

Detekce světla – Maticové detektory CCD a CMOS

Antonín Černoch Jan Soubusta Ondřej Haderka

Společná Laboratoř Optiky UP a FZÚ AV ČR



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vlastnosti
- 3 Snímání obrazu CCD
- 4 Barevné snímání
- 5 Porovnání CCD a CMOS

Vývoj CCD

CCD = *Charged Coupled Device*

1960 vývoj počítačové paměti na bázi MOS (*Metal Oxid Semiconductor*) v Bellových laboratořích

1969 W. Boyle a G.E. Smith – obrazový záznam (2009 Nob. cena)

1970 první kamera

1975 televizní kamera s dostatečným rozlišením

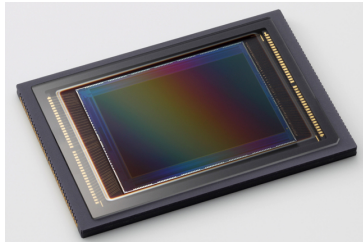
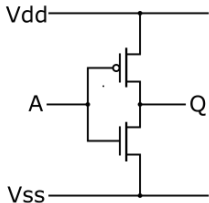


Vývoj CMOS

CMOS = *Complementary Metal Oxid Semiconductor*

1968 Albert Medwin ze společnosti RCA – vynález CMOS jako architektury mikroprocesorů, pamětí, SRAM

1997 Franken Wanlassen ze společnosti Fairchild Semiconductor – vývoj jako detektor světla

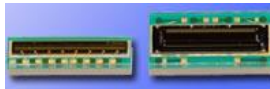


Využití kamer

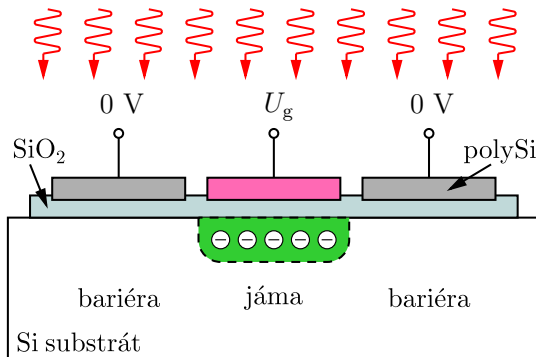
- kamera
- foťák
- fax
- scaner (kopírka)
- čtečka čárových kódů
- ...



Výstup:



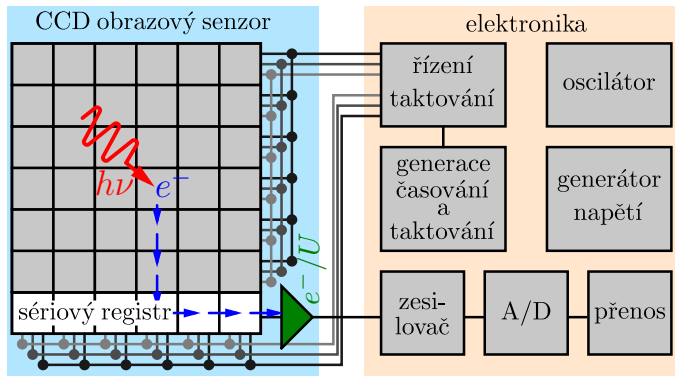
Pixel



- polykřemík – vodič, SiO_2 – izolant
- vznik elektron-děrového páru po dopadu fotonu
- zachycení elektronů v potenciálových jamách
- počet fotoelektronů úměrný počtu absorbovaných fotonů

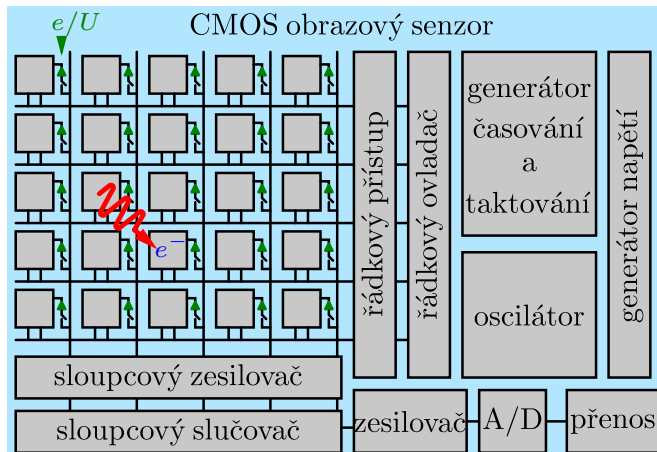
Zpracování obrazu u CCD

- změnou napětí na kontaktech přenos náboje po řádcích z paralelního do sériového registru, potom po pixelech k jedinému převodníku – převod na napětí
- výstupní zesilovač, zpracování a řízení mimo čip



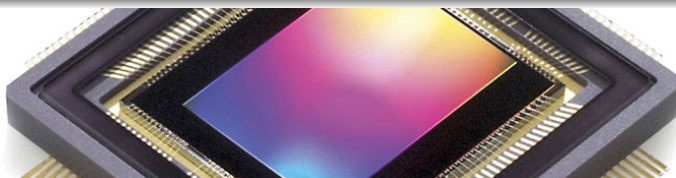
Zpracování obrazu u CMOS

- převodník na napětí u každého pixelu (menší aktivní plocha)
- zpracování a řízení na stejném čipu



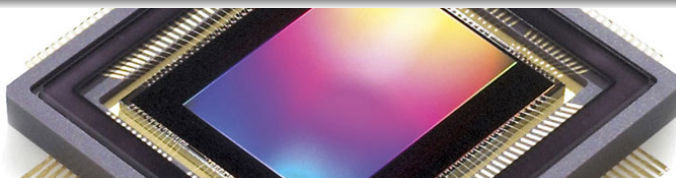
Výhody kamer

- dlouhá akumulace signálu – elektronů v potenciálových jamách
- η od 20 do 95 % (fotofilm 3-5 %)
- vysoká linearita
- dobrá rozměrová stálost, rozlišení až 1/10 pixelu (výpočetní algoritmy)
- výsledný obraz ihned k dispozici v podobě datového souboru – softwarová úprava
- u CCD sdružování pixelů – zvýšení kapacity, zrychlení vyčítání
- u CMOS windowing – vyčítání jen části matice



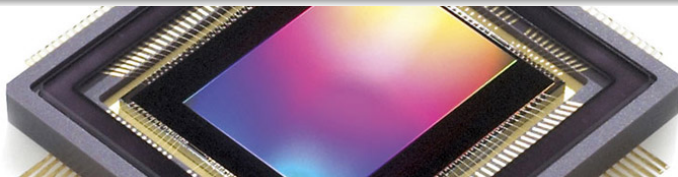
Výhody kamer

- dlouhá akumulace signálu – elektronů v potenciálových jamách
- η od 20 do 95 % (fotofilm 3-5 %)
- vysoká linearita
- dobrá rozměrová stálost, rozlišení až 1/10 pixelu (výpočetní algoritmy)
- výsledný obraz ihned k dispozici v podobě datového souboru – softwarová úprava
- u CCD sdružování pixelů – zvýšení kapacity, zrychlení vyčítání
- u CMOS windowing – vyčítání jen části matice



