

Základy technologie

fotonických vlnodných struktur

úfe

Některé významnější technologie

Iontová výměna ve skleněných podložkách (ion exchange)

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

Polymery

Termooptické (elektrooptické?) modulátory a přepínače

Ti:LiNbO₃, APE LiNbO₃ (annealed proton exchange)

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

nelineární optické prvky (kaskádní procesy χ^2 : χ^2)

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

MOCVD, MBE, CBE

Lasery, polovodičové zesilovače, elektroabsorpční modulátory, spektrální de/multiplexory, detektory,...

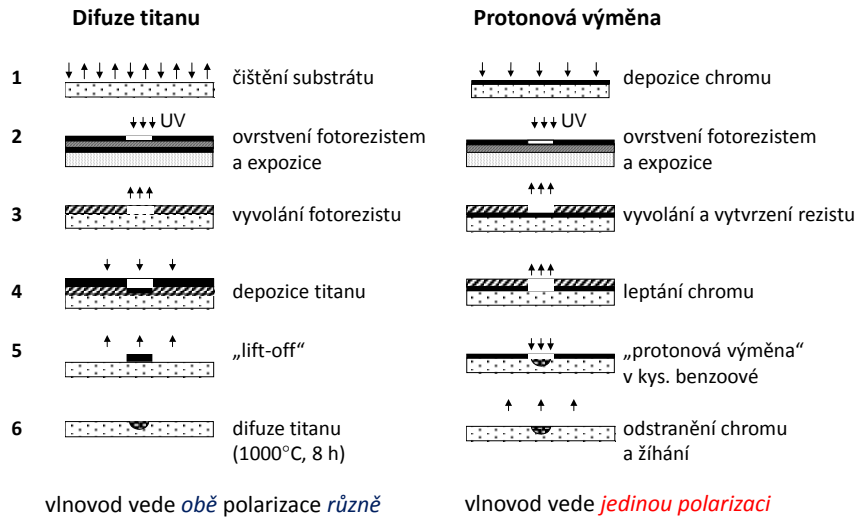
Silicon on Insulator ($\text{Si}/\text{SiO}_2/\text{Si}$)

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

extrémní hustota součástek)

úfe

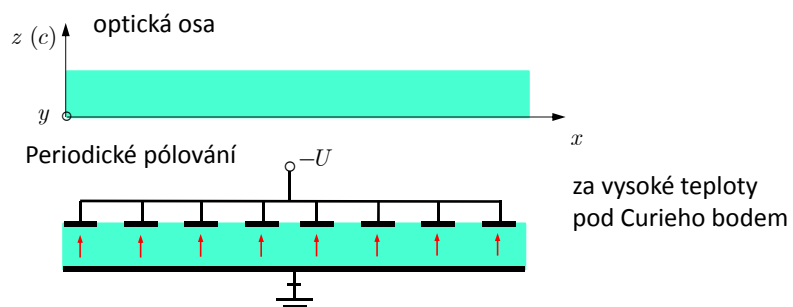
Příprava vlnodů v LiNbO_3



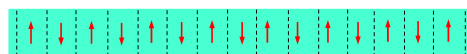
úfe

Periodické pólování krystalu LiNbO_3

Monokrystal LiNbO_3



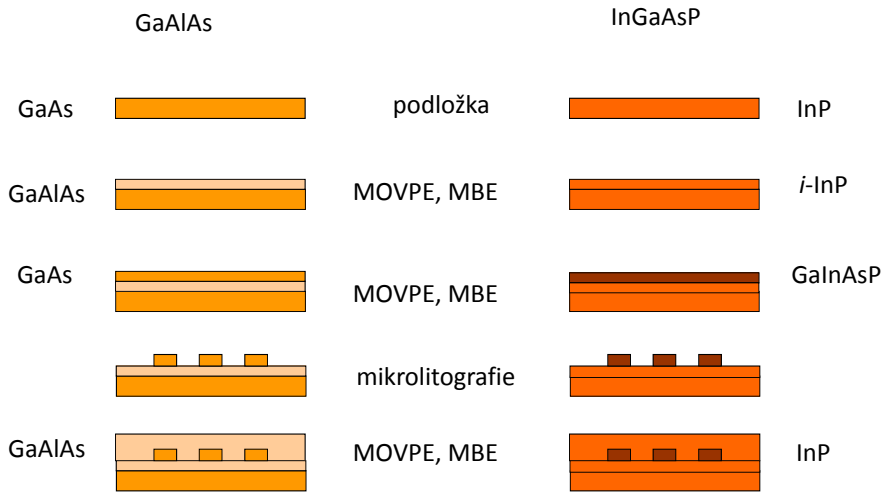
Výsledek:



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

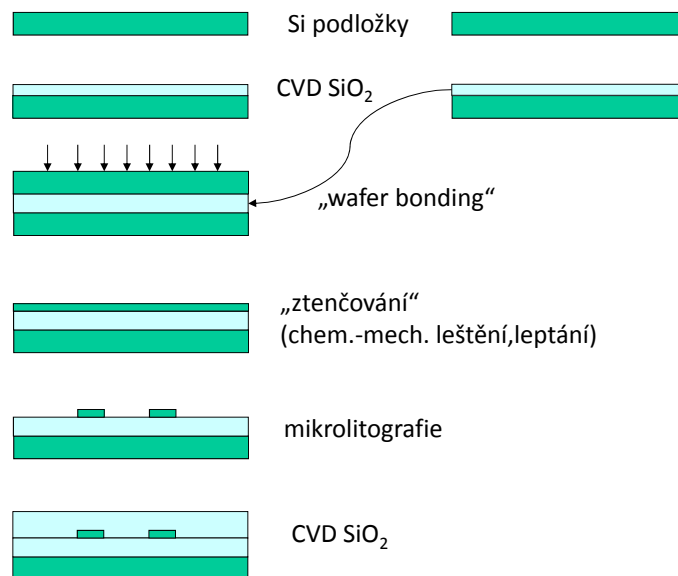
úfe

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



úfe

Příprava vlnodů SOI (silicon on insulator)



úfe

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

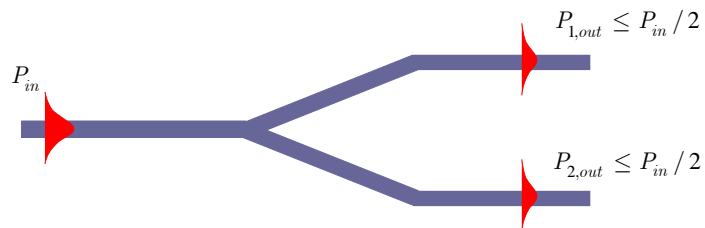
úfe

Pasivní fotonické vlnodné struktury

úfe

Vlnodné rozvětvení 1x2

1. Jednovidové rozvětvení buzené do společné větve



Výkon se dělí rovnoměrně do obou výstupních větví z důvodů symetrie

úfe

Symetrické rozvětvení buzené v opačném směru

2. Současné buzení do obou větví se vzájemným fázovým posuvem

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

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

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

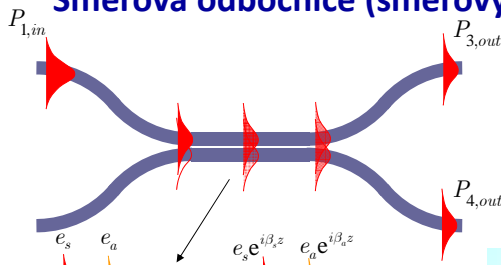
$$= \sqrt{2} e_s \cos \frac{\Delta\varphi}{2} + \sqrt{2} i e_a \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \rightarrow (e_1 + e_2) \cos \frac{\Delta\varphi}{2} = E_{in} \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$$

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

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

úfe

Směrová odbočnice (směrový vazební člen)



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

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

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

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

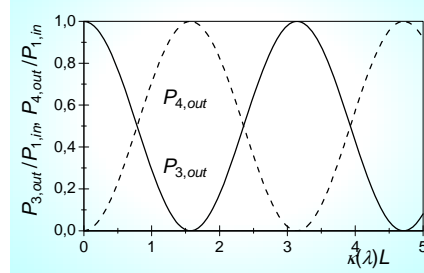
$$e_s \approx (e_1 + e_2) / \sqrt{2}, \quad e_1 \approx (e_s + e_a) / \sqrt{2},$$

