



Detekcja światła

Sebastian Maćkowski

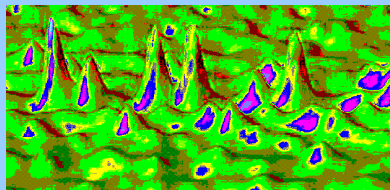
Instytut Fizyki

Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Adres poczty elektronicznej: mackowski@fizyka.umk.pl

Biuro: 365, telefon: 611-3250

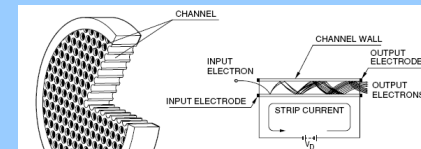
Konsultacje: czwartek 13-16



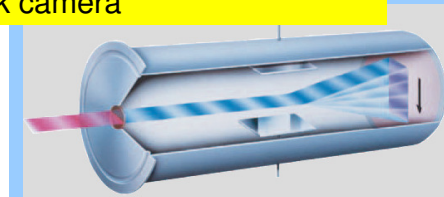
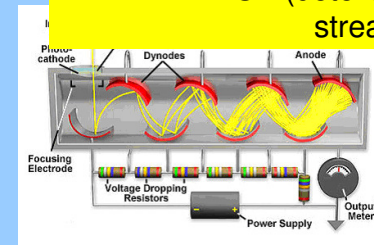
WS 2008/2009



Repeta z wykładu nr 10



fotopowielacz, część 2
MCP (detektor wielokanałowy)
streak camera



WS 2008/2009



Plan na dzisiaj



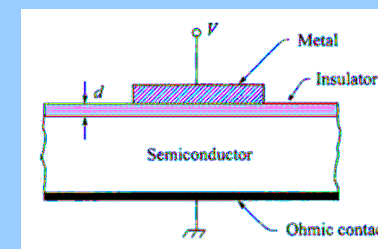
CCD (urządzenie ze sprzężeniem ładunkowym)
(urządzenie z przekazem ładunku)