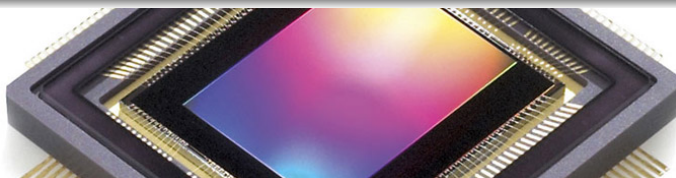
Výhody kamer

- dlouhá akumulace signálu – elektronů v potenciálových jamách
- η od 20 do 95 % (fotofilm 3-5 %)
- vysoká linearita
- dobrá rozměrová stálost, rozlišení až 1/10 pixelu (výpočetní algoritmy)
- výsledný obraz ihned k dispozici v podobě datového souboru – softwarová úprava
- u CCD sdružování pixelů – zvýšení kapacity, zrychlení vyčítání
- u CMOS windowing – vyčítání jen části matice



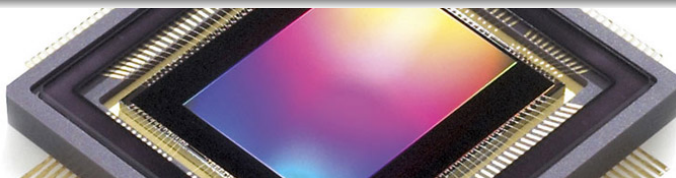
Výhody kamer

- dlouhá akumulace signálu – elektronů v potenciálových jamách
- η od 20 do 95 % (fotofilm 3-5 %)
- vysoká linearita
- dobrá rozměrová stálost, rozlišení až 1/10 pixelu (výpočetní algoritmy)
- výsledný obraz ihned k dispozici v podobě datového souboru – softwarová úprava
- u CCD sdružování pixelů – zvýšení kapacity, zrychlení vyčítání
- u CMOS windowing – vyčítání jen části matice



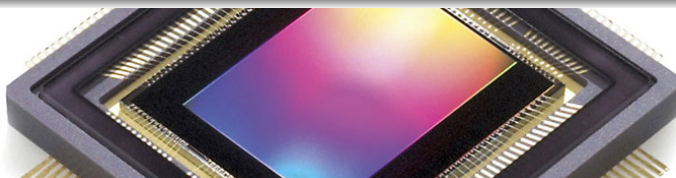
Výhody kamer

- dlouhá akumulace signálu – elektronů v potenciálových jamách
- η od 20 do 95 % (fotofilm 3-5 %)
- vysoká linearita
- dobrá rozměrová stálost, rozlišení až 1/10 pixelu (výpočetní algoritmy)
- výsledný obraz ihned k dispozici v podobě datového souboru – softwarová úprava
- u CCD sdružování pixelů – zvýšení kapacity, zrychlení vyčítání
- u CMOS windowing – vyčítání jen části matice



Výhody kamer

- dlouhá akumulace signálu – elektronů v potenciálových jamách
- η od 20 do 95 % (fotofilm 3-5 %)
- vysoká linearita
- dobrá rozměrová stálost, rozlišení až 1/10 pixelu (výpočetní algoritmy)
- výsledný obraz ihned k dispozici v podobě datového souboru – softwarová úprava
- u CCD sdružování pixelů – zvýšení kapacity, zrychlení vyčítání
- u CMOS windowing – vyčítání jen části matice

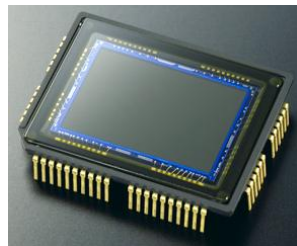


Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vlastnosti
 - Proces detekce
 - Ztráty
 - Šum
 - Prostorové rozlišení
- 3 Snímání obrazu CCD
- 4 Barevné snímání
- 5 Porovnání CCD a CMOS

Proces detekce

$$E_{\nu} = h\nu = hc/\lambda \geq E_g$$



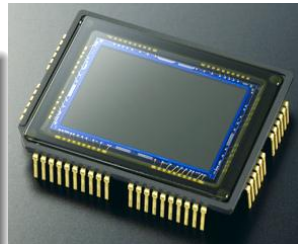
Proces detekce

$$E_\nu = h\nu = hc/\lambda \geq E_g$$

Kritická vlnová délka λ_g

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1.24}{E_g[\text{eV}]} [\mu\text{m}]$$

- pro Si je $E_g = 1.12 \text{ eV}$, tedy $\lambda_g = 1.11 \mu\text{m}$
- detekce delších vlnových délek – nevlastní polovodič



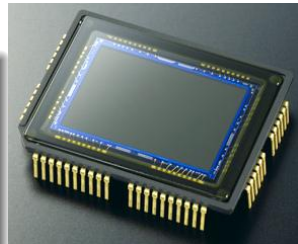
Proces detekce

$$E_\nu = h\nu = hc/\lambda \geq E_g$$

Kritická vlnová délka λ_g

$$\lambda_g = \frac{hc}{E_g} \approx \frac{1.24}{E_g[\text{eV}]} [\mu\text{m}]$$

- pro Si je $E_g = 1.12 \text{ eV}$, tedy $\lambda_g = 1.11 \mu\text{m}$
- detekce delších vlnových délek – nevlastní polovodič

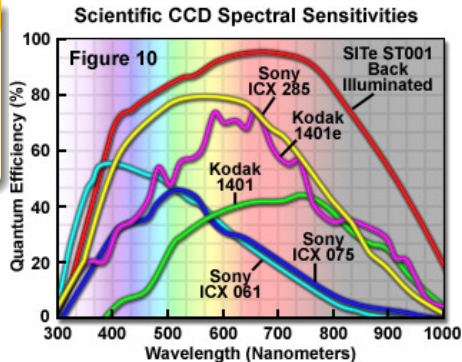


Kvantová účinnost η

- závisí na λ
- pro Si pod 400 nm může být $\eta > 100\%$ (elektronový mrak)

Citlivost $\mathcal{R}$

- $\mathcal{R} = \frac{e\lambda\eta}{hc} [\text{A/W}]$
- $\mathcal{R}_{\text{pixel}} = \frac{\lambda\eta S_p}{hc} [\text{cm}^2/\mu\text{J}]$
- S_p - plocha pixelu



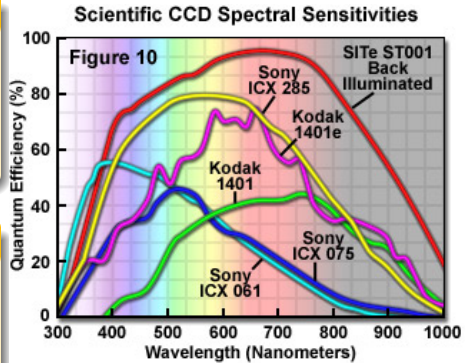
Citlivost $\mathcal{R}$

- $\mathcal{R} = \frac{e\lambda\eta}{hc} [\text{A/W}]$
- $\mathcal{R}_{\text{pixel}} = \frac{\lambda\eta S_p}{hc} [\text{cm}^2/\mu\text{J}]$
- S_p - plocha pixelu

Absorpční koeficient α

pro Si je

- $1/\alpha_{400 \text{ nm}} = 0.2 \mu\text{m}$
- $1/\alpha_{650 \text{ nm}} = 3.33 \mu\text{m}$



Citlivost $\mathcal{R}$

- $\mathcal{R} = \frac{e\lambda\eta}{hc} [\text{A/W}]$
- $\mathcal{R}_{\text{pixel}} = \frac{\lambda\eta S_p}{hc} [\text{cm}^2/\mu\text{J}]$
- S_p - plocha pixelu

