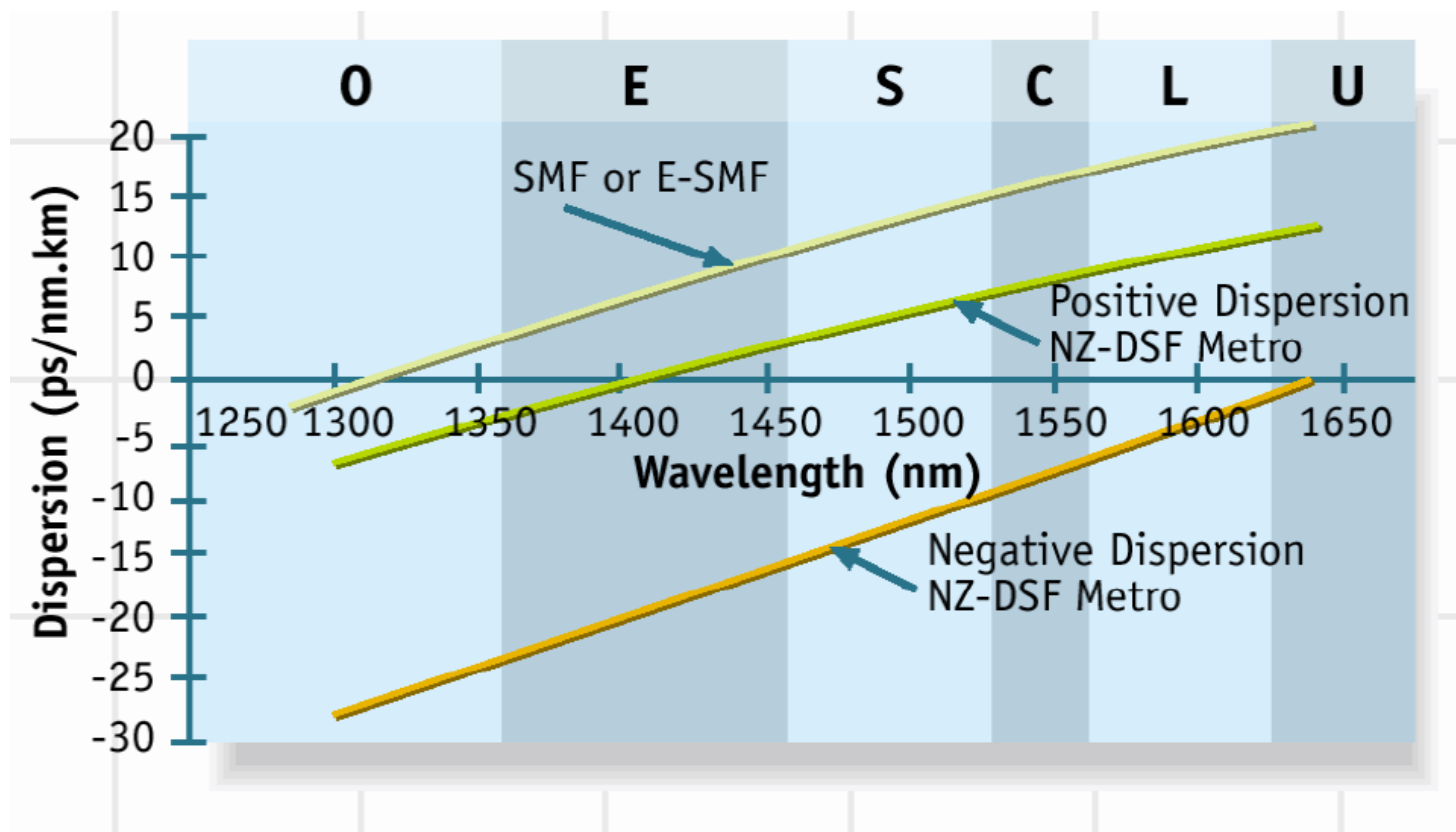


| SDH     | Pren. rýchlosť<br>(Gbits <sup>-1</sup> ) | Bit. interval<br>(ps) | Max. disperzia<br>(pskm <sup>-1</sup> nm <sup>-1</sup> ) | Prekl. vzdialenosť<br>(km) |
|---------|--|-----------------------|--|----------------------------|
| STM-6   | 2,5                                      | 400                   | 40   | 400                        |
| STM-64  | 10                                       | 100                   | 10   | 25                         |
| STM-256 | 40                                       | 25                    | 2,5  | 1,5                        |

