

Základy technologie

fotonických vlnovodných struktur

UFE

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** (dopované Er^{3+})

Polymery

Termooptické (elektrooptické?) modulátory a přepínače

Ti:LiNbO₃, APE LiNbO₃ (annealed proton exchange)

Elektrooptické, akustooptické, aktivní (dopované 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

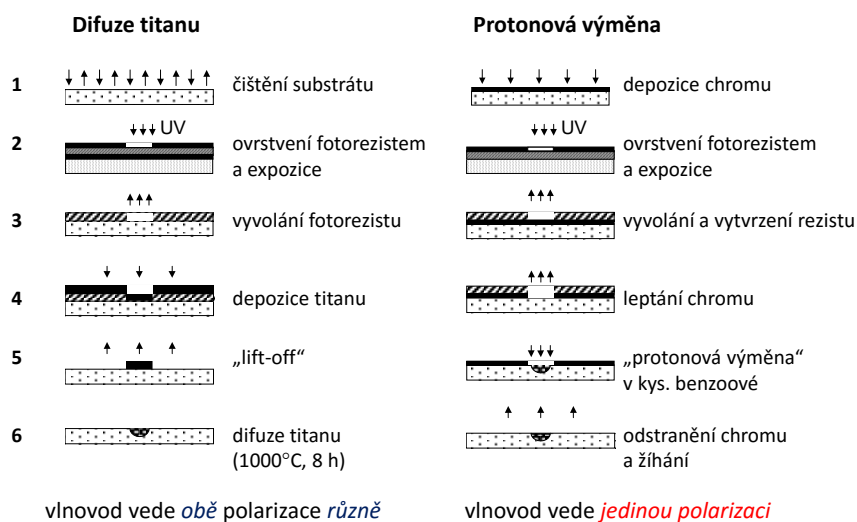
Lasery, polovodičové zesilovače, elektroabsorpční modulátory, spektrální de/multiplexory, detektory,...

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

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

UFE

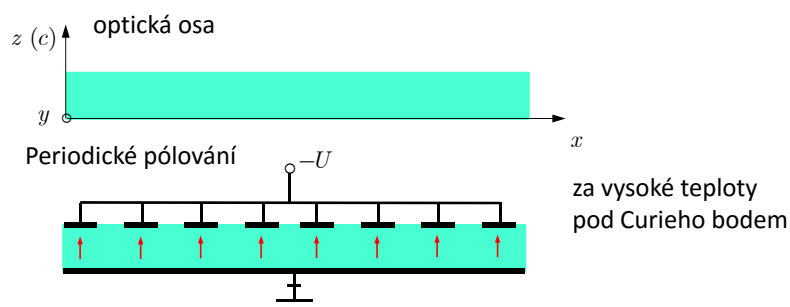
Příprava vlnovodů v LiNbO_3



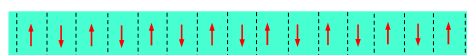
UFE

Periodické pólování krystalu LiNbO_3

Monokrystal LiNbO_3



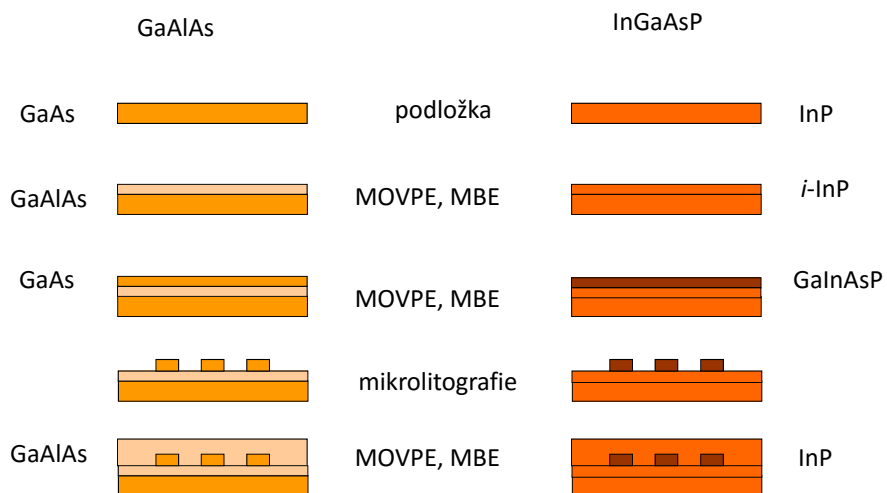
Výsledek:



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

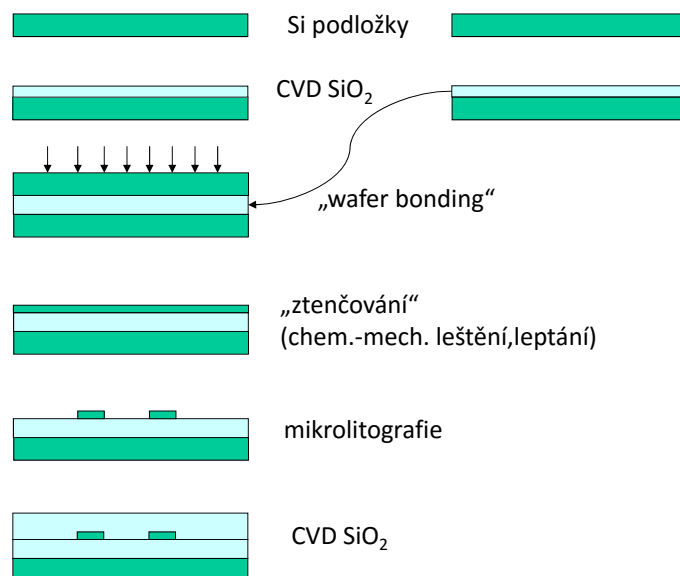
UFE

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



UFE

Příprava vlnovodů SOI (silicon on insulator)



UFE

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

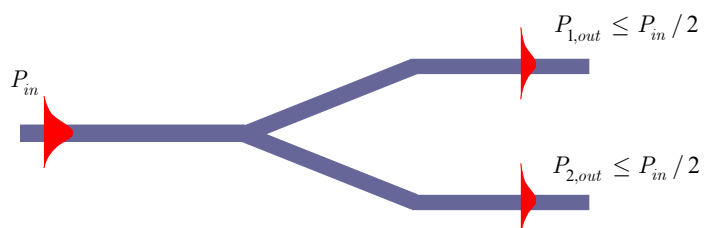
UFE

Pasivní fotonické vlnovodné 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

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

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

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

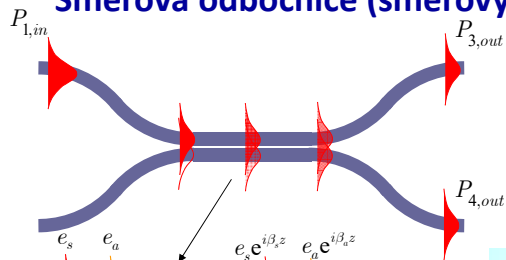
$$= \sqrt{2} e_s \cos \frac{\Delta\varphi}{2} + \sqrt{2} i e_a \sin \frac{\Delta\varphi}{2} \rightarrow (e_1 + e_2) \cos \frac{\Delta\varphi}{2} = E_{in} \cos \frac{\Delta\varphi}{2}$$

