



# OPTOELEKTRONIKA

---

## **OPTICKÉ VLNOVODY**

**Dr.h.c. Prof.RNDr.Ing. Ján TURÁN, DrSc.**

Department of Electronics and Multimedia Communications  
Faculty of Electrical Engineering and Informatics  
University of Technology Košice, Letná 9, 042 00 Košice,  
Slovakia

Tel. ++ 421 55 602 29 43, E-mail: [jan.turan@tuke.sk](mailto:jan.turan@tuke.sk)

## 2. OPTICKÉ VLNOVODY

### 2.1 ROZDELENIE A ZÁKLADNÉ TYPY OPTICKÝCH VLNOVODOV

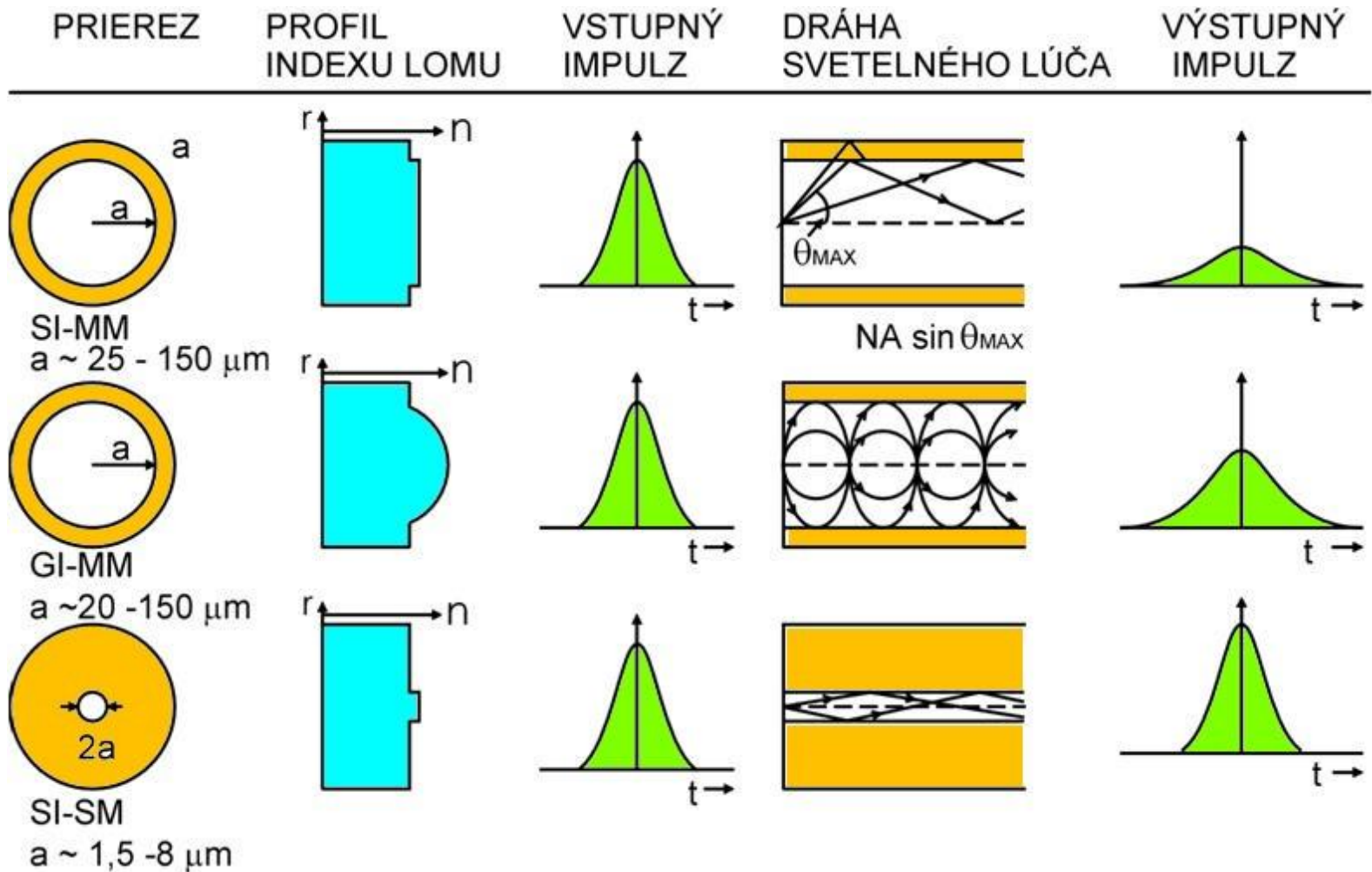
#### **Optický vlnovod (dielektrický svetlovod)**

**1950 – priemyslová výroba optických vlákien**

- **Telekomunikačné vlákna pre veľké vzdialenosti**
- **Telekomunikačné vlákna pre stredné vzdialenosti a miestny styk a lokálne komunikácie**
- **Vlákna pre osvetľovanie, kontrolné, diagnostické a meracie systémy**
- **Vlákna pre špeciálne systémy (vojenské, pozorovacie, prenos obrazu a pod.)**
- **Vlákna na prenos energie (pre lekárske účely – špeciálny skalpel, obrábanie, opticky napájané systémy a pod.)**
- **Vlákna pre senzorové systémy**

