

## 2. Zdroje a detektory světla

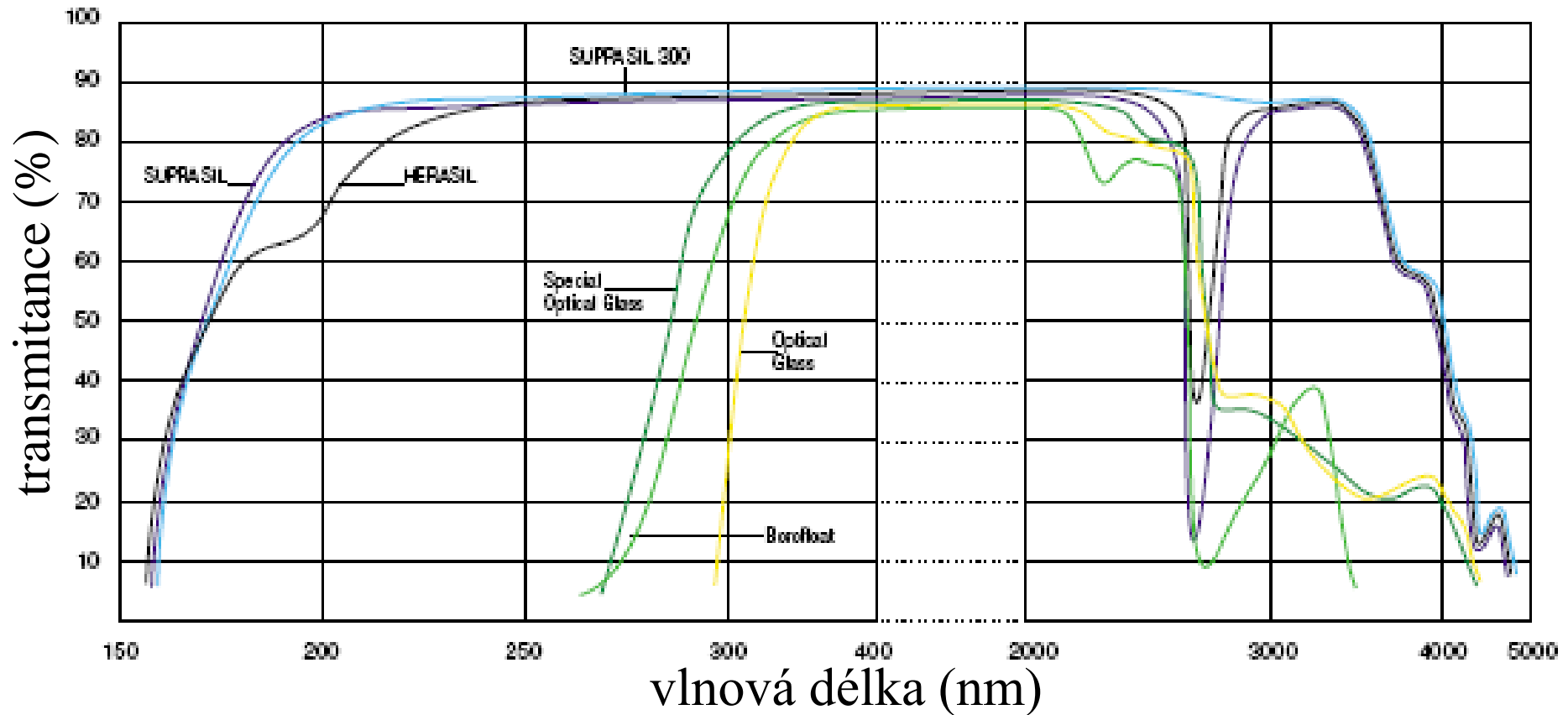
# Spektrální rozsah

Krátkovlnné limity:

Absorpce vzduchu ( $O_2, N_2$ , vodní pára) -  $\lambda < 190$  nm

Propustnost optiky

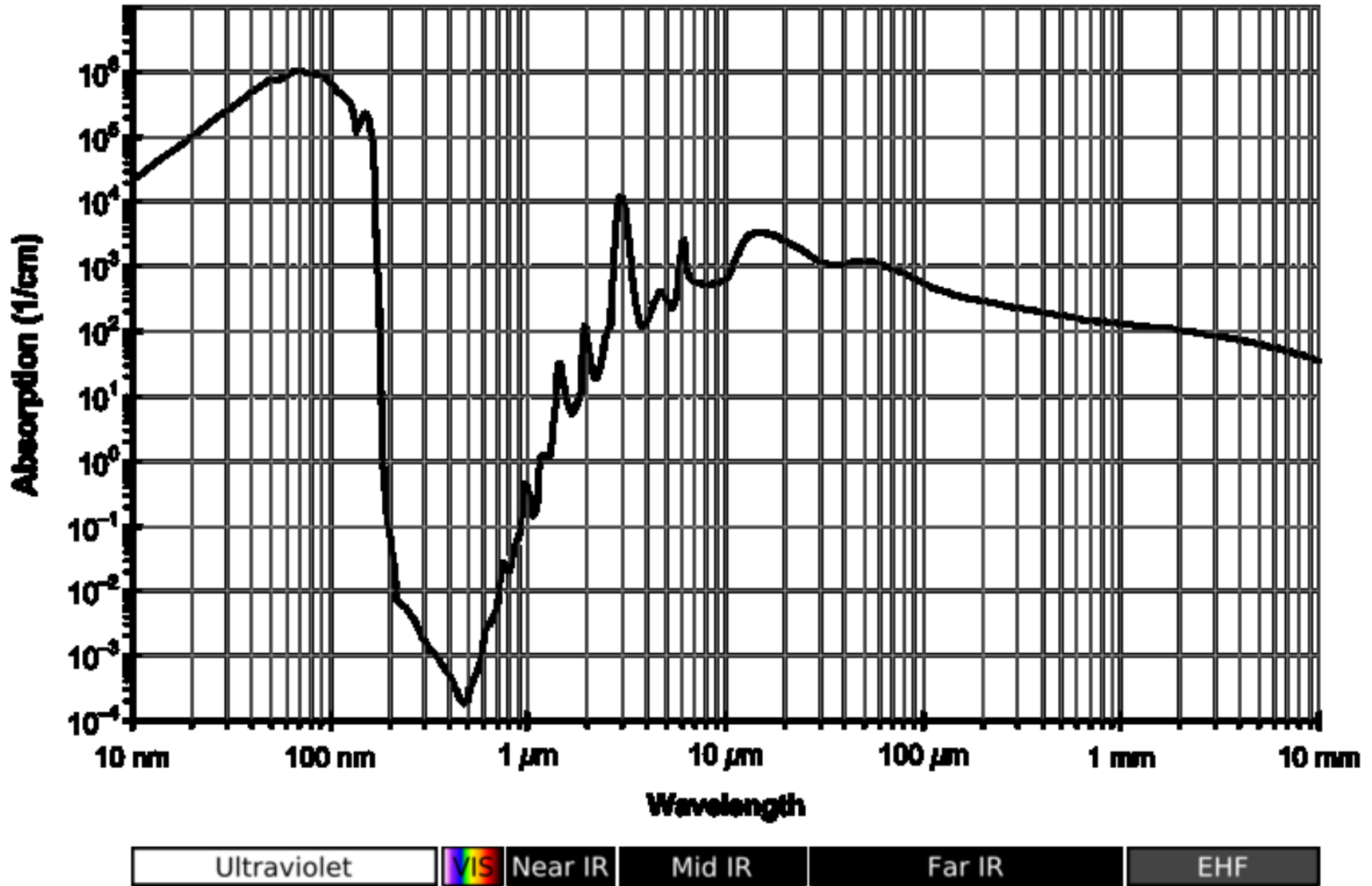
Spektrální rozsah zdroje



Dlouhovlnné limity:

Absorpce vodní páry -  $\lambda > 900$  nm

Spektrální rozsah detektoru



# Zdroje

## Lampy

**rtuťová** – intenzivní ostré čáry bez kontinuálního pozadí, používá se ke kalibraci

**Xenonová** – hladký spektrální profil přes celou VIS oblast (kromě 450-480 nm), nižší výkon v UV, vysoký tlak 8-25 atm, za provozu až 75 atm, nebezpečí exploze, nutná pevná lampová skříň

