

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

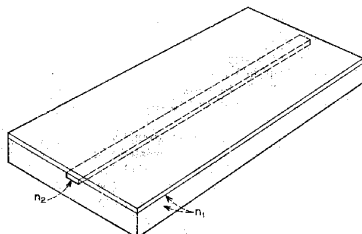


Fig. 2 — Planar waveguide formed using photolithographic techniques.

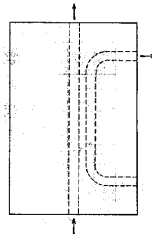


Fig. 6 — Directional coupler type hybrid.

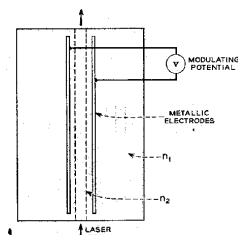


Fig. 5 — Phase modulator.

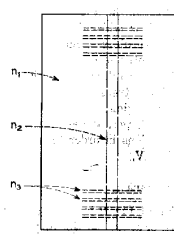


Fig. 3 — Resonator using planar waveguide.

3

Bends in Optical Dielectric Guides

By E. A. J. MARCATILI

(Manuscript received March 3, 1969)

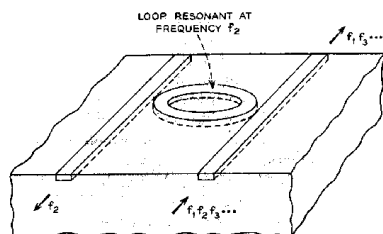


Fig. 1 — Channel dropping filter (ring type).

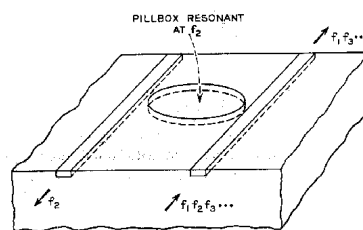


Fig. 12 — Channel dropping filter (pillbox type).

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

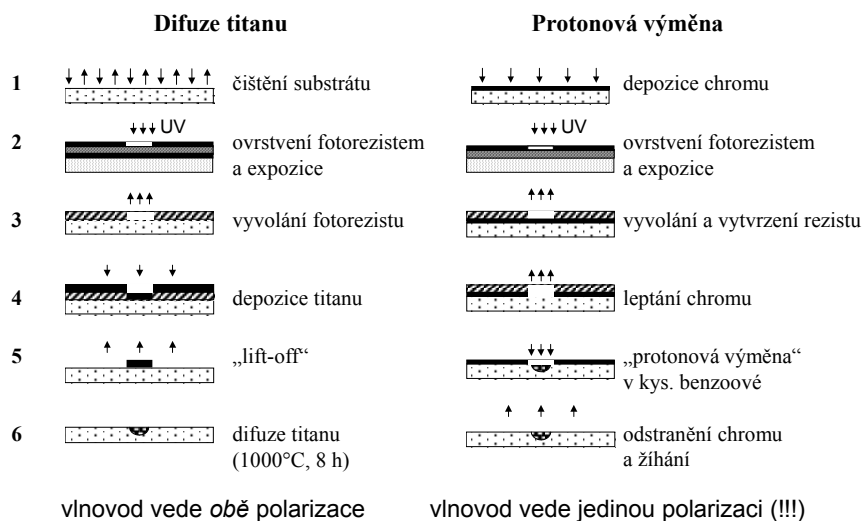
Pasivní součástky, termooptické, **aktivní** (dotované Er³⁺)

Silicon on Insulator (Si/SiO₂/Si)

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

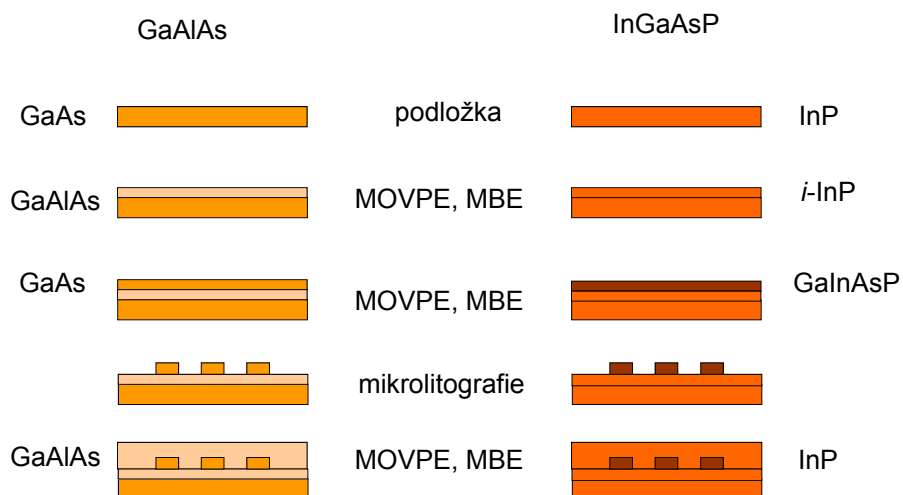
6

Příprava vlnodů v LiNbO_3



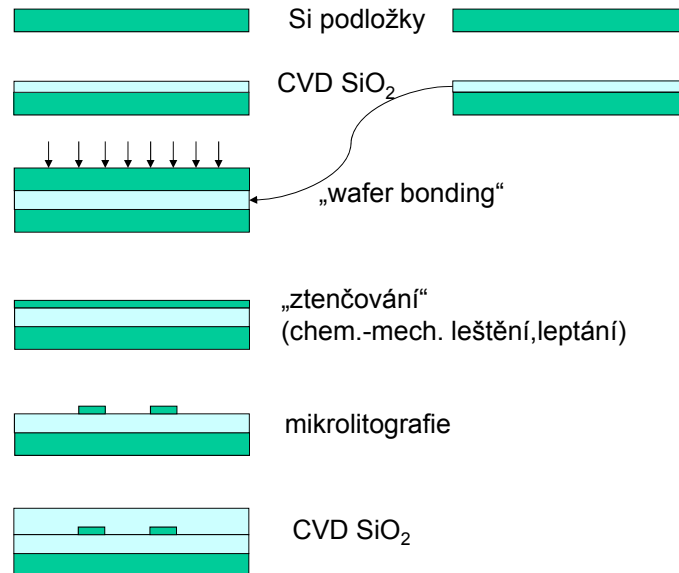
7

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



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

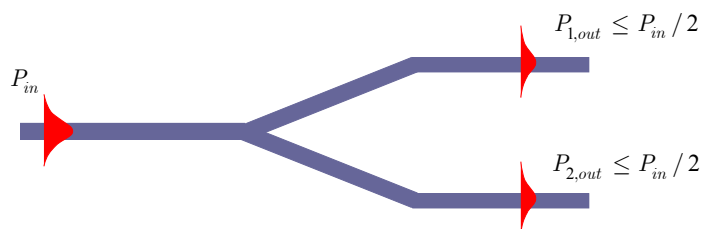
10

Základní typy fotonických vlnovodných struktur

11

Pasivní (jednovidové) vlnovodné struktury

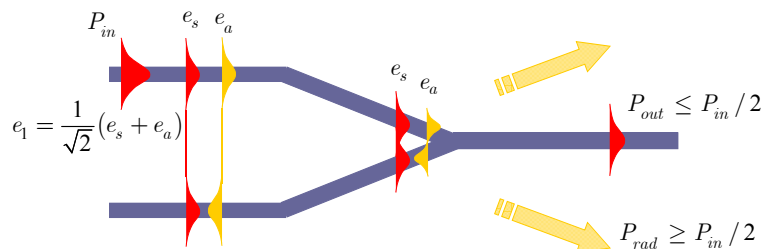
1. Symetrické jednovidové rozvětvení buzené do společné větve



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 vlnovodů

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

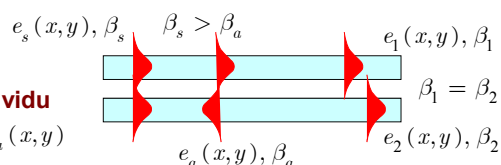
$$e_1(x, y) \approx \frac{1}{\sqrt{2}}[e_s(x, y) + e_a(x, y)],$$

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

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

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

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



(dostatečně přesné, pokud je slabá vazba)

Získáme

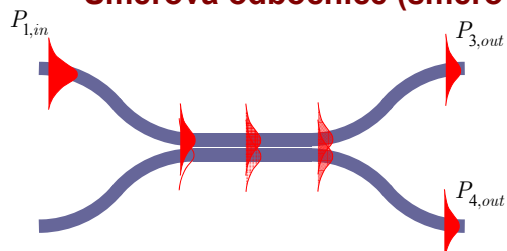
$$A_1(z) = A_1(0) e^{i \frac{\beta_s + \beta_a}{2} z} \cos \frac{\beta_s - \beta_a}{2} z,$$

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

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

14

Směrová odbočnice (směrový vazební člen)



