

# Základy technologie

## fotonických vlnovodných struktur

UFE

### Některé významnější technologie

#### Iontová výměna ve skleněných podložkách (ion exchange)

Pasivní, případně aktivní struktury (dopované  $\text{Er}^{3+}$ )

#### Silica on silicon ( $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{SiO}_2:\text{Ge,P}/\text{SiO}_2$ )

chemické depozice, hydrolýza plamenem (IO „vlákno“)

Měrný útlum řádu 0.001 dB/cm

Pasivní součástky, termooptické, **aktivní** (dotované  $\text{Er}^{3+}$ )

#### Polymery

Termooptické (elektrooptické?) modulátory a přepínače

#### Ti:LiNbO<sub>3</sub>, APE LiNbO<sub>3</sub> (annealed proton exchange)

Elektrooptické, akustooptické, aktivní (dotované  $\text{Er}^{3+}$ ),

nelineární optické prvky (kaskádní procesy  $\chi^2$ :  $\chi^2$ )

#### Polovodiče III-V ( $\text{InP}/\text{Ga}_x\text{In}_y\text{As}_{1-x}\text{P}_{1-y}$ , $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ )

MOCVD, MBE, CBE

Lasery, polovodičové zesilovače, elektroabsorpční

modulátory, spektrální de/multiplexory, detektory,...

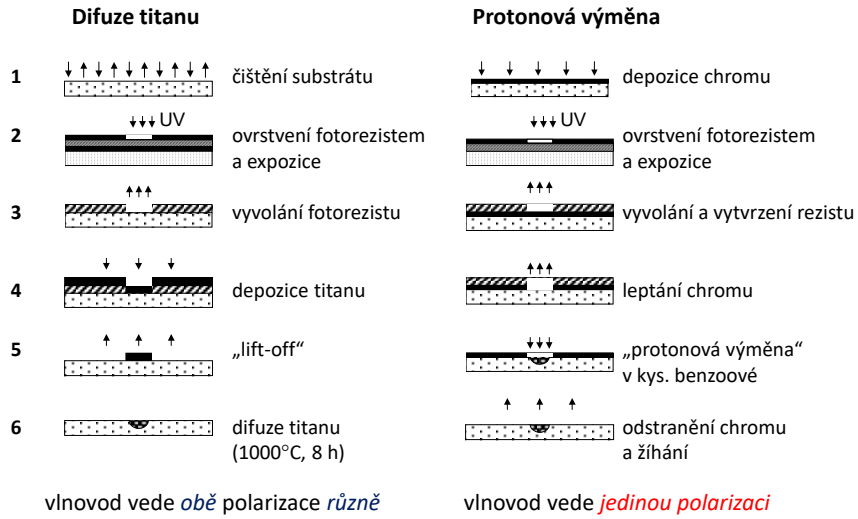
#### Silicon on Insulator ( $\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}$ )

(„wafer bonding“, extrémní kontrast indexu lomu 3,5 : 1,

extrémní hustota součástek)

UFE

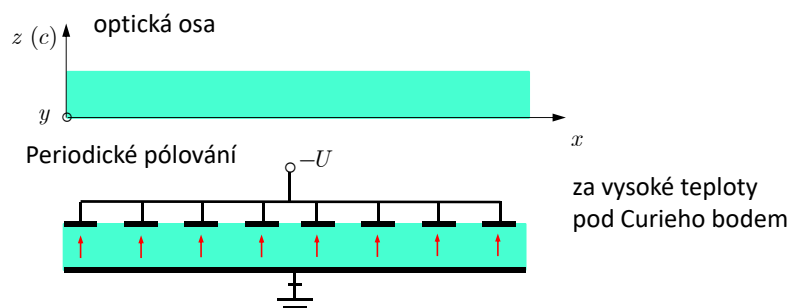
## Příprava vlnodů v $\text{LiNbO}_3$



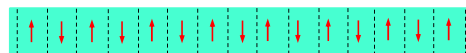
UFE

## Periodické pólování krystalu $\text{LiNbO}_3$

Monokrystal  $\text{LiNbO}_3$



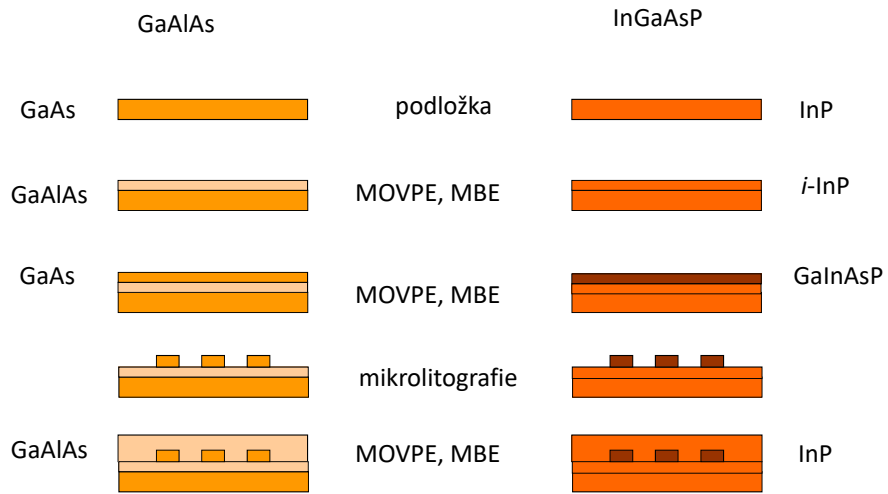
Výsledek:



Periodické střídání orientace optické osy =>  
změna znamének všech tenzorů 3. řádu ( $\chi^{(2)}$ ,  $\vec{r}$ ,  $\vec{e}$  apod.)

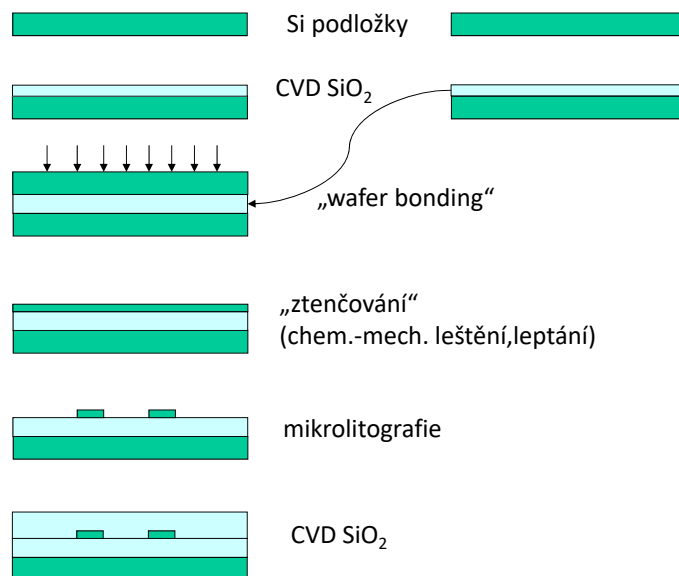
UFE

## Příprava polovodičových vlnodů $A^{III}B^V$



UFE

## Příprava vlnodů SOI (silicon on insulator)



UFE

## **Příprava masek na elektronovém litografu**

1. Modelování a návrh struktury vlnodů a elektrod
2. Příprava dat pro elektronový litograf (digitalizace?)
3. Skleněná (křemenná) podložka s cca 50-100 nm Cr („matný chrom“)
4. Depozice elektronového rezistu odstředivkou (roztok PMMA)
5. Expozice rezistu elektronovým svazkem
6. „Vyvolání“ fotorezistu (odstranění exponovaných míst)
7. Iontové leptání chromové vrstvy