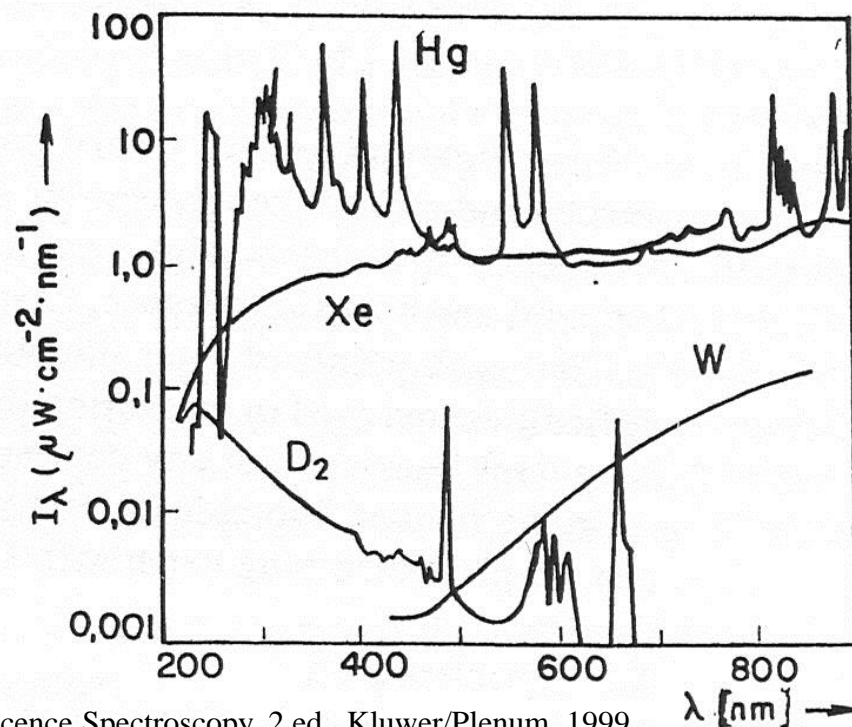
**Hg-Xe** – vyšší výkon v UV než čistě Xe lampa, ale spektru dominují čáry Hg

**Deuteriová** - vysoký výkon v UV, nízký pro VIS

**Halogenové lampy** – klasická žárovka může být v principu také použita, ale její výkon v UV-VIS je velmi slabý. Přidání halogenu umožňuje nažhavit vlákno na vyšší teplotu a tak zvýšit výkon v UV-VIS (Planckův zákon).

Table 2 Mercury Lines

253.7 nm
296.5
302.2
312.6
313.2
365.0
365.5
404.7
435.8
546.1
577.0
579.0



# Lasery

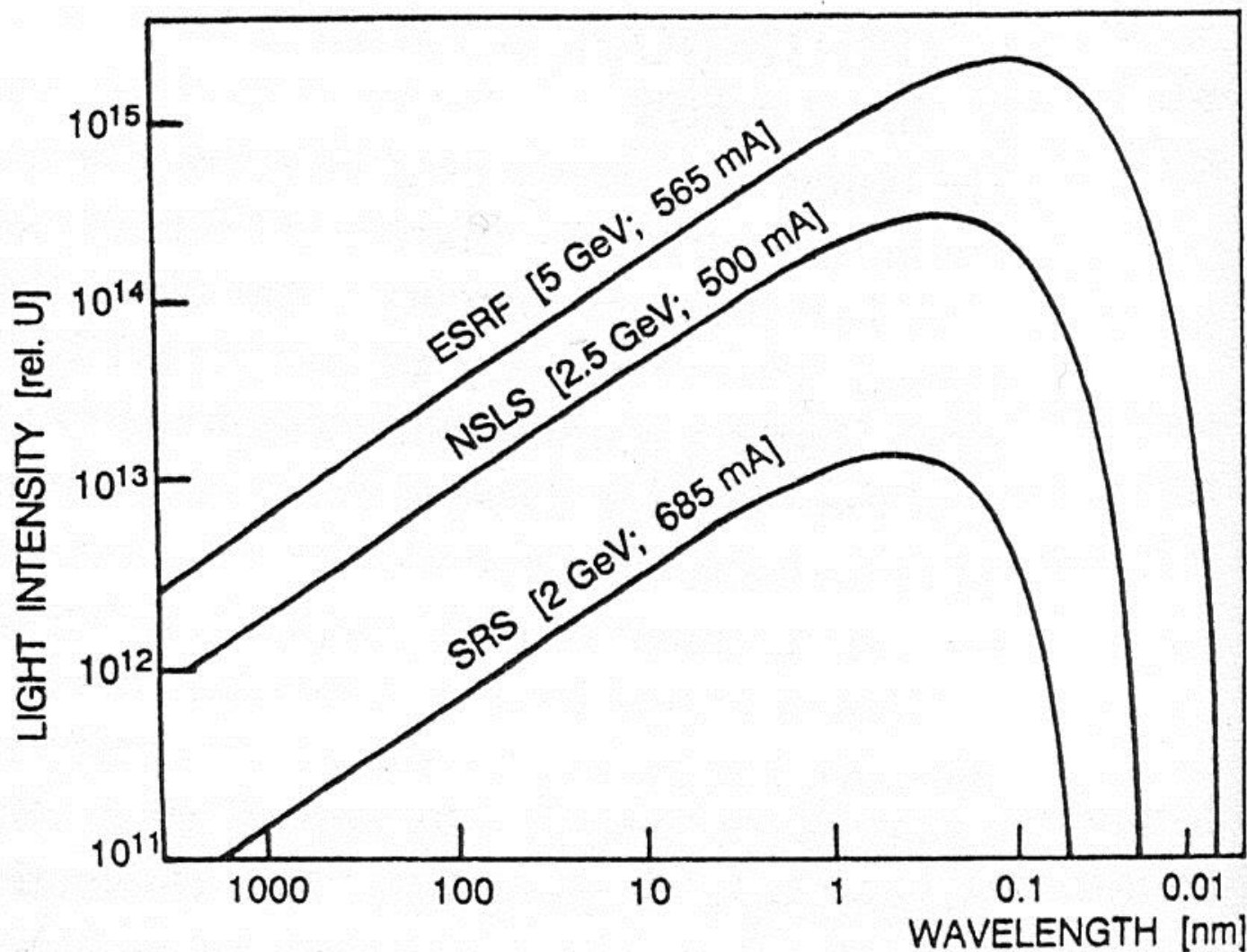
Poskytují o několik řádu větší efektivní výkon než lampy. Pro některé aplikace jsou zajímavé i další vlastnosti, jako malá divergence svazku, vysoká lokální (v prostoru i čase) světelná energie časová a prostorová koherence, paprsek může být polarizován. Nevýhodou je, že světlo je emitováno na jedné (nebo několika málo) vlnových délkách, přičemž oblast UV je špatně dostupná. Částečným řešením jsou barvivové lasery (laditelné v rozsahu 40-70 nm, přičemž jsou dostupná barviva pro oblast od 300 nm výše).

**TABLE 3 Laser Lines**

<u>Argon ion laser</u>	<u>Helium-cadmium laser</u>
528.7 nm	887.8 nm
514.5	865.2
501.7	853.1
496.5	806.7
488.0	728.4
476.5	723.7
472.7	636.0
465.8	645.5
457.9	537.8
454.5	533.7
333.6–363.8 (multiline)	441.6
274.4–305.5 (multiline)	325.0
<u>Krypton ion laser</u>	<u>Helium-neon laser</u>
793.1–799.3 nm	1523.1 nm
752.5	1206.6
676.4	1198.5
647.1	1176.7
568.2	1161.4
530.9	1152.6
520.8	1140.9
482.5	1084.4
476.2	1079.8
468.0	632.8
415.4	629.4
413.1	611.8
406.7	604.5
337.5–356.4 (multiline)	594.5
(Note: the UV part is absent in low-power lasers)	543.0

