

# **2. ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN**

---

**ÚVOD**

**NUMERICKÁ APERTURA**

**KOHERENTNÍ SVAZEK**

**ÚTLUM V OPTICKÝCH VLÁKNECH**

**DISPERZE V SI VLÁKNECH**

**MECHANISMUS ZTRÁT V OV**

Literatura:

Chatak A., Thyagarajan K.: Introduction To Fiber Optics, Cambridge University Press, 1998

### ÚVOD

Nejrozšířenější typem optického vlnovodu je optické vlákno se skokovou změnou indexu lomu (SI), které se skládá z válcového dielektrického jádra a dielektrického pláště s mírně nižším indexem lomu.

Typické vícemodové křemenné vlákno:

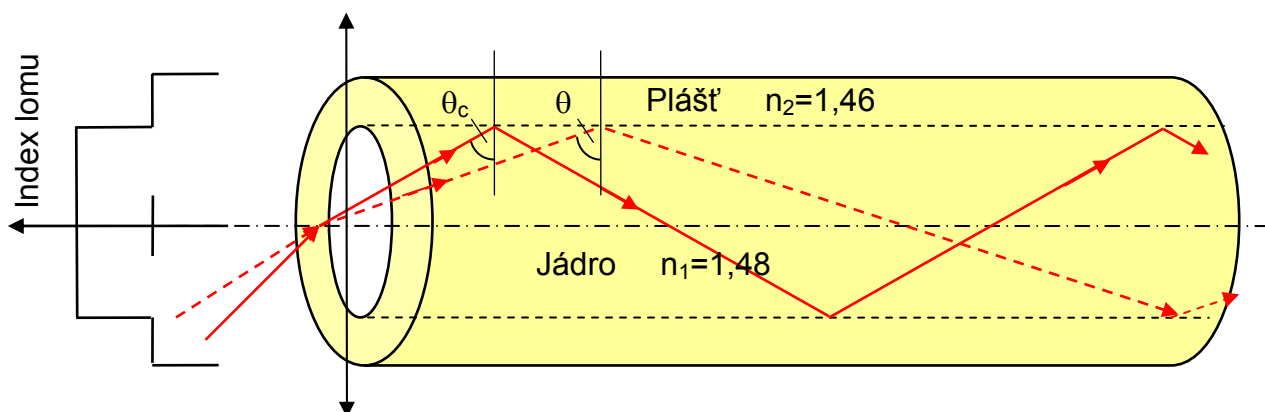
$$n_1 \approx 1,48 \quad n_2 \approx 1,46$$

$$\varnothing_{\text{jádro}} = 50 \mu\text{m} \quad \varnothing_{\text{plášť}} = 125 \mu\text{m}$$

Světelné paprsky se šíří vláknem díky totálnímu odrazu, který nastává při úhlech dopadu na rozhraní jádro-plášť větších než kritický úhel

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

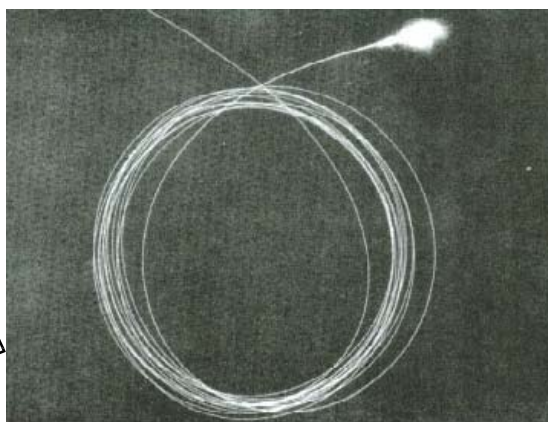
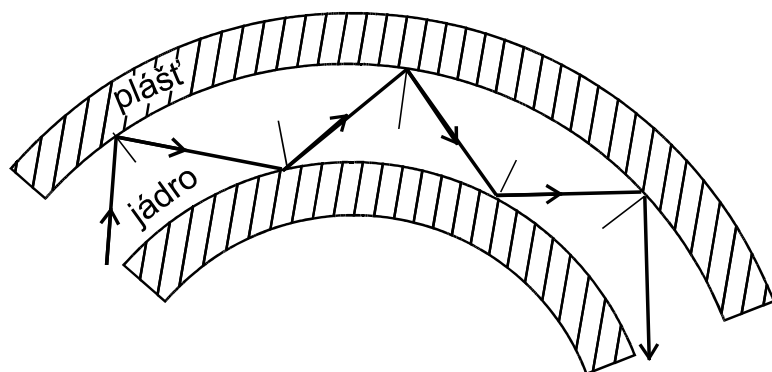
Paprsky s většími úhly dopadu konají kratší dráhu ve vlákně.