WS 2008/2009



Kondensator MOS

złącze metal – izolator – półprzewodnik: podstawowy element CCD



WS 2008/2009



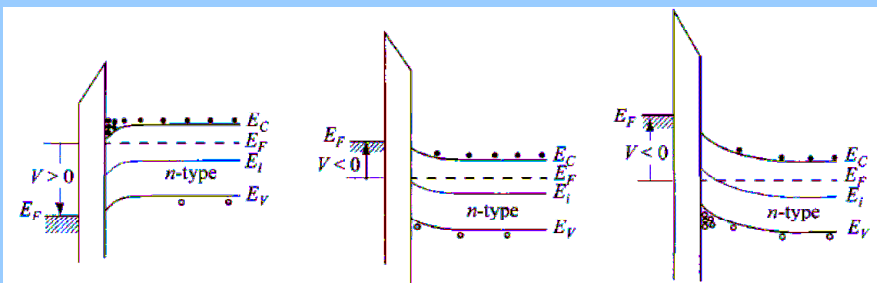
Kondensator MOS

półprzewodnik typu n

akumulacja

zubożenie

inwersja



WS 2008/2009



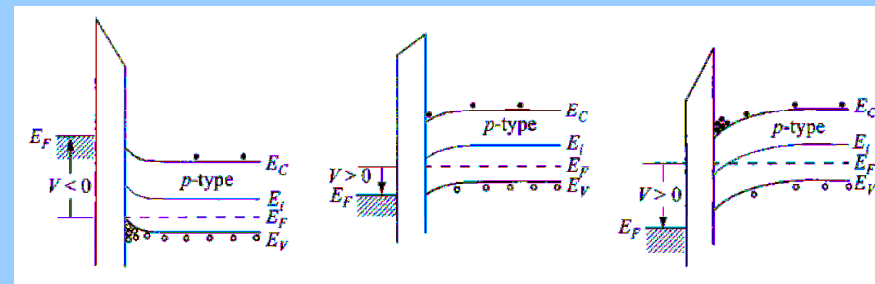
Kondensator MOS

półprzewodnik typu p

akumulacja

zubożenie

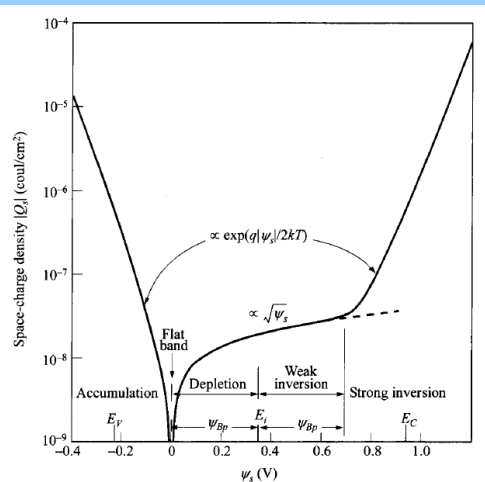
inwersja



WS 2008/2009



Kondensator MOS



krzem, p-typ

$N_A = 4 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$

$T = 300 \text{ K}$

- $\psi_s < 0$ Accumulation of holes
- $\psi_s = 0$ Flat-band condition
- $\psi_{Bp} > \psi_s > 0$ Depletion of holes
- $\psi_s = \psi_{Bp}$ Fermi-level at midgap
- $2\psi_{Bp} > \psi_s > \psi_{Bp}$ Weak inversion
- $\psi_s > 2\psi_{Bp}$ Strong inversion

WS 2008/2009



CCD - motywacja

wszystkie dotychczas omówione detektory (fotodiody, fotorezystory, fotopowielacze) wymagały zewnętrznego odbiornika, który umożliwił odczyt sygnału

fotodiody: zwykle niewielka szybkość odpowiedzi
fotopowielacze: czuła konstrukcja, konieczność chłodzenia
detektory hybrydowe: skomplikowany proces wytwarzania

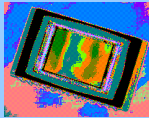
**BRAK
MOŻLIWOŚCI
OBRAZOWANIA**

WS 2008/2009

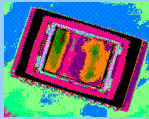


CCD

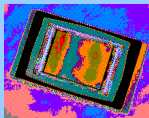
dążenie do połączenia detekcji i odczytu na jednym kawałku krzemu



nośniki ładunku zebrane przez element aktywny optycznie są przekazywane do układu odczytującego znajdującego się w pobliżu detektora



umieszczenie detektora i czytnika na jednym elemencie pozwala na kompaktową konstrukcję i wysoki współczynnik wypełnienia powierzchni



przy rozmiarze pojedynczego piksela rzędu 10 mikronów – możliwość obrazowania z dużą rozdzielczością przestrzenną

WS 2008/2009



Skonstruowanie CCD

rok 1969

Willard S. Boyle,
George E. Smith,
AT&T Labs

pierwsza linijka:
500 pikseli – 1974

pierwsza matryca:
100x100 pikseli -
1974



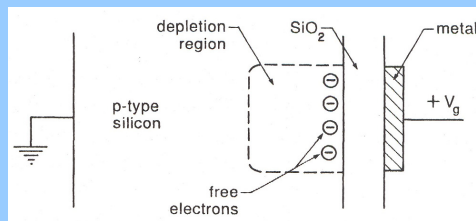
WS 2008/2009



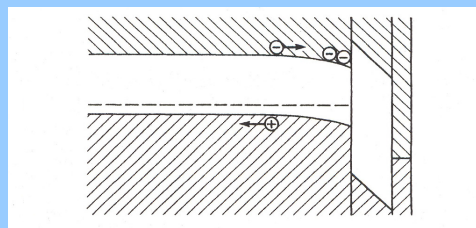
Pojedynczy kondensator

pixel – picture element

Si, typ p, w warunkach inwersji
kondensator elektronowy



przyłożenie napięcia V_g :
odpływ dziur – warstwa
zubożona
wolne elektrony na złączu



