

Základy technologie

fotonických vlnovodných struktur

Některé významnější technologie

Iontová výměna ve skleněných podložkách (ion exchange – difúzní proces)

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

Polymery (odstředivé nanášení)

Termooptické (elektrooptické?) modulátory a přepínače

Ti:LiNbO₃, APE LiNbO₃ (difúzní procesy)

Elektrooptické, akustooptické, aktivní (dotované Er^{3+}),
nelineární optické prvky (kaskádní procesy χ^2 : χ^2)

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

hydrolyza plamenem (IO „vlákno“)

Měrný útlum řádu 0.001 dB/cm

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

Si₃N₄ on silica ($\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$) (chemické depozice - PECVD);

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

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

MOCVD, MBE, CBE

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

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

(„wafer bonding“, extrémní kontrast indexu lomu 3.5 : 1.5,
velmi malá stopa vidu, extrémní hustota součástek)

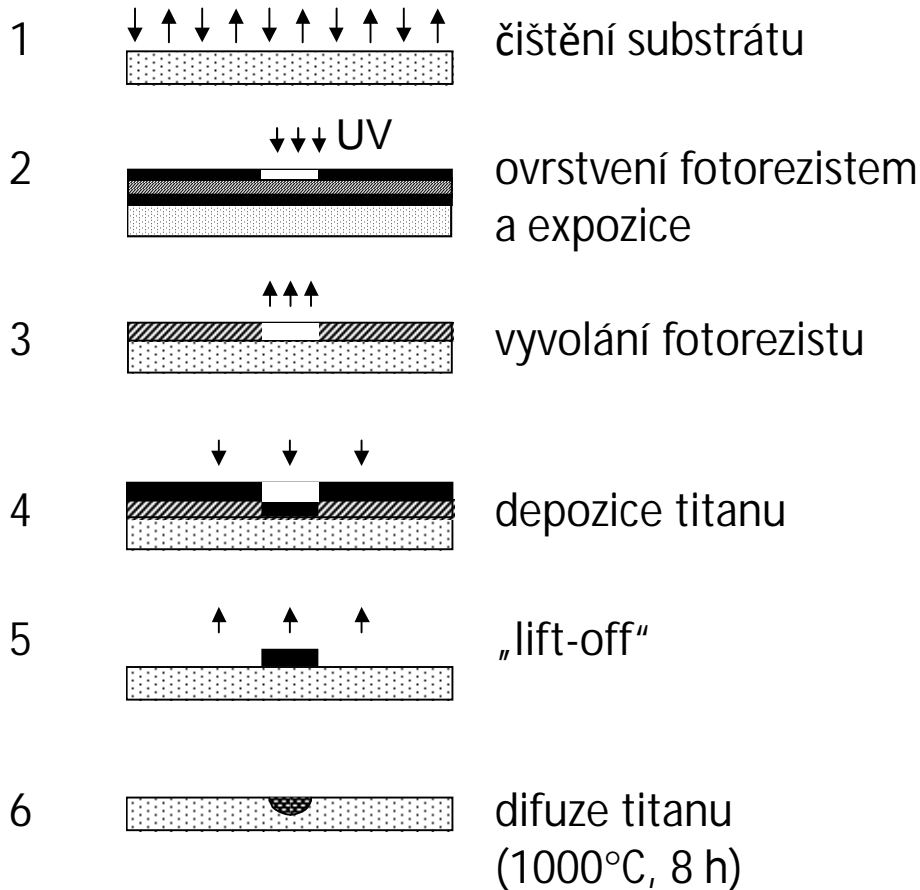
Lithium Niobate on Insulator (LNOI, $\text{LiNbO}_3/\text{SiO}_2/\text{Si}$)

(„wafer bonding“); velký kontrast indexu lomu 2.2 : 1.5

menší stopa pole vidu, vysoká účinnost elektrooptických součástek

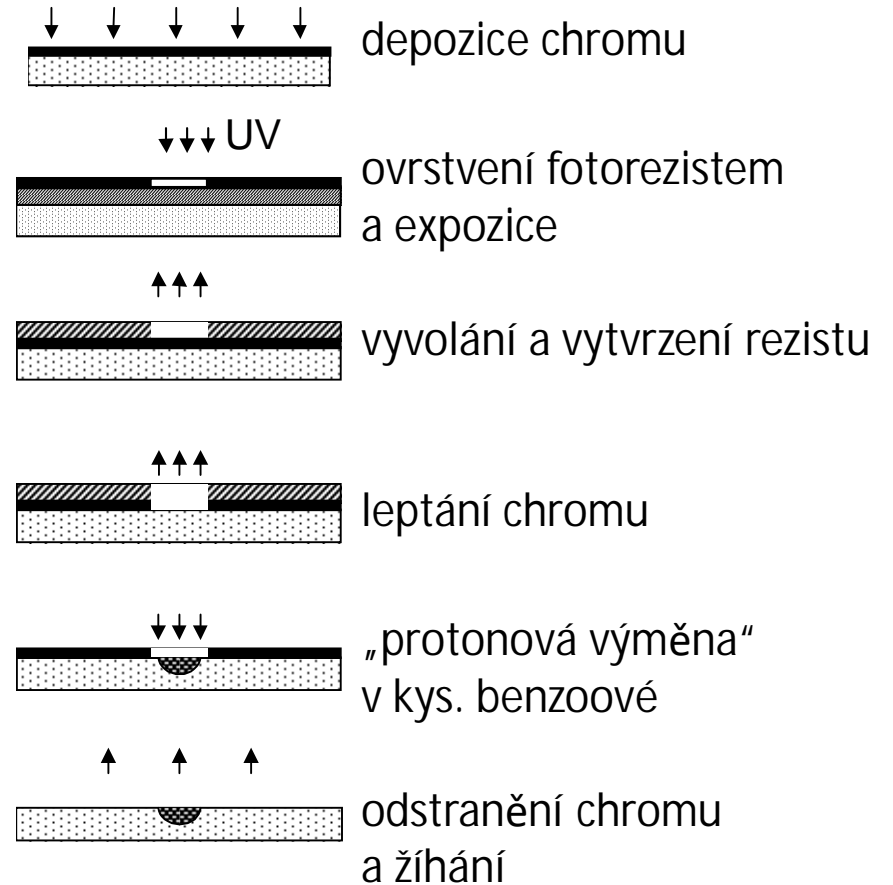
Příprava vlnovodů v LiNbO_3 difúzními metodami

Difuze titanu



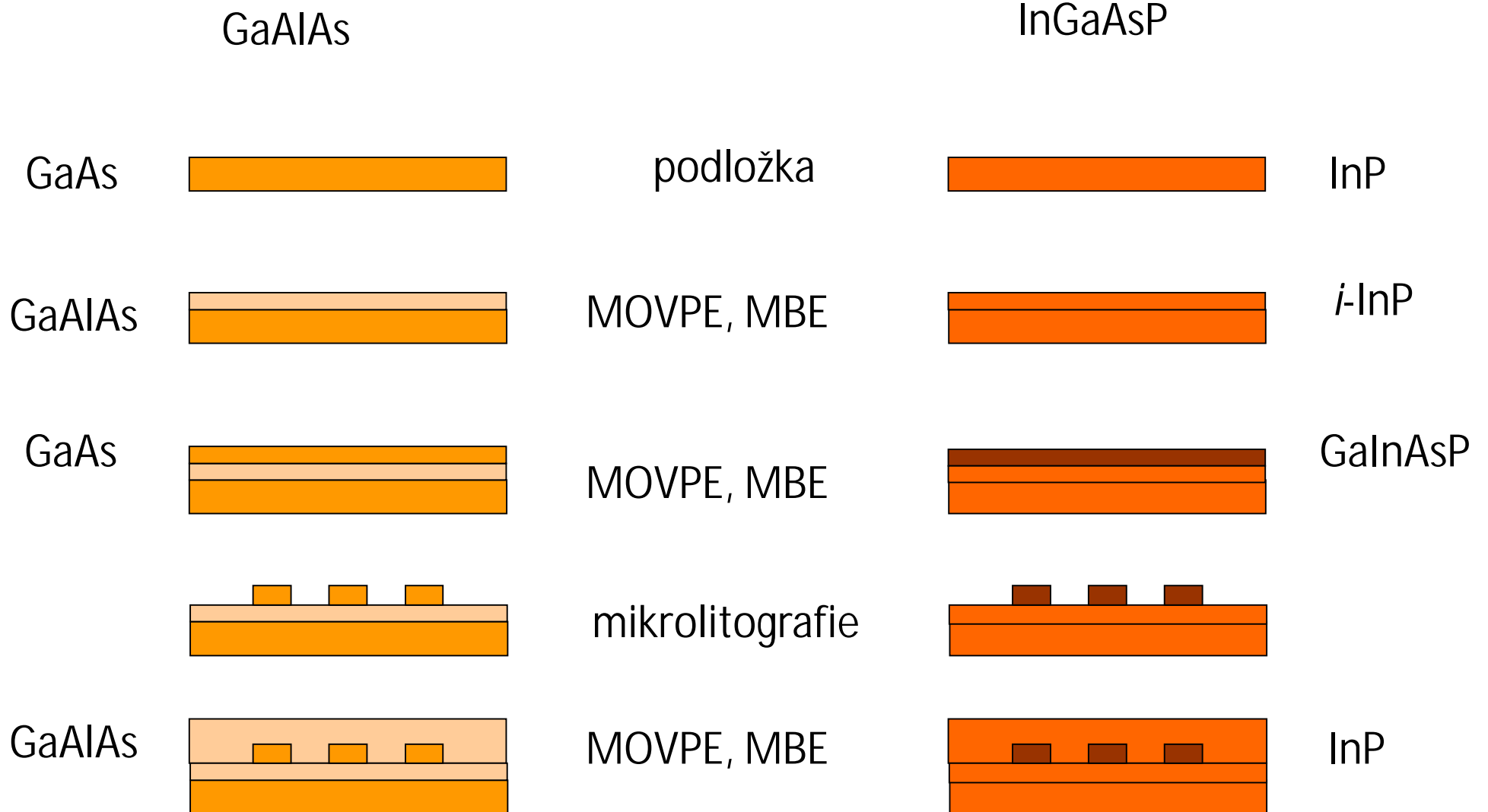
vlnovod vede *obě* polarizace *různě*

Protonová výměna

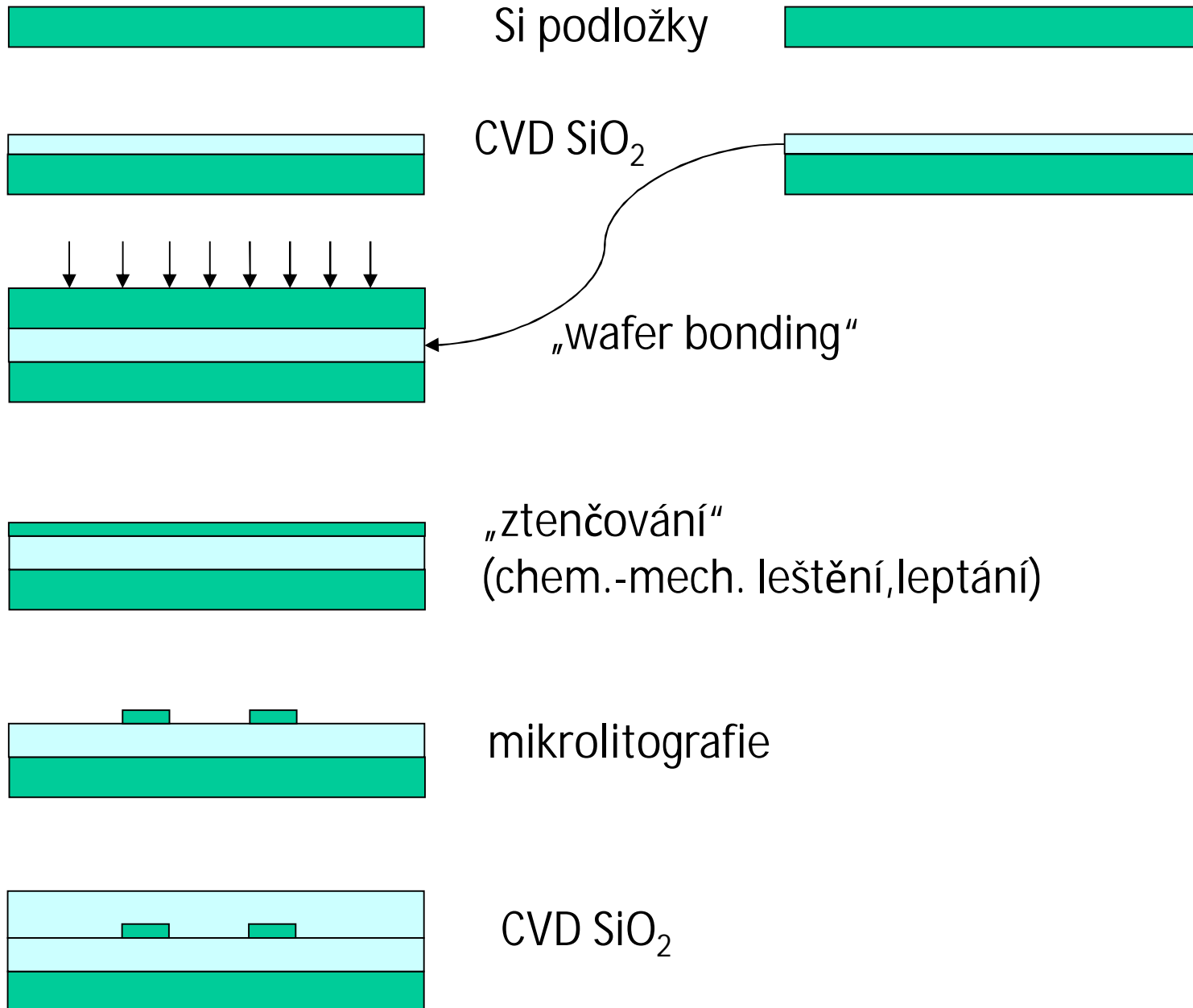


vlnovod vede *jedinou polarizaci*

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



Příprava vlnovodů SOI (silicon on insulator)



Lithium niobate on insulator – technologie přípravy

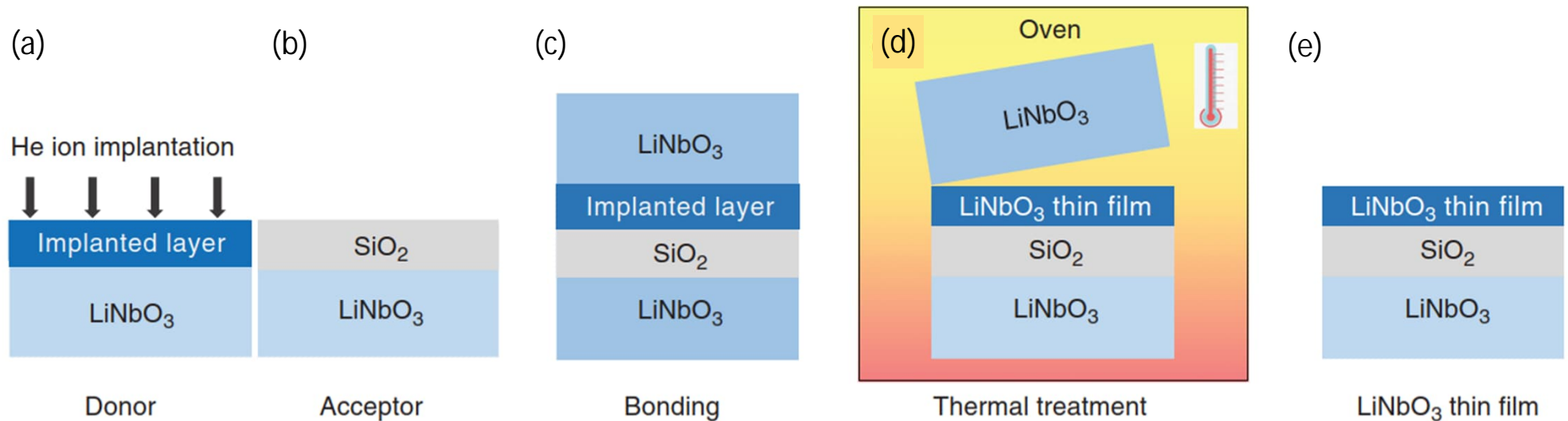
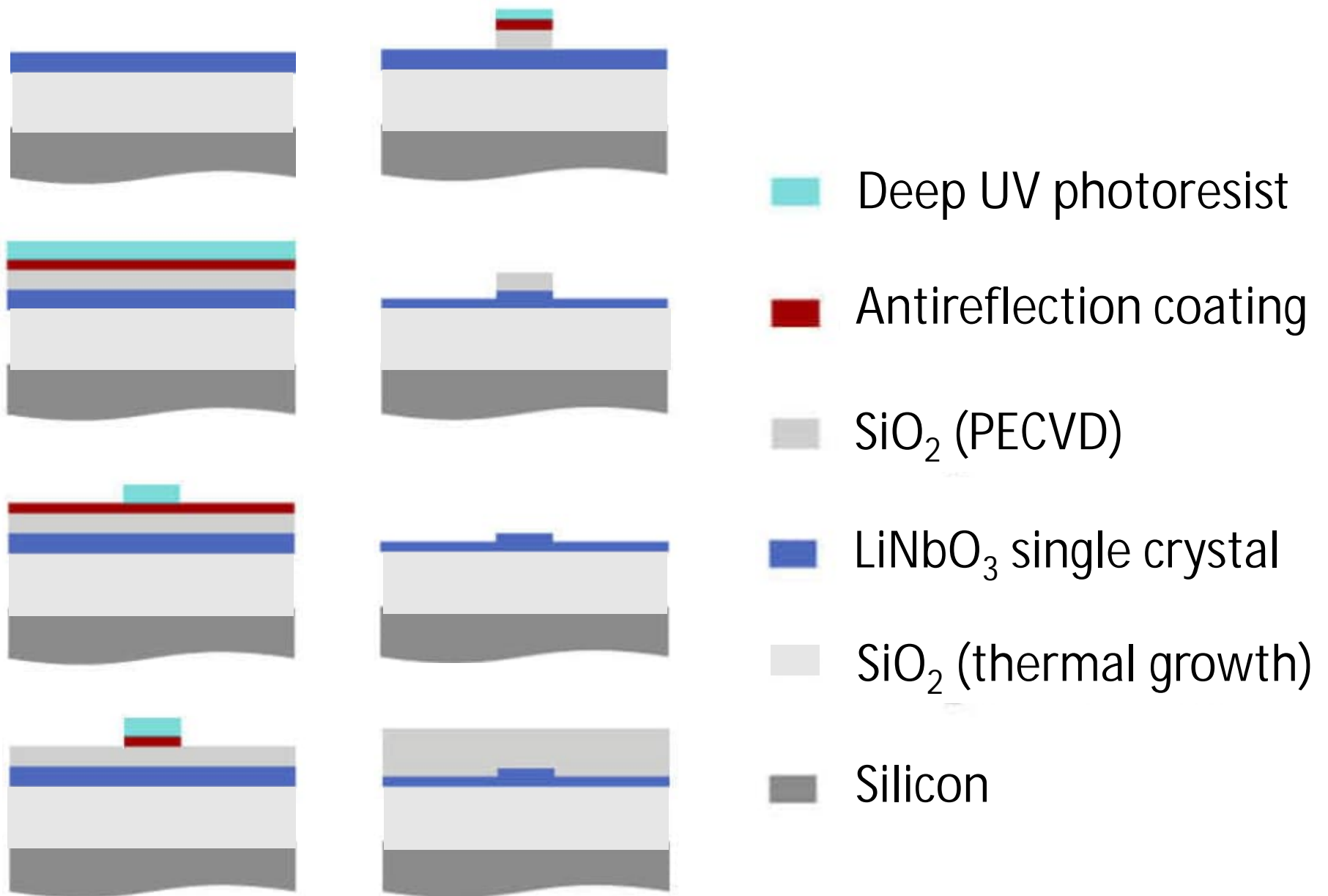


FIG. 1. Fabrication sequence of lithium-niobate-on-insulator thin films by combining ion cut and wafer bonding: (a) preparation of ion-implanted donor wafer and (b) SiO₂-deposited acceptor wafer, (c) wafer bonding, (d) thermal treatment. (e) The final high-quality lithium-niobate-on-insulator thin film after a fine surface polishing process.

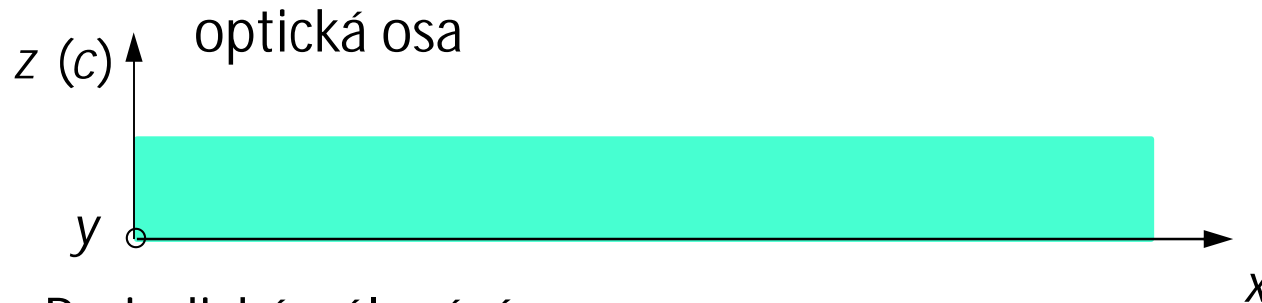
Y. Jia, L. Wang, and F. Chena, *Appl. Phys. Rev.* 8, 011307 (2021)

Příprava vlnovodů LNOI (lithium niobate on insulator)

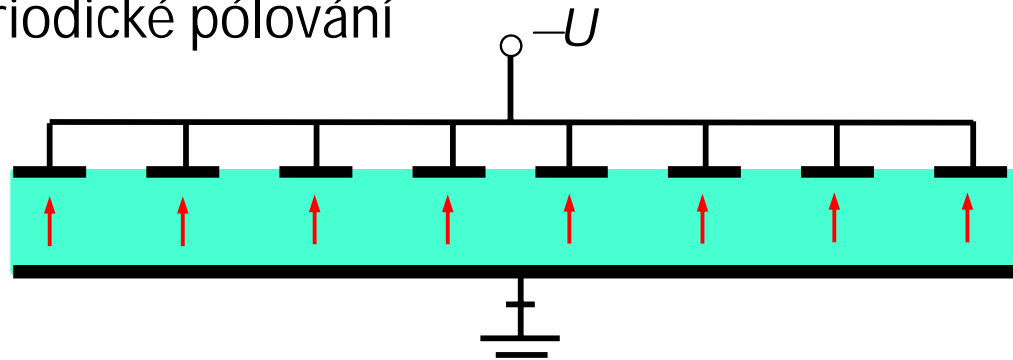


Periodické pólování krystalu LiNbO_3

Monokrystal LiNbO_3

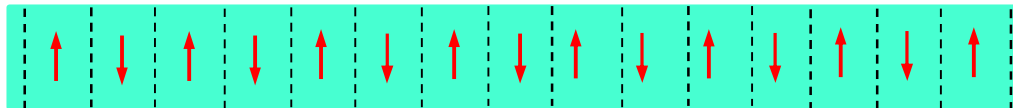


Periodické pólování



za vysoké teploty
pod Curieho bodem

Výsledek:



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

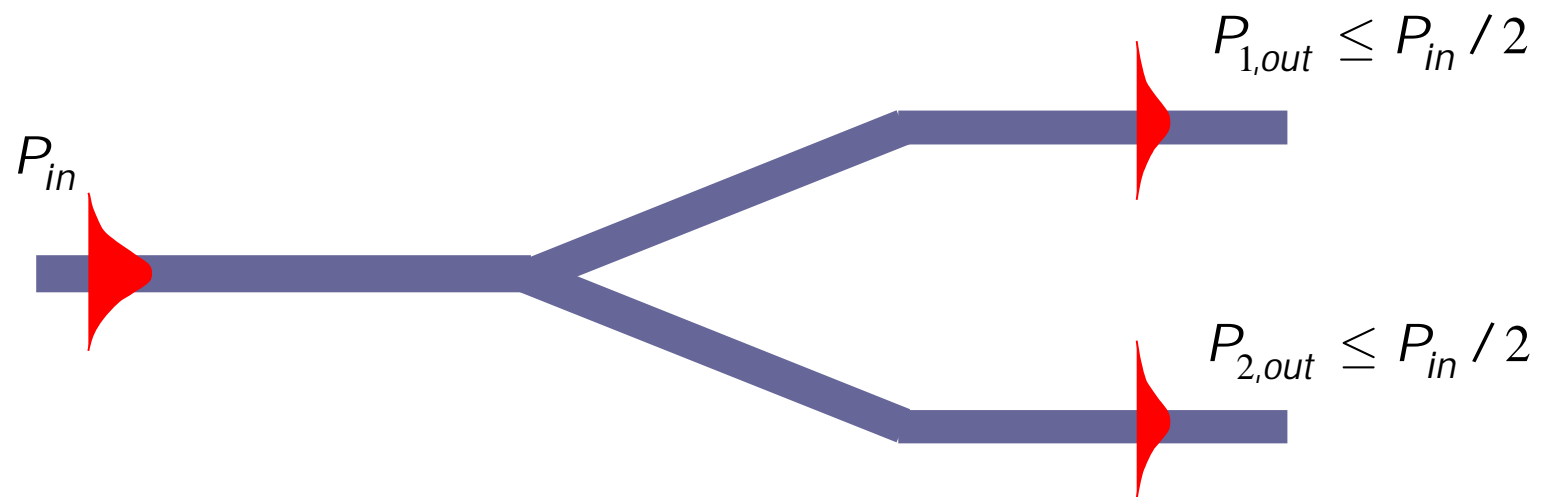
Příprava masek na elektronovém litografu

