

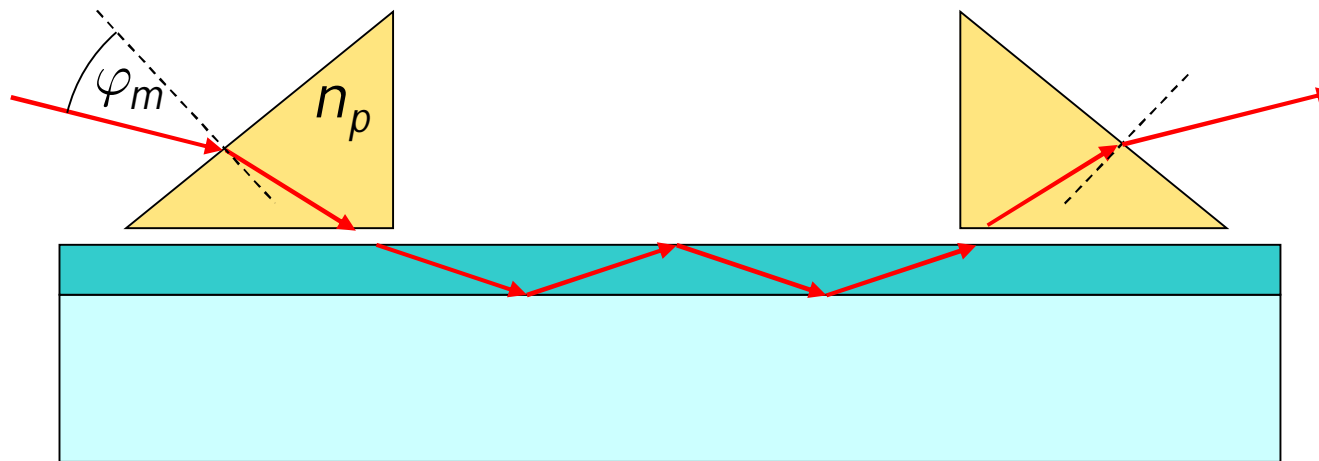
Měření parametrů

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



$$N = n_p \cos \chi$$

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

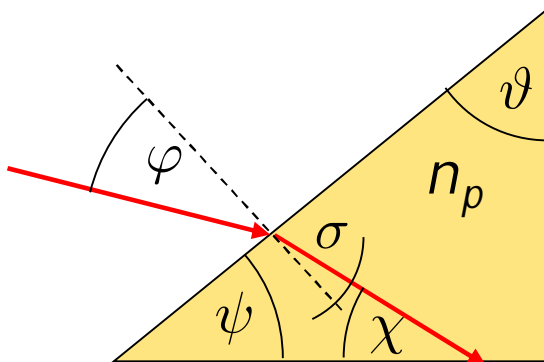
$$\chi + \sigma + (\pi - \vartheta) = \pi, \quad \chi = \vartheta - \sigma$$

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

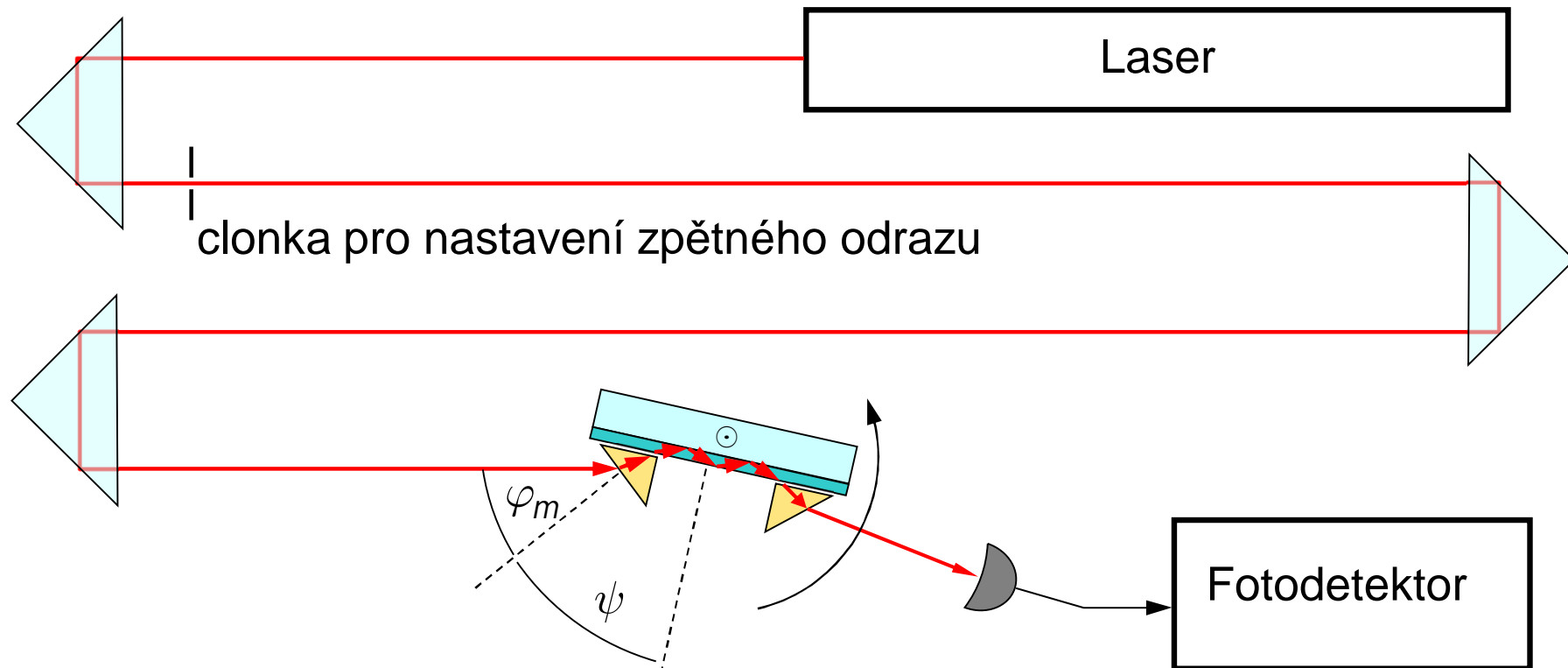
$$n_p \cos \sigma = \sqrt{n_p^2 - n_p^2 \sin^2 \sigma} = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi}$$

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

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



Experimentální uspořádání: metoda dvou hranolů



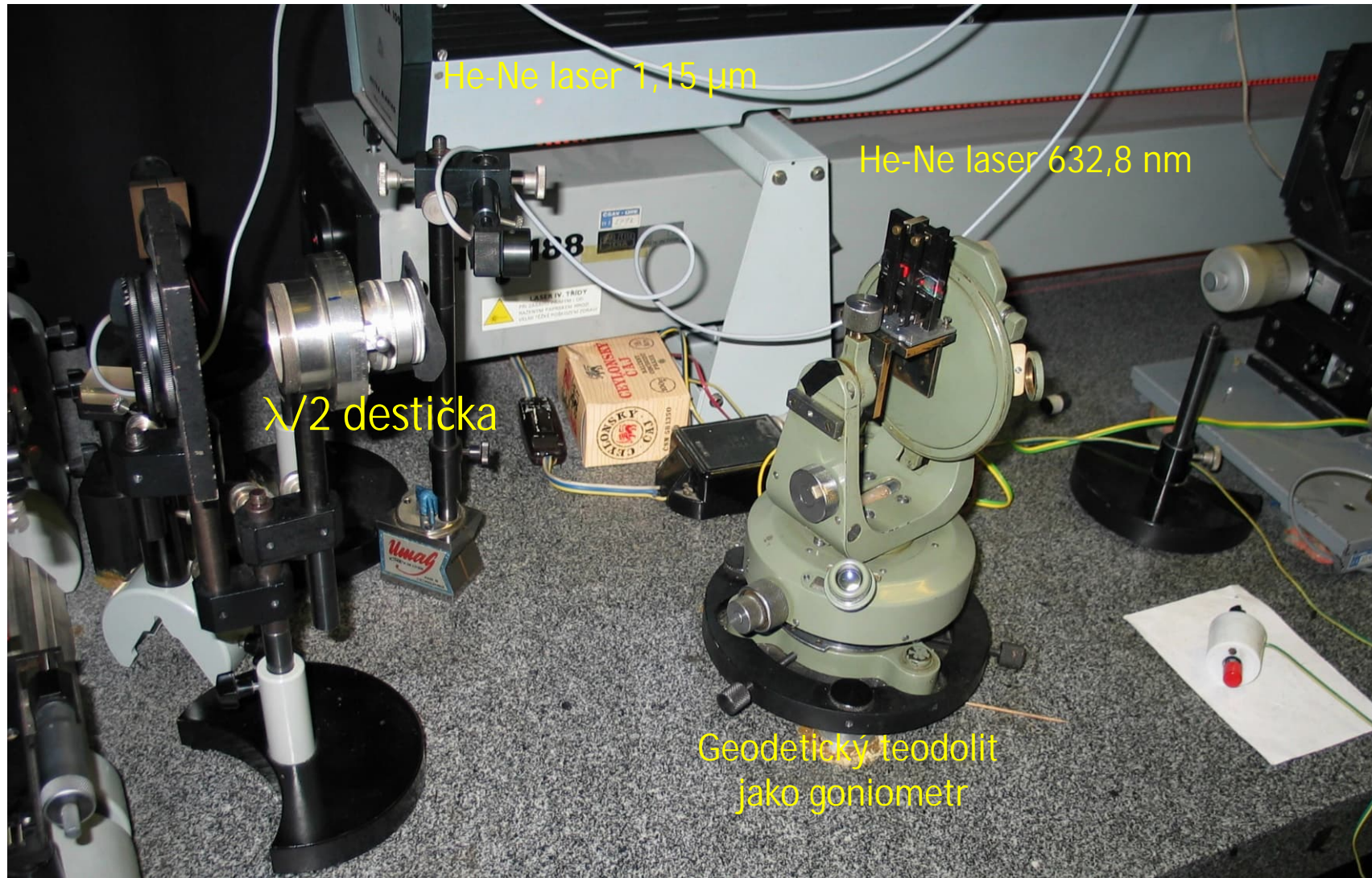
Vlnovod je umístěn na otočném stolku (goniometru)