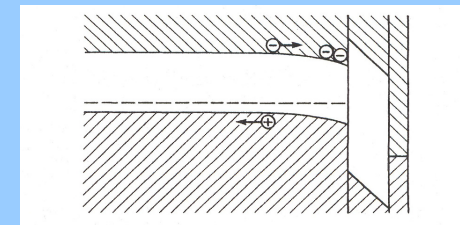
absorpcja fotonu:
rozbitcie pary elektron-dziura
brak rekombinacji w warstwie
zubożonej

WS 2008/2009



Pojedynczy kondensator

liczba elektronów (dla dostatecznie długiej ekspozycji)
odpowiada liczbie zaabsorbowanych fotonów

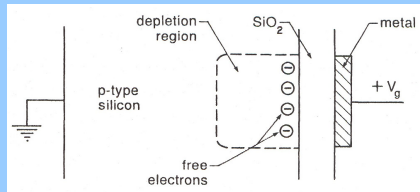


wzbudzenia termiczne:
w wysokich temperaturach → istotny wkład do sygnału
dla pomiarów ultraczulych → chłodzenie do temperatur 130-160K

WS 2008/2009



Frontside illumination



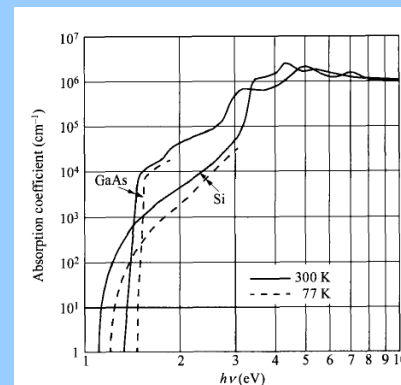
grubość warstwy krzemu domieszkowanego na typ p ~ 100 μm

oświetlenie poprzez elektrodę pierwsze CCD – metal (max. 512) obecnie – cienka warstwa krzemu silnie domieszkowana

problem: silna absorpcja dla fali krótszych niż 400 nm



Własności krzemu

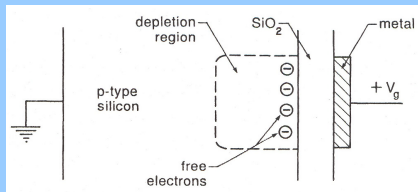


Wavelength (Nanometers)	Penetration Depth (Micrometers)
400	0.19
450	1.0
500	2.3
550	3.3
600	5.0
650	7.6
700	8.5
750	16
800	23
850	46
900	62
950	150
1000	470
1050	1500
1100	7600

rozwiązanie: elektrody z ITO (indium tin oxide) lub warstwa izolatora z azotku krzemu



Backside illumination



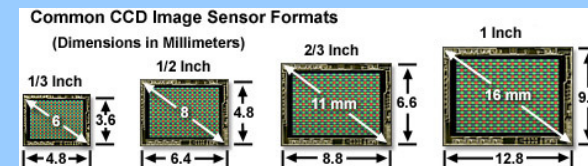
warstwa krzemu ~ 10 μm (nie może być zbyt cienka!) opracowanie technologii ~ 10 lat silne niejednorodności w procesie ścieniania, tworzenie się tlenków

dużo lepsza czułość w zakresie światła widzialnego i nadfioletu konieczność dyfuzji nośników wygenerowanych przez fotony do strefy zubożonej niekorzystny wpływ stanów powierzchniowych

wniosek: życie nie jest proste ☺



Zadania CCD

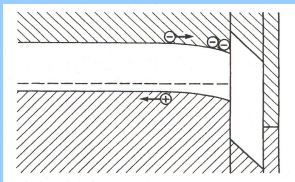


detektor CCD musi wykonać cztery podstawowe zadania

1. Wytworzenie ładunku (poprzez efekt fotoelektryczny wewnętrzny)
2. Zmagazynowanie ładunku (dzięki napięciu bramki)
3. Przekaz ładunku (dzięki sekwencji napięć na elementach piksela)
4. Odczyt ładunku – paczki ładunku detektowane są jako napięcie



