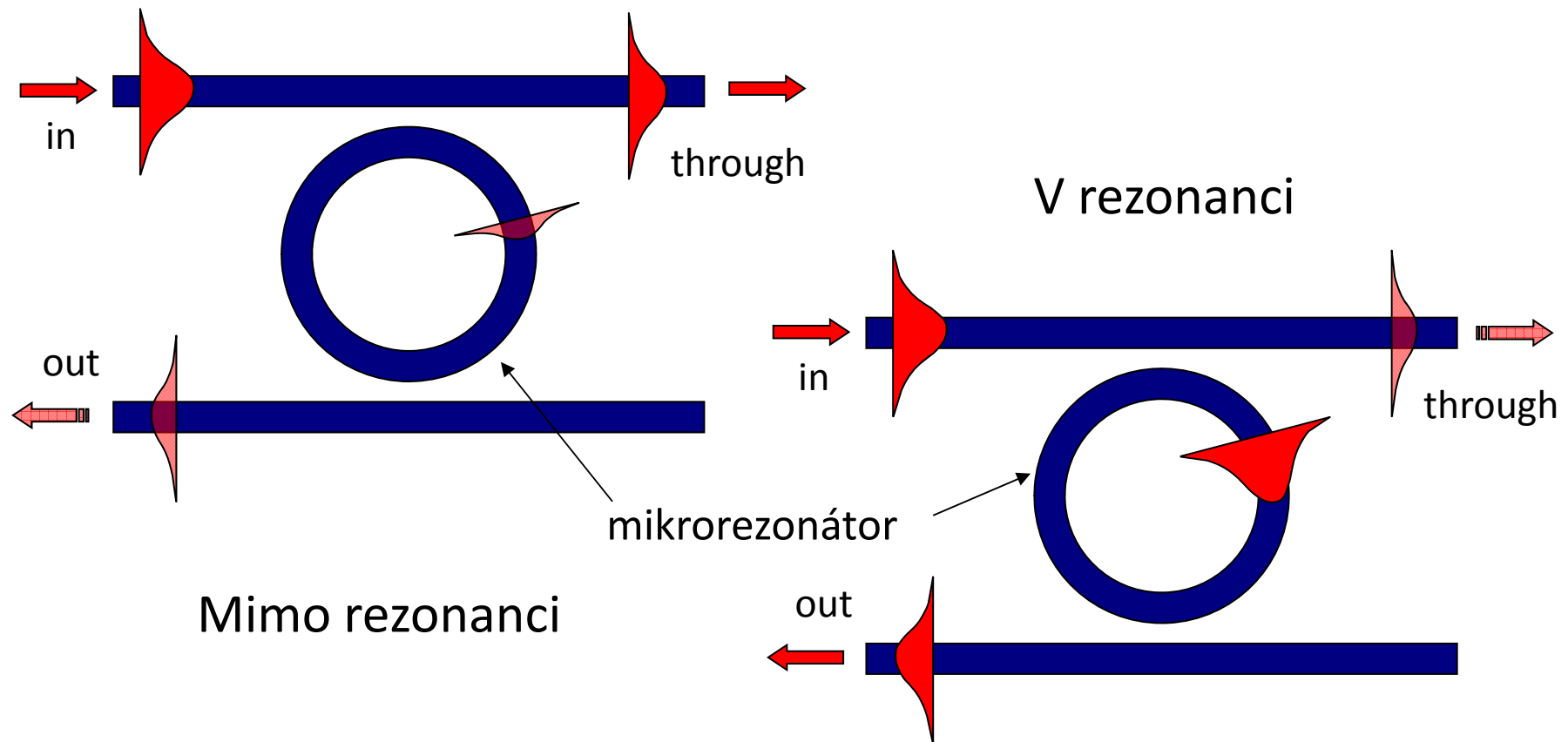


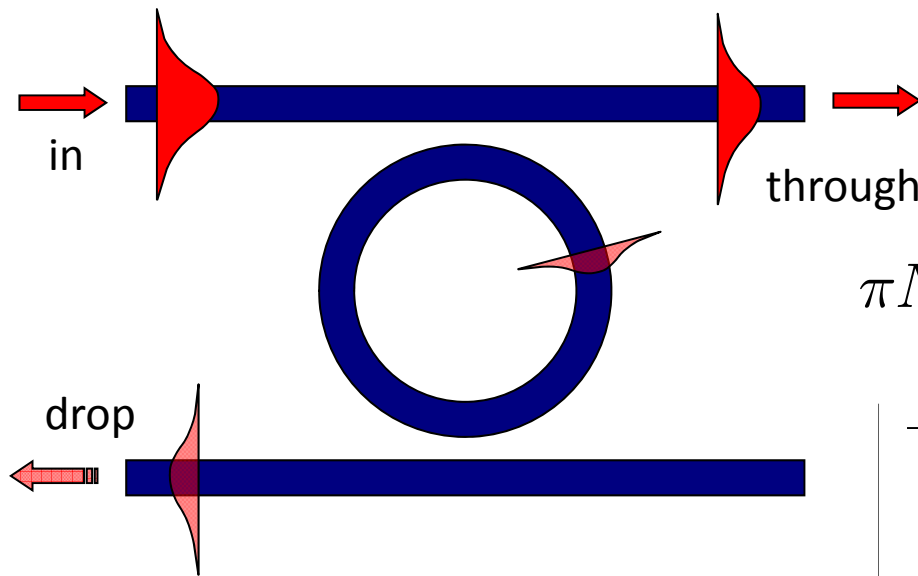
Mikrorezonátory v integrované fotonice

Vlnodné struktury s mikrorezonátory

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



Spektrální vlastnosti mikrorezonátoru



Rezonanční vln. délka

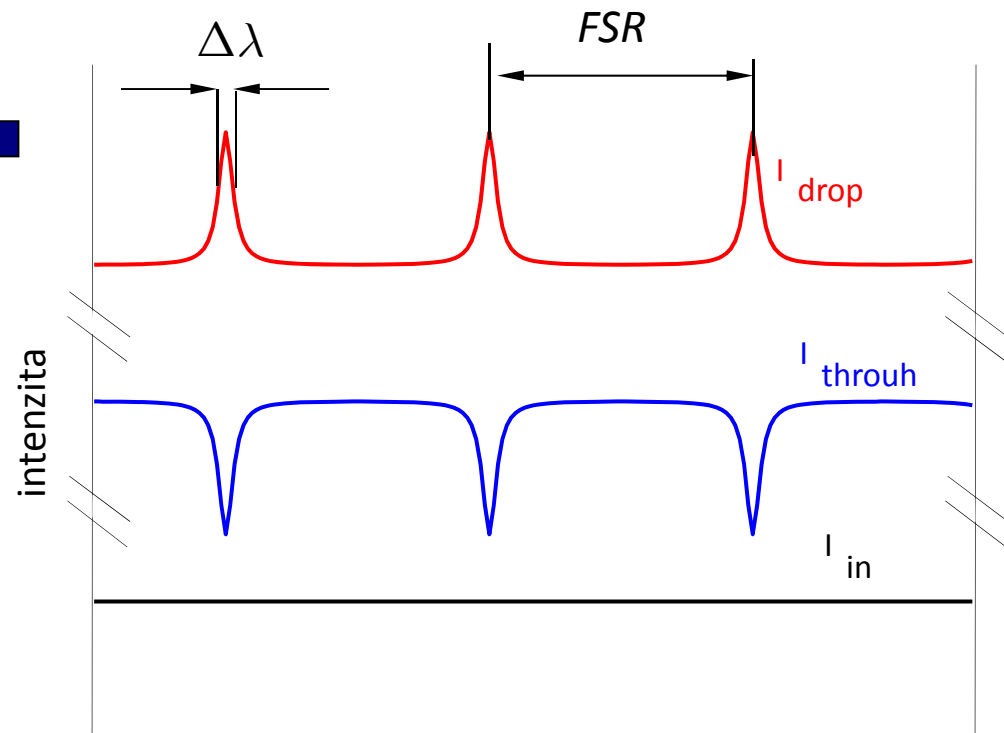
$$\pi ND = q\lambda_q, \quad q \text{ celé číslo } (10^2 - 10^3)$$

