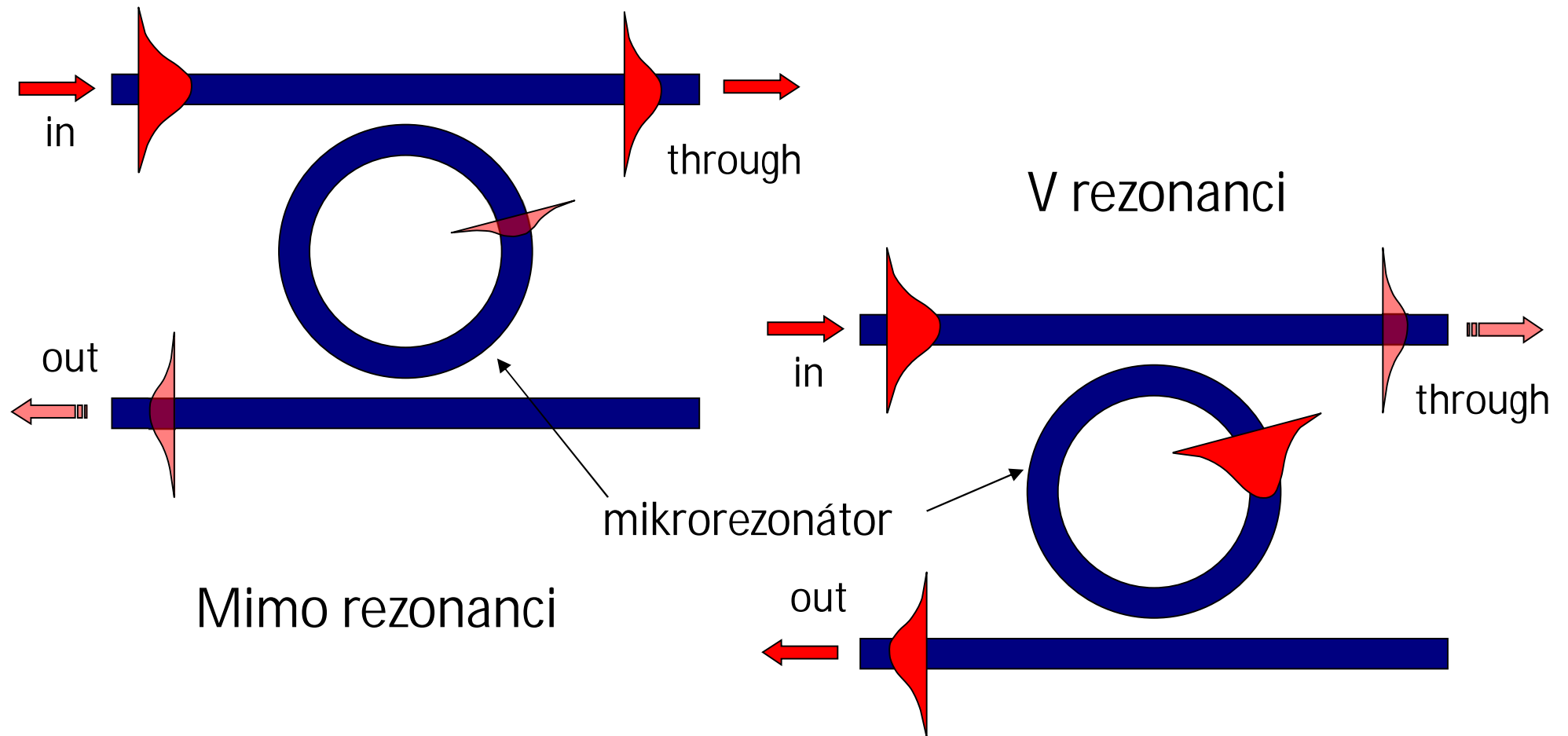


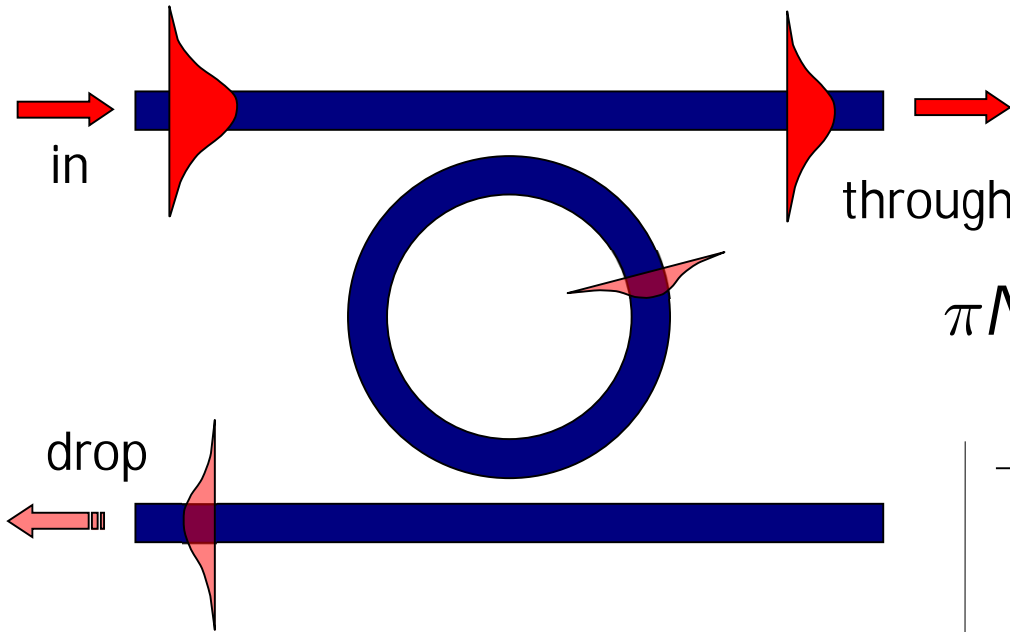
Mikrorezonátory v integrované fotonice

Vlnodné struktury s mikrorezonátory

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



Spektrální vlastnosti mikrorezonátoru



Rezonanční vln. délka

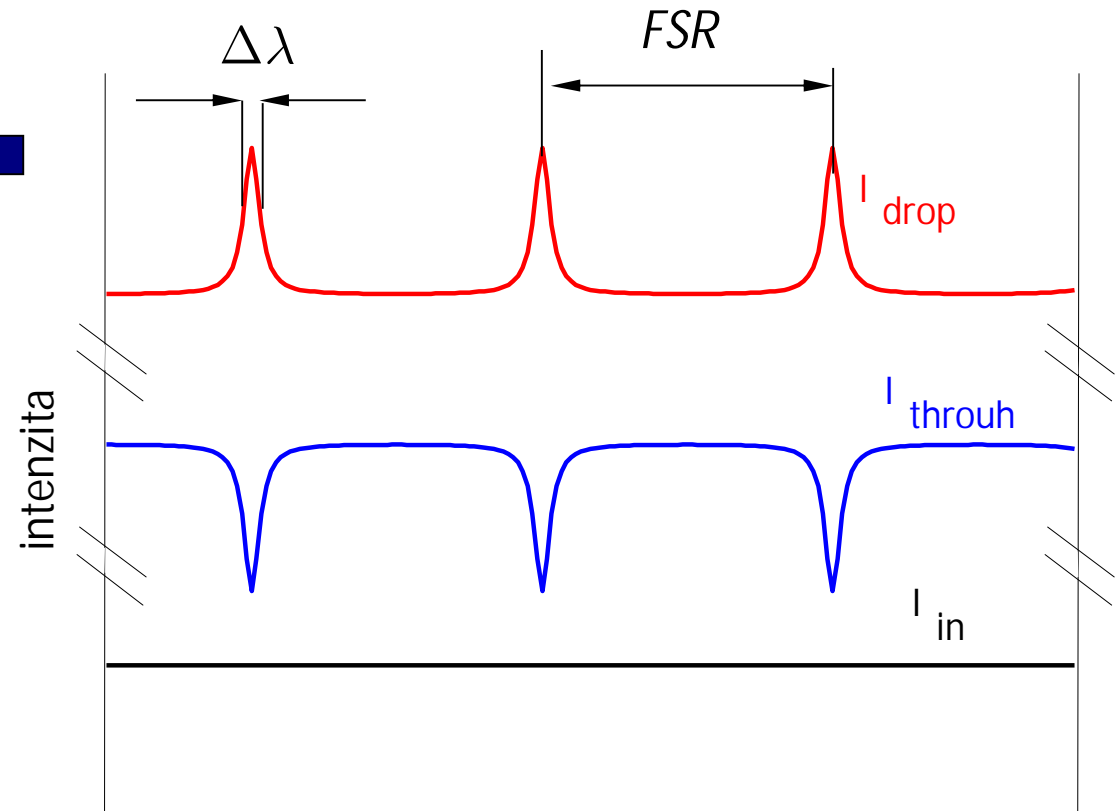
$$\pi ND = q\lambda_q, \quad q \text{ celé číslo } (10^2 - 10^3)$$