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

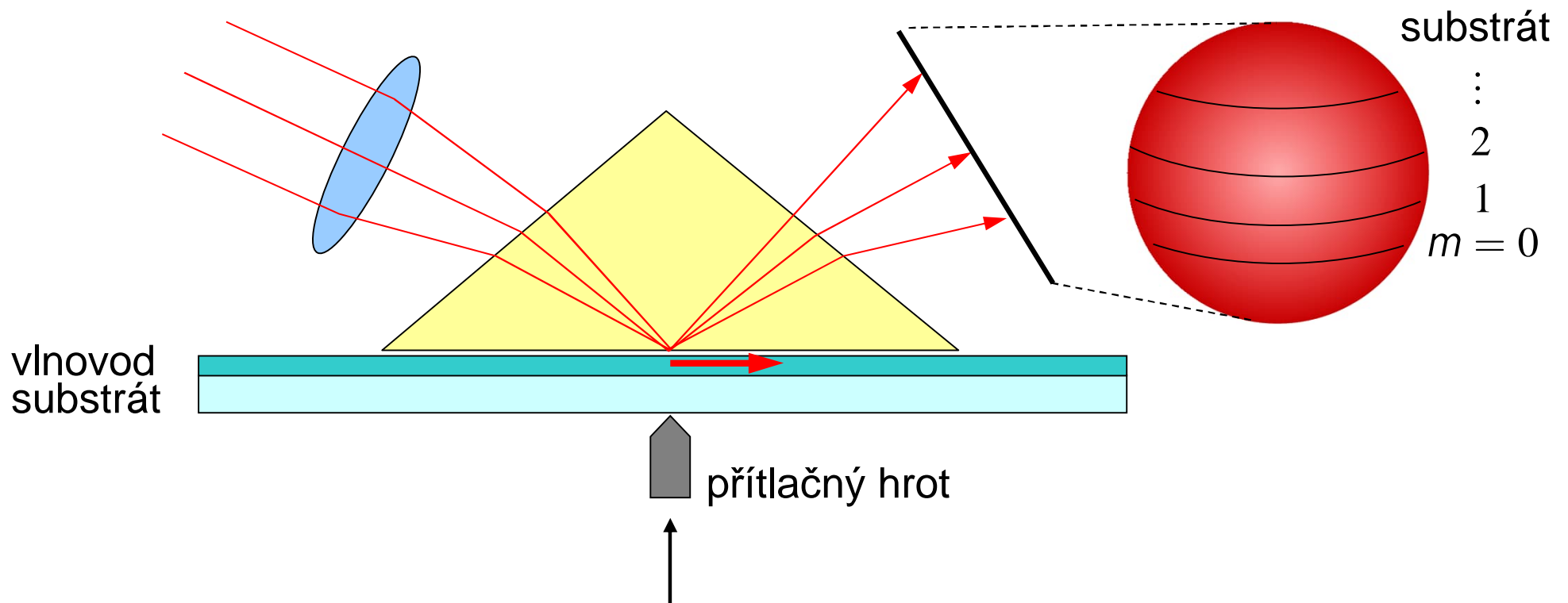
4. Vypočteme N_m
- $$N_m = \sqrt{n_p^2 - \sin^2 \varphi_m} \sin \psi + \cos \psi \sin \varphi_m$$

Často lze současně měřit i index lomu podložky

Laboratorní sestava pro měření efektivních indexů lomu planárních vlnodů (ÚFE, 1980)



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} .

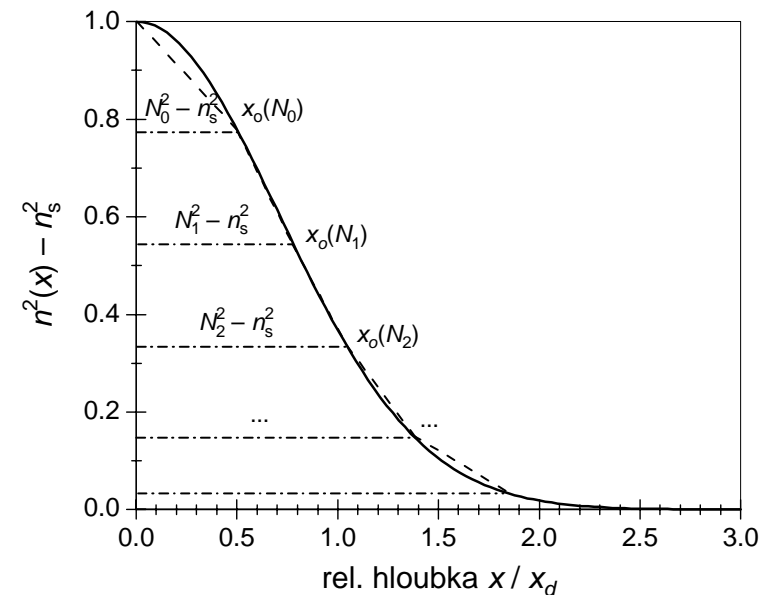
Určení profilu indexu lomu difúzního vlnovodu ze spektra vedených vidů

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

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

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).

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:

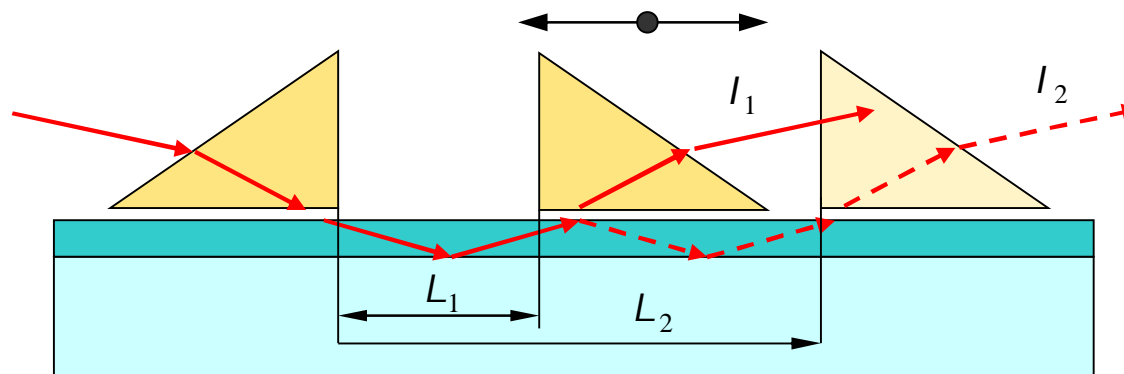
$$k_0 x_{d,m} = \frac{\left(m + \frac{3}{4}\right)\pi}{x_0(N_m)/x_d \int_0^{\sqrt{n^2(x/x_d) - N_m^2}} d(x/x_d)}$$

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

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

Měření útlumu planárních vlnovodů

Dvouhranolová metoda:

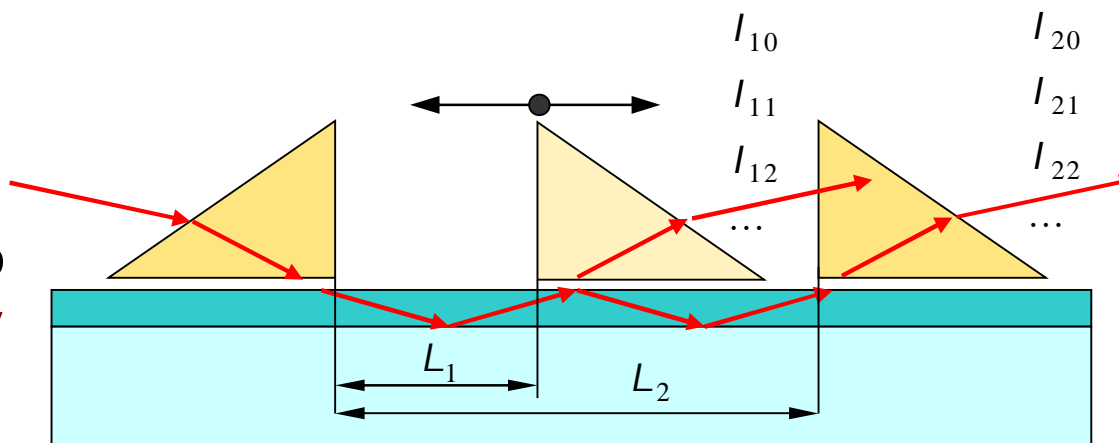


$$b = \frac{10 \log(I_{out,1} / I_{out,2})}{(L_2 - L_1)} \quad [\text{dB/cm}]$$

Problém: neměnit účinnost (výstupní) vazby

Tříhranolová metoda:

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

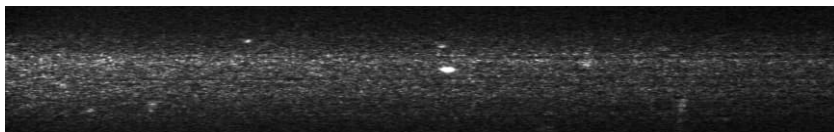


Problém: vzorek musí mít dostatečně velké rozměry

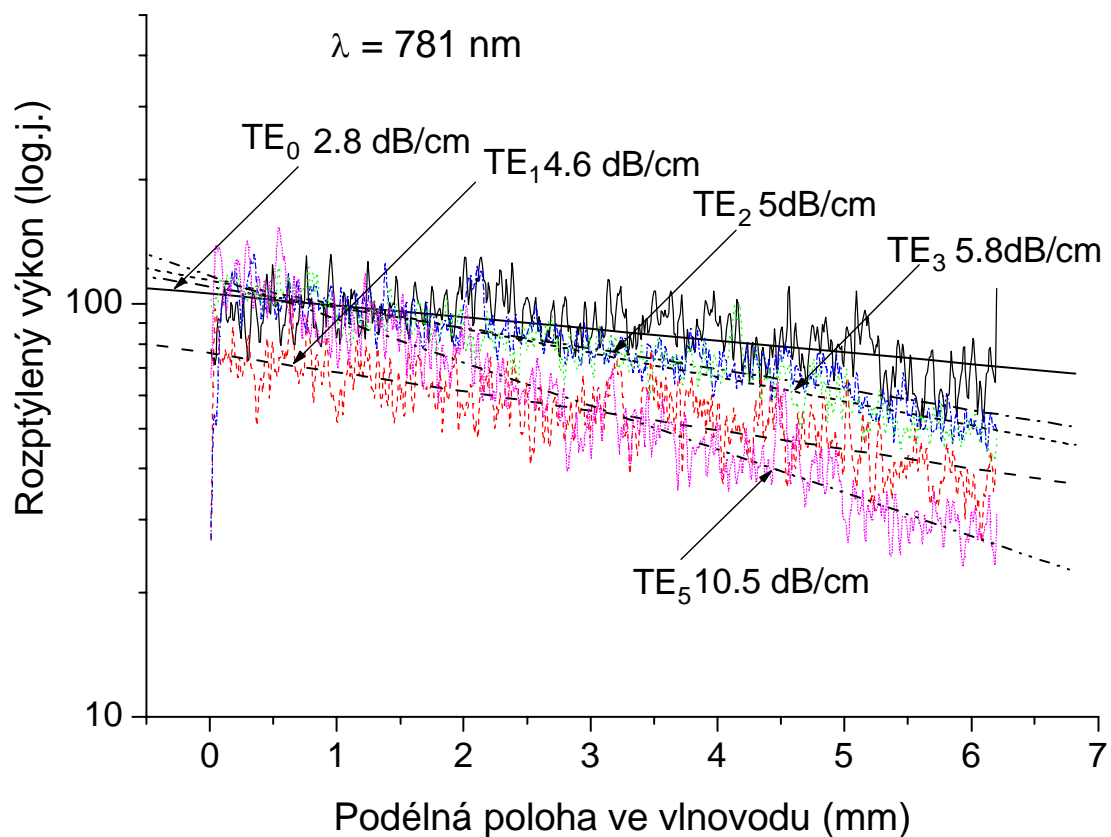
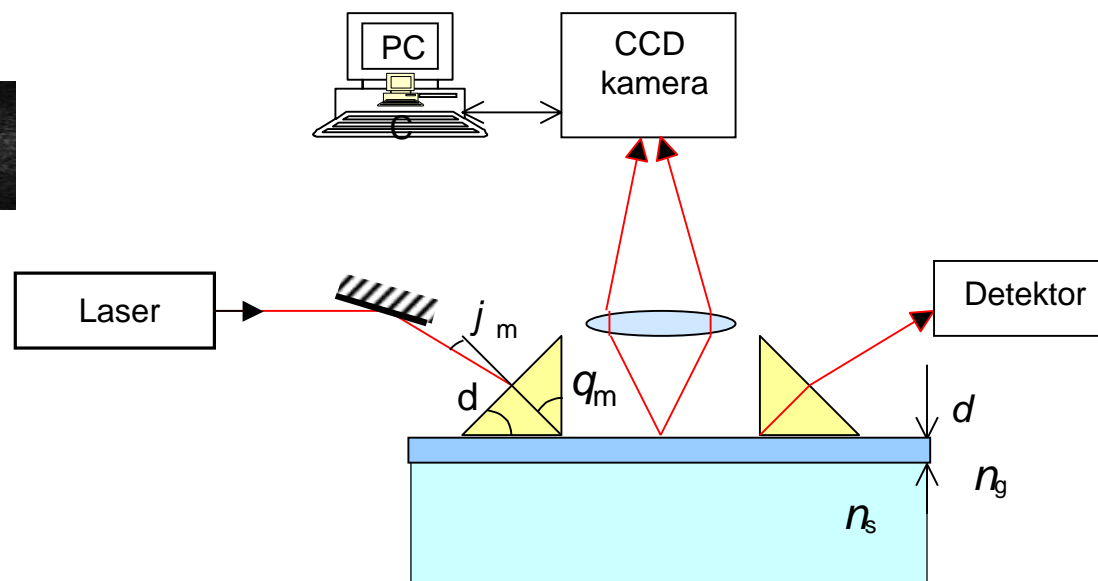
Přesnost metody typicky řádu 1 dB/cm

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:

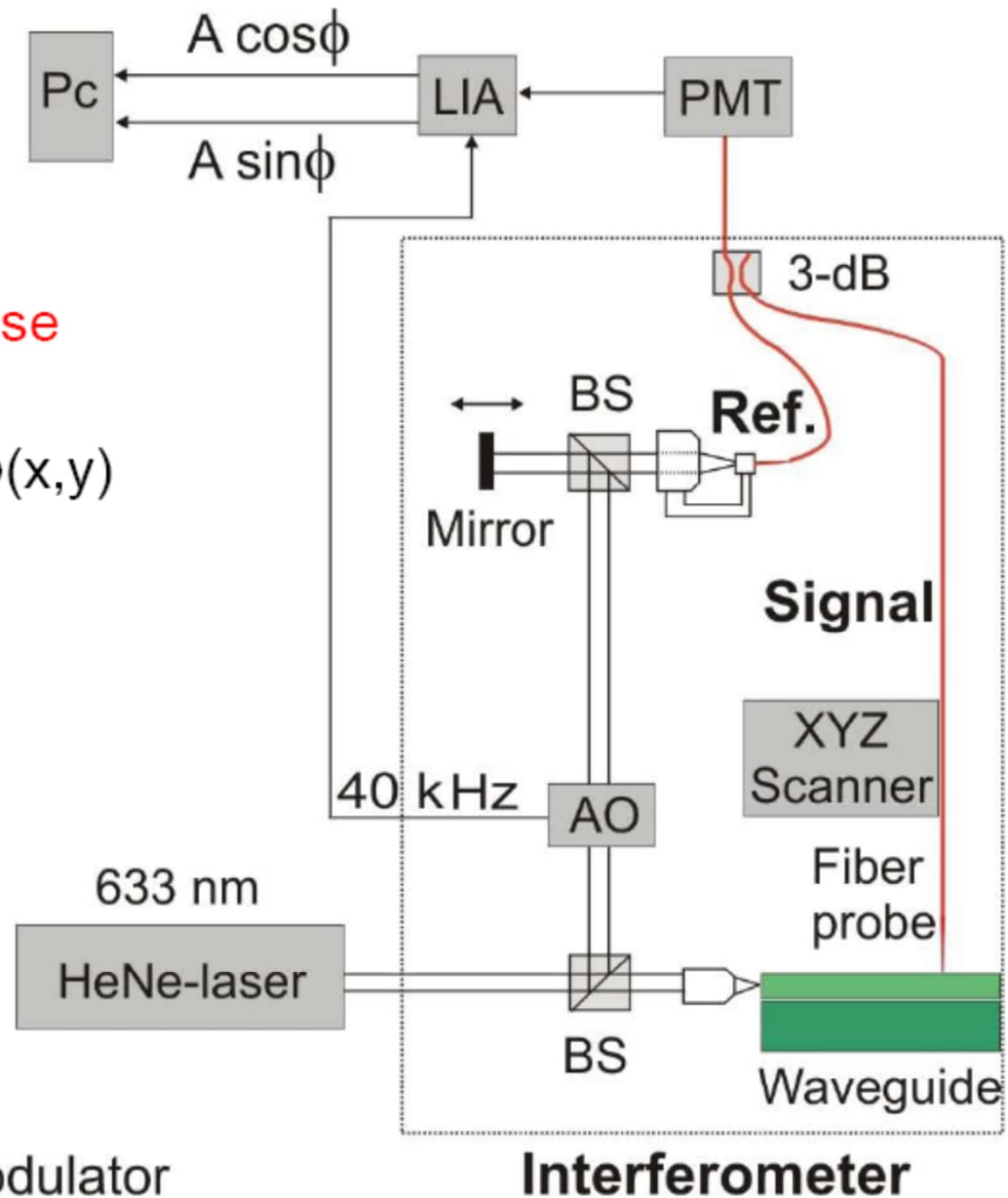
➔ Both **amplitude** and the **phase** of light are retrieved
 ($A(x,y)\cos\varphi(x,y)$ & $A(x,y)\sin\varphi(x,y)$ measured)

ϕ = Phase

A = Amplitude

LIA = Lock-In Amplifier

AO = Acousto-Optic Modulator

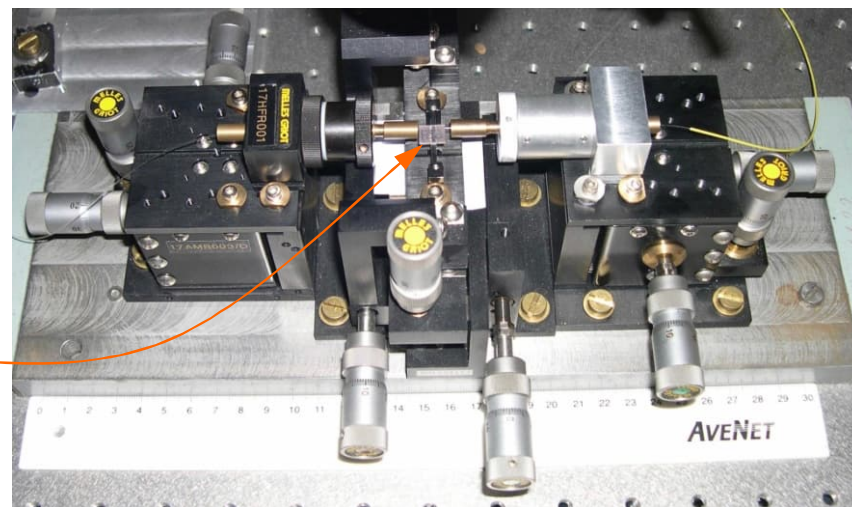
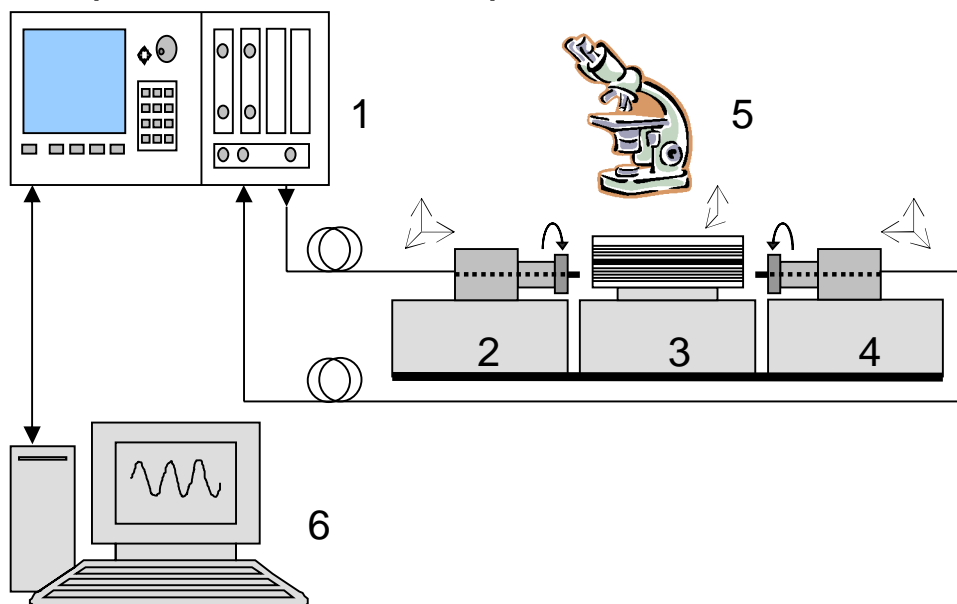


Měření útlumu kanálkových vlnovodů

Metoda Fabryových-Perotových rezonancí



Uspořádání měřicího pracoviště



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

Modální transmittance

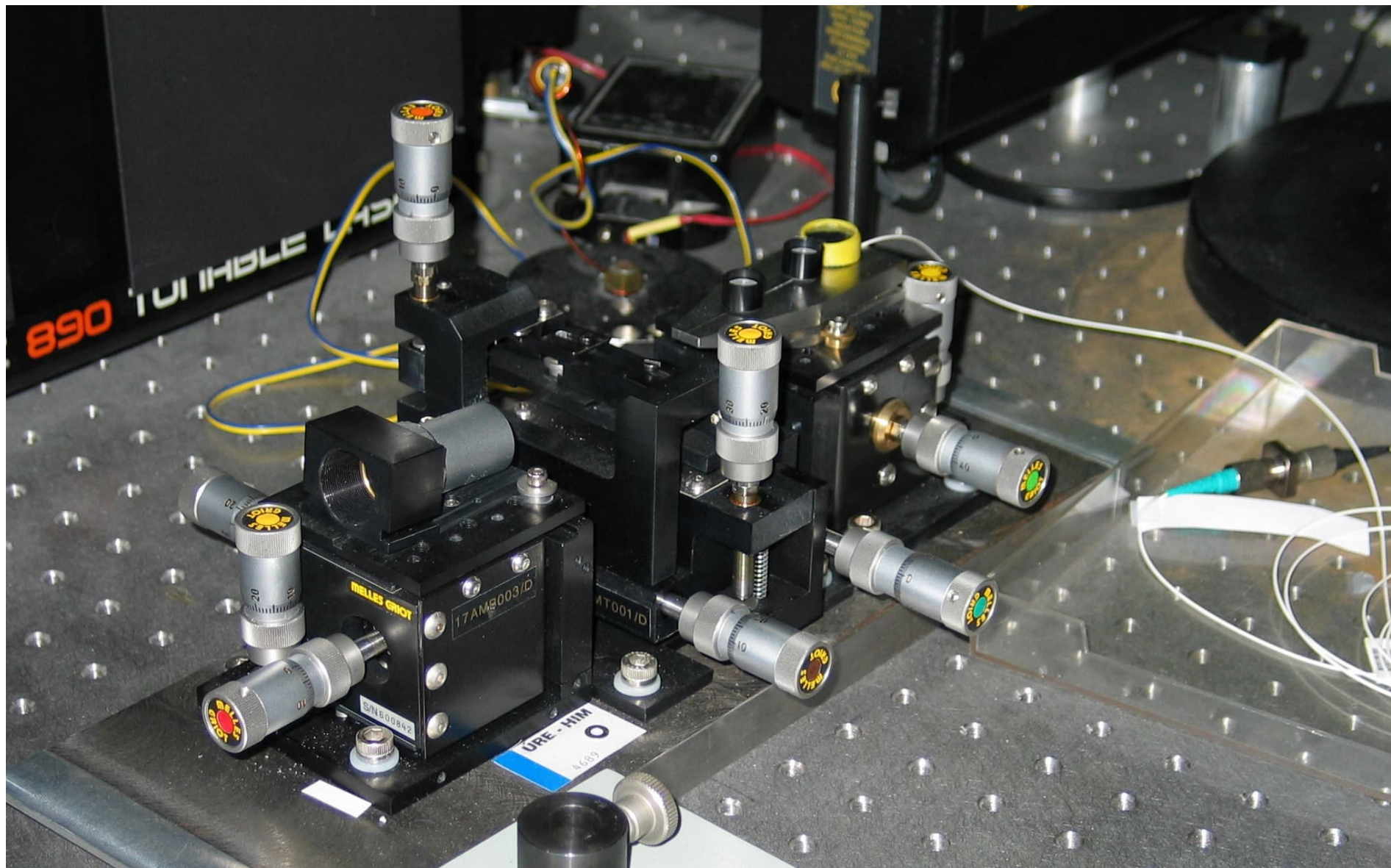
$$T = \left| \frac{(1 - R^2) \exp(-\alpha L)}{1 + R^2 \exp(-\alpha L) \exp(2ik_0NL)} \right|^2$$