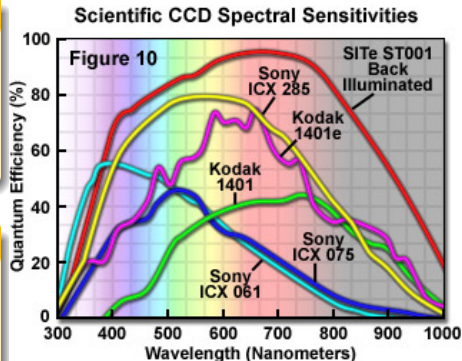
Absorpční koeficient α

pro Si je

- $1/\alpha_{400\text{ nm}} = 0.2\ \mu\text{m}$
- $1/\alpha_{650\text{ nm}} = 3.33\ \mu\text{m}$

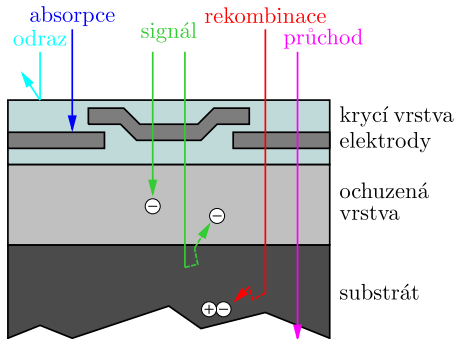
Rekombinační čas τ

- mimo ochuzenou oblast velice krátký
- závisí na čistotě a příměsích
- povrchové rekombinace v důsledku poruch na rozhraní



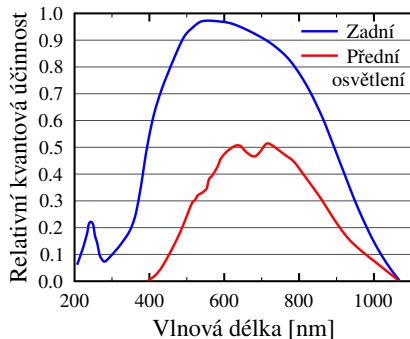
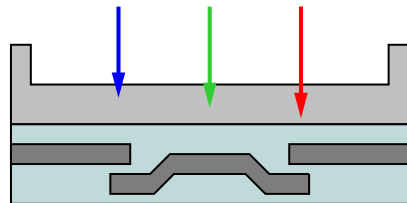
Ztráty × signál

- odraz na povrchu (Fresnelovy vztahy)
- absorpce krycími materiály – ochrana CCD proti degradaci, barevné filtry, elektrody
- excitace elektronu v nebo poblíž ochuzené oblasti
- excitace a následná rekombinace mimo ochuzenou oblast, průchod



Tenčený CCD čip osvětlený zezadu

- *Thinned back-illuminated CCD*
- beze ztrát na kontaktech a krycím filmu
- zvýšení citlivosti, posun ke kratším vlnovým délkám
- substrát vyleštěn na tloušťku 10 až 15 μm
- náročná a drahá technologie

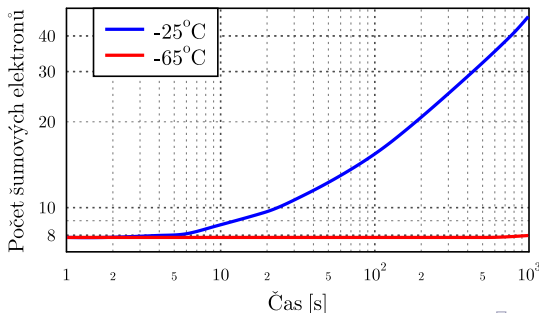


Šum

- σ_s^2 **Šum světelného signálu**, neodstranitelný, Poisson $\rightarrow \sigma_s^2 = \eta \bar{n}$
- σ_d^2 **Termální šum**, důsledkem termálních excitací (m_d), $\sigma_d^2 = \bar{m}_d$, termálně excitované fotoelektrony $\bar{m}_d < 10$ na pixel/s pro 20 °C krátké expozice, termoelektrické chlazení $\rightarrow \bar{m}_d \ll 1$
- σ_{ro}^2 **Odečítací šum**, důsledek zesílení a konverze náboje na napětí, roste s rychlostí CCD (*slow scan CCD*)

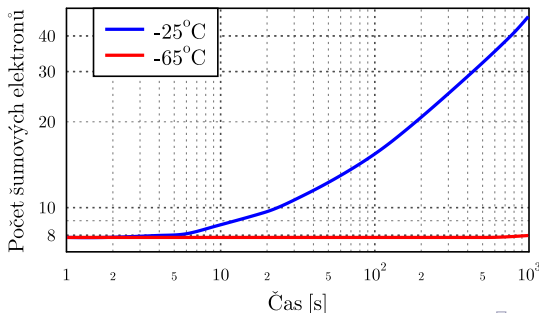
Šum

- σ_s^2 **Šum světelného signálu**, neodstranitelný, Poisson $\rightarrow \sigma_s^2 = \eta \bar{n}$
- σ_d^2 **Termální šum**, důsledkem termálních excitací (m_d), $\sigma_d^2 = \bar{m}_d$, termálně excitované fotoelektrony $\bar{m}_d < 10$ na pixel/s pro 20°C krátké expozice, termoelektrické chlazení $\rightarrow \bar{m}_d \ll 1$
- σ_{ro}^2 **Odečítací šum**, důsledek zesílení a konverze náboje na napětí, roste s rychlostí CCD (*slow scan CCD*)



Šum

- σ_s^2 **Šum světelného signálu**, neodstranitelný, Poisson $\rightarrow \sigma_s^2 = \eta \bar{n}$
- σ_d^2 **Termální šum**, důsledkem termálních excitací (m_d), $\sigma_d^2 = \bar{m}_d$, termálně excitované fotoelektrony $\bar{m}_d < 10$ na pixel/s pro 20°C krátké expozice, termoelektrické chlazení $\rightarrow \bar{m}_d \ll 1$
- σ_{ro}^2 **Odečítací šum**, důsledek zesílení a konverze náboje na napětí, roste s rychlostí CCD (*slow scan CCD*)



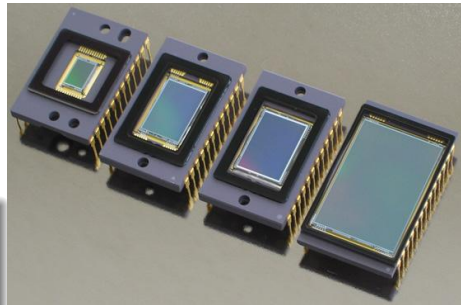
SNR

$$\sigma^2 = \sigma_{\text{ro}}^2 + \sigma_{\text{d}}^2 + \sigma_{\text{s}}^2$$

$$\text{SNR} = \frac{\eta^2 \bar{n}^2}{\sigma^2} = \frac{\eta^2 \bar{n}^2}{\sigma_{\text{ro}}^2 + \bar{m}_{\text{d}} + \eta \bar{n}}$$

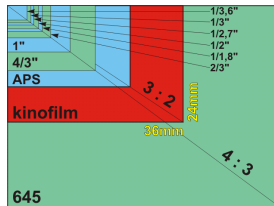
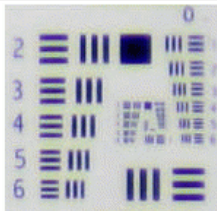
Ideální CCD

