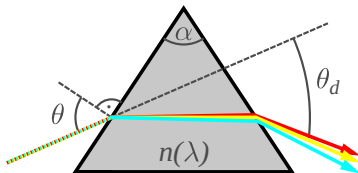


MĚŘENÍ SPEKTRA SVĚTLA

Antonín Černoch

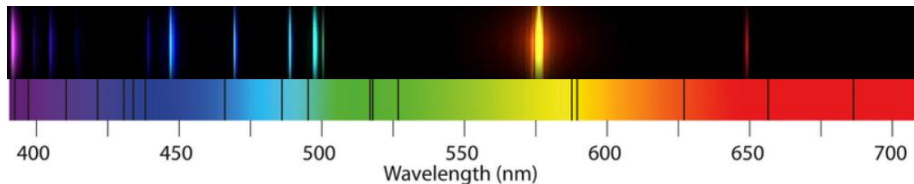
Společná laboratoř optiky UP a FZÚ AV ČR



Obsah

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

Elektromagnetické spektrum



Spektra:

- emisní, absorpční
- spojitá, čárová, pásová

Jednotky

vlnová délka nm, μm

frekvence Hz, cm^{-1}

energie eV

λ vlnová délka $\lambda = \frac{c}{\nu}$

f, ν frekvence

ω úhlová frekvence $\omega = 2\pi f$

c rychlost světla ve vakuu
($299\,792\,458\text{ m s}^{-1}$)

Oblasti elektromagnetického spektra

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

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

Infračervená

- vzdálená IČ: 1 mm–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



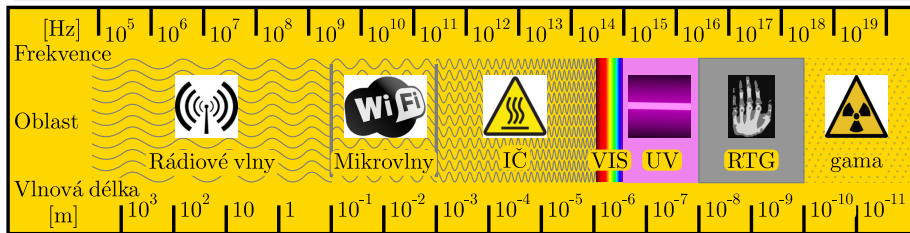
Oblasti elektromagnetického spektra

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 určitém rozsahu vlnových délek
- určování látek a jejich vlastností podle vyzářeného nebo absorbovaného světla

Způsoby měření

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

Obsah

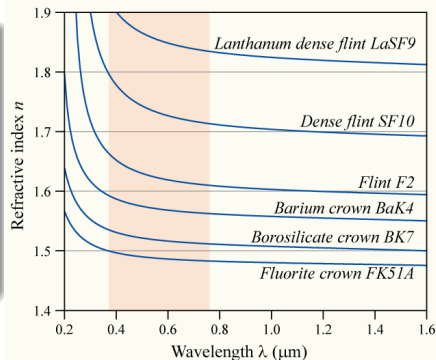
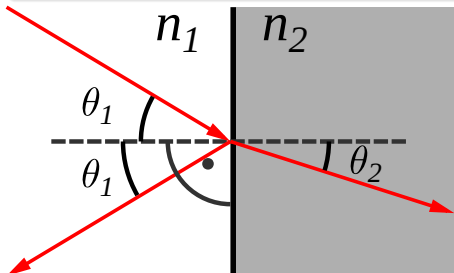
- 1 Elektromagnetické spektrum
- 2 Zobrazovací spektrometry**
 - Disperzní hranol
 - Difrakční mřížka
- 3 Selektivní spektrometry
 - Fabryův-Perotův planární rezonátor
- 4 Fourierovská spektroskopie
- 5 Streak camera

Lom na rozhraní

Chromatická disperze

index lomu materiálu závisí na vlnové délce $\rightarrow$ různé vlnové délky (barvy) se