Vzdálenost mezi rezonancemi

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

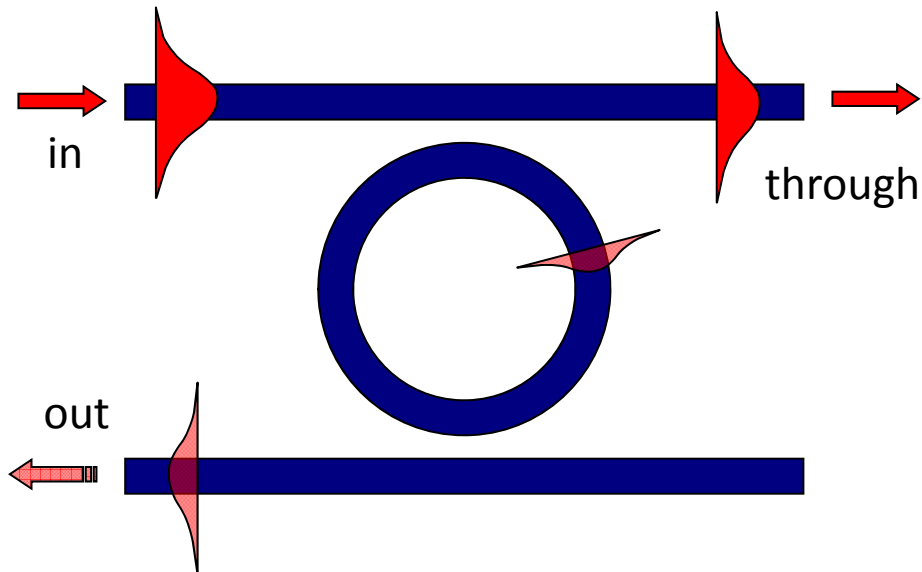
„Jemnost“ $F = FSR / \Delta\lambda$

Činitel jakosti $Q = qF$



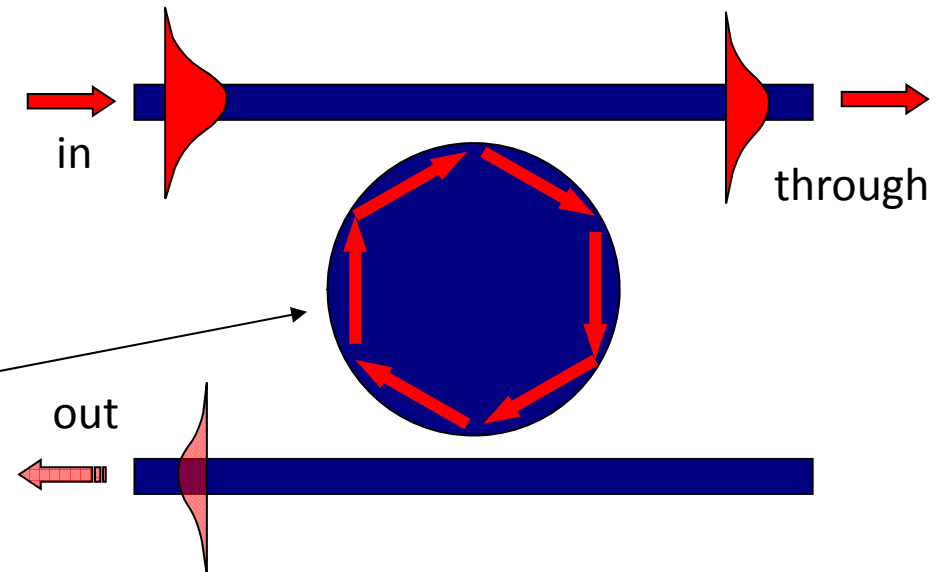
Vlnová délka nebo fáze

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,**

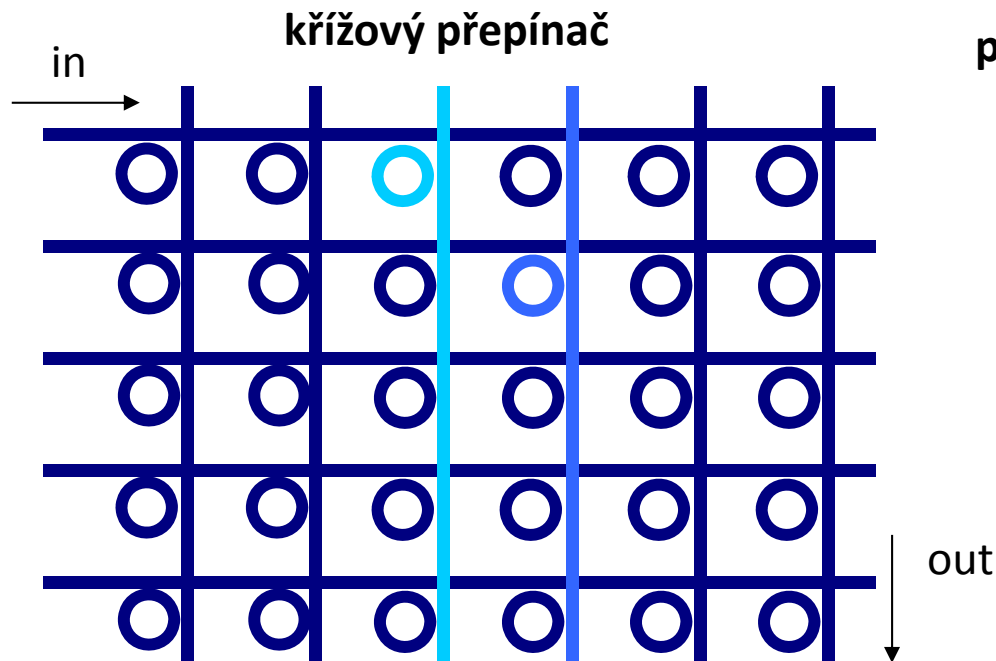
add-drop de/multiplexor

Syntéza tvaru spektrálních charakteristik –

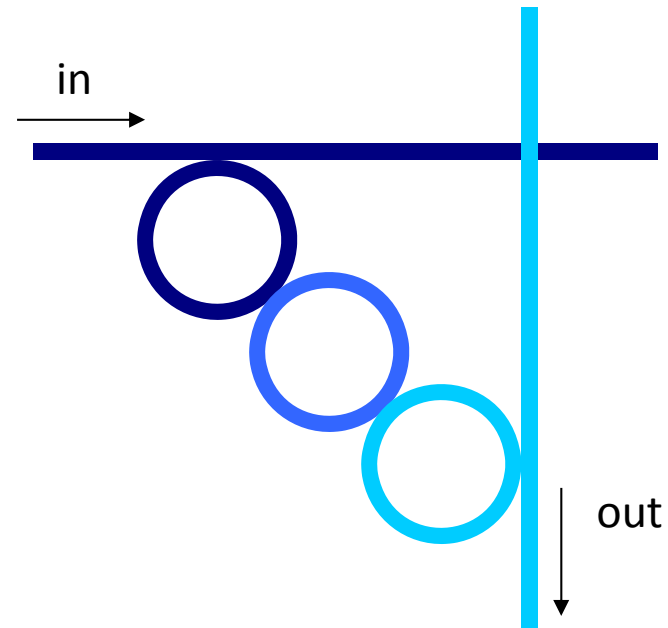
kaskádní řazení mikrorezonátorů

Elektroopticky/termoopticky laditelný mikrorezonátor –

modulátor, přepínač ($\Delta f \approx 1$ GHz)

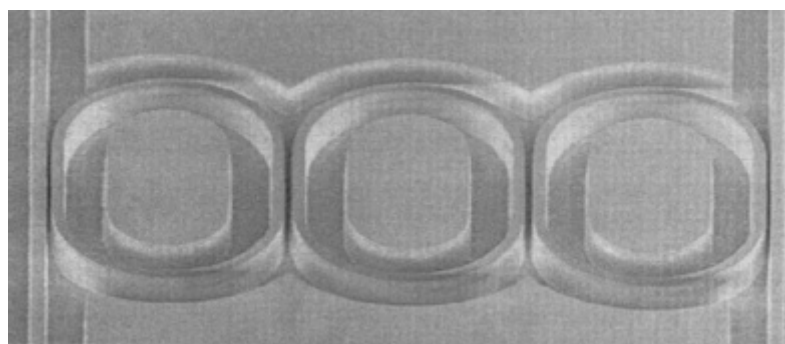
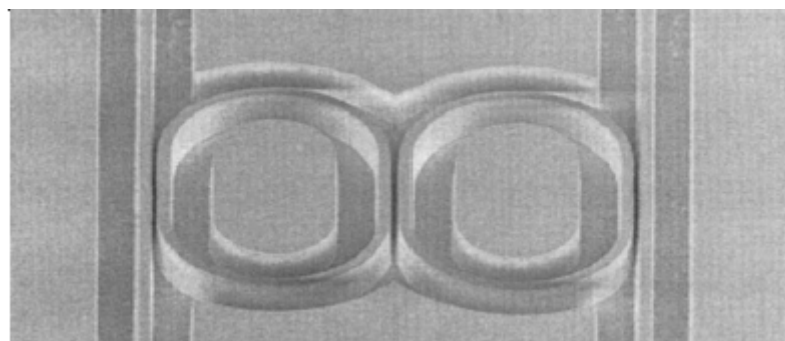
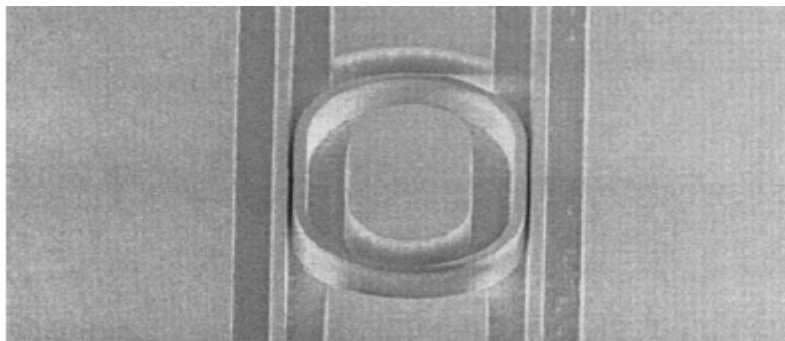


princip kaskádního filtru 3. řádu



Technologické aspekty

Laterální vazba mezi mikrorezonátorem a vlnovodem je velmi kritická:



MIT, Cambridge, 2000

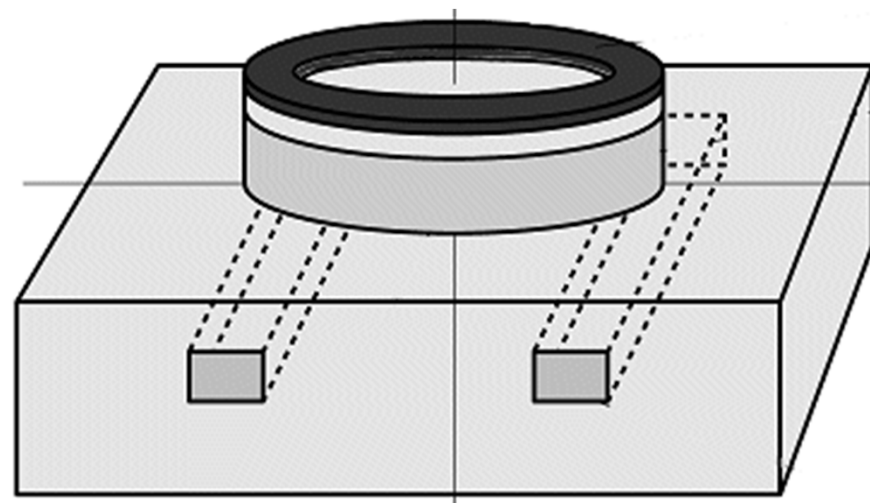
$\text{Al}_{0,5}\text{Ga}_{0,5}\text{As}$ –GaAs systém

šířka vlnovodů 0,42–0,62 μm

šířka štěrbin 0,18–0,32 μm

hloubka leptání 2 μm

Alternativa: **vertikální vazba**

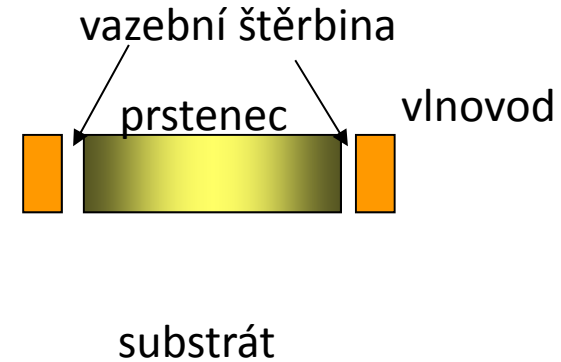


Laterální a vertikální vazba mezi μ R a vlnovodem

Laterální vazba

Jednostupňová litografie
kritická vazební štěrbina
menší flexibilita

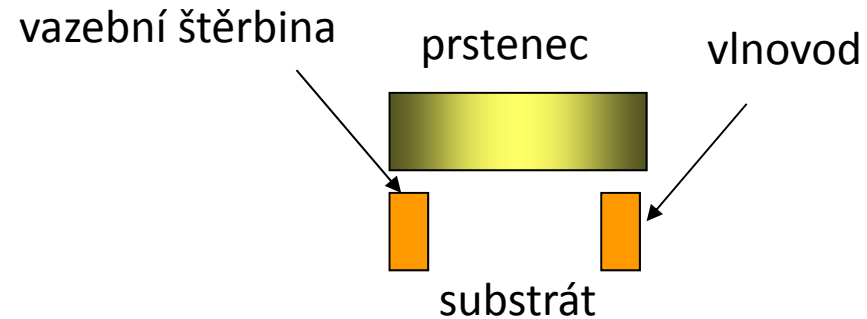
3D vektorové modelování
zádoucí



Vertikální vazba

dvoustupňová litografie
lepší reprodukovatelnost
větší flexibilita

3D vektorové modelování
nezbytné



Vlnodné filtry na bázi mikrorezonátorů

Příklad 1: Termoopticky laděný filtr vyšších řádů

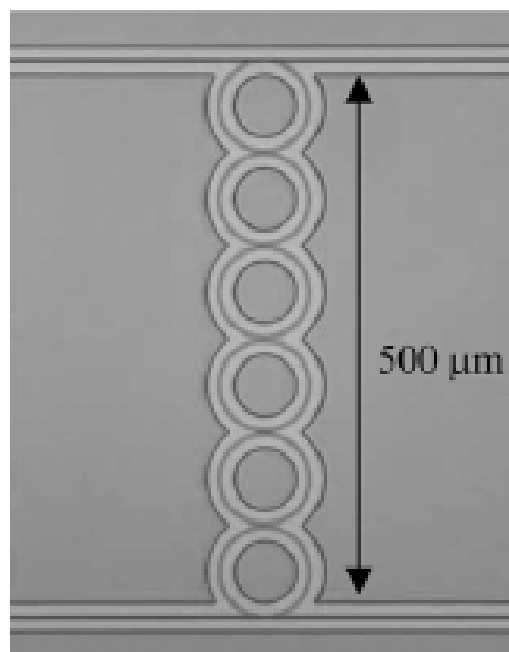
Filtry 1. až 11. řádu, \varnothing 72 μm

