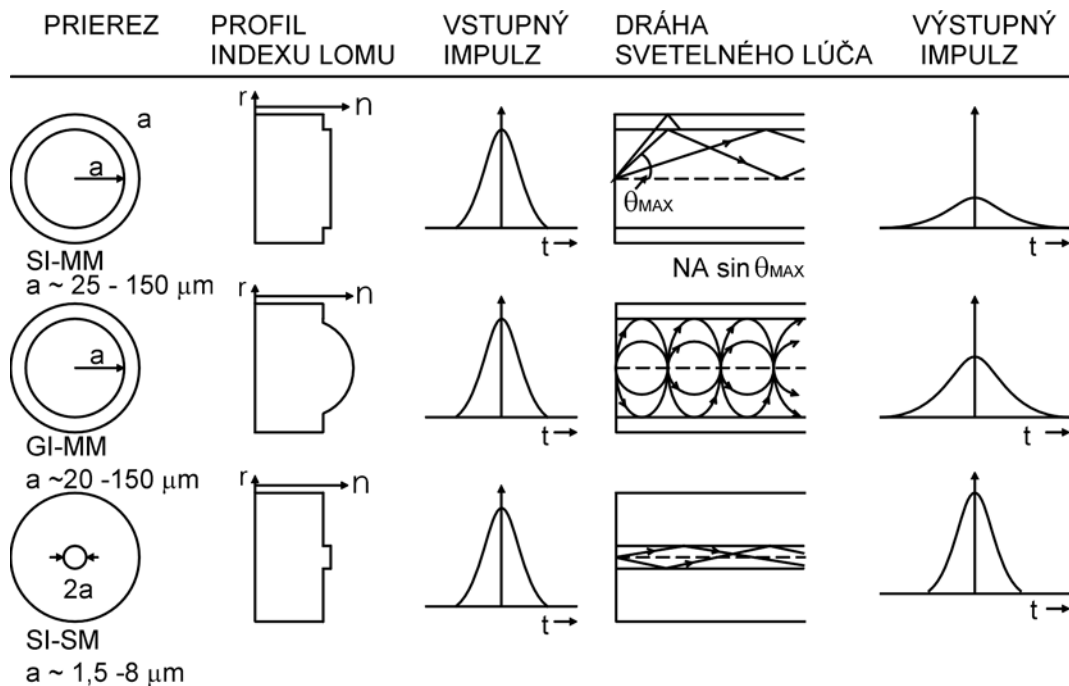


## OPTICKÉ VLNOVODY

Pre komunikačné účely sa v súčasnosti najčastejšie používajú tri typy vlákien (**obr. 1**) :