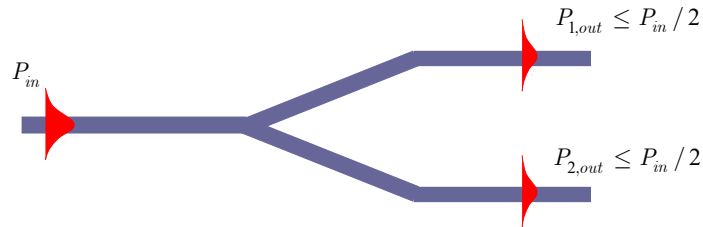
UFE

## **Pasivní fotonické vlnodné struktury**

UFE

## Vlnodné rozvětvení 1×2

### 1. Jednovidové rozvětvení buzené do společné větve



Výkon se dělí rovnoměrně do obou výstupních větví z důvodů symetrie

UFE

## Symetrické rozvětvení buzené v opačném směru

### 2. Současné buzení do obou větví se vzájemným fázovým posuvem $\Delta\varphi$

$$e_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_s + e_a),$$

$$e_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_s - e_a)$$

$$E_{out} \cong e_1 e^{i\Delta\varphi/2} + e_2 e^{-i\Delta\varphi/2} = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_s + e_a) e^{i\Delta\varphi/2} + \frac{1}{\sqrt{2}}(e_s - e_a) e^{-i\Delta\varphi/2} =$$

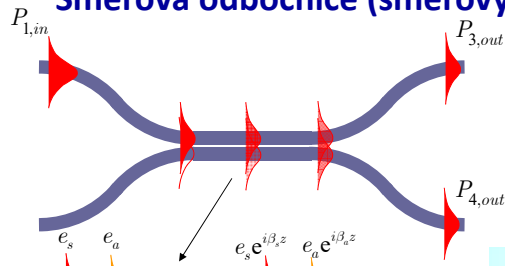
$$= \sqrt{2} e_s \cos \frac{\Delta\varphi}{2} + \sqrt{2} i e_a \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \rightarrow (e_1 + e_2) \cos \frac{\Delta\varphi}{2} = E_{in} \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$$

$$P_{out} \leq P_{in} \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2} = P_{in} \cos^2 \left( \frac{\pi u}{2 U_\pi} \right)$$

Relativní změnou fáze vidů ve vstupní větvi je možno měnit výstupní výkon

UFE

## Směrová odbočnice (směrový vazební člen)



$$P_{3,out} = P_{1,in} \cos^2(\kappa L),$$

$$P_{4,out} = P_{1,in} \sin^2(\kappa L),$$

$$\kappa = \frac{\beta_s - \beta_a}{2} = \frac{\pi}{2L_c},$$

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_s - \beta_a}$$

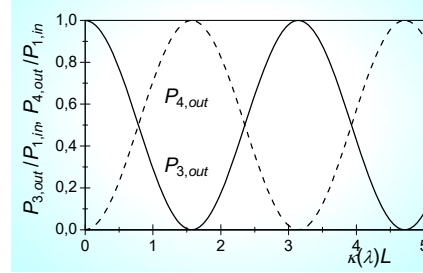
$$e_s \approx (e_1 + e_2) / \sqrt{2}, \quad e_1 \approx (e_s + e_a) / \sqrt{2},$$

$$e_a \approx (e_1 - e_2) / \sqrt{2}, \quad e_2 \approx (e_s - e_a) / \sqrt{2}.$$

$$E(0) = e_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_s + e_a),$$

$$E(z) = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_s e^{i\beta_s z} + e_a e^{i\beta_a z}) = \frac{1}{2}[(e_1 + e_2)e^{i\beta_s z} + (e_1 - e_2)e^{i\beta_a z}]$$

$$\approx e_1 e^{i(\beta_s + \beta_a)z/2} \cos \frac{\beta_s - \beta_a}{2} z + i e_2 e^{i(\beta_s + \beta_a)z/2} \sin \frac{\beta_s - \beta_a}{2} z$$

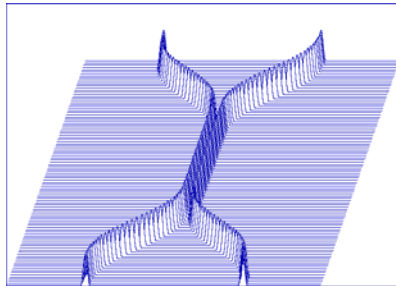


UFE

## Spektrální vlastnosti směrové odbočnice

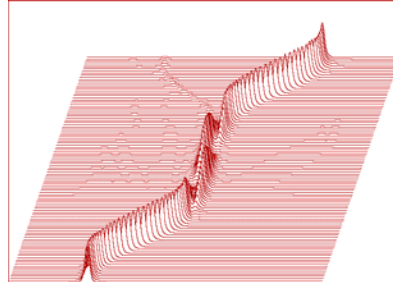
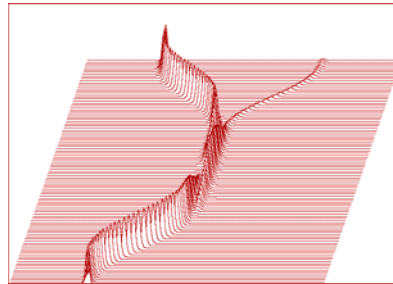
Rozložení indexu lomu

$\lambda = 1.3 \mu\text{m}$



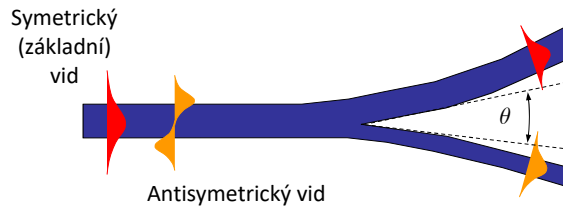
$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

Rozložení optického záření



UFE

## Asymetrické vlnovodné rozvětvení jako oddělovač vidů

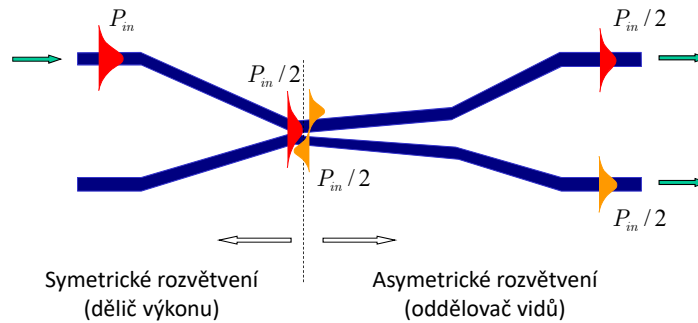


$$\frac{\Delta N_{eff}}{\sqrt{n_s^2 - N_{eff}^2} \theta} \begin{cases} > 1, & \Rightarrow \text{asymetrické Y, oddělovač vidů} \\ < 0.1, & \Rightarrow \text{symetrické Y, dělič výkonu} \end{cases}$$

Pokud je výstupní úhel  $\theta$  velmi malý ( $\theta < 0,2^\circ$ ) a výstupní větve asymetrické, chová se rozvětvení Y jako **oddělovač vidů**, nikoli jako dělič výkonu

UFE

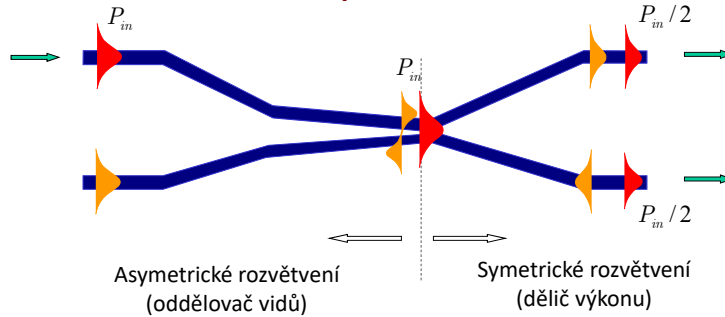
## Spektrálně nezávislá odbočnice 2x2



Odbočnice může pracovat v celém intervalu  $1,25 - 1,6 \mu\text{m}$ ; omezení je dáno **oblastí jednovidového režimu** vlnovodů

UFE

## Spektrálně nezávislá odbočnice 2x2 šíření v opačném směru

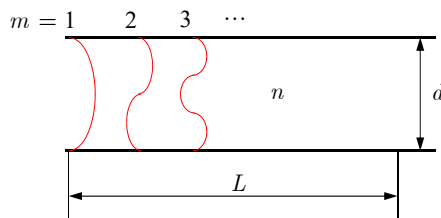


Odbočnice může pracovat v celém intervalu 1,25 – 1,6 μm;  
omezení je dáno **oblastí jednovidového režimu** vlnovodů

UFE

## Děliče s mnohovidovou interferencí

Elementární teorie kovového dvoudeskového vlnovodu



Konstanty šíření „šířivých“ vidů:

$$\beta_m = \sqrt{k_0^2 n^2 - \left(\frac{m\pi}{d}\right)^2},$$

$$m = 1, 2, \dots, M, \quad M = \left\lfloor \frac{k_0 n d}{\pi} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{2nd}{\lambda} \right\rfloor.$$

