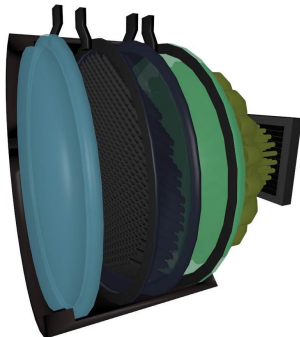


Detekce světla – Poziční jednofotonové detektory

Antonín Černoch Jan Soubusta Ondřej Haderka

Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR



Poziční jednofotonové detektory

EM-CCD speciální kamery s elektronovou multiplikací
intenzifikátory obrazu zesilovače světla zachovávající informaci o
poloze dopadu

iCCD intenzifikovaná CCD kamera

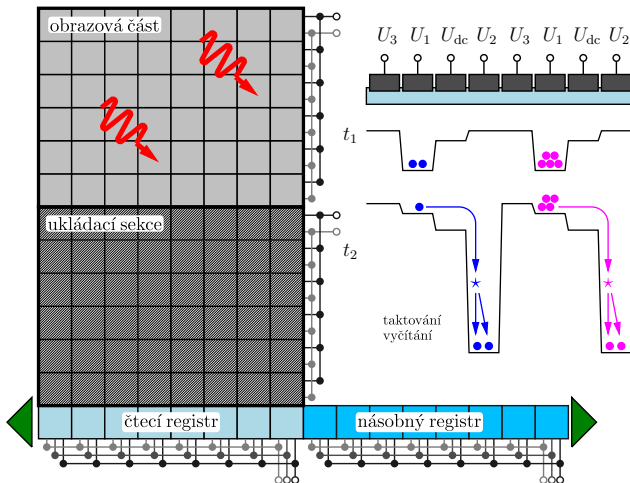
Fotonásobiče MCP, kovové kanálky a síťový typ s multianodou



Obsah

- 1 EM-CCD
- 2 Intenzifikátor obrazu
- 3 iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera
- 4 Streak kamera
- 5 Šum CCD, EM-CCD a iCCD

Princip EM-CCD



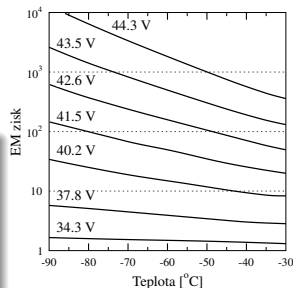
- EM přímo na čipu za čtecím registrem
- většinou FT architektura
- překonání odečítacího šumu

Násobný registr EM-CCD

- vyšší napětí na elektrodách → 'hlubší' potenciálové jamy
- zvýšení energie elektronu → nárazová ionizace
- znásobení počtu elektronů, celkový zisk až 1 000x
- zisk závisí na teplotě a velikosti napětí
- velký zisk omezuje dynamický rozsah – omezená kapacita pixelů

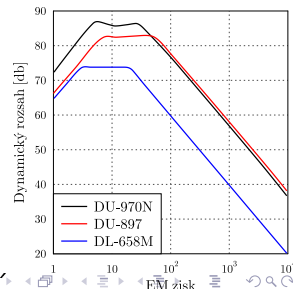
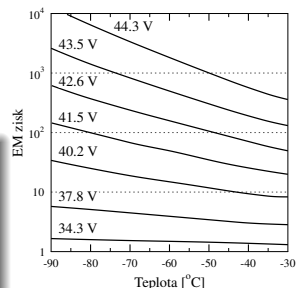
Násobný registr EM-CCD

- vyšší napětí na elektrodách → 'hlubší' potenciálové jamy
- zvýšení energie elektronu → nárazová ionizace
- znásobení počtu elektronů, celkový zisk až 1 000x
- zisk závisí na teplotě a velikosti napětí
- velký zisk omezuje dynamický rozsah – omezená kapacita pixelů



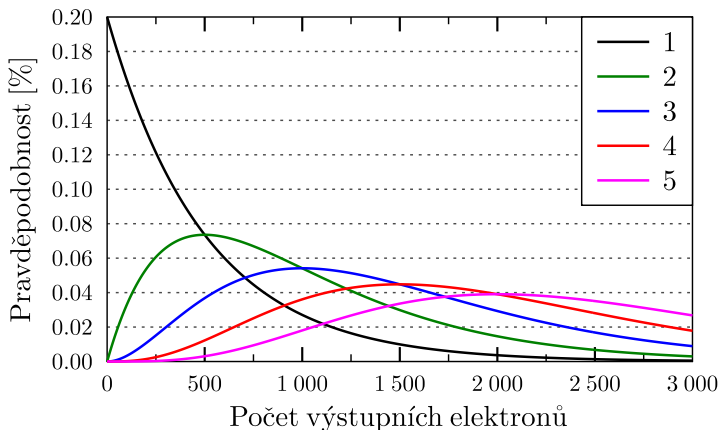
Násobný registr EM-CCD

- vyšší napětí na elektrodách → 'hlubší' potenciálové jamy
- zvýšení energie elektronu → nárazová ionizace
- znásobení počtu elektronů, celkový zisk až 1 000x
- zisk závisí na teplotě a velikosti napětí
- velký zisk omezuje dynamický rozsah – omezená kapacita pixelů