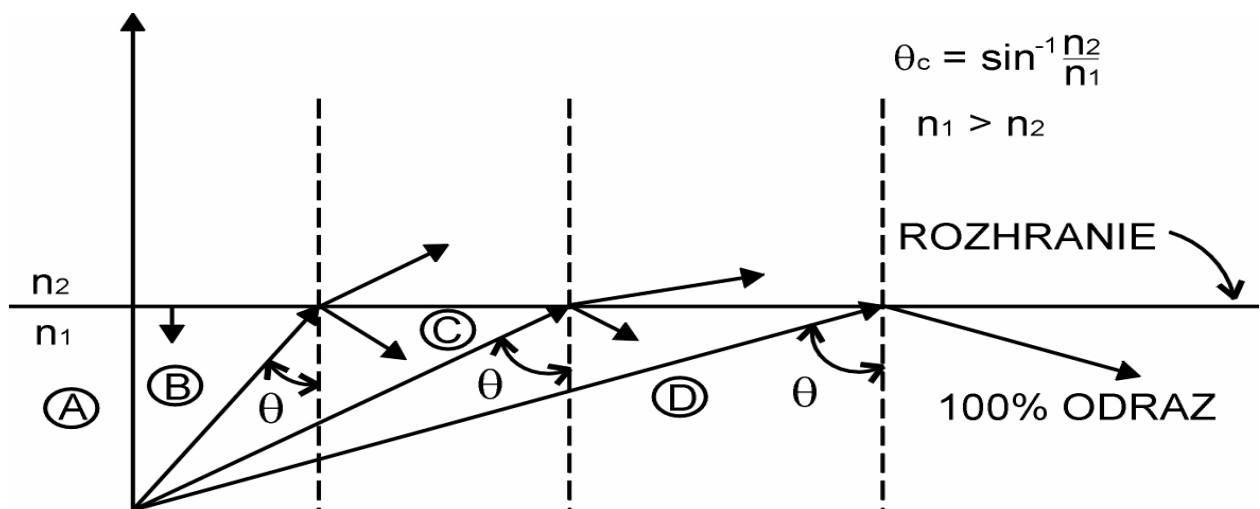
- mnohovidové vlákna so skokovitým (stupňovitým) profilom indexu lomu, tzv. **stupňovité optické vlákna** (SI-MM z angl. Step Index Multi Mode)
- mnohovidové vlákna so spojitým (gradientným) profilom indexu lomu, tzv. **gradientné optické vlákna** (GI-MM z angl. Graded Index Multi Mode),
- jednovidové vlákna so skokovitým (stupňovitým) profilom indexu lomu, tzv. **stupňovité optické vlákna** (SI-SM z ang. Step Index Single Mode).



Obr.1 Najčastejšie používané komunikačné optické vlákna

## Lúčová teória šírenia svetla (optického žiarenia) v stupňovitom optickom vlákne:

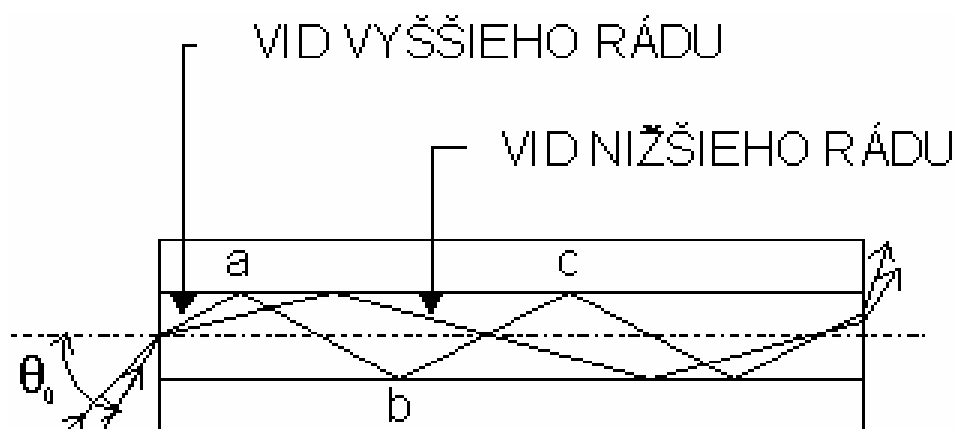
- nech index lomu jadra je  $n_1$  a index lomu plášťa je  $n_2$ , pričom  $n_2 < n_1$ ,
- svetelné lúče, šíriace sa jadrom, môžu dopadať na rozhranie jadro-plášť SI-MM (**obr. 2**) pod rôznym uhlom,
- vo vlákne sa môžu šíriť len také lúče, pre ktoré je uhol dopadu  $\theta > \theta_c$  (kde  $\theta_c$  je určená vzťahom).



