

MĚŘENÍ SPEKTRA SVĚTLA

Antonín Černoch

Regionální centrum pokročilých technologií a materiálů



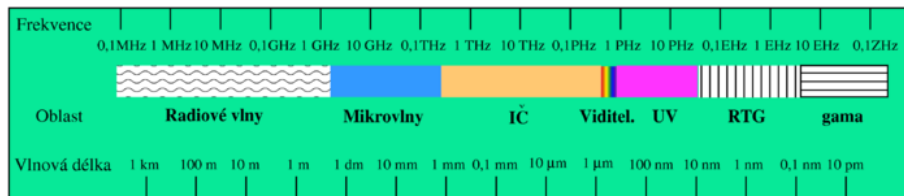
INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

CZ.1.07/2.2.00/15.0147

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Zobrazovací spektrometry
 - Disperzní hranol
 - Difrakční mřížka
- 3 Selektivní spektrometry
 - Fabryův-Perotův planární rezonátor
- 4 Fourierovská spektroskopie
- 5 Streak camera

Elektromagnetické spektrum



$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{2\pi c}{\omega}, \quad c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

λ – vlnová délka

ν – frekvence

ω – úhlová frekvence

c – rychlost světla ve vakuu

Spektra:

- spojitá, čárová, pásová
- emisní, absorpční

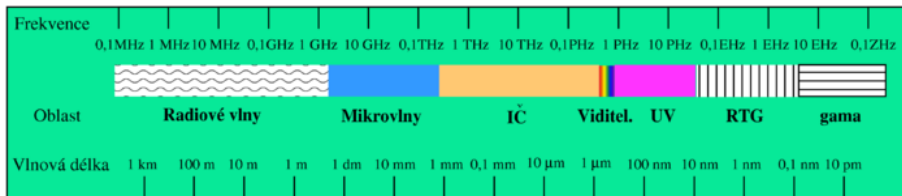
Oblasti elektromagnetického spektra

Rádiová km-0.1 m, antény, TV, rádio, mobily

Mikrovlnná 100-1 mm, magnetron nebo diody, molekuly s dipólovým momentem, mikrovlnka, Wi-fi, radar

Infračervená

- vzdálená IČ – 1000-10 μm , rotační módy molekul a fonony
- střední IČ – 10-2.5 μm , tepelné záření
- blízká IČ – 2.5-0.75 μm , podobně jako VIS



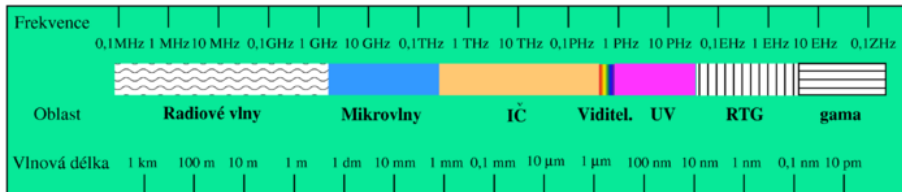
Oblasti elektromagnetického spektra

Viditelná (VIS) 750-380 nm, maximum záření hvězd, energetická vzdálenost elektronových hladin atomů

Ultrafialová (UV) 380-10 nm, ionizující záření, sterilizace

Rentgenová (X) 10-0.1 nm, neutronové hvězdy a akreační disky černých děr, prochází předměty

Gama (γ) menší jak 0.1 nm, vytváří radioizotopy



Spektroskopie

- určení intenzity záření v celém rozsahu vlnových délek (frekvencí)
- určování látek a jejich vlastností podle vyzářeného nebo absorbovaného světla

Způsoby měření

- 1 Zobrazovací spektrometry – rozmítnutí spektra do různých prostorových módů
 - disperzní hranol
 - difrakční mřížka
- 2 Monochromátory – odfiltrování neměřených složek spektra
 - prostorově (clonou) z rozmítnutého spektra
 - absorpčně
 - interferenčně
- 3 Nepřímé metody
 - Fourierovská spektroskopie