Pojemność studni



pojemność studni (*well capacity*) liczba elektronów, które mogą zostać zmagazynowane w studni

$$Q_w = C_0(V_g - V_T)$$

$$C_0 = \frac{A\kappa_0\epsilon_0}{X_0}$$

A – powierzchnia elektrody
X₀ – grubość warstwy SiO₂
κ₀ – stała dielektryczna SiO₂

dla: ΔV = 3V, A = 225 μm², X₀ = 0.1 μm

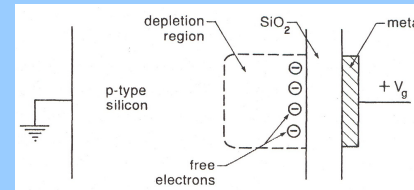
Q_w ~ 2000000

typowo od 10⁵ do 10⁷ elektronów

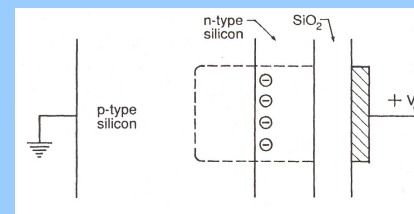
WS 2008/2009



Kanał zatopiony



kanał powierzchniowy:
silny wpływ stanów powierzchniowych na granicy krzemu i SiO₂



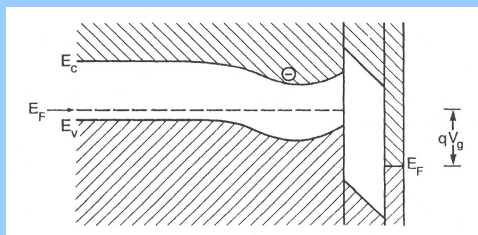
kanał zatopiony:
wprowadzenie cienkiej (~1μm) warstwy krzemu domieszkowanego przeciwnie na typ n i typ p tworzą złącze

WS 2008/2009



Kanał zatopiony

struktura pasmowa kondensatora z zatopionym kanałem



WS 2008/2009



Przekaz „ładunku”