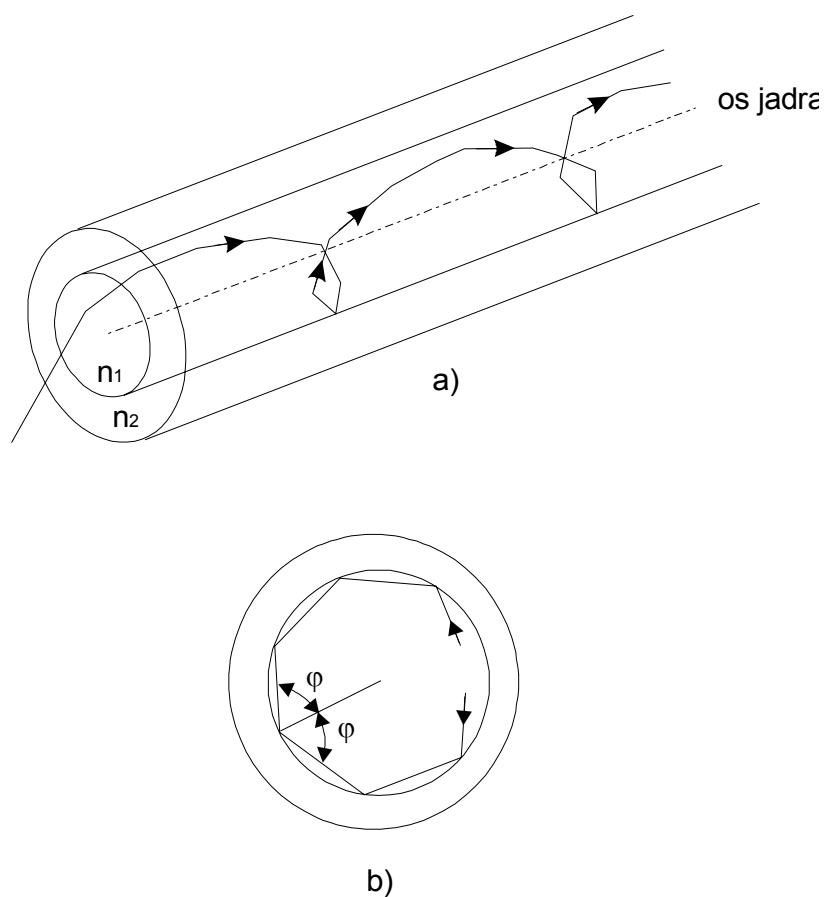
Obr. 2 Úplný odraz na rozhraní jadro-plášť

### Klasifikácia lúčov:

- **Meridionálne lúče**, ktoré sa šíria v rovinách, prechádzajúcich cez os vlákna (**obr.3**). Lúče pretínajú dvakrát os vlákna počas periódy odrazov.
- **Šikmé (kosé) lúče**, ktoré neprechádzajú cez os vlákna (**obr.4**) a šíria sa po špirálovej dráhe.