Vzdálenost mezi rezonancemi

$$FSR \approx \lambda_q^2 / (\pi N_g D)$$

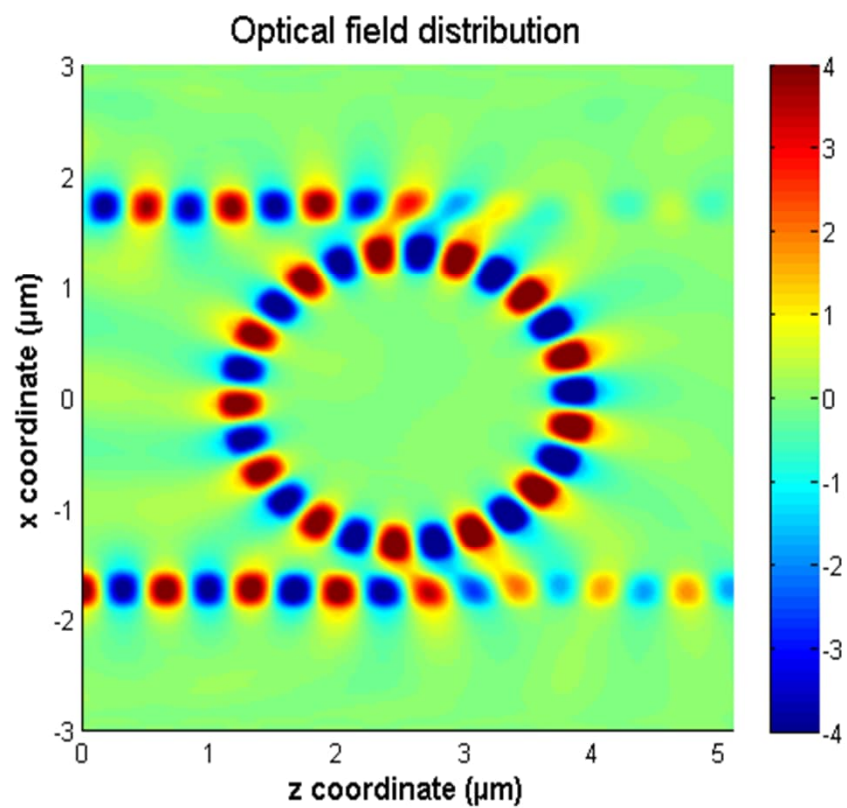
„Jemnost“ $F = FSR / \Delta\lambda$

Činitel jakosti $Q = qF$

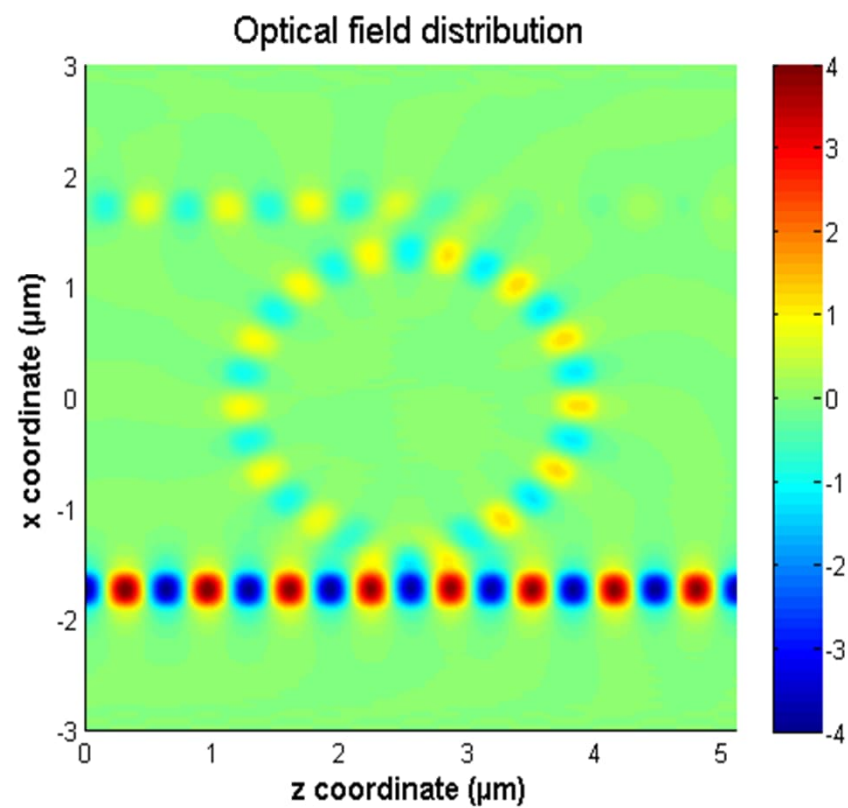


Vlnová délka nebo fáze

Mikrorezonátor v rezonanci



Mikrorezonátor mimo rezonanci

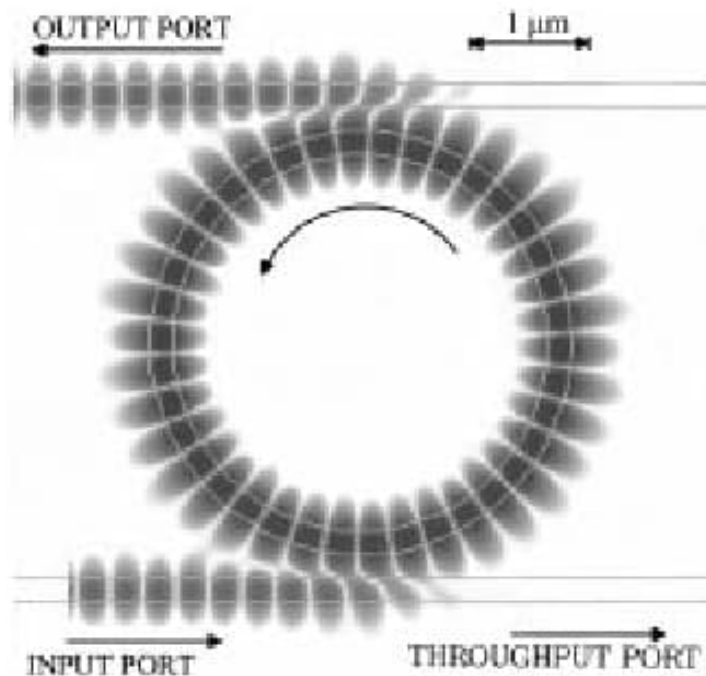


Modelování a charakterizace mikrorezonátorů

„Klasický“ spektrální přístup: „mode solver“ + metoda vázaných vln

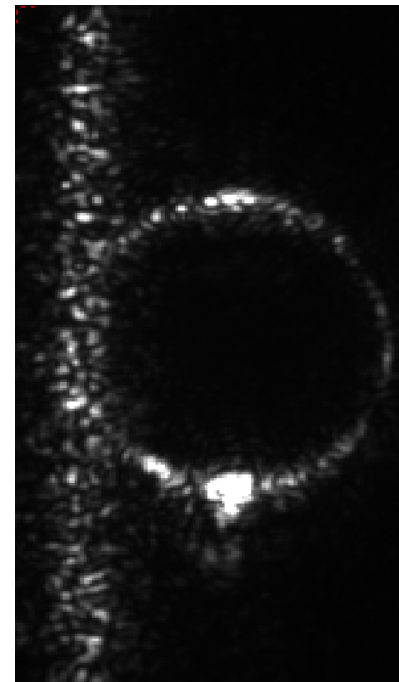
Numerický přístup: FDTD

MIT, 1998, 2D FDTD model

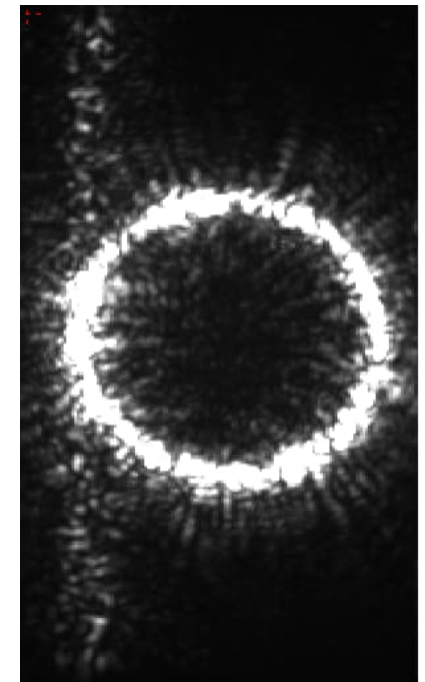


U Twente, NL, 2000
mikroskopický obraz
mikrorezonátoru o \varnothing 50 μm,
materiálový systém Si/SiO₂/Si₃N₄

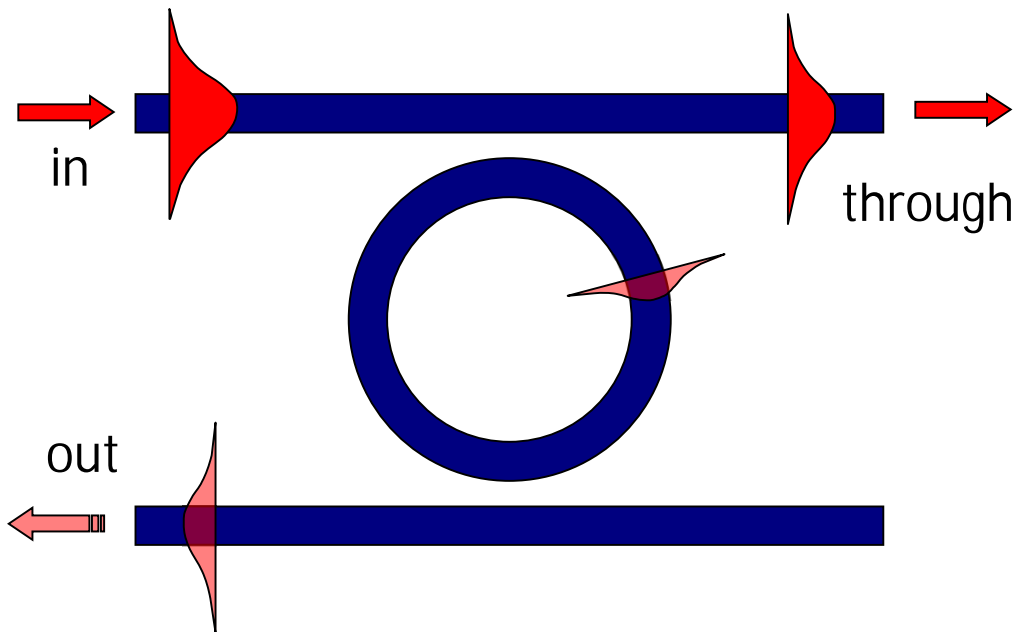
off-resonance



on-resonance

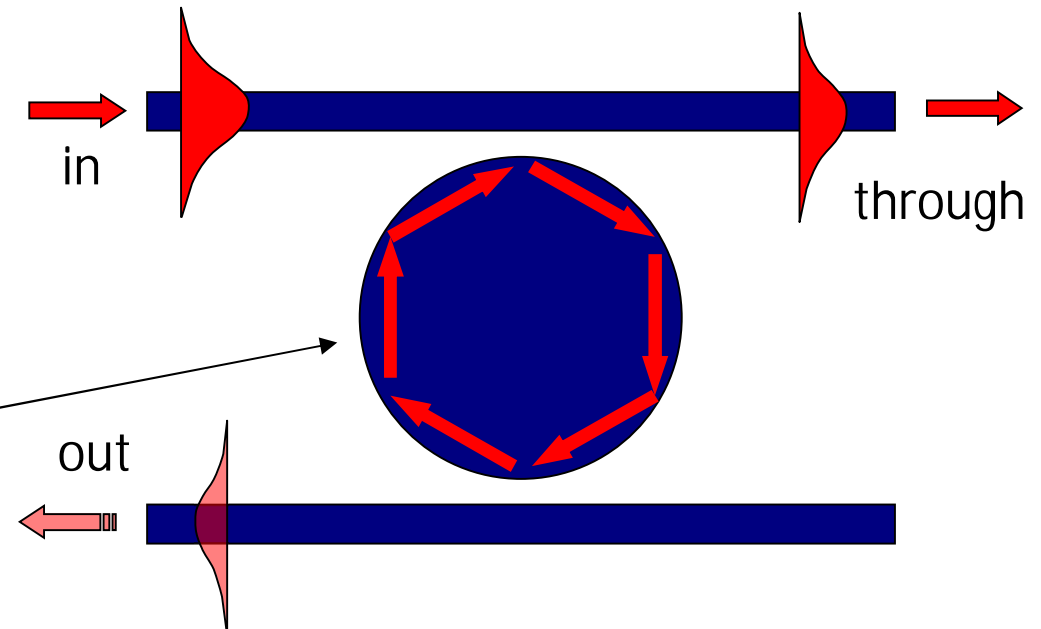


Žebrový vlnovod, nebo mikrodisk?



Žebrový vlnovod:
technologicky náročnější,
jednodušší návrh a modelování

Mikrodisk:
technologicky jednodušší,
velmi náročný návrh a modelování
(„whispering gallery modes“)

