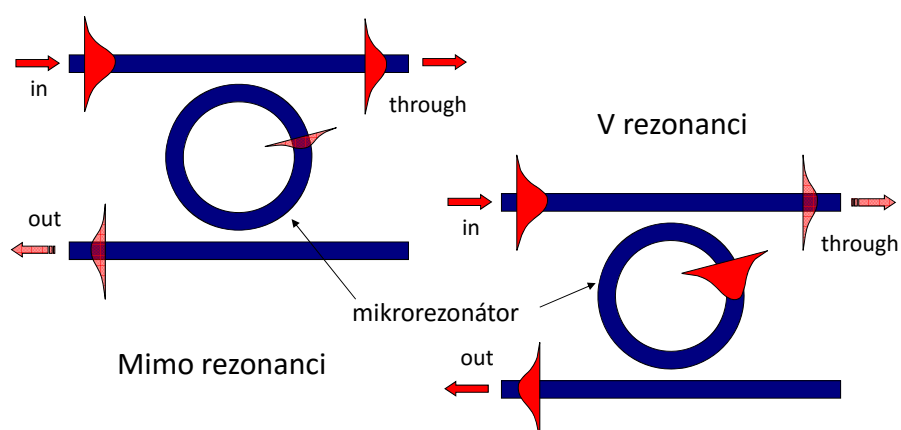


Mikrorezonátory v integrované fotonice

life

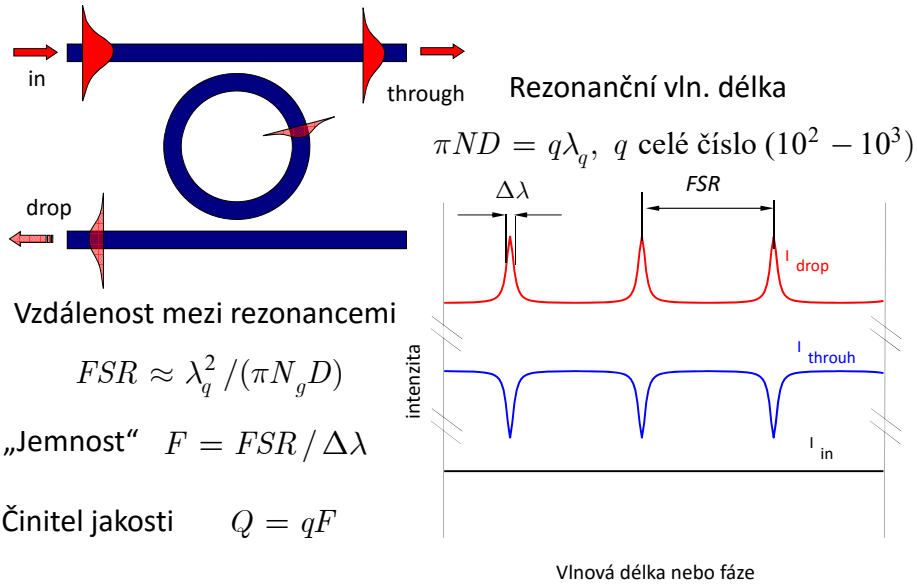
Vlnovodné struktury s mikrorezonátory

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

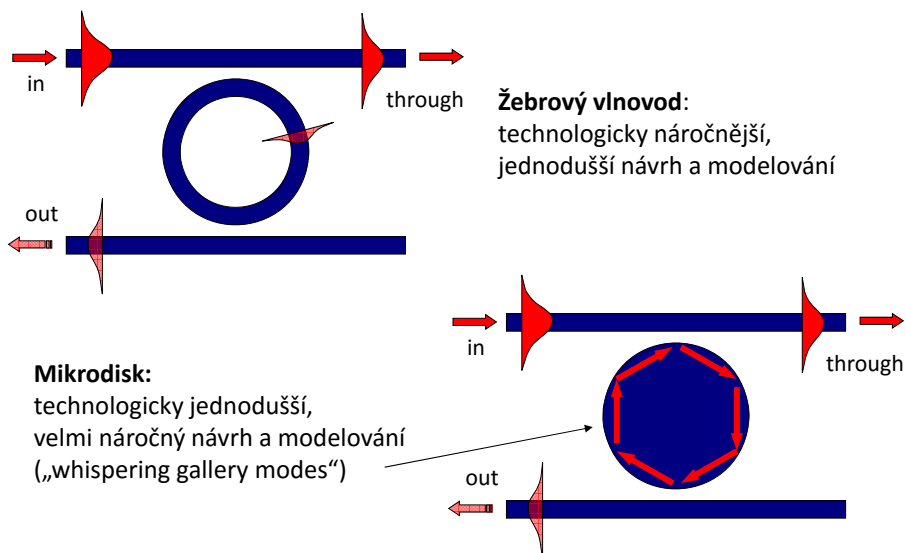


life

Spektrální vlastnosti mikrorezonátoru

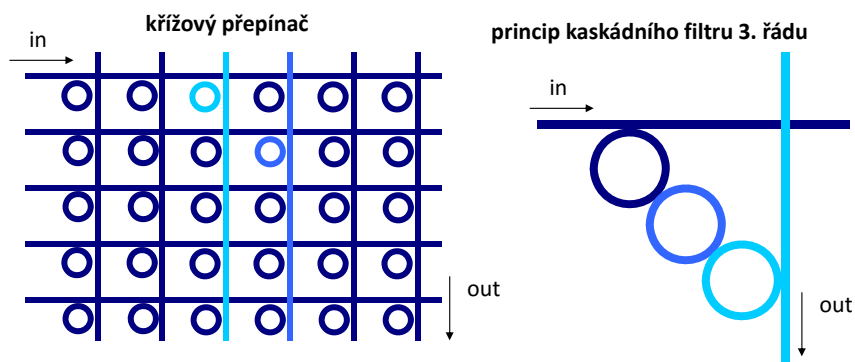


Žebrový vlnovod, nebo mikrodisk?