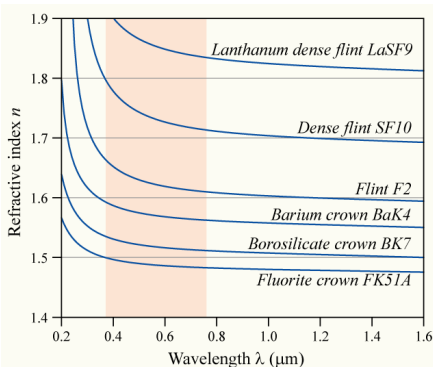
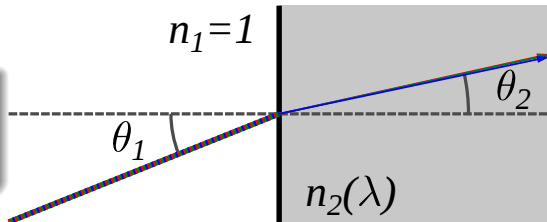
Obsah

- 1 Úvod
- 2 Zobrazovací spektrometry**
 - Disperzní hranol
 - Difrakční mřížka
- 3 Selektivní spektrometry
 - Fabryův-Perotův planární rezonátor
- 4 Fourierovská spektroskopie
- 5 Streak camera

Lom na rozhraní

Snellův zákon lomu

$$n_1(\lambda) \sin \theta_1 = n_2(\lambda) \sin \theta_2$$



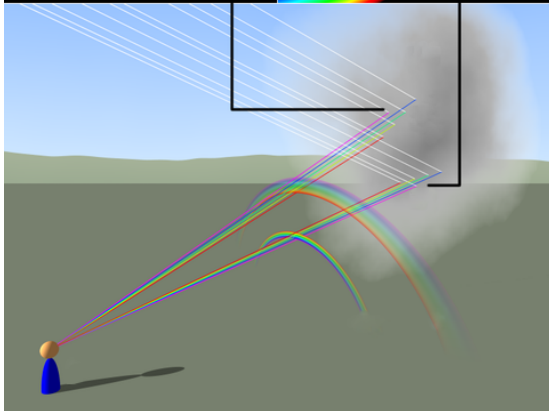
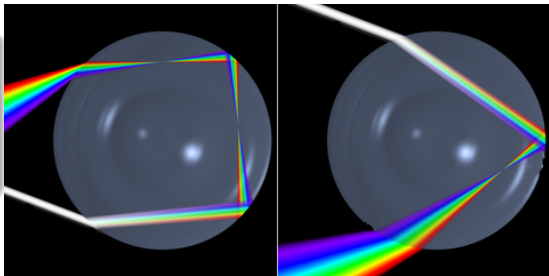
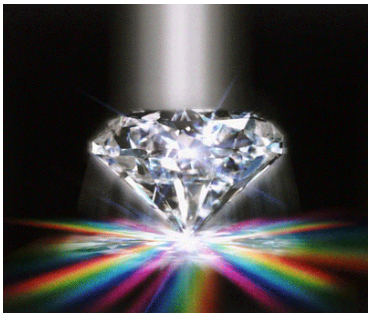
Chromatická disperze

index lomu materiálu závisí na vlnové délce → různé vlnové délky (barvy) se

- lámou pod jinými úhly
 - šíří různými rychlostmi
- $$v(\lambda) = c/n(\lambda)$$

