

Integrovaná optika

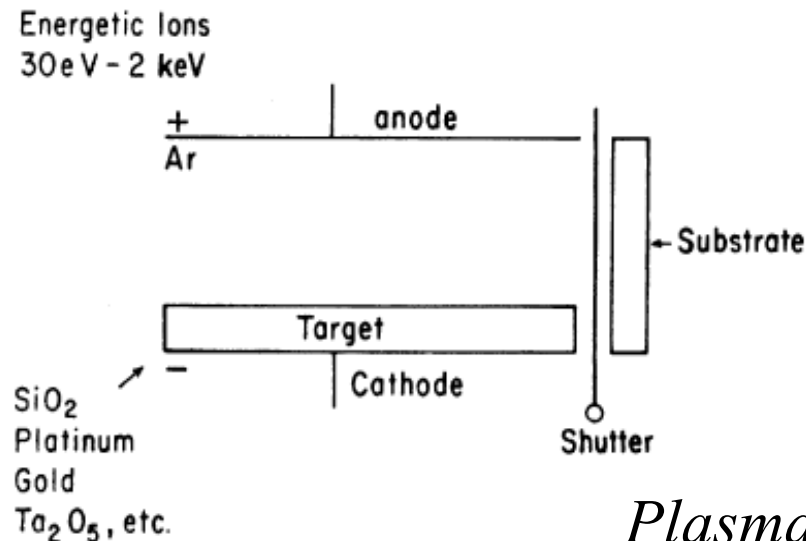
Zimný semester 2011

Optické vlnovody

- Štruktúry navrhnuté tak, aby obmedzili optickú vlnu v dobre definovanej oblasti a umožnili jej šírenie sa
- Obmedzenie vlny v priestore je dané zmenou dielektrickej konštanty
- Planárne (1-D)
- Kanáľkové (2-D)
- Cylindrické (optické vlákna),...

Optické vlnovody

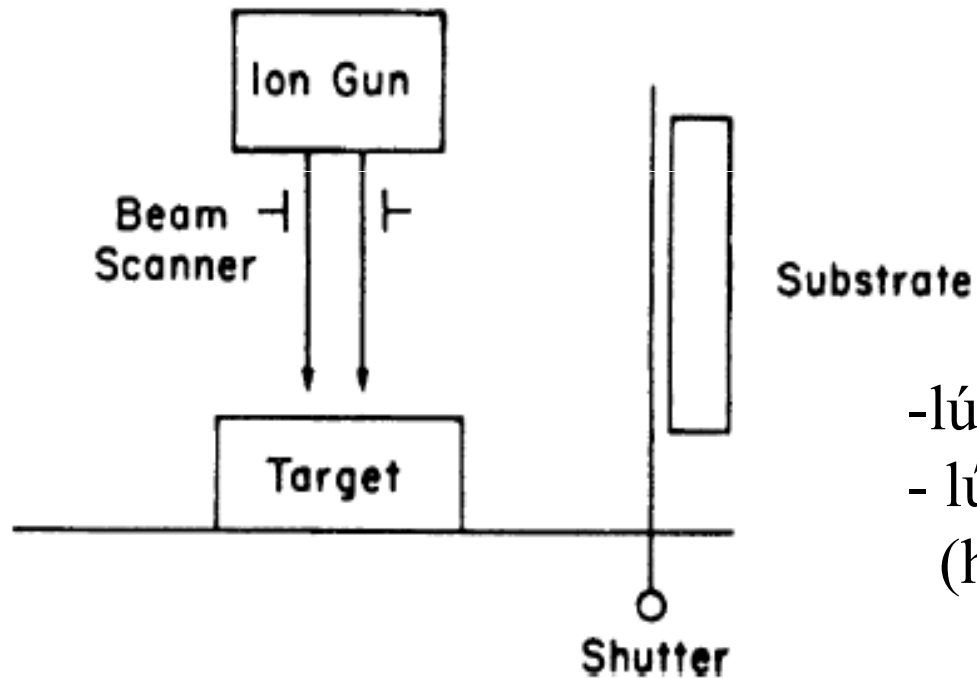
- Technika výroby:
 1. **Nanášanie tenkých vrstiev** (najstaršia a najefektívnejšia, vhodná pre amorfné materiály)
 - *naprašovanie dielektrických vrstiev*



Plasma discharge method

Optické vlnovody – výroba

- *ion beam sputtering*



- lúč zasiahne len terč
- lúč skenuje terč
(homogénne naprašovanie)

Optické vlnovody – výroba

- *nanášanie z roztokov*

- vysušením roztoku vznikne tenká dielektrická vrstva

(kvapka roztoku na rotujúcom substráte, ponorenie substrátu do roztoku a pomalé vyťahovanie...)

- lacné, nenáročné na vybavenie

- horšia čistota materiálu a uniformita

Material	Solvent
Photoresist [12]	Acetone
Epoxy [13]	Proprietary Compounds
Polymethylmethacrylate [14]	Chloroform, Toluene
Polyurethane [15]	Xylene
Polyimide [16]	
Spun-on glass (SOG) [17]	

Optické vlnovody – výroba

2. Substitučné dopovanie atómami

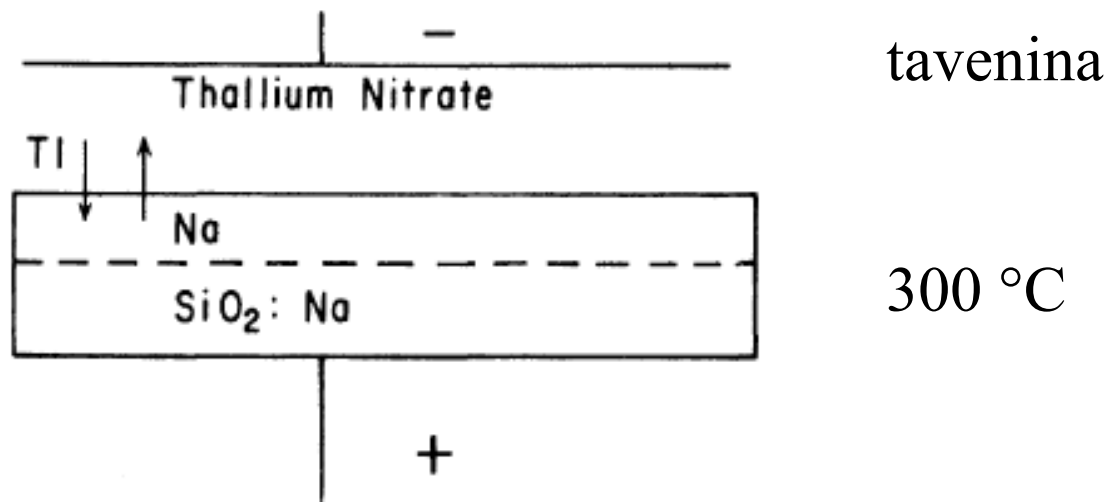
- nanášanie tenkých vrstiev nie je vhodná metóda pre kryštalické materiály (vytvorená vrstva nie je monokryštalická a nemá zhodnú štruktúru so substrátom)
- dopovanie základného materiálu prvkami, ktoré substitučne nahrádzajú niektoré atómy v pôvodnej mriežke vedie k vytvoreniu oblastí so zmeneným indexom lomu

Optické vlnovody – výroba

- *difúzia dopantov*
- substrát je vložený do pece za prítomnosti zdroja atómov dopujúcich prvkov (napr. Ti a LiNbO₃, Cd a Se v ZnS, ...)
- metóda je vhodná aj pre sklá a polyméry