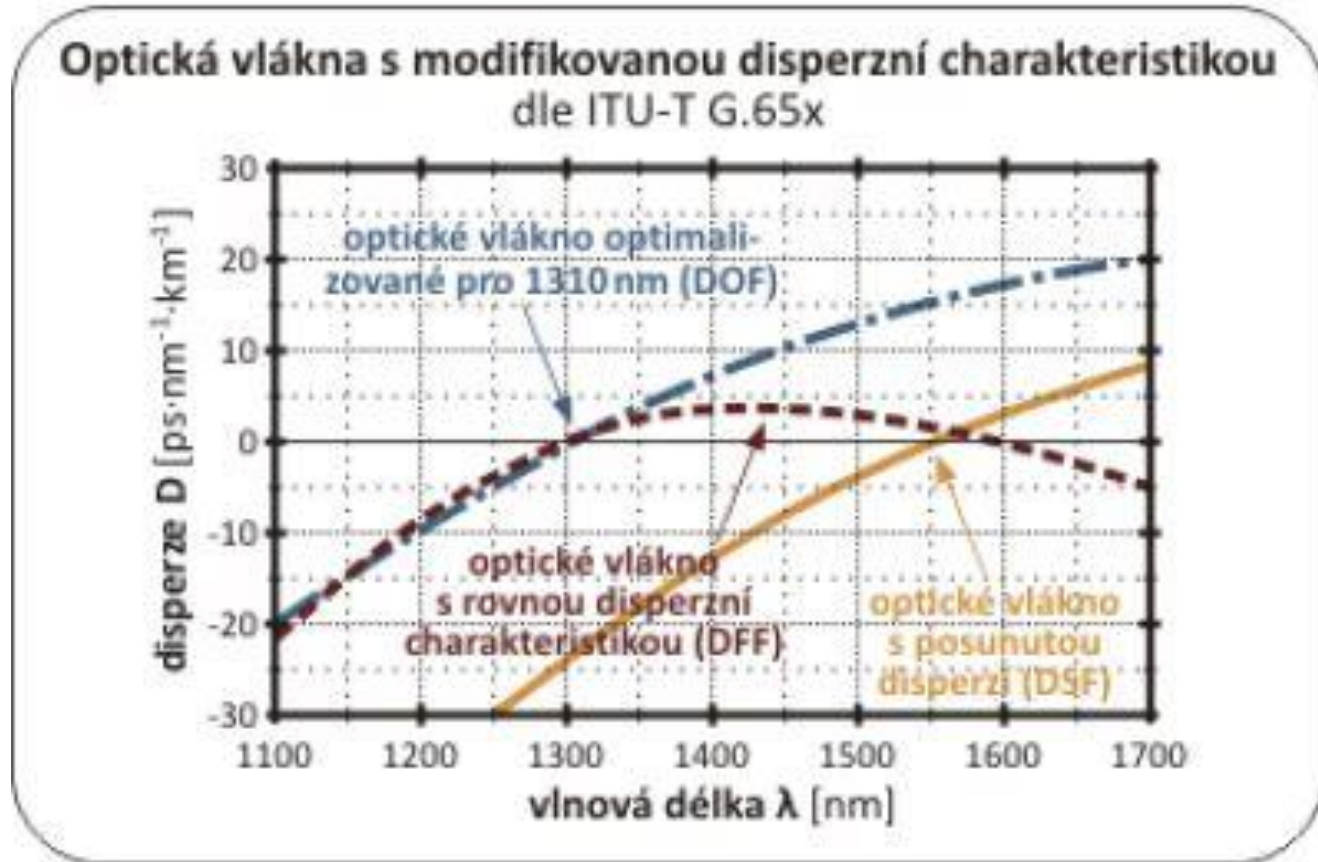
Obr. Disperzia v disperzne posunutých jednovídrových optických vláknach (DSF)



Obr. Disperzia v disperzne posunutých jednovidových optických vláknach (DSF)