## 2. OPTICKÉ VLNOVODY

### 2.1 ROZDELENIE A ZÁKLADNÉ TYPY OPTICKÝCH VLNOVODOV



**Obr. 2.1 Najčastejšie používané telekomunikačné optické vlákna.**

## 2. OPTICKÉ VLNOVODY

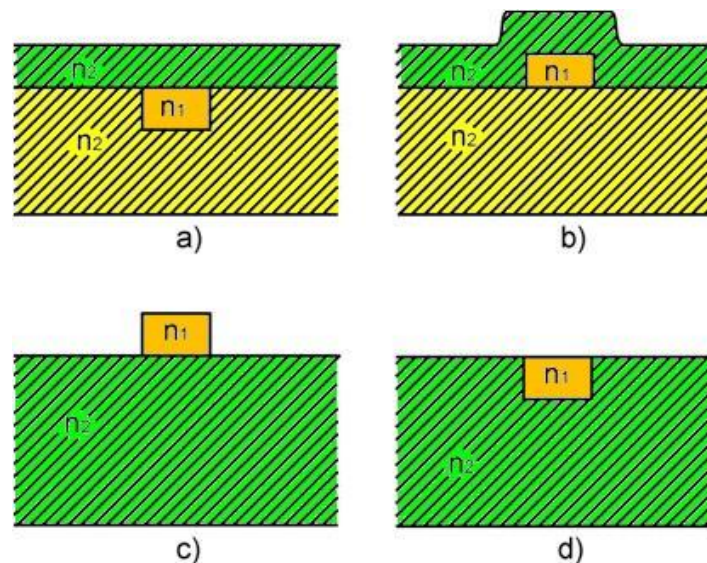
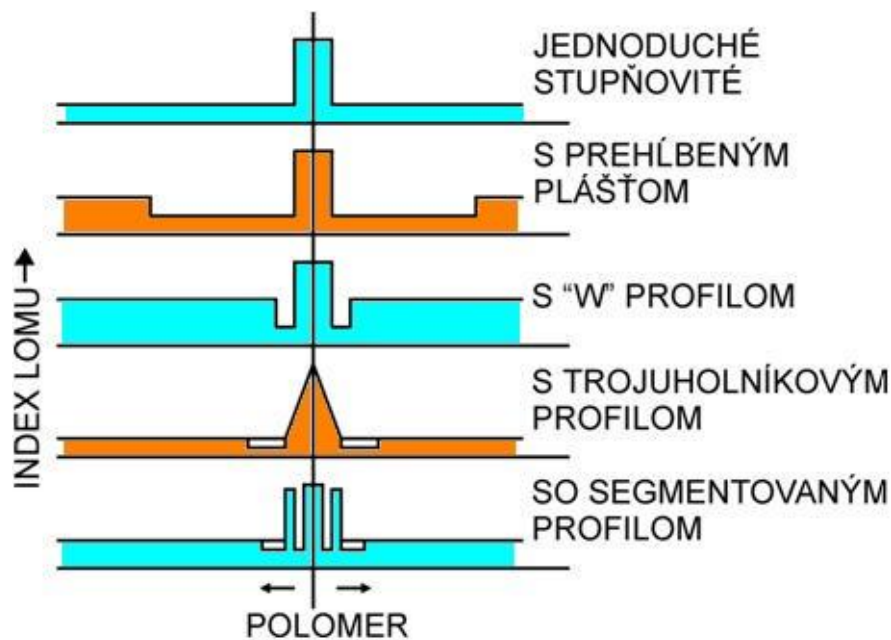
### 2.1 ROZDELENIE A ZÁKLADNÉ TYPY OPTICKÝCH VLNOVODOV

#### Pre telekomunikačné účely

- **Mnohovidové** vlákna so skokovitým (**stupňovitým**) profilom indexu lomu, tzv. **mnohovidové stupňovité optické vlákna (SI-MM - Step Index MultiMode)**
- **Mnohovidové** vlákna so spojitým (**gradientným**) profilom indexu lomu, tzv. **mnohovidové gradientné optické vlákna (GI-MM - Graded Index MultiMode)**
- **Jednovidové** vlákna so skokovitým (**stupňovitým**) profilom indexu lomu, tzv. **jednovidové stupňovité optické vlákna (SI-SM - Step Index SingleMode)**
- **Planárne optické vlnovody – integrovaná optika**

## 2. OPTICKÉ VLNOVODY

### 2.1 ROZDELENIE A ZÁKLADNÉ TYPY OPTICKÝCH VLNOVODOV



**Obr. 2.2**  
Profily indexu lomu jednovidových optických vlákien.

**Obr. 2.3**  
Pričný rez niektorých planárnych optických vlnovodov.

### 2.2.1 VLNOVÁ ROVNICA

#### Maxwellove rovnice

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \operatorname{div} \vec{E} = 0$$

#### Materiálové vzťahy

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

Pre harmonickú časovú závislosť – **Helmholtzove vlnové rovnice**

$$\Delta \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0$$

$$\Delta \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0$$

kde  $k = \omega \sqrt{\varepsilon \mu}$

je **vlnové číslo**

### 2.2.1 VLNOVÁ ROVNICA

Zložky  $\vec{E}$  a  $\vec{H}$  – riešením **vlnovej rovnice**

$$\Delta \psi + k^2 \psi = 0$$

**Laplaceov operátor** v **kartézskej súradnicovej sústave**

$$\Delta \psi(x, y, z) = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$$

**Laplaceov operátor** vo **valcovej súradnicovej sústave**

$$\Delta \psi(r, \varphi, z) = \frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$$

