

Integrovaná fotonika

1

POČÁTKY INTEGROVANÉ OPTIKY

THE BELL SYSTEM TECHNICAL JOURNAL

DEVOTED TO THE SCIENTIFIC AND ENGINEERING
ASPECTS OF ELECTRICAL COMMUNICATION

Volume 48

September 1969

Number 7

Copyright © 1969, American Telephone and Telegraph Company

Integrated Optics: An Introduction

By STEWART E. MILLER

(Manuscript received January 29, 1969)

This paper outlines a proposal for a miniature form of laser beam circuitry. Index of refraction changes of the order of 10^{-2} or 10^{-3} in a substrate such as glass allow guided laser beams of width near 10 microns. Photolithographic techniques may permit simultaneous construction of complex circuit patterns. This paper also indicates possible miniature forms for a laser, modulator, and hybrids. If realized, this new art would facilitate isolating the laser circuit assembly from thermal, mechanical, and acoustic ambient changes through small overall size; economy should ultimately result.

2

ZÁKLADNÍ SOUČÁSTKY

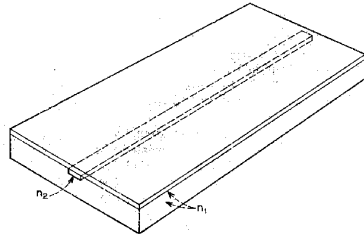


Fig. 2 — Planar waveguide formed using photolithographic techniques.

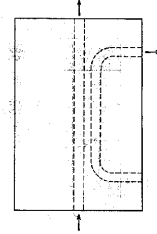


Fig. 6 — Directional coupler type hybrid.

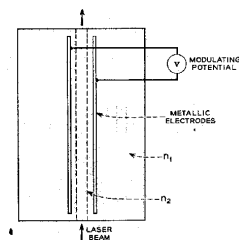


Fig. 5 — Phase modulator.

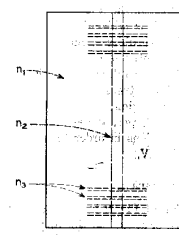


Fig. 3 — Resonator using planar waveguide.

3

Bends in Optical Dielectric Guides

By E. A. J. MARCATILI

(Manuscript received March 3, 1969)

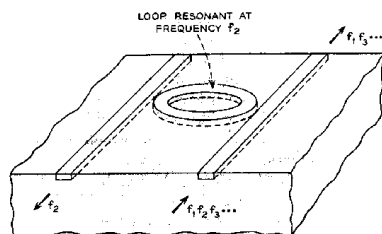


Fig. 1 — Channel dropping filter (ring type).

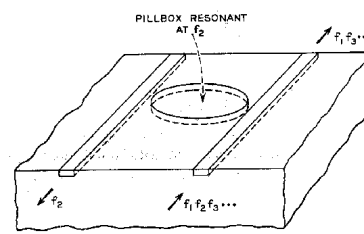


Fig. 12 — Channel dropping filter (pillbox type).

4

Základy technologie fotonických vlnovodných struktur

5

Některé významnější technologie

Ti:LiNbO₃, APE LiNbO₃ (annealed proton exchange)

Elektrooptické, akustooptické, aktivní (dotované Er³⁺),
nelineární optické prvky (kaskádní procesy χ^2 : χ^2)

Polovodiče III-V (InP/Ga_xIn_yAs_{1-x}P_{1-y}, GaAs/Al_xGa_{1-x}As)

MOCVD, MBE, CBE

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

Polymery

Termooptické (elektrooptické?) modulátory a přepínače

Silica on silicon (Si/SiO₂/SiO₂:Ge,P/ SiO₂)

chemické depozice, hydrolýza plamenem (IO „vlákno“)

Měrný útlum řádu 0.001 dB/cm

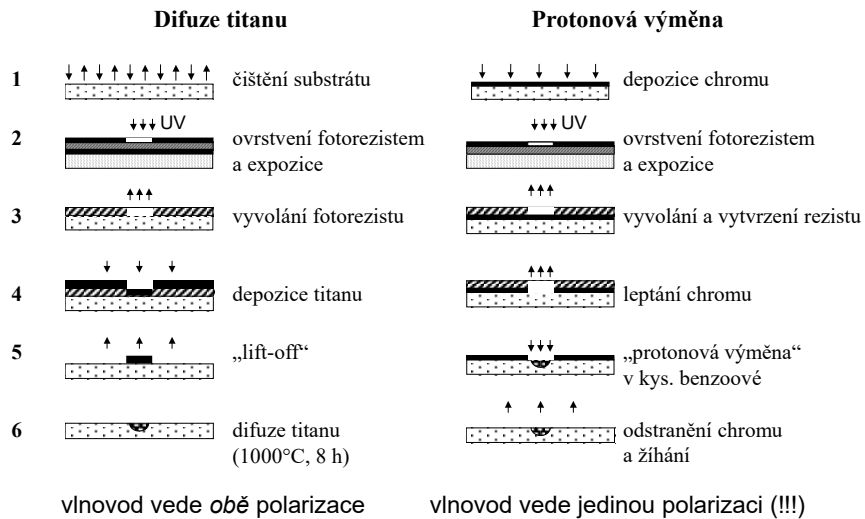
Pasivní součástky, termooptické, aktivní (dotované Er³⁺)

Silicon on Insulator (Si/SiO₂/Si)

