

Spektroskopické metody

A. Dubroka, dubroka@physics.muni.cz, budova 6, 1. patro

literatura: H. Kuzmany, Solid-state spectroscopy, Springer 2009

ukončení: zápočet

podmínky k udělení zápočtu: aktivní účast na cvičení, maximálně tři neomluvené neúčasti ve cvičení

související přednášky:

F9210 Moderní experimentální metody B, prof. V. Holý,

F8150 Optické vlastnosti pevných látek, prof. J. Humlíček

C8070 Molekulová spektroskopie, RNDr. M. Černík, doc. J. Toužín

FA600 Vibrační spektroskopie biopolymerů, doc. O. Vrána

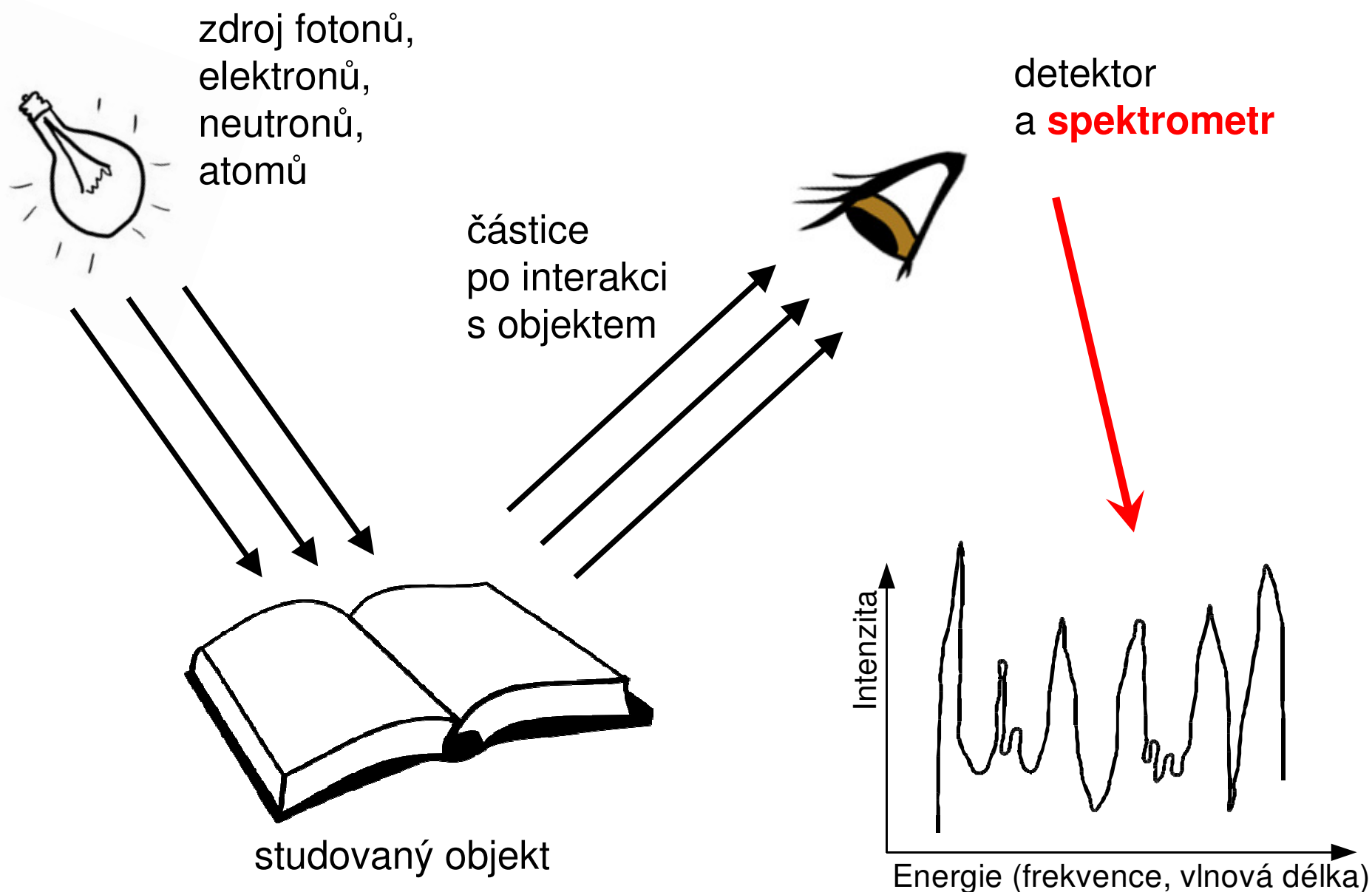
F5060 Atomová a molekulová spektroskopie, doc. A. Brablec, doc. P. Slavíček

Osnova

Cíl přednášky: přehled spektroskopických metod a vybavení

1. Zdroje záření (širokopásmové, lasery)
2. Detektory (fotonásobič, fotovodivostní, multikanálové – CCD)
3. Disperzní spektrometry (hranolový, difrakční)
4. Fourierovský spektrometr
5. Optická spektroskopie: transmise, reflexe, ATR, grazing incidence
6. Optická spektroskopie: elipsometrie, Luminiscence
7. Časově rozlišená spektroskopie, THz spektroskopie
8. Ramanská spektroskopie (D. Hemzal)
9. Grupová analýza, symetrie a vibrace, (D. Hemzal)
10. Rtg spektroskopie 1: rtg zdroje, monochromatizace, index lomu, absorpce, zobrazování (P. Mikulík)
11. Rtg spektroskopie 2: fluorescenční spektroskopie – rtg detektory, Fotoemisní spektroskopie – elektronové detektory, rtg absorpční spektroskopie - jemná struktura a absorpční hrany (O. Čaha)
12. Nukleární magnetická rezonance (K. Kubíček)
13. Exkurze do laboratoří

Spektroskopie: Studium interakce mezi látkou a sondou s určitou *energií*



rozdělení spektroskopie podle typu **použité sondy**

- elektromagnetické záření (MHz, mikrovlny, THz, infračervené, viditelné, UV, rentgenové, gamma záření)
- elektrony - EELS (electron energy loss spectroscopy), tunelová spekt
- neutrony – nepružný neutronový rozptyl (INS)
- kombinované
 - XPS – rentgenová fotoelektronová spektroskopie (foton dovnitř, elektron ven)

rozdělení spektroskopie podle **typu interakce**

reflexní/absorpční spektroskopie:

- elastická interakce (energie záření před a po interakci je stejná)
- absorpce, reflexe
- neelastický rozptyl:
 - výměna energie mezi sondou a látkou, energie záření po interakci je jiná než před interakcí
 - Ramanův rozptyl, nepružný rozptyl neutronů
- emisní spektroskopie:
 - excitovaná látka (opticky, termálně, elektricky ...) emituje elmag. záření
 - záření absolutně černého tělesa (rovnovážný stav), luminiscence (excitovaný stav)
- koherentní nebo rezonanční spektroskopie:
 - záření koherentně spojuje dva kvantové stavy látky. Koherence je ovlivněna dalšími interakcemi v látce, které jsou tímto studovány. Nukleární magnetická rezonance, elektronová paramagnetická rezonance

rozdělení spektroskopie podle časové škály

- spektroskopie „v makroskopických časech“, řádově $> 1\mu\text{s}$, typicky 1ms a déle
- časově rozlišená spektroskopie –
 - zaměřená na dynamiku materiálu
 - časové rozlišení až 10^{-16} s (0.1 fs, 100 ps)
 - použití femtosekundových laserů
 - sledování materiálu po excitaci (metoda pump-probe)

Příklady:

- časově rozlišená absorpční/reflexní spektroskopie, typicky NIR-VIS
- časově rozlišená THz spektroskopie, používá optickou rektifikaci k vytvoření THz-IR pulzů
- časově rozlišená fluorescence (luminiscence)
- časově rozlišená fotoemise

používané veličiny a jednotky ve spektroskopii

Veličiny a jejich jednotky

vlnová délka λ , jednotka typicky nm pro VIS

energie E : jednotka typicky eV, meV

vlnočet ν : počet elmag. vln na jeden centimetr
jednotka: cm^{-1}

frekvence f : Hz, MHz, THz

$$E_{[\text{eV}]} \approx \frac{1240}{\lambda_{[\text{nm}]}}$$

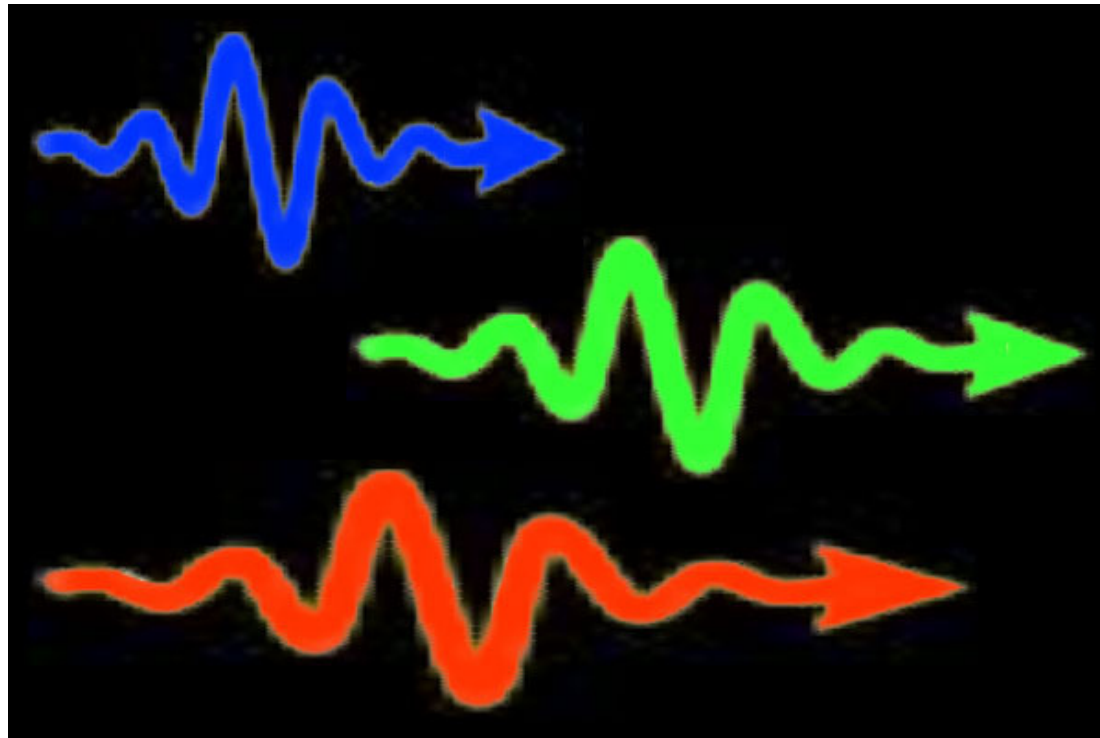
$$\nu_{[\text{cm}^{-1}]} \approx \frac{10\,000}{\lambda_{[\mu\text{m}]}}$$

$$\nu_{[\text{cm}^{-1}]} \approx 8E_{[\text{meV}]}$$

$$\nu_{[\text{cm}^{-1}]} \approx 33f_{[\text{THz}]}$$

$$300\text{ K} \approx 25\text{ meV}$$

Spektroskopie s fotony

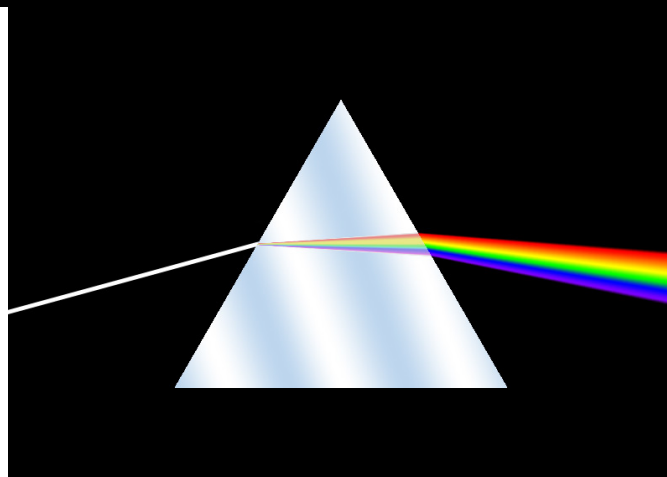


Spektr. s FOTONY	vlnová délka	vlnočet [cm ⁻¹]	Energie [eV]	frekvence	Technika
Elektromag netické vlny	6 m - 30 cm			50-1000 MHz	NMR
mikrovlny	30 cm – 5 cm		20 μeV	10-50 GHz	mikrovlnné rez., ESR,
THz záření	5 cm – 0.1 mm	0.2-100	0.02 meV – 10 meV	50 GHz – 3 THz	THz spektrosk.
Infrač. záření	1 mm- 1 μm	10-10 000	1 meV – 1 eV	0.3 THz – 30 THz	FTIR
viditelné záření	800 nm – 400 nm	12 000- 25 000	1.6 – 3 eV		disperzní spektr., Raman
UV	400 nm-190 nm		3-6.5 eV		disperzní spektr.
Rentgenové záření	100 nm- 0.01 nm		10 eV – 100 keV		XPS, XAS
jaderné γ záření	<10 pm		10 keV- 10 MeV		Radioakt. rozpad, MS
kosmické γ záření			až 10 TeV		supernovy

propagace
zrcadly v lab.
podmínkách

detekce I vs E

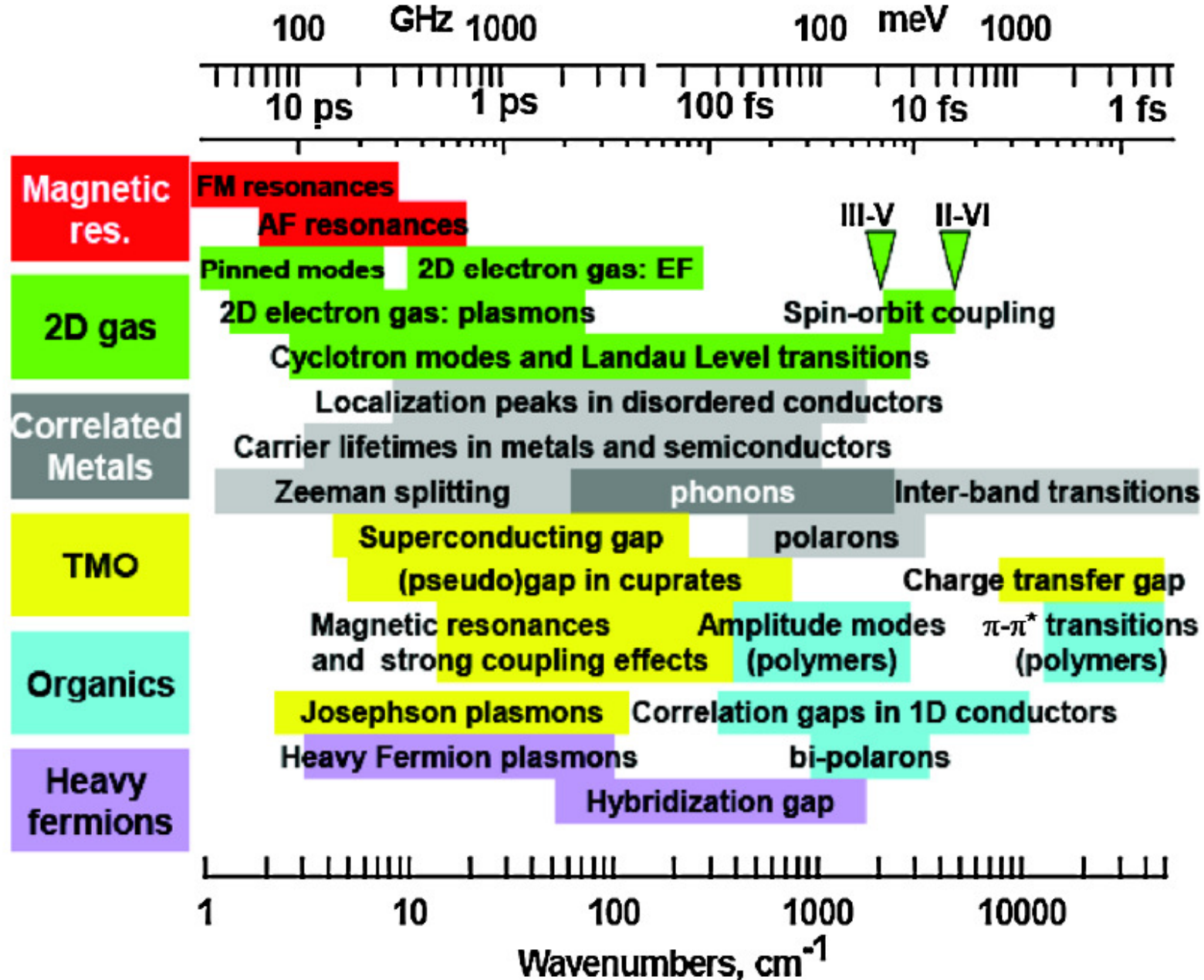
Optická spektroskopie



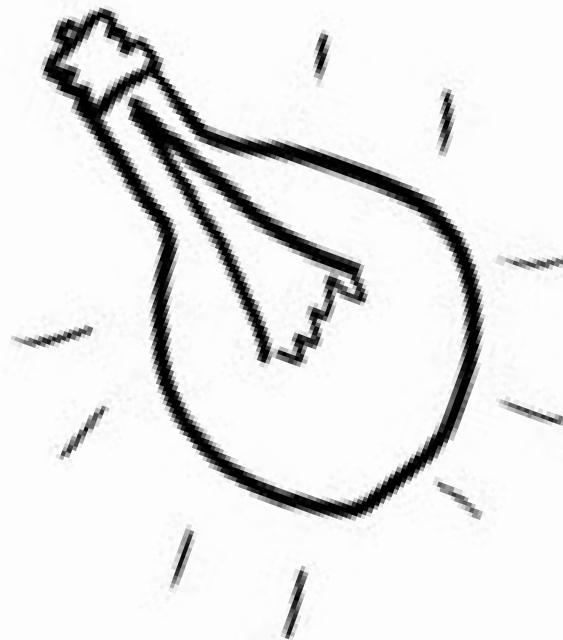
zdroj en wiki

- Optická spektroskopie: shrnuje technicky podobné spektrální rozsahy od infračervené oblasti (10 cm^{-1} , 1 meV) do UV (190 nm, ~6-10 eV)
- rozdělená do dvou podkategorií odpovídající dvou typům spektrometrů:
 - blízká infračervená oblast –NIR (1700 nm, 0.7 eV) až do UV (190 nm, 6.5 eV), disperzní spektrometry - difrakční mřížka (hranol)
 - infračervená oblast $10\text{-}6\ 000 \text{ cm}^{-1}$ (1 meV- 0.5 eV), spektrometry založené na Michelsonově interferometru, FTIR

Excitace mezi THz a UV oborem



Zdroje záření

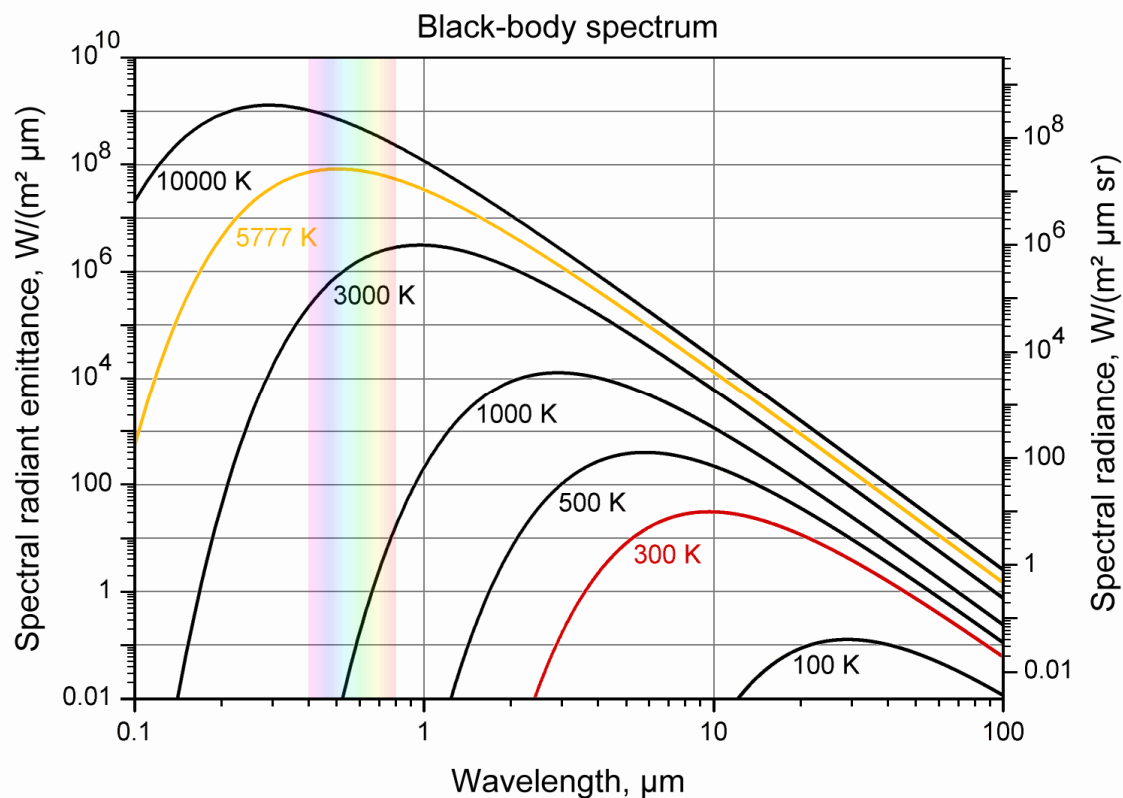


Zdroje záření - širokospektrální

tepelné záření (Planckův vyzařovací zákon)

- wolframová žárovka (tungsten), + halogen, teploty až 3300 K, typicky pro oblast VIS-NIR
- vysokotlaké výbojky (až 100 bar) pro UV záření, teploty až 6000 K :
 - deuterium: hlavně UV
 - xenon: UV+VIS-NIR
 - Hg: UV a překvapivě THz oblast $<100 \text{ cm}^{-1}$

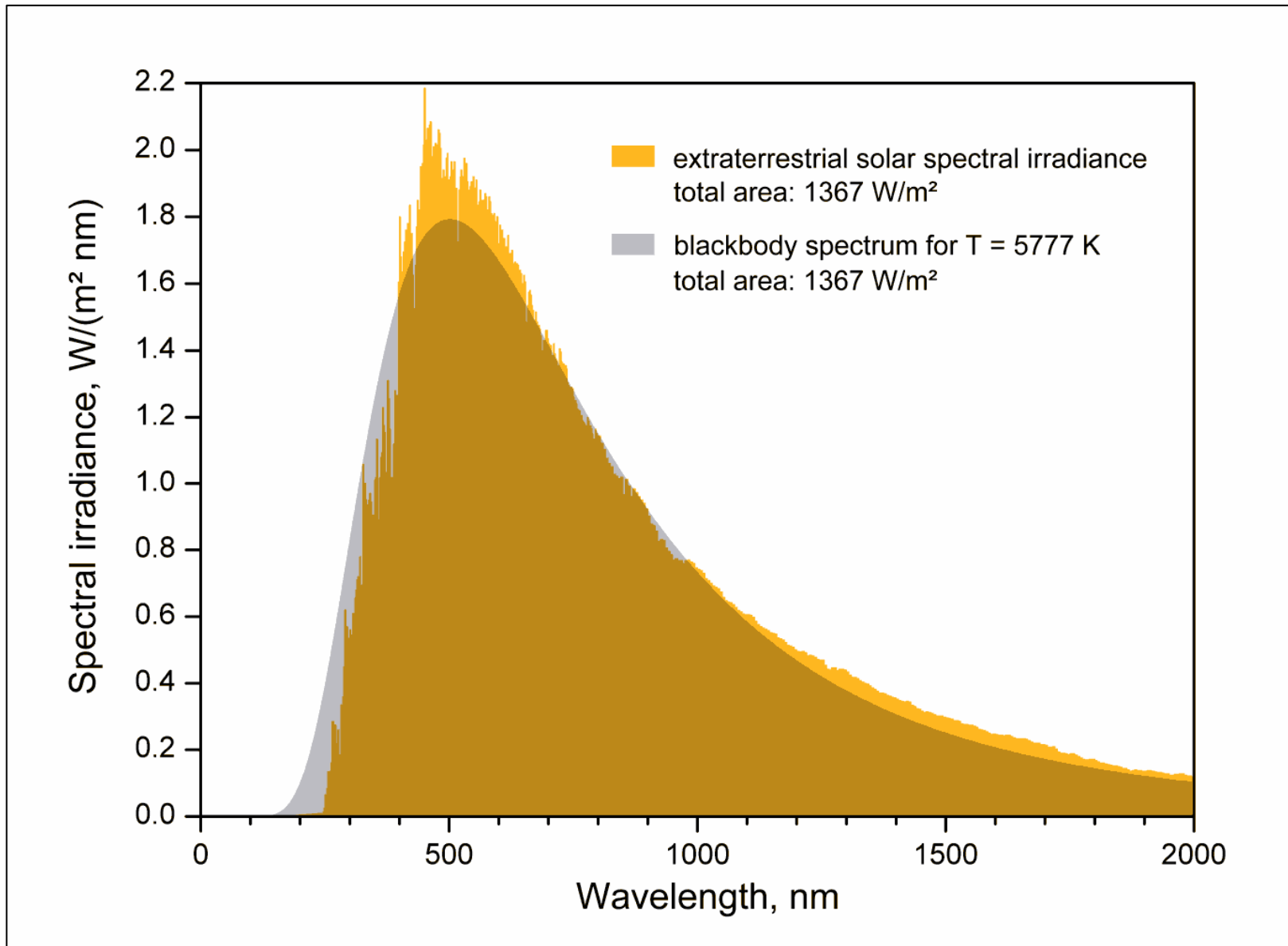
Planckův vyzařovací zákon



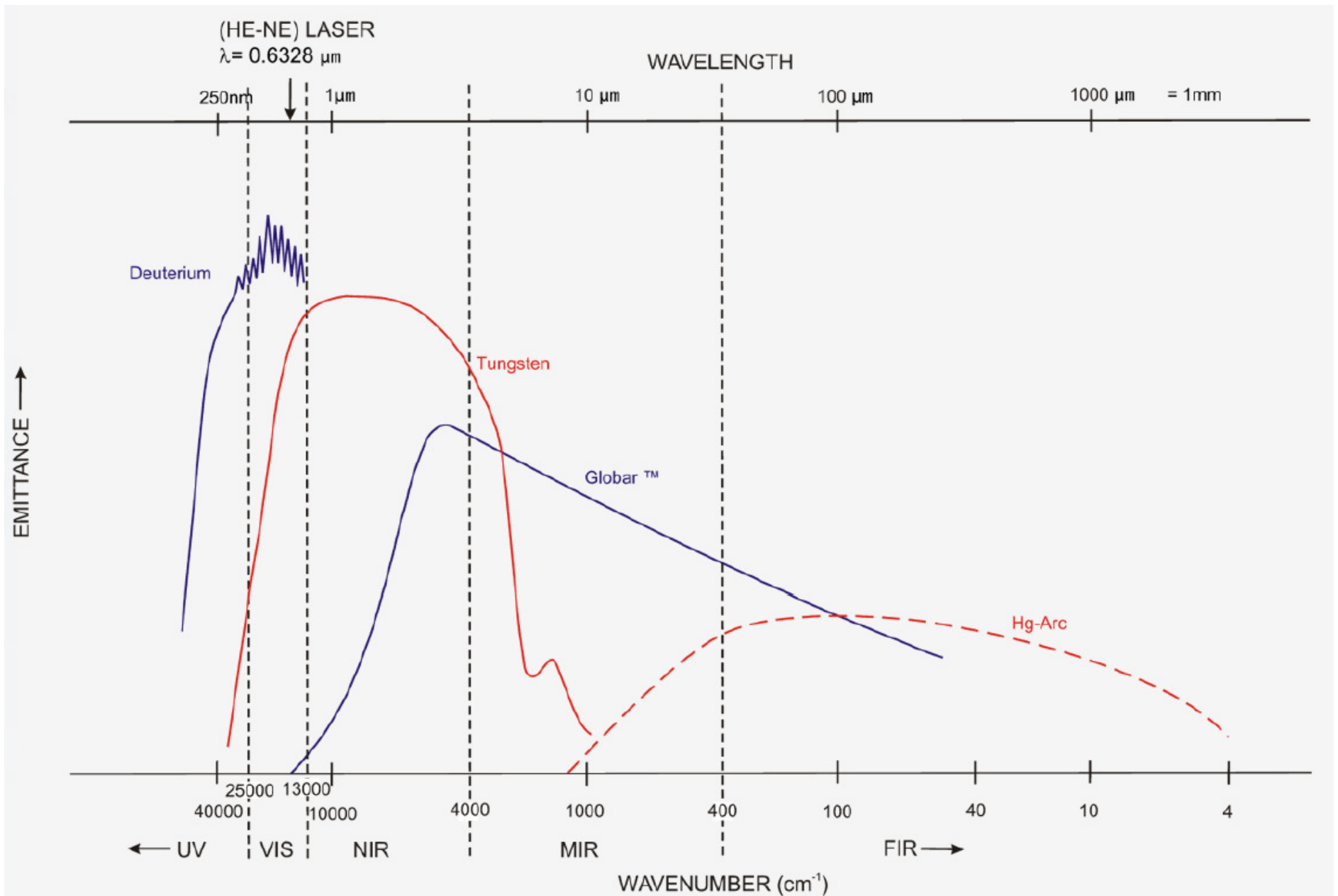
$$I(f, T) = \frac{2hf^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

$$I_{\max} \approx T^5 \quad I_{\text{tot}} = \sigma T^4$$

Sluneční záření – teplota ~ 6000 K



širokospektrální zdroje záření – (Bruker)



spektrální lampy - používané ke frekvenční kalibraci

- nejčastěji používané známé emisní čáry nízkotlakých výbojek (H, He, deuteriová, Xe, ...)