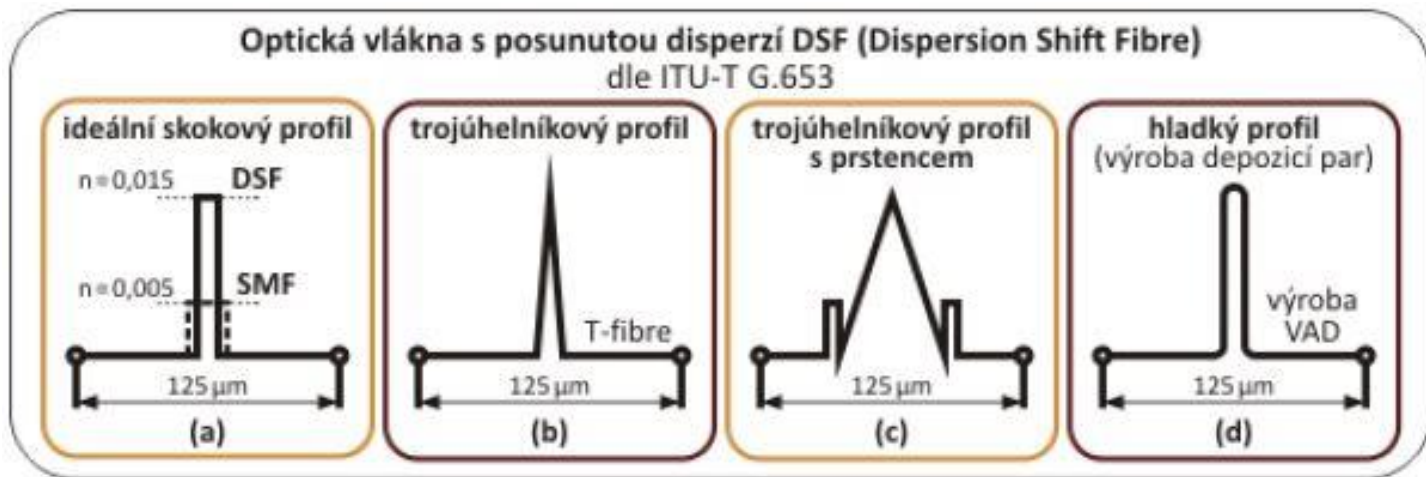


Obr. OV s modifikovanou disperznou charakteristikou podľa normy ITU-T G.65x

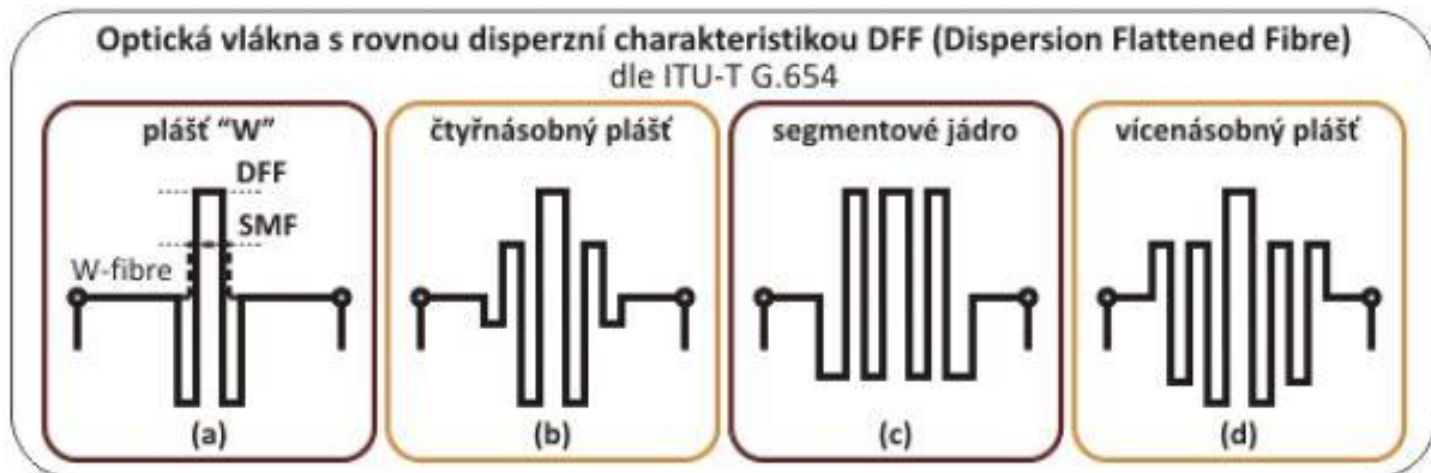




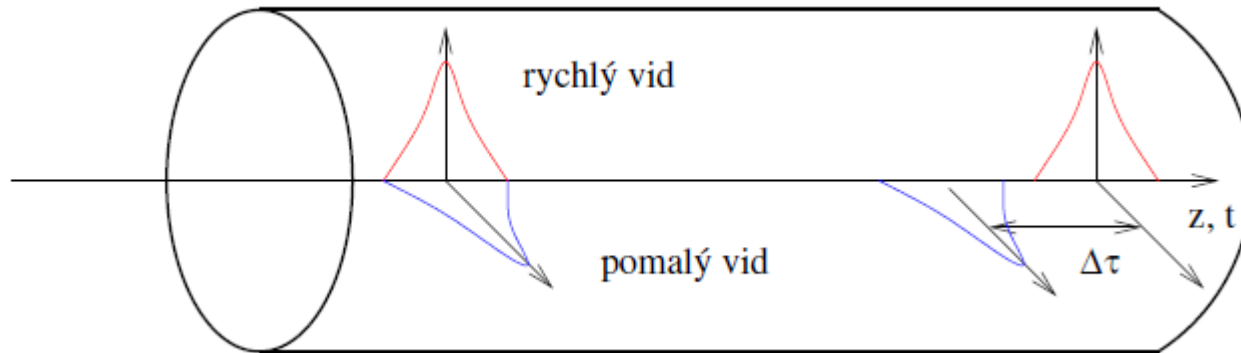
## Obr. OV s posunutou disperziou (DSF) podľa ITU-T G.653



## Obr. OV s rovnou (plochou) disperznou charakteristikou (DFF) podľa ITU-T G.654



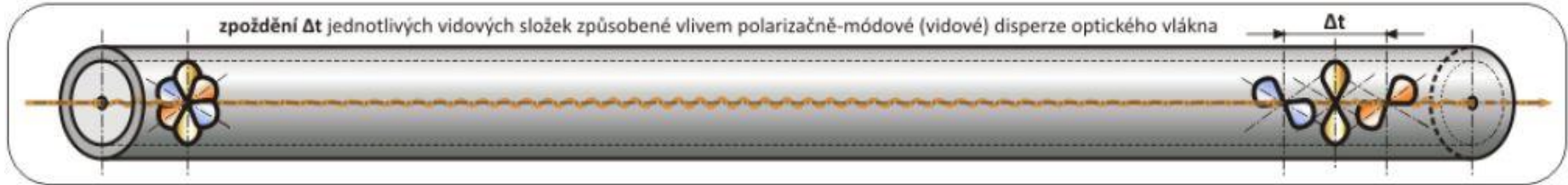
**Polarizačná vidová (módová) disperzia (PMD)** sa prejavuje rôznou