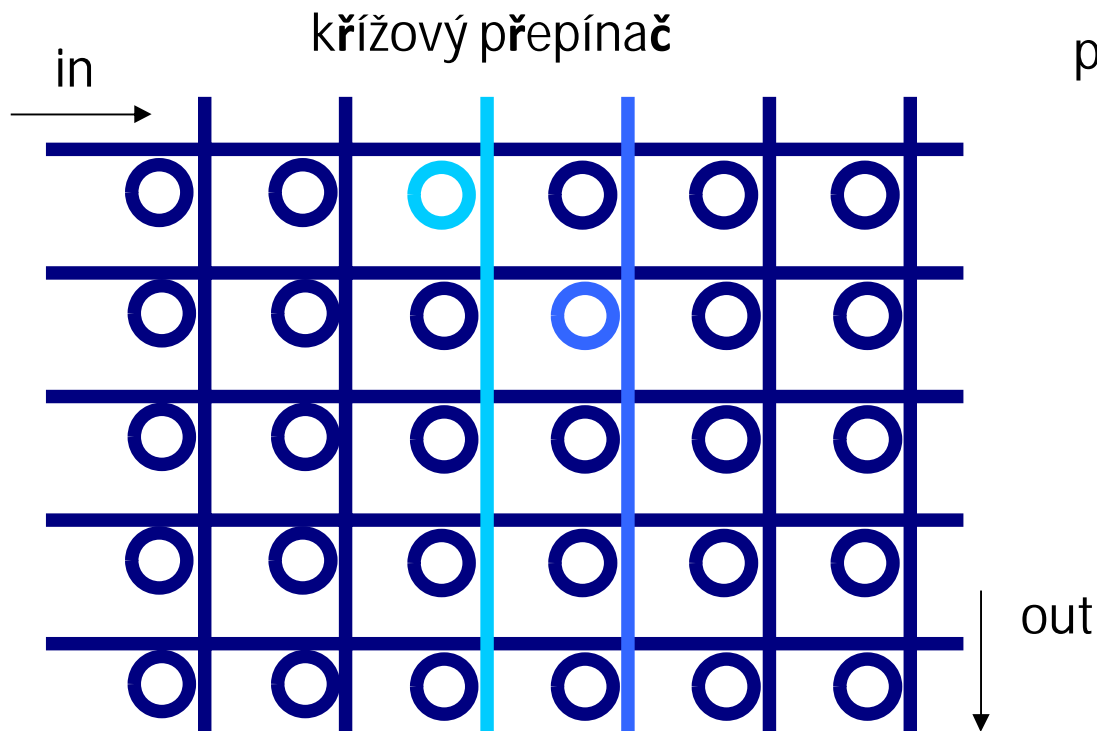


Mikrorezonátor jako stavební prvek integrovaných fotonických struktur

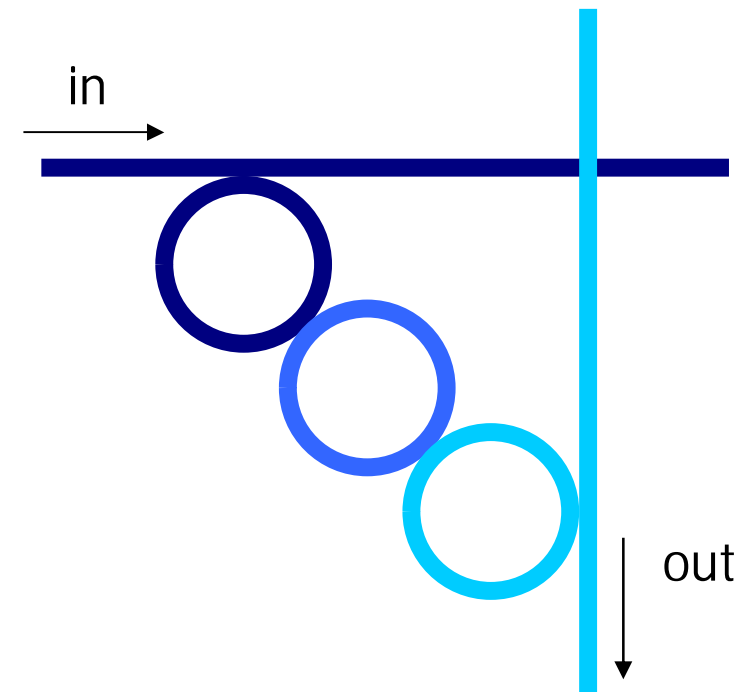
Pasivní mikrorezonátor – spektrální filtr,
add-drop de/multiplexor

Syntéza tvaru spektrálních charakteristik –
kaskádní řazení mikrorezonátorů

Elektroopticky/termoopticky laditelný mikrorezonátor –
modulátor, přepínač ($\Delta f \approx 1$ GHz)

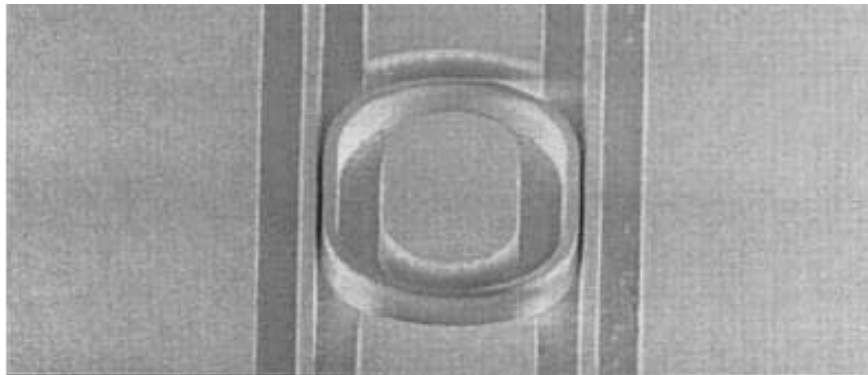


princip kaskádního filtru 3. řádu



Technologické aspekty

Laterální vazba mezi mikrorezonátorem a vlnovodem je velmi kritická:



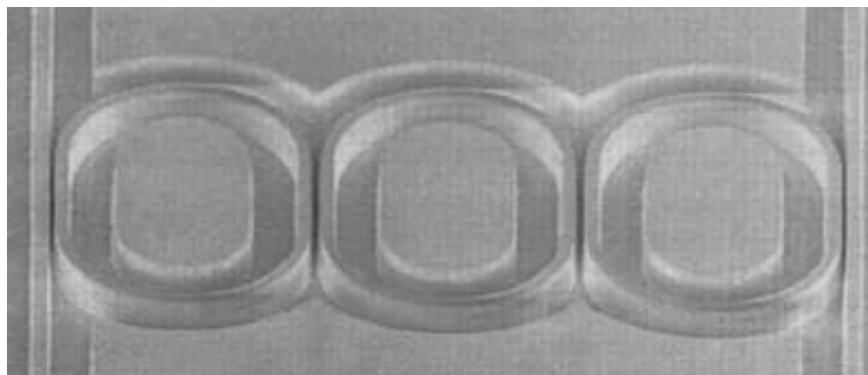
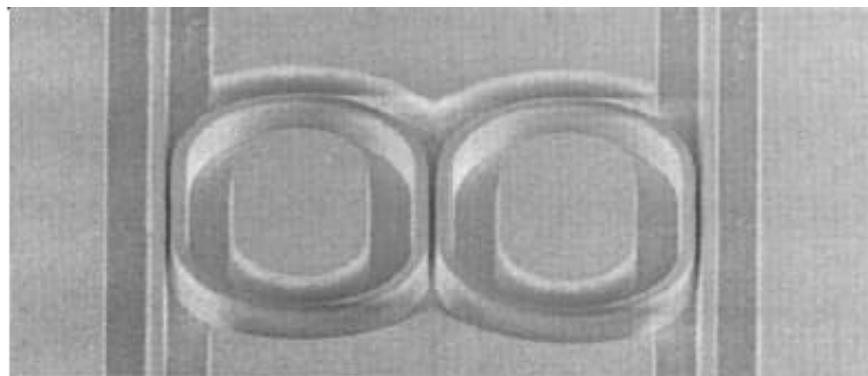
MIT, Cambridge, 2000

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

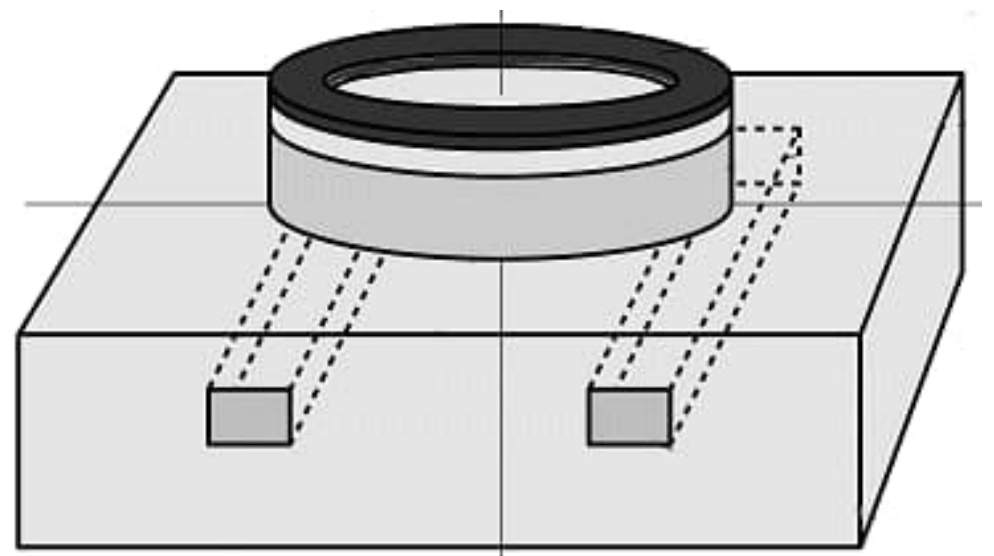
šířka vlnovodů 0,42–0,62 μm

šířka štěrbin 0,18–0,32 μm

hloubka leptání 2 μm

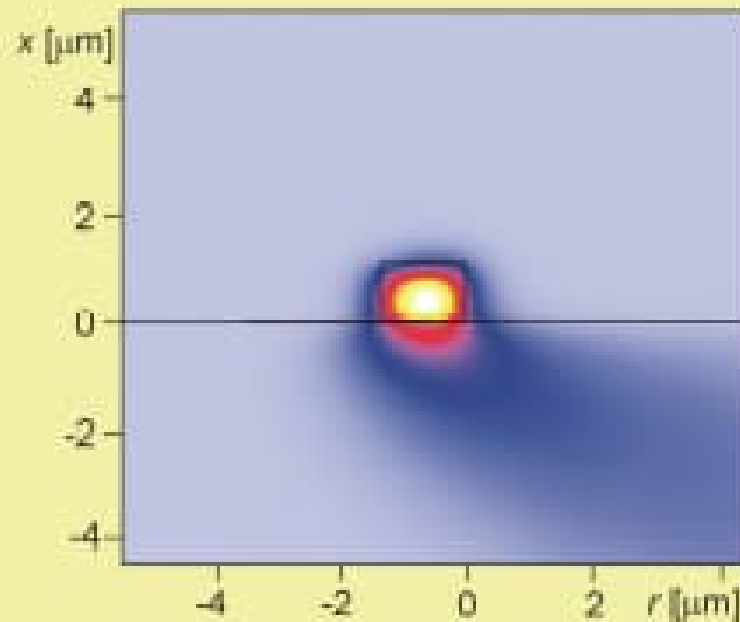


Alternativa: vertikální vazba

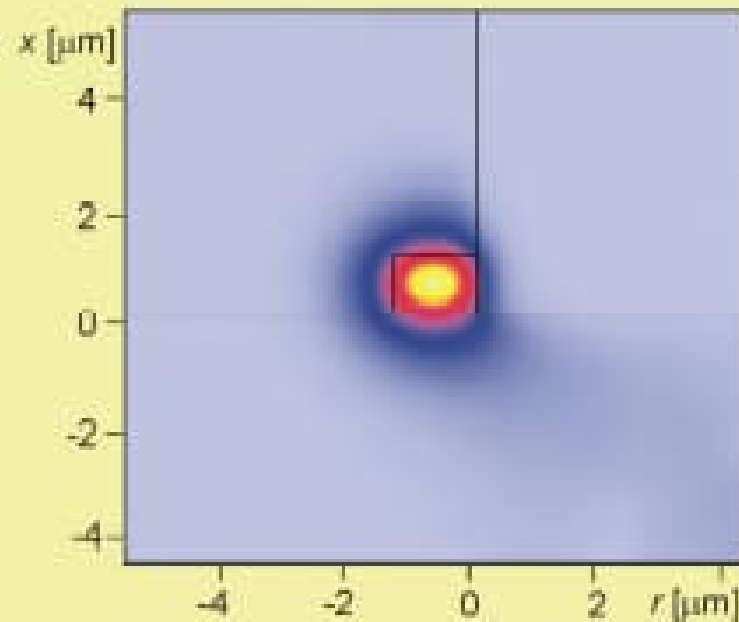


Optimalizace příčného průřezu mikrorezonátoru pro snížení ztrát vyzařováním z ohybu