Optické vlnovody – výroba

- *migrácia a výmena iónov*



- v LiNbO_3 H^+ nahrádza Li

Optické vlnovody – výroba

- *iónová implantácia*
- urýchlené ióny požadovaných dopantov dopadajú na substrát
- hĺbka vniku iónov do substrátu závisí od ich hmotnosti, kinetickej energie, substrátu a jeho orientácie
- často za iónovou implantáciou musí nasledovať tepelné ošetrenie substrátu
- charakteristika vlnovodu je podobná ako pri vlnovode vyrobenom difúziou, avšak je tu väčšia kontrola koncentračného profilu

Optické vlnovody – výroba

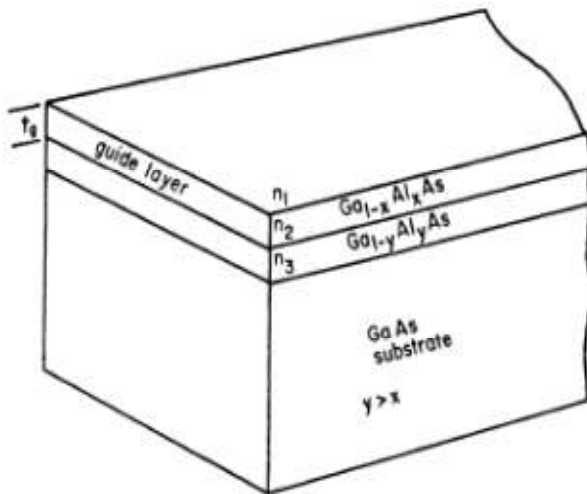
3. Zmena koncentrácie voľných nosičov náboja

- v polovodičoch oblasť s voľnými nosičmi náboja má menší index lomu
- ochudobnená vrstva sa správa ako vlnovod
- GaAs, GaP, ZnTe, ZnSe – bombardovanie protónmi a následné tepelné ošetrenie

Optické vlnovody – výroba

4. Epitaxný rast

- na substráte vyrastie vrstva mierne pozmeneného základného materiálu



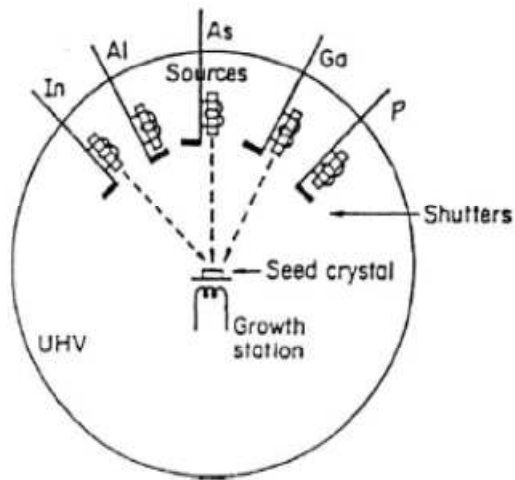
LPE – liquid phase epitaxy

VPE – vapor phase epitaxy

MBE – molecular beam epitaxy

Optické vlnovody – výroba

- *molecular beam epitaxy*



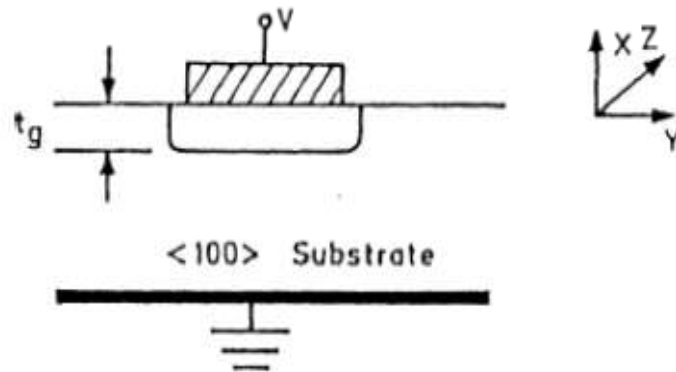
- atómy a molekuly urýchlené tepelne
- ultra-high-vacuum chamber
- excelentná kontrola čistoty, dopovania a hrúbky oproti LPE

Optické vlnovody – výroba

- *Metal-Organic Chemical Vapor Deposition*
- (MOCVD aj MOVPE – metal-organic-vapor-phase epitaxy)
- substitučné atómy sú k substrátu privádzané v plynnej forme (substrát zohriaty na cca 750 °C)
- nákladná filtrácia a kontrola plynov, bezpečnosť
- vynikajúca kontrola dopovania a hrúbky vrstvy

Optické vlnovody – výroba

5. Elektrooptický jav



Zmena indexu lomu vyvolaná elektrickým poľom – prepínače, modulátory

Elektrické pole mení aj veľkosť vlnovodu -

Optické vlnovody – výroba

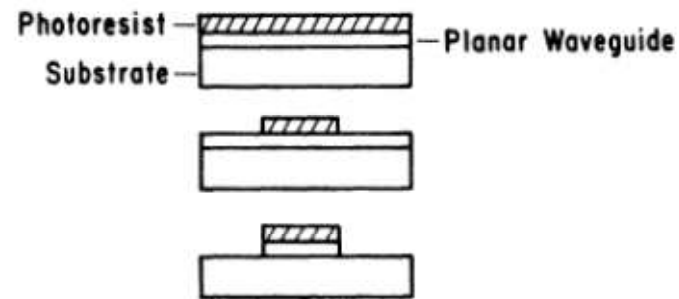
6. Oxidácia

- vývoj optických vlnovodov na substrátoch Si (snaha o prepojenie elektronických IO s optickými spojeniami)
- snaha o vytvorenie vlnovodov tohto typu aj v polovodičoch III-V

Optické vlnovody – výroba

7. Leptanie

- pokrytie substrátu fotorezistom
- maska definujúca tvar a rozmery vlnovodu
- expozícia fotorezistu UV alebo x-ray
- vyvolanie fotorezistu (leptanie – wet-etching, ion-beam-sputter etching)