R je modální reflektance, α činitel útlumu, L délka

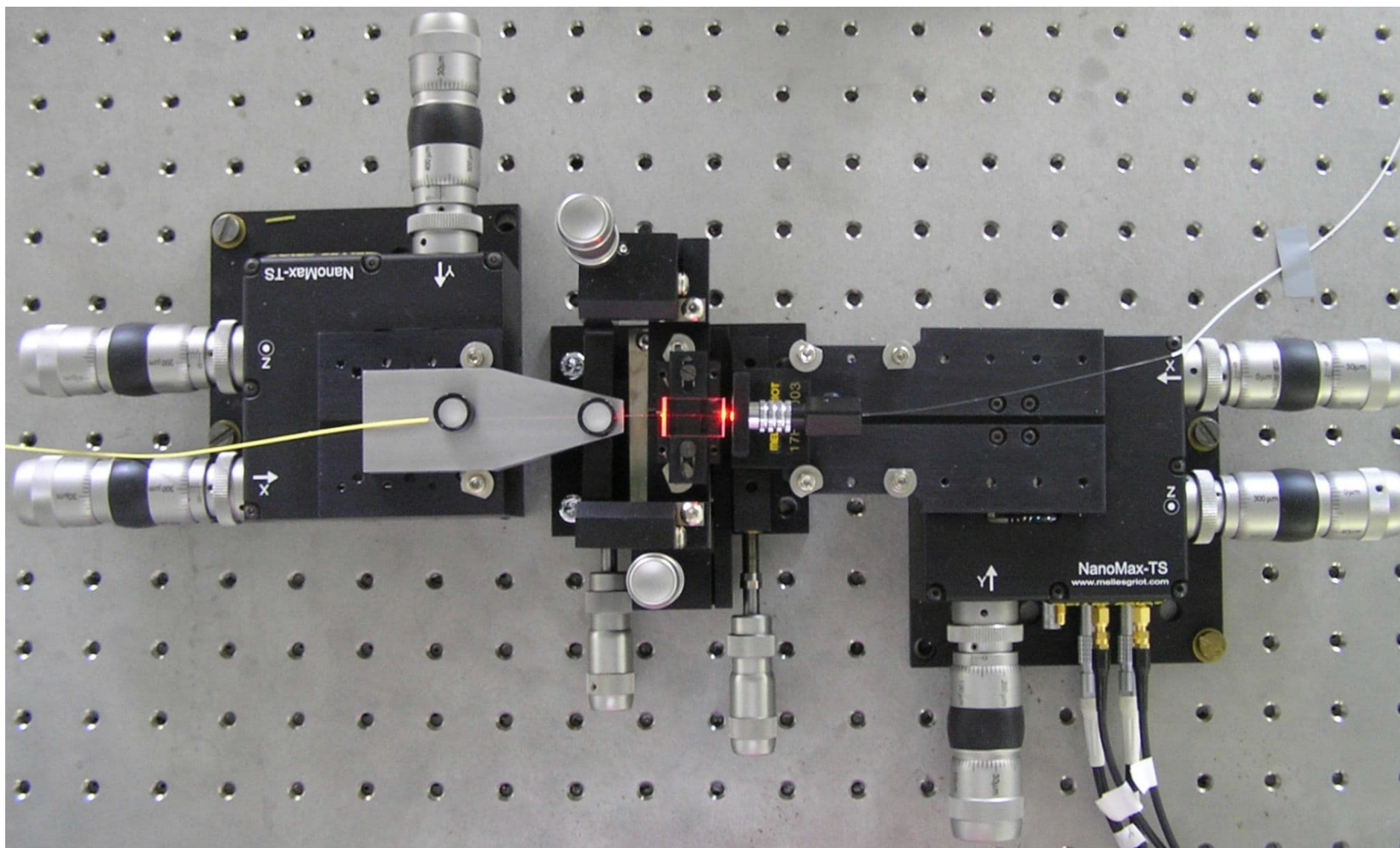
Z poměru max. a min. transmittance vyjádříme měrný útlum (dB/cm)

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

Sestava pro měření parametrů struktur integrované optiky (ÚFE 2003)

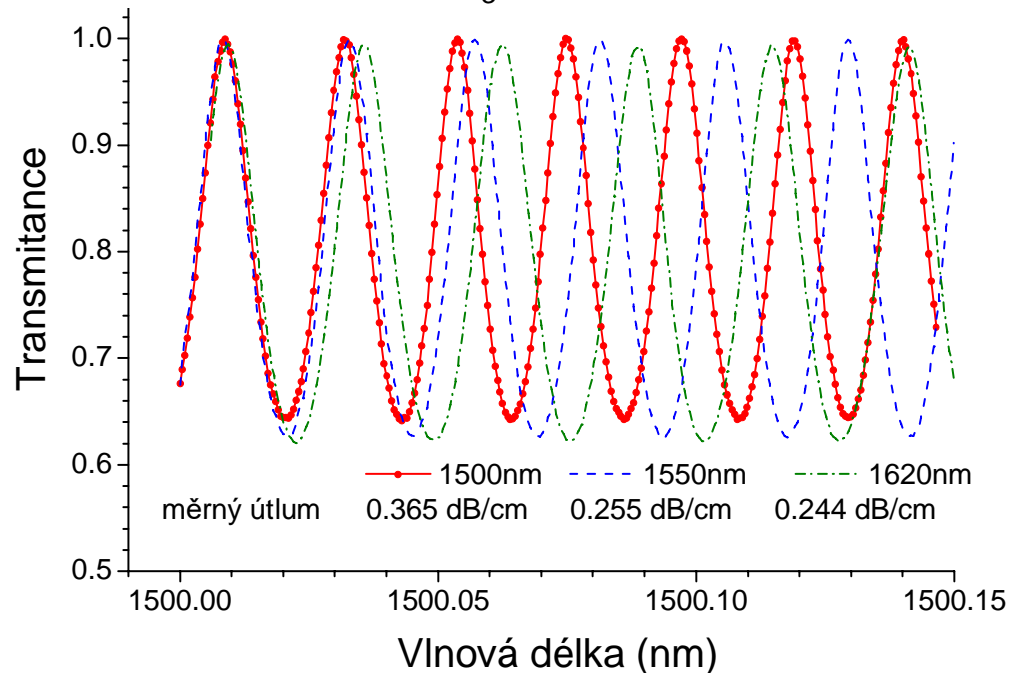


Sestava pro měření parametrů struktur integrované optiky (ÚFE 2008)