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

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

UFE

Směrová odbočnice (směrový vazební člen)



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

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

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

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

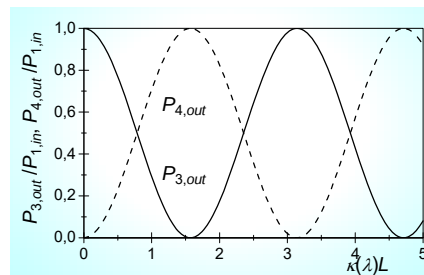
$$e_s \approx (e_1 + e_2) / \sqrt{2}, \quad e_1 \approx (e_s + e_a) / \sqrt{2},$$

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

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

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

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

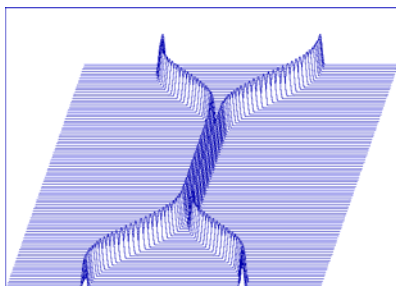


UFE

Spektrální vlastnosti směrové odbočnice

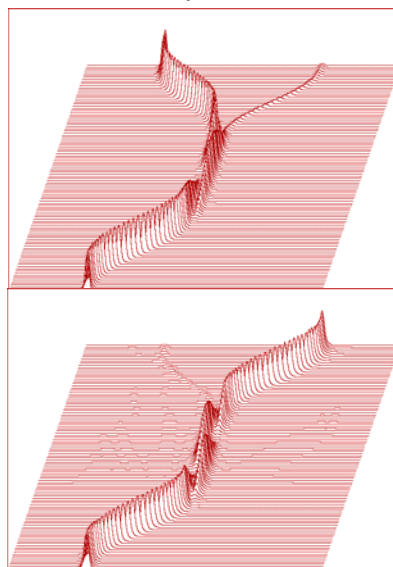
Rozložení indexu lomu

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



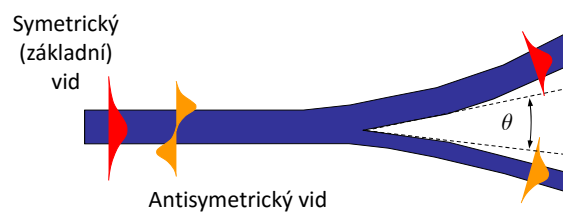
$\lambda = 1.55 \mu\text{m}$

Rozložení optického záření



UFE

Asymetrické vlnovodné rozvětvení jako oddělovač vidů

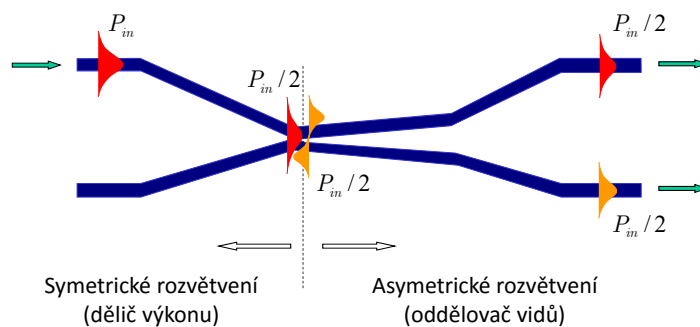


$$\frac{\Delta N_{eff}}{\sqrt{n_s^2 - N_{eff}^2} \theta} \begin{cases} > 1, & \Rightarrow \text{asymetrické Y, oddělovač vidů} \\ < 0.1, & \Rightarrow \text{symetrické Y, dělič výkonu} \end{cases}$$

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

UFE

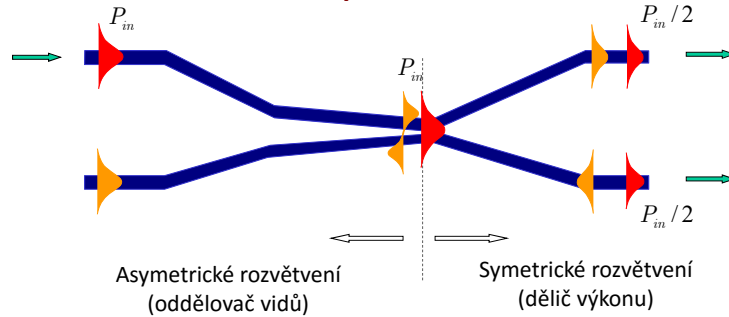
Spektrálně nezávislá odbočnice 2×2



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

UFE

Spektrálně nezávislá odbočnice 2×2 šíření v opačném směru

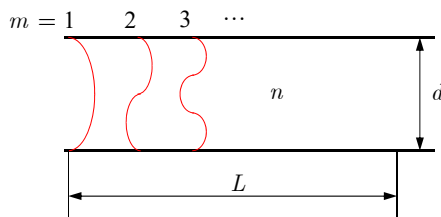


Odbočnice může pracovat v celém intervalu 1,25 – 1,6 μm ;
omezení je dáno **oblastí jednovidového režimu** vlnovodů

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

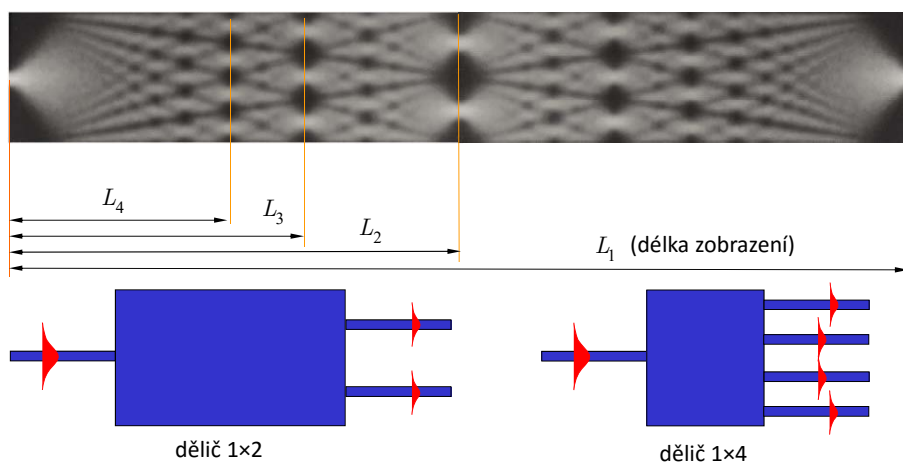
$L = \frac{2 k_0 n d^2}{\pi} = \frac{4 n d^2}{\lambda} \approx M d, \text{ liší se } \beta_m L \text{ o sudé násobky } \pi \Rightarrow \text{zobrazení}$

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

Úprava pro zmenšení fázové chyby (snížení počtu potřebných vidů)