1. Modelování a návrh struktury vlnovodů 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

Pasivní fotonické vlnovodné struktury

Vlnovodné rozvětvení 1×2

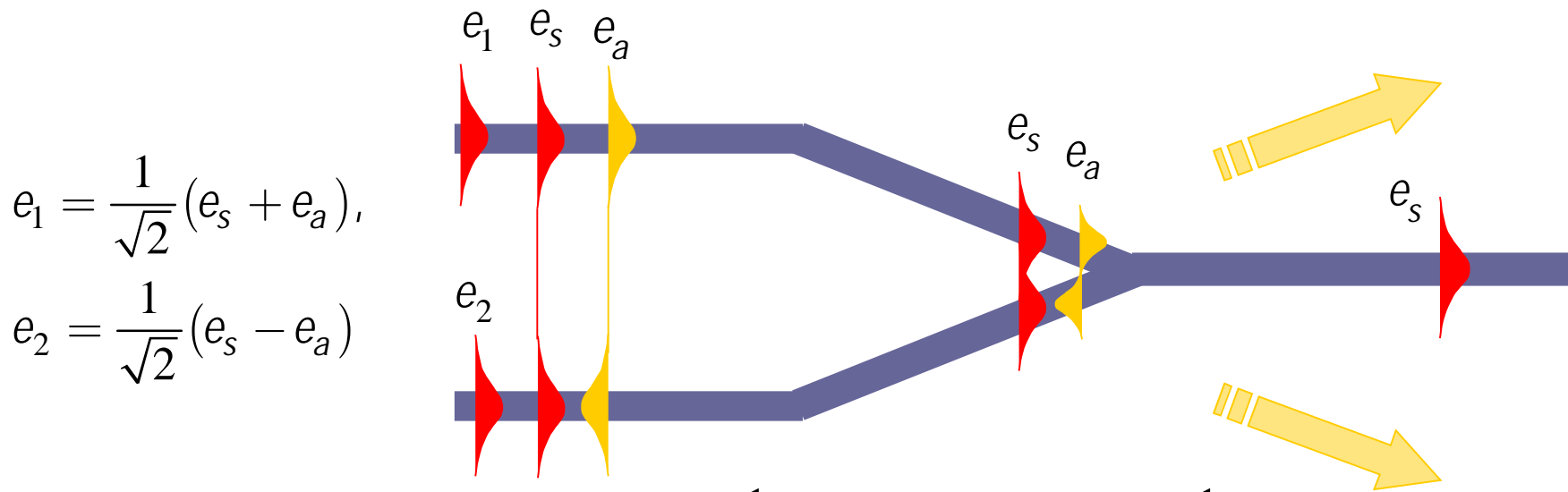
1. Jednovodové rozvětvení buzené do společné větve



Výkon se dělí rovnoměrně do obou výstupních větví z důvodů symetrie

Symetrické rozvětvení buzené v opačném směru

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



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

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

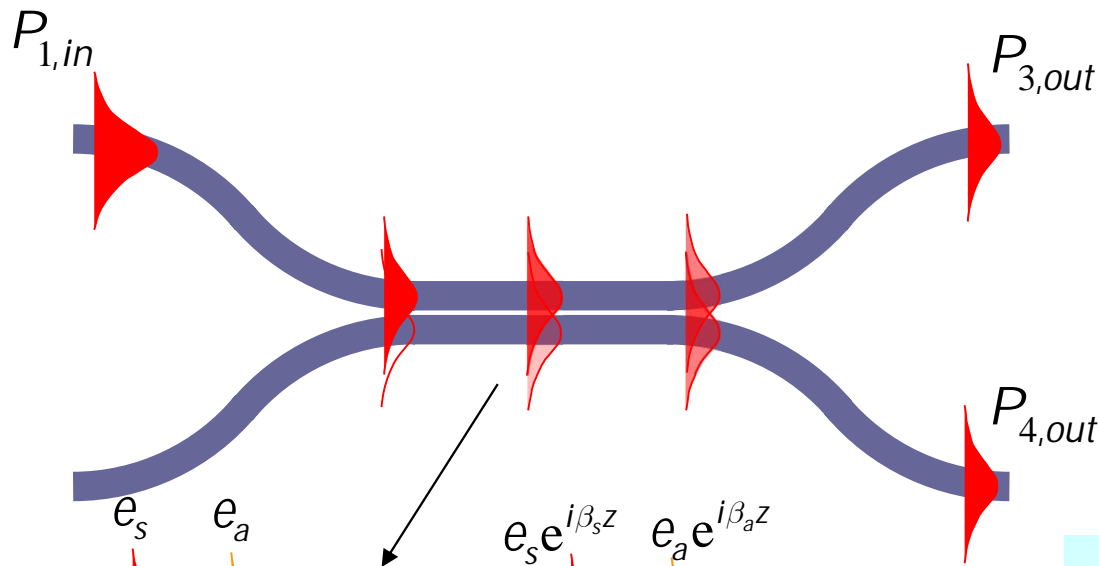
$$E_{out} \cong e_1 e^{i\Delta\varphi/2} + e_2 e^{-i\Delta\varphi/2} = \frac{1}{\sqrt{2}}(e_s + e_a) e^{i\Delta\varphi/2} + \frac{1}{\sqrt{2}}(e_s - e_a) e^{-i\Delta\varphi/2} =$$

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

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

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

Symetrická směrová odbočnice (směrový vazební člen)

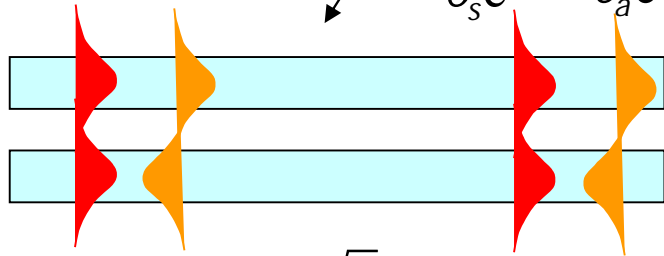


$$P_{3,out} = P_{1,in} \cos^2(\kappa L),$$

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

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

$$L_c = \frac{\pi}{\beta_s - \beta_a} = \frac{\lambda}{2(N_s - N_a)}$$



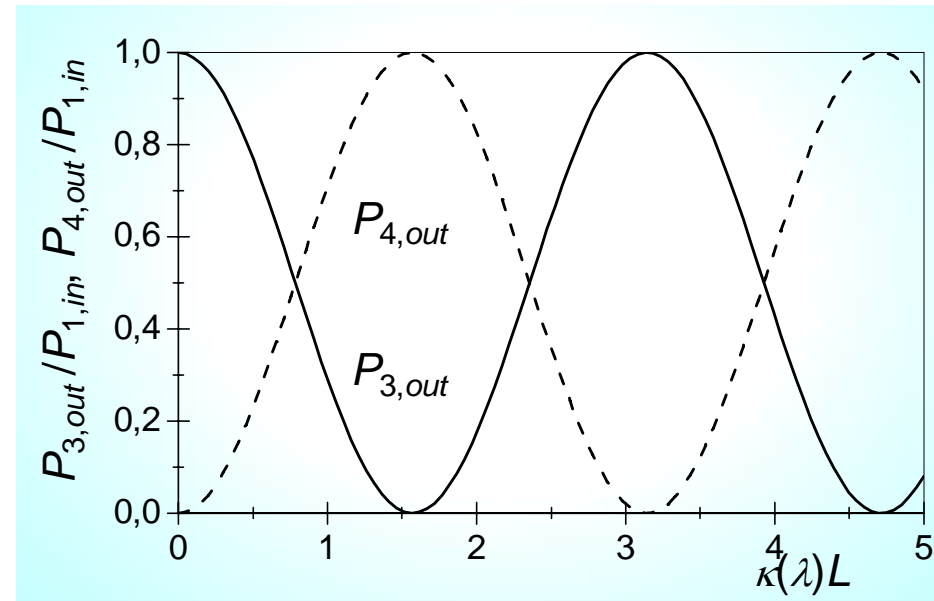
$$e_s \approx (e_1 + e_2) / \sqrt{2}, \quad e_1 \approx (e_s + e_a) / \sqrt{2},$$

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

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

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

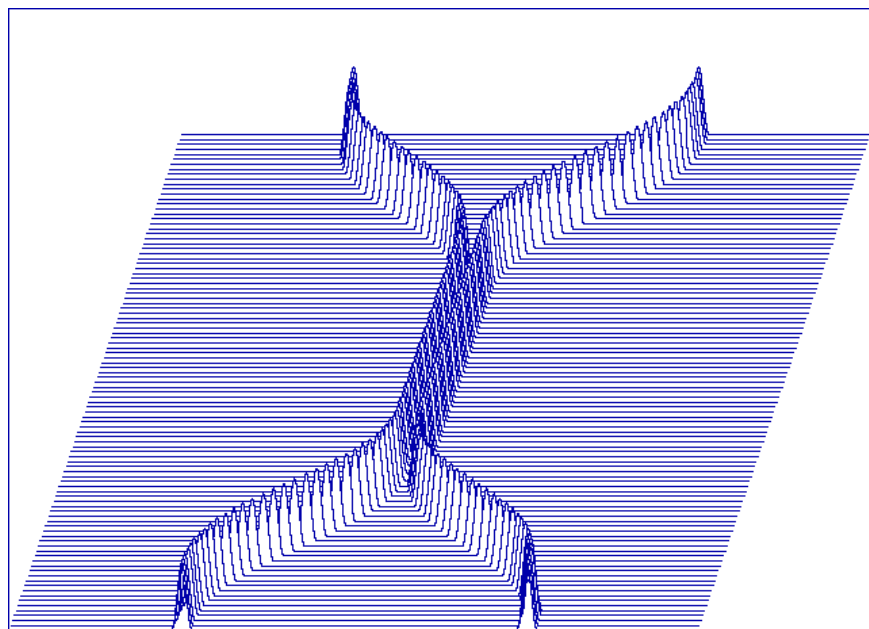
$$\approx e_1 e^{i(\beta_s + \beta_a)z/2} \cos \frac{\beta_s - \beta_a}{2} z + i e_2 e^{i(\beta_s + \beta_a)z/2} \sin \frac{\beta_s - \beta_a}{2} z$$



Spektrální vlastnosti směrové odbočnice

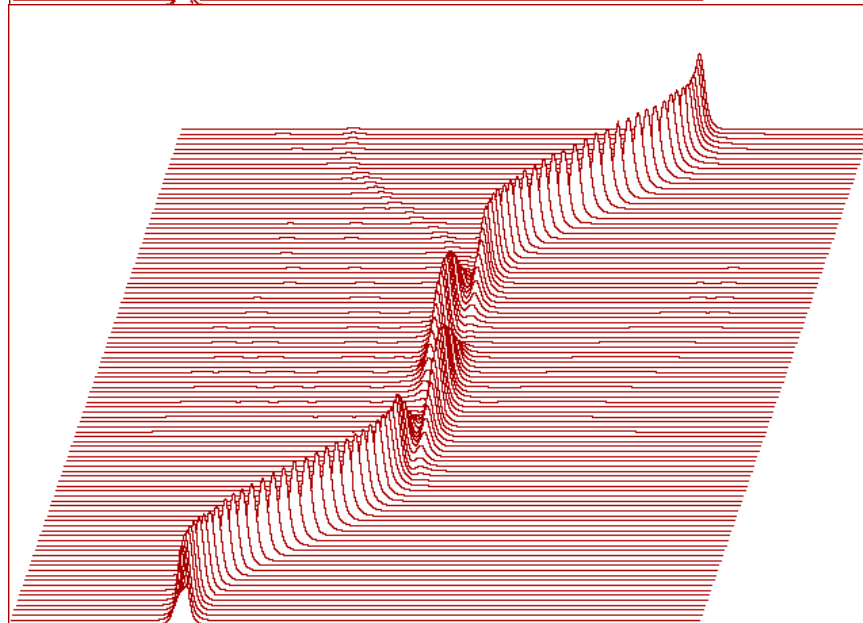
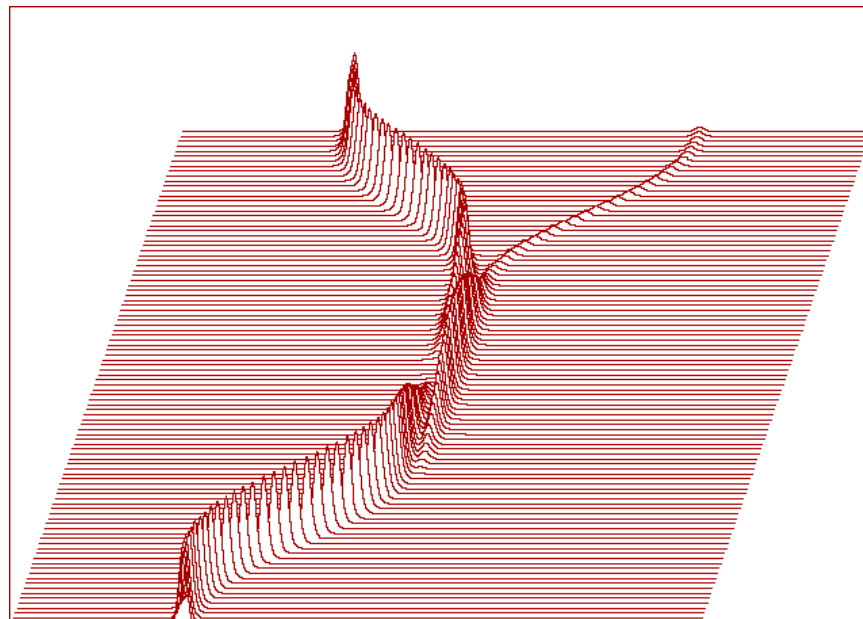
Rozložení indexu lomu

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

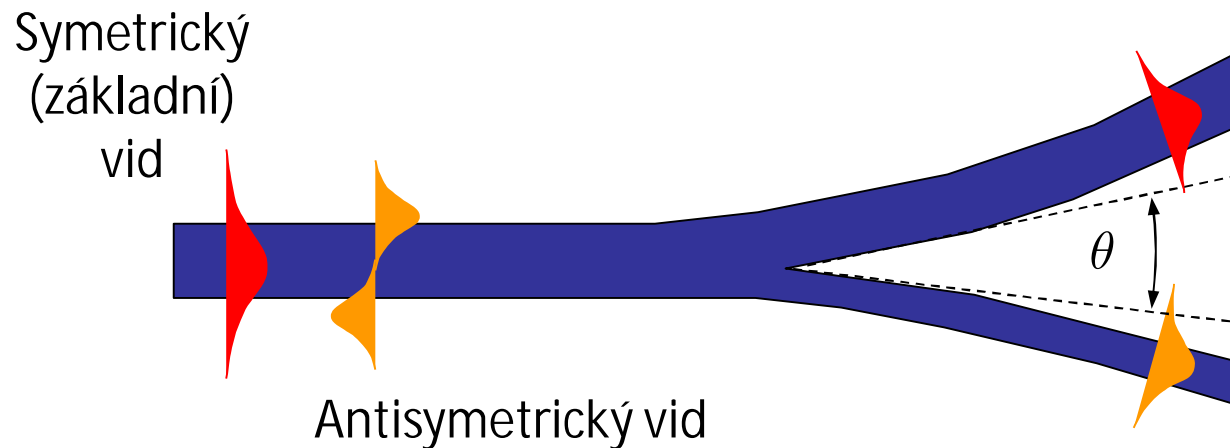


$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

Rozložení optického záření



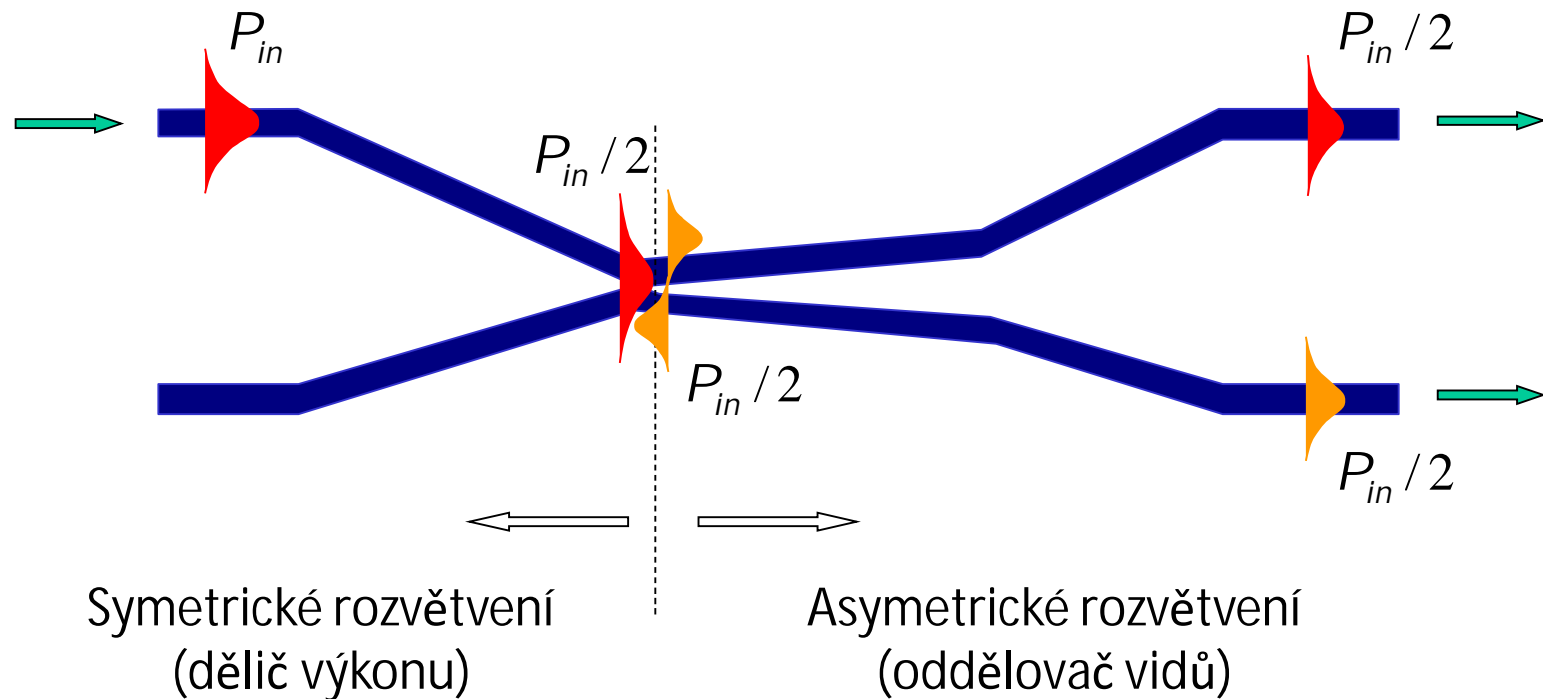
Asymetrické vlnovodné rozvětvení jako oddělovač vidů



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

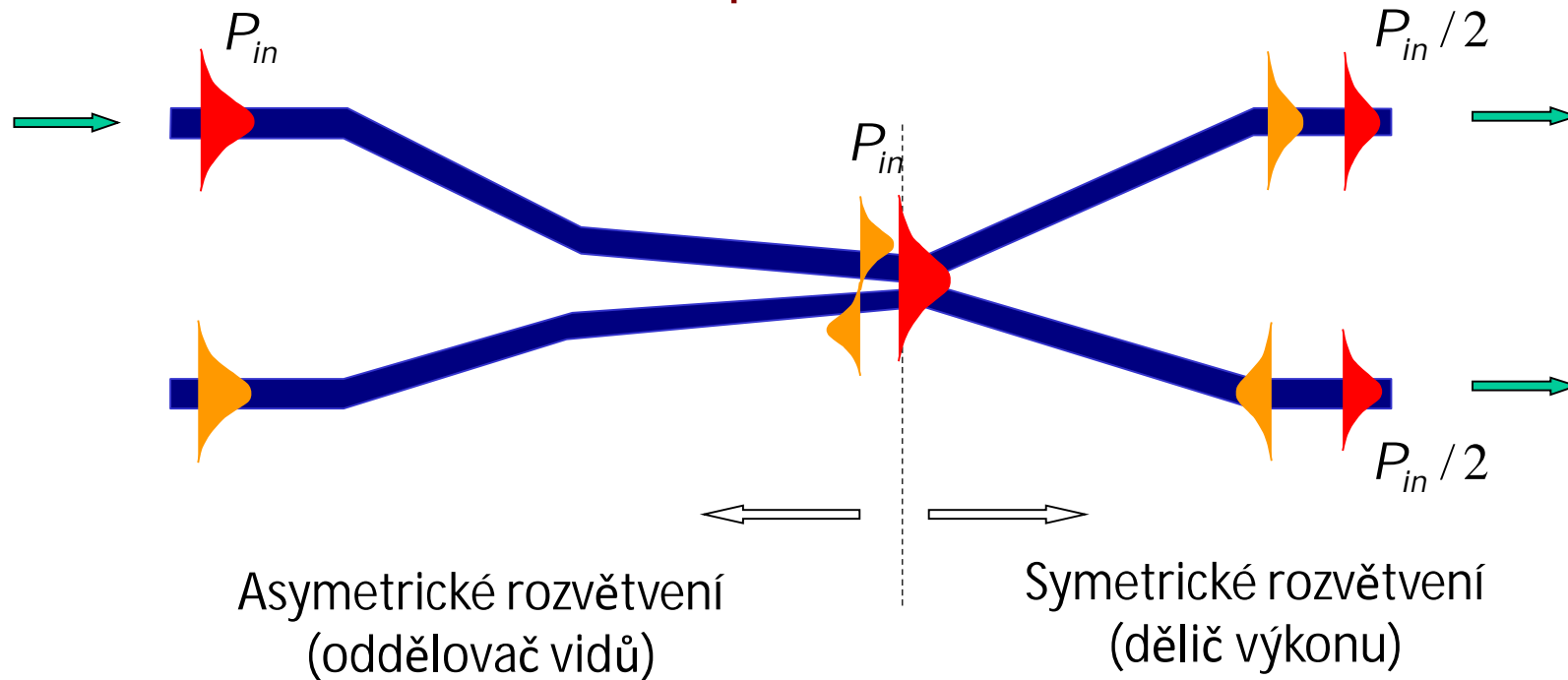
Pokud je výstupní úhel θ velmi malý ($\theta < 0,2^\circ$) a výstupní větve asymetrické, chová se rozvětvení Y jako *oddělovač vidů*, nikoli jako dělič výkonu

Spektrálně nezávislá odbočnice 2×2



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

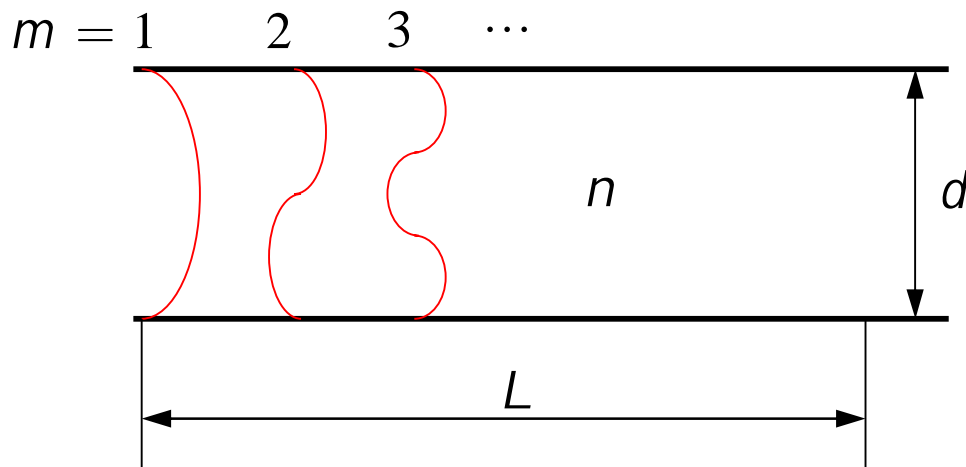
Spektrálně nezávislá odbočnice 2×2 šíření v opačném směru