Optické vlnovody – výroba

8. Priamy zápis lúčom

- elektrónový lúč
- fokusovaný zväzok iónov
- fokusovaný laserový zväzok

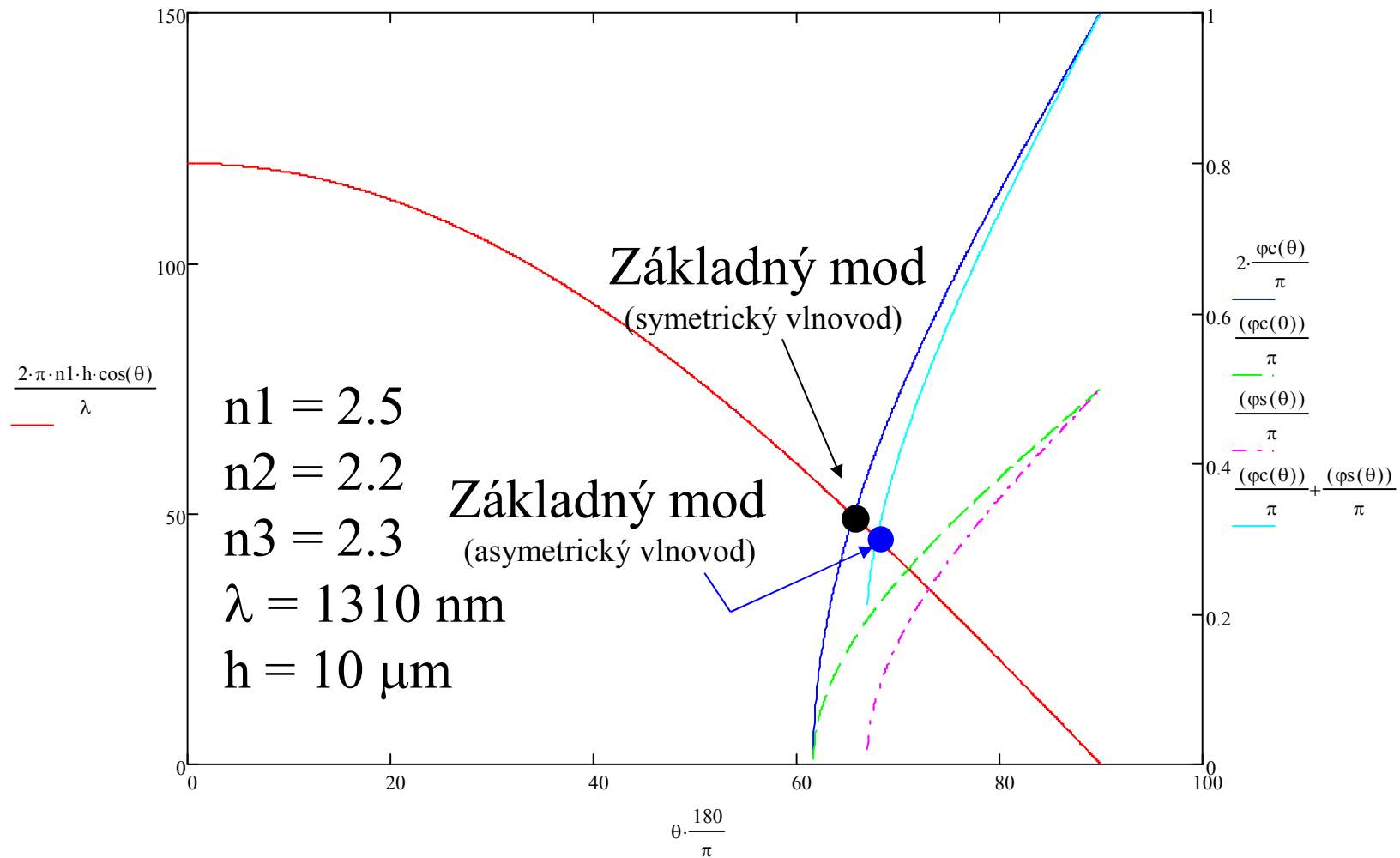
Optické vlnovody

- Využitie:
- Optické komunikácie - optické vlákno (prenos „bod – bod“)
- Vlnovodné modulátory svetla (svetelná vlny šíriaca sa vlnovodom je ovplyvnená vhodným fyzikálnym javom)
- Zosilňovače (lasery)

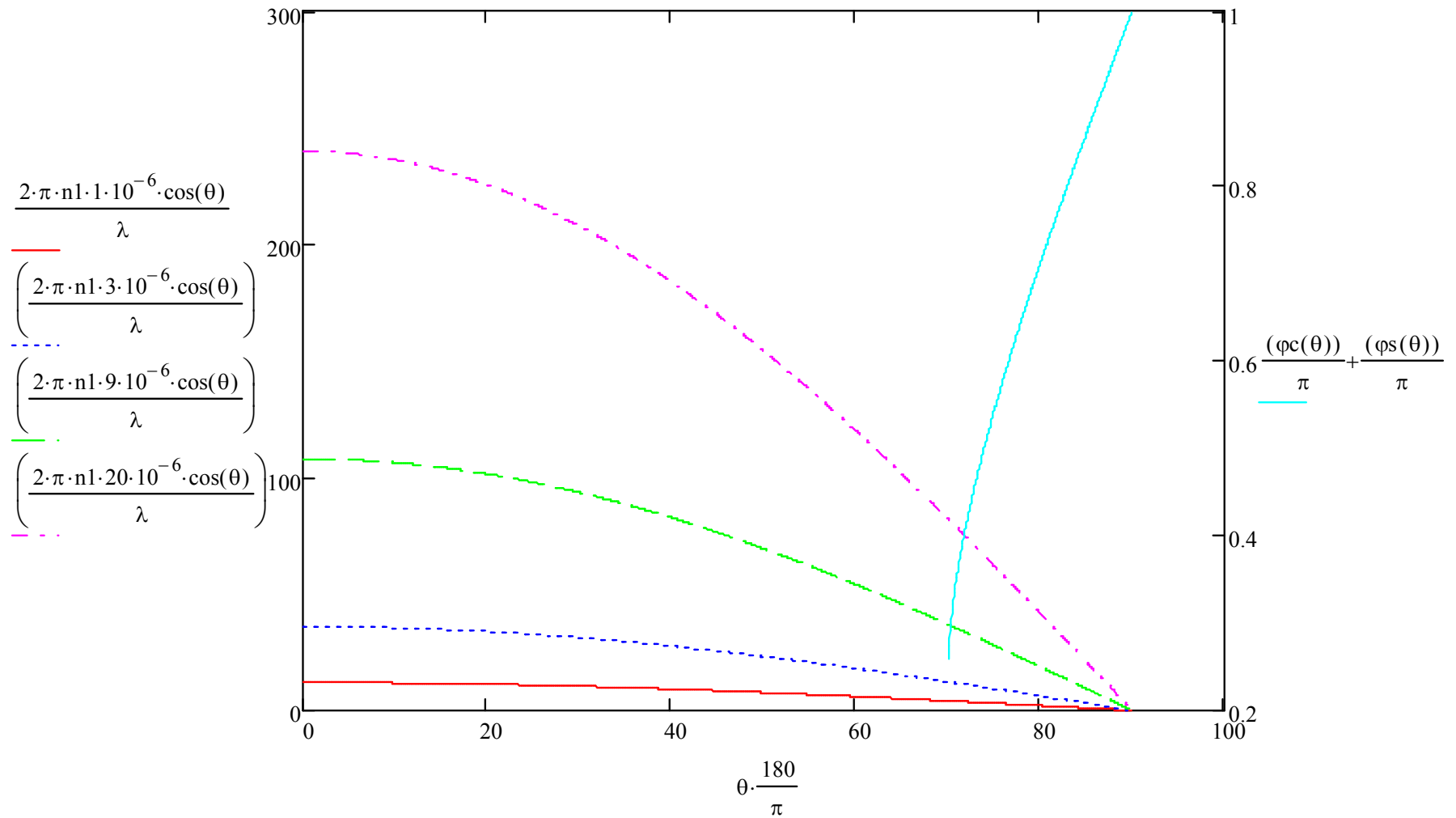
Planárny vlnovod

- Dva prístupy:
 1. Popis pomocou zákonov geometrickej optiky.
 2. Vlnový popis (riešenie vlnovej rovnice upravenej pre tento prípad).

Planárny vlnovod



Planárny vlnovod



Planárny vlnovod

- Popis pomocou vlnovej optiky
- Predpokladajme, že polia v móde šíriacom sa vo vlnovode v smere osi z môžeme vyjadriť takto:

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}(x, y) \cdot e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1.1)$$

$$\vec{H}(x, y, z, t) = \vec{H}(x, y) \cdot e^{j(\omega t - \beta z)} \quad (1.2)$$

Planárny vlnovod

- Uvažujme planárny vlnovod, v ktorom sa index lomu mení v smere osi x a nemení sa v smere osi y .

