



Uniwersytet
Wrocławski

Fotometria CCD

3. Kamera CCD. Kalibracja obrazów CCD

Andrzej Pigulski

Instytut Astronomiczny Uniwersytetu Wrocławskiego

Produkty HELAS-a, 2010

CCD

CCD = Charge Coupled Device
(urządzenie o sprzężeniu ładunkowym)

- Pierwsze CCD: 1970, Willard S. Boyle, George E. Smith (Bell Telephone Lab.), liniowość i wysoka czułość w szerokim zakresie λ .
- 1974, chip 100×100 pikseli + 20-cm teleskop Celestrona do obserwacji Księżyca i planet.

CCD

CCD = Charge Coupled Device
(urządzenie o sprzężeniu ładunkowym)

- Pierwsze CCD: 1970, Willard S. Boyle, George E. Smith (Bell Telephone Lab.), liniowość i wysoka czułość w szerokim zakresie λ .
- 1974, chip 100×100 pikseli + 20-cm teleskop Celestrona do obserwacji Księżyca i planet.



Jedno z pierwszych
astronomicznych zdjęć CCD: obraz
Urana z 1975 roku.

Poprzednicy CCD: wady i zalety

Klisza (fotometria i spektroskopia):

- zdolność gromadzenia sygnału,
- jednoczesna rejestracja wielu obiektów,
- nieliniowość
- uciążliwa obróbka i kalibracja,
- mały zakres dynamiczny,
- niska wydajność kwantowa (1-3%).

Poprzednicy CCD: wady i zalety

Kliska (fotometria i spektroskopia):

- zdolność gromadzenia sygnału,
- jednoczesna rejestracja wielu obiektów,
- nieliniowość
- uciążliwa obróbka i kalibracja,
- mały zakres dynamiczny,
- niska wydajność kwantowa (1-3%).

Fotopowielacz (fotometria i spektrofotometria):

- liniowość,
- większy niż kliska zakres dynamiczny,
- stosunkowo duża wydajność kwantowa (do 30%),
- prosta kalibracja i redukcja,
- jednoczesna obserwacja co najwyżej kilku obiektów.

CCD: wady i zalety

CCD (fotometria i spektroskopia):

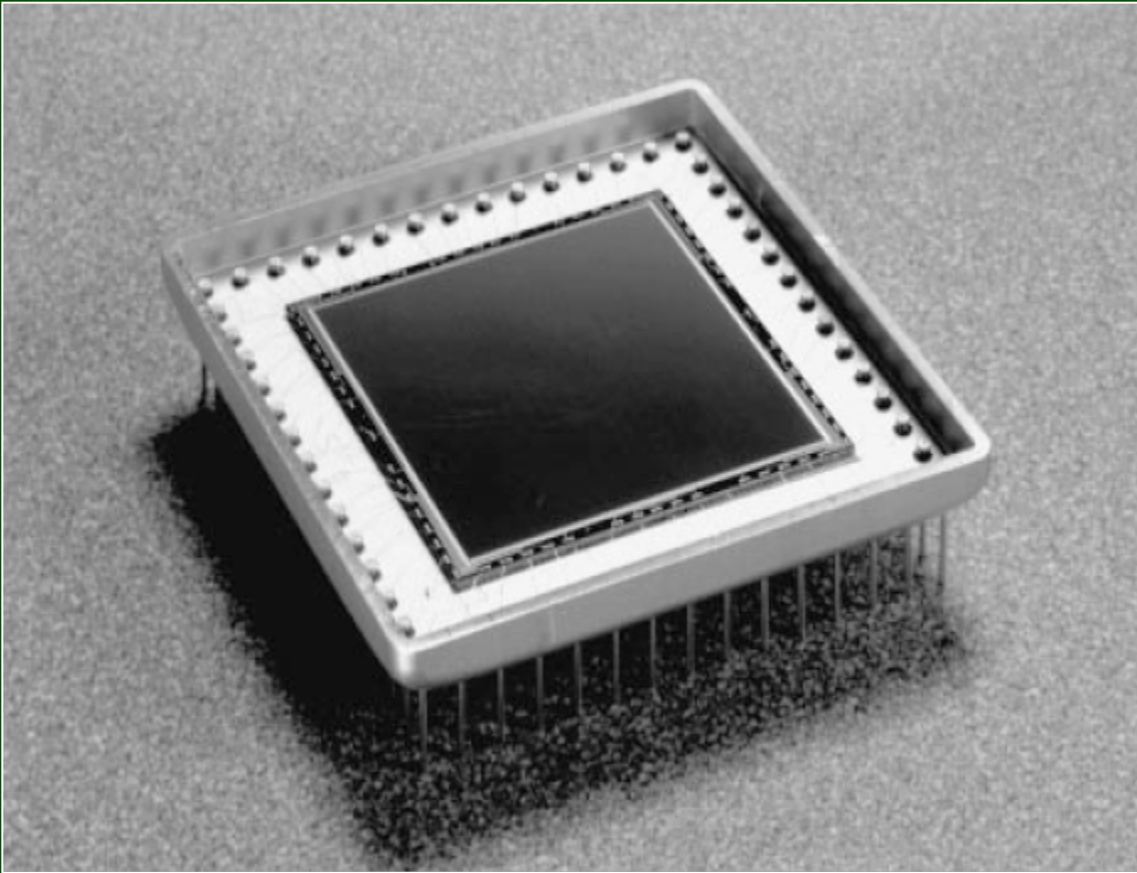
- zdolność gromadzenia sygnału,
- jednoczesna rejestracja wielu obiektów,
- liniowość w dużym zakresie dynamicznym (7-9 mag),
- bardzo wysoka wydajność kwantowa (80-90%),
- czułość w szerokim zakresie λ
(typowo 300 nm – 1,1 μm),
- mały prąd ciemny.
- wysoka cena,
- niemożność rejestracji szybkich zjawisk,
- mała czułość w UV (dla niektórych kamer).

Kamera CCD: najważniejsze elementy

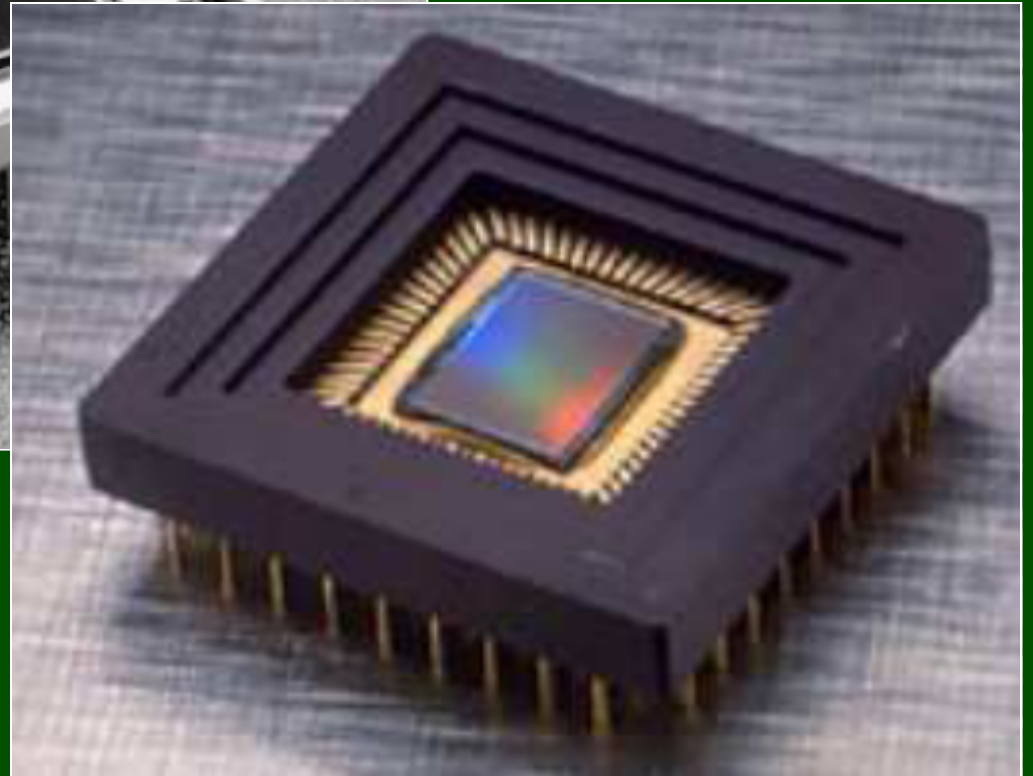
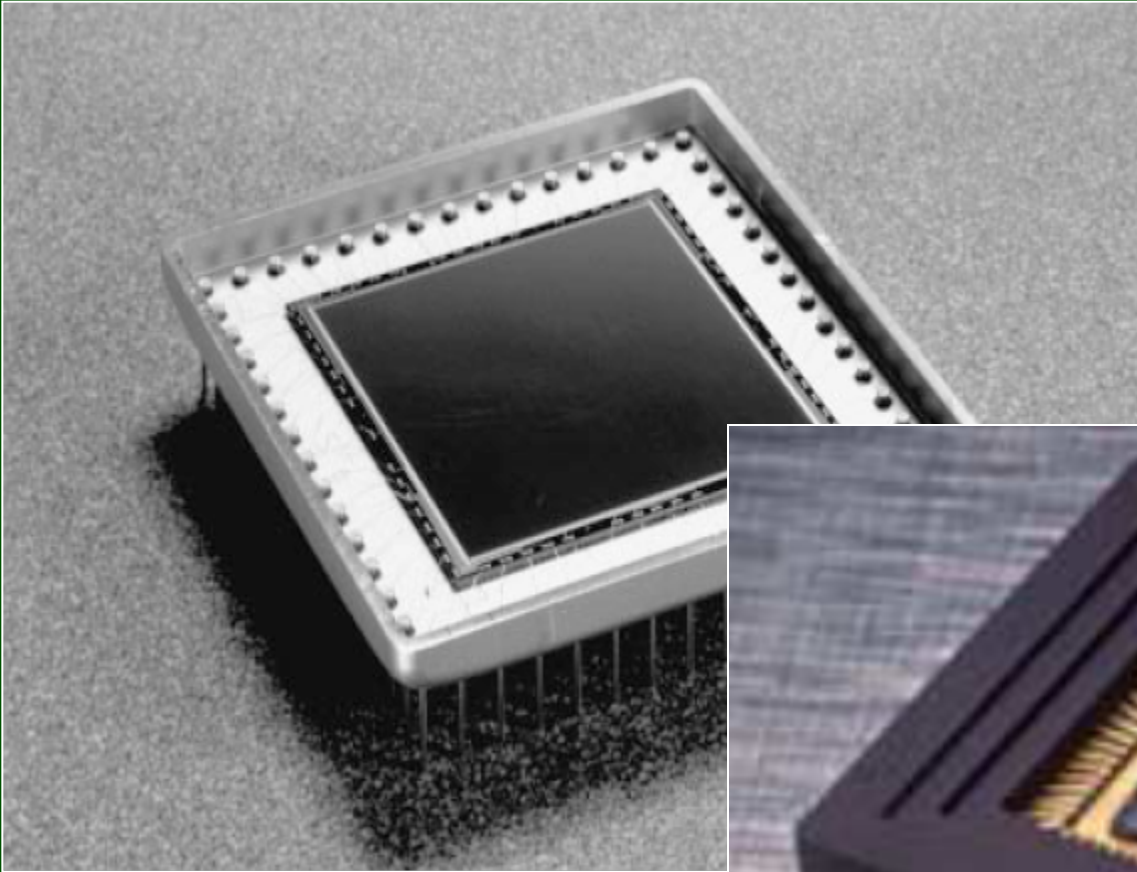
- czip (chip) CCD,
- obudowa kamery (hermetyczna, próżniowa),
- migawka,
- elementy elektroniczne + kontroler,
- układ chłodzący,
- interfejs do komputera.



CCD: chipy



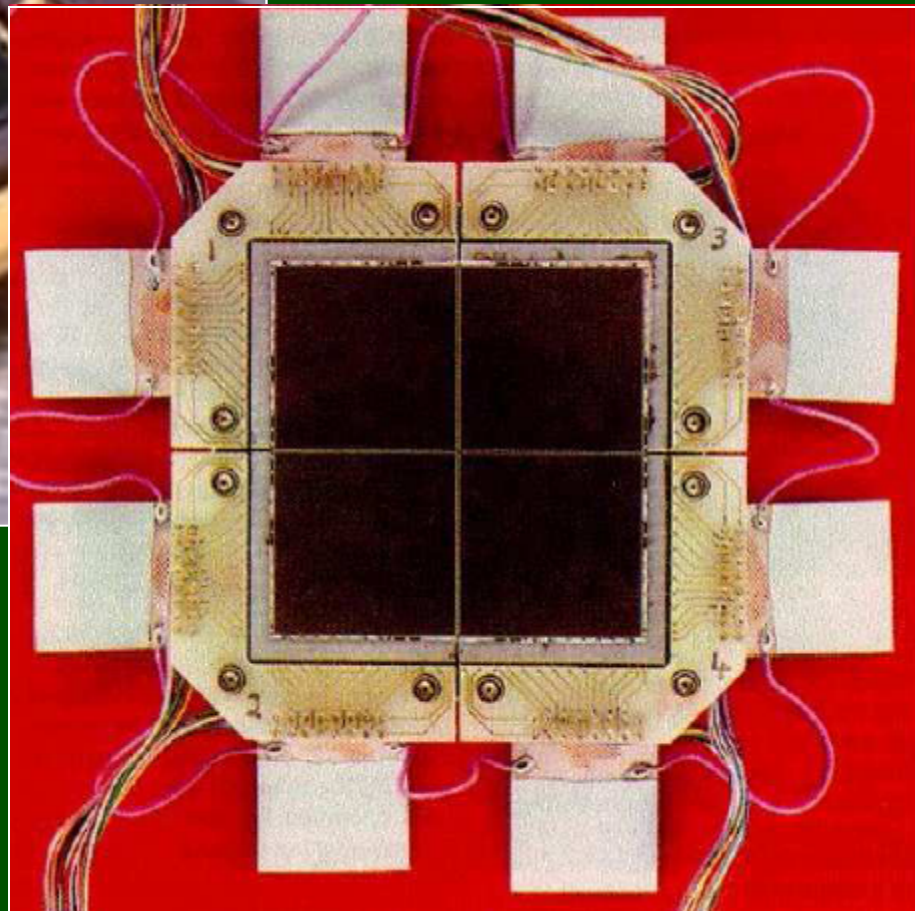
CCD: chipy



CCD: chipy – c.d.