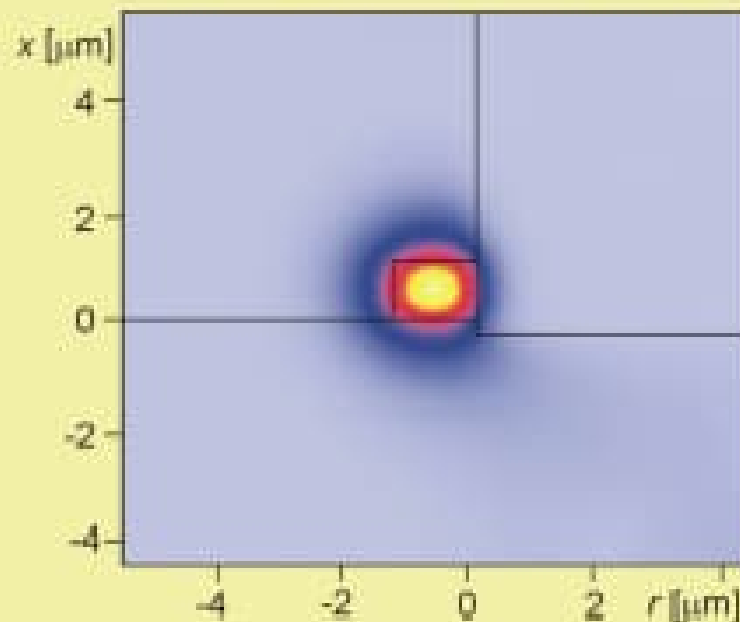
$F = 1.73$



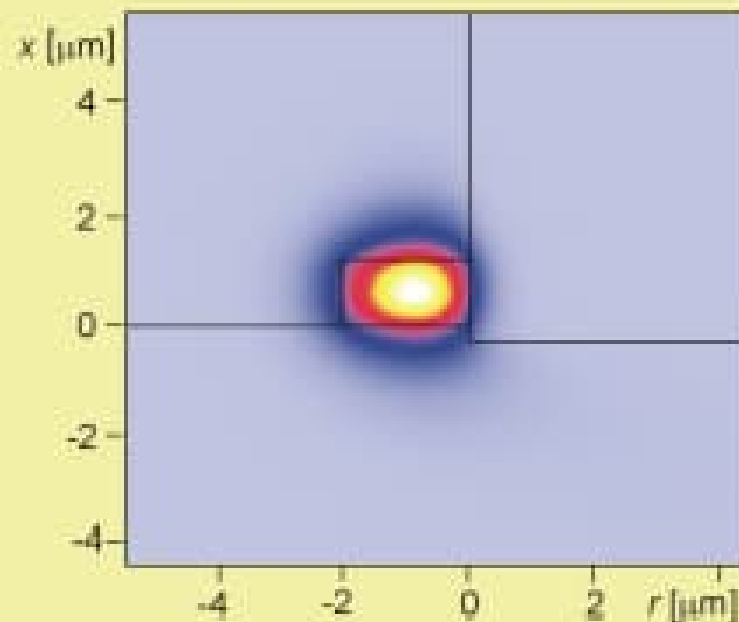
$F = 38.5$



$F = 648$



$F = 2570$

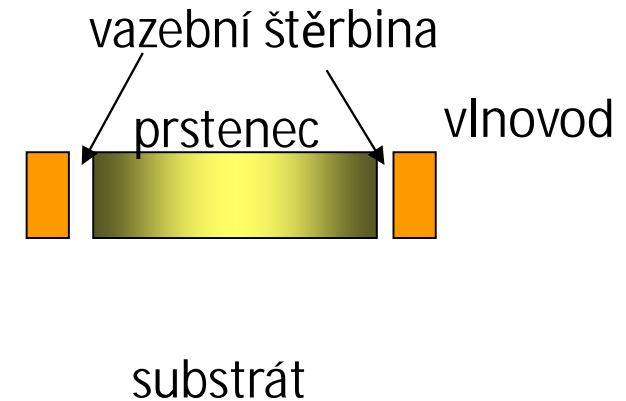


Laterální a vertikální vazba mezi μ R a vlnovodem

Laterální vazba

Jednostupňová litografie
kritická vazební štěrbina
menší flexibilita

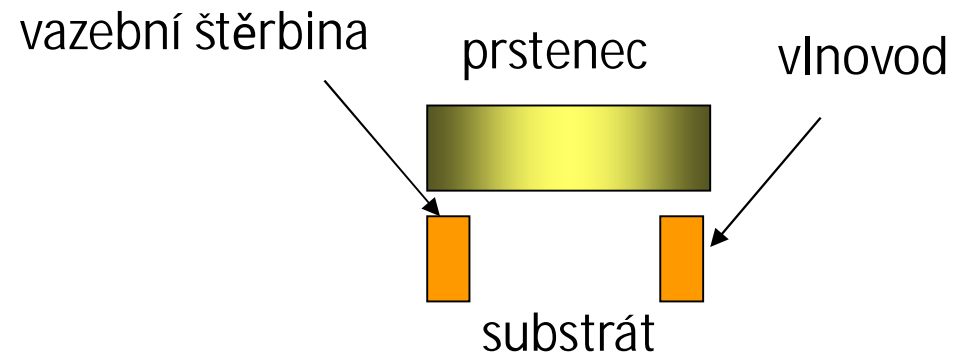
3D vektorové modelování
žadoucí



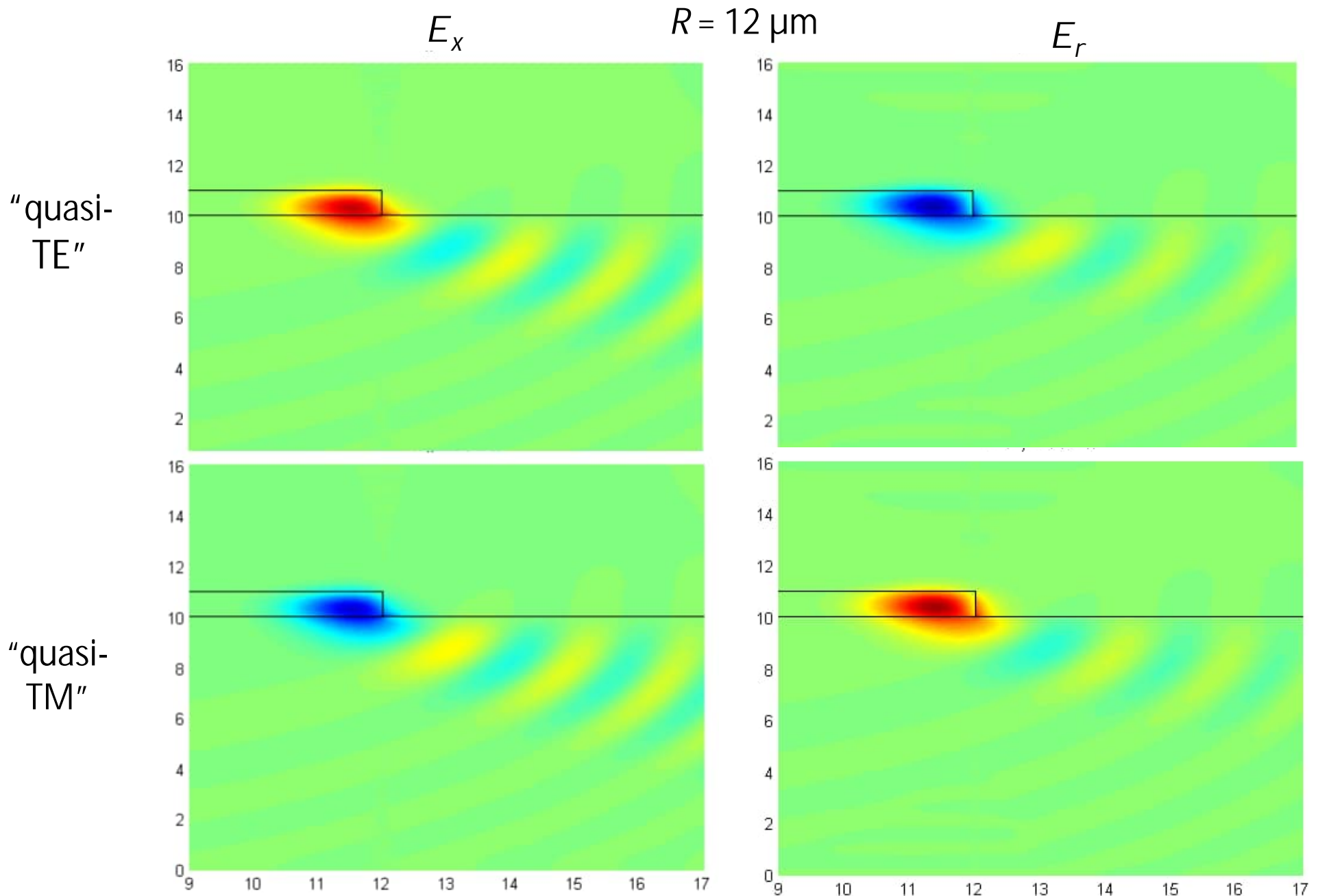
Vertikální vazba

dvoustupňová litografie
lepší reprodukovatelnost
větší flexibilita

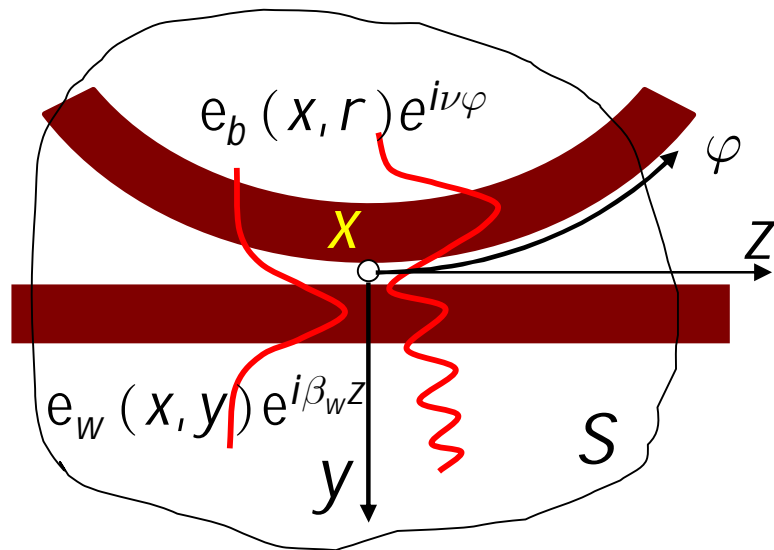
3D vektorové modelování
nezbytné



Hybridizace vidů v diskovém rezonátoru



Vazba mezi 3D přímým a zakřiveným vlnovodem



Problémy:

- Vazba mezi vedeným (bezeztrátovým) a *vytékajícím* (vyzařujícím) videm
- Role fázového synchronismu? (proměnná relativní fázová rychlost)

Přístup: lineární superpozice polí přímého a zakřiveného vlnovodu

$$E(r) \approx a_w(z) e_w(x, y) + a_b[\varphi(z)] e_b(x, r)$$

+ aplikace obecných teorémů, např. reciprocity:

$$\nabla \cdot (E_1 \times H_2 - E_2 \times H_1) = i\omega\epsilon_0 (n_1^2 - n_2^2) E_1 \cdot E_2$$

$E_1 \dots$ celkové pole, $E_2 = e_w, e_b$, pak vynásobením postupně

e_w a e_b , integrace přes plochu S s využitím ortogonality.