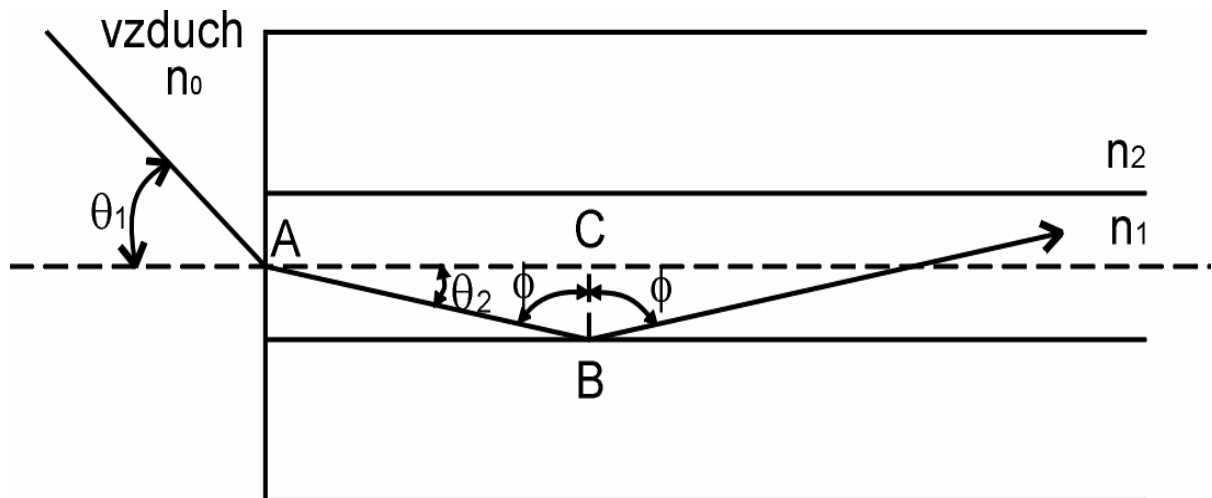


Obr.3 Šírenie meridionálnych lúčov v SI-MM vlákne



Obr.4 Špirálová dráha šikmých lúčov v SI-MM vlákna (a)  
a jej priečna projekcia (b)

Šírenie meridionálneho lúča (**obr. 5**) určuje



Obr.5 Dráha meridionálneho lúča

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \cos \phi = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \phi}$$

- v limitnom prípade  $\phi = \theta_c$  a uhol  $\theta_1 = \theta_a$  je akceptačný uhol optického vlákna

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

- ktorý určuje tzv. **akceptačný kužel** optického vlákna ( $n_0$  je index lomu optického vlákna obklopujúceho prostredia). **Numerická (číselná) apertúra** optického vlákna

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

Relatívny rozdiel indexu lomu jadra a plášťa

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx \frac{n_1 - n_2}{n_1} \text{ pre } \Delta \ll 1$$

potom pre numerickú apertúru NA platí

$$NA \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

Šírenie šikmých vidov (**obr. 4**)

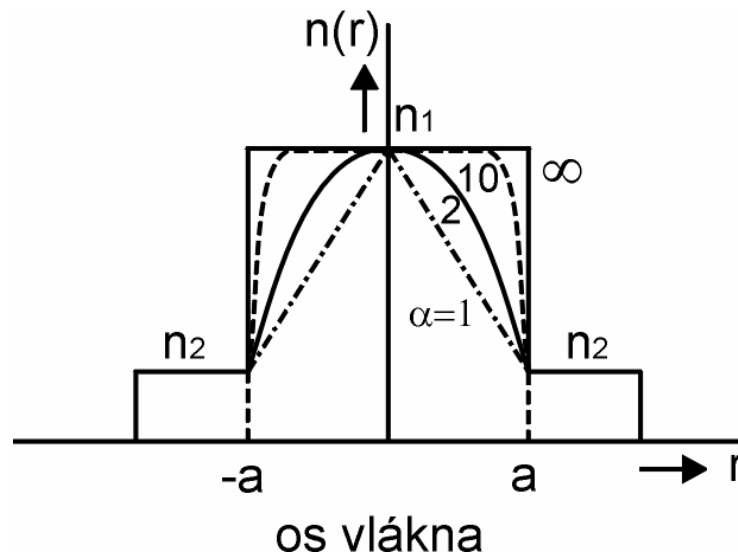
$$\sin \theta_{as} = \frac{n_1 \cos \theta_c}{n_0 \cos \varphi} = \frac{n_1}{n_0 \cos \varphi} \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$$

- kde  $\theta_{as}$  je maximálny vstupný uhol, alebo akceptačný uhol pre šikmé lúče,

čo pomocou NA je

$$n_0 \sin \theta_{as} \cos \varphi = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = NA$$

## Lúčová teória šírenia svetla (optického žiarenia) v gradientnom optickom vlákne:



Obr.6 Profil indexu lomu tzv. gradientného optického vlákna.