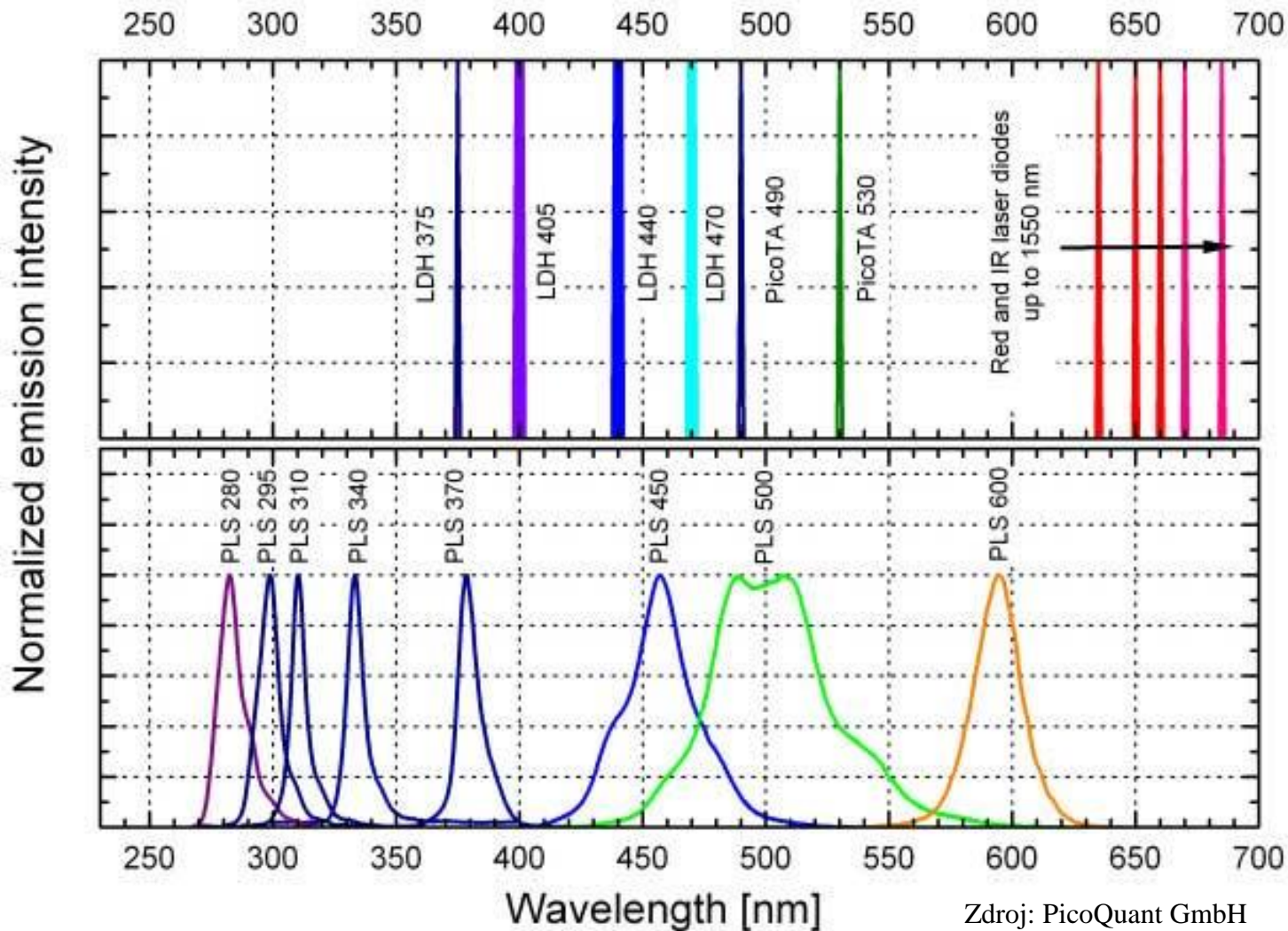
# Synchrotronové záření

Představuje ideální zdroj – spektrum je hladké v celé oblasti UV-VIS-IR, s vysokým výkonem, bezkonkurenční zvláště v UV. Nevýhodami jsou rozměry a cena.



# Světelné diody (LED) a laserové diody

Představují kompromis mezi lampami a lasery, co se týče výkonu, spektrální šířky, či kolimace svazku. Atraktivní je jejich cenová dostupnost.



Zdroj: PicoQuant GmbH

# Pulsní charakteristiky zdrojů

## Pulsní lampy

Spektrální rozsah je dán plynem, kterým je lampa naplněna – nejčastěji se používají xenonová, Xe-Hg a dusíková lampa.

Typická šířka pulsu je  $\sim 2$  ns.

## Pulsní lasery

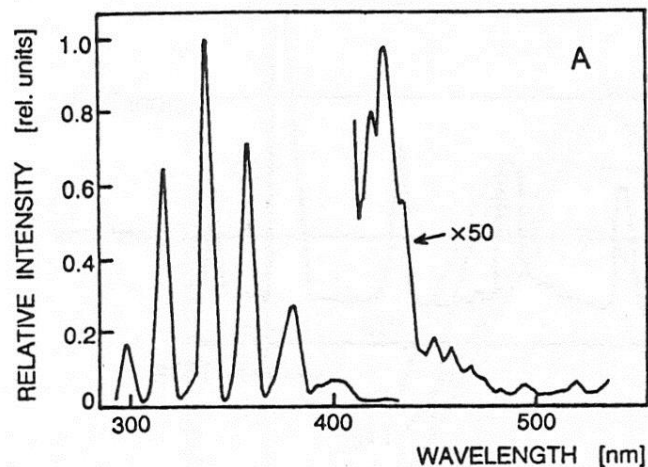
Velmi krátké pulsy (až 20 fs) při vysokém výkonu a opakovací frekvenci.

## Synchrotronové záření

Široký spektrální rozsah, typická délka pulsu 0,6-0,8 ns, pulsy mají stabilní gaussovský tvar (výhodné při dekonvolucích), vysoká opakovací frekvence (až 100 MHz).

## Pulsní LED

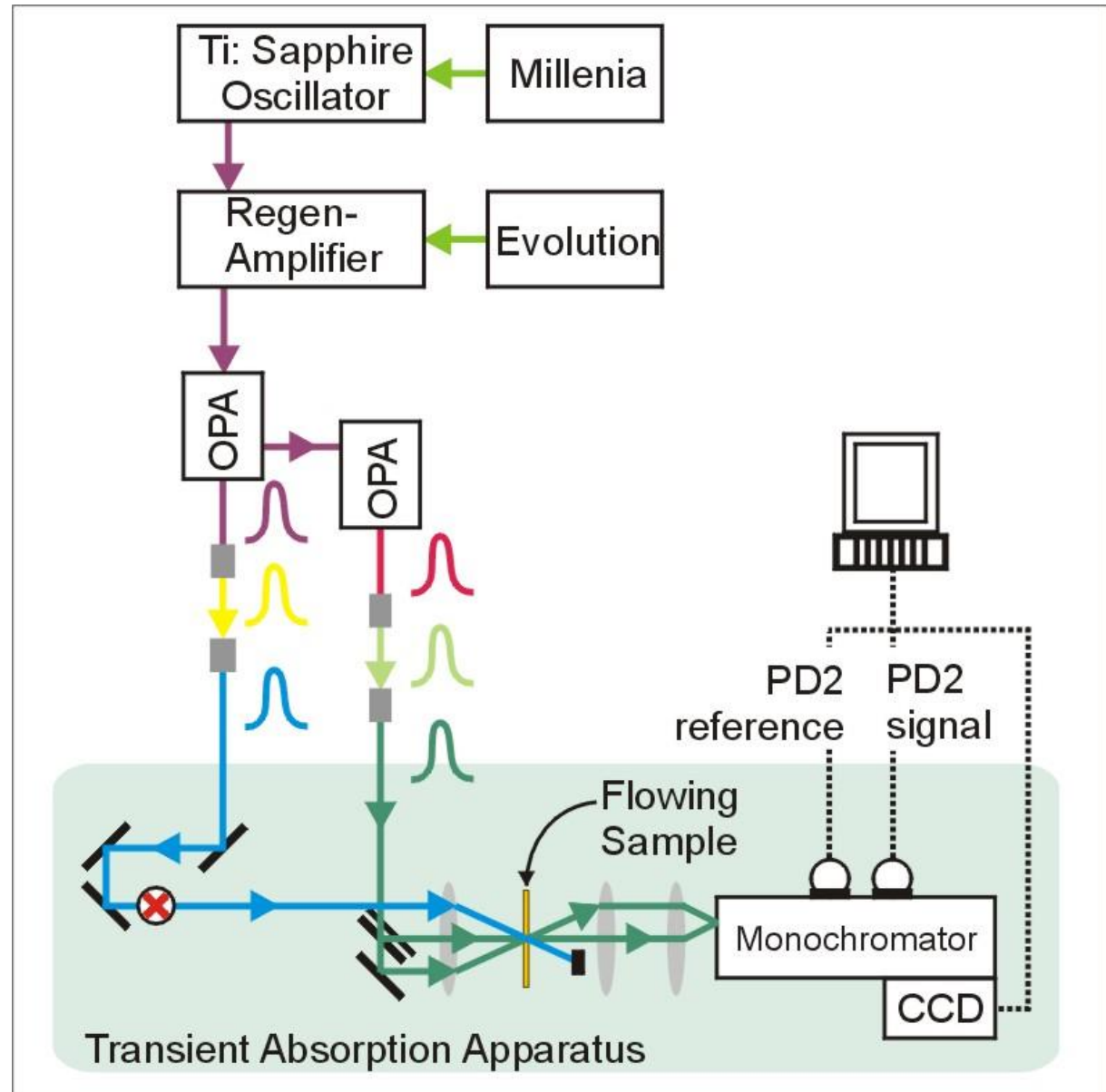
Opět kompromis mezi lampami a lasery, typická šířka pulsu 0,3-0,9 ns, pulsní laserové diody 50-90 ps.