He:

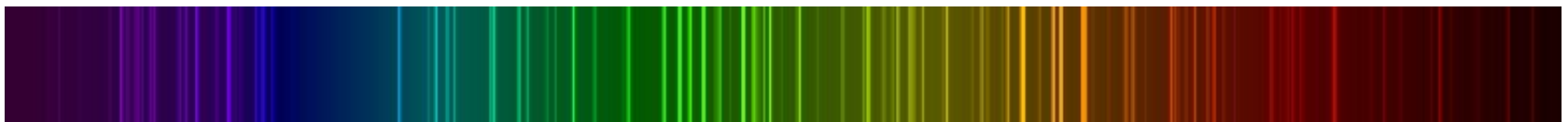


λ [Å]	Intenzita [arb.units]
3970.07	8
4101.74	15
4340.47	30
4861.33	80
6562.72	120
6562.85	180

NIST Atomic Spectra Database Lines Form
http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

Extrémně úzké spektrální linie
FWHM (full width at half maximum)
0.1-0.01Å

Xe:



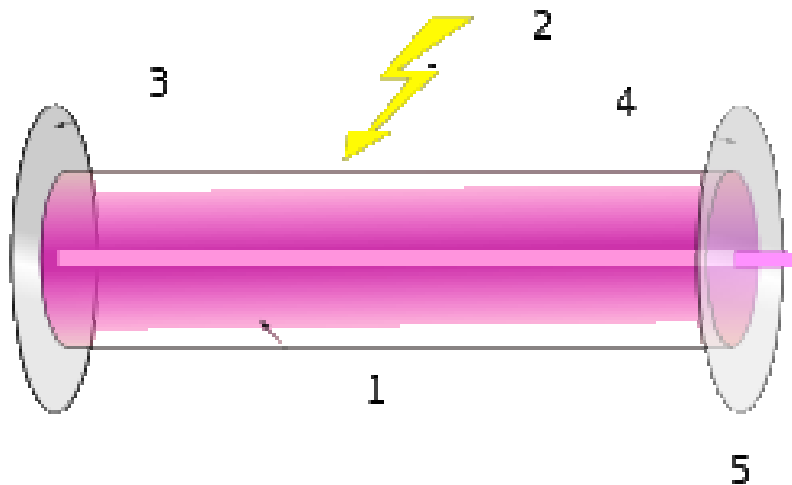
Úzkopásmový zdroj záření - LASER

LASER (Light amplification by stimulated emission of radiation)

- velmi malá divergence svazku (užitečné např. pro velmi přesnou elipsometrii)
- velmi úzký frekvenční profil, např. 150 kHz až 100 Hz na 50 THz, tzn. $1:10^{10}$
- velmi velká intenzita na jednotku frekvence, laser s $\sim 1\text{W}$ má typicky šířku 50 MHz, tzn. 0.1 W/MHz , ve srovnání 10^{-12} W/MHz od záření černého tělesa
- typické frekvence v NIR-VIS, dnes ale také od THz do UV
- používané např. v Ramanovské spektroskopii
- pulsní lasery, energie laseru se uvolní ve velmi krátkém pulsu až v řádu 1 fs 10^{-15} s – používané např. v časově rozlišené THz spektroskopii, obecně ve spektroskopii studující nerovnovážné stavy (spektroskopie pump-probe).

Princip laseru

- v opticky aktivním mediu se čerpáním ustaví populační inverze, kdy stavy s vyšší energií mají větší populaci než stavy s menší energií.
- deexcitací elektronů vzniká záření
- stimulovanou emisí (bosonová podstata světla) lavinovitě vzniká záření ve stejném směru a se stejnou fází



1. Aktivní prostředí
2. Čerpání aktivního prostředí
3. Odrazné zrcadlo
4. částečně propustné zrcadlo
5. Laserový paprsek

Bezpečnost při práci s lasery

Obecně laser je nebezpečný pro oko, protože se jedná o rovnoběžný svazek, který je velmi dobře fokusován na sítnici.

Intenzita do:

- 1 mW: bezpečné i pro oko, laserová ukazovátka
- 5 mW: bezpečné i pro oko při náhodném osvitu. Reflex oka zavře víčko za cca 0.2s. Při kontinuální expozici může způsobit nízký stupeň poškození oka
- intenzity nad 5 mW nebezpečné pro oči
- intenzita 100 mW při delší expozici (desítky sekund) může poškodit kůži (nefokusovaný svazek)
- 1 W a výše i krátká (náhodná) expozice poškodí kůži

Druhy (kontinuálních) laserů

- plynové:
 - He-Ne- 632.8 nm,
 - Kr⁺ (413-800 nm), až 7 W na 647.1 nm při příkonu 76 kW
 - Ar⁺ (351.1, 488.0, 514.5)
 - CO₂ (10.2μm)
- pevnolátkové
 - Nd:YAG (Y-Al garnet, Y₃Al₂O₁₂), 1064 nm
 - Er:YAG (Y-Al garnet, Y₃Al₂O₁₂), 2940 nm
 - rubínový laser, Al₂O₃ dopovaný s Cr³⁺, 694.3 nm
 - titan-safírový, Al₂O₃ dopovaný s Ti³⁺, 690-1000 nm

Polovodičové lasery

- inverze ve vysoce dopovaný p-n přechodu
- GaAs/AlGaAs pro červenou barvu, účinnost 25%, výkon až 1W
- GaN pro zelenou, modrou barvu i UV, výkon až 200 mW
- velmi jednoduchá konstrukce (laserová ukazovátka)

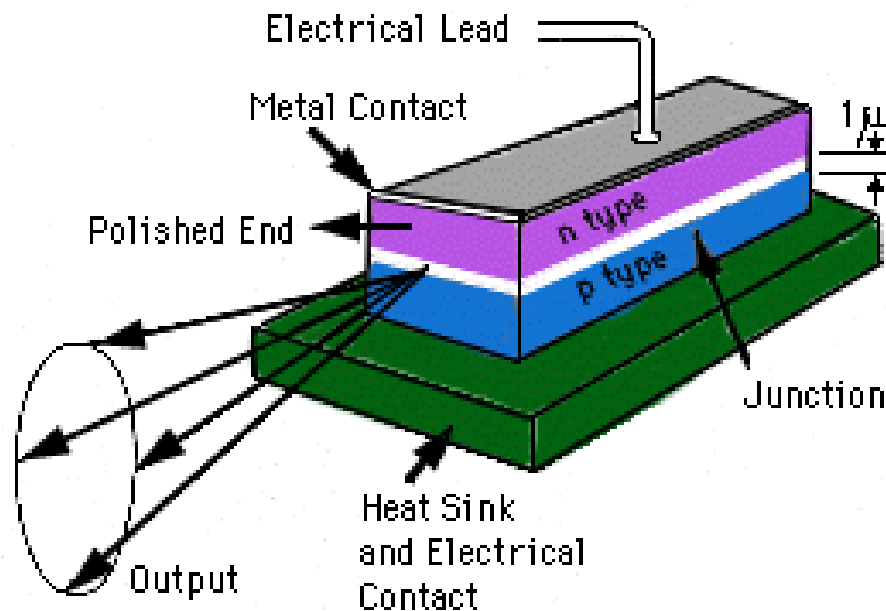
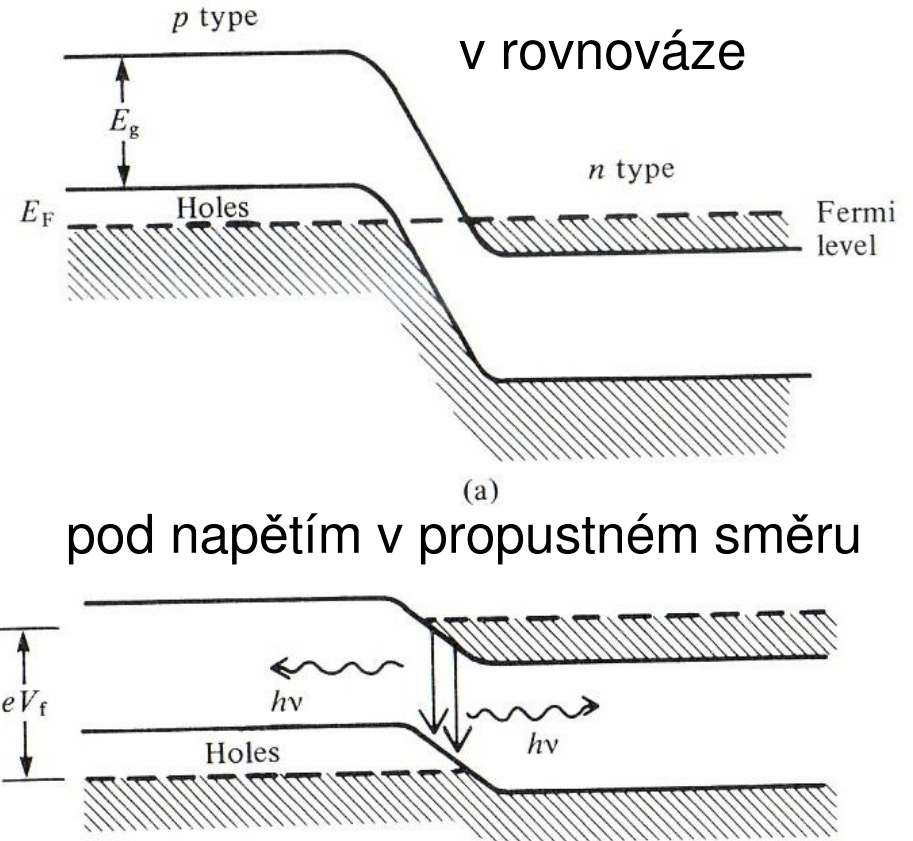


Diagram of Semiconductor Laser

E. D. Shaw



(b)

Dr. R. Willingale

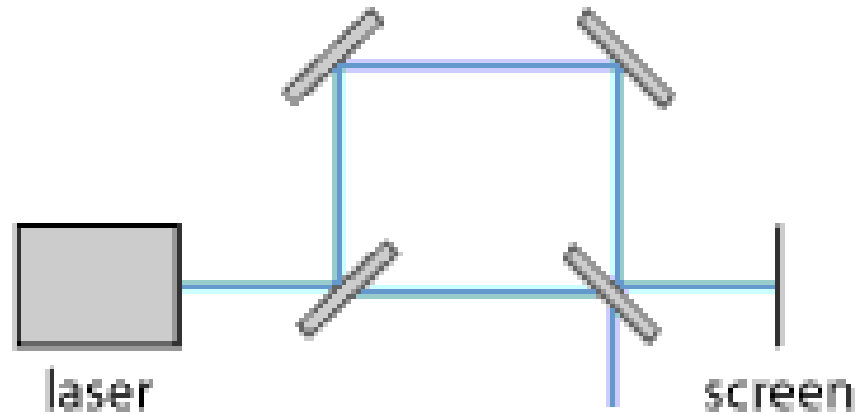
UV lasery

- plynové (excimerové- excited dimer laser), vlnové délky až 120 nm, bohužel používají halogenové plyny KrF - 248 nm, Ar² -126 nm používané v laserovém sputteringu a depozicích (Pulsed laser deposition)
- zdvojení frekvence pomocí nelineárních krytálů (KH₂PO₄), pouze pro intenzivní pole, tedy silné nebo pulsní lasery.

Koherenční délka

délka, podle které záření si udržuje charakter rovinné vlny.
Při dráhovém rozdílu v rámci této délky je silná interference

$$\Delta l \sim c_0 / \Delta f$$



zdroj: RP photonics

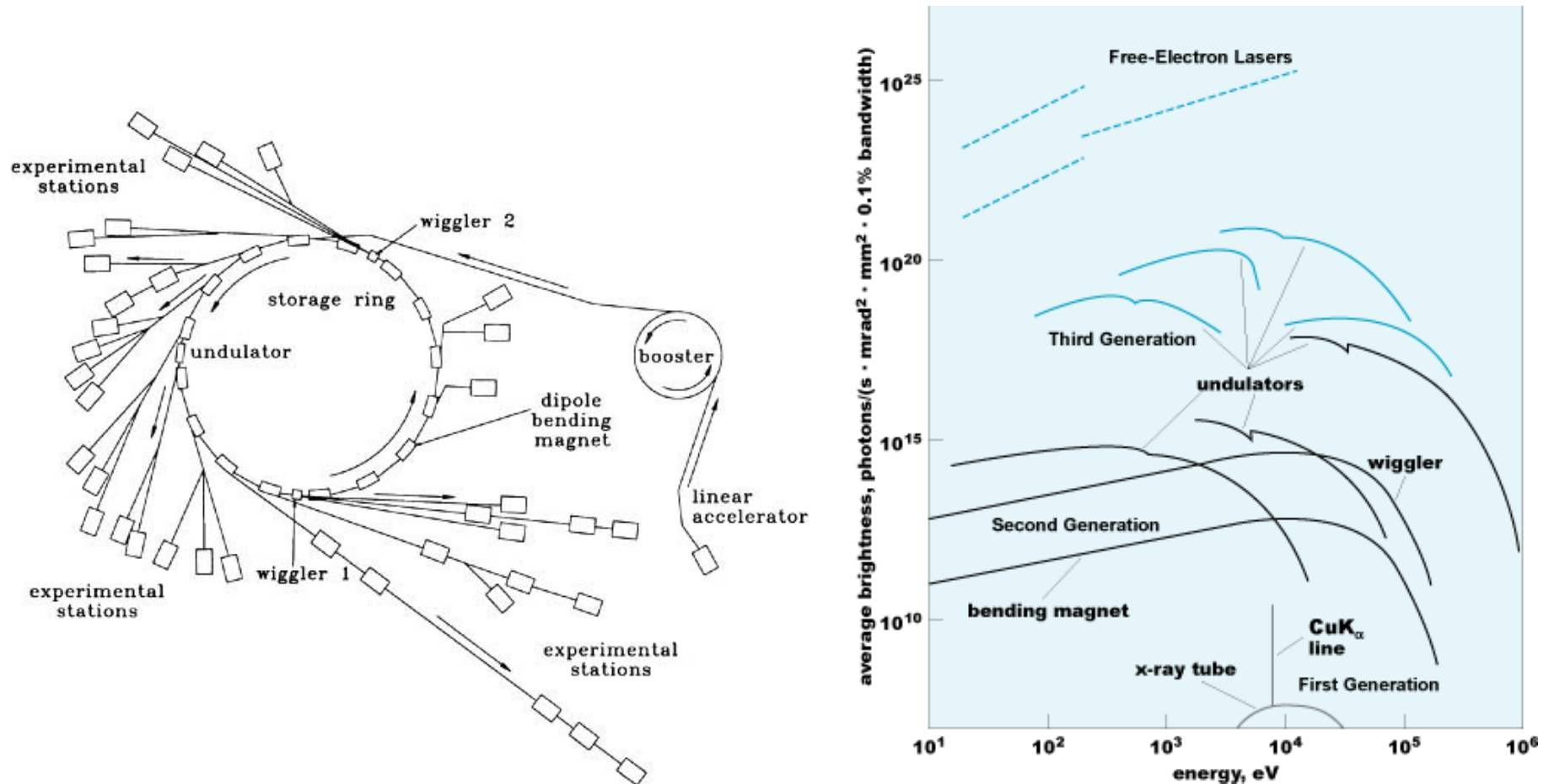
koherenční délka

- multimódový He-Ne laser $\Delta l = 20$ cm ($\Delta f = 1500$ MHz, $\Delta \lambda = 0.002$ nm)
- některých pevnolátnických laserů $\Delta l = 30$ km ($\Delta f = 10$ kHz)
- levné polovodičové lasery $\Delta \lambda \sim 0.2$ nm, $\Delta l = 2$ mm!

Pulsní lasery

- Q-switched lasers: v začátcích rychle rotující odrazný hranol, generace světla možná jen při splnění rezonanční podmínky v rezonátoru: Q-switch
 - dnes často elektro-optický nebo akusticko-optický element.
 - intenzivní pulsy až 1 ns krátké
-
- Mode-locking (fázově koherentní longitudinální módy): extrémně krátké pulzy až 1 fs, pouze několik málo period vlnové délky (Fourierovská limita). Používané pro časově rozlišenou spektroskopii. Často používaný Ti- safírový laser.

synchrotron



- používané především jako intenzivní zdroj Roentgenového záření
- zdroj infračerveného záření s vysokou zářivostí - briliancí (intenzita na jednotku plochy a jednotku emitovaného úhlu) užitečný např. v infračervené mikroskopii a elipsometrii

synchrotrony v Evropě



detailnější přednáška o synchrotronech a jejich záření:
V. Holý, Moderní experimentální metody B

Detektory



Detektory

Hlavní charakteristiky:

- frekvenční rozsah
- kvantová účinnost (citlivost)
- rychlost
- linearita

Typy detektorů

- fotografické filmy
- fotonásobič (vnější fotoelektrický jev)
- Fotoelektrické detektory (vnitřní fotoelektrický jev - excitace přes zakázaný pás)
 - fotovodivostní detektory
 - fotodiody: excitace nosiče v ochuzené vrstvě závěrně polarizované diody
 - lavinové fotodiody: foto dioda s lavinovým násobením (podobným fotonásobiči)
 - detektorová pole (CCD)

poměr signál/šum

- absorpce světla je fundamentálně náhodný proces popsatelný Poissonovým rozdělením:

$$P(k, n) = \frac{y^k}{k!} e^{-y}, \quad y = np \approx \langle k \rangle$$

k... počet absorbovaných fotonů

n... počet dopadlých fotonů

p... pravděpodobnost absorpce

$P(k, n)$ je díky kvantové povaze světla náhodná veličina => signál bude náhodný („zašuměn“)

míra šumu je úměrná odmocnině z variance σ^2

$$\sigma^2 = y \approx \langle k \rangle$$

$$\sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\langle k \rangle} \propto \sqrt{T}$$

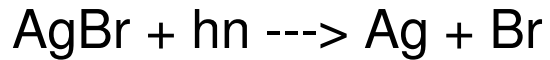
$$\text{poměr signál/šum} \sim \frac{T}{\sqrt{T}} = \sqrt{T}$$

kvantová účinnost η

- daná poměrem počtu detekovaných fotonů k celkově dopadlým
- fotografické filmy $\eta \sim 0.01-1\%$
- fotonásobiče, maximum až 35%

Fotografické filmy

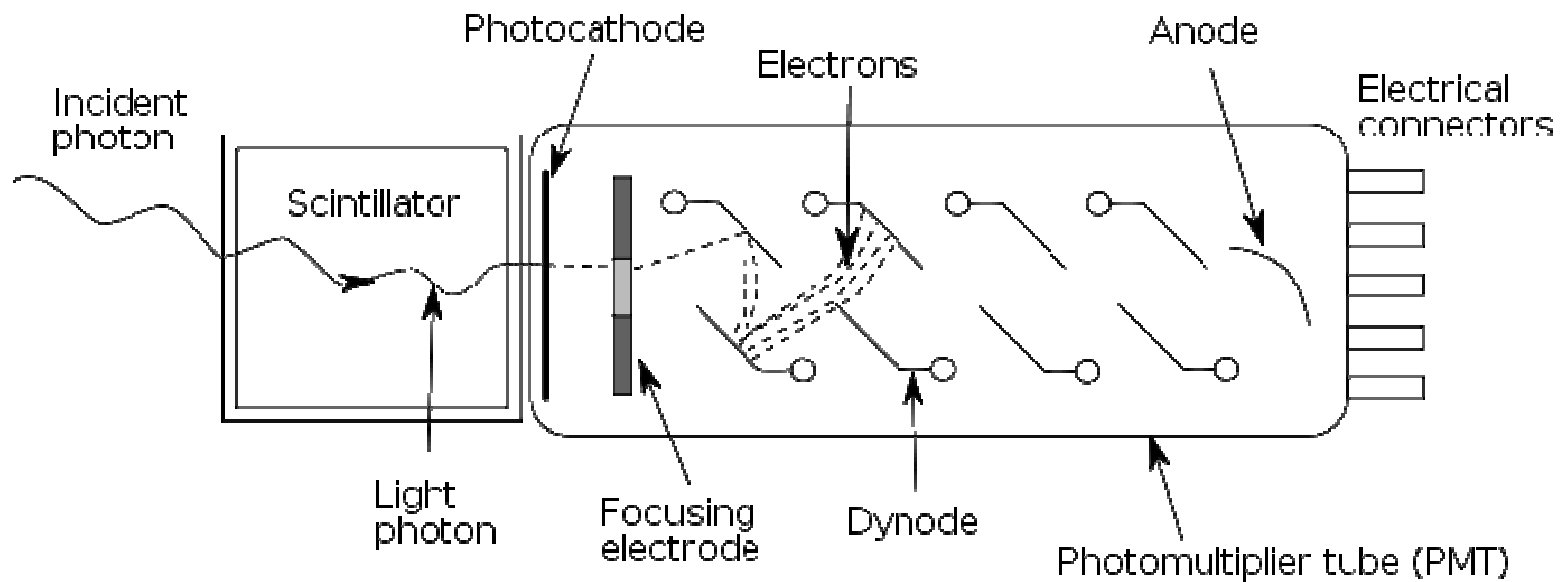
- redukce soli AgBr:



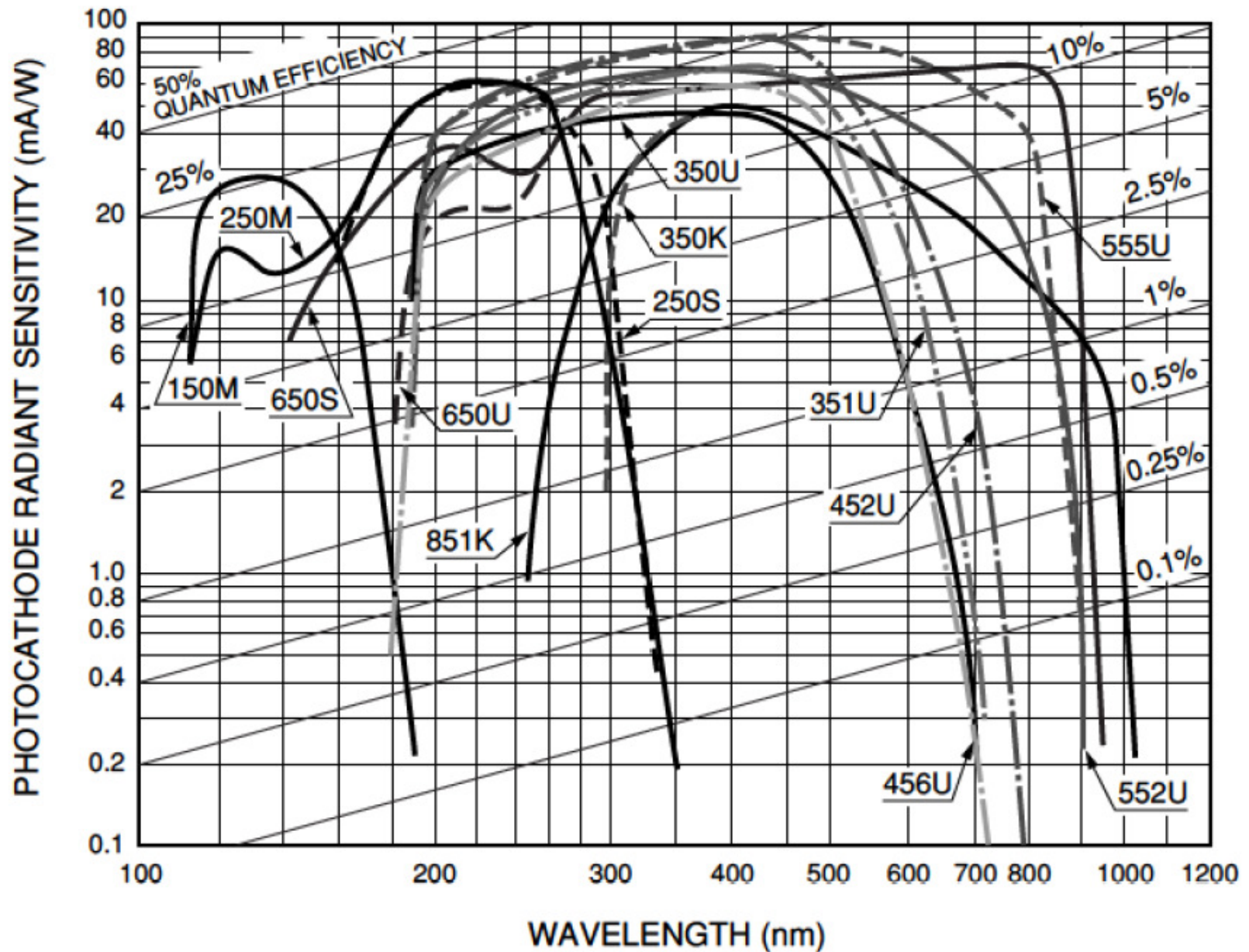
- rozlišení typicky 50-100 bodů na mm
- kvantová účinnost 0.01-1%
- výhoda: současné zaznamenání 2D obrazu
- nevýhoda: náročný proces vyvolávání. V současné době často nahrazovány CCD

fotonásobič

- VIS – UV (až Rentgen i γ záření)
- velmi citlivý (detekce jednotlivých fotonů)
- velmi rychlý ~ 0.5 GHz



Reflection Mode Photocathodes



THBV3_0402EAa

Figure 4-2 (a): Typical spectral response characteristics of reflection mode photocathodes

Reflection mode photocathodes

Curve Code (S number)	Photocathode Material	Window Material	Luminous Sensitivity (Typ.) ($\mu\text{A/lm}$)	Spectral Response				
				Spectral Range (nm)	Peak Wavelength			
					Radiant Sensitivity		Quantum Efficiency	
					(mA/W)	(nm)	(%)	(nm)
100M	Cs-I	MgF ₂	—	115 to 200	14	140	13	130
200S	Cs-Te	Quartz	—	160 to 320	29	240	14	210
200M	Cs-Te	MgF ₂	—	115 to 320	29	240	14	200
400K	Bialkali	Borosilicate	95	300 to 650	88	420	27	390
400U	Bialkali	UV	95	185 to 650	88	420	27	390
400S	Bialkali	Quartz	95	160 to 650	88	420	27	390
401K	High temp. bialkali	Borosilicate	40	300 to 650	51	375	17	375
500K(S-20)	Multialkali	Borosilicate	150	300 to 850	64	420	20	375
500U	Multialkali	UV	150	185 to 850	64	420	25	280
500S	Multialkali	Quartz	150	160 to 850	64	420	25	280
501K(S-25)	Multialkali	Borosilicate	200	300 to 900	40	600	8	580
502K	Multialkali	Borosilicate (prism)	230	300 to 900	69	420	20	390
700K(S-1)	Ag-O-Cs	Borosilicate	20	400 to 1200	2.2	800	0.36	740
—	InP/InGaAsP(Cs)	—	—	950 to 1400	10	1250	1.0	1000 to 1200
—	InP/InGaAs(Cs)	—	—	950 to 1700	10	1550	1.0	1000 to 1200

Table 4-1: Quick reference for typical spectral response characteristics (2)

temný proud (dark current)

- spontánní emise neosvětlené fotokatody
- přímoúměrná velikosti, roste s teplotou, zchlazením fotokatody lze docílit temný proud 0.1 el./s
- typicky klesá minimální energii detekce (výstupní práci)

• temný proud je obecná vlastnost spektroskopických aparatur. V experimentu by se vždy měl vždy temný proud naměřit (zjistit signál „bez světla“), srovnat měření a případně provést korekci.