Zřejmě  $\beta_m L = L \sqrt{k_0^2 n^2 - \left(\frac{m\pi}{d}\right)^2} \approx k_0 n L \left[ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m\pi}{k_0 n d}\right)^2 \right].$

Pokud  $\frac{k_0 n L}{2} \left(\frac{m\pi}{k_0 n d}\right)^2 = \frac{m^2 \pi^2 L}{2k_0 n d^2} = q_m \pi$ ,  $q_m = \frac{m^2 \pi L}{2k_0 n d^2} \dots \text{celé}$ ,  $\frac{\pi L}{2k_0 n d^2} \dots \text{celé}$ ,

$$L = \frac{2k_0 n d^2}{\pi} = \frac{4nd^2}{\lambda} \approx Md, \text{ liší se } \beta_m L \text{ o sudé násobky } \pi \Rightarrow \text{zobrazení}$$

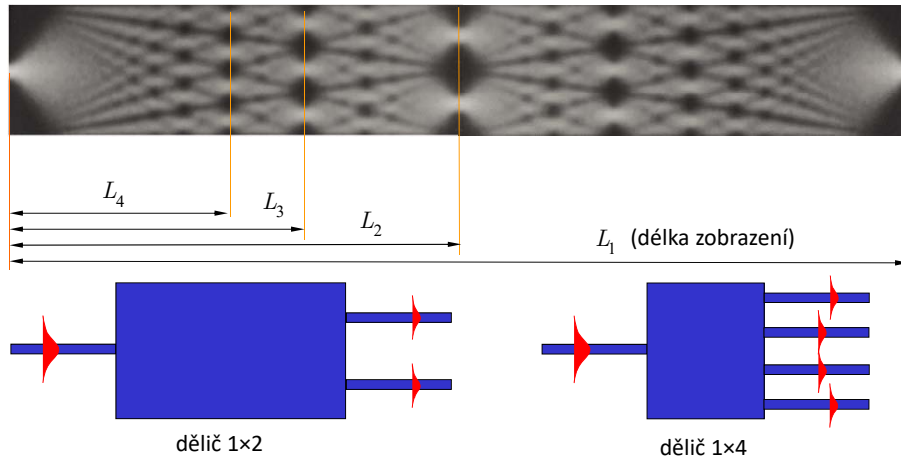
Realita: Konečný počet vidů; diel. vlnovod – *fázová chyba* (neplatí kvadr. závislost), *nedokonalé zobrazení*

UFE



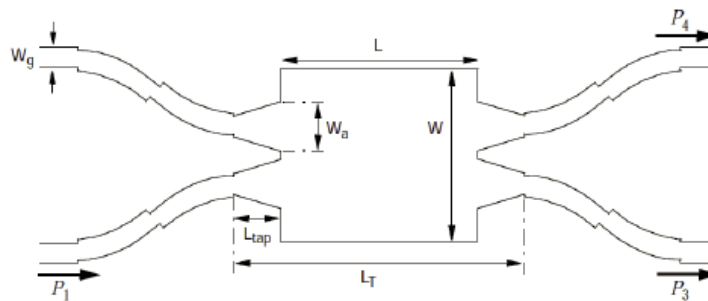
## Děliče s mnohovidovou interferencí

Princip: Interference vidů v **mnohovidovém** planárním vlnovodu (~1978)



UFE

## Vazební člen 2x2 s úpravou pro zmenšení fázové chyby (snížení počtu potřebných vidů) a redukcí ztrát v ohybech

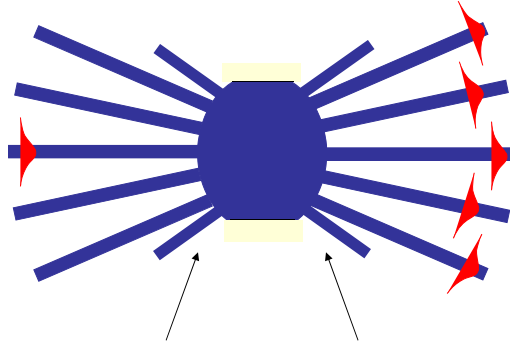


M.T.Hill, J. Lightwave Technol. **21**, 2305-2313, 2003

struktura děliče 2×2 včetně vstupních a výstupních vlnovodů

UFE

### Hvězdicový difrakční vazební člen $M \times N$



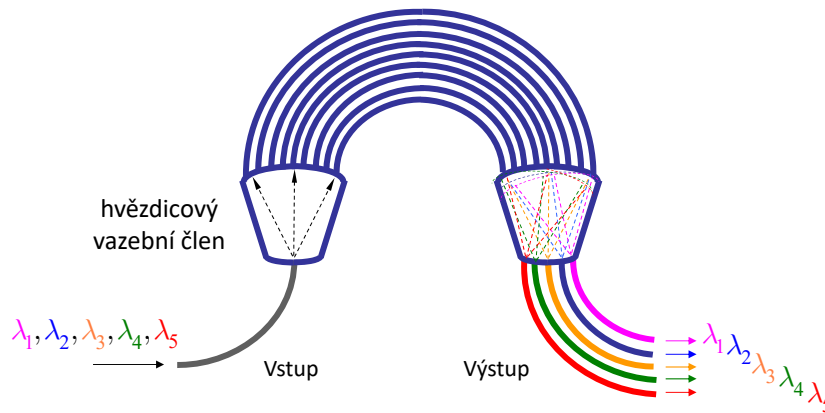
„Jalové“ vlnovody pro zlepšení rovnoměrnosti rozdělení výkonu

Umožňuje rovnoměrně navázat záření do velkého počtu (až několika desítek) vlnovodů

UFE

### Spektrální demultiplexor s fázovanou řadou vlnovodů („Phasar“, AWG – *arrayed waveguide grating demux*)

Fázovaná řada (několika desítek) vlnovodů

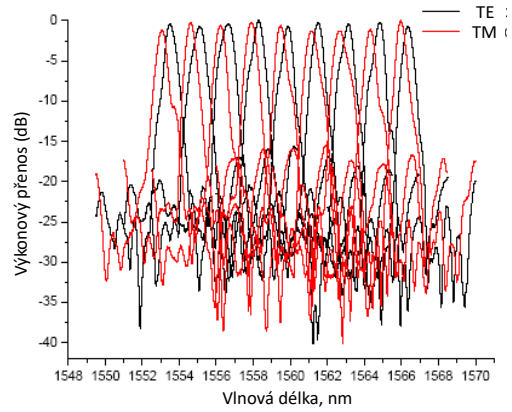
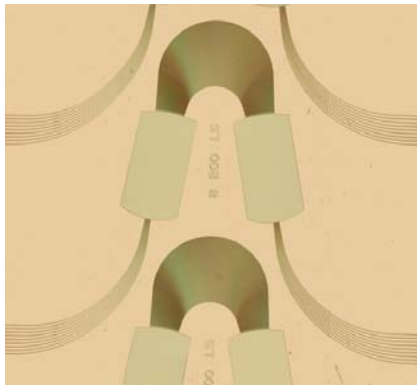


M. K. Smit, 1987; dnes asi nejpůvodnější součástka

UFE

## Příklady AWG demultiplexorů - 1

SOI, Institute of Microstructural Sciences, NRC, Ottawa, 2004



UFE

## Dynamické a nelineární fotonické vlnovodné prvky

UFE

## Poruchová metoda výpočtu konstanty šíření „slabě modifikovaného“ vlnovodu

Zjednodušená rovnice „vázaných vln zanedbávající zpětné vlny:

$$\frac{da_\mu(z)}{dz} = i\beta_\mu a_\mu(z) + i\sum_\nu K_{\mu\nu}^{++}(z)a_\nu(z).$$

Pro slabou *homogenní* poruchu (nezávislou na  $z$ ) přibližně platí

$$\frac{da_\mu(z)}{dz} \approx i\beta_\mu a_\mu(z) + iK_{\mu\mu}^{++} a_\mu(z), \quad \text{neboli} \quad \frac{da_\mu(z)}{dz} \approx i(\beta_\mu + K_{\mu\mu}^{++}) a_\mu(z), \quad \text{a}$$

