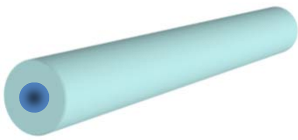
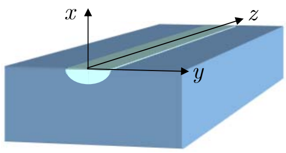
Optický vlnovod – základ (mnoha) optoelektronických prvků

Příklady pasivních fotonických vlnovodných struktur

Optické vlákno



Kanálkový optický vlnovod

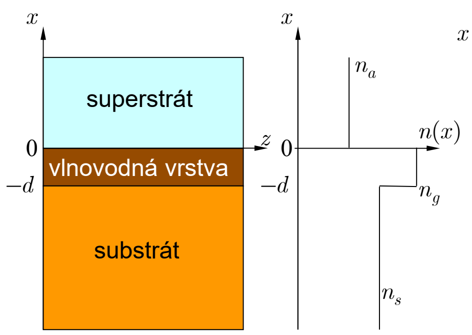


integrovaně optický
vlnovodný dělič výkonu
s připojenými optickými vlákny

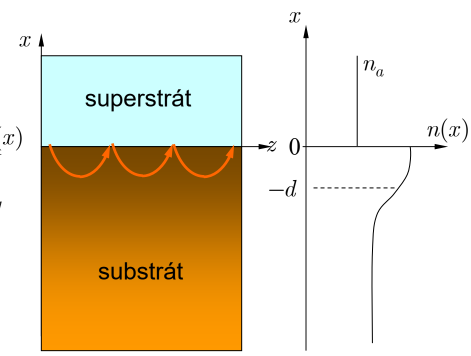
optická vlákna

Základy teorie optických vlnovodů

Vrstvový vlnovod



„Gradientní“ (nehomogenní) vlnovod



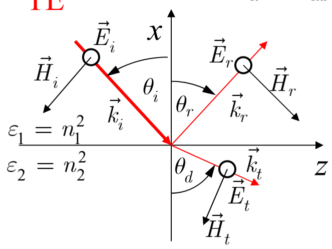
Odraz a lom rovinné vlny na rozhraní dielektrik

Základ: spojitost *tečných složek intenzit* elektrického i magnetického pole

$$\vec{E}_\alpha = E_{\alpha 0}\vec{y}^0 \exp(i\vec{k}_\alpha \cdot \vec{r} \cancel{-i\omega t}) \qquad \vec{H}_\alpha = H_{\alpha 0}\vec{y}^0 \exp(i\vec{k}_\alpha \cdot \vec{r} \cancel{-i\omega t})$$

$$k_\alpha = k_{\alpha x}\vec{x}^0 + k_{\alpha z}\vec{z}^0 = k_0\left(\gamma_\alpha \vec{x}^0 + N_\alpha \vec{z}^0\right)$$

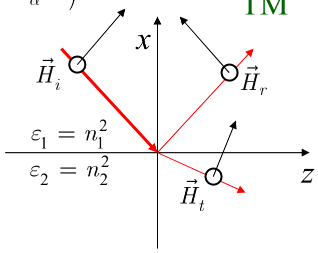
TE



$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}$$

Rozhraní: $x = 0$

TM



$$\vec{H}_{\alpha 0} = \frac{1}{\omega\mu_0}\vec{k}_\alpha \times \vec{E}_{\alpha 0}; \quad H_{\alpha z} = \frac{k_{\alpha x}}{\omega\mu_0}E_{\alpha 0} \qquad \vec{E}_{\alpha 0} = -\frac{1}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_\alpha}\vec{k}_\alpha \times \vec{H}_{\alpha 0}; \quad E_{\alpha z} = -\frac{k_{\alpha x}}{\omega\varepsilon_0\varepsilon_\alpha}H_{\alpha 0}$$

Spojitost E_y při $x = 0 : E_{i0}\exp\left(ik_{iz}z\right) + E_{r0}\exp\left(ik_{rz}z\right) = E_{t0}\exp\left(ik_{tz}z\right)$

Důsledek: $\boxed{\begin{array}{l} k_{iz} = k_{rz} = k_{tz}, \\ N_i = N_r = N_t = N \end{array}}$ $\quad \boxed{N = n_1 \sin\theta_i = n_1 \sin\theta_r = n_2 \sin\theta_t}$

$$\left|\vec{k}_\alpha\right| = k_0 n_\alpha, \quad \gamma_\alpha = \sqrt{n_\alpha^2 - N^2}$$