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

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

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

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

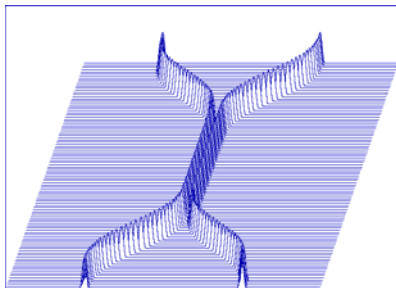


úře

Spektrální vlastnosti směrové odbočnice

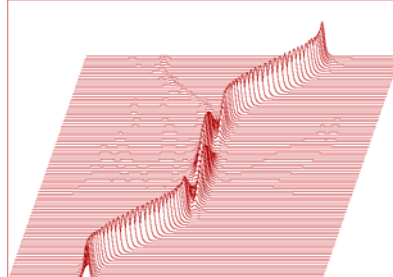
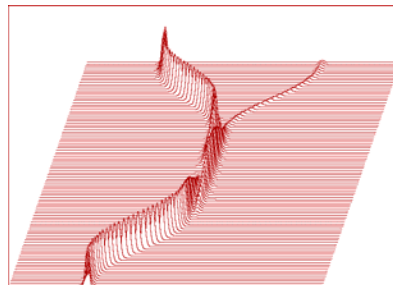
Rozložení indexu lomu

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



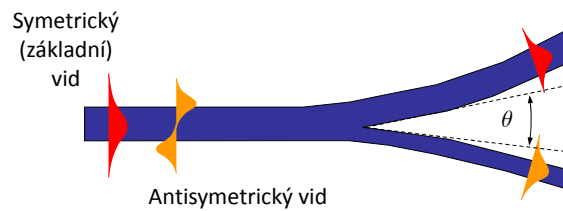
$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

Rozložení optického záření



úře

Asymetrické vlnovodné rozvětvení jako oddělovač vidů

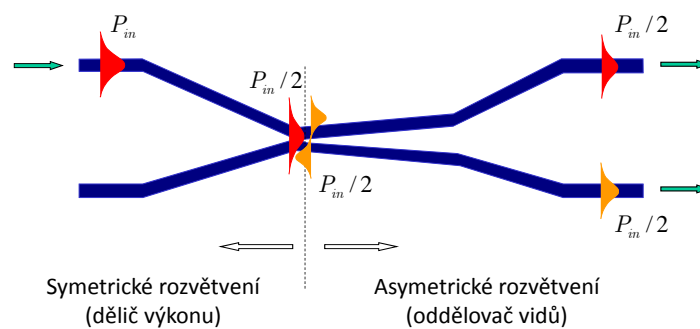


$$\frac{\Delta N_{eff}}{\sqrt{n_s^2 - N_{eff}^2} \theta} \begin{cases} > 1, & \Rightarrow \text{asymetrické Y, oddělovač vidů} \\ < 0.1, & \Rightarrow \text{symetrické Y, dělič výkonu} \end{cases}$$

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

úfe

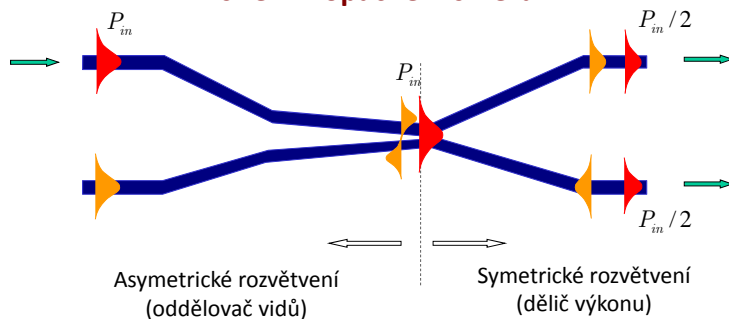
Spektrálně nezávislá odbočnice 2×2



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

úfe

Spektrálně nezávislá odbočnice 2×2 šíření v opačném směru



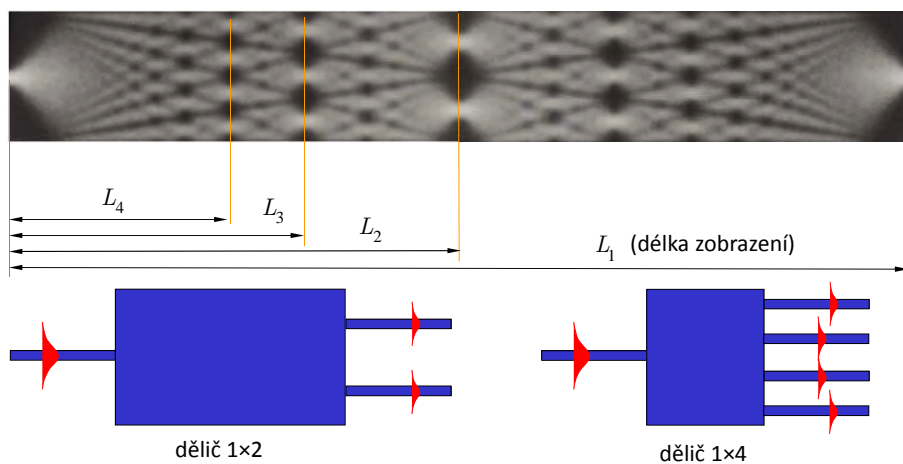
Odbočnice může pracovat v celém intervalu 1,25 – 1,6 μm ;
omezení je dáno **oblastí jednovidového režimu** vlnovodů

úfe

Některé zajímavé vlnovodné součástky

Děliče s mnohovidovou interferencí

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



úfe

Úprava pro potlačení zpětných odrazů

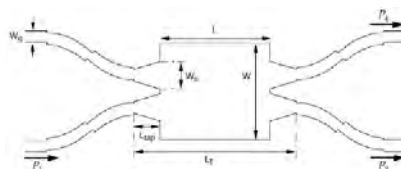
původní tvar



modifikovaný tvar



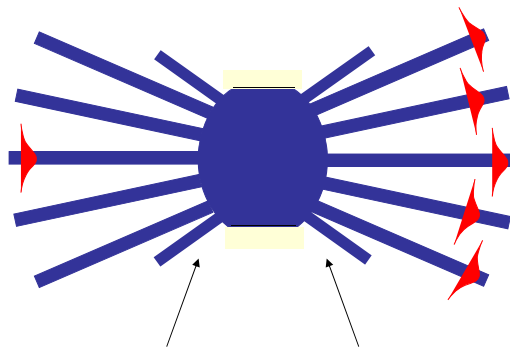
struktura děliče 2x2 včetně vstupních a výstupních vlnovodů



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

úfe

Hvězdicový difrakční vazební člen MxN



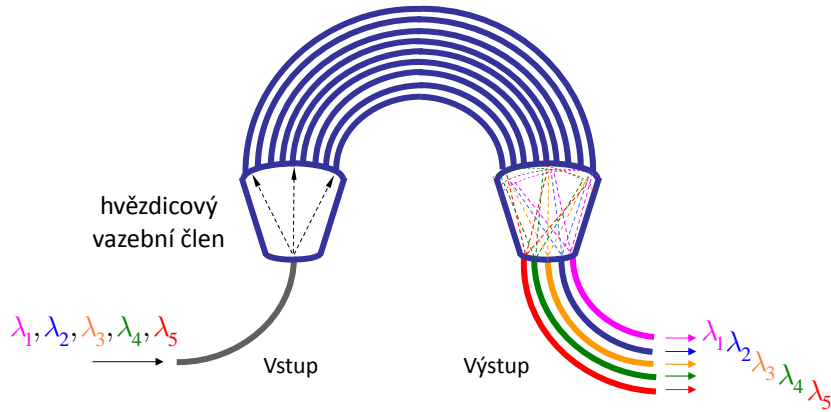
„Jalové“ vlnovody pro zlepšení rovnoměrnosti rozdělení výkonu