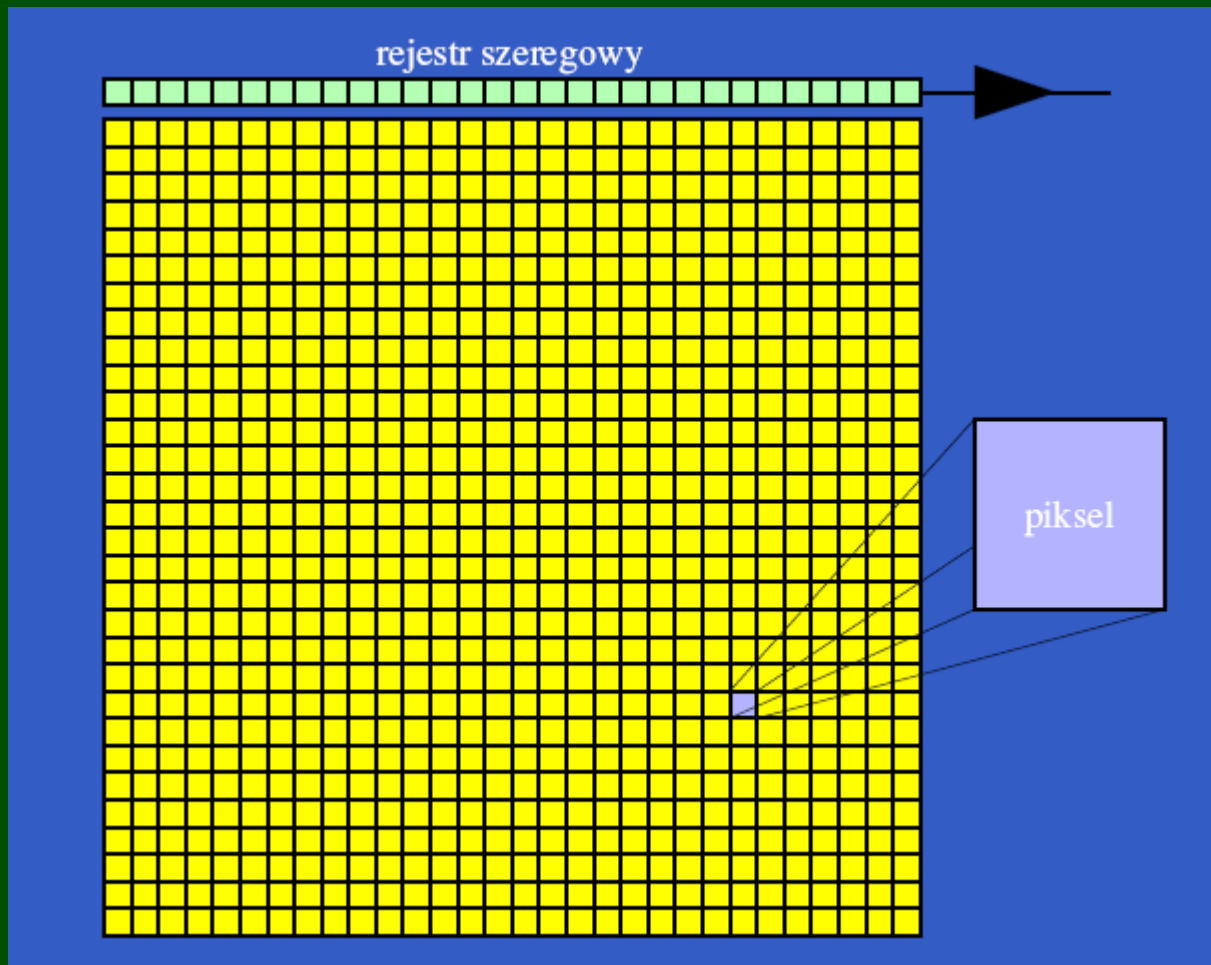


CCD: chipy – c.d.

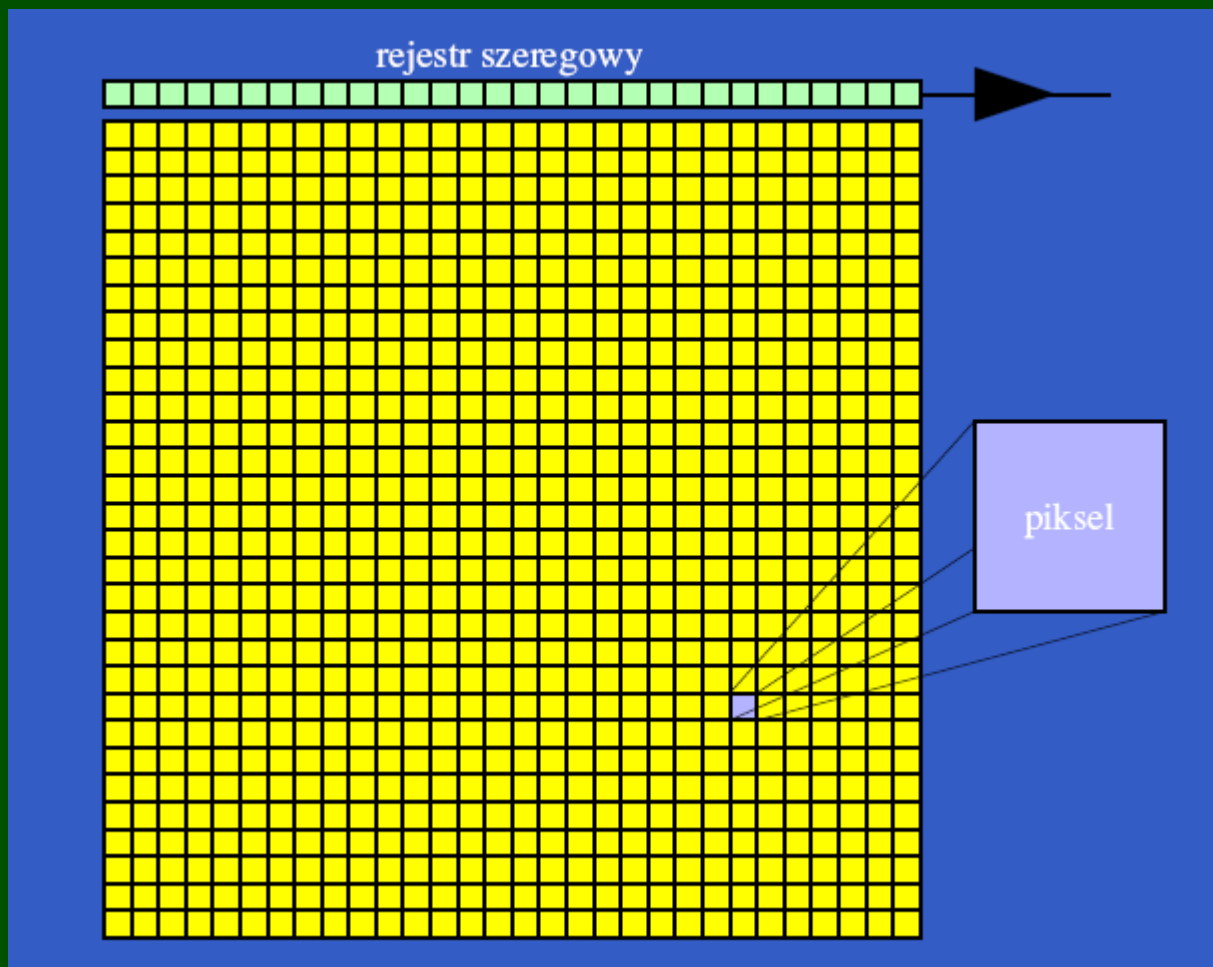


Mozaika 4 chipów

CCD: budowa

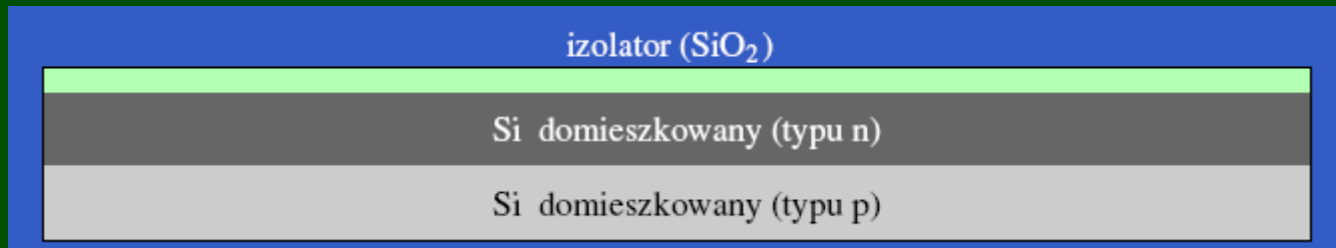


CCD: budowa

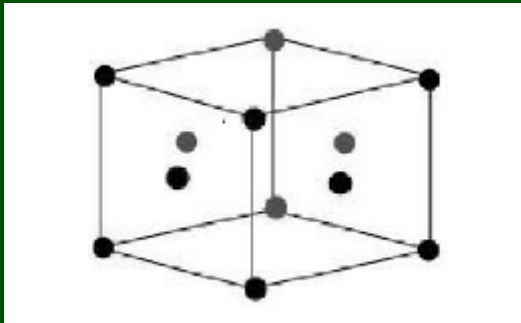
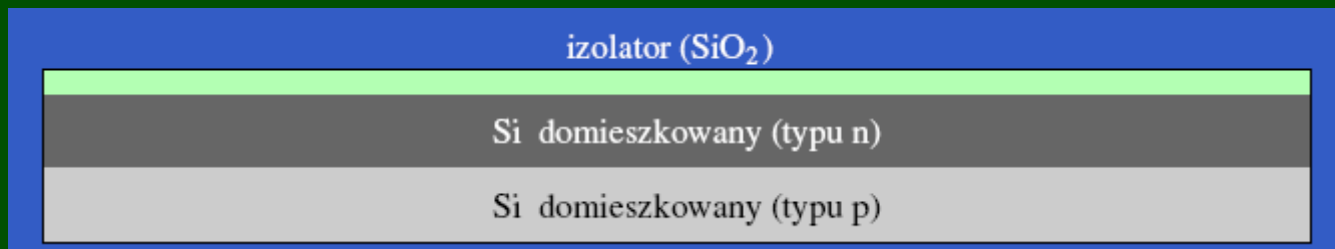


piksel = picture element

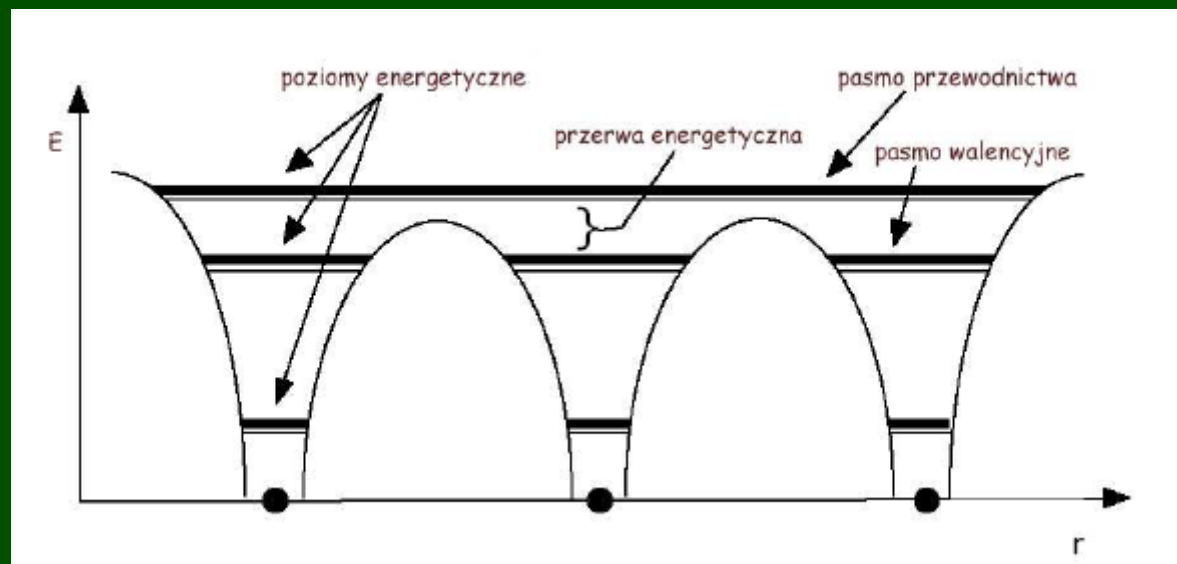
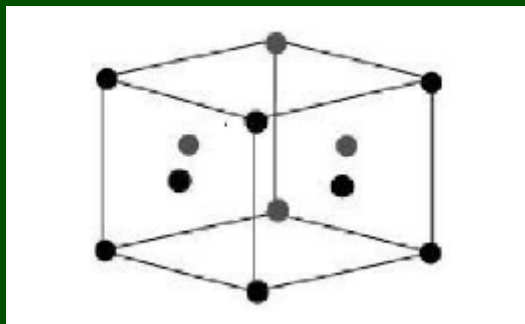
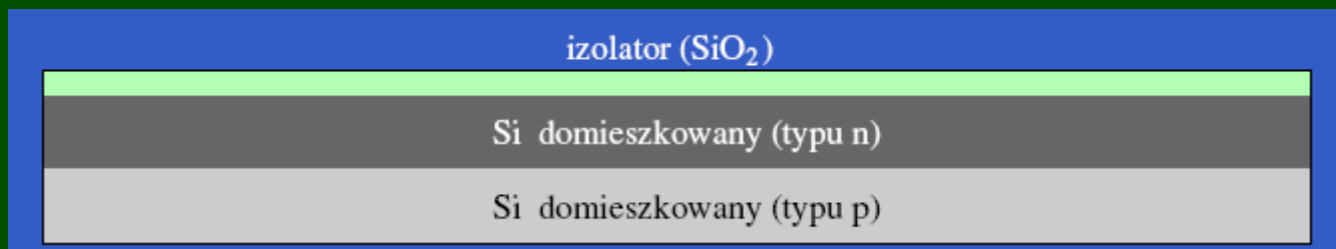
CCD: budowa



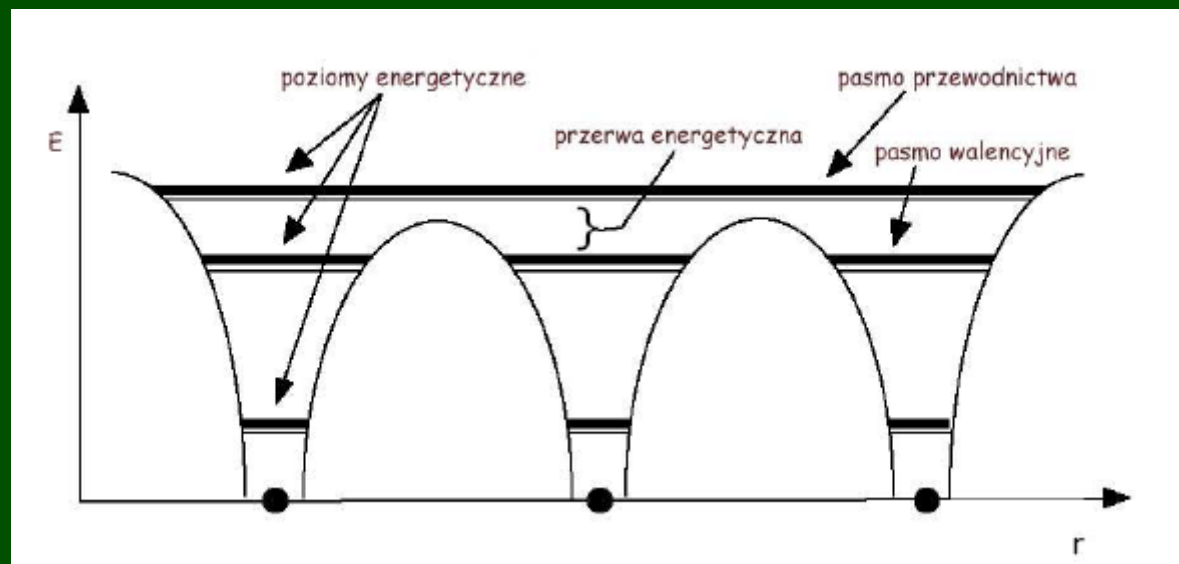
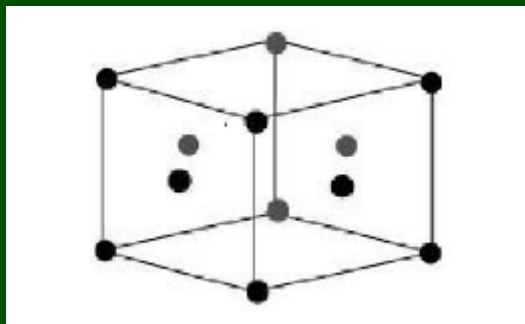
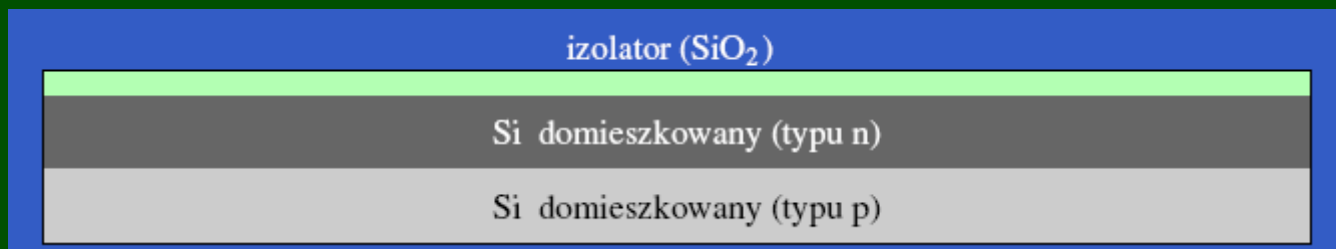
CCD: budowa



CCD: budowa



CCD: budowa



Wykorzystywane zjawisko:
wewnętrzny efekt fotoelektryczny

CCD: budowa

izolator (SiO_2)