## Základní vlastnosti optických vláken

---

Vlákno může být i zahnuté.



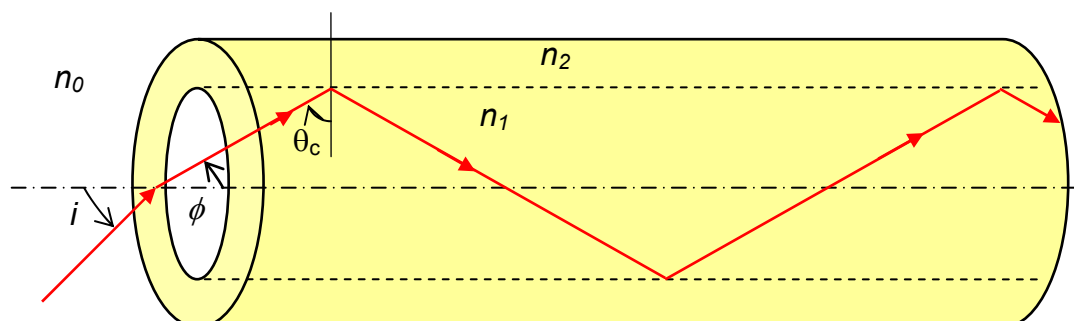
*Totální odraz v zahnutém vlákně.*

Jádro vlákna musí být obaleno pláštěm z následujících důvodů:

- mechanická výztuž (samotné jádro je křehké)
- bez pláště by mohlo docházet k „přestupu“ světla z jednoho vlákna do druhého (evanescentní vlny)

Není bez zajímavosti, že oční sítnice se skládá z mnoha tyčinek a čípků, které mají podobnou strukturu jako optické vlákno – dielektrické tyčinky (jádro) jsou obklopeny jiným dielektrikem s o něco menším indexem lomu. Průměr tyčinek je řádově jednotky mikronů. Světlo dopadající na sítnici je vedeno těmito „vlnovody“, generuje elektrické signály, které jsou pak detekovány různými nervy v mozku.

### NUMERICKÁ APERTURA



Uvažujme paprsek, který dopadá na vstupní plochu vlákna pod úhlem  $i$  vzhledem k ose vlákna. Úhel lomu ve vlákně (vzhledem k ose) označme  $\phi$ . Index lomu venkovního prostředí je  $n_0$  ( $= 1$ ). Podle Snellova zákona

$$\frac{\sin i}{\sin \phi} = \frac{n_1}{n_0}$$

Pokud má dojít k totálnímu odrazu na rozhraní jádro–plášť, pak

$$\sin \theta_c (= \cos \phi) > \frac{n_2}{n_1} \quad \text{tedy} \quad \sin \phi < \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} \quad (2.2)$$

Takže

$$\sin i < \frac{n_1}{n_0} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{\frac{n_1^2 - n_2^2}{n_0^2}} \quad (2.3)$$

Jestliže  $(n_1^2 - n_2^2) \geq n_0^2$ , pak totální odraz nastane pro libovolný úhel  $i$ .

## Základní vlastnosti optických vláken

---

Za předpokladu  $n_0 = 1$ , bude maximální hodnota  $\sin i$  pro vedené paprsky

$$\begin{aligned} \sin i_m &= \sqrt{n_1^2 - n_2^2} && \text{pro } n_1^2 < n_2^2 + 1 \\ &= 1 && \text{pro } n_1^2 > n_2^2 + 1 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Pokud bude na konec vlákna dopadat světelný kužel, do vlákna se naváže všechno světlo při vrcholovém úhlu menším než  $i_m$ .

Tento úhel je mírou navázaného světelného výkonu do vlákna a jako takový definuje numerickou aperturu (NA) vlákna podle následujícího vztahu

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.5)$$

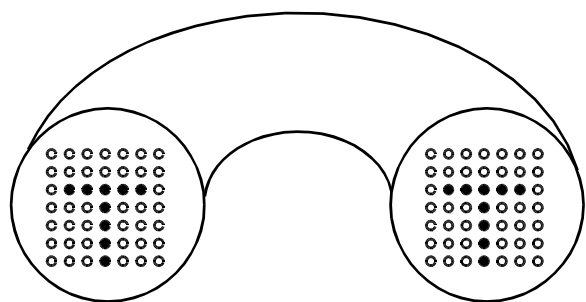
kde předpokládáme  $n_1^2 < n_2^2 + 1$ , což odpovídá všem prakticky používaným optickým vláknům.