rýchlosťou šírenia, jednotlivých vidových zložiek prenášaného optického signálu



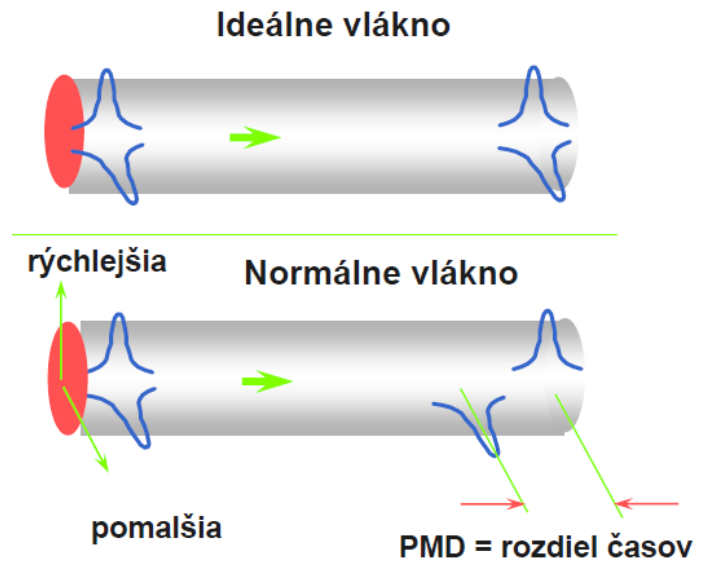
Optické vlákno



- príčinou vzniku PMD je **anizotropia**
  - to je **rôznosť indexu lomu** v osiach  $x$  a  $y$  priečnych ku smeru šírenia
- **PMD** tvorí hranicu prenosových vlastností OV, pretože **sa zatiaľ nedá potlačiť**
  - dá sa však **čiastočne eliminovať** zavedením špeciálnych OV, ktoré sú priestorovo (geometricky) orientované