Mikrorezonátor jako stavební prvek integrovaných fotonických struktur

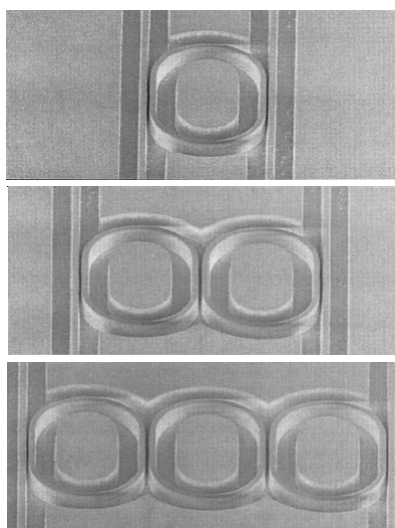
Pasivní mikrorezonátor – **spektrální filtr,**
add-drop de/multiplexor
 Syntéza tvaru spektrálních charakteristik – **kaskádní řazení** mikrorezonátorů
 Elektroopticky/termoopticky laditelný mikrorezonátor – **modulátor, přepínač** ($\Delta f \approx 1 \text{ GHz}$)



úfe

Technologické aspekty

Laterální vazba mezi mikrorezonátorem a vlnovodem je velmi kritická:



MIT, Cambridge, 2000

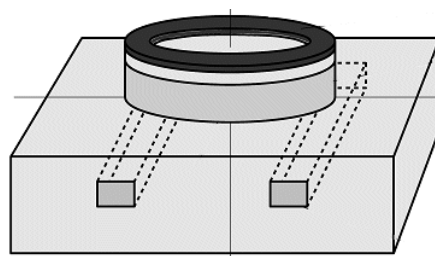
$\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}-\text{GaAs}$ systém

šířka vlnovodů $0,42-0,62 \mu\text{m}$

šířka štěrbin $0,18-0,32 \mu\text{m}$

hloubka leptání $2 \mu\text{m}$

Alternativa: **vertikální vazba**

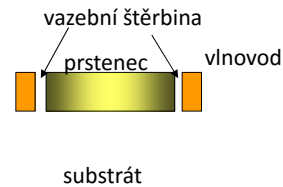


úfe

Laterální a vertikální vazba mezi μR a vlnovodem

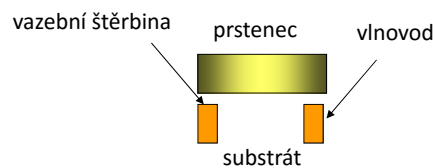
Laterální vazba

Jednostupňová litografie
kritická vazební štěrbina
menší flexibilita
3D vektorové modelování
zádoucí



Vertikální vazba

dvoustupňová litografie
lepší reprodukovatelnost
větší flexibilita
3D vektorové modelování
nezbytné

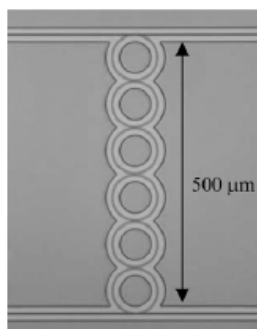


úfe

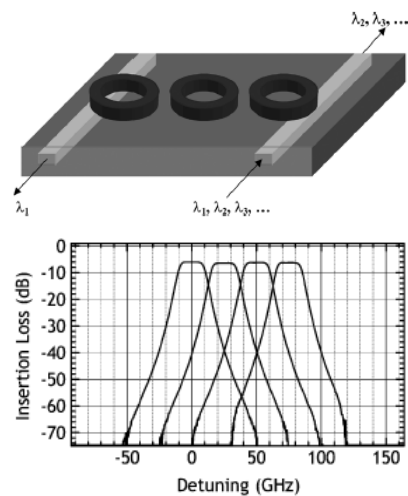
Vlnovodné filtry na bázi mikrorezonátorů

Příklad 1: Termoopticky laděný filtr vyšších řádů

Filtry 1. až 11. řádu, $\varnothing 72 \mu m$
 $SiO_2/Hydex$ ($n_s = 1,45$, $n_g = 1,7$), $\varnothing \approx 50 \mu m$
ztráty na čipu $1 \div 1,5$ dB
Little Optics, Inc., PTL, Sept. 2004
(nyní Infinera)



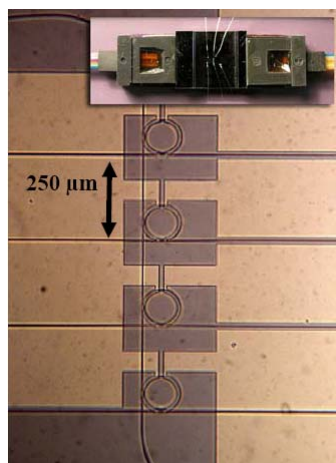
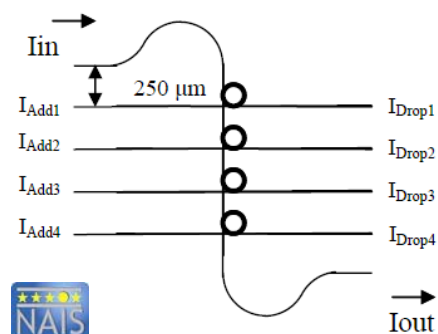
Termoopticky
laděné
spektrální
charakteristiky
filtru 5. řádu,
 $\Delta f = 25$ GHz