Pro typické vlákno  $n_1 = 1,48$  a  $n_2 = 1,46$  je  $NA = 0,242$  což odpovídá úhlu  $i_m \cong 14^\circ$ . Numerická apertura je velmi důležitou charakteristikou optického vlákna. Určuje účinnost vazby mezi zdrojem světla a vláknem nebo ztráty na spojích.

### KOHERENTNÍ SVAZEK

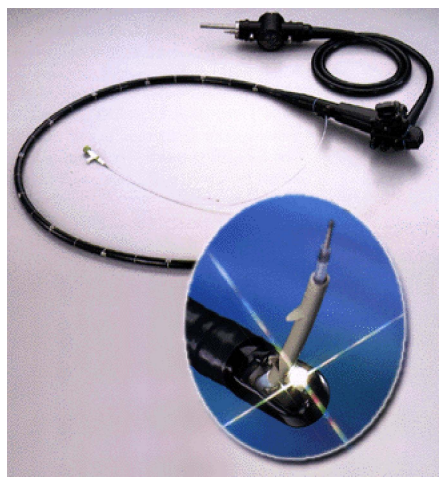
Větší množství optických vláken vedle sebe nazýváme svazek.

Pokud nejsou vlákna navzájem uspořádána, hovoříme o neko-



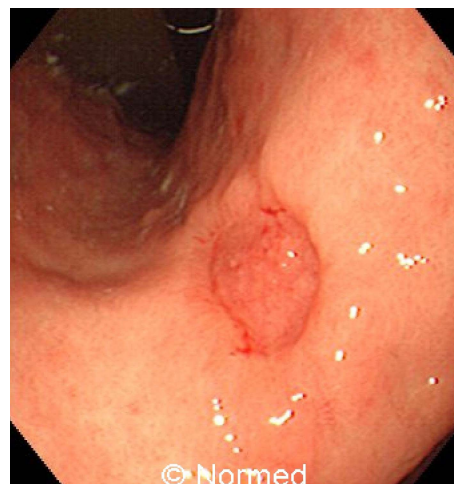
herentním svazku. Jsou-li vlákna uspořádána, tj. relativní poloha konců vlákna je stejná jak na vstupu, tak i na výstupu svazku, hovo-

říme o koherentním svazku. Koherentní svazek může přenášet obraz (viz obrázek). U nekoherentního svazku bude tentýž obraz na konci „rozházen“. Této vlastnosti nekoherentního svazku se dá využít pro kódování obrazu (signálu). Signál lze rozšifrovat pomocí stejného svazku v opačném směru. Vlákna ve svazku mohou být statisíce, takže dekódování bez originálního svazku je téměř nemožné. Využití svazků vláken: fibroskopy (lékařství, diagnostika nepřístupných částí strojů, apod.)



Lékařský  
endoskop

Obrázek  
z endoskopu



### ÚTLUM V OPTICKÝCH VLÁKNECH

Útlum a disperze jsou dvě nejdůležitější charakteristiky optických vláken. Čím menší bude útlum (a disperze), tím méně bude třeba na přenosové trase opakovačů (*repeaters*) a tedy tím menší budou i náklady na vybudování komunikační soustavy.

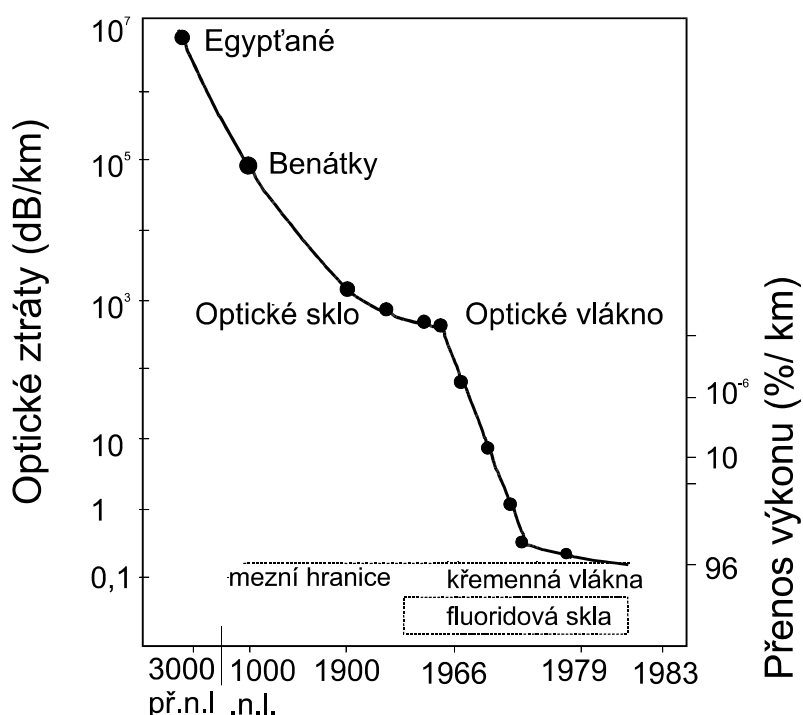
Útlum optického signálu se měří v decibelech (dB). Pokud bude vstupní příkon  $P_1$  a výstupní výkon  $P_2$ , pak ztráty v decibelech

