

Optická vlákna a komunikace. Co dále ?

Petr Hlubina

`petr.hlubina@fpf.slu.cz`

`http://www.fpf.slu.cz/~hlu10uf`

Ústav fyziky, Slezská univerzita v Opavě,
Bezručovo nám. 13, 746 01 OPAVA

Obsah

- Historický vývoj
- Úvod
 - Postupné vlny
 - Přenosová kapacita
 - Lom od kolmice - úplný odraz světla
 - Podmínky šíření světla optickým vláknem
- Typy optických vláken
- Jevy limitující použití optických vláken v komunikacích
 - Útlum optických vláken
 - Mezividová disperze optických vláken
 - Disperze jednovidových vláken
- Moderní systémy v optických komunikacích
 - WDM a DWDM - vývoj
- Mikrostrukturní optická vlákna - nová éra komunikací
- Měření na optických vláknech - naše nové metody a výsledky

Historický vývoj

- J. C. Maxwell - v letech 1862-1864 formuloval teorii elektromagnetického pole. Vlnová rovnice pro $E(z, t)$

$$\frac{\partial^2 E(z, t)}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E(z, t)}{\partial t^2} = 0.$$

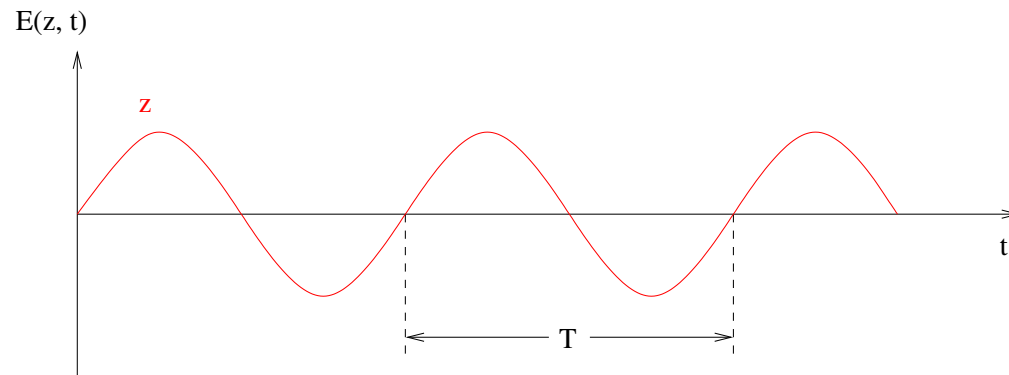
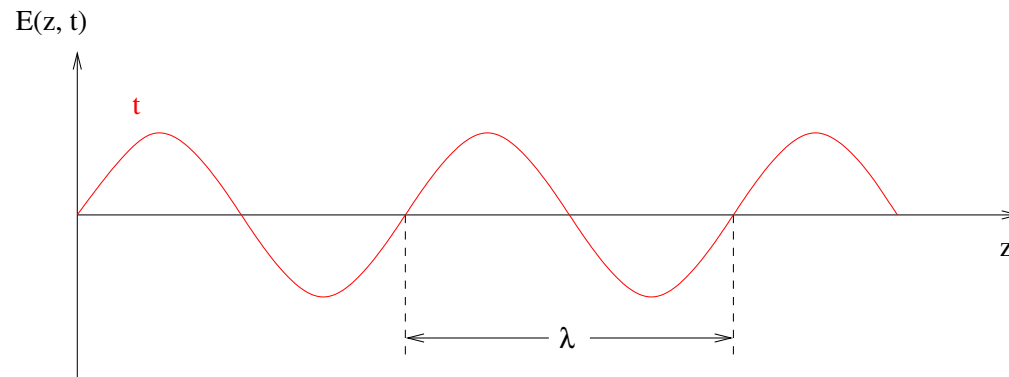
Fázová rychlost šíření elektromagnetických vln - světla - ve vakuu:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1},$$

kde $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ je permitivita a $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$ je permeabilita vakua.

- A. G. Bell - v r. 1880 vynalezl "fotofon" - "světelný" telefon, tj. přístroj využívající k přenosu informace světla šířícího se atmosférou.
- J. Tyndall (konec 19. století) - experimentálně ukázal, že světlo je vedeno dielektrikem (např. vodním paprskem vytékajícím z nádoby).
- Ch. K. Kao - v r. 1966 předpověděl použití optického vlákna jako přenosového prostředí.
- Firma Corning Glass - v r. 1969 vyrobila první optické vlákno s relativně "malým" útlumem (30 dB km^{-1}).
- Éra dynamického rozvoje optických komunikací.

Postupné vlny

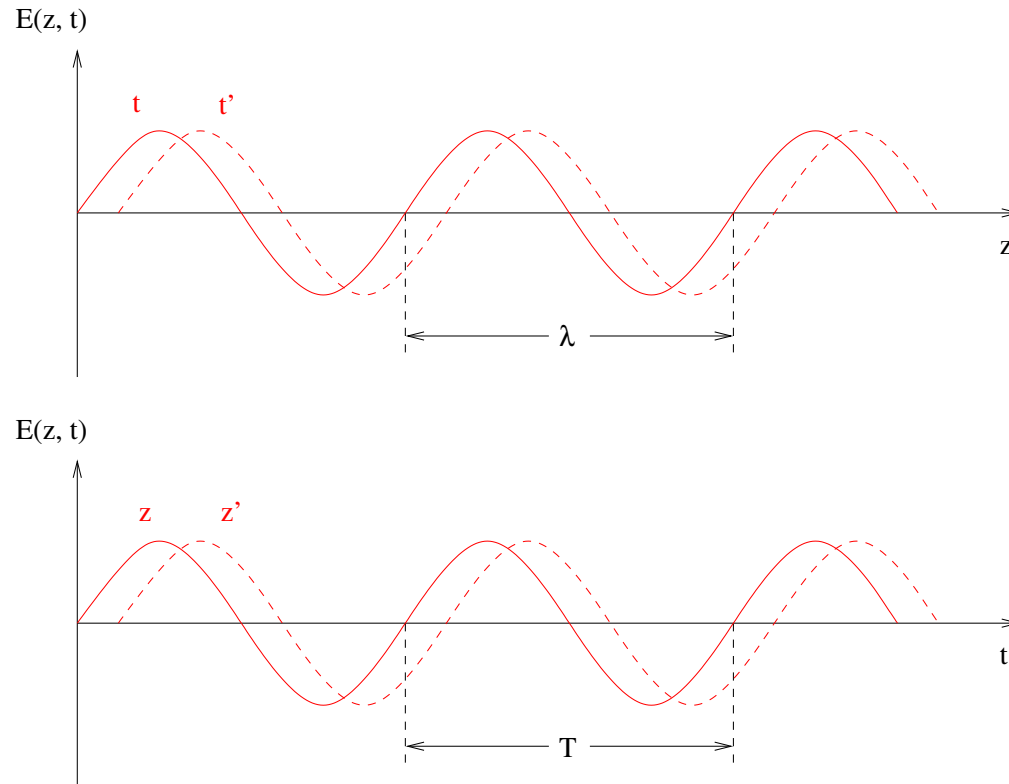


Rovnice postupné vlny:

$$E(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}z\right)$$

T ... perioda,
 λ ... vlnová délka.

Postupné vlny



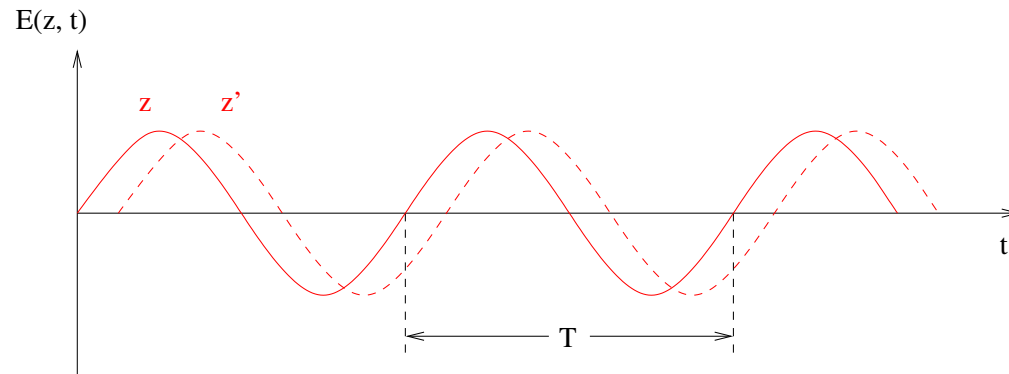
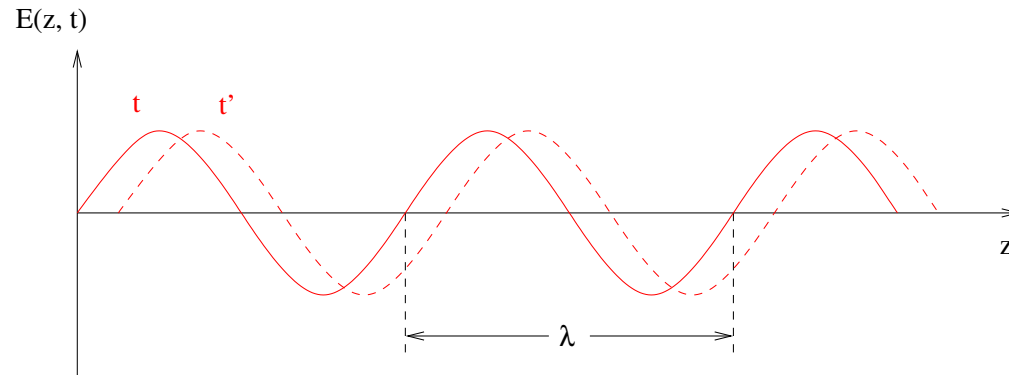
Rovnice postupné vlny:

$$E(z, t) = E_0 \cos(\omega t - kz) = E_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}z\right)$$

Vztah mezi vlnovou délkou λ a periodou T :

$$\lambda = cT$$

Postupné vlny



Optický obor - vlnová délka λ :

100 nm až 1 mm

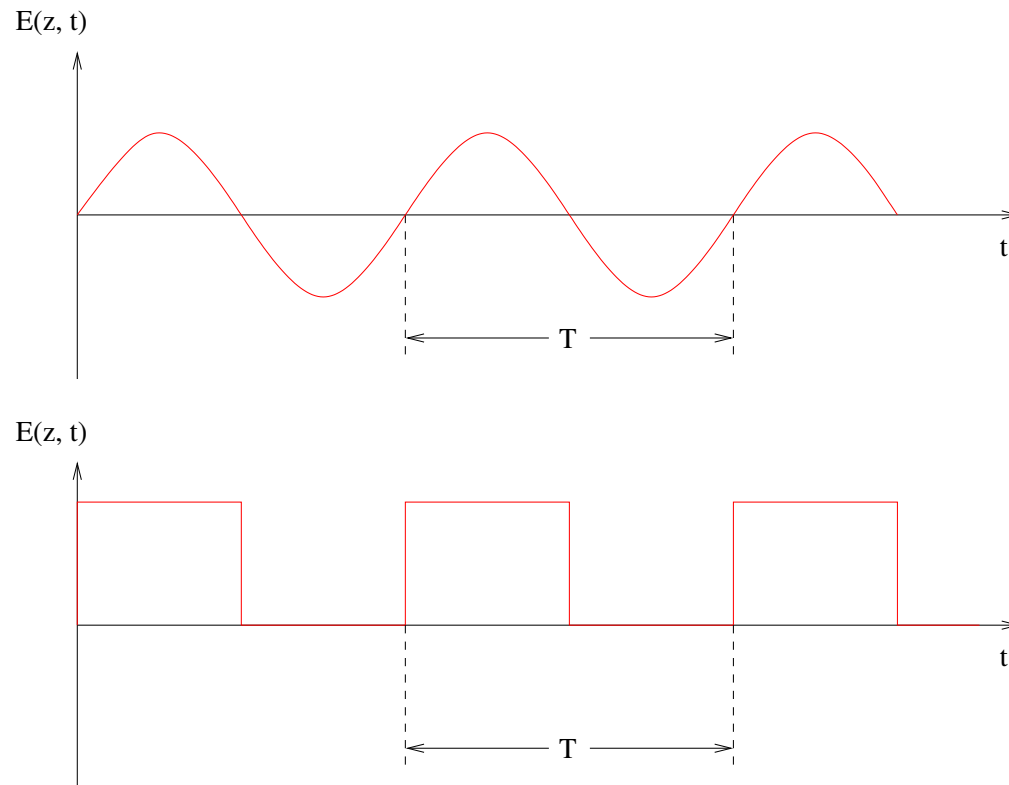
Perioda T :

$3,3 \times 10^{-16} \text{ s}$ až $3,3 \times 10^{-12} \text{ s}$

Frekvence $\nu = 1/T$:

$3 \times 10^{11} \text{ Hz}$ až $3 \times 10^{15} \text{ Hz}$

Přenosová kapacita



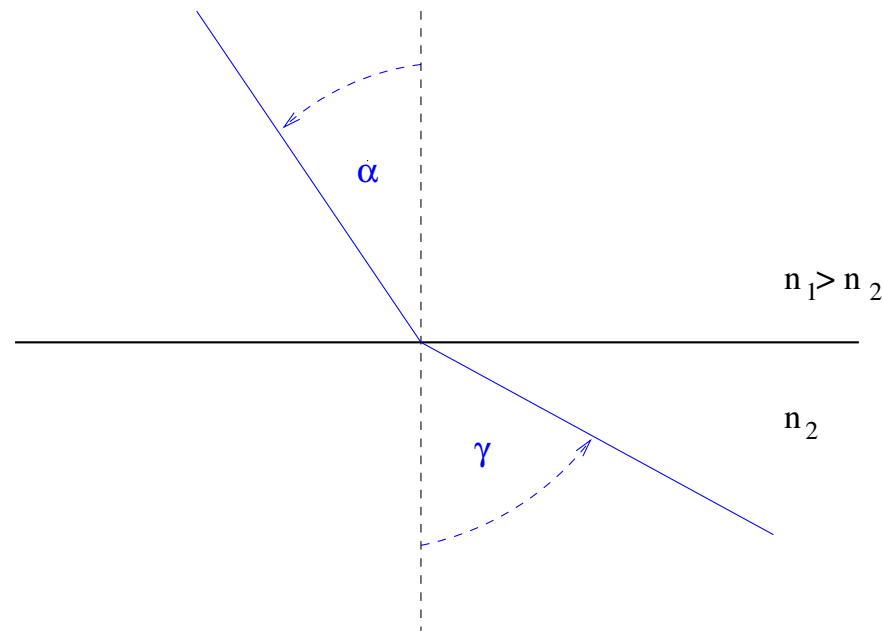
Využití přenosových vlastností světla představuje na vlnové délce $\lambda = 1,5 \mu m$ přenosovou kapacitu

$$B = 2 \times 10^{14} \text{ bit } s^{-1} = 200 \text{ Tbit } s^{-1},$$

což při pásmu $B = 64 \times 10^3 \text{ bit } s^{-1} = 64 \text{ kbit } s^{-1}$ požadovaném pro digitální přenos 1 hlasového kanálu představuje možnost přenosu přibližně:

$$3 \times 10^9 \text{ hlasových kanálů}$$

Lom od kolmice - úplný odraz světla



α ... úhel dopadu, γ ... úhel lomu, n_1, n_2 ... indexy lomu prostředí.
Index lomu (v ... fázová rychlost šíření světla v prostředí):

$$n = \frac{c}{v} \quad n \geq 1$$

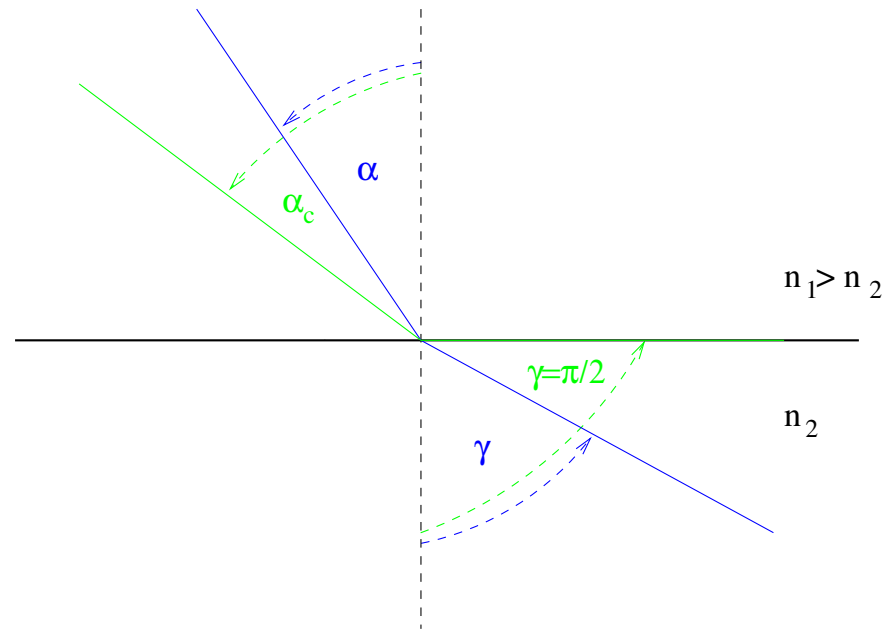
Snellův zákon lomu:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \gamma$$

Lom od kolmice:

$$n_1 > n_2 \Rightarrow \gamma > \alpha$$

Lom od kolmice - úplný odraz světla



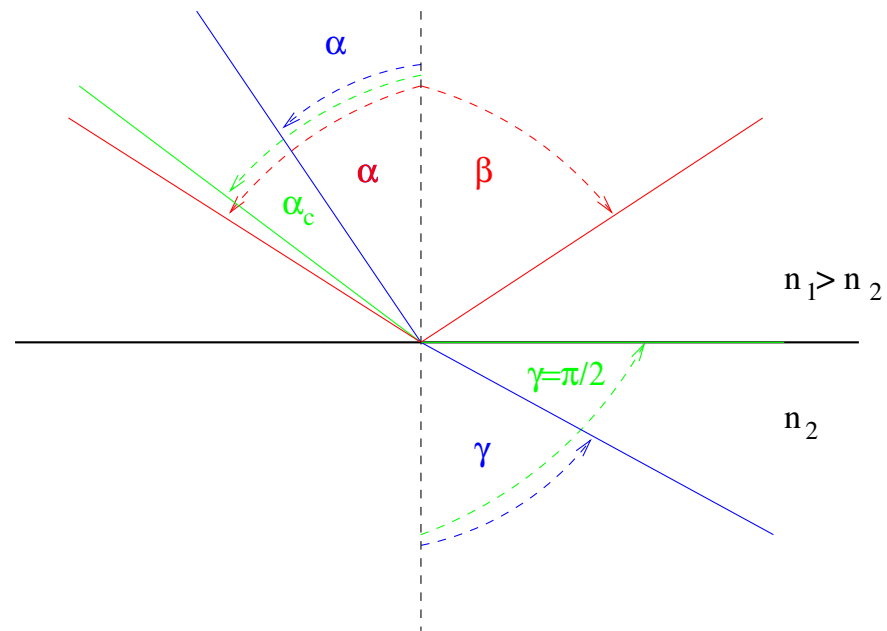
Snellův zákon lomu:

$$n_1 \sin \alpha_c = n_2 \sin(\pi/2)$$

Kritický úhel α_c :

$$\alpha_c = \arcsin(n_2/n_1)$$

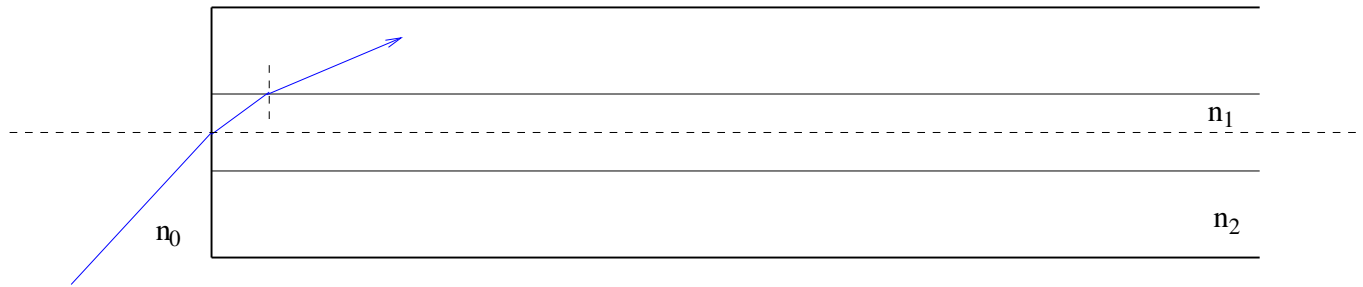
Lom od kolmice - úplný odraz světla



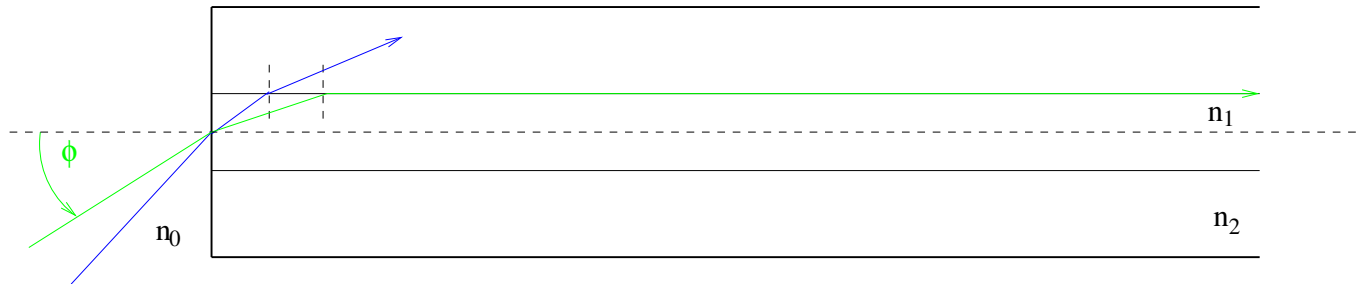
Úplný odraz světla:

$$\alpha > \alpha_c = \arcsin(n_2/n_1)$$

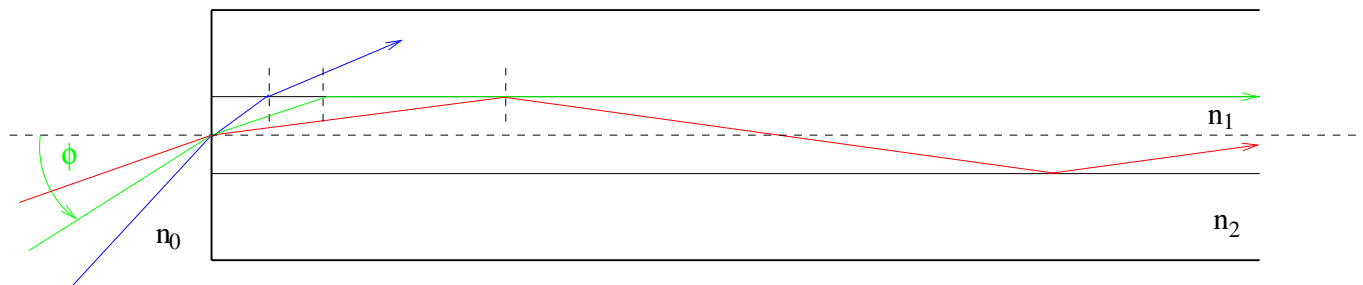
Podmínky šíření světla optickým vláknem



Paprsek vedený do pláště



Numerická apertura: $NA = n_0 \sin \phi = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$