### 2.2.2 ŠÍRENIE VÝKONU

**Výkon**  $P$  – integrácia **Poyntingovho vektora**

$$P = \int_A \operatorname{Re} \{ \vec{S} \} d\vec{A}$$

kde

$$\vec{S} = \frac{1}{2} [\vec{E}, \vec{H}^*]$$

je **komplexný Poyntingov vektor, hustota toku výkonu**



### 2.2.3 ROVNICA EIKONALU

- **Geometrická optika**
- **Vlnová teória šírenia svetla**

#### Rovnica eikonalu

$$\left( \text{grad } \phi \right)^2 = \left( \nabla \phi \right)^2 = c^2 \varepsilon \mu = n^2$$

V kartézskej súradnicovej sústave

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 = n^2(x, y, z)$$

#### Povrch eikonalu

$$\phi(\vec{r}) = \textit{konšt.}$$

### 2.2.4 ROVNICE LÚČA

$$n(x, y, z) \frac{d\vec{r}}{ds} = \text{grad } \phi$$

po úprave

$$\frac{d}{ds} [n(x, y, z) \vec{s}_0] = \text{grad } n$$

alebo

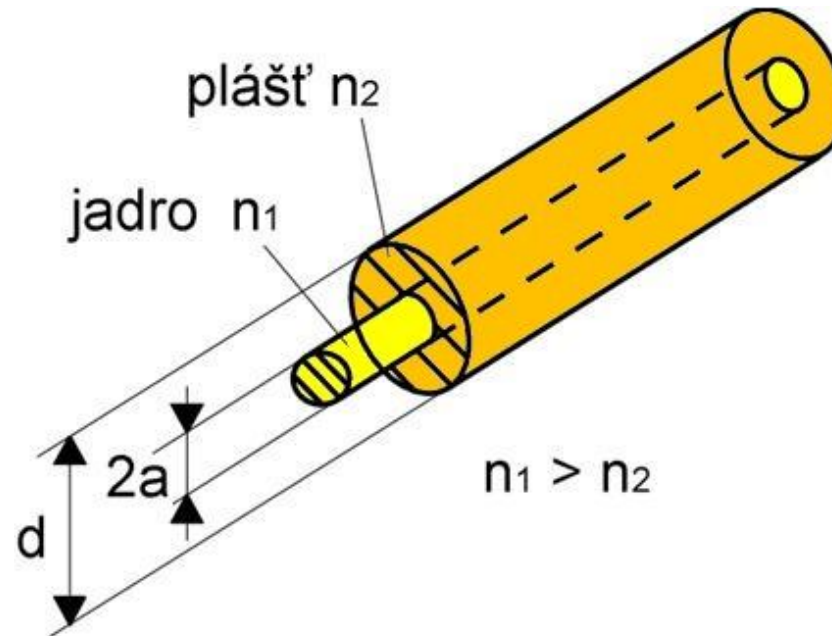
$$\frac{d}{ds} \left[ n(x, y, z) \frac{d\vec{r}}{ds} \right] = \text{grad } n$$