Si domieszkowany (typu n)

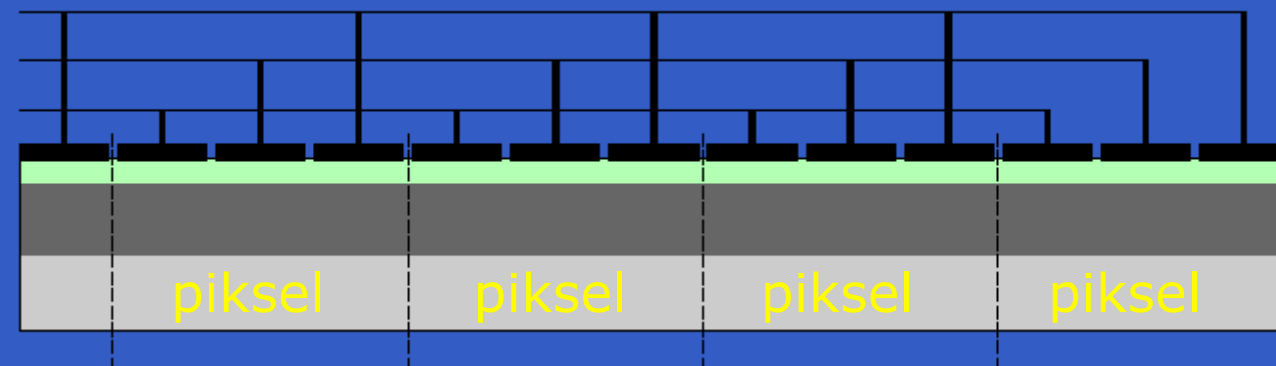
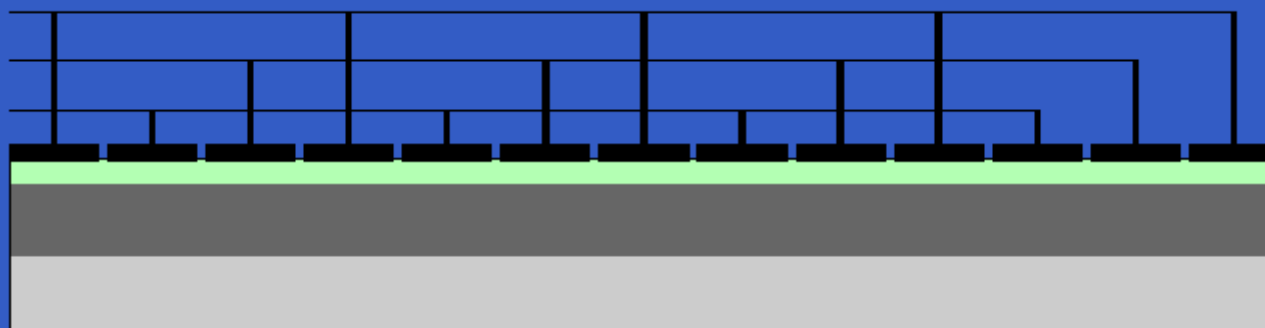
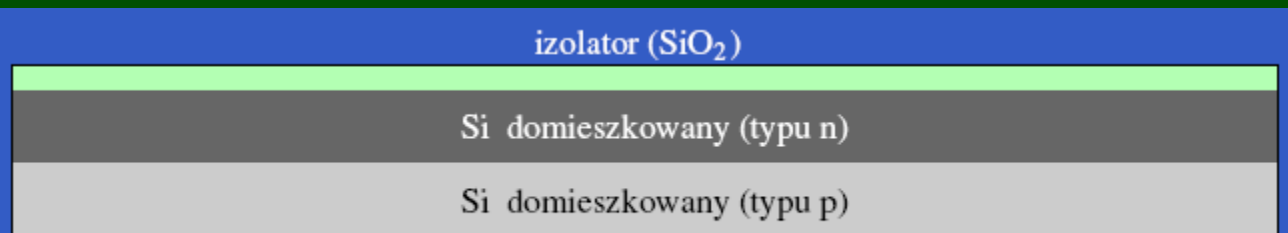
Si domieszkowany (typu p)

CCD: budowa



+ elektrody

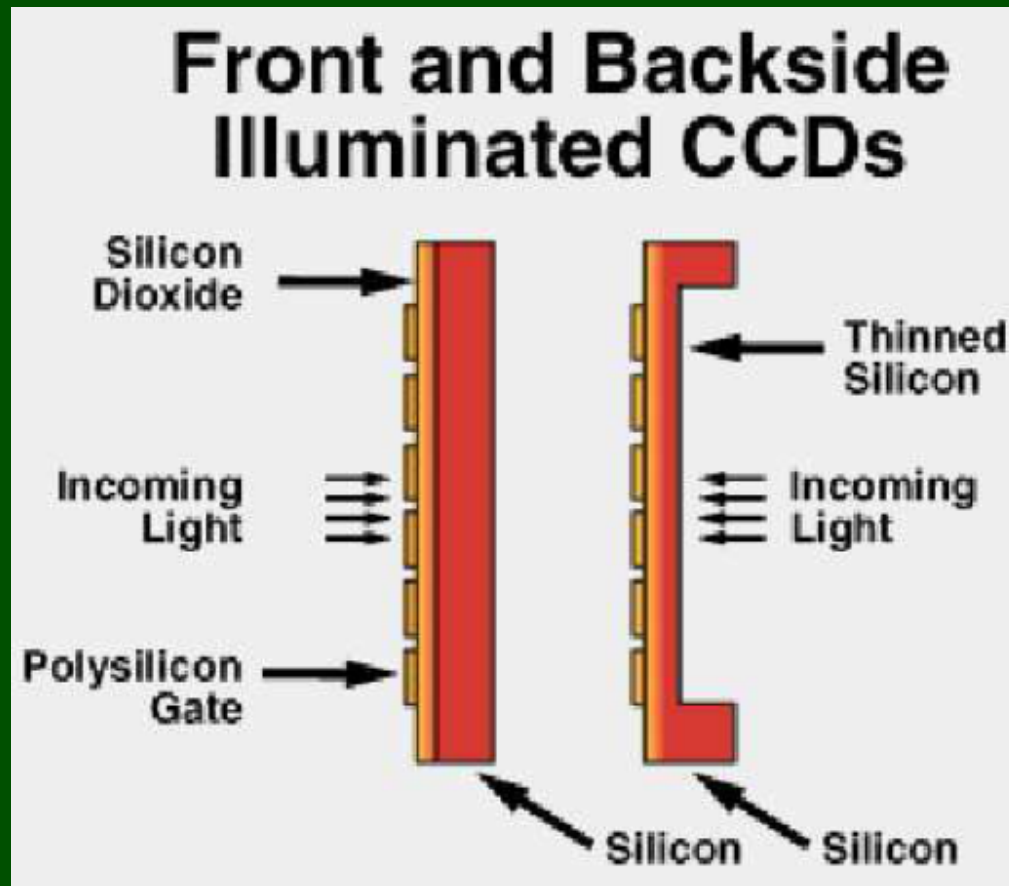
CCD: budowa



Proces uzyskiwania obrazu

- Naświetlanie chipu (zbieranie światła).
- Zbieranie ładunku.
- Transfer ładunku.
- Odczyt ładunku.
- Zapis obrazu w postaci cyfrowej.

Naświetlanie + zbieranie ładunku

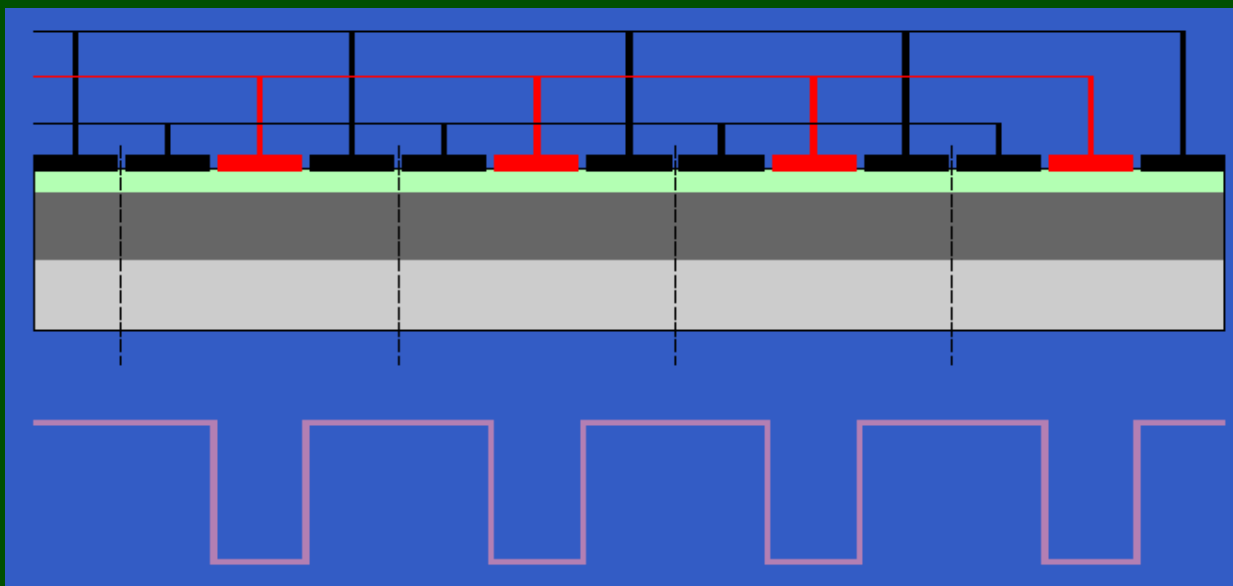


Dwa rodzaje:

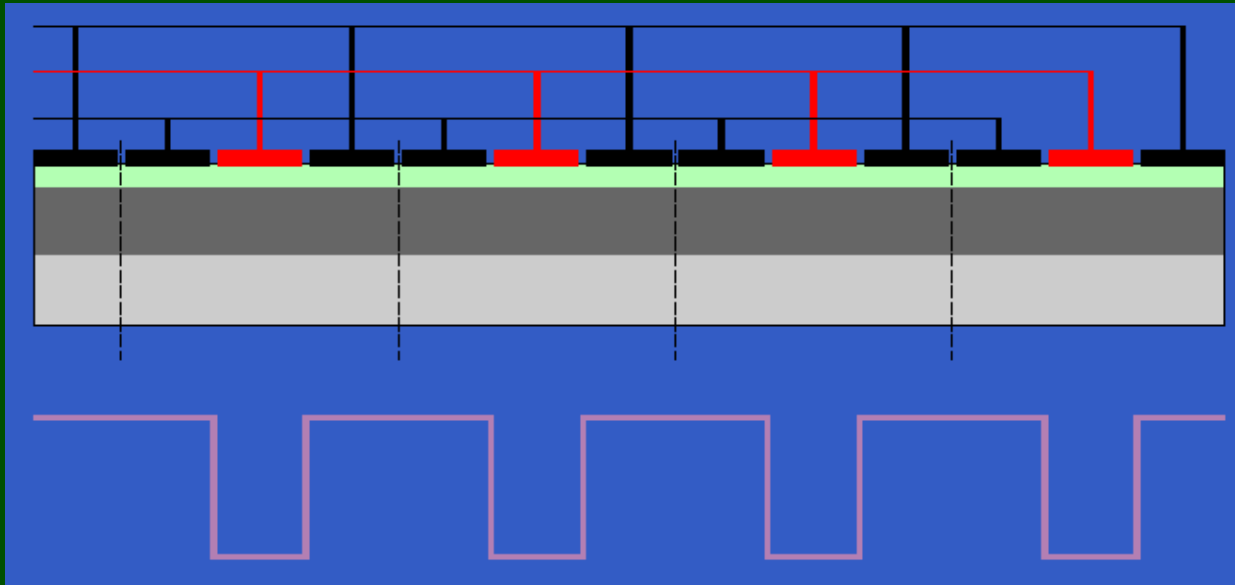
naświetlane od przodu (front-illuminated)

naświetlane od tyłu (back-illuminated, thinned)

Naświetlanie + zbieranie ładunku



Naświetlanie + zbieranie ładunku



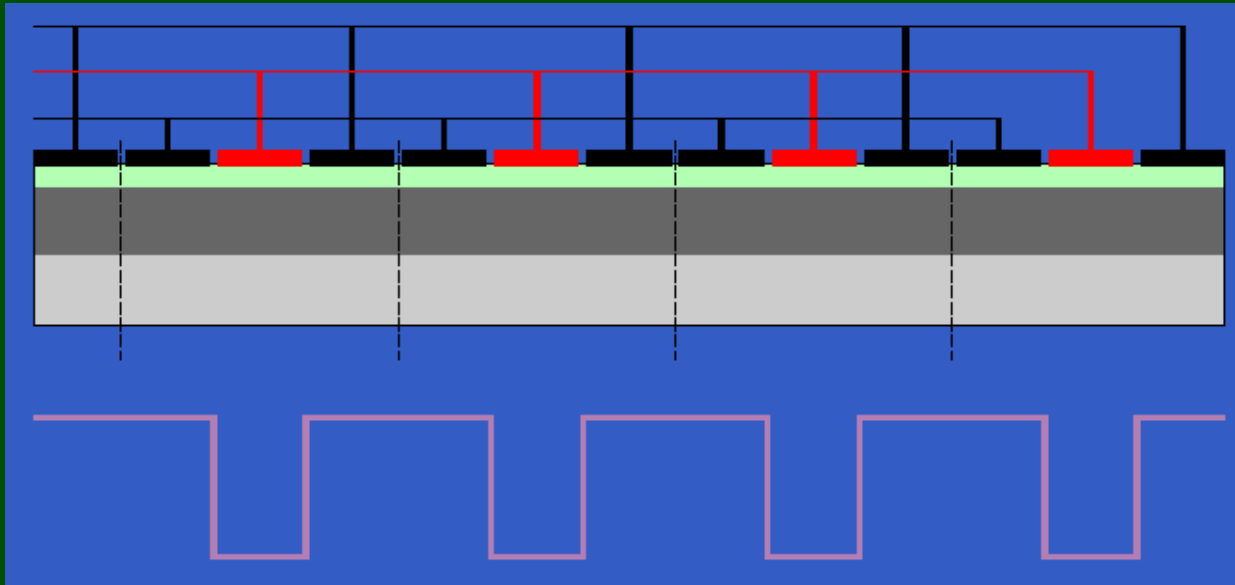
Dla Si przerwa energetyczna wynosi 1,1 eV.

$$E_{\text{fot}} > 1,1 \text{ eV}$$

$$E = hc/\lambda$$

$$\lambda < 11,000 \text{ \AA}$$

Naświetlanie + zbieranie ładunku



Dla Si przerwa energetyczna wynosi 1,1 eV.

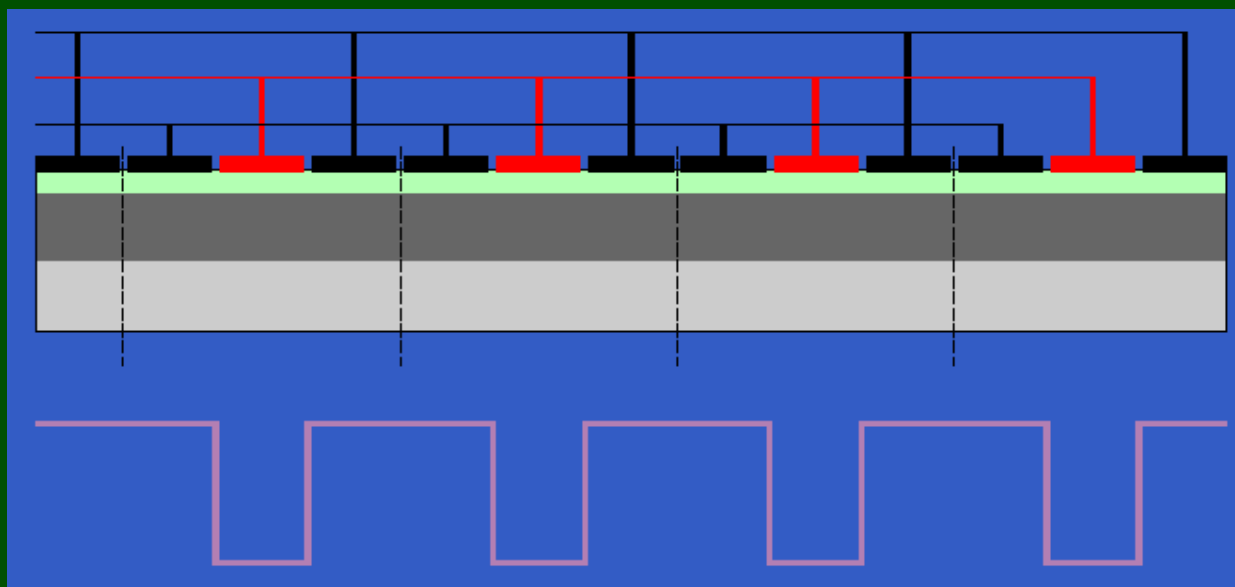
$$E_{\text{fot}} > 1,1 \text{ eV}$$

$$E = hc/\lambda$$

$$\lambda < 11,000 \text{ \AA}$$

Fotony o energiach $1,1 \text{ eV} < E < 5 \text{ eV}$ tworzą pojedynczą parę dziura-elektron. Fotony o wyższych energiach wybijają więcej elektronów (do ok. 10 keV). Średnio, do utworzenia jednej pary dziura-elektron trzeba 3,65 eV.