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} \quad (2.6)$$

Příklady:

$$P_2 = 1/2 P_1 \Rightarrow \alpha = 10 \log 2 \approx 3 \text{ dB}$$

$$\alpha = 30 \text{ dB} \Rightarrow \log \frac{P_1}{P_2} = 3 \Rightarrow P_2 = \frac{1}{1000} P_1$$



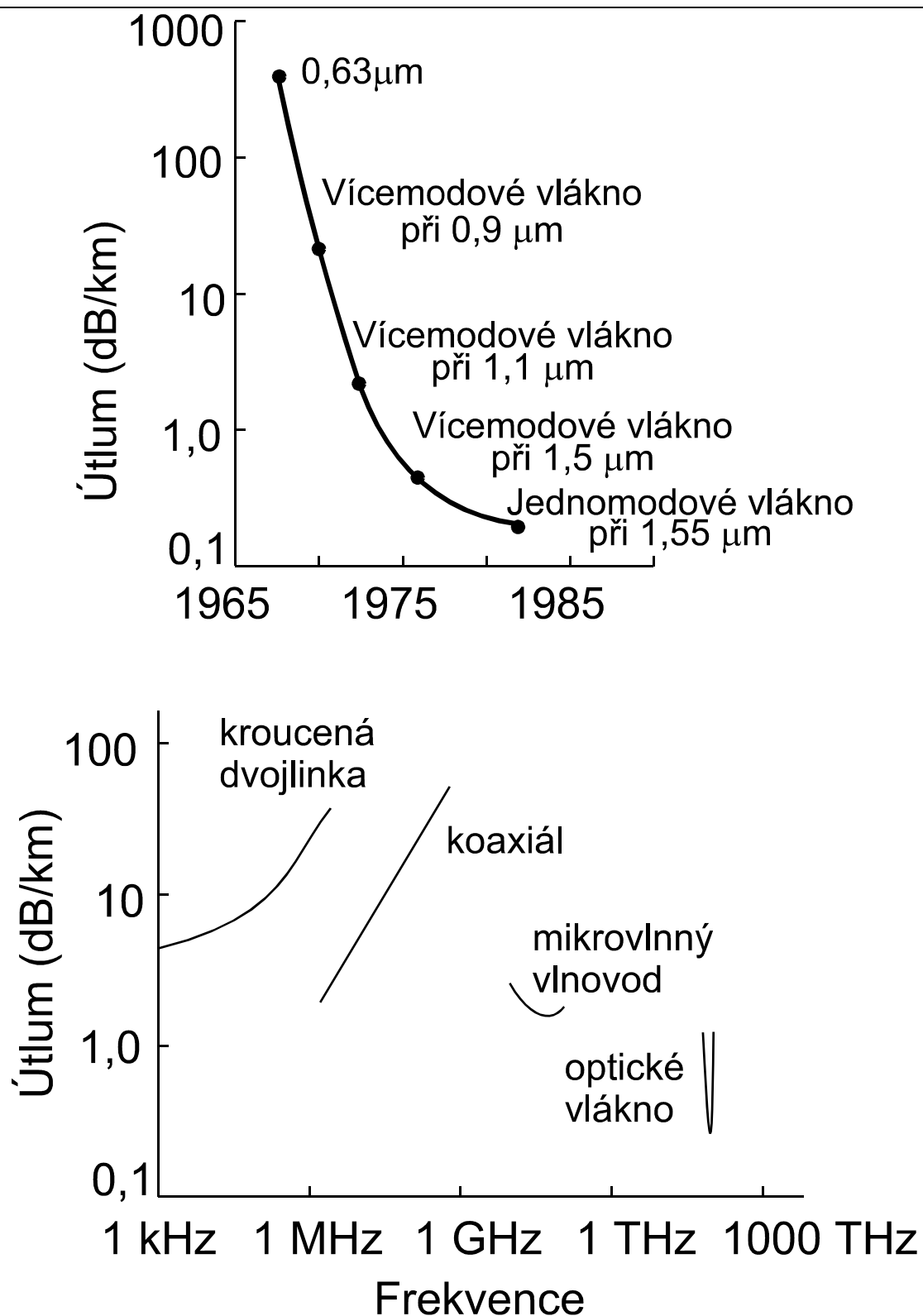
#### Historie:

Do r. 1966 ztráty více jak 1000 dB/km (nečistoty, příměsi)  
50% ztrát na 3 m délky !