■ Polarizačná vidová disperzia (PMD)



■ Príklad: 400 km optického vlákna

| SDH     | Pren. rýchlosť<br>(Gbits <sup>-1</sup> ) | Max. PMD<br>(ps) | Koeficient PMD<br>(pskm <sup>-1/2</sup> ) |
|---------|--|------------------|---|
| STM-6   | 2,5                                      | 40               | 2   |
| STM-64  | 10                                       | 10               | 0,5                                       |
| STM-256 | 40                                       | 2,5              | 0,125                                     |

■ Príklad: 40 Gbits<sup>-1</sup> optický prenosový systém

| Koeficient PMD<br>(pskm <sup>-1/2</sup> ) | Prekl. vzdialenosť<br>(km) |
|---|----------------------------|
| 0,5                                       | 25                         |
| 0,1                                       | 620                        |
| 0,05                                      | 2 500                      |

# Šírka prenosového pásma

- s disperziou súvisí šírka prenosového pásma, disperzia rastie s dĺžkou vlákna priamo úmerne, takže **po trase sa šírka pásma znižuje**
  - napr.: nech má vlákno súčiniteľ šírky pásma 500MHz/km, na dĺžke trasy 10km je možné očakávať výslednú šírku pásma len 50 MHz

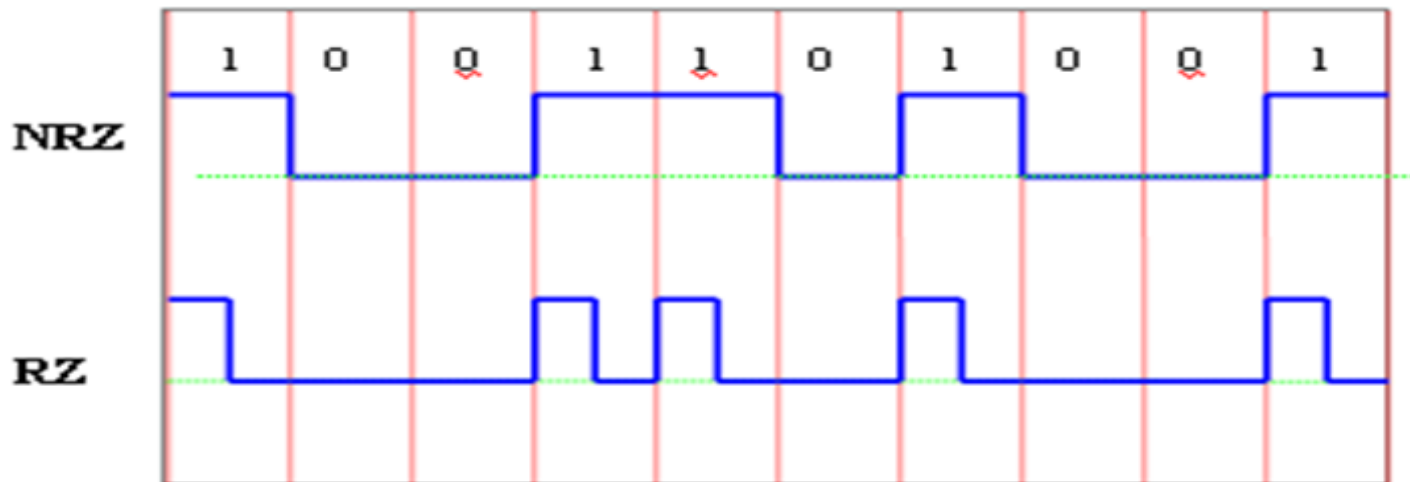
$$BW_{\text{opt}} = \frac{\text{Bandwidth*Length Product}}{\text{Length of fiber}}$$

$$BW_{\text{el}} = 0.707 \times BW_{\text{opt}}$$

- vstup: šírka pásma = 1000 MHz\*km, dĺžka opt. vlákna = 10km
- výstup:
  - optická šírka pásma = 100 MHz
  - elektrická šírka pásma = 70.7 MHz