Získáme soustavu diferenciálních rovnic 1. řádu pro $a_w(z)$ a $a_b[\varphi(z)]$

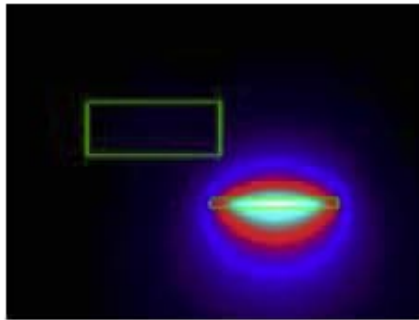
téhož tvaru jako má rovnice vázaných vidů:

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} a_w(z) \\ a_b(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \kappa_{ww}(z) & \kappa_{wb}(z) \\ \kappa_{bw}(z) & \kappa_{bb}(z) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_w(z) \\ a_b(z) \end{pmatrix}.$$

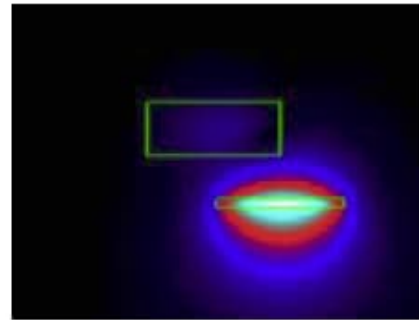
Teorie vázaných vln pro 3D horizontálně i vertikálně vázané mikrorezonátory

(spolupráce s Uni Twente - Dr. R. Stoffer, Dr.M. Hammer)

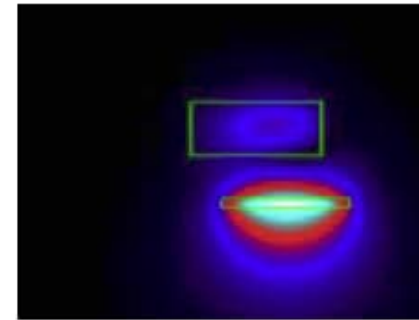
$z = -24\mu\text{m}$



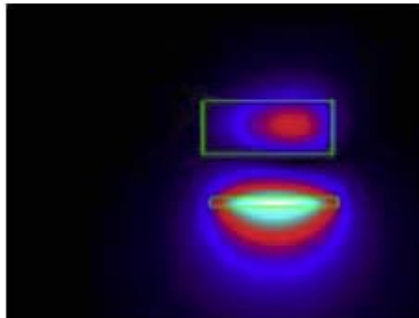
$z = -18\mu\text{m}$



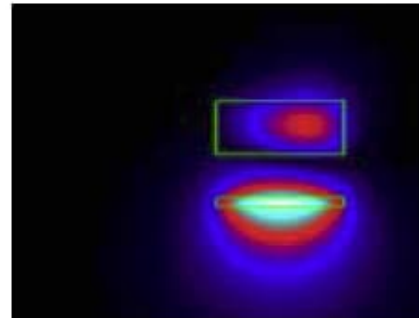
$z = -12\mu\text{m}$



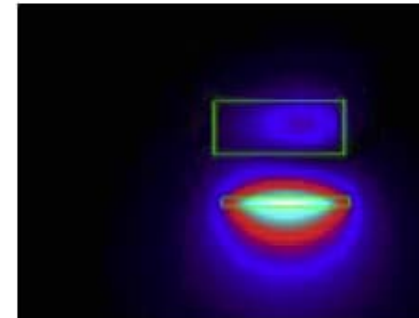
$z = -6\mu\text{m}$



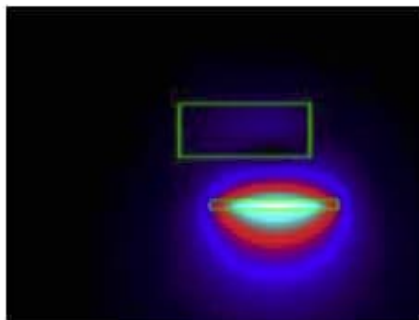
$z = 0\mu\text{m}$



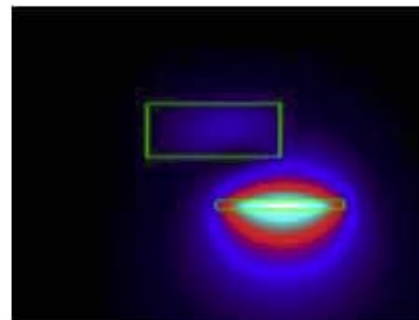
$z = 6\mu\text{m}$



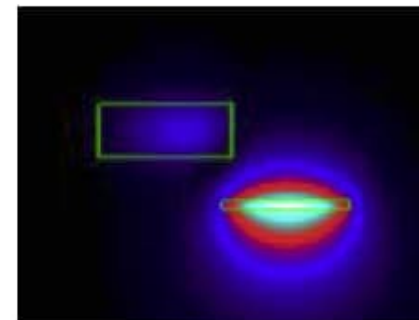
$z = 12\mu\text{m}$



$z = 18\mu\text{m}$



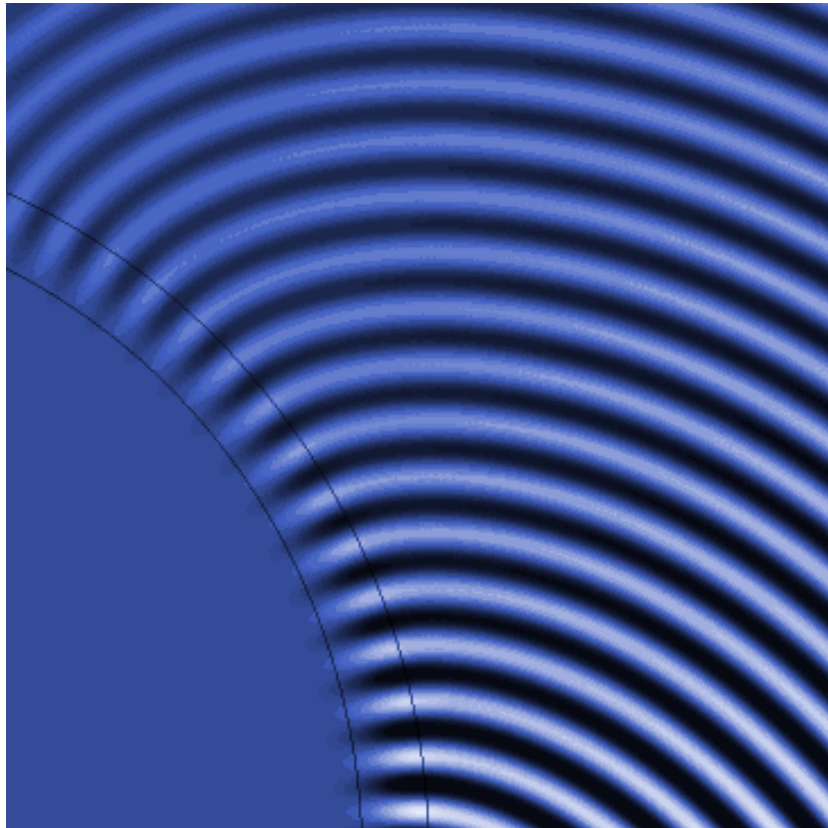
$z = 24\mu\text{m}$



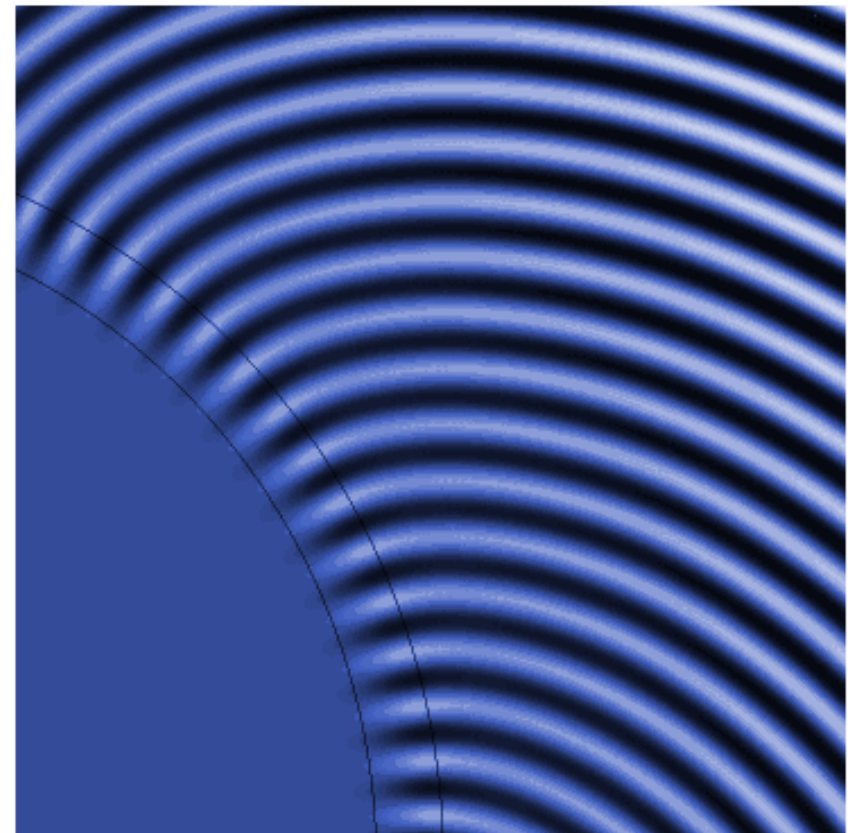
U. Twente
+ ÚRE,
Optics
Commun.
2005

Příklady rozložení polí

$$n_{sub} = 1.6, \quad n_{guide} = 1.7, \quad r = 10 \mu\text{m}$$

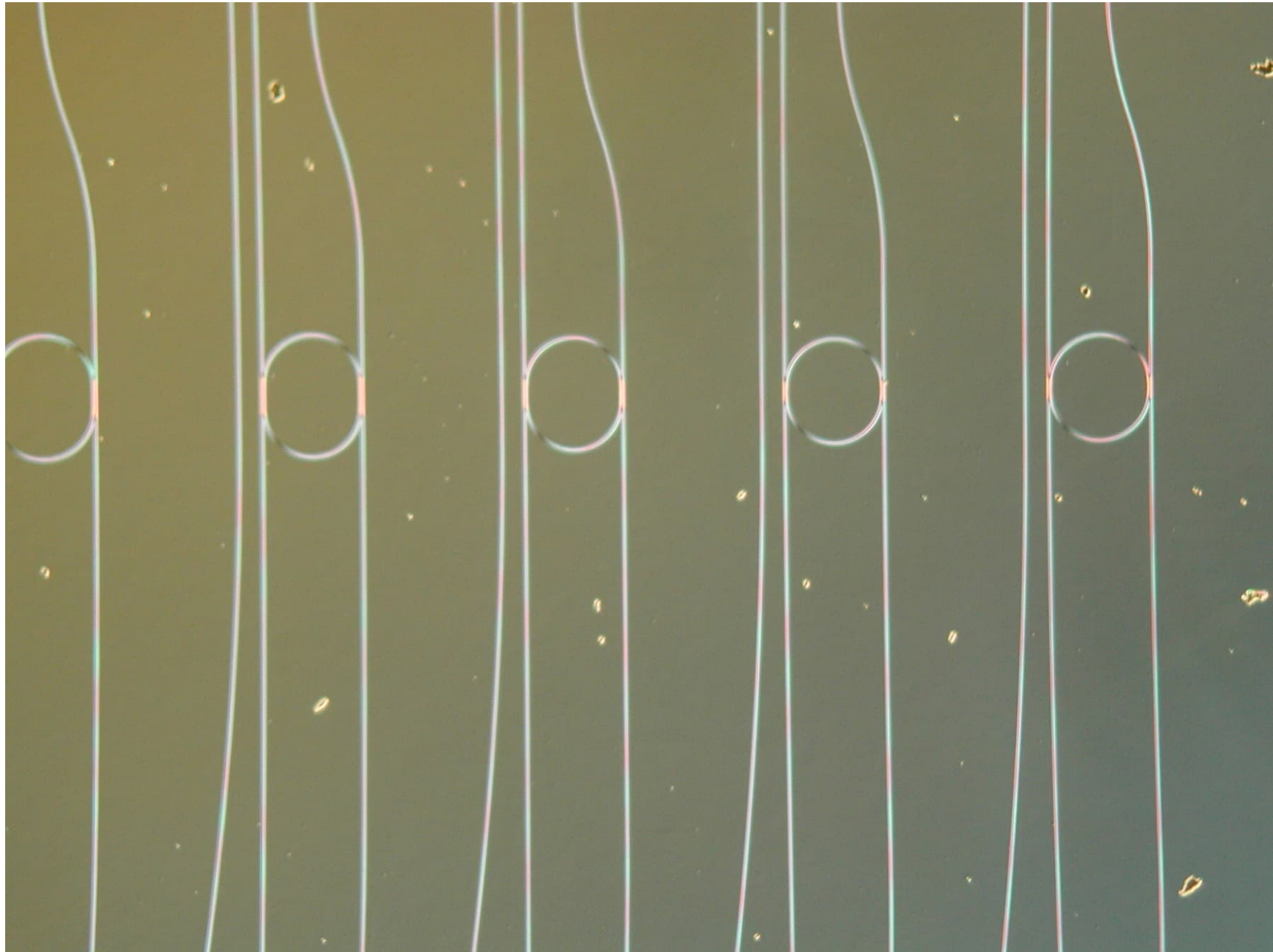


Přístup zakřiveného vlnovodu



Přístup komplexní frekvence

Experimentální vzorek mikrorezonátorů na bázi $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ (Uni Twente)