úfe

“Demonstrátor” projektu NAIS

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

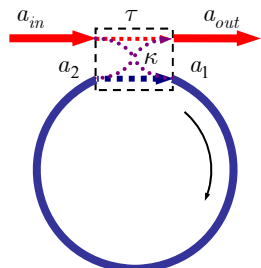


life

**Využití nelineárních optických efektů
ve fotonických strukturách s mikrozrezonátory**

life

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



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

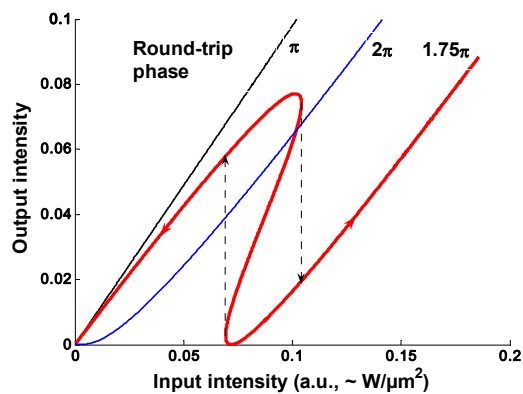
$$a_{in} = \frac{a_1 - \tau a_2}{\kappa},$$

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

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

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

... nelineární změna fáze (automodulace)

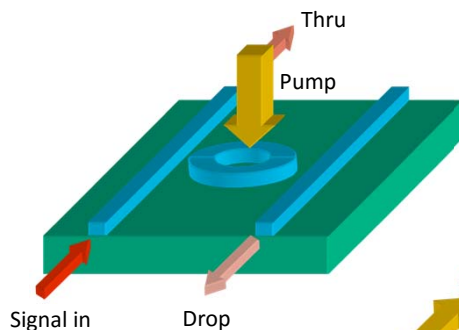


úfe

Jednoduchý model optického spínání v mikrozónátoru

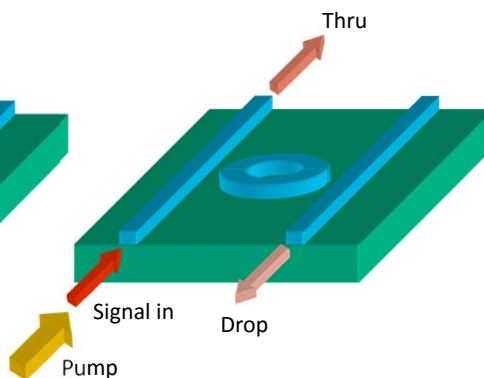
Vertikální čerpání:

jednoduché, rychlé,
vhodné pro základní experiment



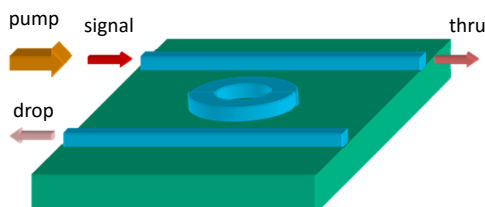
Vlnovodné čerpání:

rezonanční zesílení; pomalejší,
ale vhodné pro aplikace



úfe

Spínač využívající křížovou fázovou modulaci v mikrozreznátoru



Parametry:

Materiál: Křemík na SiO₂
 Průměr mikrozreznátoru: 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

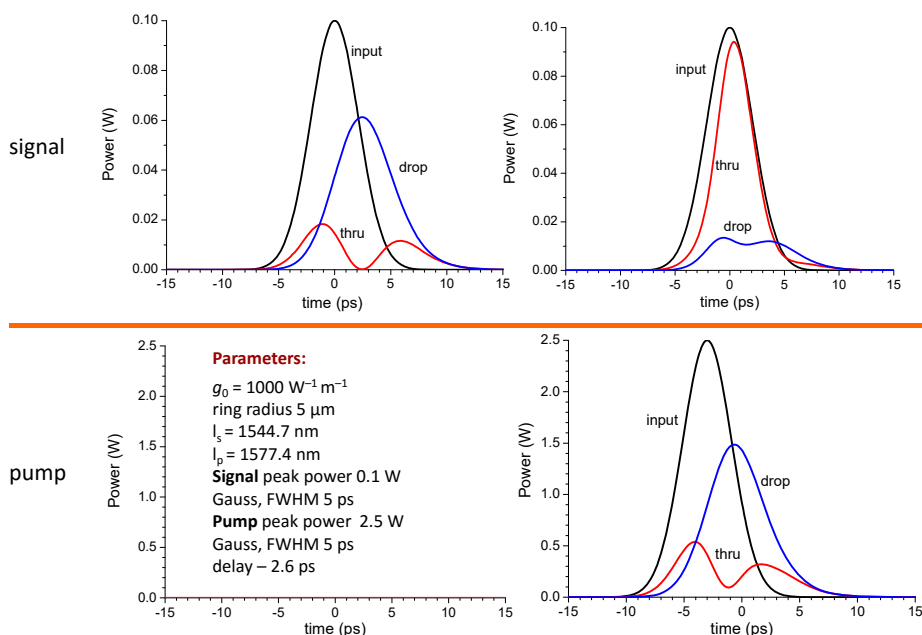
Interakce je popsána dvojicí vázaných nelineárních rovnic pro dva (spektrálně se nepřekrývající) impulsy:

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

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

úfe

Nelineární optické přepínání: časová závislost



úfe

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“

úfe

Měření parametrů

fotonických vlnovodných struktur

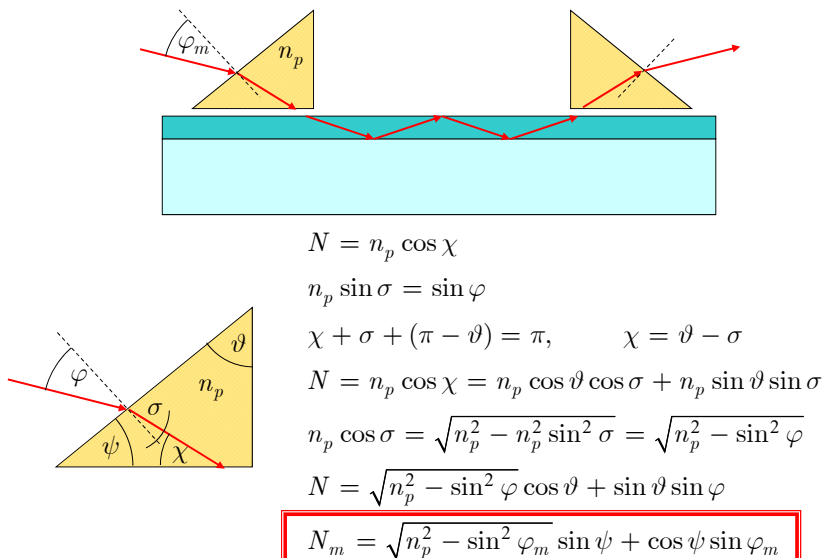
úfe

Metody měření základních parametrů vlnovodů

1. Vidová spektroskopie planárních vlnovodů
 - metody určování profilu indexu lomu
 - dvouhranolová, jednohranolová metoda
 - měření s pomocí vazební mřížky
2. Měření útlumu vlnovodů
 - útlum planárních vlnovodů
 - útlum kanálkových vlnovodů – rezonátorová metoda
 - měření grupového indexu lomu
3. Měření spektrálních vlastností vlnovodných struktur
 - měření spektrálních charakteristik
4. Měření dynamických vlastností vlnovodných struktur
 - měření parametrů EO modulátorů
 - měření vlastností AO vlnovodů

úfe

Vidová spektroskopie planárních vlnovodů



$$N = n_p \cos \chi$$

$$n_p \sin \sigma = \sin \varphi$$

$$\chi + \sigma + (\pi - \vartheta) = \pi, \quad \chi = \vartheta - \sigma$$

$$N = n_p \cos \chi = n_p \cos \vartheta \cos \sigma + n_p \sin \vartheta \sin \sigma$$

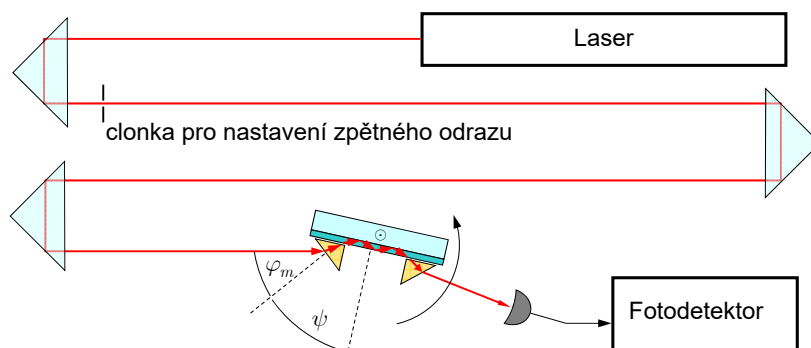
$$n_p \cos \sigma = \sqrt{n_p^2 - n_p^2 \sin^2 \sigma} = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi}$$

$$N = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi} \cos \vartheta + \sin \vartheta \sin \varphi$$

$$N_m = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi_m} \sin \psi + \cos \psi \sin \varphi_m$$

úfe

Experimentální uspořádání: metoda dvou hranolů



Vlnovod je umístěn na otočném stolku (goniometru)

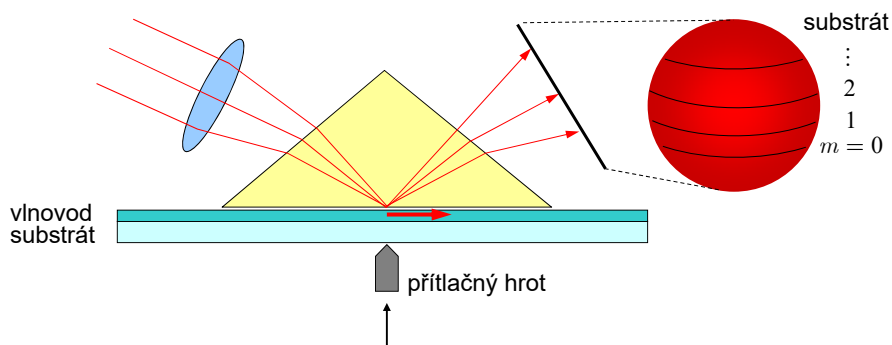
1. Nastavíme kolmý odraz od vlnovodu
2. Nastavíme kolmý odraz od hranolu
3. Nastavujeme synchronní úhly φ_m
4. Vypočteme N_m

$$N_m = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi_m} \sin \psi + \cos \psi \sin \varphi_m$$

Často lze současně měřit i index lomu podložky

úfe

Jednohranolová metoda („tmavá“ vidová spektroskopie)



Pokud synchronní úhly všech vidů leží uvnitř vstupního kužele, vybudí se všechny vidy současně. Na stínítku vznikne světlý kruh s tmavými čarami v místech odpovídajících výstupním úhlům vidů, poněvadž vybudené vidy odvedou energii z místa dopadu optického svazku.