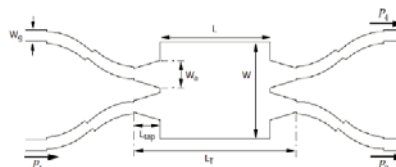
původní tvar



modifikovaný tvar



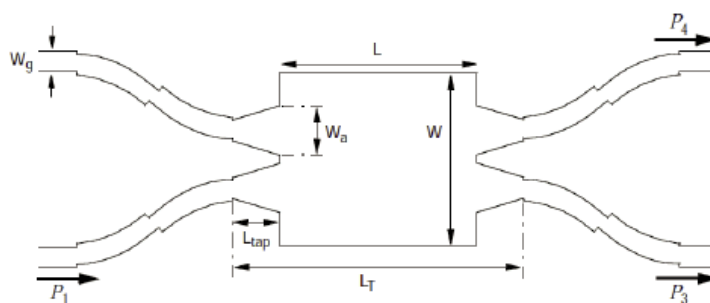
struktura děliče 2x2 včetně vstupních a výstupních vlnovodů



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

UFE

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

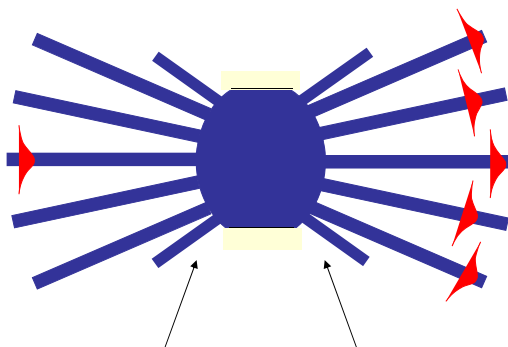


M.T.Hill, J. Lightwave Technol. **21**, 2305-2313, 2003

struktura děliče 2x2 včetně
vstupních a výstupních vlnovodů

UFE

Hvězdicový difrakční vazební člen MxN



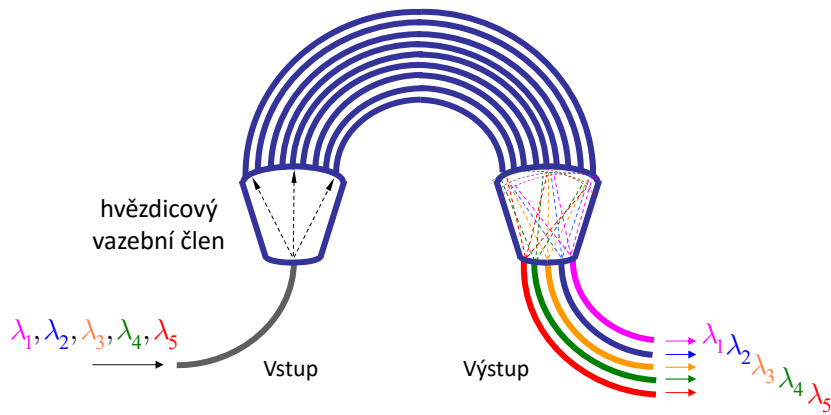
„Jalové“ vlnovody pro zlepšení rovnoměrnosti rozdělení výkonu

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

UFE

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

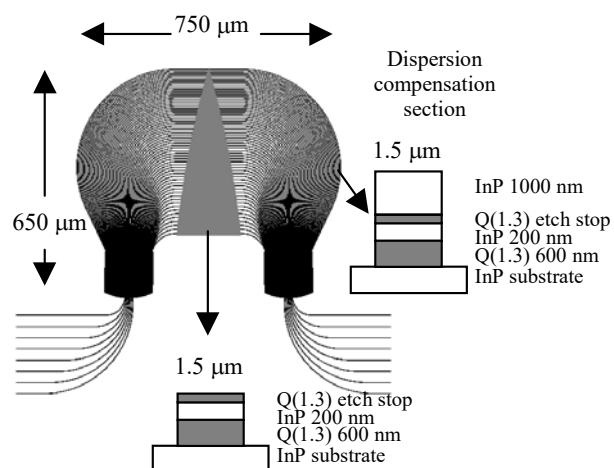
Fázovaná řada (několika desítek) vlnovodů



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

UFE

Příklad provedení integrovaně-optického AWG demultiplexoru na bázi InP

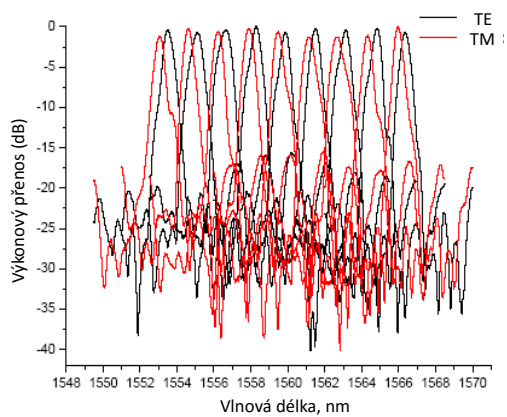
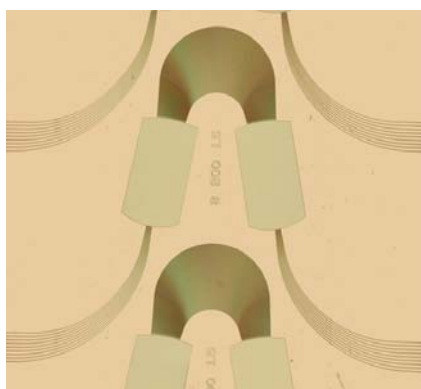


$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{f} \Delta f = \frac{\lambda^2}{c} \Delta f; \text{ pro } \lambda = 1550 \text{ nm a } \Delta f = 100 \text{ GHz je } \Delta\lambda = 0.8 \text{ nm}$$

UFE

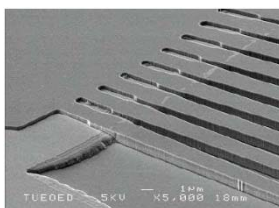
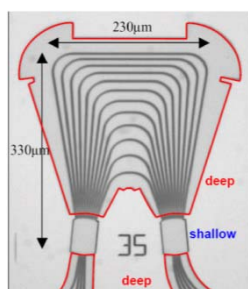
Příklady AWG demultiplexorů - 1