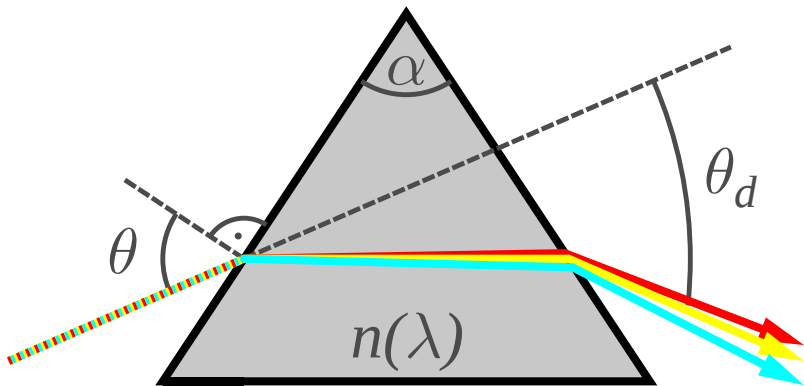
Příklad

- duha
- diamant
- šíření ve vlákně



Disperzní hranol

$$\theta_d = \theta - \alpha + \arcsin \left[\sin \alpha \sqrt{n(\lambda)^2 - \sin^2 \theta} - \sin \theta \cos \alpha \right]$$



Abbeovo číslo

snaha popsat disperzi materiálu
jedním číslem

$$\nu = \frac{1}{\delta_r} = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

$\nu < 50$ flintová skla

$\nu > 55$ korunová skla

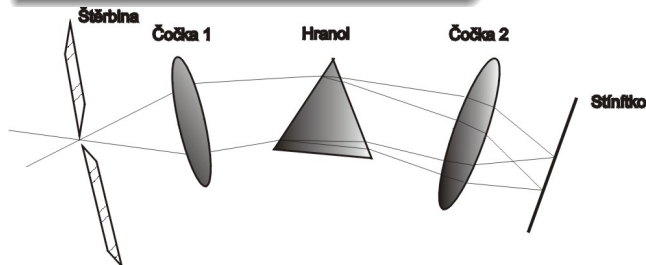
δ_r relativní disperze

$n_{F,D,C}$ indexy lomu
Franhoferových čar

$\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$

$\lambda_D = 589.2 \text{ nm}$

$\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$



Konstrukce spektrometru

- kolimátor
- disperzní hranol
- fokusační čočka

Použití

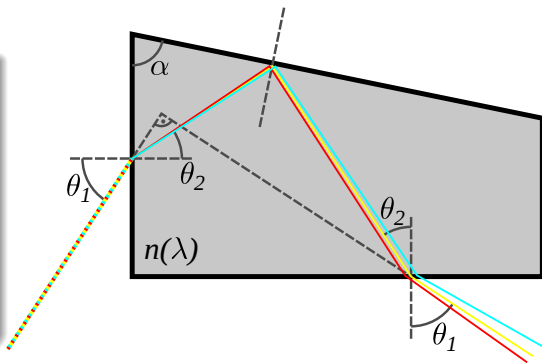
Hranol Pellin Broca

výstup kolmý na vstup (jen
pro jednu vlnovou délku
 $n_D = 1.52$)

$$\alpha = 78^\circ$$

$$\theta_1 = 57^\circ$$

$$\theta_2 = 33^\circ$$



- disperzní hranoly se v měřících přístrojích nepoužívají
- využití v rezonátorech laserů
 - výběr určité vlnové délky
 - kompenzace časové disperze

Difrakční mřížka

periodická změna s periodou Λ

- tloušťky
- indexu lomu

Paraxiální aproximace ($\Lambda \gg \lambda$)

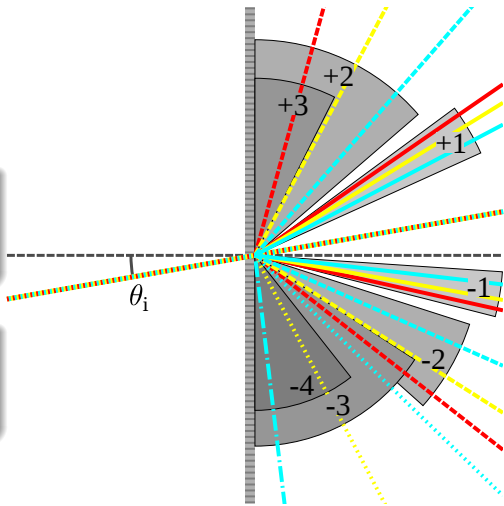
$$\theta_q = \theta_i + q \frac{\lambda}{\Lambda}$$