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

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

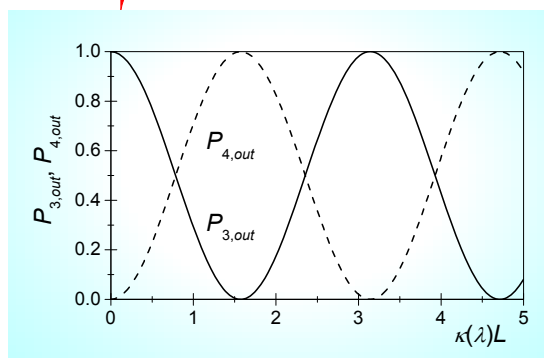
$$\kappa = \frac{\pi}{2L_c}.$$

Směrovost

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

Přeslech

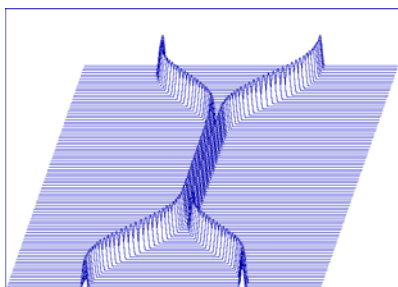
$$CT_{1,4} = 10 \log \frac{\text{Min}[P_{4,out}]}{P_{3,out} + P_{4,out}}$$



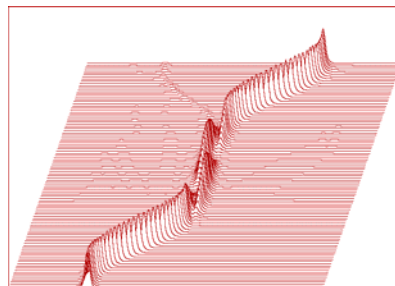
15

Metody „šíření optického svazku“ (BPM)

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



Složitější vlnovodná struktura
– rozložení indexu lomu

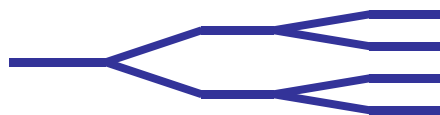


Rozložení optického záření

16

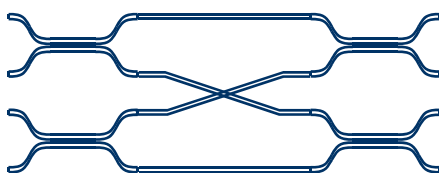
Děliče výkonu (vazební členy)

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



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

Dělič 4×4 využívající směrových vazebních členů



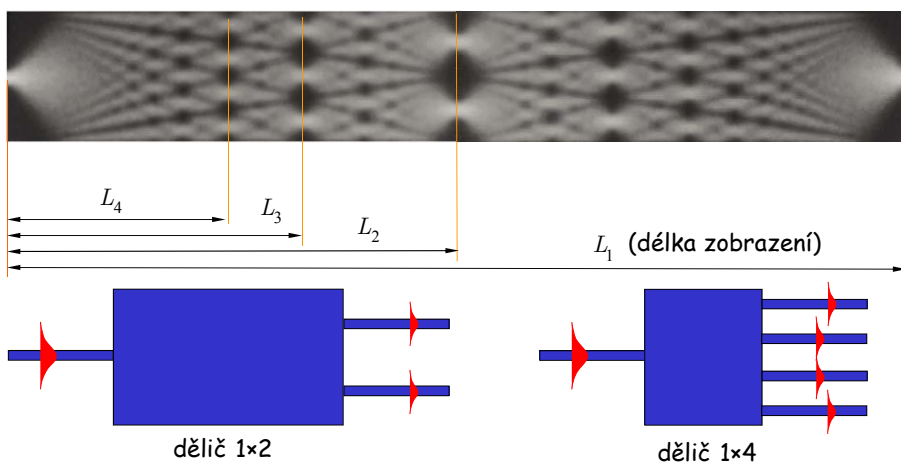
$IL \geq 6 \text{ dB}$
v obou směrech,
 $L_e \simeq 0$

17

Některé zajímavé vlnovodné součástky

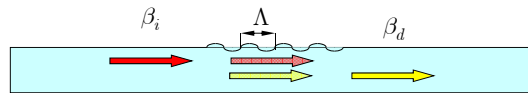
Děliče s mnohovidovou interferencí

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



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

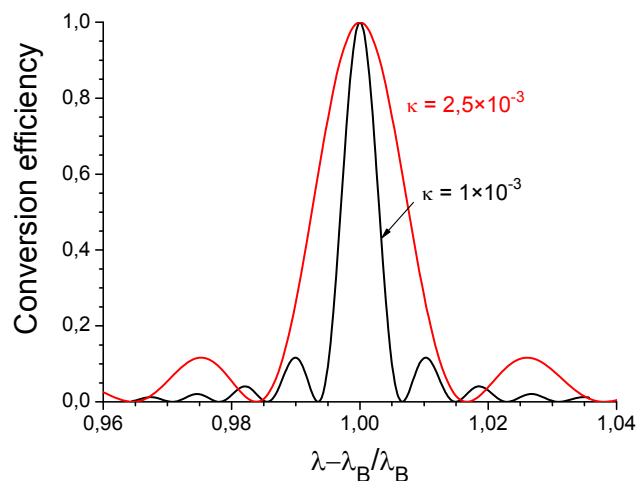
$$A_i(z) = A_{i0} e^{i\frac{\Delta\beta}{2}z} \left[\cos \delta z - i(\Delta\beta/2) \sin \delta z \right], \quad \delta = \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + |\kappa|^2}$$

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

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

20

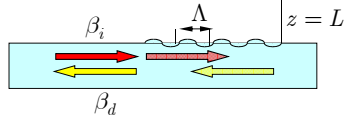
Spektrální závislost konverze vidů na mřížce



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

21

Zpětný (braggovský) odraz na mřížce



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

$$K \approx 2\beta_i$$

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

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

$$A_i(z) = \delta A_{i,0} [\delta \cosh \delta z - i(\Delta\beta/2) \sin \delta z]^{-1}, \quad \delta = \sqrt{|\kappa|^2 - (\Delta\beta/2)^2}.$$

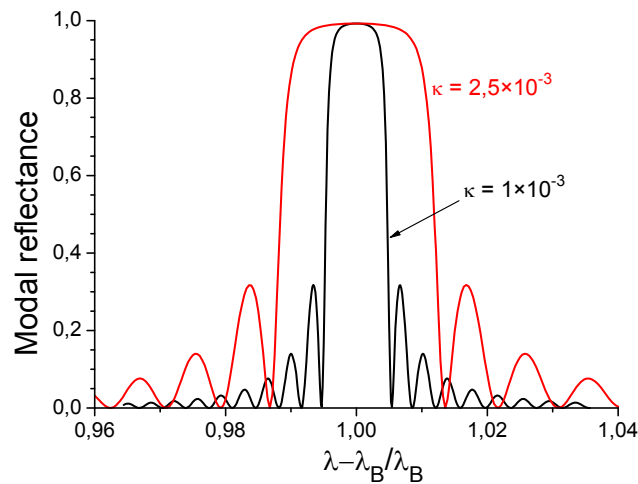
$$B_d(z) = i\kappa^* A_{i,0} e^{-i\frac{\Delta\beta}{2}z} \left[\delta \coth \delta z - i\frac{\Delta\beta}{2} \right]^{-1}$$

$$\text{Pro } \Delta\beta = 0$$

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

22

Spektrální závislost účinnosti zpětného odrazu

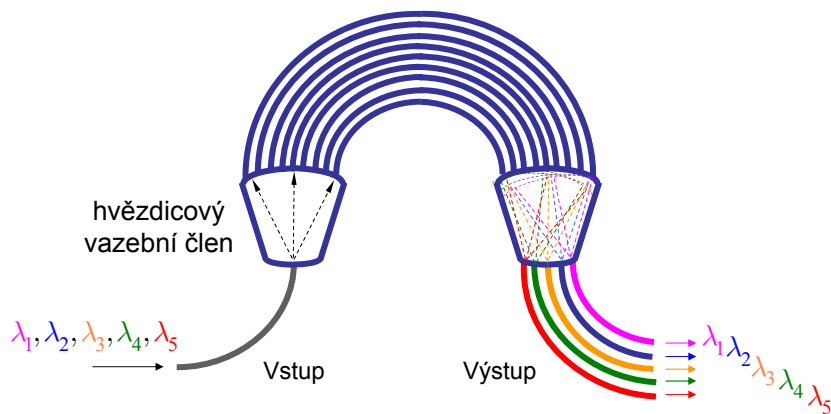


Úzká spektrální křivka konverzní účinnosti vyžaduje malý činitel vazby

23

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

Fázovaná řada (několika desítek) vlnovodů



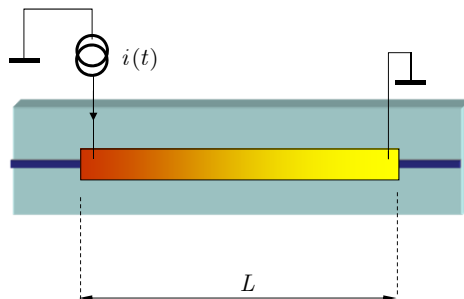
M. K. Smit, 1987; dnes asi nejpůvodnější součástka

24

**Některé fyzikální principy
využívané
ve fotonických vlnovodných 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 μs !