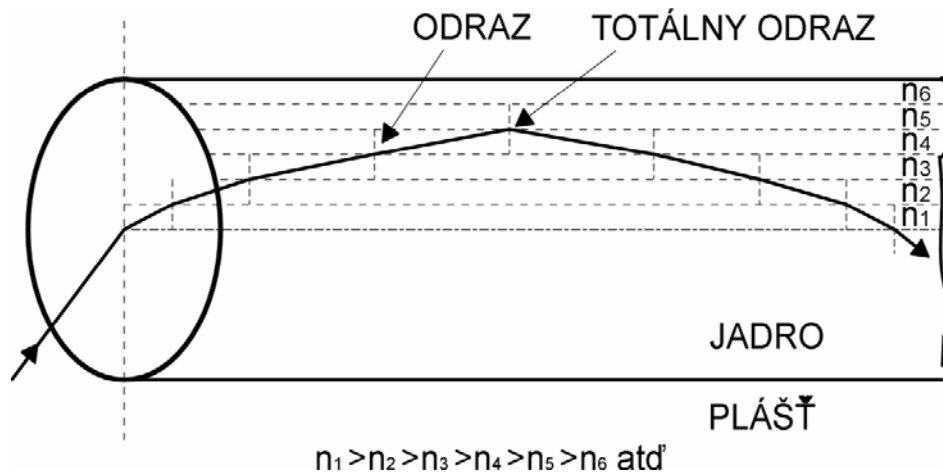
Priebeh indexu lomu (**obr.6**) v radiálnom smere má závislosť

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

$$n(r) = n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} \quad \text{pre } r > a \text{ (plášť)}$$

- kde  $\alpha$  je parameter (tzv. **parameter profilu**)
- $\Delta$  je relatívny rozdiel indexov lomu jadra a plášťa
- pre  $\alpha \rightarrow \infty$  dostaneme OV so *skokovou zmenou indexu lomu*,
- pre  $\alpha = 1$  dostaneme tzv. *trojuholníkový profil*,
- pre  $\alpha = 2$  *parabolický profil* (najčastejšie používaný v praxi).

Šírenie meridionálneho lúča v optickom vlákne s gradientným profilom indexu lomu (**obr.7**)



*Obr.7 Šírenie meridionálneho lúča v optickom vlákne s gradientným profilom indexu lomu*