Stínítko lze okalibrovat přímo v hodnotách ef. indexů lomu, nebo je možno smírat rozložení pole CCD kamerou a ze zpracování obrazu vyhodnotit hodnoty ef. indexů lomu

úfe

Určení profilu indexu lomu planárního vlnovodu ze spektra vedených vidů

$$k_0 d \sqrt{n_g^2 - N_m^2} = \arctan \left(\left(\frac{n_g}{n_s} \right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_g^2 - N_m^2}} \right) + \arctan \left(\left(\frac{n_g}{n_s} \right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_g^2 - N_m^2}} \right) + m\pi$$

U **vrstvého** vlnovodu stačí v principu znát hodnotu ef. indexů 2 vidů, poněvadž neznáme 2 parametry – tloušťku a index lomu vlnovodné vrstvy.

Pokud je vidů víc, hledáme minimum výrazu

$$\sigma_d = \frac{1}{M-1} \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} (d_m - \bar{d})^2}, \quad \bar{d} = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-1} d_m$$

$$d_m = \frac{1}{k_0 \sqrt{n_g^2 - N_m^2}} \left\{ \arctan \left[\left(\frac{n_g}{n_s} \right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_g^2 - N_m^2}} \right] + \arctan \left[\left(\frac{n_g}{n_s} \right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_s^2}{n_g^2 - N_m^2}} \right] + m\pi \right\}$$

jako funkci indexu lomu vrstvy n_g .

Nejpravděpodobnější hodnota tloušťky je pak $\bar{d}$.

life

Určení profilu indexu lomu difúzního vlnovodu ze spektra vedených vidů

WKB aproximace: $k_0 \int_0^{x_0} \sqrt{n^2(x) - N_m^2} dx = \arctan \left(\left(\frac{n(0)}{n_a} \right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_a^2}{n^2(0) - N_m^2}} \right) + \left(m + \frac{1}{4} \right) \pi$

$\approx \frac{\pi}{2}$, pokud $n^2(0) - N_m^2 \ll N_m^2 - n_a^2$

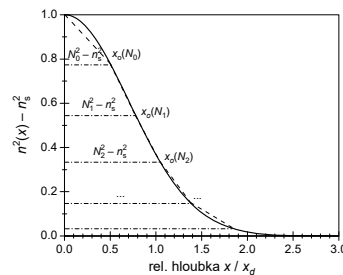
$$f(N_m) = k_0 \int_0^{x_0(N_m)} \sqrt{n^2(x) - N_m^2} dx \cong \left(m + \frac{3}{4} \right) \pi.$$

Předpokládáme profil indexu lomu ve tvaru po částech lineární funkce s vrcholy v bodech (x_m, N_m) .

Integrál je pak možno spočítat analyticky; získáme rekurentní vzorec

$$x_m = x_{m-1} + \left(N_{m-1}^2 - N_m^2 \right)^{-1/2} \times \left\{ \frac{3}{4} \lambda \left(m - \frac{1}{4} \right) - \sum_{k=1}^{m-1} \frac{x_k - x_{k-1}}{N_{k-1}^2 - N_k^2} \left[\left(N_{k-1}^2 - N_m^2 \right)^{3/2} - \left(N_k^2 - N_m^2 \right)^{3/2} \right] \right\}$$

(White a Heidrich. 1976)



pro určení „bodů obratu“ (hloubek vlnovodu, ve kterých je hodnota indexu lomu vlnovodu rovna efektivnímu indexu lomu daného vidu).

Kritické je určení hodnoty $n(0)$ na povrchu vlnovodu.

life

Určení profilu indexu lomu gradientního vlnovodu: dvouparametrický profil

Parametry obecného dvouparametrického profilu (gaussovského, parabolického, lineárního ap. lze určovat podobně: necht'

$$n^2(x) = \begin{cases} n_s^2 + [n^2(0) - n_s^2]f(x/x_d), & \xi \geq 0, \\ n_a^2, & \xi < 0 \end{cases}$$

$f(\xi)$ je monotónně klesající funkce, $0 < f(\xi) < 1$.

Neznáme povrchovou hodnotu indexu lomu $n(0)$ a difúzní hloubku x_d .

Pak můžeme použít postup jako u vrstvy:

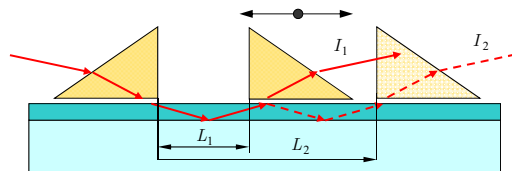
$$k_0 x_{d,m} = \frac{\left(m + \frac{3}{4}\right)\pi}{\int_0^{x_0(N_m)/x_d} \sqrt{n^2(x/x_d) - N_m^2} d(x/x_d)} \quad \bar{x}_d = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-1} x_{d,m}$$

$$\sigma_d = \frac{1}{M-1} \sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} (x_{d,m} - \bar{x}_d)^2}.$$

úfe

Měření útlumu planárních vlnovodů

Dvouhranolová metoda:

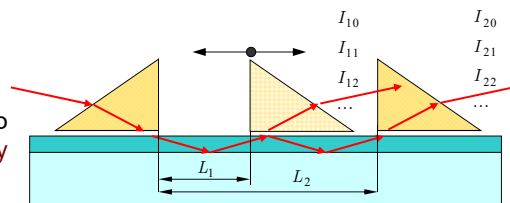


$$b = \frac{10 \log(I_{out,1} / I_{out,2})}{(L_2 - L_1)} \quad [\text{dB/cm}]$$

Problém: neměnit účinnost (výstupní) vazby

Tříhranolová metoda:

Měníme polohu středního
hranolu bez změny vazby
vstupního a výstupního
hranolu (!!!)