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

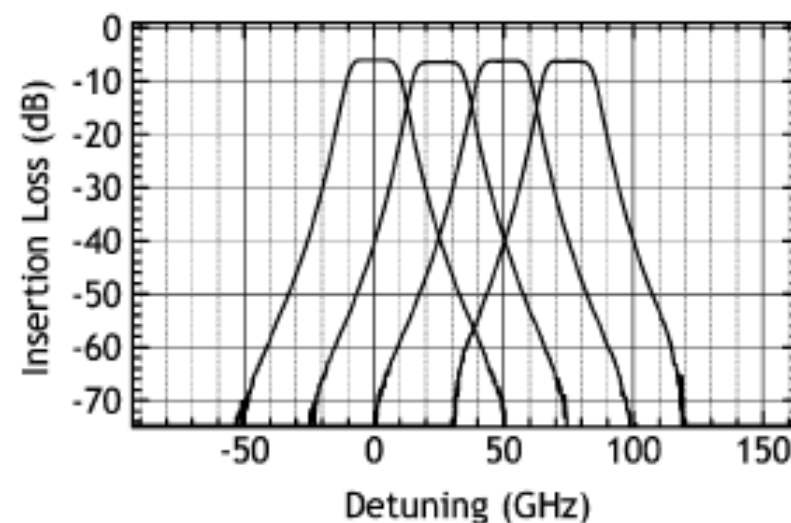
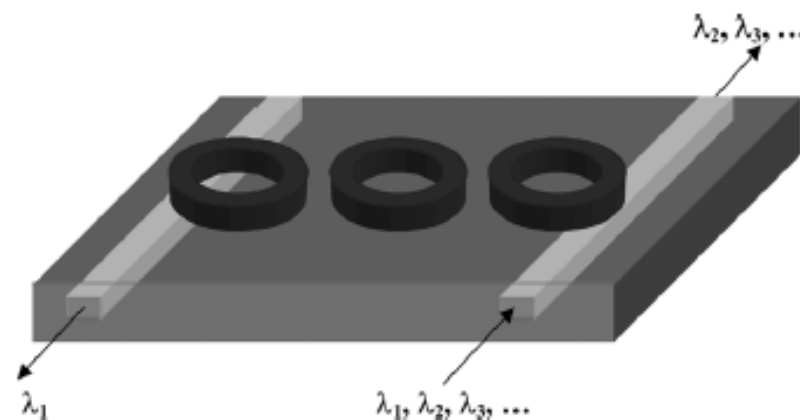
ztráty na čipu $1 \div 1,5 \text{ dB}$

Little Optics, Inc., PTL, Sept. 2004

(nyní Infinera)

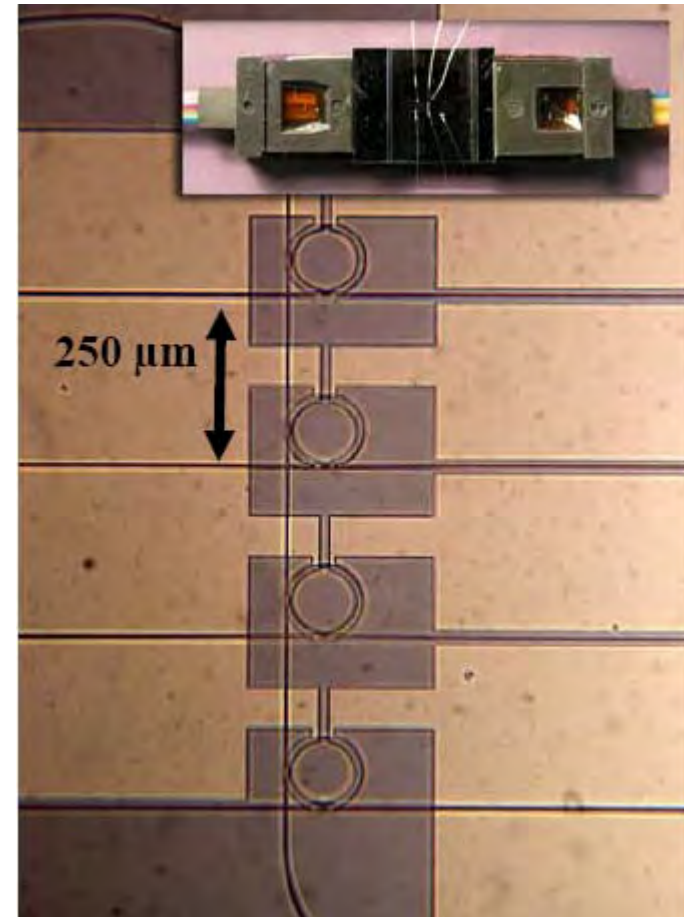
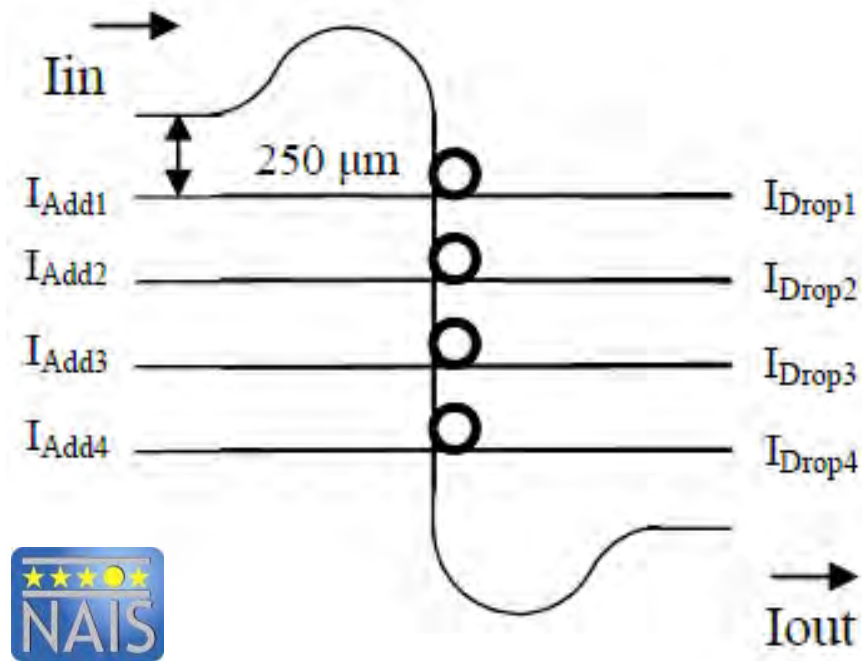


Termoopticky
laděné
spektrální
charakteristiky
filtru 5. řádu,
 $\Delta f = 25 \text{ GHz}$



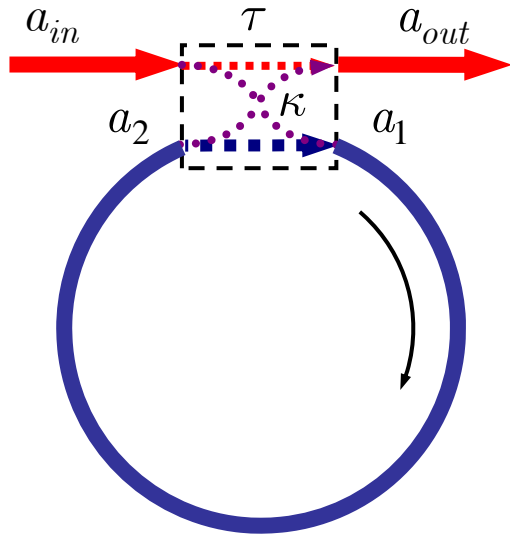
“Demonstrátor” projektu NAIS

Rekonfigurovatelný demultiplexor
s termoopticky laděnými mikrozónami
(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



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

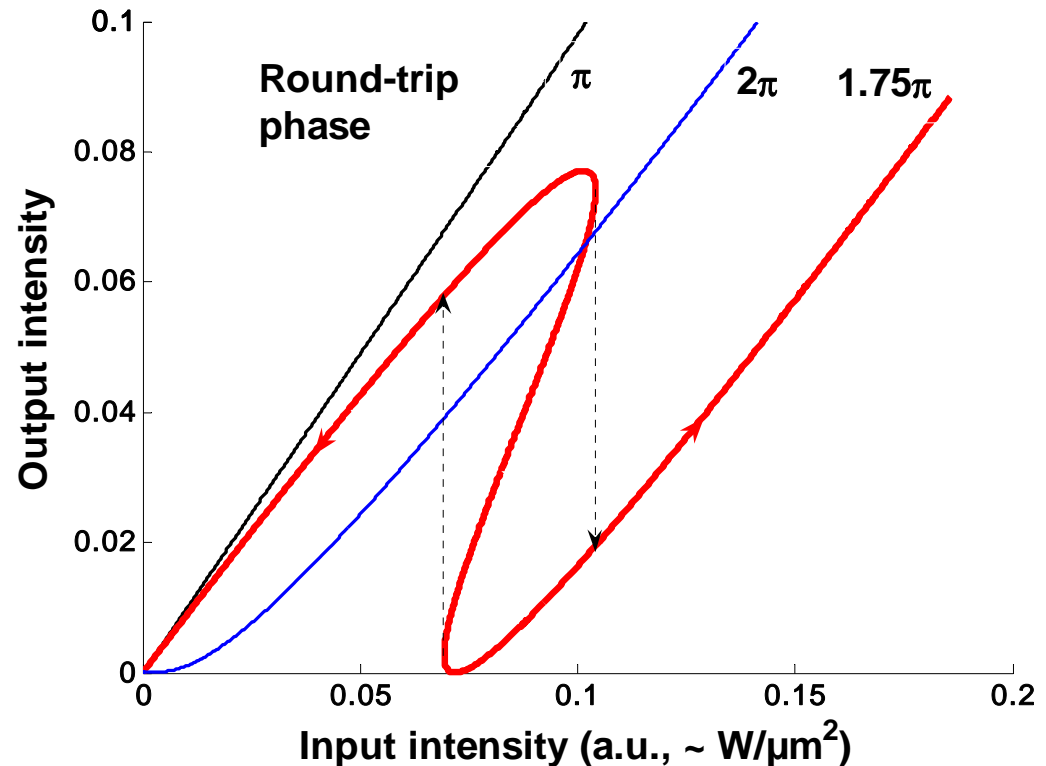
$$a_{in} = \frac{a_1 - \tau a_2}{\kappa},$$

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

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

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

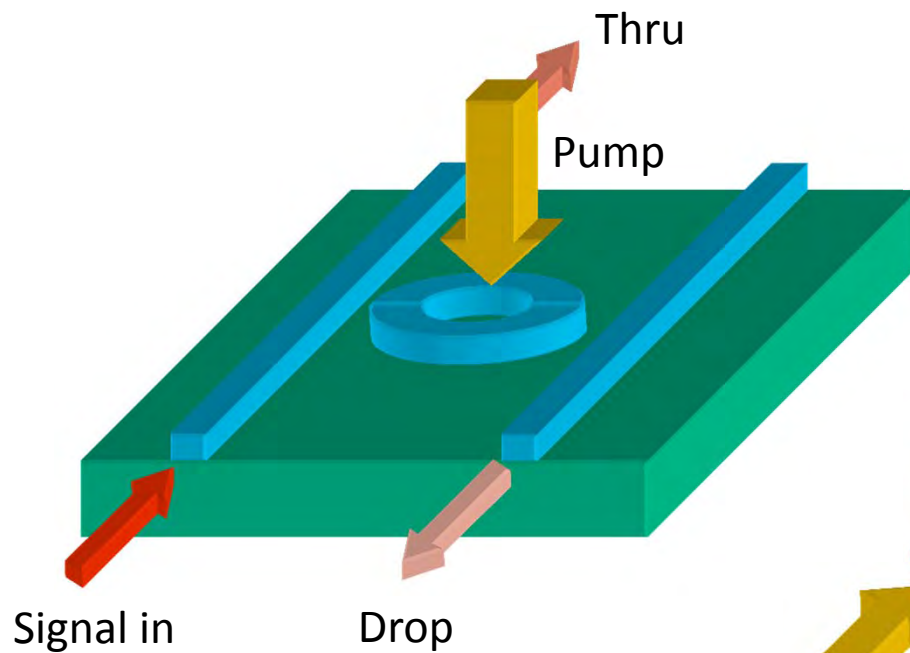
... nelineární změna fáze (automodulace)