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



Snellův zákon lomu

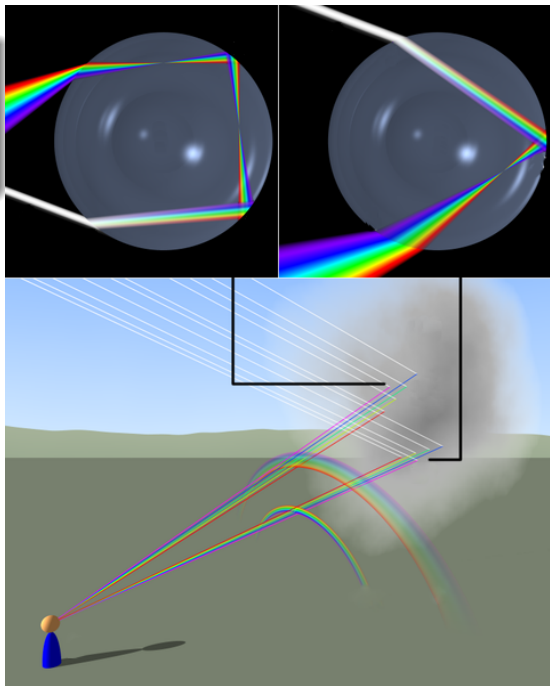
$$n_1(\lambda) \sin \theta_1 = n_2(\lambda) \sin \theta_2$$