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



UFE

Příklady AWG demultiplexorů - 2

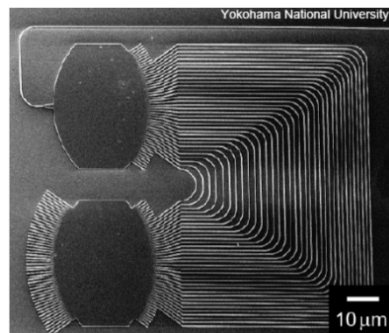


4 kanály, InP podložka

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

17 kanálů, SOI

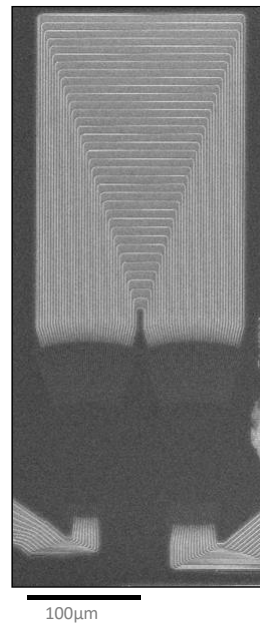
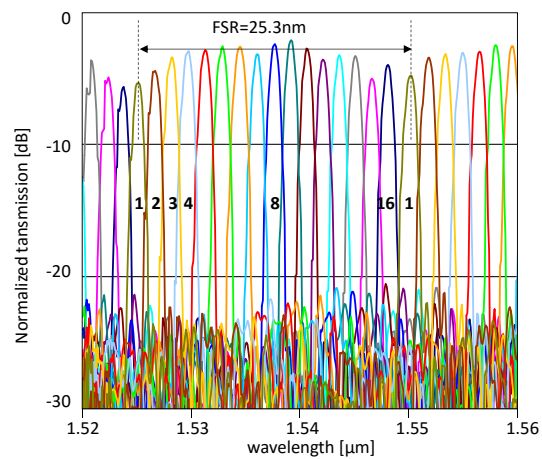
T. Fukazawa et al.
Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 43
No. 5B, pp. 673–675, 2004



UFE

AWG

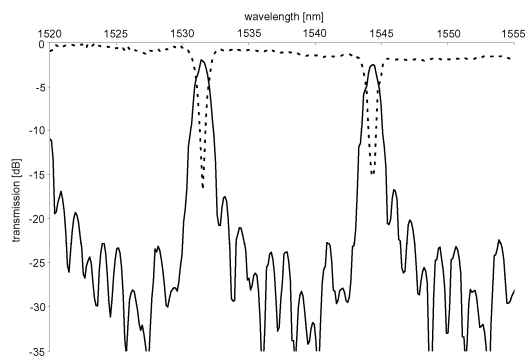
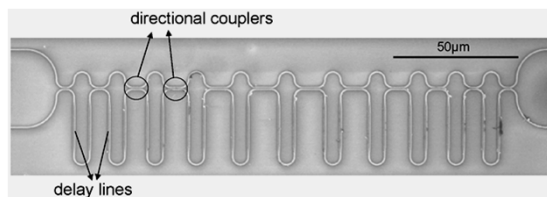
- 16-channel AWG, 200GHz
- 200 μm x 500 μm area
 - -3dB insertion loss
 - -15dB to -20dB crosstalk



UFE

Machův-Zehnderův filtr 11. řádu

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



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

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

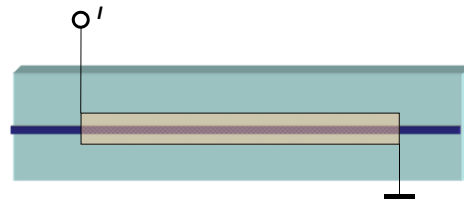
$$a_\mu(z_0 + \Delta z) \approx \exp[i(\beta_\mu + K_{\mu\mu}^{++})\Delta z]a_\mu(z_0).$$

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

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

UFE

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 μ s!

UFE

Elektrooptický jev

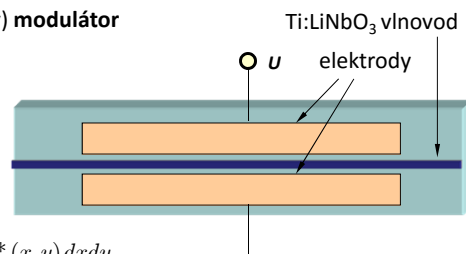
změna indexu lomu (tenzoru optické permitivity)
vlivem vnějšího elektrického pole

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

malá změna permitivity $\Rightarrow$ teorie vázaných vln

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

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

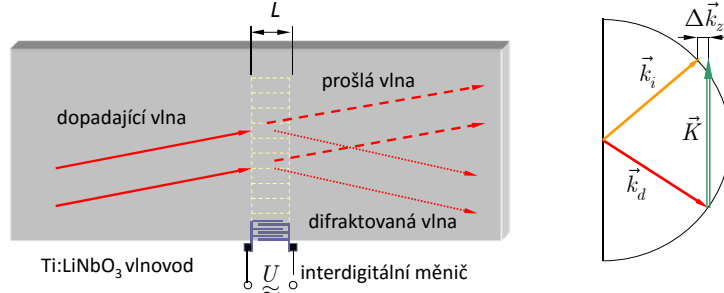


UFE

Akustooptický jev

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

Nekolineární interakce:



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

"piezoelektrický zpevněný"
elastooptický tenzor

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

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

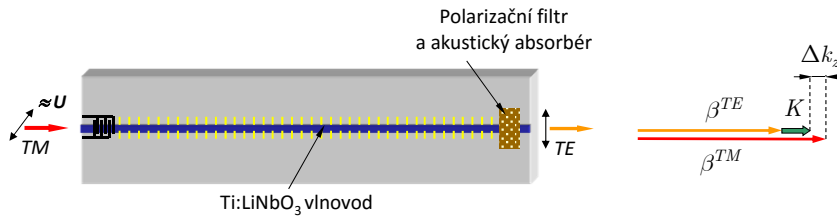
$\mathbf{k}_d \cong \mathbf{k}_i \pm \mathbf{K}$ zákon zachování (kvazi)impulsu

piezoelektrický tenzor

UFE

Akustooptický jev

Kolineární interakce



Účinnost akustooptické interakce

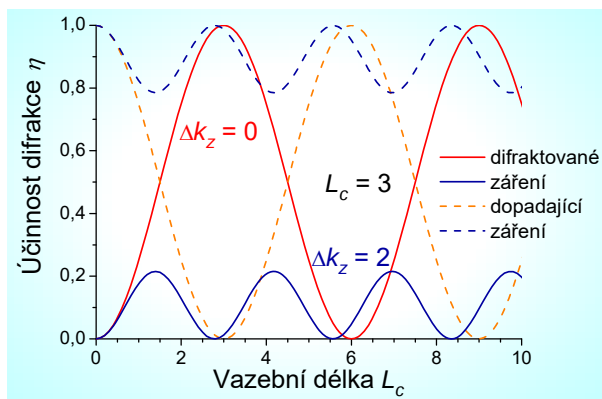
$$\eta = \frac{\kappa^2}{\kappa^2 + (\Delta k_z / 2)^2} \sin^2 \left(\sqrt{\kappa^2 + (\Delta k_z / 2)^2} L \right),$$