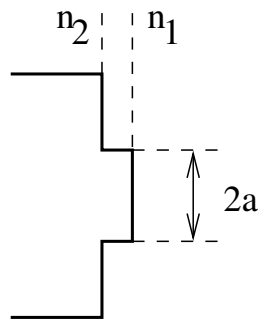
Paprsek vedený jádrem

Typy optických vláken

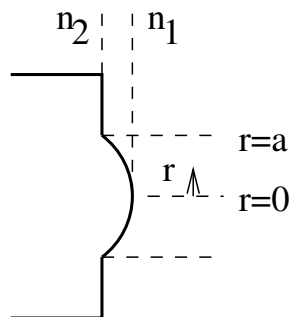
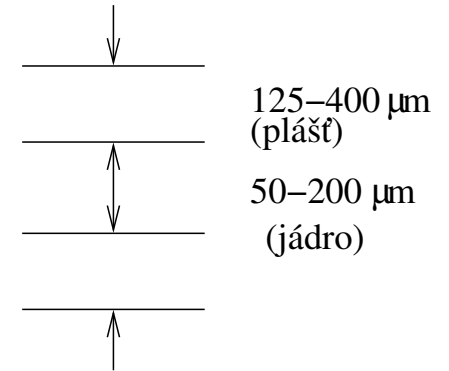
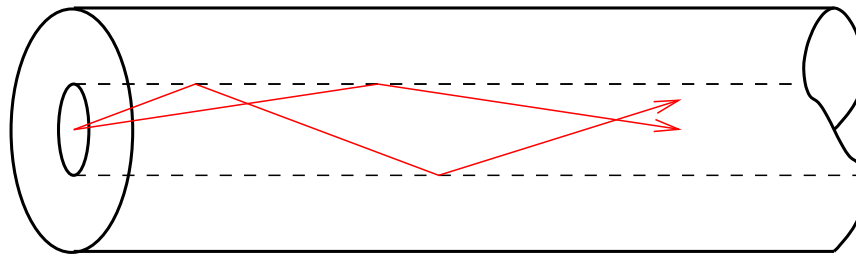
Profil indexu lomu

Typy optických vláken – šíření paprsků

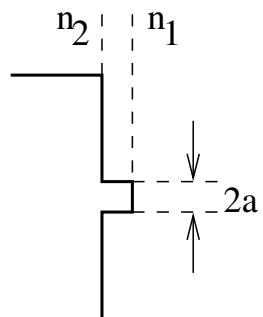
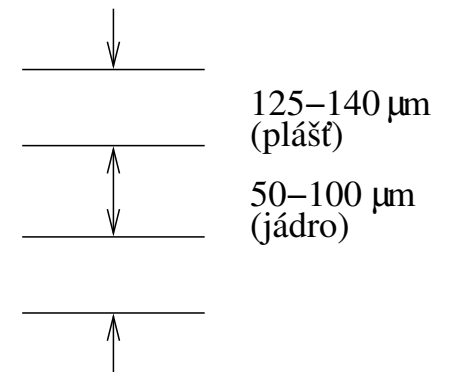
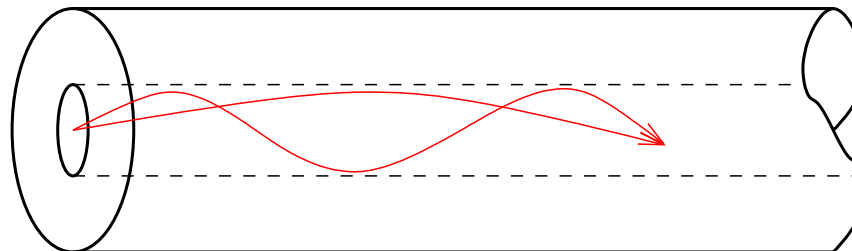
Typické rozměry



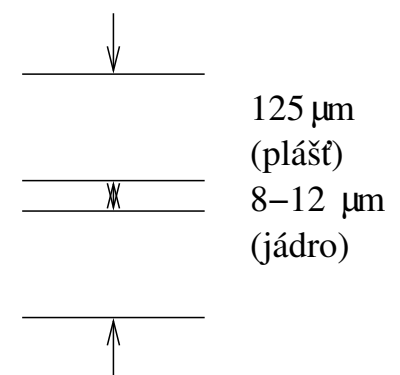
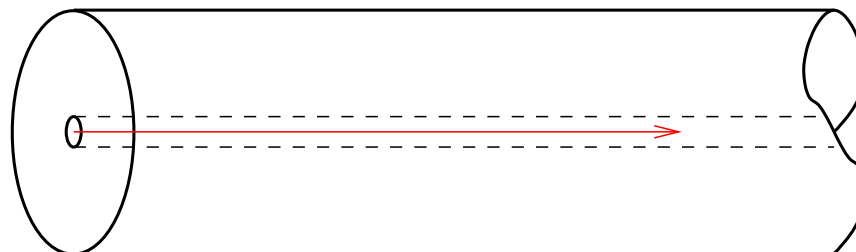
Mnohovidové – se skokovou změnou



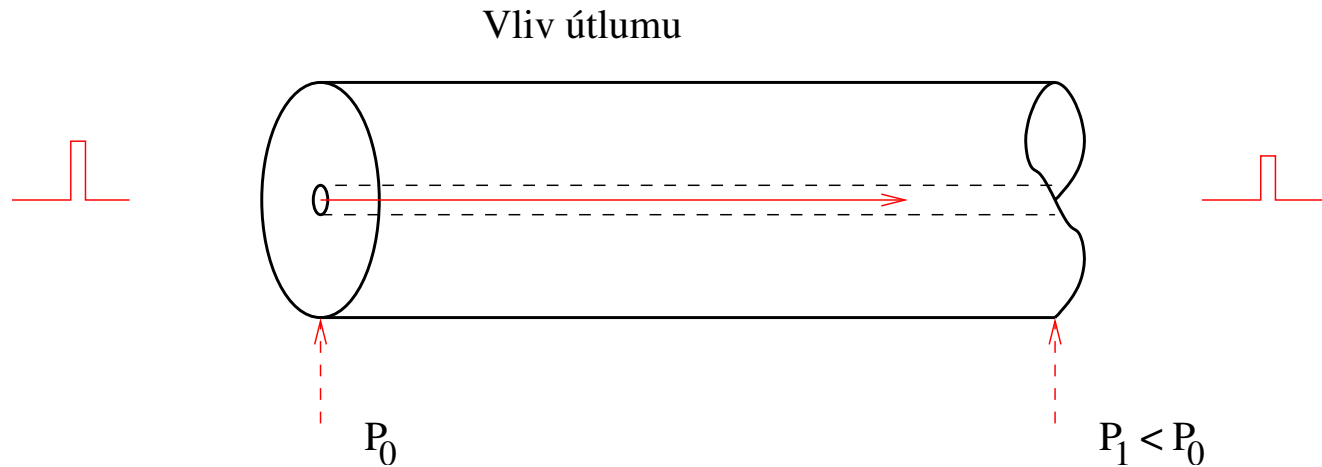
Mnohovidové – se spojitou změnou



Jednovidové



Útlum optických vláken



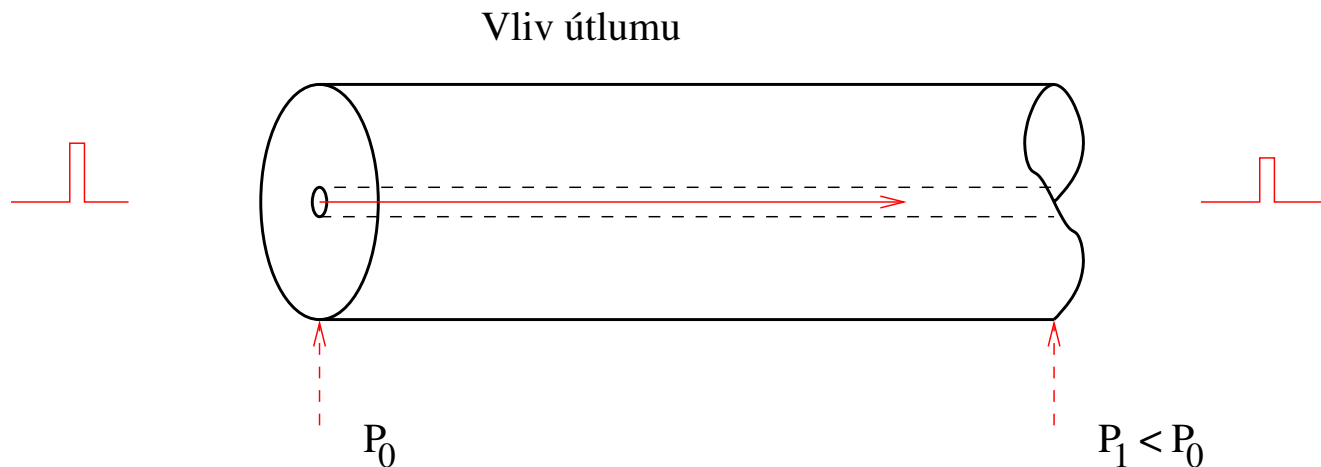
- Útlum optického vlákna:

$$u = 10 \log \frac{P_0}{P_1} \quad [u] = dB$$

- Koeficient útlumu optického vlákna délky z :

$$\alpha = \frac{1}{z} 10 \log \frac{P_0}{P_1} \quad [\alpha] = dB \text{ km}^{-1}$$

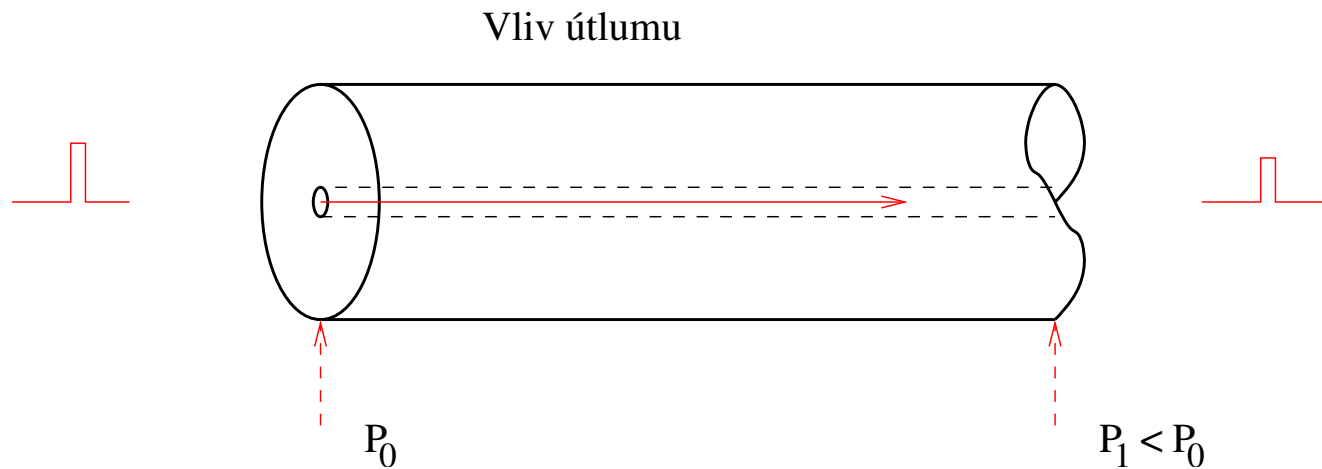
Útlum optických vláken



- Útlum různých materiálů:

Materiál	Útlum ($dB\ km^{-1}$)	3 dB délka (m)
okenní sklo	50000	0,06
optické sklo	3000	1
hustá mlha	500	6
atmosféra	10	300
optické vlákno	0,3	10000

Útlum optických vláken

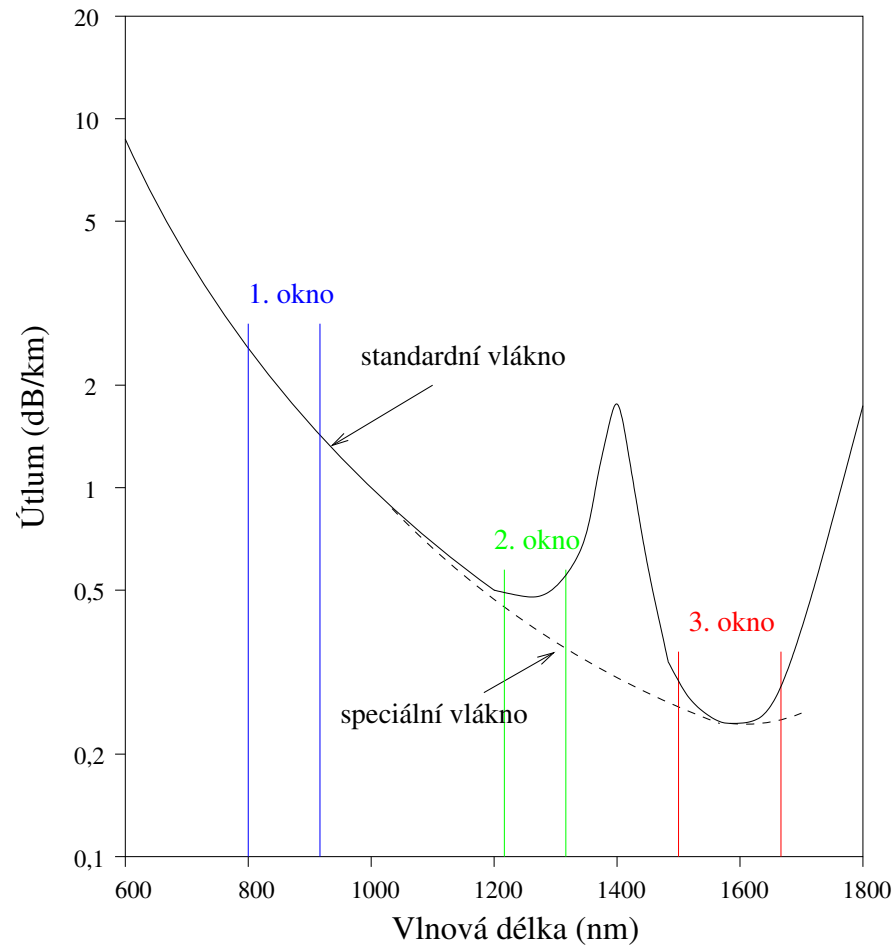


- Historický vývoj útlumu optických vláken:

Rok	Vlnová délka (μm)	Útlum ($dB km^{-1}$)
1970	0,850	20
1973	0,850	5
1976	1,300	0,5
1980	1,550	0,3

Útlum optických vláken

Spektrální závislost útlumu:



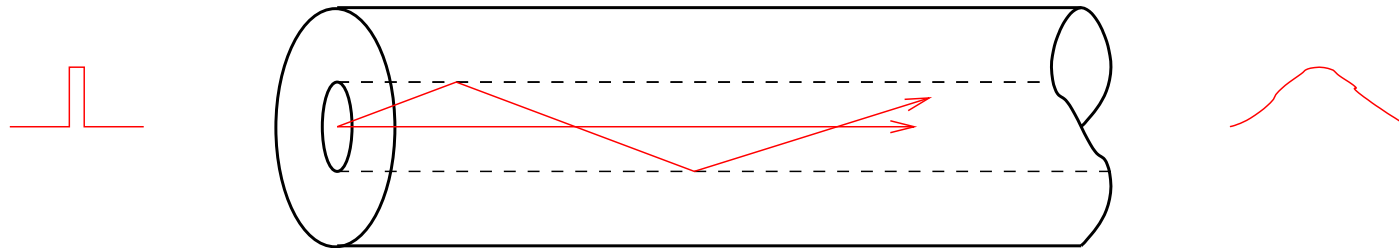
Mezividová disperze optických vláken

Vstupní puls

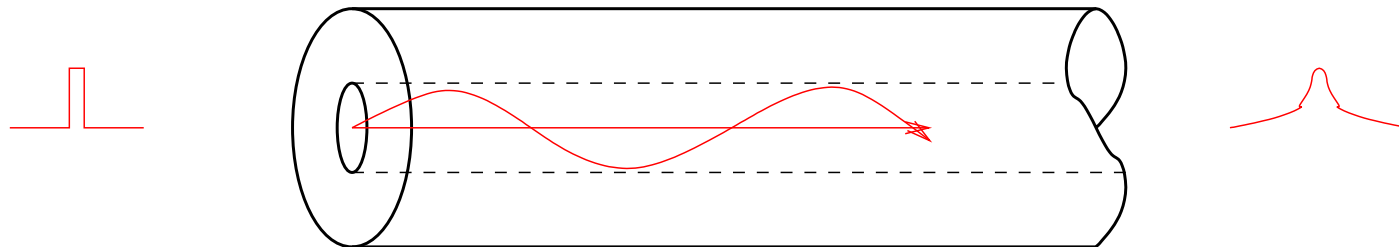
Mezividová disperze v optických vláknech

Výstupní puls

se skokovou změnou indexu lomu



se spojitou změnou indexu lomu



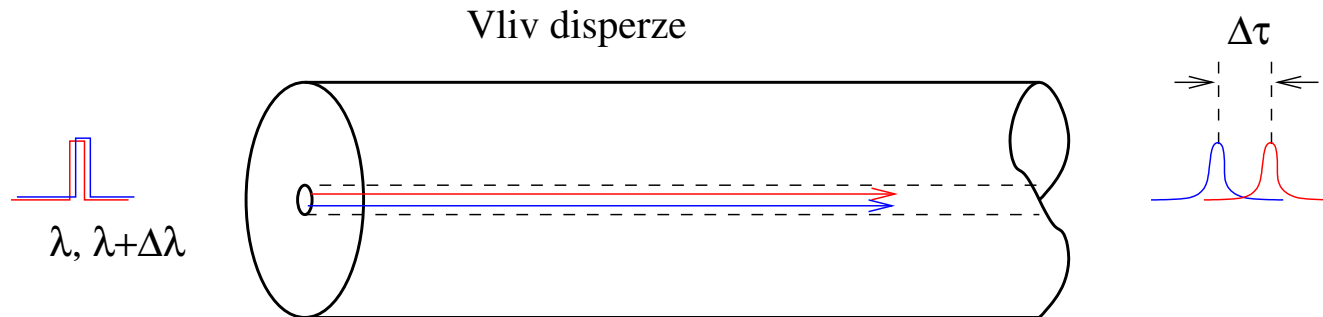
- Šířka pulsů $\Delta\tau$ a šířka přenášeného pásma B pro SI optická vlákna:

$$\Delta\tau \approx 50 \text{ ns km}^{-1} \rightarrow B \sim \frac{1}{\Delta\tau} = 20 \text{ MHz km}$$

- Šířka pulsů $\Delta\tau$ a šířka přenášeného pásma B pro GI optická vlákna:

$$\Delta\tau \approx 500 \text{ ps km}^{-1} \rightarrow B \sim \frac{1}{\Delta\tau} = 2 \text{ GHz km}$$

Disperze jednovídných vláken



- Koeficient chromatické disperze:

$$D = \frac{1}{z} \frac{\Delta\tau}{\Delta\lambda} = \frac{1}{c} \frac{dN}{d\lambda} \quad [D] = ps \ km^{-1} \ nm^{-1}$$