26

Elektrooptický jev

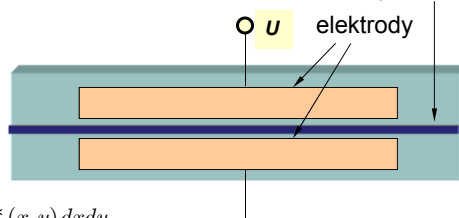
změna indexu lomu (tenzoru optické permitivity)
vlivem vnějšího elektrického pole

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

malá změna permitivity $\Rightarrow$ teorie vázaných vln

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

Ti:LiNbO₃ vlnovod

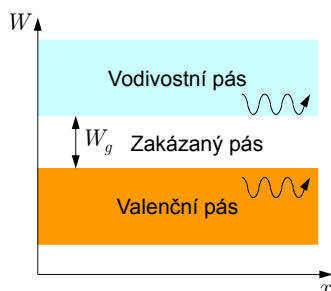


$$\begin{aligned} \Delta\beta &\approx \frac{k_0}{2} \iint_S \mathbf{e}(x, y) \cdot \Delta\varepsilon \cdot \mathbf{e}^*(x, y) dx dy \\ &= -\frac{k_0}{2} \iint_S \mathbf{e}(x, y) \cdot \varepsilon \cdot [\tilde{\mathbf{r}} \cdot \mathbf{E}_v(x, y)] \cdot \varepsilon \cdot \mathbf{e}^*(x, y) dx dy \end{aligned}$$

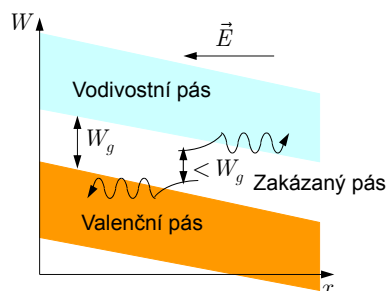
27

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)

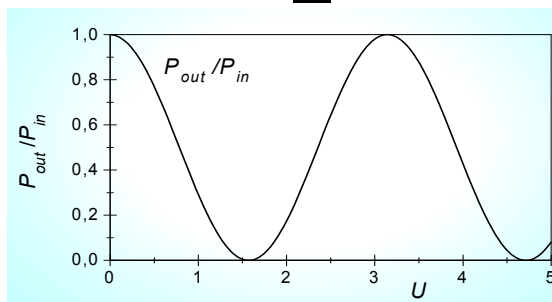
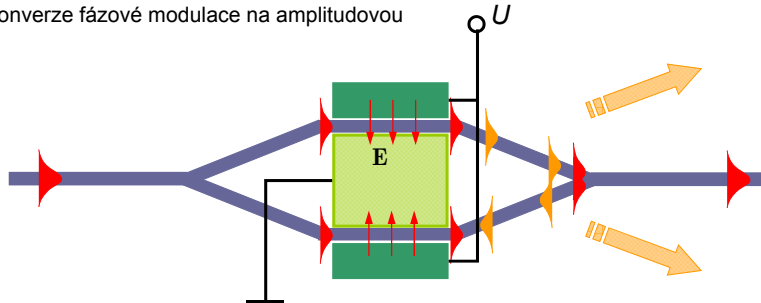
28

Rychlé elektrooptické vlnovodné modulátory

29

Machův-Zehnderův interferometrický modulátor

Konverze fázové modulace na amplitudovou



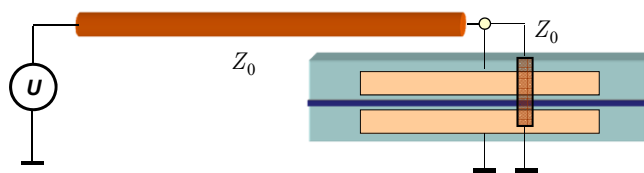
$$P_{out} = P_{in} \cos^2 \left(\frac{\pi U}{2 U_{\pi}} \right)$$

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

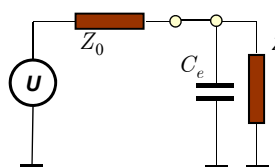
30

Modulační rychlost elektrooptických modulátorů I

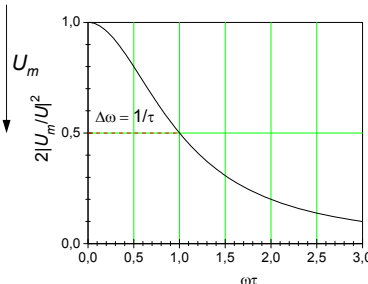
Standardní modulátor s elektrodami „se soustředěnými parametry“



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



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



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

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

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

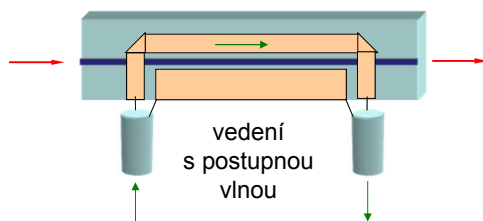
$$Z_0 = 50 \Omega,$$

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

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

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

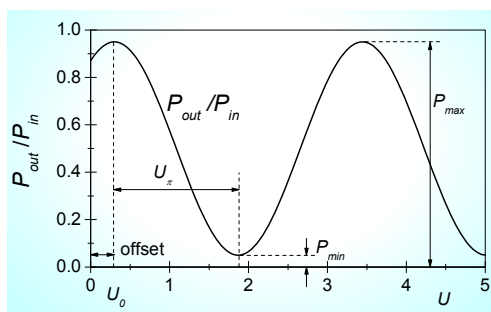
Pro $N_\mu \approx 4.2$, $N \approx 2.2$

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

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)

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

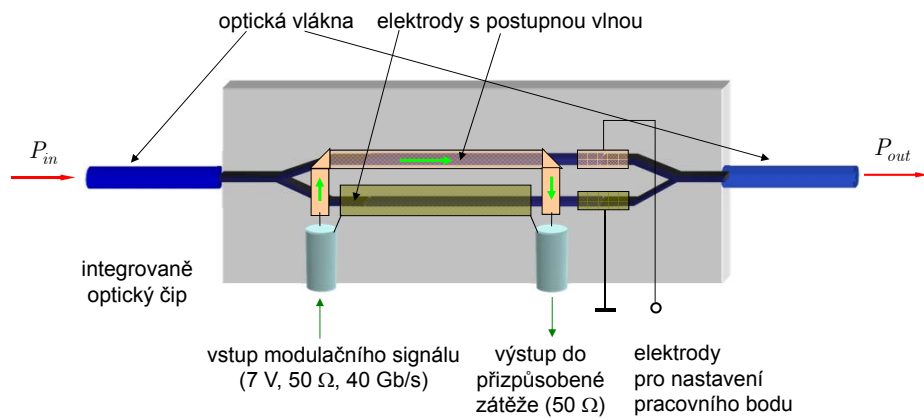
Vložný útlum

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

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

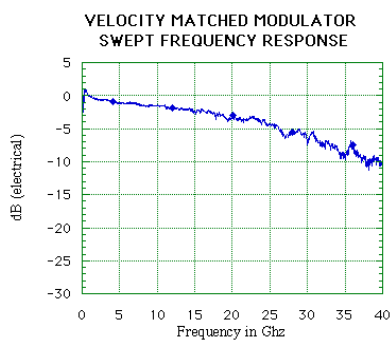
33

Elektroopticky řízený Machův-Zehnderův interferometrický modulátor s postupnou vlnou