Naświetlanie + zbieranie ładunku



Dla Si przerwa energetyczna wynosi 1,1 eV.

$$E_{\text{fot}} > 1,1 \text{ eV}$$

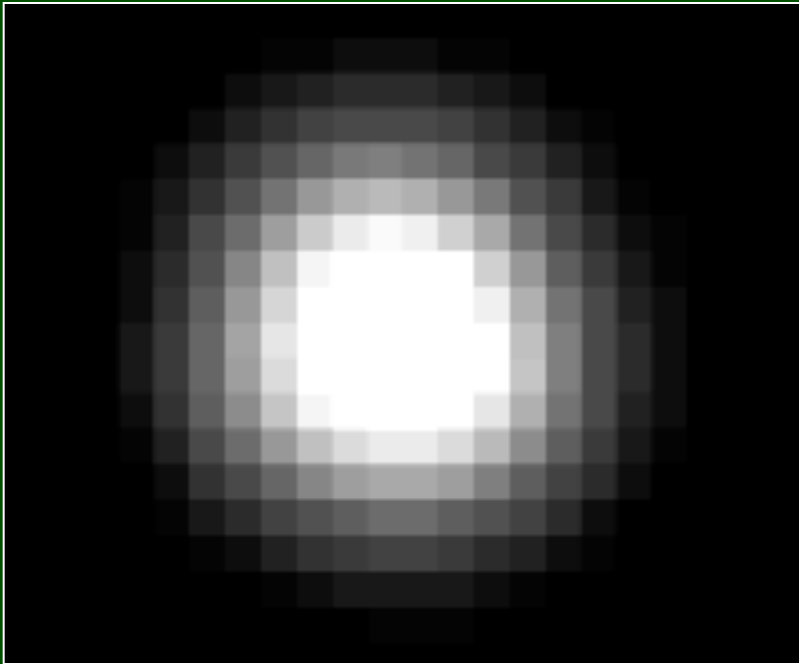
$$E = hc/\lambda$$

$$\lambda < 11,000 \text{ \AA}$$

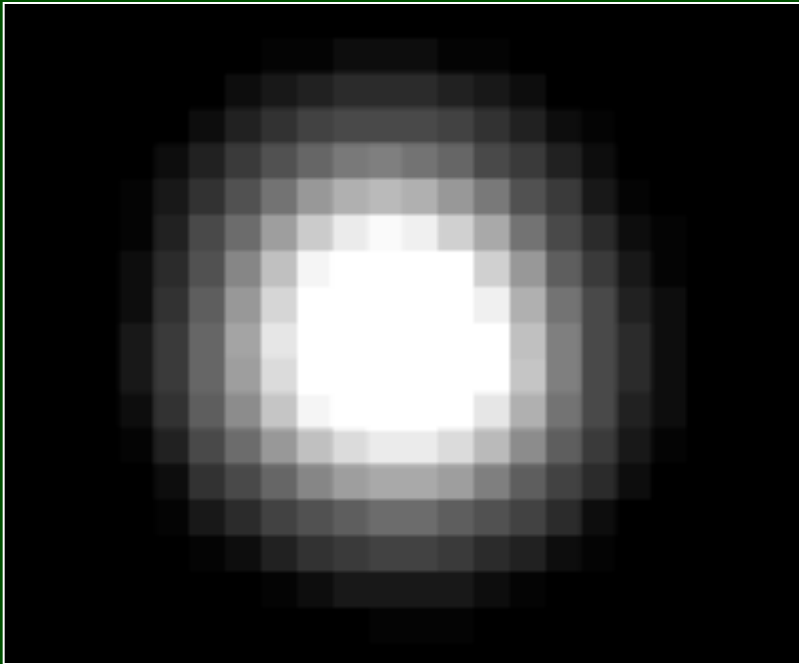
Fotony o energiach $1,1 \text{ eV} < E < 5 \text{ eV}$ tworzą pojedynczą parę dziura-elektron. Fotony o wyższych energiach wybijają więcej elektronów (do ok. 10 keV). Średnio, do utworzenia jednej pary dziura-elektron trzeba 3,65 eV.

Dla przykładu, foton o energii 1 keV utworzy $1000/3,65 \approx 274 \pm 5$ elektronów. Błąd wiąże się z tym, że część energii fotonu absorbuje krzem; wynosi on $(0,1N)^{1/2}$, gdzie 0,1 to tzw. czynnik Fano.

Naświetlanie + zbieranie ładunku

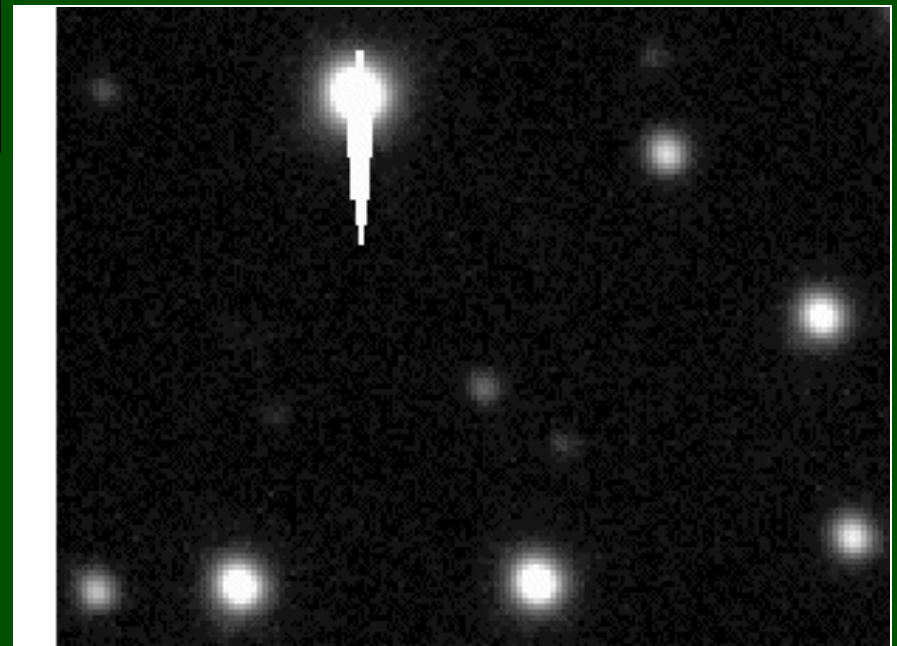


Naświetlanie + zbieranie ładunku

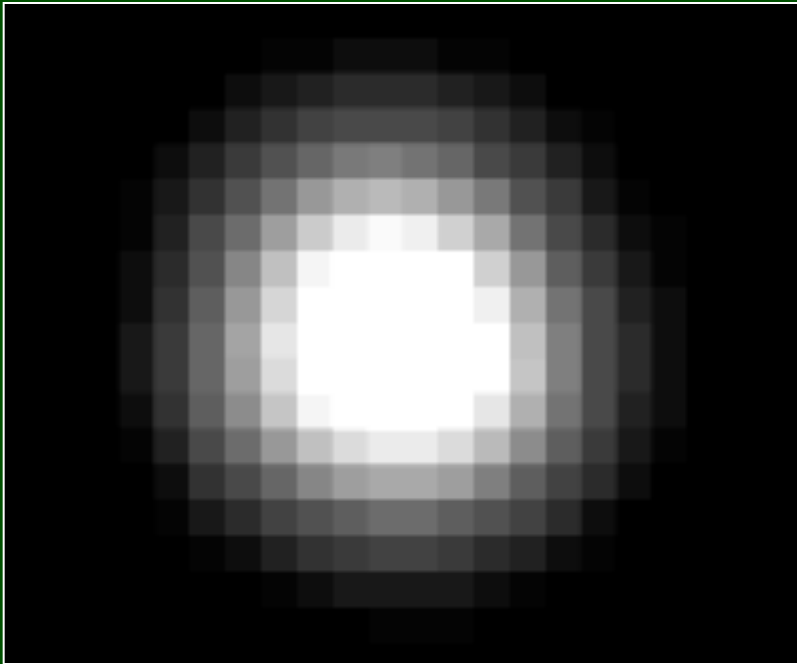


Nasylenie (saturation) +
przelewanie się ładunku
(blooming)

Są kamery zawierające tzw.
anti-blooming gate, ale zwykle
są nieliniowe



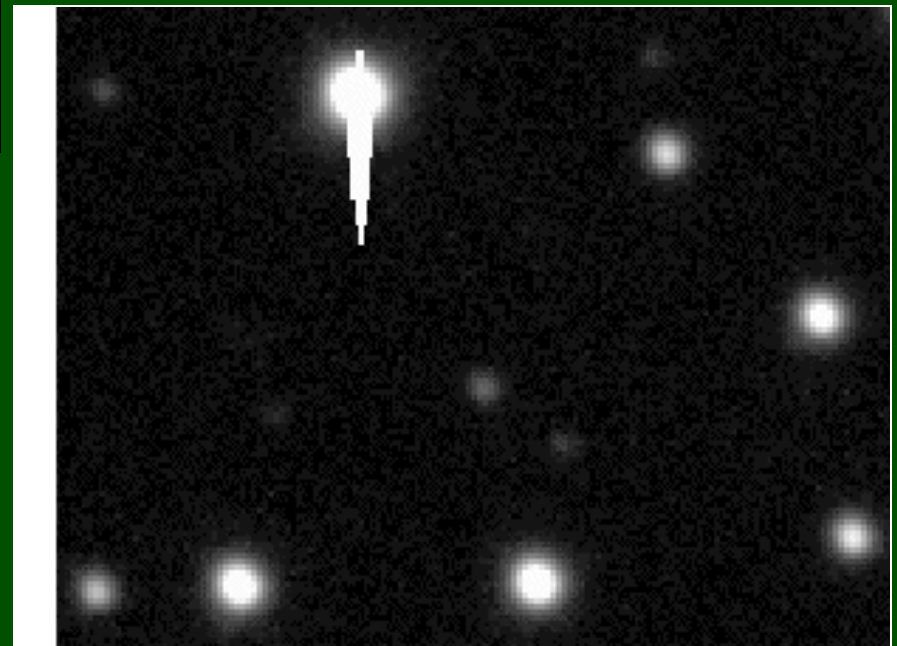
Naświetlanie + zbieranie ładunku



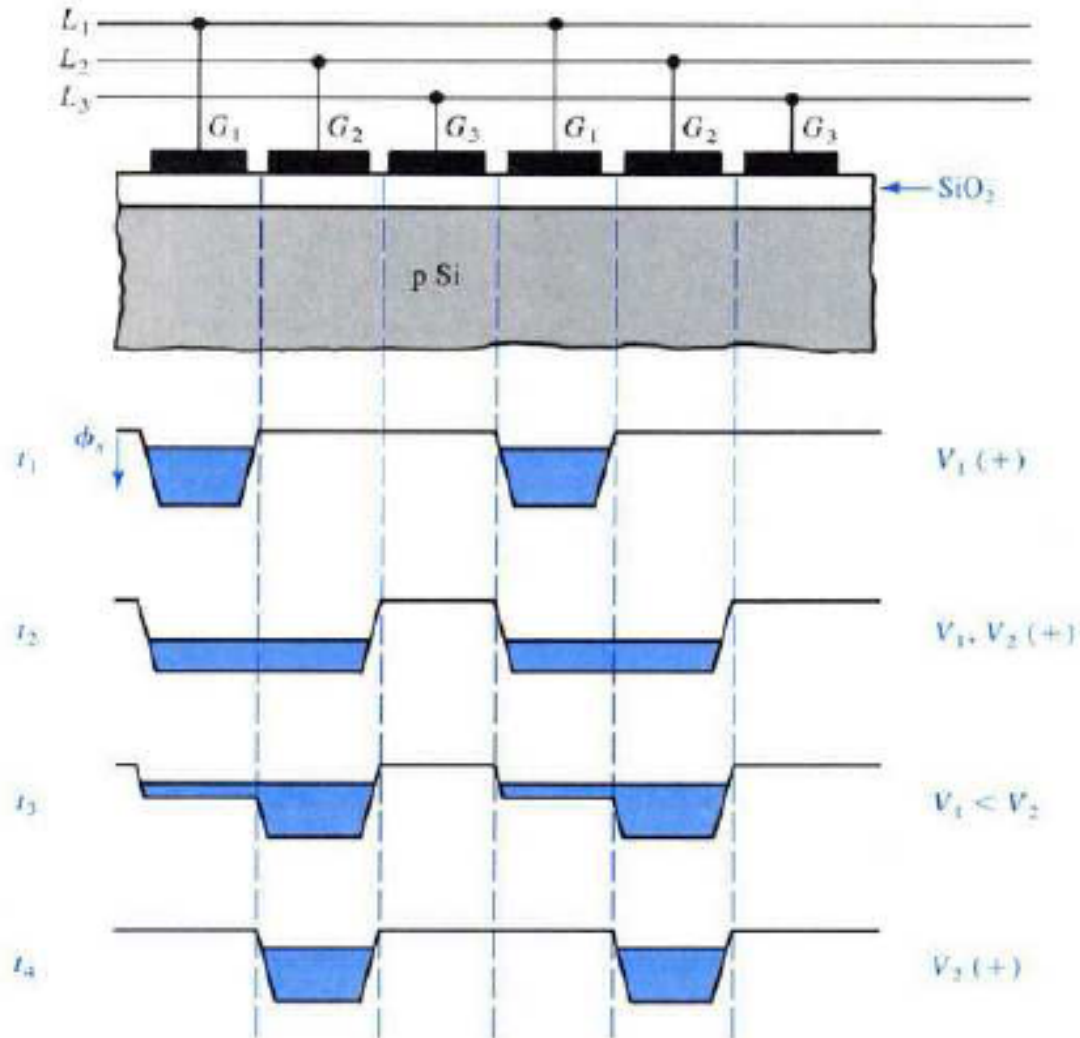
Z robieniem obrazów
CCD wiąże się pojęcie
czasu ekspozycji

Nasycenie (saturation) +
przelewanie się ładunku
(blooming)