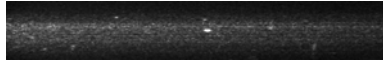
Problém: vzorek musí mít dostatečně velké rozměry

Přesnost metody typicky řádu 1 dB/cm

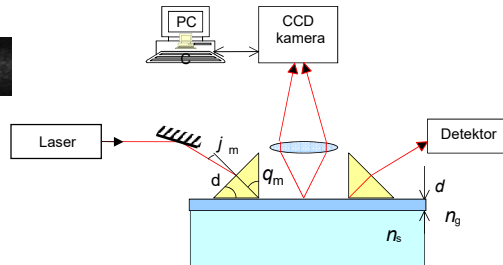
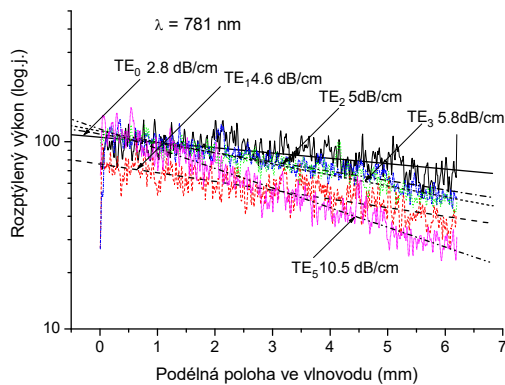
úfe

Měření útlumu planárních vlnovodů

Metoda snímání rozptýleného záření



Příklad sejmuté stopy
v GaN vlnovodu na safíru



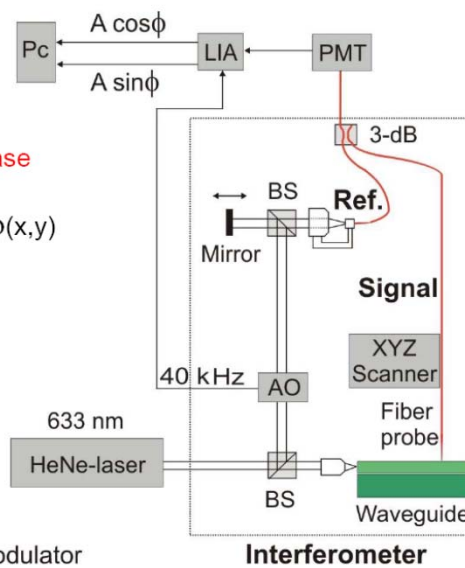
Útlum roste s vidovým indexem, což je typická vlastnost vlnovodů, u nichž je dominantním mechanismem ztrát rozptyl na rozhraních mezi vlnovodnou vrstvou a okolními prostředími

Měření s fázovým kontrastem a heterodynní detekcí

Heterodyne detection:

Both **amplitude** and the **phase** of light are retrieved
($A(x,y)\cos\phi(x,y)$ & $A(x,y)\sin\phi(x,y)$ measured)

ϕ = Phase
 A = Amplitude
LIA = Lock-In Amplifier
AO = Acousto-Optic Modulator

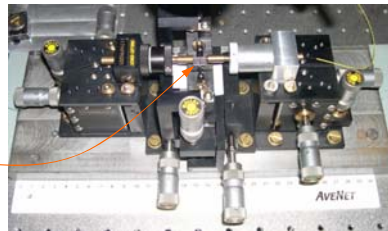
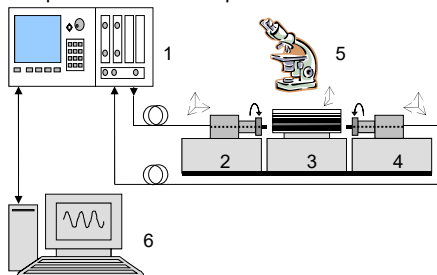


Měření útlumu kanákových vlnodů

Metoda Fabryových-Perotových rezonancí



Uspořádání měřicího pracoviště



Kanákový vlnod se chová jako FP rezonátor v důsledku odrazů od leštěných čel vlnodů

Modální transmittance

$$T = \left| \frac{(1 - R^2) \exp(-\alpha L)}{1 + R^2 \exp(-\alpha L) \exp(2ik_0NL)} \right|^2,$$

R je modální reflektance, α činitel útlumu, L délka

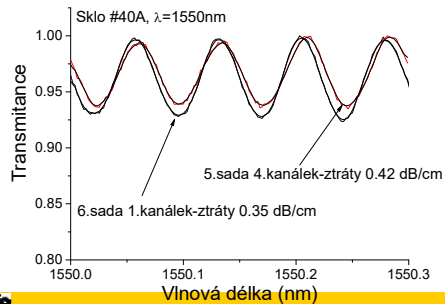
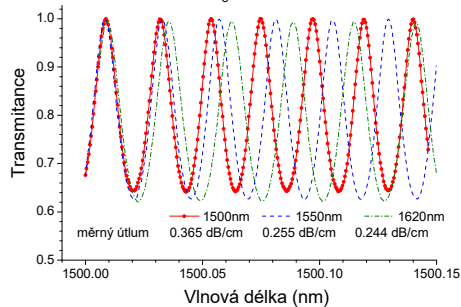
Z poměru max. a min. transmittance vyjádříme měrný útlum (dB/cm)

$$b = \frac{4.34}{L} \left(\ln \frac{1 + \sqrt{K}}{1 - \sqrt{K}} - 2 \ln \frac{N + 1}{N - 1} \right), \quad K = \frac{T_{\max}}{T_{\min}}.$$