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

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

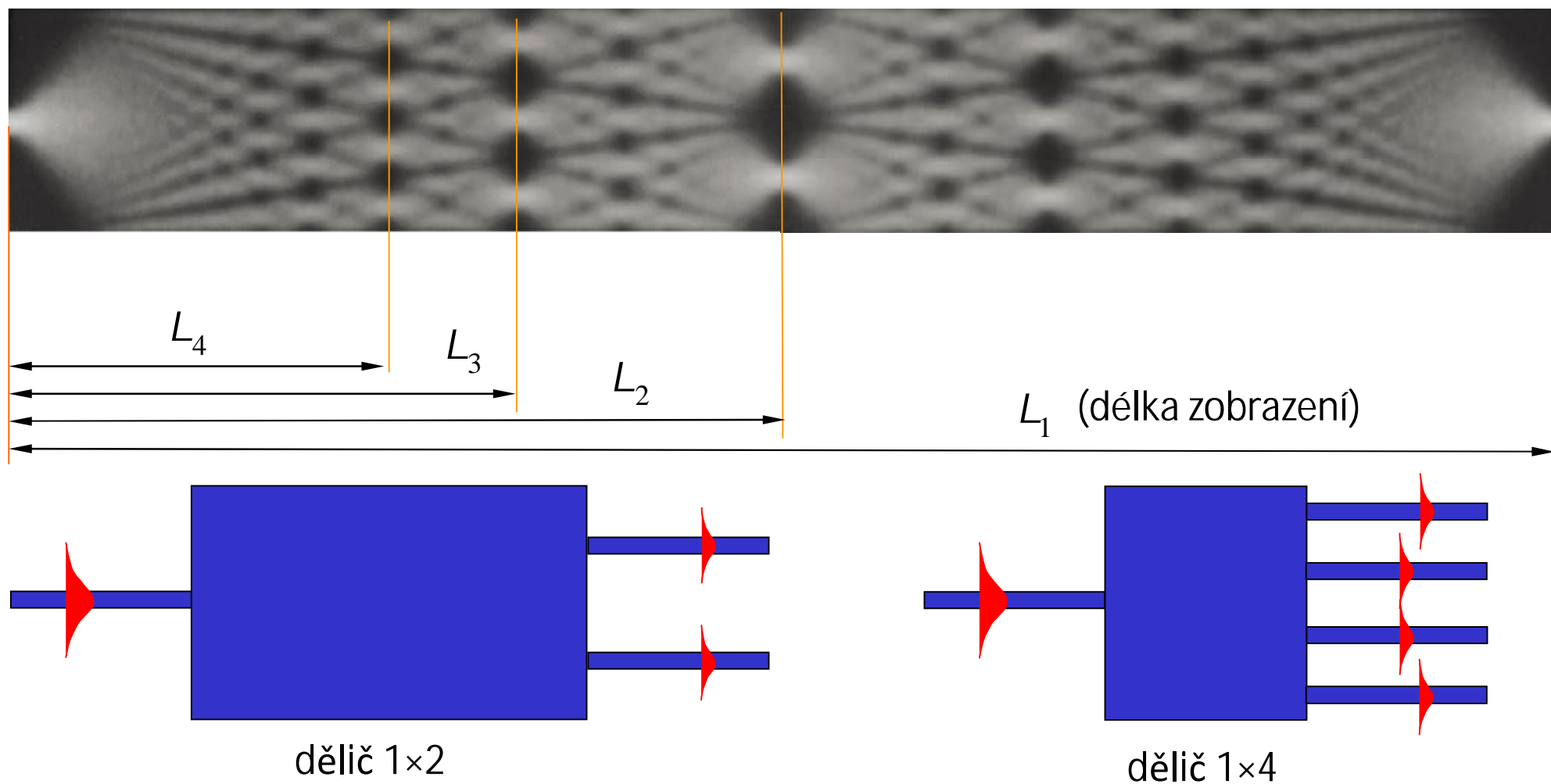
Pokud $\frac{k_0 n L}{2} \left(\frac{m\pi}{k_0 n d}\right)^2 = \frac{m^2 \pi^2 L}{2k_0 n d^2} = q_m \pi$, $q_m = \frac{m^2 \pi L}{2k_0 n d^2} \dots \text{celé}$, $\frac{\pi L}{2k_0 n d^2} \dots \text{celé}$,

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

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

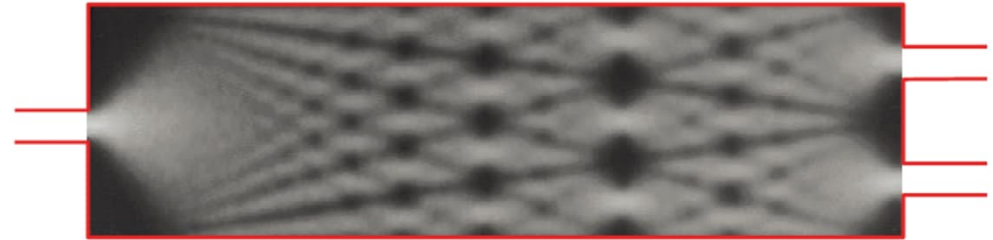
Děliče s mnohovidovou interferencí

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



Úprava pro zmenšení fázové chyby (snížení počtu potřebných vidů)

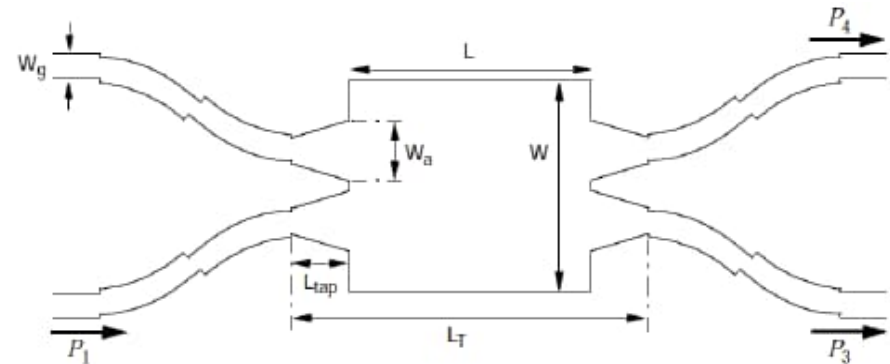
původní tvar



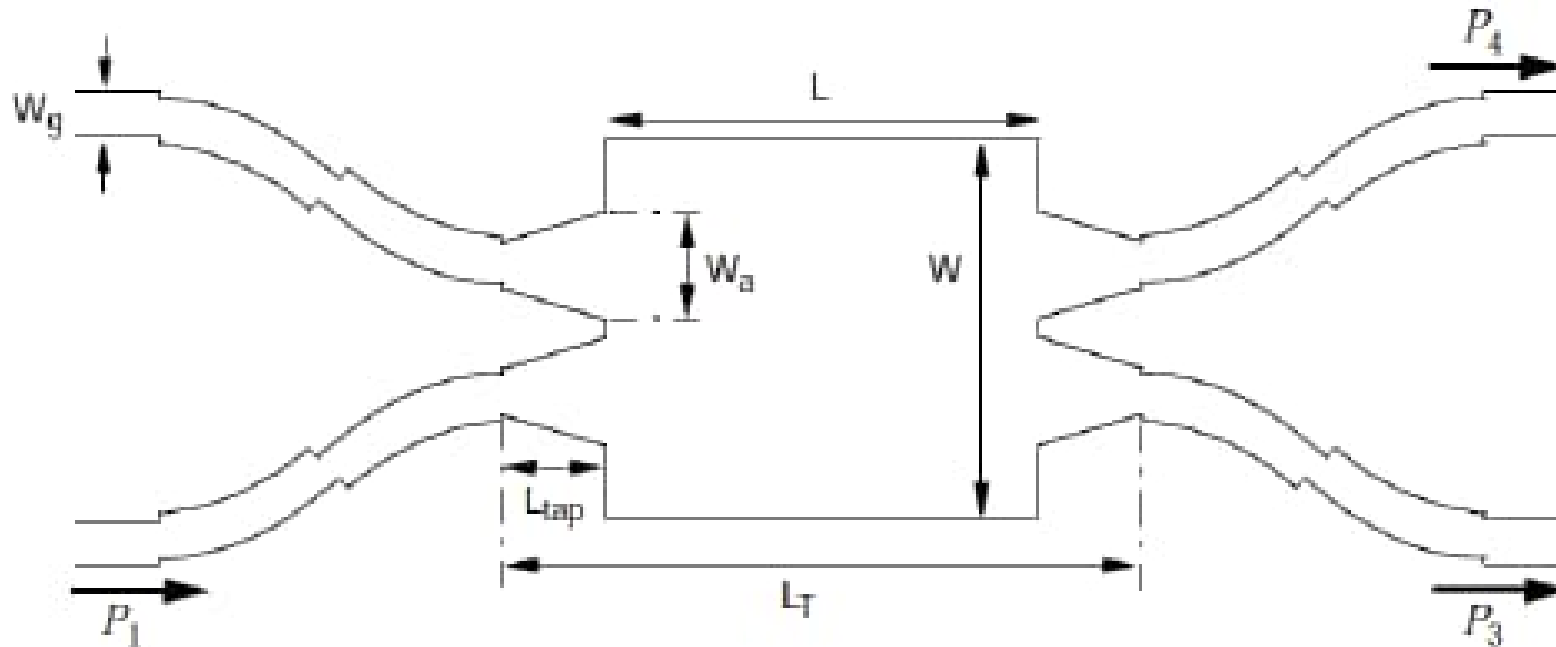
modifikovaný tvar



struktura děliče 2x2 včetně vstupních a výstupních vlnovodů



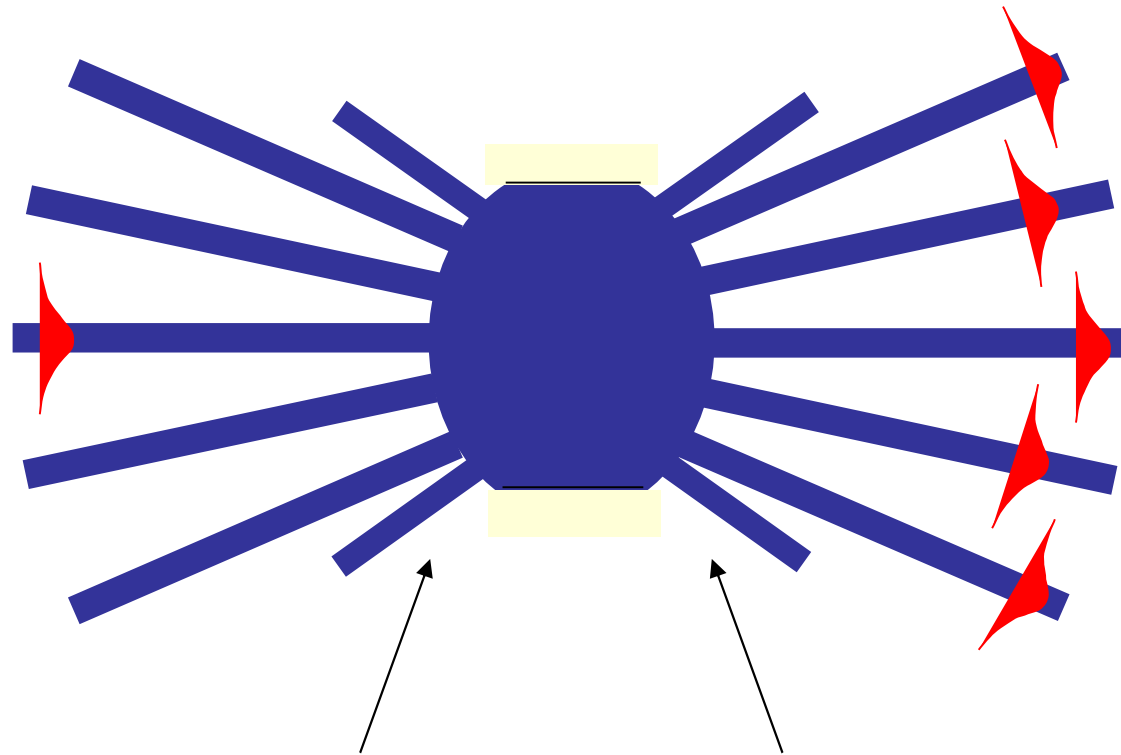
Vazební člen 2x2 s úpravou pro zmenšení fázové chyby (snížení počtu potřebných vidů) a redukcí ztrát v ohybech



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

struktura děliče 2×2 včetně
vstupních a výstupních vlnovodů

Hvězdicový difrakční vazební člen $M \times N$

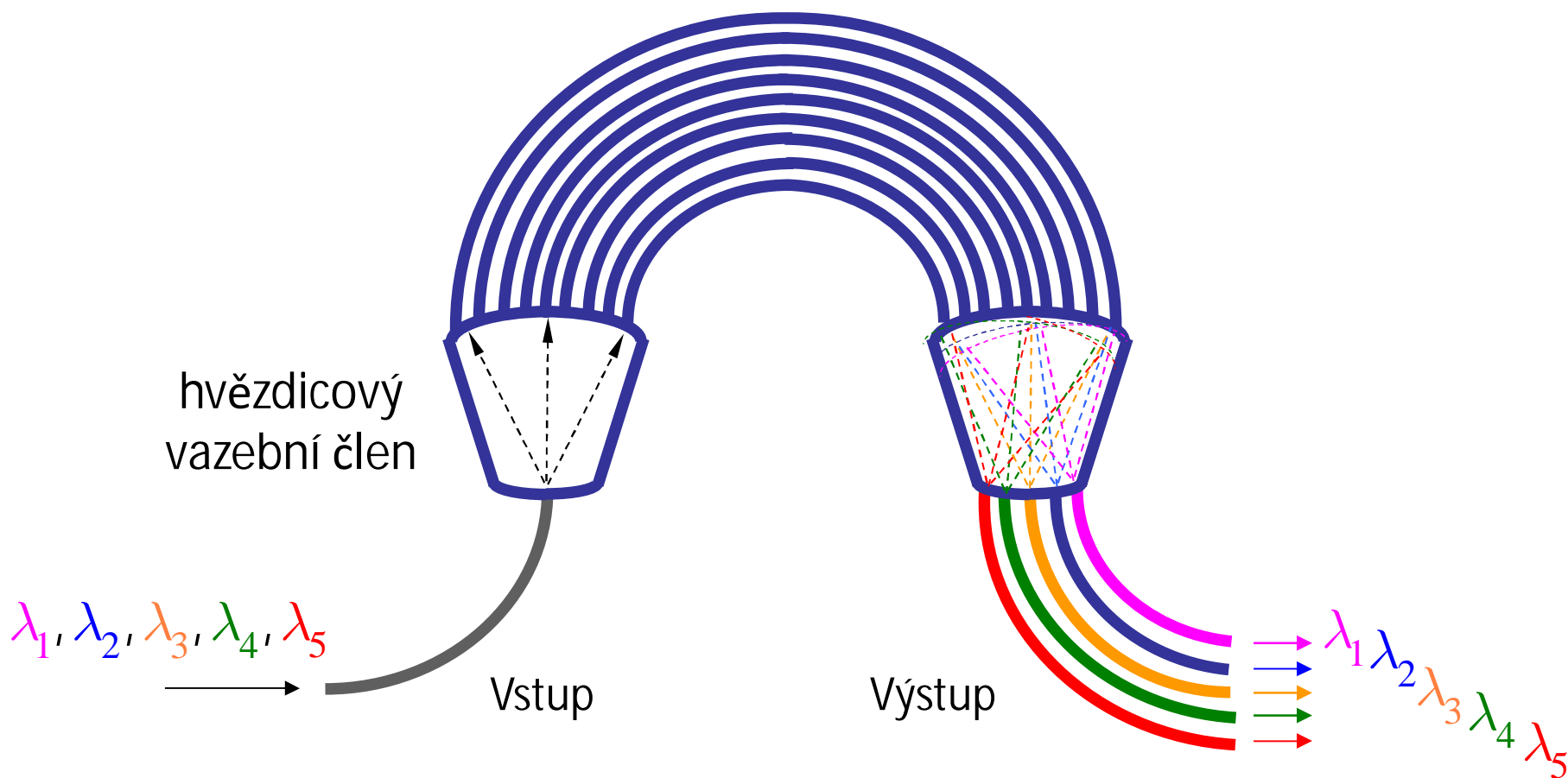


„Jalové“ vlnovody pro zlepšení rovnoměrnosti rozdělení výkonu

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

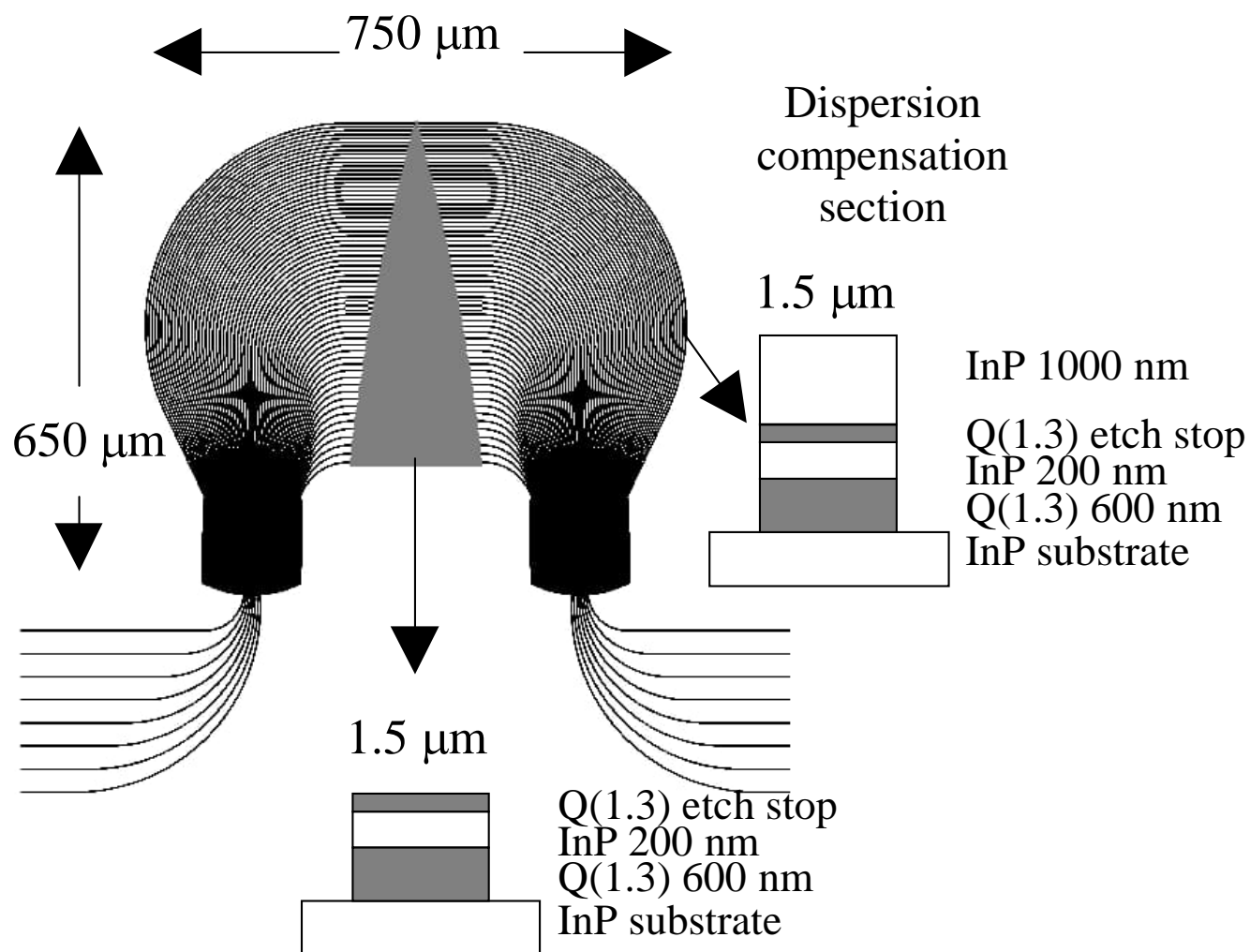
Spektrální demultiplexor s fázovanou řadou vlnovodů („Phasar“, AWG – *arrayed waveguide grating* demux)

Fázovaná řada (několika desítek) vlnovodů



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

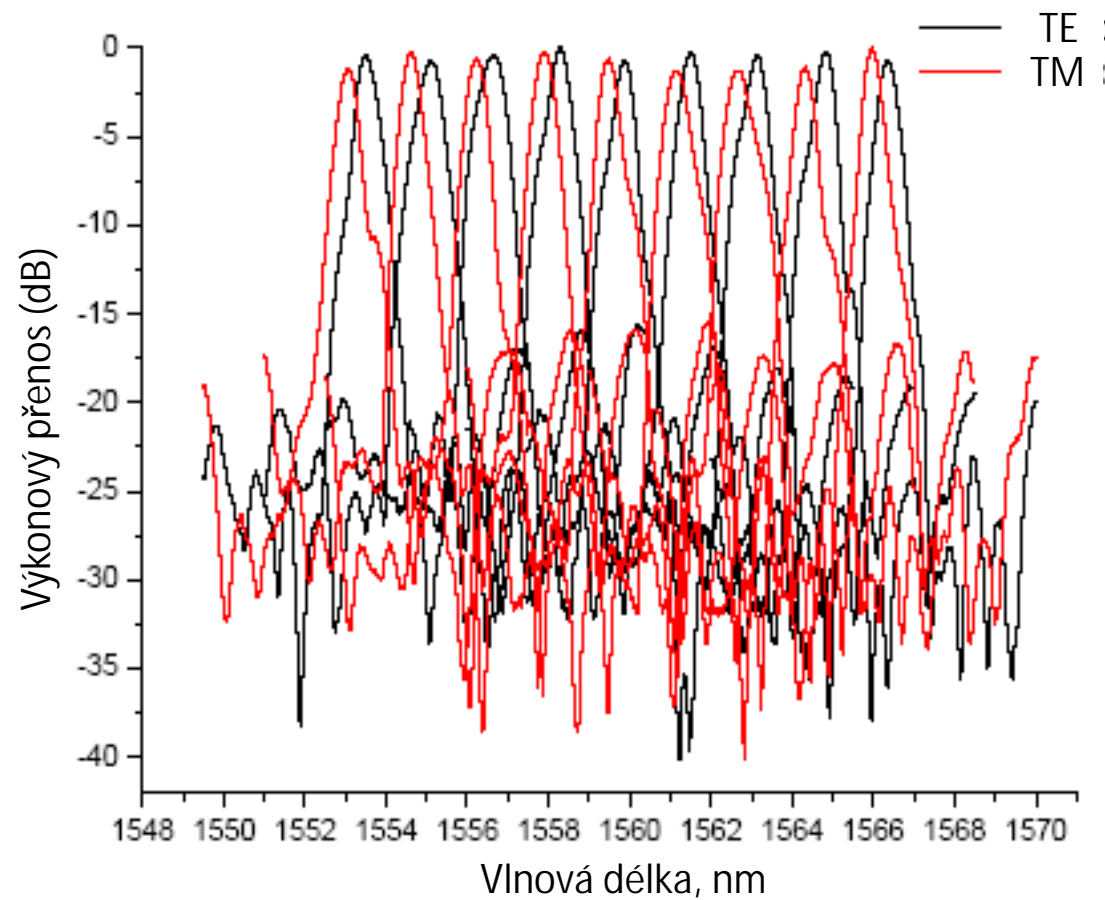
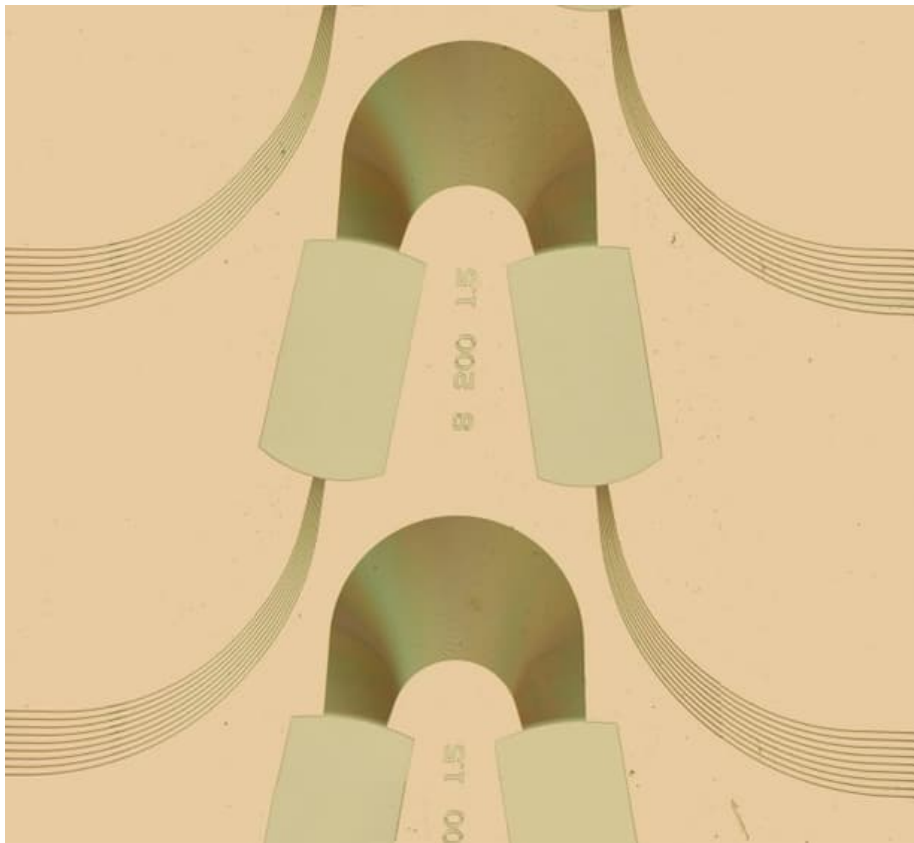
Příklad provedení integrovaně-optického AWG demultiplexoru na bázi InP



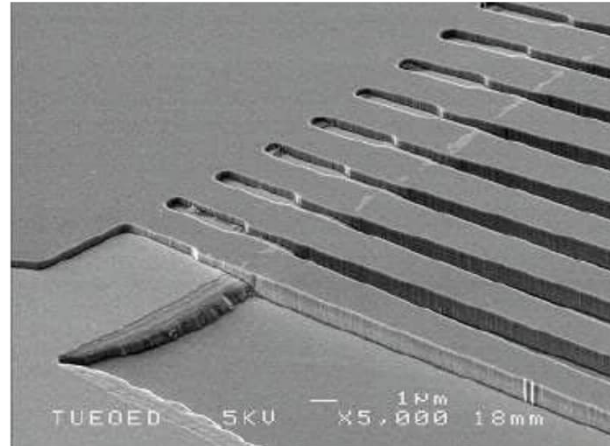
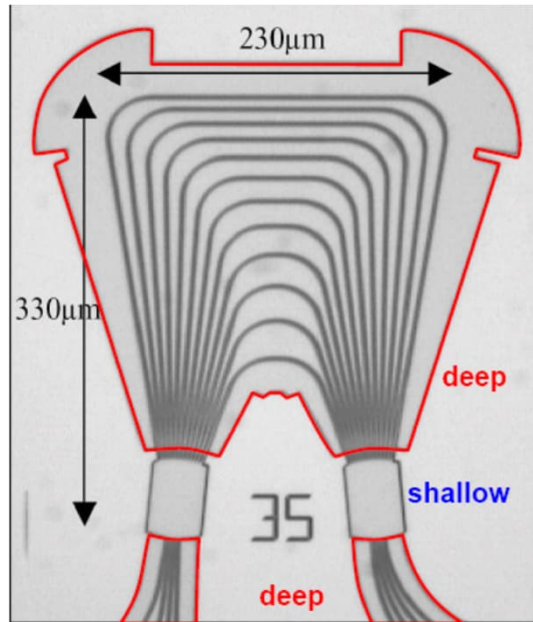
$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{f} \Delta f = \frac{\lambda^2}{c} \Delta f; \text{ pro } \lambda = 1550 \text{ nm a } \Delta f = 100 \text{ GHz je } \Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$$