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

úfe

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

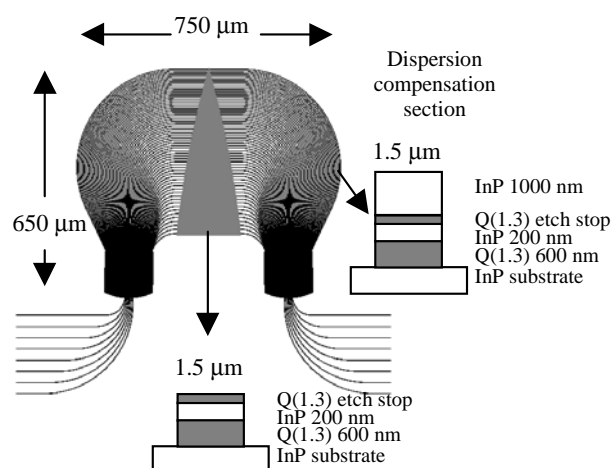
Fázovaná řada (několika desítek) vlnovodů



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

úfe

Příklad provedení integrovaně-optického AWG demultiplexoru na bázi InP

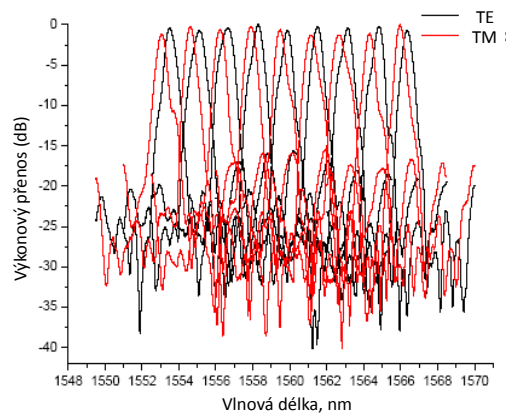


$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{f} \Delta f = \frac{\lambda^2}{c} \Delta f; \text{ pro } \lambda = 1550 \text{ nm a } \Delta f = 100 \text{ GHz je } \Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$$

úfe

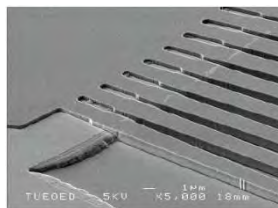
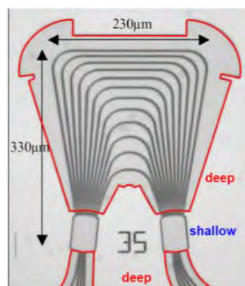
Příklady AWG demultiplexorů - 1

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



life

Příklady AWG demultiplexorů - 2

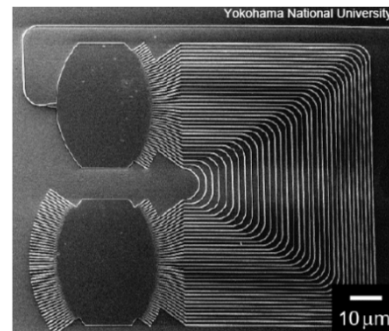


4 kanály, InP podložka

COBRA TU/e, NL:
Y. Barbarin et al.
IEEE Photon. Technol. Lett.,
Vol. 16, pp 2478-80, Nov. 2004.

17 kanálů, SOI

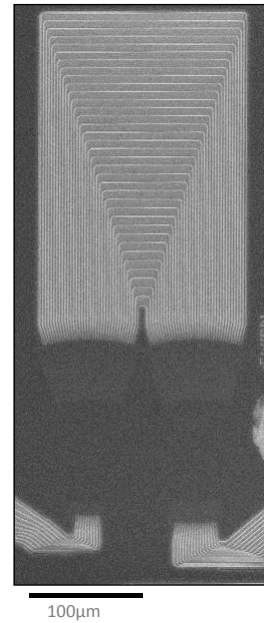
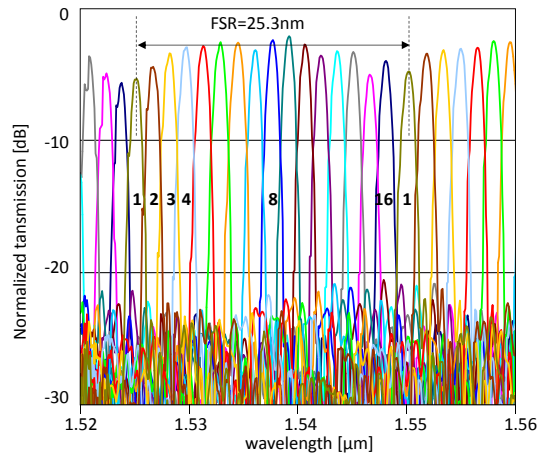
T. Fukazawa et al.
Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43
No. 5B, pp. 673–675, 2004



life

AWG

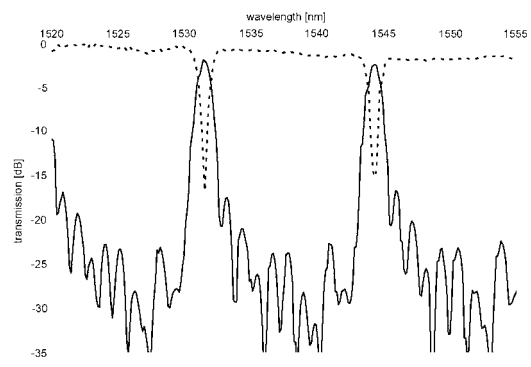
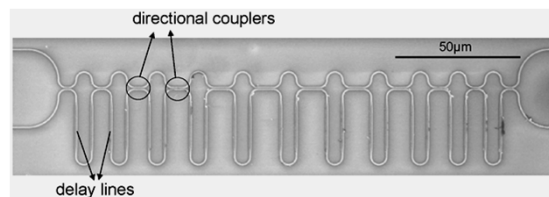
- 16-channel AWG, 200GHz
- 200 μm x 500 μm area
 - -3dB insertion loss
 - -15dB to -20dB crosstalk



life

Machūv-Zehnderův filtr 11. řádu

- Channel drop, 1 out of 8
- $\Delta f_{\text{ch}} = 200\text{GHz}$
- 11th order filter
- -15dB crosstalk



life

Dynamické a nelineární fotonické vlnovodné prvky

úfe

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

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

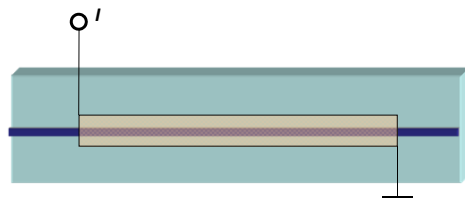
$$a_\mu(z_0 + \Delta z) \approx \exp\left[i(\beta_\mu + K_{\mu\mu}^{++})\Delta z\right] a_\mu(z_0).$$

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

$$\Delta\beta = \frac{\omega\epsilon_0}{4} \frac{|\beta_\mu|}{\beta_\mu} \iint_S \left[\epsilon(x,y) - \epsilon^{(0)}(x,y) \right] \left(\left| \mathbf{e}_{\mu\perp}^*(x,y) \right|^2 + \frac{\epsilon^{(0)}(x,y)}{\epsilon(x,y)} \left| e_{\mu z} \right|^2 \right) dx dy.$$

úfe

Termooptický jev



$$\varphi = k_0 NL$$

fázový posun
při šíření vlny

$$\Delta\varphi = \frac{d\varphi}{dT} \Delta T = \underbrace{\frac{\partial\varphi}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial T}}_{\text{vlastní termooptický jev}} + \underbrace{\frac{\partial\varphi}{\partial L} \frac{\partial L}{\partial T}}_{\text{teplotní roztažnost}}$$

- Jednoduchý jev – existuje ve všech materiálech
- při vhodné konstrukci časové konstanty řádu ms až μs !