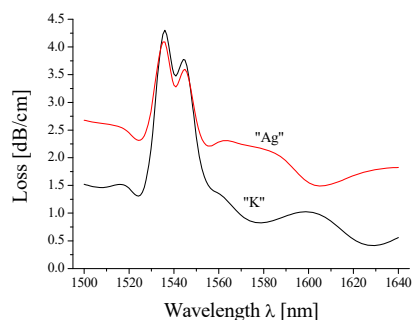
úfe

Měření útlumu kanákových vlnodů

Záznam měření Ti:LiNbO₃ vlnodů



Spektrální závislost útlumu vlnodů vytvořených iontovými výměnami Ag⁺↔Na⁺ a K⁺↔Na⁺ ve skle dopovaném Er³⁺



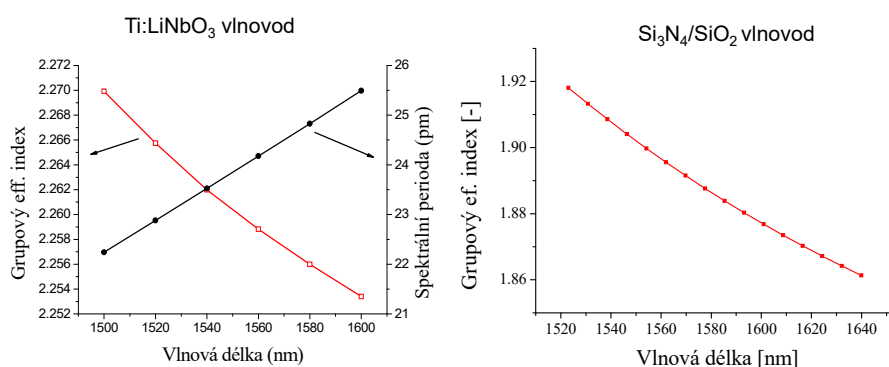
úfe

Měření grupového indexu lomu kanálkových vlnovodů

Rezonanční podmínka FP rezonátoru je dána vztahem $\frac{2\pi\nu_q}{c} N(\nu_q)L = \pi q$, q je celé číslo

Pro vzdálenost sousedních rezonancí (FSR) platí $\Delta[\nu N(\nu)] = \left(N + \nu \frac{dN}{d\nu}\right) d\nu = N_g \Delta\nu = \frac{c}{2L}$,

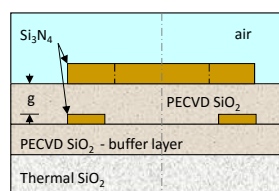
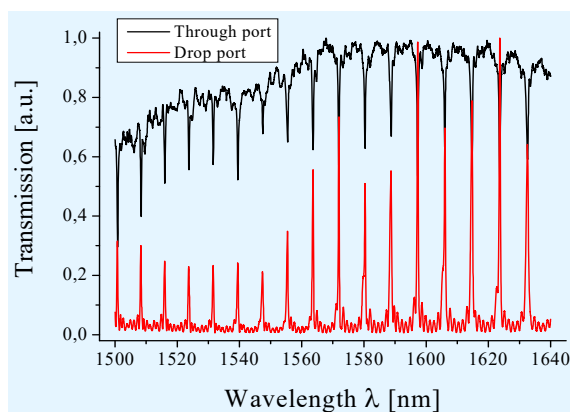
$\Delta\nu = \frac{c}{2N_g L}$, neboli $N_g = \frac{c}{2\Delta\nu L} = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda L}$... grupový index lomu