Příklady AWG demultiplexorů - 1

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



Příklady AWG demultiplexorů - 2

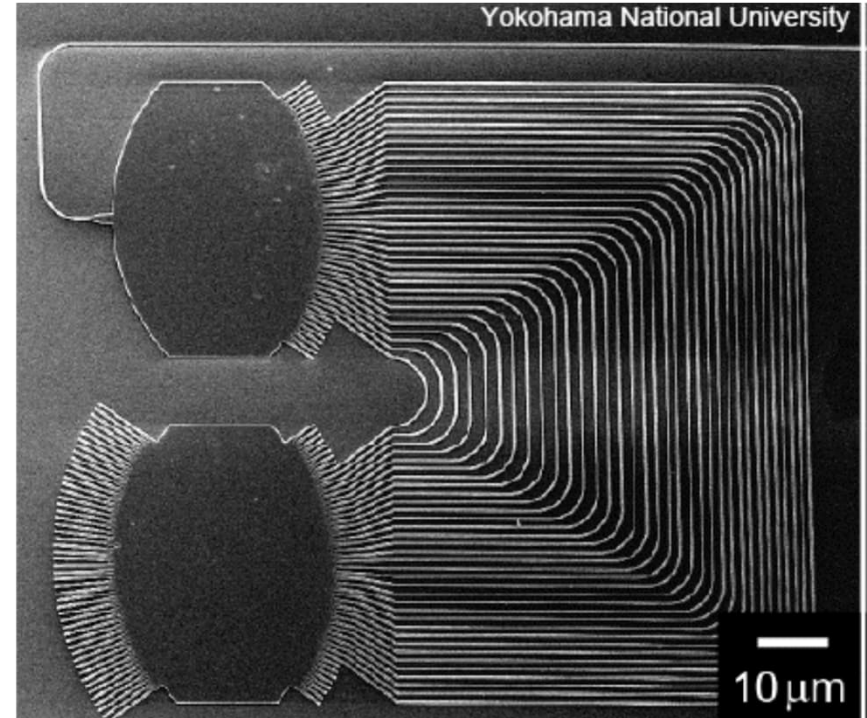


4 kanály, InP podložka

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

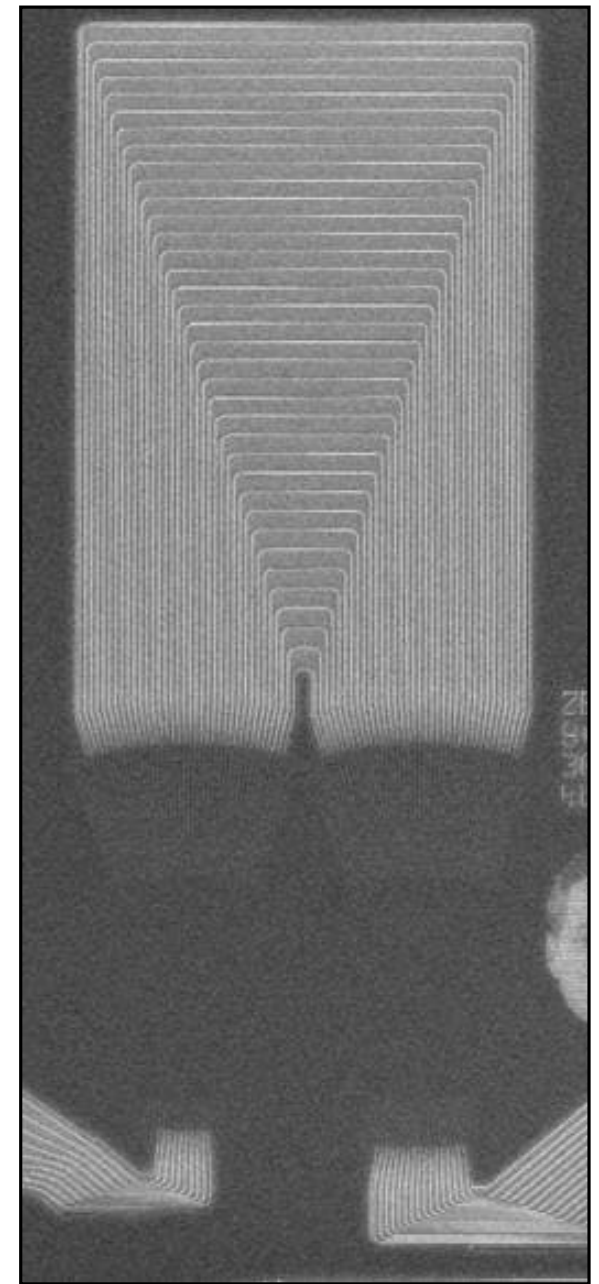
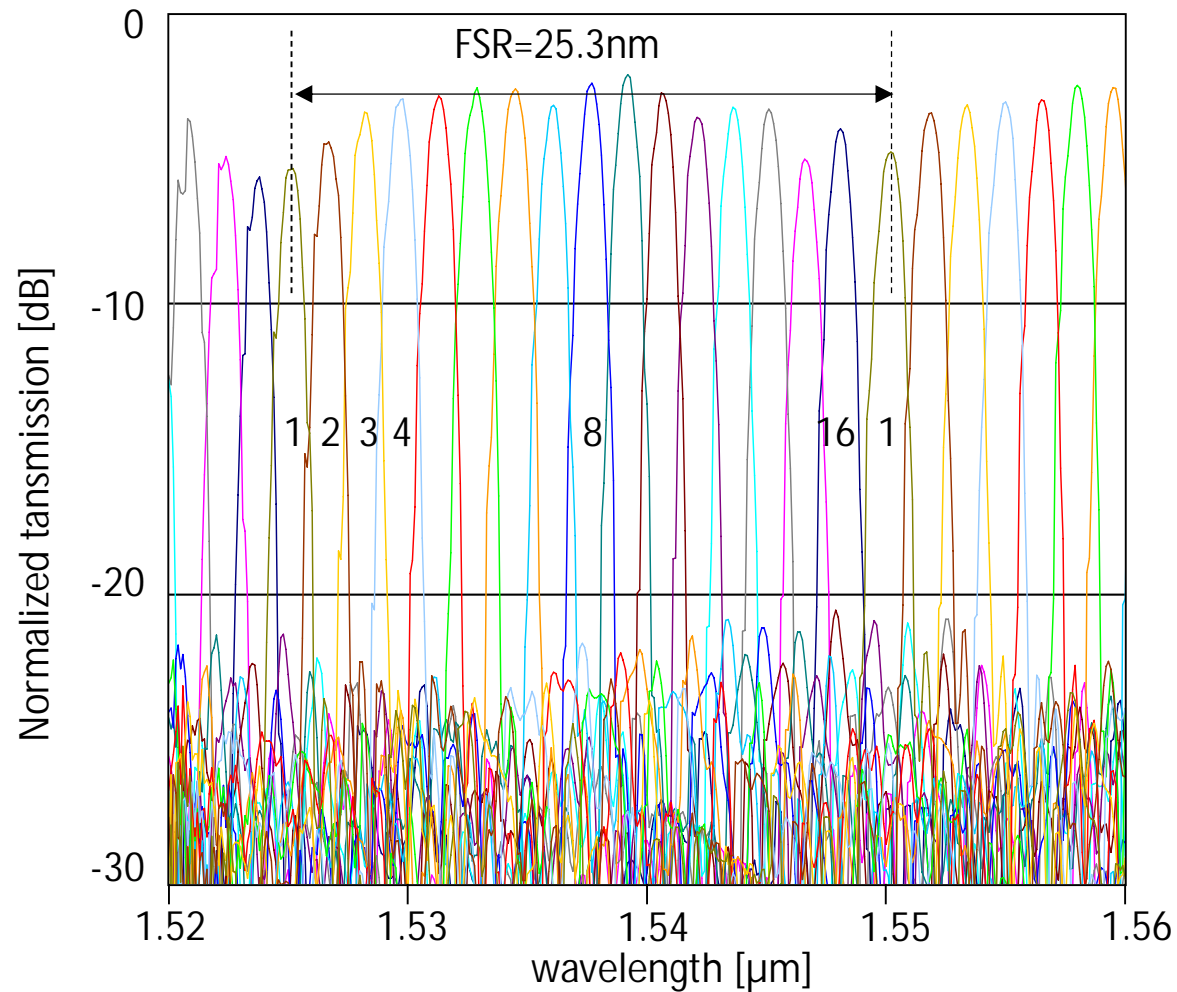
17 kanálů, SOI

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



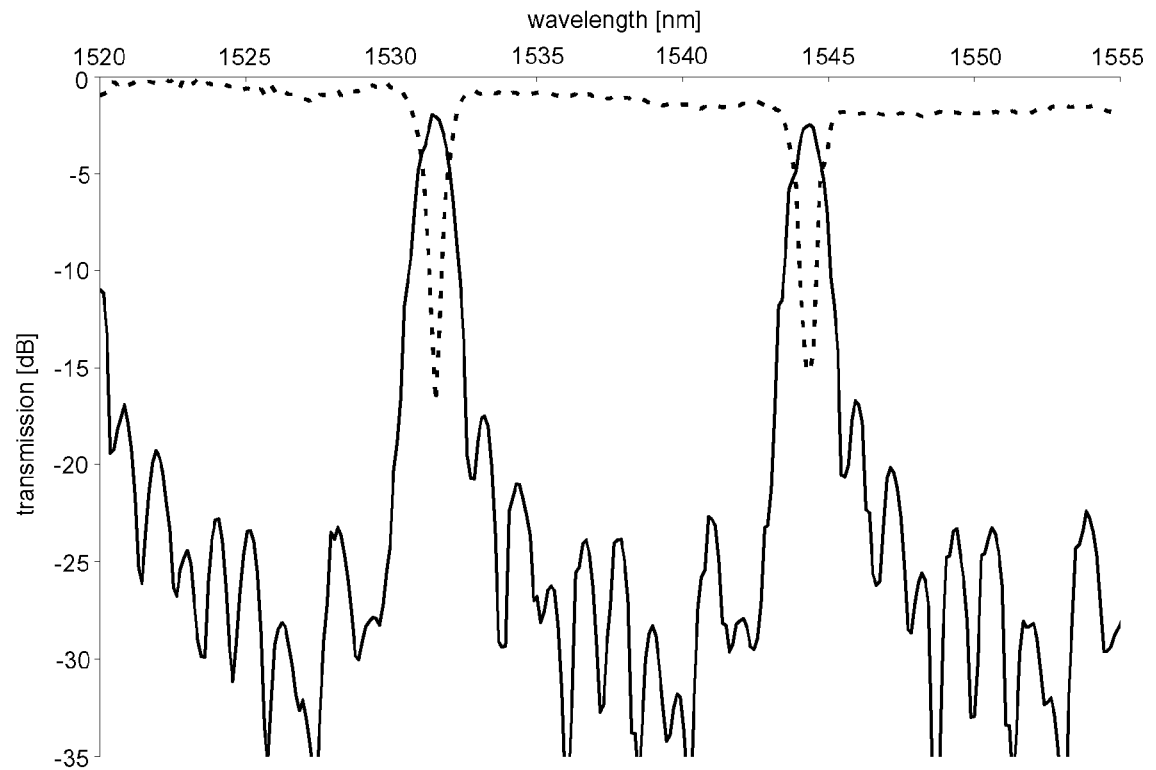
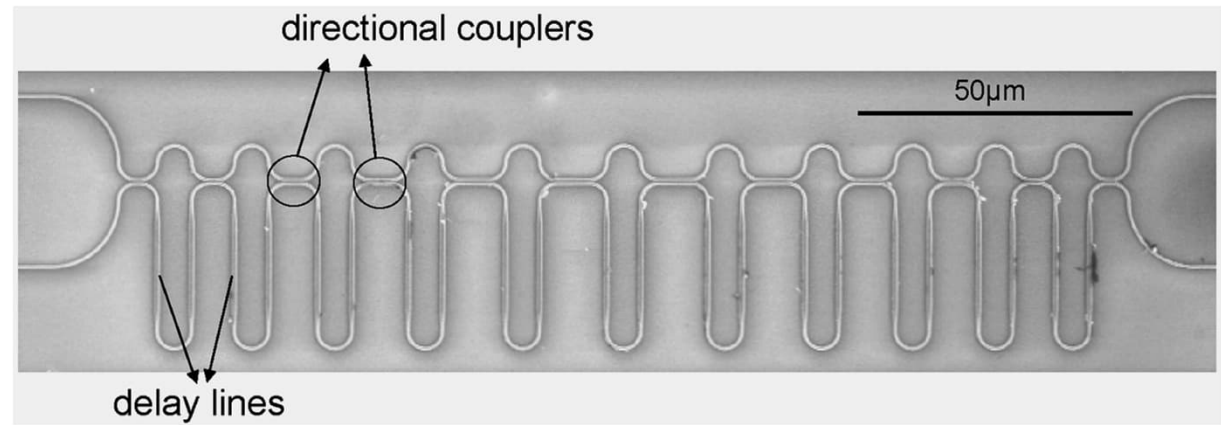
AWG

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



Mach-Zehnder filter 11. řádu

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



Dynamické a nelineární fotonické vlnovodné prvky

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

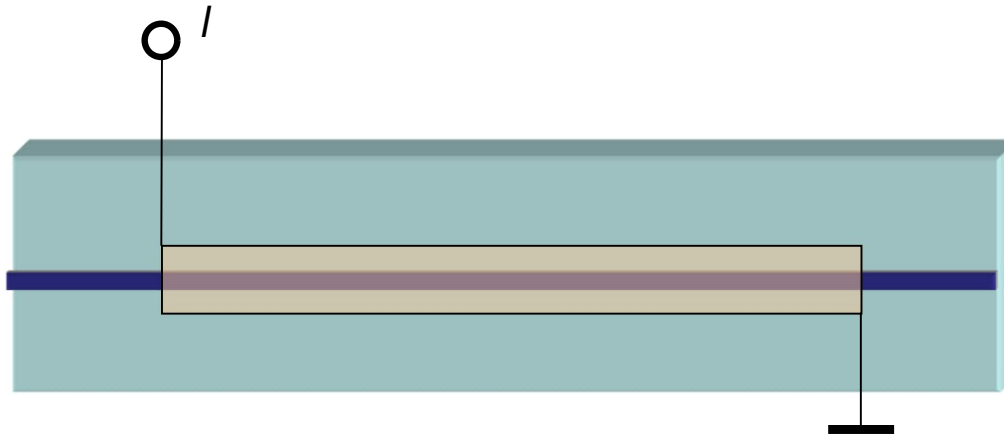
$$\frac{da_{\mu}(z)}{dz} \approx i\beta_{\mu} a_{\mu}(z) + iK_{\mu\mu}^{++} a_{\mu}(z), \quad \text{neboli} \quad \frac{da_{\mu}(z)}{dz} \approx i\left(\beta_{\mu} + K_{\mu\mu}^{++}\right) a_{\mu}(z), \quad a$$

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

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

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

Termooptický jev



$$\varphi = k_0 NL$$

fázový posun
při šíření vlny

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

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

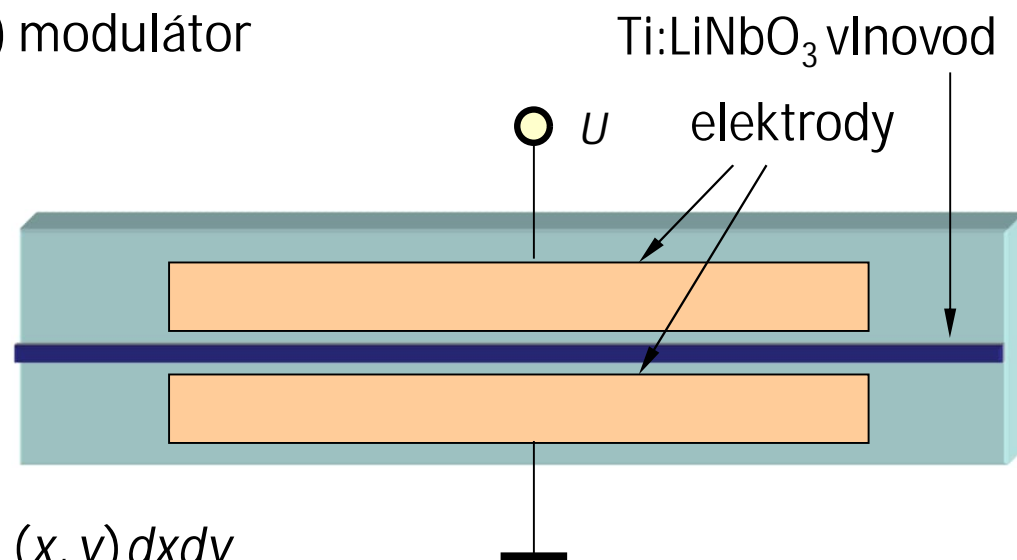
Elektrooptický jev

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

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

malá změna permitivity \Rightarrow teorie vázaných vln

Typická aplikace: elektrooptický (fázový) modulátor



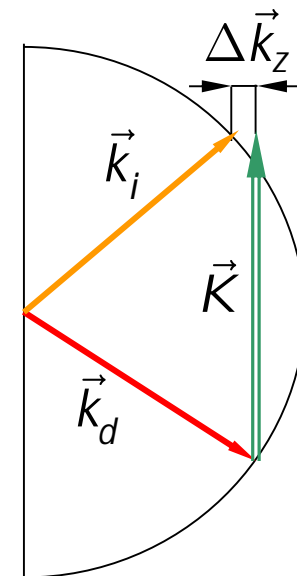
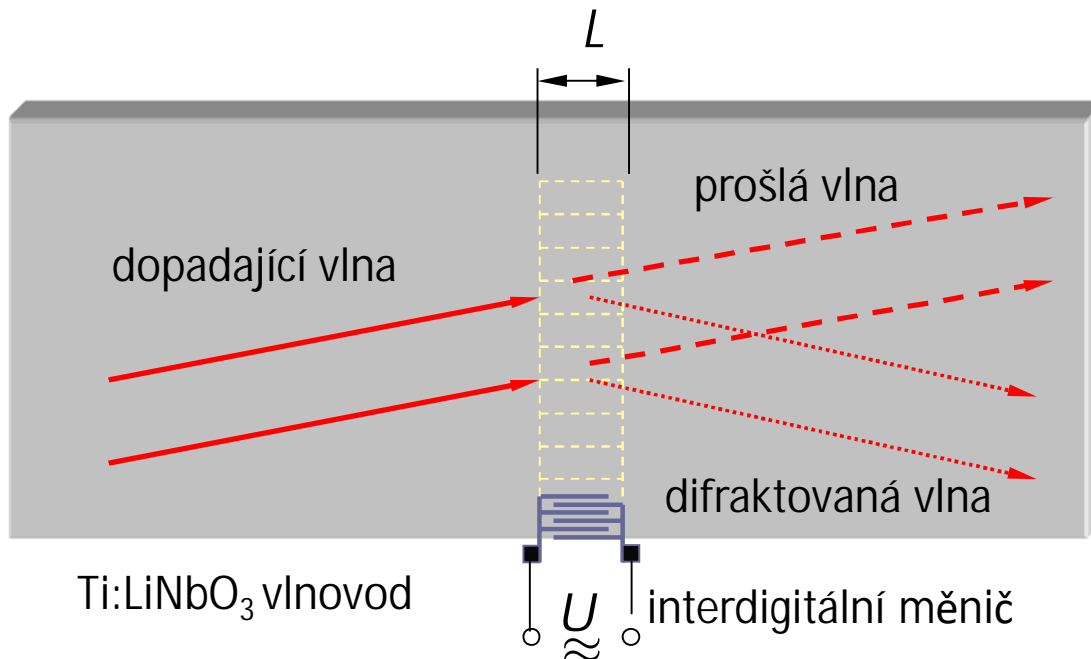
$$\Delta\beta \approx \frac{k_0}{2} \iint_S e(x, y) \cdot \Delta\epsilon \cdot e^*(x, y) dx dy$$

$$= -\frac{k_0}{2} \iint_S e(x, y) \cdot \epsilon \cdot [\tilde{r} \cdot E_v(x, y)] \cdot \epsilon \cdot e^*(x, y) dx dy$$

Akustooptický jev

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

Nekolineární interakce:



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

"piezoelektricky zpevněný"
elastooptický tenzor

v piezoelektrických materiálech

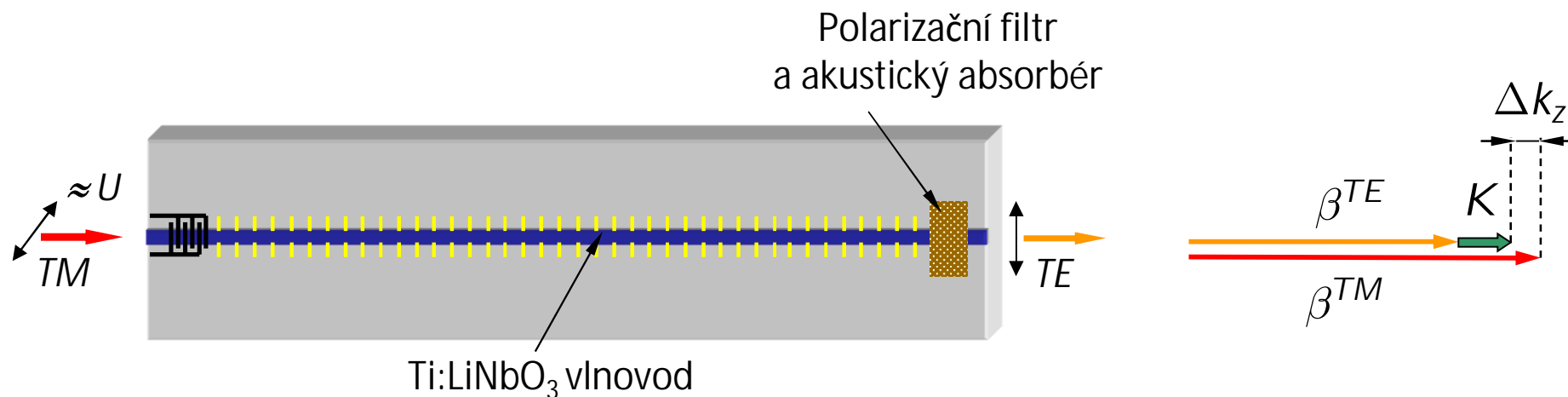
$$\Delta(\bar{\epsilon}^{-1}) = \bar{\rho} : \bar{S} + \overbrace{\bar{r} \cdot E_p}^{\text{piezoelektrický tenzor}} = \left(\bar{\rho} - \bar{r} \cdot \bar{\epsilon}^{-1} \cdot \bar{e} \right) : \bar{S}$$

$$\omega_d = \omega_i \pm \Omega_a, \quad \text{zákon zachování energie}$$

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

Akustooptický jev

Kolineární interakce



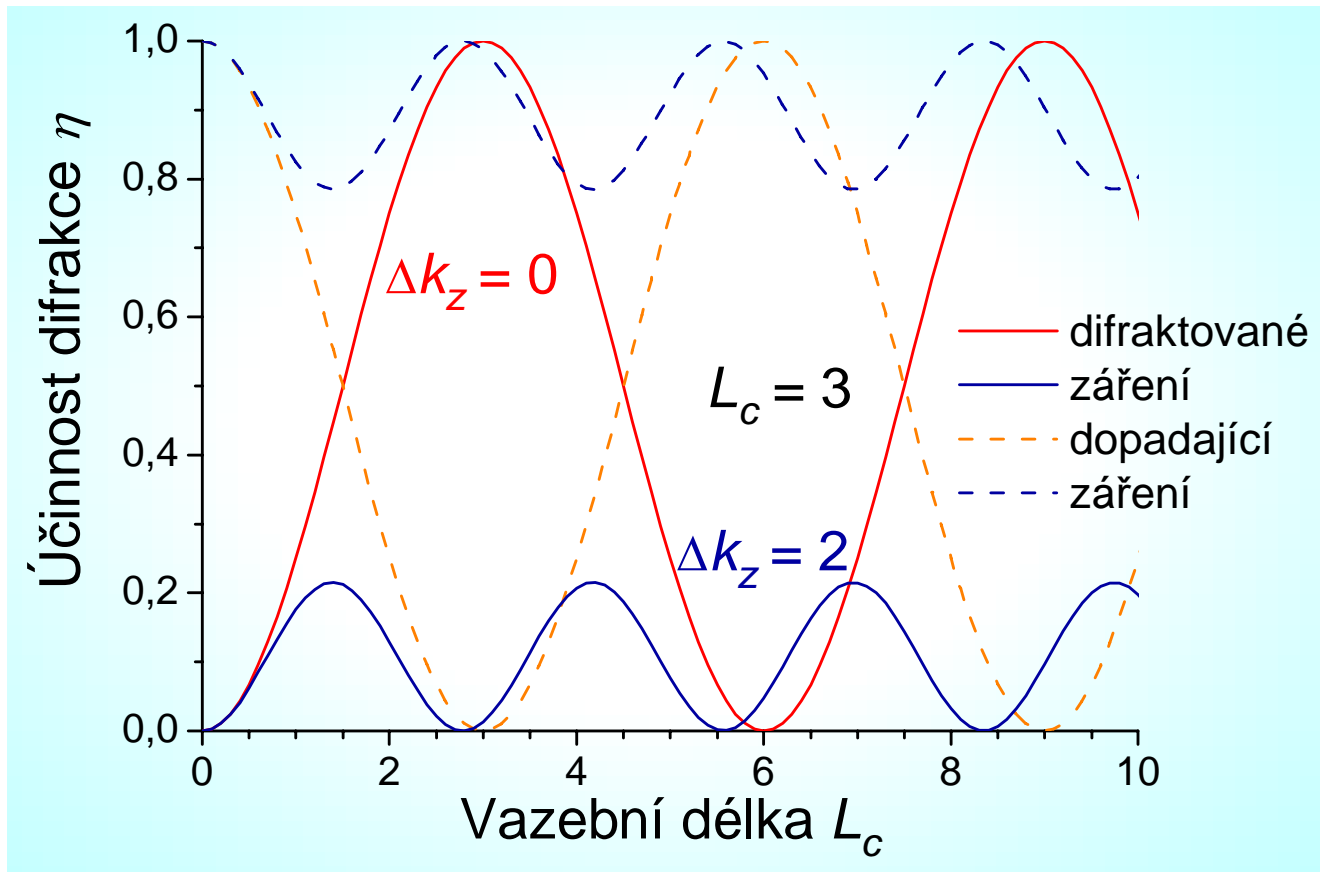
Účinnost akustooptické interakce

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

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

Účinnost akustooptické interakce

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



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

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

pak

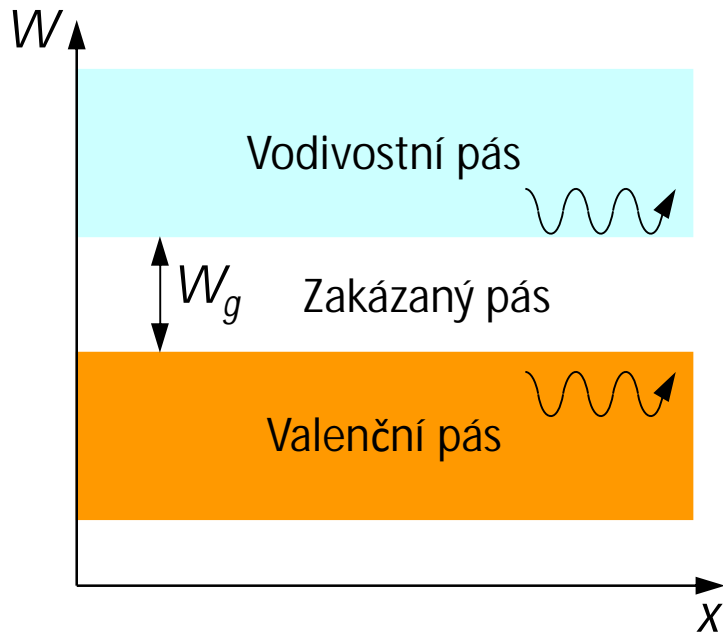
$$\Delta n' \approx -\frac{q^2 n_e \lambda^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 n m_e^* c^2},$$