# Ti:Sapph laser (přechodová absorpce)

Krátké pulsy ( $<10$  fs) s vysokým výkonem (až řádově MW v pulsu) ve spektrální oblasti 700-1000 nm. Použití optických krystalů umožňuje zdvojení či ztrojení frekvence. Dělič svazku umožňuje použít tentýž puls současně jako budící i měřící.



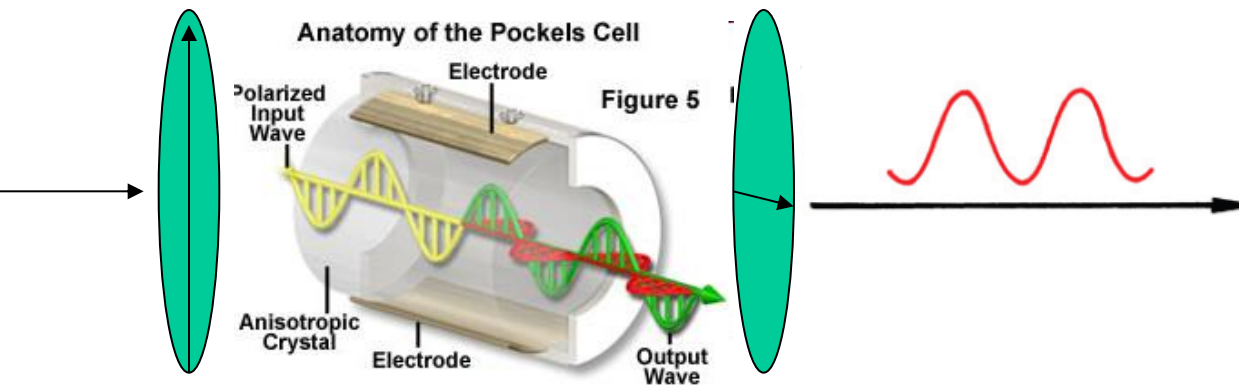
# Harmonicky modulované světlo

Výkon některých zdrojů lze modulovat elektronicky (diody)

Zdroje produkující kontinuální světlo lze modulovat elektrooptickým modulátorem (ve starších přístrojích akustooptickým modulátorem).

Polarizátor

Polarizátor



# Totální vnitřní reflexe (total internal reflection)

Snellův zákon:  $n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \alpha_2$

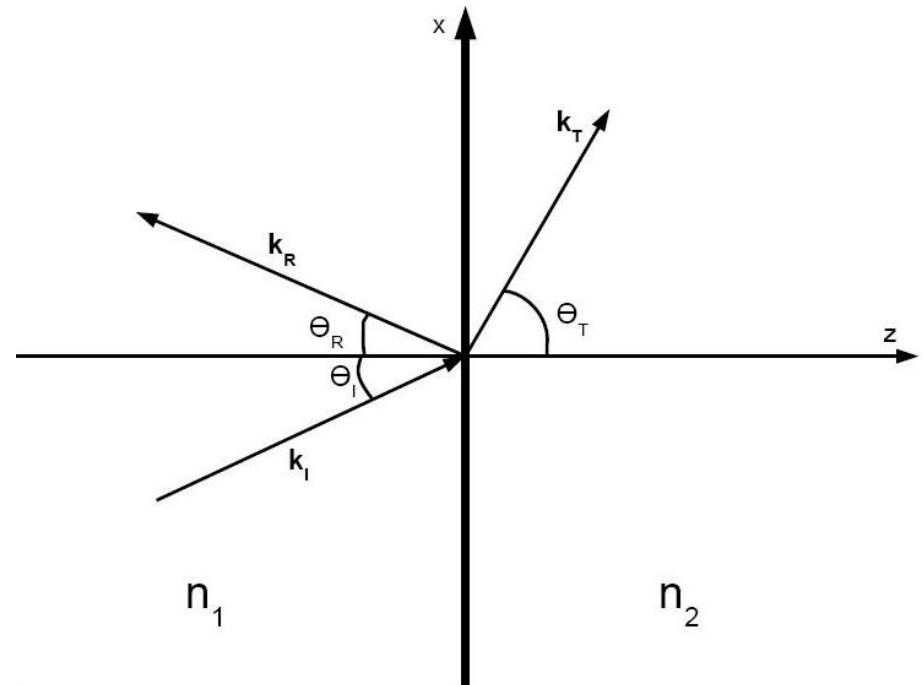
Kritický úhel:  $\theta_c = \arcsin(n_2/n_1)$

Při hodnotách větších vzniká v druhém prostředí **evanescentní vlna**

$$\mathbf{E}_T = \mathbf{E}_0 e^{-\kappa z} e^{i(kx - \omega t)}$$

$$\kappa = \frac{\omega}{c} \sqrt{(n_1 \sin(\theta_I))^2 - n_2^2}$$

$$k = \frac{\omega n_1}{c} \sin(\theta_I)$$

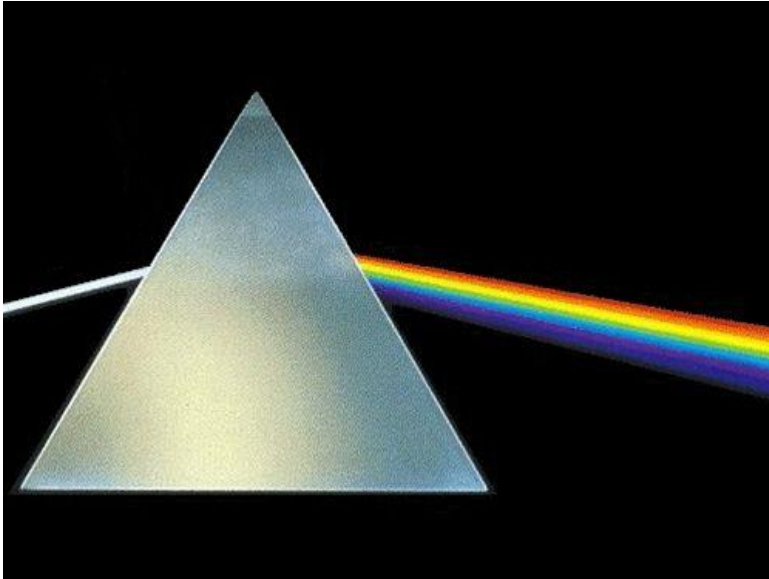


vlna se šíří ve směru osy x, ve směru osy z je exponenciálně tlumená

rychlost tlumení je možné ovlivnit nastavením úhlu dopadajícího paprsku

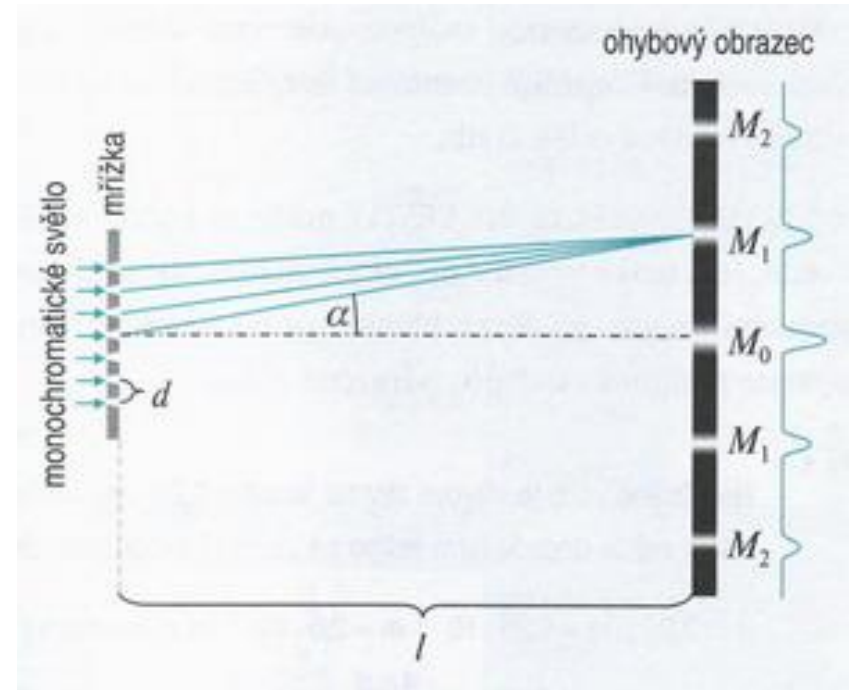
# Spektrální rozklad světla

## Hranol



Pro lom na rozhraní platí  
 $n_1(\lambda) \sin \alpha_1 = n_2(\lambda) \sin \alpha_2$