základné rovnice na určenie dráhy lúča v nehomogénnom prostredí

## 2. OPTICKÉ VLNOVODY

### 2.3 LÚČOVÁ TEÓRIA ŠÍRENIA SVETLA V STUPŇOVITOM OPTICKOM VLÁKNE

#### Vlákno tvorené jadrom a plášťom

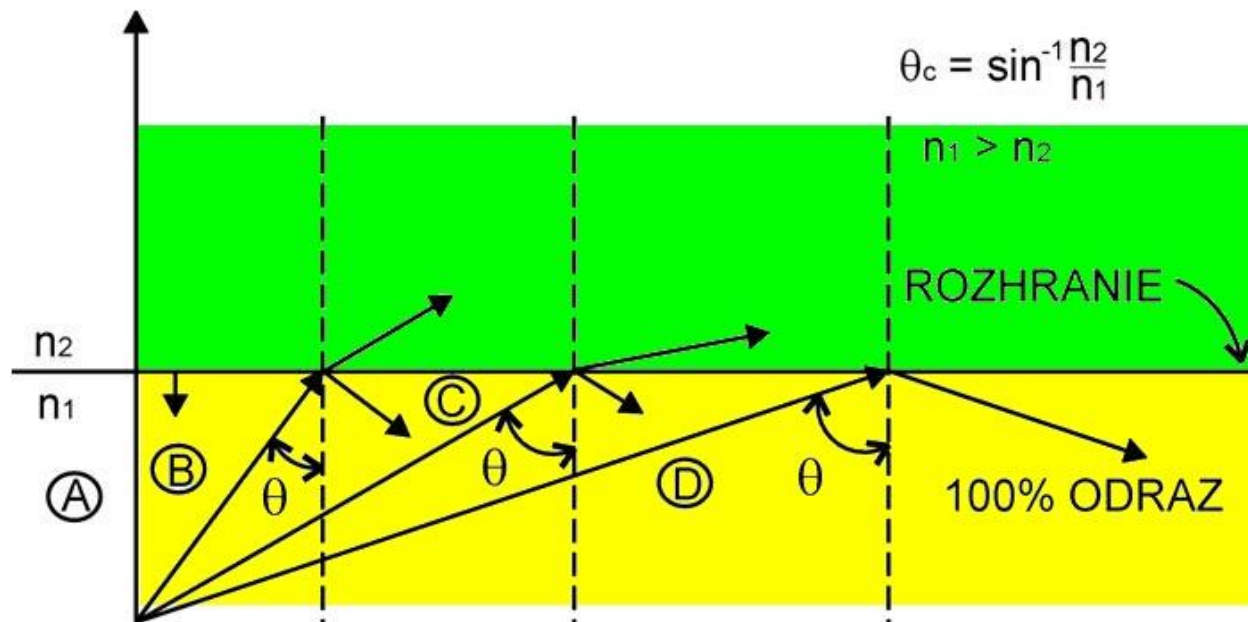


Obr. 2.4 Stupňovité mnohovidové optické vlákno.

**Vidy** – rôzne dráhy šírenia sa svetelnej vlny

### 2.3.1 KLASIFIKÁCIA LÚČOV

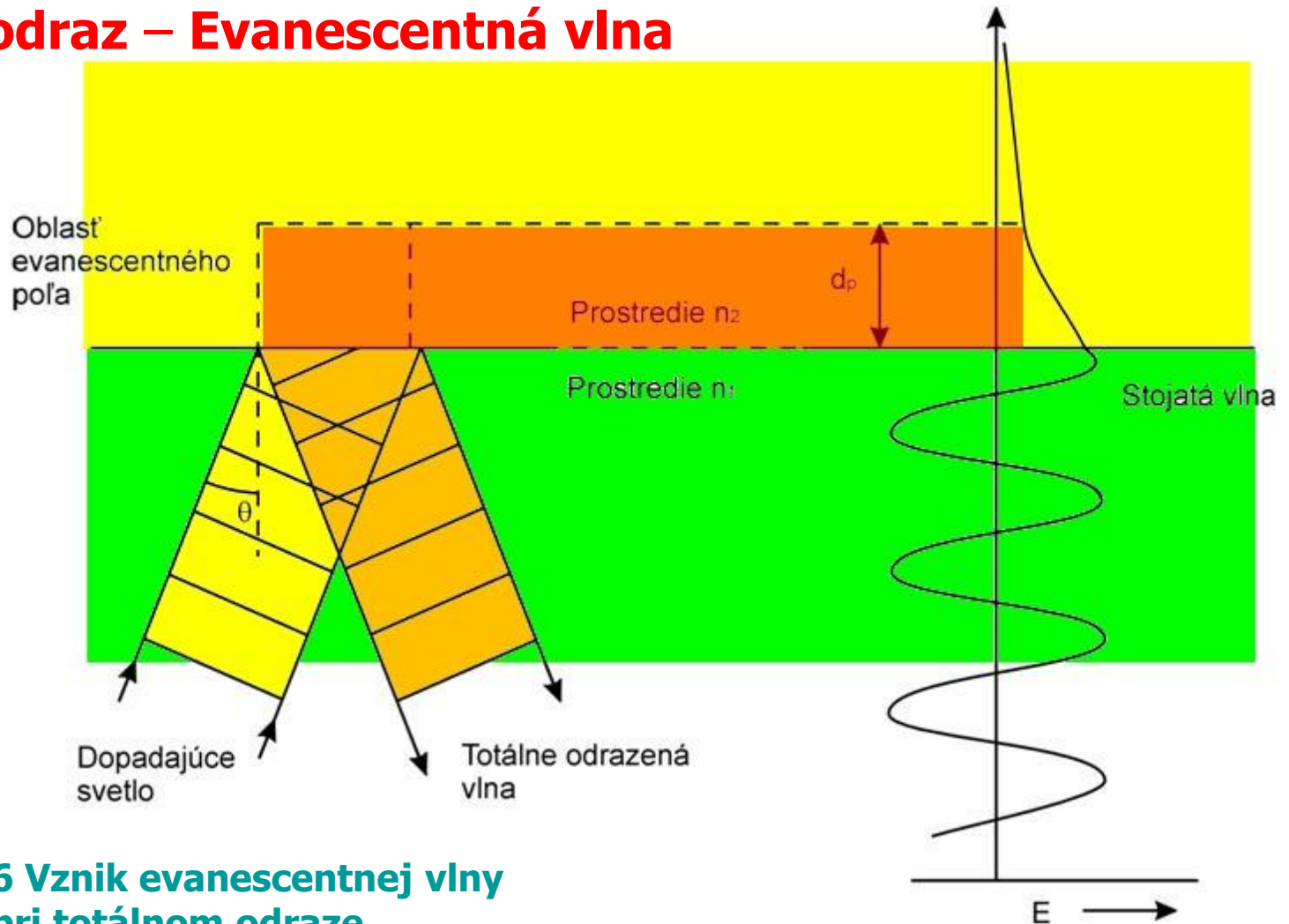
**SI-MM vlákno** s indexom lomu jadra  $n_1$  a indexom lomu plášťa  $n_2$  pričom  $n_2 < n_1$  ( $n_1 = 1,48$  a  $n_2 = 1,46 \Rightarrow \Theta_c = 80,6^\circ$ )