Jednoduchý model optického spínání v mikrorezonátoru

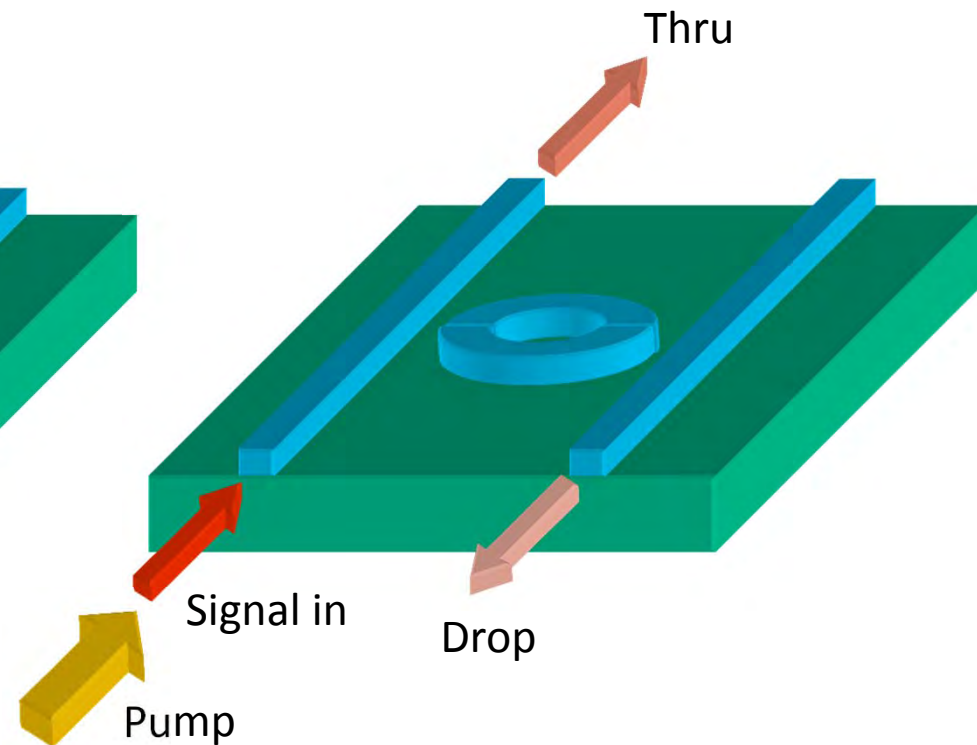
Vertikální čerpání:

jednoduché, rychlé,
vhodné pro základní experiment

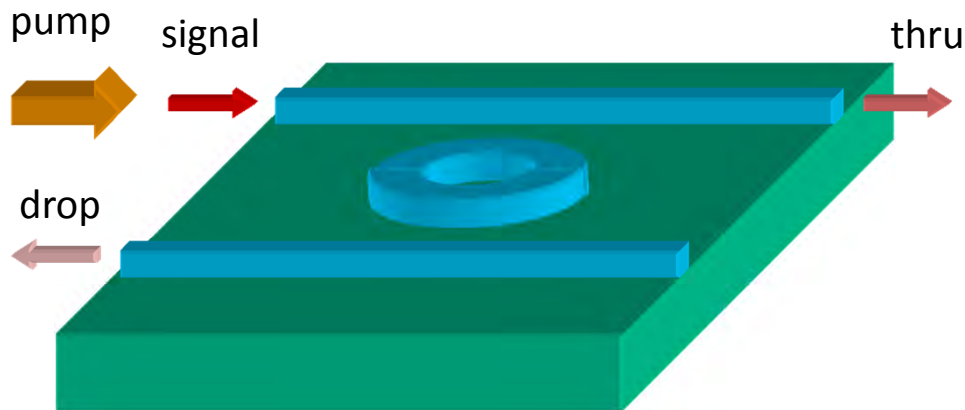


Vlnovodné čerpání:

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

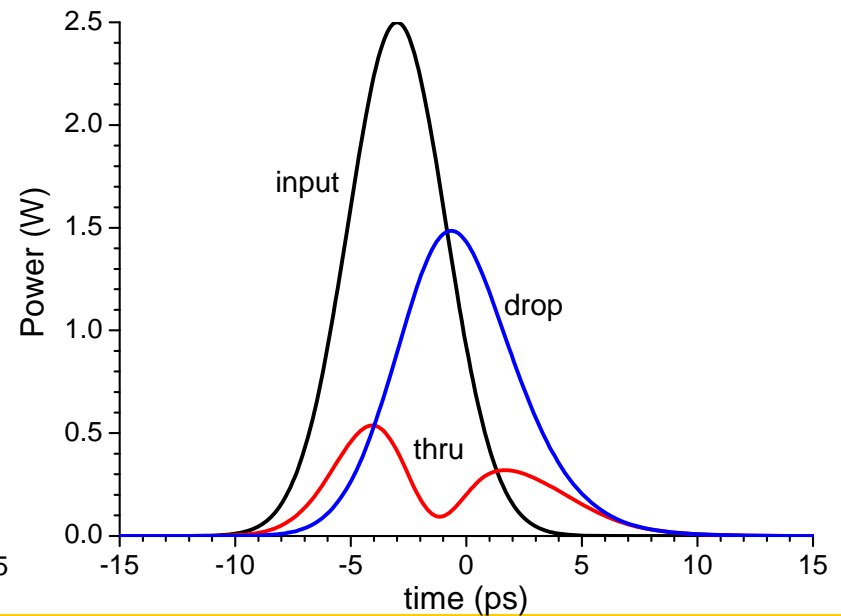
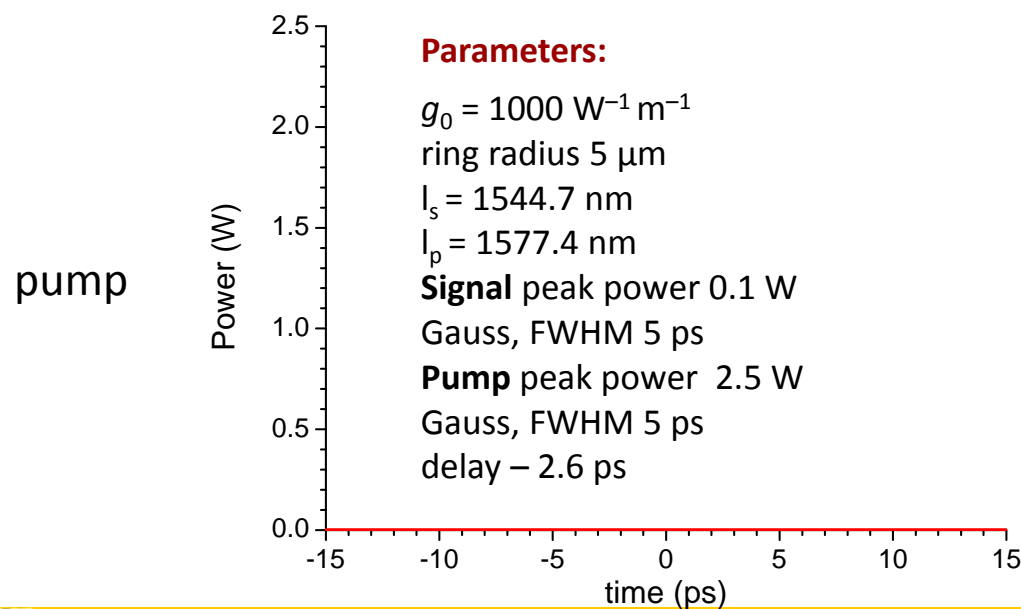
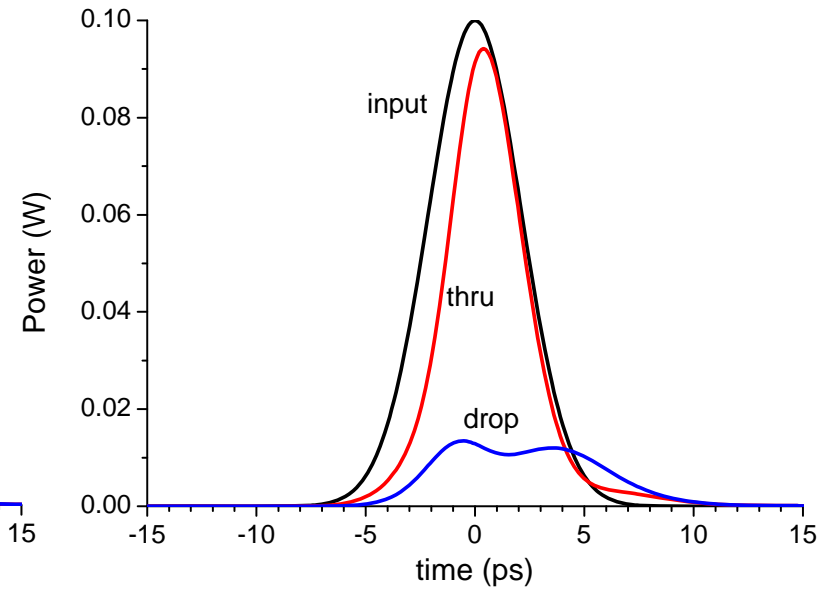
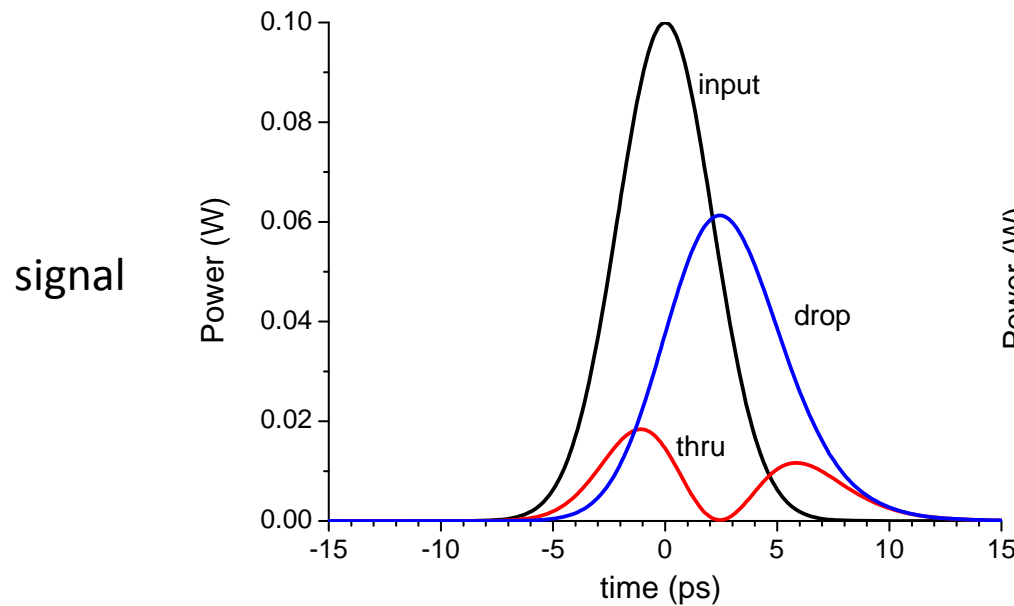
Špičkový čerpací výkon: $P_p \approx 2.5$ W

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



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“

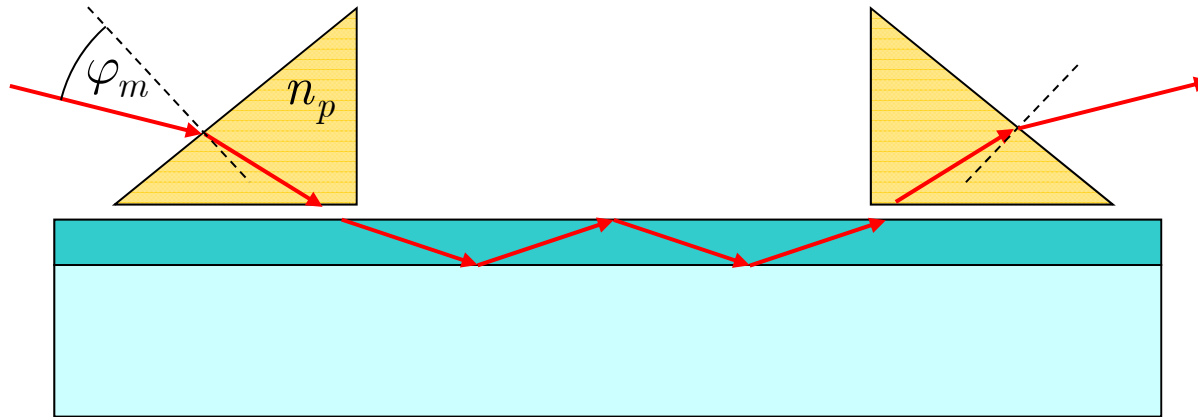
Měření parametrů

fotonických vlnovodných struktur

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

Vidová spektroskopie planárních vlnovodů



$$N = n_p \cos \chi$$

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

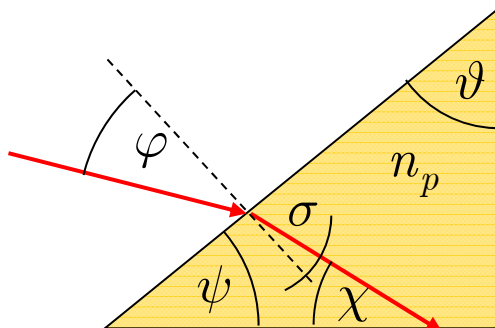
$$\chi + \sigma + (\pi - \vartheta) = \pi, \quad \chi = \vartheta - \sigma$$