## Mřížka



Interferenční podmínka  
 $d (\sin \alpha_D + \sin \alpha_V) = k \lambda$   
kde  $\alpha_D$  a  $\alpha_V$  jsou úhly, pod  
kterými paprsek dopadá na a  
vychází z mřížky

# Monochromátory

Obsahují disperzní element – hranol nebo (většinou)

**mřížku**

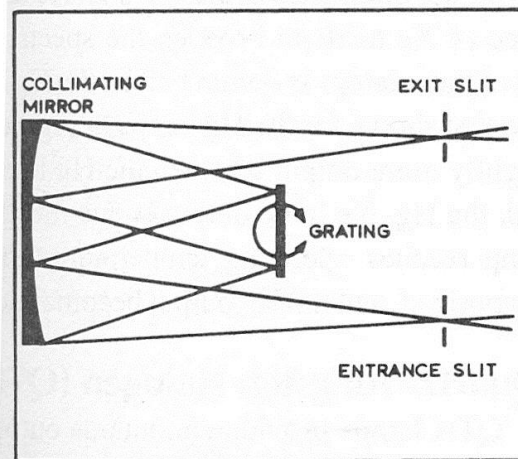
Spektrální rozlišení je dané **kvalitou mřížky** (počet vrypů na mm) a otevřením **štěrbín** (ale – intenzita prošlého světla roste kvadraticky s šířkou štěrbin)

Mřížkový monochromátor propouští i druhou harmonickou frekvenci.

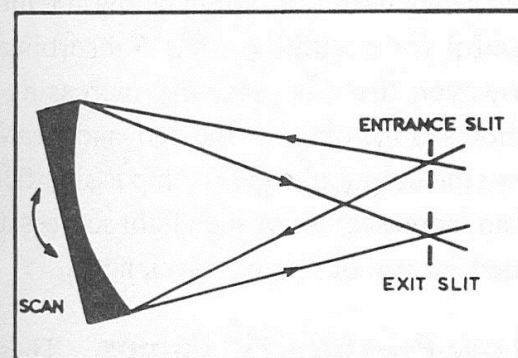
Důležitou charakteristikou je tzv. **blaze-wavelength**

Odlišná účinnost průchodu fotonů s různou polarizací a různou vlnovou délkou

Pro fotony s různou vlnovou délkou může být odlišná i doba průchodu monochromátorem.

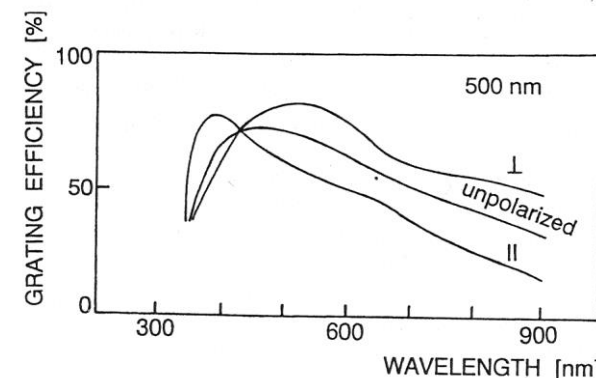
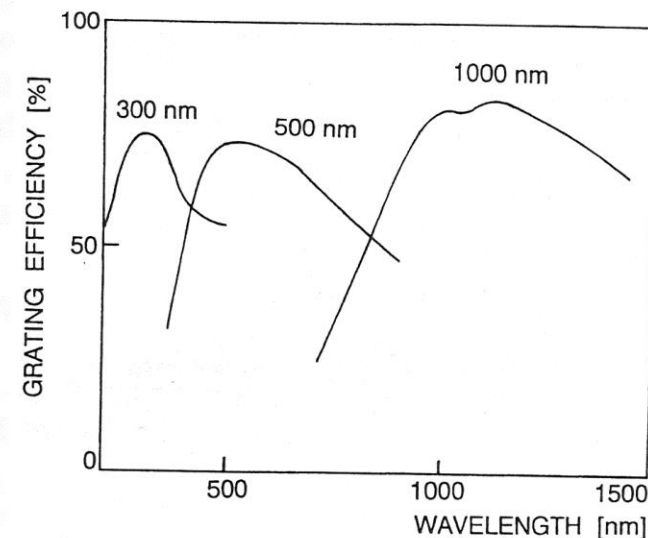


Plane Grating



Concave Grating

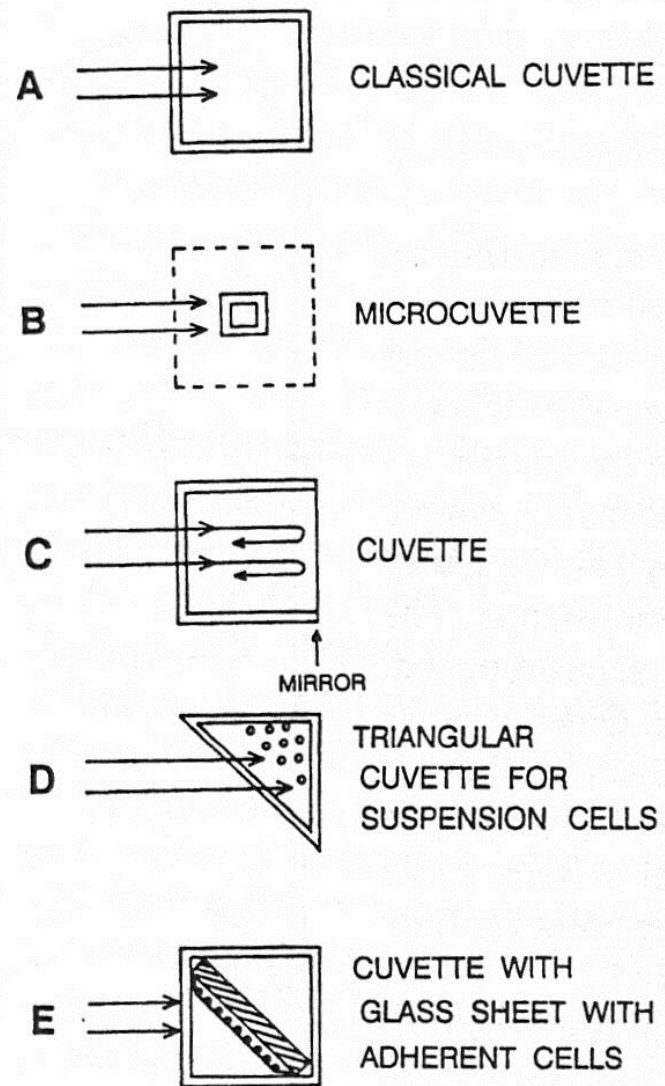
## Blaze-wavelength



# Vzorky

Roztoky se standardně dávají do kyvet, které bývají ze skla, křemene, či z plastu. U skleněných a plastových kyvet je třeba dát pozor na jejich omezenou propustnost v UV.

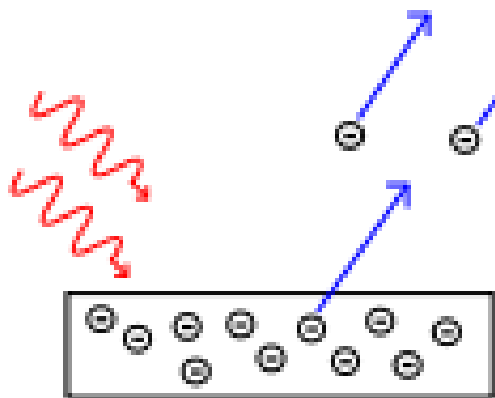
Absorpční kyvety mívají dvě protilehlé stěny matné.