Odraz a lom rovinné vlny na rozhraní dielektrik: Fresnelovy vzorce pro TE polarizaci

spojitost E_y pro $x = 0$: $\quad E_{i0} + E_{r0} = E_{t0},$

spojitost H_z pro $x = 0$: $\quad k_{ix}E_{i0} + k_{rx}E_{r0} = k_{tx}E_{t0}.$

neboli

$$E_{i0} + E_{r0} = E_{t0},$$

$$-\sqrt{n_1^2 - N^2}E_{i0} + \sqrt{n_1^2 - N^2}E_{r0} = -\sqrt{n_2^2 - N^2}E_{t0}. \quad (N = n_1 \sin\theta_i)$$

Řešením soustavy pro E_{r0} a E_{t0} je

$$R^{TE} = \frac{E_{r0}}{E_{i0}} = \frac{\sqrt{n_1^2 - N^2} - \sqrt{n_2^2 - N^2}}{\sqrt{n_1^2 - N^2} + \sqrt{n_2^2 - N^2}},$$

$$T^{TE} = \frac{E_{t0}}{E_{i0}} = \frac{2\sqrt{n_1^2 - N^2}}{\sqrt{n_1^2 - N^2} + \sqrt{n_2^2 - N^2}}.$$

Odraz a lom rovinné vlny na rozhraní dielektrik: Fresnelovy vzorce pro TM polarizaci

spojitost H_y pro $x = 0$: $\quad H_{i0} + H_{r0} = H_{t0}$,

spojitost E_z pro $x = 0$: $\quad \frac{k_{ix}}{n_1^2} H_{i0} + \frac{k_{rx}}{n_1^2} H_{r0} = \frac{k_{tx}}{n_2^2} H_{t0}$.

$$H_{i0} + H_{r0} = H_{t0},$$

neboli $\quad -\frac{\sqrt{n_1^2 - N^2}}{n_1^2} H_{i0} + \frac{\sqrt{n_1^2 - N^2}}{n_1^2} H_{r0} = -\frac{\sqrt{n_2^2 - N^2}}{n_2^2} H_{t0}$. $\quad (N = n_1 \sin\theta_i)$

Řešením soustavy pro H_{r0} a H_{t0} je

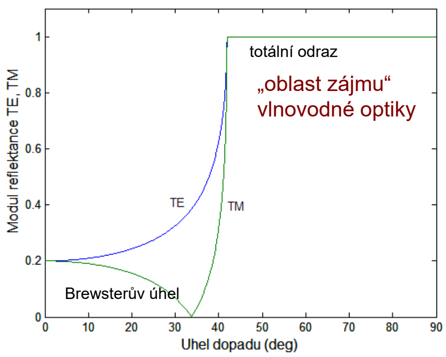
$$R^{TM} = \frac{H_{r0}}{H_{i0}} = \frac{\dfrac{\sqrt{n_1^2 - N^2}}{n_1^2} - \dfrac{\sqrt{n_2^2 - N^2}}{n_2^2}}{\dfrac{\sqrt{n_1^2 - N^2}}{n_1^2} + \dfrac{\sqrt{n_2^2 - N^2}}{n_2^2}},$$

$$T^{TM} = \frac{H_{t0}}{H_{i0}} = \frac{2\dfrac{\sqrt{n_1^2 - N^2}}{n_1^2}}{\dfrac{\sqrt{n_1^2 - N^2}}{n_1^2} + \dfrac{\sqrt{n_2^2 - N^2}}{n_2^2}}.$$

5

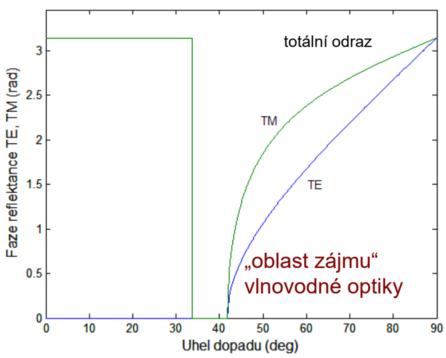
Vlastnosti činitele odrazu

$N = n_1 \sin\theta_i \geq n_2, \quad \sin\theta_i \geq n_2 / n_1,$



$$R^{TE} = \frac{\sqrt{n_1^2 - N^2} - i\sqrt{N^2 - n_2^2}}{\sqrt{n_1^2 - N^2} + i\sqrt{N^2 - n_2^2}} = e^{i\arg\left\{R^{TE}\right\}},$$

$$\arg\left\{R^{TE}\right\} = -2\arctan\frac{\sqrt{N^2 - n_2^2}}{\sqrt{n_1^2 - N^2}}.$$