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

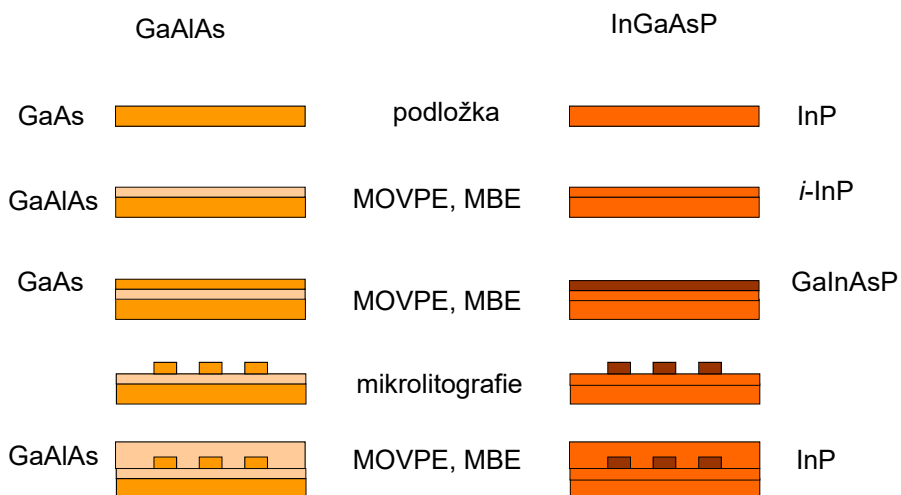
6

Příprava vlnodů v LiNbO_3



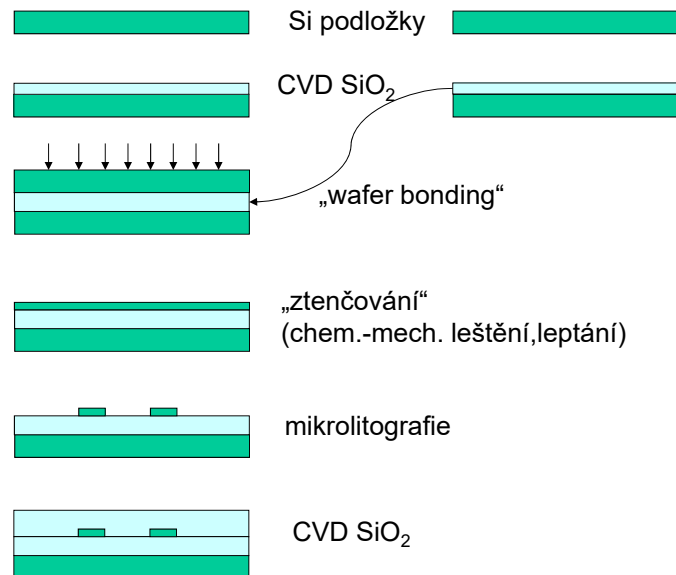
7

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



8

Příprava vlnodů SOI (silicon on insulator)



9

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. „Vývolání“ fotorezistu (odstranění exponovaných míst)
7. Iontové leptání chromové vrstvy

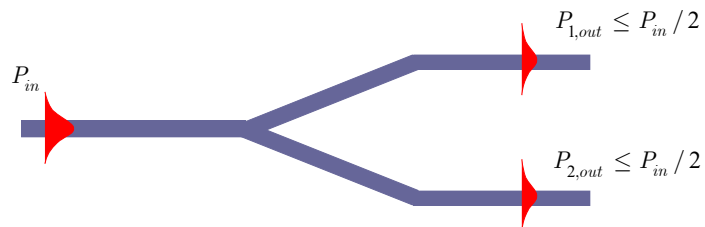
10

Základní typy fotonických vlnovodných struktur

11

Pasivní (jednovidové) vlnovodné struktury

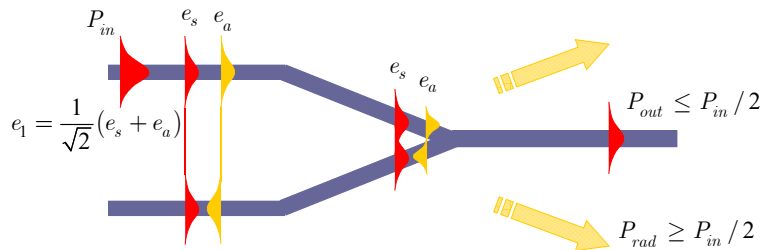
1. Symetrické jednovidové rozvětvení buzené do společné větve



Výkon se dělí rovnoměrně do obou výstupních větví z důvodů symetrie

12

Symetrické rozvětvení napájené do jedné z „výstupních“ větví



Dojde k vyzáření (ztrátám) **nejméně poloviny výkonu!**

13

Vzájemná vazba dvou identických vlnodů

Exaktní řešení: superpozice symetrického a antisymetrického vidu

$$E(x, y, z) = A_s e^{i\beta_s z} e_s(x, y) + A_a e^{i\beta_a z} e_a(x, y)$$

$$\approx A_1(z) e^{i\beta_1 z} e_1(x, y) + A_2(z) e^{i\beta_2 z} e_2(x, y)$$

Pro slabou vazbu

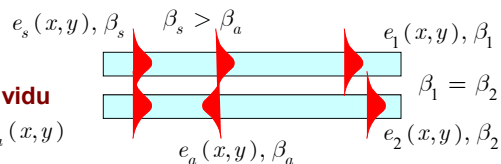
$$e_1(x, y) \approx \frac{1}{\sqrt{2}} [e_s(x, y) + e_a(x, y)],$$

$$e_2(x, y) \approx \frac{1}{\sqrt{2}} [e_s(x, y) - e_a(x, y)],$$

$$e_s(x, y) \approx \frac{1}{\sqrt{2}} [e_1(x, y) + e_2(x, y)],$$

$$e_a(x, y) \approx \frac{1}{\sqrt{2}} [e_1(x, y) - e_2(x, y)],$$

L_c – vazební délka, na níž se přelije 100% výkonu z vlnovodu 1 do 2



(dostatečně přesné, pokud je slabá vazba)

Získáme

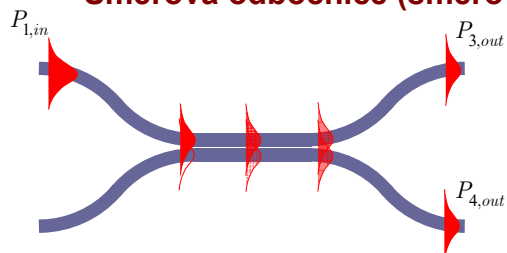
$$A_1(z) = A_1(0) e^{i\frac{\beta_s + \beta_a}{2} z} \cos \frac{\beta_s - \beta_a}{2} z,$$

$$A_2(z) = i A_1(0) e^{i\frac{\beta_s + \beta_a}{2} z} \sin \frac{\beta_s - \beta_a}{2} z,$$

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

14

Směrová odbočnice (směrový vazební člen)



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

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

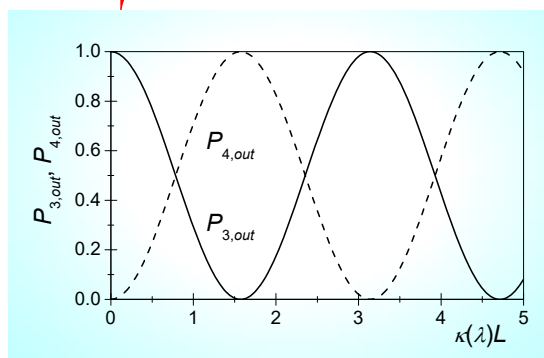
$$\kappa = \frac{\pi}{2L_c}.$$

Směrovost

$$D_{1,2} = 10 \log \frac{P_{1,in}}{P_{2,out}}$$

Přeslech

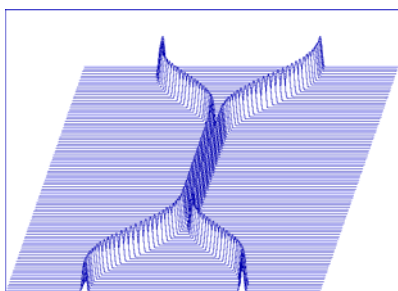
$$CT_{1,4} = 10 \log \frac{\text{Min}[P_{4,out}]}{P_{3,out} + P_{4,out}}$$



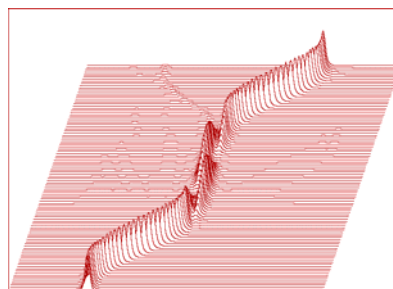
15

Metody „šíření optického svazku“ (BPM)