- Potom môžeme predpokladať, že: $\frac{\partial}{\partial y} = 0$

- Dosadením funkcií (1.1) a (1.2) do Maxvellových rovníc dostaneme

sústavu rovníc pre

jednotlivé zložky vektorov \vec{E}, \vec{H}

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{array} \right.$$

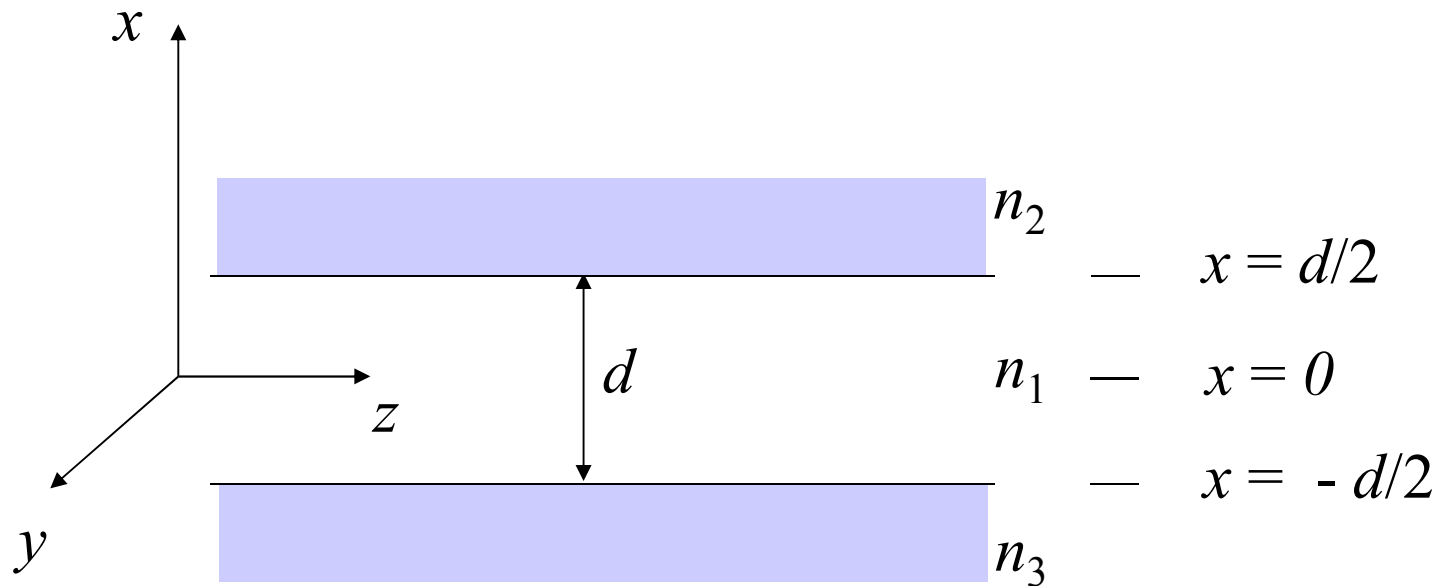
Planárny vlnovod

- *TE* vlny (E_y, H_x, H_z):
$$\beta E_y = -\mu\omega H_x$$
$$-j\beta H_x - \frac{\partial H_z}{\partial x} = j\varepsilon\omega E_y$$
$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -j\mu\omega H_z$$
- *TM* vlny (E_x, E_z, H_y):
$$\beta H_y = \varepsilon\omega E_x$$
$$j\beta E_x + \frac{\partial E_z}{\partial x} = j\mu\omega H_y$$
$$\frac{\partial H_y}{\partial x} = j\varepsilon\omega E_z$$

Planární vlnovod

- Uvažujme symetrický vlnovod:

$$n_1 > n_2 = n_3,$$



Planárny vlnovod

- Z vyjadrení zložiek pre *TE* a *TM* vlny dostaneme rovnice popisujúce *TE* a *TM* polarizované vlny

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) \cdot E_y = 0$$

$$\frac{\partial^2 H_y}{\partial x^2} + (\omega^2 \varepsilon \mu - \beta^2) \cdot H_y = 0$$

Planárny vlnovod

- Uvažujme TE vlny
- Predchádzajúcu rovnicu pre E_y prepíšeme využitím vzťahu

$$\omega\sqrt{\varepsilon\mu} = nk_0$$

do tvaru:

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} + (n^2 k_0^2 - \beta^2) \cdot E_y = 0$$

Planárny vlnovod

- Ak $n^2 k_0^2 > \beta^2$, potom riešenie rovnice bude mať tvar:

$$E_y \approx e^{jk_x x}, \quad k_x = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}$$

- Ak $n^2 k_0^2 < \beta^2$, potom riešenie rovnice bude mať tvar:

$$E_y \approx e^{-\alpha x}, \quad \alpha = \sqrt{\beta^2 - n_2^2 k_0^2}$$

Planárny vlnovod

- Pre nami uvažovaný vlnovod teda riešenia budú:

$$E_y = \begin{cases} A \cdot e^{\alpha x} & x \leq -d/2 \\ B \cdot \cos(k_x x) + C \cdot \sin(k_x x) & -d/2 \leq x \leq d/2 \\ D \cdot e^{-\alpha x} & x \geq d/2 \end{cases}$$

- Z podmienky rovnosti zložiek a ich derivácií na rozhraní dostaneme sústavu rovníc, ktoré sa dajú upraviť na transcendentné rovnice:

$$\frac{k_x d}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{k_x d}{2}\right) = \frac{\alpha d}{2} \qquad \frac{k_x d}{2} \cdot \operatorname{cot} g\left(\frac{k_x d}{2}\right) = \frac{-\alpha d}{2}$$

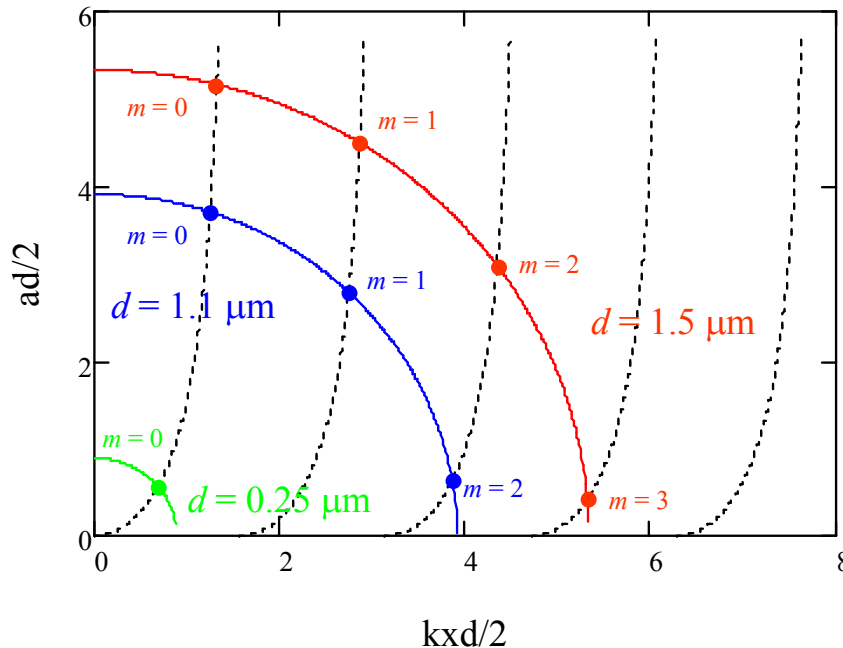
Planárny vlnovod

- Riešme rovnice graficky pre konkrétne hodnoty n_1 , n_2 , d a λ :

$$n_1 = 2.2$$

$$n_2 = 2.0$$

$$\lambda = 810 \text{ nm}$$



Krivky pretínajú vodorovnú os v hodnotách $m\pi/2$, takže hrúbka vlnovodu pri ktorej sa môže m -tý mód šíriť je