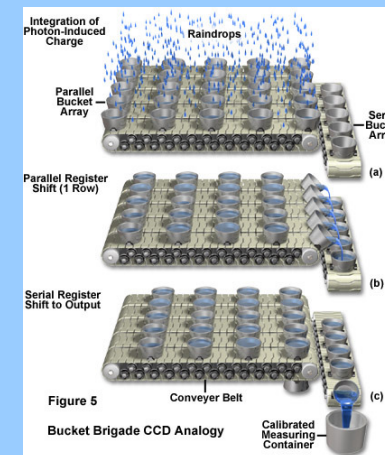


Figure 5

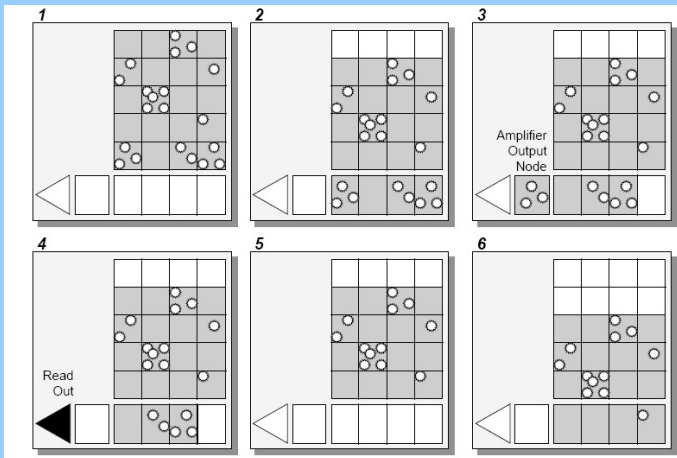
Bucket Brigade CCD Analogy

Calibrated Measuring Container

WS 2008/2009



Przekaz ładunku

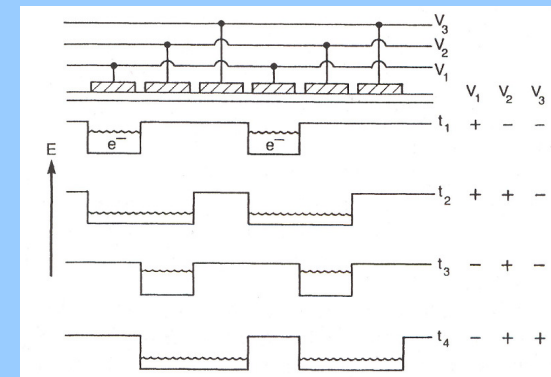


WS 2008/2009



Przekaz ładunku

sekwencja napięć prowadzi do transferu ładunku
detektor CCD trójfazowy



WS 2008/2009



Przekaz ładunku

silne sygnały – wiodący wkład od dryftu
odpychających się elektronów

elektrody oddalone o L_e , w jednej z nich znajduje się N_0 elektronów

różnica potencjałów: $V_{21} = N_0 q / C_0$, pole elektryczne: $\epsilon_{21} = N_0 q / L_e C_0$

wówczas prędkość dryftu: $\langle v_{21} \rangle = -\mu \epsilon_{21}$

charakterystyczny czas dryftu: $\tau_{SI} = -L_e / \langle v_{21} \rangle$

$$\tau_{SI} \sim \frac{L_e}{\mu \epsilon_{21}} = \frac{L_e^2 C_0}{\mu N_0 q} \quad \tau_{SI} = \frac{2L_e^2 C_0}{\pi \mu N_0 q}$$

dla $N_0 = 3 \times 10^5$

$\tau_{SI} = 0.002 \mu s$

WS 2008/2009



Przekaz ładunku

słabe sygnały – wiodący wkład od termicznej dyfuzji elektronów

$$\tau_{th} \sim \frac{L_e^2}{D} \quad \text{stała dyfuzji}$$

rygorystyczny rachunek prowadzi do równania:

$$\tau_{th} = \frac{4L_e^2}{\pi^2 D} \quad \text{dla } T = 300K$$

$$\tau_{th} = 0.026 \mu s$$

typowo dla wypełnionych studni: $\tau_{th} \gg \tau_{SI}$

WS 2008/2009



Przekaz ładunku

ale τ_{Si} zależy odwrotnie proporcjonalnie od N_0

$$N_0^{crit}$$

koncentracja krytyczna, poniżej której dominująca jest termiczna dyfuzja nośników

z warunku $\tau_{Si} = \tau_{th}$

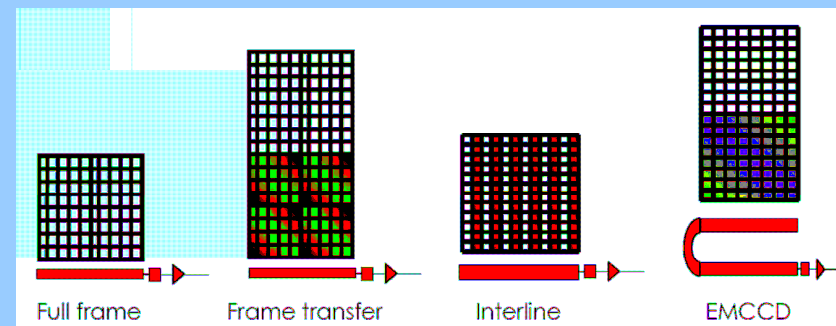
$$N_0^{crit} = \frac{\pi DC_0}{2\mu q}$$

dla m-fazowego CCD działającego w oparciu o wykładniczą zależność od czasu, wydajność transferu elektronów opisana jest zależnością