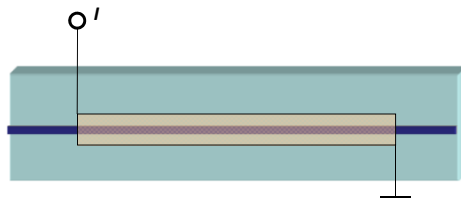
$$a_\mu(z_0 + \Delta z) \approx \exp\left[i(\beta_\mu + K_{\mu\mu}^{++})\Delta z\right] a_\mu(z_0).$$

„Porucha“ tedy (v prvním přiblížení) způsobí změnu konstanty šíření o hodnotu

$$\Delta\beta = \frac{\omega\varepsilon_0}{4} \frac{|\beta_\mu|}{\beta_\mu} \iint_S \left[ \varepsilon(x,y) - \varepsilon^{(0)}(x,y) \right] \left[ \left| e_{\mu\perp}^*(x,y) \right|^2 + \frac{\varepsilon^{(0)}(x,y)}{\varepsilon(x,y)} \left| e_{\mu z} \right|^2 \right] dx dy.$$

UFE

## Termooptický jev



$$\varphi = k_0 NL$$

fázový posun  
při šíření vlny

$$\Delta\varphi = \frac{d\varphi}{dT} \Delta T = \frac{\partial\varphi}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial T} + \frac{\partial\varphi}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial T}$$

vlastní termooptický jev
tepelná roztažnost

- Jednoduchý jev – existuje ve všech materiálech
- při vhodné konstrukci časové konstanty řádu ms až  $\mu$ s!

UFE

## Elektrooptický jev

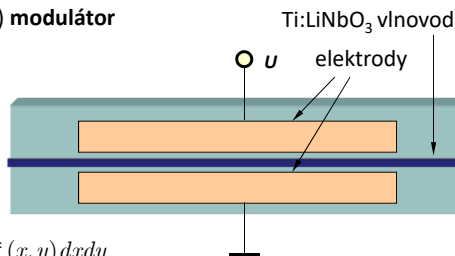
změna indexu lomu (tenzoru optické permitivity)  
vlivem vnějšího elektrického pole

$$\Delta(\epsilon^{-1}) = \tilde{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{E}_v; \quad \Delta\epsilon \cong -\epsilon \cdot (\tilde{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{E}_v) \cdot \epsilon$$

malá změna permitivity  $\Rightarrow$  teorie vázaných vln

Typická aplikace: **elektrooptický (fázový) modulátor**

$$\begin{aligned} \Delta\beta &\approx \frac{k_0}{2} \iint_S \mathbf{e}(x, y) \cdot \Delta\epsilon \cdot \mathbf{e}^*(x, y) dx dy \\ &= -\frac{k_0}{2} \iint_S \mathbf{e}(x, y) \cdot \epsilon \cdot [\tilde{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{E}_v(x, y)] \cdot \epsilon \cdot \mathbf{e}^*(x, y) dx dy \end{aligned}$$

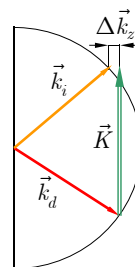
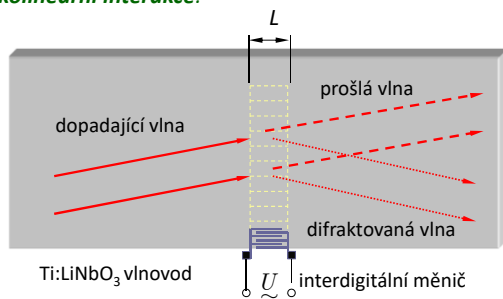


UFE

## Akustooptický jev

difrakce na (povrchové) akustické vlně  
jako na dynamické optické difrakční mřížce

**Nekolineární interakce:**



$$\Delta(\bar{\epsilon}^{-1}) = \bar{\mathbf{p}} : \bar{\mathbf{S}}; \quad \Delta\epsilon = -\bar{\epsilon} \cdot (\bar{\mathbf{p}} : \bar{\mathbf{S}}) \cdot \bar{\epsilon}, \quad \bar{\mathbf{S}} = \bar{\mathbf{S}}_0 e^{i(\mathbf{K} \cdot \mathbf{r} - \Omega_a t)}$$

"piezoelektricky zpevněný"  
elastooptický tenzor

v piezoelektrických materiálech  $\Delta(\bar{\epsilon}^{-1}) = \bar{\mathbf{p}} : \bar{\mathbf{S}} + \tilde{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{E}_p = \overbrace{(\bar{\mathbf{p}} - \tilde{\mathbf{r}} \cdot \bar{\epsilon}^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{e}})}^{\text{piezoelektrický tenzor}} : \bar{\mathbf{S}}$

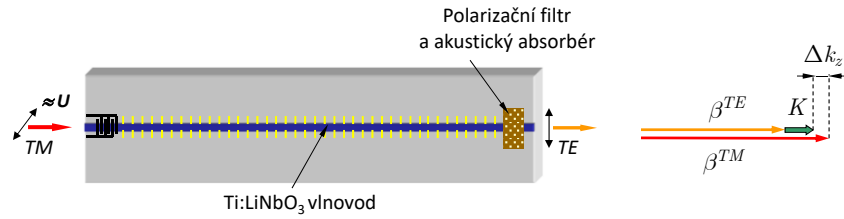
$\omega_d = \omega_i \pm \Omega_a$ , zákon zachování energie

$\mathbf{k}_d \cong \mathbf{k}_i \pm \mathbf{K}$  zákon zachování (kvazi)impulsu

UFE

## Akustooptický jev

### Kolineární interakce



Účinnost akustooptické interakce

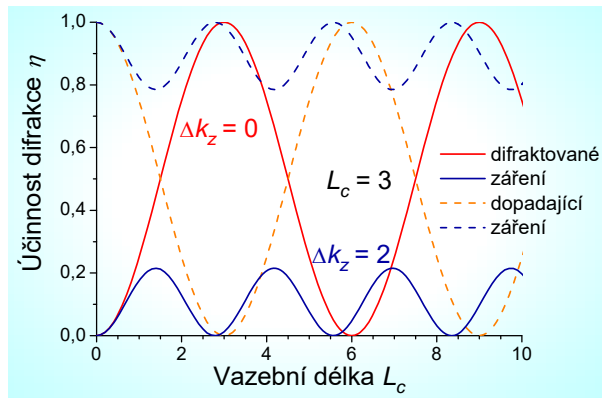
$$\eta = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + (\Delta k_z / 2)^2} \sin^2 \left( \sqrt{\kappa^2 + (\Delta k_z / 2)^2} L \right),$$

$$\kappa \approx \frac{k_0}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{e}^{TM}(x, y) \cdot \Delta \boldsymbol{\varepsilon}(x, y) \cdot \mathbf{e}^{TE}(x, y) dx dy = \frac{\pi}{2L_c}$$

UFE

## Účinnost akustooptické interakce

$$\eta = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + (\Delta k_z / 2)^2} \sin^2 \left( \sqrt{\kappa^2 + (\Delta k_z / 2)^2} L \right),$$



UFE

## Vliv koncentrace volných nosičů náboje na optické vlastnosti polovodičového materiálu

"Volné" elektrony ve vodivostním pásu v homogenním elektrickém poli

$$m_e^* \frac{d^2x}{dt^2} + \gamma \frac{dx}{dt} - qE_0 e^{-i\omega t} = 0, \quad \gamma - \text{fenomenologická konstanta tlumení}$$

Ustálené řešení je  $x_0 = \frac{q}{m_e^* \omega^2 + i\gamma\omega} E_0$  – amplituda výchylky z rovnovážné polohy

Elektrická polarizace:  $\Delta P = -qn_e x_0 = -\frac{q^2 n_e}{m_e^* \omega^2 + i\gamma\omega} E_0$

$n_e$  – koncentrace elektronů

$$\Delta \varepsilon = \Delta P / (\varepsilon_0 E_0) = -\frac{q^2 n_e}{\varepsilon_0 (m_e^* \omega^2 + i\gamma\omega)} \approx -\frac{q^2 n_e}{\varepsilon_0 m_e^* \omega^2} + i \frac{q^2 n_e \gamma}{\varepsilon_0 (m_e^*)^2 \omega^3}$$