# Detektory

## Vnější fotoelektrický jev

dopadající záření vyrazí elektron



$$h\nu = W + E_K$$

↑  
výstupní práce

↙ energie fotonu      ↘ kinetická energie  
vyraženého elektronu

## Vnitřní fotoelektrický jev

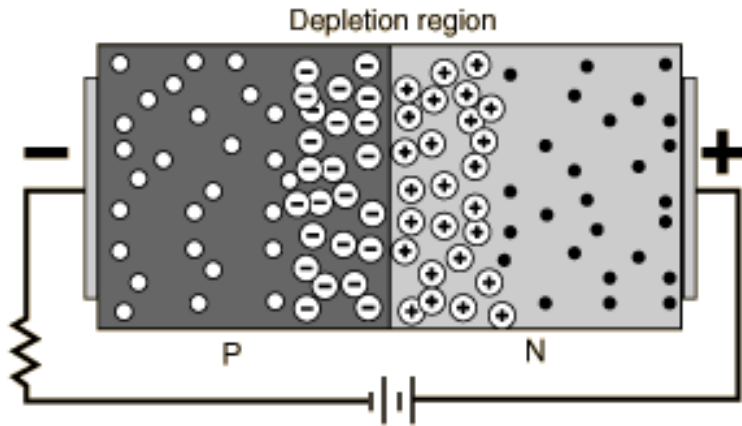
Přechod elektronu z valenčního pásu do vodivostního pásu při dopadu na PN rozhraní dochází ke generaci volných nosičů náboje  
dopadající foton musí mít energii minimálně rovnou šířce zakázaného pásu.

Polovodič	CdS	GaP	GaAs	<b>Si</b>	<b>Ge</b>	PbS
$\lambda_0$ [ $\mu\text{m}$ ]	0.52	0.56	0.92	1.1	1.8	2.9

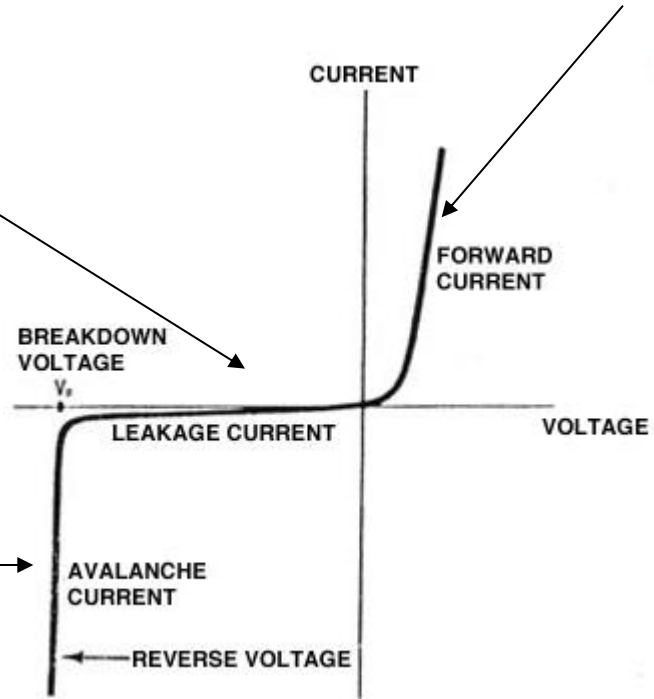
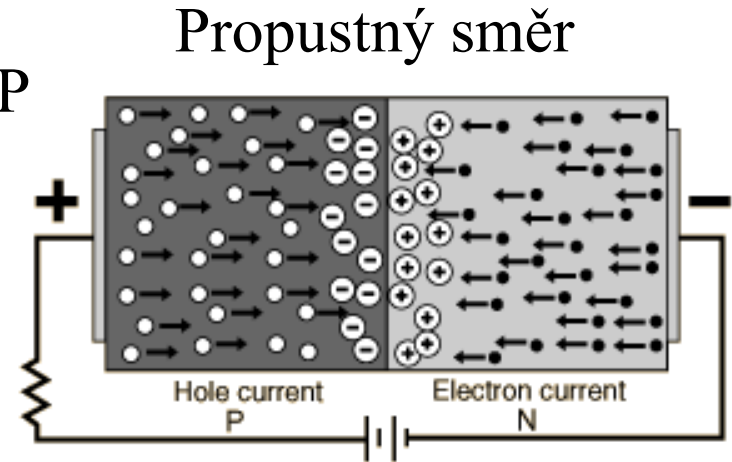
# Dioda

Vznikne spojením polovodiče typu P s polovodičem typu N, na jejich rozhraní vznikne hradlová vrstva

Závěrný směr



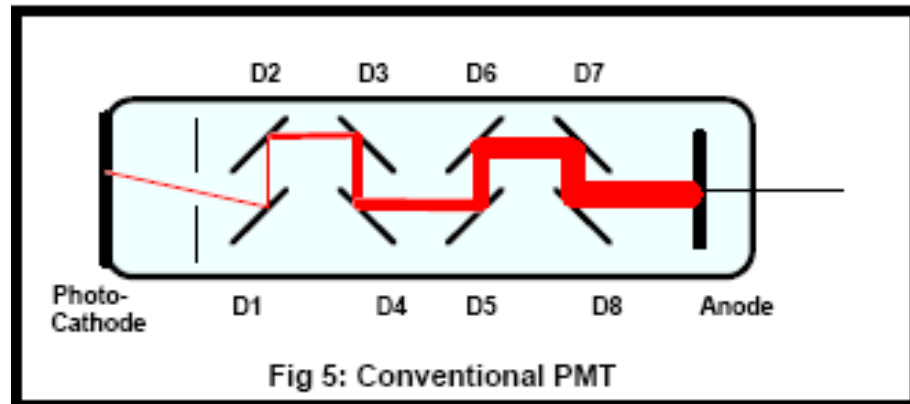
Průraz





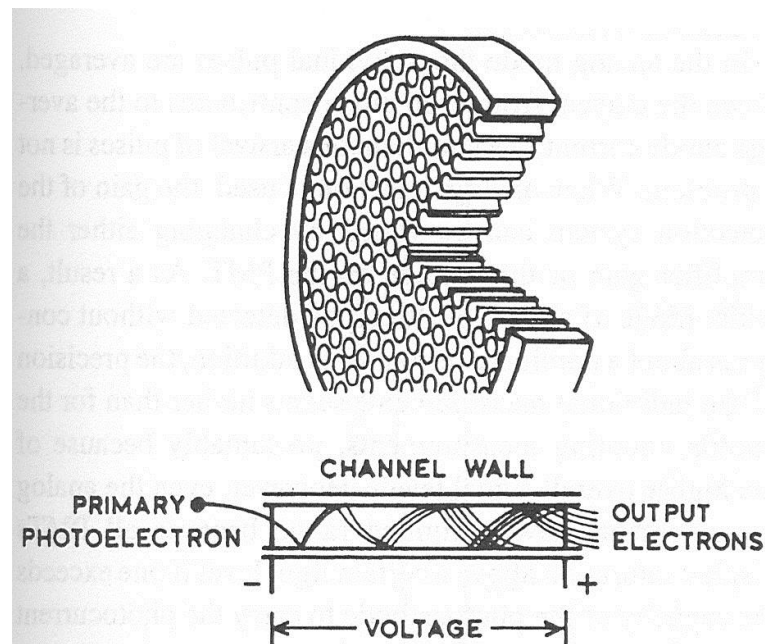
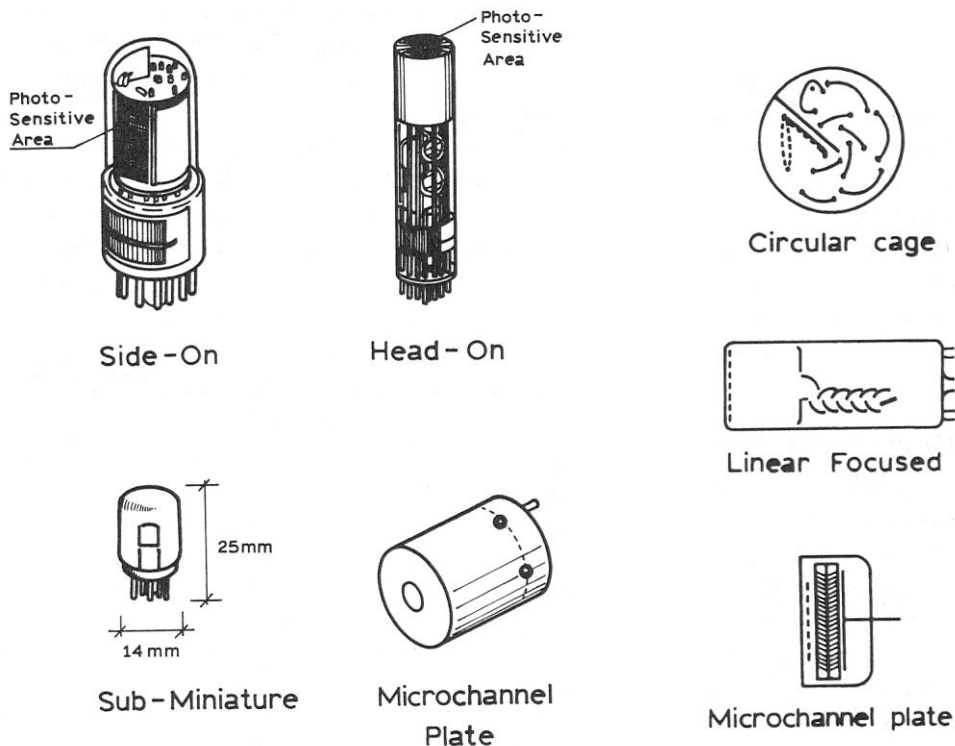
# Vnější fotoelektrický jev

Nejčastěji používaným detektorem je **fotonásobič**. Dopadající foton vyrazí z fotokatody elektron, který je elektrickým polem urychlen a po nárazu na dynodu z ní vyrazí spršku sekundárních elektronů. Ty jsou opět urychleny a narazí do další dynody, atd. Fotonásobiče mívají 7-15 dynod, což způsobí zesílení signálu faktorem  $10^5$ - $10^9$ .