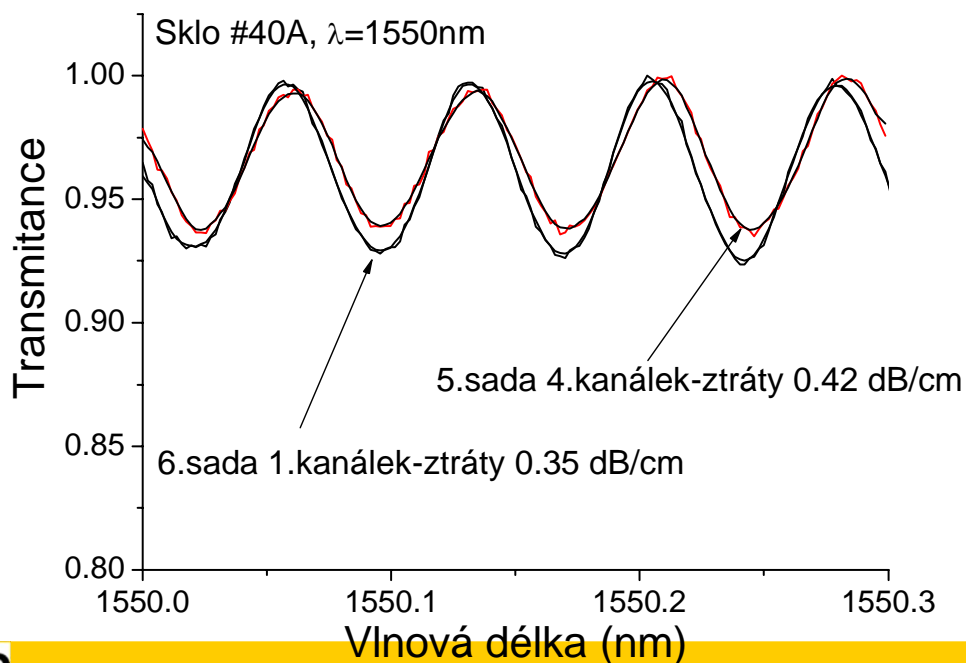
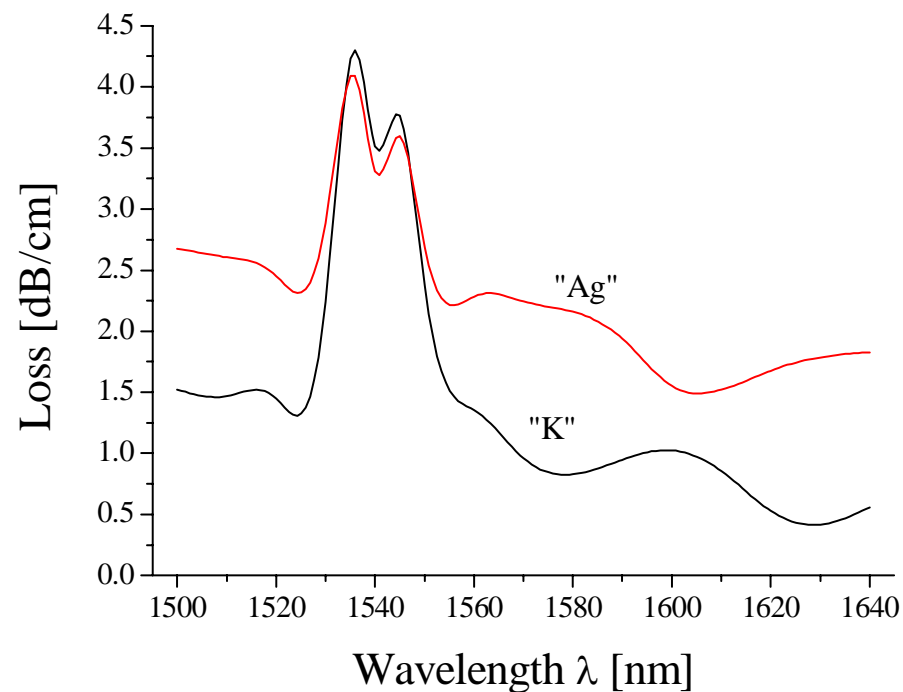


Měření útlumu kanálkových vlnovodů

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+}

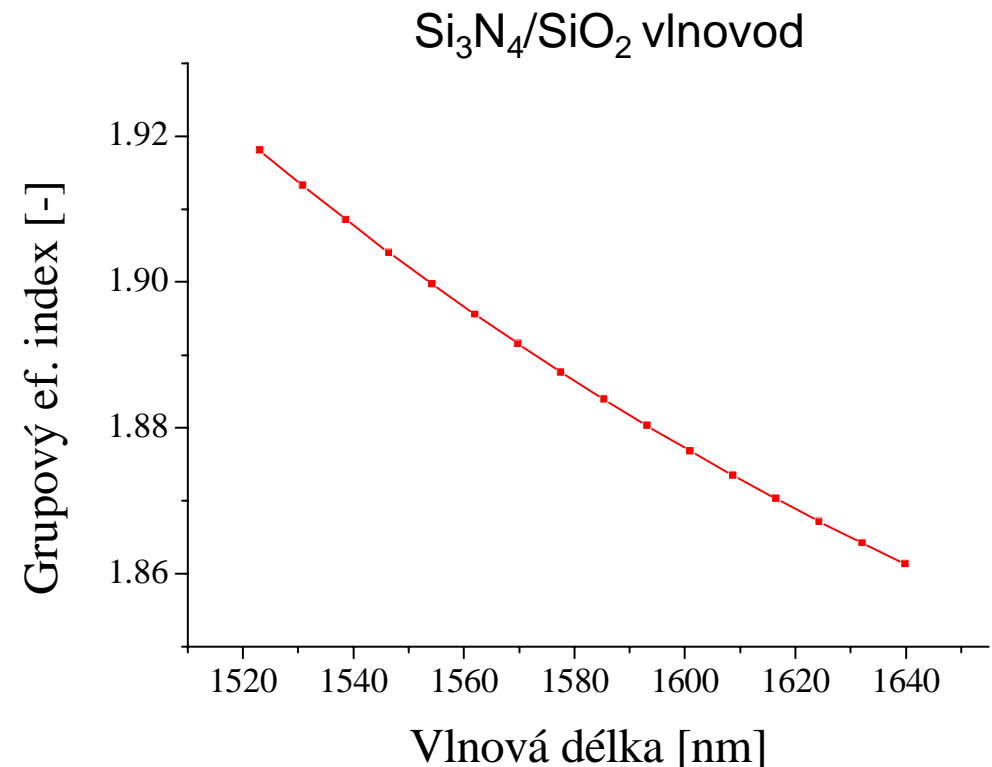
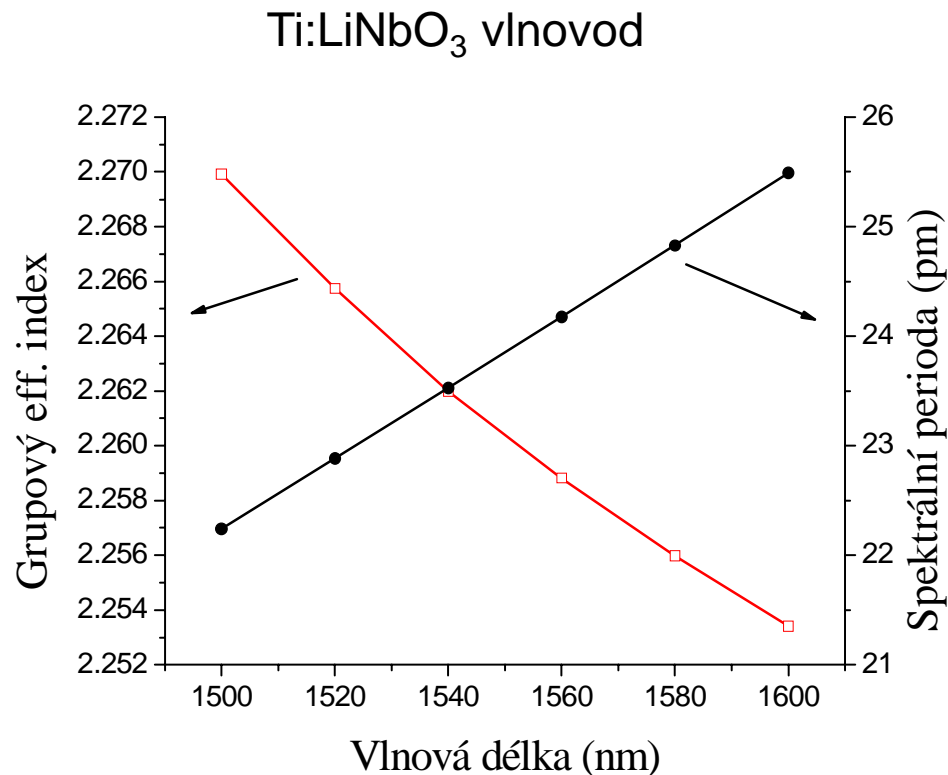