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

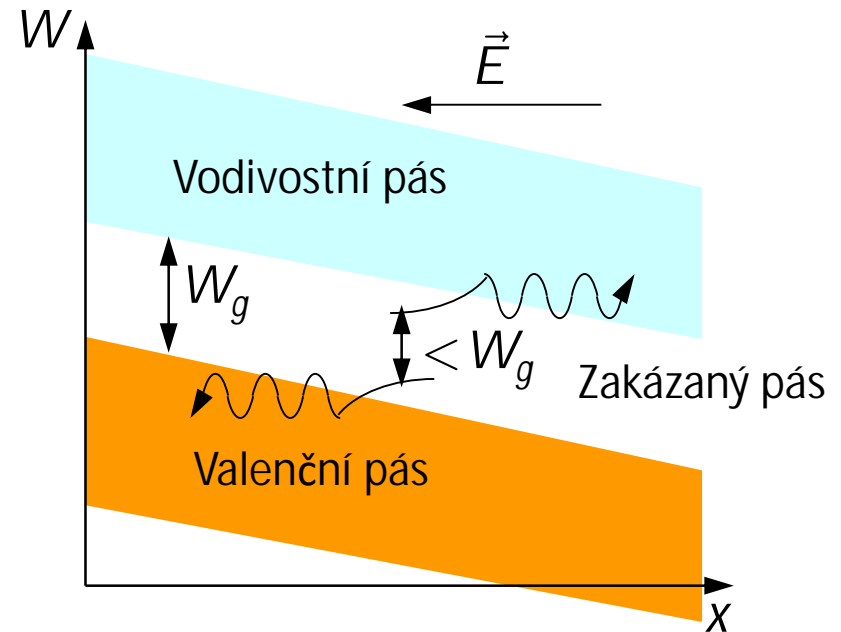
$$\Delta n' \simeq 10^{-3} \div 10^{-2} \quad (!), \quad b \approx 1 \text{ dB/cm}$$

Elektroabsorpce a elektrorefrakce v polovodičích

Pásový energetický diagram polovodiče



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



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

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

Elektroabsorpční jev \Rightarrow změna spektrální závislosti absorpce

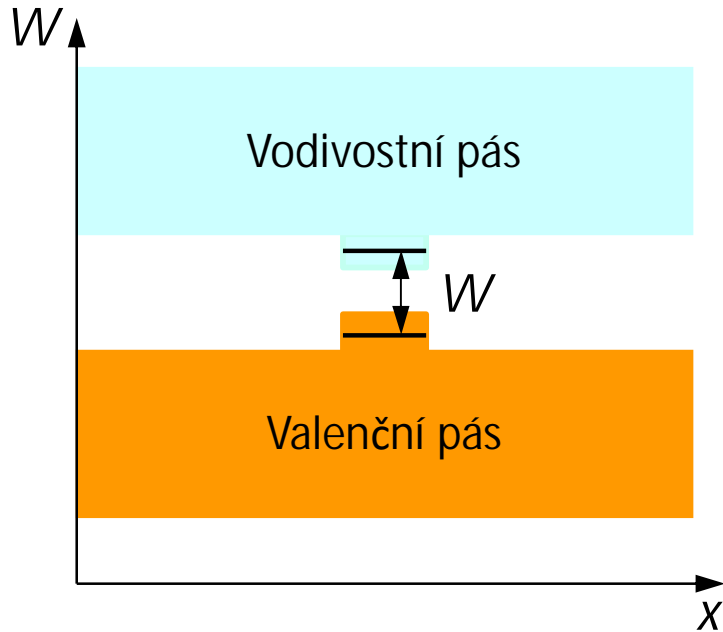


Kramersovy-Kronigovy relace \Rightarrow Elektrorefrakční jev

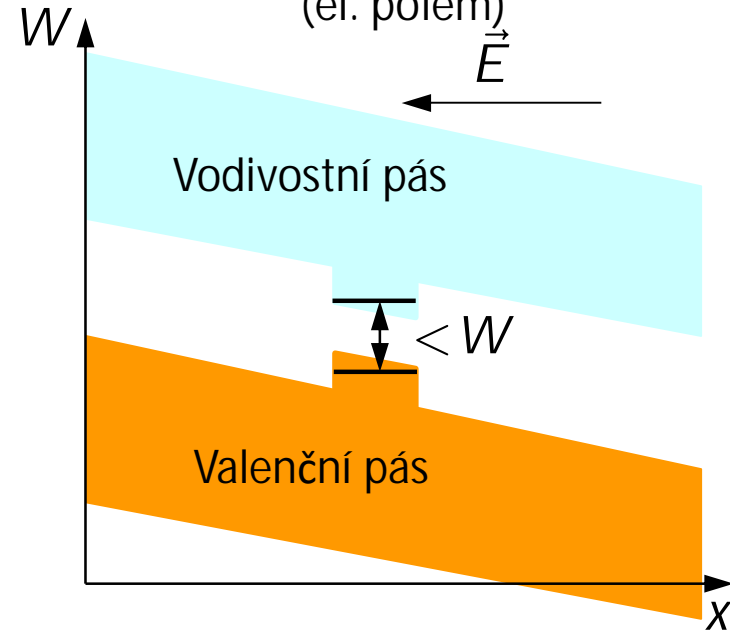
„Zesílení“ excitonovými efekty v kvantových jamách;
QCSE (Starkův jev v kvantově ohraničených strukturách)

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)



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

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

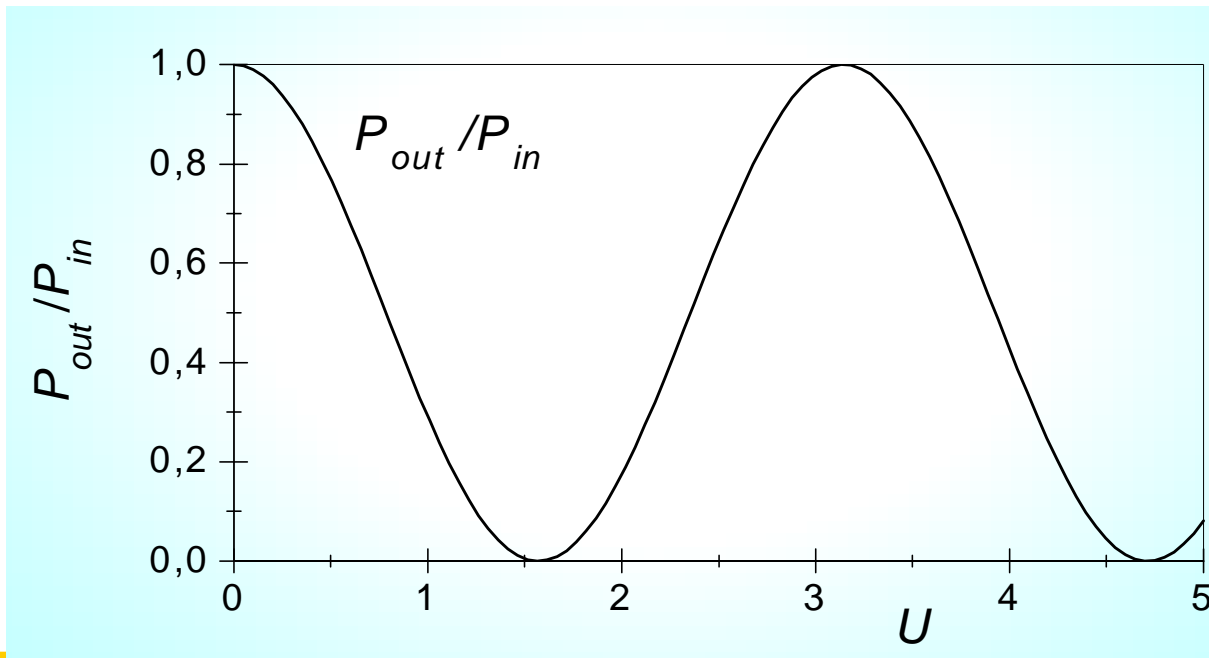
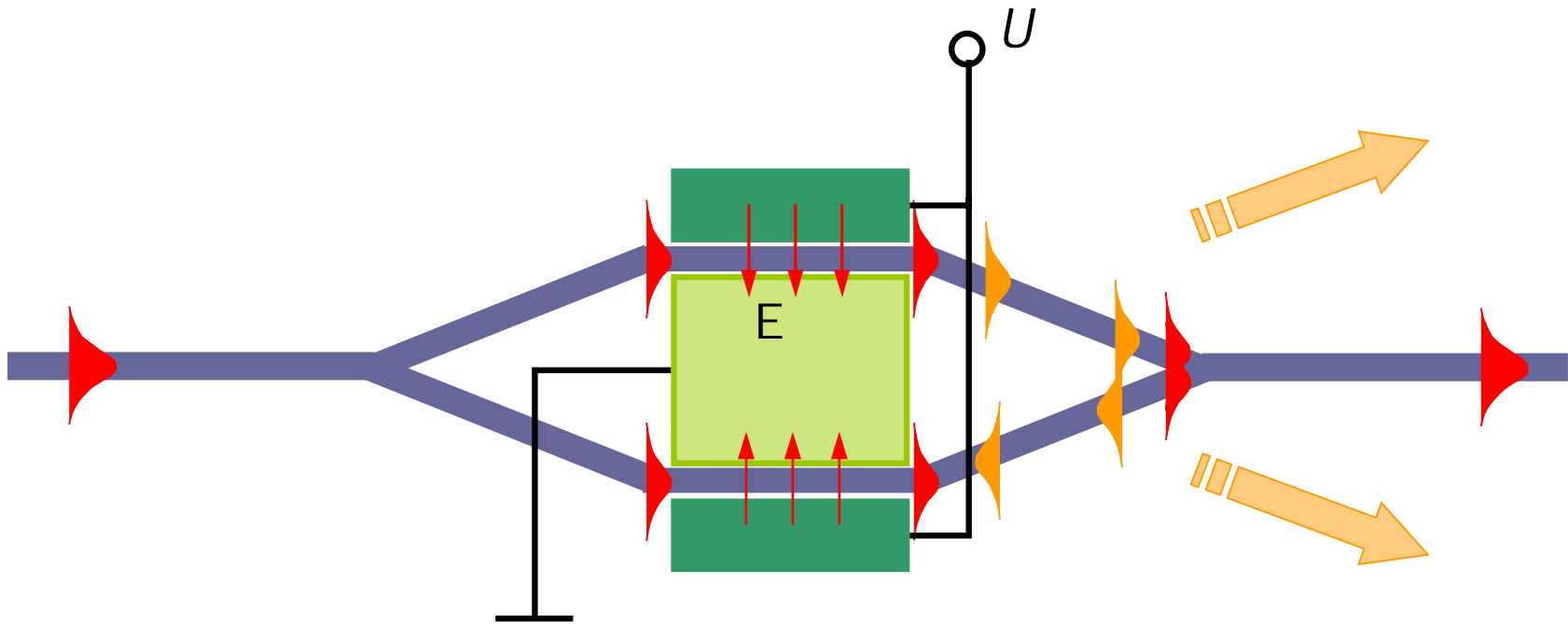
Elektroabsorpční Starkův jev (QCSE) \Rightarrow

Kramersovy-Kronigovy relace \Rightarrow

Elektrorefrakční Starkův jev (QCSE)

Excitonové jevy v kvantových jámách zvýrazňují QCSE (**strmější absorpční hrana**)

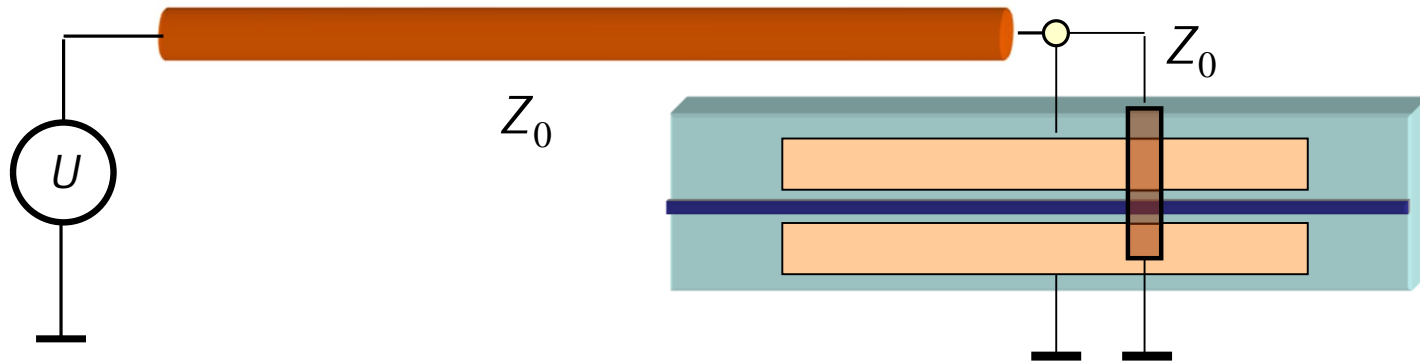
Machův-Zehnderův interferometrický modulátor



$$\begin{aligned} P_{out} &= P_{in} \cos^2 \left(\frac{\pi U}{2 U_{\pi}} \right) \\ &= \frac{P_{in}}{2} \left[1 + \cos \left(\pi \frac{U}{U_{\pi}} \right) \right] \end{aligned}$$

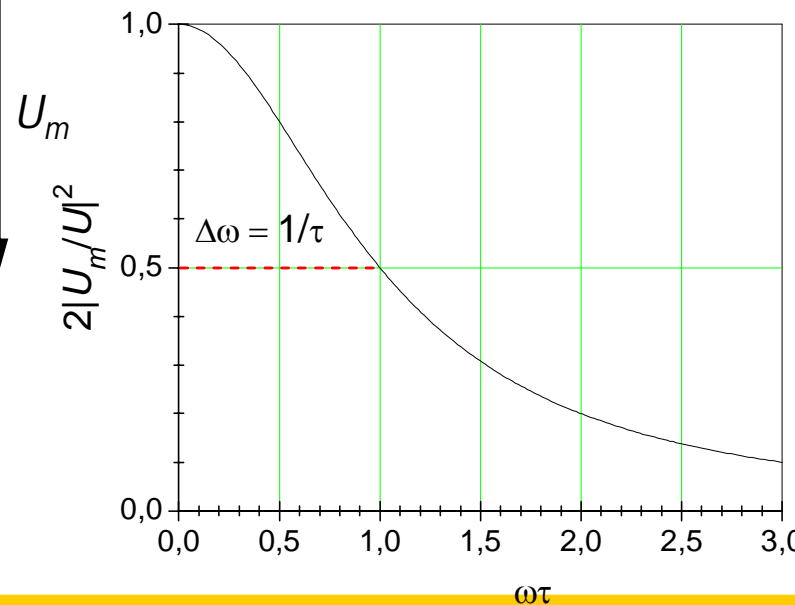
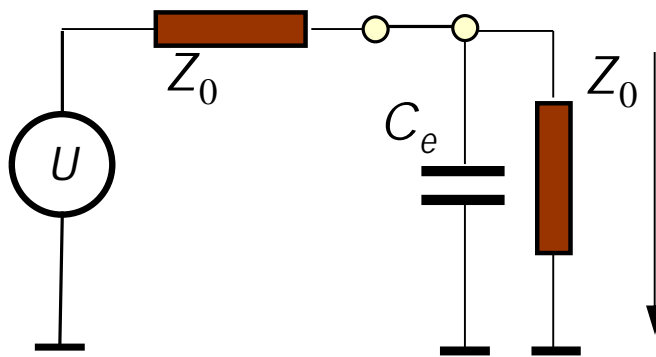
Modulační rychlost elektrooptických modulátorů I

Standardní modulátor s elektrodami „se soustředěnými parametry“



Ekvivalentní elektrický obvod

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



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

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

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

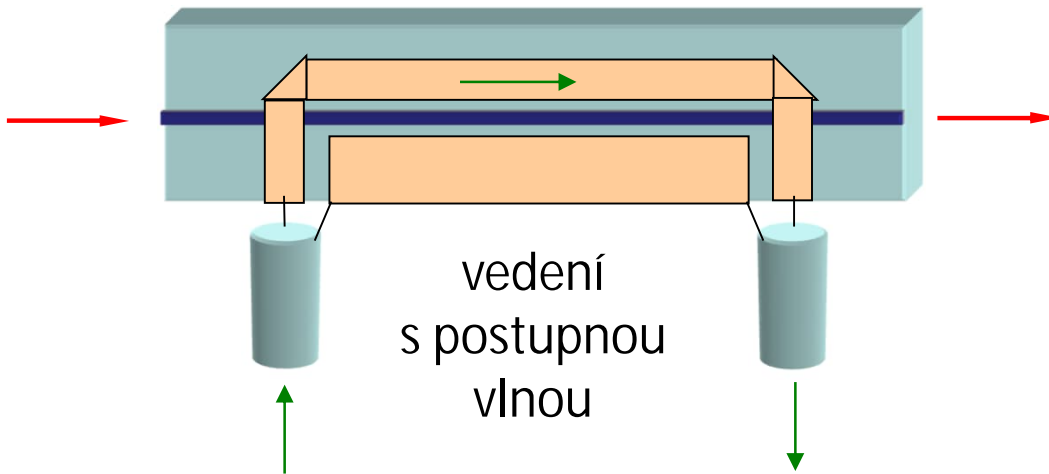
$$Z_0 = 50 \Omega,$$

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

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

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“:

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

Účinnost modulace elektrodami délky L :

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

Optická vlna:

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

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

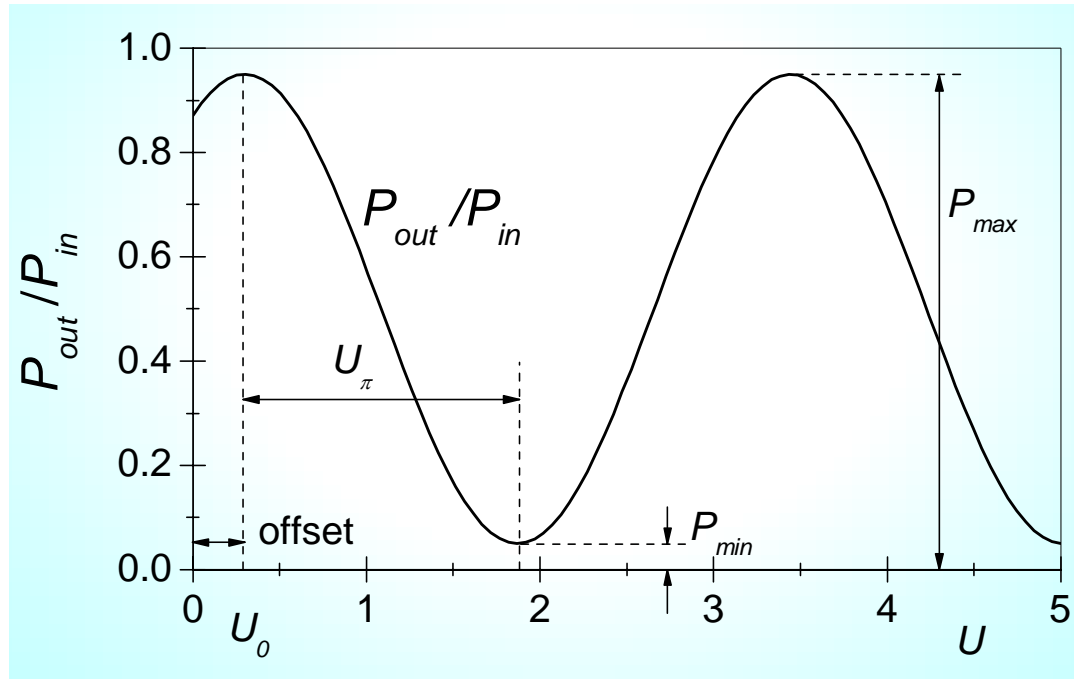
$$B \cdot L \approx \frac{\Omega_{\text{max}}}{2\pi} L = \frac{c}{2(N_\mu - N)}$$

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

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

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.