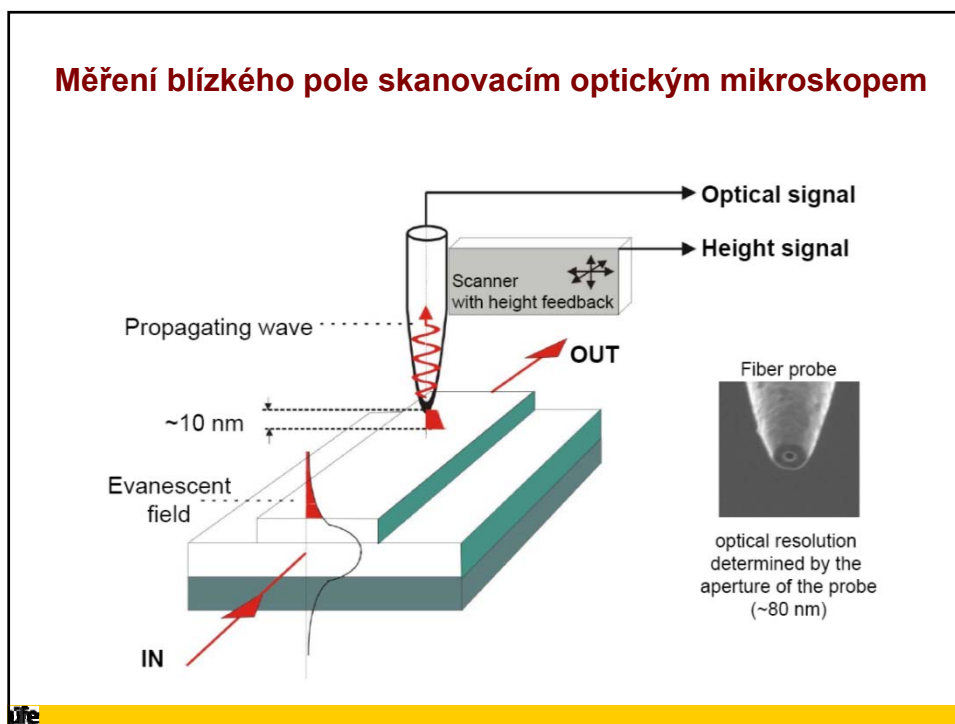
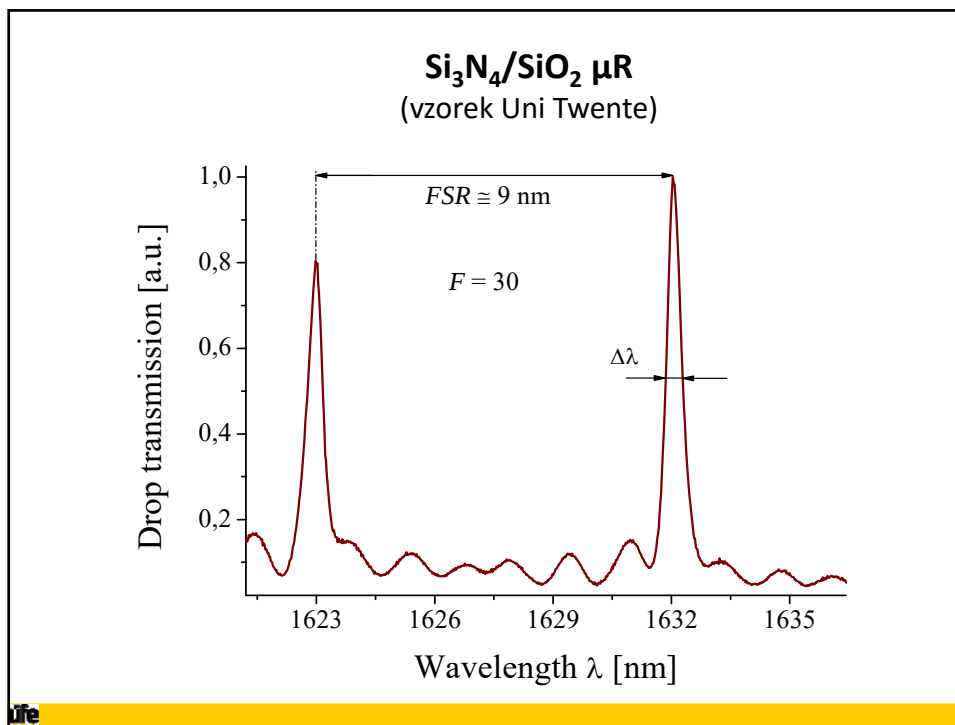


Charakterizace mikrorezonátorů

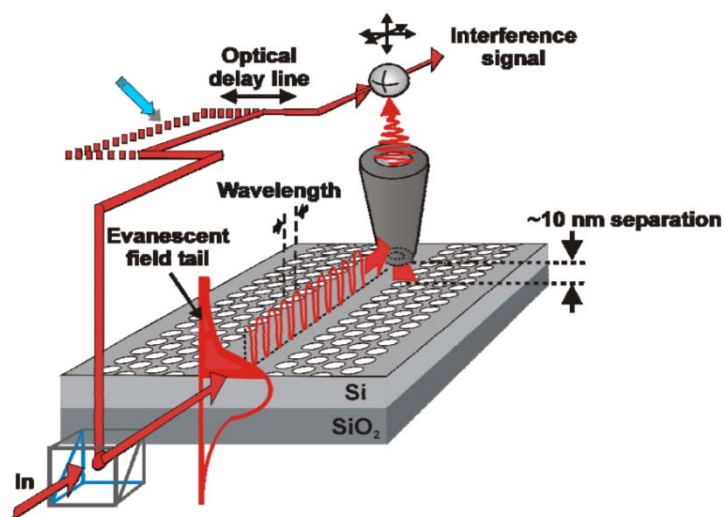
(F. Ondráček, FEL ČVUT a ÚFE)

Si₃N₄/SiO₂ prstencový μR, R = 50 μm
technologie: Uni Twente, NL





Interferometrické měření s fázovým kontrastem

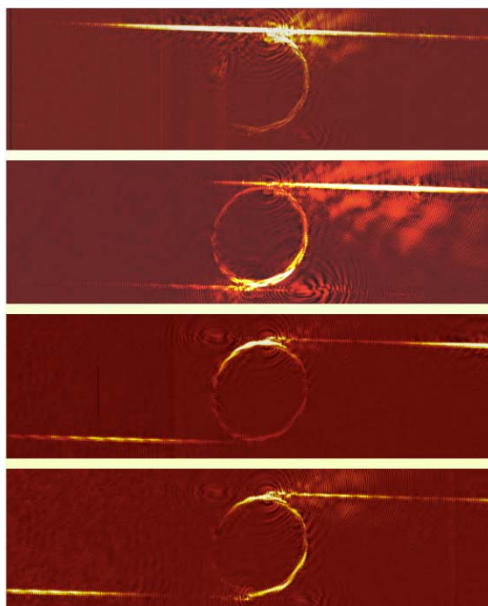


úfe

Šíření femtosekundového impulsu v mikrozónátoru

Experiment:
interferenční mikroskopie
blízkého pole,
Uni Twente, NL, 2003

Délka impulsu ~ 80 fs,
vlnová délka ~ 800 nm
(Ti:safírový laser)



úfe