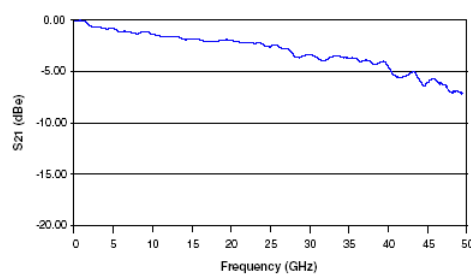


34

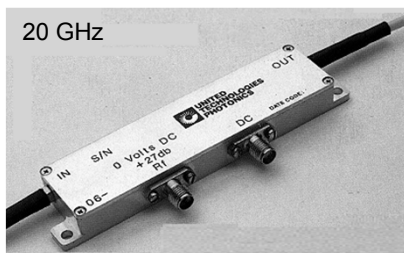
Komerční elektrooptické modulátory



Frequency Response



20 GHz

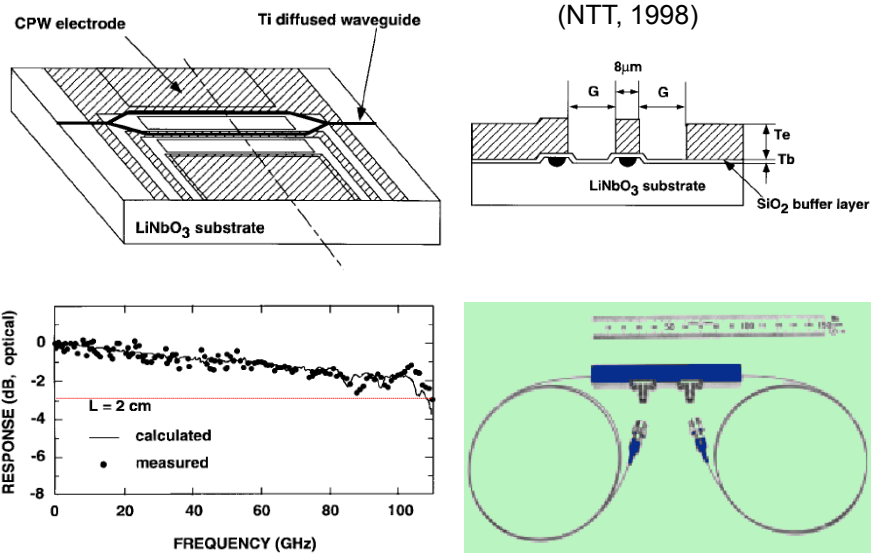


40 GHz



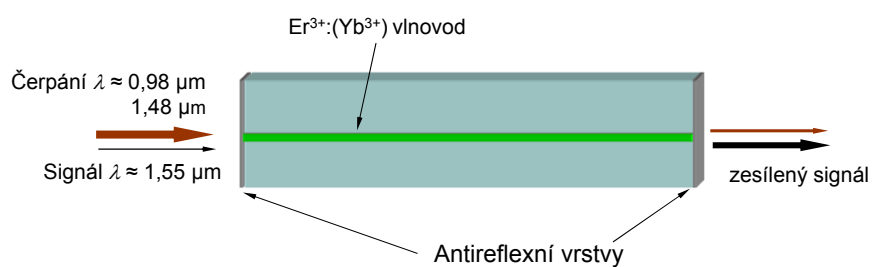
35

100 GHz LiNbO₃ modulátor s ovládacím napětím 5,1 V



36

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")

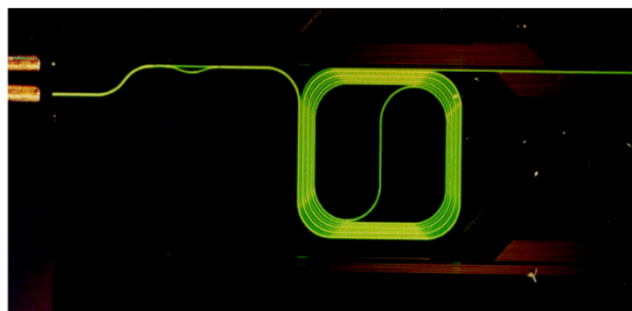
Nevýhody: malá délka $\rightarrow$ vysoká koncentrace dopantů, **malé zesílení**

37

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)

38

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

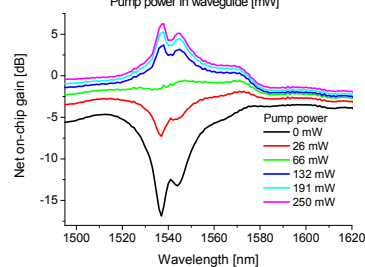
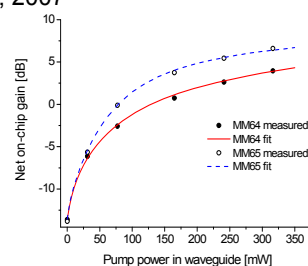
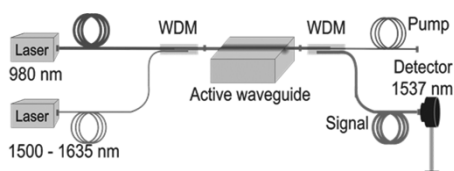
VŠCHT A ÚFE AV ČR, 2007

Substrát

Soustava
kanálových
vlnodů



Charakterizace vzorků aktivních vlnodů

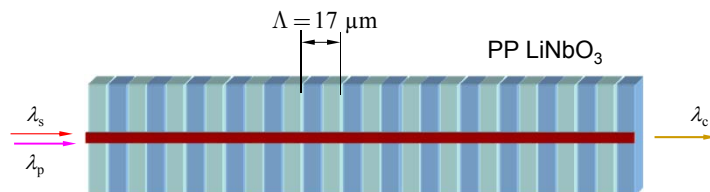


Ionová výměna $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{K}^+$ a $\text{Na}^+ \leftrightarrow \text{Ag}^+$, ztráty $\approx 0.18 \text{ dB/cm}$, délka vzorku 4 cm
Max. zesílení na čipu 6 dB, zesílení vlákno – vlákno $\approx 5 \text{ dB}$.

39

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

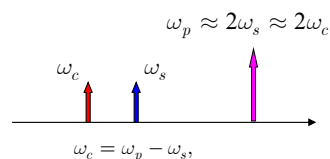
Nelineární optický jev 2. řádu – generování rozdílové frekvence



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

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

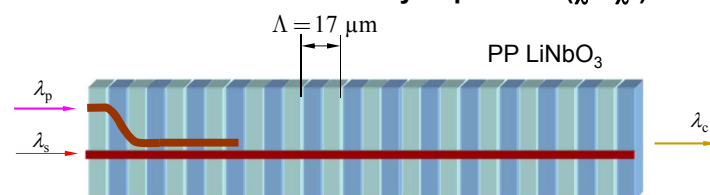
Řešení: kaskádní aplikace dvou procesů $\chi^{(2)}$



40

Kódově transparentní konverze vlnových délek pro optické komunikační systémy

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



Princip

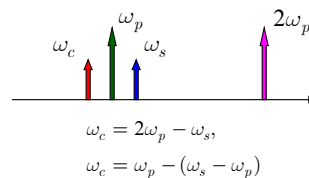
1. generování 2. harmonické
2. generování rozdílové frekvence