Metody pro výpočet rozložení pole optického záření
ve složitějších podélně nehomogenních vlnovodných strukturách



Složitější vlnovodná struktura
– rozložení indexu lomu

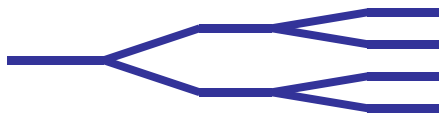


Rozložení optického záření

16

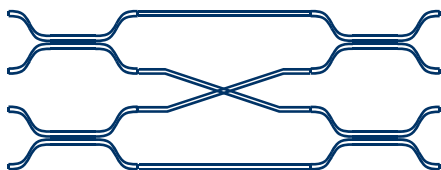
Děliče výkonu (vazební členy)

Dělič 1×4 s postupným dělením 1×2 s pomocí symetrických děličů Y



$IL \geq 6$ dB, $L_e \geq 0$ dB;
ve zpětném směru
velmi „ztrátové“,
 $L_e \geq 6$ dB

Dělič 4×4 využívající směrových vazebních členů



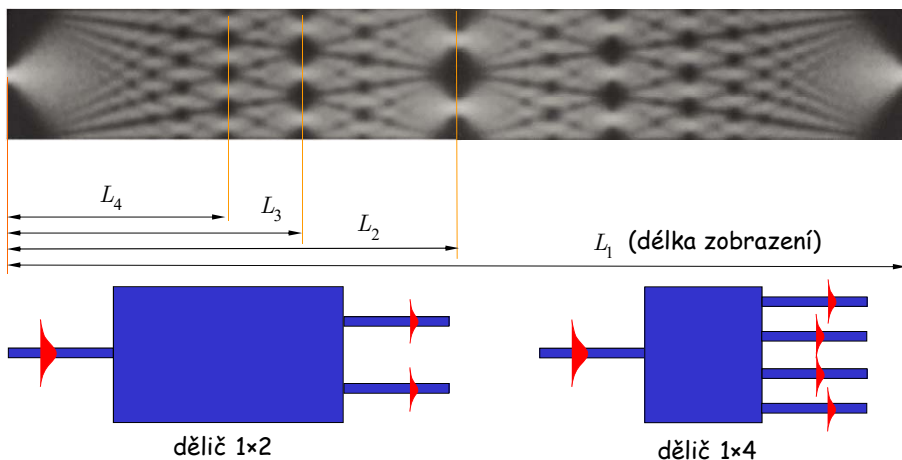
$IL \geq 6$ dB
v obou směrech,
 $L_e \approx 0$

17

Některé zajímavé vlnovodné součástky

Děliče s mnohovidovou interferencí

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

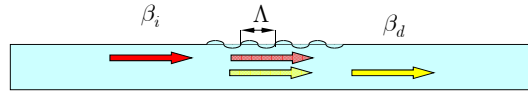


dělič 1×2

dělič 1×4

18

Konverze vidů na vlnovodné mřížce



$$K_{\mu\nu}^{pq}(z) = \sum_m K_{\mu\nu,m}^{pq} e^{imKz}, \quad K = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad \beta_d \approx \beta_i \pm mK$$

Pro $m = 1$

$$\frac{dA_i}{dz} = i\kappa^* e^{i\Delta\beta z} A_d(z), \quad \Delta\beta = \beta_d - \beta_i - K$$

$$\frac{dA_d}{dz} = i\kappa e^{-i\Delta\beta z} A_i(z), \quad \kappa = iK_{d,i,1}^{++}$$

Řešení s počáteční podmínkou $A_i(0) = A_{i0}$, $A_d(0) = 0$ je

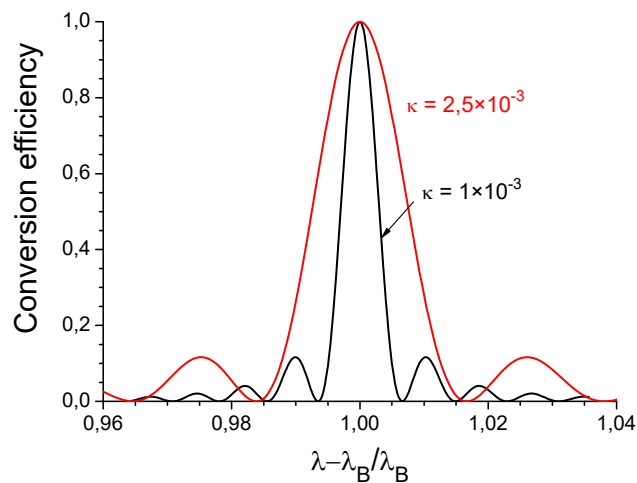
$$A_i(z) = A_{i0} e^{i\frac{\Delta\beta}{2}z} \left[\cos \delta z - i(\Delta\beta/2) \sin \delta z \right], \quad \delta = \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + |\kappa|^2}$$

$$A_d(z) = iA_{i0} \frac{\kappa}{\delta} e^{-i\frac{\Delta\beta}{2}z} \sin \delta z; \quad |A_d(z)|^2 = |A_{i0}|^2 \left| \frac{\kappa}{\delta} \right|^2 \sin^2 \delta z.$$

Pro $\Delta\beta = 0$ $|A_d(z)|^2 = |A_{i0}|^2 \sin^2 |\kappa|z$ Účinnost může být teoreticky 100%

20

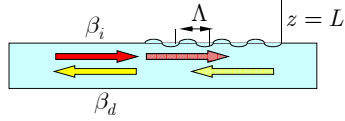
Spektrální závislost konverze vidů na mřížce



Míčka s malým činitelem vazby může mít úzkou spektrální křivku konverzní účinnosti

21

Zpětný (braggovský) odraz na mřížce



$$\beta_d \approx \beta_i \pm mK; \quad \beta_d \approx \beta_i - K \approx -\beta_i$$

$$K \approx 2\beta_i$$

$$\frac{dA_i}{dz} = i\kappa^* e^{-i\Delta\beta z} B_d(z), \quad \Delta\beta = \beta_d + \beta_i - K \quad \text{Řešení s okrajovými podmínkami}$$

$$\frac{dB_d}{dz} = -i\kappa e^{i\Delta\beta z} A_i(z), \quad \kappa = iK_{d,i,1}^{++} \quad A_i(0) = A_{i0}, \quad B_d(L) = 0 \quad \text{je}$$

$$A_i(z) = \delta A_{i,0} [\delta \cosh \delta z - i(\Delta\beta/2) \sinh \delta z], \quad \delta = \sqrt{|\kappa|^2 - (\Delta\beta/2)^2}$$