V konstantním poli  $\gamma \frac{dx}{dt} = qE$ , t.j.  $v = \frac{dx}{dt} = \frac{q}{\gamma} E = \mu_e E$ ,  $\mu_e$  – pohyblivost elektronu

$$\varepsilon + \Delta \varepsilon = (n + \Delta n)^2 \doteq \varepsilon + 2n\Delta n + \cancel{(\Delta n)^2}$$

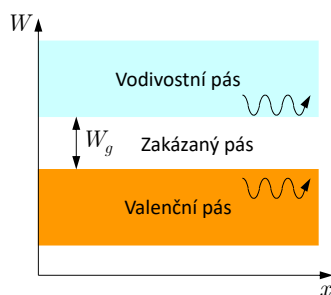
pak  $\Delta n' \approx -\frac{q^2 n_e \lambda^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 n m_e^* c^2}$ ,  $\alpha = k_0 \Delta n'' \approx \frac{q^3 n_e \lambda^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 n m_e^{*2} \mu_e c^2}$

$$\Delta n' \approx 10^{-3} \div 10^{-2} (!), \quad b \approx 1 \text{ dB/cm}$$

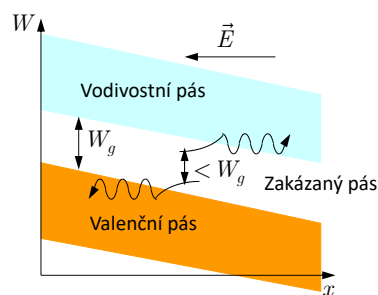
UFE

## Elektroabsorpce a elektrorefrakce v polovodičích

Pásový energetický diagram polovodiče



Pásový energetický diagram polovodiče s přiloženým napětím (el. polem)



$$\varepsilon'(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} \mathbf{P} \int_0^\infty \frac{\omega' \varepsilon''(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{2\omega}{\pi} \mathbf{P} \int_0^\infty \frac{\varepsilon'(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

Elektroabsorpční jev  $\Rightarrow$  změna spektrální závislosti absorpce



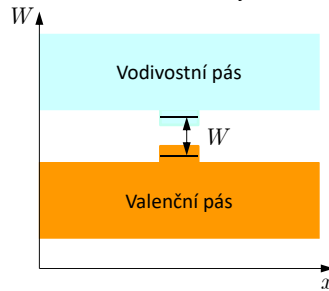
Kramersovy-Kronigovy relace  $\Rightarrow$  Elektrorefrakční jev

„Zesílení“ excitonovými efekty v kvantových jamách;  
QCSE (Starkův jev v kvantově ohraničených strukturách)

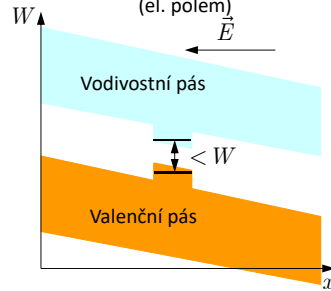
UFE

## Starkův jev v kvantově ohraničených strukturách (QCSE)

Pásový energetický diagram polovodiče s kvantovou jámou



Pásový energetický diagram polovodiče s kvantovou jámou s přiloženým napětím (el. polem)



$$\varepsilon'(\omega) - 1 = \frac{2}{\pi} \mathbf{P} \int_0^\infty \frac{\omega' \varepsilon''(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{2\omega}{\pi} \mathbf{P} \int_0^\infty \frac{\varepsilon'(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega'$$

Elektroabsorpční Starkův jev (QCSE)  $\Rightarrow$

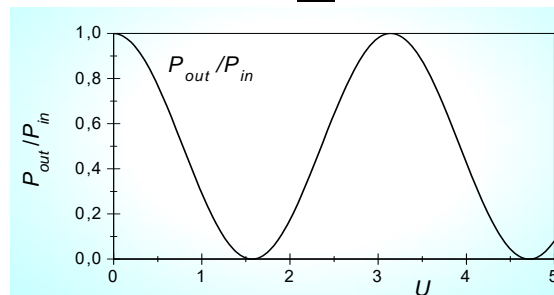
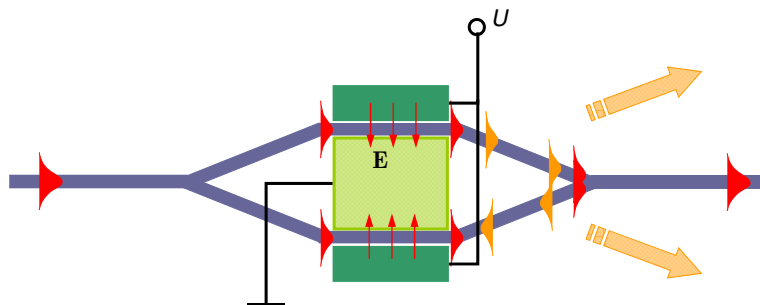
Kramersovy-Kronigovy relace  $\Rightarrow$

Elektrorefrakční Starkův jev (QCSE)

Excitonové jevy v kvantových jamách zvýrazňují QCSE (strmější absorpční hrana)

UFE

## Machův-Zehnderův interferometrický modulátor



$$P_{out} = P_{in} \cos^2\left(\frac{\pi U}{2 U_\pi}\right)$$

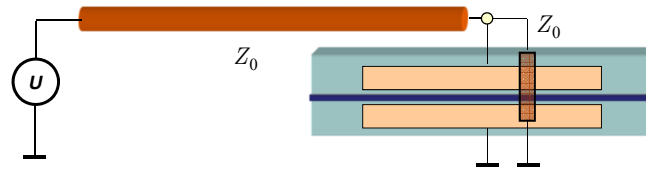
$$= \frac{P_{in}}{2} \left[ 1 + \cos\left(\frac{\pi U}{U_\pi}\right) \right]$$

UFE

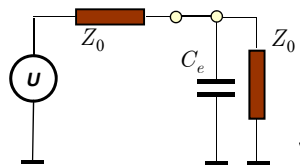


## Modulační rychlost elektrooptických modulátorů I

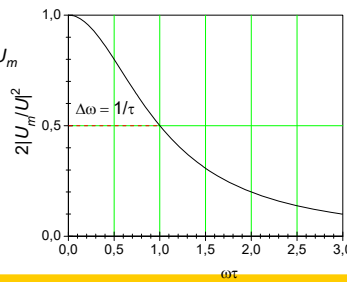
Standardní modulátor s elektrodami „se soustředěnými parametry“



Ekvivalentní elektrický obvod  $U_m = \frac{1}{2(1 + j\omega\tau)} U$ ,  $\tau = \frac{Z_0 C_m}{2}$ ,  $C_m = C_e L_e$



$$\left| \frac{U_m}{U} \right| = \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}}$$



$$B = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

$$B \cdot L_e = \frac{1}{\pi C_e Z_0}$$

$$C_e = 2 \text{ pF/cm,}$$

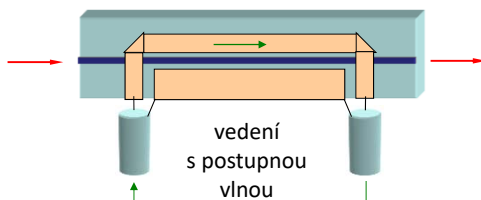
$$Z_0 = 50 \Omega,$$

$$B \cdot L_e \approx 3 \text{ GHz} \cdot \text{cm}$$

UFE

## Modulační rychlost elektrooptických modulátorů II

Modulátor s elektrodami s postupnou vlnou



Elektrody tvoří součást mikrovlnného koplanárního vedení  $\Rightarrow$  neuplatní se kapacita elektrod, kritický je **rozdíl rychlostí šíření optické a modulační elektrické vlny**.