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

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

Aplikační možnosti

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



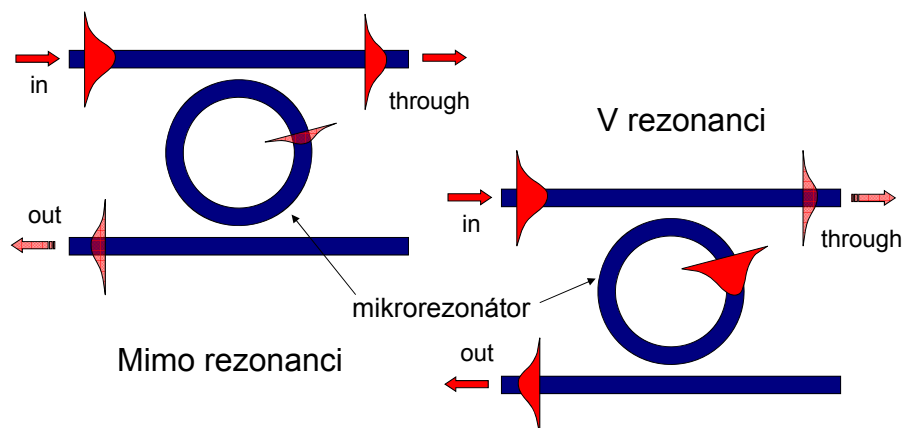
41

Mikrorezonátory

42

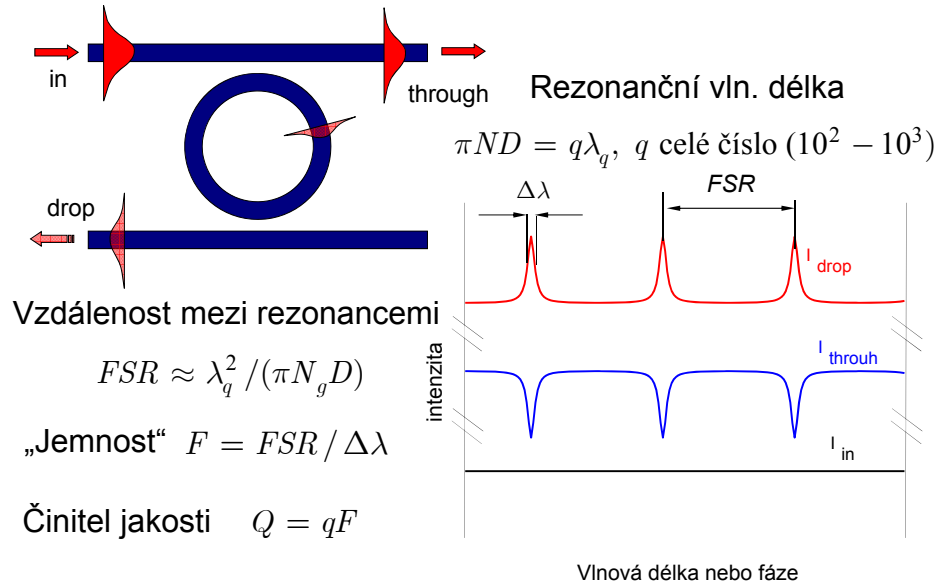
Vlnvodné struktúry s mikrorezonátory

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



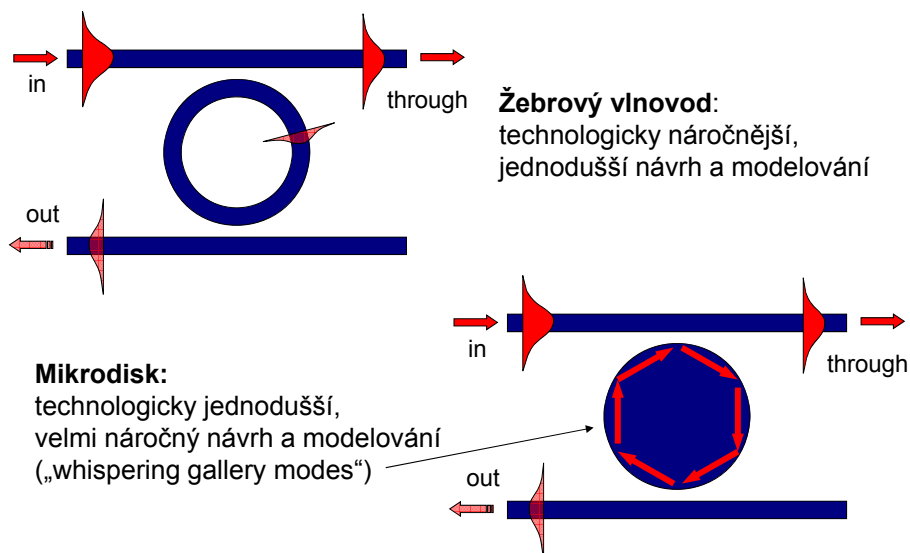
43

Spektrální vlastnosti mikrorezonátoru



44

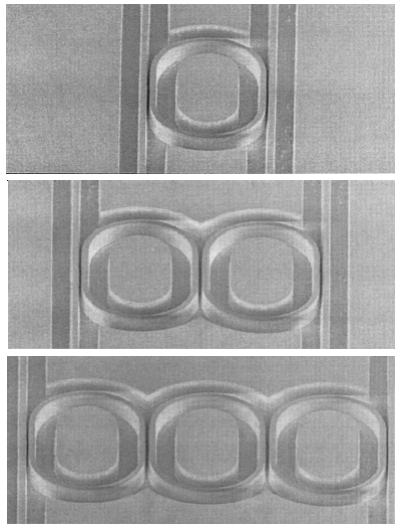
Žebrový vlnovod, nebo mikrodisk?



45

Technologické aspekty

Laterální vazba mezi mikrorezonátorem a vlnovodem je velmi kritická:



MIT, Cambridge, 2000

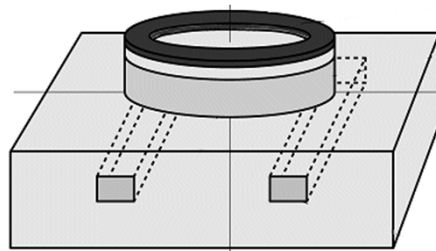
$\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}-\text{GaAs}$ systém

šířka vlnovodů 0,42–0,62 μm

šířka štěrbin 0,18–0,32 μm

hloubka leptání 2 μm

Alternativa: **vertikální vazba**



46

Vlnovodné filtry na bázi mikrorezonátorů

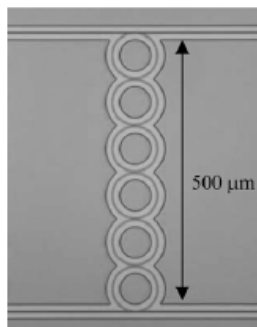
Příklad 1: Termoopticky laděný **filtr vyšších řádů**

Filtry 1. až 11. řádu, $\varnothing$ 72 μm

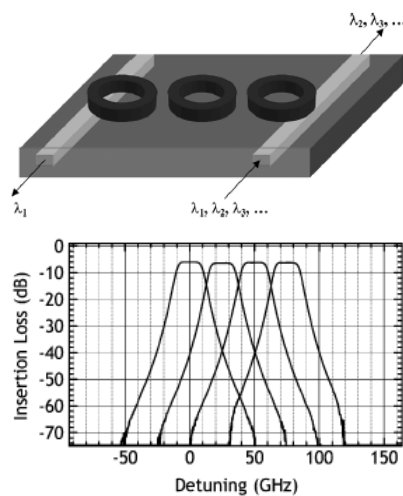
$\text{SiO}_2/\text{Hydex}$ ($n_s = 1,45$, $n_g = 1,7$), $\varnothing \approx 50 \mu$

ztráty na čipu 1 ÷ 1,5 dB

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



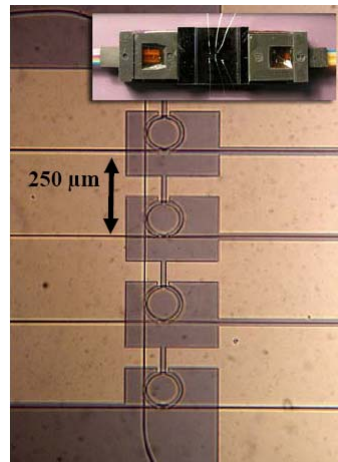
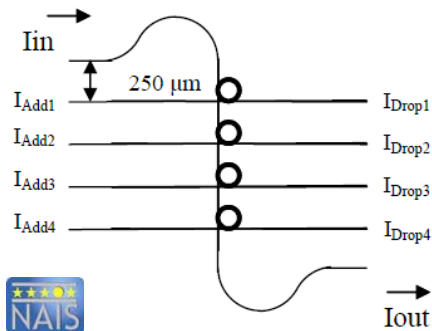
Termoopticky
laděné
spektrální
charakteristiky
filtru 5. řádu,
 $\Delta f = 25 \text{ GHz}$



47

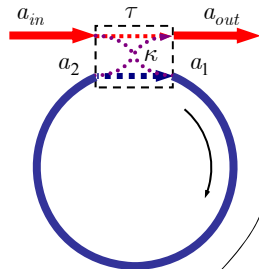
Rekonfigurovatelný demultiplexor s termoopticky laděnými mikrozónami

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



48

Bistabilita v důsledku Kerrovské nelinearity automodulace fáze



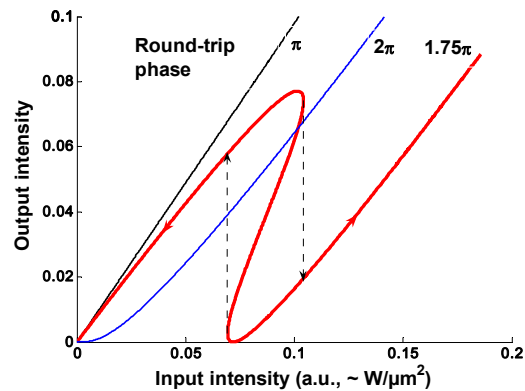
$$a_{in} = \frac{a_1 - \tau a_2}{\kappa},$$

$$a_{out} = \tau a_{in} + \kappa a_2$$

$$\begin{pmatrix} a_{out} \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau & \kappa \\ \kappa & \tau \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{in} \\ a_2 \end{pmatrix} \quad \text{lineární vazba mezi rezonátorem a vlnovodem}$$

$$a_2 = a_1 b e^{i\phi_L} e^{i\phi_{NL}} \quad \text{lineární a nelineární fázový posuv}$$

$$\phi_{NL} = -\gamma |a_1|^2 (1 - b^2) / (2 \ln b) \quad b = \text{faktor ztrát/oběh}$$