Obecně

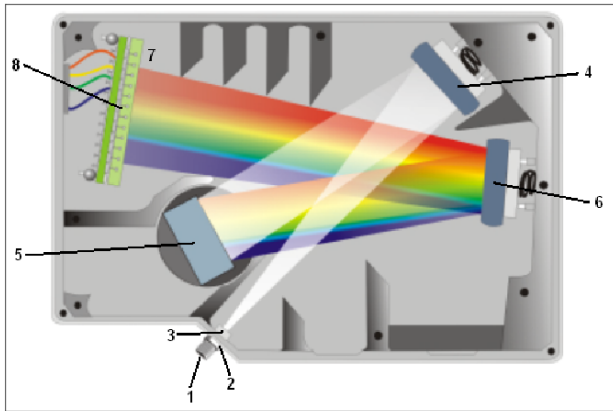
$$\sin \theta_q = \sin \theta_i + q \frac{\lambda}{\Lambda}$$

$$q = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$\Lambda = 1.667 \mu\text{m} \rightarrow 600 \text{ čar/mm}$$



Ocean Optics HR4000CG-UV-NIR



rozsah
rozlišení
štěrbina
odrazná mřížka

200-1100 nm
0.025 nm
5 μm
300 čar/mm

- ❶ SMA vláknový konektor
- ❷ pravoúhlá štěrbina
- ❸ spektrální filtr
- ❹ kolimační zrcadlo
- ❺ difrakční mřížka
- ❻ fokusační zrcadlo
- ❼ kolekční čočky
- ❽ lineární CCD

Jobin Yvon Triax 320

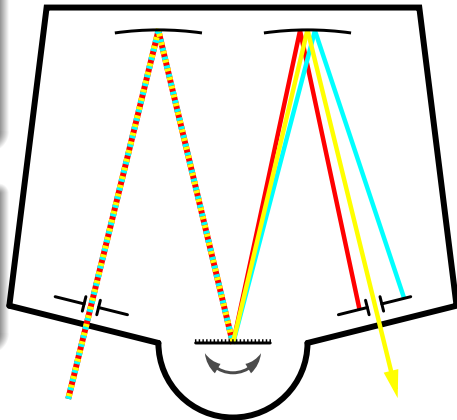
Monochromátor

- vstupní a výstupní štěrbina určují rozlišení
- otočení mřížky vybírá vlnovou délku

Spektrometr

- se CCD
- skenování otáčením mřížky na jeden detektor

mřížka	1200 čar/mm
disperze	2.64 nm/mm
rozlišení	0.06 nm
rozsah	0 - 1500 nm



Obsah

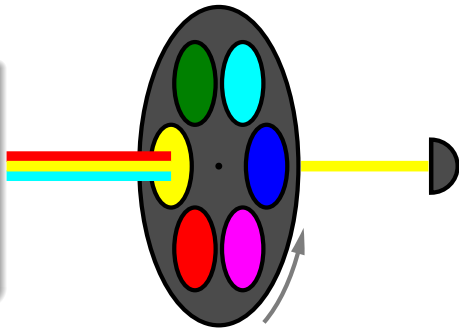
- 1 Úvod
- 2 Zobrazovací spektrometry
 - Disperzní hranol
 - Difrakční mřížka
- 3 Selektivní spektrometry**
 - **Fabryův-Perotův planární rezonátor**
- 4 Fourierovská spektroskopie
- 5 Streak camera

Princip

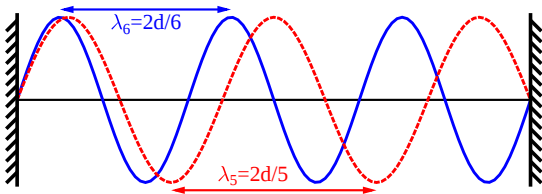
- odrazení nebo absorpce neměřených složek spektra
- detektor změří jen výkon prošlého záření
- změna parametrů filtru → skenování frekvence

Možnosti:

- clona v rozmítnutém spektru z hranolu nebo mřížky
- sada filtrů, které se mění – drahé a zdlouhavé
- laditelný filtr – interference