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

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

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

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

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

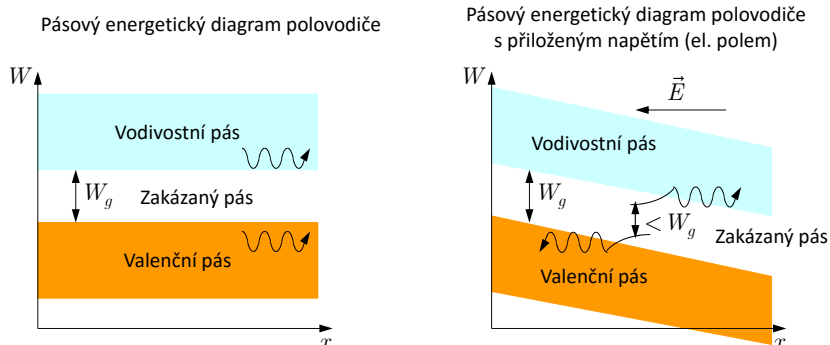
pak

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

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

UFE

Elektroabsorpce a elektrorefrakce v polovodičích



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

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

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

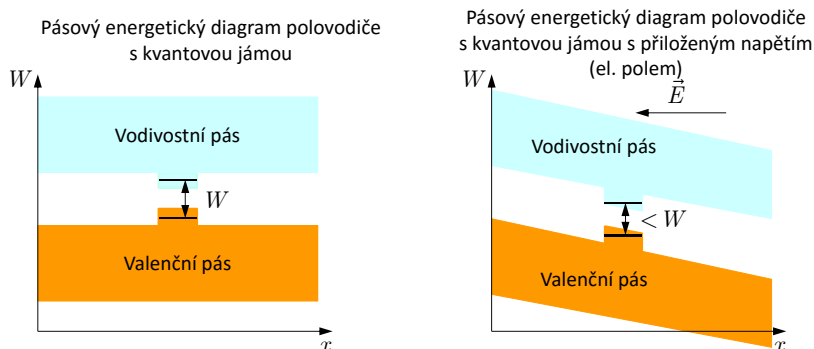
$\Downarrow$

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

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

UFE

Starkův jev v kvantově ohraničených strukturách (QCSE)



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

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

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

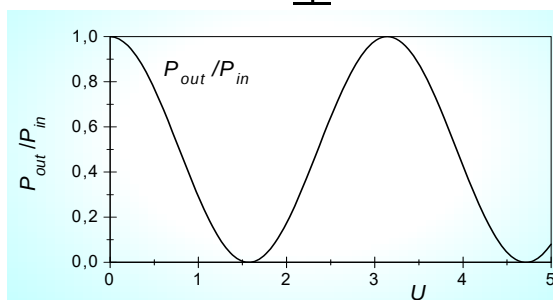
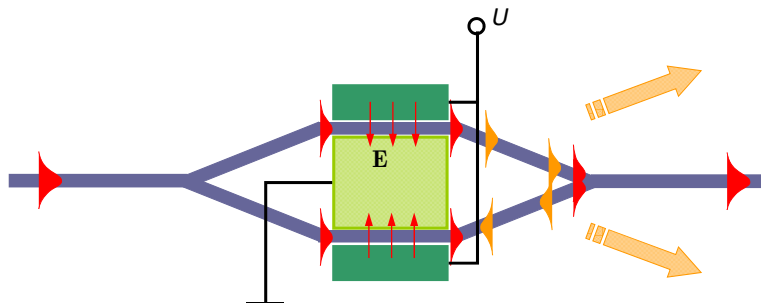
Kramersovy-Kronigovy relace $\Rightarrow$

Elektro**refrakční** Starkův jev (QCSE)

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

UFE

Machův-Zehnderův interferometrický modulátor



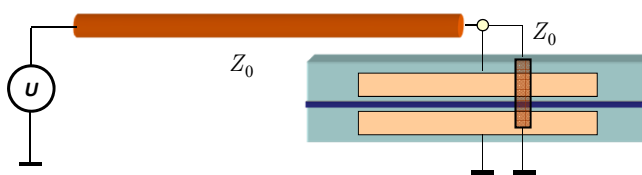
$$P_{out} = P_{in} \cos^2 \left(\frac{\pi U}{2 U_{\pi}} \right)$$

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

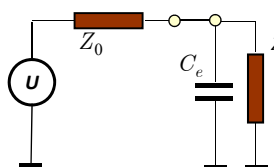
UFE

Modulační rychlost elektrooptických modulátorů I

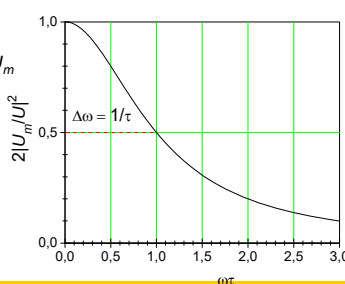
Standardní modulátor s elektrodami „se soustředěnými parametry“



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



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



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

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

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

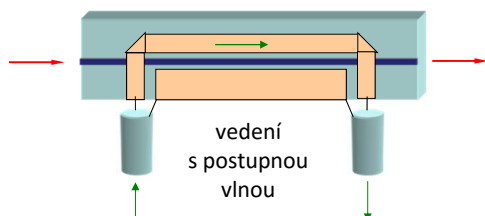
$$Z_0 = 50 \Omega,$$

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

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 **rozdíel 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

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

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

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

Optická vlna:

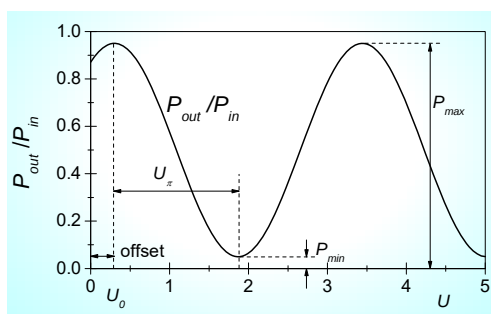
$$E_{\text{opt}} = E_0 \exp[j\omega(t - Nz/c)]$$

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

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.

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

Spínací poměr (extinkce, extinkční poměr)

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

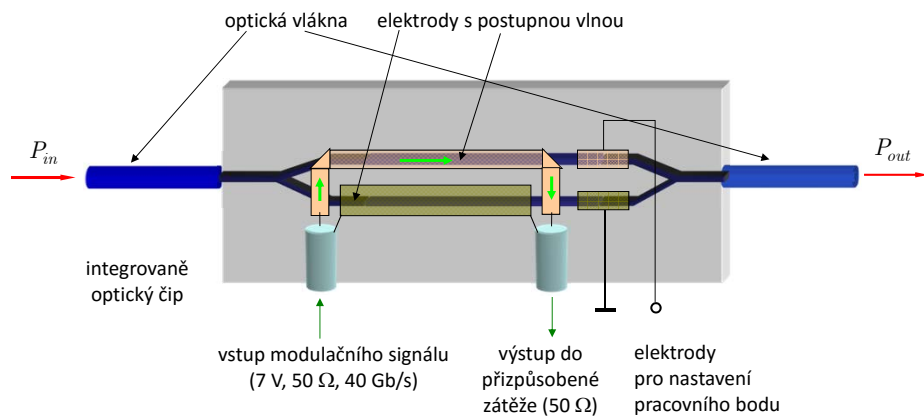
Vložný útlum

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

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

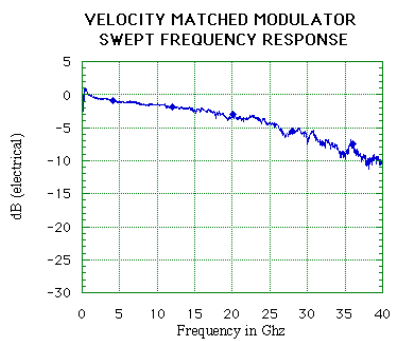
UFE

Elektroopticky řízený Machův-Zehnderův interferometrický modulátor s postupnou vlnou