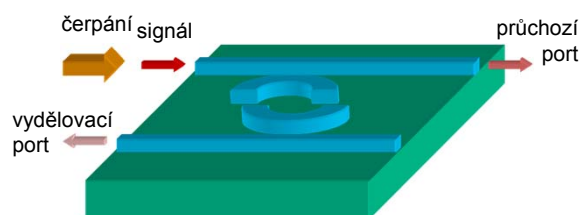


49

SPÍNÁNÍ S POMOCÍ NELINEÁRNÍHO OPTICKÉHO JEVU V OPTICKÉM MIKROREZONÁTORU

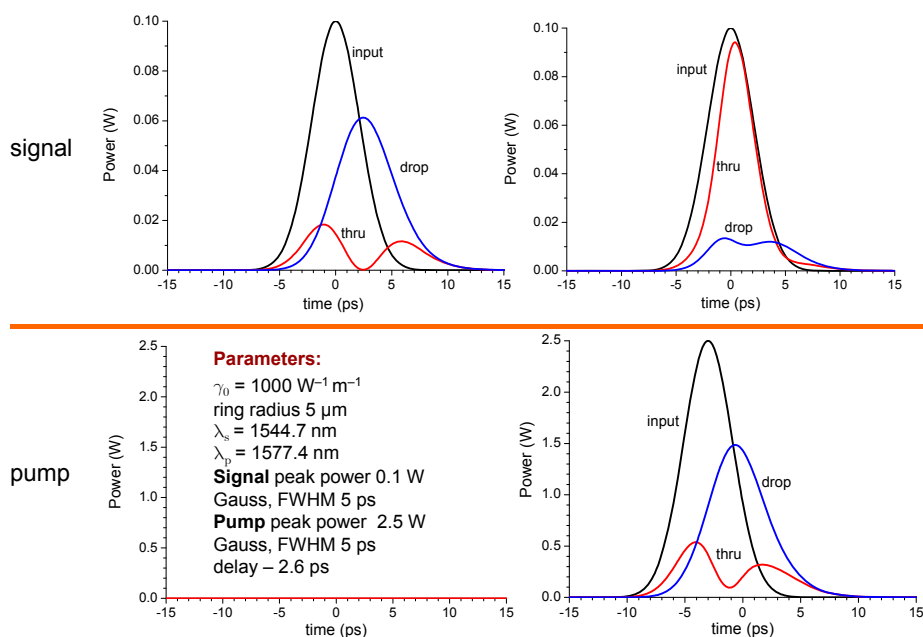
Silná čerpací vlna mění index lomu rezonátoru a tím ho rozladí;

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



50

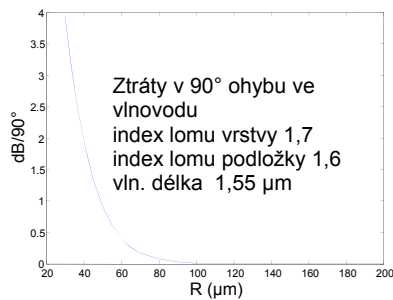
Optické přepínání s pomocí křížové fázové modulace



51

„Nové směry“ v integrované optice

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



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

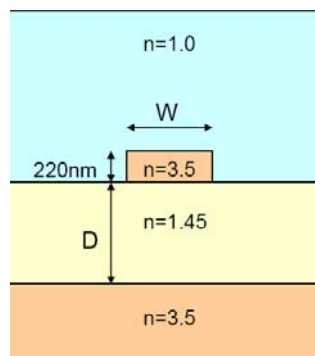
1. **Struktury na bázi mikrorezonátorů**
2. **Vlnovodné struktury ve fotonických krystalech**
3. **„Plazmonika“**

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

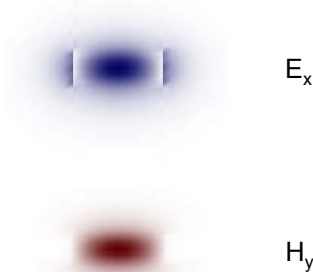
53

„Fotonický drát“

(vlnovod s velkým kontrastem indexu lomu)

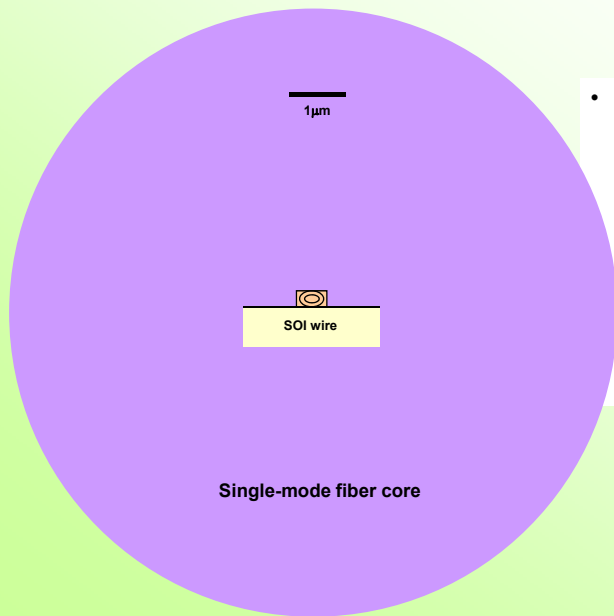


Rozložení elektromagnetického pole základního vidu TE_{00}



54

Vazba do „nanofotonických“ vlnovodů

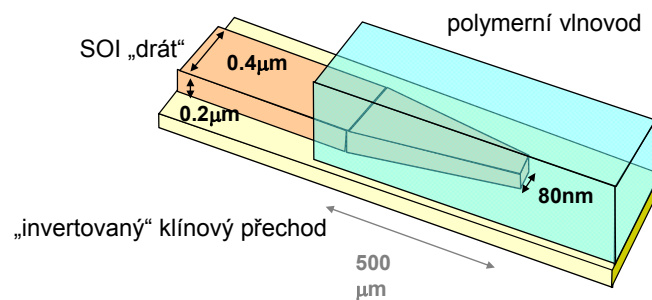
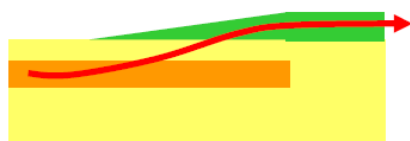


• Problémy:

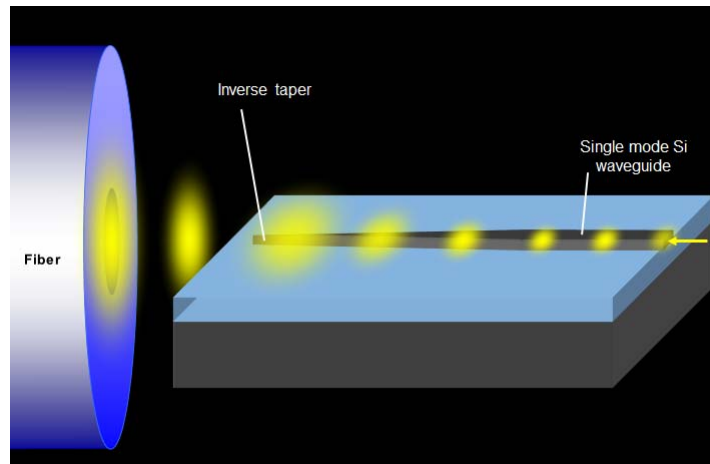
- Účinná vazba mezi submikrometrovým vlnovodem a vláknem
- Je nutný konvertor velikosti vidového pole:
 - v horizontální rovině
 - ve vertikální rovině (obtížnější)
- Polarizační problém

55

„Adiabatický přechod“ mezi vlnovody velmi různých profilů / kontrastů



56



57

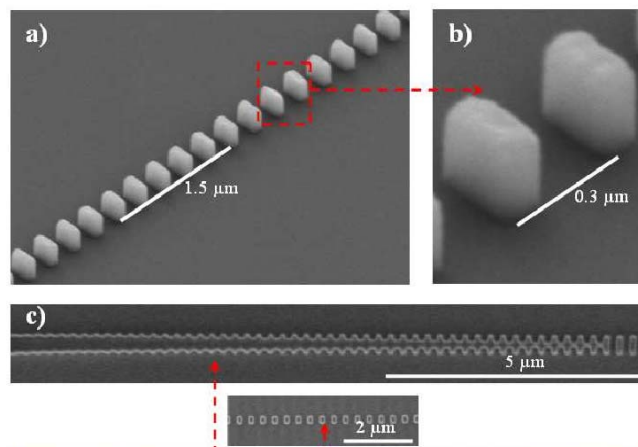
Subwavelength grating periodic structures in silicon-on-insulator: a new type of microphotonic waveguide

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

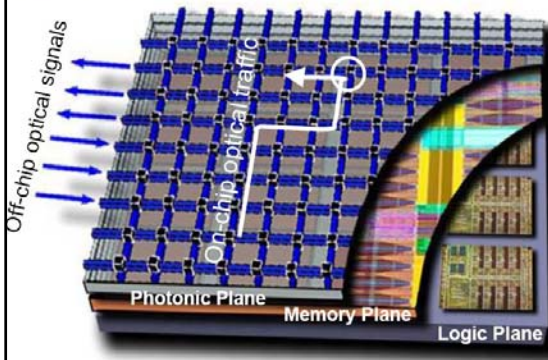
²Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, Ottawa, Canada

*przemek.bock@nrc.ca



58

Vision for 22nm CMOS (circa 2018) - 10 TFLOPs on a 3D chip



36 "Cell" chip (~300 cores)

System level study:
IBM, Columbia, Cornell, UCSB

Co-PIs:
Jeff Kash (IBM)
Keren Bergman (Columbia)
Yurii Vlasov (IBM)

Logic plane	~300 cores
Memory plane	~30GB eDRAM
Photonic plane	On-Chip Optical Network
	>70Tbps optical on-chip
	>70Tbps optical off-chip

Photonic layer is not only connecting various cores, but also routes the traffic

All future dates and specifications are estimations only. Subject to change without notice.

www.research.ibm.com/photonics



A to už je úplný

KONEC

integrované fotoniky...