úfe

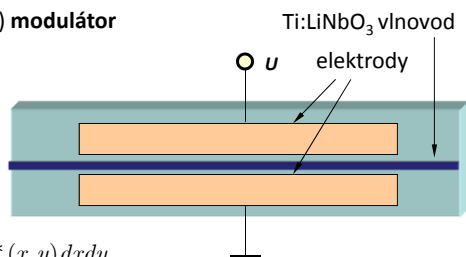
Elektrooptický jev

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

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

malá změna permitivity \Rightarrow teorie vázaných vln

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



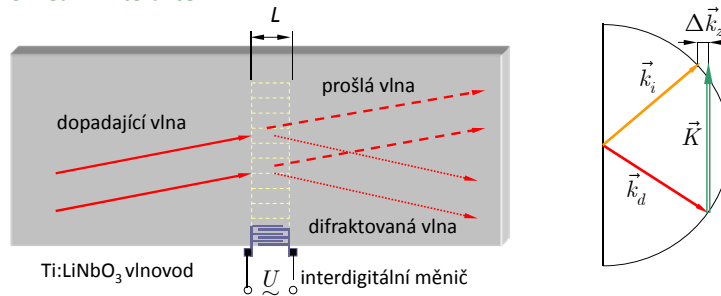
$$\begin{aligned} \Delta\beta &\approx \frac{k_0}{2} \iint_S \mathbf{e}(x, y) \cdot \Delta\varepsilon \cdot \mathbf{e}^*(x, y) dx dy \\ &= -\frac{k_0}{2} \iint_S \mathbf{e}(x, y) \cdot \varepsilon \cdot [\tilde{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{E}_v(x, y)] \cdot \varepsilon \cdot \mathbf{e}^*(x, y) dx dy \end{aligned}$$

úfe

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

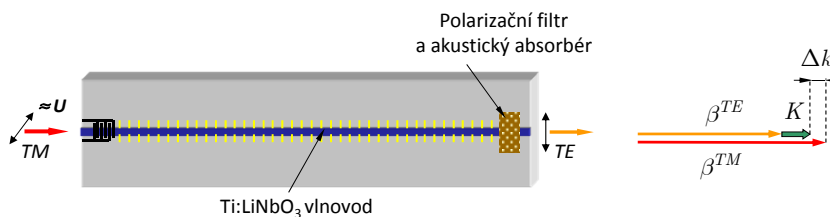
$\omega_d = \omega_i \pm \Omega_a$, zákon zachování energie

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

úfe

Akustooptický jev

Kolineární interakce



Účinnost akustooptické interakce

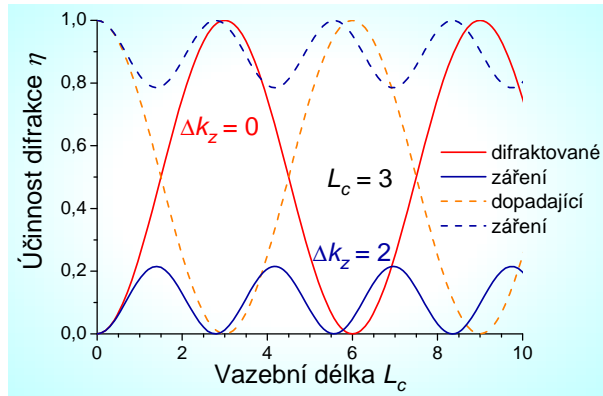
$$\eta = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + (\Delta k_z / 2)^2} \sin^2 \left(\sqrt{\kappa^2 + (\Delta k_z / 2)^2} L \right),$$

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

úfe

Účinnost akustooptické interakce

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



úfe

Vliv koncentrace volných nosičů náboje na optické vlastnosti polovodičového materiálu

“Volné” elektrony ve vodivostním pásu v homogenním elektrickém poli

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

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. $v = \frac{dx}{dt} = \frac{q}{\gamma} E = \mu_e E$, μ_e – pohyblivost elektronu

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

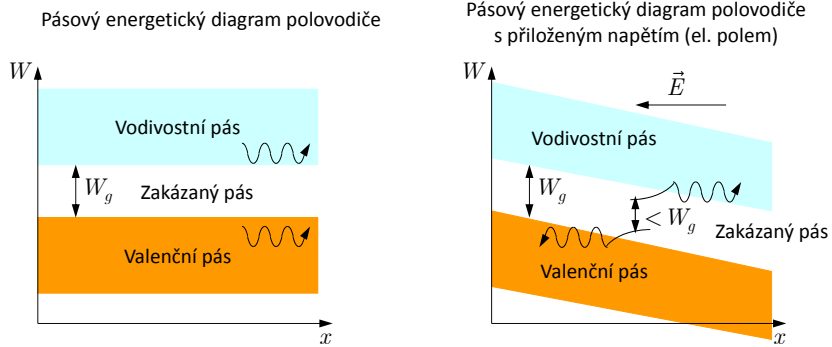
pak

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

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

úfe

Elektroabsorpce a elektrorefrakce v polovodičích



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

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

Elektro**absorpční** jev \Rightarrow změna spektrální závislosti absorpce

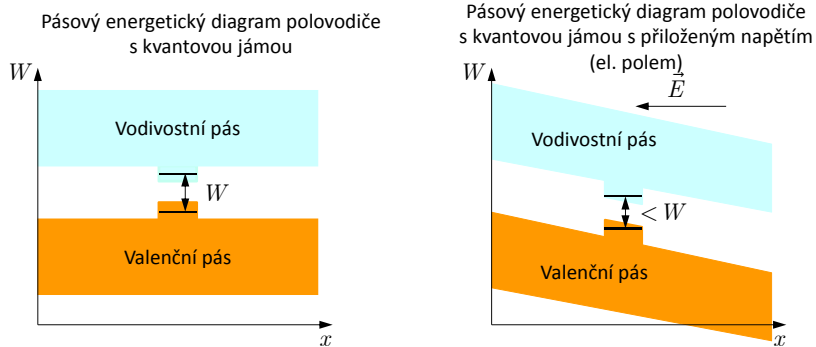


Kramersovy-Kronigovy relace \Rightarrow Elektro**refrakční** jev

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

úfe

Starkův jev v kvantově ohraničených strukturách (QCSE)



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

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

Elektro**absorpční** Starkův jev (QCSE) \Rightarrow

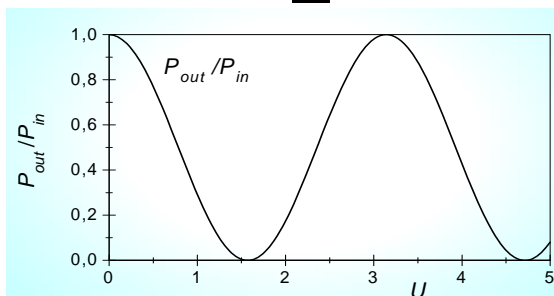
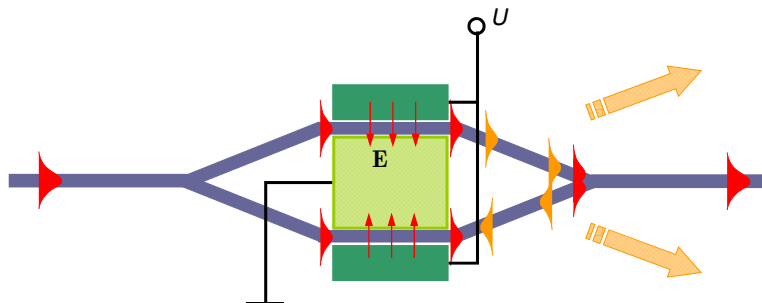
Kramersovy-Kronigovy relace \Rightarrow

Elektro**refrakční** Starkův jev (QCSE)

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

úfe

Machův-Zehnderův interferometrický modulátor



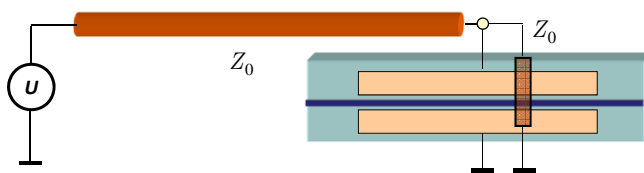
$$P_{out} = P_{in} \cos^2 \left(\frac{\pi U}{2 U_{\pi}} \right)$$

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

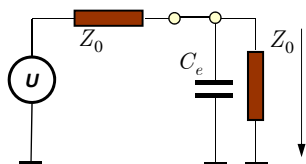
life

Modulační rychlost elektrooptických modulátorů I

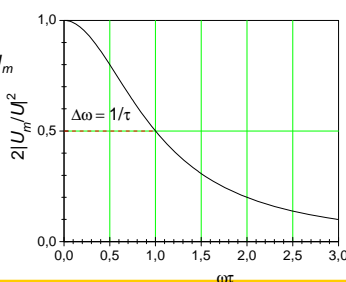
Standardní modulátor s elektrodami „se soustředěnými parametry“



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



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



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

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

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

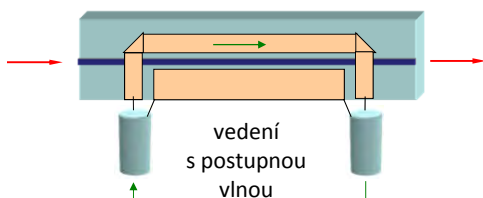
$$Z_0 = 50 \Omega,$$

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

life

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 modulace elektrodami délky L :

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

Optická vlna:

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

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

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

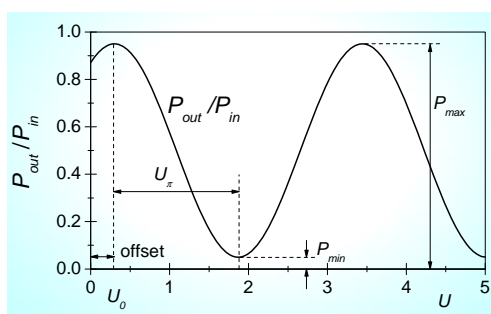
Pro $N_\mu \approx 4.2$, $N \approx 2.2$

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

úfe

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.