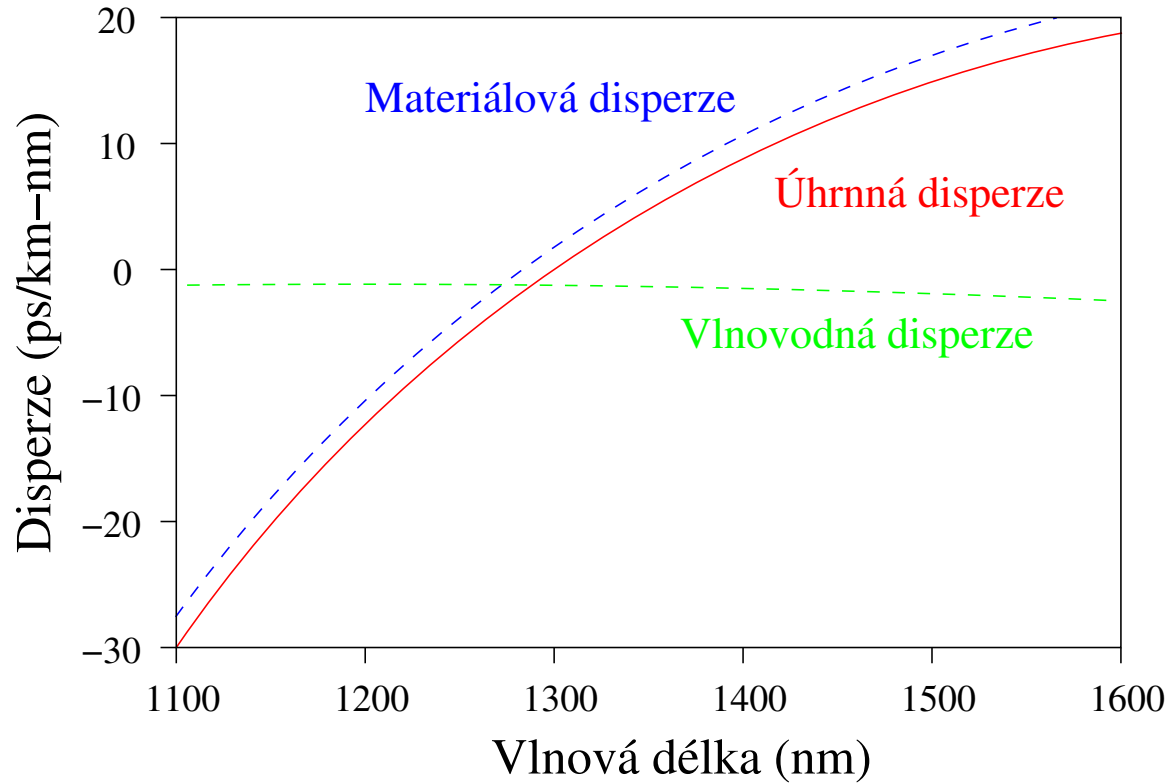
$N = n - \lambda dn/d\lambda \dots$ skupinový index lomu

- Čistý SiO₂:

Vlnová délka (μm)	index lomu	sk. index lomu	Disperze ($ps \ km^{-1} \ nm^{-1}$)
0,850	1,45250	1,46572	-84
1,310	1,44680	1,46164	4
1,550	1,44402	1,46260	22

Disperze jednořivových vláken

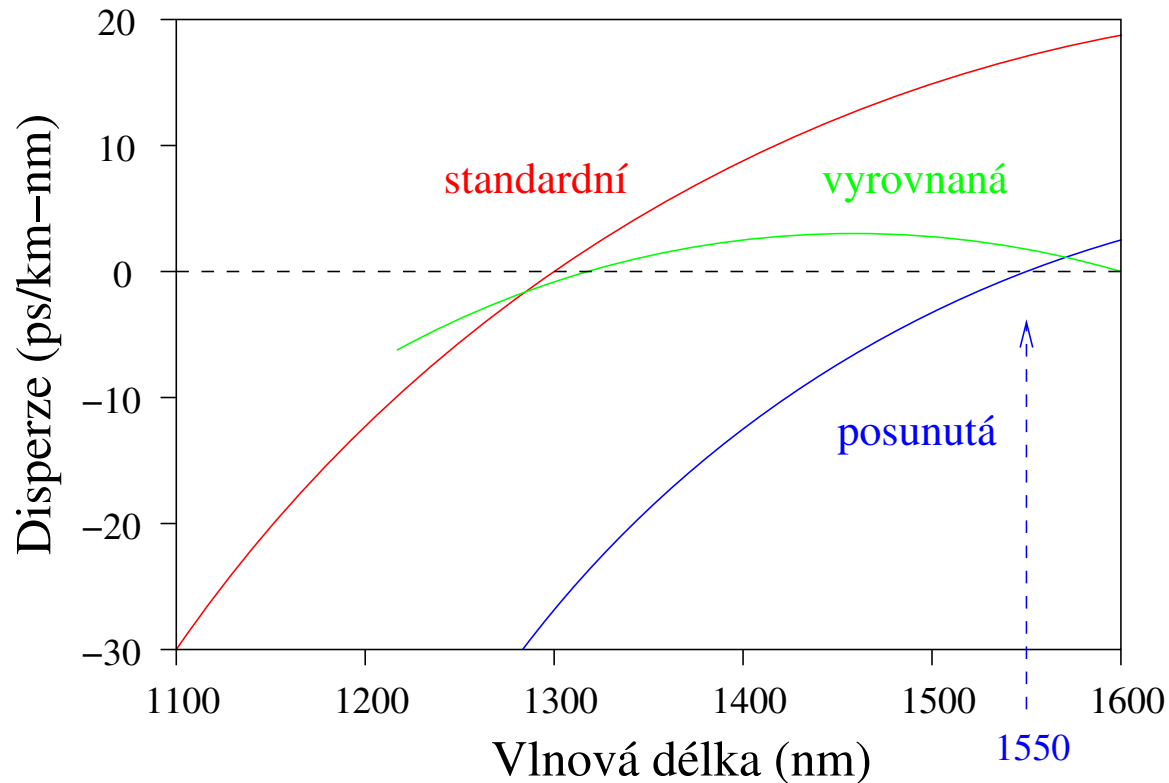
Spektrální závislost disperze:



- Minimum úhrnné disperze je na jiné vlnové délce (1310 nm) než je minimum útlumu (1550 nm)!

Disperze jednovídrových vláken

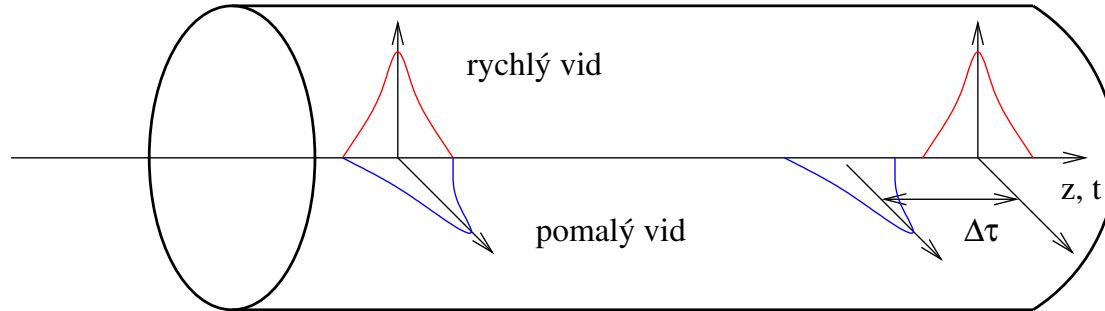
Spektrální závislost disperze:



SDH	Přen. rychlost ($Gbit\ s^{-1}$)	Bit. interval (ps)	Max. disp. (ps)	Překl. vzdálenost (km)
STM-16	2,5	400	40	400
STM-64	10	100	10	25
STM-256	40	25	2,5	1,5

Disperze jednovídných vláken

Polarizační vidová disperze (PMD):



Příklad - 400 km optického vlákna:

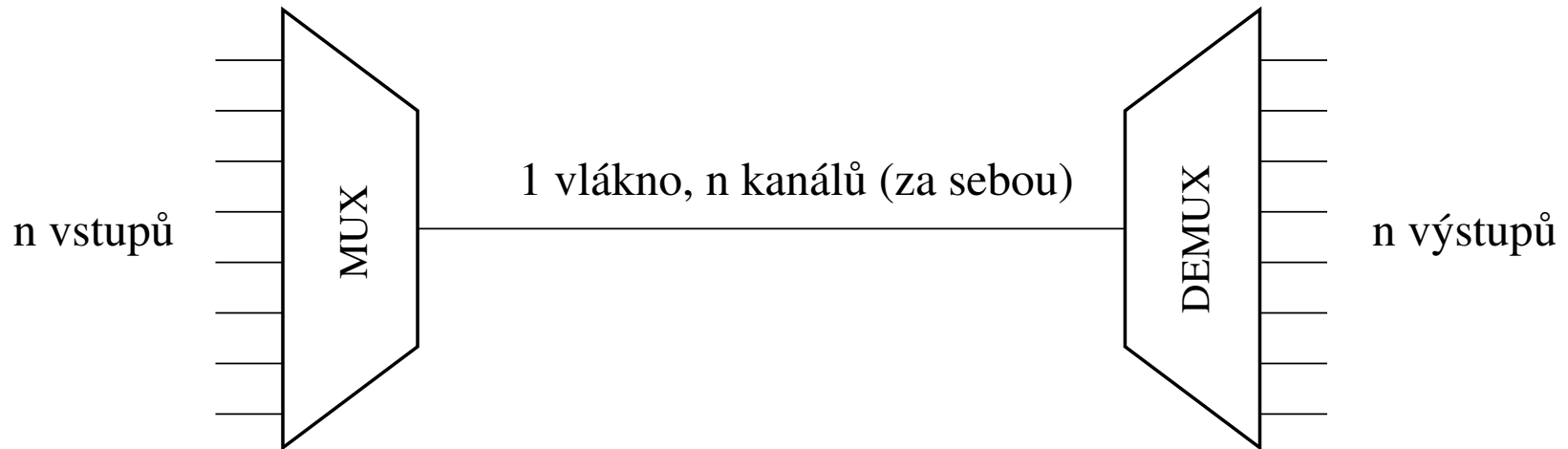
SDH	Přen. rychlost ($Gbit\ s^{-1}$)	Max. PMD (ps)	Koef. PMD ($ps\ km^{-1/2}$)
STM-16	2,5	40	2
STM-64	10	10	0,5
STM-256	40	2,5	0,125

Příklad - 40 $Gbit\ s^{-1}$ optický přenosový systém:

Koef. PMD ($ps\ km^{-1/2}$)	Překl. vzdálenost (km)
0,5	25
0,1	620
0,05	2 500

Komunikační spoj - realizace a generace

- Standardní realizace komunikačního spoje:

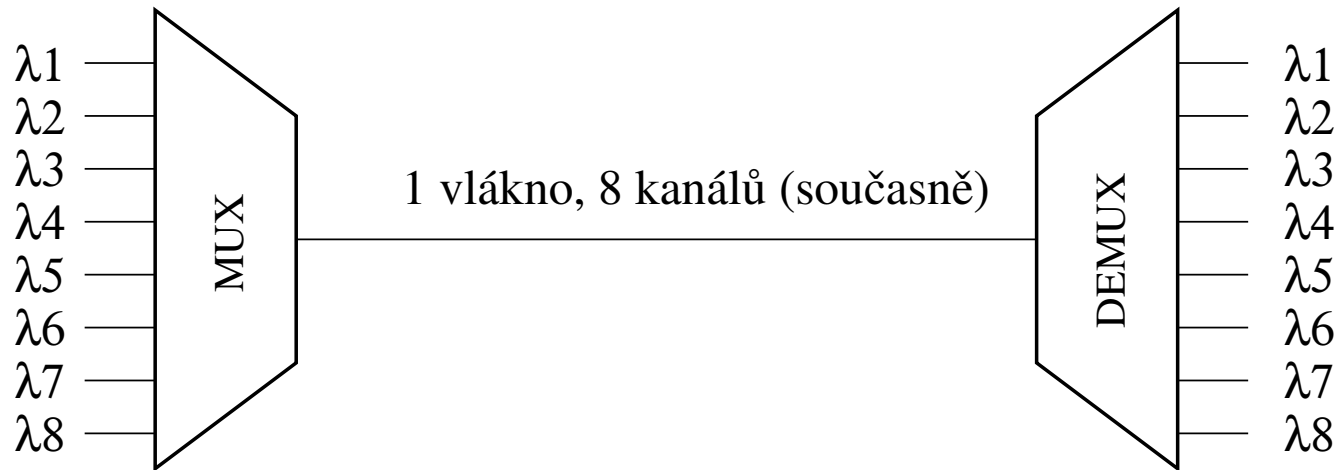


- Generace optických komunikačních spojů - parametry:

Generace	Rok	Př. rychlost ($Gbit\ s^{-1}$)	Typ vlákna	Útlum ($dB\ km^{-1}$)	Vzdálenost opak. (km)
I($0,8-0,9\ \mu m$)	1977	$\sim 0,045$	Mnohovid-GI	~ 3	~ 10
II($1,3\ \mu m$)	1981	$\sim 0,045$	Mnohovid-GI	~ 1	~ 30
III($1,3\ \mu m$)	nyní	$\sim 2,5$	Jednovid	$\leq 0,5$	~ 40
IV($1,55\ \mu m$)	nyní	≥ 10	Jednovid	$< 0,3$	≥ 100

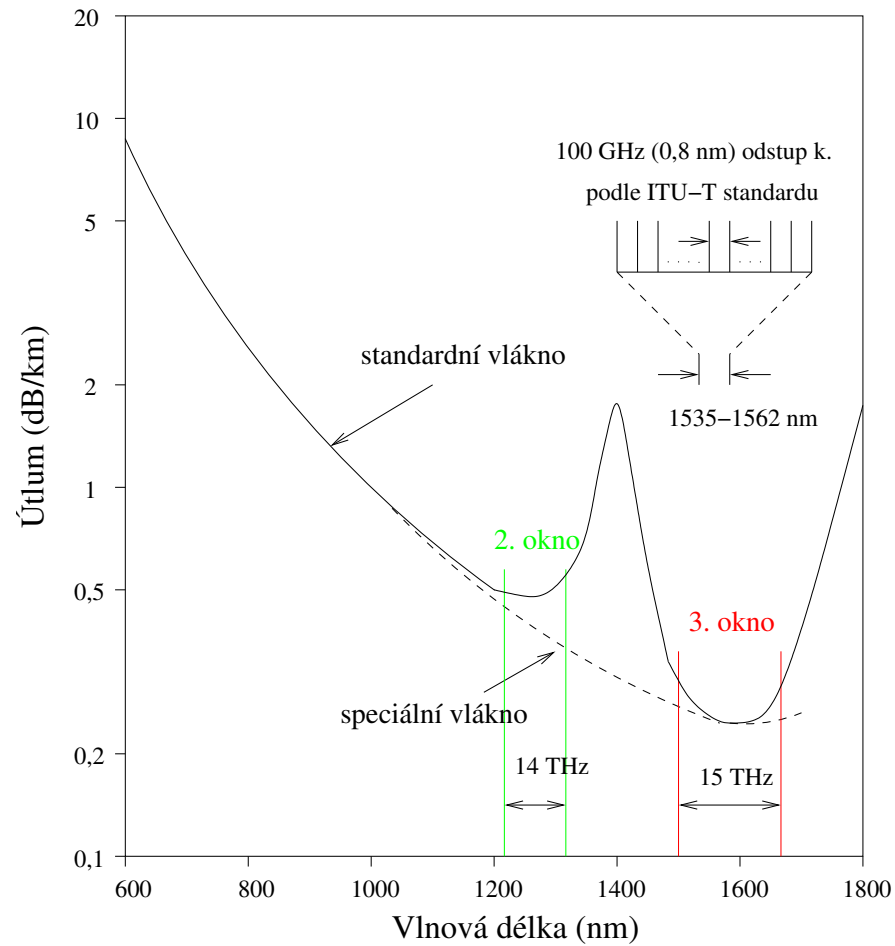
WDM a DWDM - vývoj

- Standardní realizace komunikačního spoje s vlnovým multiplexem (WDM):



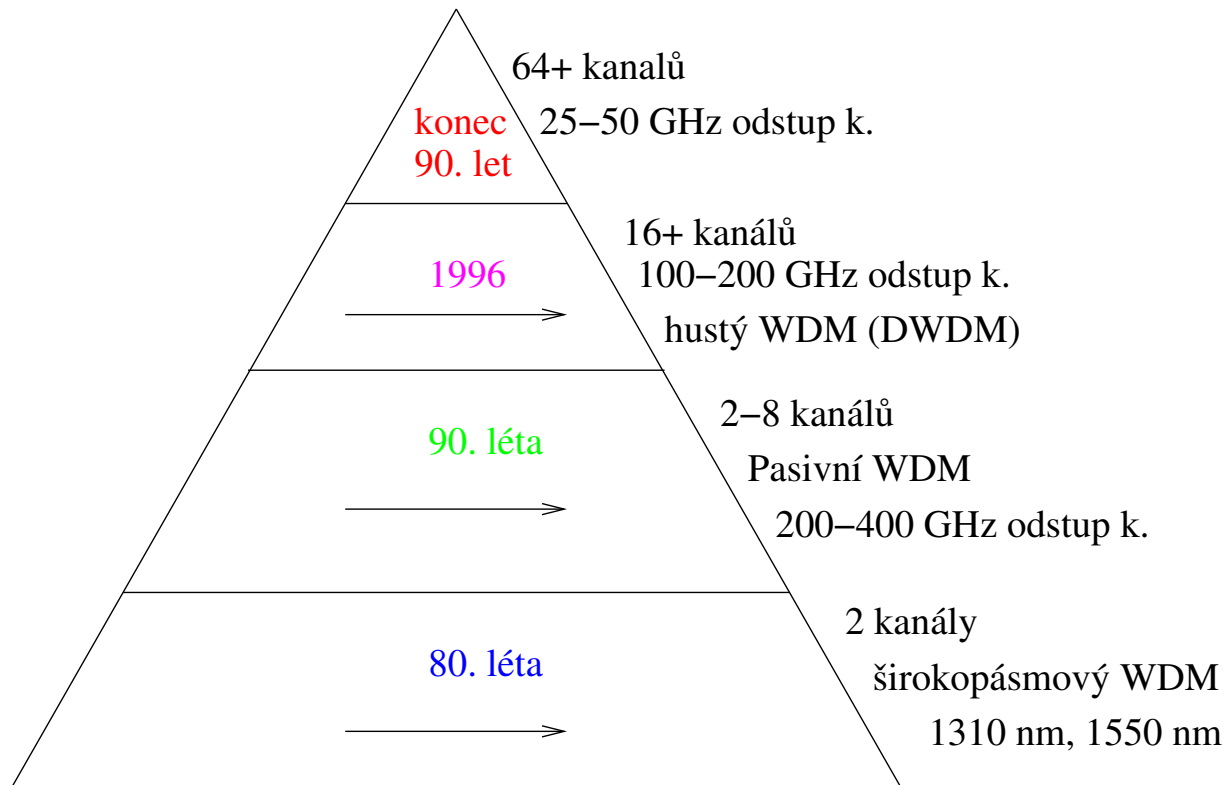
- Typy WDM:
 - širokopásmový WDM (1310 nm , 1550 nm , 2 kanály)
 - pasivní WDM (odstup kanálů $\delta\nu = 200 - 400 \text{ GHz}$ ($\delta\lambda = 1,6 - 3,2 \text{ nm}$), 4 – 8 kanálů)
- Doporučený spektrální plán kanálů podle ITU:
 - základem je frekvence $\nu = 193,1 \text{ THz}$ (kryptonová čára), resp. vlnová délka $\lambda = 1552,527 \text{ nm}$
 - doporučený odstup kanálů $\delta\nu = 100 \text{ GHz}$ ($\delta\lambda = 0,8 \text{ nm}$), resp. $\delta\nu = 50 \text{ GHz}$ ($\delta\lambda = 0,4 \text{ nm}$)
 - Příklad: v části 3. telekomunikačního okna (1520 – 1605 nm) máme přes 100, resp. 200 kanálů

WDM a DWDM - vývoj



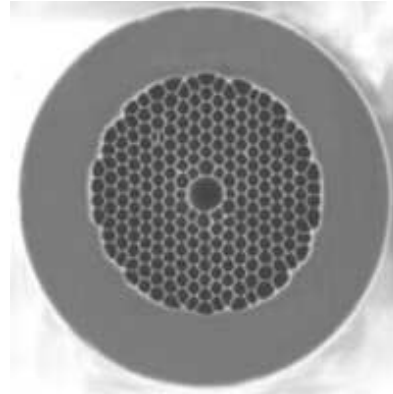
Telek. okno	$\Delta\lambda$ (nm)	$\Delta\nu$ (THz)
2. okno (1310 nm)	80	14
3. okno (1550 nm)	120	15