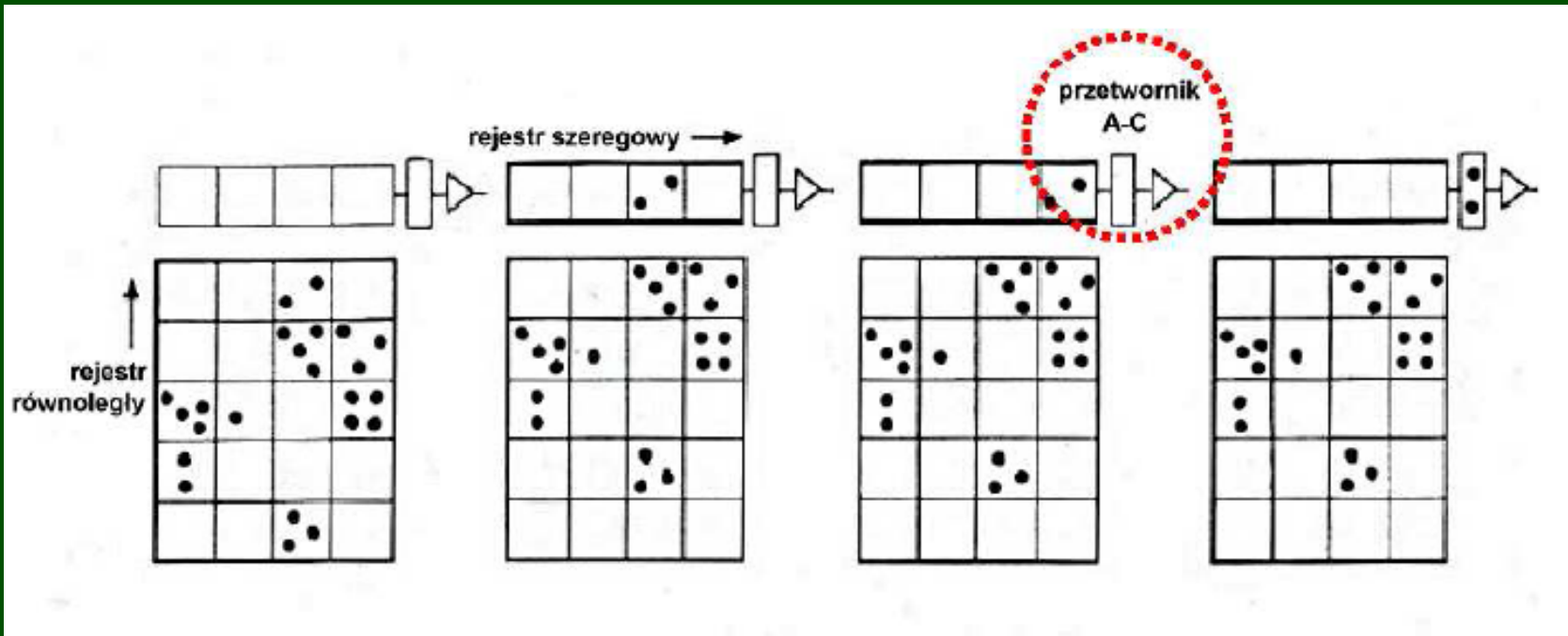
Są kamery zawierające tzw.
anti-blooming gate, ale zwykle
są nieliniowe



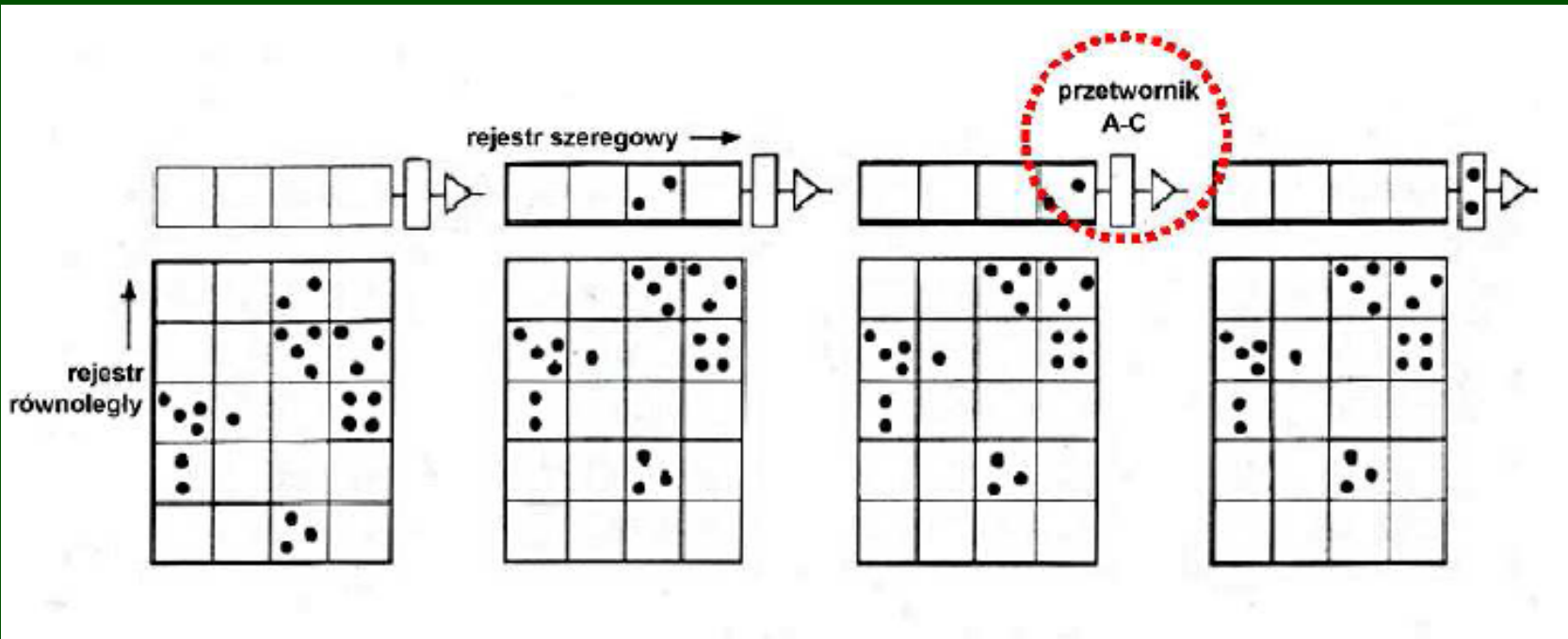
Transfer ładunku



Transfer i odczyt ładunku

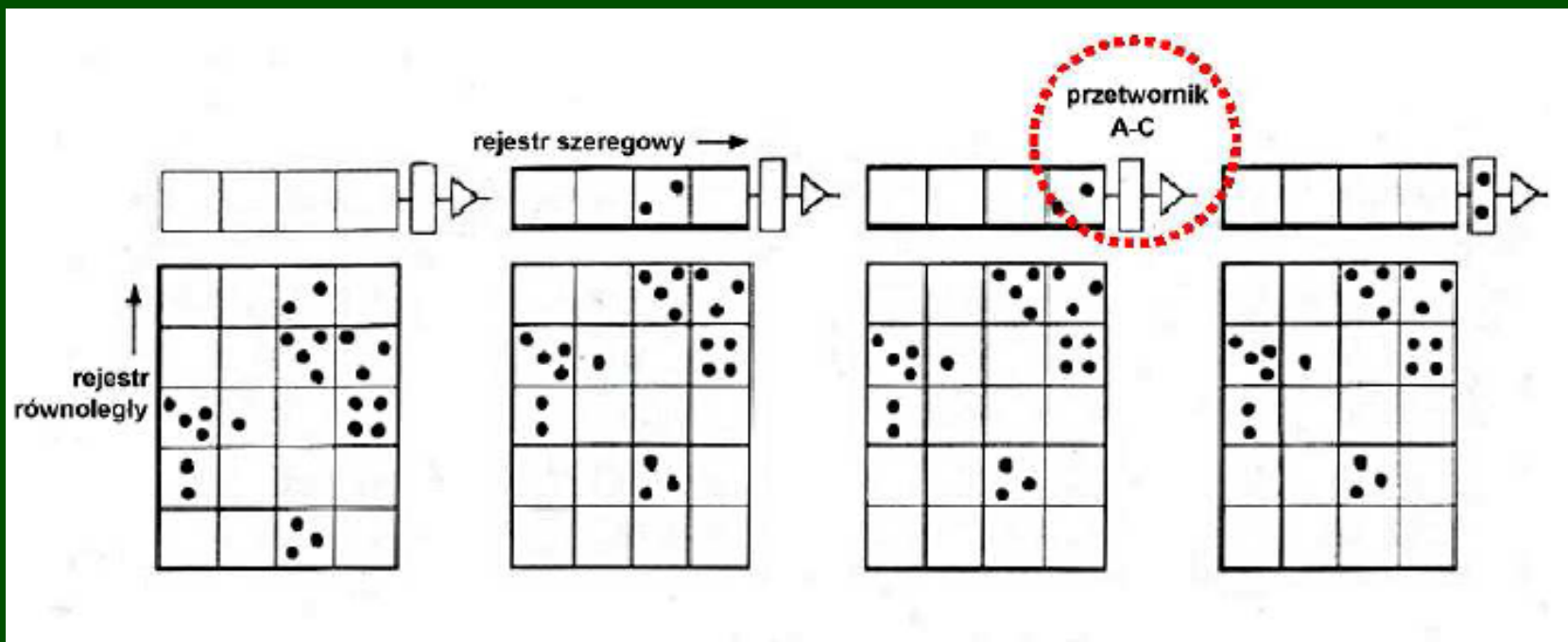


Transfer i odczyt ładunku



Zamiana elektronów na jednostki cyfrowe (ADU = analog-to-digital unit) następuje w przetworniku analogowo-cyfrowym.

Transfer i odczyt ładunku



Zamiana elektronów na jednostki cyfrowe (ADU = analog-to-digital unit) następuje w przetworniku analogowo-cyfrowym.

Binowanie (binning): 2×2 , 3×3 .

CCD: parametry: rozmiary

Najczęściej kwadratowe, o rozmiarach $N_x \times N_y = 2^N \times 2^N$, np. **512 × 512**, **1024 × 1024** (1K × 1K), **2K × 2K** lub o stosunku boków 3:2. Ale bywa i inaczej: kamera w Białkowie ma rozmiary 1150 × 1252 pikseli.

CCD: parametry: rozmiary

Najczęściej kwadratowe, o rozmiarach $N_x \times N_y = 2^N \times 2^N$, np. **512 × 512**, **1024 × 1024** (1K × 1K), **2K × 2K** lub o stosunku boków 3:2. Ale bywa i inaczej: kamera w Białkowie ma rozmiary 1150 × 1252 pikseli.

Rozmiar piksela: $x = 7\text{-}25 \mu\text{m}$, typowo kwadratowe. Dawniej w spektroskopii: podłużne, o dużym stosunku rozmiarów (reticony).

CCD: parametry: rozmiary

Najczęściej kwadratowe, o rozmiarach $N_x \times N_y = 2^N \times 2^N$, np. **512 × 512**, **1024 × 1024** (1K × 1K), **2K × 2K** lub o stosunku boków 3:2. Ale bywa i inaczej: kamera w Białkowie ma rozmiary 1150 × 1252 pikseli.

Rozmiar piksela: $x = 7\text{-}25 \mu\text{m}$, typowo kwadratowe. Dawniej w spektroskopii: podłużne, o dużym stosunku rozmiarów (reticony).

Rozmiary liniowe: $D = N \cdot x$

CCD: parametry: rozmiary

Najczęściej kwadratowe, o rozmiarach $N_x \times N_y = 2^N \times 2^N$, np. **512 × 512**, **1024 × 1024** (1K × 1K), **2K × 2K** lub o stosunku boków 3:2. Ale bywa i inaczej: kamera w Białkowie ma rozmiary 1150 × 1252 pikseli.

Rozmiar piksela: $x = 7\text{-}25 \mu\text{m}$, typowo kwadratowe. Dawniej w spektroskopii: podłużne, o dużym stosunku rozmiarów (reticony).

Rozmiary liniowe: $D = N \cdot x$

Pole widzenia (fotometria) $D'' = 206265 D/f$,
 f - ogniskowa efektywna teleskopu.

CCD: parametry: rozmiary

Najczęściej kwadratowe, o rozmiarach $N_x \times N_y = 2^N \times 2^N$, np. **512 × 512**, **1024 × 1024** (1K × 1K), **2K × 2K** lub o stosunku boków 3:2. Ale bywa i inaczej: kamera w Białkowie ma rozmiary 1150 × 1252 pikseli.

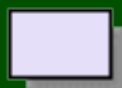
Rozmiar piksela: $x = 7\text{-}25 \mu\text{m}$, typowo kwadratowe. Dawniej w spektroskopii: podłużne, o dużym stosunku rozmiarów (reticony).

Rozmiary liniowe: $D = N \cdot x$

Pole widzenia (fotometria) $D'' = 206265 D/f$,
 f - ogniskowa efektywna teleskopu.