- $\bar{m}_{\text{d}} \sim 0$
- $\bar{n} \gg \sigma_{\text{ro}}^2$



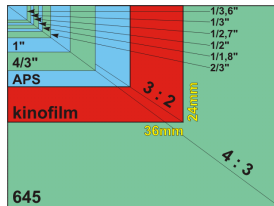
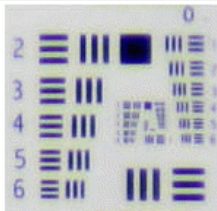
Prostorové rozlišení

- velikost počet pixelů
- prostorové rozložení (oblast mezi pixely nepřispívající k signálu)
- kvalita zobrazovací soustavy
- místo dopadu a velikost světelného signálu
- funkce přenosu modulace (MTF) a kontrastu (CTF)
- software korigující doostření, kompenzace rozložení bodové události ve více pixelech



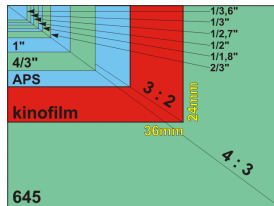
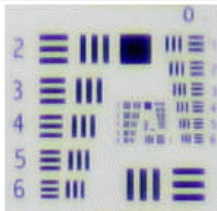
Prostorové rozlišení

- velikost počet pixelů
- prostorové rozložení (oblast mezi pixely nepřispívající k signálu)
- kvalita zobrazovací soustavy
- místo dopadu a velikost světelného signálu
- funkce přenosu modulace (MTF) a kontrastu (CTF)
- software korigující doostření, kompenzace rozložení bodové události ve více pixelech



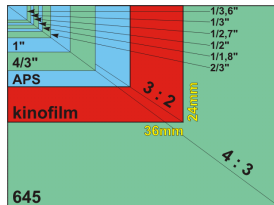
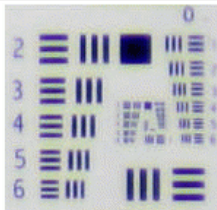
Prostorové rozlišení

- velikost počet pixelů
- prostorové rozložení (oblast mezi pixely nepřispívající k signálu)
- kvalita zobrazovací soustavy
- místo dopadu a velikost světelného signálu
- funkce přenosu modulace (MTF) a kontrastu (CTF)
- software korigující doostření, kompenzace rozložení bodové události ve více pixelech



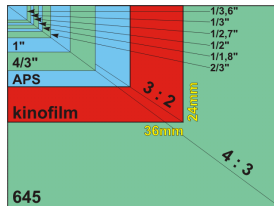
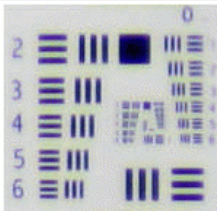
Prostorové rozlišení

- velikost počet pixelů
- prostorové rozložení (oblast mezi pixely nepřispívající k signálu)
- kvalita zobrazovací soustavy
- místo dopadu a velikost světelného signálu
- funkce přenosu modulace (MTF) a kontrastu (CTF)
- software korigující doostření, kompenzace rozložení bodové události ve více pixelech



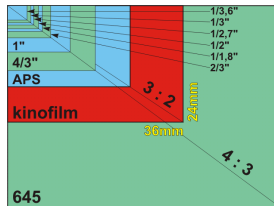
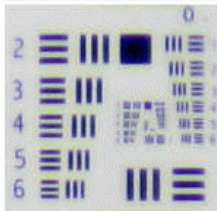
Prostorové rozlišení

- velikost počet pixelů
- prostorové rozložení (oblast mezi pixely nepřispívající k signálu)
- kvalita zobrazovací soustavy
- místo dopadu a velikost světelného signálu
- funkce přenosu modulace (MTF) a kontrastu (CTF)
- software korigující doostření, kompenzace rozložení bodové události ve více pixelech

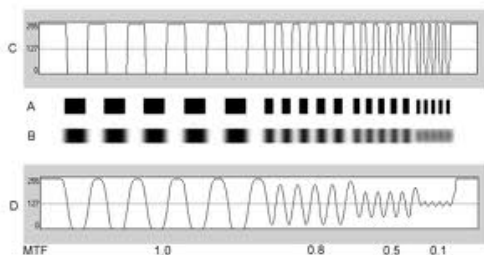
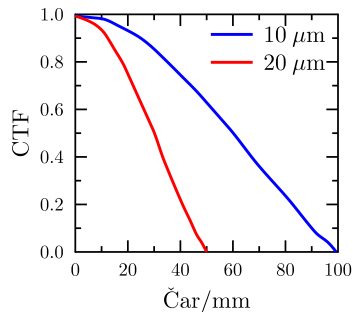
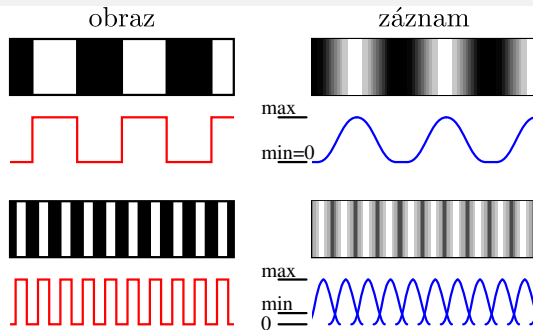


Prostorové rozlišení

- velikost počet pixelů
- prostorové rozložení (oblast mezi pixely nepřispívající k signálu)
- kvalita zobrazovací soustavy
- místo dopadu a velikost světelného signálu
- funkce přenosu modulace (MTF) a kontrastu (CTF)
- software korigující doostření, kompenzace rozložení bodové události ve více pixelech

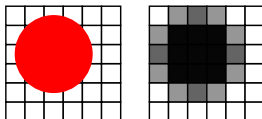
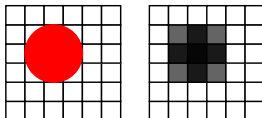
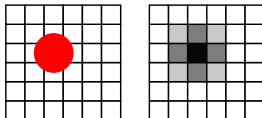
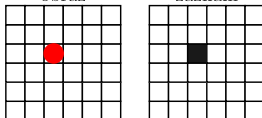


Funkce přenosu kontrastu

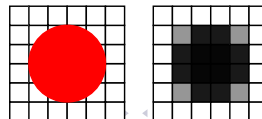
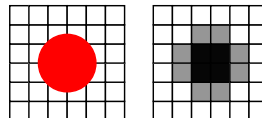
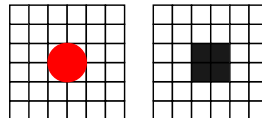
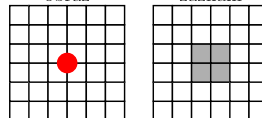


Vliv místa dopadu na matici

centrováno na střed pixelu
obraz záznam



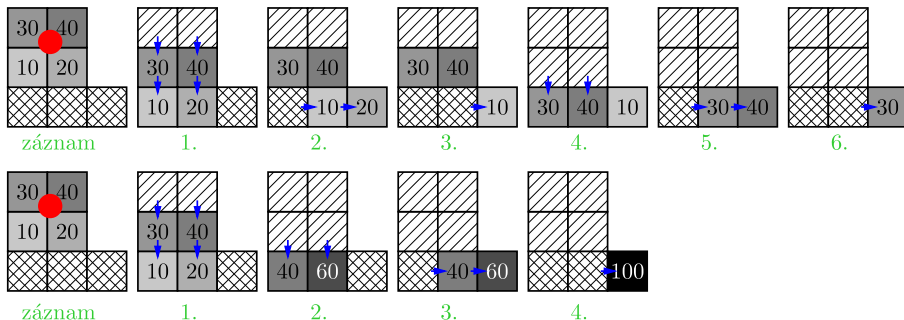
centrováno na rozhraní pixelů
obraz záznam