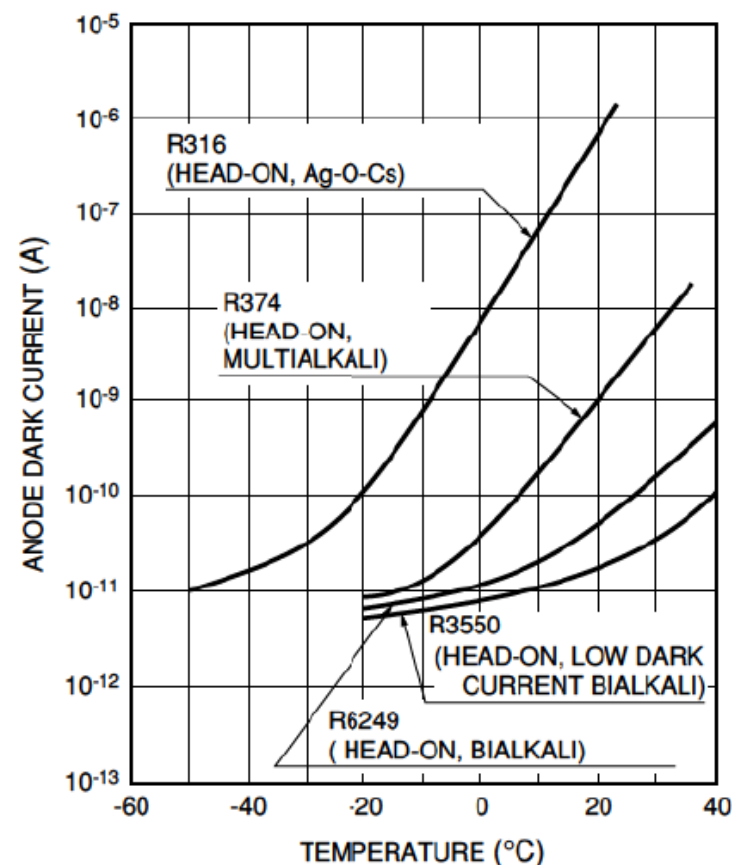


Figure 4-39: Temperature characteristics of anode dark current

- fotonásobiče jsou extrémně citlivé na světlo. Po osvětlení denním světlem jejich temný proud může být zvětšen o několik řádů.

celkové zesílení (gain)

- Celkové zesílení (gain) $G = \delta^n$
n - počet dynod
 δ - koeficient sekundární emise
pro $\delta=5$ a $n=10$ dostáváme $G=10^7$
- Hamamatsu R928,
 $G=10^7$ (na 1000 V)

příklad závislosti na napětí

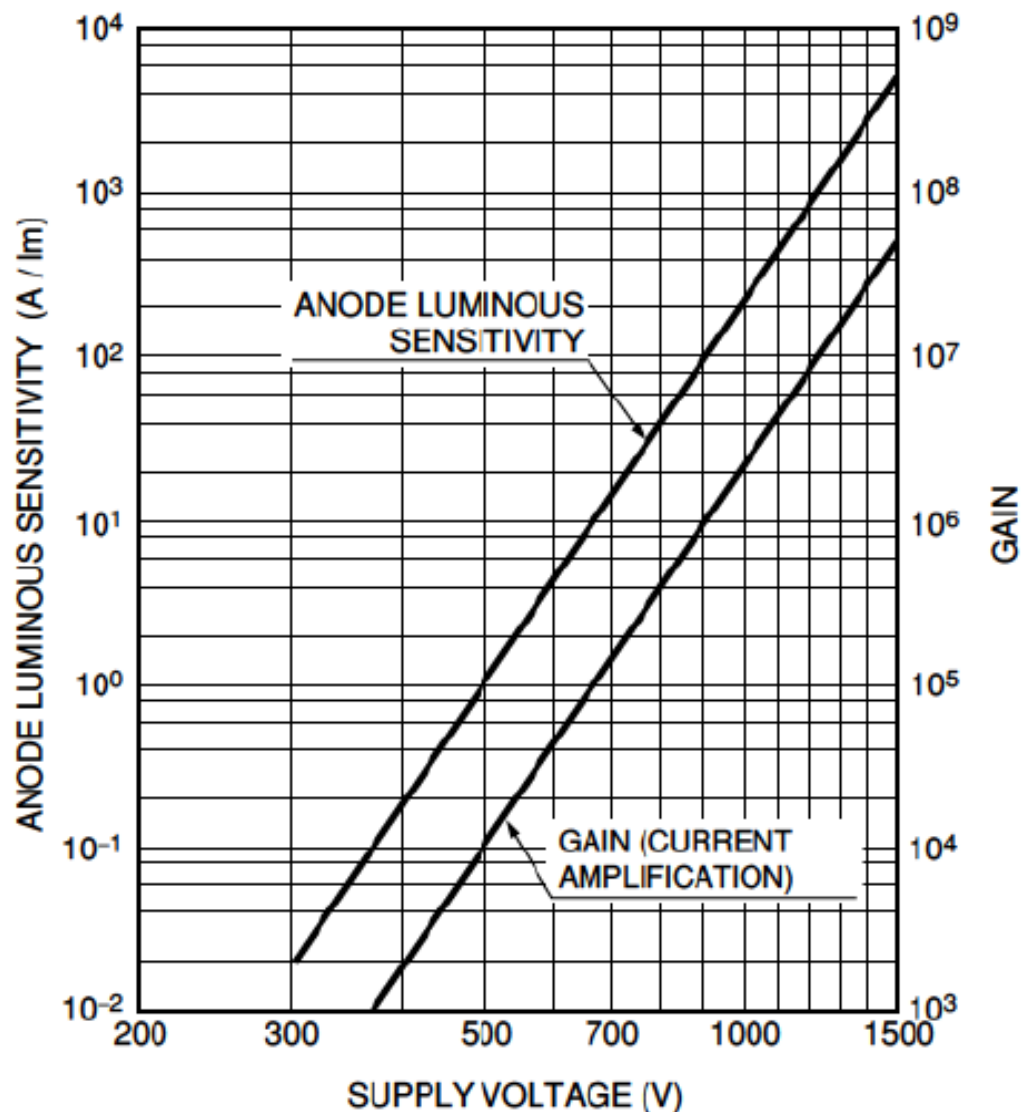
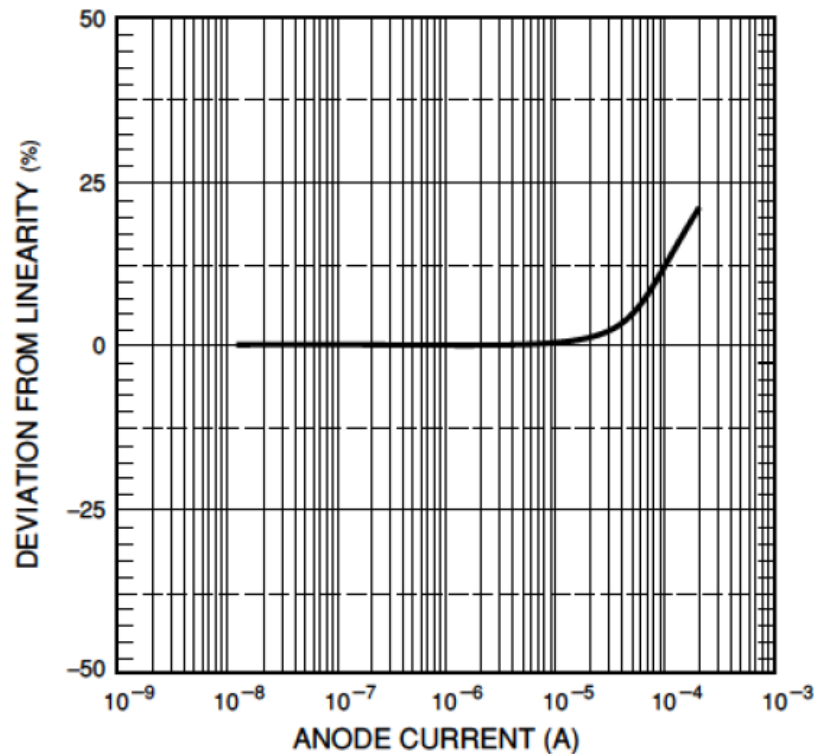


Figure 4-13: Gain vs. supply voltage

Linearita

- závislá jak na katodě, tak na anodě
- v tomto případě dynamický rozsah v lineárním režimu do 2% asi 10^3



- linearita je zásadní při kvantitativní spektroskopii (např. srovnávání reference a vzorku). Je třeba zjistit rozsah linearity pro požadovanou přesnost absolutního určení

VOLTAGE DISTRIBUTION RATIO (1·1· ...1·1·1)

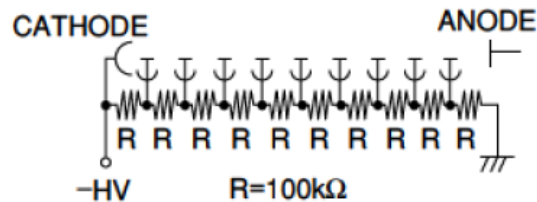
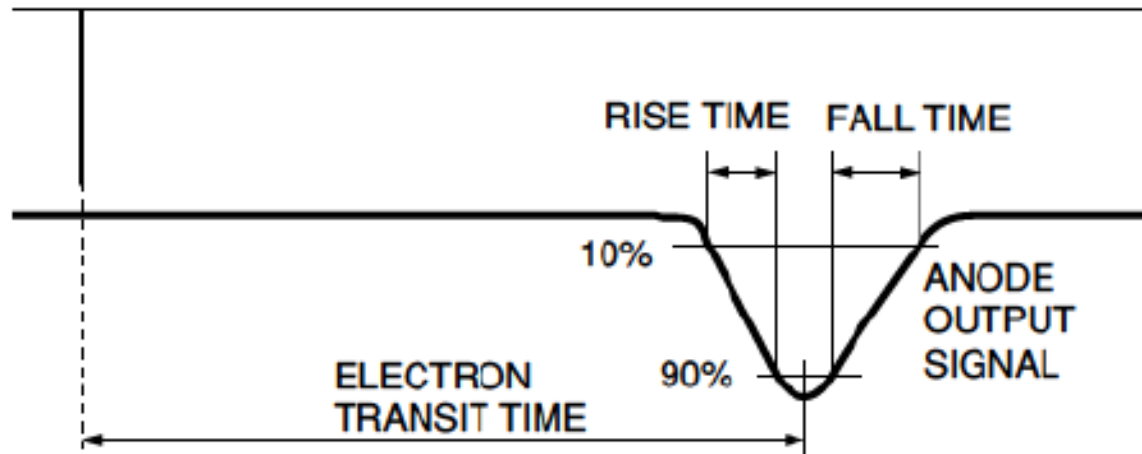


Figure 4-25: DC linearity (side-on type)

časové charakteristiky

- fotonásobiče jsou velmi rychlé detektory. Rychlost odezvy je limitovaná především dobou cesty elektronů přes dynody

DELTA FUNCTION LIGHT



Unit : ns

Dynode Type	Rise Time	Fall Time	Pulse Width (FWHM)	Electron Transit Time	TTS
Linear-focused	0.7 to 3	1 to 10	1.3 to 5	16 to 50	0.37 to 1.1
Circular-cage	3.4	10	7	31	3.6
Box-and-grid	to 7	25	13 to 20	57 to 70	Less than 10
Venetian blind	to 7	25	25	60	Less than 10
Fine mesh	2.5 to 2.7	4 to 6	5	15	Less than 0.45
Metal channel	0.65 to 1.5	1 to 3	1.5 to 3	4.7 to 8.8	0.4

Table 4-3: Typical time characteristics (2-inch dia. photomultiplier tubes)

Fotovodivostní detektory

- excitace páru elektron díra přes zakázaný pás polovodiče NIR-VIS (až UV)

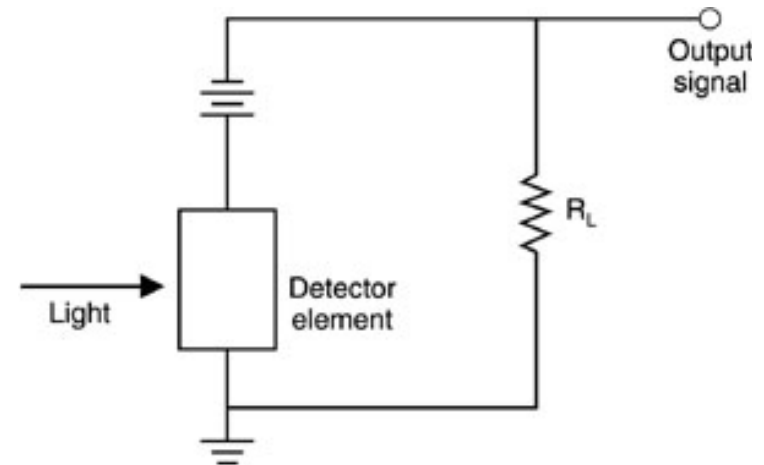
Si (zakázaný pás 1.1eV)

Ge (0.67eV),

PbS (0.37eV) často chlazený alespoň Peltier. ef.

HgCdTe (MCT), 400-6000 cm^{-1} , chlazený kap. dusíkem

- excitace dopantů z příměsových stavů (bolometry)
 - dopanty lokalizované na příměsích na nízkých teplotách - nutno chladit na nízké teploty ~ 4.2K (He), 1.6 (odčerpávané He), 0.3 K (He 3)



detektivita, ekvivalentní šumový výkon

odezva detektoru $R_s = \frac{\Delta V_S}{\Delta P}$, [V/W]

NEP: (noise equivalent power), ekvivalentní šumový výkon = světelný výkon ekvivalentní pozorovanému šumu

Detektivita $D = \frac{1}{\text{NEP}}$

$D \propto \sqrt{A}$ A ... plocha detektoru

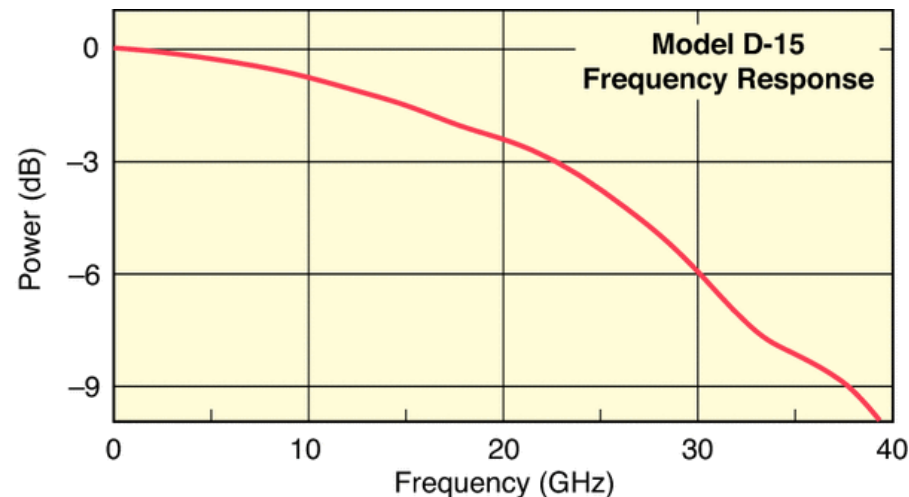
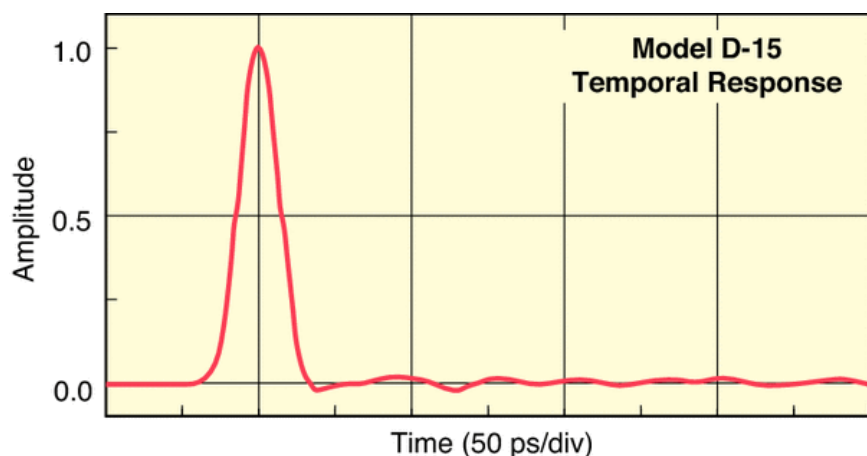
$D \propto \sqrt{\Delta f}$ Δf ... rychlost detektoru (bandwidth)

Δf =frekvence na které signál poklesne na 50% od DC limity

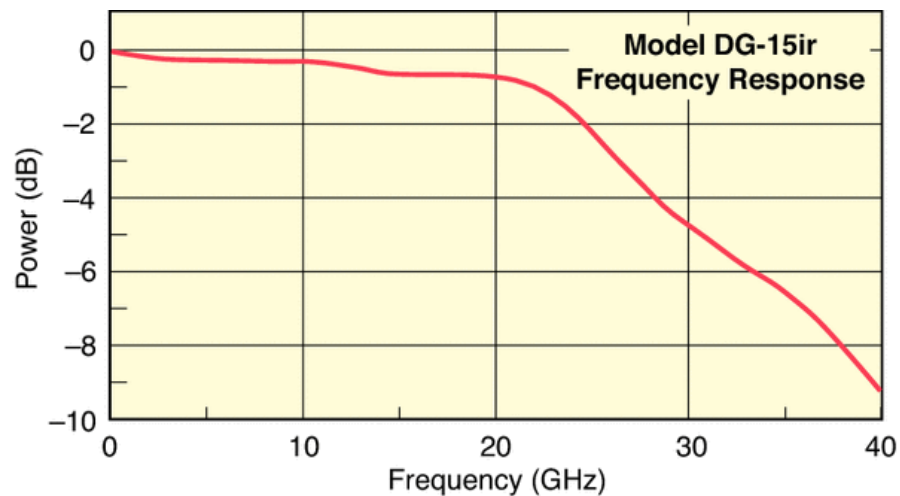
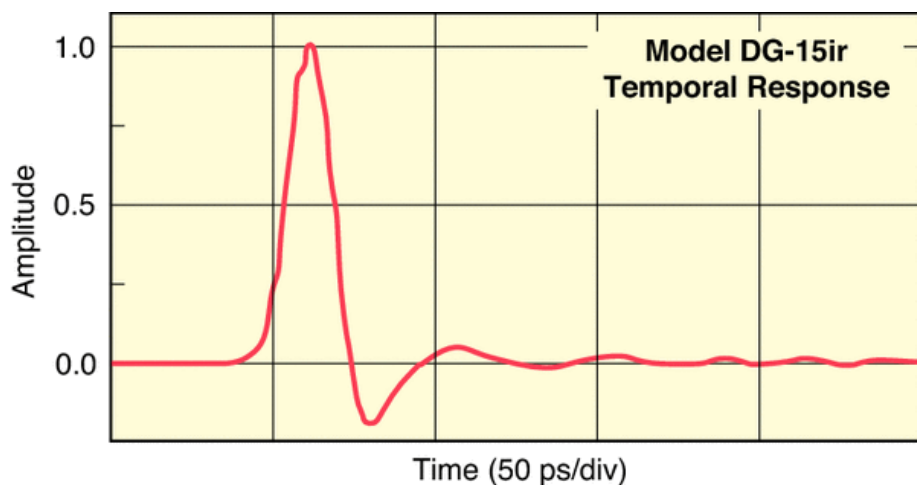
specifická detektivita $D^* = \frac{\sqrt{\Delta f} \sqrt{A}}{\text{NEP}}$, [Wm/s^{1/2}]

šířka pásma – (bandwidth)

Δf =frekvence na které signál poklesne na 50% od DC limity (-3 dB)



časový vývoj (vlevo) a frekvenční odezva detektoru pro časově rozlišené měření (Newport D-15), FWHM 15 ps



charakteristiky pro detektor do frekvenční oblasti 20 GHz (Newport DG-15ir)

Základní zdroje šumu fotovodivostní detektorů

- Termální (Johnsonův) šum- způsobený termálním pohybem náboje přes detektor

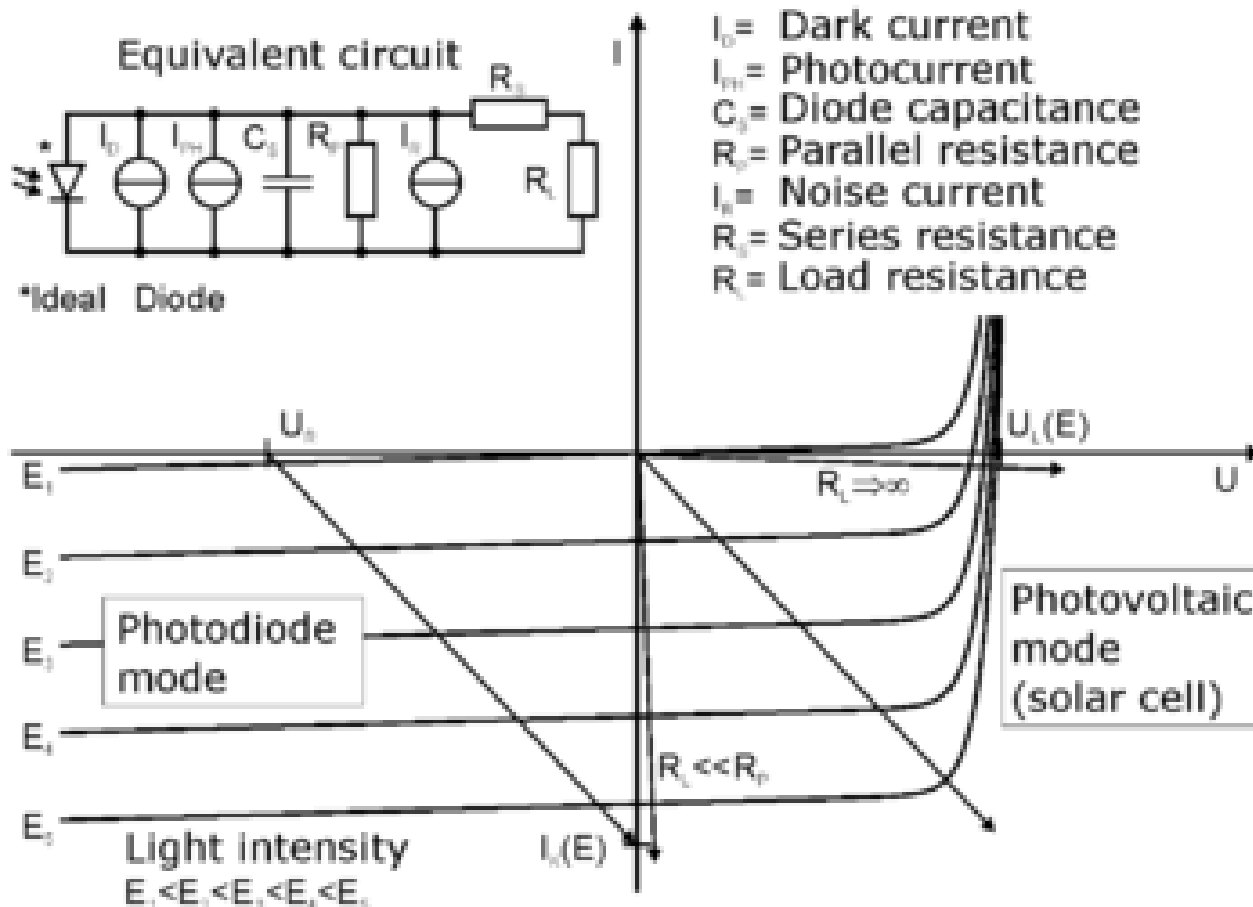
$$\langle V_R^2 \rangle = 4k_B T R_D \Delta f \quad - \text{lineární s } T$$