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

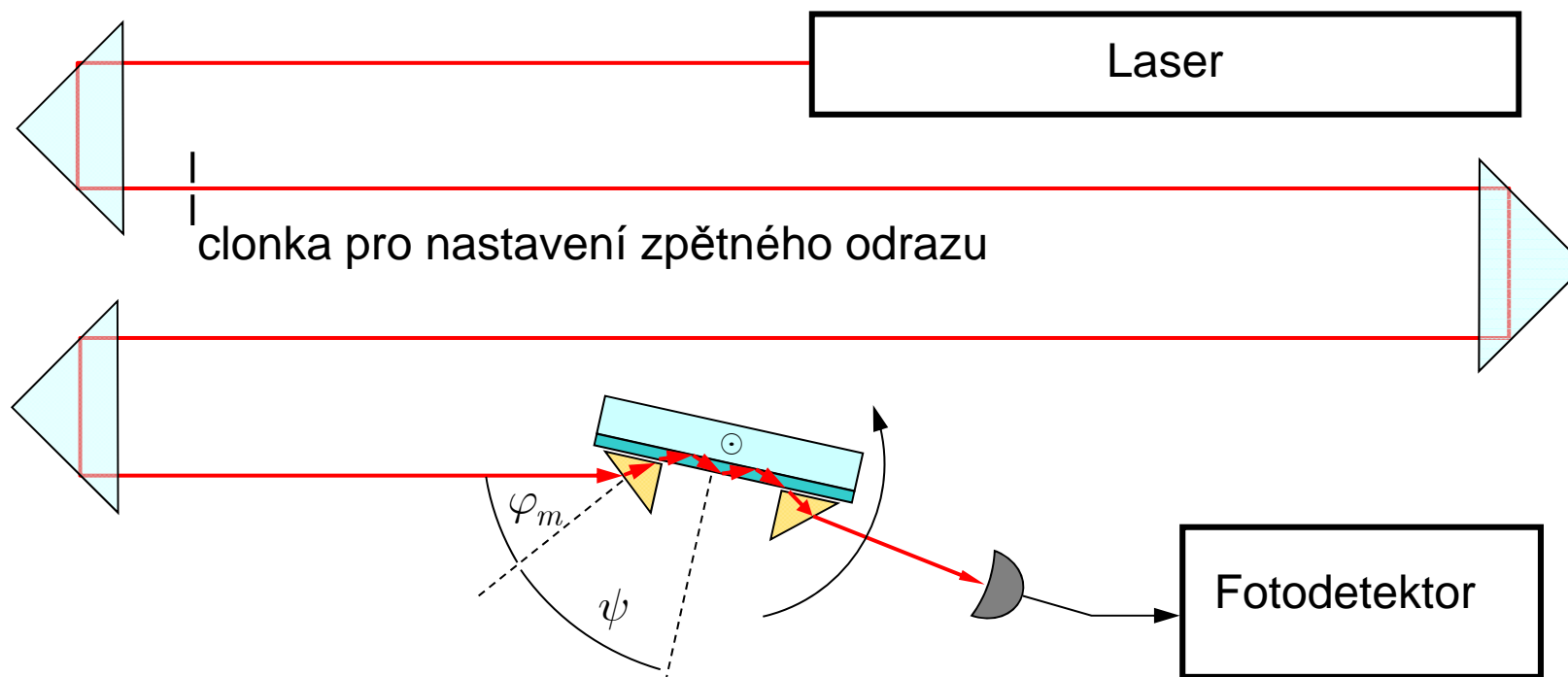
$$n_p \cos \sigma = \sqrt{n_p^2 - n_p^2 \sin^2 \sigma} = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi}$$

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

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



Experimentální uspořádání: metoda dvou hranolů



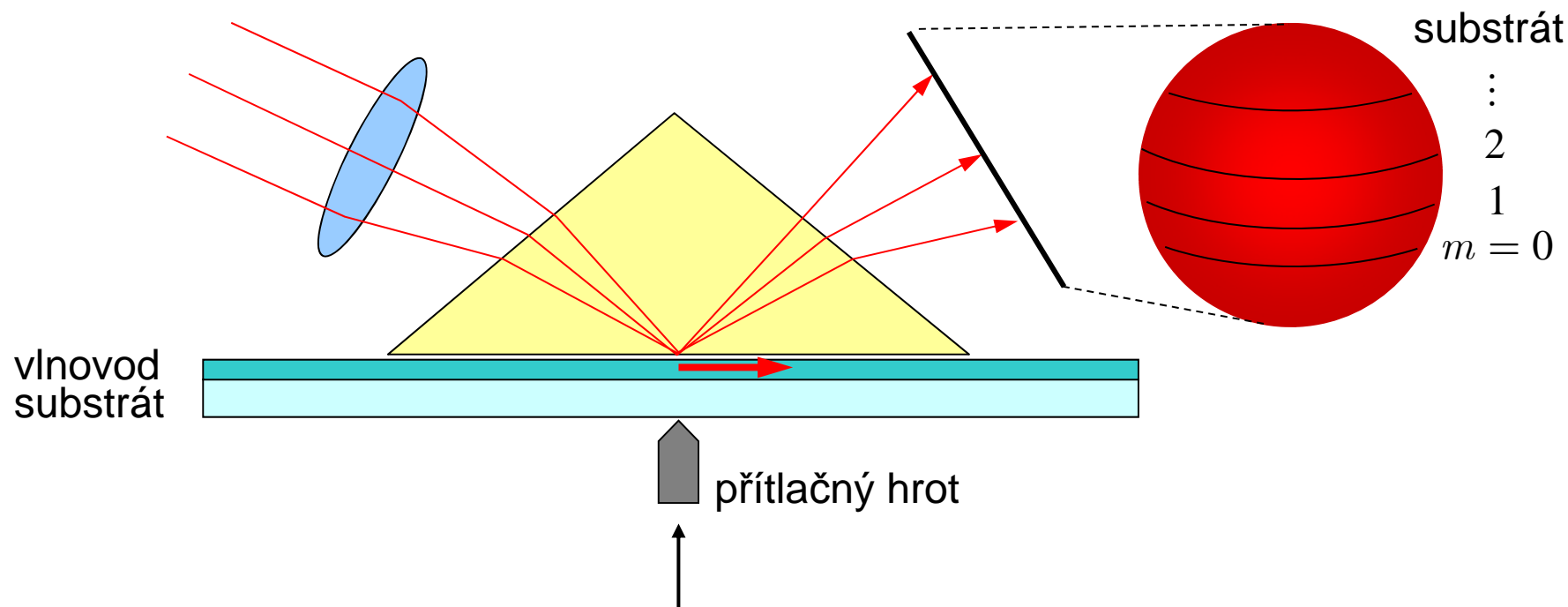
Vlnovod je umístěn na otočném stolku (goniometru)

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

Jednohranolvá 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 vybuzené 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

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} .

Určení profilu indexu lomu difúzního vlnovodu ze spektra vedených vic

WKB aproximace:
$$k_0 \int_0^{x_0} \sqrt{n^2(x) - N_m^2} dx = \underbrace{\arctan \left[\left(\frac{n(0)}{n_a} \right)^{2\nu} \sqrt{\frac{N_m^2 - n_a^2}{n^2(0) - N_m^2}} \right]}_{\approx \frac{\pi}{2}, \text{ pokud } n^2(0) - N_m^2 \ll N_m^2 - n_a^2} + \left(m + \frac{1}{4} \right) \pi$$

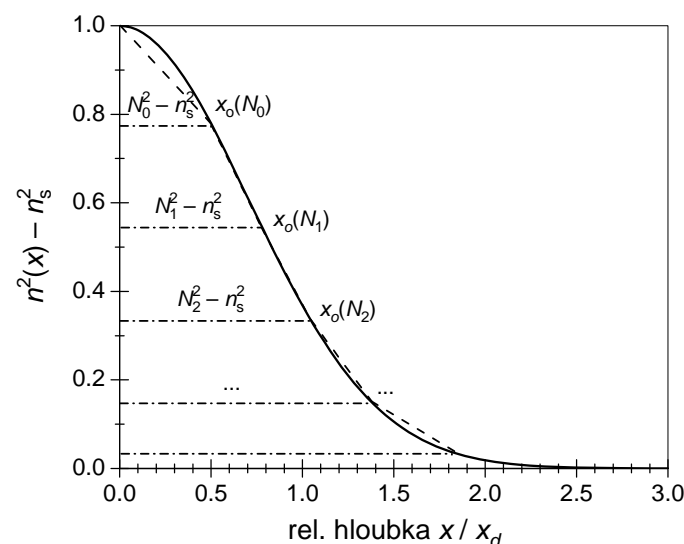
$$f(N_m) = k_0 \int_0^{x_0(N_m)} \sqrt{n^2(x) - N_m^2} dx \cong \left(m + \frac{3}{4} \right) \pi.$$

Předpokládejme 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

$$x_m = x_{m-1} + \left(N_{m-1}^2 - N_m^2 \right)^{-1/2} \times \quad (\text{White a Heidrich. 1976})$$

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



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

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

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:

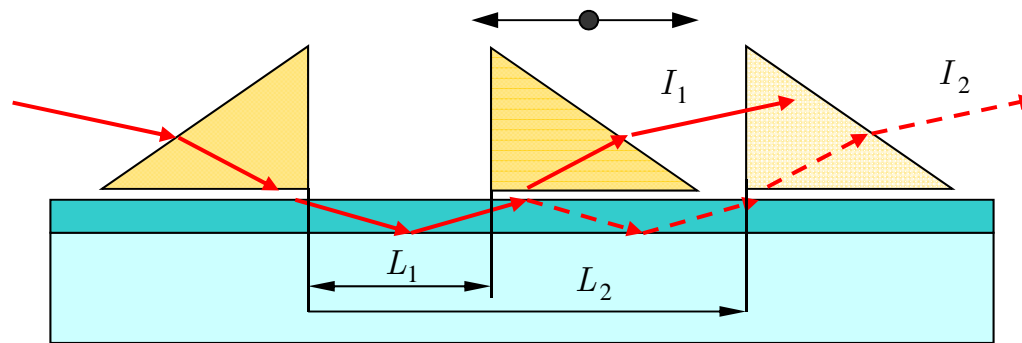
$$k_0 x_{d,m} = \frac{\left(m + \frac{3}{4}\right)\pi}{\int_0^{x_0(N_m)/x_d} \sqrt{n^2(x/x_d) - N_m^2} d(x/x_d)}$$

$$\bar{x}_d = \frac{1}{M-1} \sum_{m=0}^{M-1} x_{d,m}$$

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

Měření útlumu planárních vlnovodů

Dvouhranolová metoda:

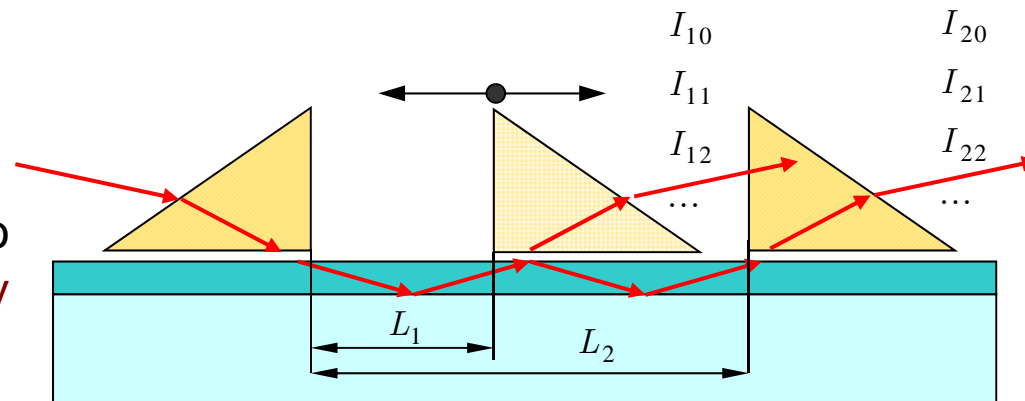


$$b = \frac{10 \log(I_{out,1} / I_{out,2})}{(L_2 - L_1)} \quad [\text{dB/cm}]$$

Problém: neměnit účinnost (výstupní) vazby

Tříhranolová metoda:

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

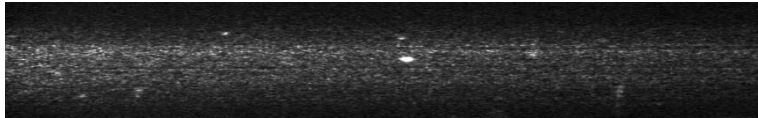


Problém: vzorek musí mít dostatečně velké rozměry

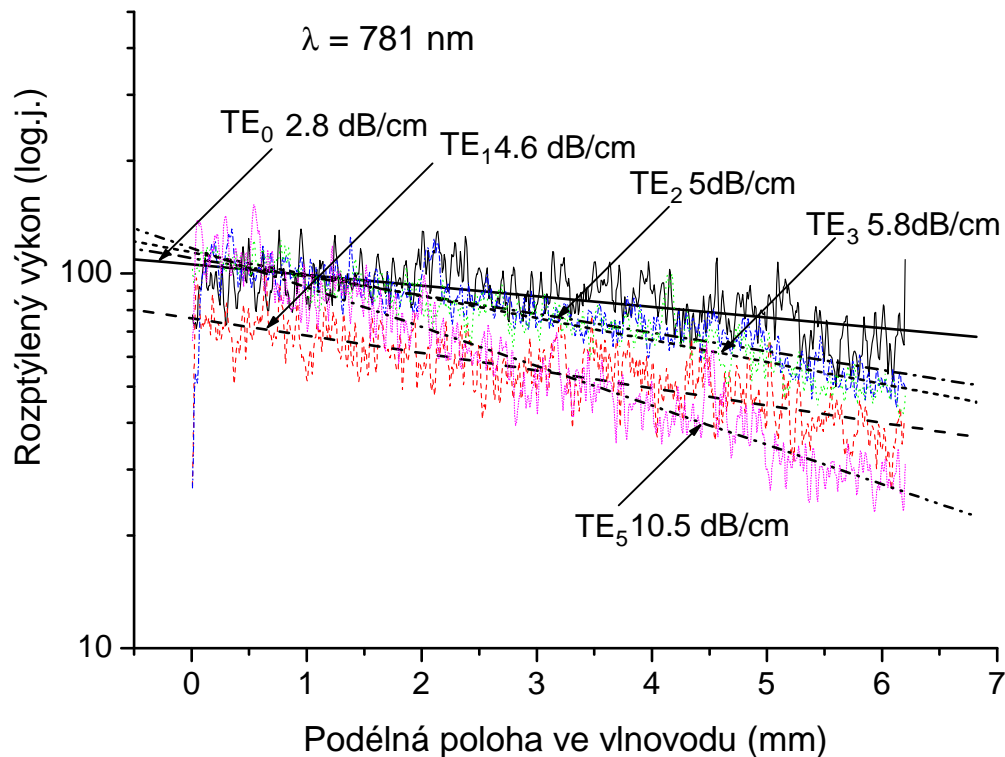
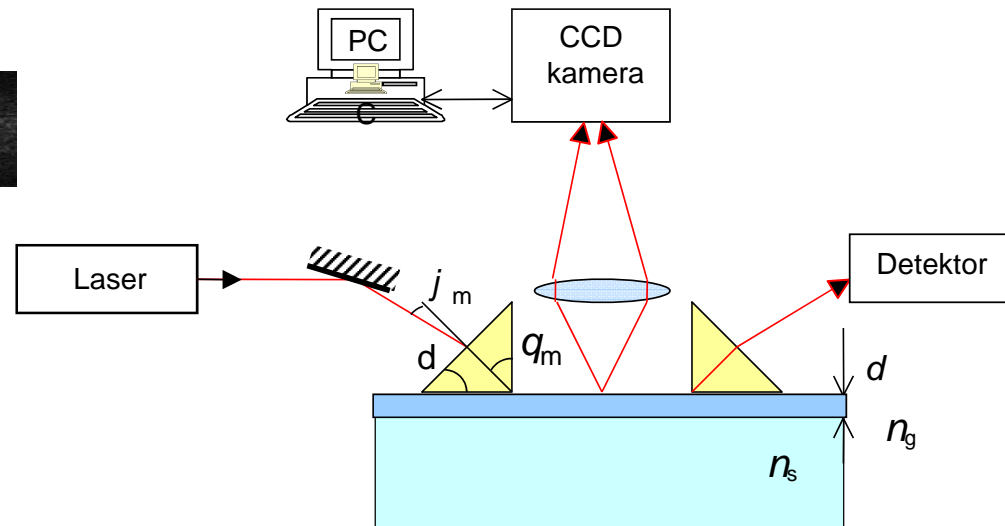
Přesnost metody typicky řádu 1 dB/cm

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:

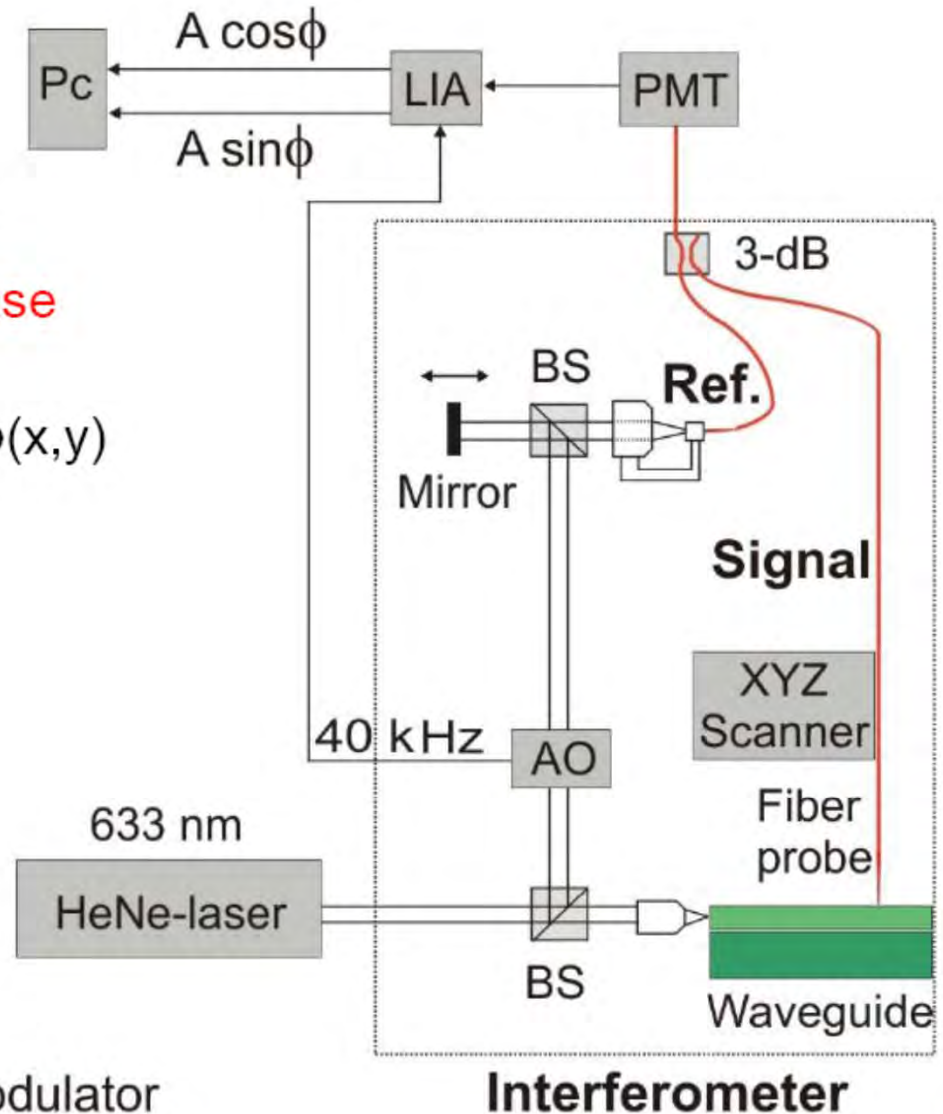
➔ Both **amplitude** and the **phase** of light are retrieved
 ($A(x,y)\cos\phi(x,y)$ & $A(x,y)\sin\phi(x,y)$ measured)

ϕ = Phase

A = Amplitude

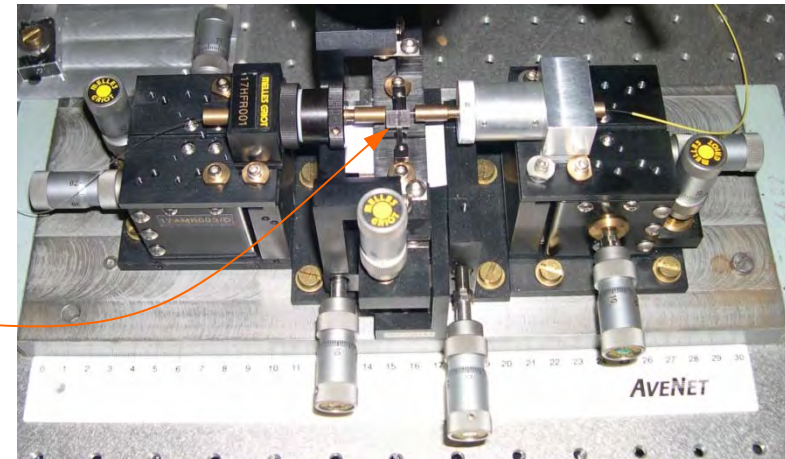
LIA = Lock-In Amplifier

AO = Acousto-Optic Modulator

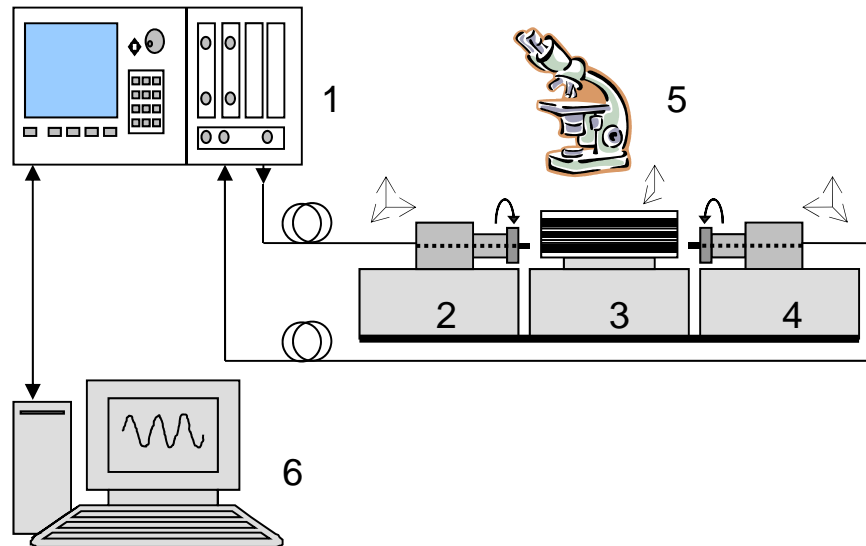


Měření útlumu kanálkových vlnovodů

Metoda Fabryových-Perotových rezonancí



Uspořádání měřicího pracoviště



Kanálkový vlnovod se chová jako FP rezonátor v důsledku odrazů od leštěných čel vlnovodu