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

Spínací poměr (extinkce, extinkční poměr)

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

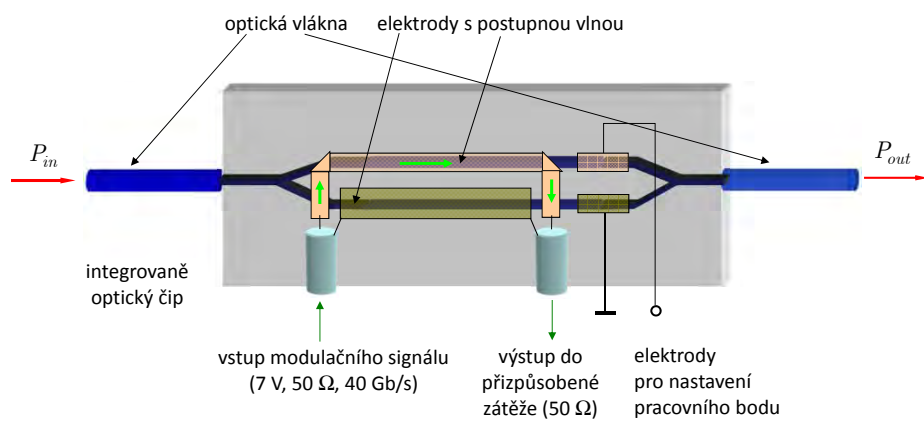
Vložný útlum

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

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

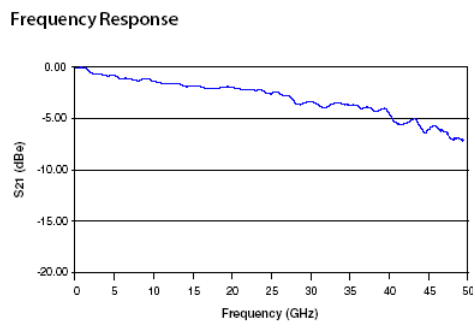
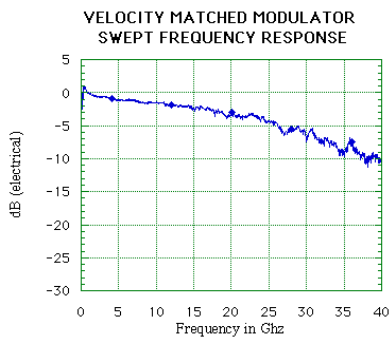
úfe

Elektroopticky řízený Machův-Zehnderův interferometrický modulátor s postupnou vlnou



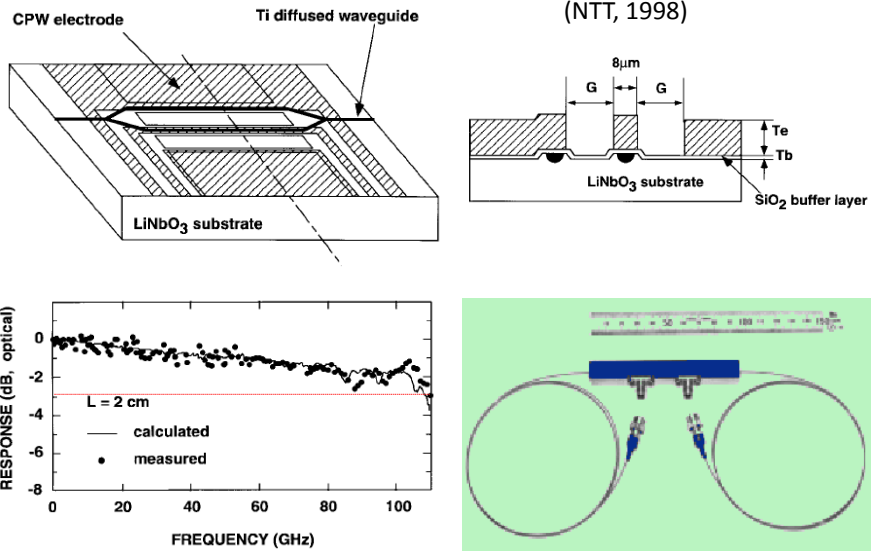
life

Komerční elektrooptické modulátory



life

100 GHz LiNbO₃ modulátor s ovládacím napětím 5,1 V

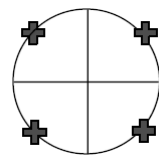


life

Modulátor pro kvadrurní fázovou modulaci (QPSK)

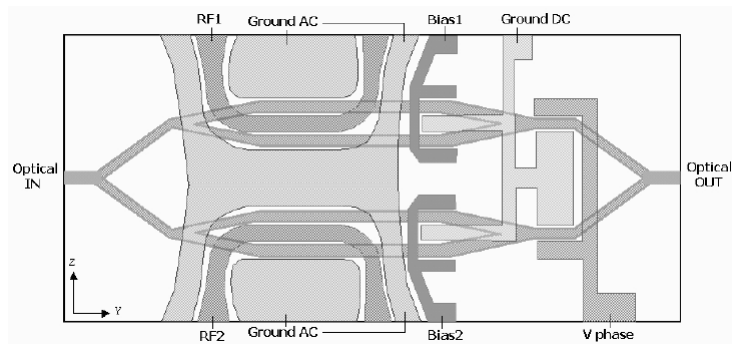
Imaginary axis

Modulační formát přenášející 2 bity/symbol



Real axis

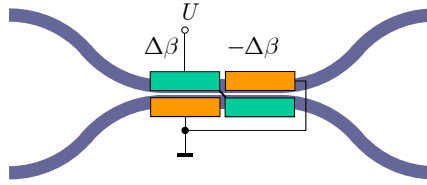
Realizace v LiNbO₃



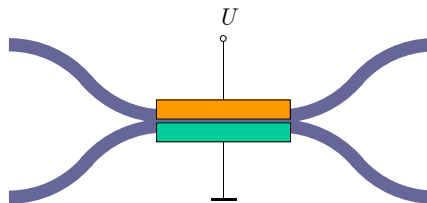
life

Elektrooptické vlnovodné přepínače

Elektroopticky řízená
směrová odbočnice
2 nebo více sekcí
opačně napájených
„ $\Delta\beta$ – reversal“
Nízké ovládací napětí,
komplikovaná spínací
charakteristika



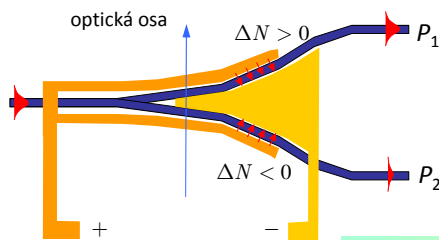
Přepínač s dvouvidovou
interferencí
„two-mode interference coupler“
Nízké ovládací napětí,
sinusová spínací charakteristika



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**.