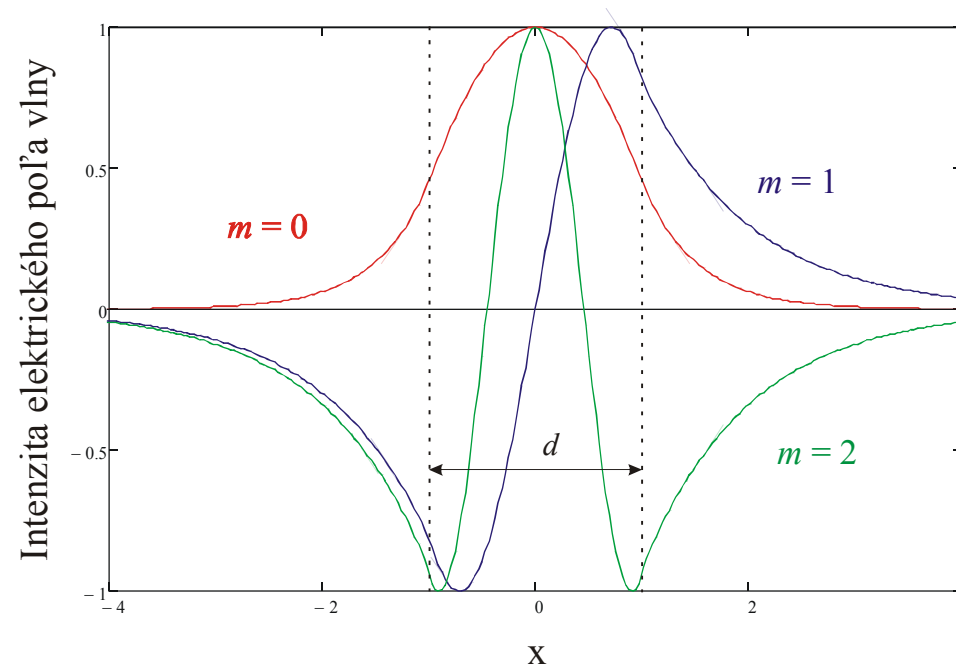
$$R(d_c) = m\pi/2$$

a pre hrúbku vlnovodu máme

$$d_c = \frac{1}{2} \cdot \frac{m \cdot \lambda}{\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

Planárny vlnovod

- Po nájdení konštant A, B, C, D vo vyjadrení pre E_y môžeme nakresliť módový profil.
- Typický módový profil pre TE vlnu vyzerá takto:



Teória viazaných vidov

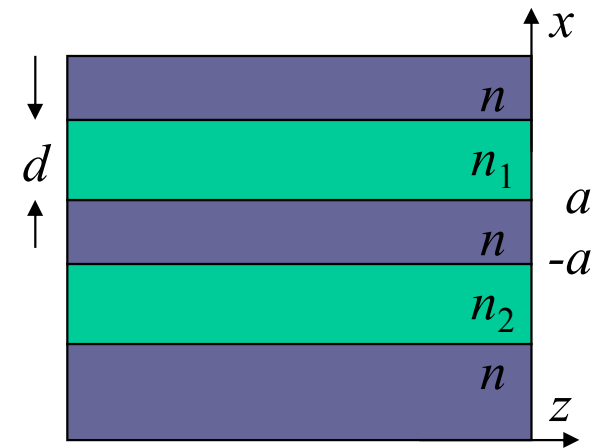
- Vo vlnovode sa môže mód počas šírenia transformovať na iný mód.
- Pre popis takýchto javov bola vypracovaná teória viazaných vidov (*Coupled Mode Theory*).
- Je založená na tzv. „teórii porúch“, podľa ktorej k transformácii vidu (módu) dôjde v dôsledku existencie istej poruchy vo vlnovode.
- Pomocou *CMT* sa veľmi často popisuje a analyzuje činnosť rôznych väzobných členov.

Teória viazaných vidov

- Väzba medzi vlnovodmi:
 - ak sú dve polia dostatočne blízko seba tak, že sa prekrývajú (evanescentné vlny), je možné prenášať medzi vlnovodmi optický výkon

Teória viazaných vidov

Uvažujme 2 paralelné planárne vlnovody s hrúbkou d , vzdialené od seba o $2a$, s indexami lomu n_1 a n_2 obklopené prostredím s indexom lomu n . Analyzujme pomocou *CMT*.



Predpoklad:

- módy každého z vlnovodov (v neprítomnosti toho druhého) ostávajú približne rovnaké, teda $E_{y1}(x)\exp(-i\beta_1z)$ a $E_{y2}(x)\exp(-i\beta_2z)$
- väzba vplýva na amplitúdu týchto módov a neovplyvňuje ich priečne rozloženie alebo konštanty šírenia sa

Teória viazaných vidov

- amplitúdy módov vo vlnovode „1“ označme $A_1(z)$ a vo vlnovode „2“ ako $A_2(z)$.
- predpokladajme, že tieto amplitúdy sa so súradnicou z menia pomaly.
- pre polia vo vlnovodoch môžeme napísať:

$$E_1(x, z) = A_1(z)E_y(x) \exp(-i\beta_1 z) = A_1(z) \cdot e_1(x, z)$$

$$E_2(x, z) = A_2(z)E_y(x) \exp(-i\beta_2 z) = A_2(z) \cdot e_2(x, z)$$

Teória viazaných vidov

- prítomnosť vlnovodu „2“ možno považovať za poruchu v médiu s indexom lomu n vo forme vrstvy s indexom lomu n_2 a šírkou d vo vzdialenosti $2a$.
- oblasť so zmeneným indexom lomu $(n_2 - n)$ a pole vlny E_2 sú zdrojom poruchovej polarizácie P .

$$P = (\varepsilon_2 - \varepsilon)E_2 = \varepsilon_0(n_2^2 - n^2)E_2$$

- z MR zahrňajúcich polarizáciu prostredia dostaneme vlnovú rovnicu v tvare:

$$\nabla^2 E - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$$

Teória viazaných vidov

Označme komplexnú amplitúdu $S_1 = -\mu_0 \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$

$$S_1 = \mu_0 \omega^2 P = (n_2^2 - n^2) k_0^2 E_2 = (k_2^2 - k^2) E_2$$

$$S_2 = \mu_0 \omega^2 P = (n_1^2 - n^2) k_0^2 E_1 = (k_1^2 - k^2) E_1$$

Helmholtzove rovnice v prítomnosti zdroja:

$$(\nabla^2 + k^2) E_1 = -S_1 = -(k_2^2 - k^2) E_2 \quad \text{vlnovod „1“ so zdrojom v poli vo vlnovode „2“}$$

$$(\nabla^2 + k^2) E_2 = -S_2 = -(k_1^2 - k^2) E_1 \quad \text{vlnovod „2“ so zdrojom v poli vo vlnovode „1“}$$

Teória viazaných vidov

- Keďže $e_1(x,z)$ a $e_2(x,z)$ vyhovujú Helmholtzovej rovnici, môžeme písať:

$$(\nabla^2 + k_1^2)e_1 = 0; (\nabla^2 + k_2^2)e_2 = 0$$

$$(\nabla^2 + k_1^2)E_1 = (\nabla^2 + k_1^2)A_1(z)e_1(x, z)$$

$$(\nabla^2 + k_2^2)E_2 = (\nabla^2 + k_2^2)A_2(z)e_2(x, z)$$

Teória viazaných vidov

- Skombinovaním predchádzajúcich foriem rovníc a zanedbaním derivácií vyšších rádov dostaneme:

$$2 \frac{dA_1}{dz} \frac{de_1}{dz} = -(k_2^2 - k^2) A_2 e_2 \quad 2 \frac{dA_2}{dz} \frac{de_2}{dz} = -(k_1^2 - k^2) A_1 e_1$$