60

Výhody a nevýhody vlnovodných struktur s mikrorezonátory

Výhody:

- Relativně velká variabilita realizovatelných funkcí – spektrální filtr, modulátor, přepínač, laser(?), ...
- Technologická homogenita prvků s různými funkcemi
- Malé rozměry stavebních bloků (řádu 10 μm)

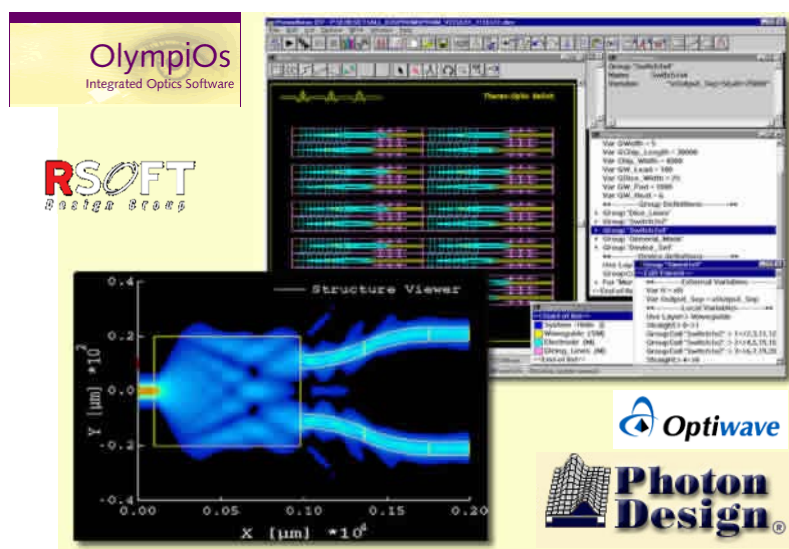
Nevýhody:

- Vysoká technologická náročnost
- Návrh a modelování vyžaduje nové metody (3D, všesměrové šíření)
- Obtížnost účinné vazby na vláknové vlnovody
- Omezené technické parametry (šířka pásma filtru, mezní frekvence modulátoru, ...)

Dnes patrně nejperspektivnější technologie pro „large-scale photonic integration“

111

Komerční softwarové produkty pro modelování a návrh integrovaných fotonických struktur



112

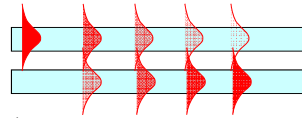
Aproximativní metoda vázaných vidů

Dvojice vázaných vlnovodů

$e_1(x, y)$

nejsou ortogonální!

$e_2(x, y)$



$$E(x, y, z) \approx a_1(z)e_1(x, y) + a_2(z)e_2(x, y)$$

$$\frac{da_1}{dz} = i\beta_1 a_1(z) + i\kappa_{12} a_2(z)$$

Zachování výkonu v bezztrátové struktuře:

$$\frac{da_2}{dz} = i\kappa_{21} a_1(z) + i\beta_2 a_2(z)$$

$$\frac{d}{dz}(a_1 a_1^* + a_2 a_2^*) = 0 \Rightarrow \kappa_{21} = \kappa_{12}^*$$

$$a_1(z) = a_1(0) e^{i\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} z} [\cos \delta z - i(\Delta\beta/2) \sin \delta z], \quad \delta = \sqrt{(\Delta\beta/2)^2 + |\kappa_{12}\kappa_{21}|}$$

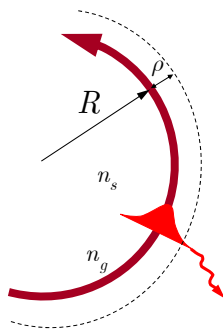
$$a_2(z) = i a_1(0) \frac{\kappa_{12}}{\delta} e^{i\frac{\beta_1 + \beta_2}{2} z} \sin \delta z; \quad P_d(z) = |a_1(0)|^2 \left| \frac{\kappa_{12}}{\delta} \right|^2 \sin^2 \delta z.$$

Problém: neexistuje jednoznačný způsob výpočtu činitele vazby (úloha není exaktně formulována!)

113

Šíření optického záření v zakřivených vlnovodech

Každý zakřivený dielektrický vlnovod vyzařuje



Fázová rychlost vlny lineárně roste s poloměrem; pro velké poloměry by překročila rychlost světla v substrátu. Odpovídající část přeneseného výkonu je vyzářena do okolí

$$v(r) = v(R + \rho) = \left(1 + \frac{\rho}{R}\right) v(R) \leq \frac{c}{n_s},$$

Záření „Čerenkovova typu“ („rychlá“ vlna). Pomocí poruchové metody je možno ukázat, že

$$\exp(i k_0 N z) = \exp(i k_0 N' z) \exp(-k_0 N'' z);$$

$$N = N' + i N'', \quad N'' > 0$$

$$N'' \approx 2 \frac{\sqrt{N^2 - n_s^2} (n_g^2 - N^2)}{k_0 N d (n_g^2 - n_s^2)} \exp \left[-\frac{2}{3} k_0 R \frac{(N^2 - n_s^2)^{3/2}}{n_s^2} \right]$$

114

Metody analýzy zakřivených vlnodů

1. Metoda konformního zobrazení pro 2D (planární) vlnod

Přímý vlnod:
$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} + k_0^2 n^2(x) E = 0$$

$$E(x, z) = E(x) \exp(ik_0 N z)$$

Zakřivený vlnod:

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + k_0^2 n^2(r) E = 0$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad x = r \cos \varphi, \quad y = r \sin \varphi$$

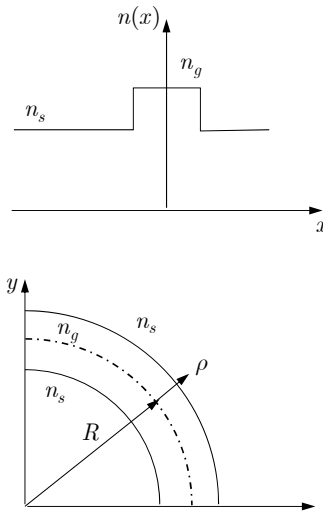
Komplexní proměnná $z = x + iy = r e^{i\varphi}$

Konformní zobrazení $w = u + iv$

$$w = u + iv = R \ln \frac{z}{R} = R \ln \frac{r}{R} + i R \varphi,$$

$$u = R \ln \frac{r}{R}, \quad v = R \varphi$$

$$\frac{r}{R} = \exp\left(\frac{u}{R}\right), \quad \varphi = \frac{v}{R}$$



115

Metoda konformního zobrazení pro 2D (planární) vlnod

Konformní zobrazení transformuje vlnovou rovnici do tvaru

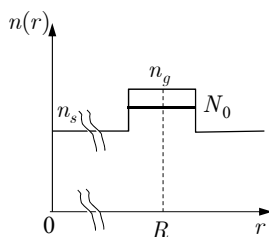
$$\frac{\partial^2 E}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial v^2} + k_0^2 \underbrace{\frac{r^2}{R^2} n^2(r)}_{n_{eq}^2(u)} E = 0$$

$$n_{eq}(u) = \frac{r}{R} n(r) = \exp\left(\frac{u}{R}\right) n\left[R \exp\left(\frac{u}{R}\right)\right] \dots \text{ekvivalentní profil přímého vlnodu}$$

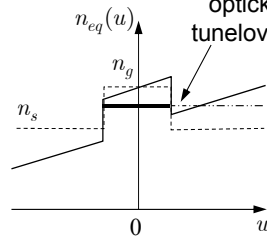
Ekvivalentní profil: $r = R + \rho, \quad \rho \ll R, \quad \frac{u}{R} = \ln \frac{r}{R} = \ln \frac{R + \rho}{R} \approx \frac{\rho}{R}, \quad u \approx \rho,$

$$\exp\left(\frac{u}{R}\right) \approx \exp\left(\frac{\rho}{R}\right) \approx 1 + \frac{\rho}{R}, \quad n_{eq}(u) \approx \left(1 + \frac{u}{R}\right) n\left[R\left(1 + \frac{u}{R}\right)\right] \approx \frac{r}{R} n(r)$$