**Vlnové číslo** prostredia

$$k = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

**Normovaná frekvencia** optického vlákna

$$v = k \cdot a(\text{NA}) = kn_1 a \sqrt{2\Delta}$$

**Vlnová teória šírenia svetla v optickom vlákne so skokovou zmenou indexu lomu:**

**Vidový objem**, t.j. počet vedených vidov v SI-MM vlákne

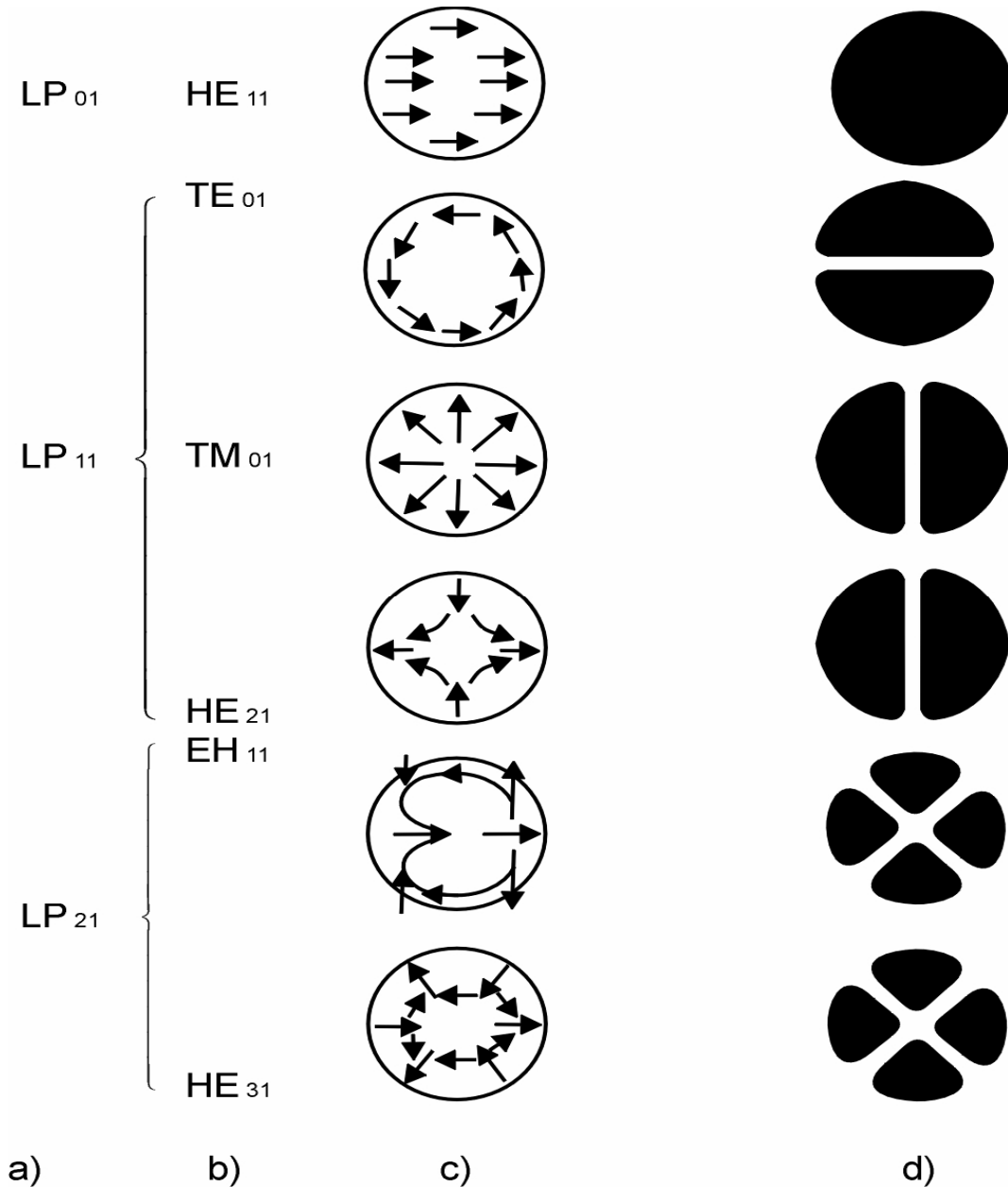
$$M_s \approx \frac{V^2}{2}$$

**Oblasť šírenia dominantného** vidu (jednovidovosť) v stupňovitom OV

$$0 < v = kn_1 a \sqrt{2\Delta} < v_c^{LP_{11}} \approx 2.405$$

- na **obr. 1** je znázornené rozloženie intenzity elektrického poľa troch najnižších LP vidov.





Obr.1 Rozloženie intenzity elektrického poľa troch najnižších LP vidov v homogénnom SI-MM OV: (a) označenie LP vidov, (b) tradičné označenie vidov, (c) rozloženie elektromagnetického poľa tradičných vidov, (d) rozloženie  $E_{ox}$  pre LP vidy

**Vlnová teória šírenia svetla v optickom vlákne so spojitou zmenou indexu lomu:**

**Vidový objem**, t. j. počet vedených vidov v gradientnom OV

$$M_g = \frac{\alpha}{\alpha + 2} (n_1 k a)^2 \Delta$$

pre  $\Delta \ll 1$

$$M_g \cong \frac{\alpha}{\alpha + 2} \frac{v^2}{2}$$

pre parabolický profil indexu lomu ( $\alpha = 2$ )

$$M_g \cong \frac{v^2}{4} = \frac{1}{2} M_S$$

**Oblasť jednovidovosti** pre gradientné optické vlákno

$$0 < v < v_c = 2.405 \sqrt{1 + \frac{2}{\alpha}}$$

## PRÍKLADY

**Príklad 1** Pre stupňovité optické vlákno s numerickou apertúrou 0,20 a indexom lomu plášťa 1,59 vypočítajte : (a) akceptačný uhol pre meridionálne lúče ak je vlákno vo vode (index lomu 1,33) a vzduchu