Modální transmittance

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

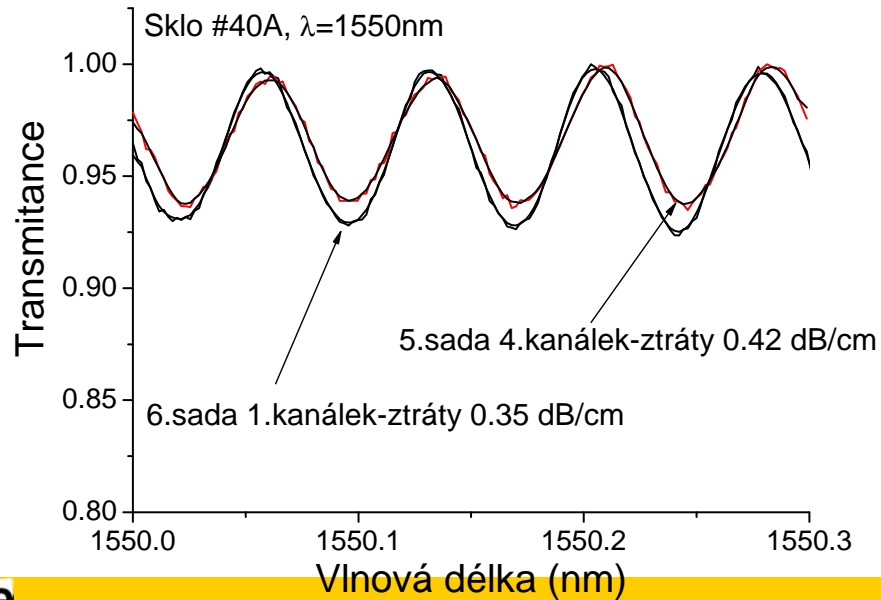
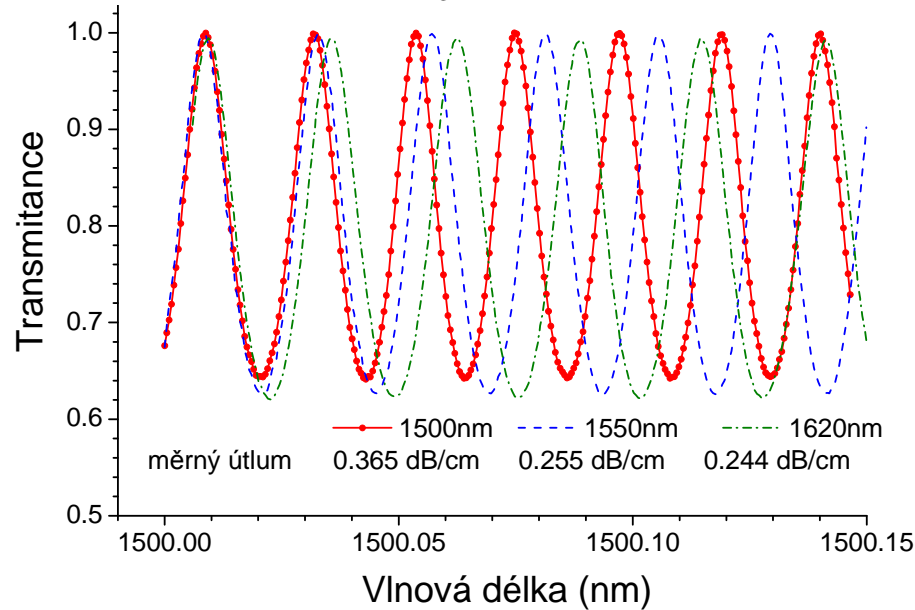
R je modální reflektance, α činitel útlumu, L délka

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

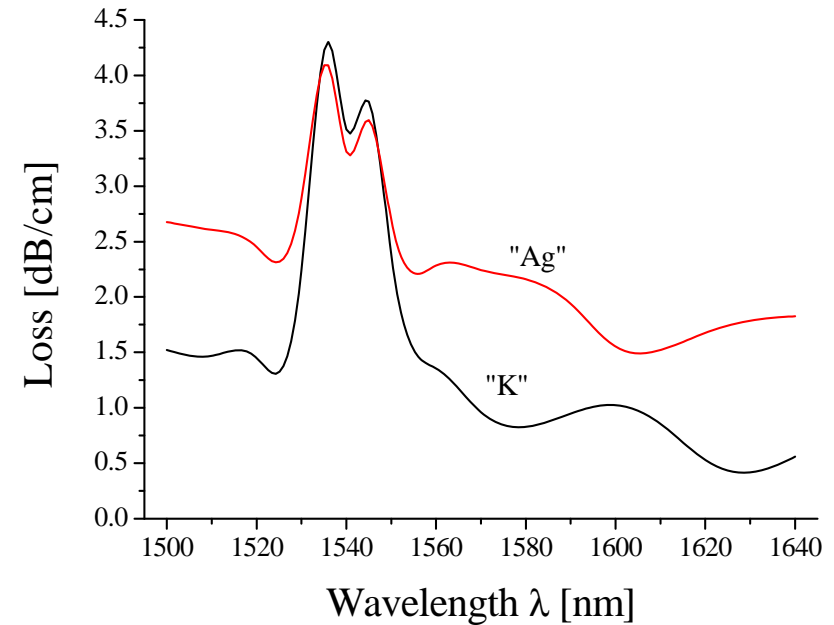
$$b = \frac{4.34}{L} \left(\ln \frac{1 + \sqrt{K}}{1 - \sqrt{K}} - 2 \ln \frac{N + 1}{N - 1} \right), \quad K = \frac{T_{\max}}{T_{\min}}.$$

Měření útlumu kanálkových vlnovodů

Záznam měření Ti:LiNbO₃ vlnovodu



Spektrální závislost útlumu vlnovodů vytvořených iontovými výměnami $\text{Ag}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ a $\text{K}^+ \leftrightarrow \text{Na}^+$ ve skle dopovaném Er^{3+}



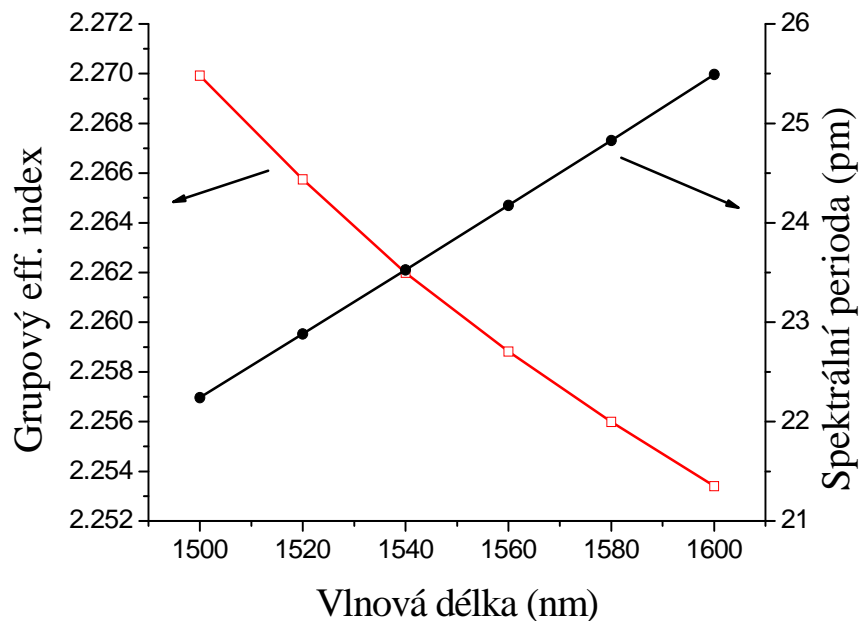
Měření grupového indexu lomu kanálkových vlnovodů

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

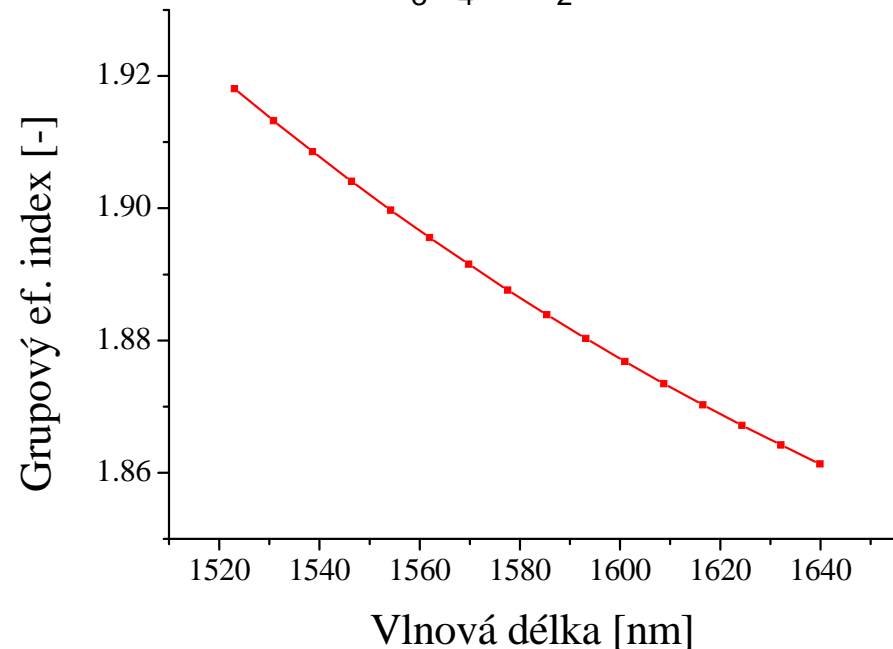
Pro vzdálenost sousedních rezonancí (FSR) platí $\Delta[\nu N(\nu)] = \left(N + \nu \frac{dN}{d\nu} \right) d\nu = N_g \Delta\nu = \frac{c}{2L}$,

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

Ti:LiNbO₃ vlnovod



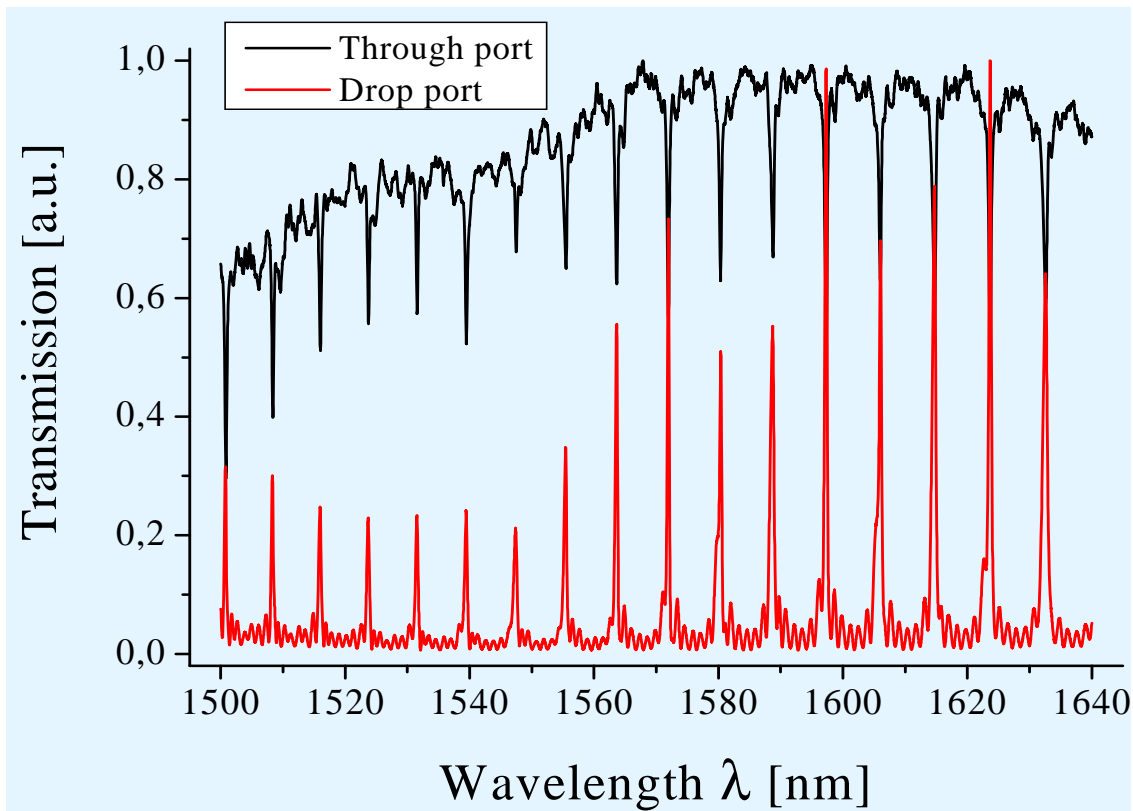
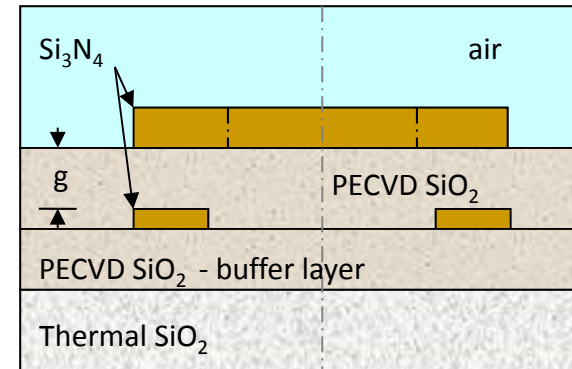
Si₃N₄/SiO₂ vlnovod