Spektroskopia: rozdzielczość, pokrycie widma

CCD: parametry: rozmiary



KAF-0400
AP1



KAF-1600
AP2



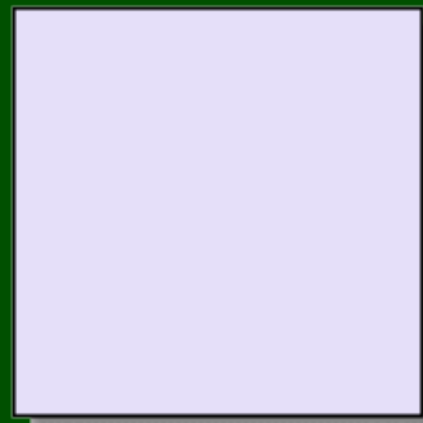
KAF-4200
AP4



KAF-1000 & SIA003AB
AP6 & AP8



SIA502AB
AP7



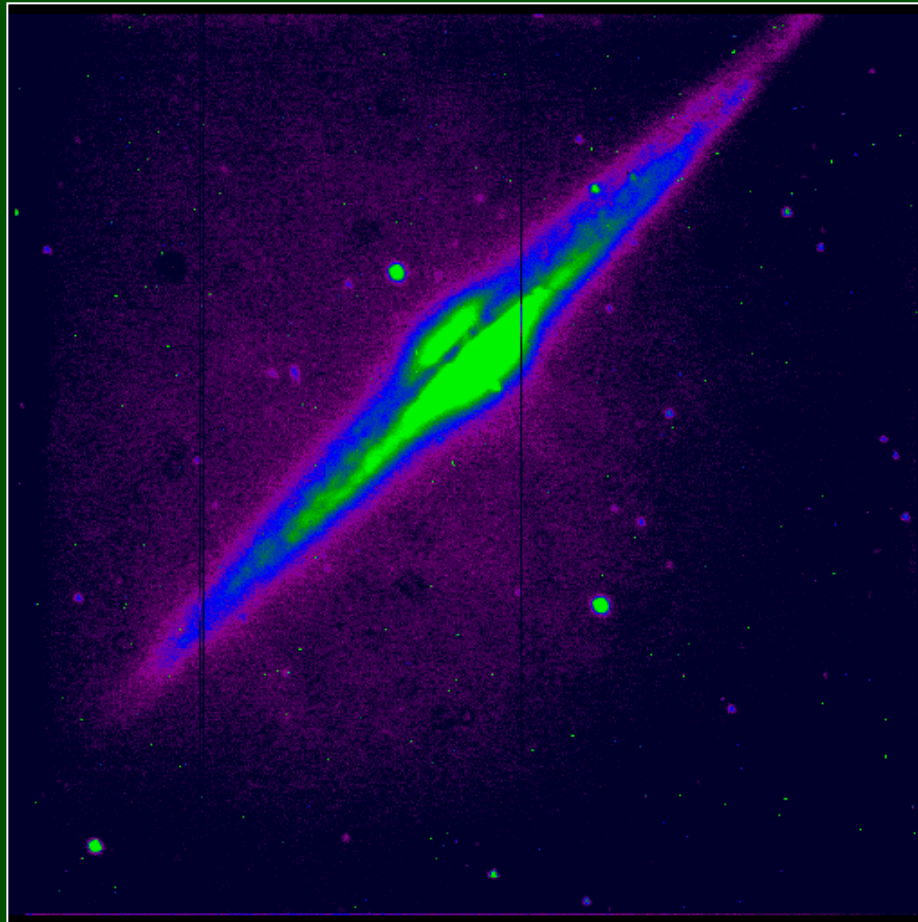
THX7899M
AP10

CCD: defekty chipu

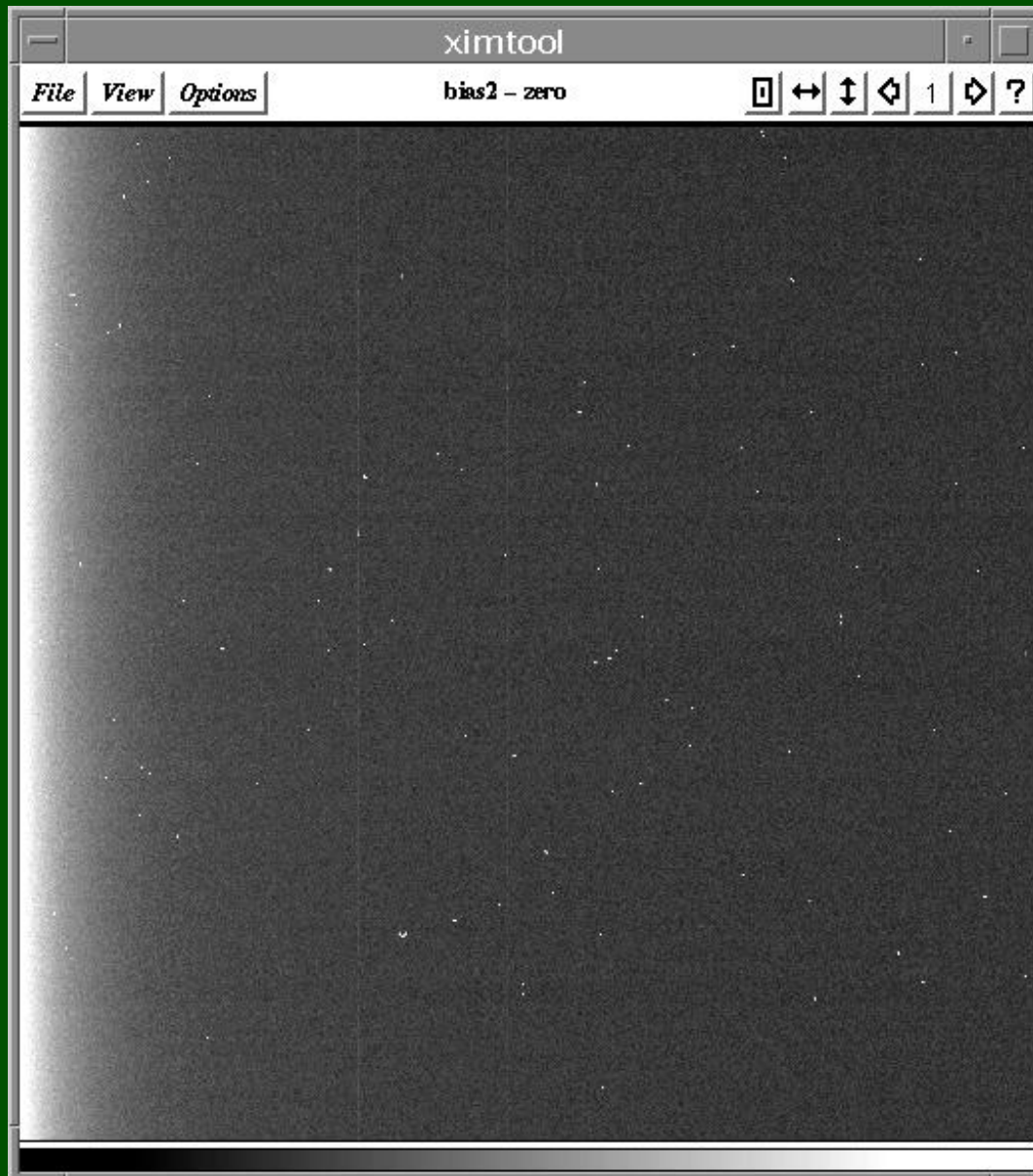
- wadliwe kolumny (bad columns),
- gorące piksele (hot pixels),
- nieczynne/wadliwe piksele lub grupy pikseli (bad clusters),
- zniekształcenia przestrzenne.

CCD: defekty chipu

- wadliwe kolumny (bad columns),
- gorące piksele (hot pixels),
- nieczynne/wadliwe piksele lub grupy pikseli (bad clusters),
- zniekształcenia przestrzenne.



CCD: defekty chipu



Gorące piksele i ślady po promieniach kosmicznych (cosmic ray events = cosmics)

CCD: parametry: wydajność kwantowa

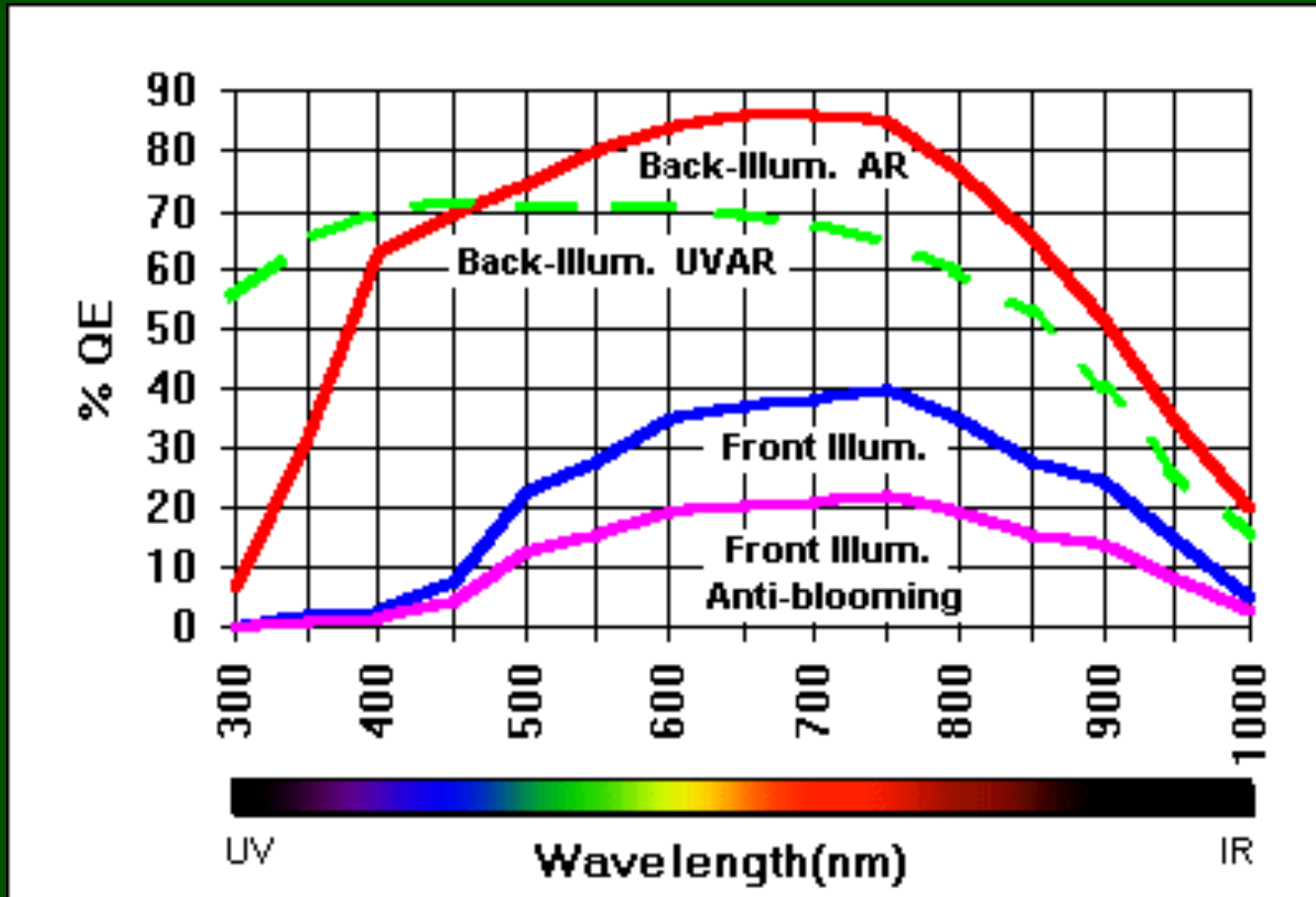
Zależy od:

- rodzaju naświetlania (od przodu, od tyłu),
- szczegółów produkcji,
- pokrycia w UV (UV coating).

CCD: parametry: wydajność kwantowa

Zależy od:

- rodzaju naświetlania (od przodu, od tyłu),
- szczegółów produkcji,
- pokrycia w UV (UV coating).



CCD: parametry

Pojemność studni potencjału (full well capacity), zwykle 50-600 tys. elektronów. Zależy od rozmiarów piksela.

CCD: parametry

Pojemność studni potencjału (full well capacity), zwykle **50-600 tys. elektronów**. Zależy od rozmiarów piksela.

Wzmocnienie (gain): ilościowa miara czułości detektora.

Sygnał analogowy (elektrony) przetwarzany jest na sygnał cyfrowy (ADU) w postaci liczby całkowitej:

$$S = G \cdot N_e$$

a właściwie

$$S = G \cdot N_e + \text{const (bias)}$$

G to wzmocnienie w e^-/ADU .

Zwykle wzmocnienie wynosi **kilka e^-/ADU** .

CCD: parametry

Do zapisu liczby większej niż 255 potrzebne są 2 bajty = 16 bitów. Większość współczesnych kamer CCD to kamery 16-bitowe.

CCD: parametry

Do zapisu liczby większej niż 255 potrzebne są 2 bajty = 16 bitów. Większość współczesnych kamer CCD to kamery 16-bitowe.

Aby w pełni wykorzystać dynamikę zapisu należałoby przyjąć, że poziom saturacji wynosi $2^{16} - 1 = 65535$ ADU.

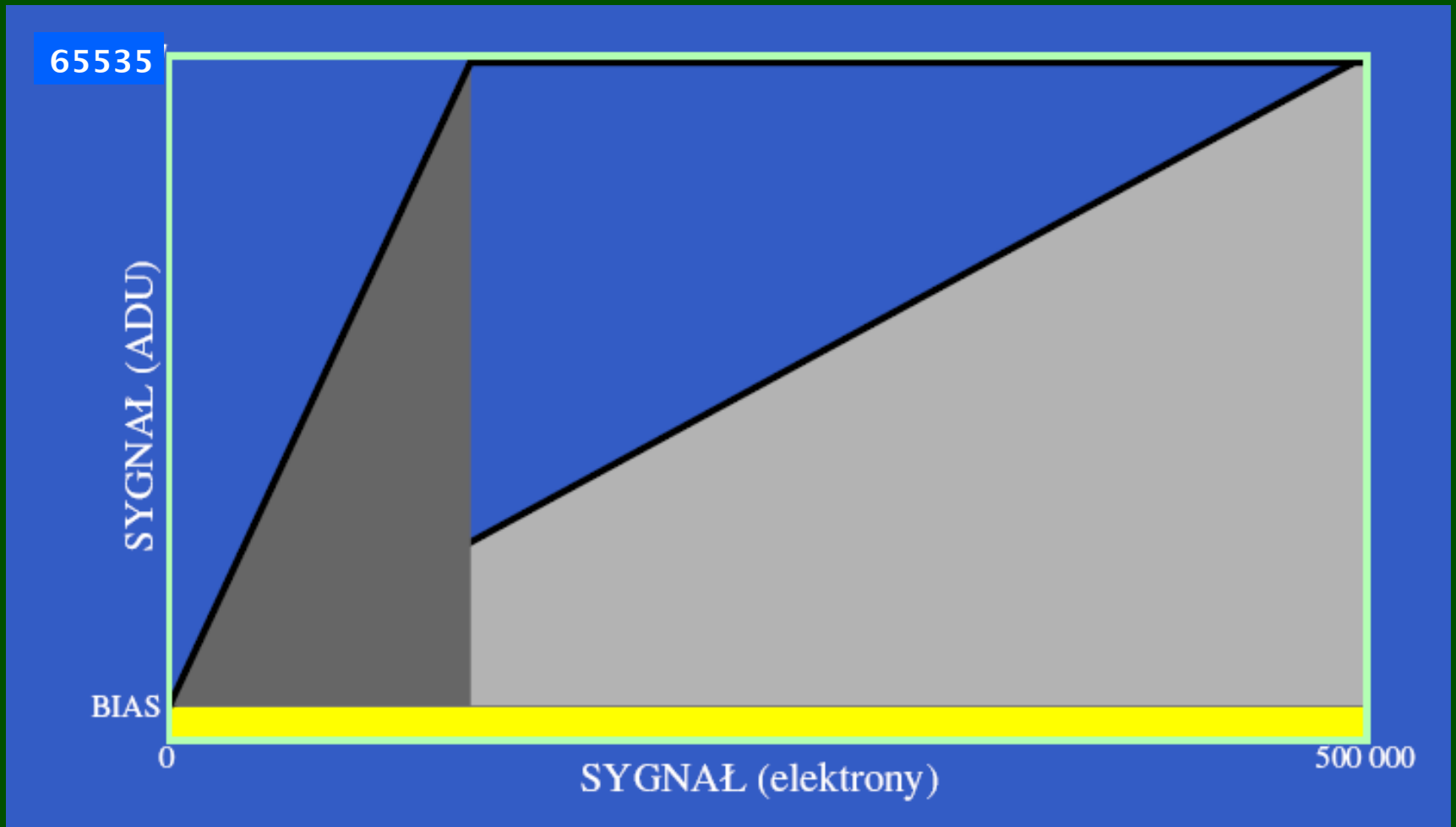
Tak zazwyczaj jest, ale wykorzystuje się też zapisy:

14-bitowy, od 0 do 16383 ADU,

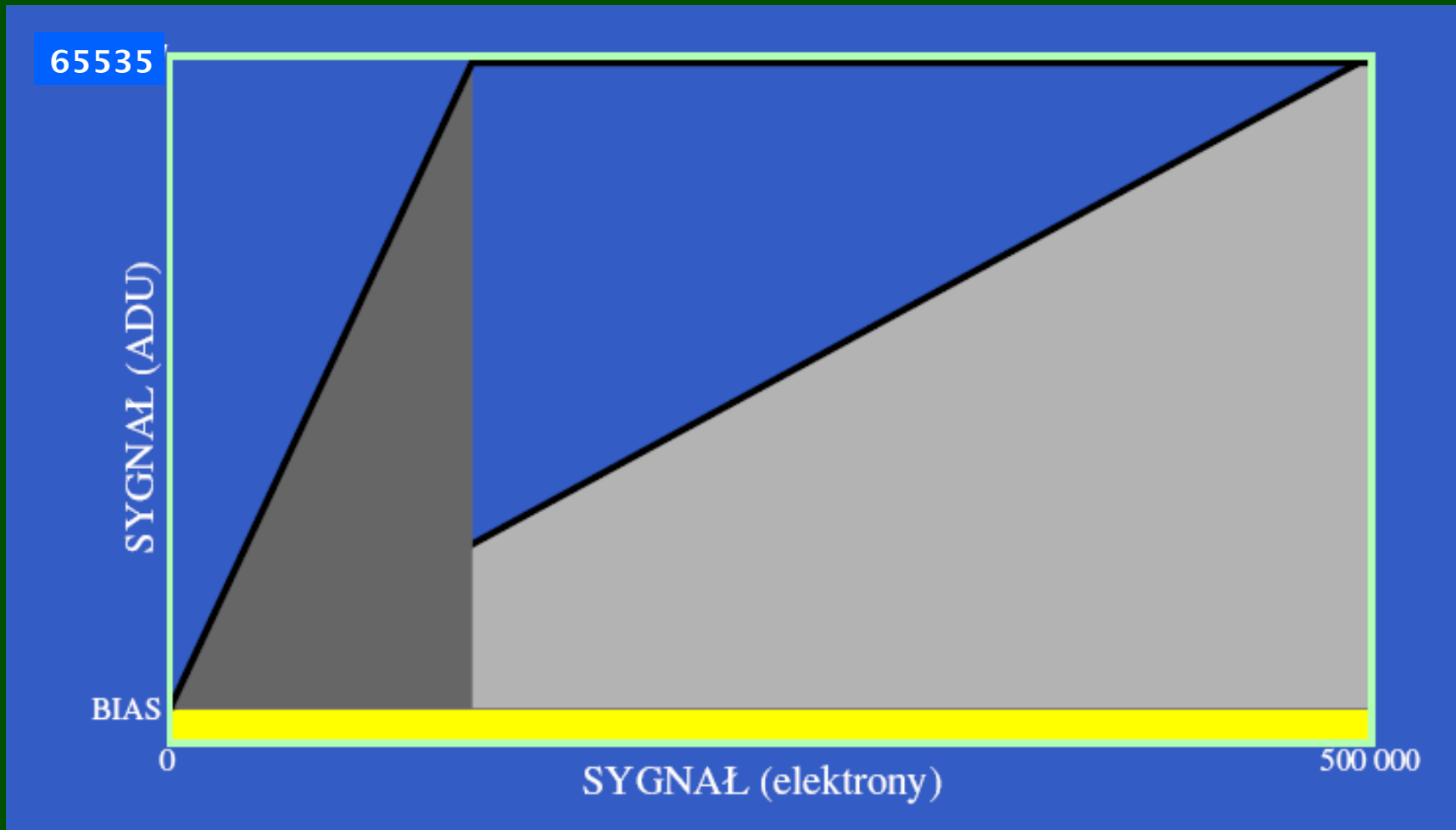
12-bitowy, od 0 do 4096 ADU,

8-bitowy, od 0 do 255 ADU (niektóre guidery).