Fabryův-Perotův planární rezonátor



- konstruktivní a destruktivní interference
- částečně propustná zrcadla $\rightarrow$ rozšíření spektrální čáry

Spektrální propustnost

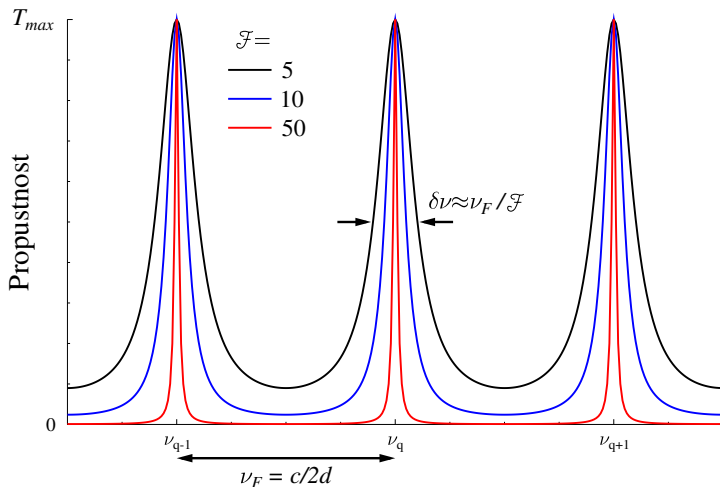
$$T(\nu) = \frac{T_{max}}{1 + \left(\frac{2\mathcal{F}}{\pi}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi\nu}{\nu_F}\right)}, \quad \mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{r}}{1-r}, \quad T_{max} = \frac{|t|^2}{(1-r)^2}$$

T_{max} maximum propustnosti

$\mathcal{F}$ Jemnost (*Finesse*)

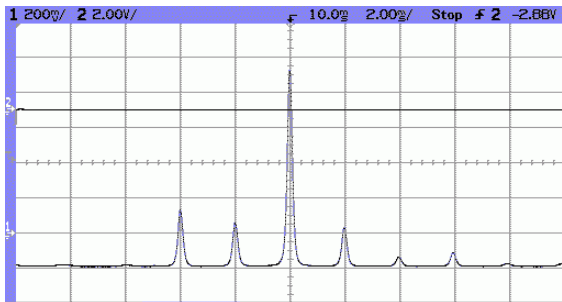
$$t = t_1 t_2, \quad r = r_1 r_2$$

$$\nu_F = c/2d$$



- ν_F – volný spektrální interval, opakování průběhu → nejednoznačnost
- skanování spektra – posun jednoho zrcadla o $\delta d \rightarrow \delta\nu_q = -\nu_q \frac{\delta d}{d}$

Spektrum
polovodičového
laseru OZ Optics



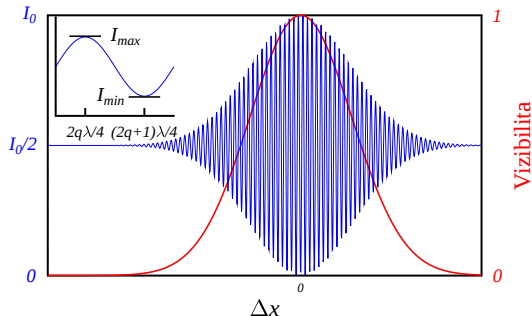
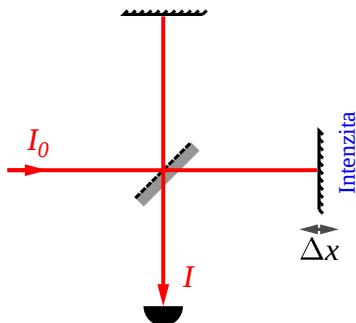
Jemnost:
 $\mathcal{F} = 150$,
Centrální vlnová
délka:
 $\lambda = 826 \text{ nm}$

d mm	ν_F GHz	λ_F nm	1 nm/ ν_F	$\delta\nu$ GHz	$\delta\lambda$ nm
10	15	0.035	29	0.1	0.00023
5	30	0.069	14.5	0.2	0.00046
2	75	0.173	5.8	0.5	0.00125
1	150	0.35	2.9	1	0.0023
0.5	300	0.69	1.45	2	0.0046
0.2	750	1.73	0.58	5	0.0115
0.1	1500	3.5	0.29	10	0.023