- generačně-rekombinační šum - vzniká termální generací přes zakázaný pás. (exponenciální závislost díky Boltzmannovu rozdělení). Detektory s malým zakázaným pásem je potřeba chladit pro zvýšení citlivosti (Peltierův jev)
- šum pozadí - podstatné pro FIR, záření černého tělesa na 300 K má maximum asi 1000 cm^{-1} . Nutno stínit studenými štíty a studenými filtry.
- Pokud jsou zdroje šumu menší než šum díky pozadí, hovoříme o ideálním detektoru, nebo detektoru limitovaném pozadí (BLIP: background limited photodetector)
- rychlost odezvy detektoru je nepřímo úměrná doba života excitovaných nositelů τ
- naopak citlivost je přímoúměrná τ ,

fotodioda



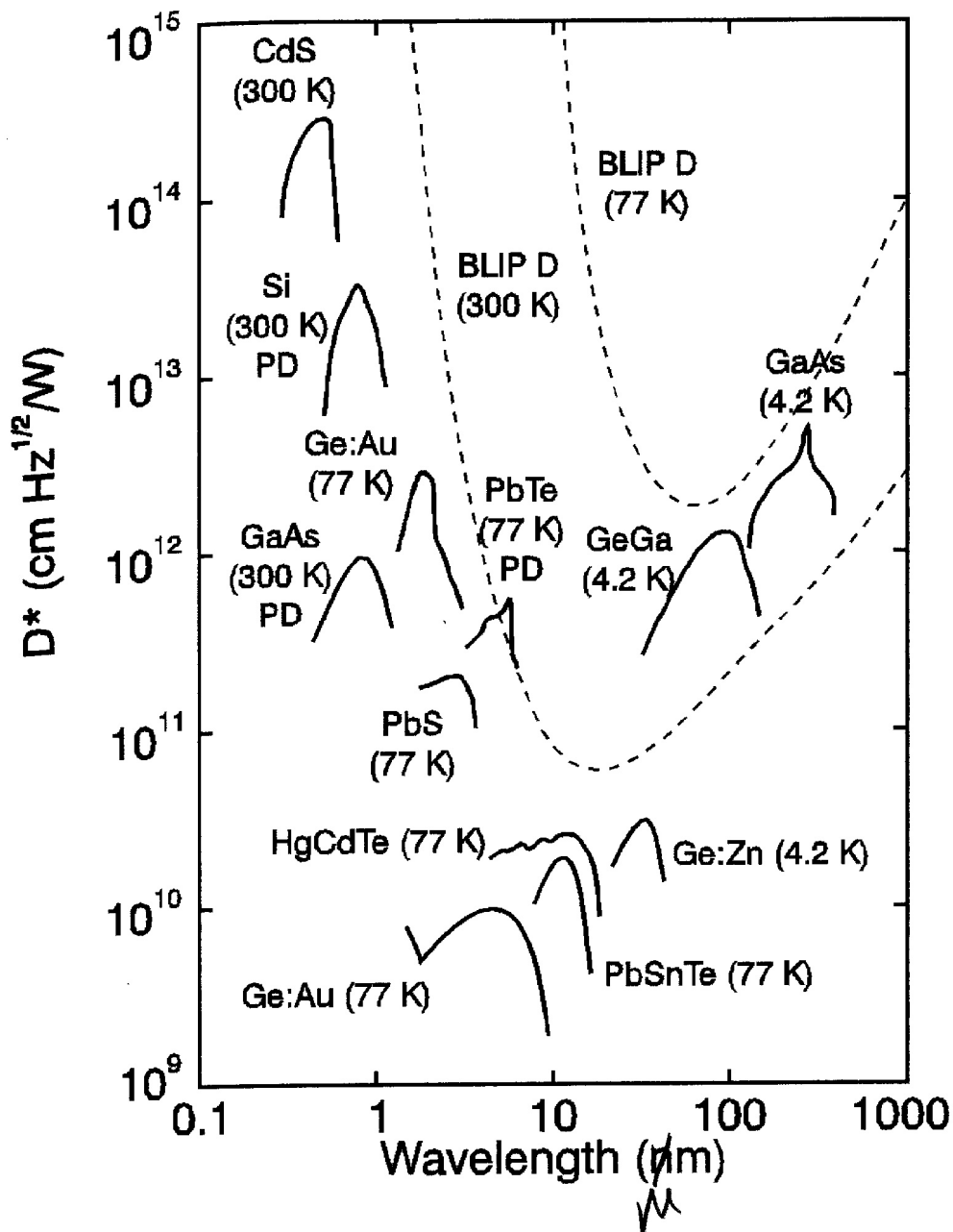
- proud (Si) diody v závěrném směru je velmi citlivý na zachycení fotonu v ochuzené vrstvě.
- velmi rychlé detektory s odezvou až 10^{-10} s.
- proces navíc může být zesílený lavinovým násobením (avalanche photodiodes)



- Použitelné v rozsahu nad zakázaným pásem Si, typicky 1100 -185 nm, ale i pro vyšší energie až do rentgenové oblasti

zdroj: wiki\Photodiode

specifická detektivita fotovodivostních detektorů

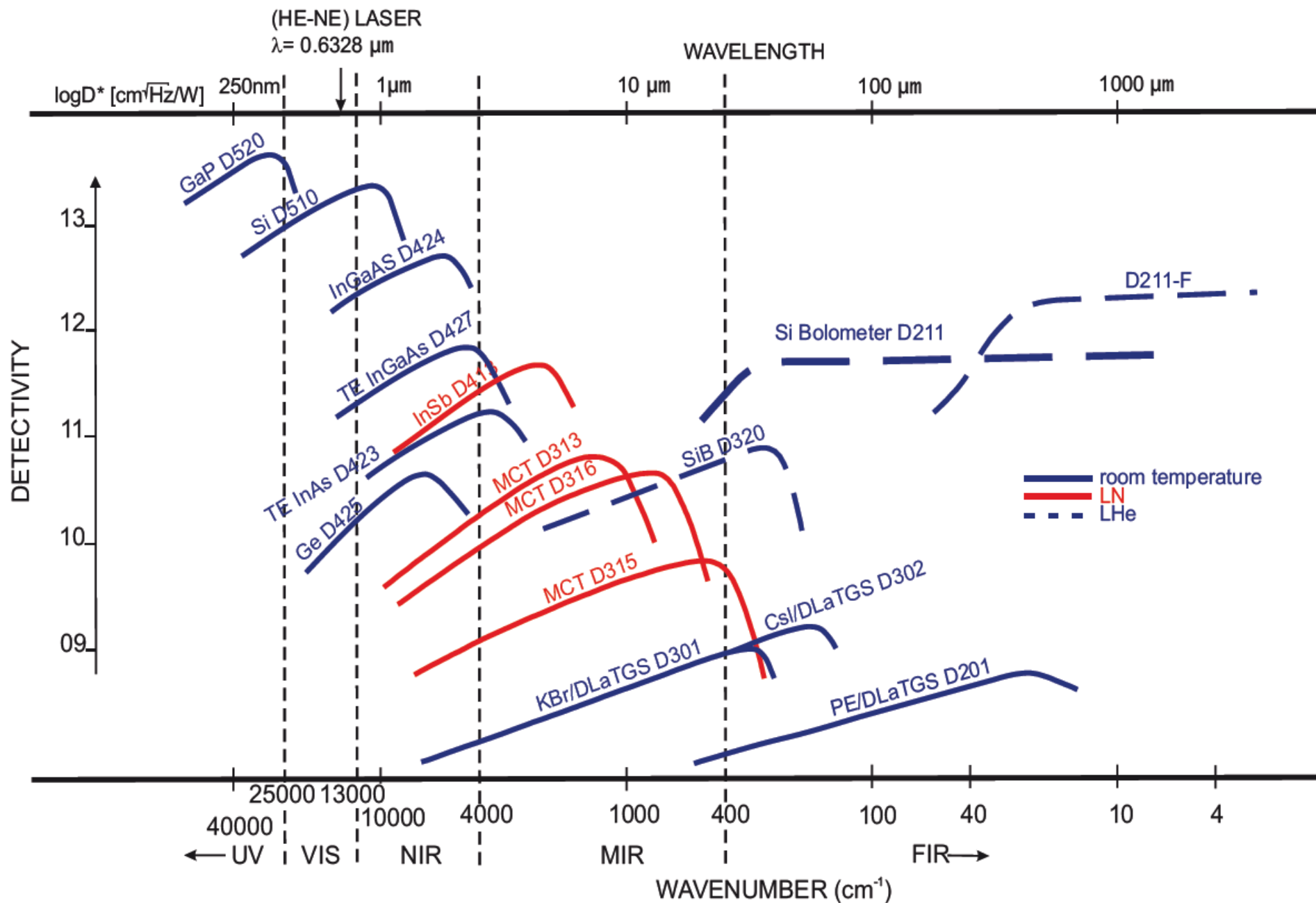


- PD=photodiode
- BLIP: background limited photodetector

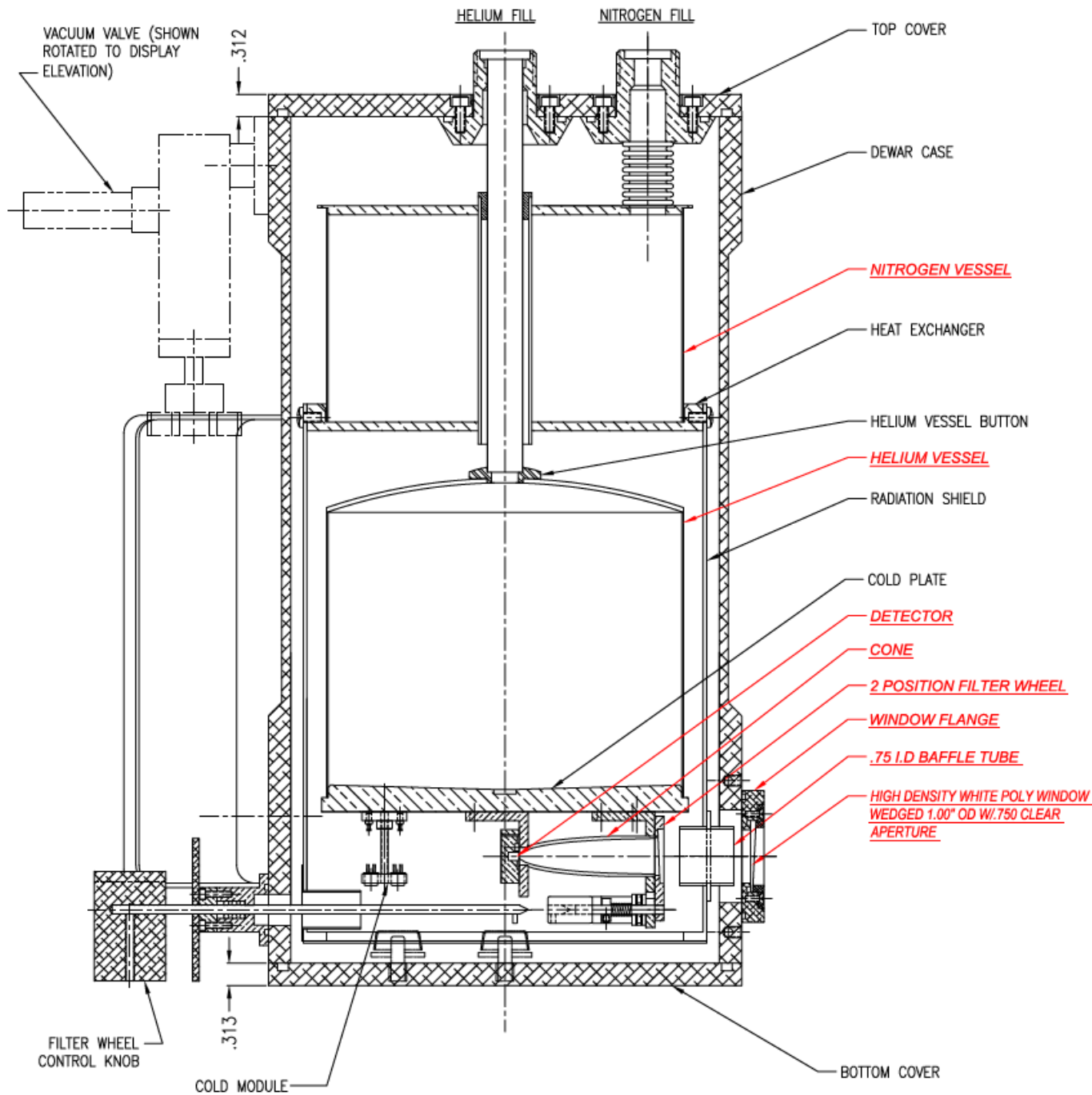
zdroj: S. M. Sze, *Semicond. devic.*(1981)

Fig. 5.7. Specific detectivity D^* versus wavelength for various photoelectric detectors. Photodiodes are labeled PD. The dashed lines are ideal values for 77 K and 300 K, respectively; after [5.1]

specifická detektivita detektorů (Bruker)



4.2-1.6K Bolometer



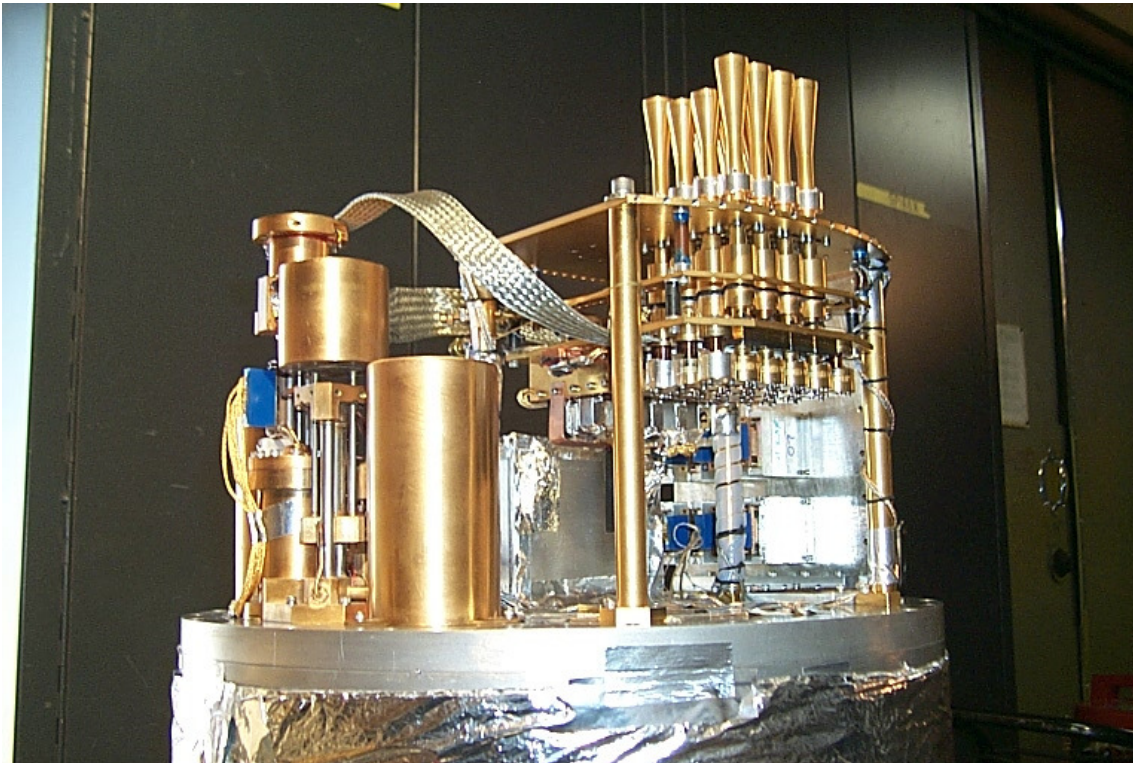
nabídka bolometrů infrared laboratories

	Thermal Conductance	Bolometer Resistance	Electrical Sensitivity	Noise Equivalent Power (NEP)	Noise
General Purpose 4.2K Bolometer System	$G[\mu\text{W/K}]: \sim 16$	$R_o[\text{M}\Omega]: \sim 10 \text{ to } 20$	$S[\text{V/W}]: \sim 2.4 \times 10^5$	$\text{NEP}[\text{W/Hz}^{1/2}]: \sim 1.2 \times 10^{-13}$	$V_n[\text{nV/Hz}^{1/2}] \text{ at } 80 \text{ Hz} \leq 80$
Hi Res 4.2K Bolometer System	$G[\mu\text{W/K}]: \sim 4$	$R_o[\text{M}\Omega]: \sim 14$	$S[\text{V/W}]: \sim 6.1 \times 10^5$	$\text{NEP}[\text{W/Hz}^{1/2}]: \sim 4.3 \times 10^{-14}$	$V_n[\text{nV/Hz}^{1/2}] \text{ at } 80 \text{ Hz} \leq 40$
Standard 1.6K Bolometer System	$G[\mu\text{W/K}]: \sim 12$	$R_o[\text{M}\Omega]: \sim 77$	$S[\text{V/W}]: \sim 7.5 \times 10^5$	$\text{NEP}[\text{W/Hz}^{1/2}]: \sim 4.6 \times 10^{-14}$	$V_n[\text{nV/Hz}^{1/2}] \text{ at } 80 \text{ Hz} \leq 40$
Far-IR 1.6K Bolometer System	$G[\mu\text{W/K}]: \sim .3$	$R_o[\text{M}\Omega]: < 1000$	$S[\text{V/W}]: \sim 1.0 \times 10^7$	$\text{NEP}[\text{W/Hz}^{1/2}]: \sim 3.6 \times 10^{-15}$	$V_n[\text{nV/Hz}^{1/2}] \text{ at } 80 \text{ Hz} \leq 50$

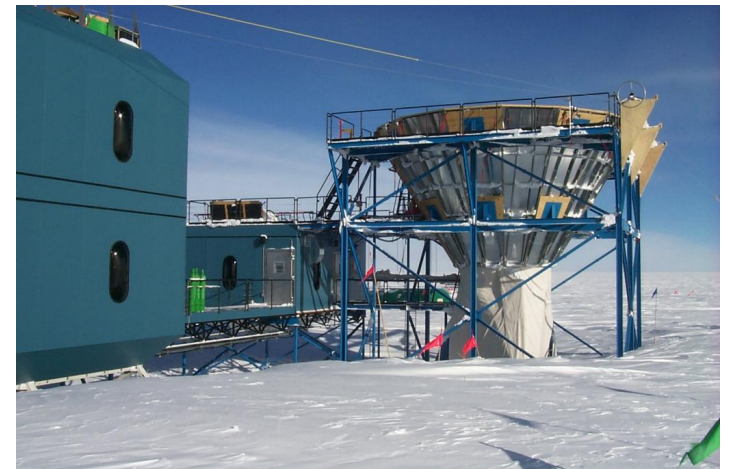
řádově citlivější, řádově pomalejší

Arcminute Cosmology Bolometer Array Receiver

16 Element 250mK Array Bolometer, frekvence 100-250 GHz

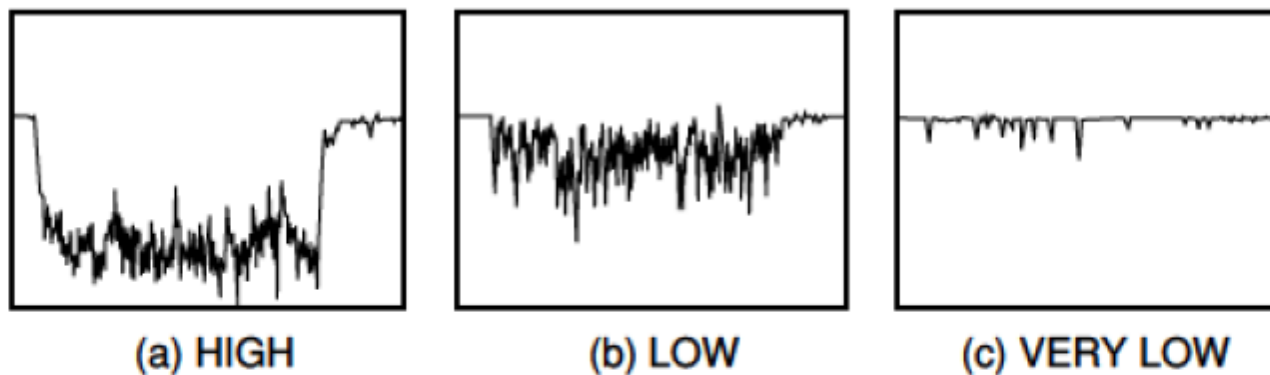


U.C. Berkley in Antarktika



Photon counting

- detekce extrémně slabých intenzit. V tomto případě je výhodnější pracovat digitálně - sčítat jednotlivé fotony než analogově (větší intenzity)
- (pulse height discriminator) výškový oddělovač pulzů umožňuje oddělení signálu od pozadí a tedy potlačit šum (temný proud)
- typicky se používá u fotonásobičů nebo lavinové diody



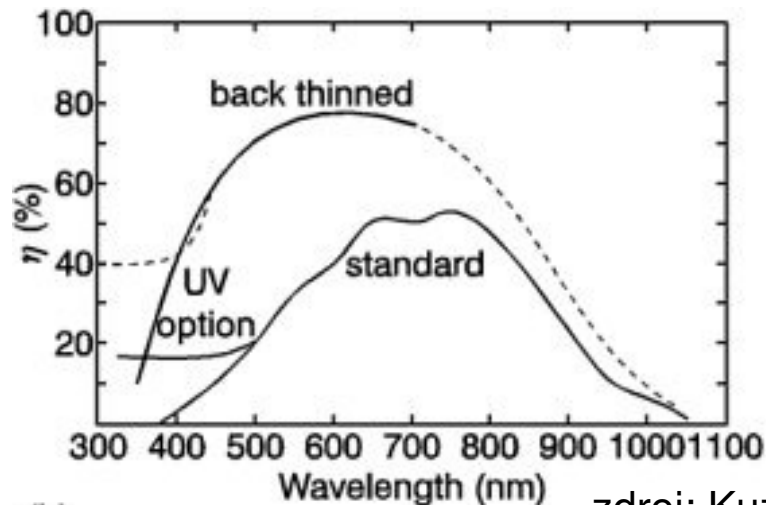
THBV3_0602

Figure 6-2: Photomultiplier tube output waveforms observed at different light levels

zdroj: katalog Hamamatsu

CCD

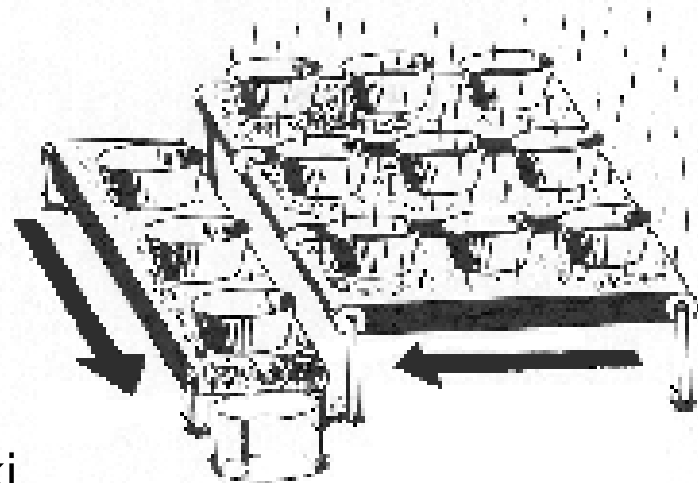
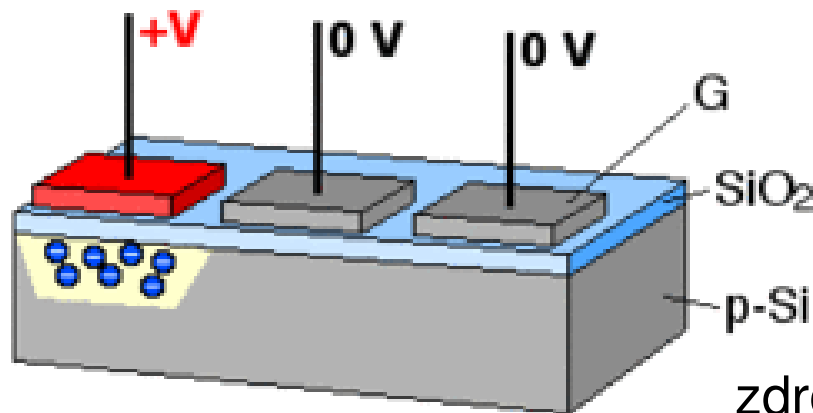
- CCD (charge coupled device): pole MOS diod. Vytváří plošný detektor umožňující např. simultánně detekovat signál v disperzním spektrometru (multikanálová detekce).
- typická velikost elementů 5-25 μm



- kvantová účinnost standardního CCD a CCD ztenčeného na zadní straně (osvit ze zadu) až 80%
- možnost snížit temný proud chlazením (LnN, peltier) až na hodnotu 1e/hodina

(b) zdroj: Kuzmany

proces vyčítání:



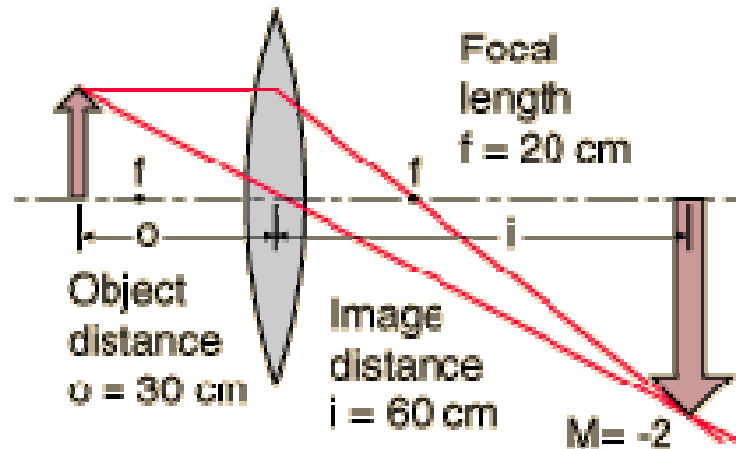
Srovnání typické rychlosti detektorů (šířka pásma)

detektor	Maximální rychlost odezvy [Hz]
Fotonásobič	0.5 GHz
Fotodiody	10 GHz
Lavinové fotodiody	250 GHz
Bolometry	500 Hz
MCT (HgCdTe)	160 kHz
Pyroelektrické detektory (DTGS)	50-500 Hz

Optické prvky

- čočky
- zrcadla (sférická, toroidální, parabolická, eliptická)
- optická vlákna
- filtry (low-pass, high-pass, band-pass, notch)

fokusace záření: čočky



$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$
$$\frac{1}{\text{object distance}} + \frac{1}{\text{image distance}} = \frac{1}{\text{focal length}}$$

- výhody: fokusace beze změny směru (ve srovnání se zrcadly)
- nevýhody:
 - propustné jen v určitém frekvenčním oboru, typicky NIR-UV
 - chromatická aberace