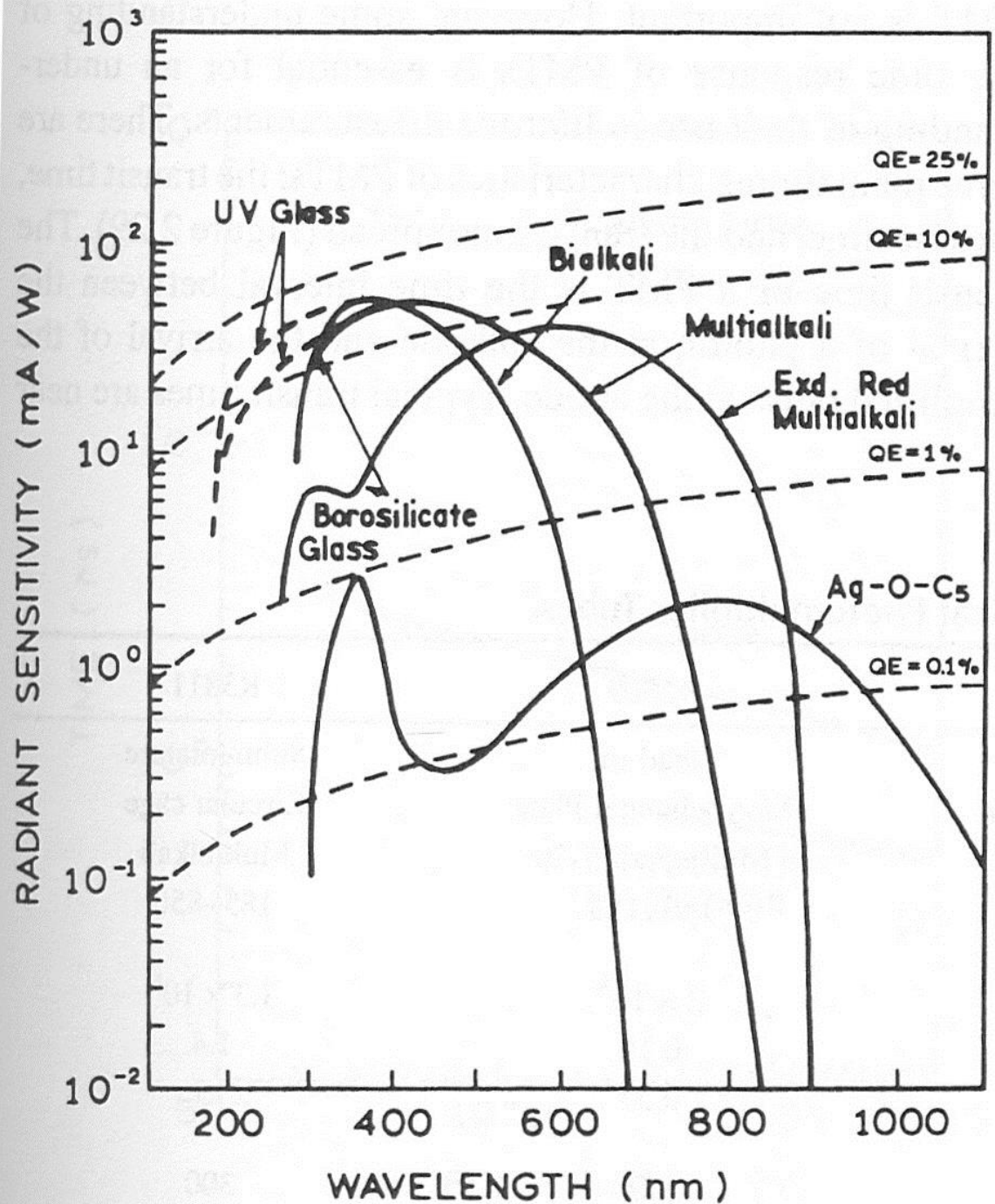


Lakowicz – Principles of Fluorescence Spectroscopy, 2.ed., 1999

## Mikrokanálová destička (MCP)



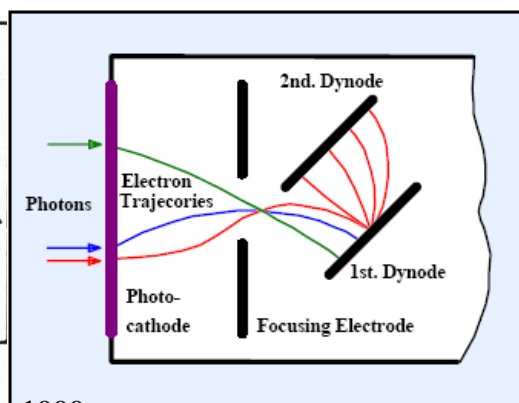
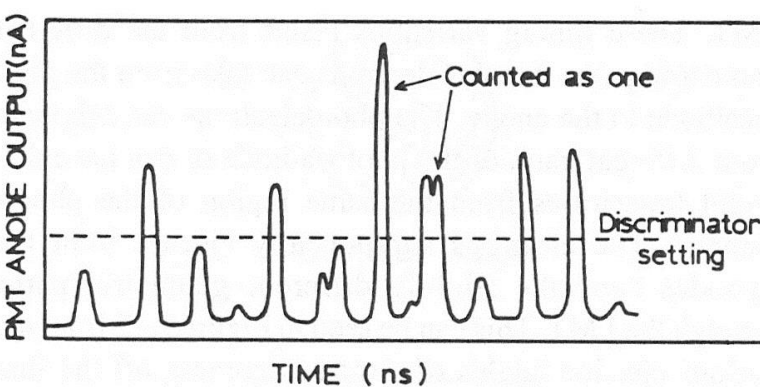
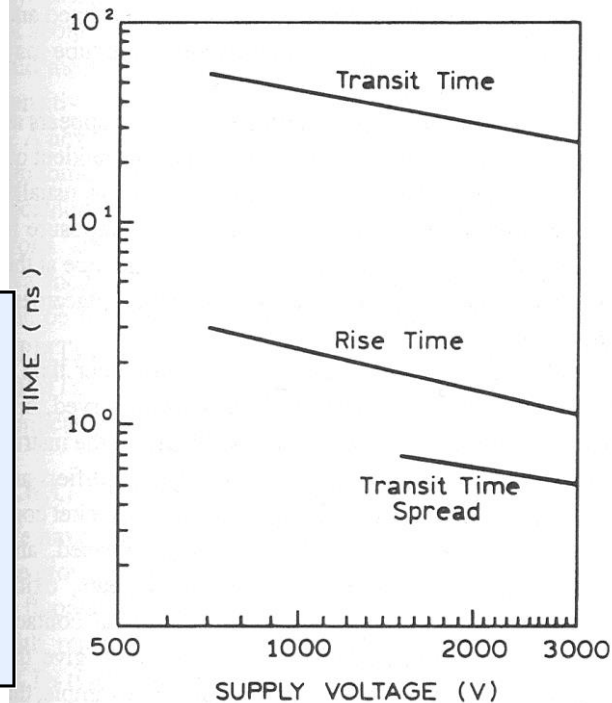
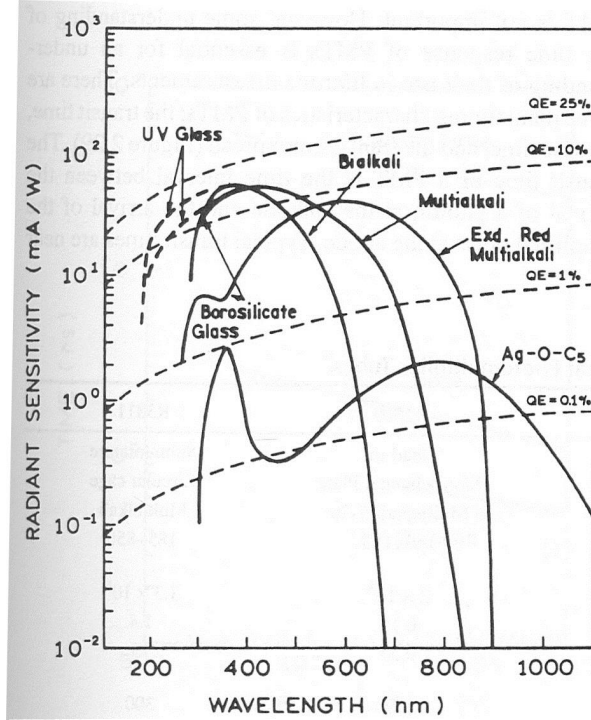
Důležitou vlastností fotonásobiče je spektrální citlivost fotokatody. Ta prudce klesá na červené straně spektra (foton má málo energie na vyražení elektronu).