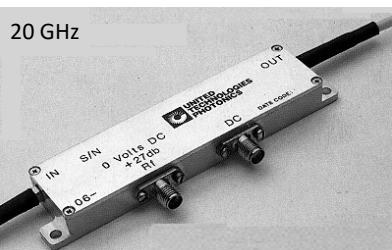
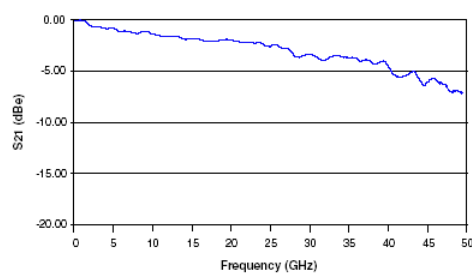


UFE

Komerční elektrooptické modulátory

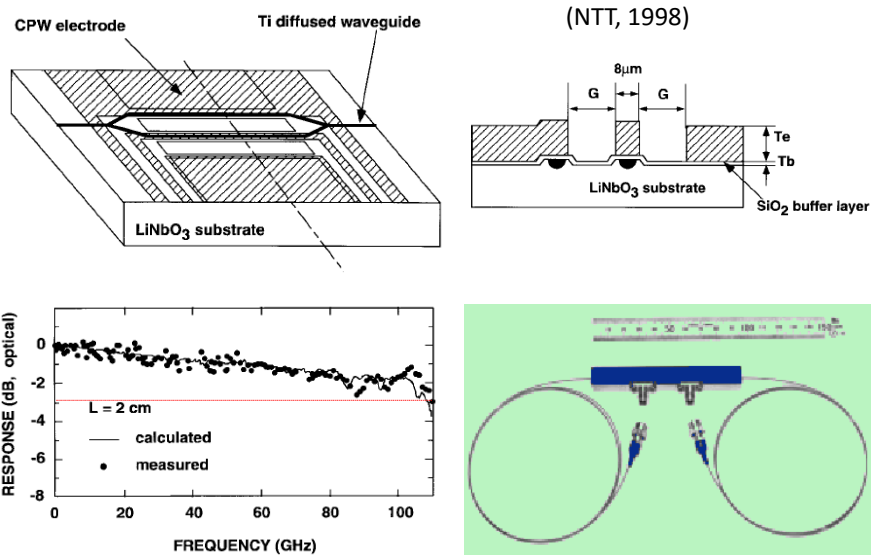


Frequency Response



UFE

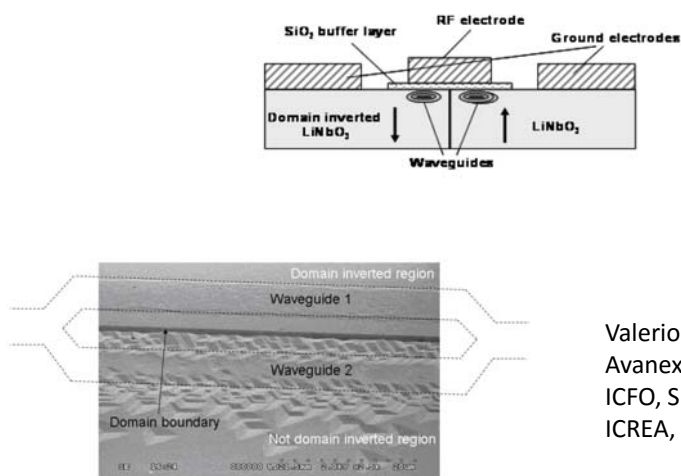
100 GHz LiNbO₃ modulátor s ovládacím napětím 5,1 V



UFE

Modulátor využívající inverzi domén v LiNbO₃

Zjednodušení elektrodové struktury:



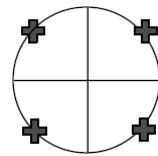
Valerio Pruneri et al.,
 Avanex Corporation, Italy
 ICFO, Spain
 ICREA, Spain, 2007

UFE

Modulátor pro kvadrurní fázovou modulaci (QPSK)

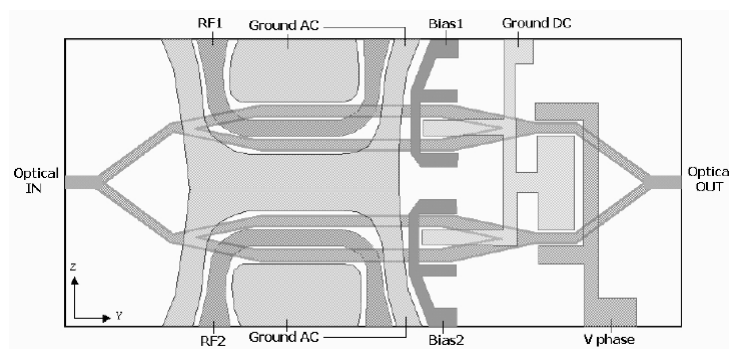
Imaginary axis

Modulační formát přenášející 2 bity/symbol



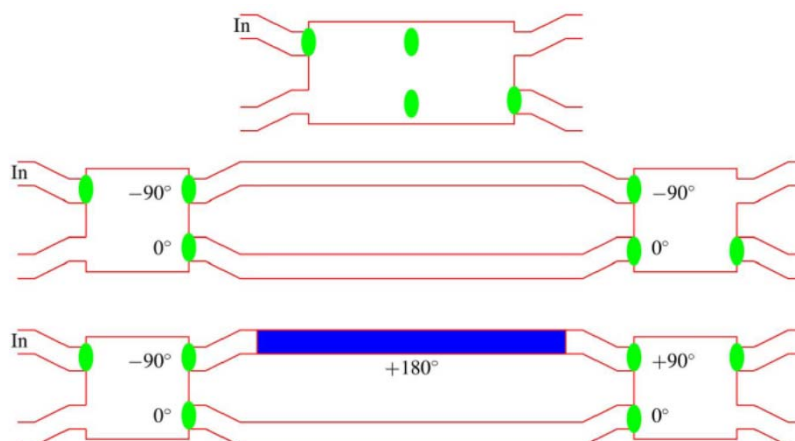
Real axis

Realizace v LiNbO_3



UFE

Machův-Zehnderův interferometrický přepínač/modulátor v polovodičovém materiálu (InP/InGaAsP), elektrorefraktivní modulace