Měření grupového indexu lomu kanákových vlnovodů

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 $\Delta[\nu N(\nu)] = \left(N + \nu \frac{dN}{d\nu} \right) d\nu = N_g \Delta\nu = \frac{c}{2L}$,

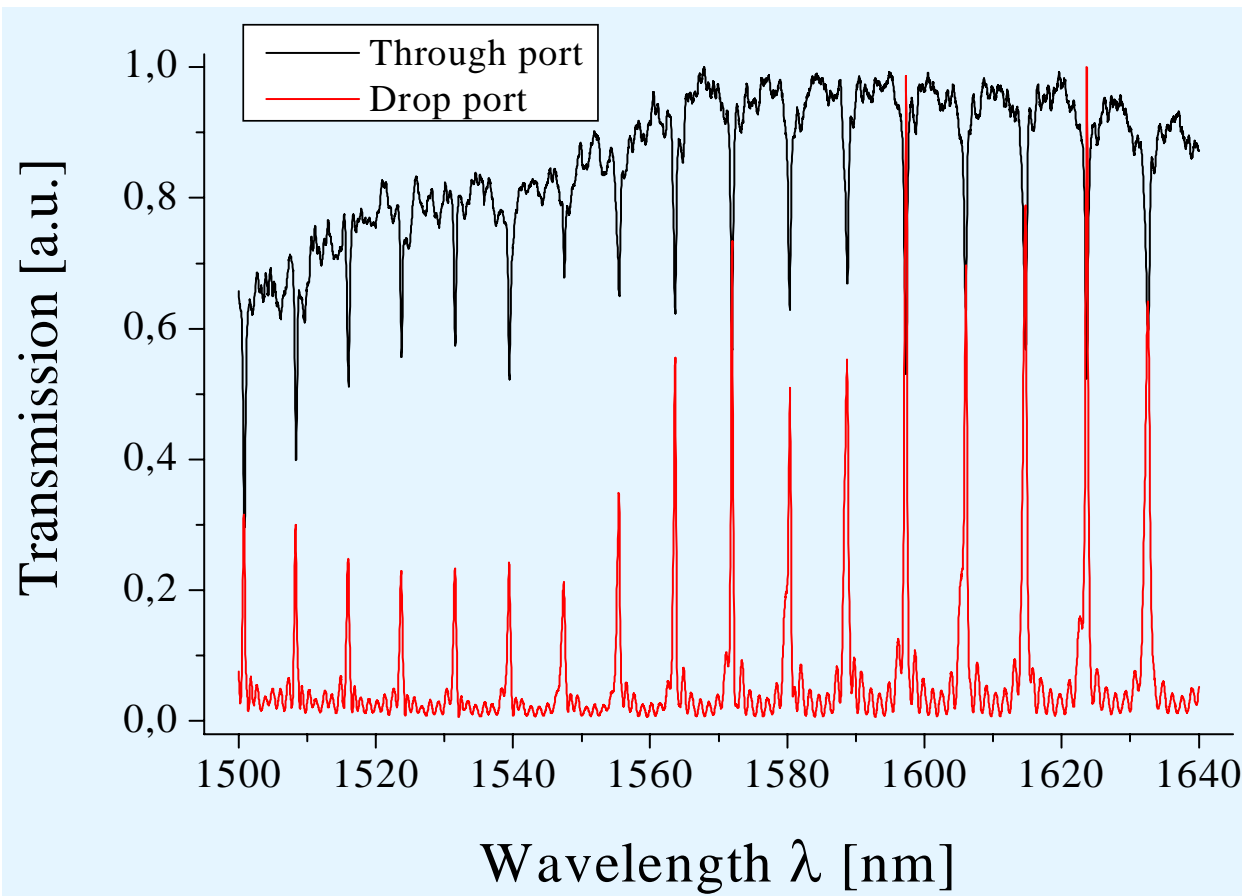
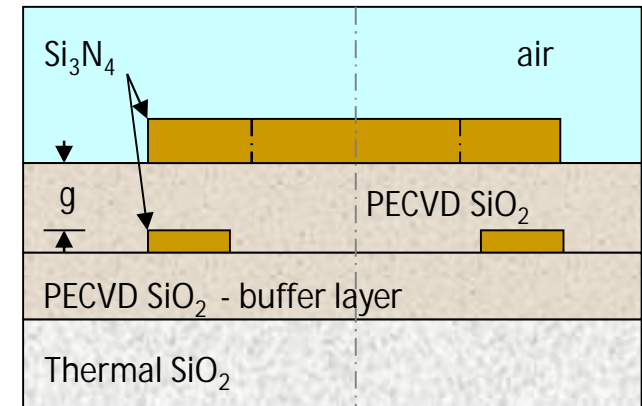
$$\Delta\nu = \frac{c}{2N_g L}, \text{ neboli } N_g = \frac{c}{2\Delta\nu L} = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda L} \dots \text{ grupový index lomu}$$



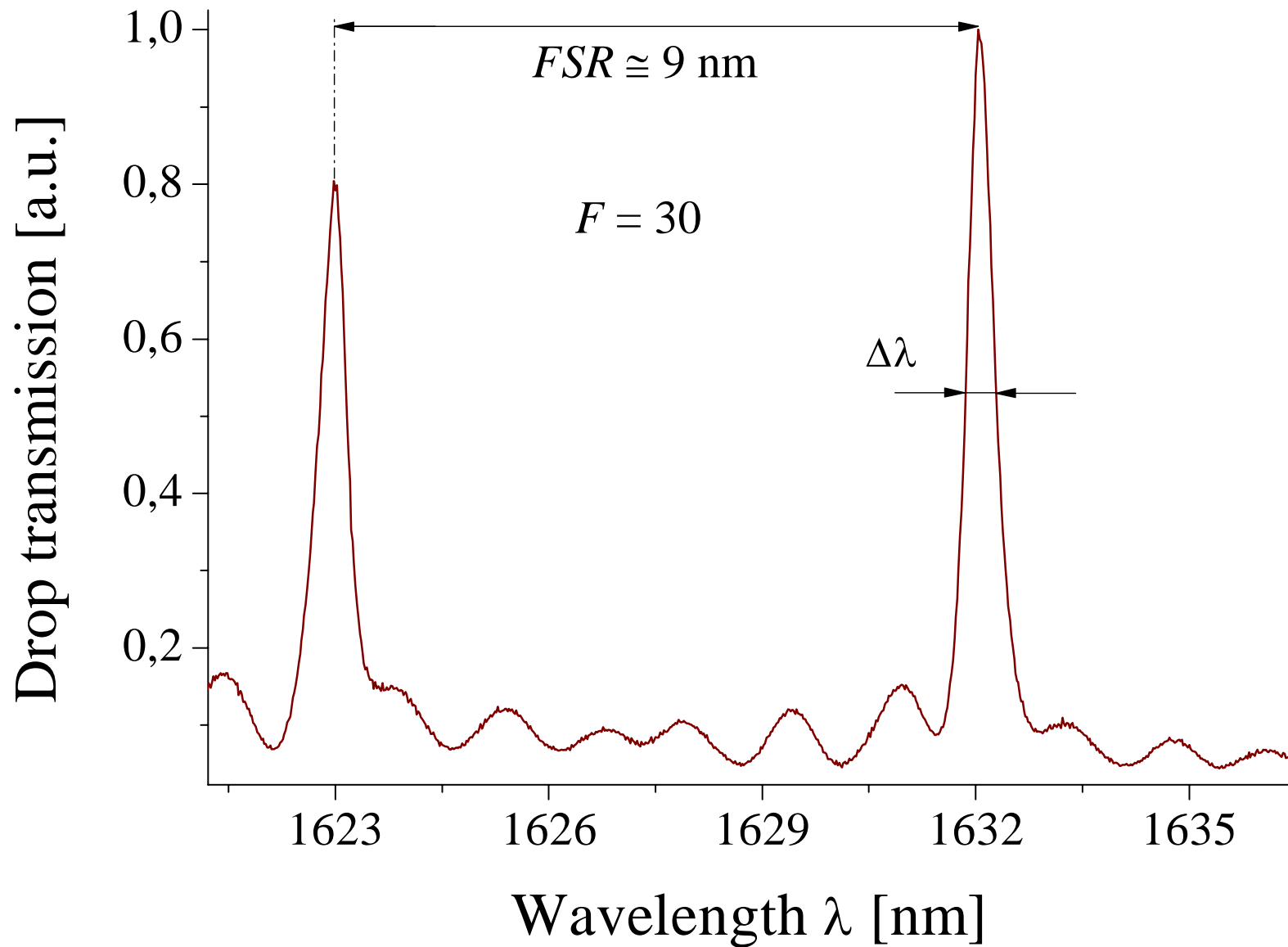
Charakterizace mikrorezonátorů

(F. Ondráček, FEL ČVUT a ÚFE)