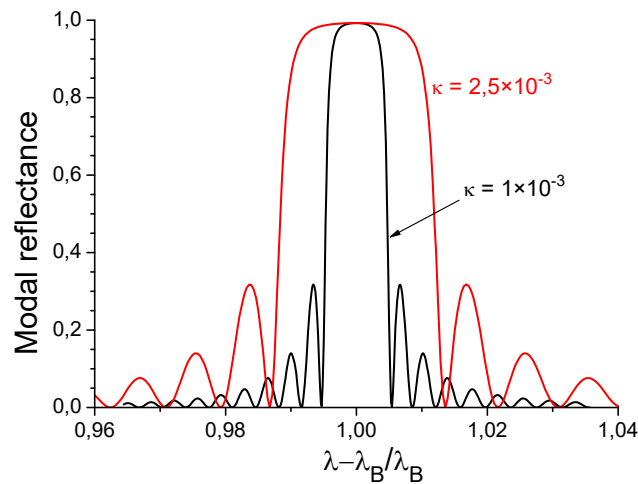
$$B_d(z) = i\kappa^* A_{i,0} e^{-i\frac{\Delta\beta}{2}z} \delta \sinh \delta z$$

Pro $\Delta\beta = 0$

$$|R|^2 = \left| \frac{B_d(L)}{A_{i0}} \right|^2 = \left| \frac{\kappa \sinh \delta L}{\delta \cosh \delta L - i(\Delta\beta/2) \sinh \delta L} \right|^2 \quad |R|^2 = \tanh^2 |\kappa|L$$

22

Spektrální závislost účinnosti zpětného odrazu

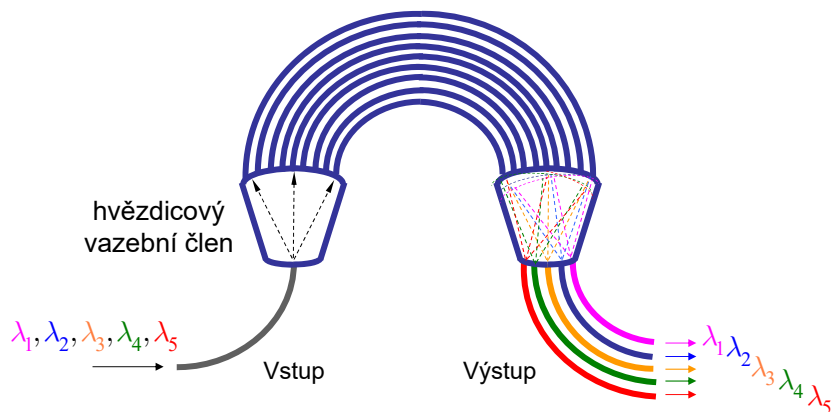


Úzká spektrální křivka konverzní účinnosti vyžaduje malý činitel vazby

23

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

Fázovaná řada (několika desítek) vlnodů



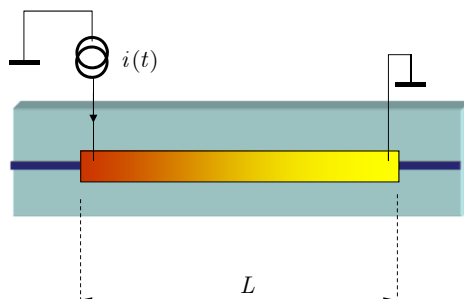
M. K. Smit, 1987; dnes asi nejpůlárnějši součástka

24

**Některé fyzikální principy
využívané
ve fotonických vlnodných prvcích**

25

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 μ s!

26

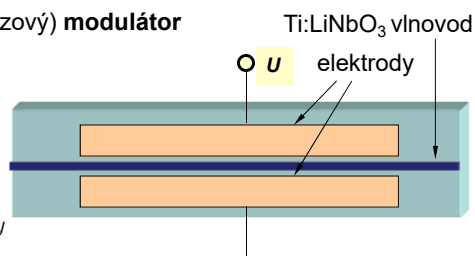
Elektrooptický jev

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**

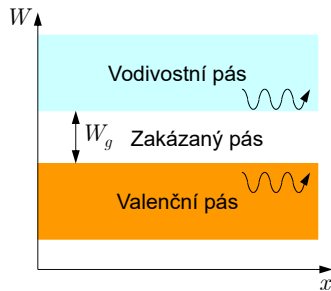


$$\begin{aligned} \Delta\beta &\approx \frac{k_0}{2} \iint_S \mathbf{e}(x, y) \cdot \Delta\epsilon \cdot \mathbf{e}^*(x, y) dx dy \\ &= -\frac{k_0}{2} \iint_S \mathbf{e}(x, y) \cdot \epsilon \cdot [\tilde{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{E}_v(x, y)] \cdot \epsilon \cdot \mathbf{e}^*(x, y) dx dy \end{aligned}$$

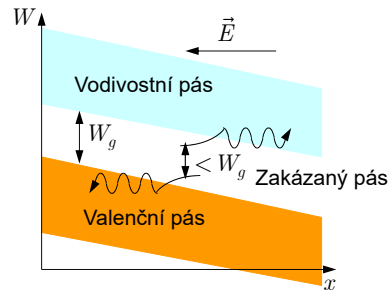
27

Elektroabsorpce a elektrorefrakce v polovodičích

Pásový energetický diagram polovodiče



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



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

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

Elektroabsorpční jev \Rightarrow

Kramersovy-Kronigovy relace \Rightarrow

Elektrorefrakční jev

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

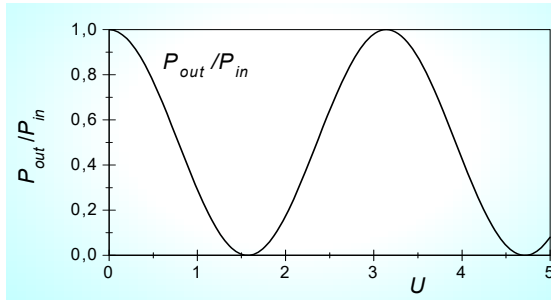
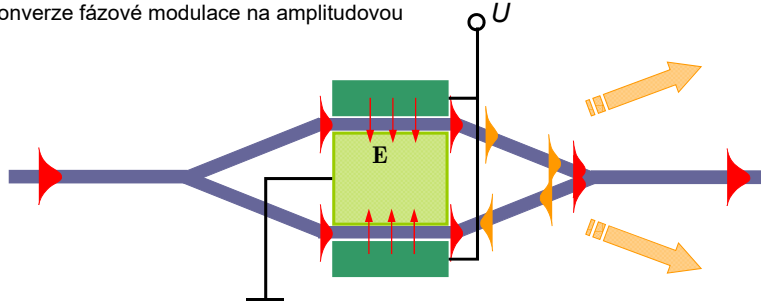
28

Rychlé elektrooptické vlnovodné modulátory

29

Machův-Zehnderův interferometrický modulátor

Konverze fázové modulace na amplitudovou



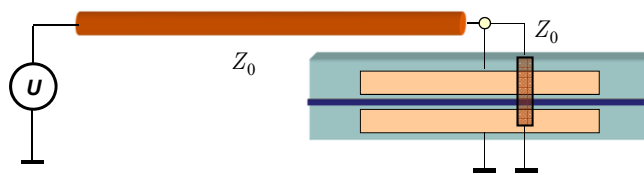
$$P_{out} = P_{in} \cos^2\left(\frac{\pi U}{2U_{\pi}}\right)$$