( $n_0=1$ ); (b) kritický uhol  $\theta_c$  na rozhraní jadro-plášť, (c) akceptačný uhol pre šikmé lúče ak je vlákno vo vzduchu a uhol odrazu týchto lúčov je  $2\varphi=100^\circ$  resp.  $150^\circ$ .

((a) voda  $8^\circ 38' 55''$ , vzduch  $11^\circ 32' 13''$  = so vzrastajúcim indexom lomu prostredia  $n_0$  akceptačný uhol meridionálnych lúčov **klesá** (b)  $82^\circ 50' 20''$  (c)  $2\varphi=100^\circ - 18^\circ 7' 41''$ ,  $2\varphi=150^\circ - 50^\circ 36' 2''$  = so vzrastajúcim uhlom odrazu  $2\varphi$  akceptačný uhol šikmých lúčov **klesá**, akceptačný uhol šikmých lúčov je **väčší** ako akceptačný uhol meridionálnych lúčov)

**Príklad 2** Mnohovidové gradientné optické vlákno má vo vzduchu akceptačný uhol  $8^\circ$ . Vypočítajte relatívny rozdiel indexov lomu medzi osou jadra a plášťom pre toto vlákno, ak index lomu na osi jadra je 1,52.

$$(\Delta = 4,24 \cdot 10^{-3} = 0,42\%)$$

**Príklad 3** Rýchlosť svetla v jadre stupňovitého optického vlákna je  $2,01 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$  a kritický uhol na rozhraní jadro-plášť je  $80^\circ$ . Vypočítajte numerickú apertúru a akceptačný uhol vlákna vo vzduchu, ak uvažujete priblíženie geometrickej optiky. Rýchlosť svetla vo vákuu je  $2,998 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$ .

$$(NA=0,25877, \theta_a=14^\circ 59' 50'')$$

**Príklad 4** Uvažujte gradientné optické vlákno s indexom lomu na osi jadra 1,5, konštantou  $\alpha$  ..profilu indexu lomu 1,90, relatívnym rozdielom indexou lomu na osi jadra a plášťa 1,3 % a priemerom jadra  $40 \mu\text{m}$ . Vypočítajte počet vedených vidov v tomto vlákne pri šírení svetla s vlnovou dĺžkou  $1,55 \mu\text{m}$ . Určite medznú hodnotu normovanej frekvencie pre jednovidový režim práce tohto vlákna.

$$(93,66 \text{ vidov} = 93 \text{ použiteľných vidov}, v_c = 3,4456)$$

**Príklad 5** Jednovidové stupňovité optické vlákno má priemer jadra  $4 \mu\text{m}$  a index lomu jadra je 1,49. Vypočítajte najkratšiu vlnovú dĺžku,

pre ktorú je možné jednovidové šírenie svetla v tomto vlákne, ak uvažujete, že relatívny rozdiel indexov lomu je 2 %.

$$(\lambda_{\min} = 1,55708\mu\text{m})$$

**Príklad 6** Mnohovidové stupňovité optické vlákno má relatívny rozdiel indexov lomu 1% a index lomu jadra 1,5. Nech týmto vláknom sa pri vlnovej dĺžke  $1,3\mu\text{m}$  šíri približne 1100 vidov. Vypočítajte priemer jadra tohto optického vlákna.

(priemer jadra optického vlákna je  $91,4949\mu\text{m}$ )

**Príklad 7** Gradientné optické vlákno s parabolickým profilom indexu lomu má index lomu jadra na osi vlákna 1,5 a relatívny rozdiel indexov lomu je 1%. Určite maximálny priemer jadra vlákna, ktorý umožňuje jednovidový režim práce na vlnovej dĺžke  $1,3\mu\text{m}$ .