- Úpravou týchto rovníc dostaneme tzv. rovnice viazaných vidov

Teória viazaných vidov

- Rovnice viazaných vidov (*coupled mode equations*)

$$\frac{dA_1}{dz} = -iC_{21}e^{i\Delta\beta z} A_2(z) \quad C_{21} = \frac{(n_2^2 - n^2)k_0^2}{2\beta_1} \int_a^{a+d} u_1(x)u_2(x)dx$$
$$\frac{dA_2}{dz} = -iC_{12}e^{-i\Delta\beta z} A_1(z) \quad C_{12} = \frac{(n_1^2 - n^2)k_0^2}{2\beta_2} \int_{-a-d}^{-a} u_2(x)u_1(x)dx$$

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$$

Teória viazaných vidov

- Predpokladajme $A_1(0) = 1, A_2(0) = 0$
- Riešenie rovnice viazaných vidov potom bude

$$A_1(z) = A_1(0) \exp\left(\frac{i\Delta\beta z}{2}\right) \left(\cos \gamma z - \frac{i\Delta\beta}{2\gamma} \sin \gamma z\right)$$

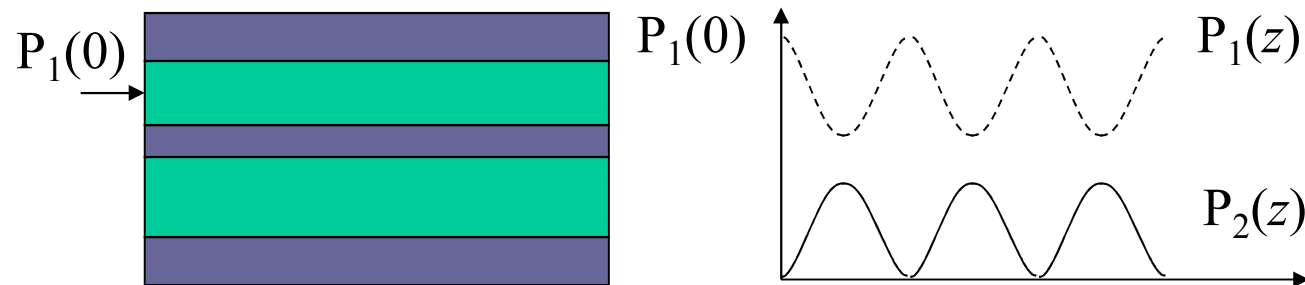
$$A_2(z) = A_1(0) \frac{C_{12}}{i\gamma} \exp\left(-\frac{i\Delta\beta z}{2}\right) \sin \gamma z$$

$$\gamma^2 = (\Delta\beta/2)^2 + C^2$$

$$C = \sqrt{C_{12}C_{21}}$$

Teória viazaných vidov

- Optický výkon: $P_1(z) \propto |A_1(z)|^2$; $P_2(z) \propto |A_2(z)|^2$



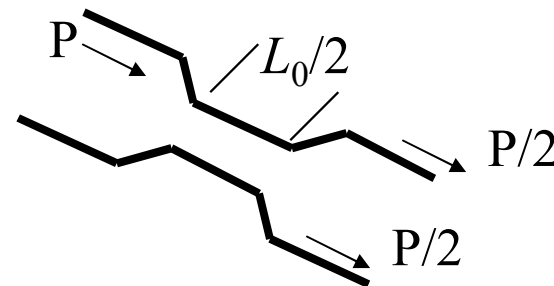
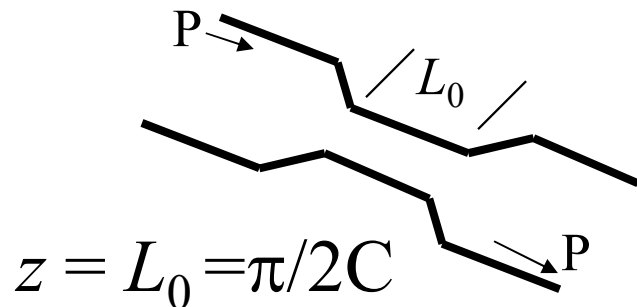
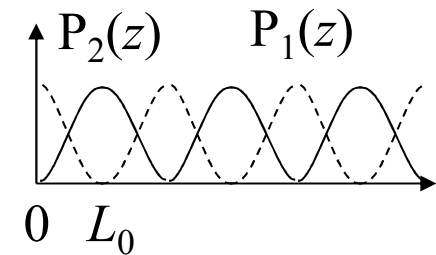
Optický výkon sa periodicky vymieňa medzi vlnovodmi s periódou $2\pi/\gamma$.

Teória viazaných vidov

- Ak sú vlnovody rovnaké ($n_1 = n_2, \beta_1 = \beta_2$), potom $\Delta\beta = 0$ a obidva vlnovody sú fázovo prispôsobené.

$$A_1(z) = A_1(0) \cos \gamma z \quad A_2(z) = -iA_1(0) \sin \gamma z$$

$$P_1(z) = P_1(0) \cos^2 Cz \quad ; \quad P_2(z) = P_1(0) \sin^2 Cz$$



$$z = L_0/2$$

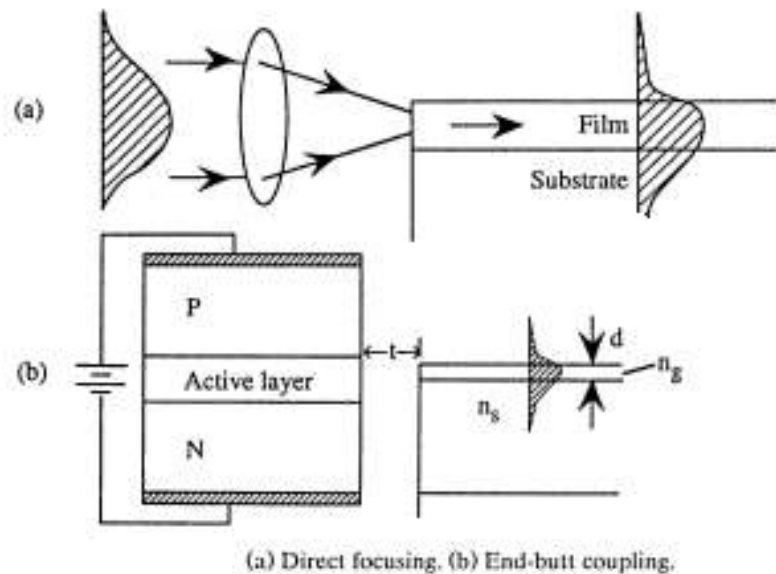
Optický delič
50/50

Naviazanie a vyviazanie optického žiarenia

- **Priama väzba** - pri ktorej je lúč žiarenia priamo naviazaný na hranu optického vlnovodu .
 1. priama fokusácia (cez šošovku, end -fire)
 2. tesné naviazanie zdroja (end-butt coupling)

Účinnosť prenosu energie optického lúča do vlnovodu bude vysoká ak rozloženie elektrického poľa dopadajúceho žiarenia zodpovedá rozloženiu vo vlnovode.