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

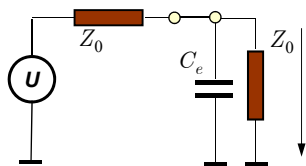
30

Modulační rychlost elektrooptických modulátorů I

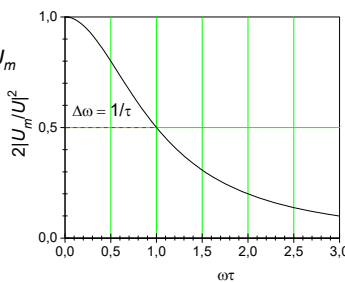
Standardní modulátor s elektrodami „se soustředěnými parametry“



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



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



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

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

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

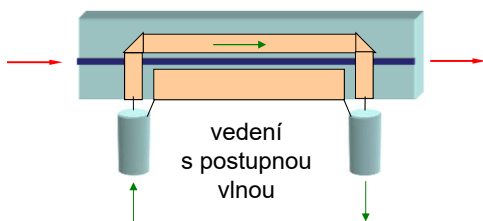
$$Z_0 = 50 \Omega,$$

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

31

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 :

Optická vlna:

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

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

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

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

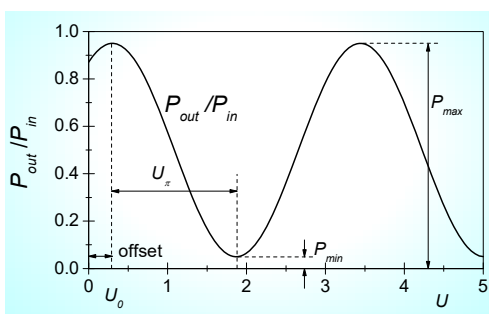
Pro $N_\mu \approx 4.2$, $N \approx 2.2$

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

32

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

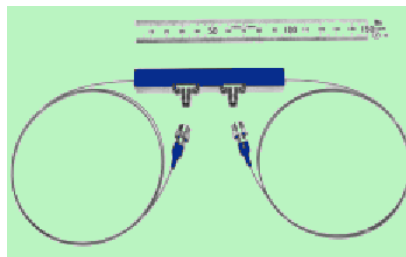
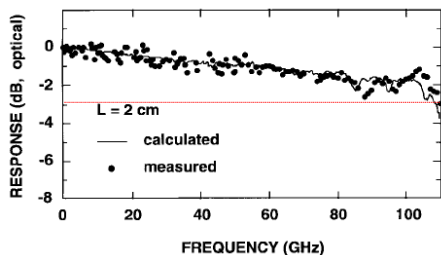
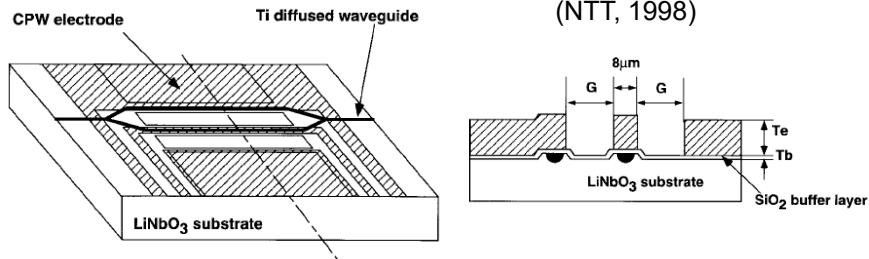
$$IL = 10 \log \frac{P_{\text{in, fibre}}}{P_{\text{max, fibre}}}$$

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

33

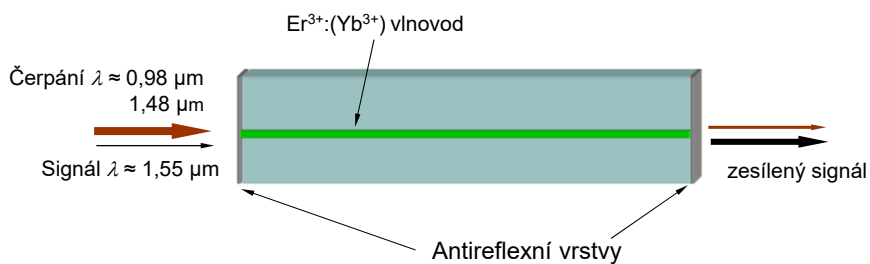
100 GHz LiNbO₃ modulátor s ovládacím napětím 5,1 V

(NTT, 1998)



36

Vlnodné 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")

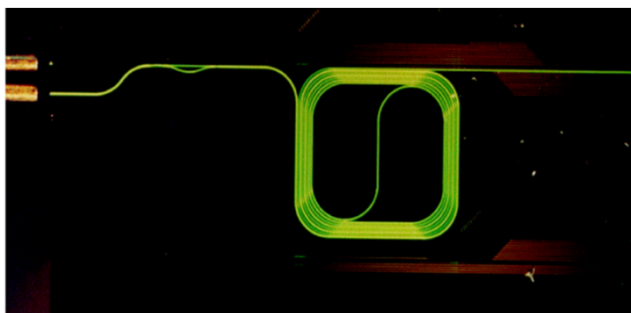
Nevýhody: malá délka -> vysoká koncentrace dopantů, **malé zesílení**

37

Vlnodný zesilovač $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Er}^{3+}$ na Si/SiO₂ podložce

spirála 1×1 mm²

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



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

38

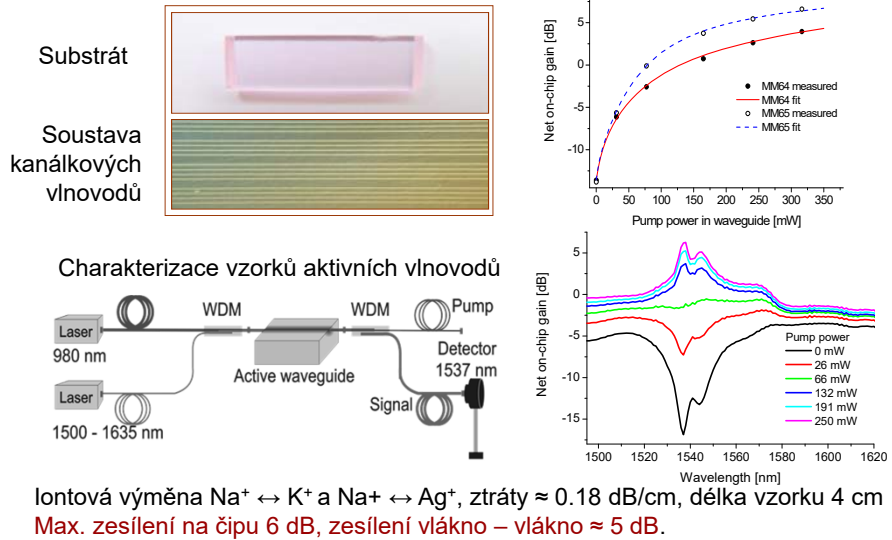
A to už je úplný

KONEC INTEGROVANÉ FOTONIKY

39

VLNOVODNÝ ZESILOVAČ VE VLNOVODU ZE SPECIÁLNÍHO SKLA DOPOVANÉHO Er^{3+} A Yb^{3+}

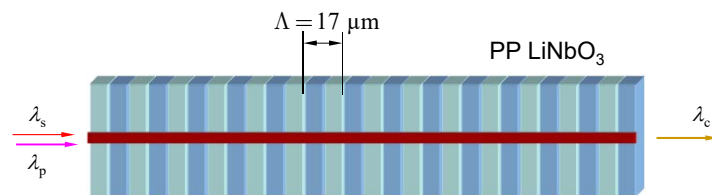
VŠCHT A ÚFE AV ČR, 2007



40

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

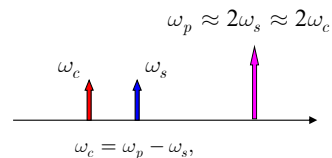
Nelineární optický jev 2. řádu – generování rozdílové frekvence