1970 (USA) – čisté křemenné vlákno se ztrátami 17 dB/km ( $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ )

Dnes  $\leq 0,2 \text{ dB/km}$  ( $\lambda = 1550 \text{ nm}$ )  
95,5% ztrát na 1 km !

## Základní vlastnosti optických vláken



Pozn.: Křivka ztrát pro optické vlákno se zdá úzká, protože máme logaritmickou stupnici



### DISPERZE V SI VLÁKNECH

Disperze (zkreslení) pulsů je jednou z nejdůležitějších charakteristik, které určují přenosovou kapacitu komunikačních systémů. V digitálních komunikačních systémech se přenášené informace nejdříve zakódují do sekvence světelných pulsů, které jsou vláknem přenášeny od vysílače k přijímači, kde jsou dekodovány. Čím větší bude počet přenášených pulsů (na přijímači od sebe rozlišitelných), tím větší bude přenosová kapacita systému. Pulsy cestující vláknem se rozšiřují, dochází k tzv. disperzi pulsů. Disperze má dvě hlavní příčiny:

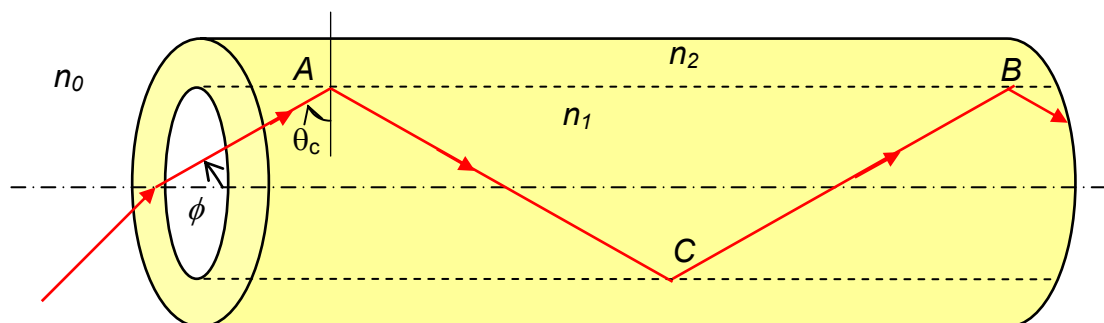
1. Různé paprsky cestují různě dlouhou dobu daným úsekem vlákna – intermodální disperze.
2. Paprsky s různými vlnovými délkami se šíří různými rychlostmi – chromatická disperze.

#### *Intermodální disperze*

Protože paprsky absolvují ve vlákně různě dlouhé dráhy (paprsky s větším úhlem vzhledem k ose vlákna konají delší dráhu), pulsy budou na výstupu z vlákna širší. Pokud bude rozšíření pulsů příliš velké, nebude je možné vzájemně rozlišit – přenášená informace se ztratí. Čím menší bude pulsní disperze, tím větší bude přenosová kapacita systému.

## Základní vlastnosti optických vláken

---



Uvažujme vlákno se stupňovitým indexem lomu. Vzdálenost  $AB$  paprsek urazí za dobu

$$t = \frac{AC + CB}{c/n_1} = \frac{n_1(AB)}{c \cos \phi} \quad (2.7)$$

kde  $c/n_1$  je rychlost světla v prostředí s indexem lomu  $n_1$ . Vlák-  
nem o délce  $L$  bude paprsek cestovat dobu

$$t = \frac{n_1 L}{c \cos \phi} \quad (2.8)$$

Minimální ( $\phi = 0$ ) a maximální doby ( $\phi = \theta_c = \arccos(n_2/n_1)$ )

$$t_{\min} = \frac{n_1 L}{c} \quad t_{\max} = \frac{n_1^2 L}{c n_2} \quad (2.9)$$

Pokud tedy budou všechny vstupní paprsky excitovány součas-  
ně, na výstupním konci budou zabírat časový interval