Hardwarové sdružování pixelů CCD

Binning

- + vyšší dynamický rozsah, rychlejší odečet, lepší *SNR*
- zmenšené rozlišení



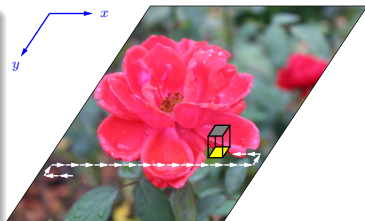
Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vlastnosti
- 3 Snímání obrazu CCD**
 - Způsoby snímání obrazu CCD
 - Architektury plošných CCD
 - Techniky přenosu náboje na čipu CCD
 - Odtokové kanálky
 - Kapacita pixelu
 - Další technologie CCD
- 4 Barevné snímání

Způsoby snímání obrazu CCD

Bodové snímání

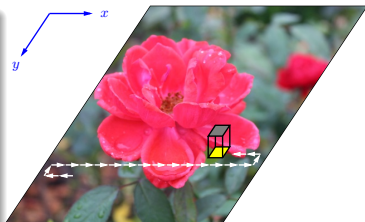
- rozlišení úměrné kroku a rozlišení detektoru
- stejné charakteristiky pro celý obraz
- nepřesnost v určení pozice
- záznam jen statických obrazů



Způsoby snímání obrazu CCD

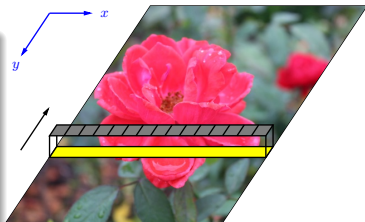
Bodové snímání

- rozlišení úměrné kroku a rozlišení detektoru
- stejné charakteristiky pro celý obraz
- nepřesnost v určení pozice
- záznam jen statických obrazů



Lineární snímání

- jednodušší pohybový aparát
- velikost a rozložení pixelů omezuje rozlišení v x
- skenery, spektrometry, satelity



Plošné snímání

- omezené rozlišení velikostí pixelů
- různé charakteristiky pixelů

Architektury plošných CCD

Metody přenosu náboje mezi jednotlivými pixely:

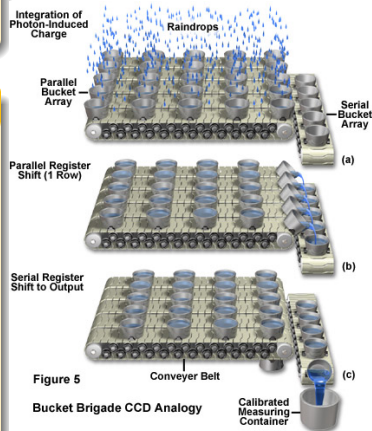
FF *Full-Frame transfer*

FT *Frame Transfer*

IL *Interline transfer*

další *Frame Interline transfer*, *Accordian*,
Charge Injection,
MOS XY adresování

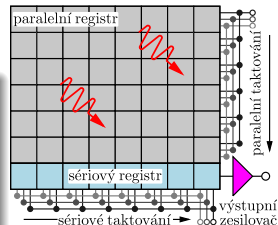
FF, FT a IL lze použít i pro lineární CCD



FF

Full-Frame transfer

- malá operační i výrobní náročnost
- zablouknutí paralelního registru po dobu vyčítání (mechanická uzávěrka nebo synchronně pulzní osvětlení), jinak rozmazání (*smearing*)

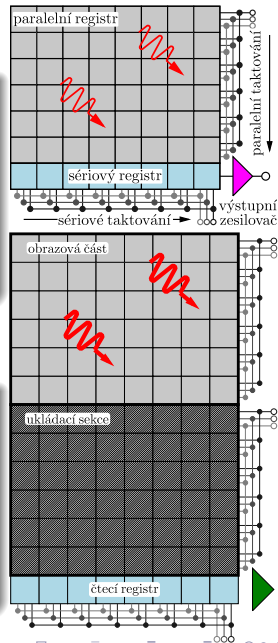


FF *Full-Frame transfer*

- malá operační i výrobní náročnost
- zablouknutí paralelního registru po dobu vyčítání (mechanická uzávěrka nebo synchronně pulzní osvětlení), jinak rozmazání (*smearing*)

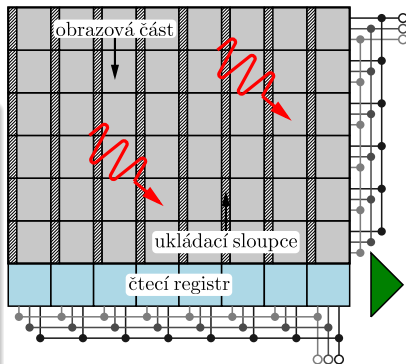
FT *Frame transfer*

- dva identické paralelní registry, jeden zablouknutý
- po expozici rychlý přesun (ms) do ukládací sekce, potom pomalé vyčítání zároveň s další expozicí



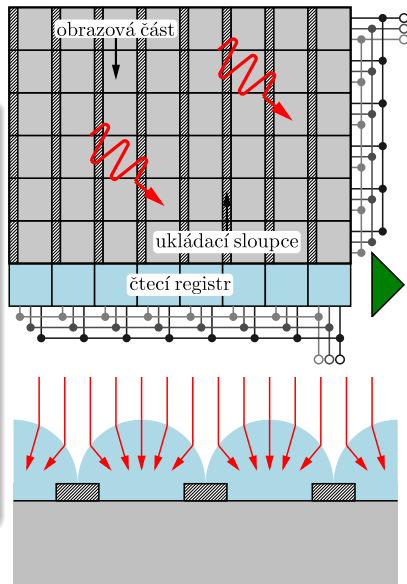
IL *Interline transfer*

- kryté ukládací sloupce mezi světlocitlivými pixely
- přesun náboje v ukládacím sloupci metodou FF zároveň s načítáním dalšího snímku
- eliminace rozmazání, rychlá elektronická uzávěrka
- menší světlocitlivá plocha → matice mikročoček (jen pro kolmé osvětlení)



IL *Interline transfer*

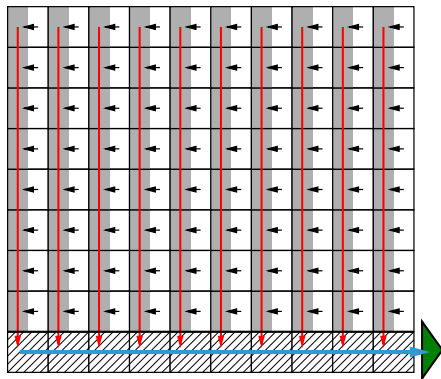
- kryté ukládací sloupce mezi světlocitlivými pixely
- přesun náboje v ukládacím sloupci metodou FF zároveň s načítáním dalšího snímku
- eliminace rozmazání, rychlá elektronická uzávěrka
- menší světlocitlivá plocha → matice mikročoček (jen pro kolmé osvětlení)