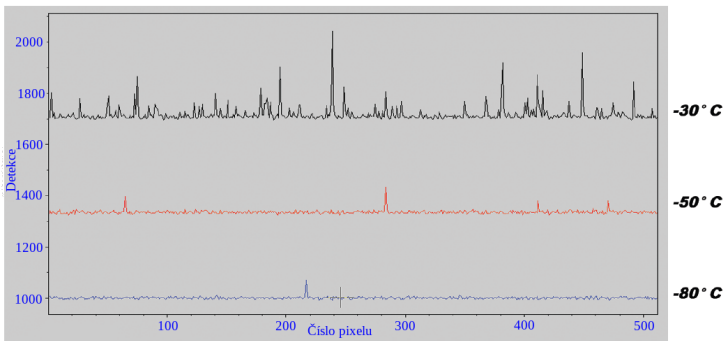
Čítání fotonů u EM-CCD

- zesílení $> 30\times$, po odečtením šumové hladiny
- počet fotonů ale neurčíme – statistiky se překrývají



Šum EM-CCD

- odečítací, termální a šum světelného signálu +
- σ_{cic}^2 – šum indukovaný přesunem náboje (*Clock Induced Charge*), u běžné CCD zanedbatelný (cca 0.05 elektronů na pixel)
- u EM-CCD je vynásoben zesílením až 1 000krát



Andor iXon Ultra 888 Back-Illuminated EMCCD

rozlišení	$1\,024 \times 1\,024$
velikost pixelu	$13\,\mu\text{m} \times 13\,\mu\text{m}$
kapacita pixelu aktivního	80 ke^-
kapacita pixelu násobného	730 ke^-
odečítací šum bez EM	49 e^- (10 MHz)
EM zisk	$1\text{--}1\,000\times$
maximální η	92.5 % @ 580 nm
temný proud [$\text{e}^-/\text{px}/\text{s}$]	0.000 11 ($-95\text{ }^\circ\text{C}$)
falešné detekce na pixel	0.005
AD převodník	16ti bitový



Obsah

- 1 EM-CCD
- 2 Intenzifikátor obrazu**
- 3 iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera
- 4 Streak kamera
- 5 Šum CCD, EM-CCD a iCCD

Intenzifikátor obrazu

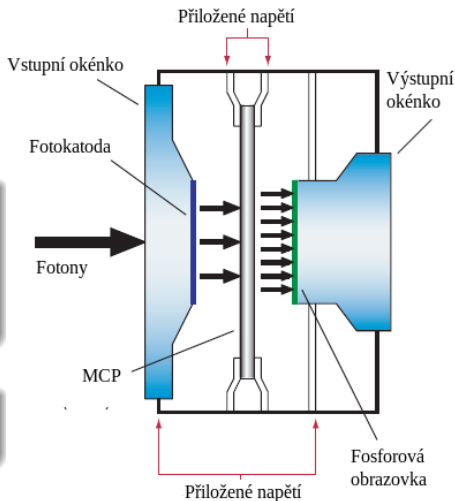
znásobí intenzitu světelného signálu, ale zachová informaci o poloze

Typická sestava

- 1 fotokatoda
- 2 mikrokanálková destička
- 3 fosforová obrazovka

Gen I

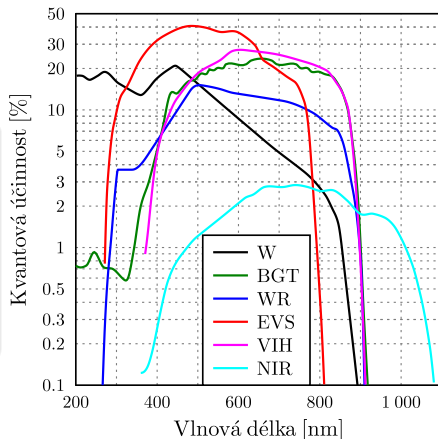
bez MCP, jen vysoké napětí



2. Generace intenzifikátorů obrazu

GEN II

- bialkalické nebo multialkalické fotokatody na křemenném skle
- použitelné v krátkovlnné oblasti spektra (UV a VIS)
- rychlost závěrky okolo 50 ns