$$\theta_1 = 30^\circ, n_2(B) = 1.8, n_2(R) = 1.7$$

$$\rightarrow \theta_2(B) = 16.1^\circ, \theta_2(R) = 17.1^\circ$$

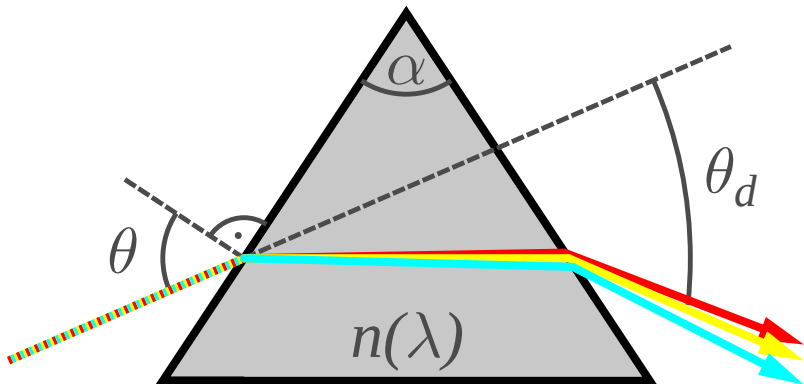
Příklady

- 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
jediným číslem

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

$\nu < 50$ flintová skla

$\nu > 55$ korunová skla

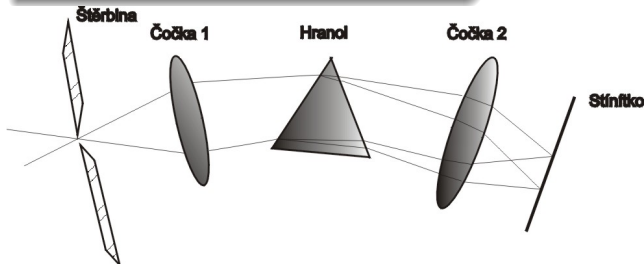
δ_r relativní disperze

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

$\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$

$\lambda_D = 589.2 \text{ nm}$

$\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$

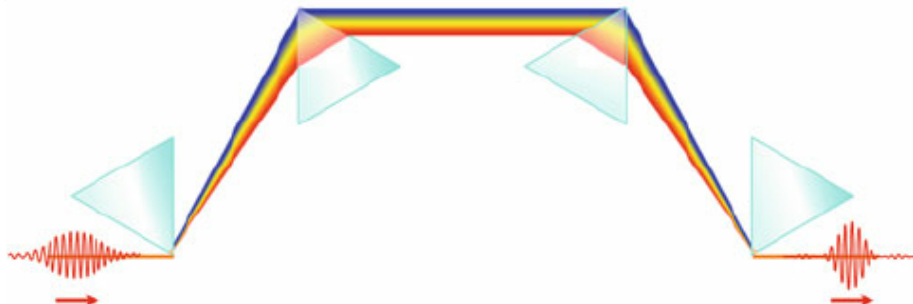


Konstrukce spektrometru

- kolimátor
- disperzní hranol
- fokusační čočka

Použití

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



Difrakční mřížka

změna

- tloušťky
- indexu lomu

s periodou Λ

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

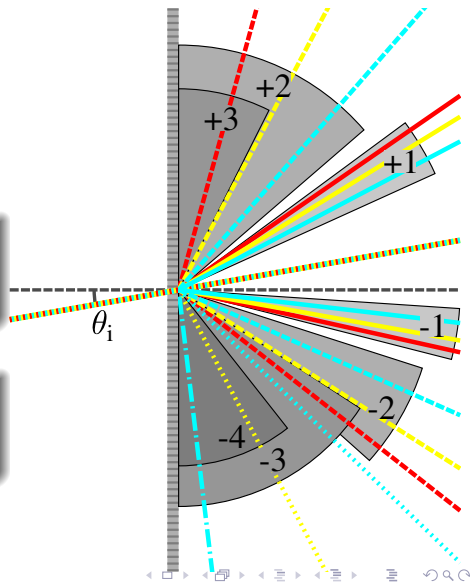
$$\theta_q = \theta_i + q \frac{\lambda}{\Lambda}$$

Obecně

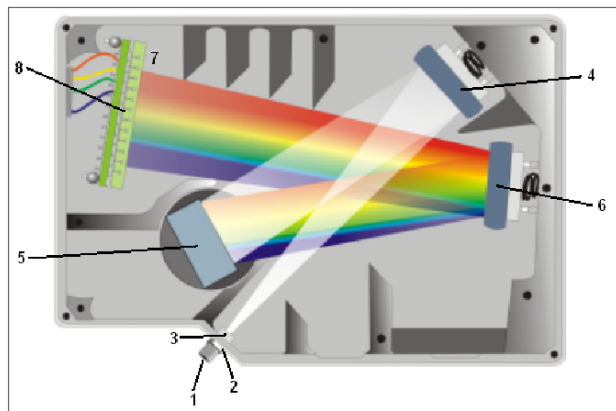
$$\sin \theta_q = \sin \theta_i + q \frac{\lambda}{\Lambda}$$

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

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



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 obdélníková štěrbina
- ❸ spektrální filtr
- ❹ kolimační zrcadlo
- ❺ difrakční mřížka
- ❻ fokusační zrcadlo
- ❼ kolekční čočky
- ❽ lineární CCD

Jobin Yvon Triax 320

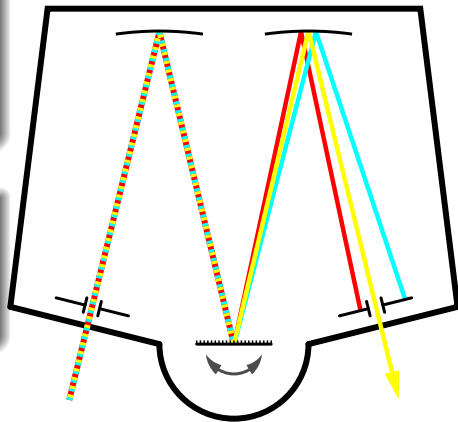
Monochromátor

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

Spektrometr

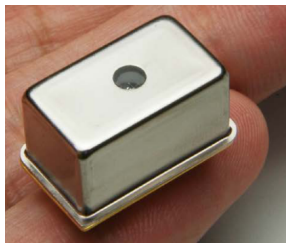
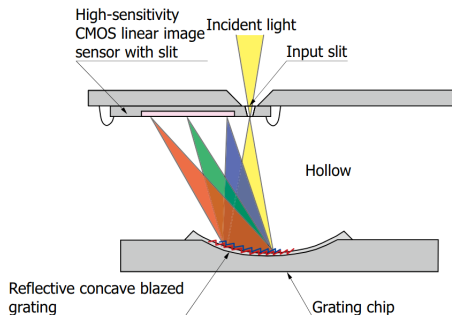
- CCD
- skenování otáčením mřížky na jeden detektor