WDM a DWDM - vývoj

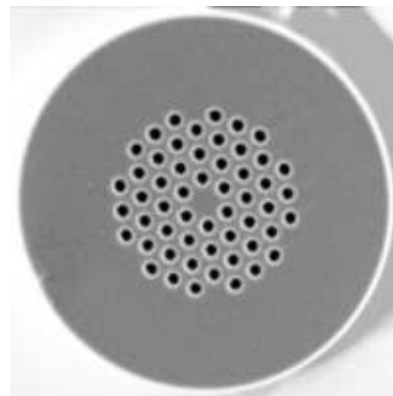


Mikrostrukturální vlákna - nová éra komunikací

- Optické vlákno s dutým jádrem (hollow-core PCF)



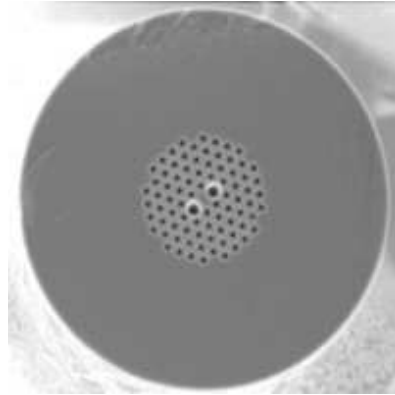
- Optické vlákno nekonečně jednovidové (endlessly single-mode PCF)



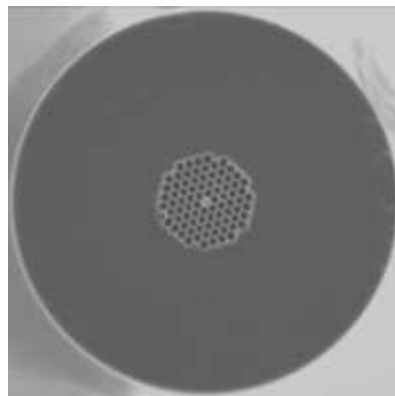
Výrobce: Blaze Photonics Photonic crystals: popularizační článek v angličtině

Mikrostrukturní vlákna - nová éra komunikací

- Optické vlákno zachovávající polarizaci (polarization-maintaining PCF)

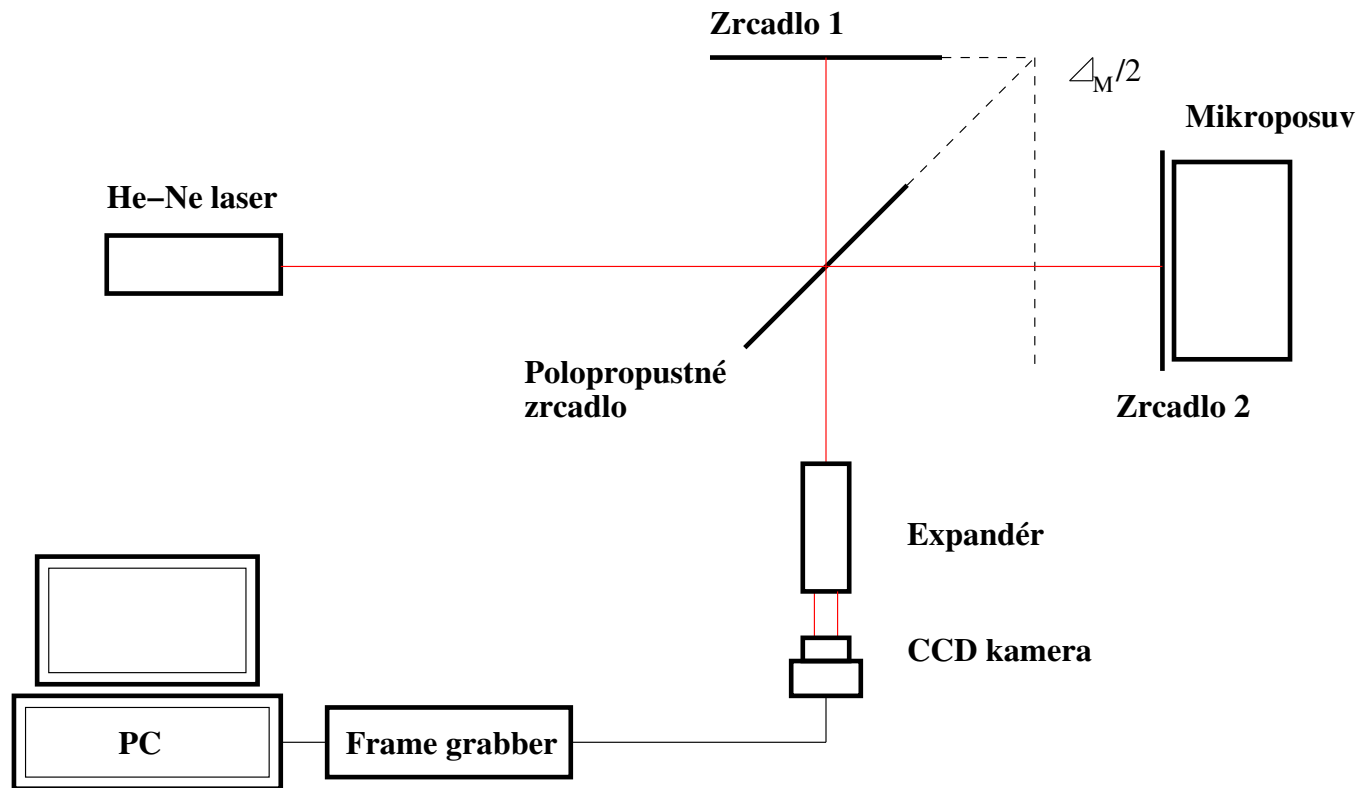


- Optické vlákno vysoce nelineární (highly non-linear PCF)



Výrobce: Blaze Photonics Photonic crystals: popularizační článek v angličtině

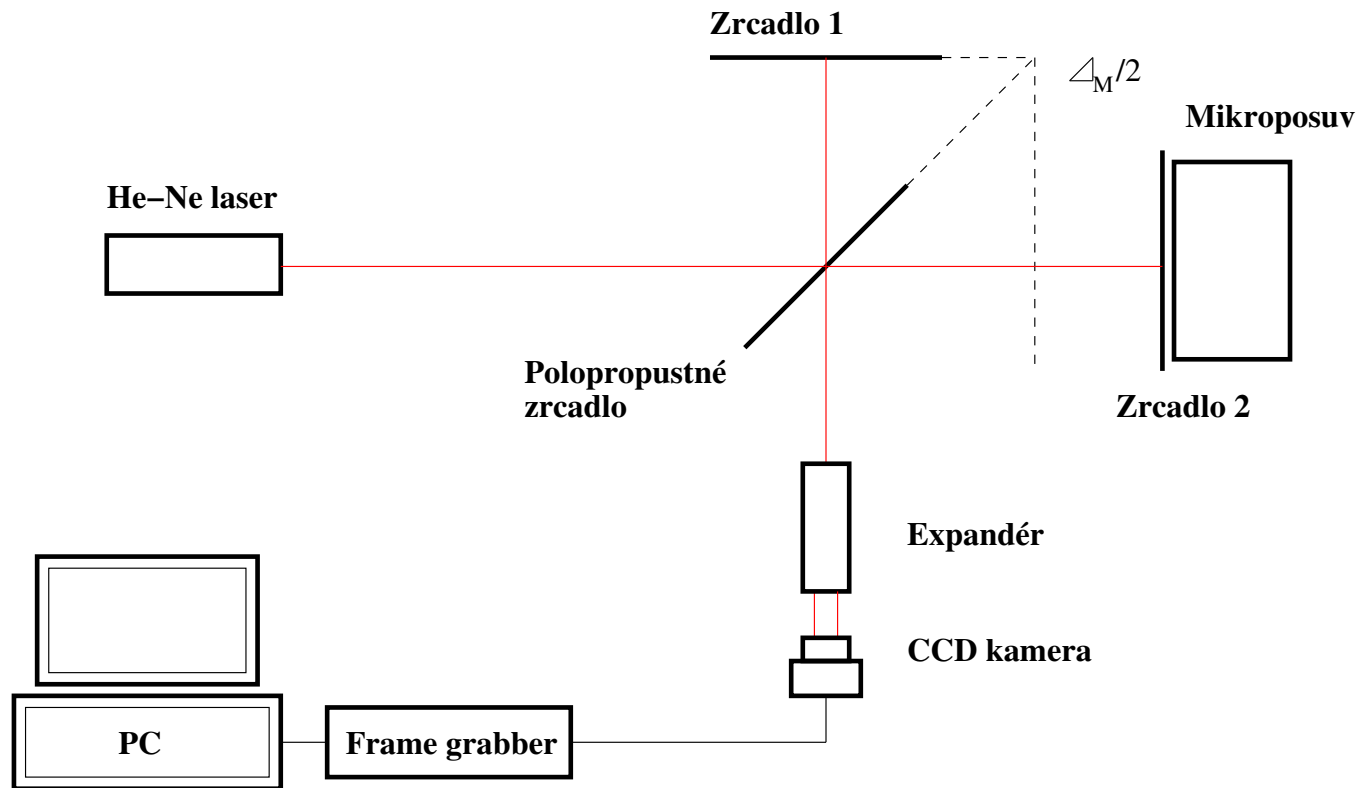
Michelsonův interferometr - funkce viditelnosti



Teoretický základ:

- HLUBINA, P., PROCHÁZKA, P.: **Vidová reprezentace záření He-Ne laseru.** *Jemná mechanika a optika*, 39, 1994 č. 9, s. 239-242.
- HLUBINA, P.: **Vidová reprezentace záření laserových diod.** *Jemná mechanika a optika*, 39, 1996 č. 6, s. 164-168.

Michelsonův interferometr - funkce viditelnosti

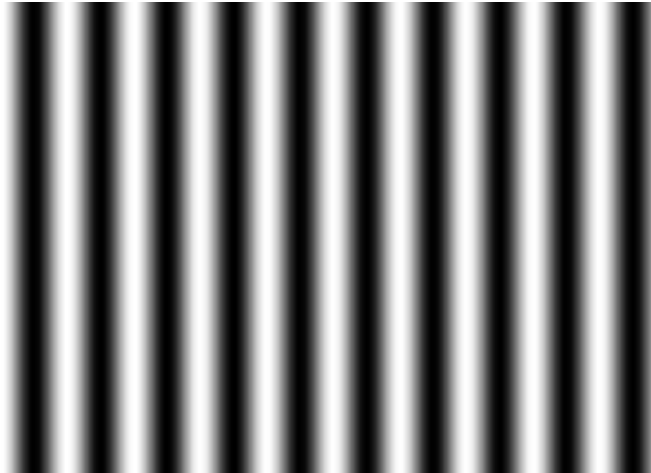


- Funkce viditelnosti (kontrastu) interferenčních proužků:

$$V(\Delta_M) = \frac{I_{M\max}(\Delta_M) - I_{M\min}(\Delta_M)}{I_{M\max}(\Delta_M) + I_{M\min}(\Delta_M)}$$

Teoretická funkce viditelnosti

Teoretické interferogramy:



- Dráhový rozdíl:

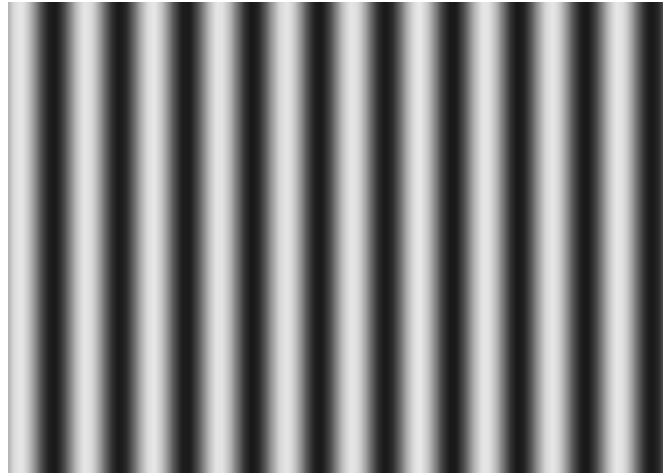
$$\Delta_M = 0$$

- Viditelnost:

$$V = 1,00$$

Teoretická funkce viditelnosti

Teoretické interferogramy:



- Dráhový rozdíl:

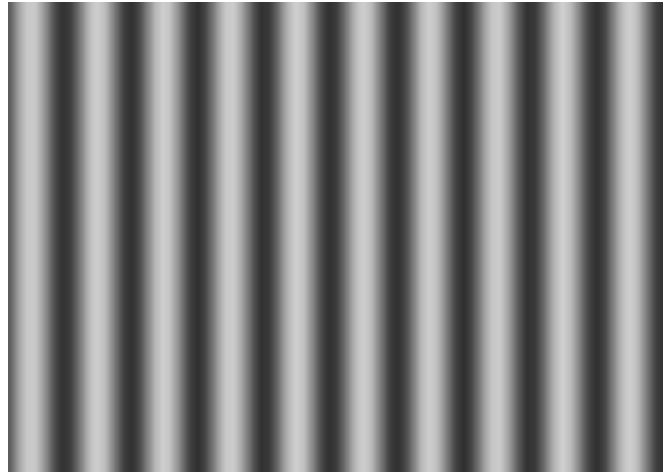
$$\Delta_M = 0,9\Delta_{M0}$$

- Viditelnost:

$$V = 0,80$$

Teoretická funkce viditelnosti

Teoretické interferogramy:



- Dráhový rozdíl:

$$\Delta_M = 1,4\Delta_{M0}$$

- Viditelnost:

$$V = 0,60$$

Teoretická funkce viditelnosti

Teoretické interferogramy:



- Dráhový rozdíl:

$$\Delta_M = 1,9\Delta_M$$

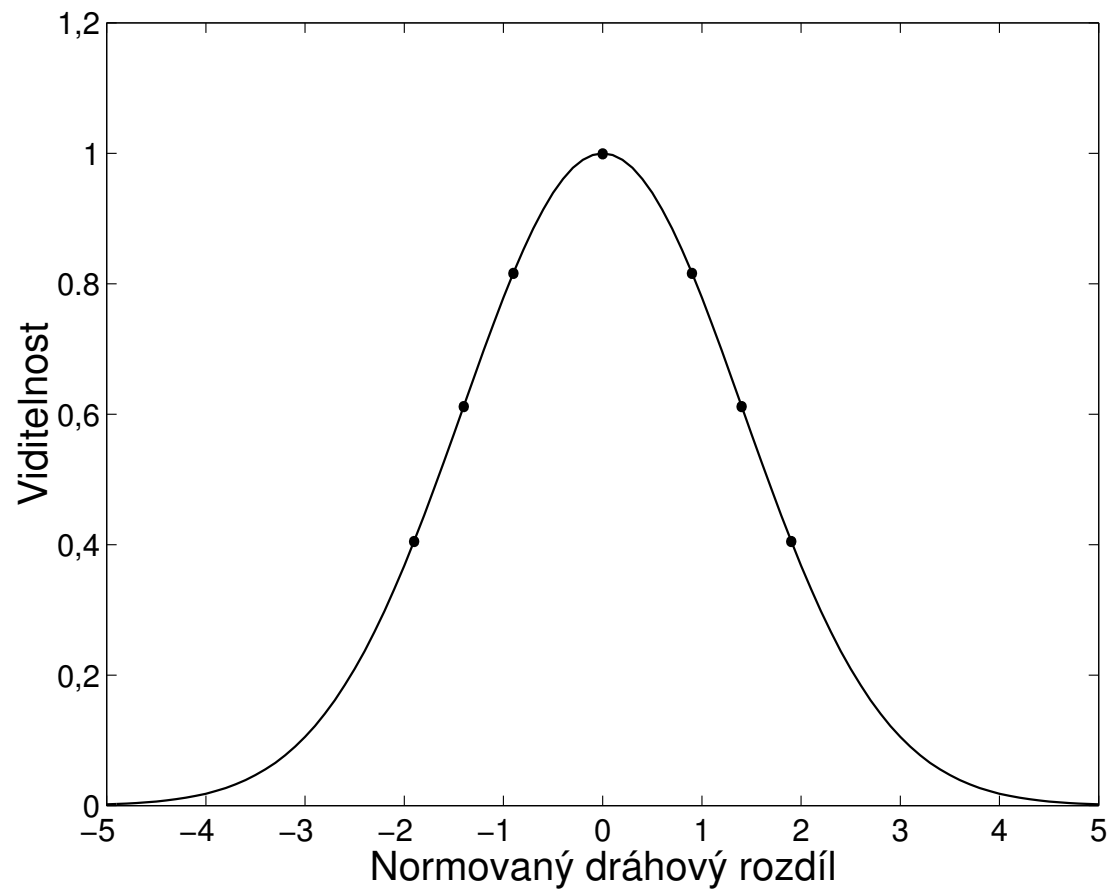
- Viditelnost:

$$V = 0,40$$

Start externí animace
Start animace z internetu

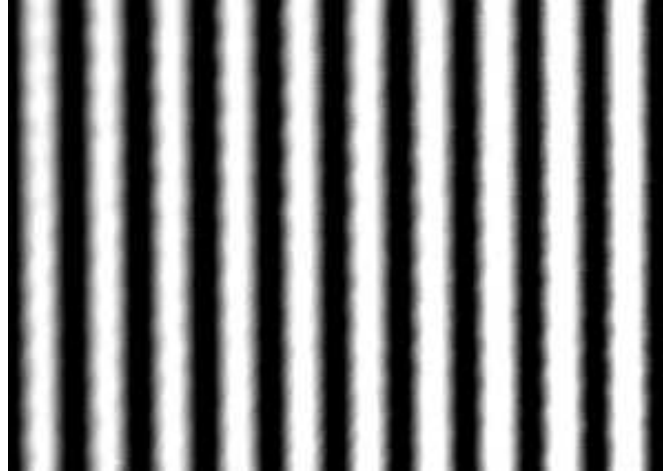
Teoretická funkce viditelnosti

Funkce viditelnosti:



Naměřená funkce viditelnosti

Zaznamenané interferogramy:



- Dráhový rozdíl:

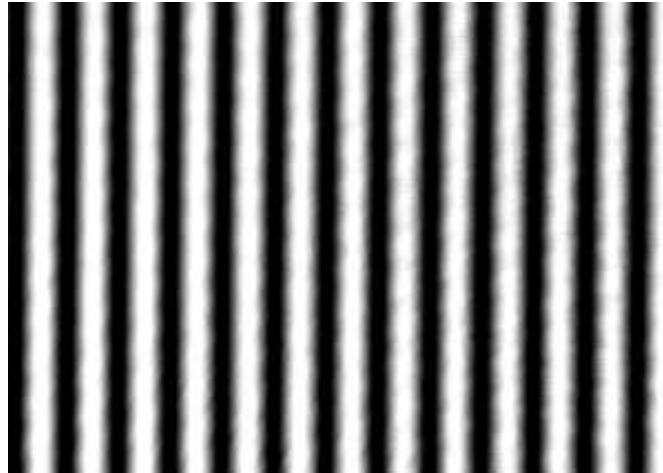
$$\Delta_M = 5 \mu m$$

- Viditelnost:

$$V = 1,00$$

Naměřená funkce viditelnosti

Zaznamenané interferogramy:



- Dráhový rozdíl:

$$\Delta_M = -5 \mu m$$

- Viditelnost:

$$V = 0,97$$

Naměřená funkce viditelnosti

Zaznamenané interferogramy:



- Dráhový rozdíl:

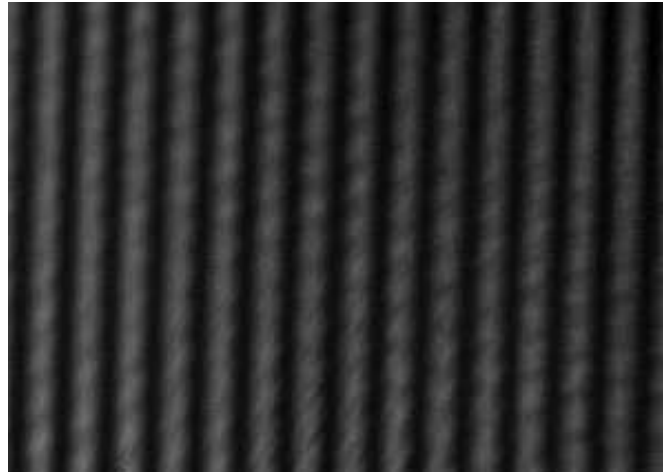
$$\Delta_M = -25 \mu m$$

- Viditelnost:

$$V = 0,37$$

Naměřená funkce viditelnosti

Zaznamenané interferogramy:



- Dráhový rozdíl:

$$\Delta_M = -35 \mu m$$

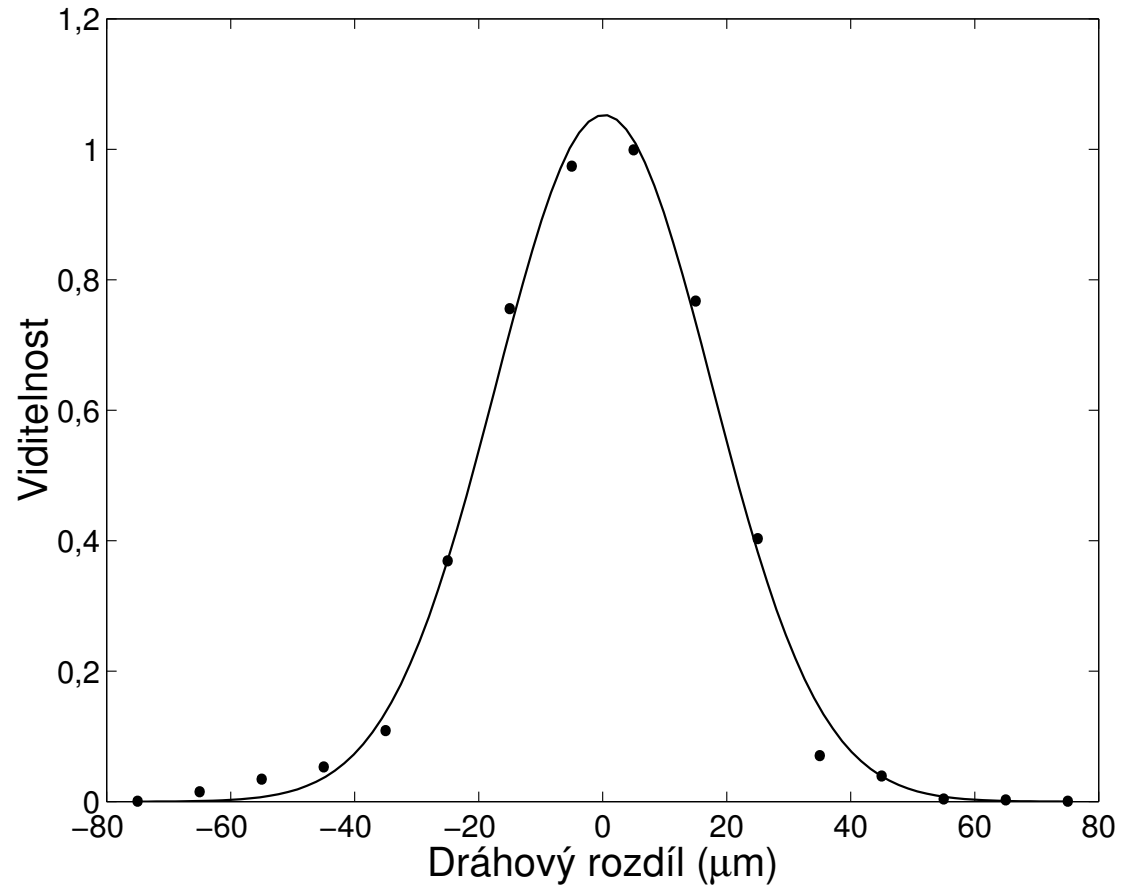
- Viditelnost:

$$V = 0,11$$

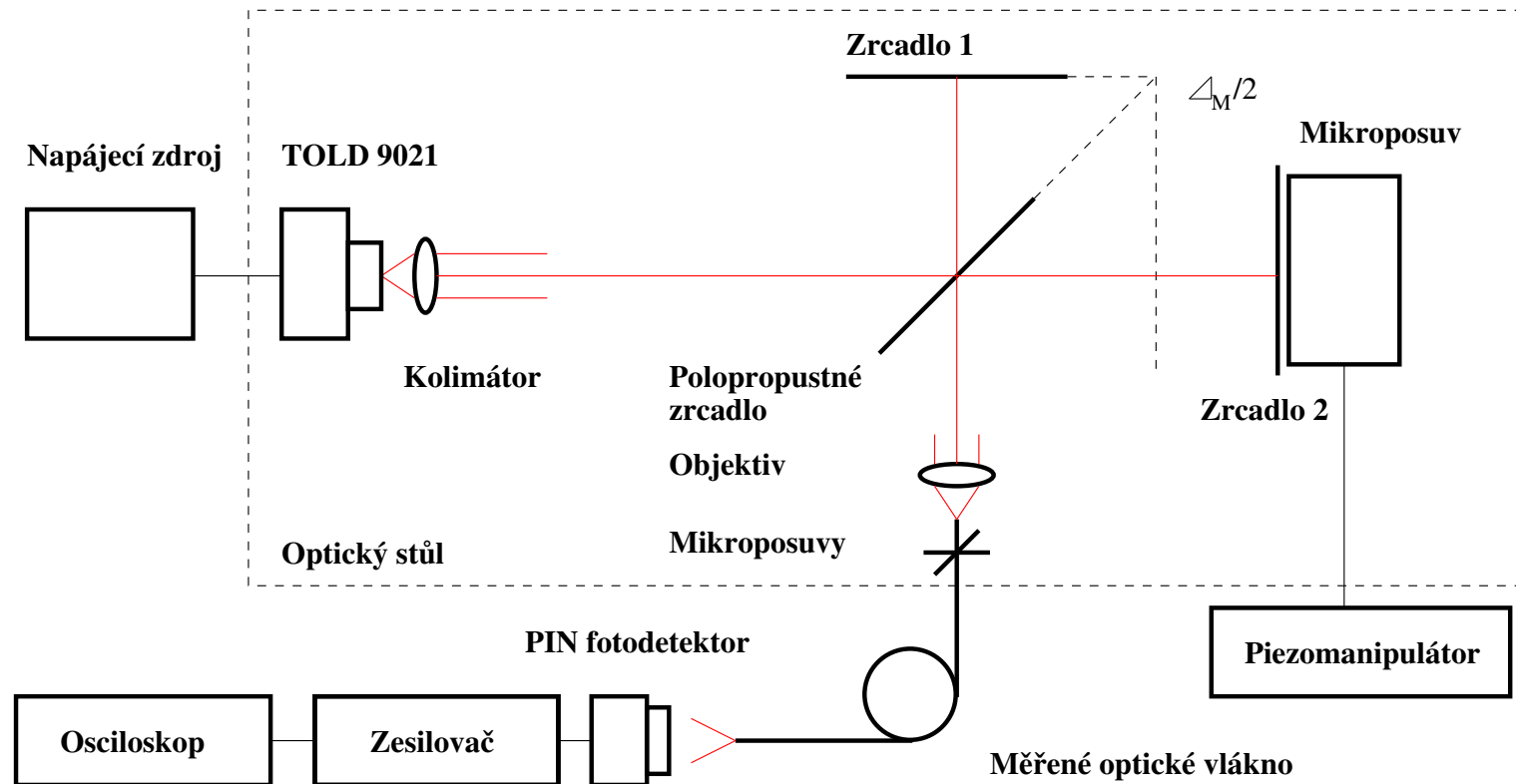
Start externí animace
Start animace z internetu

Naměřená funkce viditelnosti

Funkce viditelnosti:



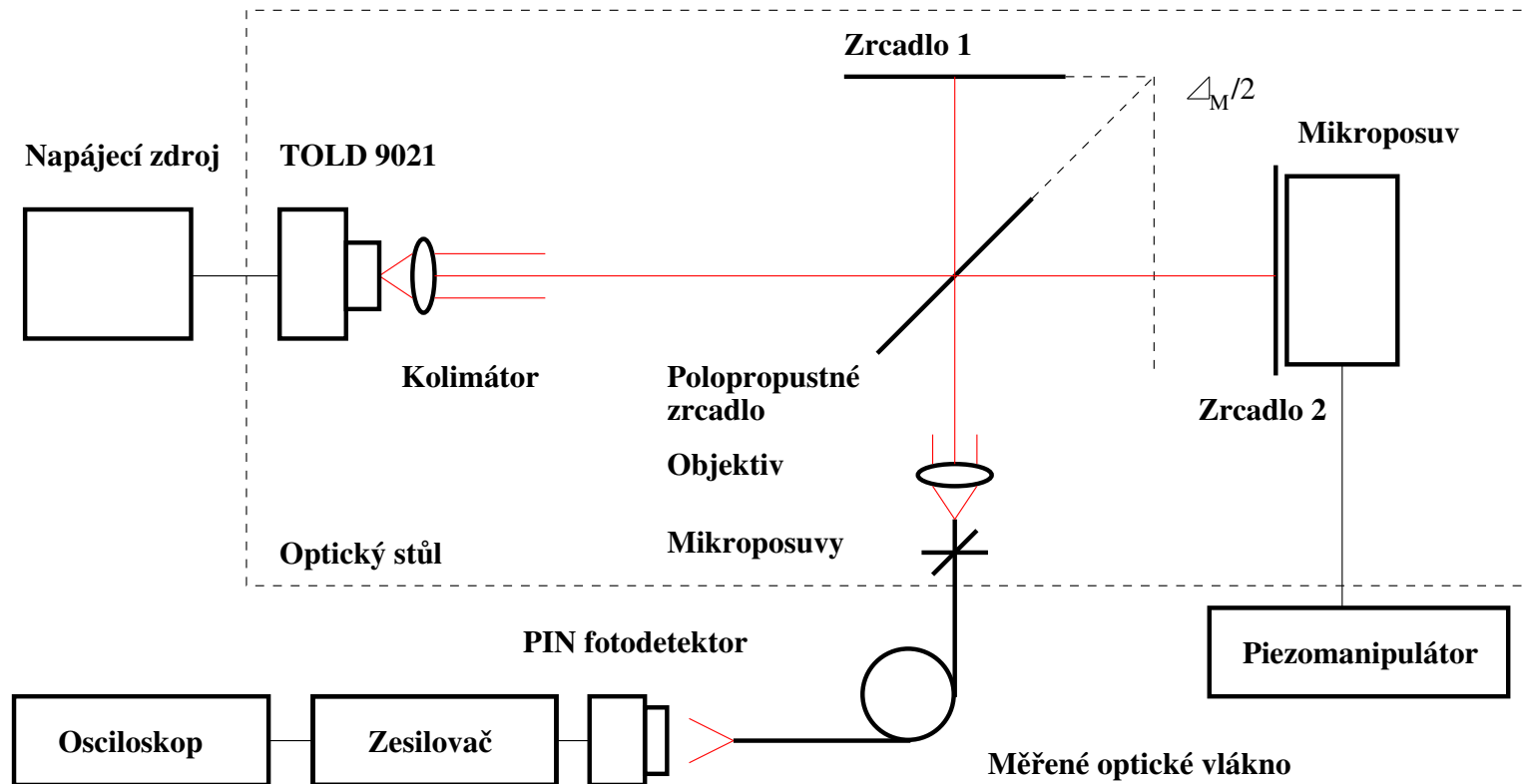
Tandemové uspořádání s optickým vláknem



Teoretický základ:

- HLUBINA, P.: **Měření mezividové disperze dvouvidového optického vlákna s využitím nízkokoherenční interferometrie v časové a spektrální oblasti.** *Jemná mechanika a optika*, 43, 1998 č. 6, s. 190-200.
- HLUBINA, P.: **Měření mezividové disperze s využitím spektrální interference v konfiguraci Michelsonův interferometr a dvouvidové optické vlákno.** *Jemná mechanika a optika*, 43, 1998 č. 11-12, s. 369-373.

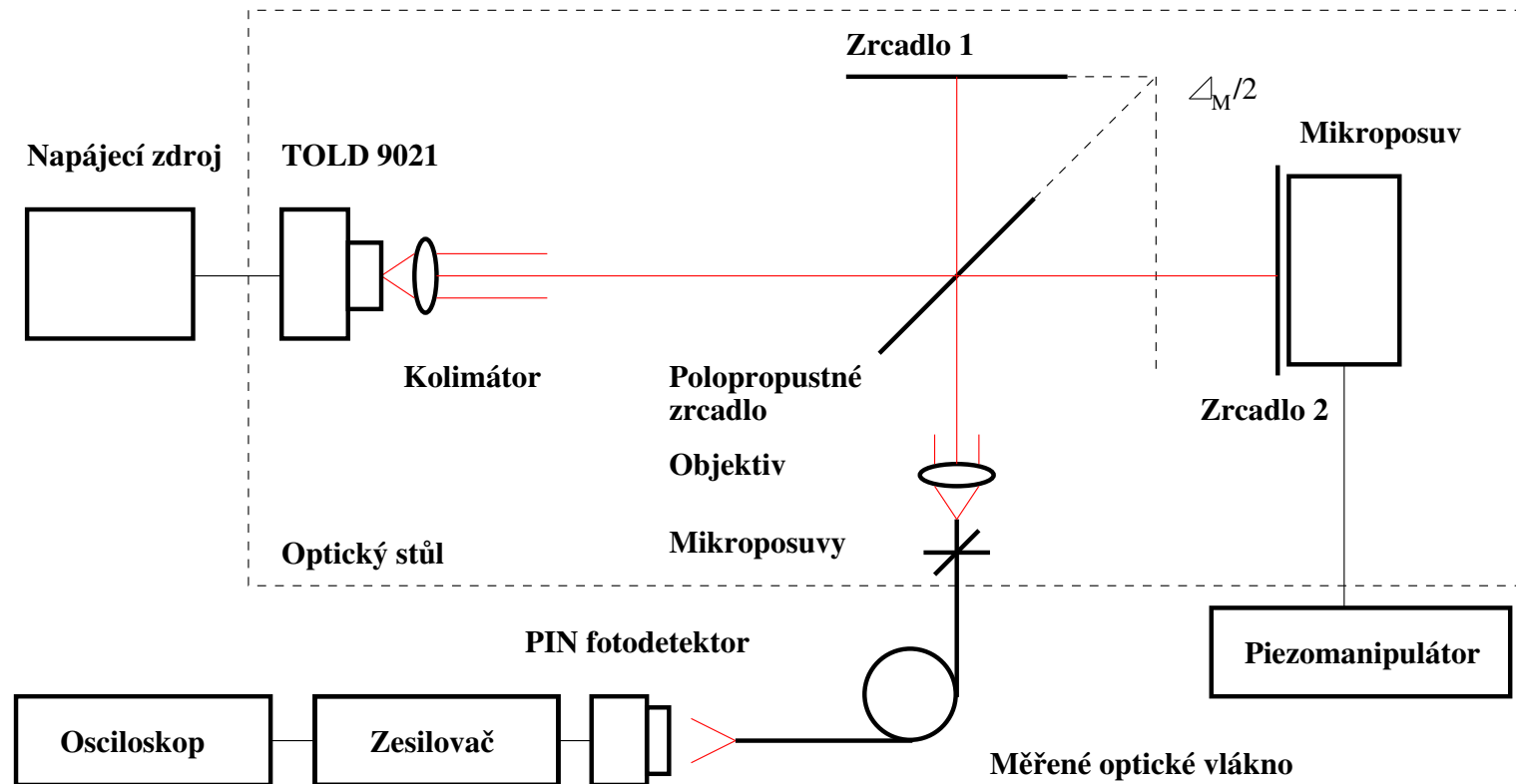
Tandemové uspořádání s optickým vláknem



- Teoretický interferogram:

$$\begin{aligned}
 I_M(\Delta_M) = I^{(0)} \{ & 1 + |\gamma(\Delta_M)| \cos[(2\pi/\lambda_0)\Delta_M] \\
 & + V \{ |\gamma(\Delta_{01}^g(z; \lambda_0))| \} \cos[\Delta\beta_{01}(\lambda_0)z] \\
 & + 0.5 |\gamma(\Delta_M - \Delta_{01}^g(z; \lambda_0))| \cos[(2\pi/\lambda_0)\Delta_M - \Delta\beta_{01}(\lambda_0)z] \\
 & + 0.5 |\gamma(\Delta_M + \Delta_{01}^g(z; \lambda_0))| \cos[(2\pi/\lambda_0)\Delta_M + \Delta\beta_{01}(\lambda_0)z] \} \}
 \end{aligned}$$

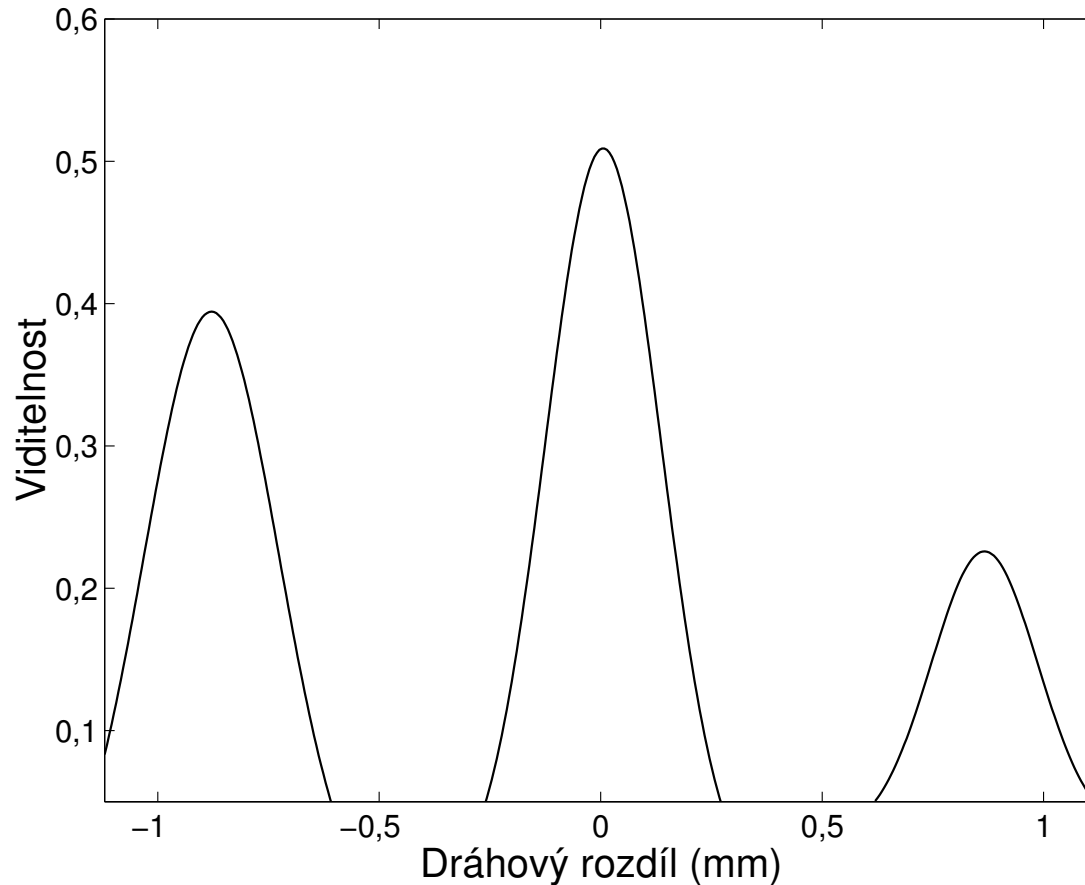
Tandemové uspořádání s optickým vláknem



- Funkce viditelnosti (kontrastu) interferenčních proužků:

$$V(\Delta_M) = \frac{I_{M\max}(\Delta_M) - I_{M\min}(\Delta_M)}{I_{M\max}(\Delta_M) + I_{M\min}(\Delta_M)}$$

Experimentální výsledky

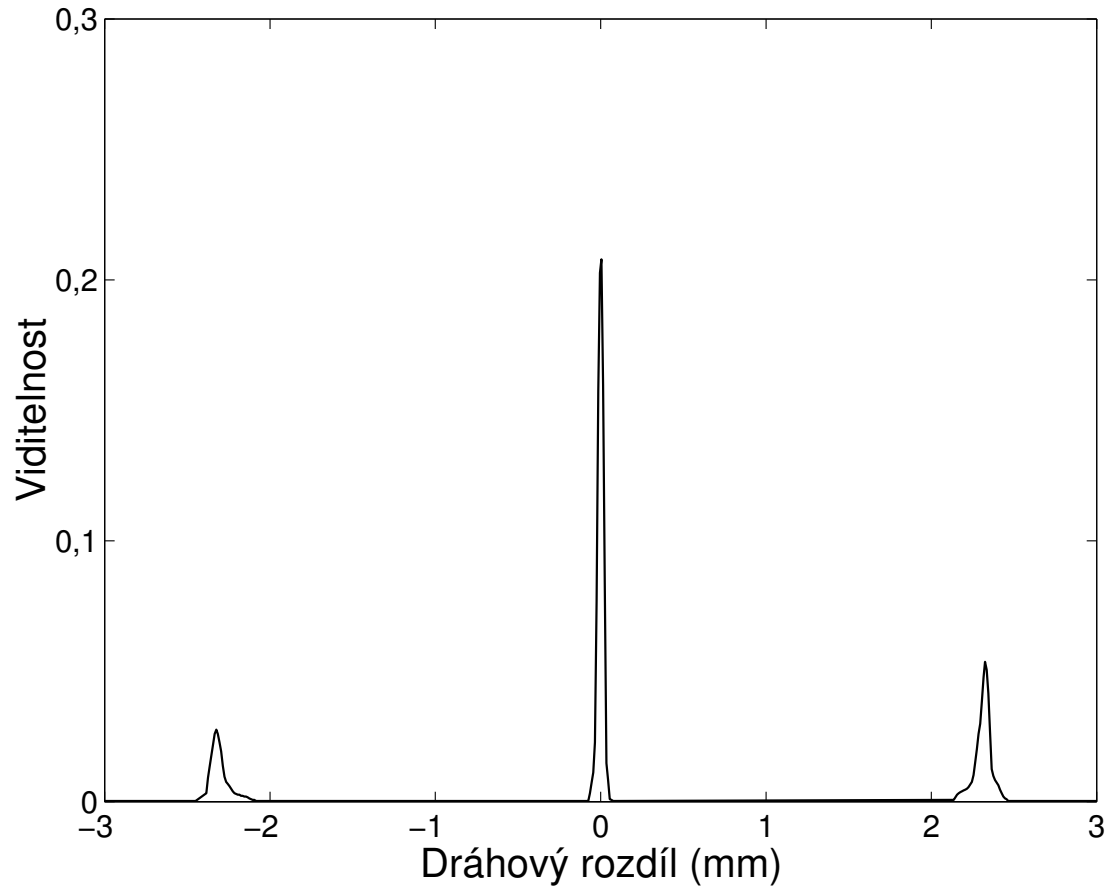


- Naměřený mezividový rozdíl skupinových optických drah $\Delta_{01}^g(z; \lambda_0)$:

$$\Delta_{01}^g(z; \lambda_0) = -885 \mu m$$

$$\Delta_{01}^g(z; \lambda_0) = 860 \mu m$$

Experimentální výsledky



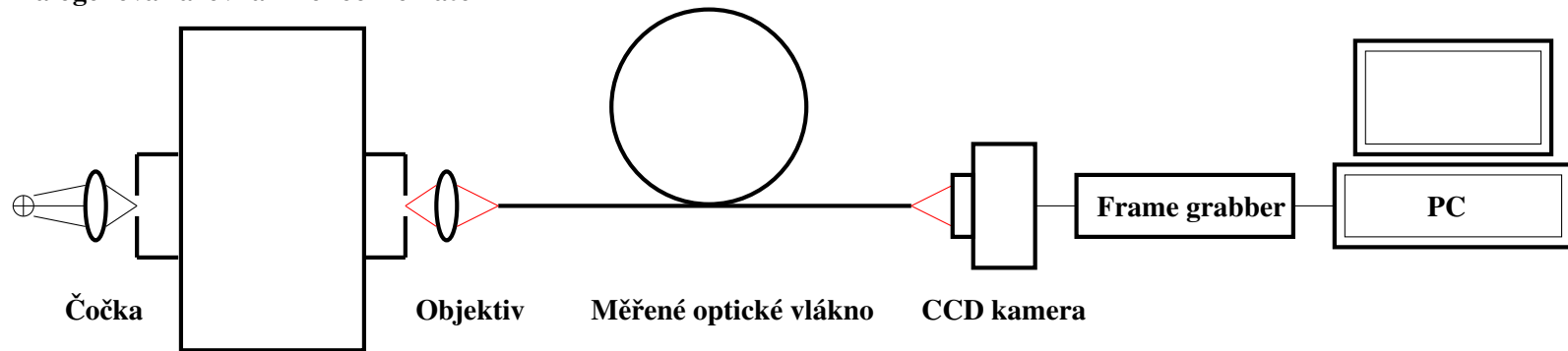
- Naměřený mezividový rozdíl skupinových optických drah $\Delta_{01}^g(z; \lambda_0)$:

$$\Delta_{01}^g(z; \lambda_0) = -2322 \mu m$$

$$\Delta_{01}^g(z; \lambda_0) = 2320 \mu m$$

Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce

Halogenová žárovka Monochromátor



Parametry měřeného optického vlákna s eliptickým jádrem:

- Mezní vlnová délka pro tzv. *sudý* LP_{11} vid přibližně 930 nm
- Rozměry jádra přibližně $3,9 \times 1,4 \mu\text{m}$
- Rozdíl indexů lomu jádra a pláště přibližně 0,026 ($\lambda = 630 \text{ nm}$)
- Délka $z=0,88 \text{ m}$

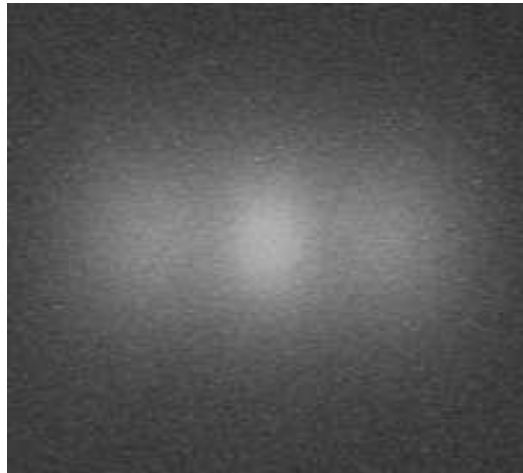
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 580 \text{ nm}$$

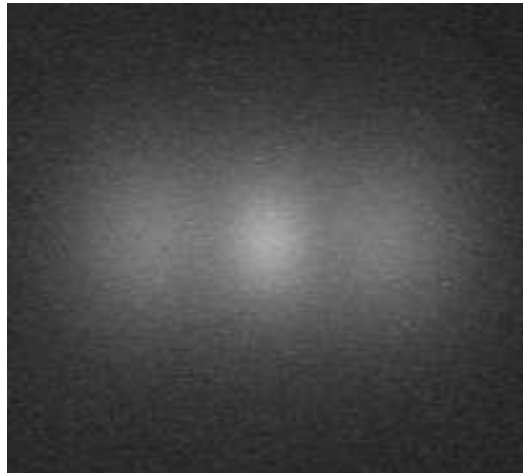
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 590 \text{ nm}$$

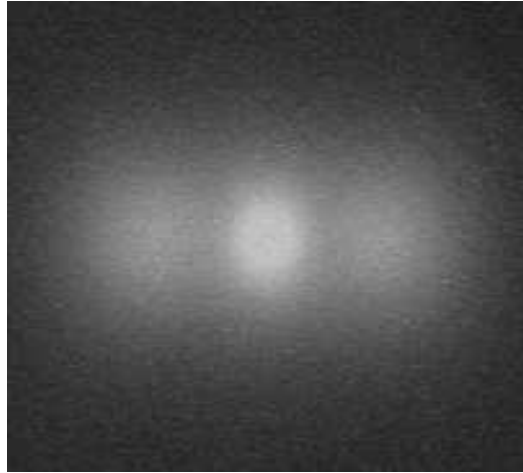
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 600 \text{ nm}$$

Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 610 \text{ nm}$$

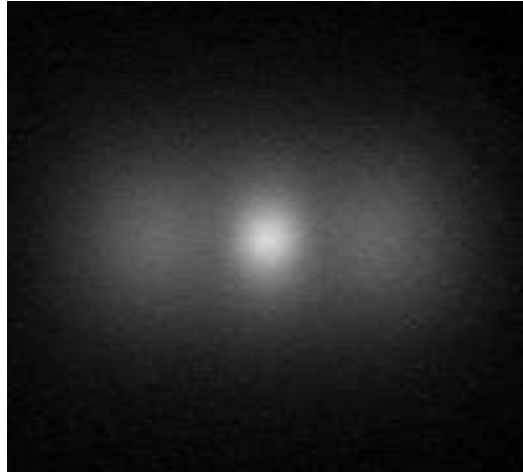
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 620 \text{ nm}$$

Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 630 \text{ nm}$$

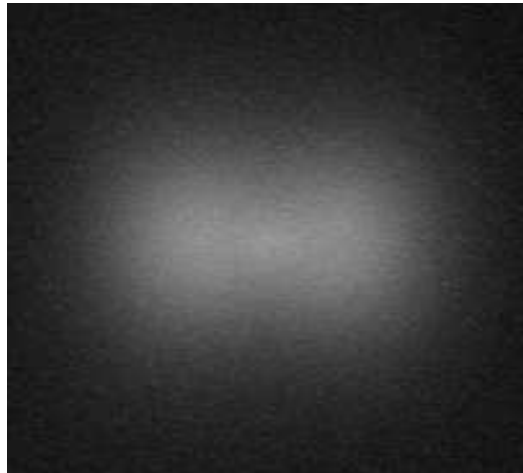
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 640 \text{ nm}$$

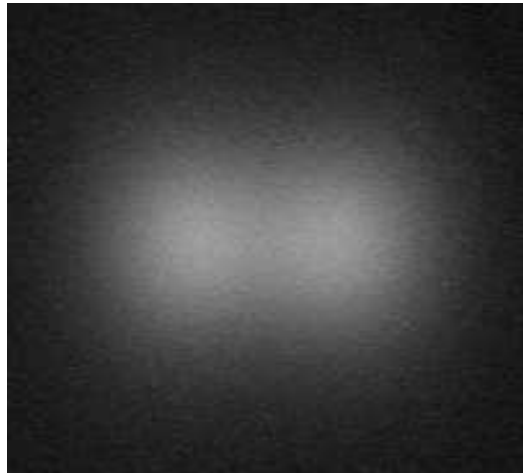
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 650 \text{ nm}$$

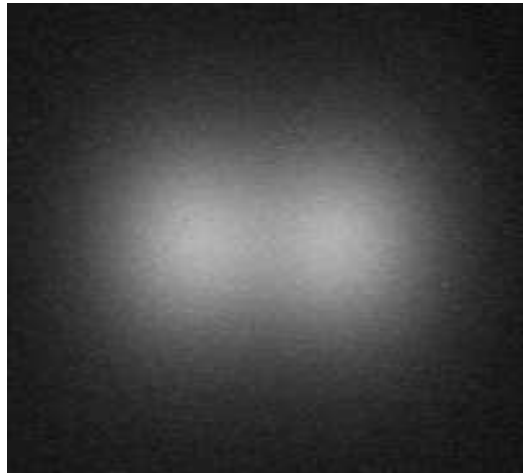
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 660 \text{ nm}$$

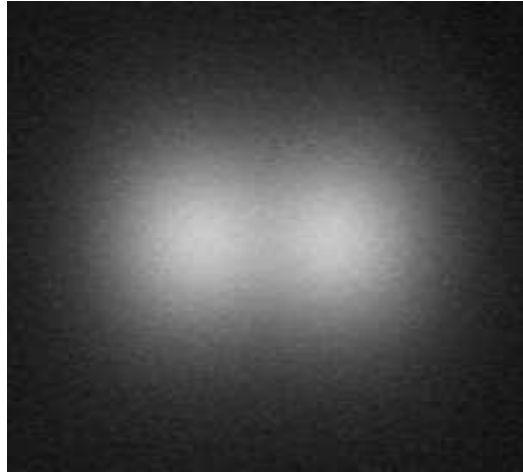
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 670 \text{ nm}$$

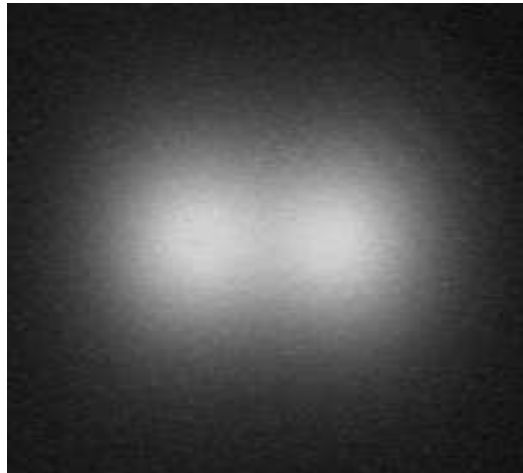
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 680 \text{ nm}$$

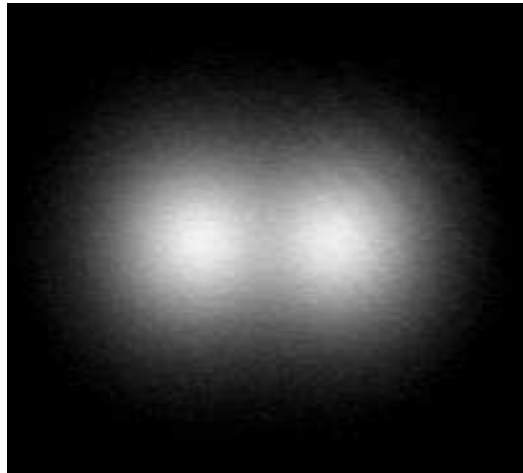
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 690 \text{ nm}$$

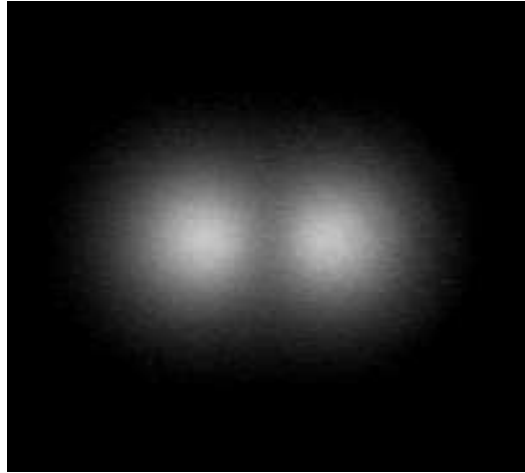
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 760 \text{ nm}$$

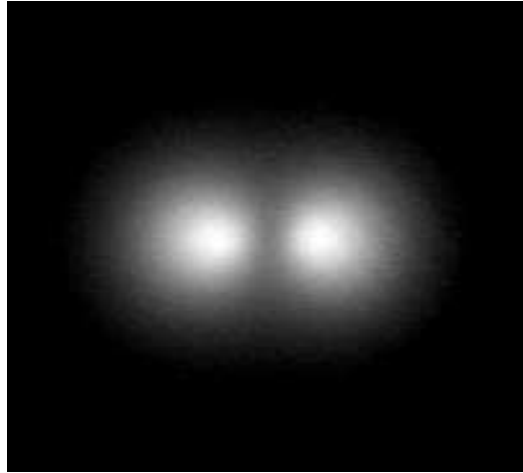
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 860 \text{ nm}$$

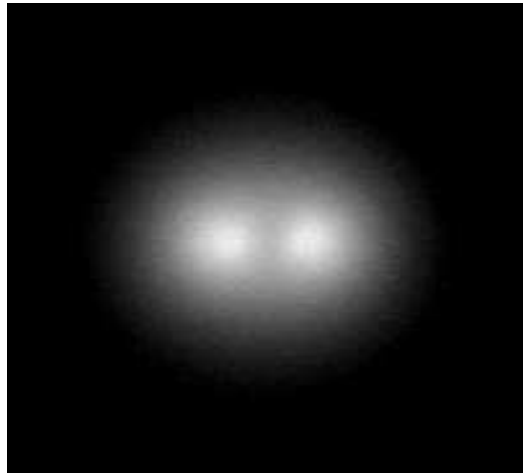
Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 900 \text{ nm}$$

Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 930 \text{ nm}$$

Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce



- Vlnová délka:

$$\lambda = 940 \text{ nm}$$

Pole LP vidů v závislosti na vlnové délce

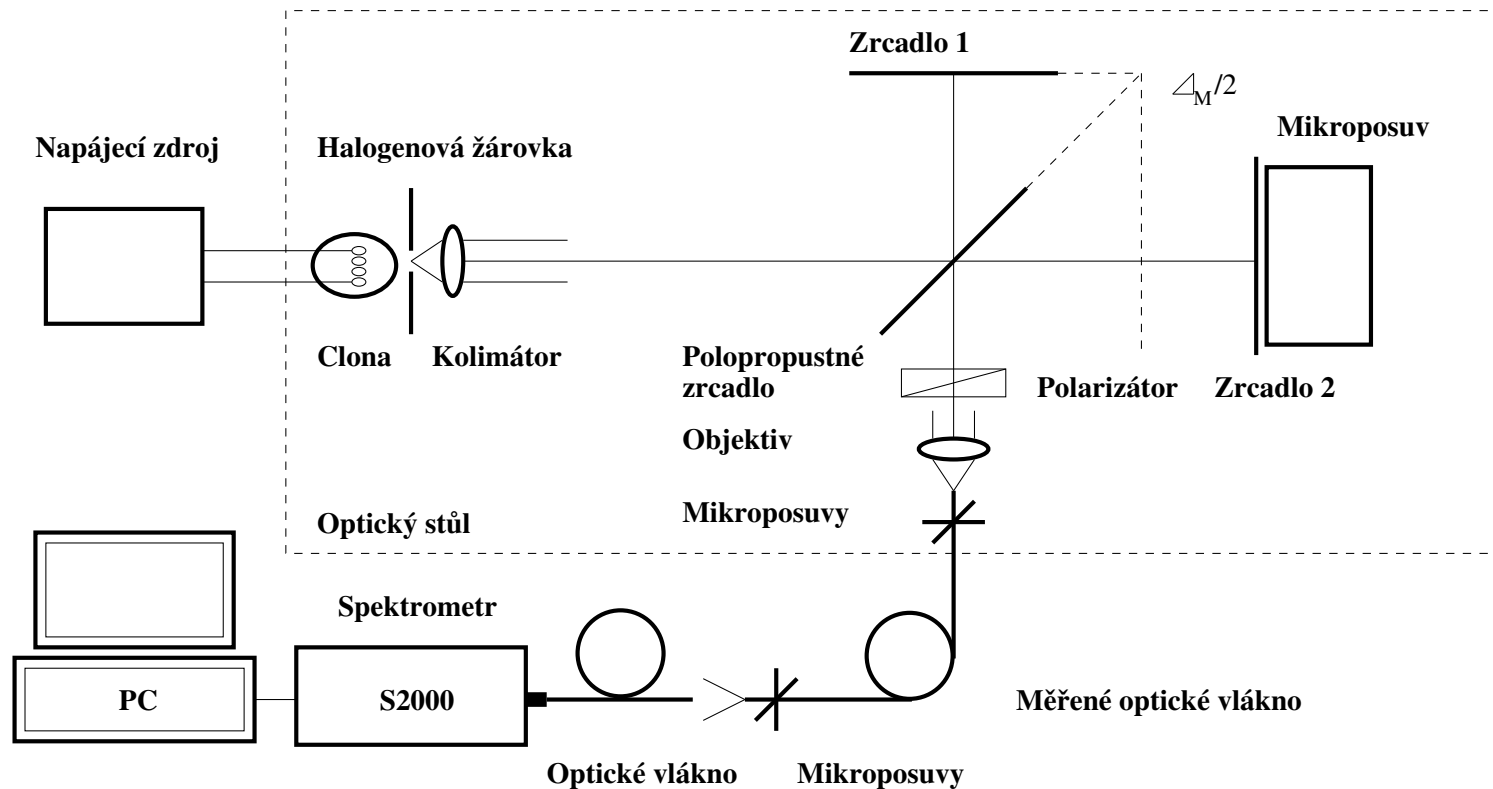


- Vlnová délka:

$$\lambda = 950 \text{ nm}$$

Start externí animace
Start animace z internetu

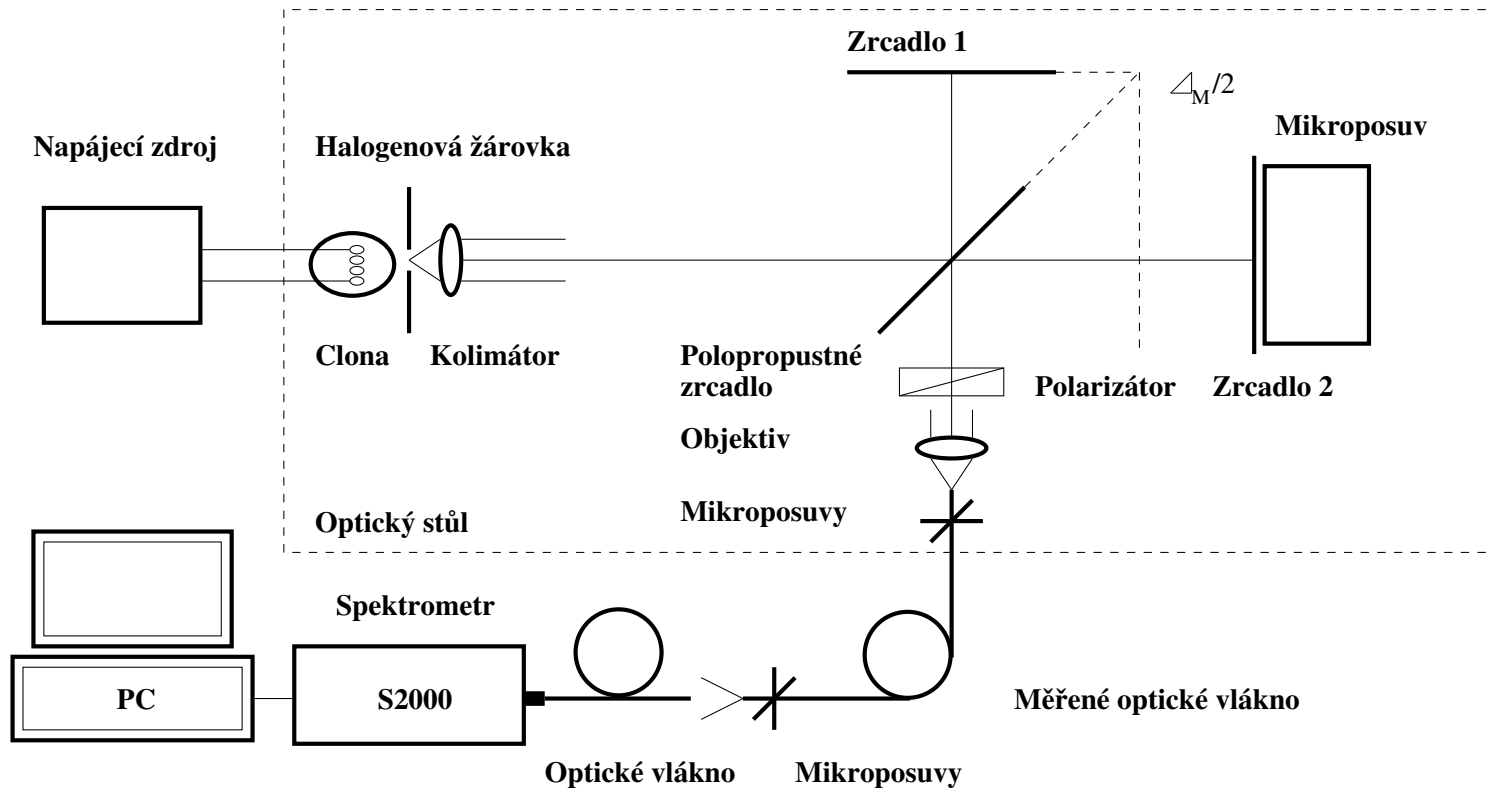
Experimentální uspořádání



Teoretický základ:

- HLUBINA, P.: **Spektrální závislosti parametrů šíření dvojice vidů optického vlákna určené měřením vyrovnávací vlnové délky a mezividové disperze.** *Jemná mechanika a optika*, 44, 1999 č. 3, s. 83-87.