CCD: parametry: wzmacnienie

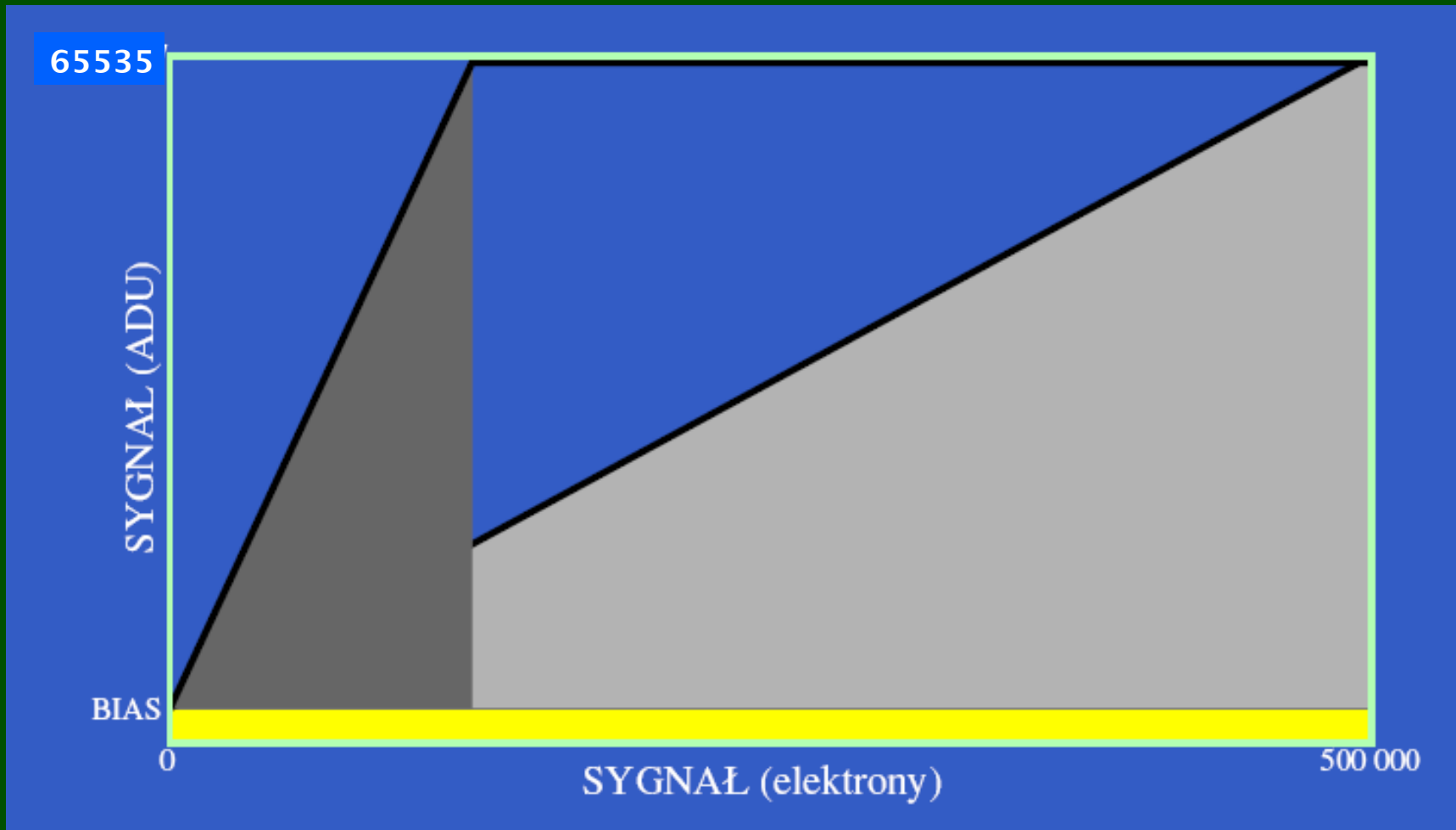


CCD: parametry: wzmacnienie



małe wzmacnienie = duża czułość
duże wzmacnienie = mała czułość

CCD: parametry: wzmacnienie



małe wzmacnienie = duża czułość
duże wzmacnienie = mała czułość

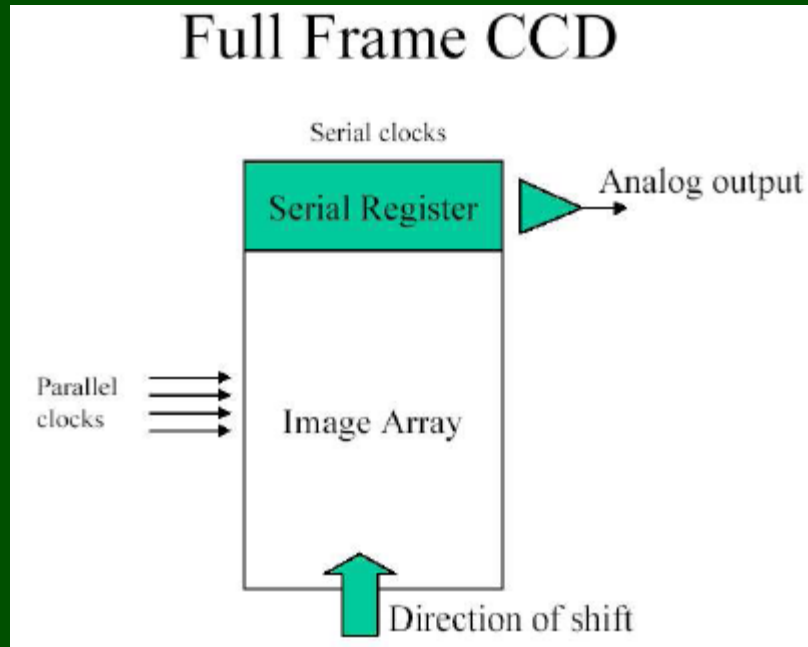
Nieliniowości

CCD: parametry: tempo transferu

Tempo transferu + rozmiary chipu × czas transferu

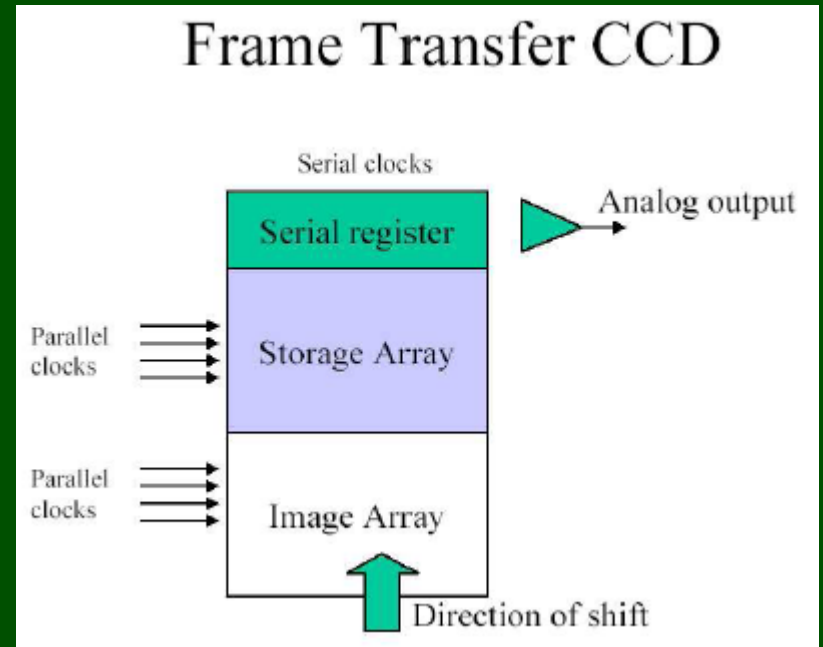
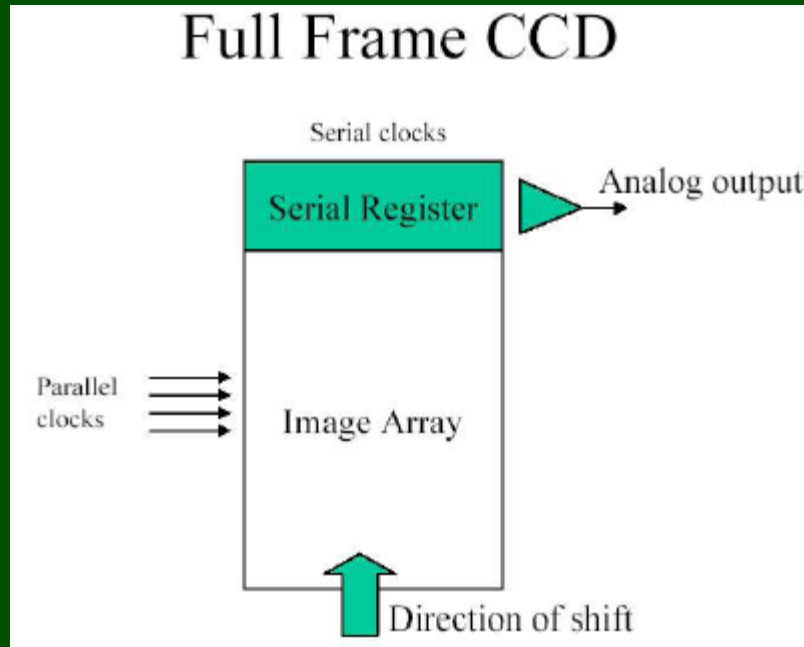
CCD: parametry: tempo transferu

Tempo transferu + rozmiary chipu × czas transferu



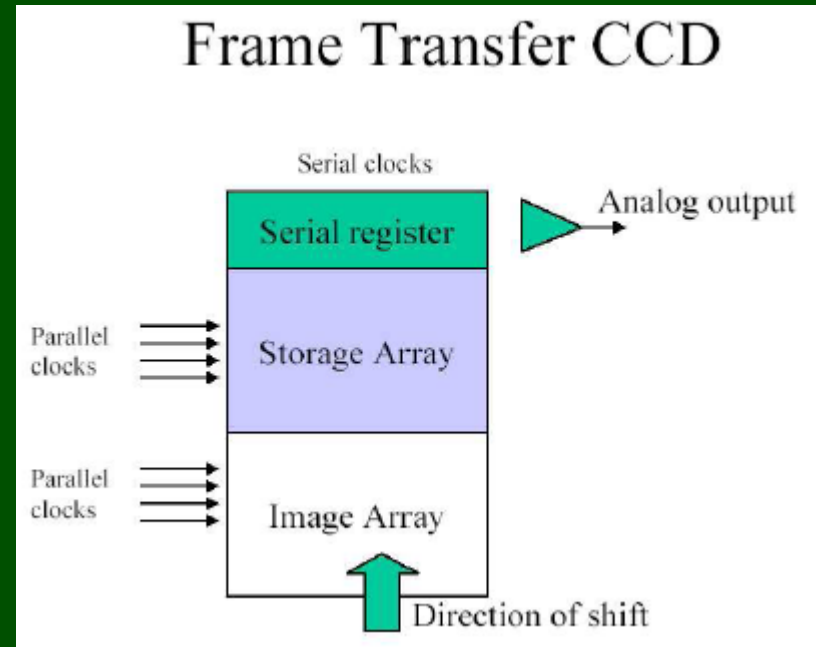
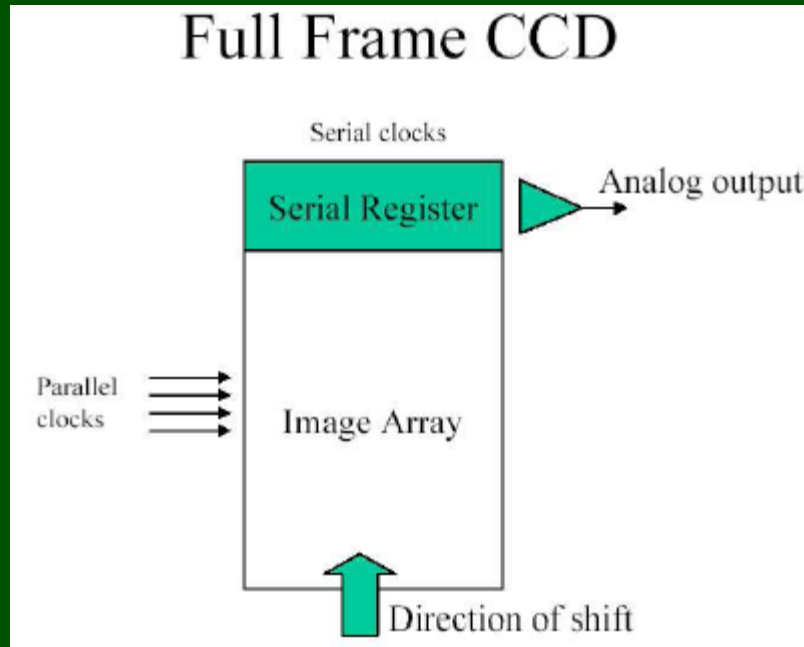
CCD: parametry: tempo transferu