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



Miniaturní spektrometr Hamamatsu C12666MA

rozsah 340–780 nm
rozlišení 12 nm
váha 5 g
velikost $20.1 \times 12.5 \times 10.1$ mm



Obsah

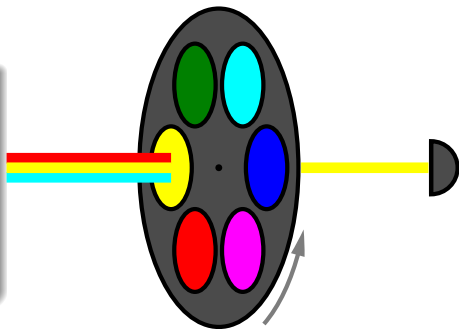
- 1 Elektromagnetické spektrum
- 2 Zobrazovací spektrometry
 - Disperzní hranol
 - Difrakční mřížka
- 3 Selektivní spektrometry**
 - **Fabryův-Perotův planární rezonátor**
- 4 Fourierovská spektroskopie
- 5 Streak camera

Princip

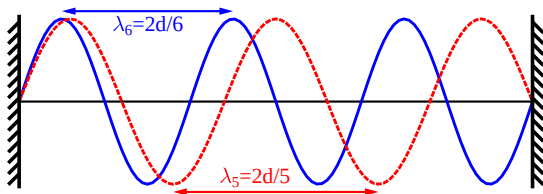
- odrazení nebo absorpce neměřených složek spektra
- detektor změří jen výkon prošlého záření
- změna parametrů filtru → skenování vlnové délky

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

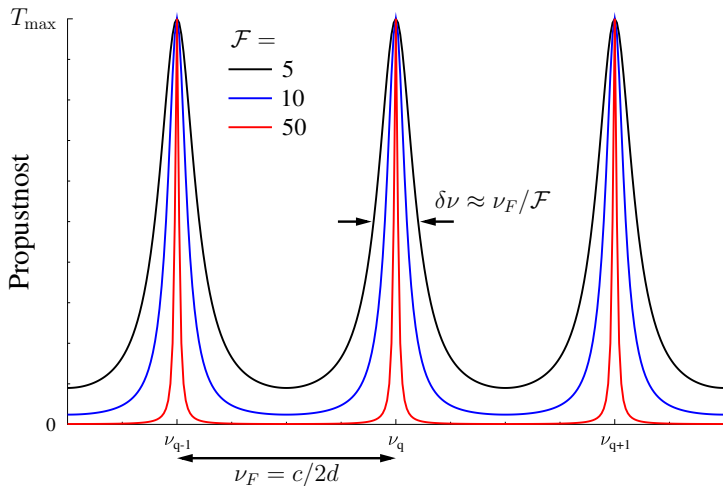
$$T(\nu) = \frac{T_{\max}}{1 + \left(\frac{2\mathcal{F}}{\pi}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi\nu}{\nu_F}\right)}, \quad \mathcal{F} = \frac{\pi\sqrt{r}}{1-r}, \quad T_{\max} = \frac{|t|^2}{(1-r)^2}$$