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

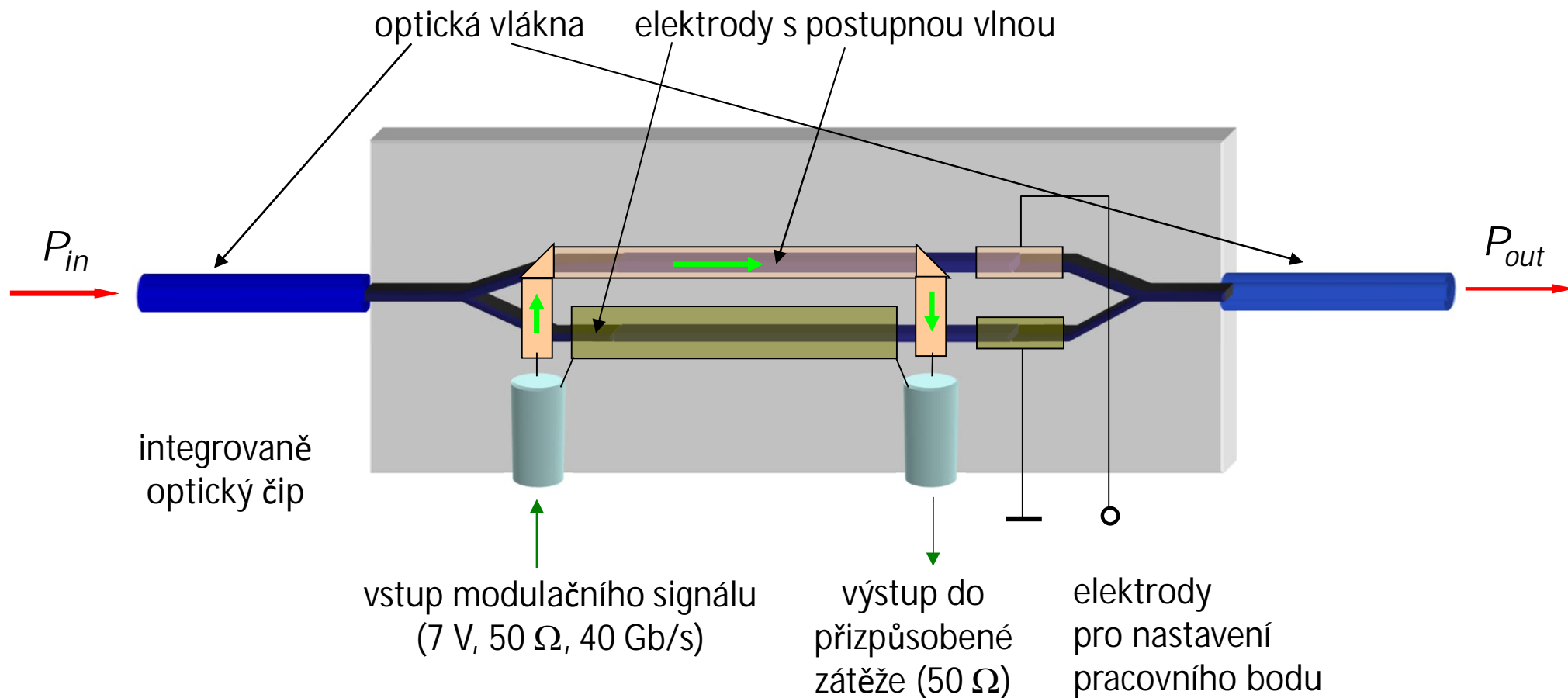
Spínací poměr (extinkce, extinkční poměr)

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

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

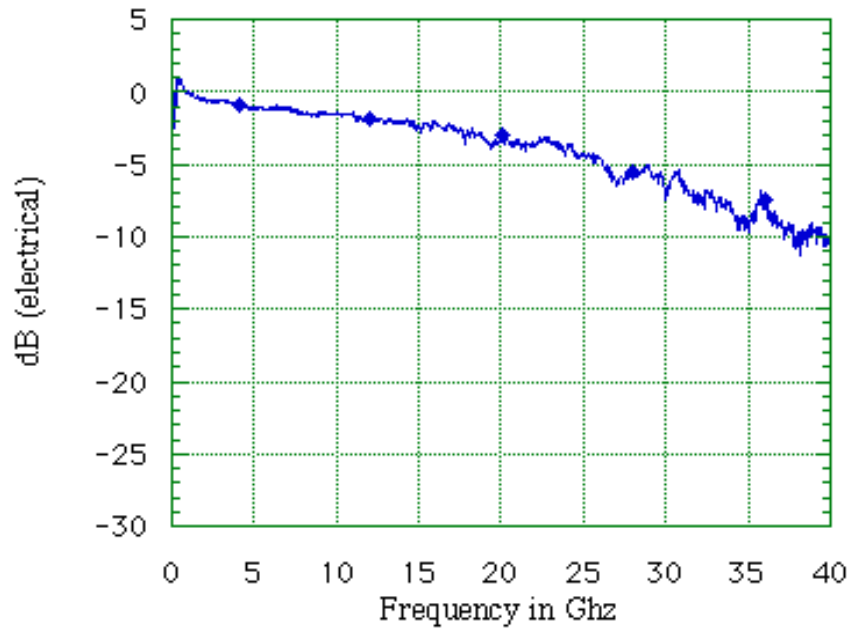
U kvalitních modulátorů $E \geq 20$ dB, $IL \leq 3$ dB

Elektroopticky řízený Mach-Zehnder interferometrický modulátor s postupnou vlnou

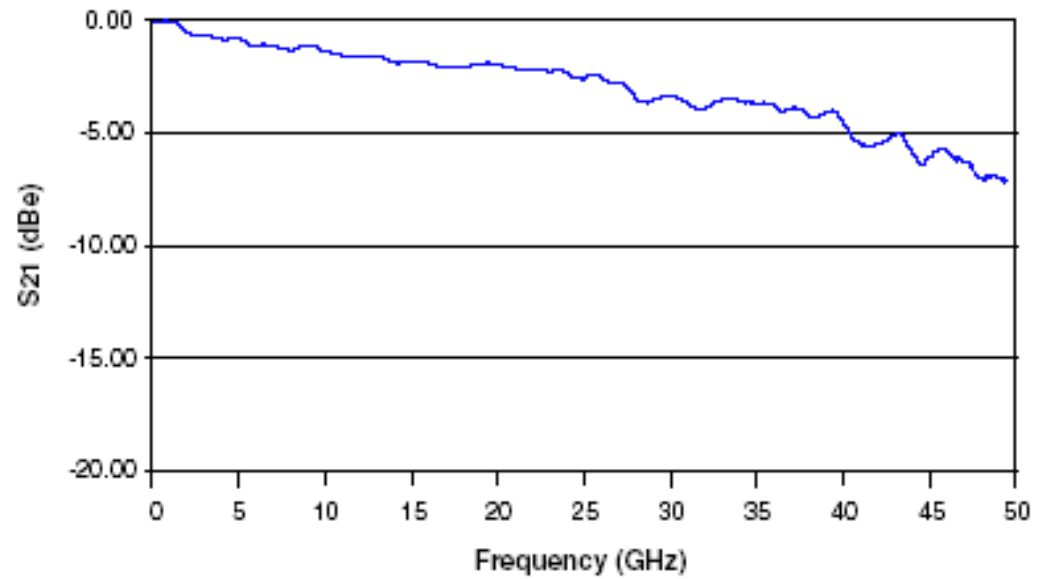


Komerční elektrooptické modulátory

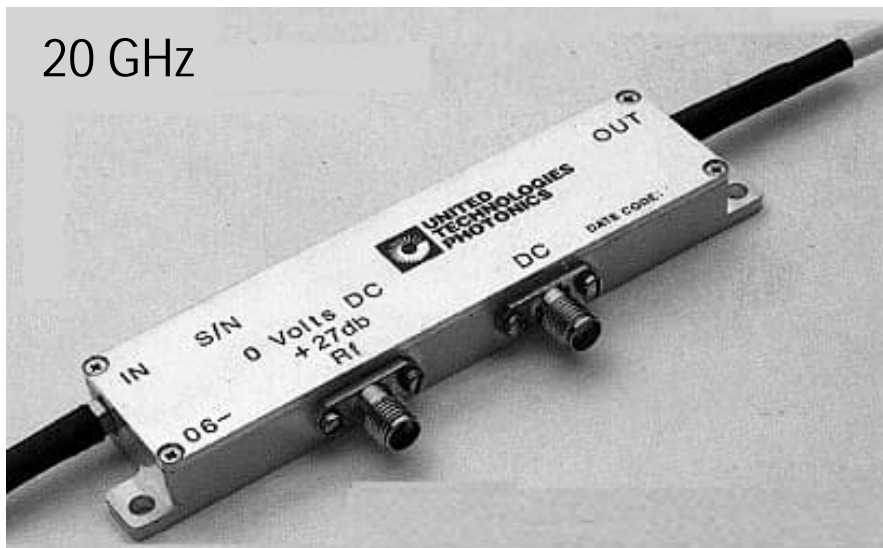
VELOCITY MATCHED MODULATOR
SWEEPED FREQUENCY RESPONSE



Frequency Response



20 GHz

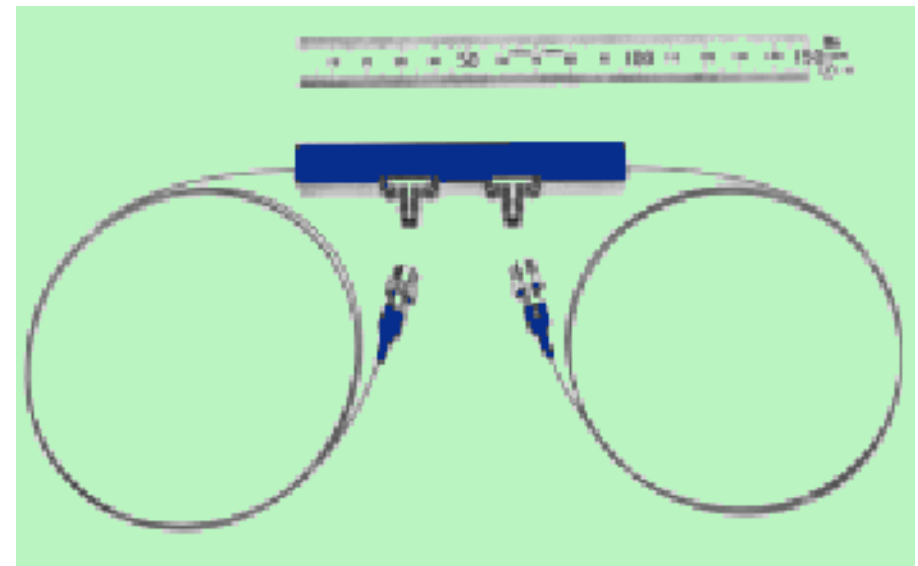
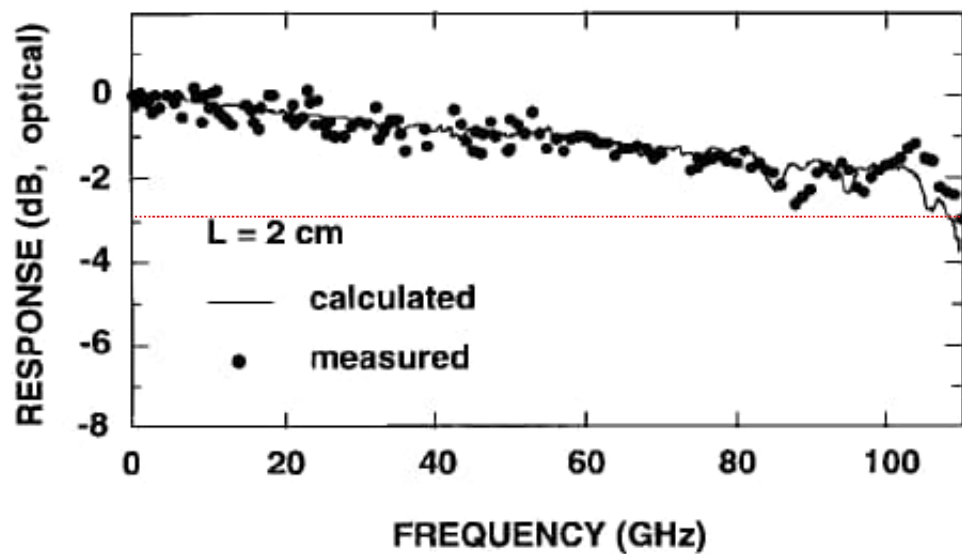
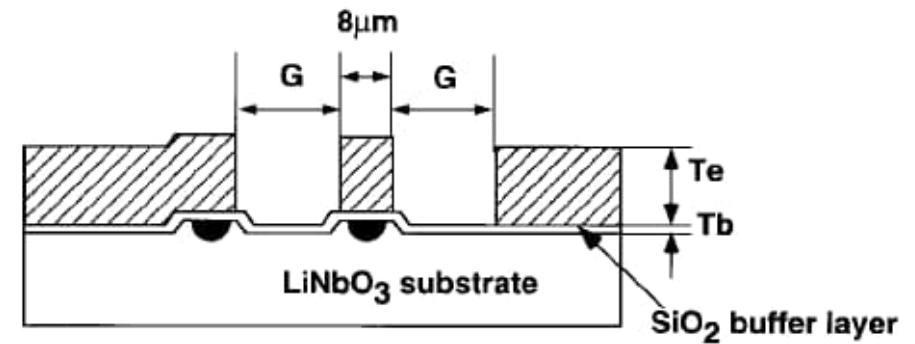
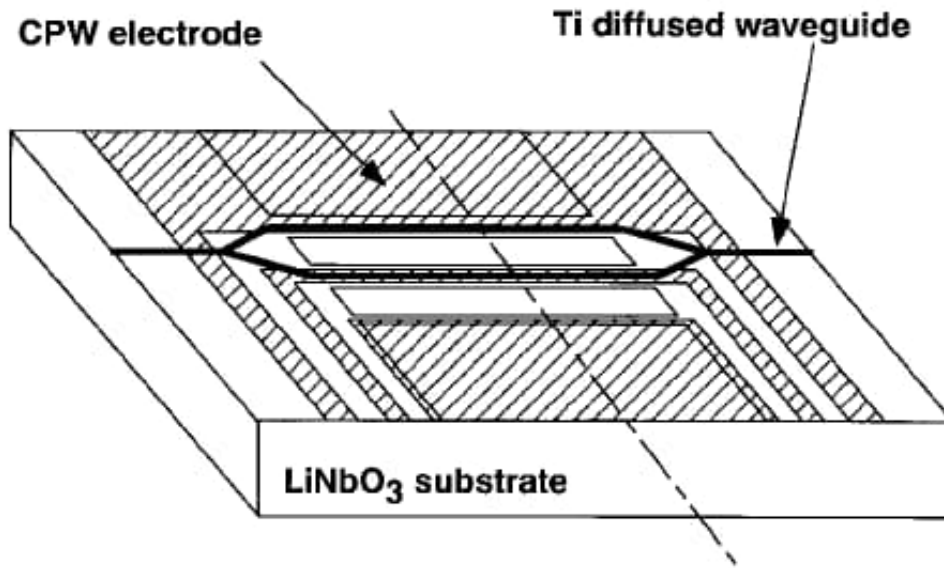


40 GHz



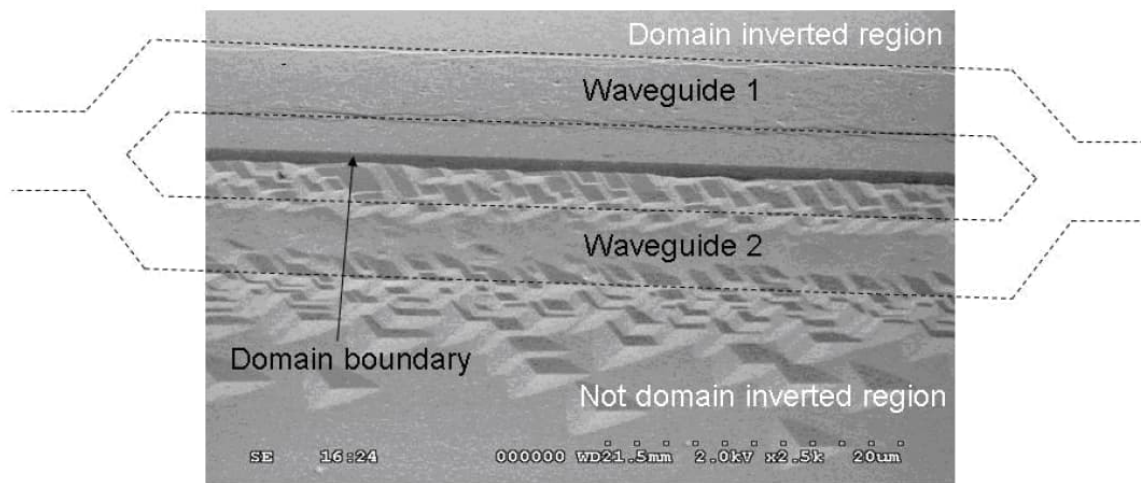
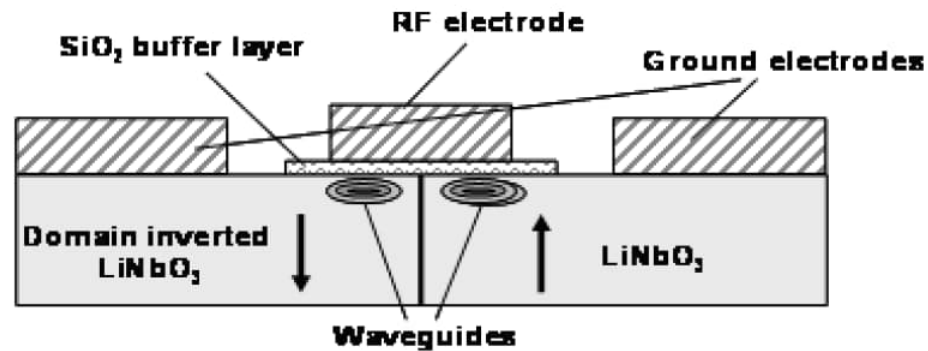
100 GHz LiNbO₃ modulátor s ovládacím napětím 5,1 V

(NTT, 1998)



Modulátor využívající inverzi domén v LiNbO_3

Zjednodušení elektrodové struktury:

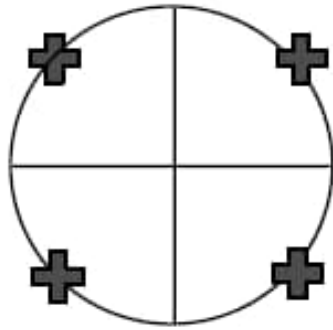


Valerio Pruneri et al.,
Avanex Corporation, Italy
ICFO, Spain
ICREA, Spain, 2007

Modulátor pro kvadraturní fázovou modulaci (QPSK)

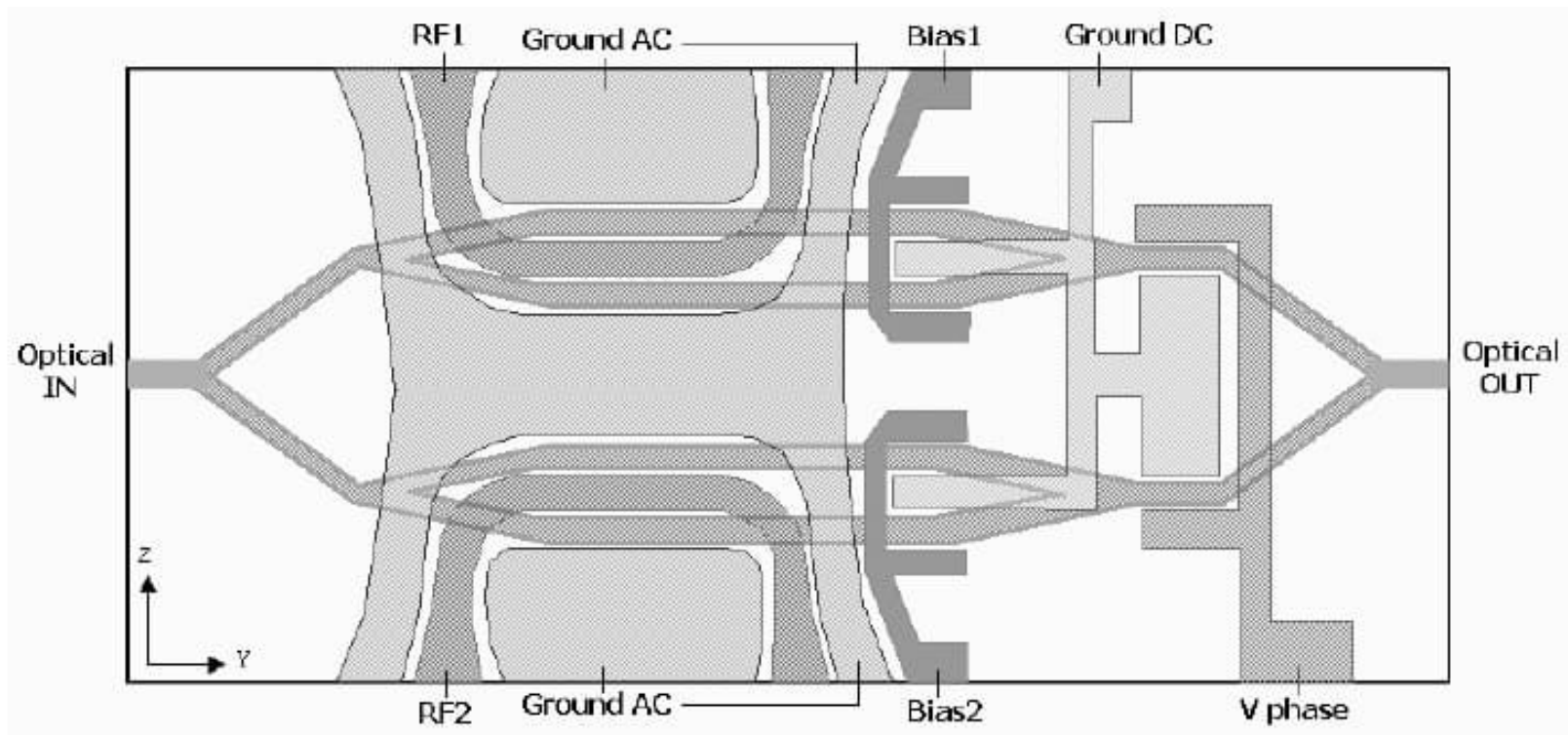
Imaginary axis

Modulační formát přenášející 2 bity/symbol

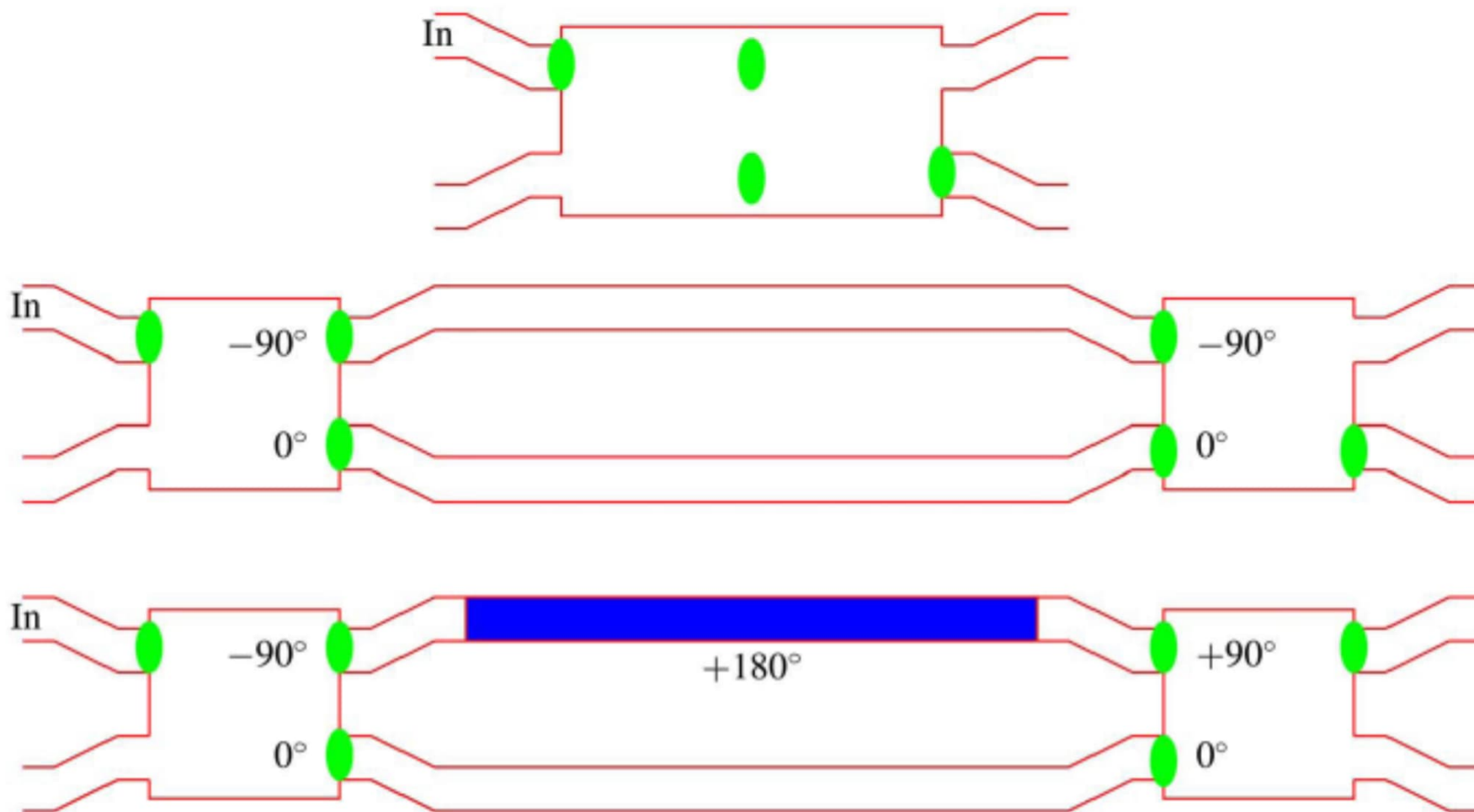


Real axis

Realizace v LiNbO₃



Mach-Zehnder interferometric switch/modulator in semiconductor material (InP/InGaAsP), electrorefractive modulation



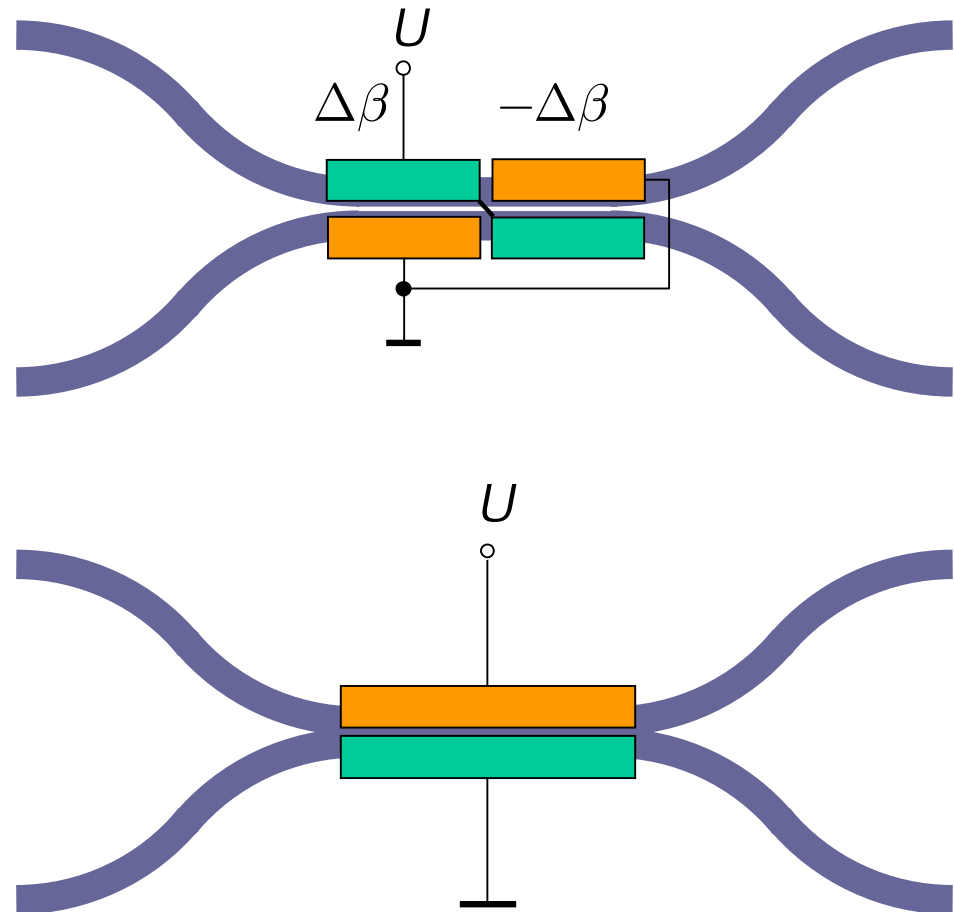
Elektrooptické vlnovodné přepínače

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

Nízké ovládací napětí,
*komplikovaná spínací
charakteristika*,
napětím lze korigovat
tolerance paramertrů

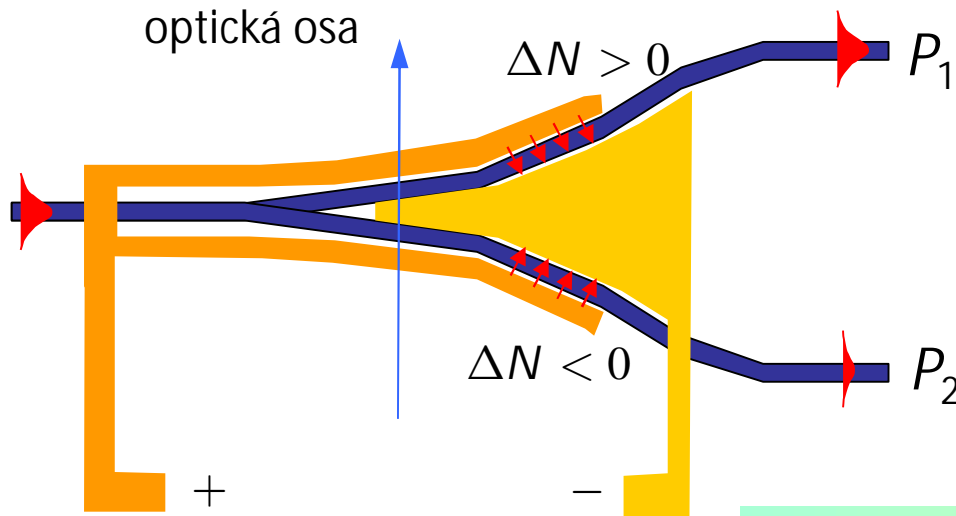
Přepínač s dvouvidovou
interferencí
„two-mode interference coupler“

Nízké ovládací napětí,
sinusová spínací charakteristika



Střední část vlnovodné struktury je dvouvidová.
Symetrický vid má ve šterbině 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**.