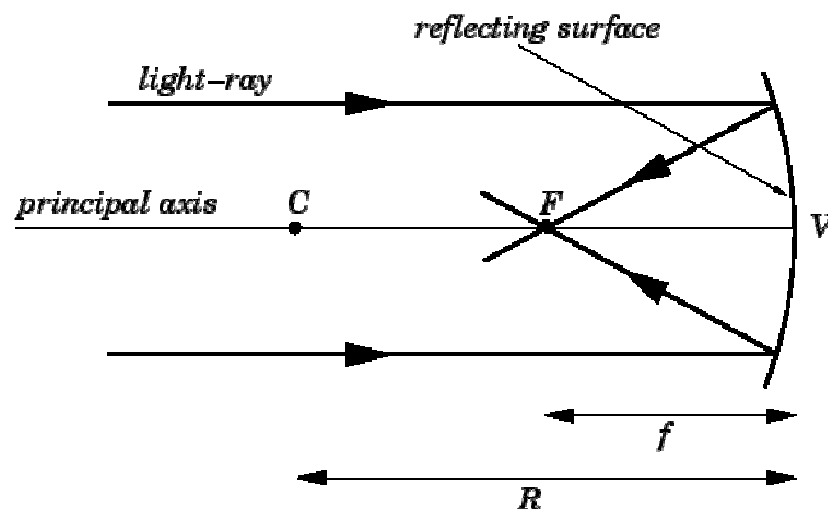
fokusace záření: zrcadla,

(nevýhoda, někdy výhoda): mění směr paprsku

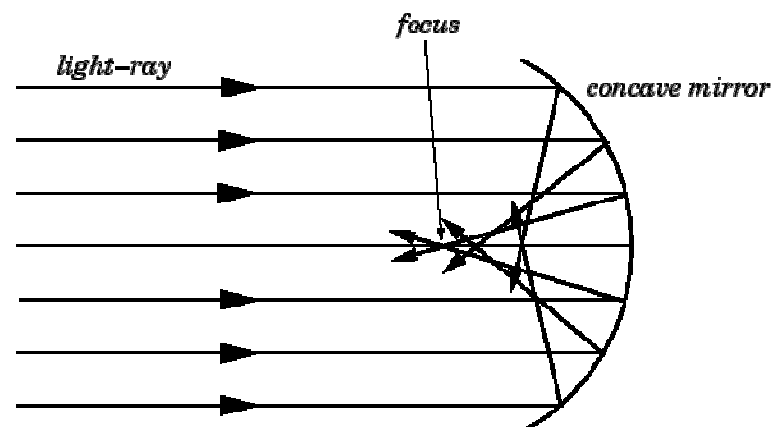
výhody:

- spektrálně neutrální ve velmi širokém rozsahu až do UV (hliník 15 eV), používané v infračervené (NIR-UV) spektroskopii (Al nebo Au).
- lze používat ideální optické prvky (parabolická, eliptická zrcadla)

Sférické zrcadlo:



sférická aberace

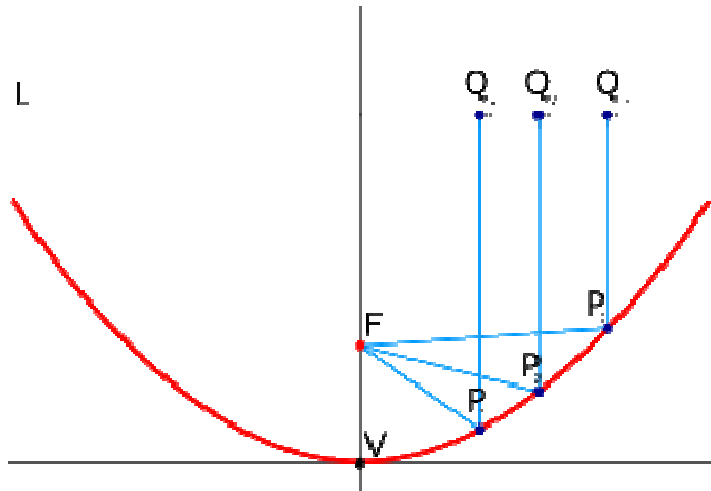


- bez distorzí zobrazuje pouze s vzorem i obrazem v centru sféry. Minimalizovat distorze co nejbližším splněním této podmínky
- relativně levné
- mezi dva fokální body je potřeba jen jedno zrcadlo

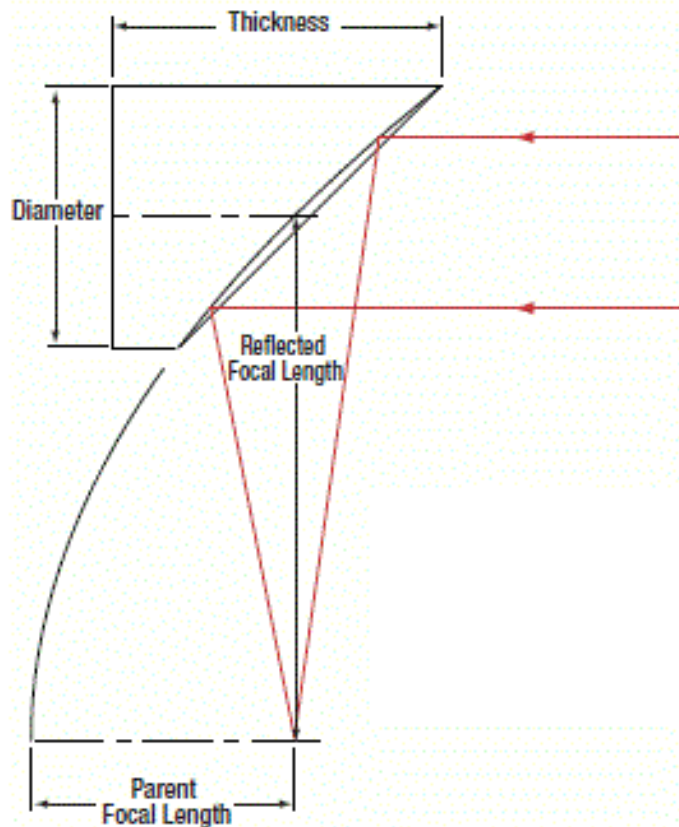
$$\frac{1}{o} + \frac{1}{i} = \frac{1}{f}$$

- opět funguje: $\frac{1}{\text{object distance}} + \frac{1}{\text{image distance}} = \frac{1}{\text{focal length}}$

parabolická zrcadla

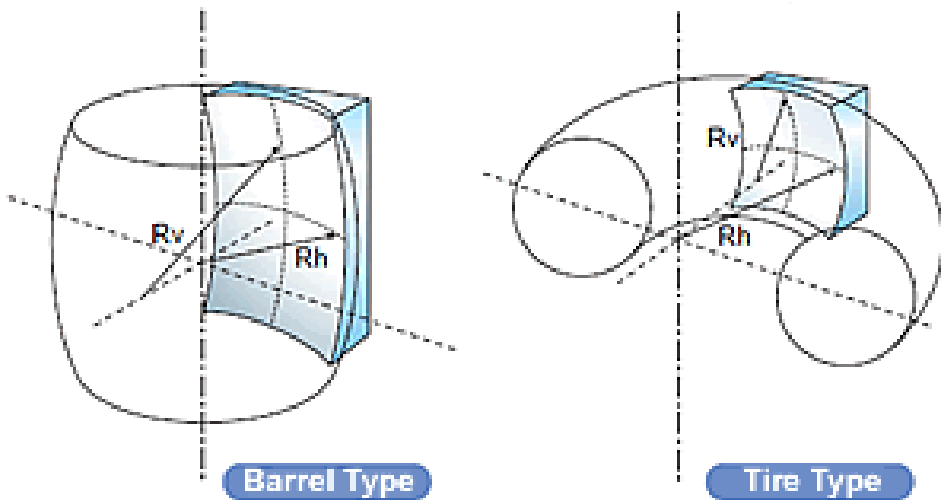


- ideálně převádí paralelní svazek na fokusovaný a naopak. Používána ve spektroskopiích kde záleží na udržení nejvyšší kvality paprsku (THz, laserová spektroskopie)
- je potřeba dvou zrcadel na spojení dvou fokálních bodů
- velmi často ve formě mimoosých reflektorů (off-axis) na 90st, ale i 15,30,60



90 st. mimoosé parabolické zrcadlo

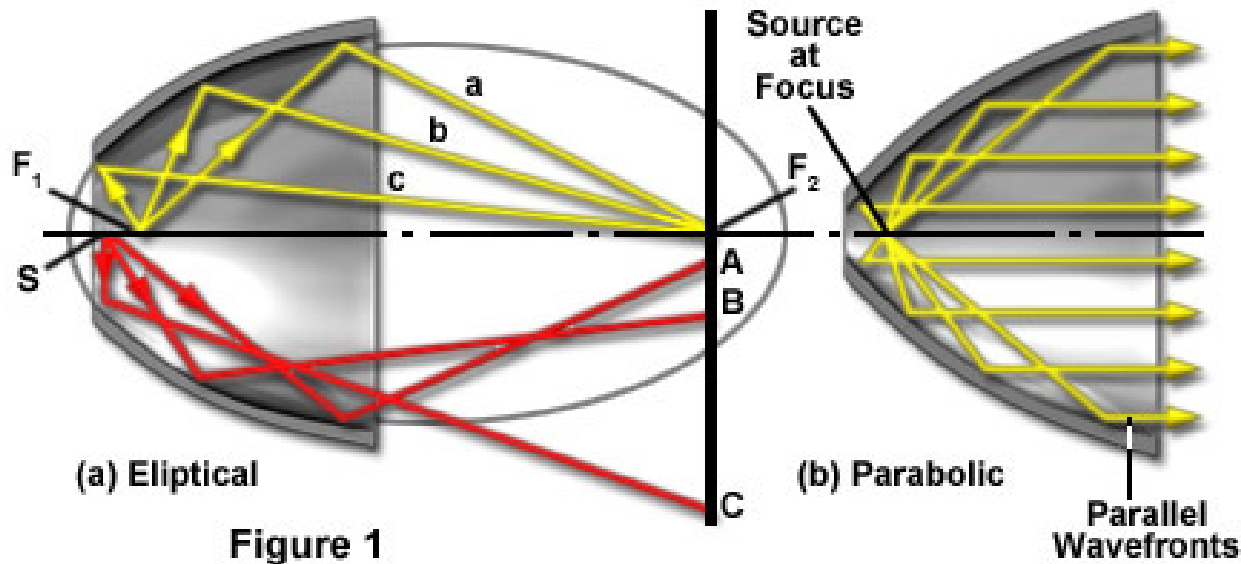
Toroidální zrcadla



- „sférické“ zrcadlo s různým poloměrem vertikálním a horizontálním. Používaná pro fokusaci pod větším úhlem, kde by sférické zrcadlo mělo příliš velkou sférickou aberaci.
- není ideální zrcadlo, lepší než použít sférické pro velké úhly.
- relativně levné ve srovnání s ideálním elipstickým zrcadlem

Eliptická zrcadla

Elliptical and Parabolic Reflectors



- povrch zrcadla je povrchem elipsoidu
- ideálně zobrazuje jedno ohnisko na druhé
- náročné a tedy drahé na výrobu (>15 tis. Kč)
 - (Petra Turnov, Toptec Turnov)

optická vlákna

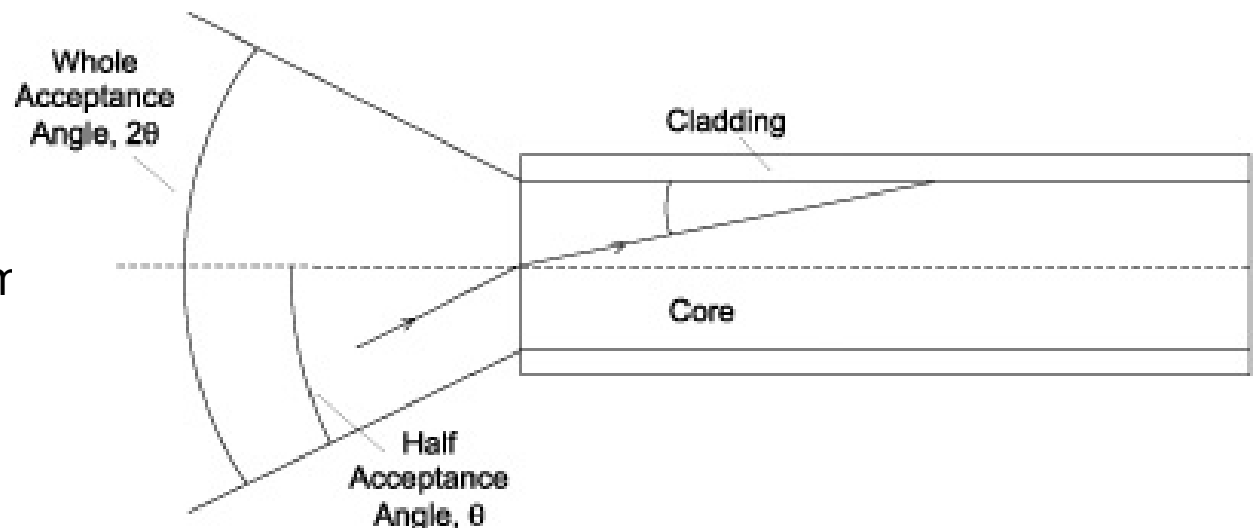
- skelné vlákno přenáší svazek totální reflexí
- flexibilní směrování svazku
- vhodné pro NIR-UV, nebo pro THz, ve FIR a MIR absorbují

různé spektrální propustnosti:

Solarization-resistant	UV/S R-VIS	190-800 nm (most efficient)
High OH content	UV- VIS	300-800 nm (most efficient)
Low OH content	VIS- NIR	400-2100 nm (most efficient)

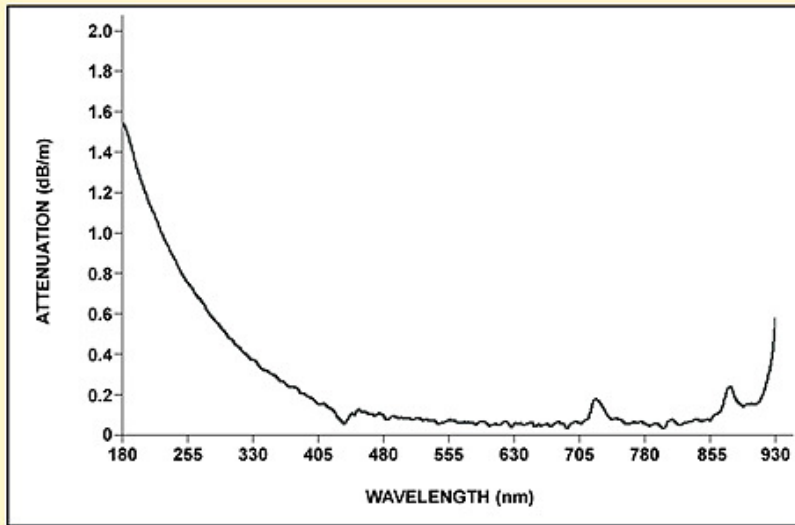
velikost jádra : 8-1000 μm

akceptance typicky 25°

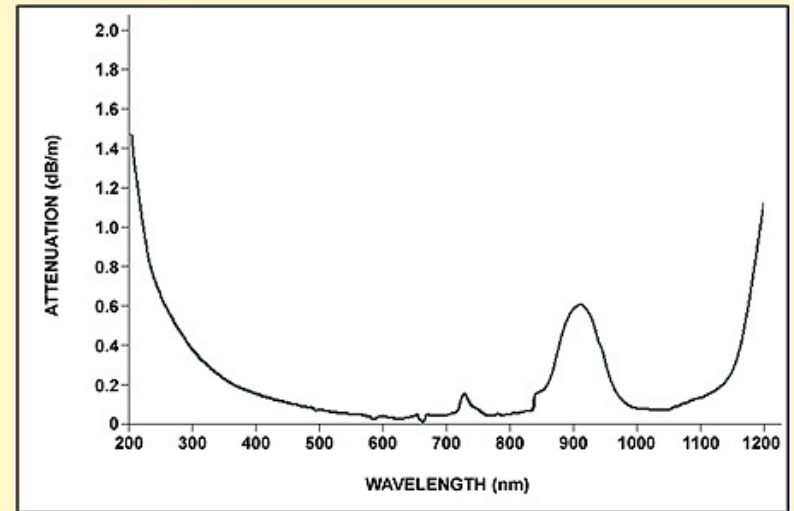


propustnosti optických vláken (Ocean optics)

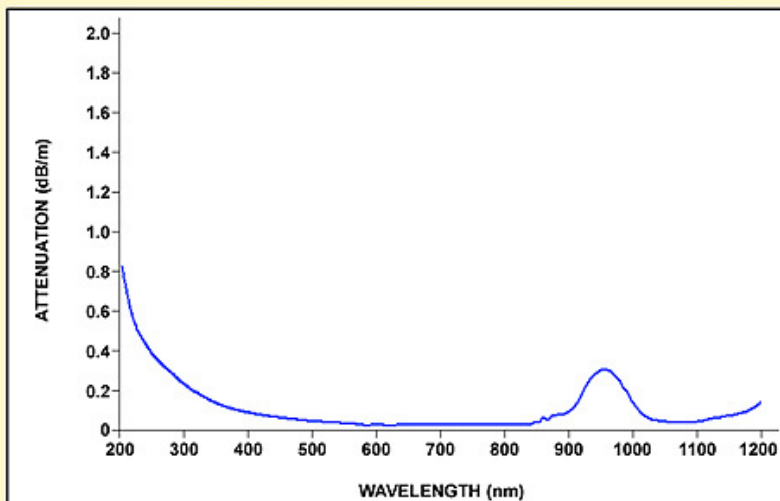
XSR Solarization-resistant: 180-900 nm



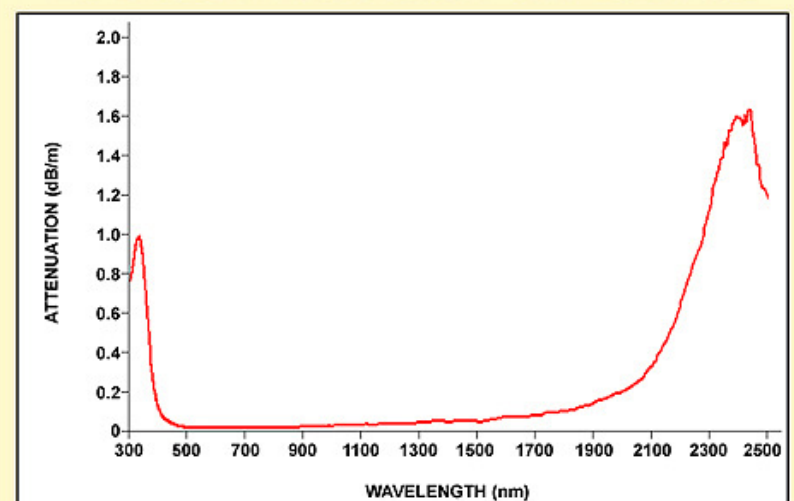
UV/SR-VIS Fibers: 200-900 nm



UV-VIS High OH Fibers: 300-1100 nm



VIS-NIR Low OH Fibers: 400-2500 nm



Polarizátory

- optické elementy propouštějící převážně jednu polarizaci
- jsou charakterizované

polarizačním podílem
$$P = \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}$$

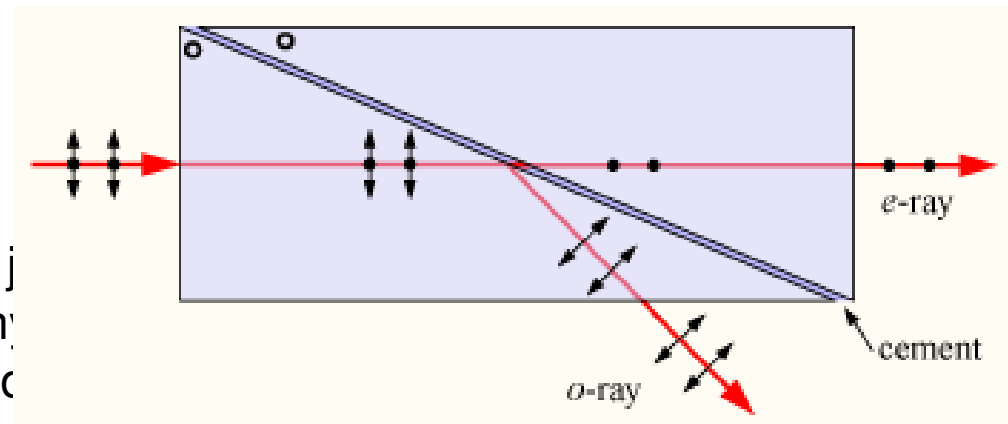
nebo stupněm polarizace
$$P' = \frac{I_{\parallel} - I_{\perp}}{I_{\parallel} + I_{\perp}}$$

pro $I_{\parallel} \gg I_{\perp}$ $P' \approx 1 - 2P$

V NIR-UV oblasti jsou používány Nicolovy nebo Glanovy-Thomsenovy hranolové polarizátory polarizačním podílem 10^{-5} (velmi dobré).

Glanův-Thomsenův hranol
materiál: dvojlomný kalcit

ordinární a extraordinární paprsek cítí j
index lomu. Extraordinární je odchýlen
totální reflexí na vrstvě s jiným prostře

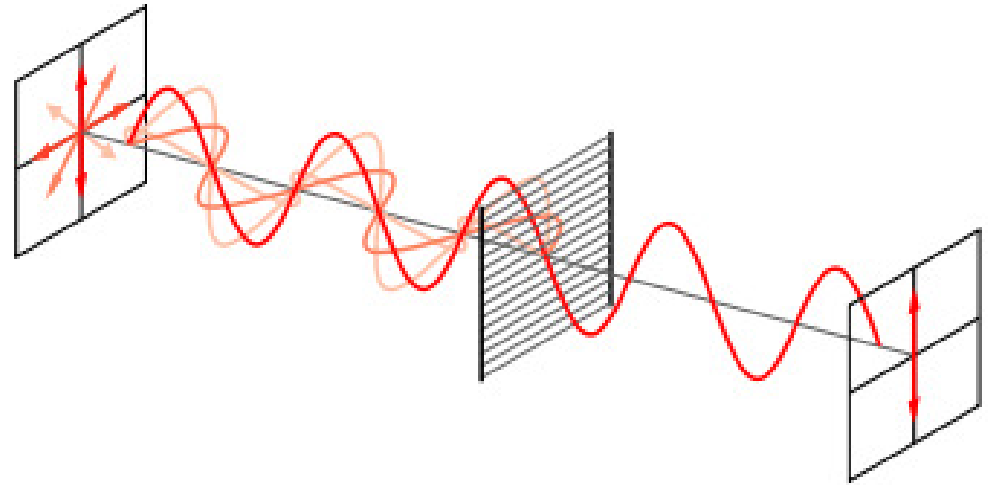


Polarizátory

- Pro střední infračervenou oblast a menší frekvence až do THz se používají drátové polarizátory:

komponenta elektrického pole rovnoběžného s dráty je zkratovaná – odražená, ta opačná je propuštěná.

Polarizační podíl typicky 10^{-2} - 10^{-3}
(případně i horší, pozor!)



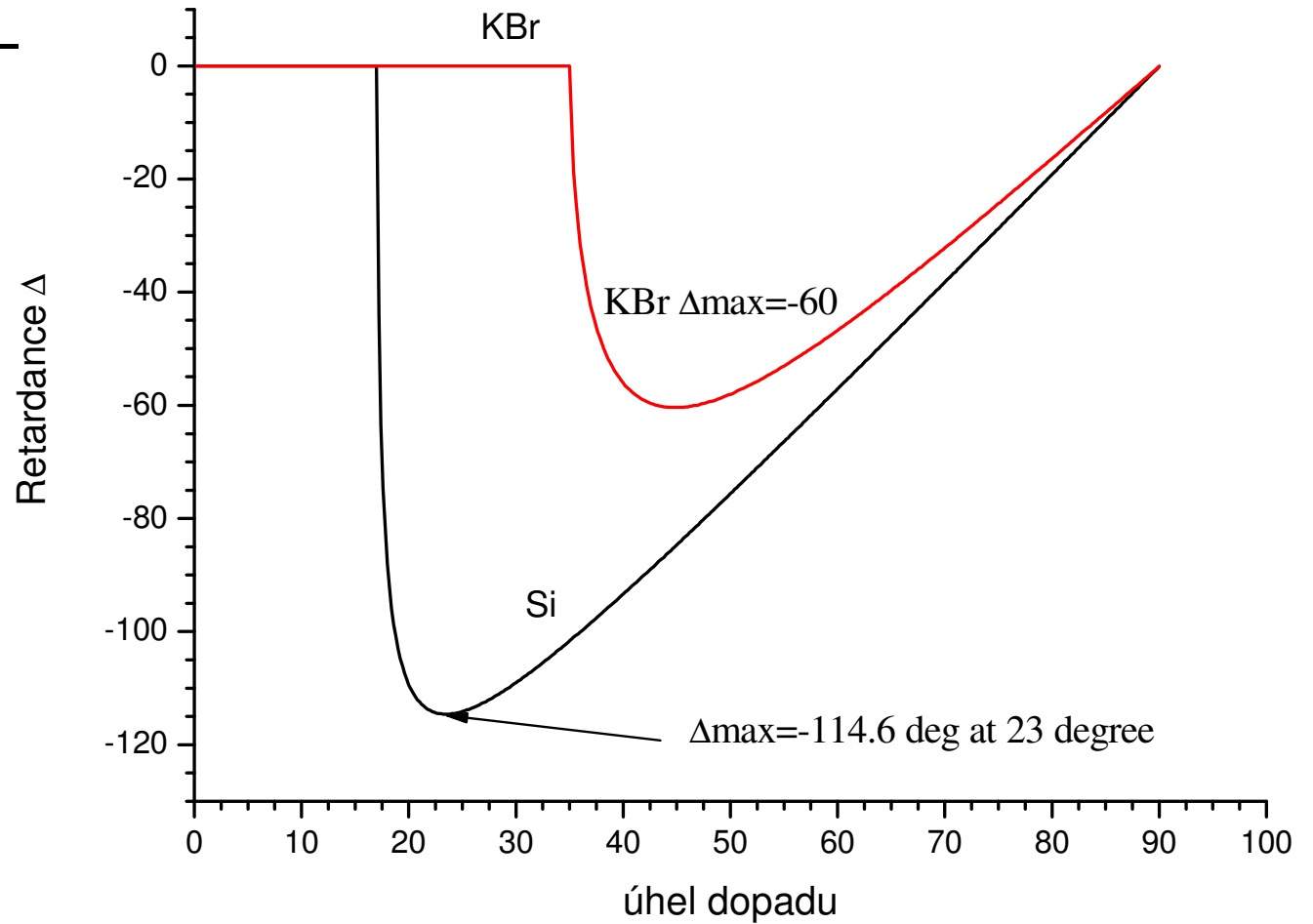
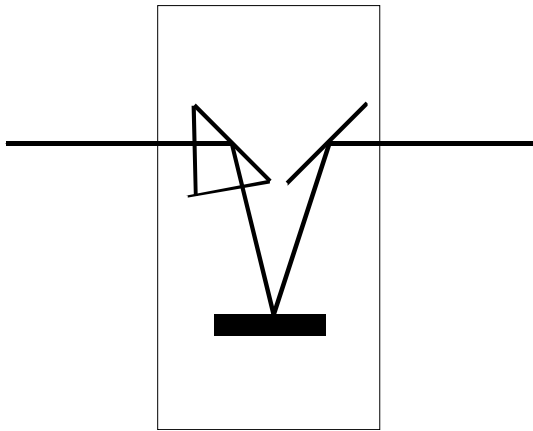
Pro elipsometrii je potřebný polarizační podíl (hrubě řečeno) 10^{-2} , lépe 10^{-3} při menších hodnotách se výrazně začnou objevovat artefakty, které je však možno korigovat, pokud je polarizační podíl znám.