**Obr. 2.5 Úplný odraz na rozhraní jadro – plášť.**

2.3.1 KLASIFIKÁCIA LÚČOV

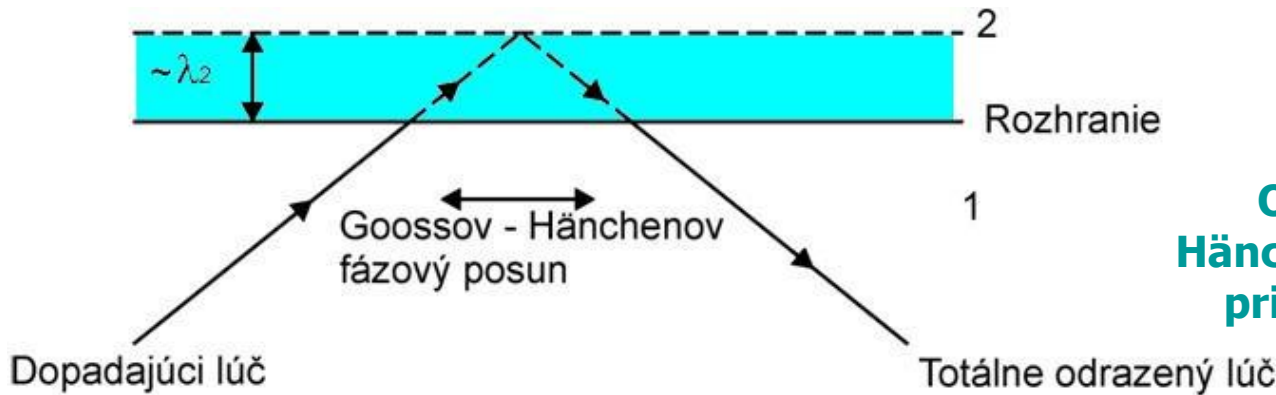
**Totálny odraz – Evanescentná vlna**



**Obr. 2.6 Vznik evanescentnej vlny pri totálnom odraze.**

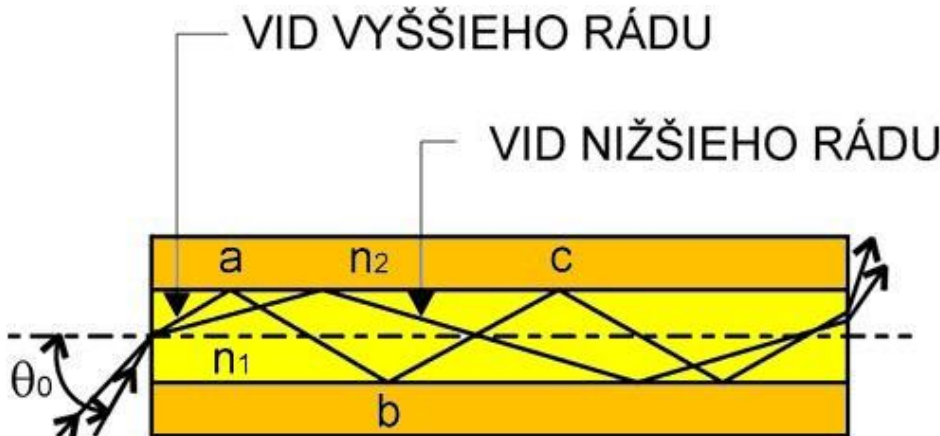
### 2.3.1 KLASIFIKÁCIA LÚČOV

Potrebné počítať s tzv. **Goosovým – Hänchenovým fázovým posunom**



**Obr.2.7 Goosov – Hänchenov fázový posun pri totálnom odraze.**

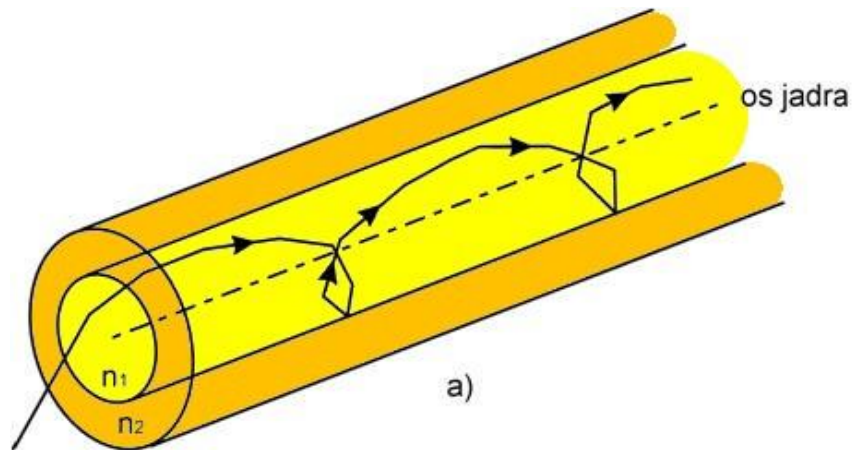
### Lúče v (SI-MM OV) : 1. Meridionálne lúče