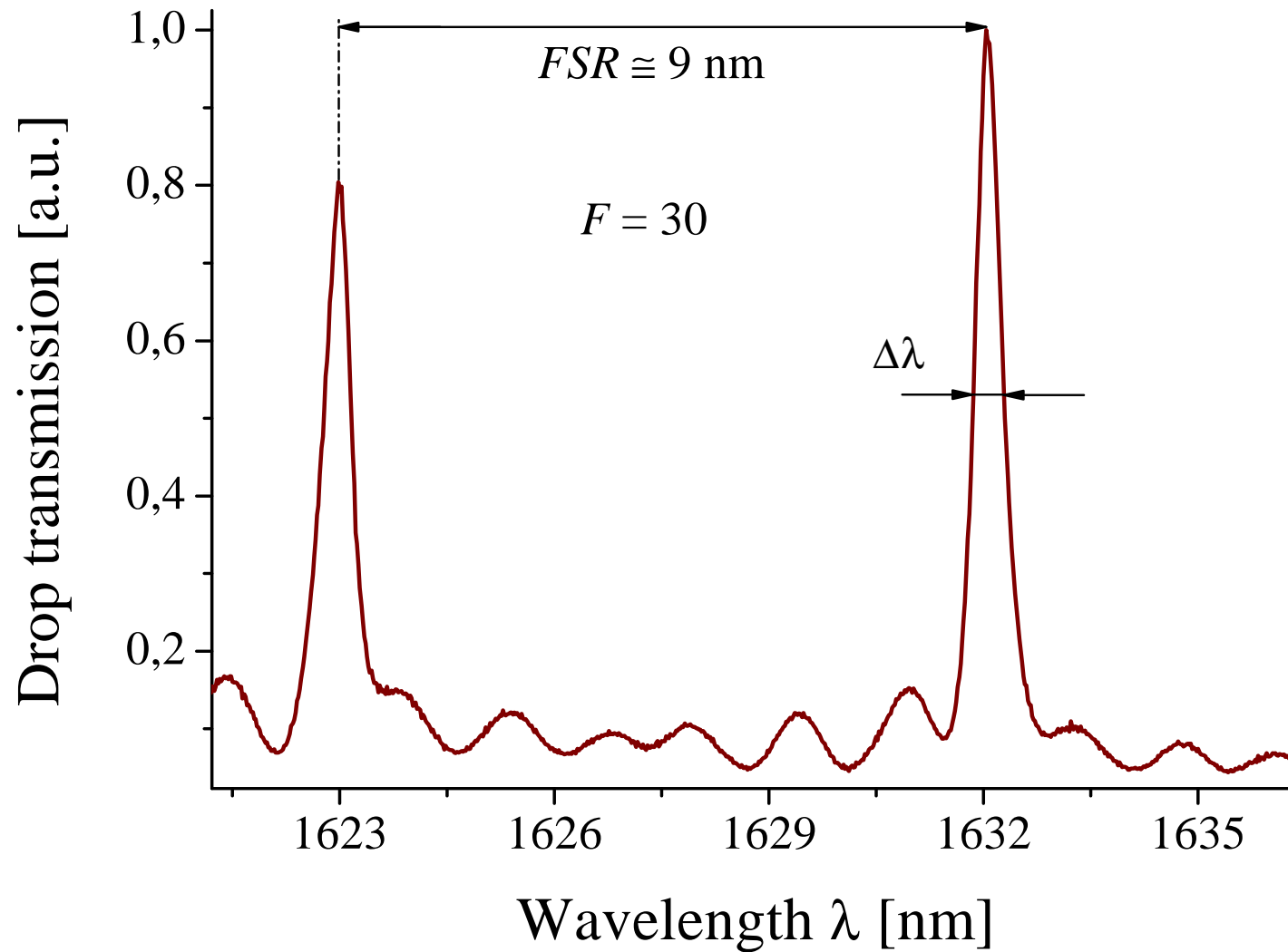
Charakterizace mikrorezonátorů

(F. Ondráček, FEL ČVUT a ÚRE)

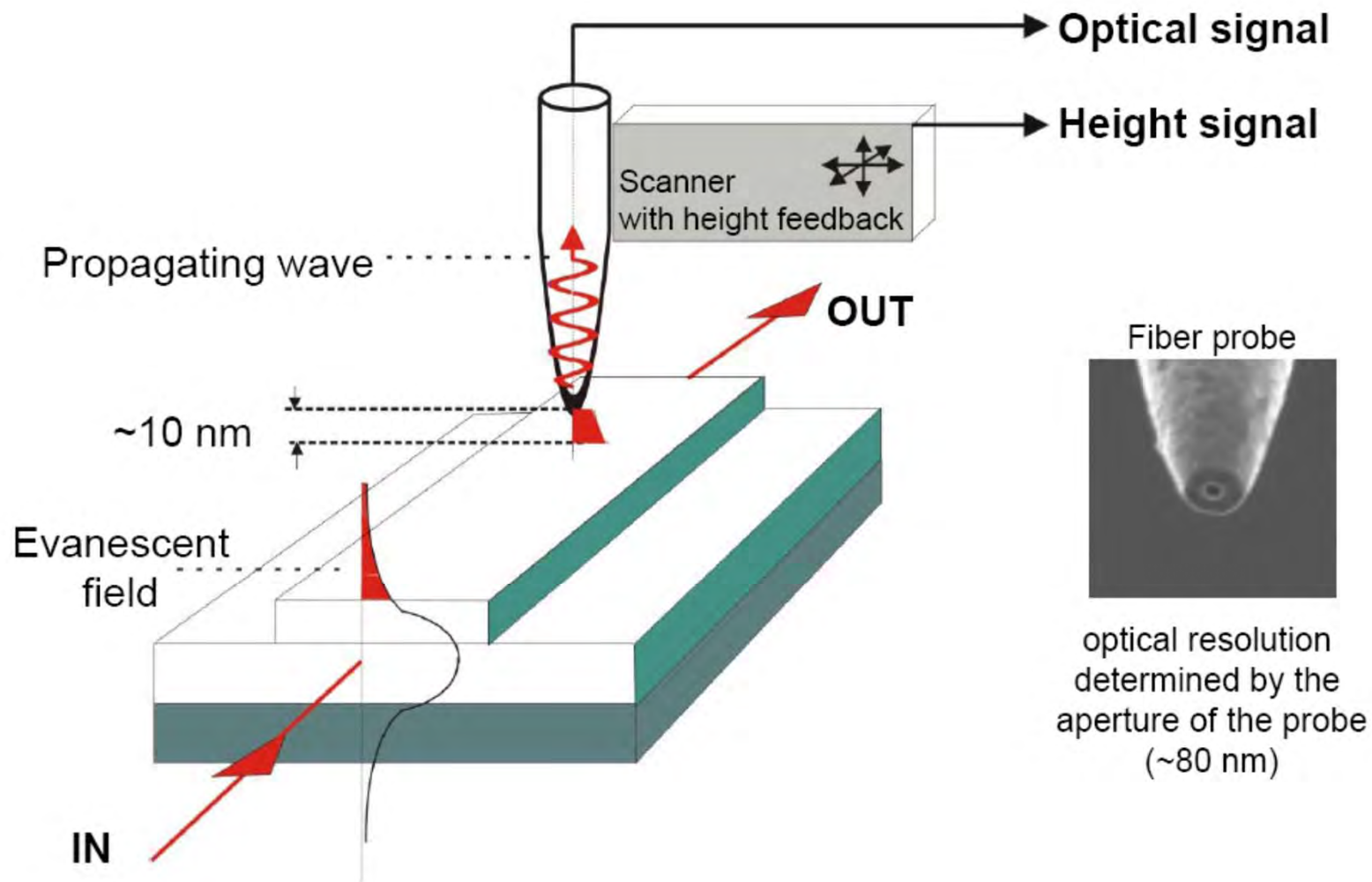
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ prstencový μR , $R = 50 \mu\text{m}$
technologie: Uni Twente, NL



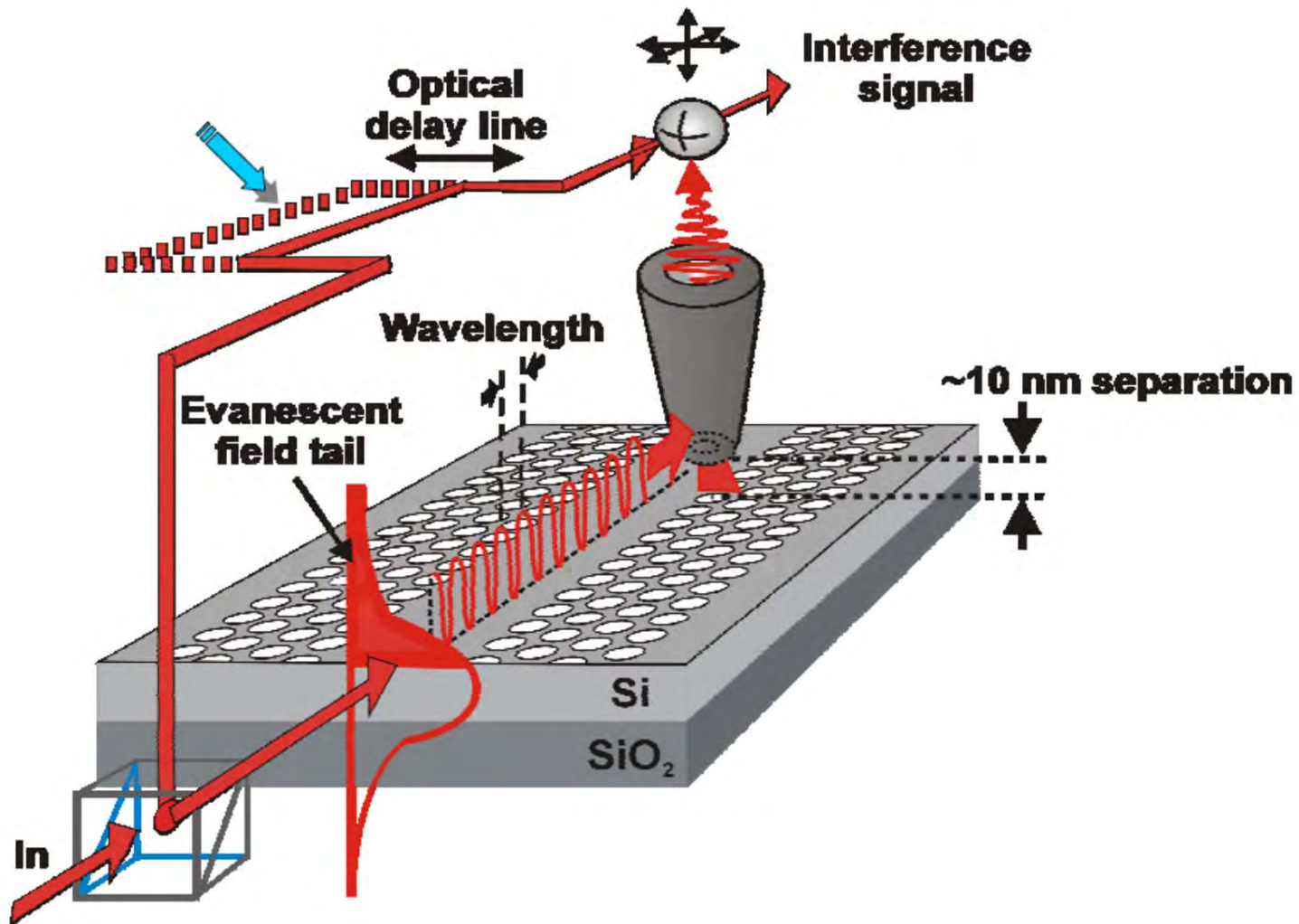
Si₃N₄/SiO₂ μR
(vzorek Uni Twente)



Měření blízkého pole skanovacím optickým mikroskopem



Interferometrické měření s fázovým kontrastem



Šíření femtosekundového impulsu v mikrorezonátoru

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

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