retardéry (nebo (čtvrt)vlňové destičky, nebo kompenzátory)

- převádí lineárně polarizované světlo na kruhově (nebo elipticky polarizované světlo)
- ve viditelné oblasti se opět používají dvojlomné materiály
 - křemené retardéry - pouze úzké intervaly $\pm 1\%$
 - tekuté krystaly (achromatické), typicky 400-700 nm, 900-1250nm
 - polymerové achromatické retardéry např. 480-630 nm, 1200-1650. (Edmund optics)
 - Berekova vlnová destička (achromatická, 190-1600 nm) (Newport, Woollam)
 - naklápění destičky z dvojlomného materiálu s extraordinární osou kolmo na ní
 - naklápění destičky mění retardanci od 0 do libovolné hodnoty
- fotoelastický modulátor: mechanická deformace vyvolává dvojlom. Funguje na veliké frekvenci 50kHz. (Horiba)

retardéry (nebo (čtvrt)vlnové destičky, nebo kompenzátory)

- v infračervené oblasti se používá změna fáze při totální odrazu



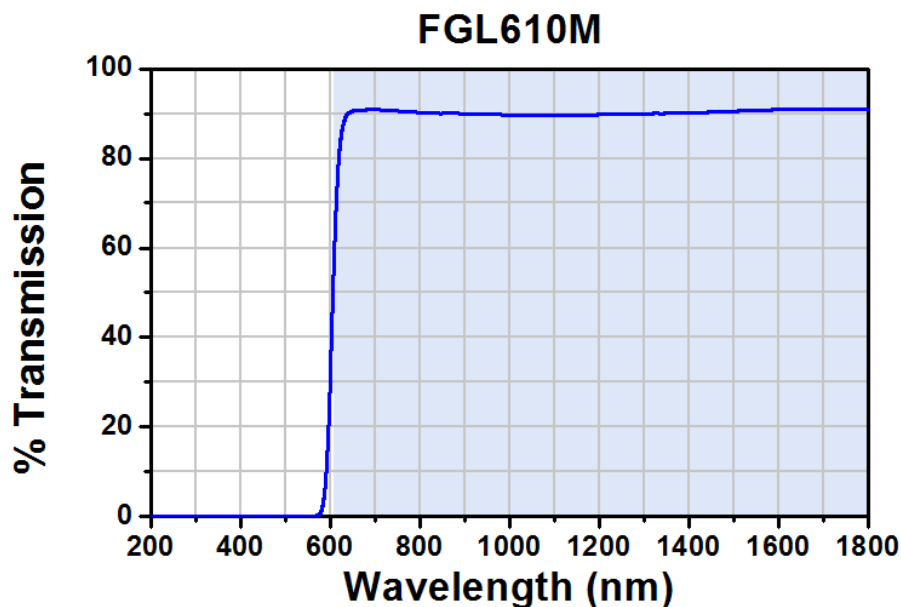
Spektrální analýza

- filtry
- disperzní monochromátor (prostorová separace frekvencí)
 - hranolový
 - mřížkový
- interferenční spektrometr (nedispersivní) - (Fourierovský)

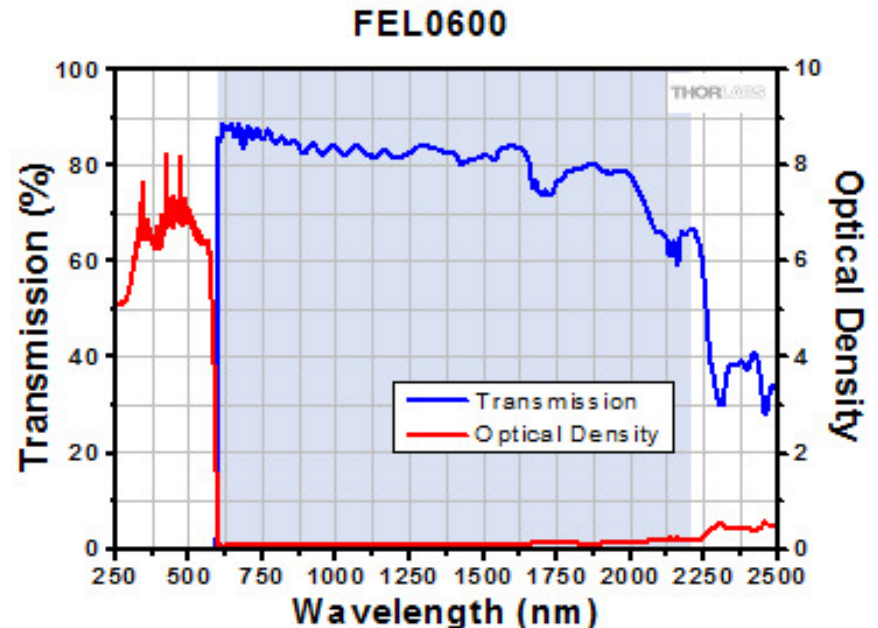
Filtry

- spektrálně neutrální filtry (neutral density), utlumování intenzity, hlavně při použití laserů. Míra utlumení je optická hustota (OD), což je logaritmus propustnosti: typicky OD=0.1 (79%), 1 (10%)...6 (10^{-4} %)
- spektrální filtry
 - dolní propust (long-pass),
 - dielektrické (interferenční) – ostrý nástup, oscilace
 - absorptivní (zlato) – pozvolný nástup, hladší propustnost

absorptivní (Au) long pass filter (Thorlabs)



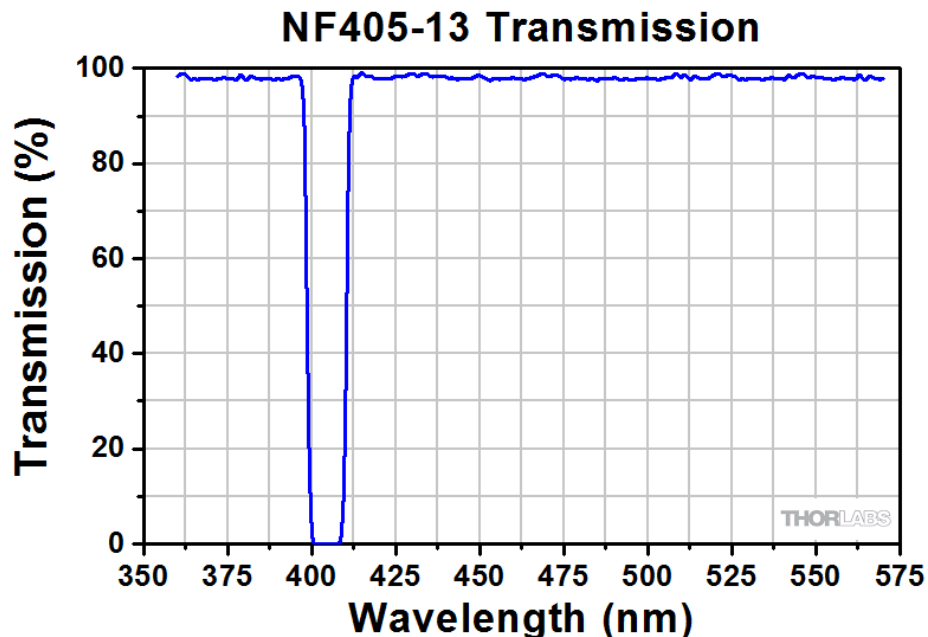
interferenční filter (Thorlabs)



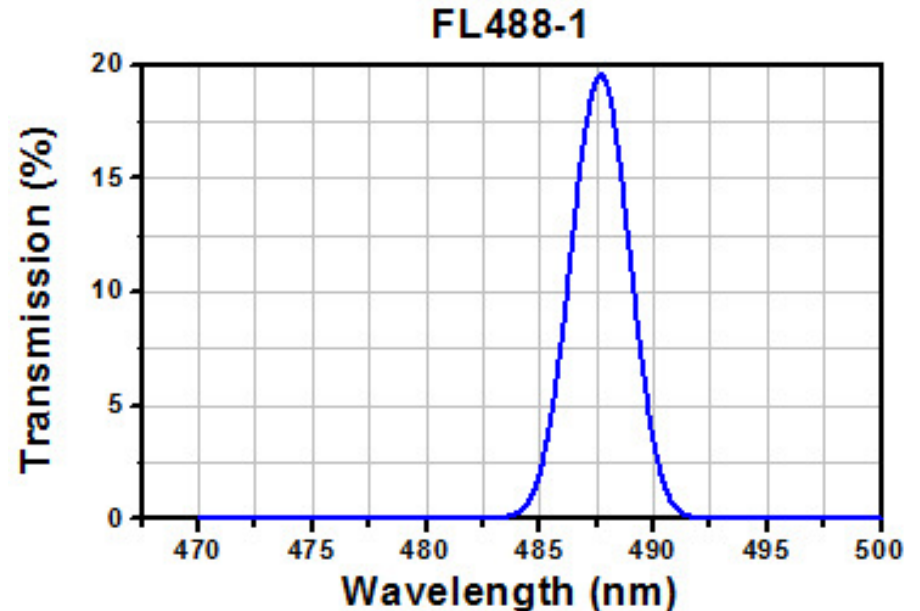
Filtry

- short-pass, interferenční
- band-pass, interferenční, např. potlačení postranních linií v plynových laserech
- notch („band-block“), používá se v Ramanově spektroskopii pro potažení elasticky rozptýleného signálu
- firmy: Thorlabs, Newport, Edmund Optics

notch filter 405 nm,
blokuje 13nm oblast (Thorlabs)



bandpass filter 488,
propouští 1nm oblast (Thorlabs)



Disperzní monochromátory

- disperzní prvek: hranol, difrakční mřížka
- rozlišení monochromátoru:
 - difrakčně limitované (Rayleighovo kritérium)
 - určené šířkou štěrbin

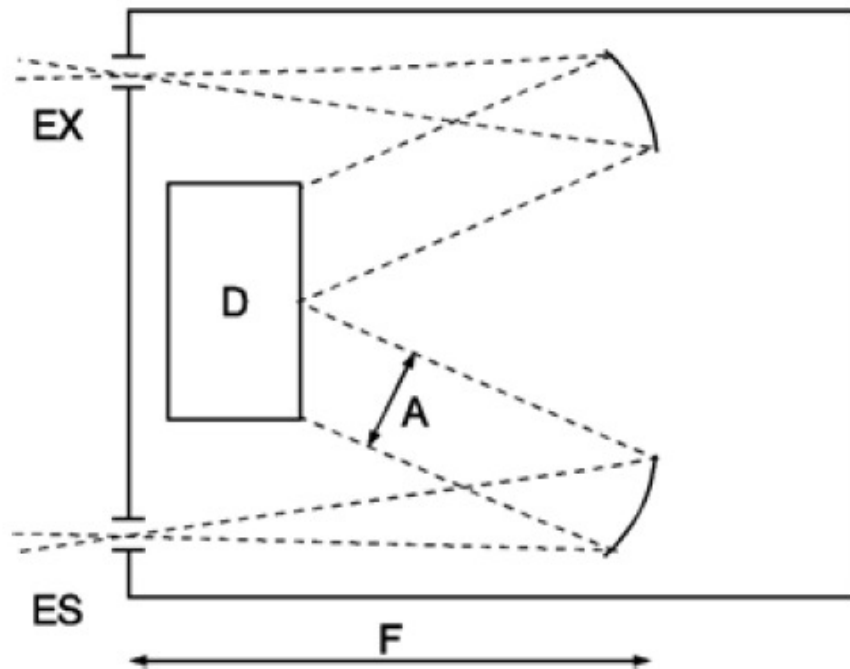
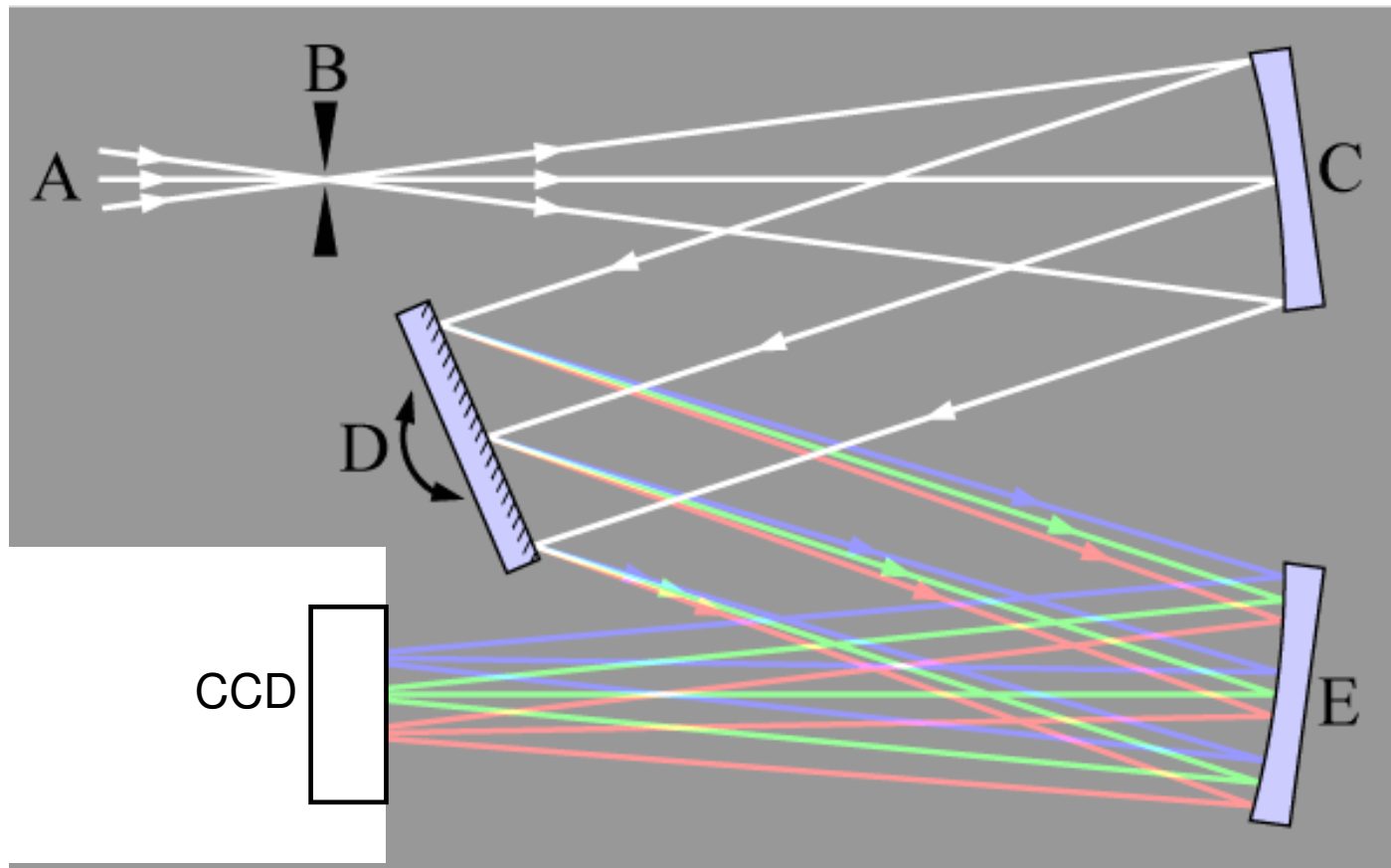


Fig. 4.6. Schematic arrangement of a monochromator; (ES: entrance slit, A: aperture, D: dispersive element, EX: exit slit, F: focal length)

Disperzní spektrometr

- disperzní prvek: hranol, difrakční mřížka
- jednokanálová detekce
- multikanálová detekce s CCD detektorem



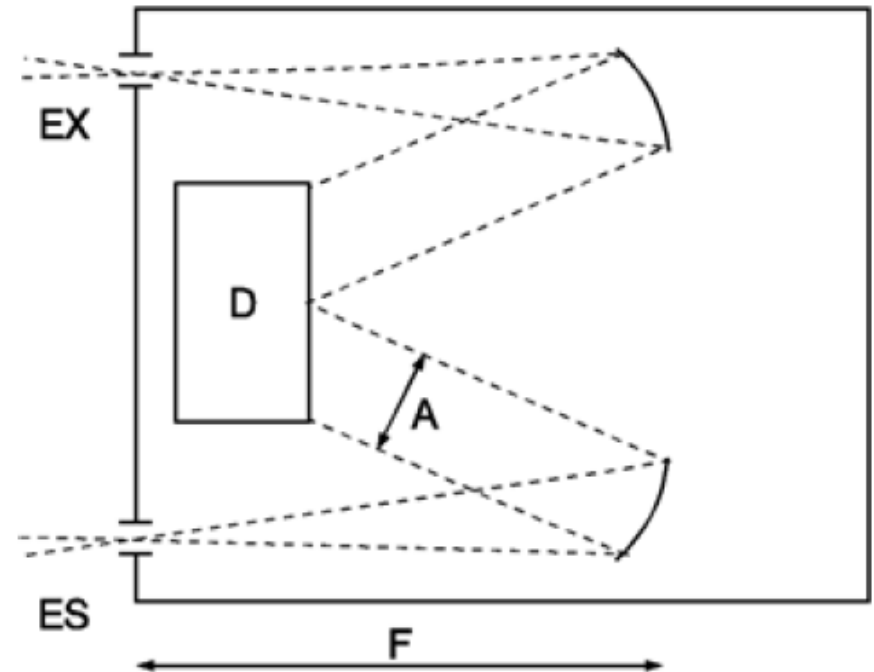
rozlišení monochromátoru

- **rozlišení dané difrakcí na disperzním členu (Rayleighovo kritérium):** dvě vlnové délky λ a $\lambda + \delta\lambda$ jsou rozlišeny, jestliže maximum difrakčního obrazce jednoho paprsku se překrývá s minimem od druhého.

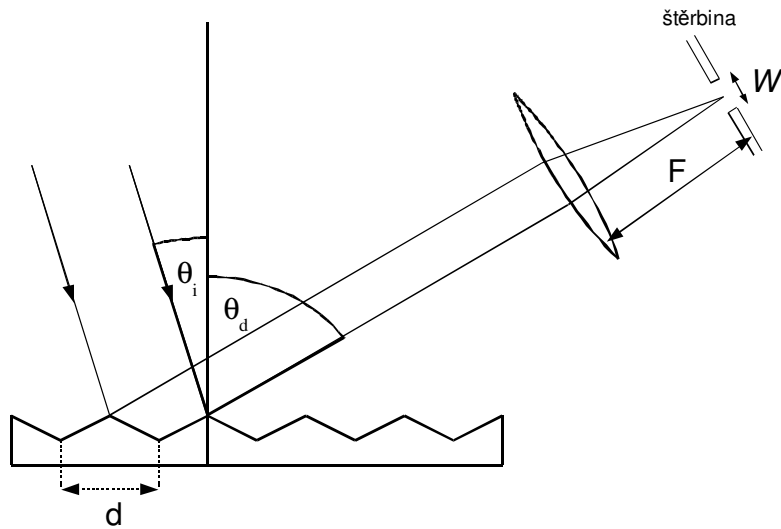
$$R_0 = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{f}{\delta f} = \frac{\nu}{\delta\nu}$$

- Je to teoreticky největší rozlišení, co je možno dosáhnout od daného monochromátoru.

- **rozlišení dané velikostí vstupní a výstupní štěrby**
- toto je to rozlišení, se kterým se experimentátor nejvíce potká



difrakční mřížka



- relativní fáze difraktovaných paprsků

$$\phi = 2\pi \frac{\Delta l_{\text{opt}}}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} (\sin \theta_i - \sin \theta_d)$$

- součet intenzit od všech hran

$$E_r = \sqrt{R} \sum_{s=1}^N E_0 e^{is\phi} = \sqrt{R} E_0 \frac{1 - e^{iN\phi}}{1 - e^{i\phi}}$$

$$I_r = R I_0 \frac{\sin^2(N\phi/2)}{\sin^2(\phi/2)}$$

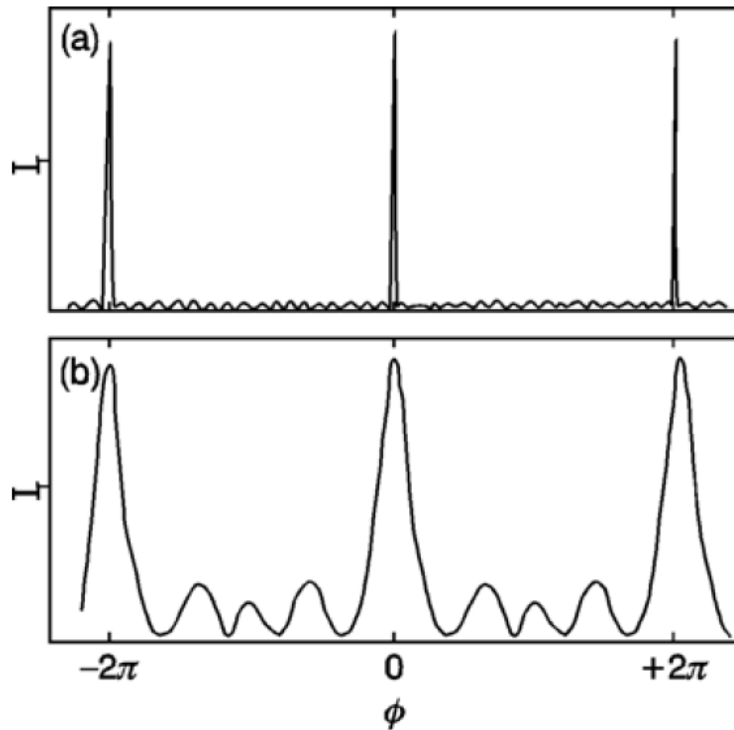
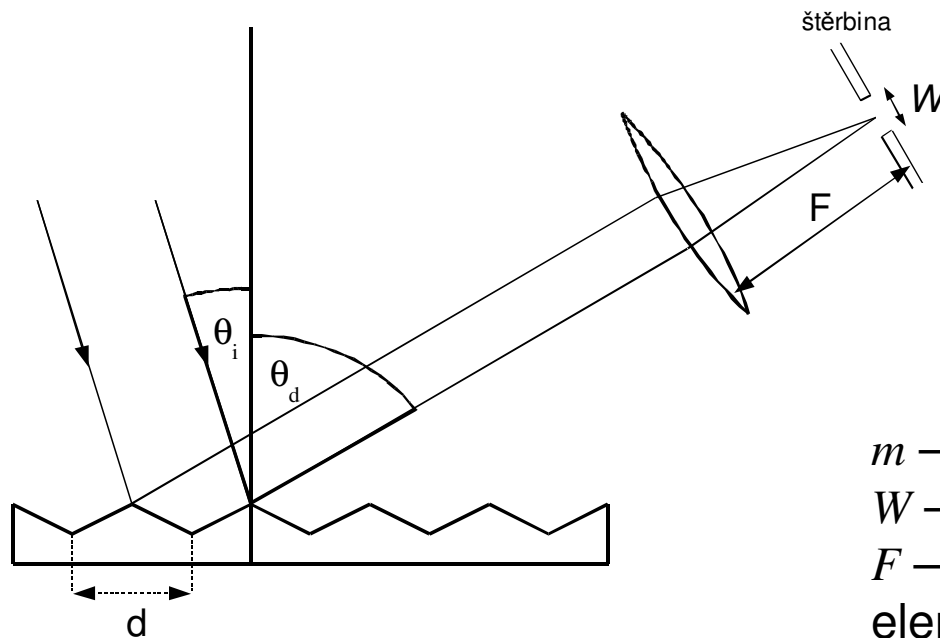


Fig. 4.9. Multiple-beam interference for a grating with $N = 20$ lines (a) and with $N = 5$ lines (b) from (4.17)

Rozlišení difrakční mřížky



$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda F m}{W d \cos \theta_d}$$

nebo

$$\delta\lambda = \frac{W d \cos \theta_d}{F m}$$

m – difrakční řád.