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

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

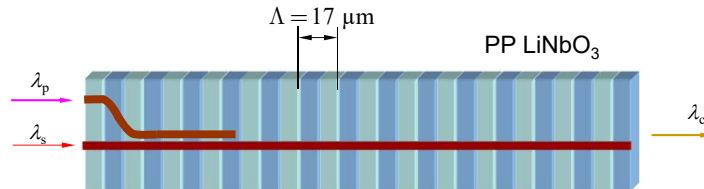
Řešení: kaskádní aplikace dvou procesů $\chi^{(2)}$



41

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

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

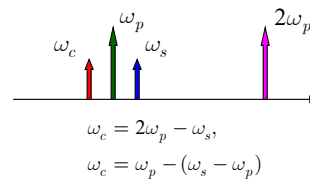


Princip

1. generování 2. harmonické
2. generování rozdílové frekvence

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

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



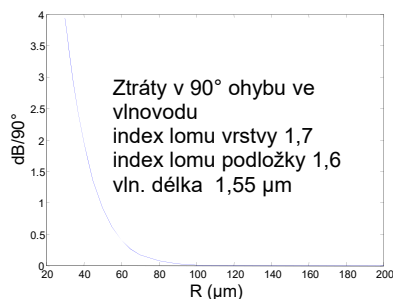
Aplikační možnosti

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

42

Vlnovody s velkým kontrastem: SOI

„Klasické“ vlnovodné struktury s malým kontrastem indexu lomu ($\Delta n \leq 0,01$) vyžadují velké poloměry zakřivení ($R \approx 20 \text{ mm}$) → velké rozměry prvků, malá hustota integrace.



Struktury s „velkým“ kontrastem indexu lomu ($\Delta n \geq 0,1 \div 10$).

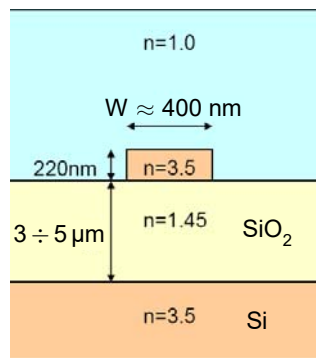
1. **Struktury na bázi mikrorezonátorů**
2. **Vlnovodné struktury ve fotonických krystalech**
3. **„Plazmonika“**

Struktury s vysokým kontrastem indexu lomu umožňují lokalizaci optického záření v menší prostorové oblasti a tím i **vyšší hustotu integrace** na čipu

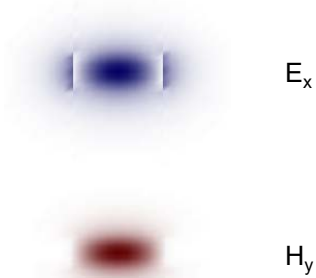
43

„Fotonický drát“

(vlnovod s velkým kontrastem indexu lomu)



Rozložení elektromagnetického pole základního vidu TE_{00}



44

Vazba do „nanofotonických“ vlnovodů

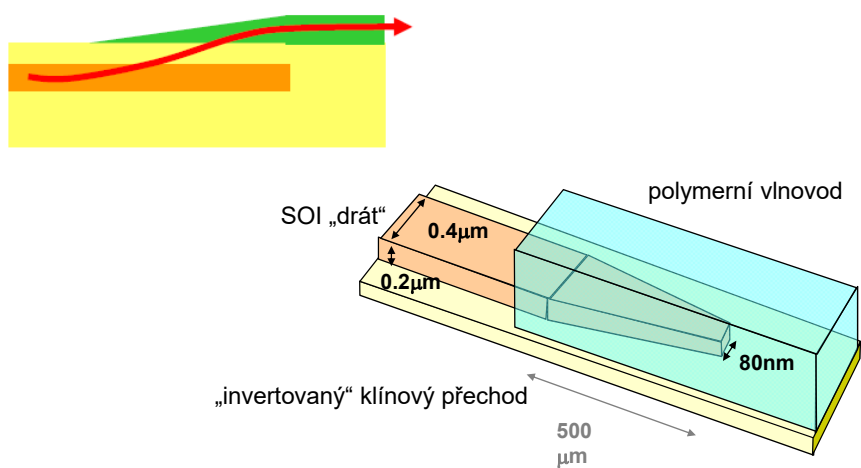


• Problémy:

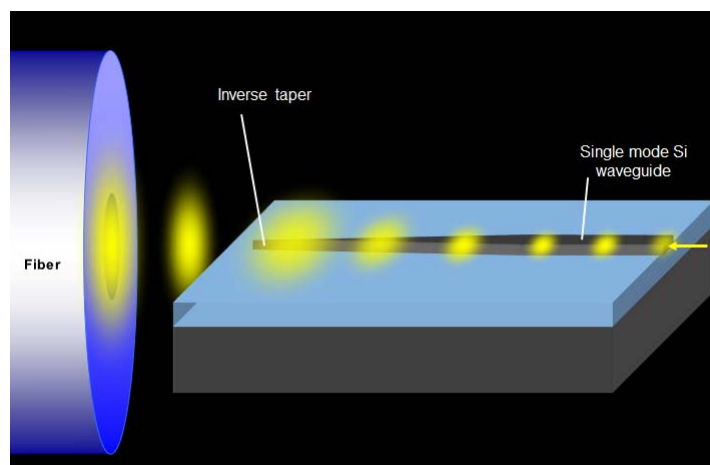
- Účinná vazba mezi submikrometrovým vlnovodem a vláknem
- Je nutný konvertor velikosti vidového pole:
 - v horizontální rovině
 - ve vertikální rovině (obtížnější)
- Polarizační problém