úfe

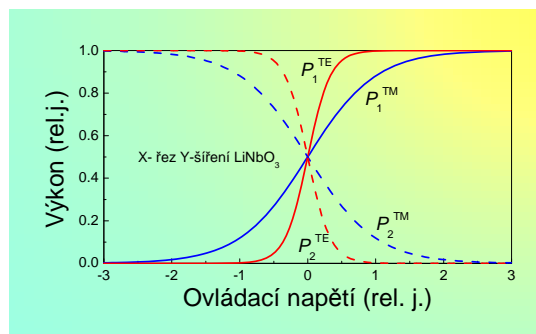
Polarizačně nezávislý „digitální“ optický přepínač (DOS) v LiNbO_3



Symetrické rozvětvení
s elektroopticky indukovanou
asymetrií

Přepínací charakteristika

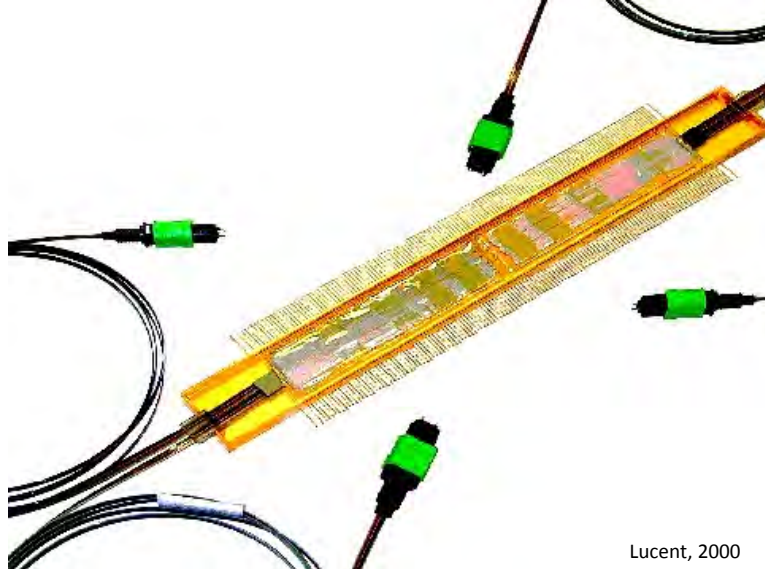
Vlastnosti přepínače DOS:
polarizační nezávislost,
velmi výhodný (skokovitý) tvar
přepínací charakteristiky;
velké ovládací napětí (± 60 V)



úfe

Elektrooptický přepínač 16×16 v Ti:LiNbO₃ (2×20×5 mm)

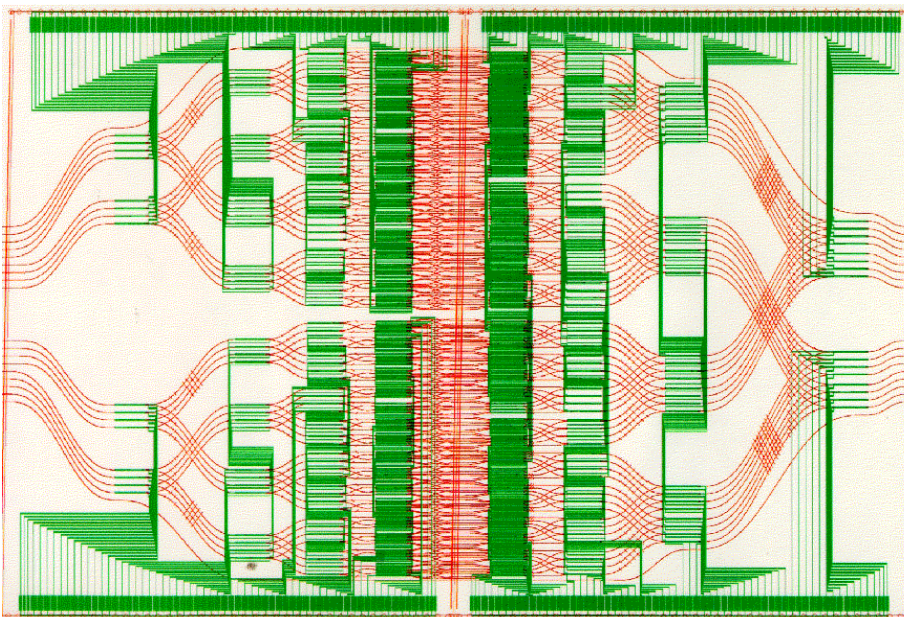
„Neblokující“ architektura, 480 DOS přepínačů. $U = \pm 45$ V, $IL < 15$ dB,
 $\tau \cong 5$ ns, kompenzace PMD křemennou $\lambda/2$ destičkou (PMD < 1 ps)



Lucent, 2000

life

„Layout“ optických vlnovodů a elektrodové struktury přepínače



life

Počet přepínačů 1×2 („DOS“) potřebný pro realizaci
přepínací matice N×N s „neblokující architekturou“

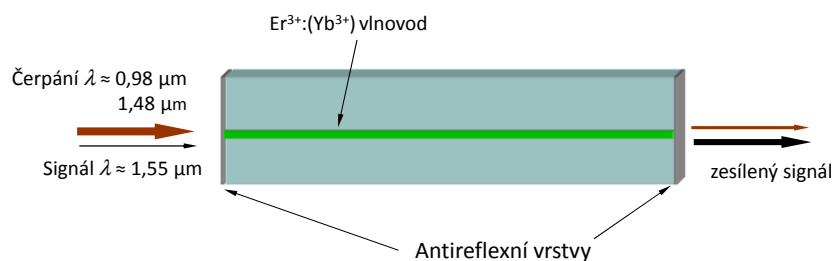
The diagram shows three stages of development indicated by arrows pointing to the table rows:

- R&D Design:** Indicated by a large downward arrow on the left, covering all rows from N=2 to N=1024.
- R&D Fabrication:** Indicated by a downward arrow, covering rows from N=4 to N=1024.
- Commercially Available:** Indicated by a downward arrow, covering rows from N=8 to N=1024.

N	Number of 1×2's
2	4
4	24
8	112
16	480
32	1984
64	8064
128	32,512
256	130,560
512	523,264
1024	2,095,104

úfe

Vlnovodné optické zesilovače a lasery (EDWA, EDWL)



Vlnovody z různých materiálů: (fosfátové) sklo, Al_2O_3 , LiNbO_3 , ...
zesílení ≈ 10 dB

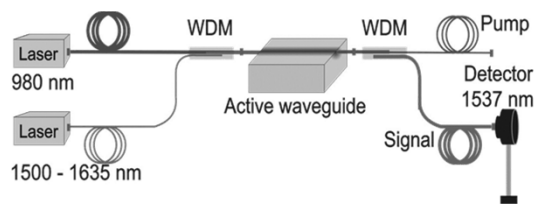
Výhody: malé rozměry, možnost současného zesilování signálů
na různých „nosných“ vlnových délkách
možnost integrace s pasivními součástkami na jednom čipu
("zero-dB splitter")

Nevýhody: malá délka \rightarrow vysoká koncentrace dopantů, **malé zesílení**

úfe

Vlnodný optický zesilovač dopovaný erbiem

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

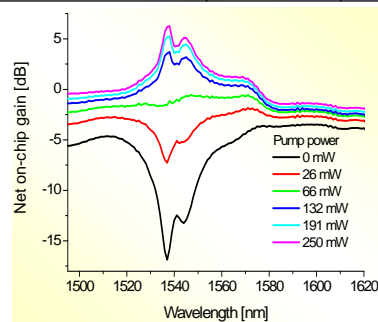


úfe

Vlnodný optický zesilovač dopovaný erbiem

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

Waveguide parameters	K ⁺	Ag ⁺
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

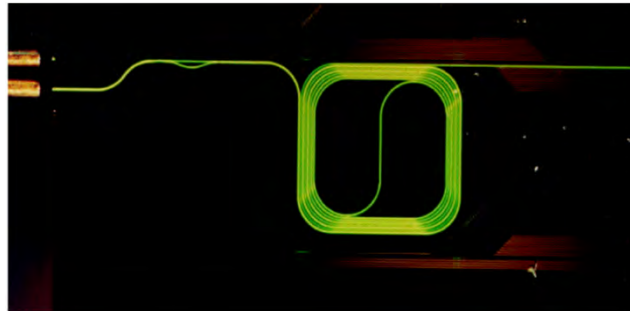


úfe

Vlnodný zesilovač $\text{Al}_2\text{O}_3: \text{Er}^{3+}$ na Si/SiO_2 podložce

spirála $1 \times 1 \text{ mm}^2$

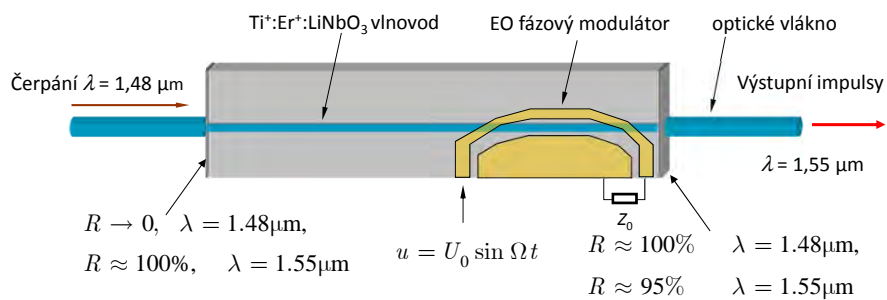
zisk 2,3 dB na $\lambda = 1,55 \mu\text{m}$ při čerpání 10 mW na $1,48 \mu\text{m}$