$$CTE = (1 - e^{-V/\tau})^m$$

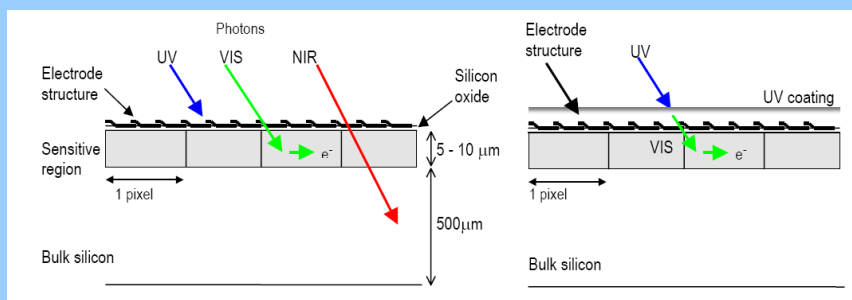


Przekaz ładunku



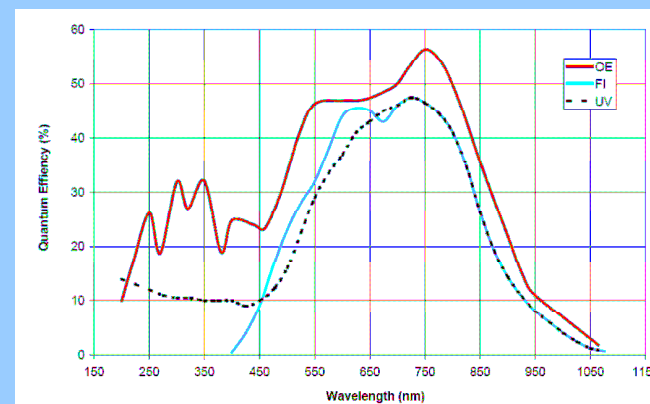
Wydajność kwantowa

front-illuminated CCD (FI)



Wydajność kwantowa

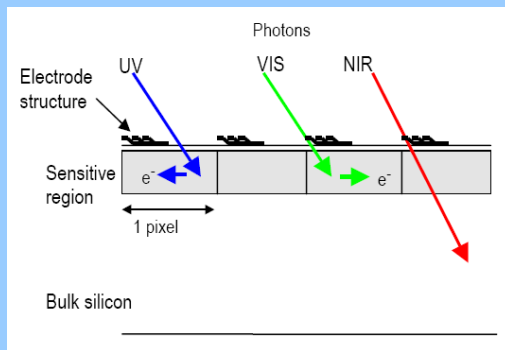
front-illuminated CCD (FI)