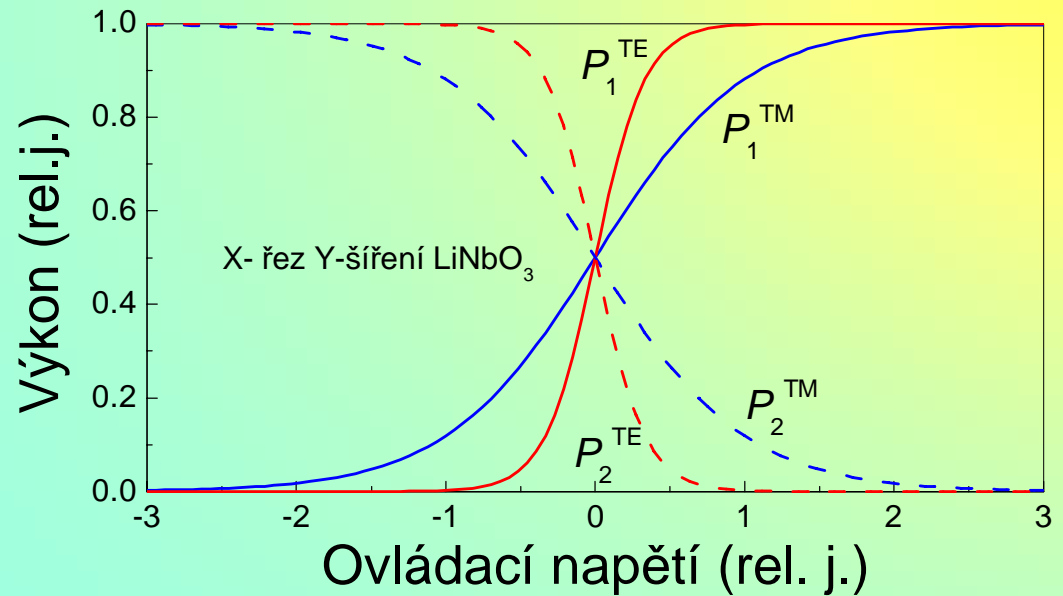
Polarizačně nezávislý „digitální“ optický přepínač (DOS) v LiNbO₃



Symetrické rozvětvení
s elektroopticky indukovanou
asymetrií

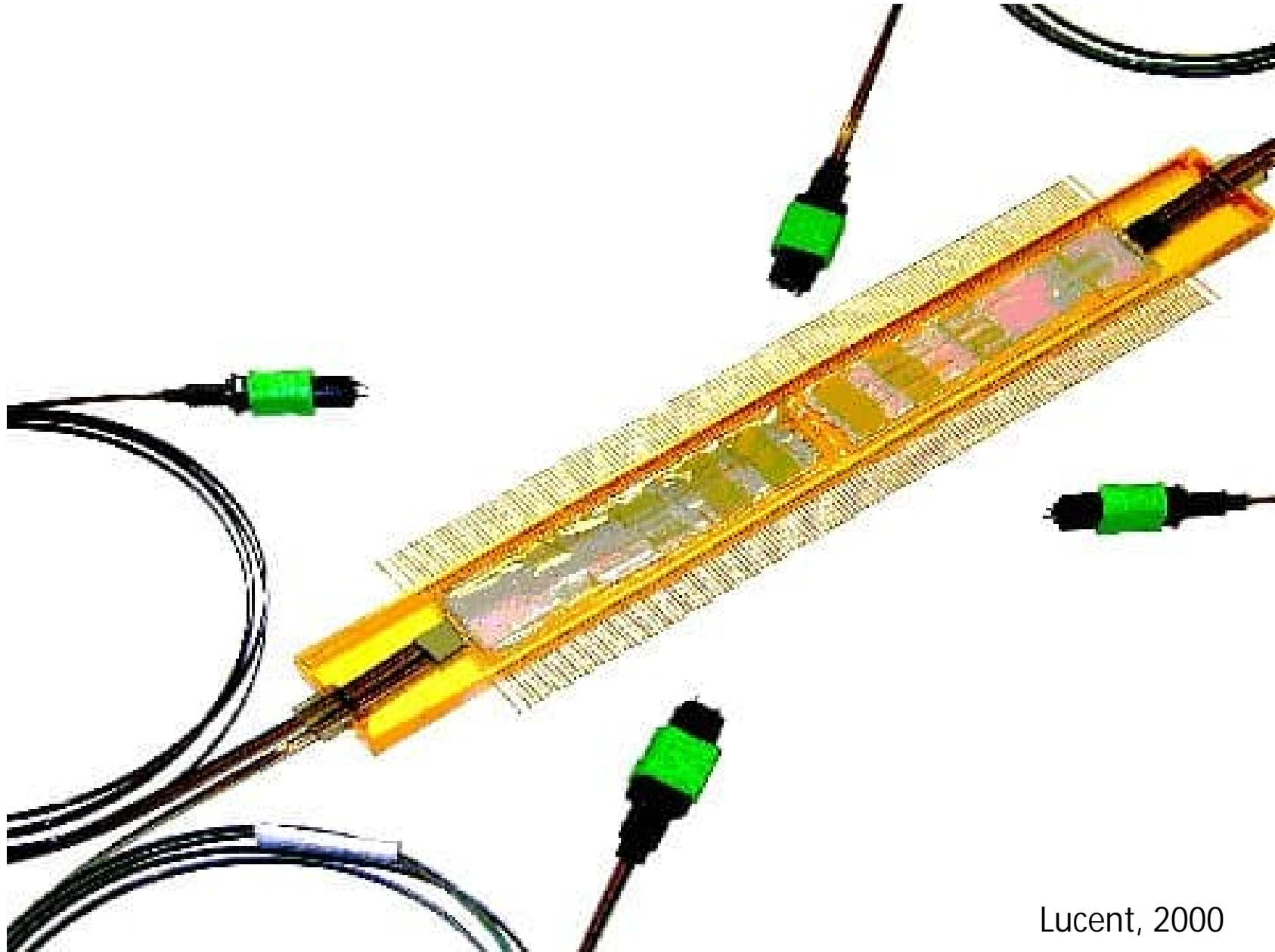
Přepínací charakteristika

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



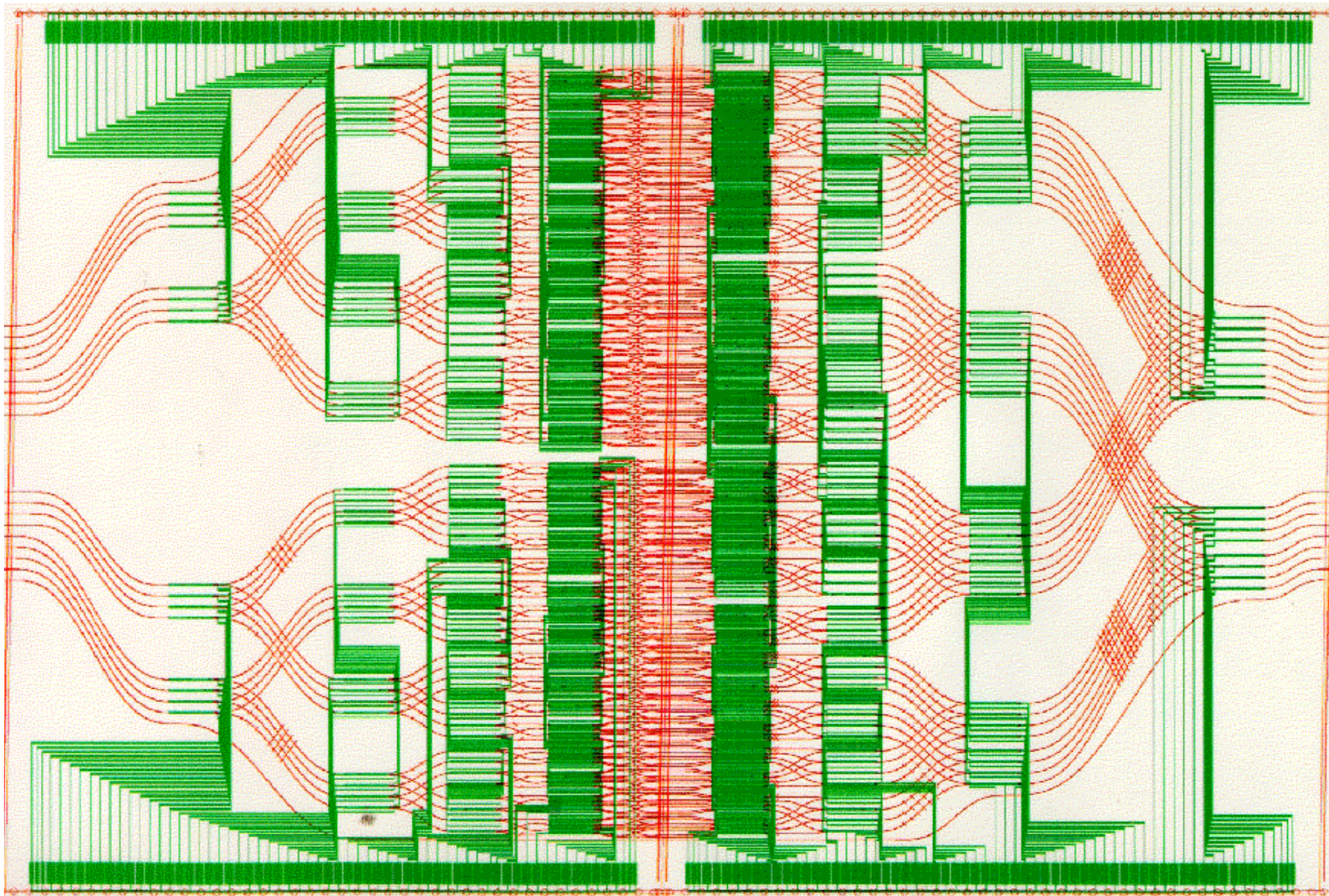
Elektrooptický přepínač 16×16 v Ti:LiNbO₃ (2×20×5 mm)

„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)

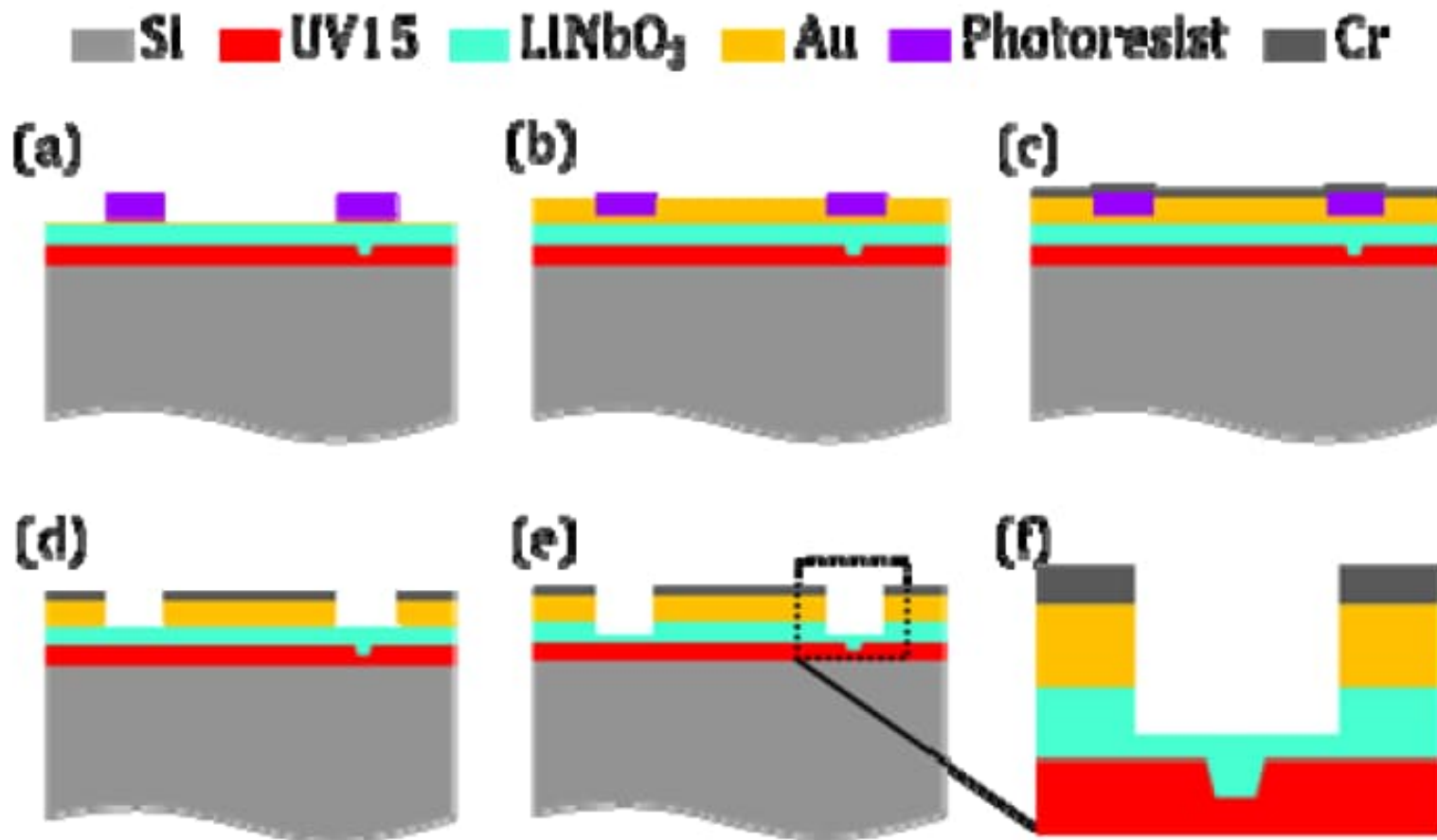


Lucent, 2000

„Layout“ optických vlnodů a elektrodové struktury přepínače

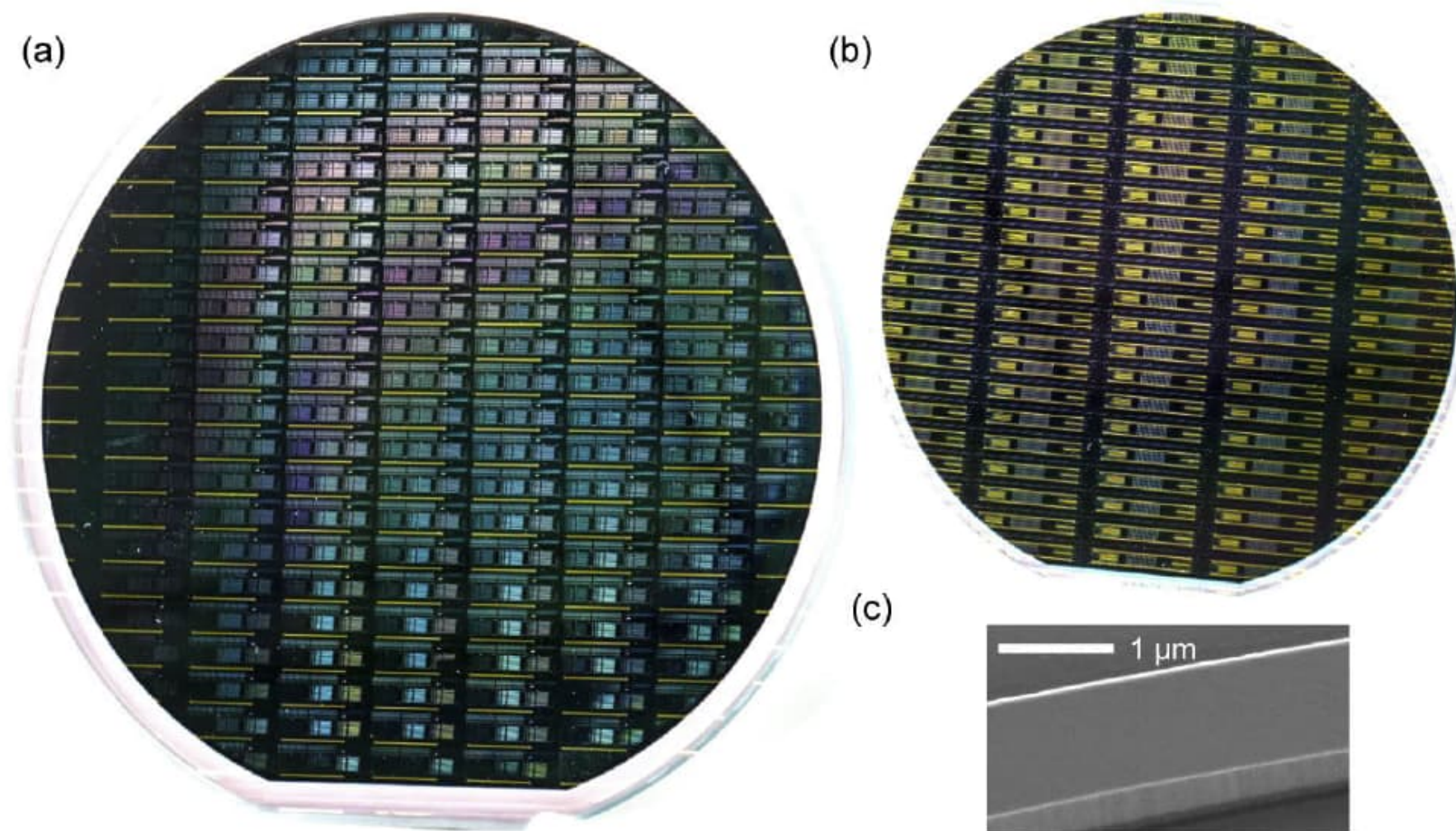


Příprava EO modulátoru využívající technologii LNOI



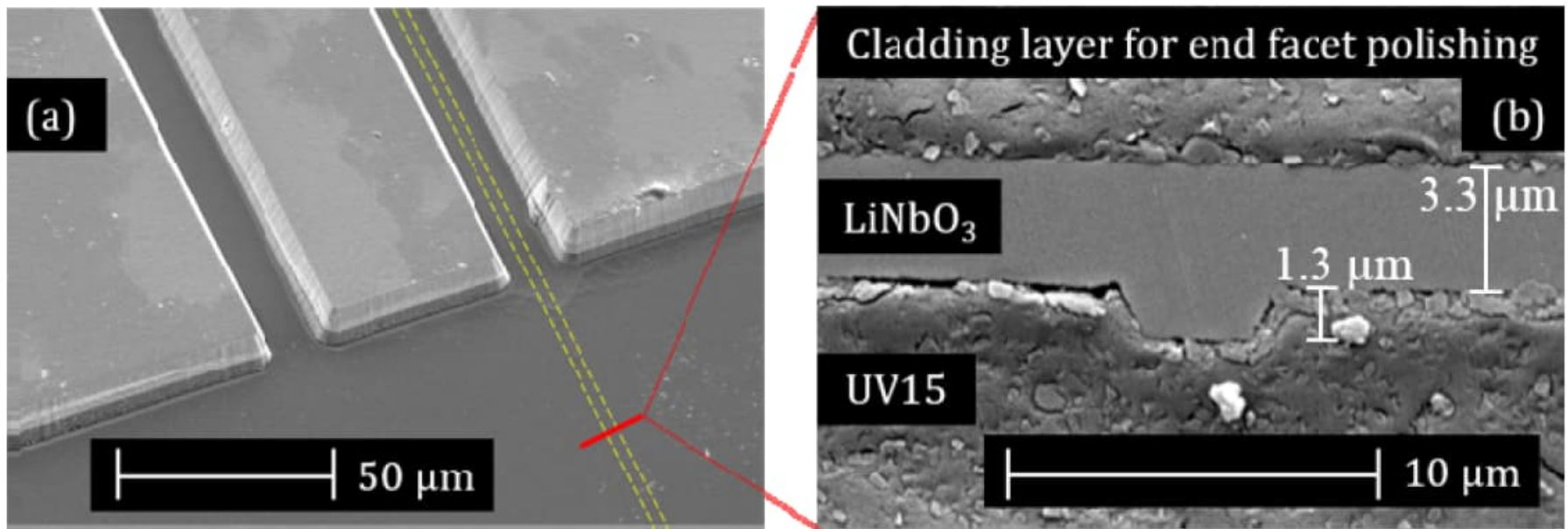
obrácený
žebrový
vlnovod

Hromadná výroba elektrooptických přepínačů a dalších komponent využívající technologii „Lithium Niobate on Insulator“ (LNOI) a DUV litografií

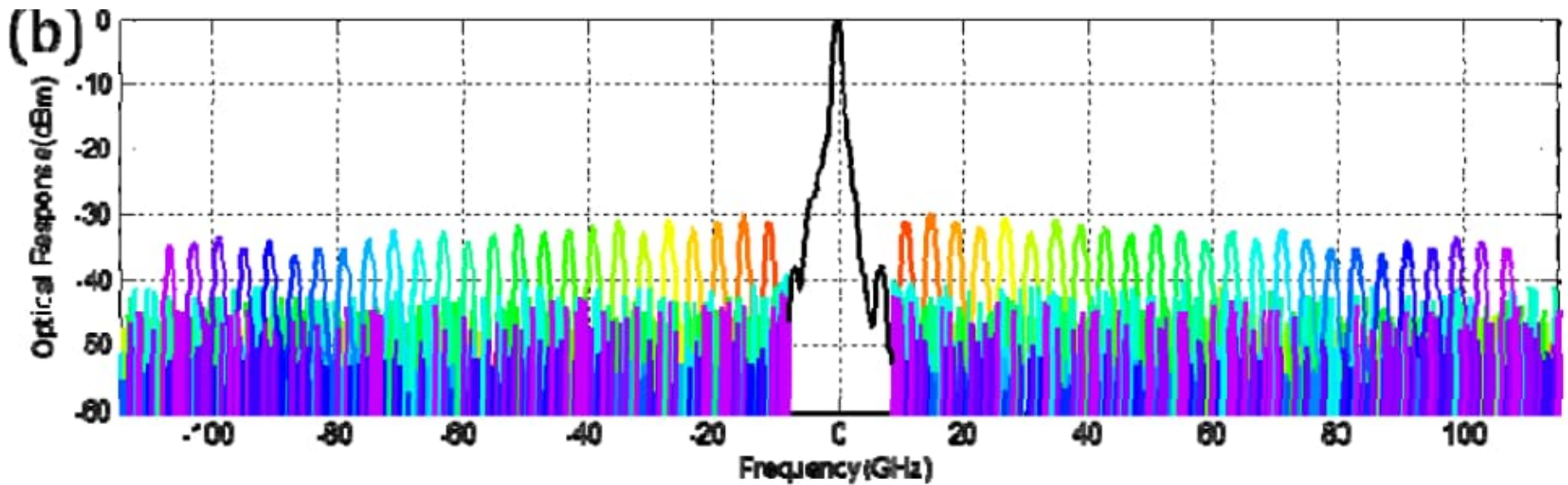


Optics Express Vol. 28, No. 17, 24452 (2020)

SEM obrázek části modulátoru



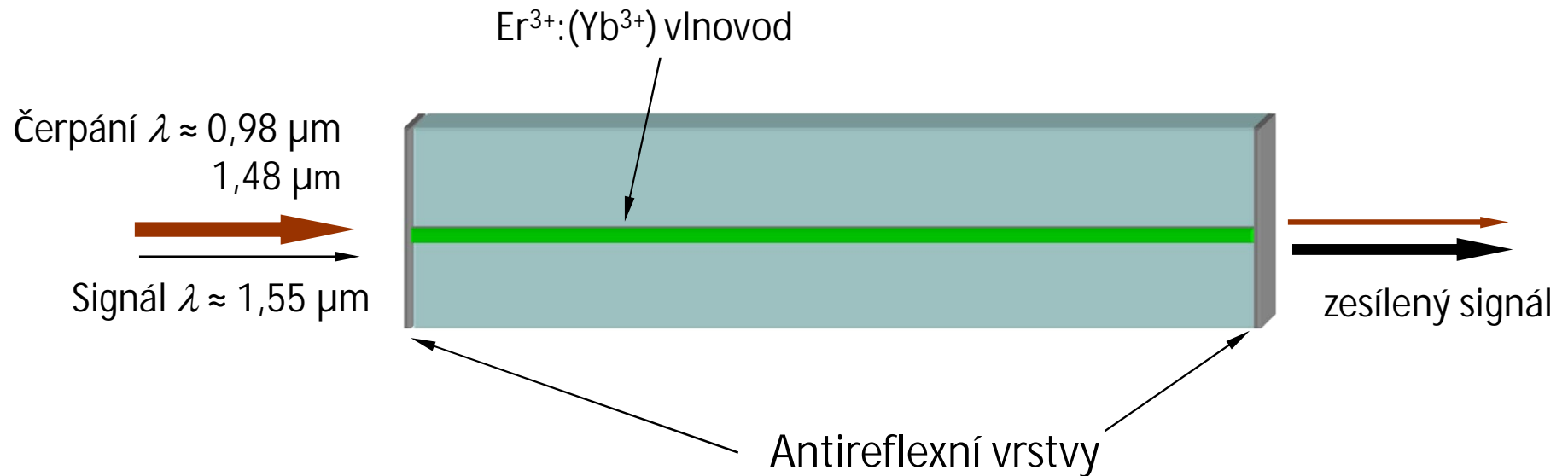
Optické spektrum signálu modulovaného frekvencí 110 GHz