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

úfe

Vlnodný $\text{Ti}:\text{Er}:\text{LiNbO}_3$ laser s integrovaným elektrooptickým modulátorem pro synchronizaci vidů



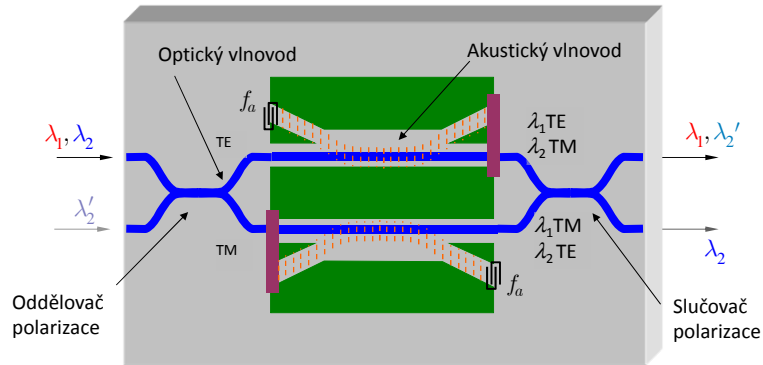
Ultrakrátké pulsy ($\leq 5 \text{ ps}$), opakovací frekvence $\approx 20 \text{ GHz}$

(Univerzita Paderborn, D, 1997-2000)

úfe

Polarizačně nezávislý akustooptický laditelný začleňovací/vydělovací demultiplexor v LiNbO₃

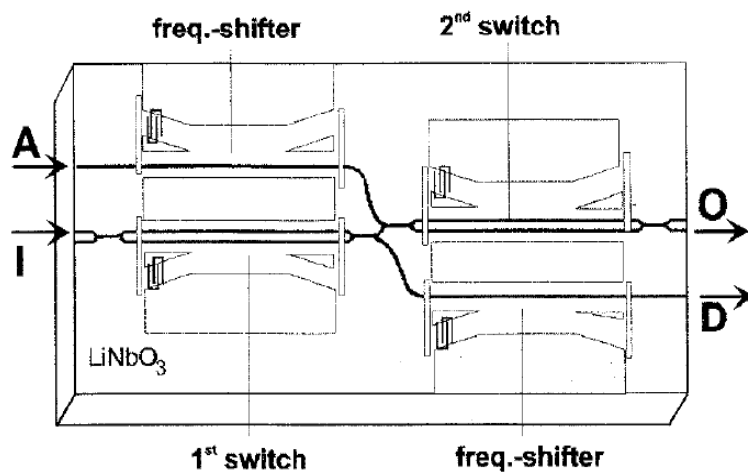
Princip: kolineární AO TE-TM konverze



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

ife

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

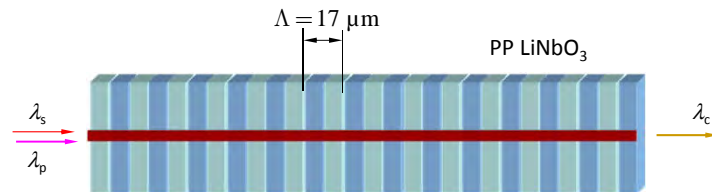


(Univerzita Paderborn 1997-2000)

ife

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

Nelineární optický jev 2. řádu – generování rozdílové frekvence

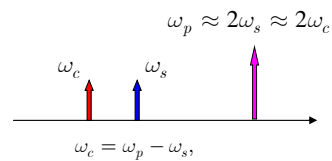


$$K = 2\pi / \Lambda; \quad k_c = k_p - k_s + K;$$

Problém: vlnovod je na $\omega_p \approx 2\omega_s$

dvou- až třívlidový \Rightarrow obtížná excitace základního vidu.

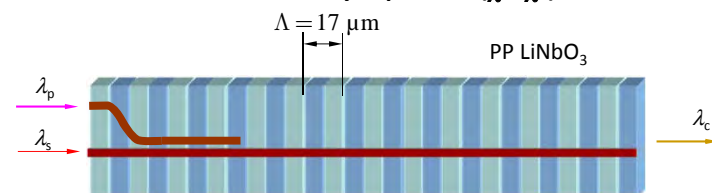
Řešení: kaskádní aplikace dvou procesů $\chi^{(2)}$



úfe

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

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



Princip

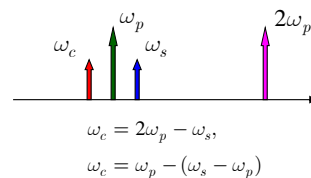
1. generování 2. harmonické
2. generování rozdílové frekvence

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

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

Aplikační možnosti

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



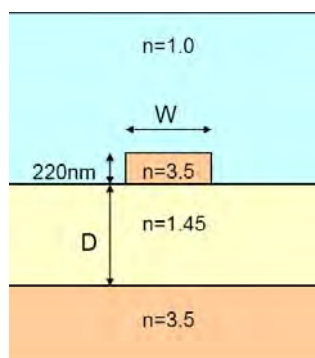
úfe

Vlnovody s velkým kontrastem indexu lomu

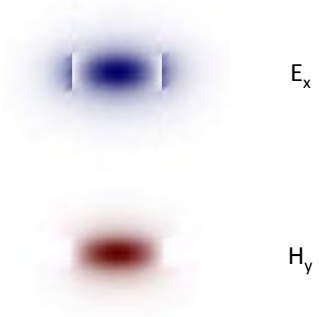
úfe

„Fotonický drát“

(vlnovod s velkým kontrastem indexu lomu)

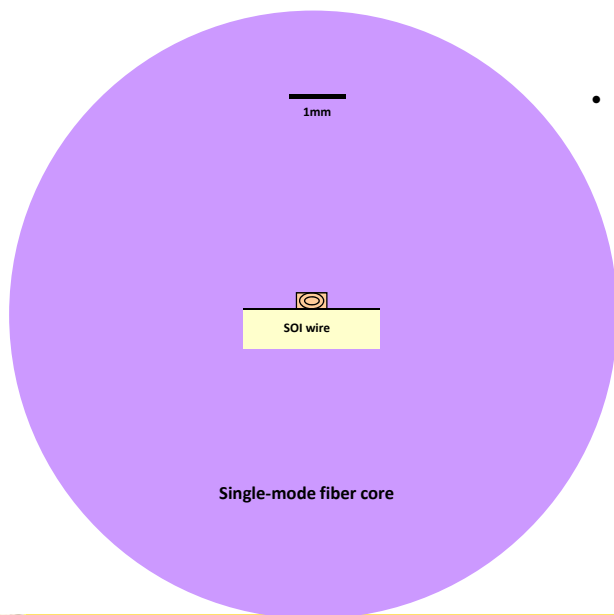


Rozložení elektromagnetického pole základního vidu TE_{00}



úfe

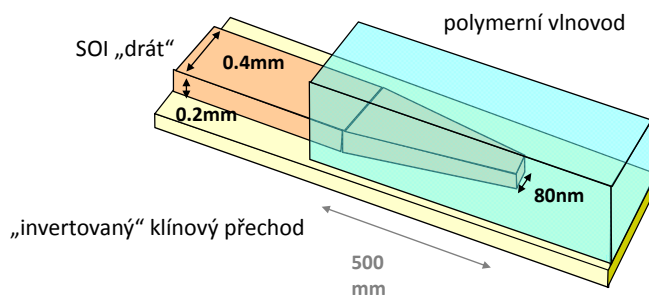
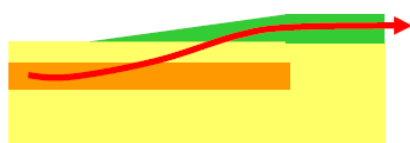
Vazba do „nanofotonických“ vlnovodů



- **Problémy:**
 - Účinná vazba mezi submikrometrovým vlnovodem a vláknem
 - Je nutný konvertor velikosti vidového pole:
 - v horizontální rovině
 - ve vertikální rovině (obtížnější)
 - Polarizační problém