Detail vazební oblasti



Chování 2D pole pro velké poloměry

Asymptotický rozvoj Hankelovy funkce pro velké argumenty

$$H_{\nu}^{(1)}(z) \approx \sqrt{\frac{2}{\pi z}} e^{i(z - \pi\nu/2 - \pi/4)}, \quad -\pi < \arg z < 2\pi$$

$$E_z(r, \varphi) \approx D' \sqrt{\frac{1}{k_0 n_3 r}} e^{ik_0 n_3 r} e^{i\nu\varphi}, \quad r \rightarrow \infty$$

Přístup zakřiveného vlnovodu:

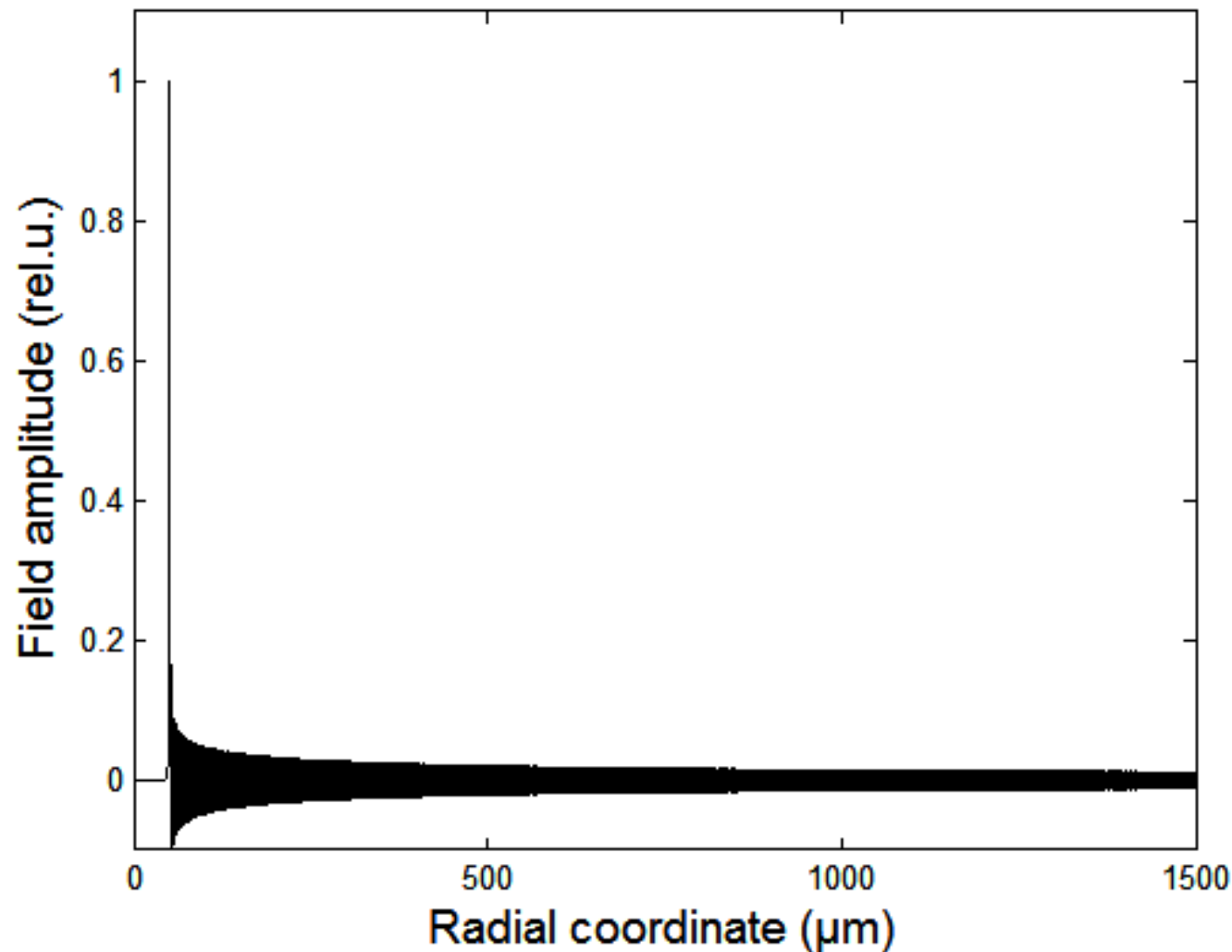
$$k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad \nu = \nu' + i\nu''$$

$$E_z(r, \varphi) \approx D' \sqrt{\frac{1}{k_0 n_3 r}} e^{ik_0 n_3 r} e^{i\nu'\varphi} e^{-\nu''\varphi}, \quad r \rightarrow \infty$$

Pole vlastního vidu *klesá* pro $r \rightarrow \infty$ jako $\frac{1}{\sqrt{k_0 n_3 r}}$

Chování 2D pole pro velké poloměry

Přístup zakřiveného vlnovodu:



Prstencový rezonátor

$$n_1 = 1.6$$

$$n_2 = 1.7$$

$$n_3 = 1.6$$

$$R = 50 \mu\text{m}$$

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

Vlnodivé filtry na bázi mikrorezonátorů

Příklad 1: Termoopticky laděný filtr vyšších řádů

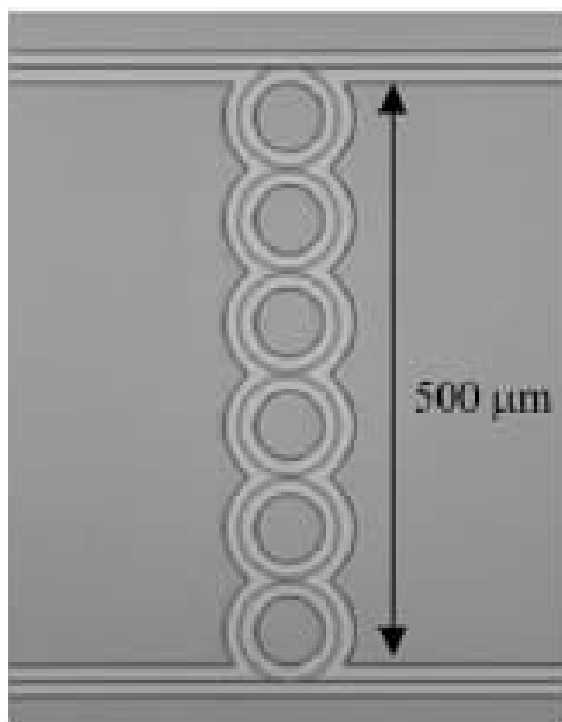
Filtry 1. až 11. řádu, \varnothing 72 μm

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

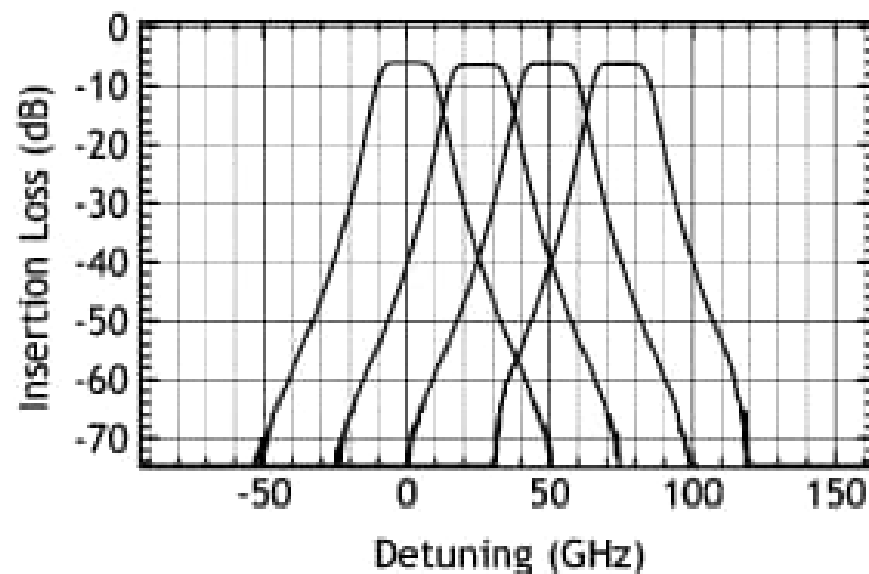
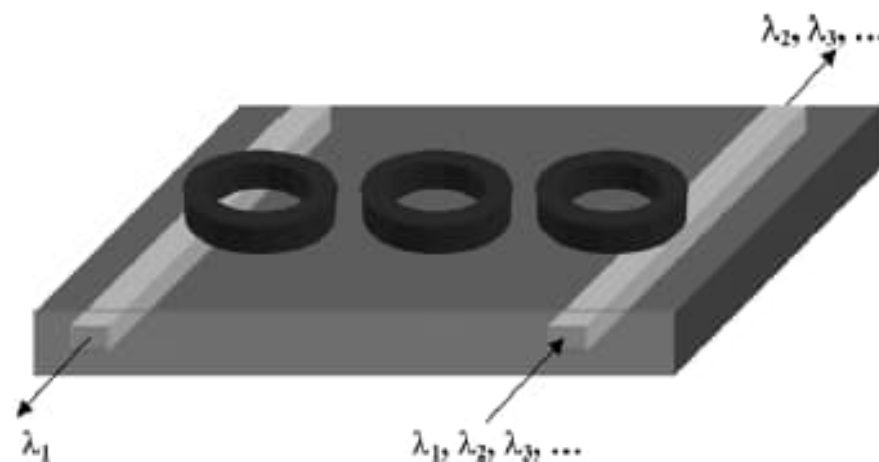
ztráty na čipu $1 \div 1,5 \text{ dB}$

Little Optics, Inc., PTL, Sept. 2004

(nyní Infinera)

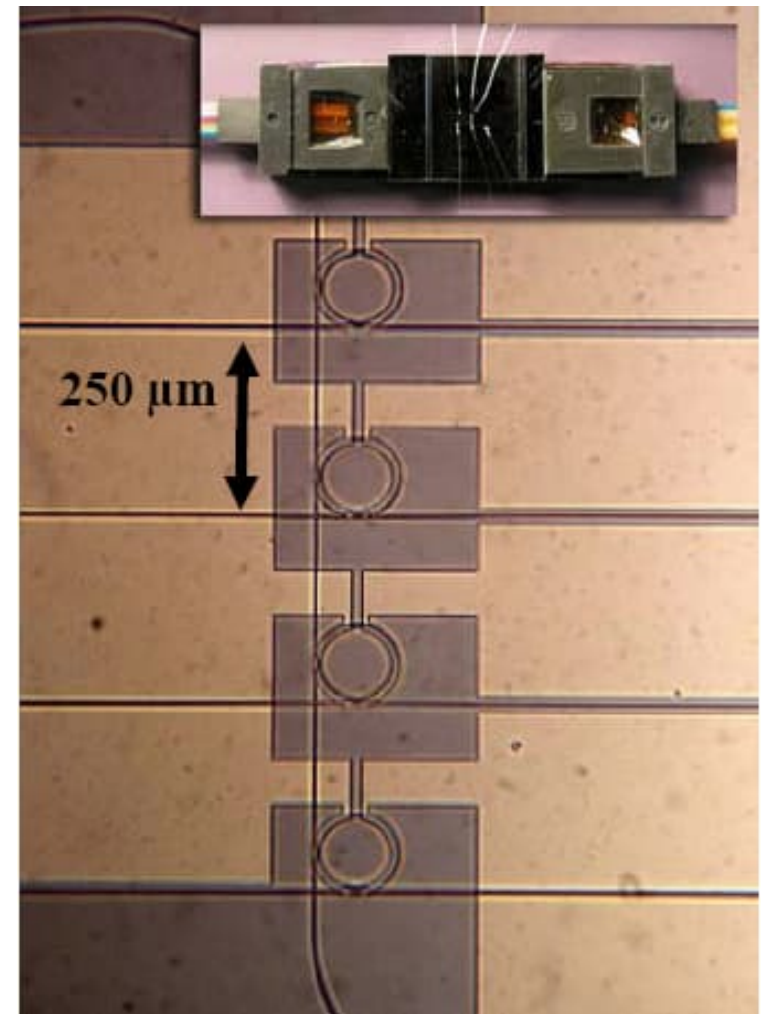
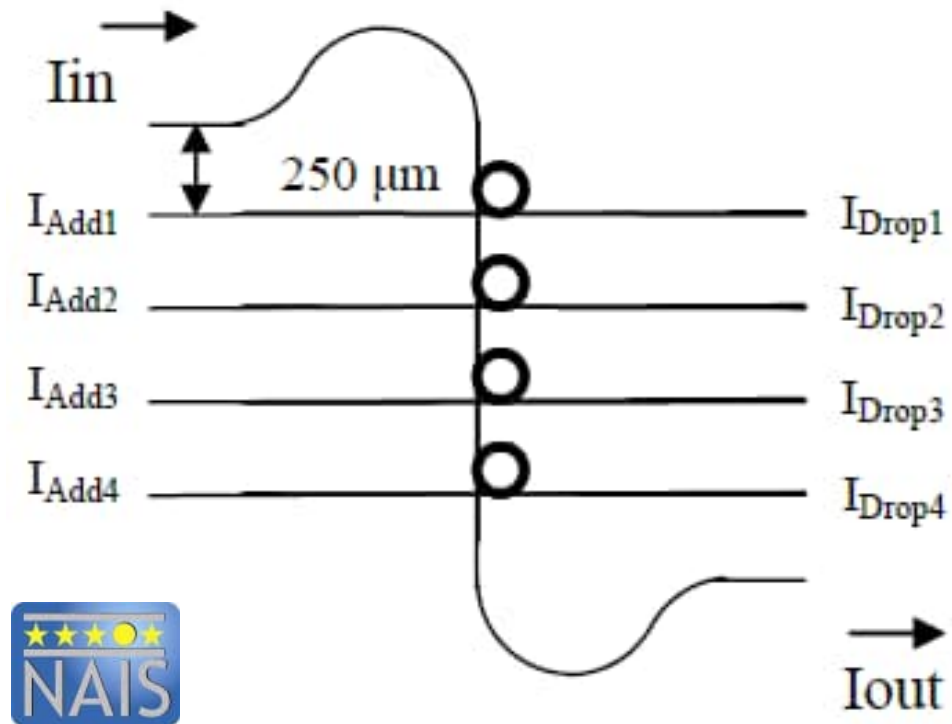