## Prenosová rýchlosť

- pre kódy RZ je prenosová rýchlosť **rovná maximálnej frekvencii** na vedení
  - **optické komunikácie** pracujú s kódovaním RZ, preto sa dá **prenosová rýchlosť popísať priamo šírkou pásma**
- pre kódy NRZ je prenosová rýchlosť **2x väčšia** ako je **maximálna** možná **frekvencia** na vedení



## Šírka pásma

- **elektrická šírka pásma:** je taká veľká, kde pokles napätia je menší ako 3dB

$$-3dB = 20 \log(U_x)$$

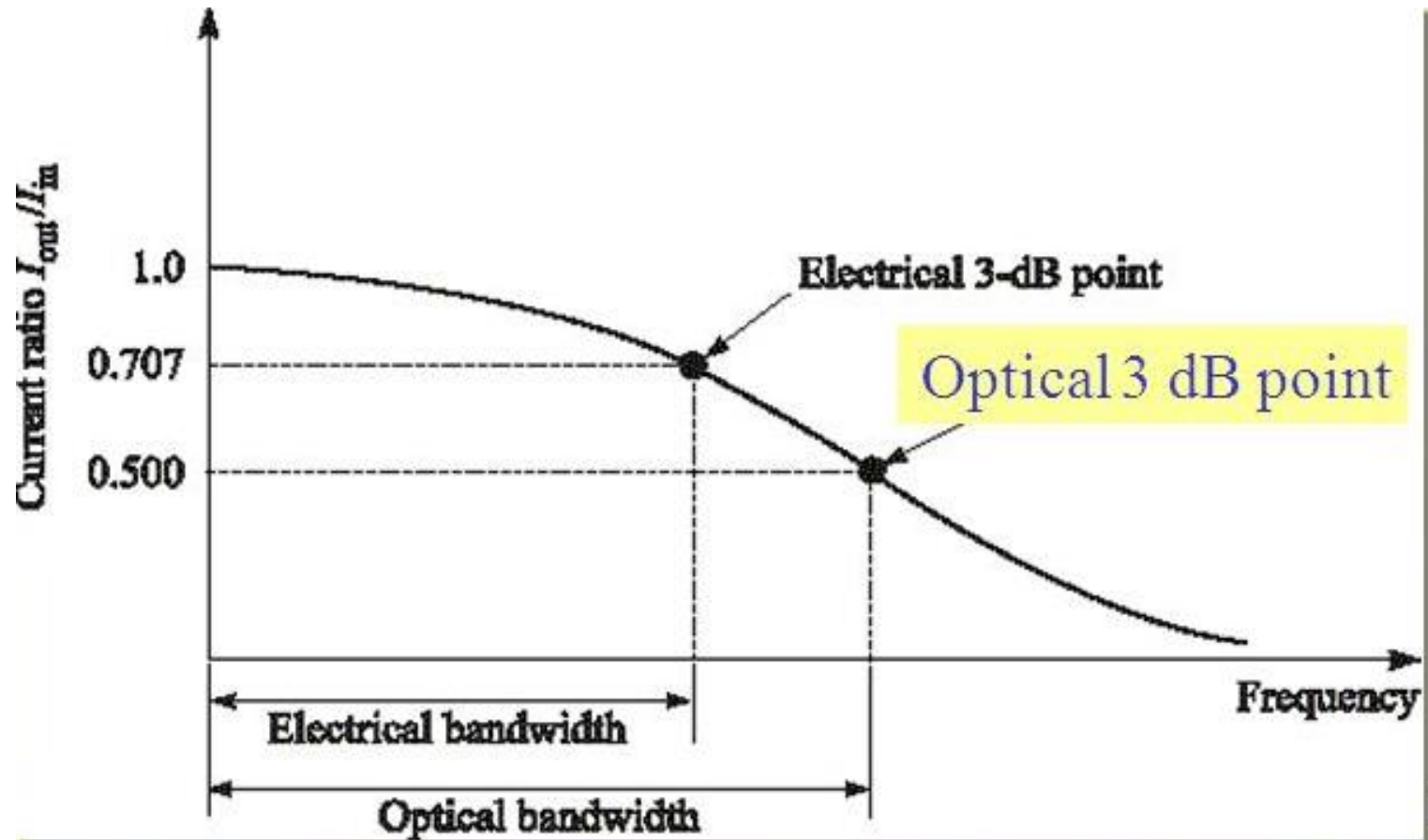
kde  $U_x$  je pomer výstupného napätia ku vstupnému a  $U_x = 0.7079458$