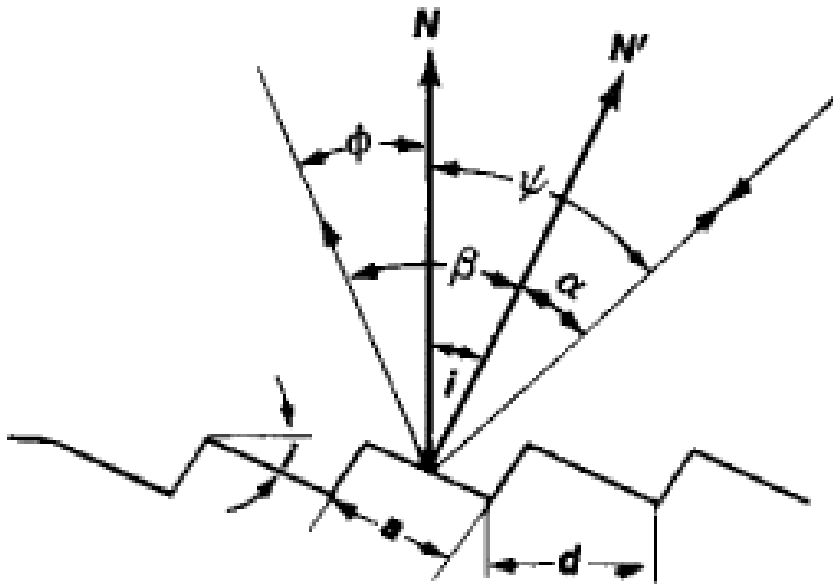
W – šířka štěrby

F – fokální vzdálenost fokusačního elementu

- absolutní rozlišení $\delta\lambda$ je nezávislé na frekvenci, tzn. relativní rozlišení roste s vlnovou délkou
- intenzita s m klesá jako $1/m^2$, tzn. typicky se používá první řád $m=1$.
- S větším F , $1/W$ roste rozlišení ale klesá intenzita
- Pro typické hodnoty $d=1\mu\text{m}$ (1000 lines/mm), $F=25\text{cm}$, $W=100\mu\text{m}$, $\delta\lambda=0.4\text{ nm}$, a pro 500 nm , $\lambda/\delta\lambda=1250$.
- pro větší rozlišení se používají dvojně, až trojně monochromátory, rozlišení $(\lambda/\delta\lambda)^2$ resp. $(\lambda/\delta\lambda)^3$

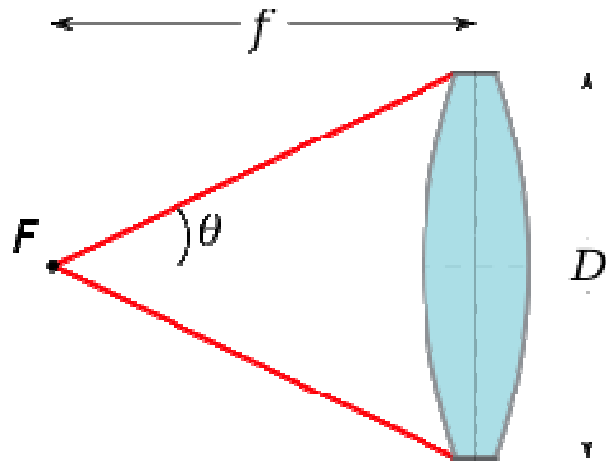
zkosení mřížky (blazed grating)

- zkosení mřížky zvětšuje intenzitu pro difrakční maximum pro zrcadlový odraz – větší intenzita
- intenzita s m klesá jako $1/m^2$, mřížky jsou typicky tedy zkosené pro první řád $m=1$,



- nutnost použití filtrů pro odfiltrování “špatných“ difrakčních řádů – nevýhoda mřížek oproti hranolům

Numerická apertura NA a F -number (světelnost)



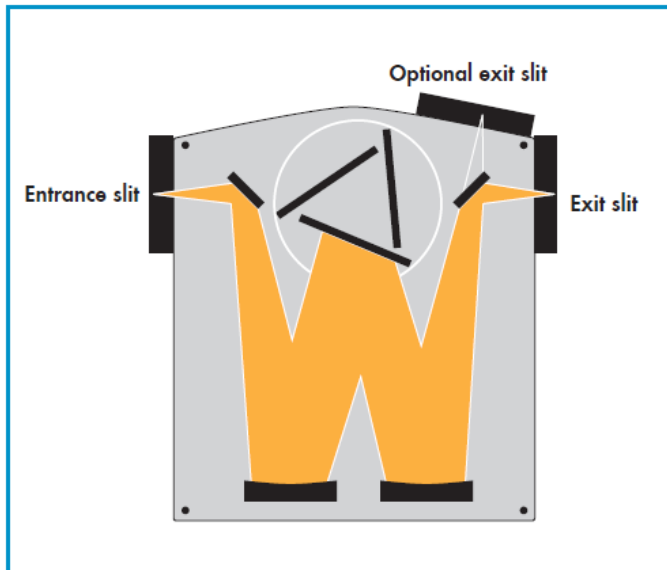
F-number (světelnost)

$$F/\# = f/D$$

numerická apertura:

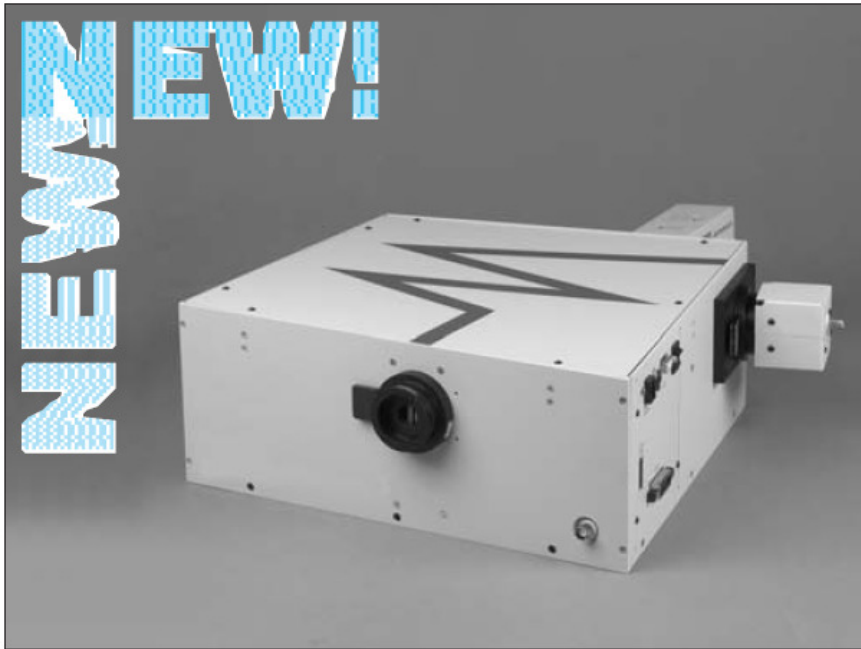
$$NA_i = n \sin \theta = n \sin \left[\arctan \left(\frac{D}{2f} \right) \right] \approx n \frac{D}{2f}$$

zdroj: wiki



světelnost spektrometru: poměr velikosti prvního fokálního zrcadla ke vzdálenosti štěrbin

Příklad z reálného života: Oriel Cornerstone 1/4 m



Cornerstone™ 260 1/4 m monochromator with a detector mounted to each output port.

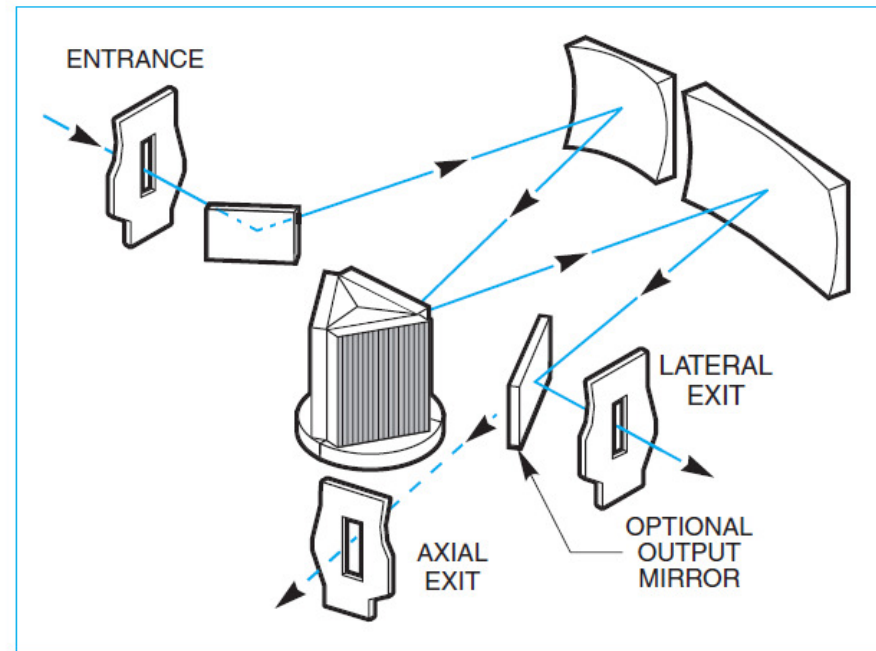


Fig. 1 Optical design of the Cornerstone™ 260 Monochromator.

CORNERSTONE™ 260 SPECIFICATIONS

Focal length:	260 mm
F/number:	F/3.9
Usable wavelength range:	180 nm to 24 μ m, with interchangeable gratings
Wavelength accuracy:	0.35 nm
Resolution:	0.15 nm*
Wavelength precision:	0.08 nm
Maximum slew rate:	175 nm/s
Weight:	21 lbs (9.5 kgs)

* with 1200 l/mm grating, 10 μ m x 2 mm slit.

Příklad z reálného života: Oriel Cornerstone 1/4 m

Table 1 Grating Specifications for Cornerstone™ 260 1/4 m Monochromator.

These gratings are mounted in pre-adjusted holders which can be inserted and removed, at any time, from the Cornerstone™ 260.

Line Density (l/mm)	Blaze Wavelength	Type	Reciprocal Dispersion* (nm/mm)	Peak Efficiency (%)	Primary Wavelength Region**	Instrument's Upper Wavelength Mechanical Limit (For Specified Grating)	Model No.
2400	250 nm	Holographic	1.6	60	180 - 700 nm	700 nm	74060
1800	500 nm	Holographic	2.1	65	300 - 925 nm	925 nm	74061
1200	250 nm	Holographic	3.2	80	180 - 650 nm	1400 nm	74062
1200	350 nm	Ruled	3.2	65	200 - 1400 nm	1400 nm	74063
1200	750 nm	Ruled	3.1	80	450 - 1400 nm	1400 nm	74064
600	200 nm	Ruled	6.4	90	180 - 500 nm	2800 nm	74065
600	400 nm	Ruled	6.5	80	250 - 1300 nm	2800 nm	74066
600	1000 nm	Ruled	6.4	75	600 - 2500 nm	2800 nm	74067
600	1250 nm	Ruled	6.4	70	750 - 2800 nm	2800 nm	74068
600	1600 nm	Ruled	6.2	85	900 - 2800 nm	2800 nm	74069
400	1200 nm	Ruled	9.7	80	700 - 2500 nm	4.2 µm	74070
400	1600 nm	Ruled	9.6	80	900 - 2900 nm	4.2 µm	74071
300	500 nm	Ruled	12.8	85	250 - 1150 nm	5.6 µm	74072
300	1000 nm	Ruled	12.9	80	575 - 2500 nm	5.6 µm	74073
300	2000 nm	Ruled	12.9	90	1100 - 5000 nm	5.6 µm	74074
246.16	226 nm	Ruled	15.5	85	190 - 450 nm	6.8 µm	74075
200	1000 nm	Ruled	19.3	85	600 - 2200 nm	8.4 µm	74076
150	300 nm	Ruled	25.5	80	190 - 800 nm	11.2 µm	74077
150	800 nm	Ruled	25.6	80	425 - 1600 nm	11.2 µm	74078
150	1250 nm	Ruled	25.7	80	725 - 2800 nm	11.2 µm	74079
150	4000 nm	Ruled	25.8	75	2.5 - 12 µm	11.2 µm	74080
121.6	413 nm	Ruled	31.3	80	250 - 1000 nm	13.8 µm	74081
75	7000 nm	Ruled	51.7	80	4.5 - 20 µm	22.4 µm	74082

* At blaze wavelength.

** The primary wavelength region is where the grating efficiency is $\geq 20\%$. System efficiency will also be affected by the reflectivity of the mirrors and the grating angle at any wavelength.

Příklad z reálného života: Oriel Cornerstone 1/4 m

Table 2 Approximate Resolution of Fixed Slits

Slit Width (μm)	Slit Height (mm)	Resolution @ 546.1 nm** (nm)	Model No.
10	2	0.15	77222
25	3	0.15	77220
50	6	0.25	77219
120	12*	0.4	77218
280	12*	1	77217
600	12*	2	77216
760	12*	2.5	77215
1240	12*	4	77214
1560	12*	5	77213
3160	12*	10	77212
6320	12*	20	77211

* Actual slit height is 18 mm; usable height is 12 mm.

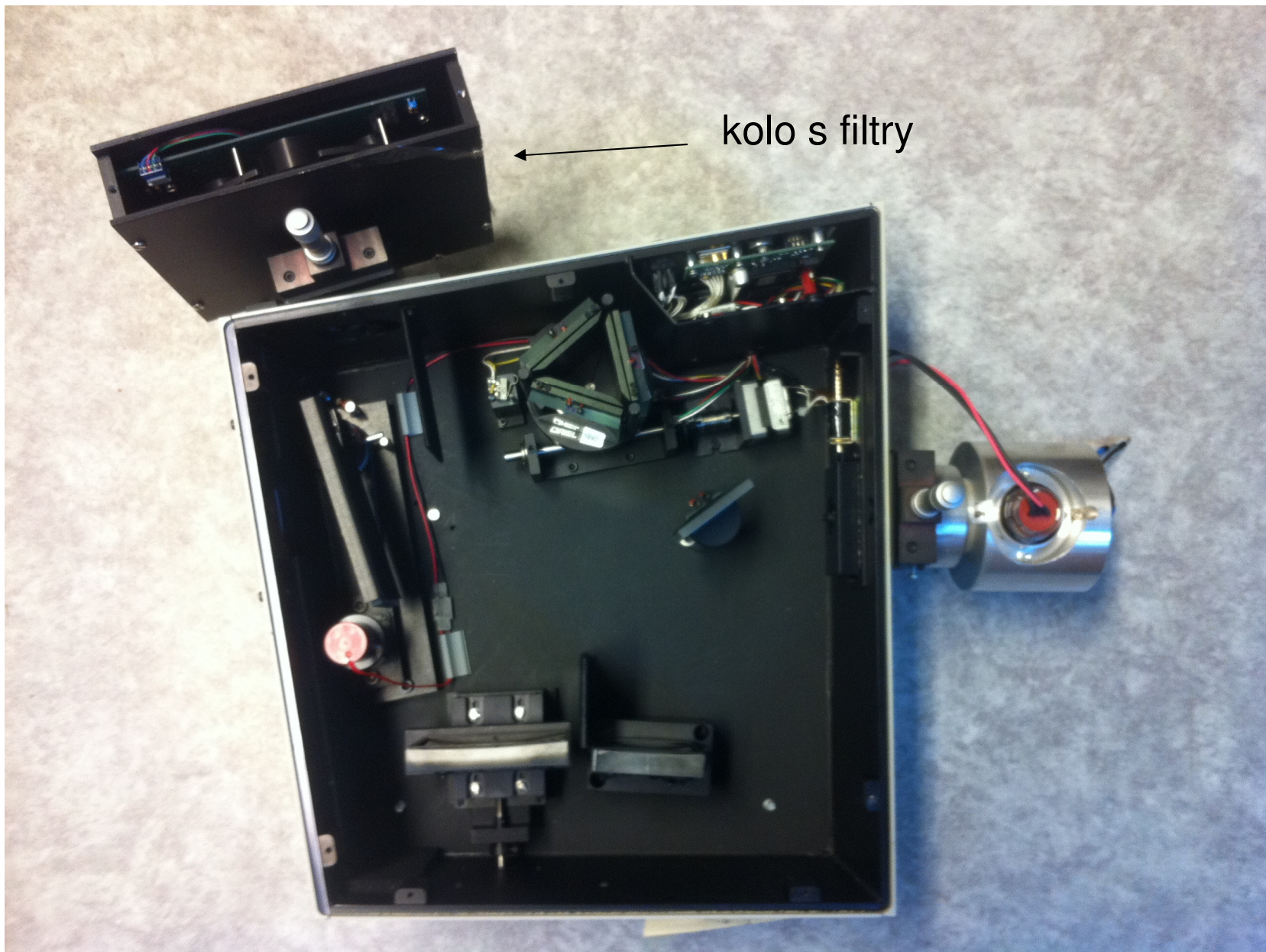
** For 1200 l/mm gratings.

Table 1 Comparison of Oriel Monochromators

Monochromator	Automated	Resolution* (nm)	No. of Gratings Supported	No. of Output ports	Built in Shutter	Standard Computer Interfaces	
						RS-232	IEEE-488
77250 1/8 m		0.40	1	1			
77200 1/4 m		0.15	1	1			
Cornerstone™ 130 1/8 m	✓	0.50	2	1	✓	✓	✓
Cornerstone™ 260 1/4 m	✓	0.15	3	2	✓	✓	✓
MS257™	✓	0.10	4	2	✓	✓	

* 1200 l/mm grating and 10 μm x 2 mm slit.

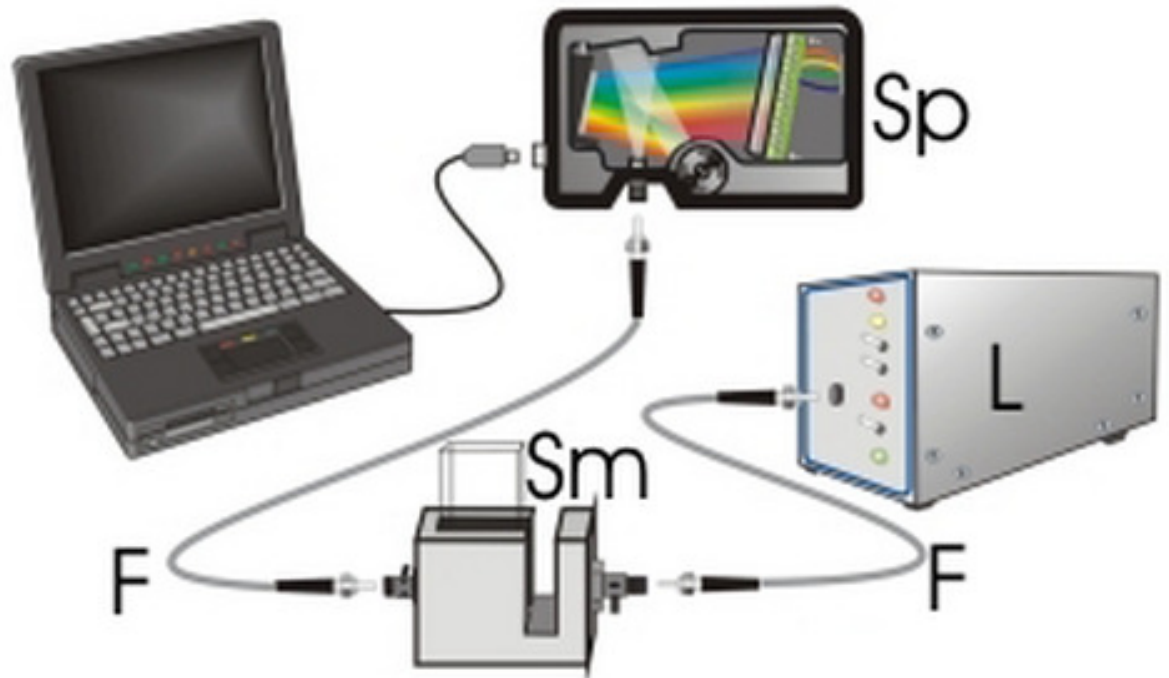
Příklad z reálného života: Oriel Cornerstone ¼ m



Příklad z reálného života: vláknový spektrometr



- rozsah typicky 200-850 nm, ale i dál do NIR
- **multikanálová detekce s lineárním CCD**
- integrační doba ~ **1 ms** – 60 s a více -
(*in situ* aplikace, mapování)
- signál/šum ~ 100-1000, (relativně velký šum)
- rozlišení ~ 2nm (2048 elementů)
- relativně nízká cena (už od 40 tisíc Kč)



Příklad z reálného života: vláknový spektrometr

velký rozsah= malé rozlišení

Table 2 Example of Spectral range and gratings

Use	Useable range (nm)	Spectral range (nm)	Lines/mm	Blaze (nm)	Order code
UV/VIS/NIR	200-1100	900	300	300	UA
UV/VIS	200-850	520	600	300	UB
UV	200-750	250-220*	1200	250	UC
UV	200-650	165-145*	1800	UV	UD
UV	200-580	115-70*	2400	UV	UE
UV	220-400	70-45*	3600	UV	UF
UV/VIS	250-850	520	600	400	BB
		800			VA

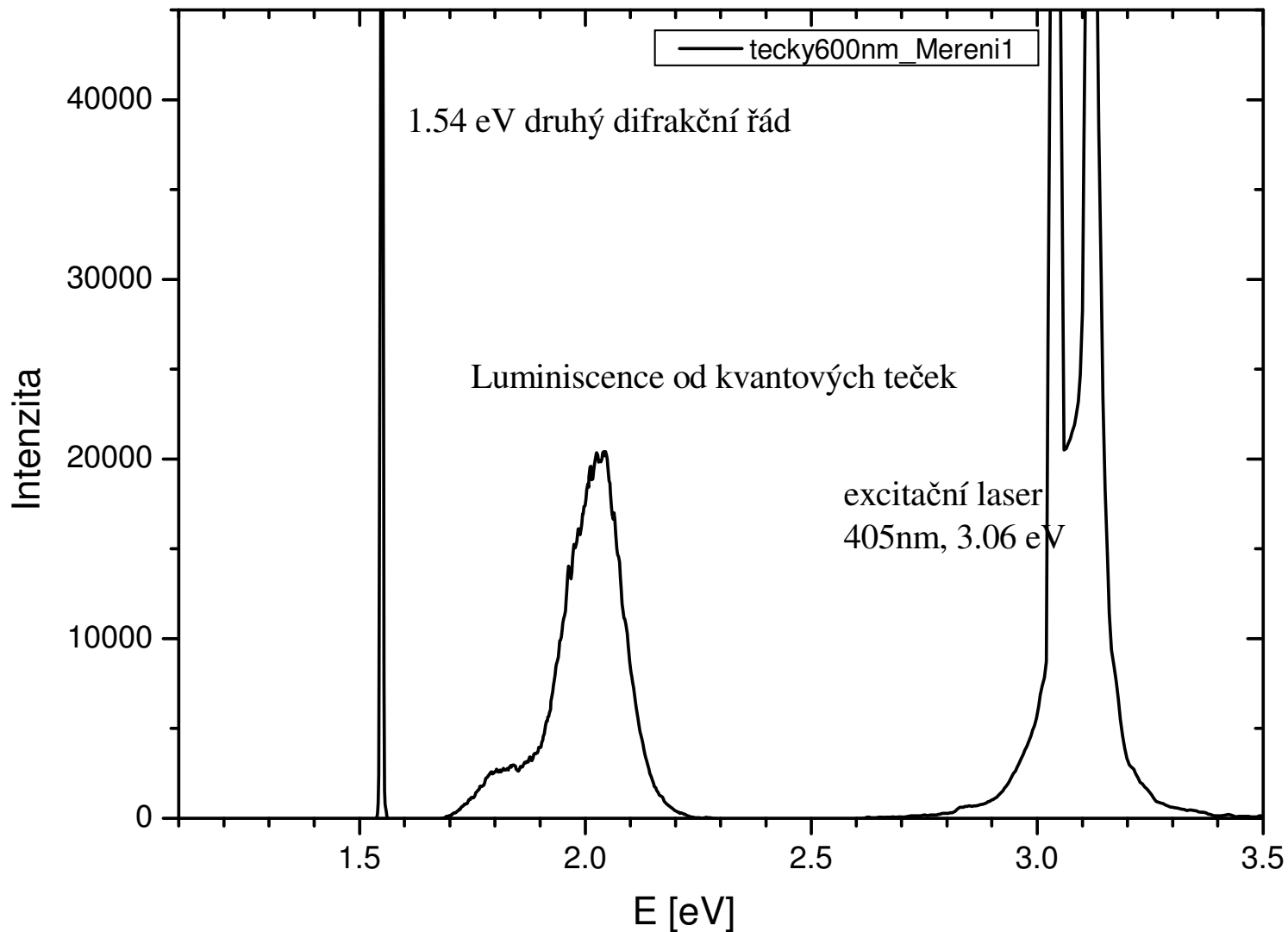
malý rozsah= velké rozlišení

Please select Spectral range bandwidth from the useable Wavelength range, for example: grating UE (200-315 nm)
 * the spectral range depends on the starting wavelength of the grating: the higher the wavelength, the smaller the range. For example: Grating UE (510-580 nm)

The order code is defined by 2 letters: the first is the Blaze (U= 250/300 nm or UV for holographic, B=400 nm, V=500 nm or VIS for holographic, N=750 nm, I=1000 nm) and the second the nr of lines/mm (Z=150, A=300, B=600, C=1200, D=1800, E=2400, F=3600 lines/mm)

Příklad z reálného života: vláknový spektrometr

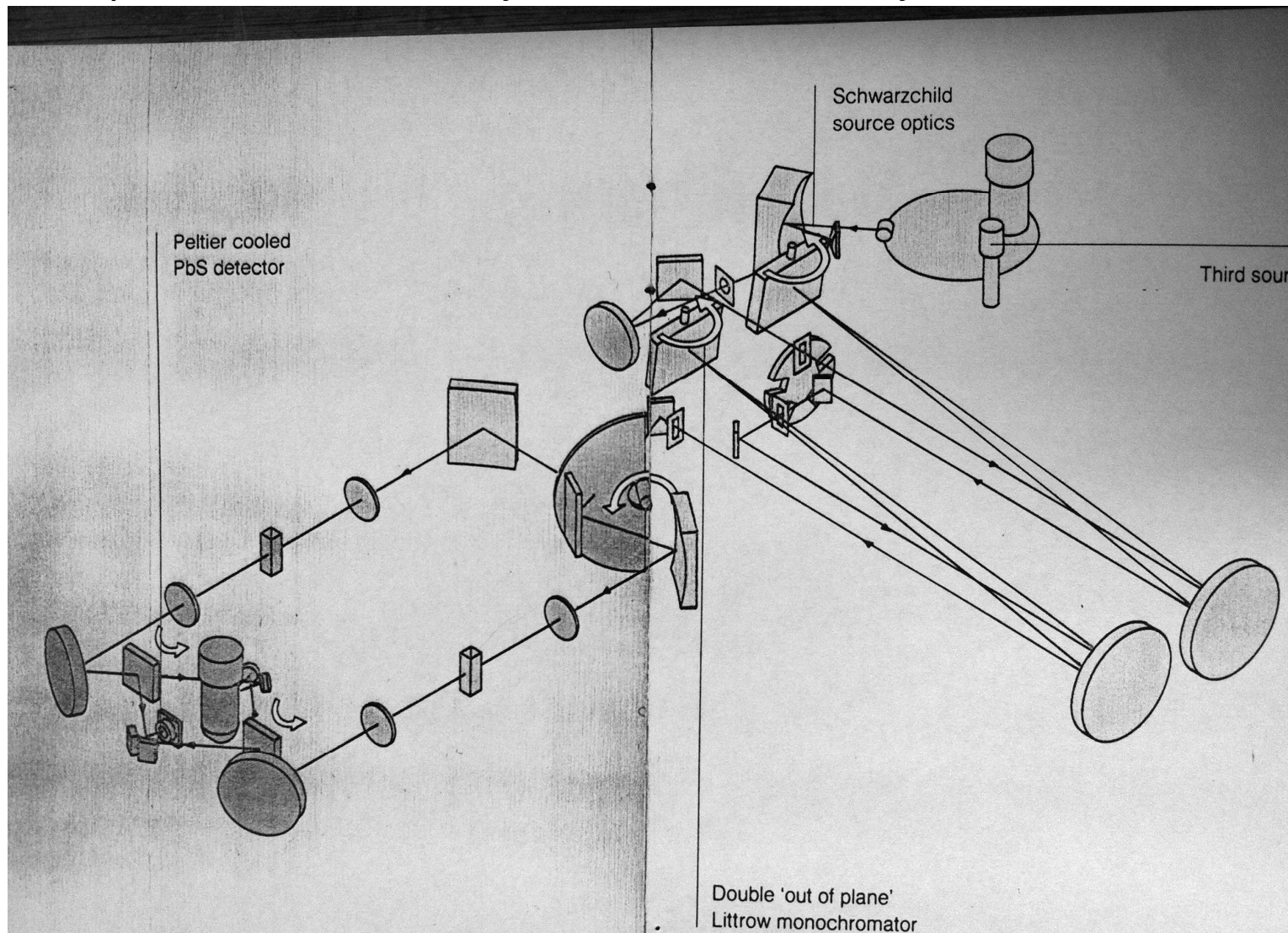
Při širokorozsahových mřížkách je nebezpečí detekce druhých řádů.
Při silných intenzitách nutno použít filtr.