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

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

Vlnovodné optické zesilovače a lasery (EDWA, EDWL)



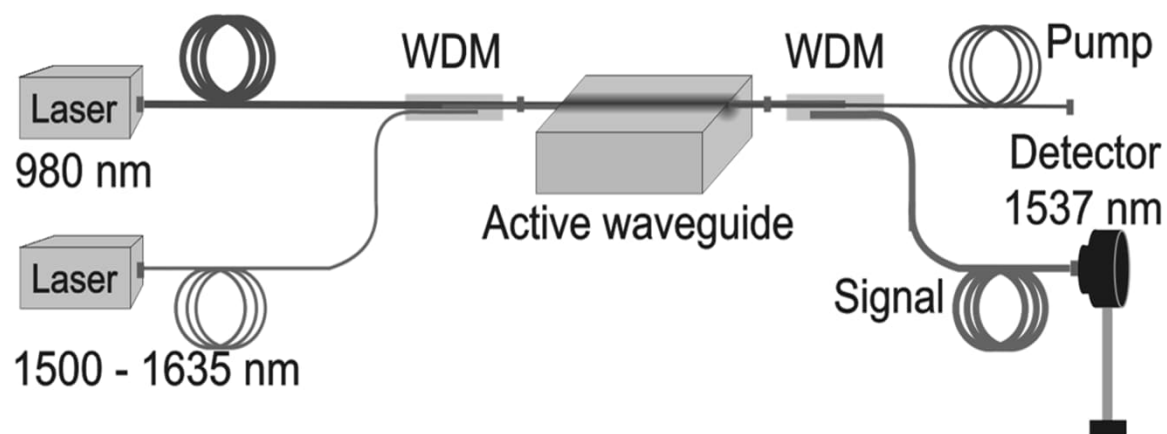
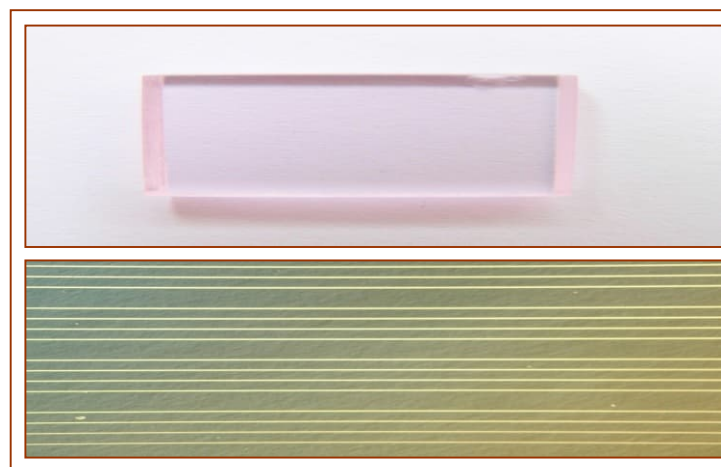
Vlnovody z různých materiálů: (fosfátové) sklo, Al₂O₃, LiNbO₃, ...
zesílení ≈ 10 dB

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 -> vysoká koncentrace dopantů, malé zesílení

Vlnodný optický zesilovač dopovaný erbiem

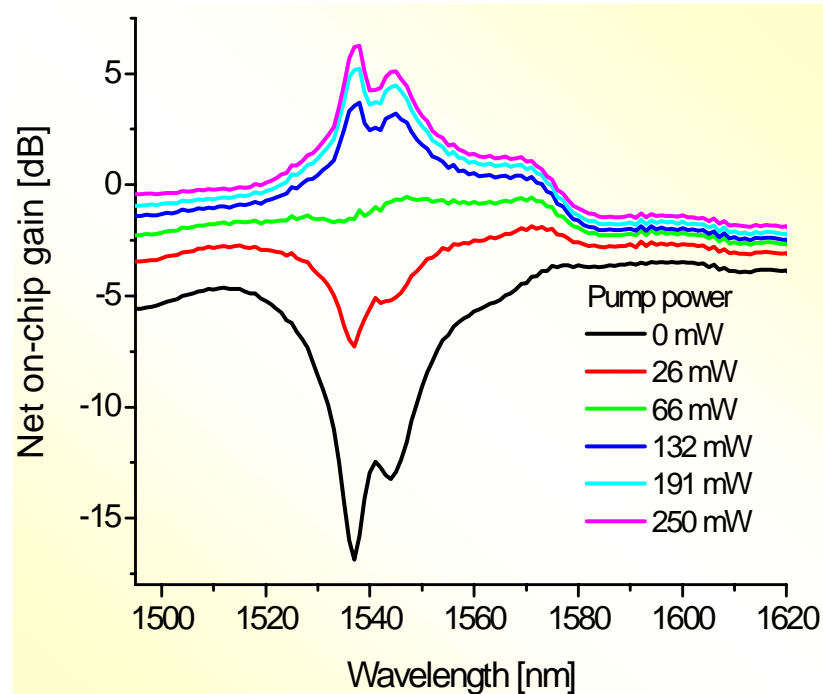
Substrátové sklo a iontová výměna: VŠCHT, litografie a charakterizace: ÚFE



Vlnodný optický zesilovač dopovaný erbiem

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

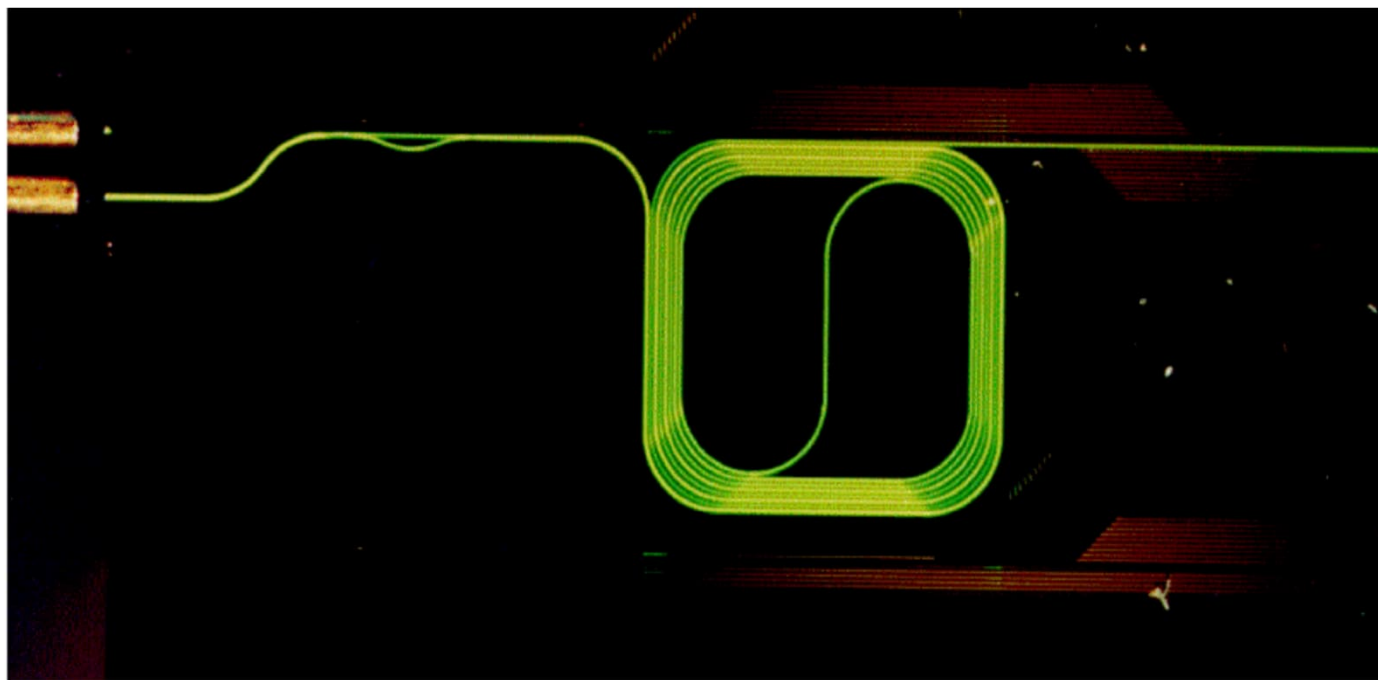
Waveguide parameters	K ⁺	Ag ⁺
Mode-field dimensions	9.6×12.9 μm	6.1×7.0 μm
Mode-field dimensions @ 980 nm	6.9×10.5 μm	3.2×4.8 μm
Scattering loss @ 1550 nm	0.18 dB/cm	0.85 dB/cm



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

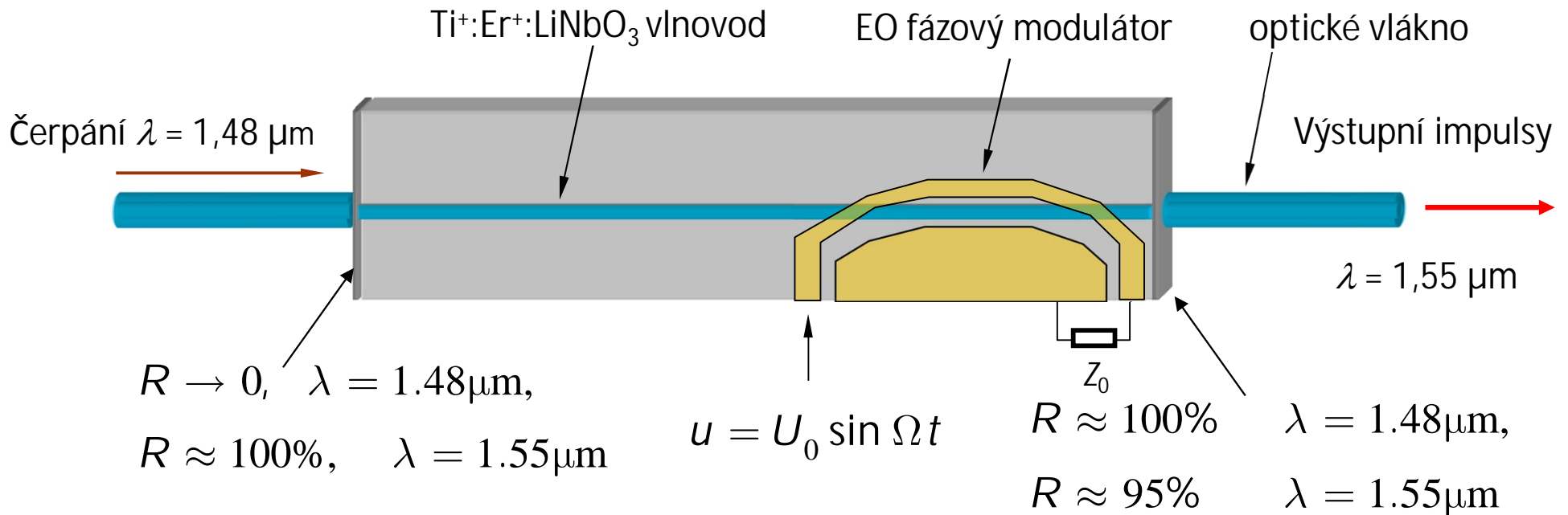
spirála $1 \times 1 \text{ mm}^2$

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)

Vlnodný Ti:Er:LiNbO₃ laser s integrovaným elektrooptickým modulátorem pro synchronizaci vidů

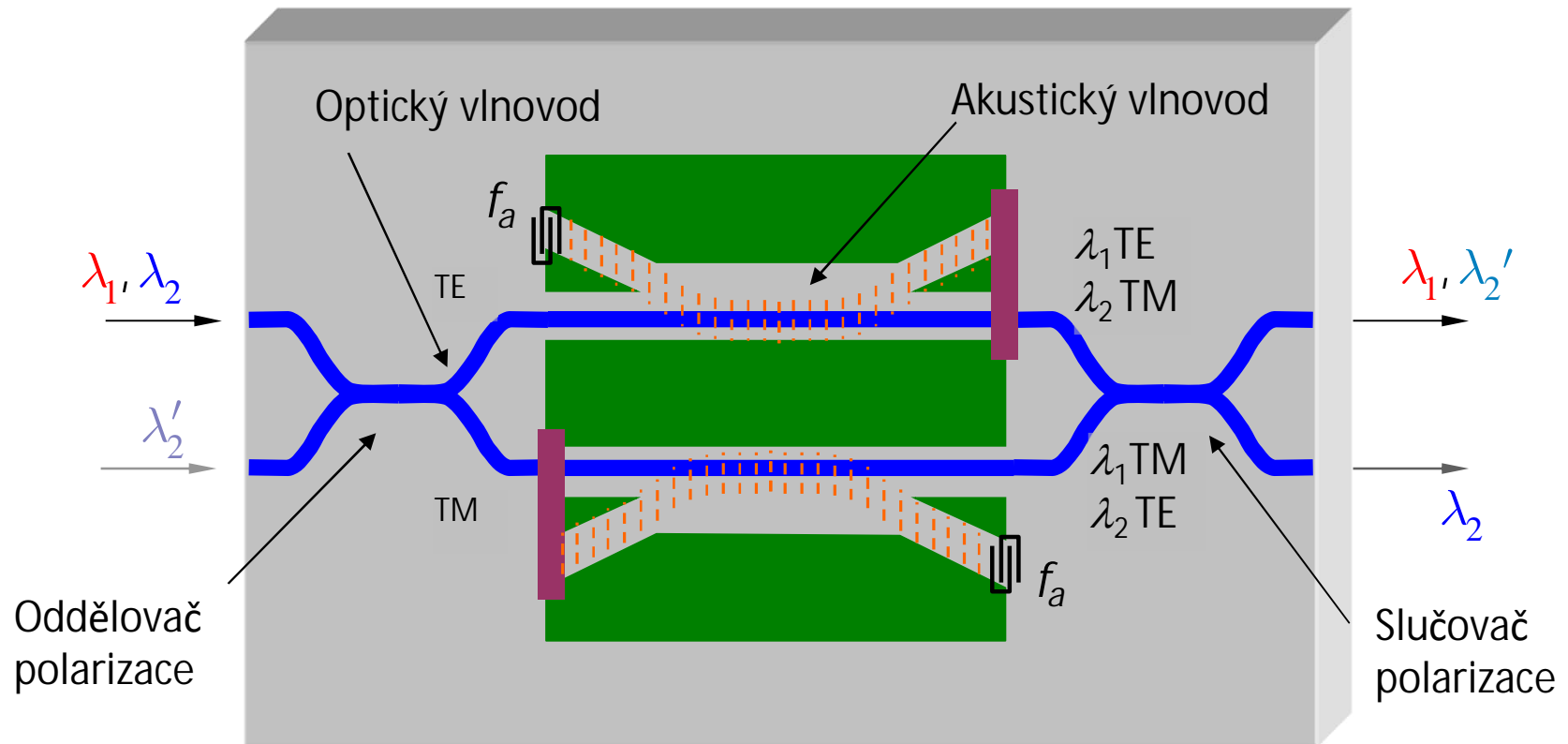


Ultrakrátké pulsy ($\leq 5 \text{ ps}$), opakovací frekvence $\approx 20 \text{ GHz}$

(Univerzita Paderborn, D, 1997-2000)

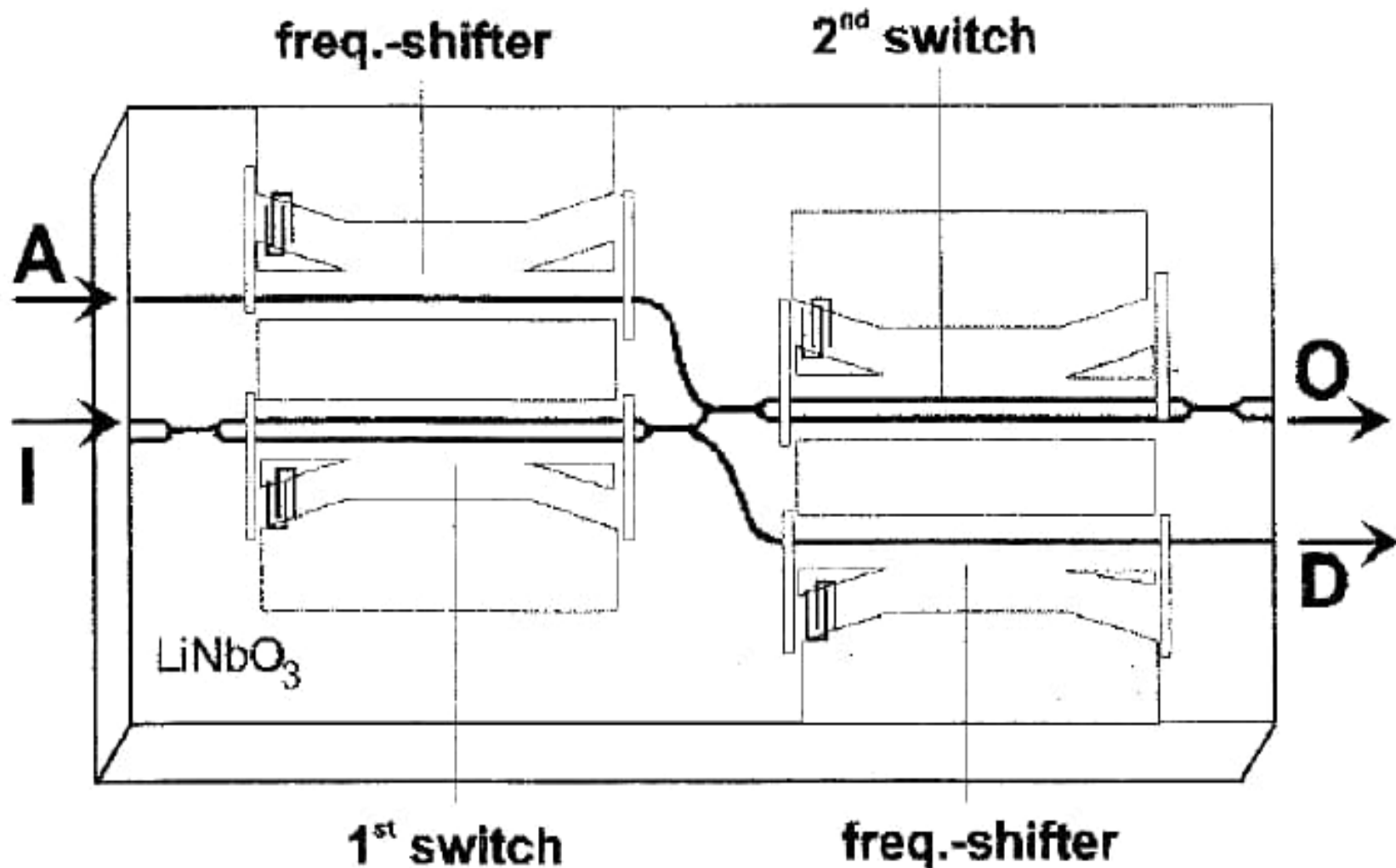
Polarizačně nezávislý akustoopticky laditelný začleňovací/vydělovací demultiplexor v LiNbO₃

Princip: kolineární AO TE-TM konverze



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

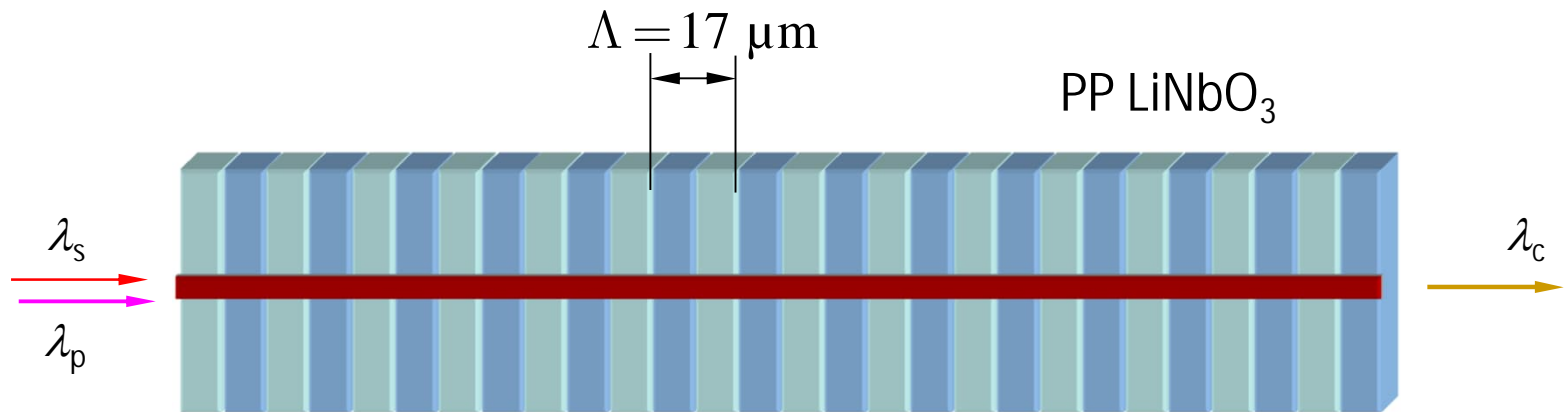
Add-drop multiplexer s kaskádním řazením filtrů a kompenzací frekvenčního posuvu



(Univerzita Paderborn 1997-2000)

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

Nelineární optický jev 2. řádu – generování rozdílové frekvence



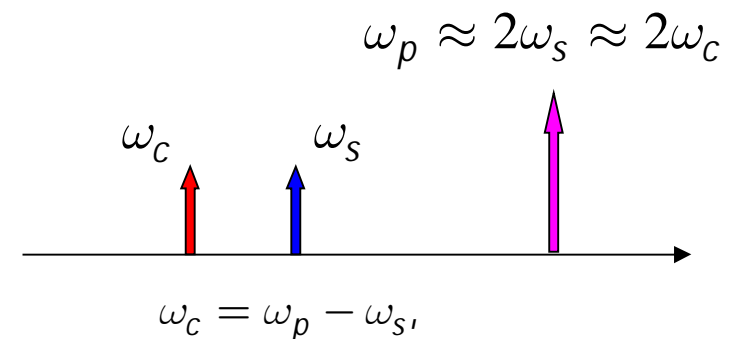
$$K = 2\pi / \Lambda; \quad k_c = k_p - k_s + K;$$

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

dvou- až třívidový \Rightarrow obtížná excitace základního vidu.

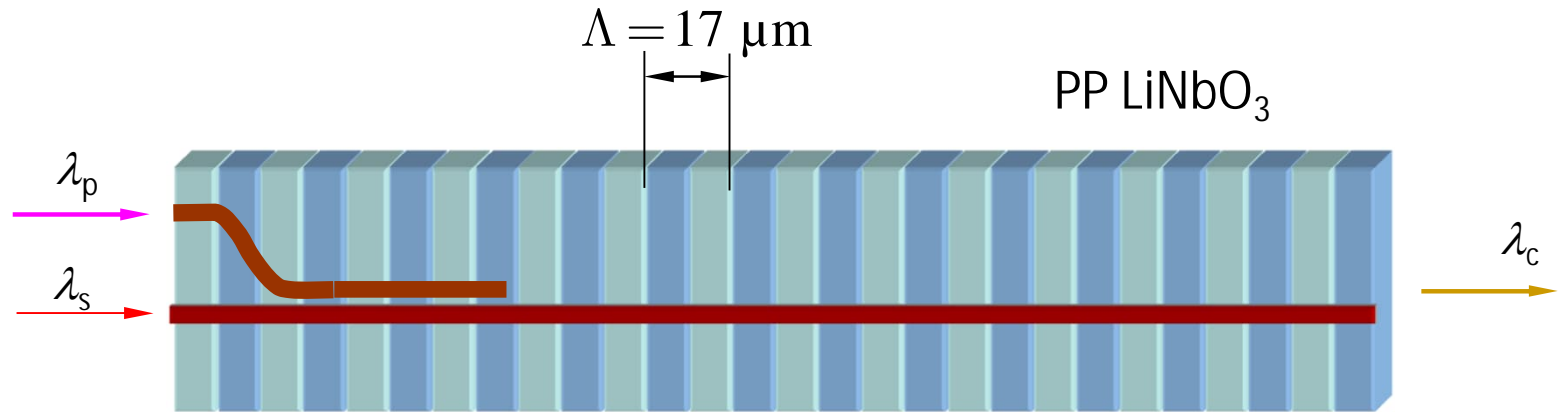
Řešení: kaskádní aplikace dvou procesů

$$\chi^{(2)}$$



Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

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



Princip

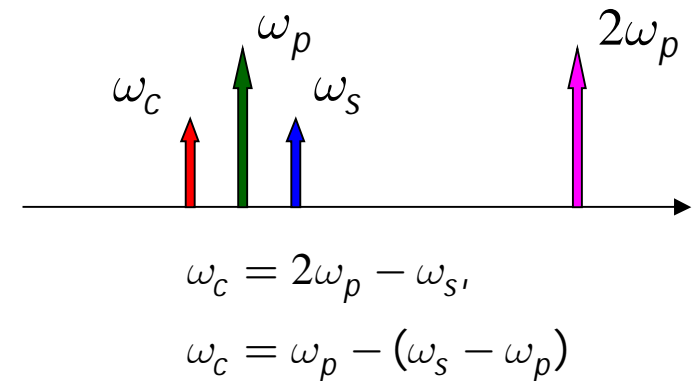
1. generování 2. harmonické
2. generování rozdílové frekvence

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

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

Aplikační možnosti

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



Konec **části 3**