 **COBRA** TU/e

UFE

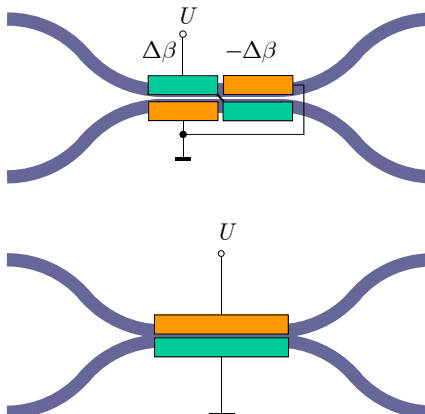
Elektrooptické vlnovodné přepínače

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

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

Přepínač s dvouvidovou
interferencí
„two-mode interference coupler“

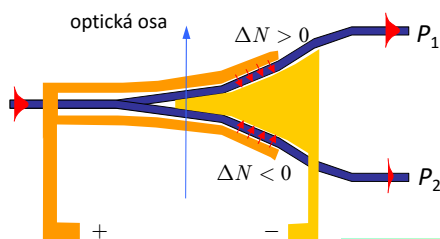
Nízké ovládací napětí,
sinusová spínací charakteristika



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 LiNbO₃

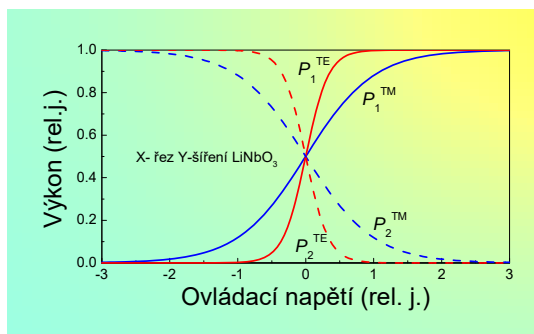


Symetrické rozvětvení
s elektroopticky indukovanou
asymetrií

Přepínací charakteristika

Vlastnosti přepínače DOS:

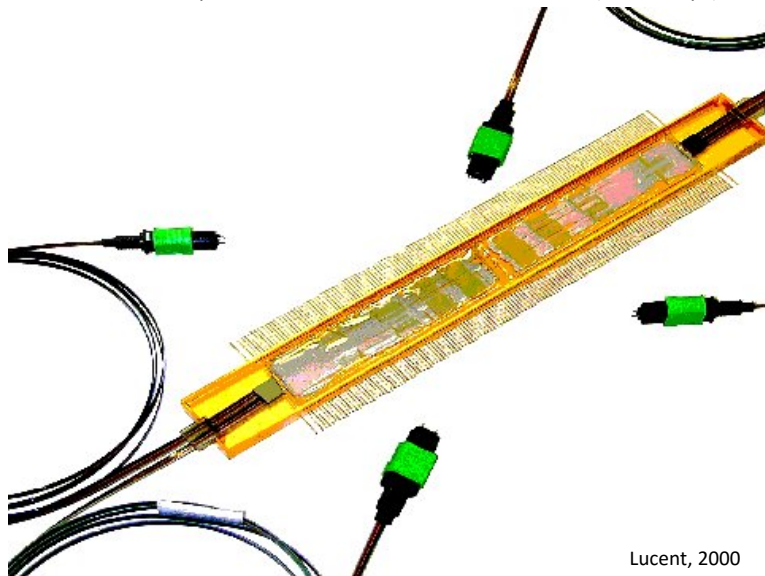
polarizační nezávislost,
velmi výhodný (skokovitý) tvar
přepínací charakteristiky;
velké ovládací napětí (± 60 V)



UFE

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

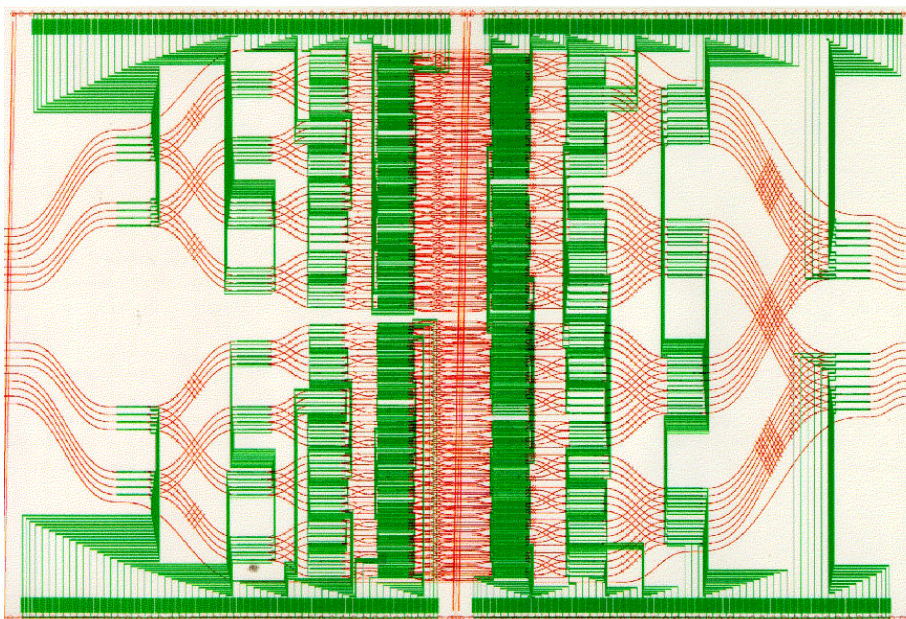
„Neblokující“ architektura, 480 DOS přepínačů. $U = \pm 45$ V, $IL < 15$ dB,
 $\tau \cong 5$ ns, kompenzace PMD křemennou $\lambda/2$ destičkou (PMD < 1 ps)



Lucent, 2000

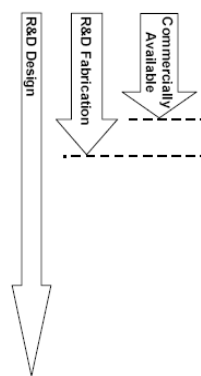
UFE

„Layout“ optických vlnovodů a elektrodové struktury přepínače



UFE

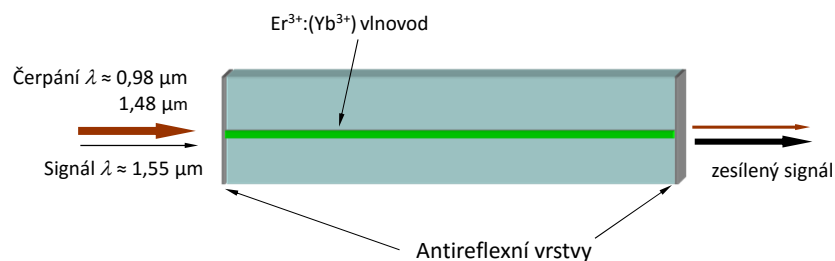
Počet přepínačů 1×2 („DOS“) potřebný pro realizaci
přepínací matice N×N s „neblokující architekturou“



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

UFE

Vlnovodné optické zesilovače a lasery (EDWA, EDWL)



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

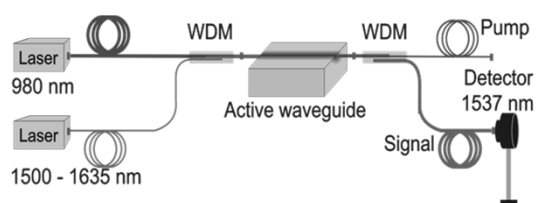
Výhody: malé rozměry, možnost současného zesilování signálů
na různých „nosných“ vlnových délkách
možnost integrace s pasivními součástkami na jednom čipu
("zero-dB splitter")