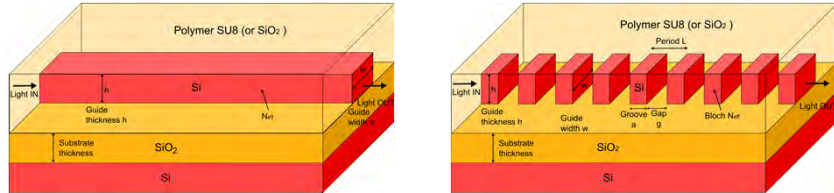
úfe

„Adiabatický přechod“ mezi vlnovody velmi různých profilů / kontrastů

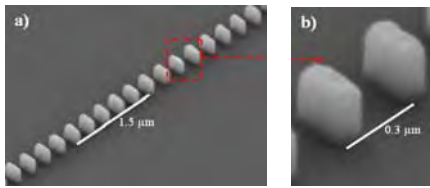


úfe

Křemíkové vlnovody se subvlnovými mřížkami



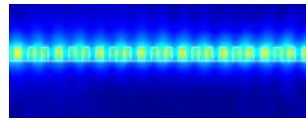
Schematic picture of (a) a strip channel waveguide and (b) SWG waveguide considered in this contribution. In both cases, Si guide (either continuous or segmented) on SiO₂ substrate, embedded in SU8 polymer (or, alternatively in SiO₂ cladding) are considered; h represents the guide thickness, w guide width, L is the SWG period (with Si groove dimension a, and gap g).



Scanning electron microscope (SEM) images of fabricated structures including: a) SWG straight waveguide with $\Lambda = 300$ nm, $w = 250$ nm and a duty cycle of 33%. b) Detail of two SWG segments.

P. J. Bock, Optics Express, 18(19), 20251 (2010).

- SWG waveguide - a new type of microphotonic waveguide
- Practical implementations to fiber-chip coupling, waveguide crossing and refractive index engineering

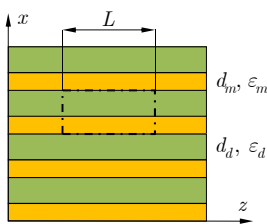


life

ELEMENTÁRNÍ TEORIE EFEKTIVNÍHO PROSTŘEDÍ

Vrstevnaté prostředí s parametry ϵ_1 , d_1 a ϵ_2 , d_2

$$d_1, d_2 \ll \lambda$$



Ekvivalentní kapacitor s deskami podél x:

$$C_{eq} = \frac{\epsilon_1 d_1}{L} + \frac{\epsilon_2 d_2}{L} = \frac{\epsilon_{\parallel} (d_1 + d_2)}{L}; \quad \epsilon_{\parallel} \dots \text{eff. permittivity}$$

Tedy $\epsilon_{\parallel} = f\epsilon_1 + (1-f)\epsilon_2$, $f = \frac{d_1}{d_1 + d_2} = \frac{d_1}{L}$

Ekvivalentní kapacitor s deskami podél z: $0 \leq f \leq 1$.

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{d_1}{\epsilon_1 L} + \frac{d_2}{\epsilon_2 L} = \frac{(d_1 + d_2)}{\epsilon_{\perp} L} \quad \epsilon_{\perp} \dots \text{eff. permittivity,}$$

Tedy $\frac{1}{\epsilon_{\perp}} = \frac{1}{\epsilon_1} f + \frac{1}{\epsilon_2} (1-f)$, $\epsilon_{\perp} = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{f\epsilon_2 + (1-f)\epsilon_1}$,

Efektivní prostředí je anizotropní, jednoosé, s tenzorem permitivity

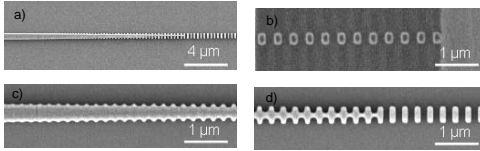
$$\epsilon_{eff} = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\parallel} \end{pmatrix}$$

J. C. Maxwell Garnett, "Colours in metal glasses and in metallic films,"
Philosophical Transaction of the Royal Society London **203**, 385-420 (1904).

life

Složitější subvlnové vlnovodné struktury

Vidový transformátor

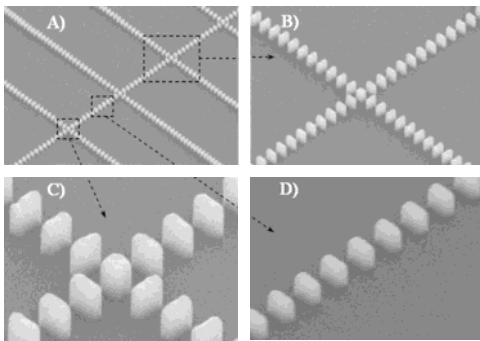


Subwavelength grating mode transformer.

- a) SEM image of the coupler,
- b) low - confinement section near the chip edge,
- c) high-confinement section near the strip waveguide,
- d) Intermediate section.

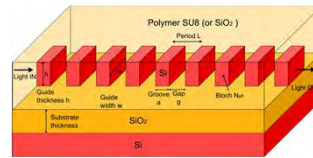
P. J. Bock et al., 7th IEEE Conference on Group IV Photonics, Sept. 2010, Beijing

Křížení segmentovaných vlnovodů



Scanning electron microscope images of SWG crossings:
 A) multiple SWG crossings,
 B) one SWG crossing,
 C) detail of the crossing region with square center segment,
 D) SWG straight waveguide.

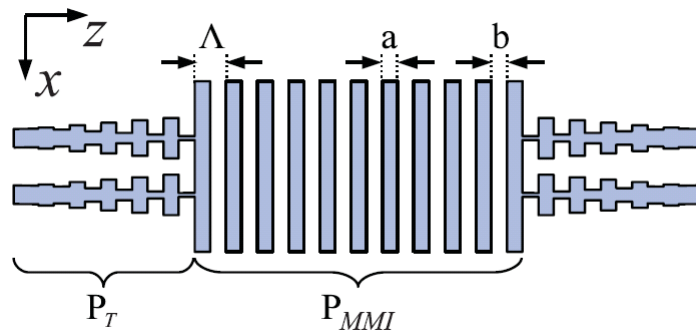
P. J. Bock et al., Optics Express, 18(15), 16146 (2010).



life

Aplikace subvlnových segmentovaných vlnovodů na vazební člen s mnohovlnovou interferencí

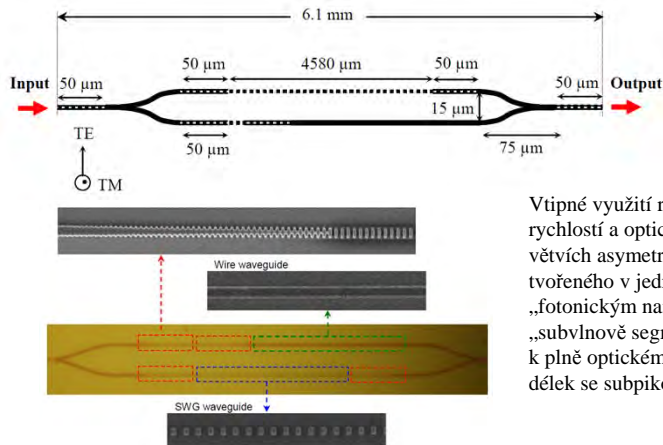
A. Maese-Novo, R. Halir, S. Romero-García, D. Pérez-Galacho,
 L. Zavargo-Peche, A. Ortega-Monux, I. Molina-Fernández,
 J. G. Wanguemert-Pérez, and P. Cheben, Wavelength-Independent Multimode Interference Coupler, Opt. Express 2012 (in print)



life

Aplikace subvlnových segmentovaných vlnodů na optický konvertor vlnových délek

I. Glesk, P. J. Bock, P. Cheben *et al.*, Optics Express, 19 (15), 14031 (2011).



Vtipné využití rozdílů fázových a grupových rychlostí a optické lokalizace v jednotlivých větvích asymetrického MZ interferometru tvořeného v jedné větvi homogenním „fotonickým nanodrátem“ a ve druhé větvi „subvlnově segmentovaným“ vlnovodem k plně optickému spínání a konverzi vlnových délek se subpikosekundovou rychlostí