Způsoby vyčítání IL CCD

progresivní všechny řádky matice popořadě

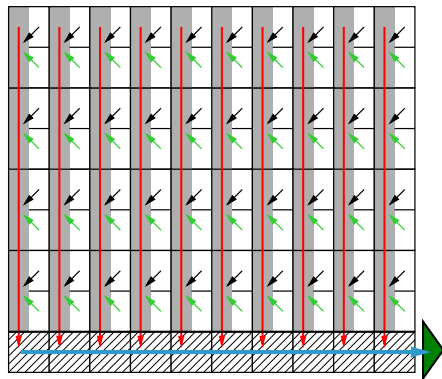
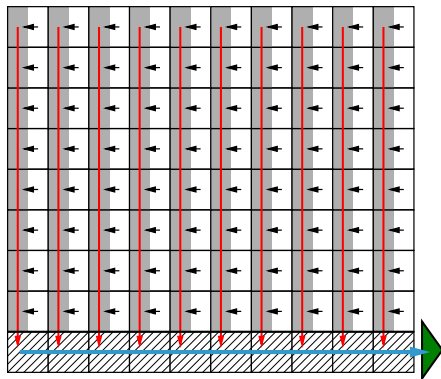
prokládaný vyčítání zvlášť sudých a lichých řádků, potřeba jen polovina ukládacích pixelů, televizní přenos



Způsoby vyčítání IL CCD

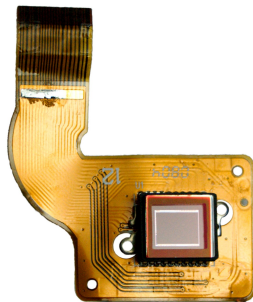
progresivní všechny řádky matice popořadě

prokládaný vyčítání zvlášť sudých a lichých řádků, potřeba jen polovina ukládacích pixelů, televizní přenos



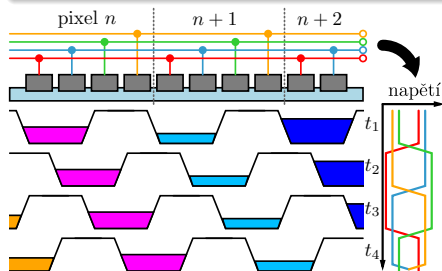
Techniky přenosu náboje na čipu CCD

- pixel tvoří kontakty (dopovaný Si) na polovodiči (Si) oddělené izolantem (SiO_2)
- napětí na kontaktech tvoří potenciálové jámy (vyšší napětí) a bariéry (nižší napětí)
- excitované elektrony jsou zachycovány v potenciálových jamách
- změnou napětí přepínání mezi potenciálovou jamou a bariérou $\rightarrow$ pohyb náboje na čipu
- techniky: čtyřfázová (4Φ), třífázová (3Φ), pseudo-dvoufázová ($P2\Phi$), pravá dvoufázová ($T2\Phi$), virtuální fáze ($V\Phi$)



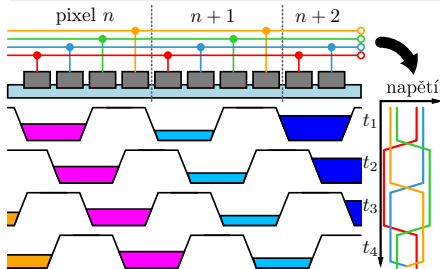
4 Φ – čtyřfázová

- 4 kontakty na pixel
- dva tvoří jámu, dva bariéru
- ob jeden kontakt překlopení napětí
- přesun o pixel ve čtyřech krocích



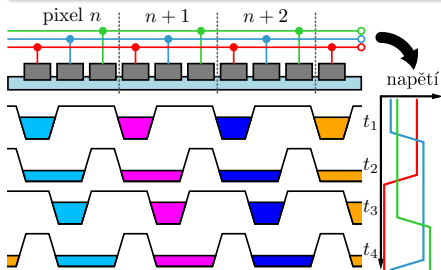
4 Φ – čtyřfázová

- 4 kontakty na pixel
- dva tvoří jámu, dva bariéru
- ob jeden kontakt překlopení napětí
- přesun o pixel ve čtyřech krocích



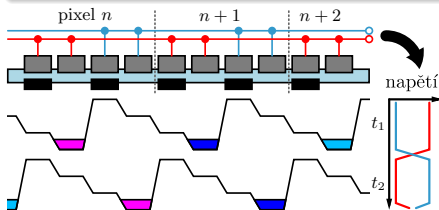
3 Φ – třífázová

- 3 kontakty na pixel
- 2+1 střídavě jáma a bariéra (housenka)
- méně kontaktů $\rightarrow$ větší hustota pixelů a rozlišení
- složitější časování, přesun o pixel v šesti krocích



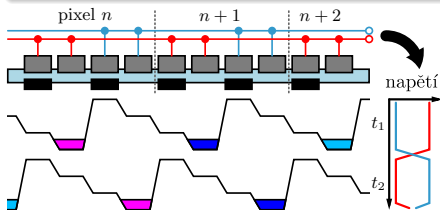
P2 Φ – pseudo-dvoufázová

- 4 kontakty na pixel, po dvou stejné napětí
- ob jeden kontakt podsazen materiál zvyšující potenciál $\rightarrow$ nakloněná jáma
- jednodušší časování ale složitější konstrukce



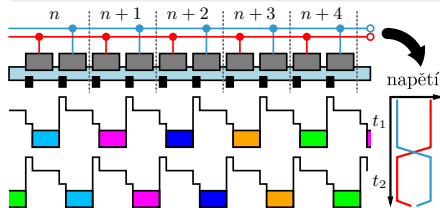
P2 Φ – pseudo-dvoufázová

- 4 kontakty na pixel, po dvou stejné napětí
- ob jeden kontakt podsazen materiál zvyšující potenciál $\rightarrow$ nakloněná jáma
- jednodušší časování ale složitější konstrukce



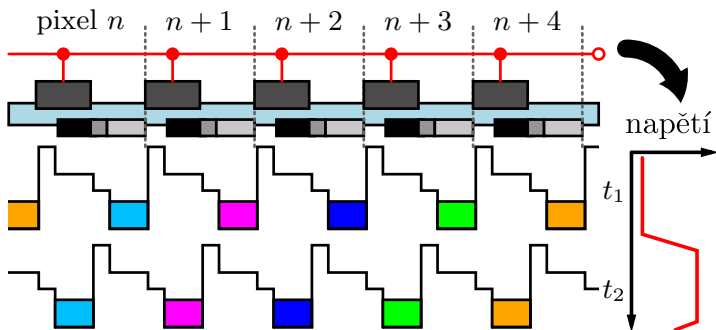
T2 Φ – pravá dvoufázová

- 1 kontakt na pixel
- materiál zvyšující potenciál jen pod částí elektrody
- velká hustota pixelů
- přesun o pixel ve dvou krocích



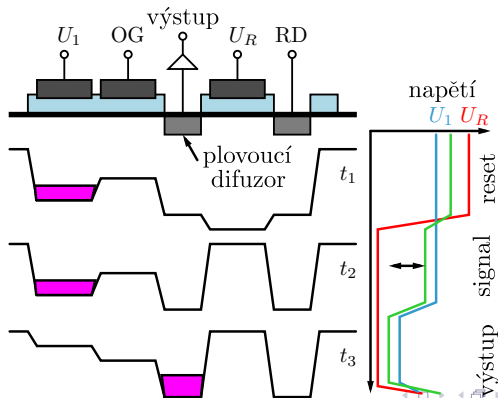
$V\Phi$ – virtuální fáze

- pixel tvoří jeden kontakt a mezera (velká hustota)
- 3 různé materiály postupně zvyšující potenciál
- větší propustnost světla (citlivost v UV)
- přesun o pixel ve dvou krocích změnou vysokého napětí (problémy s časovou stálostí)