$T_{\max}$ maximum propustnosti

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

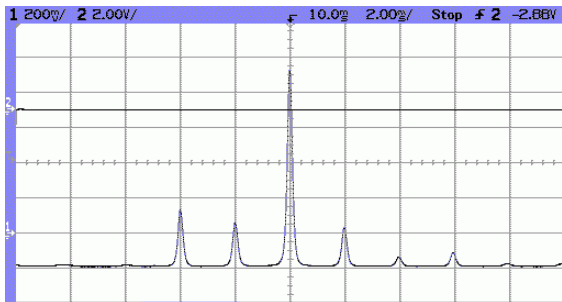
$$t = t_1 t_2, \quad r = r_1 r_2$$

$$\nu_F = c/2d$$



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

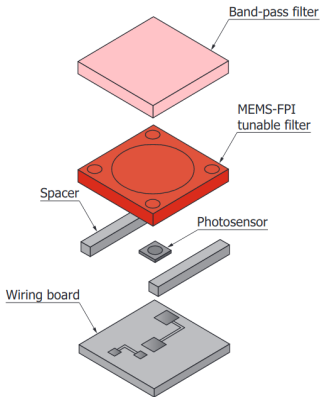
Spektrum
polovodičového
laseru OZ Optics



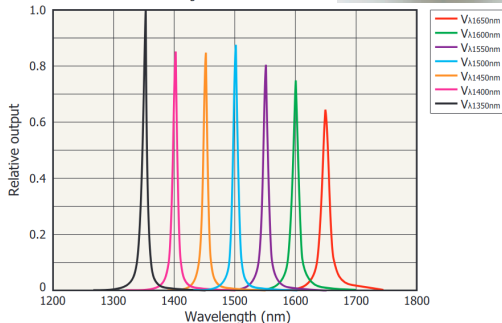
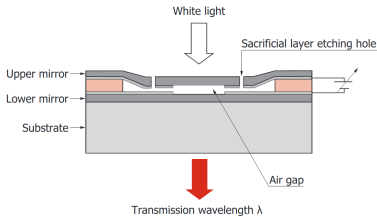
Jemnost:
 $\mathcal{F} = 150$,
Centrální vlnová
délka:
 $\lambda = 826 \text{ nm}$

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

Hamamatsu C14272 MEMS-FPI



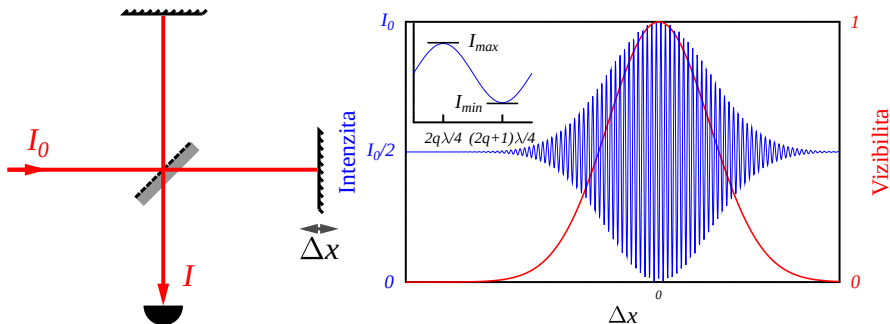
rozsah 1350–1650 nm
rozlišení 20 nm
váha 1 g
detekční plocha 0.3 mm



Obsah

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

Měření spektra pomocí interferometru



Wienerův-Chinčinův teorém

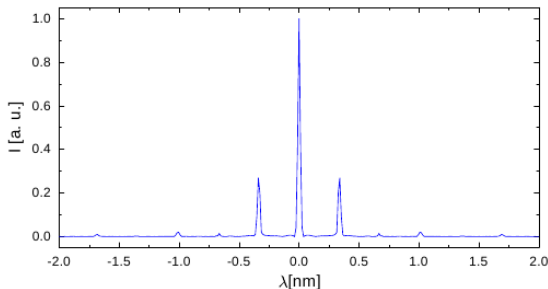
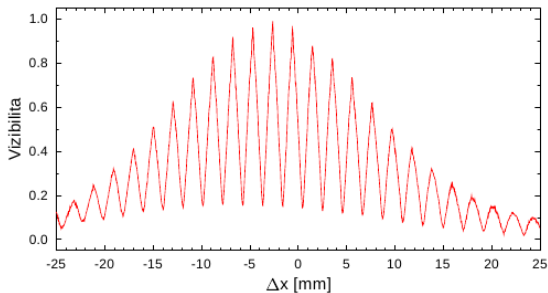
$$S(\nu) = 2 \int_0^\infty I(\tau) \cos(2\pi\nu\tau) d\tau$$