45

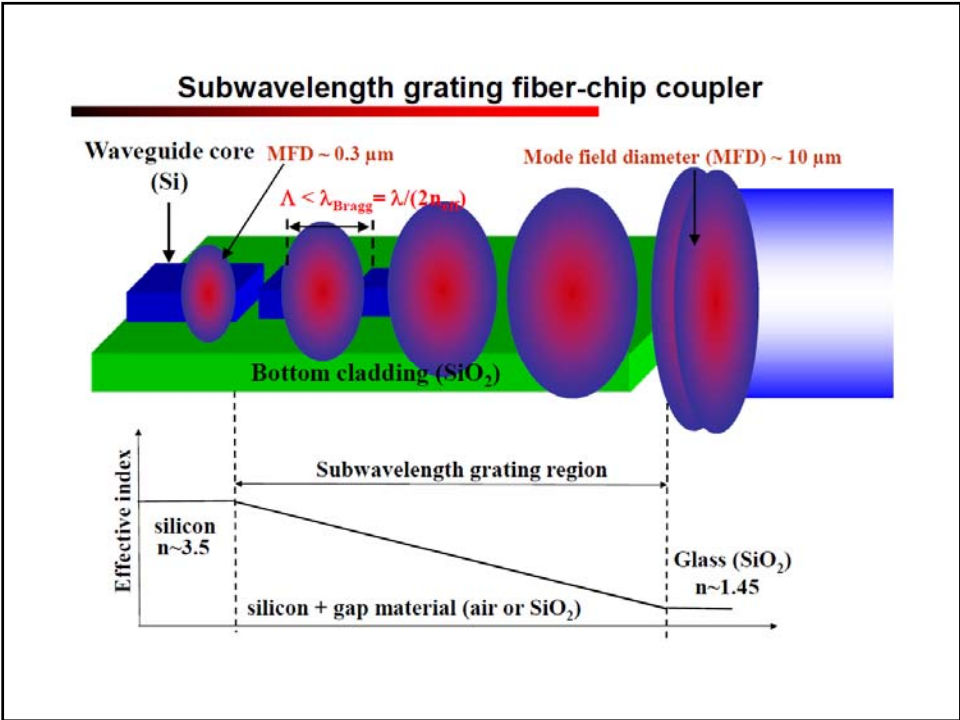
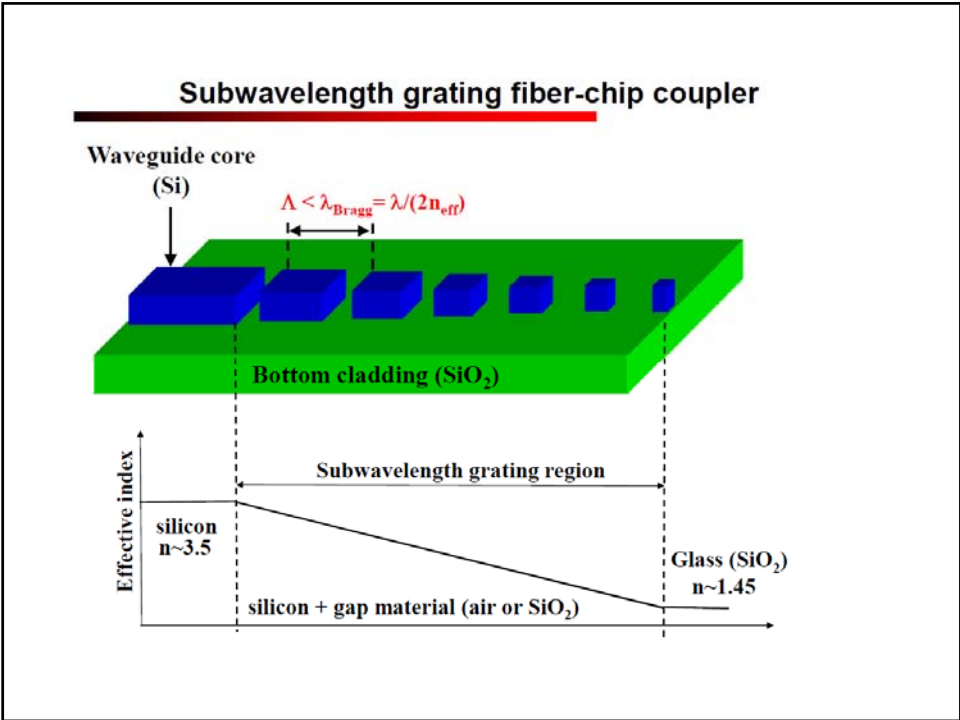
„Adiabatický přechod“ mezi vlnovody velmi různých profilů / kontrastů



46



47



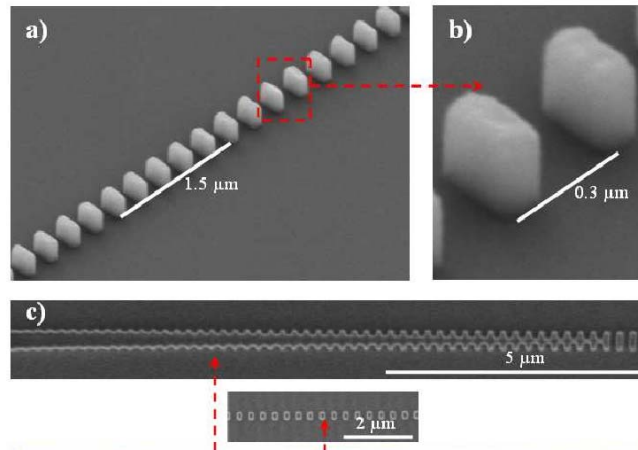
Subwavelength grating periodic structures in silicon-on-insulator: a new type of microphotonic waveguide

Przemek J. Bock,^{1,2,*} Pavel Cheben,¹ Jens H. Schmid,¹ Jean Lapointe,¹ André Delâge,¹ Siegfried Janz,¹ Geof C. Aers,¹ Dan-Xia Xu,¹ Adam Densmore,¹ and Trevor J. Hall²

¹Institute for Microstructural Sciences, National Research Council Canada, Ottawa, Canada

²Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, Ottawa, Canada

*przemek.bock@nrc.ca



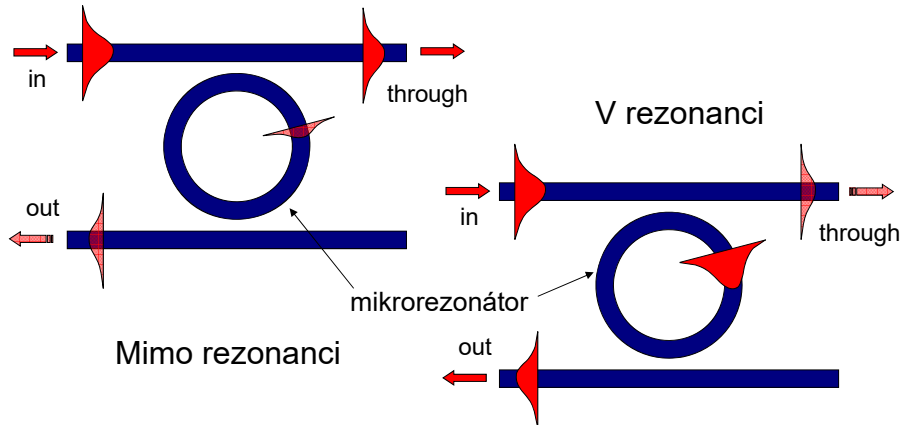
50

Mikrorezonátory

113

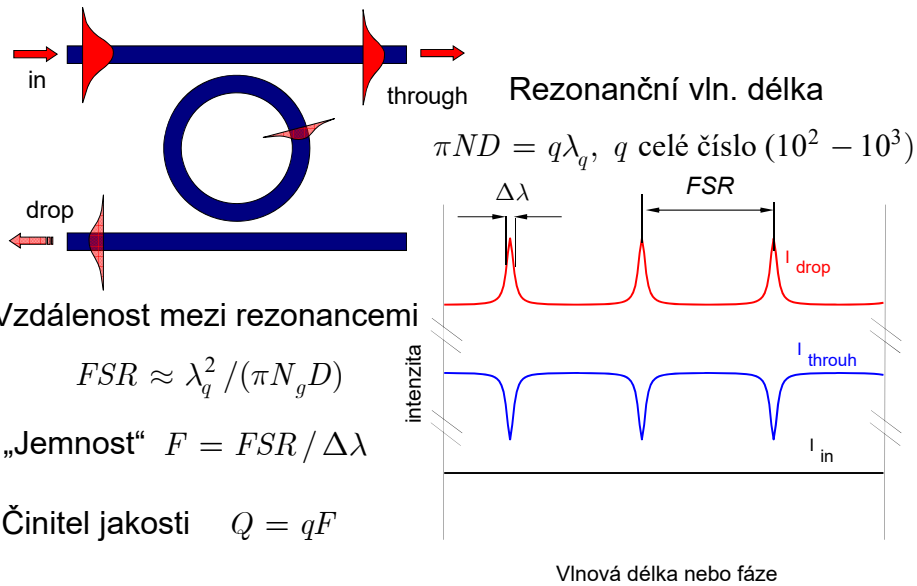
Vlnodné struktury s mikrorezonátory

(≥ 1990 , B. E. Little *et al.*, MIT, Cambridge, USA)



114

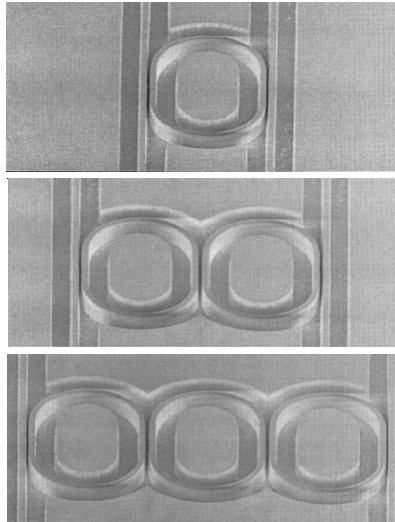
Spektrální vlastnosti mikrorezonátoru



115

Technologické aspekty

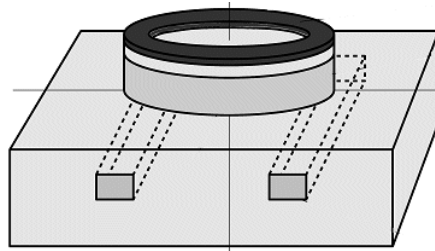
Laterální vazba mezi mikrorezonátorem a vlnovodem je velmi kritická:



MIT, Cambridge, 2000

$\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ -GaAs systém
šířka vlnovodů 0,42–0,62 μm
šířka štěrbin 0,18–0,32 μm
hloubka leptání 2 μm

Alternativa: **vertikální vazba**



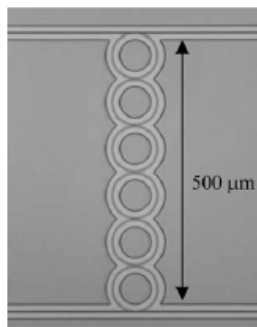
117

Vlnovodné filtry na bázi mikrorezonátorů

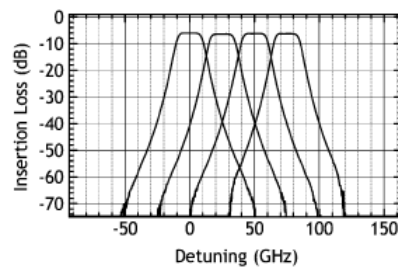
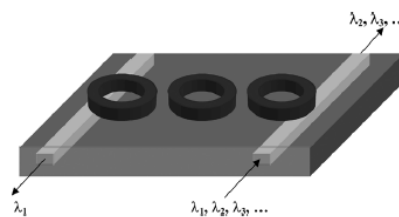
Příklad 1: Termoopticky laděný **filtr vyšších řádů**

Filtry 1. až 11. řádu, \varnothing 72 μm
 $\text{SiO}_2/\text{Hydex}$ ($n_s = 1,45$, $n_g = 1,7$), $\varnothing \approx 50 \mu$
ztráty na čipu $1 \div 1,5 \text{ dB}$

(Little Optics, Inc., PTL, Sept. 2004)



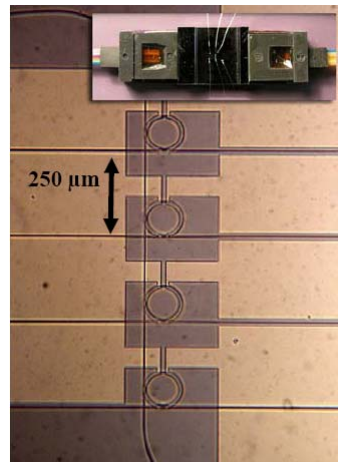
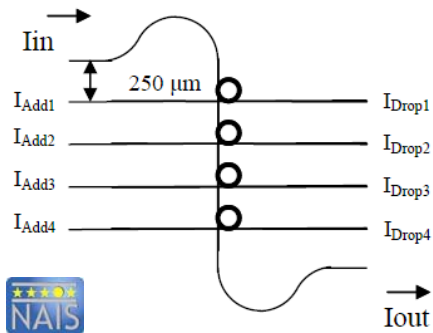
Termoopticky
laděné
spektrální
charakteristiky
filtru 5. řádu,
 $\Delta f = 25 \text{ GHz}$



118

Rekonfigurovatelný demultiplexor s termoopticky laděnými mikrorezonátory

(Realizace: University of Twente, NL,
systémové testy: Nortel, UK)

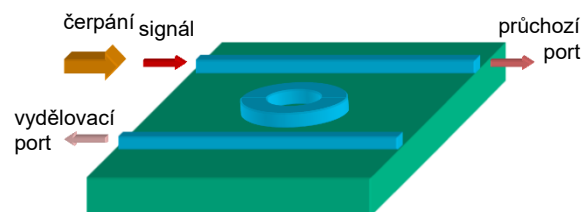


119

SPÍNÁNÍ S POMOCÍ NELINEÁRNÍHO OPTICKÉHO JEVU V OPTICKÉM MIKROREZONÁTORU

Silná čerpací vlna mění index lomu rezonátoru a tím ho rozladuje;

Signálová vlna postupuje do průchozího portu, je-li mimo rezonanci,
a do vydělovacího portu, je-li v rezonanci.



121

Optické přepínání s pomocí křížové fázové modulace