- **optická šírka pásma:** tu platí to isté, ale pretože sme vo výkonovej oblasti, tak 3dB sú polovica signálu

$$-3dB = 10 \log(P_x)$$

kde  $P_x$  je pomer výstupného výkonu ku vstupnému a  $P_x = 0.5011872$

Obr. Optická šířka pásma vs. elektrická šířka pásma





## Obr. Typické šírky prenášaného pásma v komunikačných optických vláknach SiO<sub>2</sub>

| Optické vlákno |     | Šírka pásma × dĺžka optického vlákna [MHz × km] |           |            |              |
|----------------|-----|---|-----------|------------|--------------|
| rozmery        | typ | 780nm   | 850nm     | 1300nm     | 1550nm       |
| 9/125μm        | SM  | ~2000   | ~2000     | ~20000     | 4000 ÷ 20000 |
| 50/125μm       | MM  | 150 ÷ 700                                       | 200 ÷ 800 | 400 ÷ 1500 | 300 ÷ 1500   |
| 62,5/125μm     | MM  | 100 ÷ 400                                       | 100 ÷ 400 | 200 ÷ 600  | 150 ÷ 500    |
| 100/140μm      | MM  | 100 ÷ 400                                       | 100 ÷ 400 | 100 ÷ 400  | 100 ÷ 300    |
| 110/125μm      | MM  |   | 17        |            |              |
| 200/230μm      | MM  |   | 17        |            |              |

| Fiber Type   | Bandwidth                                     |
|--------------|---|
| Single Mode  | 100 GHz-km                                    |
| Graded Index | 500 MHz-km at 1300 nm<br>160 MHz-km at 850 nm |
| Step Index   | 20 MHz-km                                     |

# Aplikačné parametre OV

## Jednovidové OV (SI SM)

- **merný útlm:** 0.35dB/km (1310nm), 0.2dB/km (1550nm)
- **šírka pásma:** pre 1310nm je omnoho viac ako 100GHz.km
- **použitie:** dlhé trasy, zdroj LD, vysoké prenosové rýchlosti

## Mnohovidové OV (SI MM)

- **merný útlm:** 2.6 až 50dB/km (850nm)
- **šírka pásma:** 6 až 50MHz.km
- **použitie:** krátke trasy (medzi budovami), zdroj LED, malá šírka pásma

## Mnohovidové OV (GI MM)

- **merný útlm:** 2 až 10dB/km (850nm), 0.5dB/km (1310nm), 0.25dB/km (1550nm)
- **šírka pásma:** 300MHz.km až 1.5GHz.km
- **použitie:** LAN siete

# Kontrolné otázky

- Čo definuje NA?
- Čo je akceptačný uhol OV?
- Čo je vid (mód)?
- Pomocou čoho sa stanovuje počet vedených vidov v OV?
- Aká je veľkosť normalizovanej (normovanej ) frekvencie pre jednovidový režim SM vlákna?
- Čím znižujeme počet prenášaných vidov v OV?
- Čo spôsobuje (ovplyvňuje) tlmenie pri šírení signálu v OV?
- Čo neovplyvňuje tlmenie pri šírení signálu v OV?
- Čím (akými faktormi) je spôsobené tlmenie signálu OV?
- Čím je zapríčinené (spôsobené) tlmenie „vlastnou absorpciou“?
- Čím je zapríčinené (spôsobené) tlmenie „nevlastnou absorpciou“?
- Aký následok má lineárny rozptyl materiálu OV?
- Aký následok má nelineárny rozptyl materiálu OV?