Autokorelační funkce

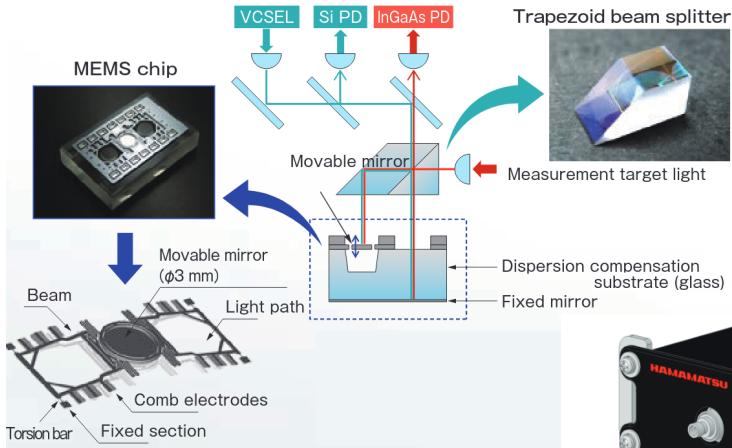
$$V(\Delta x) = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$$

Diskrétní vzorkování

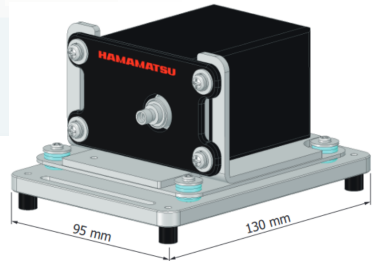
- V jen v určitých bodech
→ diskrétní FFT
- rozsah $\Delta x \times$ rozlišení
(např. 25 mm $\rightarrow$ 0.007 nm)
- hustota měření
(velikost kroku) $\times$
rozsah spektra (např. 1 $\mu\text{m} \rightarrow$ 172 nm)
- možná změna spektra
během dlouhého
měření



Hamamatsu C15511-01 FT-NIR



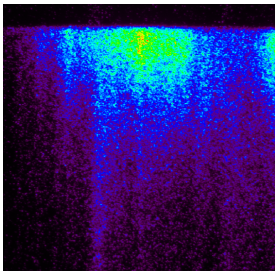
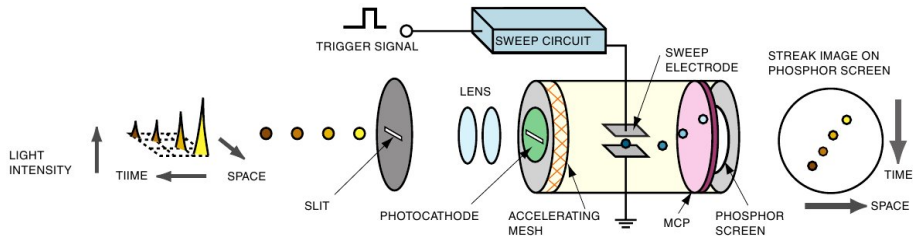
rozsah 1100–2500 nm
rozlišení 8 nm



Obsah

- 1 Elektromagnetické spektrum
- 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
- v kombinaci s laditelným femtosekundovým laserem

Hamamatsu C10910

modulární – fotokatoda, sweep jednotka, kamera



- časové rozlišení od 0.1 ps
- spektrální rozsah 200–850 nm
- jednofotonová citlivost (photon counting)