Elektrická modulační „vlna“:

$$E_{\text{mod}} = E_m \exp[j\Omega(t - N_\mu z / c)]$$

Účinnost modulační elektrodami délky  $L$ :

Šířka pásma (pro pokles účinnosti modulační o 4 dB) je

Optická vlna:

$$E_{\text{opt}} = E_0 \exp[j\omega(t - Nz / c)]$$

$$\eta_{\text{mod}} \sim \left[ \frac{\sin \frac{\Omega}{2c} (N_\mu - N) L}{\frac{\Omega}{2c} (N_\mu - N) L} \right]^2;$$

$$B \cdot L \approx \frac{\Omega_{\text{max}}}{2\pi} L = \frac{c}{2(N_\mu - N)}$$

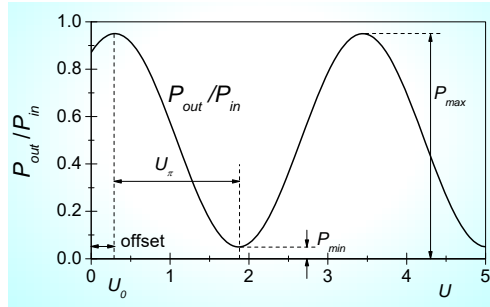
Pro  $N_\mu \approx 4.2$ ,  $N \approx 2.2$

$$B \cdot L \approx 10 \text{ GHz} \cdot \text{cm}$$

UFE

## Technické parametry reálných elektrooptických modulátorů

Typická modulační charakteristika



„Offset“ v přepínací charakteristice je důsledkem rozdílu v optické dráze ramen interferometru. Je ho možno kompenzovat napětím. U rychlých modulátorů se proto vytváří sada kompenzačních elektrod.

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{1}{2} \left[ 1 + m \cos \left( \pi \frac{U - U_0}{U_\pi} \right) \right], \quad m < 1$$

Spínací poměr (extinkce, extinkční poměr)

$$E = 10 \log \frac{P_{max}}{P_{min}} = 10 \log \frac{1+m}{1-m}$$

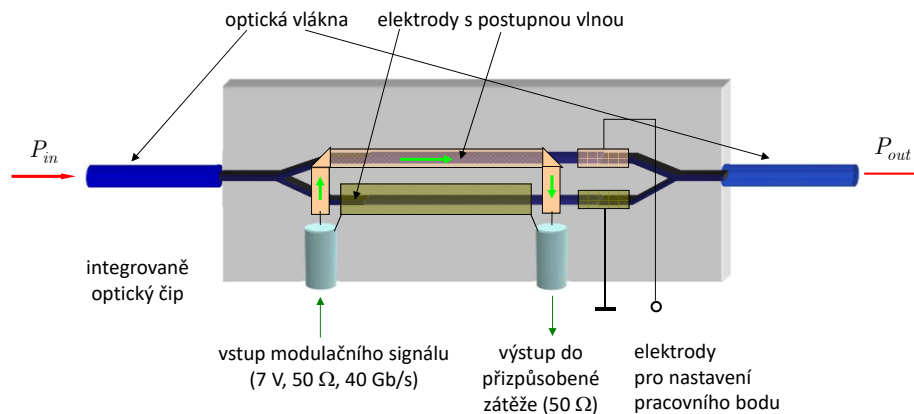
Vložný útlum

$$IL = 10 \log \frac{P_{in, fibre}}{P_{max, fibre}}$$

U kvalitních modulátorů  $E \geq 20$  dB,  $IL \leq 3$  dB

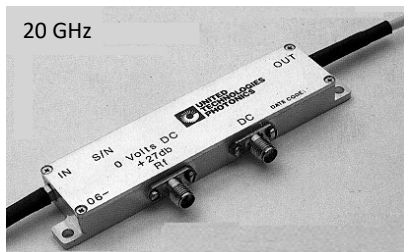
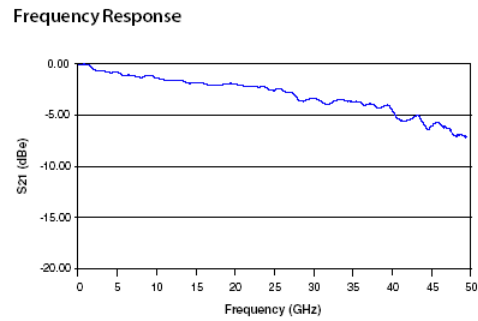
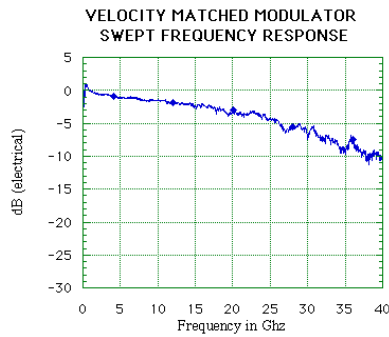
UFE

## Elektroopticky řízený Machův-Zehnderův interferometrický modulátor s postupnou vlnou



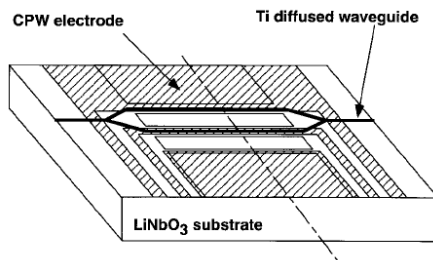
UFE

## Komerční elektrooptické modulátory

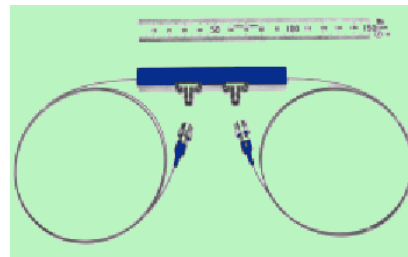
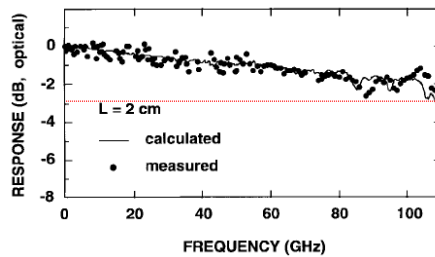
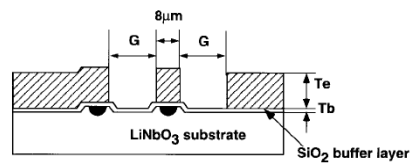


UFE

## 100 GHz LiNbO<sub>3</sub> modulátor s ovládacím napětím 5,1 V



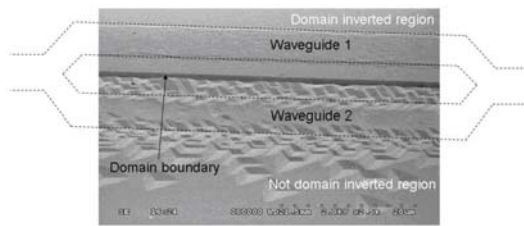
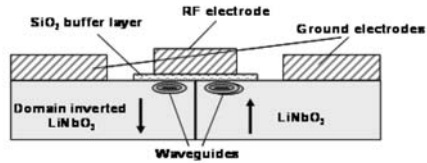
(NTT, 1998)



UFE

## Modulátor využívající inverzi domén v $\text{LiNbO}_3$

Zjednodušení elektrodové struktury:



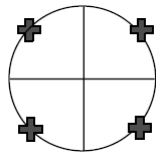
Valerio Pruneri et al.,  
Avanex Corporation, Italy  
ICFO, Spain  
ICREA, Spain, 2007

UFE

## Modulátor pro kvadrurní fázovou modulaci (QPSK)

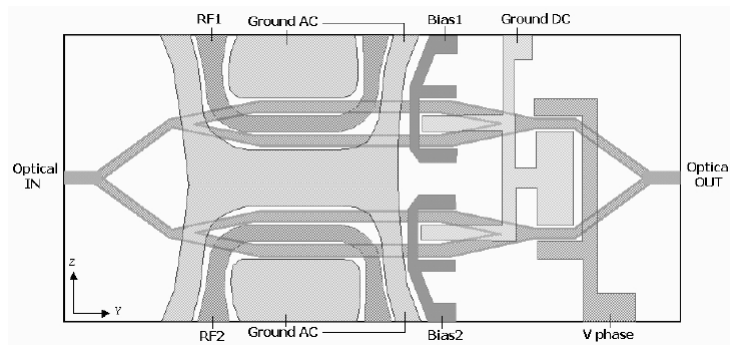
Imaginary axis

Modulační formát přenášející 2 bity/symbol



Real axis

Realizace v  $\text{LiNbO}_3$



UFE

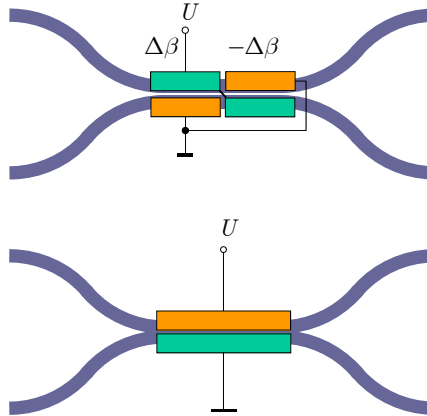
## Elektrooptické vlnovodné přepínače

Elektroopticky řízená  
směrová odbočnice  
2 nebo více sekcí  
opačně napájených  
„ $\Delta\beta$  – reversal“