Konverze náboje na napětí

- 1 vynulování plovoucího difuzního senzoru resetovací elektrodou → referenční hodnota napětí
- 2 přenesení náboje z posledního pixelu sériového registru
- 3 dochází ke změně potenciálu, po odečtení reference → signál



Kapacita pixelu q_w *Full well capacity*

$$q_w = C(U - U_c), \quad C = S_p \epsilon_r \epsilon_0 / d$$

S_p plocha pixelu (typicky $15 \times 15 \mu\text{m}^2$)

ϵ_r pro SiO_2 hodnota 4.5

d tloušťka SiO_2 (typicky $0.1 \mu\text{m}$)

U napětí na elektrodě

U_c mezní napětí pro vytvoření potenciálové jámy

$$U - U_c \approx 3 \text{ V}$$



Example

$$C = 225 \mu\text{m}^2 \times 4.5 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m} / 0.1 \mu\text{m} \approx 9 \times 10^{-14} \text{ F}$$

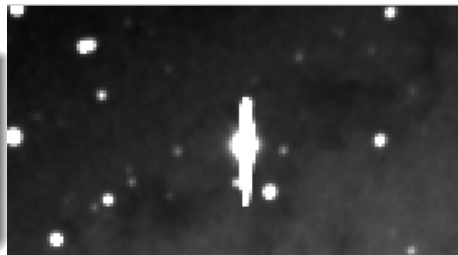
$$\rightarrow q_w \approx 2.7 \times 10^{-13} \text{ C} \approx 1.7 \times 10^6 e^-$$

Odtokové kanálky

Overflow Drain

Přetékání náboje *Blooming*

- překročení kapacity pixelu v důsledku přeexpozice
- nejnáze ve směru paralelního posuvu



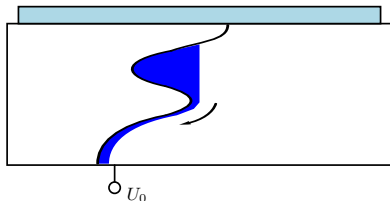
VOD vertikální obvod přetečení

LOD laterální obvod přetečení

- + možnost elektronické uzávěrky
- omezení kapacity pixelu, zhoršená linearita

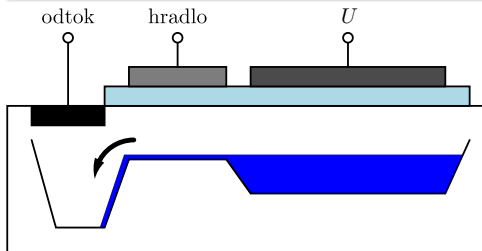
Vertikální obvod přetečení

- předpětí na substrát
- odvedení přebytečného náboje do hloubky



Laterální obvod přetečení

- OD vedle sloupce pixelů
- zmenšení aktivní plochy



Detekce kratších vlnových délek

- tenčené čipy osvětlené zezadu (FF a FT, nelze VOD)
- pokrytí CCD čipu fosforem – průhledný nad 450 nm, osvětlen UV emituje ve VIS, snížené rozlišení v důsledku rozptylu

Detekce kratších vlnových délek

- tenčené čipy osvětlené zezadu (FF a FT, nelze VOD)
- pokrytí CCD čipu fosforem – průhledný nad 450 nm, osvětlen UV emituje ve VIS, snížené rozlišení v důsledku rozptylu

Vysokorychlostní CCD

- rychlost CCD omezena zesilovačem na čipu, zrychlení → větší energie → lokální ohřevy, snížení uniformity
- řešením je rozdělit čip na více bloků s paralelním vyčítáním → složitější zpracování
- další zrychlení limitováno časovačem na čipu, šum v důsledku kapacitního chování CCD

Vady CCD čipů

Tmavé pixely horší odezva jak 75 % průměru

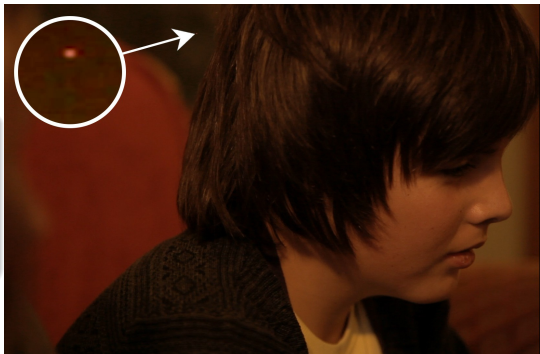
Horké pixely přexponovány v důsledku temného proudu (víc jak 50x)

Pasti zachycují posouvané elektrony, těžko odhalitelné (až od 200 elektronů)

Flat field nehomogenní odezva v různých místech čipu

Původ

- znečištění povrchu
- vady ve struktuře
- nežádoucí příměsi

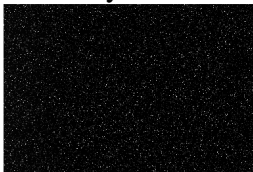


Softwarová úprava

Původní snímek



Temný snímek



—

=



Flat field



—

=

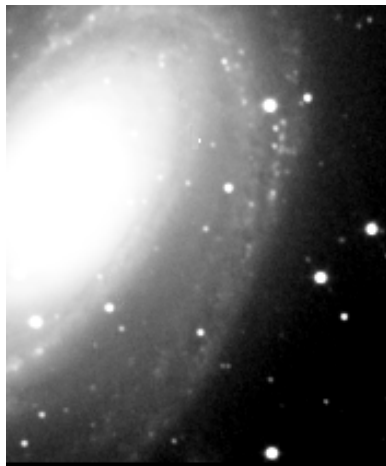
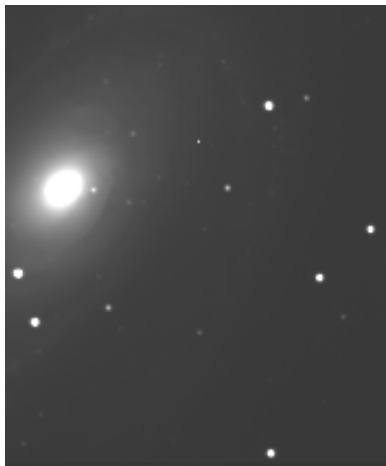
Výsledný snímek



Skládání expozic

Stretching

- softwarové sečtení více expozic s kratší expozicí
- kompenzace nedostatečného dynamického rozsahu CCD



Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vlastnosti
- 3 Snímání obrazu CCD
- 4 Barevné snímání**
- 5 Porovnání CCD a CMOS

Barevné snímání

- Si CCD čipy jsou monochromatické, změnu podle vlnové délky nelze odlišit od změny v intenzitě
- použití filtrů pro záznam informace o barvě (VIS)

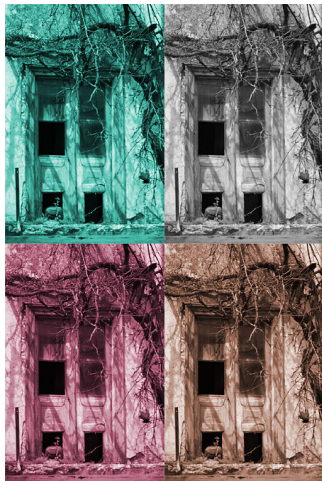
RGB *Red*, *Green*, *Blue*, někdy navíc L
(*Light*)

celková propustnost 1/3

CMY *Cyan*, *Magenta*, *Yellow*

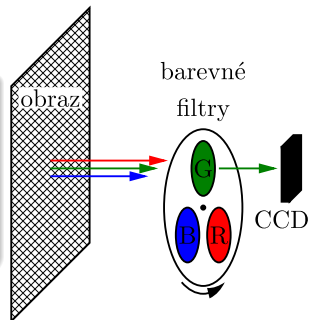
celková propustnost 2/3, M je
obtížné vyrobit