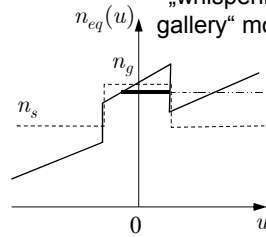
Původní profil



Ekvivalentní profil

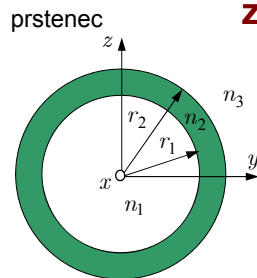


Silný ohyb:
„whispering
gallery“ mode

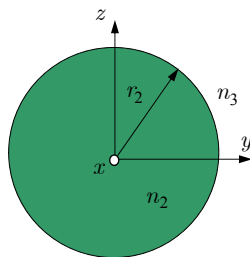


116

Semianalytické řešení vlnové rovnice zakřiveného 2D vlnovodu



$n_2 > n_1, n_3$,



disk $n_2 > n_3$

Polarizace: $\mathbf{E} \parallel \mathbf{x}^0; \frac{\partial}{\partial x} \equiv 0$

$$\mathbf{E}(r, \varphi) = E_x(r, \varphi) \mathbf{x}^0 = \psi(r) \exp(i\nu\varphi) \mathbf{x}^0$$

Vlnová rovnice (z Maxwellových rovnic)

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla \underbrace{\nabla \cdot \mathbf{E}}_0 - \Delta \mathbf{E} = -k_0^2 n^2(r) \mathbf{E},$$

$$\Delta_{\perp} E_x + k_0^2 n^2(r) E_x = 0,$$

Besselova rovnice

$$r \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\psi(r)}{dr} \right) + (k_0^2 n^2 r^2 - \nu^2) \psi(r) = 0,$$

prstenec:

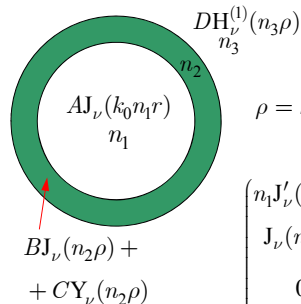
$$n(r) = \begin{cases} n_1, & r \leq r_1, \\ n_2, & r_1 < r \leq r_2, \\ n_3, & r > r_2 \end{cases}$$

disk:

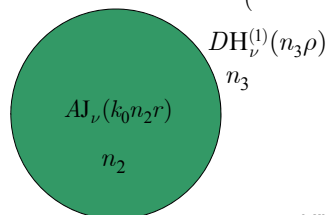
$$n(r) = \begin{cases} n_2, & r \leq r_2 \\ n_3, & r > r_2 \end{cases}$$

117

Rigorózní řešení rovnice pro 2D prstencový a diskový mikrozónátor



$$BJ_{\nu}(n_2\rho) + CY_{\nu}(n_2\rho)$$



Podmínky spojitosti na rozhraních r_1, r_2

E_x spojitá $\Rightarrow \psi(r)$ spojitá

H_{φ} spojitá $\Rightarrow \frac{\partial \psi(r)}{\partial r}$ spojitá

$$\begin{pmatrix} n_1 J'_{\nu}(n_1 \rho_1) & -n_2 J'_{\nu}(n_2 \rho_1) & -n_2 Y'_{\nu}(n_2 \rho_1) & 0 \\ J_{\nu}(n_1 \rho_1) & -J_{\nu}(n_2 \rho_1) & -Y_{\nu}(n_2 \rho_1) & 0 \\ 0 & -n_2 J'_{\nu}(n_2 \rho_2) & -n_2 Y'_{\nu}(n_2 \rho_2) & n_3 H_{\nu}^{(1)'}(n_3 \rho_2) \\ 0 & -J_{\nu}(n_2 \rho_2) & -Y_{\nu}(n_2 \rho_2) & H_{\nu}^{(1)}(n_3 \rho_2) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} n_2 J'_{\nu}(n_2 \rho_2) & n_2 H_{\nu}^{(1)'}(n_3 \rho_2) \\ J_{\nu}(n_2 \rho_2) & H_{\nu}^{(1)}(n_3 \rho_2) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

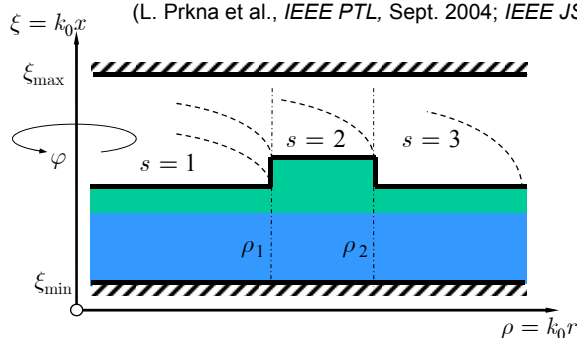
$\det(\dots) = \Phi(\nu, \omega) = 0$... disperzní rovnice
pro ν nebo ω

zakřivený vlnovod rezonátor

118

3D analýza rotačně symetrických zakřivených vlnodů

(L. Prkna et al., *IEEE PTL*, Sept. 2004; *IEEE JSTQE*, Jan. 2005)



Přístup velmi podobný jako u přímých vlnodů; **radiální** závislost místo **laterální**.

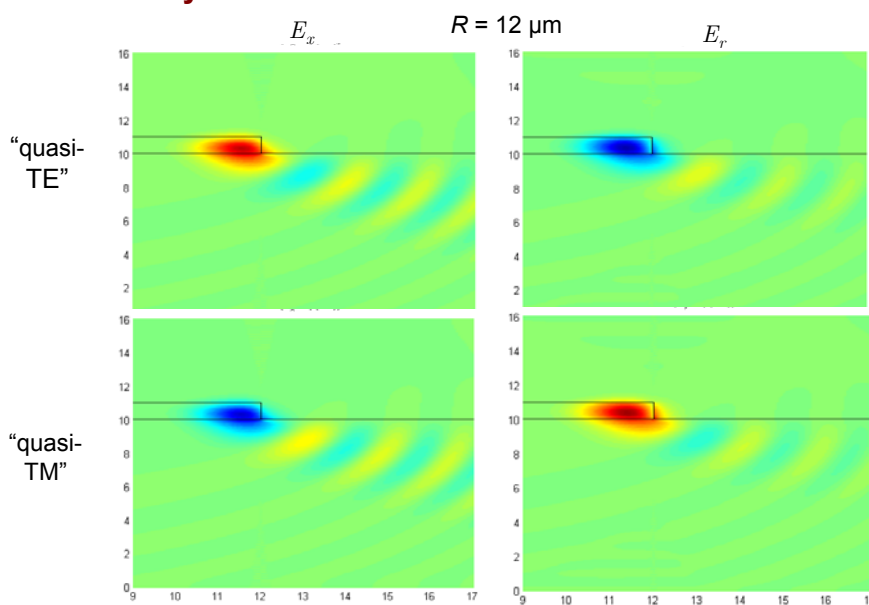
Problém: **Cylindrické** funkce místo trigonometrických.

1. rozdělení struktury na radiálně homogenní úseky („řezy“), každý řez je považován za multivrstvu.
2. Pole v každém řezu je vyjádřeno pomocí TE a TM vidů multivrstvy.
3. Na rozhraní mezi řezy jsou aplikovány podmínky spojitosti tečných složek.

- Žádná (nebo malá) diskretizace
- Pole v každém řezu je popsáno *analyticky*

119

Hybridizace vidů v diskovém rezonátoru



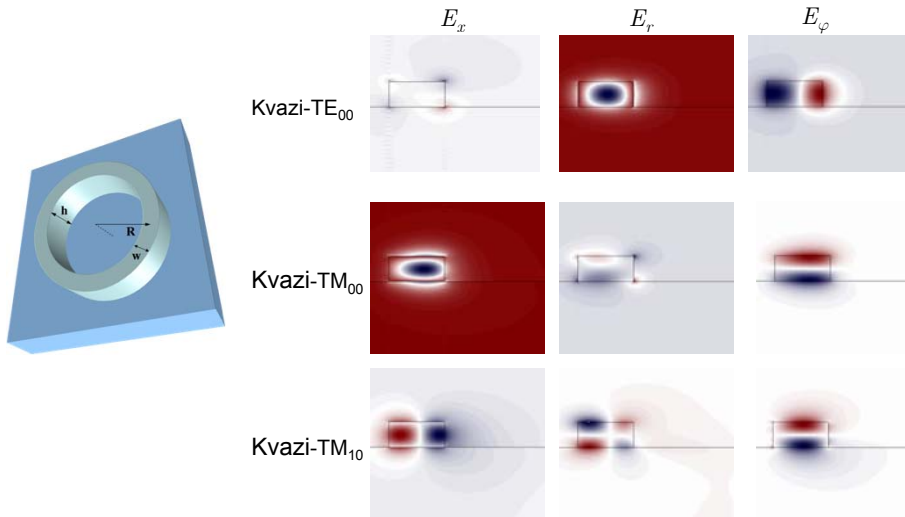
Obě složky pole $\neq 0$ a srovnatelné; $\sim$ lineární polarizace pod $\sim 45^\circ$

120

Mikrorezonátor s velkým kontrastem

Si/SiO₂ prestencový mikrorezonátor,

$R = 2\ \mu\text{m}$, $n_{\text{Si}} = 3.5$, $n_{\text{SiO}_2} = 1.45$, $n_a = 1$, $\lambda = 1.55\ \mu\text{m}$, $h = 360\ \text{nm}$, $w = 500\ \text{nm}$.



121