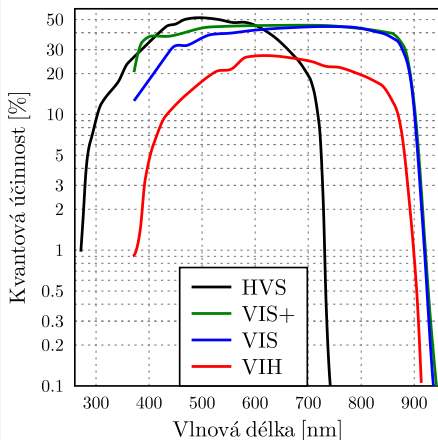
3. Generace intenzifikátorů obrazu

GEN III

- GaAs fotokatoda na běžném skle
- použitelné ve VIS a blízké IČ oblasti

Filmed krycí ochranná vrstva z hliníku
vyšší pracovní napětí
rychlost elektronické závěrky 5 ns

Filmless bez krycí vrstvy
rychlost závěrky 2 ns
speciální konstrukce i pod 1 ns

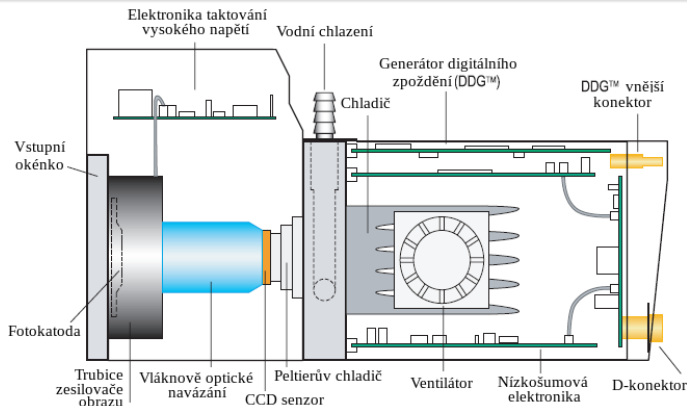


Obsah

- 1 EM-CCD
- 2 Intenzifikátor obrazu
- 3 iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera**
- 4 Streak kamera
- 5 Šum CCD, EM-CCD a iCCD

iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera

- intenzifikátor obrazu + chlazený CCD čip + nízkošumová elektr.
- malá odečítací frekvence 50 až 500 kHz
- zesílení je dáno pevným napětím na MCP

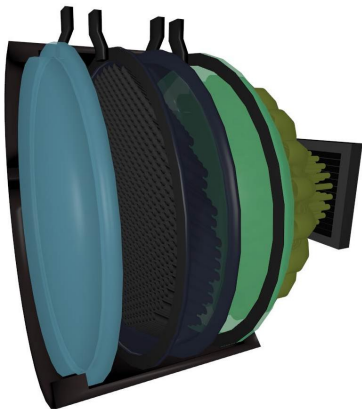


Kvantová účinnost iCCD

prvky ovlivňující celkovou kvantovou účinnost:

- 1 kvantová účinnost fotokatody
- 2 ztráty při přenosu elektronů v zesilovací části
- 3 účinnost navázání do svazku optických vláken
- 4 kvantová účinnost CCD čipu

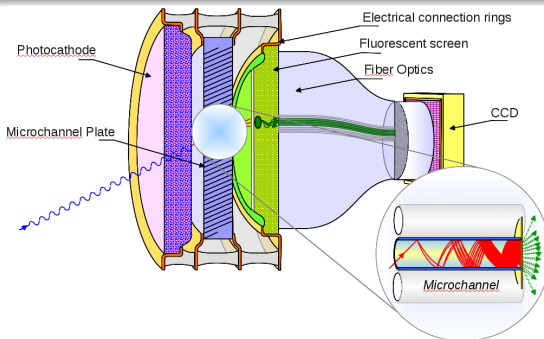
⇒ výsledná hodnota 5-20 %



Prostorové rozlišení

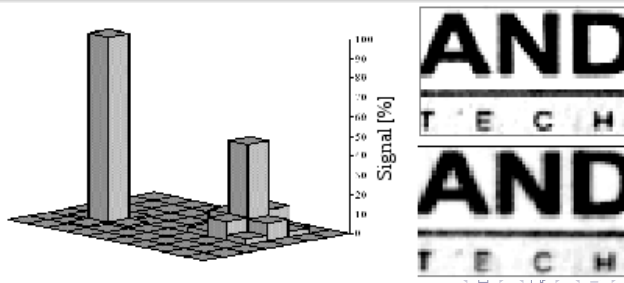
Důvody snížení prostorového rozlišení

- 1 elektrony z fotokatody mohou dopadnout do různých kanálků MCP
- 2 sprška elektronů z MCP excituje určitou oblast fosforové obrazovky
- 3 svazek vláken nemusí být vycentrován na středy pixelů