Termoopticky
laděné
spektrální
charakteristiky
filtru 5. řádu,
 $\Delta f = 25 \text{ GHz}$



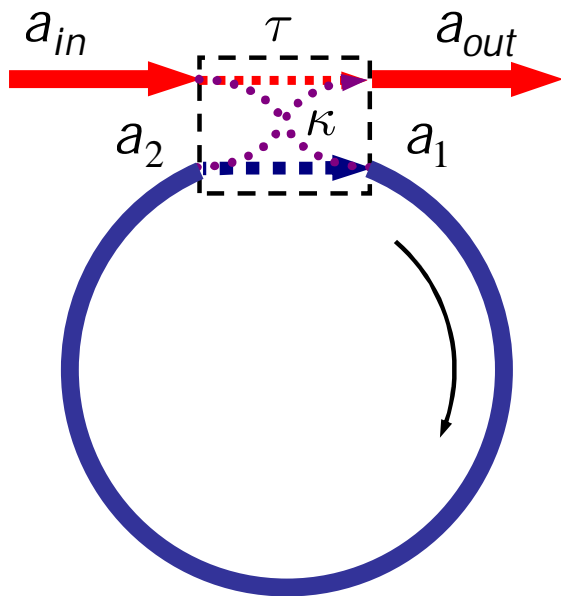
“Demonstrátor” projektu NAIS

Rekonfigurovatelný demultiplexor
s termoopticky laděnými mikrorezonátory
(Realizace: University of Twente, NL,
systémové testy: Nortel, UK)



Využití nelineárních optických efektů ve fotonických strukturách s mikrorezonátory

Nelineární šíření optického záření v mikrozónátoru: Kerrovská nelinearita → automodulace fáze



$$\begin{pmatrix} a_{out} \\ a_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tau & \kappa \\ \kappa & \tau \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_{in} \\ a_2 \end{pmatrix}$$

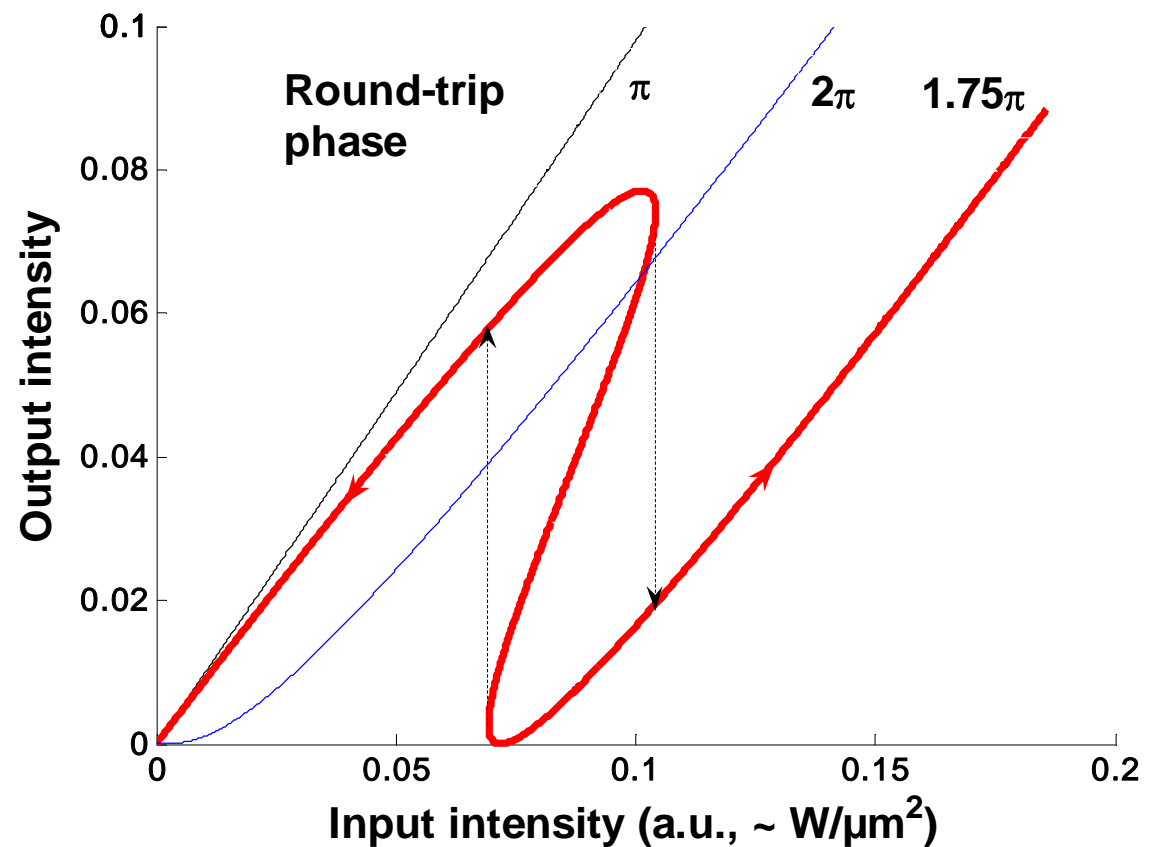
$$a_{in} = \frac{a_1 - \tau a_2}{\kappa},$$

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

$$a_2 = a_1 b e^{i\phi_L} e^{i\phi_{NL}}$$

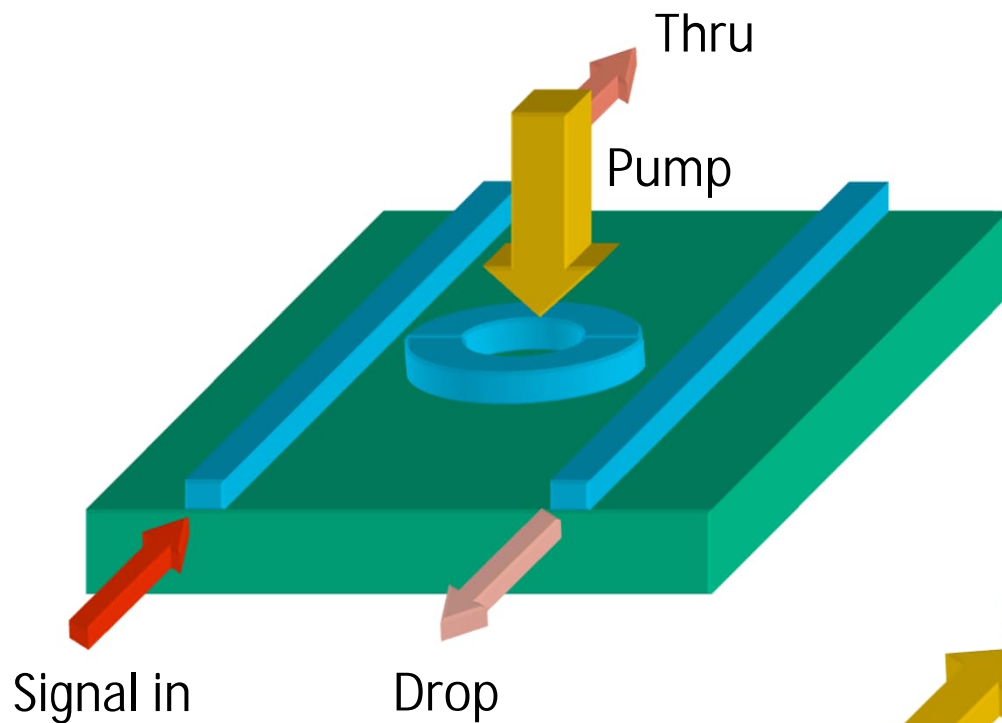
$$\phi_{NL} = -\gamma |a_1|^2 (1 - b^2) / (2 \ln b)$$

... nelineární změna fáze (automodulace)