Fotonásobič může fungovat ve „**photon-counting**“ modu (jsou zaznamenávány dopady jednotlivých fotonů na fotokatodu, přičemž výsledná intenzita je úměrná počtu těchto událostí) nebo v **analogovém modu** (výsledný proud na anodě je úměrný počtu dopadajících fotonů).

**Diskriminátor** potlačuje detekci signálu, který je způsoben samovolným uvolněním elektronů z dynod. Velký fotonový tok může způsobit zahlcení fotonásobiče.

Důležitými charakteristikami jsou především spektrální citlivost fotokatody a pro časově rozlišená měření také „**transit-time**“ (doba mezi dopadem fotonu na fotokatodu a detekcí signálu na anodě), „**rise-time**“ (doba za kterou na anodě naroste signál z 10% na 90% finální hodnoty) a „**transit-time spread**“ (fotony, které dopadnou na různá místa fotokatody mohou mít různý transit-time).



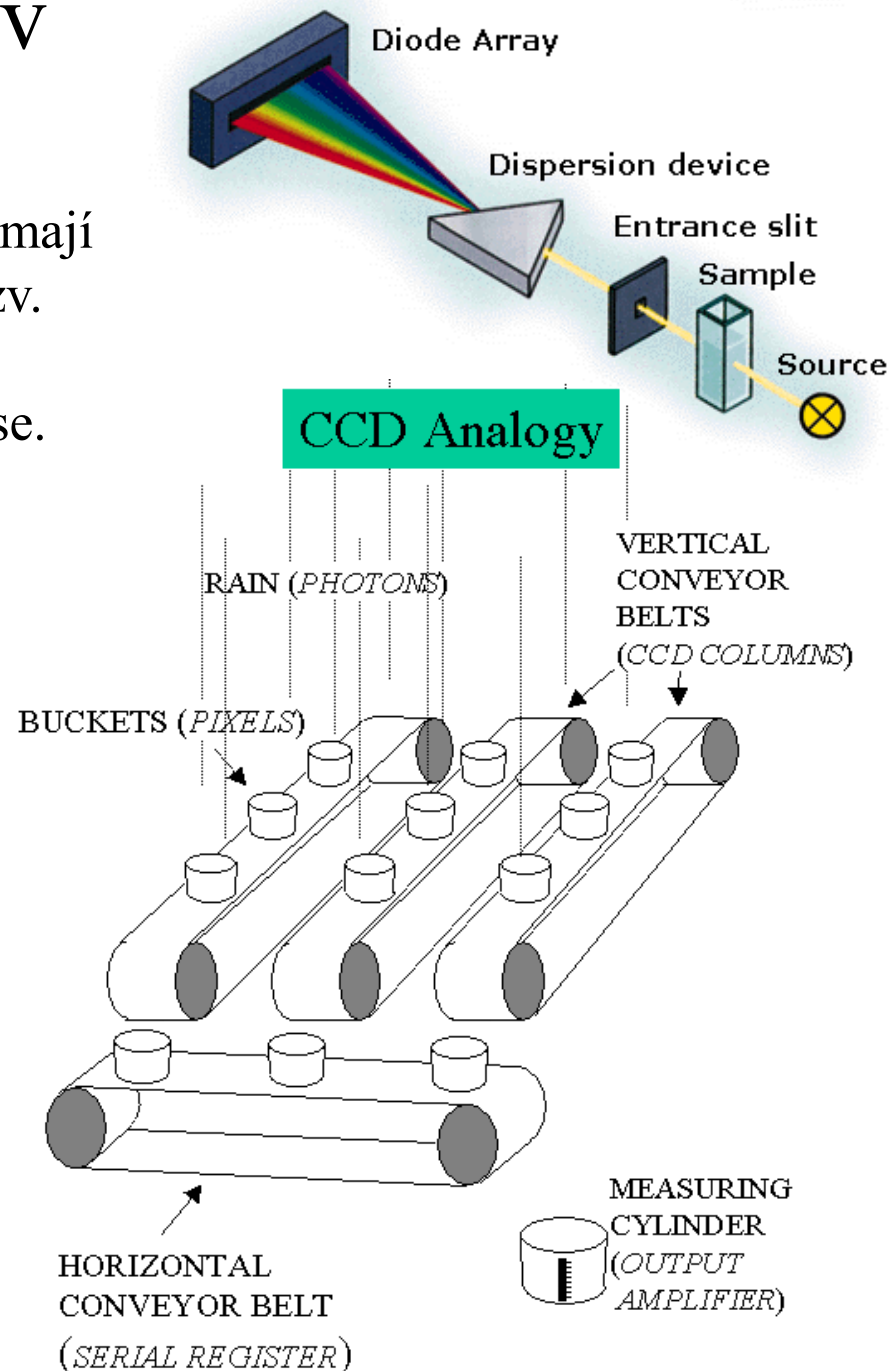
# Vnitřní fotoelektrický jev

## Fotodiody

obecně trochu méně citlivé než fotonásobiče, mají malou aktivní plochu, ale je možné vytvořit tzv. diodové pole a měřit najednou celé spektrum. Problémem bývá také nestabilita signálu v čase.

## CCD kamery

Dopad světla na pole křemíkových čipů způsobí separaci nábojů, elektrony jsou externím elektrickým polem odvedeny pryč, aby se zabránilo rekombinaci. Tak získáváme informaci o prostorové lokalizaci fotonu. Pokud je kamera chlazená, dosahuje obrovské citlivosti.



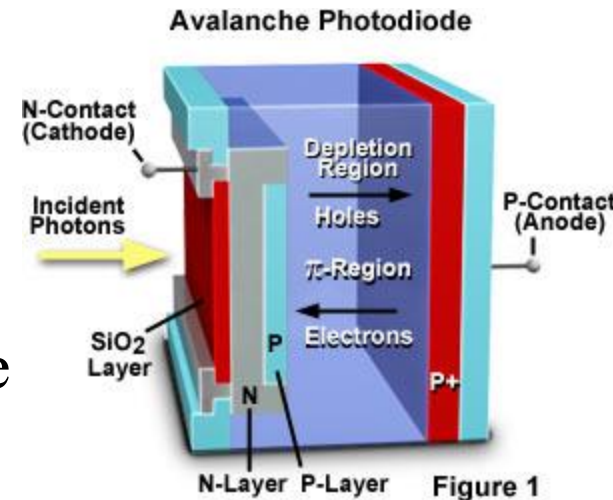
# Lavinové fotodiody (Avalanche photodiodes, APD)

Fotodioda je zapojena pod napětím, které se blíží průraznému napětí. Nosiče náboje generované dopadem fotonů jsou urychleny silným elektrickým polem vzniklým ve vyprázdňené části. Jestliže tyto nosiče získají kinetickou energii větší, než je energie zakázaného pásu, mohou při srážce s krystalovou mříží excitovat elektron z valenčního pásu do vodivostního, čímž vznikají nové nosiče, tyto mohou být opět urychleny, atd.

Důsledkem je mnohem větší citlivost než u obyčejných fotodiód (multiplikace faktorem  $10^1$ - $10^2$ ).

## SPAD (Single-photon avalanche diodes)

Dioda je zapojena pod napětím, které je větší než průrazné napětí. V tomto nestabilním režimu může dopad jednoho fotonu spustit lavinu s multiplikačním faktorem až  $10^{18}$  (mA).



# Shrnutí

- Spektrální omezení
- Zdroje (lampy, lasery, LED, synchrotron)
  - spektrální charakteristiky
  - časové charakteristiky
- Monochromátory (štěrbiny, blaze-wavelength)
- Kyvety
- Detektory (fotonásobič, fotodiody, CCD kamery, APD, SPAD)
  - spektrální charakteristiky
  - časové charakteristiky
  - princip fungování