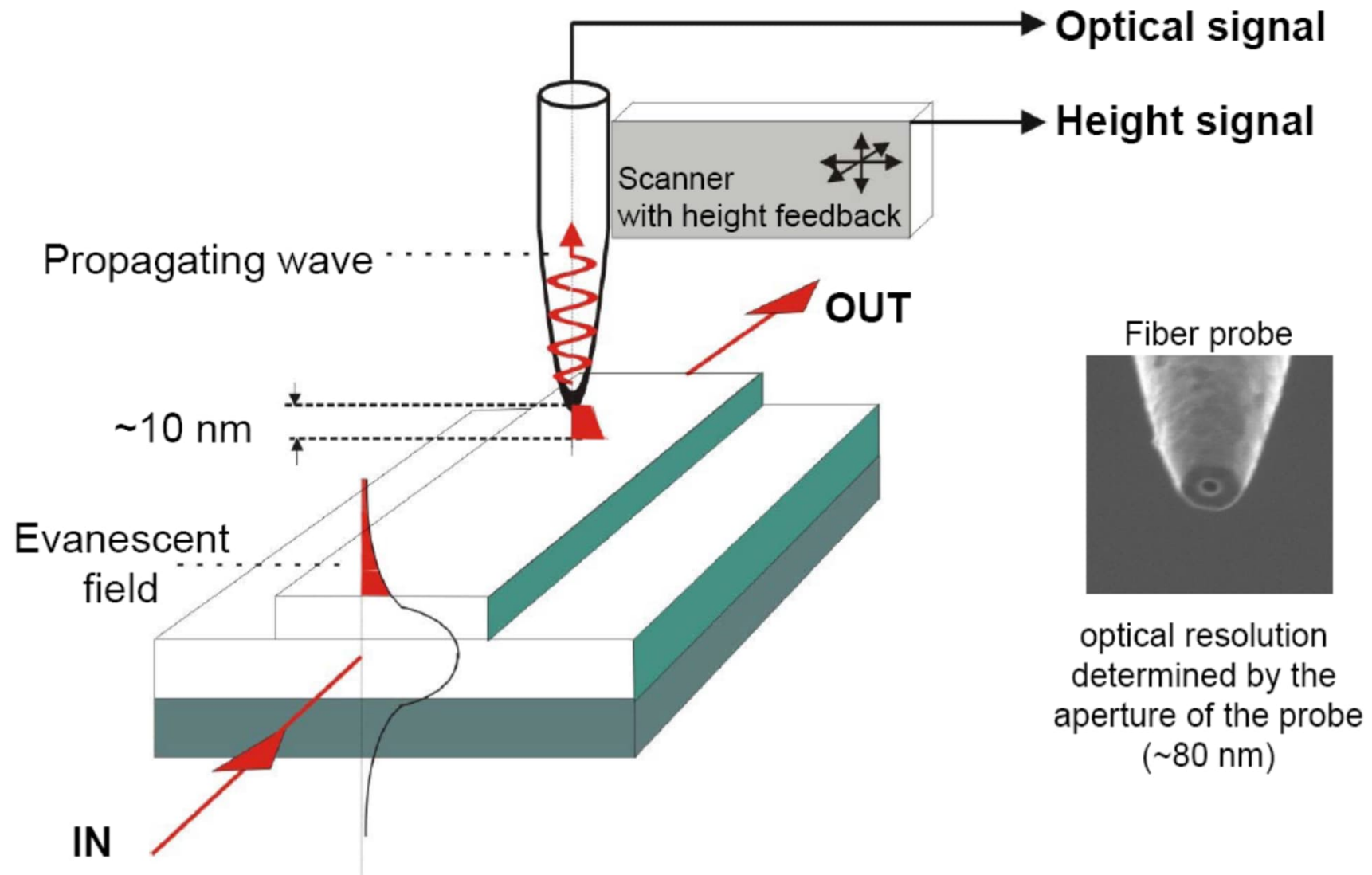
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ prstencový μR , $R = 50 \mu\text{m}$
technologie: Uni Twente, NL



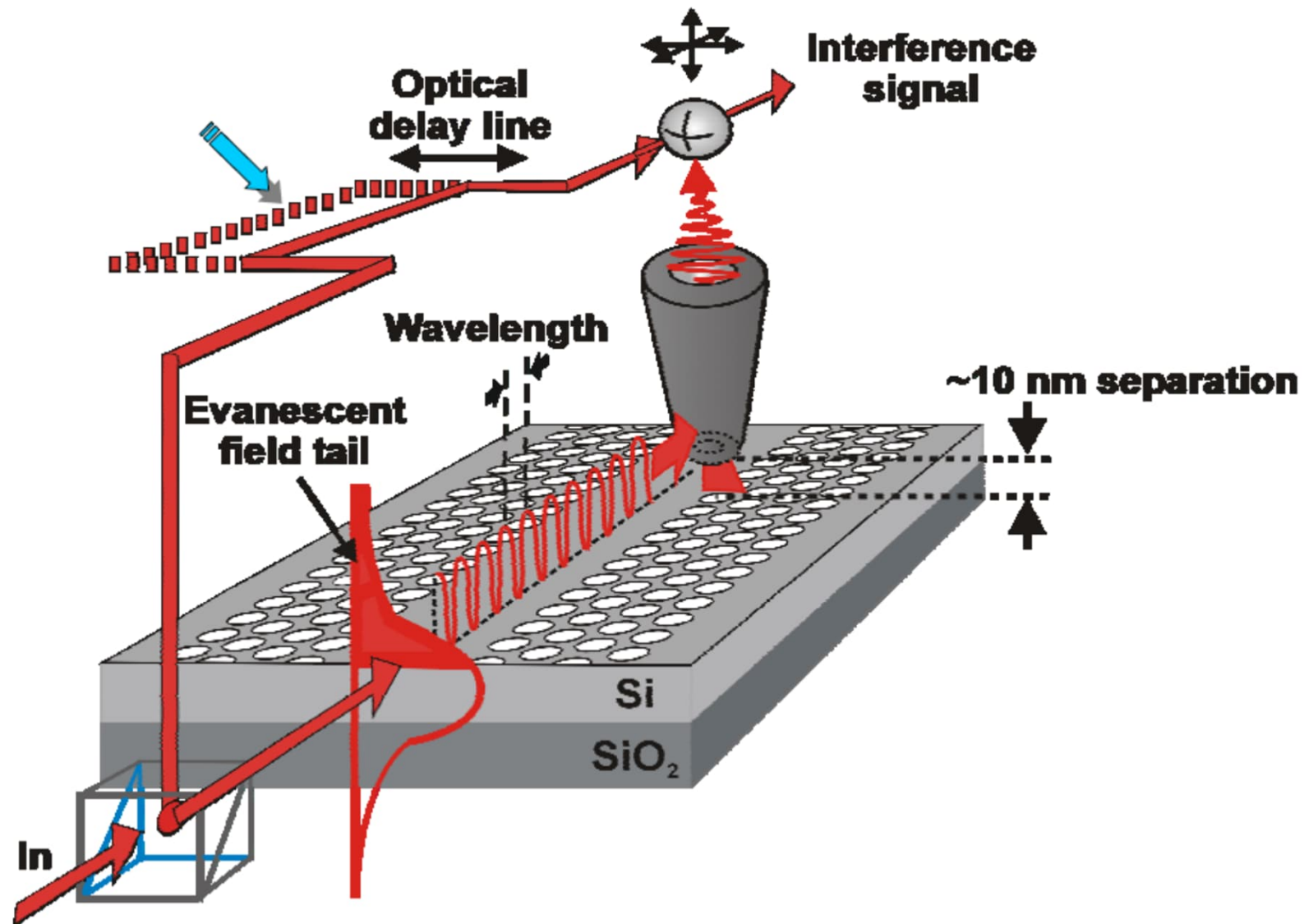
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ μR
(vzorek Uni Twente)



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)