**Obr. 2.8 Šírenie meridionálnych lúčov.**

2.3.1 KLASIFIKÁCIA LÚČOV

2. Šikmé (kosé) lúče



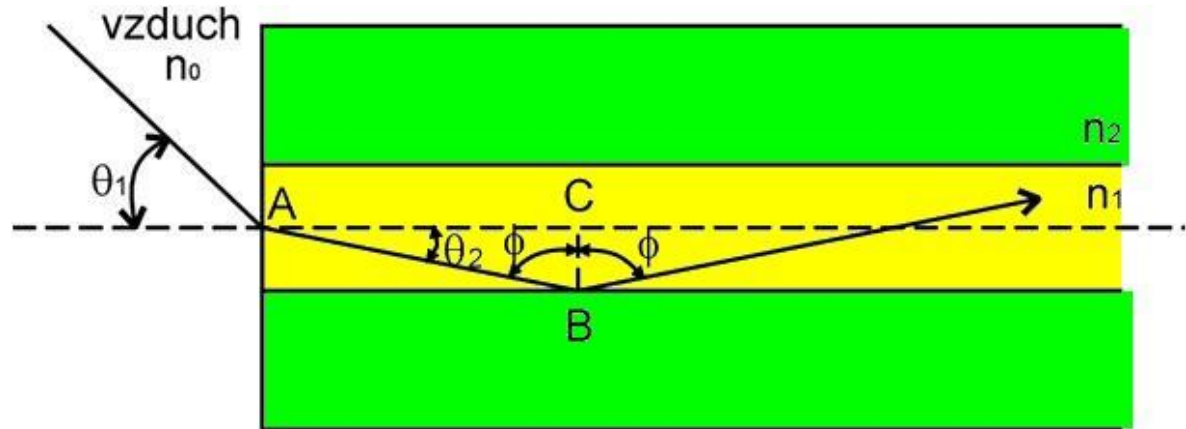
Obr.2.9  
Špirálová dráha šikmých lúčov v  
SI-MM vlákne (a) a jej priečna  
projekcia (b).

2.3.2 ANALÝZA MERIDIONÁLNYCH LÚČOV

**Snellov zákon**

$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \sin \theta_2$$

$$\phi = \frac{\pi}{2} - \theta_2$$



$$n_0 \sin \theta_1 = n_1 \cos \phi = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2}$$

**Obr. 2.10**  
Dráha meridionálneho lúča.

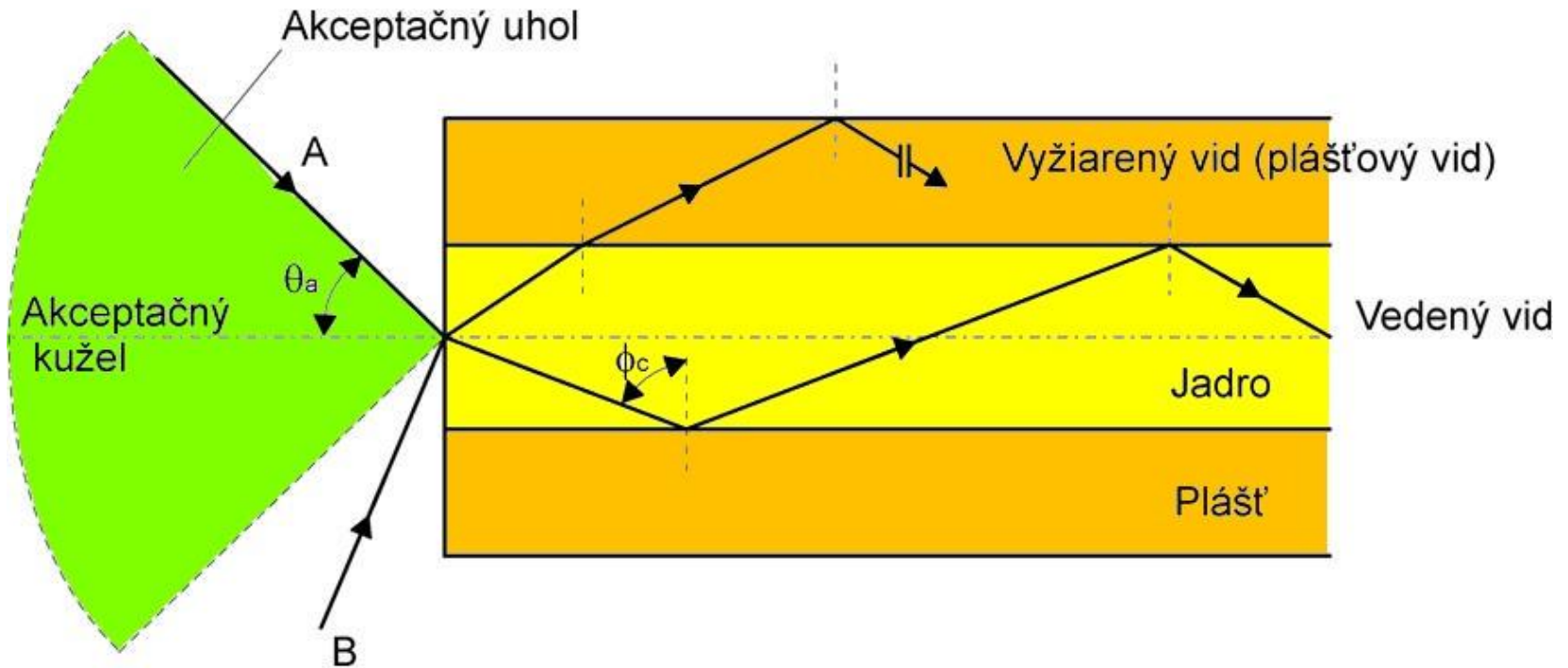
$\Theta_1 = \Theta_a$  – **Akceptačný uhol**