- Prečo vznikajú straty makroohybom OV?
- Čím sú spôsobene straty mikroohybom OV?
- Čo spôsobuje disperzia v OV?
- Na akej vlnovej dĺžke je minimum súhrnnej disperzie pre sklenené OV?
- Na akej vlnovej dĺžke je minimum tlmenia pre sklenené OV?
- Pre aký typ OV je vlnovodová disperzia zanedbateľná?
- Pre aký typ OV je vlnovodová disperzia podstatná?
- Pre aký typ OV je medzividová disperzia podstatná?
- Čím sa prejavuje PMD disperzia?
- Čo je elektrická šírka pásma?
- Čo je optická šírka pásma?

# Zoznam použitých skratiek a symbolov

- $\alpha$  útlm (straty, tlmenie) optického vlákna
- $\alpha_{dB}$  tlmenia optického vlákna na jednotku dĺžky
- B šírka prenášaného pásma
- c rýchlosť svetla vo vákuu (cca  $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ )
- CIP nosnou indukovaná fázová modulácia (Carrier Induced Phase Modulation)
- CPM krížová fázová modulácia (Cross Phase Modulation)
- dB jednotka tlmenia (decibel)
- $D_M$  materiálová disperzia
- $D_W$  vlnovodová disperzia
- DFF OV s plochou disperziou (Dispersion Flatter Fiber)
- DSF OV s potlačením chromatickej disperzie (Dispersion Shifted Fiber)
- DWDM hustý vlnový multiplex (Dense WDM)
- EDFA erbiom dopovaný optický zosilňovač (Erbium-doped Optical Fiber Amplifiers)
- FWM štvorvlnové zmiešavanie (Four Wave Mixing)
- GI gradientné OV (Graded Index)
- GI MM mnohovidové OV s plynulou zmenou indexu lomu (graded-index multimode)
- Gbps jednotka prenosovej rýchlosti (Gb/s , Giga bit za sekundu)

- ITU medzinárodná telekomunikačná únia ITU (International Telecommunication Union)
- km jednotka dĺžky (kilometer ,  $10^3$ )
- $\lambda$  vlnová dĺžka
- LAN lokálna počítačová sieť (Local Area Network)
- LD polovodičový laser (Laser Diode)
- LED elektroluminiscenčná dióda, typ vysielacej diódy (Light-emitting Diode)
- $\mu\text{m}$  jednotky dĺžky (mikrometer ,  $10^{-6}$ )
- m jednotky dĺžky (meter)
- MAN mestská (metropolitná) sieť (Metropolitan Area Network)
- Mbps jednotka prenosovej rýchlosti (Mb/s, Mega bit za sekundu)
- MHz jednotka frekvencie (MegaHertz,  $10^6$ )
- MM mnohovidové OV (Multi Mode)
- $n_1$  index lomu jadra optického vlákna (core)
- $n_2$  index lomu plášťa optického vlákna
- NA numerická apertúra
- nm jednotka dĺžky (nanometer,  $10^{-9}$ )
- nonDSF OV bez posunutia disperzie (Non Dispersion Shifted Fiber)
- NRZ linkový kód bez návratu k nule (Not Return Zero)

- NZ-DSF vlákna s posunutou nenulovou disperziou (Non Zero-Dispersion Shifted Fiber)
- OV optické vlákno
- PMD polarizačná módová disperzia
- POF plastové OV (Plastic Optical Fiber)
- RZ linkový kód s návratom k nule (Return Zero)
- SBS stimulovaný Brillouinov rozptyl (Stimulated Brillouin Scattering)
- SI stupňovité OV (Step Index)
- SI MM mnohovidové OV so skokovou zmenou indexu lomu (step-index multimode)
- SI SM jednovidové OV so skokovou zmenou indexu lomu (step-index singlemode)
- SiO<sub>2</sub> oxid kremičitý
- SM(SMF) jednovidové OV (Single Mode (Single Mode Fiber))
- SPM vlastná fázová modulácia (Self Phase Modulation)
- SRS stimulovaný Ramanov rozptyl (Stimulated Raman Scattering)
- THz jednotka frekvencie (TeraHertz, 10<sup>12</sup>)
- $\vartheta_m$  akceptačný uhol
- V normovaná (normalizovaná) frekvencia
- WDM vlnový multiplex (Wavelength-division Multiplexing)
- XPM krížová fázová modulácia (Cross Phase Modulation)



Ďakujem za pozornosť