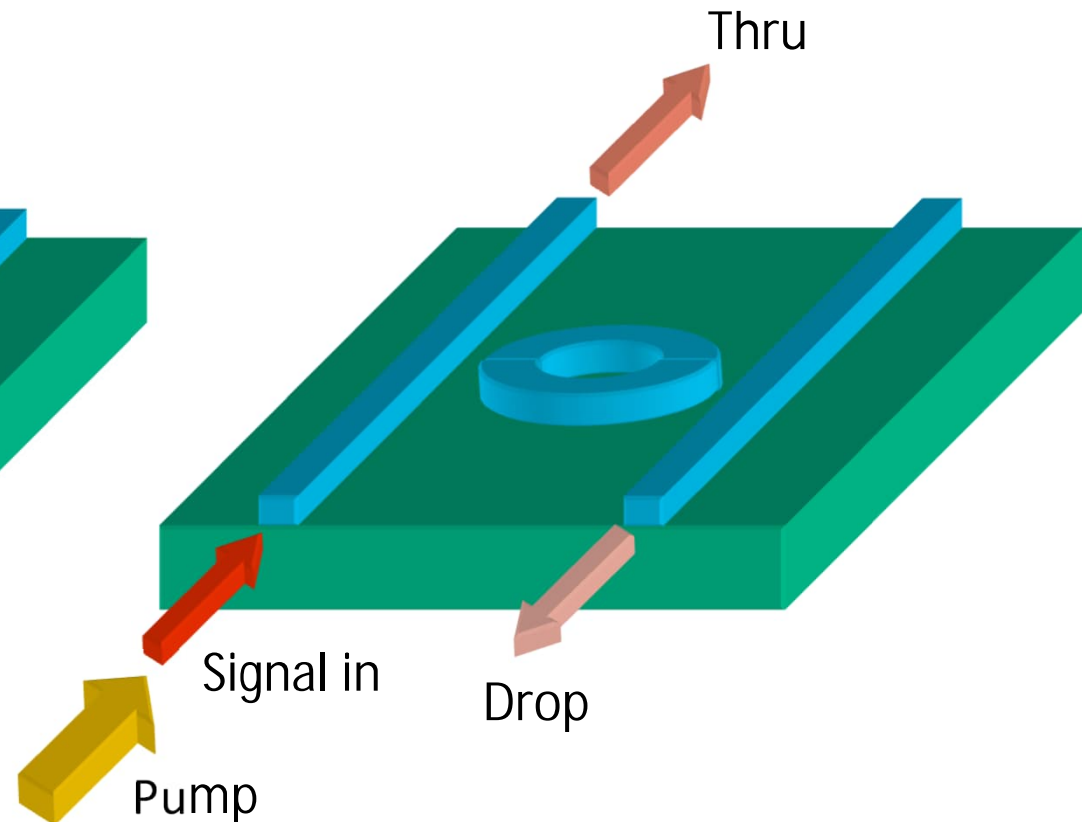


Jednoduchý model optického spínání v mikrorezonátoru

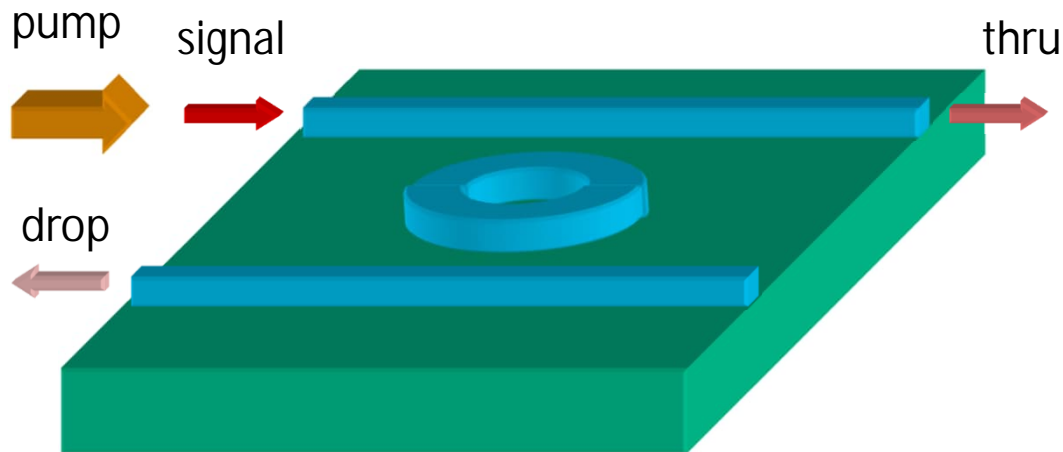
Vertikální čerpání:
jednoduché, rychlé,
vhodné pro základní experiment



Vlnodné čerpání:
rezonanční zesílení; pomalejší,
ale vhodné pro aplikace



Spínač využívající křížovou fázovou modulaci v mikrorezonátoru



Parametry:

Materiál: Křemík na SiO₂

Průměr mikrorezonátoru: 10 μm

Rozměry vlnovodů: 300×400 nm

Nosná vln.délka signálu: 1545 nm

Vlnová délka čerpacího impulsu: 1577 nm

Vstupní impuls: gaussovský, $t_s \approx 5$ ps

Čerpací impuls: gaussovský, $t_p \approx 5$ ps

Špičkový čerpací výkon: $P_p \approx 2.5$ W

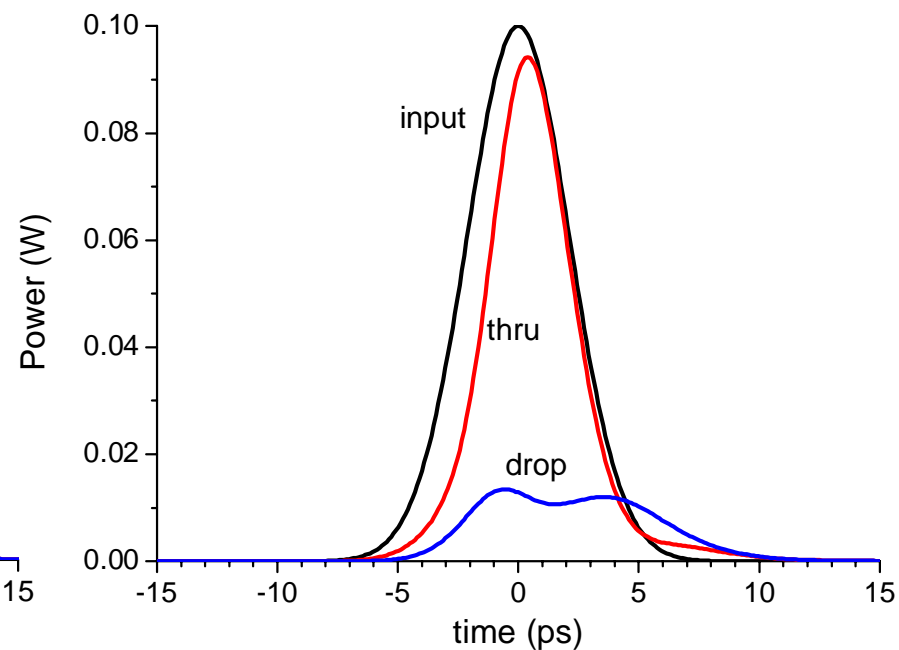
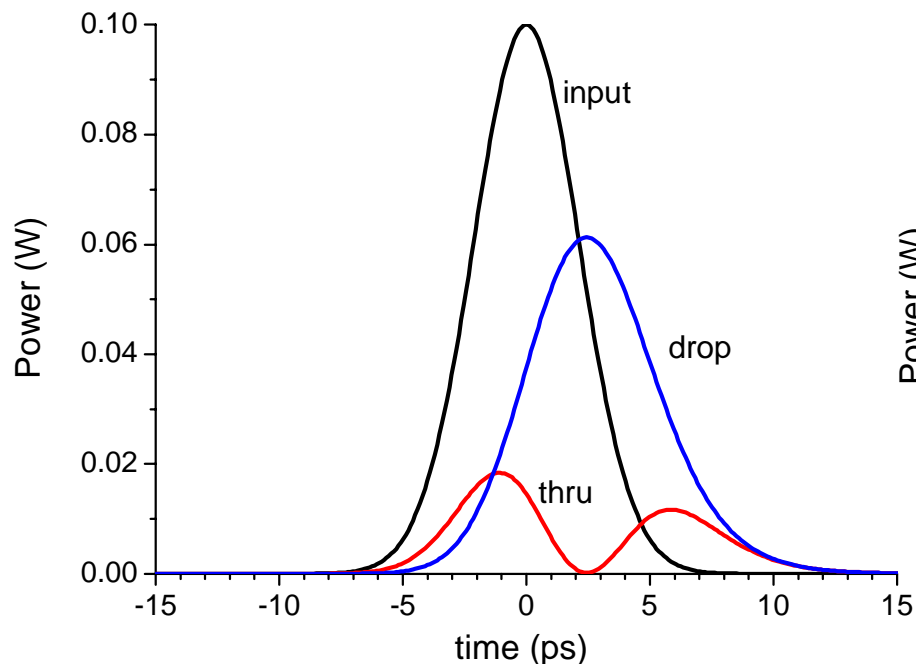
Interakce je popsána dvojicí vázaných nelineárních rovnic pro dva (spektrálně se nepřekrývající) impulsy:

$$\frac{\partial u_s(z, t)}{\partial z} - i\beta_{0,s}u_s + \beta_{1,s} \frac{\partial u_s}{\partial t} + i \frac{\beta_{2,s}}{2} \frac{\partial^2 u_s}{\partial t^2} - \frac{\beta_{3,s}}{6} \frac{\partial^3 u_s}{\partial t^3} + \dots = i\gamma_{0,s}u_s (|u_s|^2 + 2|u_p|^2) \quad \dots \text{signál}$$

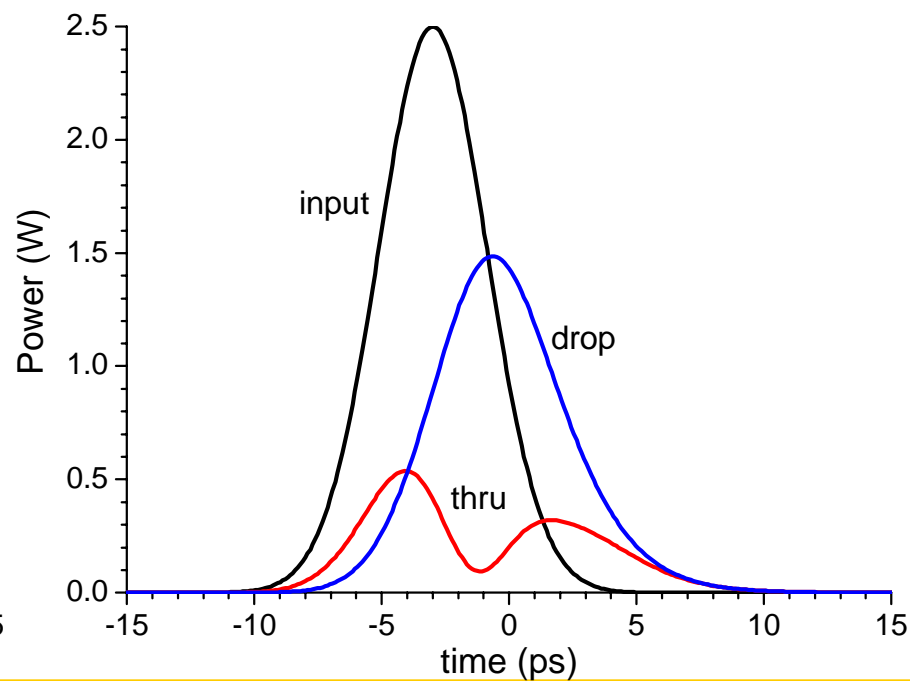
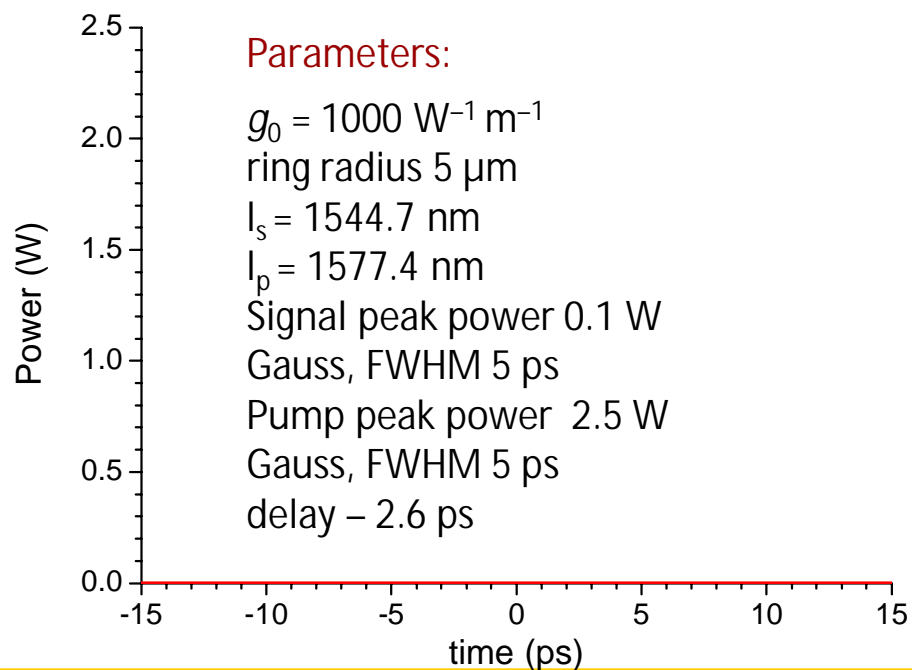
$$\frac{\partial u_p(z, t)}{\partial z} - i\beta_{0,p}u_p + \beta_{1,p} \frac{\partial u_p}{\partial t} + i \frac{\beta_{2,p}}{2} \frac{\partial^2 u_p}{\partial t^2} - \frac{\beta_{3,p}}{6} \frac{\partial^3 u_p}{\partial t^3} + \dots = i\gamma_{0,p}u_p (2|u_s|^2 + |u_p|^2) \quad \dots \text{čerpaní}$$

Nelineární optické přepínání: časová závislost

signal



pump



Výhody a nevýhody vlnovodných struktur s mikrerezonátory

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“