Naviazanie a vyviazanie optického žiarenia



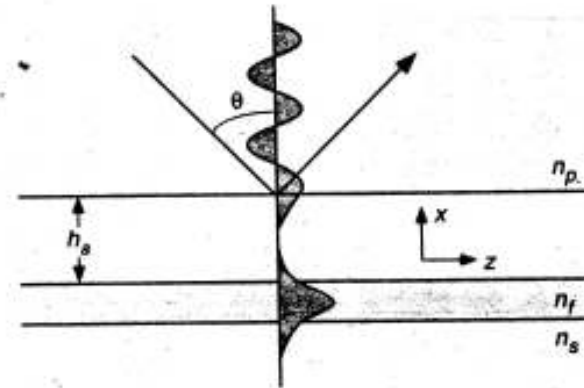
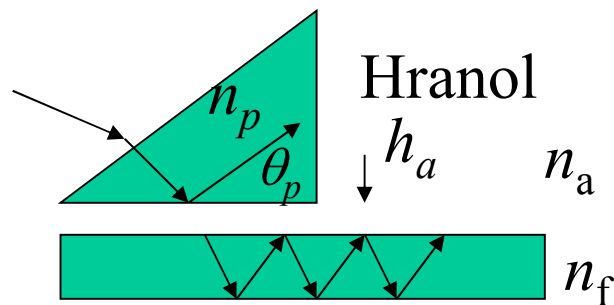
Priama fokusácia: Prakticky sa dosahuje účinnosť naviazania okolo 60% , pretože hrúbka vlnovodnej vrstvy je rádovo $1 \mu\text{m}$ a naviazanie je veľmi kritické.

Tesná väzba: je aplikovateľná pri naviazaní polovodičového lasera do optického vlnovodu, pretože hrúbka aktívnej vrstvy lasera je približne zhodná s hrúbkou vlnovodnej vrstvy.

Účinnosť väzby je najcitlivejšia na posun osi naviazania vo vertikálnom smere (presnosť naviazania vyžaduje posuvy s možnosťou nastavenia v ráde $0.1 \mu\text{m}$. Vzdialenosť väzby lasera a vlnovodu je tiež kritická a musí byť kontrolovaná s presnosťou vlnovej dĺžky naviazaného žiarenia.

Naviazanie a vyviazanie optického žiarenia

- **Hranolový väzobný člen:**



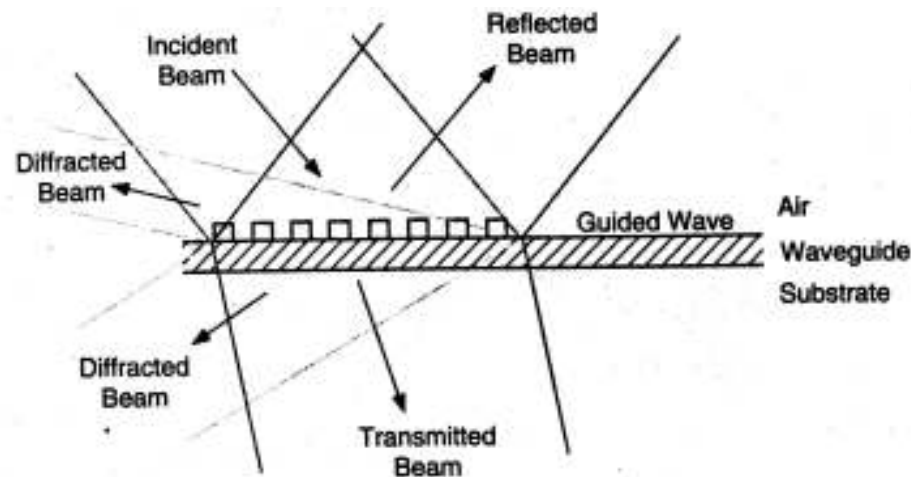
Hranol s indexom lomu $n_p > n_a$ je umiestnený vo vzdialenosti h_a od vlnovodu. θ_p je uhol úplného odrazu vlny vo vnútri hranola. Priečne pole vlny zasahuje mimo hranol a exponenciálne klesá v priestore medzi hranolom a vlnovodom (evanescentná vlna). Pri dostatočne malej vzdialenosti h_a toto pole zasahuje aj do vlnovodu a stáva sa vedeným módom.

Zariadenie je možné použiť aj v opačnom prevedení ako vyvážovací člen.

Naviazanie a vyviazanie optického žiarenia

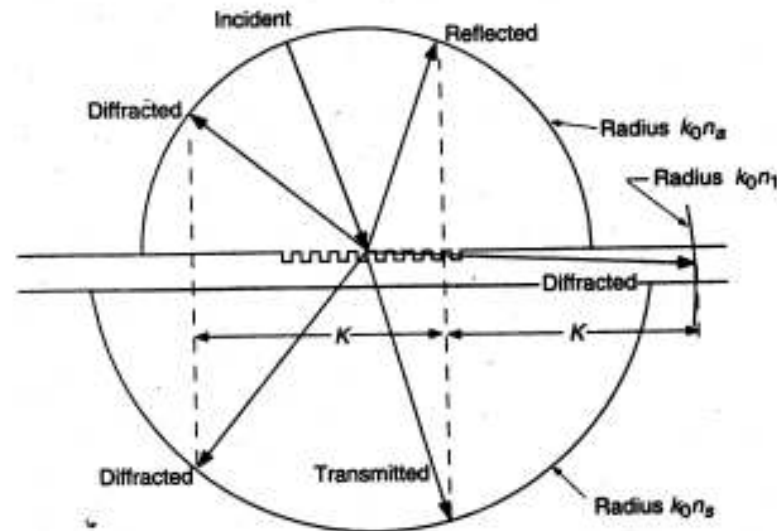
- **Mriežkový väzobný člen:**

Účinok mriežky na dopadajúce optické žiarenie a vlnu šíriacu sa vo vlnovode závisí na perióde a tvare mriežky, vlnovej dĺžke a uhle dopadu žiarenia. Povrchová vlna je v dôsledku periodickej štruktúry mriežky sprevádzaná harmonickými zložkami konštanty šírenia $\beta_\nu = \beta_0 \pm \frac{2\pi\nu}{\Lambda}$ pre $\nu = 0, 1, 2, \dots$, kde Λ je perióda difrakčnej mriežky a $K = \frac{2\pi\nu}{\Lambda}$.



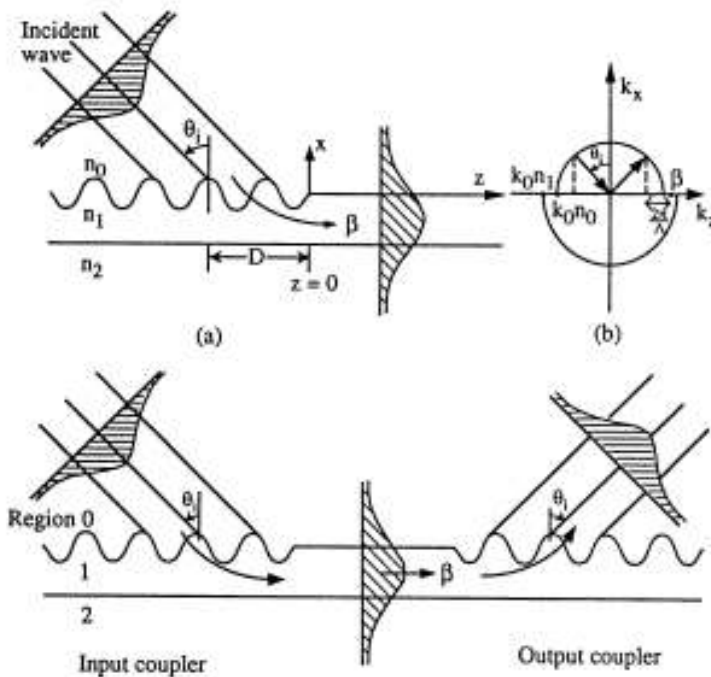
Naviazanie a vyviazanie optického žiarenia (mriežkový väzobný člen)

- K naviazaniu alebo vyviazaniu optického žiarenia dôjde za podmienky že $\beta_v = \beta_{gr}$, pričom β_v je konštanta šírenia módu vzniknutého difrakciou dopadajúcej vlny s konštantou šírenia β_0 a je splnená pre niektorú hodnotu v .