Nízké ovládací napětí,  
komplikovaná spínací  
charakteristika,  
napětím lze korigovat  
tolerance parametřů

Přepínač s dvouvidovou  
interferencí  
„two-mode interference coupler“

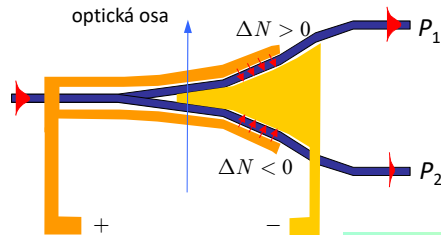
Nízké ovládací napětí,  
sinusová spínací charakteristika



Střední část vlnovodné struktury je dvouvidová.  
Symetrický vid má ve štěrbině mezi elektrodami maximum,  
antisymetrický vid minimum  $\Rightarrow$  vidy jsou ovlivňovány různě.  
Tím dojde k *fázovému posuvu* mezi nimi  $\Rightarrow$  **přepínání**.  
Oba tyto elektrooptické přepínače jsou **polarizačně závislé**.

UFE

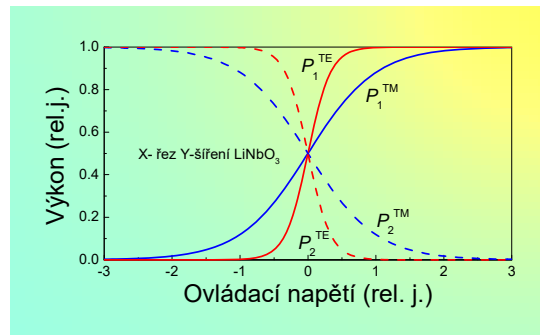
## Polarizačně nezávislý „digitální“ optický přepínač (DOS) v $\text{LiNbO}_3$



**Symetrické rozvětvení**  
s elektroopticky indukovanou  
asymetrií

Přepínací charakteristika

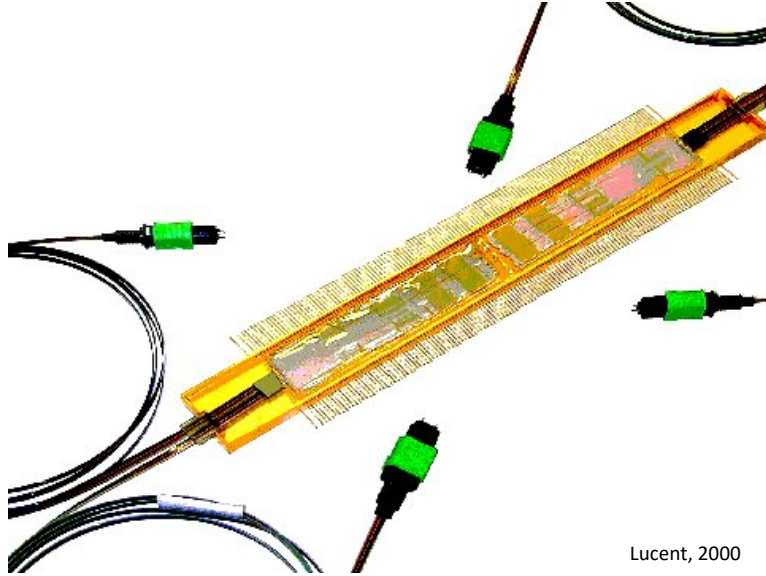
**Vlastnosti přepínače DOS:**  
polarizační nezávislost,  
velmi výhodný (skokovitý) tvar  
přepínací charakteristiky;  
velké ovládací napětí ( $\pm 60$  V)



UFE

### Elektrooptický přepínač 16×16 v Ti:LiNbO<sub>3</sub> (2×20×5 mm)

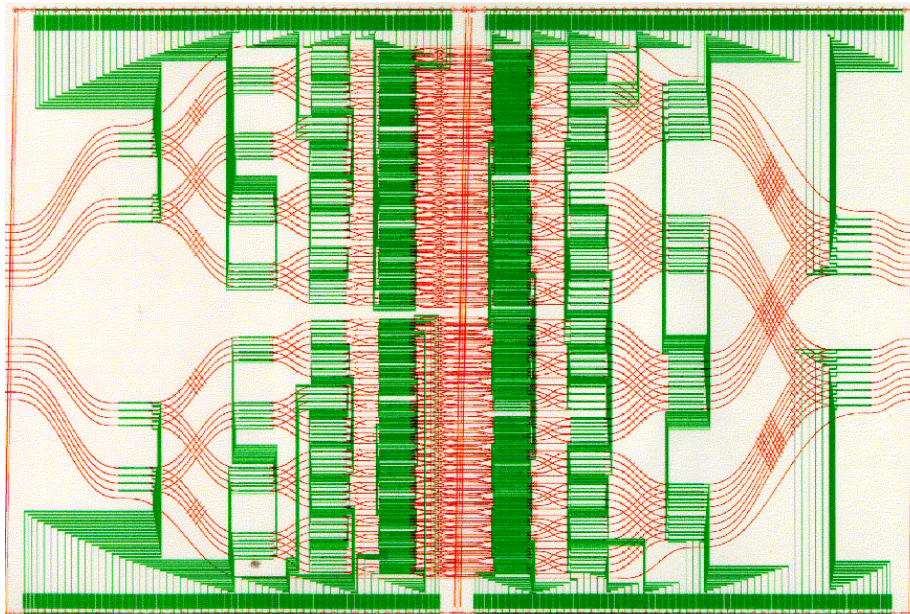
„Neblokující“ architektura, 480 DOS přepínačů.  $U = \pm 45$  V,  $IL < 15$  dB,  
 $\tau \cong 5$  ns, kompenzace PMD křemennou  $\lambda/2$  destičkou (PMD < 1 ps)



Lucent, 2000

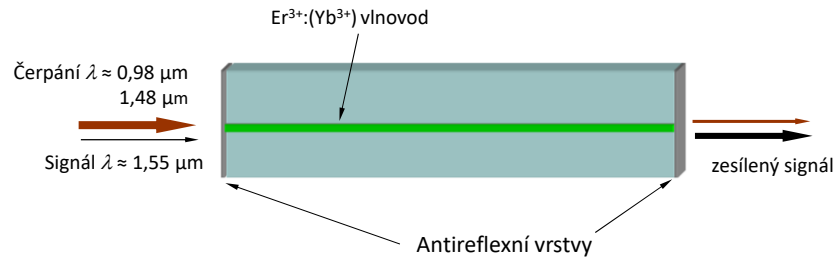
UFE

### „Layout“ optických vlnovodů a elektrodové struktury přepínače



UFE

## Vlnovodné optické zesilovače a lasery (EDWA, EDWL)



Vlnovody z různých materiálů: (fosfátové) sklo,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{LiNbO}_3$ , ...  
zesílení  $\approx 10$  dB

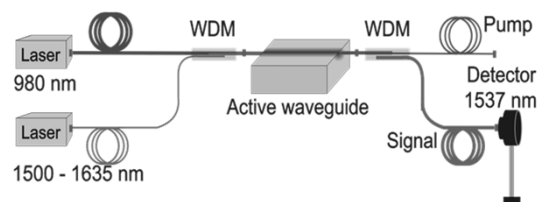
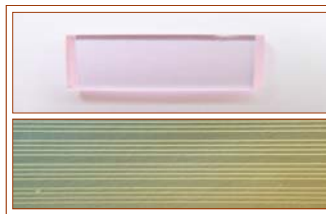
Výhody: malé rozměry, možnost současného zesilování signálů  
na různých „nosných“ vlnových délkách  
možnost integrace s pasivními součástkami na jednom čipu  
("zero-dB splitter")