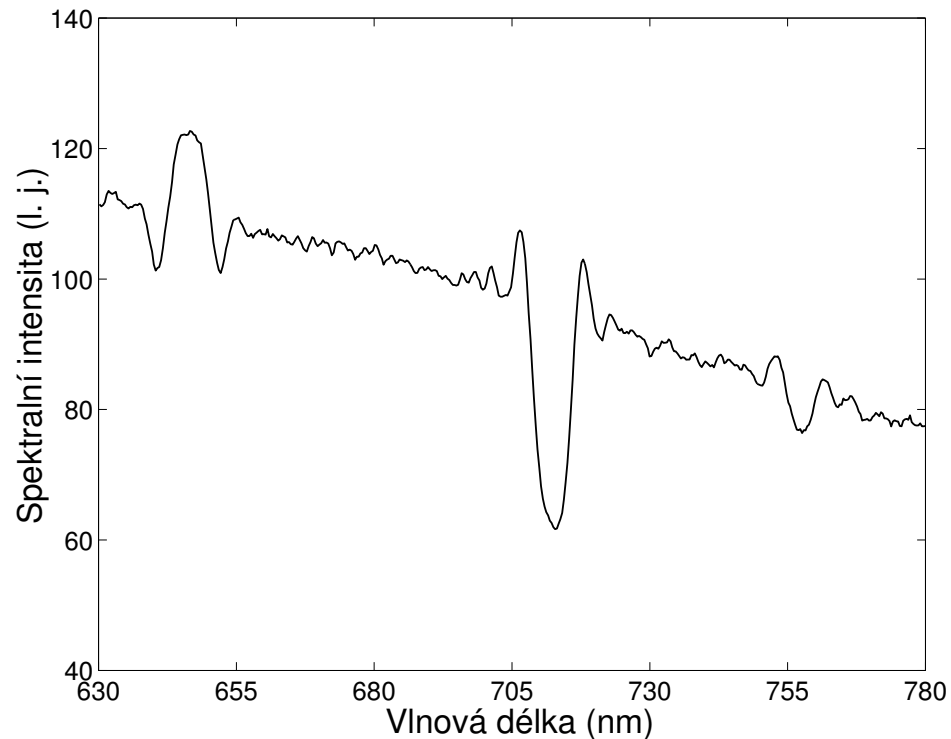
Experimentální uspořádání



- Teoretický spektrální interferogram:

$$\begin{aligned}
 I_M(\mathbf{R}, \Delta_M; \lambda) = & I^{(0)}(\mathbf{R}, \lambda) \left\{ 1 + \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left[\Delta_M \Delta\lambda_R/\lambda^2\right]^2\right\} \cos\left[\left(2\pi/\lambda\right)\Delta_M\right] \right. \\
 & + V(\mathbf{R}; \lambda) \left\{ \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left[\Delta_{01}^g(z; \lambda)\Delta\lambda_R/\lambda^2\right]^2\right\} \cos\left[\Delta\beta_{01}(\lambda)z\right] \right. \\
 & + 0.5 \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left[\left(\Delta_M - \Delta_{01}^g(z; \lambda)\right)\Delta\lambda_R/\lambda^2\right]^2\right\} \cos\left[\left(2\pi/\lambda\right)\Delta_M - \Delta\beta_{01}(\lambda)z\right] \right. \\
 & \left. \left. + 0.5 \exp\left\{-\left(\pi^2/2\right)\left[\left(\Delta_M + \Delta_{01}^g(z; \lambda)\right)\Delta\lambda_R/\lambda^2\right]^2\right\} \cos\left[\left(2\pi/\lambda\right)\Delta_M + \Delta\beta_{01}(\lambda)z\right]\right\} \right\}
 \end{aligned}$$

Princip měřicí metody

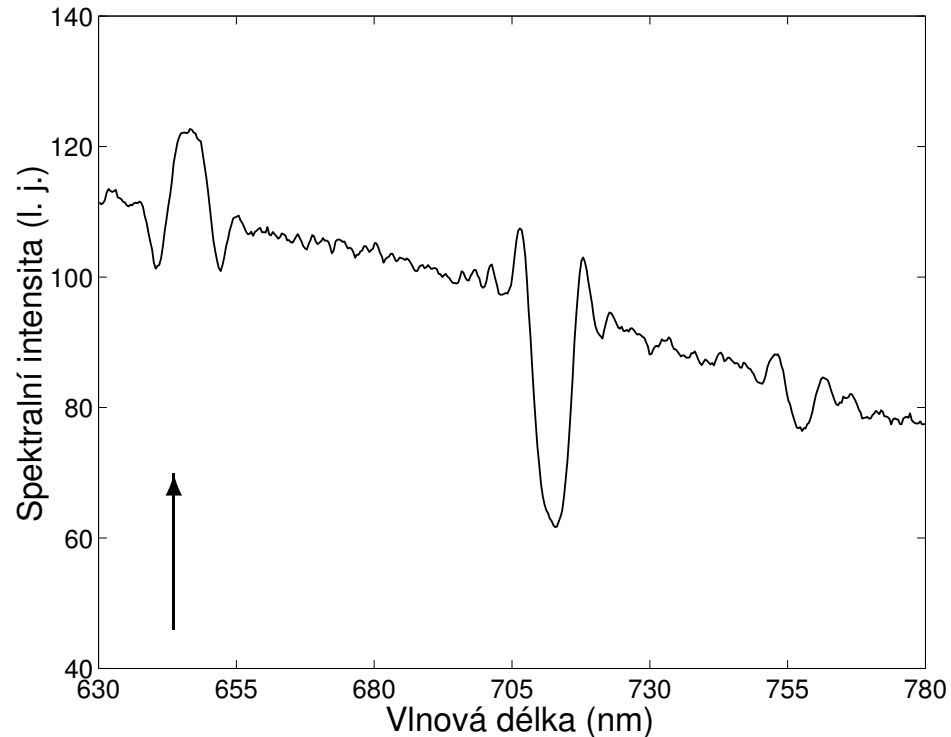


- Šířka odezvodé funkce spektrometru $\Delta\lambda_R$:

$$\Delta\lambda_R \approx 3 \text{ nm}$$

- HLUBINA, P., MARTYNKIEN, T., URBANCZYK, W.: **Měření mezividové disperze ve dvouvidových optických vláknech s eliptickým jádrem s využitím spektrální interferometrie v bílém světle.** *Jemná mechanika a optika*, **48**, 2003 č. 1, s. 28-31.

Princip měřicí metody



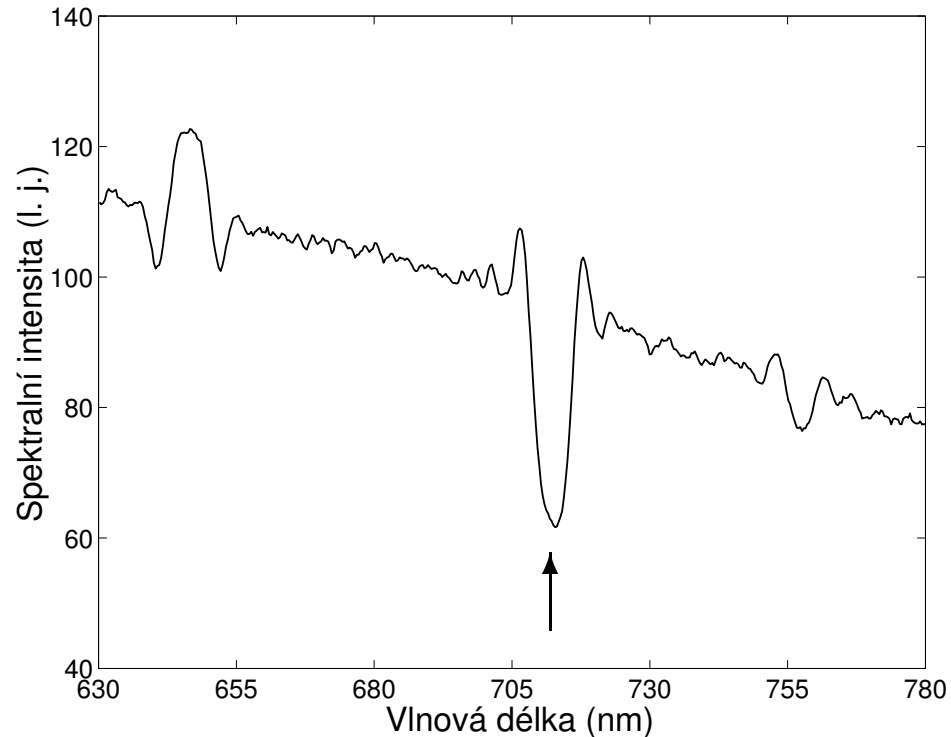
- První typ spektrálních interferenčních proužků:

$$I_{M1}(\mathbf{R}, \Delta_M; \lambda) = I^{(0)}(\mathbf{R}, \lambda) \{1 + V(\mathbf{R}; \lambda) \times 0.5 \exp\{-(\pi^2/2)[(\Delta_M - \Delta_{01}^g(z; \lambda))\Delta\lambda_R/\lambda^2]^2\} \cos[(2\pi/\lambda)\Delta_M - \Delta\beta_{01}(\lambda)z]\}$$

- První vyrovnávací vlnová délka λ_1 :

$$\Delta_{01}^g(z; \lambda_1) = \Delta_M$$

Princip měřicí metody



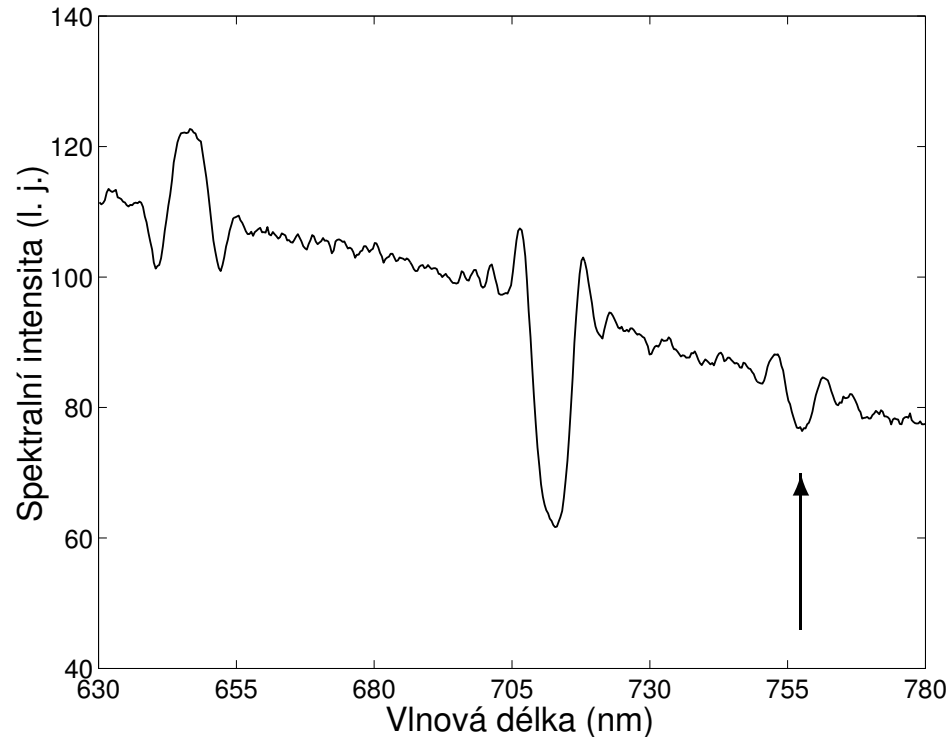
- Druhý typ spektrálních interferenčních proužků:

$$I_{M2}(\mathbf{R}, \Delta_M; \lambda) = I^{(0)}(\mathbf{R}, \lambda) \{1 + V(\mathbf{R}; \lambda) \times \exp\{-(\pi^2/2)[\Delta_{01}^g(z; \lambda)\Delta\lambda_R/\lambda^2]^2\} \cos[\Delta\beta_{01}(\lambda)z]\},$$

- Druhá vyrovnávací vlnová délka λ_0 :

$$\Delta_{01}^g(z; \lambda_0) = 0$$

Princip měřicí metody



- Třetí typ spektrálních interferenčních proužků:

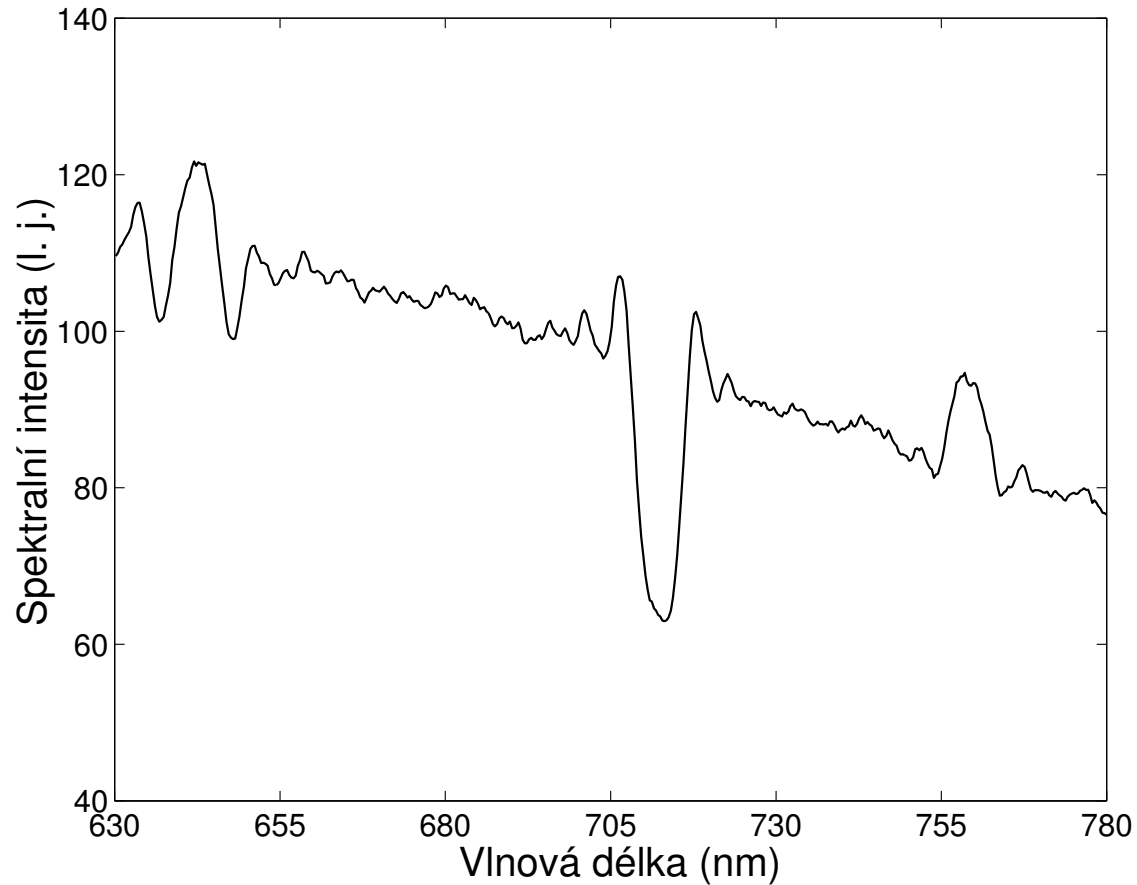
$$I_{M3}(\mathbf{R}, \Delta_M; \lambda) = I^{(0)}(\mathbf{R}, \lambda) \{1 + V(\mathbf{R}; \lambda)\} \\ \times 0.5 \exp\left\{-\left(\frac{\pi^2}{2}\right) [(\Delta_M + \Delta_{01}^g(z; \lambda)) \Delta\lambda_R / \lambda^2]^2\right\} \cos\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \Delta_M + \Delta\beta_{01}(\lambda)z\right]\}$$

- Třetí vyrovnávací vlnová délka λ_2 :

$$\Delta_{01}^g(z; \lambda_2) = -\Delta_M$$

Experimentální výsledky

Zaznamenané spektrální interferogramy:



- Nastavený ROD Δ_M :

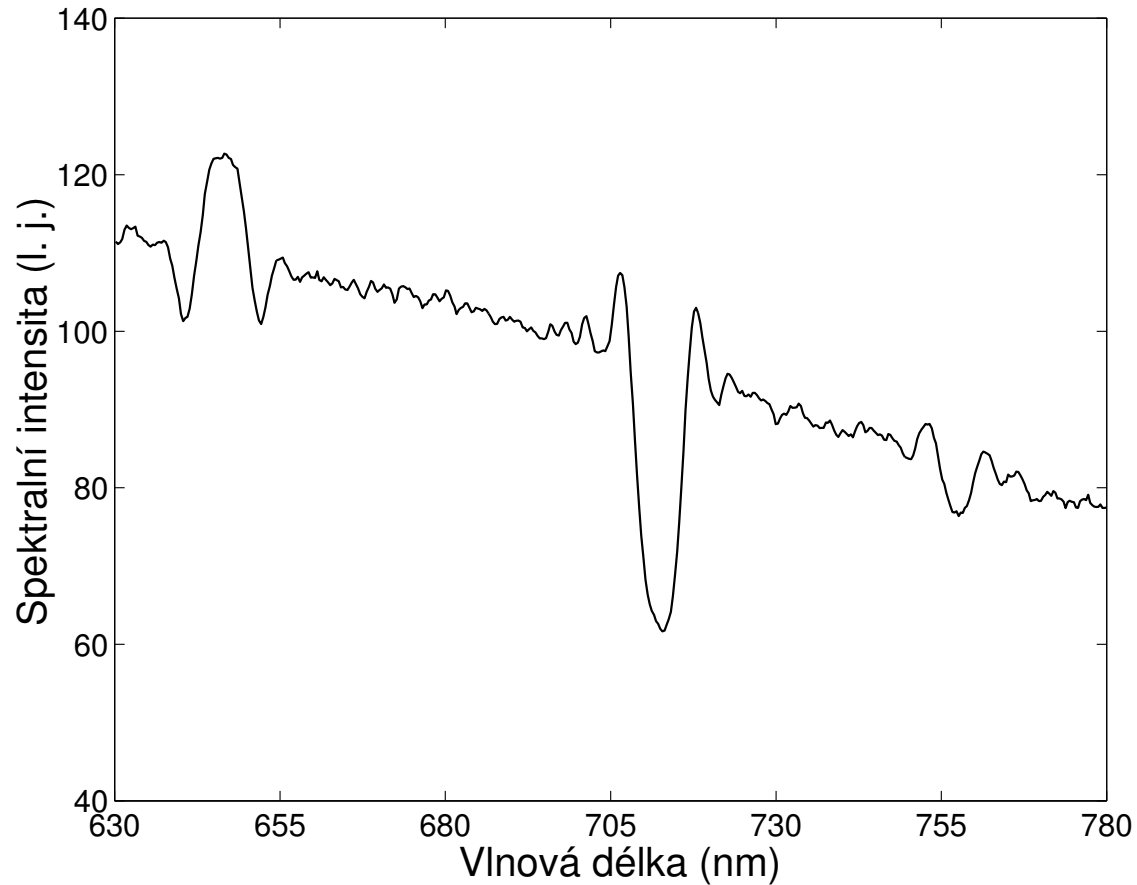
$$\Delta_M = -940 \mu m$$

- Vyrovnávací vlnové délky λ_1 , λ_0 , λ_2 :

$$\lambda_1 = 642,66 \text{ nm}, \quad \lambda_0 = 712,50 \text{ nm}, \quad \lambda_2 = 758,86 \text{ nm}$$

Experimentální výsledky

Zaznamenané spektrální interferogramy:



- Nastavený ROD Δ_M :