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



2.3.2 ANALÝZA MERIDIONÁLNYCH LÚČOV

**Akceptačný kužel optického vlákna**



**Obr. 2.11**  
**Akceptačný kužel optického vlákna.**

- **Vedené vidy**
- **Plášťové vidy**

### 2.3.3 NUMERICKÁ APERTÚRA

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

**Relatívny rozdiel indexu lomu jadra a plášť'a  $\Delta$**

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

potom

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

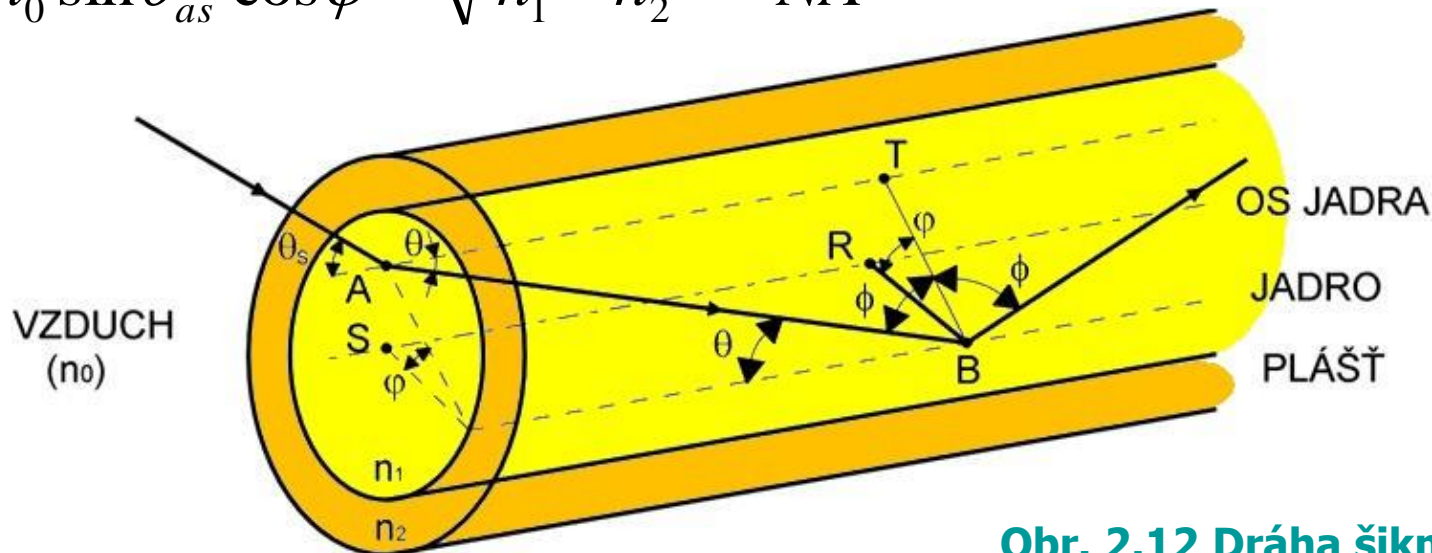
2.3.4 ANALÝZA ŠIKMÝCH LÚČOV

■ Šikmé (kosé) vidy

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

$\Theta_{as}$  – akceptačný uhol pre šikmé lúče. Pomocou NA

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



Obr. 2.12 Dráha šikmého lúča dopadajúceho pod uhlom  $\Theta_s$ .

## 2.4.1 KLASIFIKÁCIA LÚČOV A ZÁKLADNÉ ROVNICE

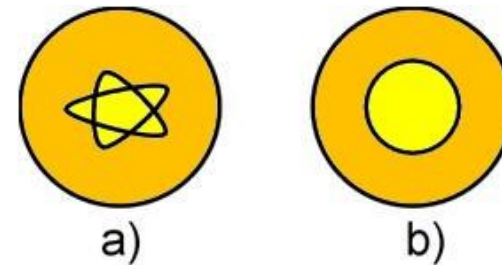
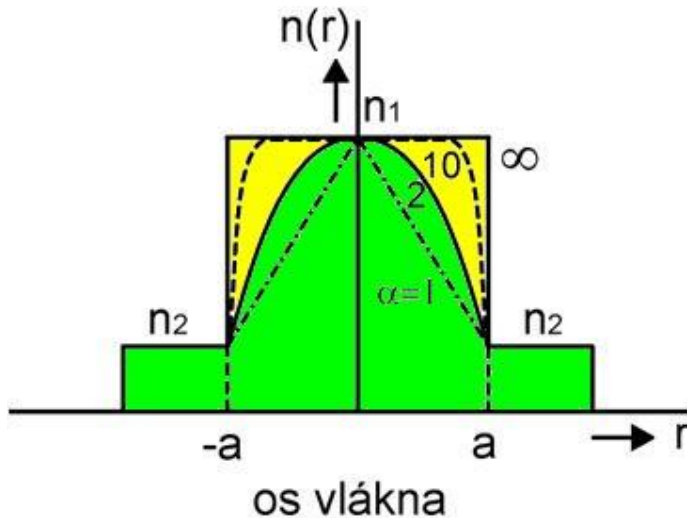
### OV s gradientným profilom indexu lomu (GI)