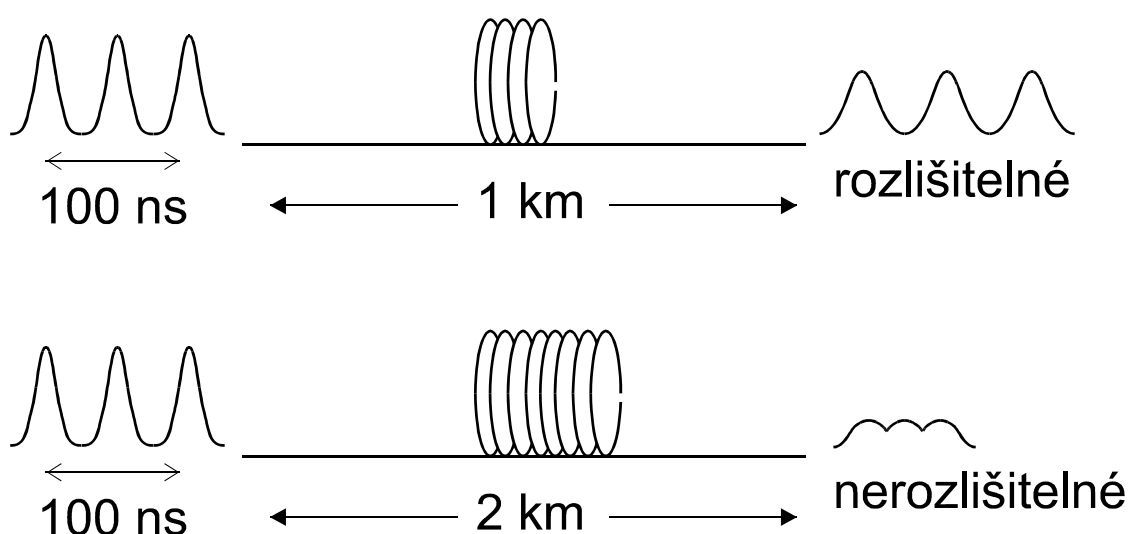
$$T = t_{\max} - t_{\min} = \frac{n_1 L}{c} \left( \frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \quad (2.10)$$

## Základní vlastnosti optických vláken

---

Pro typické vlákno  $n_1 = 1,5$   $\frac{n_1 - n_2}{n_2} \simeq 0,01$   $L = 1\text{km}$  dostaneme  $T \simeq 50\text{ns/km}$

Pokud budou na vstupu dva pulsy vzdálené např. 100 ns, po 1 km je lze ještě rozlišit, avšak po 2 km už budou nerozlišitelné.



Budeme-li používat systém s přenosovou rychlostí 1 Mb/s (s pulsy vzdálenými  $10^{-6}$  s), disperze 50 ns/km znamená použití opakovačů každé 3 – 4 km. Naproti tomu 1000 Mb/s optický přenosový systém s disperzí 50 ns/km znamená nežádoucí zkreslení pulsů každých 50 m, což je neefektivní a nákladné, tedy nevyhovující.

### ***Materiálová (chromatická) disperze***

Vyplývá ze závislosti indexu lomu na vlnové délce. Různé vlnové délky se šíří různými rychlostmi ve vlákně => disperze pulsů.

U křemenných optických vláken s vlnovou délkou  $0,85 \mu\text{m}$  a LED zdrojem se spektrální šířkou  $30 \text{ nm}$  je chromatická disperze asi  $2,7 \text{ ns/km}$ . U vícemodových SI vláken je to zanedbatelná hodnota. U GI (gradientních) vláken se vyrovnávají doby přenosu různých módů (intermodální disperze je menší), takže chromatická disperze může hrát významnější roli. U jednomodových vláken je chromatická disperze dominantní.

### **Poznámka:**

Korektní analýza šíření vln v optických vláknech vyžaduje řešení Maxwellových rovnic. „Paprsková“ optika je platná jen když

bude „vlnovodový“ parametr  $V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2} > 10$ . Pro typické

vlákno s parametry  $n_1 \approx 1,48$   $n_2 \approx 1,46$   $a \approx 25 \mu\text{m}$  při pracovní vlnové délce  $\lambda = 0,8 \mu\text{m}$  je  $V \approx 48$  a paprsková optika je vyhovující. Pokud však bude při stejných hodnotách indexu lomu průměr jádra  $2 \mu\text{m}$  (jednomodové vlákno), pak  $V \approx 3,8$  a klasickou optiku nelze použít. V takovém případě je nutné použít vlnovou teorii.

### MECHANISMUS ZTRÁT V OV

Hlavní zdroje útlumu v optických vláknech lze rozdělit na dvě skupiny: absorpční a radiační ztráty.