Naviazanie a vyviazanie optického žiarenia (mriežkový väzobný člen)

- Podobne, ak sa v planárnom vlnovode šíri žiarenie v smere osi z , dôjde pri interakcii s mriežkou k vyviazaniu žiarenia dané násobkami K a uhlom θ .



Naviazanie a vyviazanie optického žiarenia

- **Vlnovodné väzby**

Väzby medzi vlnovodmi sa môžu vytvárať ako:

- 1/ Planárna- planárna, kde vrstva druhého vlnovodu sa na časti prekrýva s vrstvami spodného vlnovodu nad sebou a tým dochádza k väzbe medzi nimi
- 2/ Hybridná technológia, kde dva vlnovody za sebou na spoločnom substráte sú prekryté materiálom s indexom lomu blízkym k indexu lomu vlnovodných vrstiev
- 3/ Naviazanie cez mriežku medzi vlnovodmi nad sebou

Naviazanie a vyviazanie optického žiarenia

- **Väzby vlnovod - optické vlákno**

Väzby vlnovod optické vlákno sa realizujú:

- 1/ ako dočasné prechody – cez imerznú kvapalinu
- 2/ cez klinové zakončenie planárneho vlnovodu, ktoré má za následok vyviazanie žiarenia do substrátu
- 3/ Naviazanie cez tunelovaciú vrstvu pritlačením optického vlákna ku klinovému zakončeniu planárneho vlnovodu.

Mriežky vo vlnovodoch

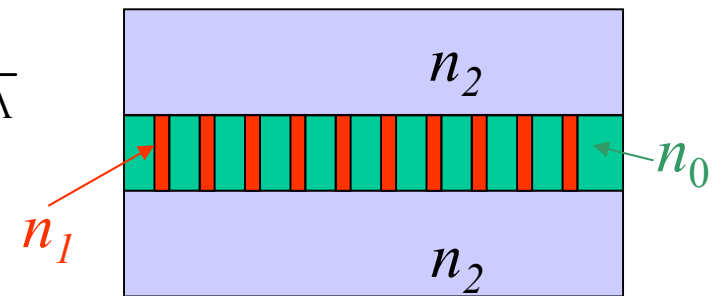
- Mriežka sa nachádza priamo vo vlnovodnej vrstve
- Analýza pomocou *CMT*

$$\lambda_0 := 2 \cdot n_0 \cdot \Lambda$$

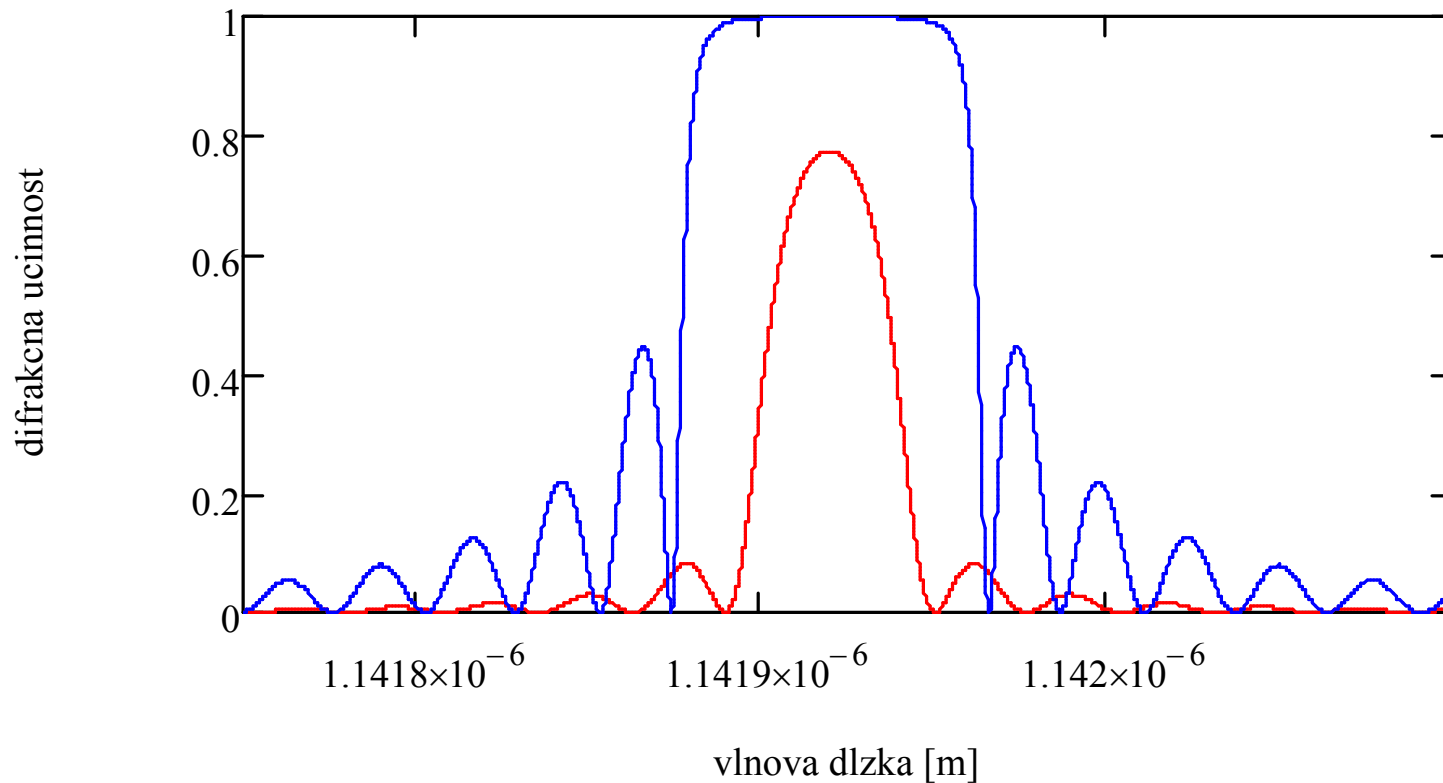
$$\kappa(\lambda) := \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1 \cdot n_0 \cdot \Lambda}{\lambda^2} \quad \Delta\beta(\lambda) := \frac{2 \cdot \pi}{\Lambda} - \left(\frac{4 \cdot \pi}{\lambda_0} \right) \cdot n_0 \cdot \frac{\lambda}{2 \cdot n_0 \cdot \Lambda}$$

$$s(\lambda) := \sqrt{(\kappa(\lambda))^2 - \left(\frac{\Delta\beta(\lambda)}{2} \right)^2}$$

$$\eta(\lambda) := \frac{(\kappa(\lambda))^2 \cdot (\sinh(s(\lambda) \cdot L))^2}{(s(\lambda))^2 \cdot (\cosh(s(\lambda) \cdot L))^2 + \left(\frac{\Delta\beta(\lambda)}{2} \right)^2 \cdot (\sinh(s(\lambda) \cdot L))^2}$$



Mriežky vo vlnovodoch (braggovské mriežky, filtre)



$$n_1 = 5 \cdot 10^{-5}, n_0 = 2.34, L = 10 \text{ mm}, \Lambda = 244 \text{ nm}$$

$$n_1 = 15 \cdot 10^{-5}$$