Obsah

- 1 Úvod
- 2 Zobrazovací spektrometry
 - Disperzní hranol
 - Difrakční mřížka
- 3 Selektivní spektrometry
 - Fabryův-Perotův planární rezonátor
- 4 Fourierovská spektroskopie**
- 5 Streak camera

Měření spektra pomocí interferometru



Wiener-Chinčín

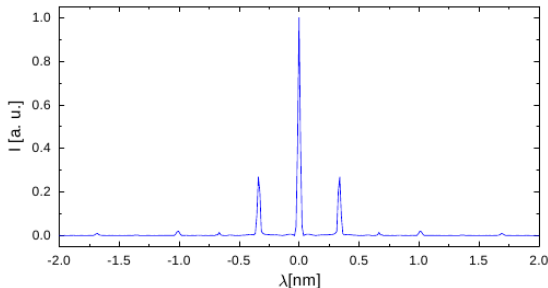
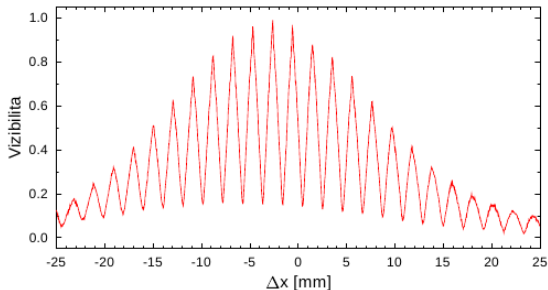
$$S(\nu) = 2 \int_0^{\infty} I(\tau) \cos(2\pi\nu\tau) d\tau$$

Autokorelační funkce

$$V(\Delta x) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Diskrétní vzorkování

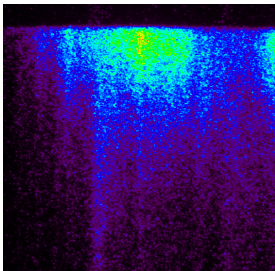
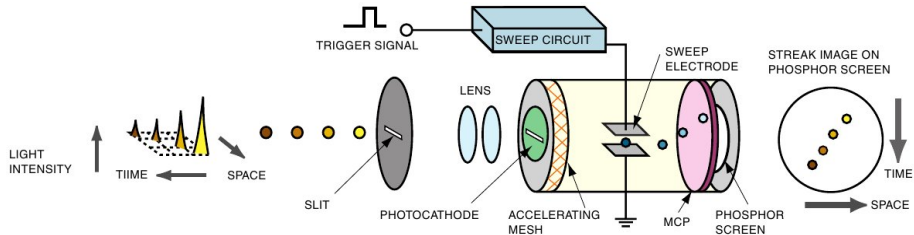
- V jen v určitých bodech
→ diskrétní FFT
- rozsah $\Delta x \times$ rozlišení
(např. 25 mm $\rightarrow$ 0.007 nm)
- hustota měření
(velikost kroku) $\times$
rozsah spektra (např.
1 $\mu\text{m} \rightarrow$ 172 nm)
- možná změna spektra
během dlouhého
měření



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Zobrazovací spektrometry
 - Disperzní hranol
 - Difrakční mřížka
- 3 Selektivní spektrometry
 - Fabryův-Perotův planární rezonátor
- 4 Fourierovská spektroskopie
- 5 Streak camera**

Streak camera



Spektroskopie s časovým rozlišením

- optické vlastnosti nanočástic
- studium neklasických optických polí
- identifikace chemických sloučenin

Hamamatsu C10910



- časové rozlišení 1 ps to 1 ms
- spektrální rozsah 230 - 900 nm
- jednofotonová citlivost (photon counting)
- v kombinaci s laditelným fs laserem