Nevýhody: malá délka -> vysoká koncentrace dopantů, **malé zesílení**

ÚFE

## Vlnovodný optický zesilovač dopovaný erbiem

Substrátové sklo a iontová výměna: VŠCHT, litografie a charakterizace: ÚFE

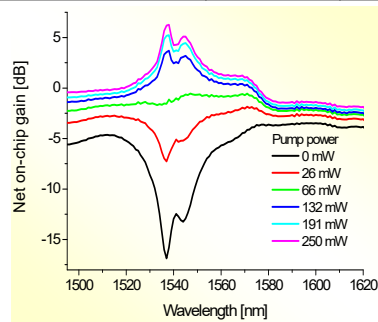


ÚFE

## Vlnovodný optický zesilovač dopovaný erbiem

Substrátové sklo a iontová výměna: VŠCHT, litografie a charakterizace: ÚFE

Waveguide parameters	K <sup>+</sup>	Ag <sup>+</sup>
Mode-field dimensions	9.6×12.9 μm	6.1×7.0 μm
Mode-field dimensions @ 980 nm	6.9×10.5 μm	3.2×4.8 μm
Scattering loss @ 1550 nm	0.18 dB/cm	0.85 dB/cm

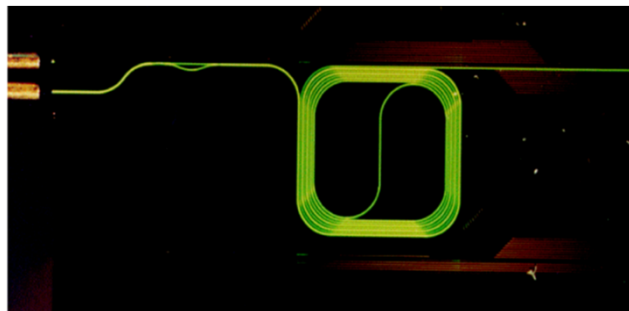


UFE

## Vlnovodný zesilovač Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Er<sup>3+</sup> na Si/SiO<sub>2</sub> podložce

spirála 1×1 mm<sup>2</sup>

zisk 2,3 dB na λ = 1,55 μm při čerpání 10 mW na 1,48 μm

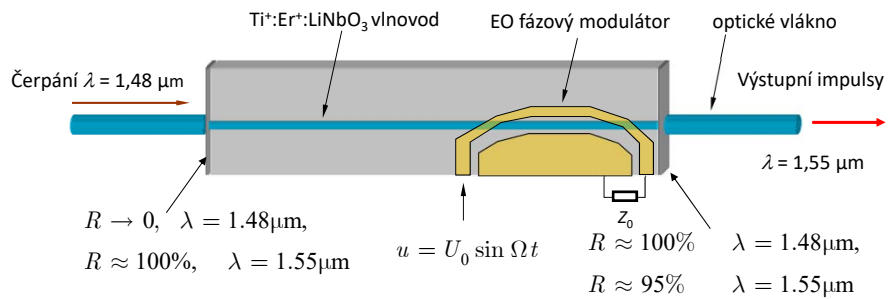


M.K. Smit et al. (TUD); Appl. Phys. Lett. **68**, 1888 (1996)

UFE



### Vlnodný Ti:Er:LiNbO<sub>3</sub> laser s integrovaným elektrooptickým modulátorem pro synchronizaci vidů



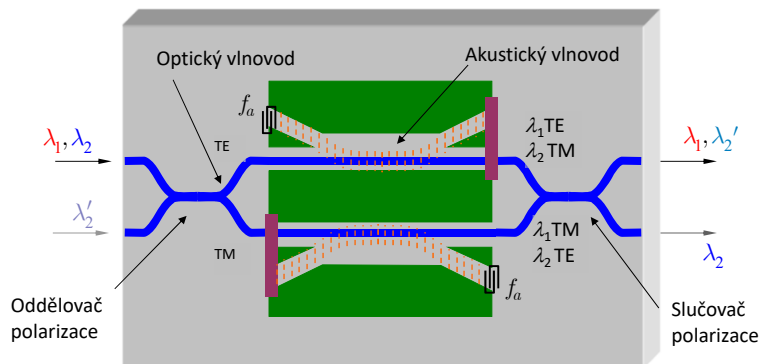
Ultrakrátké pulsy ( $\leq 5 \text{ ps}$ ), opakovací frekvence  $\approx 20 \text{ GHz}$

(Univerzita Paderborn, D, 1997-2000)

UFE

### Polarizačně nezávislý akustooptický laditelný začleňovací/vydělovací demultiplexor v LiNbO<sub>3</sub>

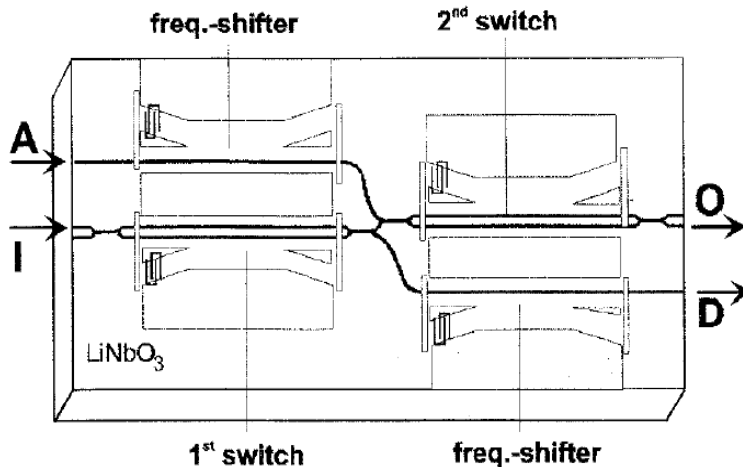
Princip: kolineární AO TE-TM konverze



Střední vlnová délka  $\lambda_c = 1,55 \mu\text{m}$ ,  
 vzdálenost kanálů  $< 1 \text{ nm}$ , přeladitelnost  $\Delta\lambda \approx 70 \text{ nm}$

UFE

### Add-drop multiplexer s kaskádním řazením filtrů a kompenzací frekvenčního posuvu

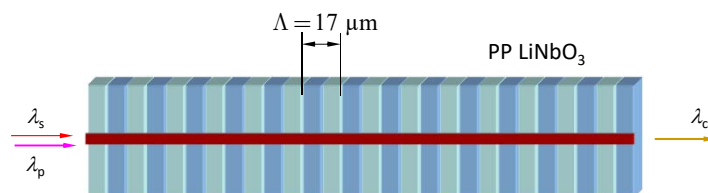


(Univerzita Paderborn 1997-2000)

UFE

### Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

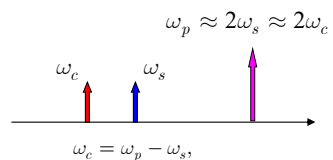
Nelineární optický jev 2. řádu – generování rozdílové frekvence



$$K = 2\pi / \Lambda; \quad k_c = k_p - k_s + K;$$

Problém: vlnovod je na  $\omega_p \approx 2\omega_s$  dvou- až třívládový  $\Rightarrow$  obtížná excitace základního vlád.

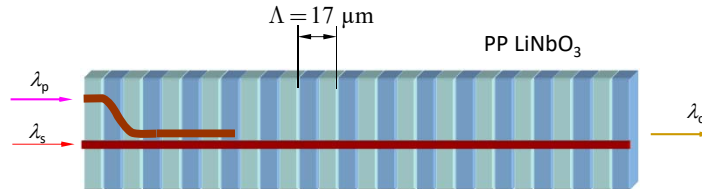
Řešení: kaskádní aplikace dvou procesů  $\chi^{(2)}$



UFE

## Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

Kaskáda dvou nelineárních třívlnových procesů ( $\chi^2$ :  $\chi^2$ ) v PPLN



Princip

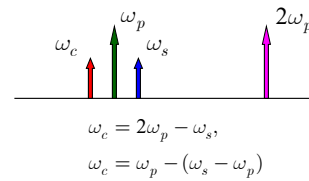
1. generování 2. harmonické
2. generování rozdílové frekvence

$$K = 2\pi / \Lambda; \quad k_{2p} = 2k_p + K;$$

$$k_c = k_{2p} - k_s - K = 2k_p - k_s \approx k_s$$

Aplikační možnosti

- Konverze vlnové délky
- Kompenzace disperze (inverze frekvenční závislosti!)
- Optické vzorkování rychlých průběhů



UFE

Konec části 3

UFE