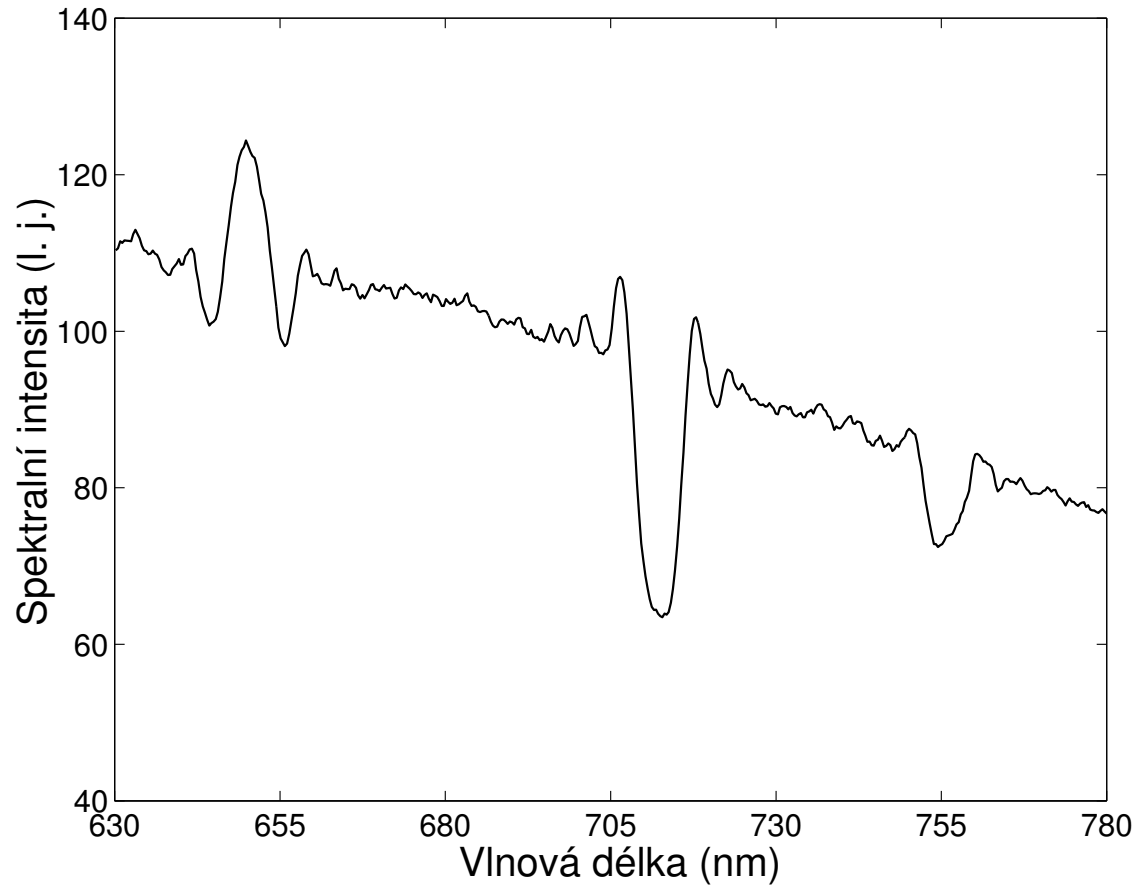
$$\Delta_M = -900 \mu m$$

- Vyrovňovací vlnové délky λ_1 , λ_0 , λ_2 :

$$\lambda_1 = 646,59 \text{ nm}, \quad \lambda_0 = 712,50 \text{ nm}, \quad \lambda_2 = 757,30 \text{ nm}$$

Experimentální výsledky

Zaznamenané spektrální interferogramy:



- Nastavený ROD Δ_M :

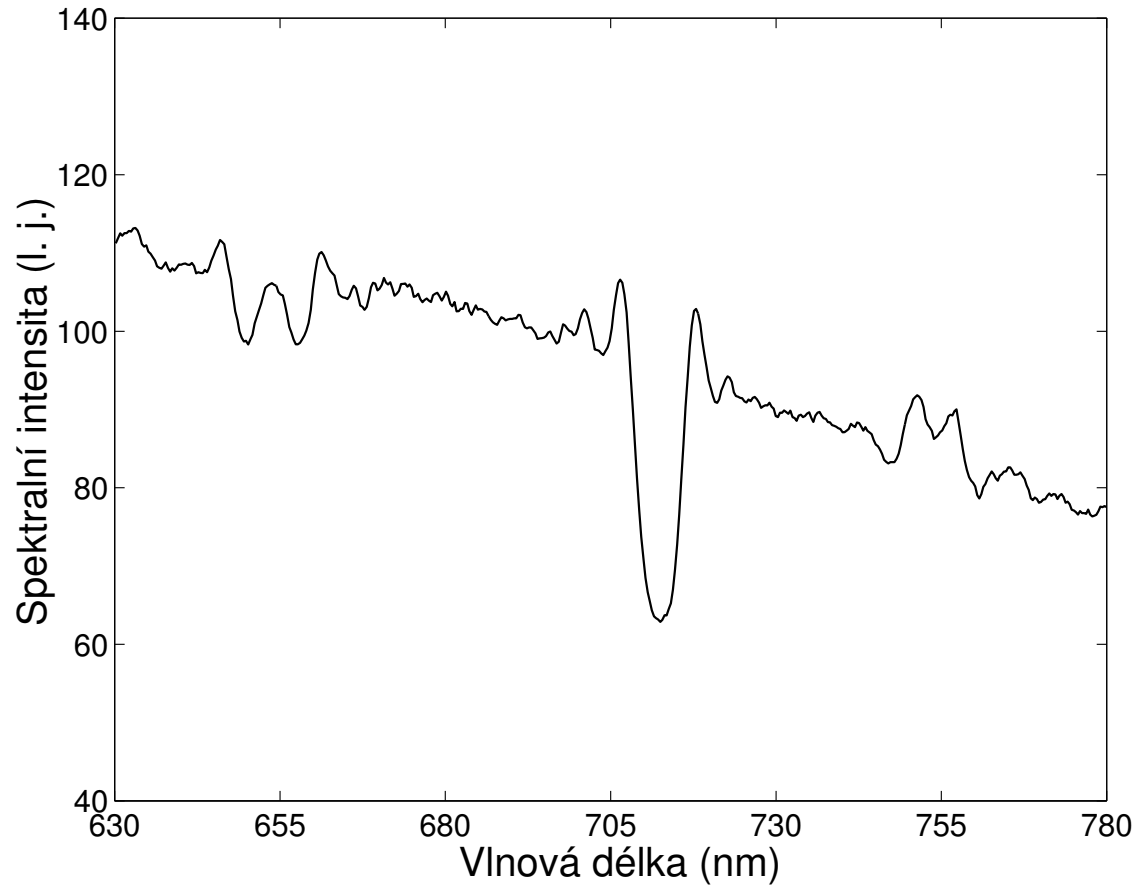
$$\Delta_M = -860 \mu m$$

- Vyrovnávací vlnové délky λ_1 , λ_0 , λ_2 :

$$\lambda_1 = 650,19 \text{ nm}, \quad \lambda_0 = 712,50 \text{ nm}, \quad \lambda_2 = 755,74 \text{ nm}$$

Experimentální výsledky

Zaznamenané spektrální interferogramy:



- Nastavený ROD Δ_M :

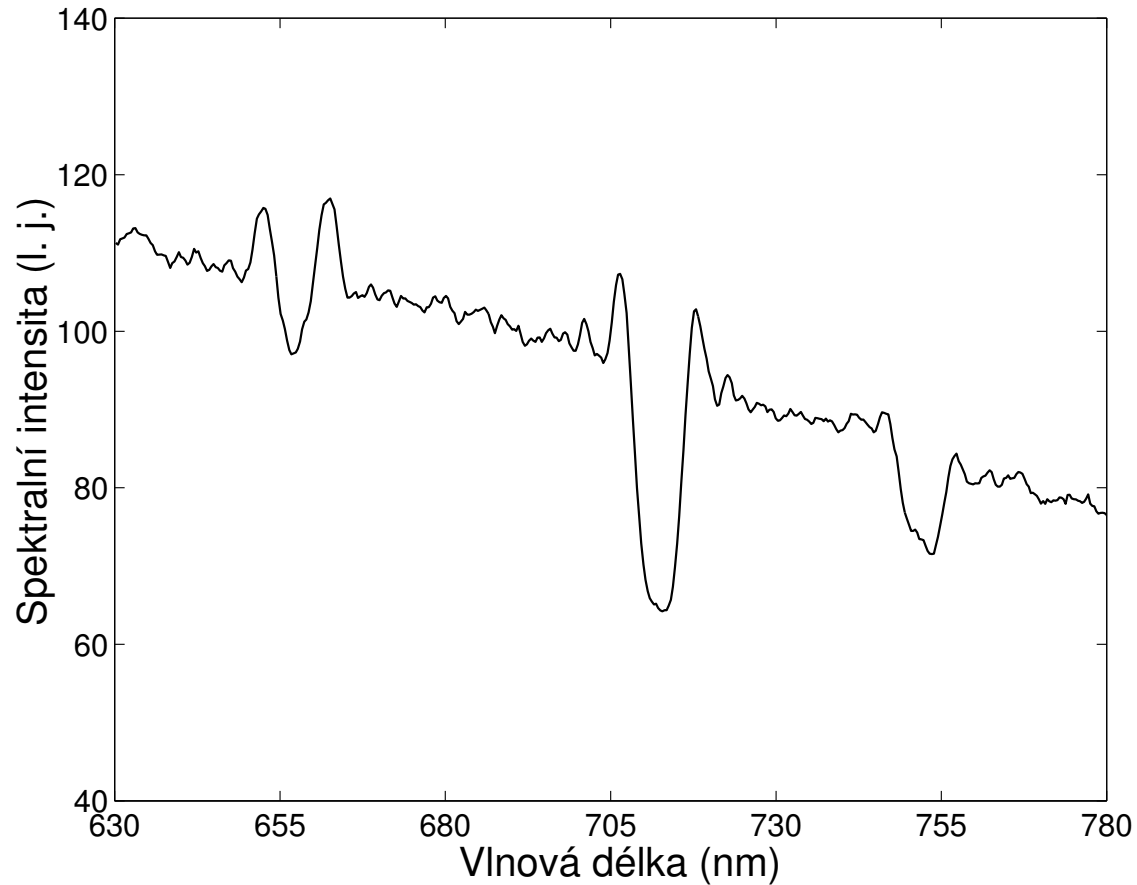
$$\Delta_M = -820 \mu m$$

- Vyrovňovací vlnové délky λ_1 , λ_0 , λ_2 :

$$\lambda_1 = 653,79 \text{ nm}, \quad \lambda_0 = 712,50 \text{ nm}, \quad \lambda_2 = 753,87 \text{ nm}$$

Experimentální výsledky

Zaznamenané spektrální interferogramy:



- Nastavený ROD Δ_M :

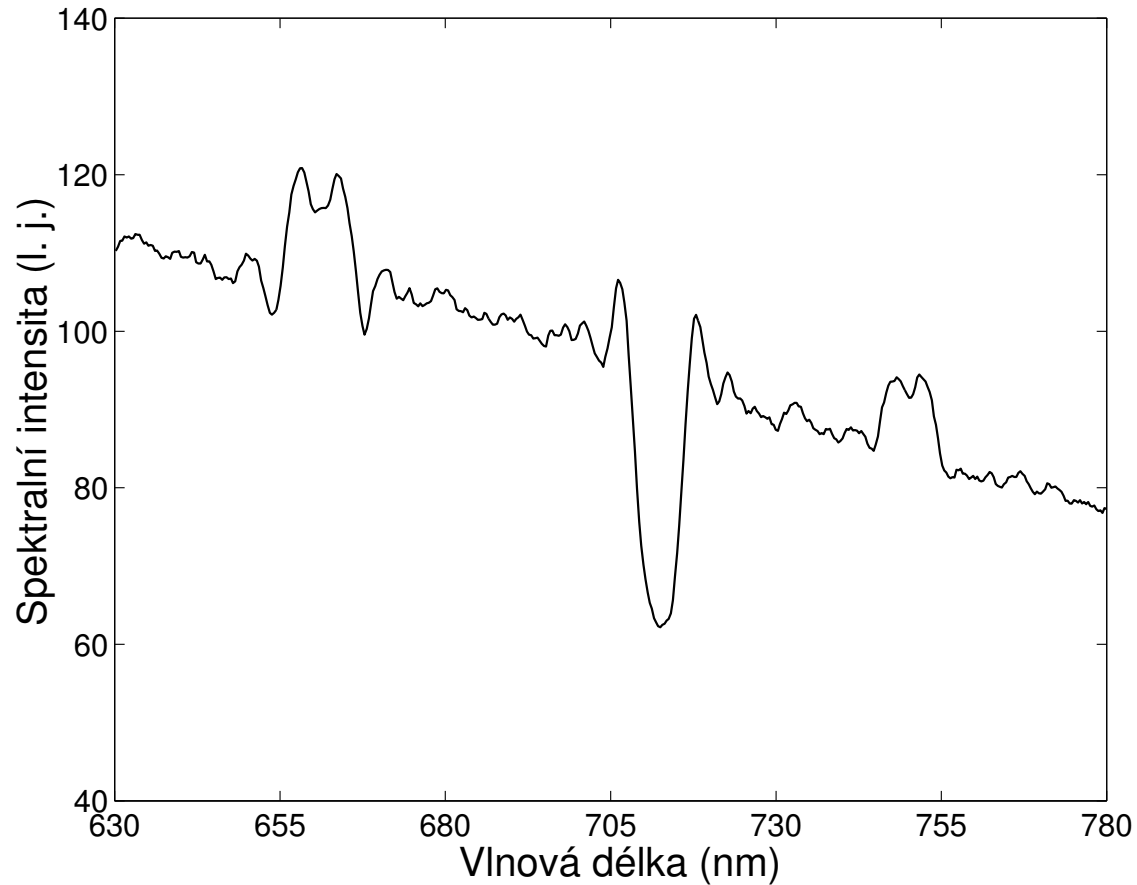
$$\Delta_M = -780 \mu m$$

- Vyrovňovací vlnové délky λ_1 , λ_0 , λ_2 :

$$\lambda_1 = 657,05 \text{ nm}, \quad \lambda_0 = 712,50 \text{ nm}, \quad \lambda_2 = 751,99 \text{ nm}$$

Experimentální výsledky

Zaznamenané spektrální interferogramy:



- Nastavený ROD Δ_M :

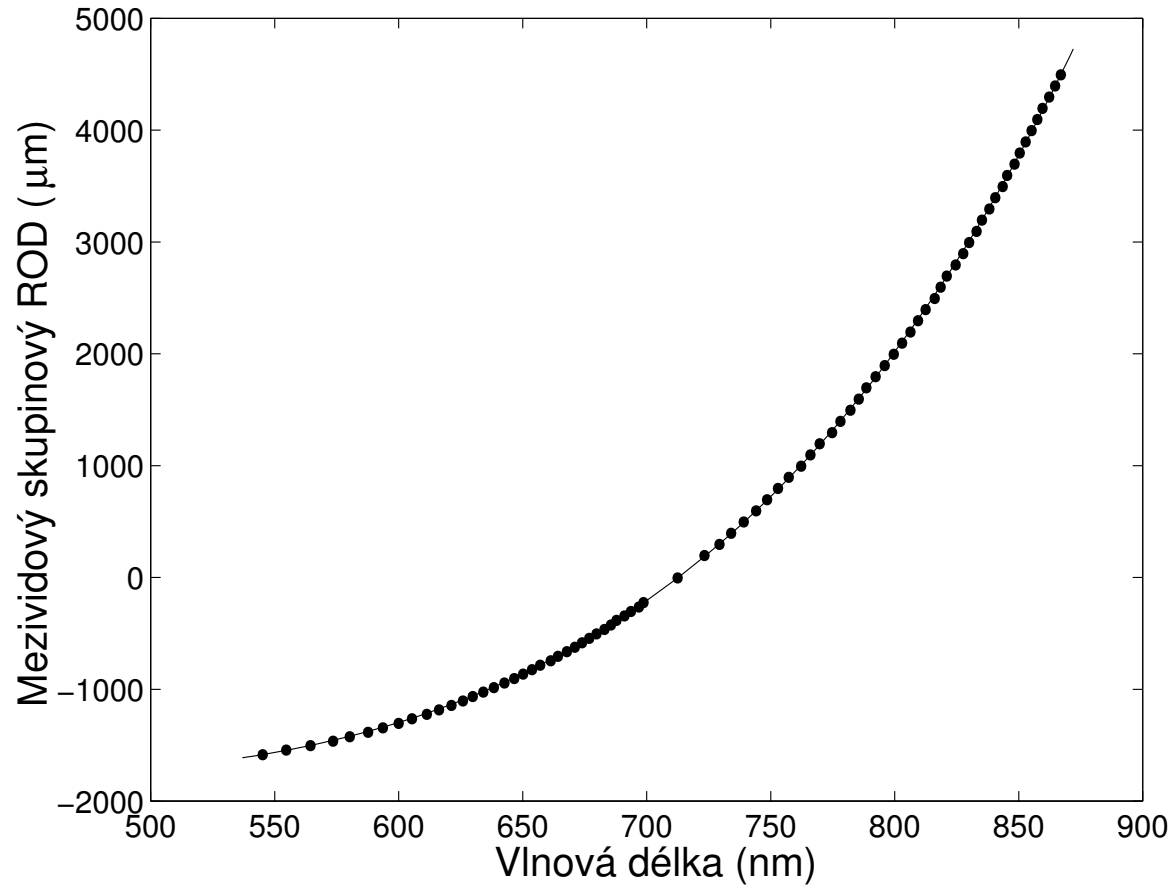
$$\Delta_M = -740 \mu m$$

- Vyrovňovací vlnové délky λ_1 , λ_0 , λ_2 :

$$\lambda_1 = 661,28 \text{ nm}, \quad \lambda_0 = 712,50 \text{ nm}, \quad \lambda_2 = 750,11 \text{ nm}$$

Experimentální výsledky

Mezividový skupinový ROD pro jednu polarizaci vidů LP₀₁ a LP₁₁:

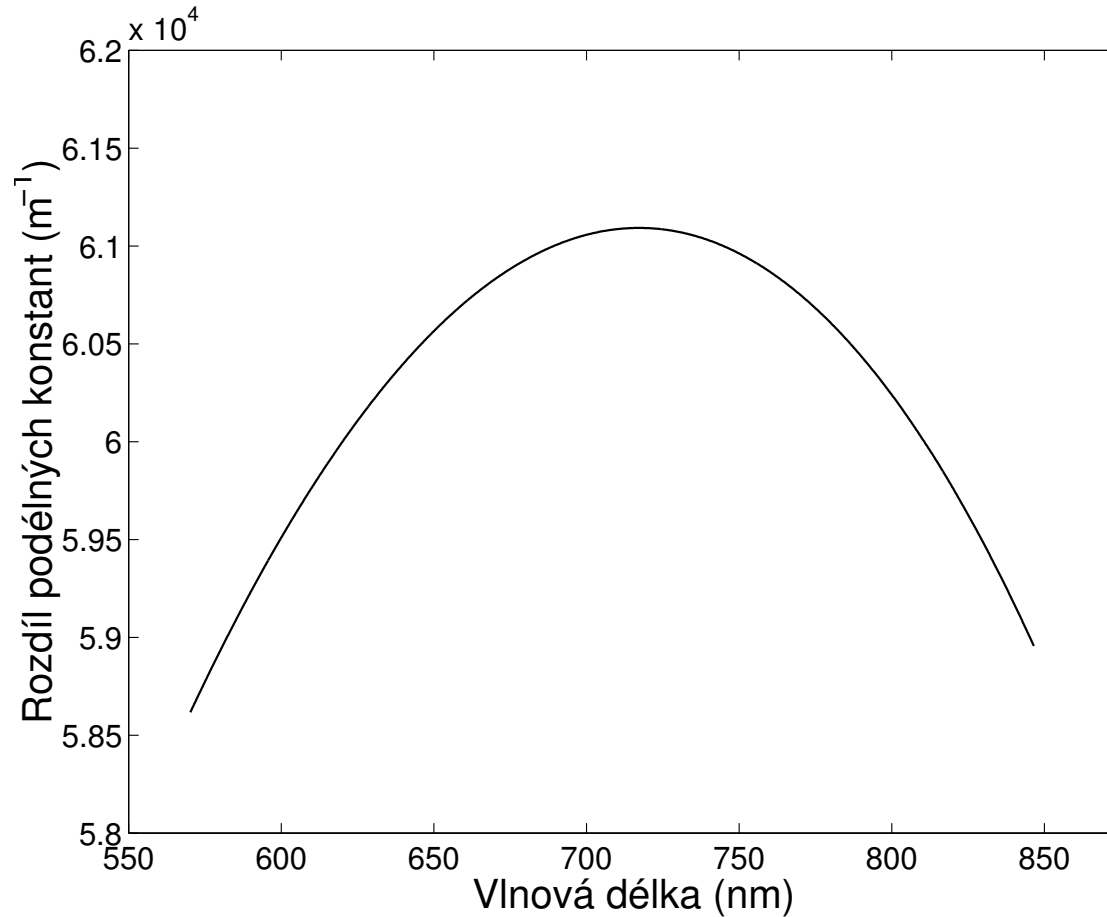


- Polynom třetího řádu jako fitující funkce $f(\lambda)$:

$$f(\lambda) = -\Delta_{01}^g(z; \lambda)/(z\lambda^2) = (1/2\pi)d[\Delta\beta_{01}(\lambda)]/d\lambda$$

Experimentální výsledky

Rozdíl podélných konstant šíření mezi vidy LP_{01} a LP_{11} :



- Polynom čtvrtého řádu jako fitující funkce $F(\lambda)$:

$$\Delta\beta_{01}(\lambda) = 2\pi[F(\lambda) + C]$$

Detailnější popis našich měření a výsledků

- HLUBINA, P., MARTYNKIEN, T., URBANCZYK, W.: **White-light spectral interferometry used for dispersion characterization of highly birefringent optical fibers**, *Proc. SPIE (International Symposium on Microwave and Optical Technology, Ostrava 2003)*, Bellingham 2004.
Česká verze přednášky: **Spektrální interferometrie v bílém světle využítá k disperzní charakterizaci vysoce dvojlomných optických vláken.**