- kompenzace na spektrální citlivost oka



Sekvenční snímání

- více expozic přes barevné filtry RGB popř. LRGB
- potřeba delší čas, mechanické součástky a softwarové zpracování

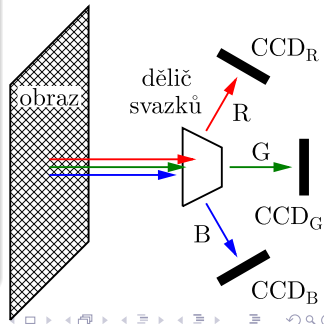
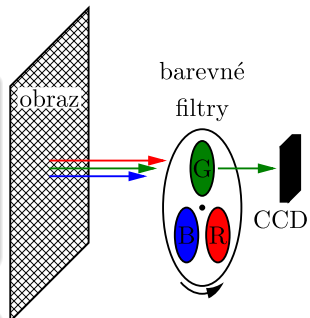


Sekvenční snímání

- více expozic přes barevné filtry RGB popř. LRGB
- potřeba delší čas, mechanické součástky a softwarové zpracování

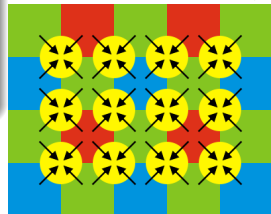
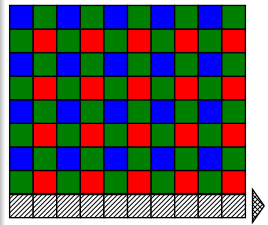
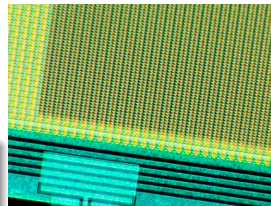
3 čipy

- chromatický hranol rozdělí světlo na barevné složky nebo achromatický hranol a barevné filtry (ztráta 2/3 intenzity)
- nutné softwarové zpracování
- čipy mohou mít různé vlastnosti → zhoršení věrnosti obrazu



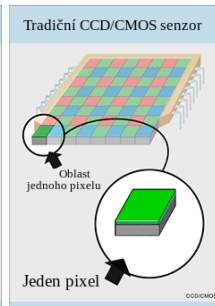
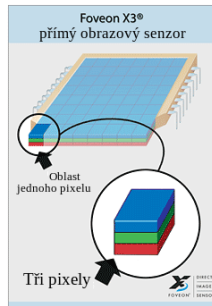
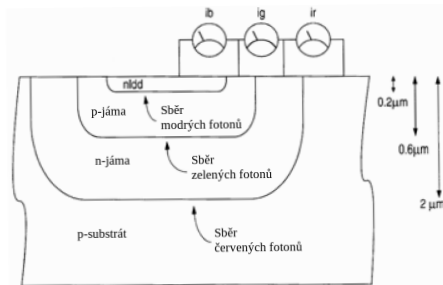
Integrované filtry na čipu – Bayerova maska

- na pixely při výrobě nanесeny RGB nebo CMY filtry
- zachování rozlišení v jasové složce, prostorové klesne na 1/4
- interpolace barevné informace ze sousedních pixelů
- filtry nelze odstranit
- nelze snímat za úzkopásmovými filtry
- nelze sdružovat pixely



Foveon X3

- záznam barevné informace podle hloubky, ve které foton excituje elektron
- odečet počtu fotonů v různých hloubkách
- zachováno rozlišení ale menší kapacita pixelů

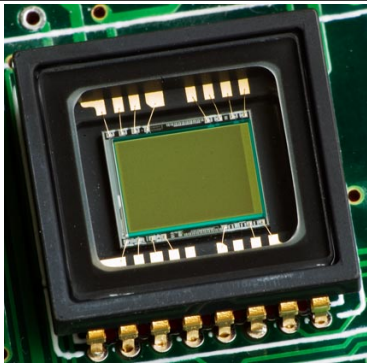


Obsah

- 1 Úvod
- 2 Vlastnosti
- 3 Snímání obrazu CCD
- 4 Barevné snímání
- 5 Porovnání CCD a CMOS**
 - Scientific CCD iKon

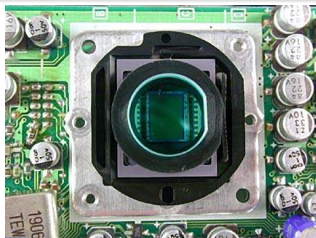
Porovnání CCD a CMOS

Kvantová účinnost	CCD	lepší pokrytí světlocitlivou plochou
Citlivost	CMOS	zesílení přímo na čipu
Šum	CCD	u CMOS přispívá elektronika na čipu
Uniformita za světla	–	obě platformy srovnatelné
Uniformita za tmy	CCD	u CMOS různé zesílení u pixelů
Rychlost	CMOS	zpracování na čipu, paralelnost



CCD

- dynamický rozsah
- elektronická uzávěrka (IL)
- změna rychlosti a dynamického rozsahu
- sdružování pixelů
- nelineární analogové zpracování
- možnost přetečení



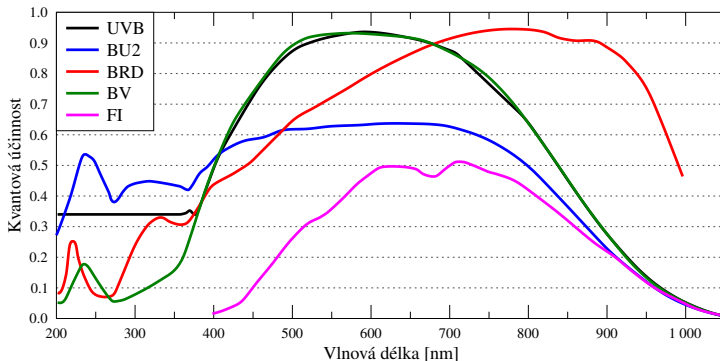
CMOS

- elektronická uzávěrka
- neuniformní a uniformní
- windowing
- řízení napětí a časování
- méně energeticky náročné
- menší úniky energie
- spolehlivé
- možnost integrace



Scientific CCD iKon (Andor)

- tenčená CCD osvětlená zezadu
- termoelektrické chlazení (až -100°C)
- malý odečítací šum
- 16-bitový A/D převodník s velkým dynamickým rozsahem



Model	DZ436	DZ432	DU937N (FT)
Rozlišení	2048 x 2048	1250 x 1152	512 x 512
Velikost pixelu [μm]	13 x 13	22.5 x 22.5	13 x 13
Obrazová oblast [mm]	27.6 x 27.6	28.1 x 25.9	6.6 x 6.6
Typ senzoru	BV, FI	BV, FI, UV	BV, FI, UV, BU2
Kapacita pixelu [e^-]	100 000	400 000	100 000
Rychlost vyčítání	1 MHz, 500, 66 a 31 kHz		2.5 MHz a 50 kHz
Odečítací šum [e^-]	7.5	12	10
Temný proud [$e^-/(\text{pix s})$]	0.000 2	0.000 5	0.000 2