- spektrometr Varian Cary 5E
- frekvenční rozsah 0.4-6.5 eV (3000 - 185 nm)

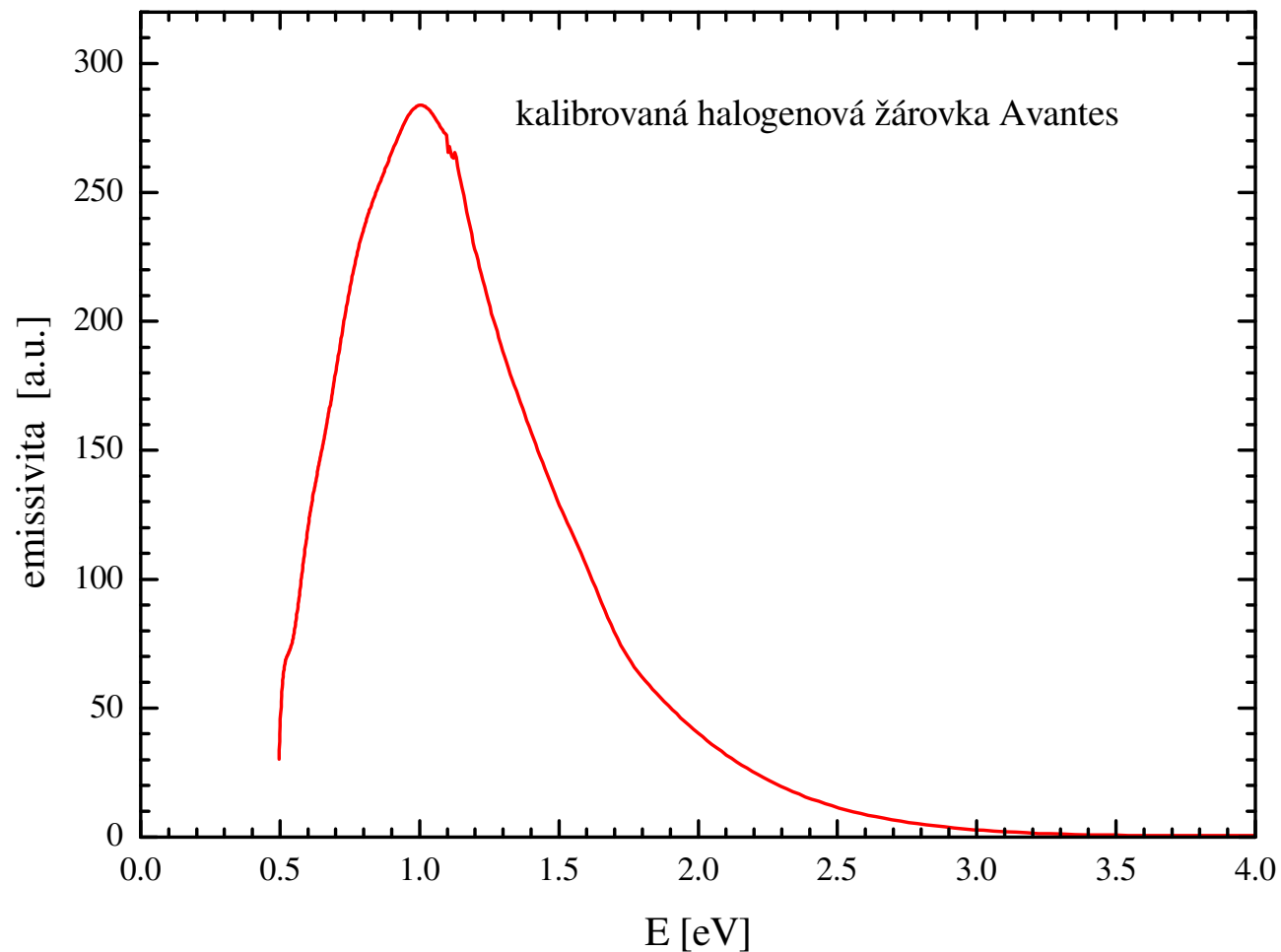


- dvoukanálově měření pro odstranění časové nestability
- PbS detektor, zakázaný pás 0,37eV, chlazený Peltierovým efektem
- fotonásobič pro VIS-UV
- halogenová žárovka (IR –VIS), deteriová výbojka (UV)
- disperzní dvoumřížkový monochromátor, vysoké rozlišení ~ 0.1 nm



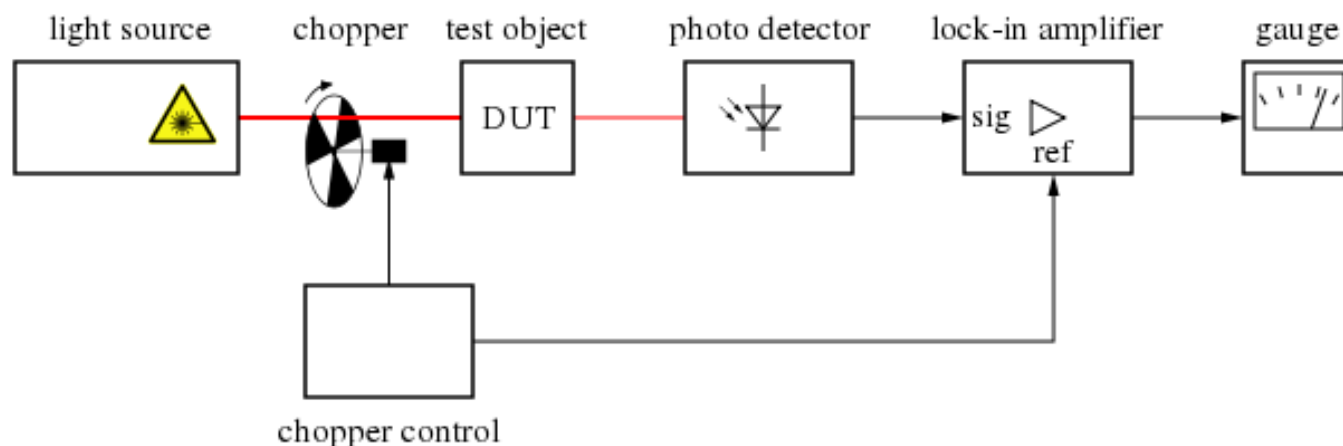
intenzitní kalibrace spektrometru

- nutná hlavně pro emisní spektrometrii, luminiscence, ramanskou spektroskopii v širokém frekvenčním rozsahu
- kalibrované lampy (D, Xe výbojky, halogenové žárovky)
- tato propustnost spektrometru závisí na polarizaci



synchronní zesilovač

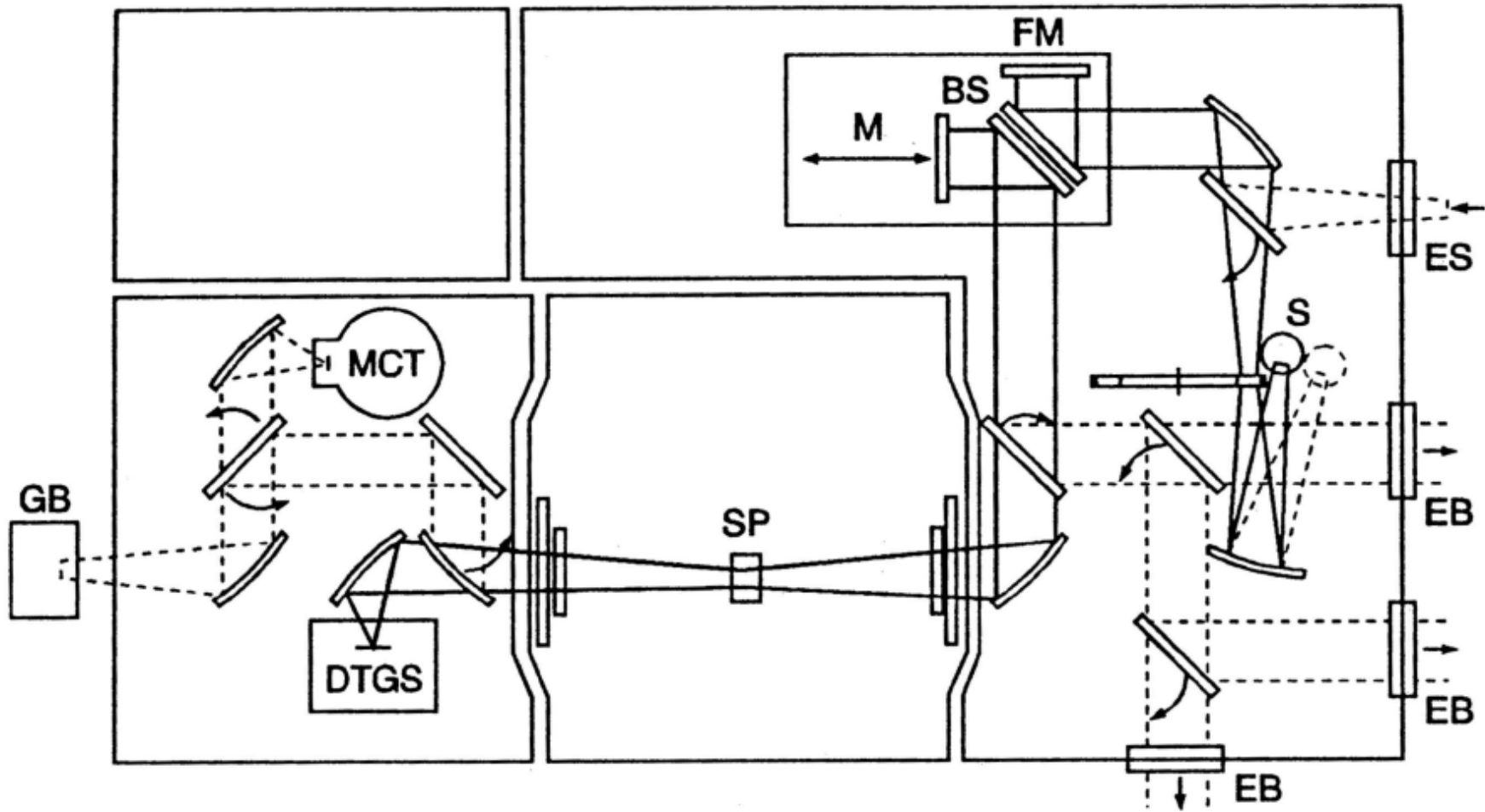
- pro odstranění (potlačení) vlivu světla z okolí je ideální modulace světla (chopper) a následná detekce s použitím synchronního zesilovače (lock-in amplifier, někdy „phase sensitive detector“)



- synchronní zesilovač integruje měřený signál s frekvencí danou modulací což velmi potlačuje jakýkoliv nemodulovaný signál (šum, přímé světlo z okolí apod).

$$U_{\text{out}}(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sin [2\pi f_{\text{ref}} \cdot s + \varphi] U_{\text{in}}(s) ds$$

Fourierovský spektrometr



- Fourierovský spektrometr (Bruker IFS 66v)
- spektrální informace určena interferometricky – měření pásma frekvencí najednou

předpokládejme že zdroj emituje monochromatickou vlnu:

$$E(r, t) = E_0 \cos(k_0 r - \omega_0 t)$$

detektor: $E_D(r, t) = \frac{E_0}{2} \{ \cos(k_0 r_D - \omega_0 t) + \cos[k_0(r_D + 2x) - \omega_0 t] \}$

detektor: $I(x) = \text{konst } \epsilon_0 \langle E^2 \rangle = \text{konst } \frac{\epsilon_0}{4} E_0^2 [1 + \cos(4\pi\nu_0 x)]$

vlnočet: $\nu_0 = k_0 / 2\pi$

při polychromatickém zdroji s intenzitou $I(\nu)$ je intenzita na detektoru

$$I(x) = \frac{1}{2} \int_0^\infty I(\nu) [1 + \cos(4\pi\nu x)] d\nu$$

střední intenzita : $I'(x) = I(x) - \frac{1}{2} \int_0^\infty I(\nu) d\nu = \frac{1}{2} \int_0^\infty I(\nu) \cos(4\pi\nu x) d\nu$

spektrální informaci získáme inverzní Fourierovou transformací přímo měřené veličiny $I'(x)$

$$I(\nu) = 2 \int I'(x) \cos(4\pi\nu x) dx$$

rozišení Fourierovského spektrometru

- konečném rozsahu pohybu zrcadla je spektrum delta funkce

$$I'(\nu') = \frac{I_0}{2} \int_0^\infty \int_{-x_{\max}}^{x_{\max}} \delta(\nu - \nu_0) \cos(4\pi\nu x) \cos(4\pi\nu' x) dx d\nu$$

$$= \frac{I_0 x_{\max}}{2} \frac{\sin[4\pi x_{\max}(\nu_0 - \nu')]}{4\pi x_{\max}(\nu_0 - \nu')},$$

- rozlišení je dané šířkou maxima, $\delta\nu \sim 1/(2x_{\max})$
- optimální rozlišení je pouze pro $r = F(2/R_0)^{1/2}$,
 r -apertura, F fokální vzdálenost, R_0 relativní rozlišení

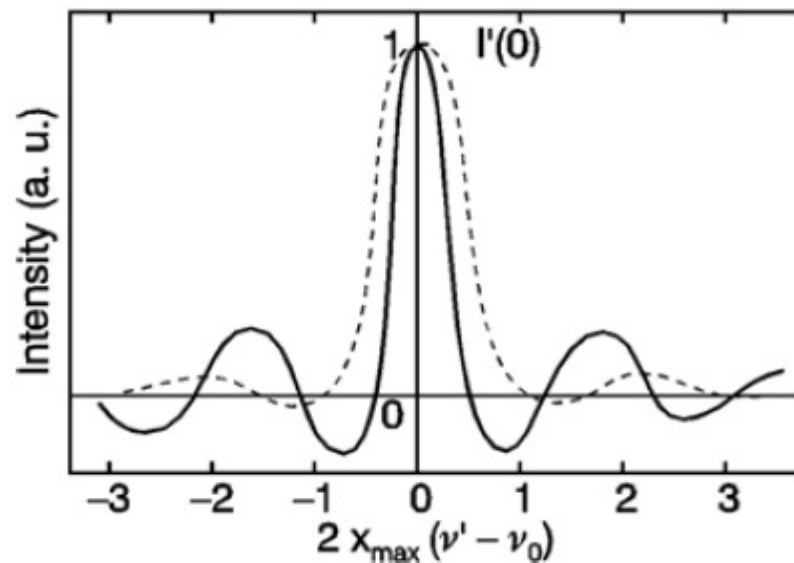


Fig. 10.13. Spectral intensity evaluated for monochromatic light with a Fourier transformation over a limited range in space; (—) without apodization, (---) with apodization

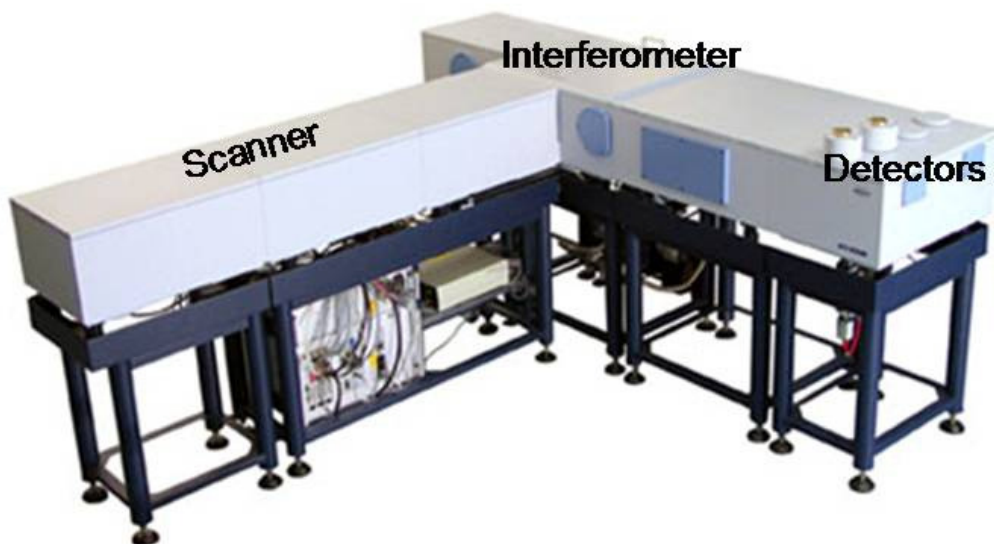


- Fourierovský spektrometr Bruker IFS 66v
- rozlišení 0.2 cm^{-1}

- zdroj globar (glow bar – žhavená tyč SiC na 1450 K)
- detektor DTGS (deuterated tri glycin sulfat), blízkost k feroelektrickému přechodu
- rozsah frekvencí $50\text{-}680 \text{ cm}^{-1}$ (6-90 meV), FIR (far-infrared), dělič svazku $6 \mu\text{m}$ mylar
- rozsah frekvencí $400\text{-}6000 \text{ cm}^{-1}$ (50- 750 meV), MIR (mid-infrared), dělič svazku KBr krystal
- rozsah frekvencí $5000\text{-}11000 \text{ cm}^{-1}$ NIR (near-infrared)
- měření ve vakuu pro odstranění absorpce ve vzduchu

Fourierovské spektrometry s vysokým rozlišením

- spektrometry s vysokým rozlišením $\sim 0.01 \text{ cm}^{-1}$
 - velká dráha pohyblivého zrcadla
- používané pro spektroskopii plynů



S. Civiš *et al.* J. Phys. Chem. 2012

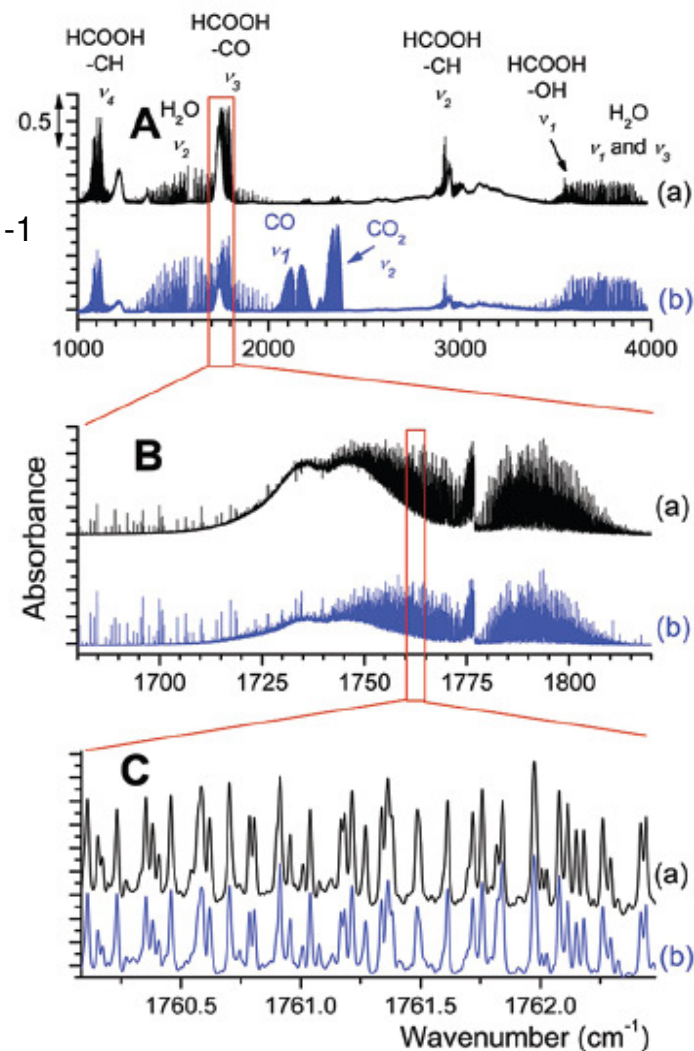
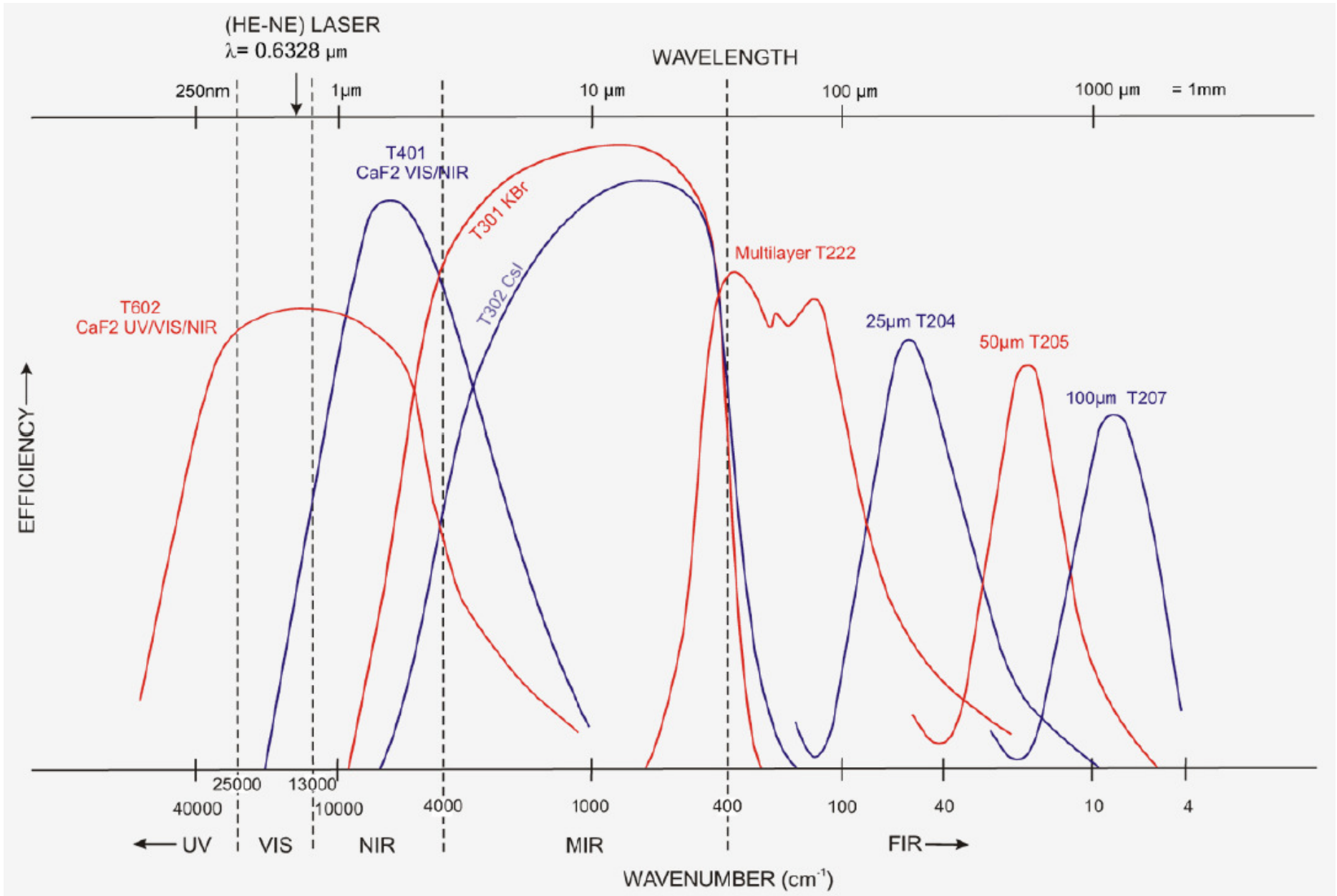
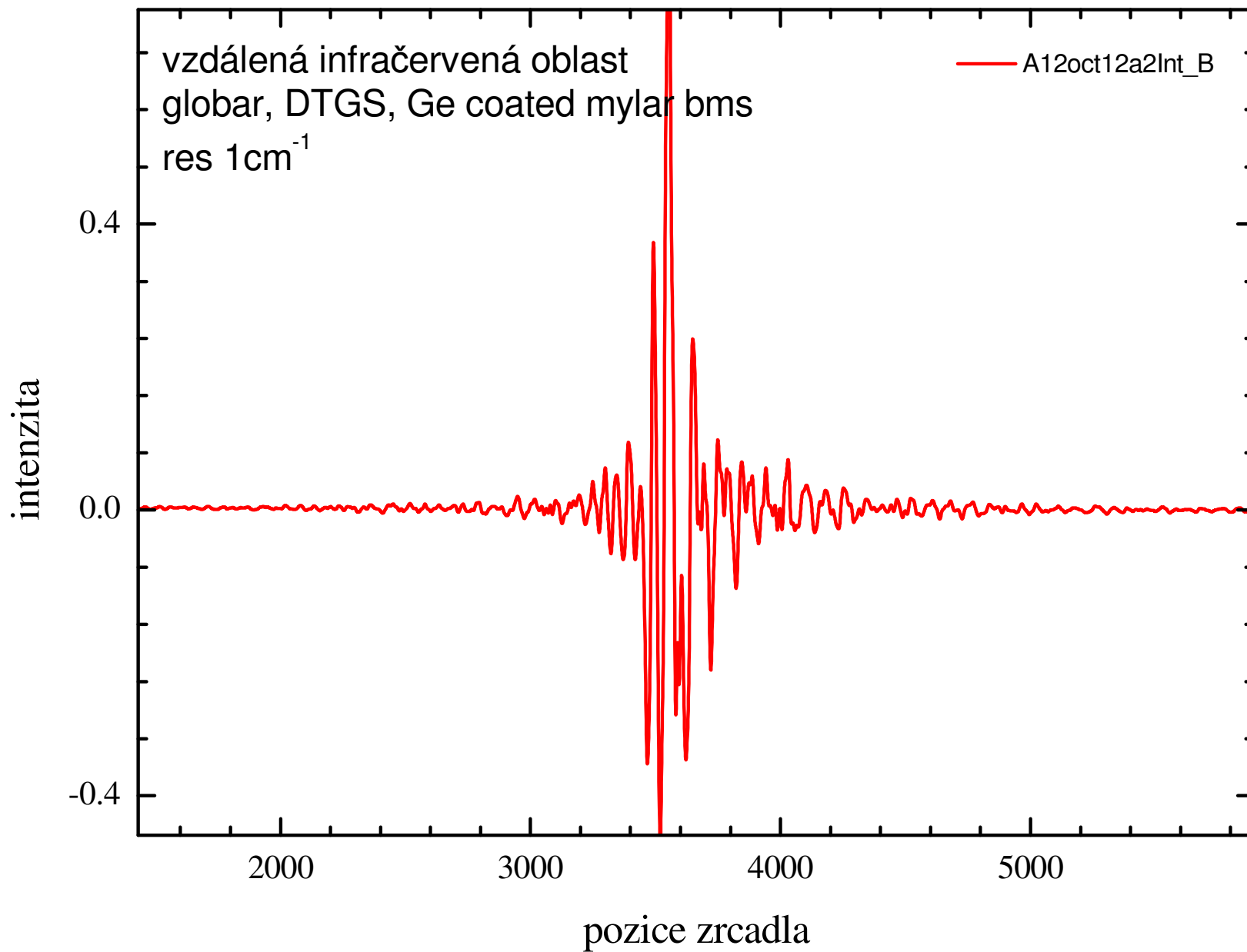


Figure 1. High-resolution FTIR absorption spectra of formic acid in the gas phase over the Ti^{18}O_2 surface in the range of 1000–4000 cm^{-1} (A) and details of the ν_3 band of formic acid (B, C): nonirradiated sample of formic acid (a) and sample with Ti^{18}O_2 irradiated by the XeCl laser (308 nm, 8500 pulses, energy of 150 mJ/pulse) (b).

děliče svazku - beamsplitters



interferogram



signál FIR