#### Absorpční ztráty

Lze dále rozdělit na vnitřní (*intrinsic*) a vnější (*extrinsic*). Vnitřní absorpce je způsobena interakcí světelné vlny s jednou nebo několika složkami skla, které tvoří základní materiál optického vlákna. Příkladem takové interakce je infračervený absorpční pás  $\text{SiO}_2$ . V optických komunikačních systémech ( $0,8\text{--}0,9\text{ }\mu\text{m}$  a  $1,2\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m}$ ) je však absorpce v infračervené oblasti zanedbatelná.

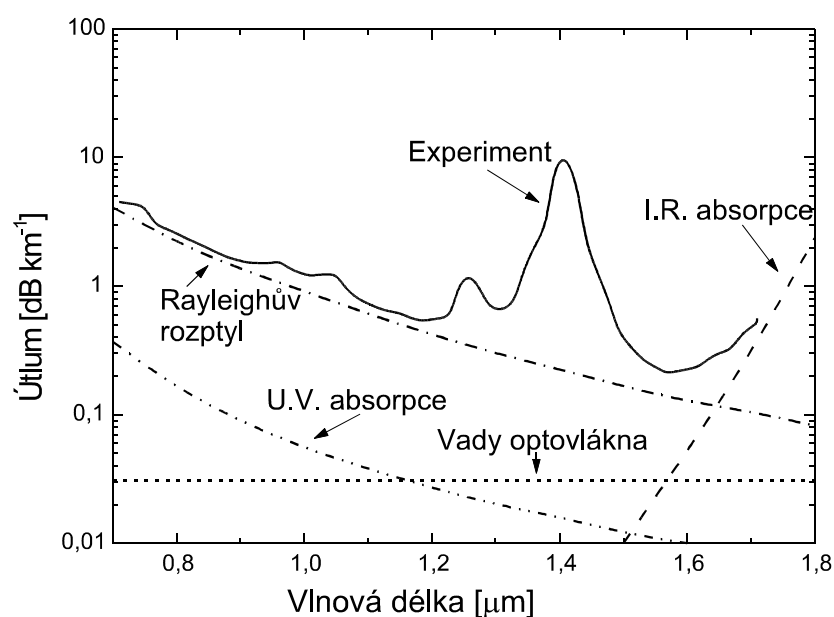
Vnější absorpce je způsobena příměsemi minoritních materiálů jako např. iontů kovů ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cr}^{3+}$ , apod.) a  $\text{OH}^-$  iontů rozpuštěných ve skle. Například 1 ppm  $\text{Fe}^{2+}$  (1 částice v milionu) způsobí ztráty 0,65 db/km při  $1,1\text{ }\mu\text{m}$  (viz tabulka). Naštěstí existují tzv. absorpční „okna“, kde lze nalézt minimum absorpce, takže ultračistá optická vlákna mohou vykazovat ztráty  $\leq 0,2\text{ dB/km}$  při  $\lambda = 1,55\text{ }\mu\text{m}$ .

Speciálními technologiemi (VAD – *Vapor-Phase Axial Deposition*) je možné snížit obsah  $\text{OH}^-$  skupin na méně než 1 ppb (1 částice v miliardě).

## Základní vlastnosti optických vláken

Příměsi	Ztráty v důsledku 1ppm příměsi (dB/km)	Maximum absorpce ( $\mu\text{m}$ )
$\text{Fe}^{2+}$	0,68	1,1
$\text{Fe}^{3+}$	0,15	0,4
$\text{Cu}^{2+}$	1,1	0,85
$\text{Cr}^{3+}$	1,6	0,625
$\text{V}^{4+}$	2,7	0,725
$\text{OH}^-$	1,0	0,95
$\text{OH}^-$	2,0	1,24
$\text{OH}^-$	4,0	1,38

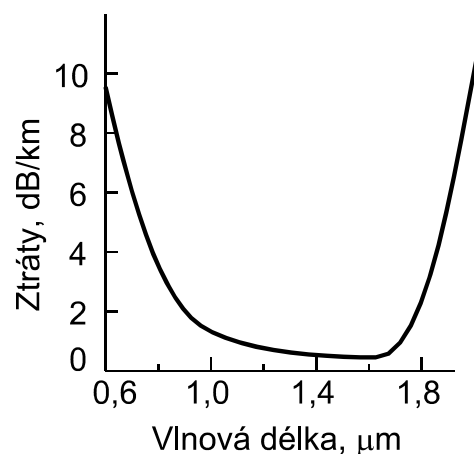
*Absorpční ztráty v křemenném vlákně v důsledku přítomnosti 1 ppm různých iontů kovů a  $\text{OH}^-$  skupiny.*