Jednofotonové události

- událost – nadprahové množství elektronů
- měly by být bodové
- software na doostření obrazu
- porovnání velikosti náboje v pixelu a jeho blízkém okolí s prahovou hodnotou
- přesná poloha určená jako těžiště



Laboratorní kamery

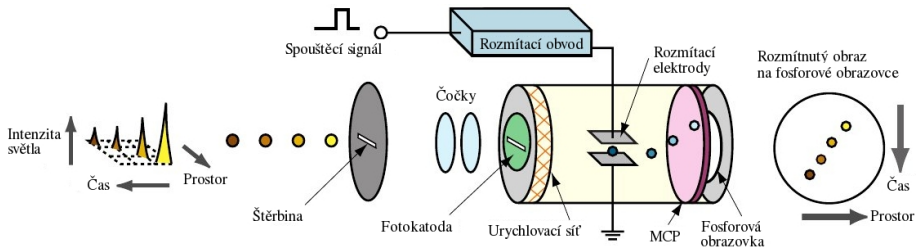
kamera	Andor DH 735	PI-MAX 512	Andor CMOS
rozlišení	1 024 × 1 024	512 × 512	2 560 × 2 160
hrana pixelu [μm]	13	19	6.5
spek. rozsah [nm]	265-740	500-900	300-800
η_{max} [%]	~ 20	~ 5	40
pro [nm]	500	600	500



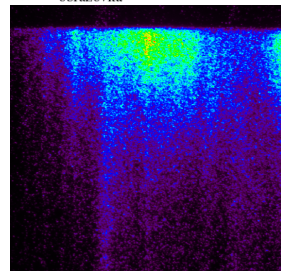
Obsah

- 1 EM-CCD
- 2 Intenzifikátor obrazu
- 3 iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera
- 4 Streak kamera**
- 5 Šum CCD, EM-CCD a iCCD

Streak kamera



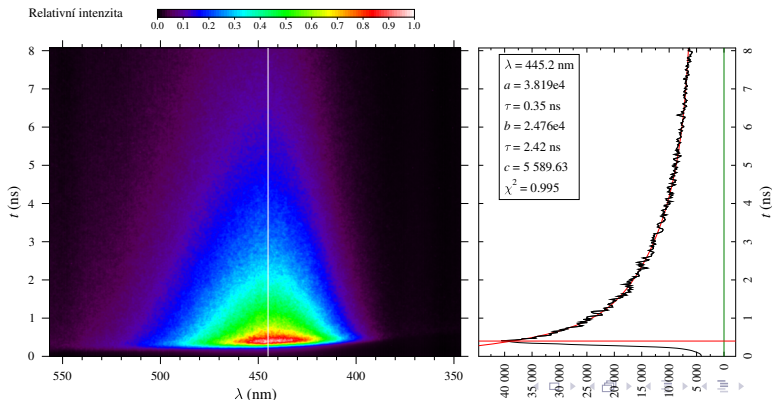
- často v kombinaci se spektrometrem
- štěrbina v horizontálním směru
- časově závislá změna vychýlení ve vertikálním směru
- spektrum s časovým rozlišením (~ 1 ps)



Hamamatsu C10910



- časové rozlišení 1 ps až 1 ms
- spektrální rozsah 230-900 nm
- jednofotonová citlivost
- spektroskopie s časovým rozlišením



Obsah

- 1 EM-CCD
- 2 Intenzifikátor obrazu
- 3 iCCD – Intenzifikovaná CCD kamera
- 4 Streak kamera
- 5 Šum CCD, EM-CCD a iCCD**

Šum CCD, EM-CCD a iCCD

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{ro}}^2 + F^2 G^2 (\sigma_{\text{d}}^2 + \sigma_{\text{s}}^2 + \sigma_{\text{cic}}^2)$$

Poissonovský signál $\Rightarrow$

$$\text{SNR} = \frac{(\eta G \bar{n})^2}{\sigma^2} = \frac{(\eta G \bar{n})^2}{\sigma_{\text{ro}}^2 + F^2 G^2 (\sigma_{\text{d}}^2 + \eta \bar{n} + \sigma_{\text{cic}}^2)}$$

		Ideál	CCD	EM-CCD	iCCD
kvantová účinnost	η	1	0.93	0.93	0.50
zisk	G	1	1	1 000	1 000
faktor zvýšení šumu	F	1	1	1.41	1.6
odečítací šum	σ_{ro}	0	10	60	20
temný šum	σ_{d}	0	0.001	0.001	0.001
CIC šum	σ_{cic}	0	0.05	0.005	0

- pro silné signály nad 100 fotonů na pixel je nejlepší CCD
- pro slabší signály vyniká EM-CCD
- pro jednofotonové aplikace, kdy záleží na každé události, je nejlépe použít iCCD