Wydajność kwantowa

open electrode CCD (OE): wzrost wydajności w zakresie UV

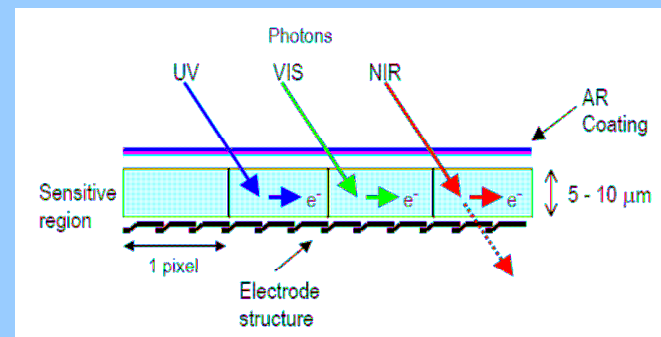


WS 2008/2009



Wydajność kwantowa

back-illuminated CCD



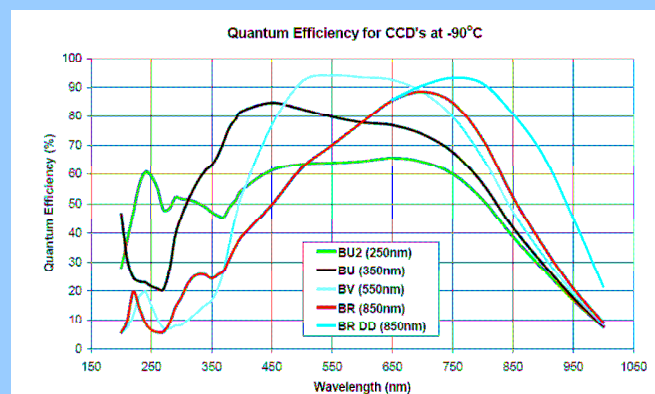
poprzez warstwę AR możliwa zmiana maksimum czułości

WS 2008/2009



Wydajność kwantowa

back-illuminated CCD

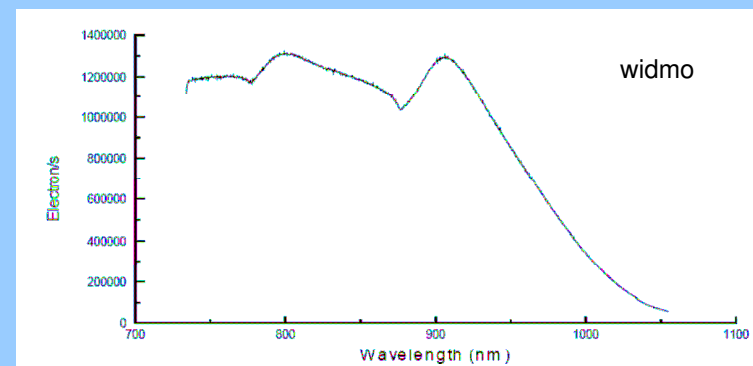


WS 2008/2009



Etaloning

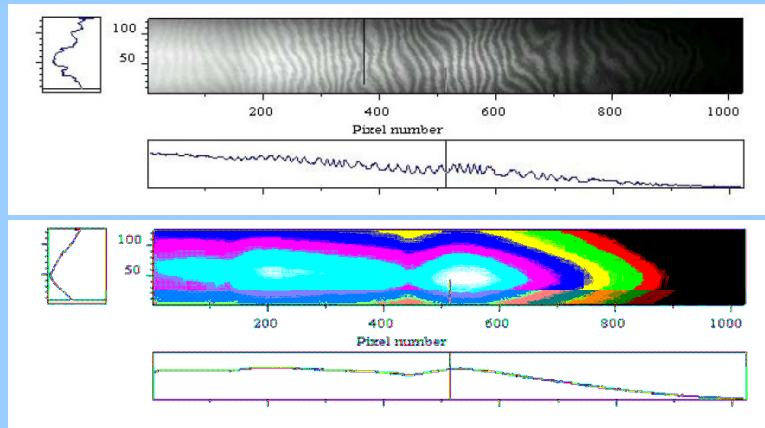
wzór interferencyjny w bliskiej podczerwieni dla back-illuminated CCD