*Plná čára znázorňuje typické spektrum ztrát v křemenném vlákně (1979).*

*Pozn.:*

*Rayleighův rozptyl je úměrný  $\lambda^{-4}$ .*



*Spektrum ztrát pro velmi nízkou koncentraci  $\text{OH}^-$  u optického vlákna vyrobeného technologií VAD.*

### **Radiační ztráty**

Radiační ztráty vznikají pokud je vedený paprsek vyvázán do pláště. K tomuto jevu dochází v důsledku Rayleighova rozptylu na malých (ve srovnání s vlnovou délkou) nehomogenitách ve vláknu. Tyto nehomogenity vznikají při výrobě vlákna – jedná se o fluktuace ve složení a hustotě materiálu vlákna.

Ztráty v důsledku Rayleighova rozptylu jsou úměrné  $\lambda^{-4}$ , s rostoucí vlnovou délkou rychle klesají. Při vlnové délce  $1,55 \mu\text{m}$  je teoretický rozptyl u taveného křemenného vlákna asi  $0,15 \text{ dB/km}$ , což je v podstatě mezní limit ztrát. Dopanty jako např.  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , apod. (používají se pro nastavení speciálních profilů indexu lomu) zvyšují Rayleighův rozptyl.

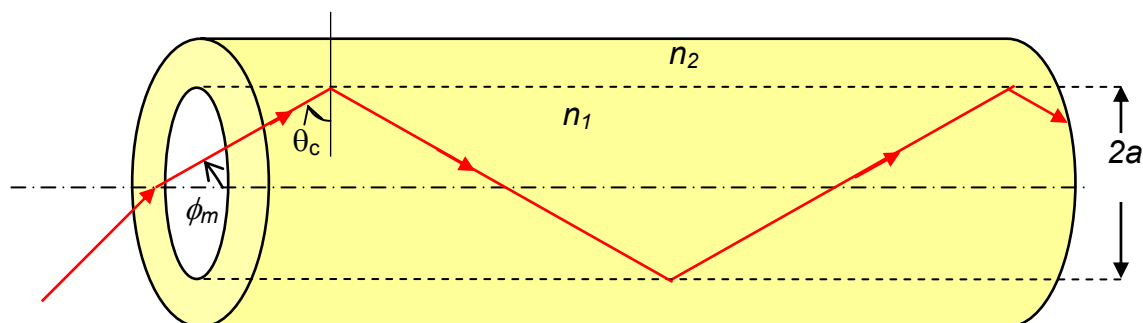
Radiační ztráty mohou být způsobeny též ohybem vláken, nehomogenitami v průměru, apod.

*Futuristické vize předpokládají komunikační optoelektronické systémy založené na infračervených vláknech ( $\lambda \geq 2 \mu\text{m}$ ), kde je díky velké vlnové délce zanedbatelný Rayleighův rozptyl. Samozřejmě to nebudou křemenná vlákna, která mají infračervenou absorpční hranu (viz předchozí obrázek). Avšak vlákna vyrobená z některých fluoridů mají absorpční ir hranu v oblasti okolo  $50 \mu\text{m}$ . Takže takové infračervené vlákno ( $\lambda \geq 2 \mu\text{m}$ ) by vykazovalo extrémně nízké ztráty ( $\leq 0,01 \text{ dB/km}$ ), což odpovídá použití opakovačů na vzdálenostech větších než  $1000 \text{ km}$ . Bohužel v současnosti se zatím setkáváme s problémy nejen při výrobě těchto vláken, ale i odpovídajících zdrojů a detektorů pracujících na těchto vlnových délkách.*

## Základní vlastnosti optických vláken

### Příklad:

- a) Uvažujme optické vlákno s následujícími parametry:  
 $n_1 = 1,475$ ;  $n_2 = 1,460$  a  $a = 25 \mu\text{m}$ . Jaká je maximální hodnota úhlu  $\phi$  (viz obrázek), při kterém ještě budou paprsky vedeny vláknem?
- b) Vypočítejte počet odrazů paprsku při průchodu vláknem o délce 1 km právě při maximálním úhlu  $\phi$ .



### Řešení:

- a) Podmínka totálního odrazu:  $\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$

$$\cos \phi_m = \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1,460}{1,475} \doteq 0,9898 \Rightarrow \phi_m \doteq 8,2^\circ$$

- b) Na jeden odraz připadá délka vlákna  $\frac{2a}{\tan \phi_m}$ . Pro vlákno

délky  $L$  bude počet odrazů  $N = \frac{\tan \theta_m}{2a} L \doteq 2,88 \times 10^6$