- **Priebeh indexu lomu**

$$n(r) = \begin{cases} n_1 \sqrt{1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a}\right)^\alpha} & \text{pre } r < a \text{ (jadro)} \\ n_1 \sqrt{1 - 2\Delta} & \text{pre } r > a \text{ (plášť)} \end{cases}$$

- **Špirálové lúče**

$\alpha$  – parameter profilu



**Obr. 2.14 Šírenie šikmých lúčov v OV so spojitým profilom indexu lomu (a) lúče s deformovanou dráhou; (b) špirálové lúče.**

**Obr. 2.13 Profil indexu lomu GI OV.**

## 2.4.1 KLASIFIKÁCIA LÚČOV A ZÁKLADNÉ ROVNICE

**Analýza – rovnice lúča**

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dr}{ds} \right) - nr \left( \frac{d\theta}{ds} \right)^2 = \frac{dn}{dr}$$

**Pre zložku r**

$$n \left( \frac{dr}{ds} \right) \left( \frac{d\theta}{ds} \right) + \frac{d}{ds} \left( nr \frac{d\theta}{ds} \right) = 0$$

**Pre zložku  $\theta$**

$$\frac{d}{ds} \left( n \frac{dz}{ds} \right) = 0$$

**Pre zložku z, integrovaním dostaneme**

$$z = \int_{r_0}^r N_0 \left[ \left( \frac{n(r)}{n_0} \right)^2 + \left( 1 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 \right) (x_0 M_0 - y_0 L_0) - N_0^2 \right]^{-1/2} dr$$

## 2.4.2 MERIDIONÁLNE LÚČE

$$y_0 = M_0 = 0 \quad \mathbf{a} \quad x_0 = r_0$$

**Po integrácii dostaneme**

$$r = C \sin \left( \frac{\eta n_1}{n_0 N_0} + \psi \right)$$

**Rovnica vyjadruje dráhu lúča tvaru **vlny s periódou  $\Lambda$****

**$\Lambda$  je konštantné pre určitý profil indexu lomu**

$$n^2(r) = n_1^2 \left[ 1 - (\xi r)^2 + \frac{2}{3} (\xi r)^4 + \dots \right] = n_1^2 \operatorname{sech}^2(\xi r)$$

### 2.4.3 ŠPIRÁLOVÉ LÚČE

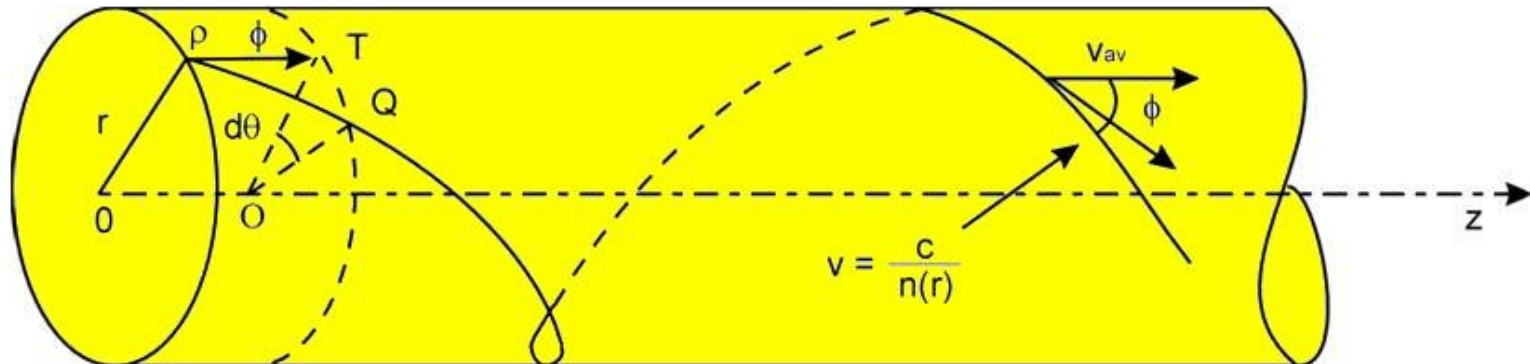
**Axiálna rýchlosť**  $v_z$

$$v_z(r) = \frac{\cos \phi}{n(r) \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \frac{\sqrt{1 + \frac{r}{n} \frac{dn}{dr}}}{n \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

**Rýchlosť má byť pozdĺž dráhy lúča konštantná**

$$n^2(r) = \frac{n_1^2}{1 + (\eta r)^2} = n_1^2 \left[ 1 - (\eta r)^2 + (\eta r)^4 - \dots \right]$$

■ **Kvadratický profil indexu lomu**



**Obr. 2.15** Dráha špirálového lúča.