(maximálny priemer jadra gradientného optického vlákna pri zachovaní jednovidového režimu práce je  $d = 2a = 6,635\mu\text{m}$ )

## PRÍKLADY na precvičenie doma

**Príklad 1** Stupňovité optické vlákno s indexom lomu jadra 1,44 a plášťa 1,42 má dostatočný priemer jadra, t.j. možno pre toto vlákno použiť lúčovú teóriu šírenia svetla. Vypočítajte akceptačný uhol tohoto vlákna vo vzduchu pre šikmé lúče, ktoré menia svoj smer pri každom odraze o  $130^\circ$ . ( $\theta_{\text{as}} = 34,6^\circ$ )

**Príklad 2** V stupňovitom optickom vlákne s veľkým priemerom jadra (v porovnaní s vlnovou dĺžkou prenášaného svetla) sú šikmé lúče vo vzduchu naviazané len do maximálneho uhla dopadu  $42^\circ$ . Nech tieto šikmé lúče pri každom odraze na rozhraní jadro-plášť menia smer šírenia o  $90^\circ$ . Vypočítajte pre toto vlákno akceptačný uhol pre meridionálne lúče vo vzduchu. ( $\theta_{\text{as}} = \sin^{-1} \text{NA} = \sin^{-1} 0,473 = 28,2^\circ$ )

**Príklad 3** Optické vlákno vo vzduchu má  $NA = 0,4$ . Porovnajete akceptačný uhol meridionálnych lúčov s akceptačným uhlom tých šikmých lúčov, ktoré menia svoj smer šírenia o  $100^\circ$  pri každom odraze na rozhraní jadro-plášť. ( $\theta_a = 23,6^\circ$ ,  $\theta_{as} = 38,5^\circ$ )

**Príklad 4** Určite relatívny rozdiel indexov lomu pre jednovidové optické vlákno s priemerom jadra  $10 \mu\text{m}$  a s indexom lomu jadra  $1,49$ , ktoré pracuje pri vlnovej dĺžke  $1,56 \mu\text{m}$ . ( $\Delta = 0,32\%$ )

**Príklad 5** Gradientné optické vlákno s parabolickým profilom indexu lomu umožňuje šírenie 742 vedených vidov. Vlákno má numerickú apertúru vo vzduchu  $0,3$  a priemer jadra  $70 \mu\text{m}$ . Vypočítajte vlnovú dĺžku svetla, ktoré sa šíri optickým vláknom. Ďalej určite maximálny priemer jadra vlákna, ktorý pri tej istej vlnovej dĺžke umožňuje jednovidový režim práce. ( $\lambda = 1,2 \mu\text{m}$ ,  $a = 2,2 \mu\text{m}$  teda maximálny priemer jadra optického vlákna pre jednovidový režim práce je  $4,4 \mu\text{m}$ .) (4)

**Príklad 6** Určite maximálny priemer jadra stupňovitého optického vlákna s relatívnym rozdielom indexov lomu  $1,5\%$  a indexom lomu jadra  $1,48$  tak, aby toto vlákno pracovalo v jednovidovom režime. Nech vlákno pracuje na vlnovej dĺžke  $0,85 \mu\text{m}$ . Určite, ako sa zmení takto vypočítaný priemer jadra pri desaťnásobnom zmenšení relatívneho rozdielu indexov lomu. (maximálny priemer jadra stupňovitého optického vlákna pri zachovaní jednovidového režimu práce je  $d = 2a = 2,6 \mu\text{m}$ , po zmenšení relatívneho rozdielu indexov lomu dostaneme  $d = 2a = 8 \mu\text{m}$ . Došlo k **zväčšeniu** maximálneho priemeru jadra.)