WS 2008/2009

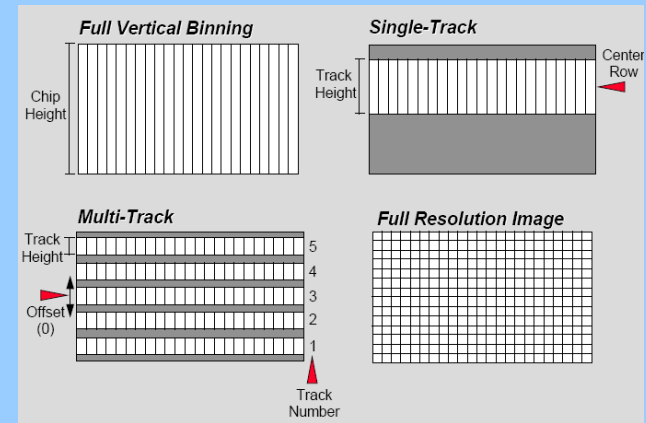


Etaloning



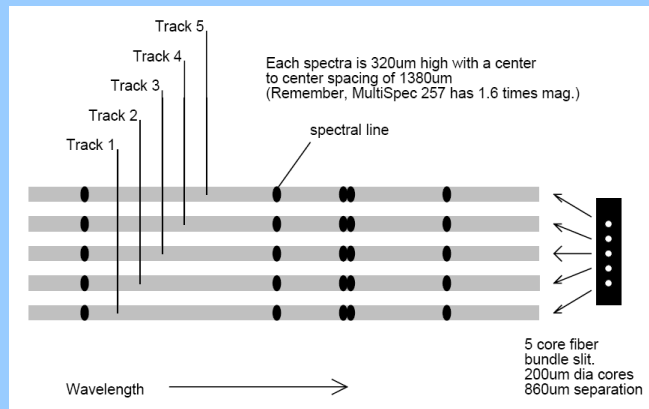
Mody detekcji

binning określa obszar i sposób detekcji



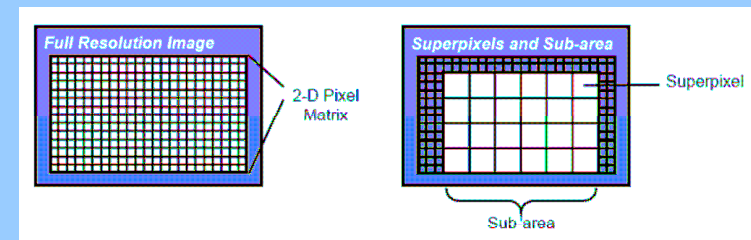
Mody detekcji

multi-track binning



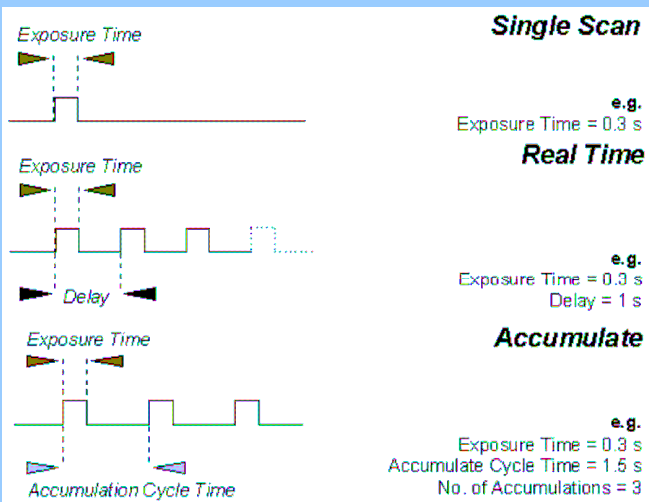
Mody detekcji

tworzenie super-pikseli poprzez binning poprzeczny i podłużny: szybsza detekcja, mniejsze obciążenie pamięci, wzrost czułości

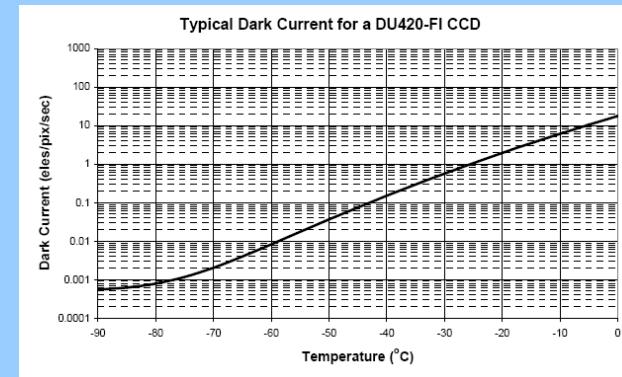




Mody detekcji



Prąd ciemny



chłodzenie ciekłym azotem lub termoelektrycznie (efekt Peltier)



Plan na dwunasty wykład