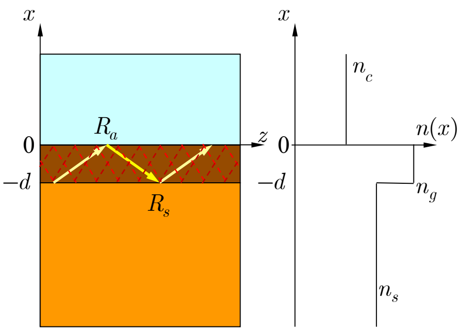
$$R^{TM} = \frac{\dfrac{\sqrt{n_1^2 - N^2}}{n_1^2} - i\dfrac{\sqrt{N^2 - n_2^2}}{n_2^2}}{\dfrac{\sqrt{n_1^2 - N^2}}{n_1^2} + i\dfrac{\sqrt{N^2 - n_2^2}}{n_2^2}} = e^{i\arg\left\{R^{TM}\right\}},$$

$$\arg\left\{R^{TM}\right\} = -2\arctan\left[\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \frac{\sqrt{N^2 - n_2^2}}{\sqrt{n_1^2 - N^2}}\right].$$

V oblasti totálního odrazu je modul reflektance roven 1 a fáze závisí na úhlu dopadu.

6

Disperzní rovnice planárního vrstvového vlnovodu



Podmínka příčné rezonance
(podmínka selfkonzistence):

rovinná vlna se po dvou průchodech vrstvou a dvou odrazech od rozhraní musí „zreprodukovat“ i co do fáze:

$$e^{i(k_x d + k_z L)} R_a e^{i(k_x d + k_z L)} R_s \stackrel{!}{=} e^{2ik_z L}$$

$$R_a R_s e^{2ik_x d} = 1$$

$$2k_x d + \arg R_s + \arg R_a = 2\pi m$$

$$\nu = \begin{cases} 0, & \text{TE} \\ 1, & \text{TM} \end{cases}$$

$$k_0 d\sqrt{n_g^2 - N^2} = \arctan\left[\left(\frac{n_g}{n_s}\right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N^2 - n_s^2}{n_g^2 - N^2}}\right] + \arctan\left[\left(\frac{n_g}{n_a}\right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N^2 - n_c^2}{n_g^2 - N^2}}\right] + m\pi,$$

Disperzní diagram planárního vlnovodu

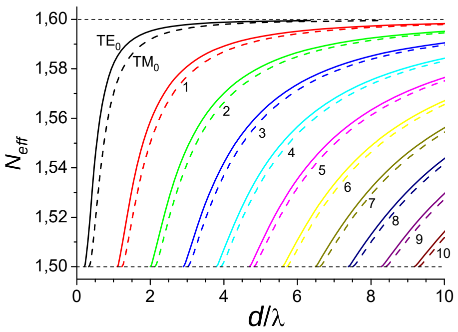
Nesymetrický vlnovod

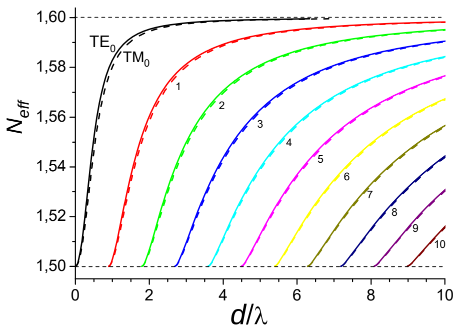
$$n_c < n_s < n_g$$

Počet vidů:

$$M^{TM} \le M^{TE} \le M^{TM} + 1$$

$$N_m^{TE} > N_m^{TM}$$





Symetrický vlnovod

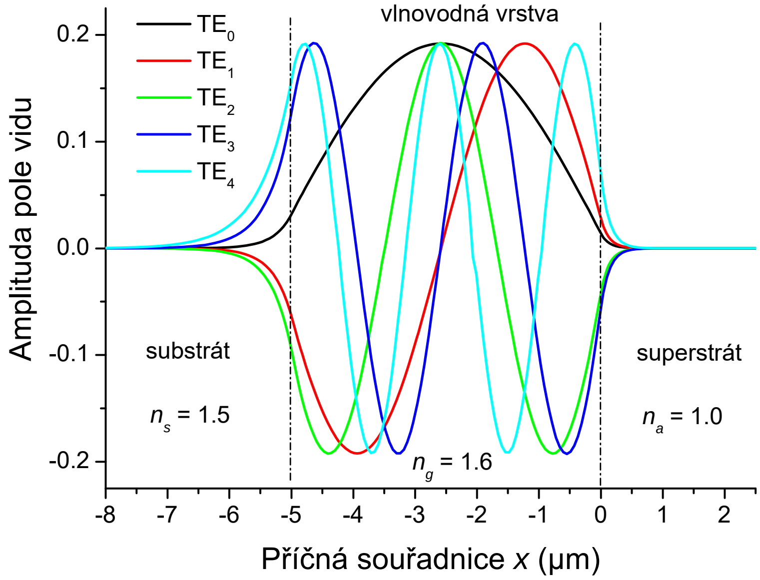
$$n_c = n_s < n_g$$

Počet vidů: $M^{TE} = M^{TM}$

$$N_m^{TE} \ge N_m^{TM}$$

vlnovodový dvojlom je menší

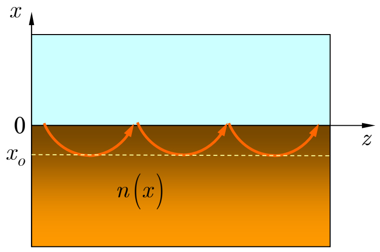
Rozložení pole vidů vrstvového vlnovodu



9

Disperzní rovnice *gradientního vlnovodu* ve WKB aproximaci

Paprskový model šíření vlny



$$k_x \to k_x(x) \approx k_0\sqrt{n^2(x) - N^2}$$

$$k_x d \to k_0 \int_{x_0}^{0} \sqrt{n^2(x) - N^2}\, dx$$

Bod obratu: $k_x(x_0) = 0 \;\Rightarrow\; n(x_0) = N$

$$R_s \to \exp(-i\pi/2)$$

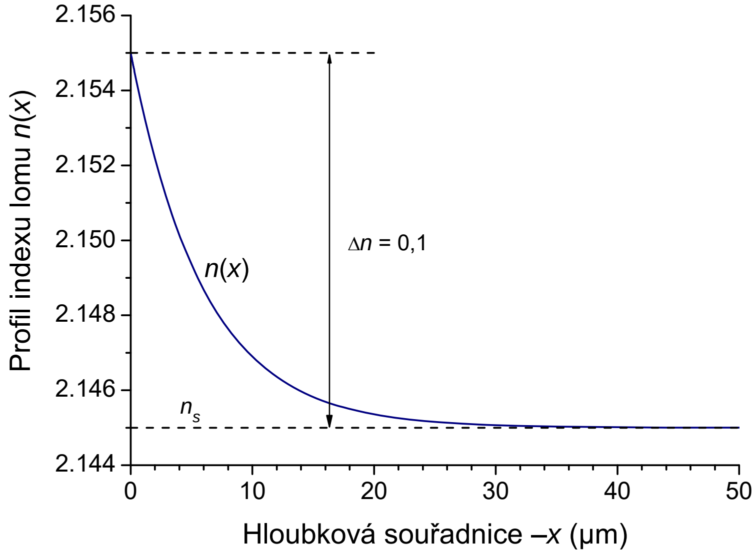
$$\nu = \begin{cases} 0, & \text{TE} \\ 1, & \text{TM} \end{cases}$$

$$k_0 \int_{x_0(N)}^{0} \sqrt{n^2(x) - N^2}\, dx = \arctan\left[\left(\frac{n_g}{n_c}\right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N^2 - n_c^2}{n_g^2 - N^2}}\right] + \left(m + \frac{1}{4}\right)\pi,$$

$$k_0 d\sqrt{n_g^2 - N^2} = \arctan\left[\left(\frac{n_g}{n_c}\right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N^2 - n_c^2}{n_g^2 - N^2}}\right] + \arctan\left[\left(\frac{n_g}{n_s}\right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N^2 - n_s^2}{n_g^2 - N^2}}\right] + m\pi,$$

10

Příklad: Vlnovod s exponenciálním profilem indexu lomu



Rozložení pole H_y TM vidů gradientního vlnovodu