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

UFE

Vlnodný optický zesilovač dopovaný erbiem

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

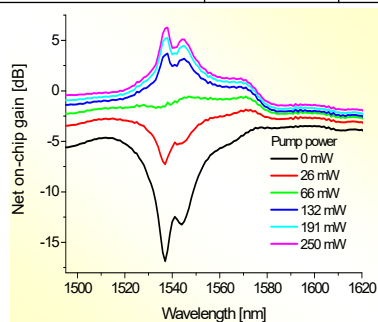


ÚFE

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

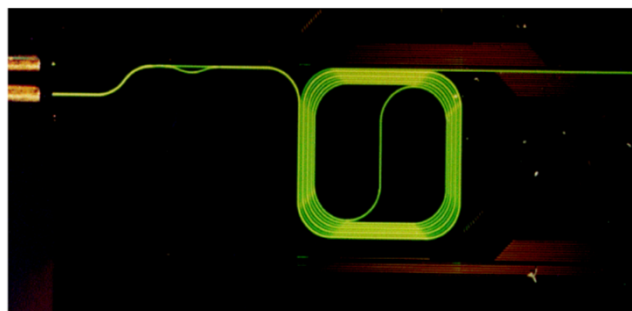


ÚFE

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

spirála $1 \times 1 \text{ mm}^2$

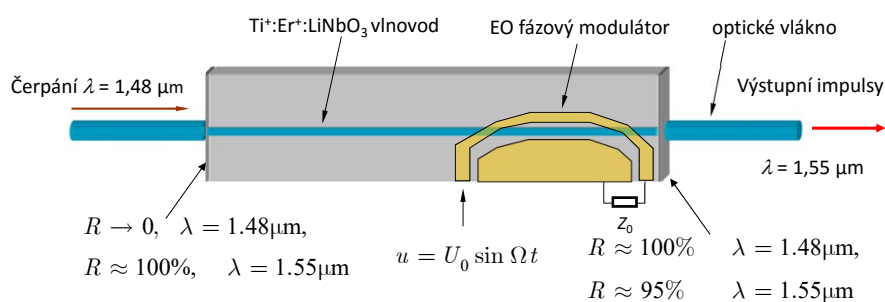
zisk 2,3 dB na $\lambda = 1,55 \text{ }\mu\text{m}$ při čerpání 10 mW na $1,48 \text{ }\mu\text{m}$



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

UFE

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



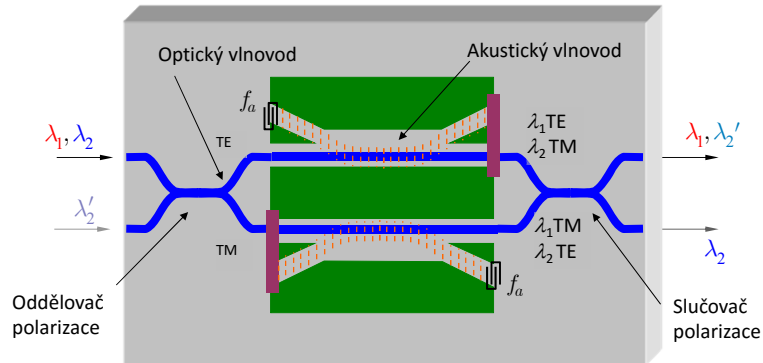
Ultrakrátké pulsy ($\leq 5 \text{ ps}$), opakovací frekvence $\approx 20 \text{ GHz}$

(Univerzita Paderborn, D, 1997-2000)

UFE

Polarizačně nezávislý akustooptický laditelný začleňovací/vydělovací demultiplexor v LiNbO₃

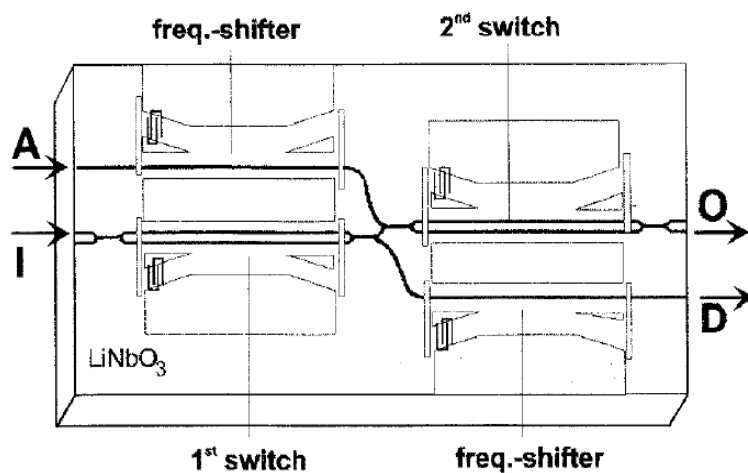
Princip: kolineární AO TE-TM konverze



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

UFE

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

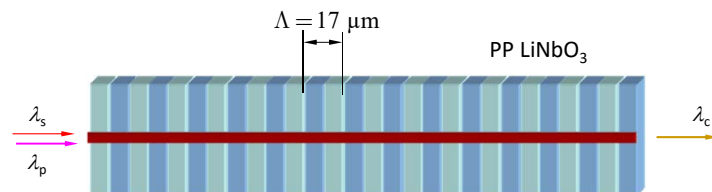


(Univerzita Paderborn 1997-2000)

UFE

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

Nelineární optický jev 2. řádu – generování rozdílové frekvence

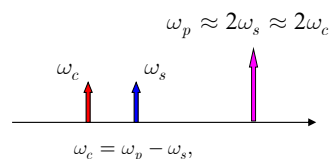


$$K = 2\pi / \Lambda; \quad k_c = k_p - k_s + K;$$

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

dvou- až třívlnový $\Rightarrow$ obtížná excitace základního vidu.

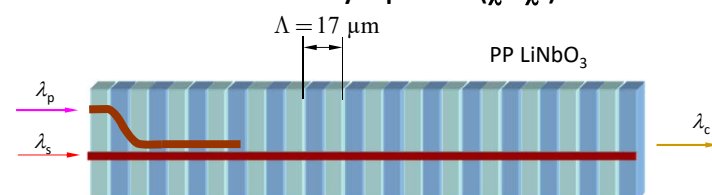
Řešení: kaskádní aplikace dvou procesů $\chi^{(2)}$



UFE

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

Kaskáda dvou nelineárních třívlnových procesů (χ^2 : χ^2) v PPLN



Princip

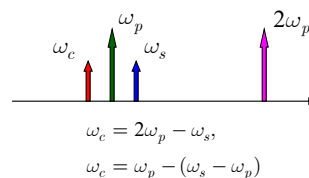
1. generování 2. harmonické
2. generování rozdílové frekvence

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

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

Aplikační možnosti

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



UFE

Konec části 3

UFE