Tempo transferu + rozmiary chipu \times czas transferu



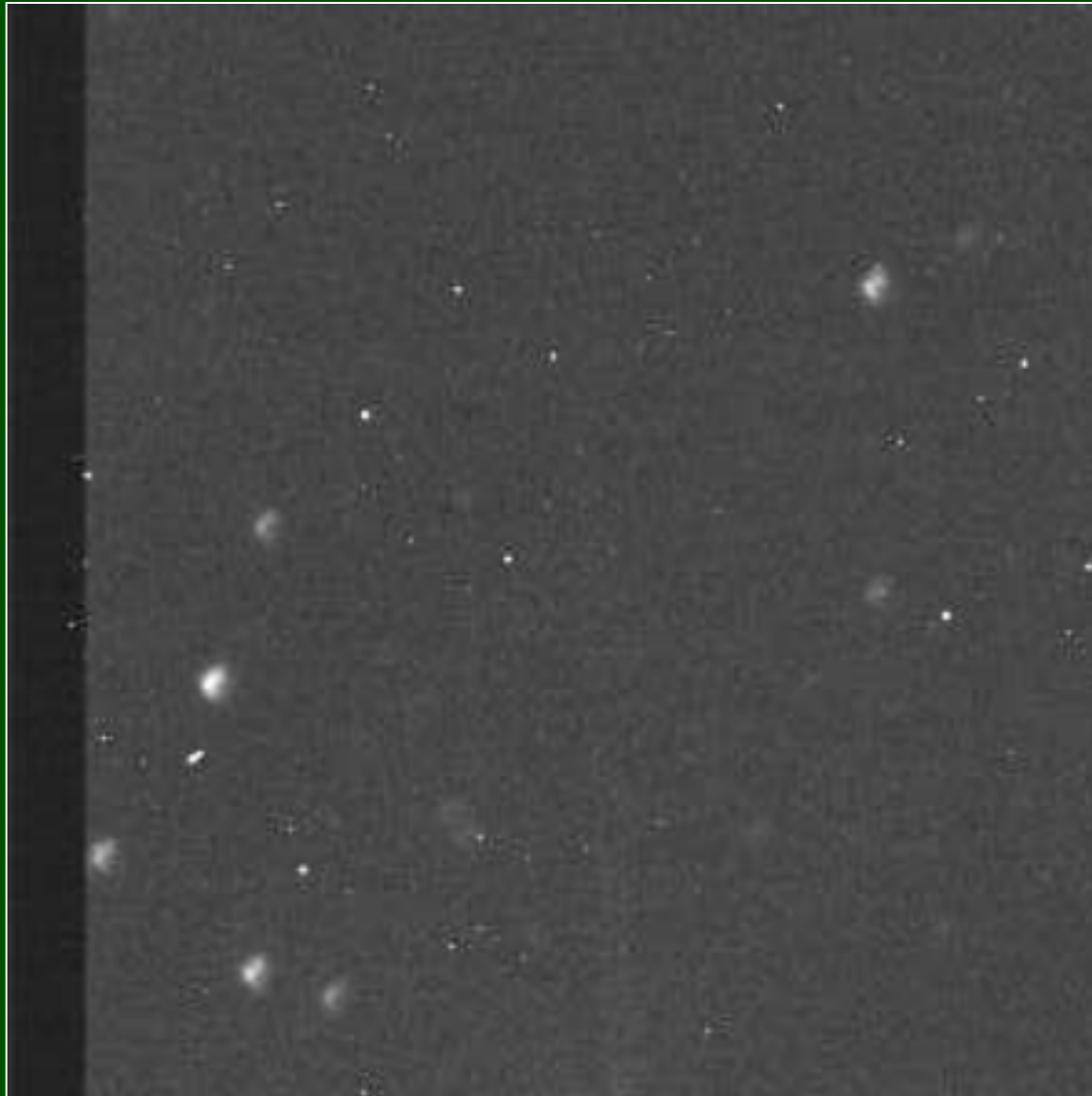
CCD: parametry: tempo transferu

Tempo transferu + rozmiary chipu \times czas transferu

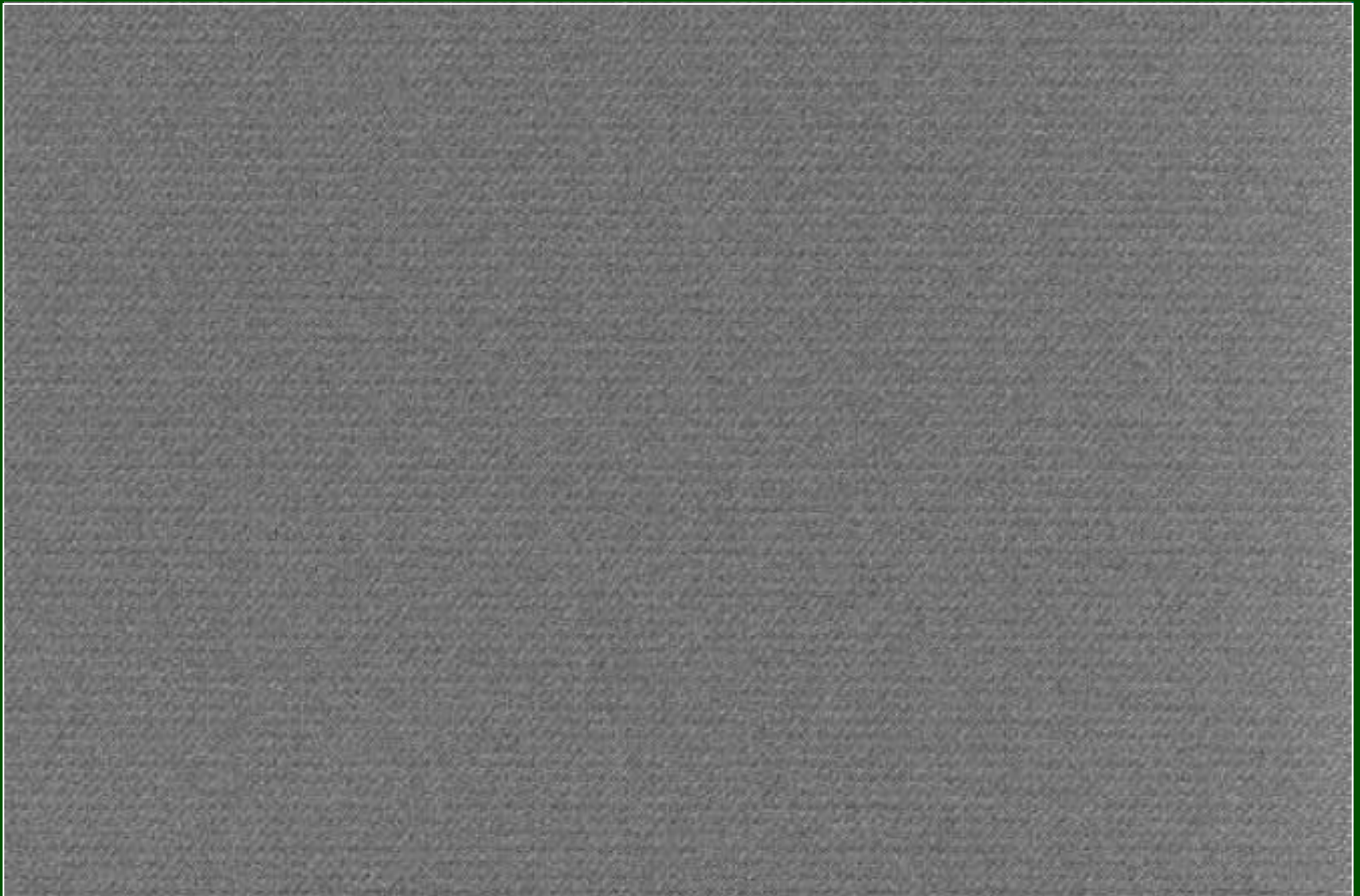


Im większe tempo transferu, tym większy błąd odczytu (read-out noise), typowy RON = 3-15 e^- .

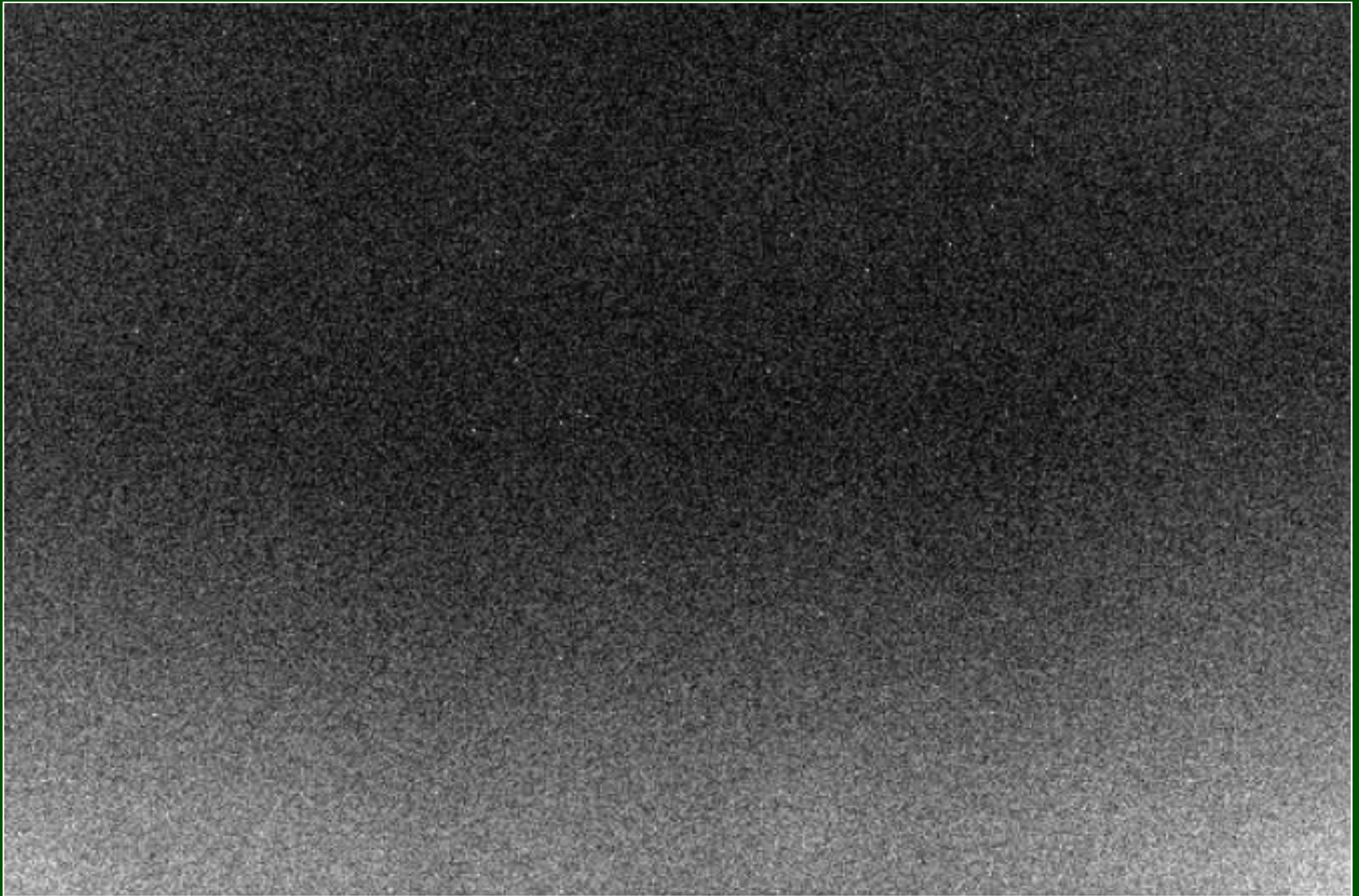
Kalibracja obrazów CCD: prescan, overscan



Kalibracja obrazów CCD: bias



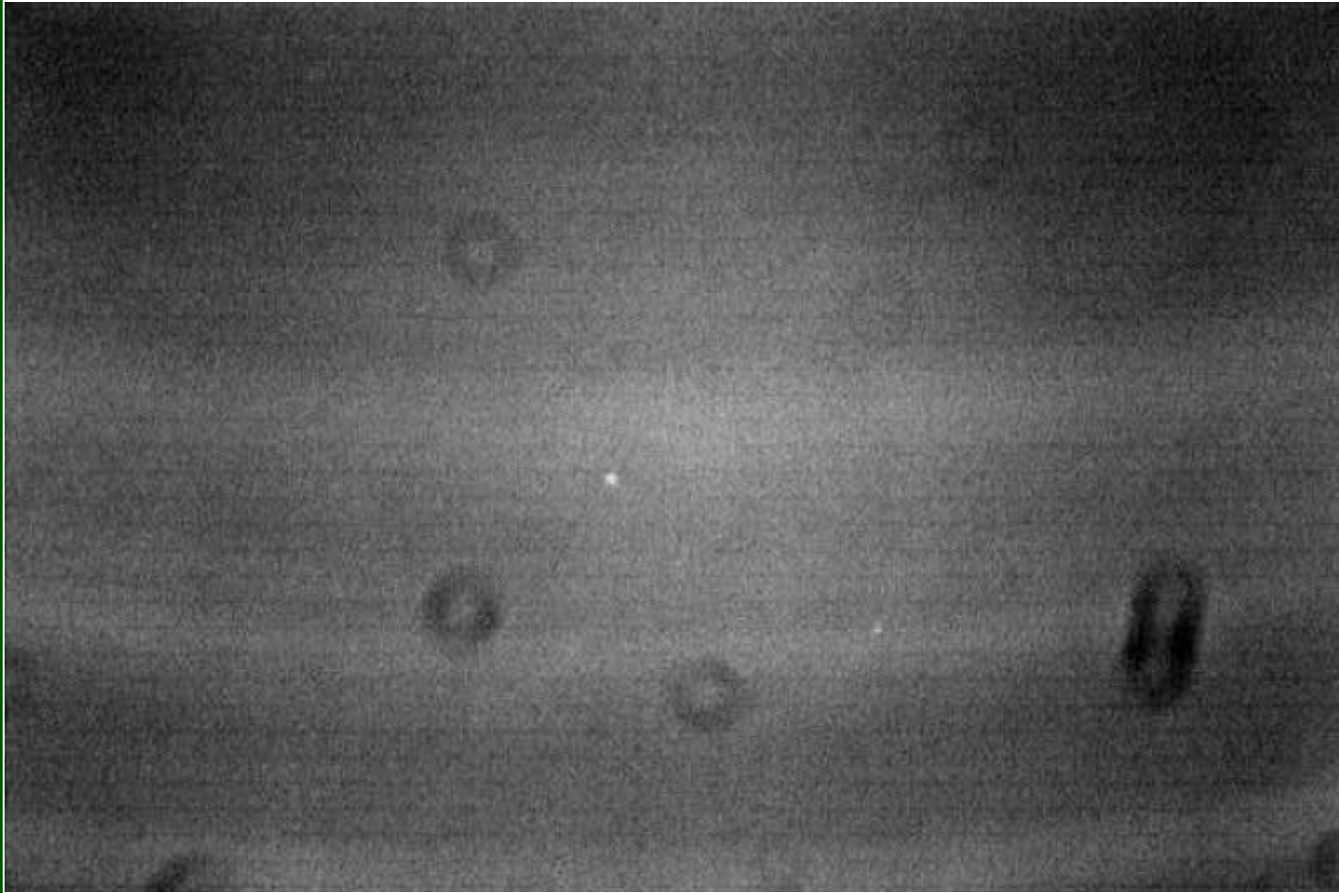
Kalibracja obrazów CCD: dark



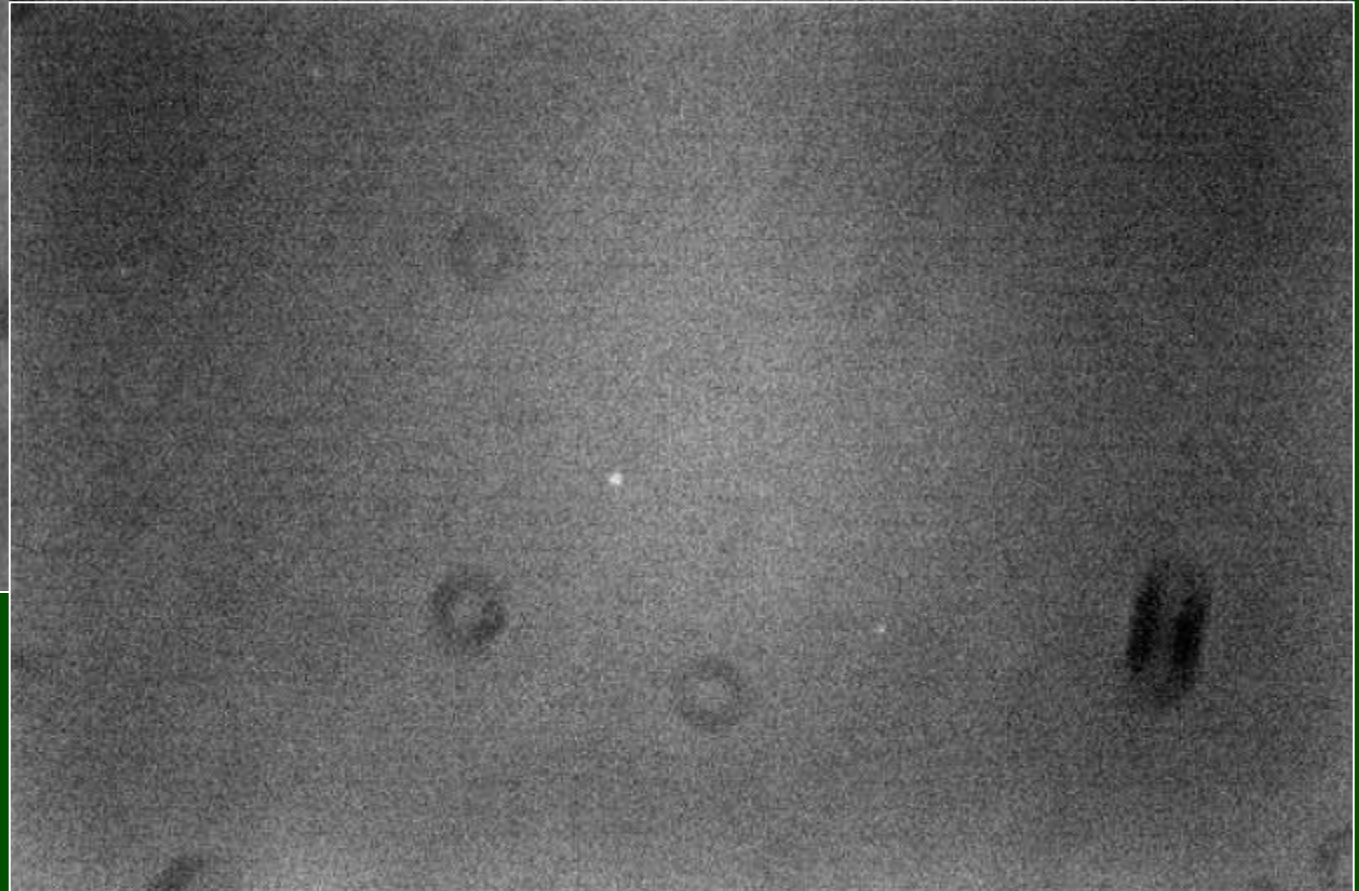
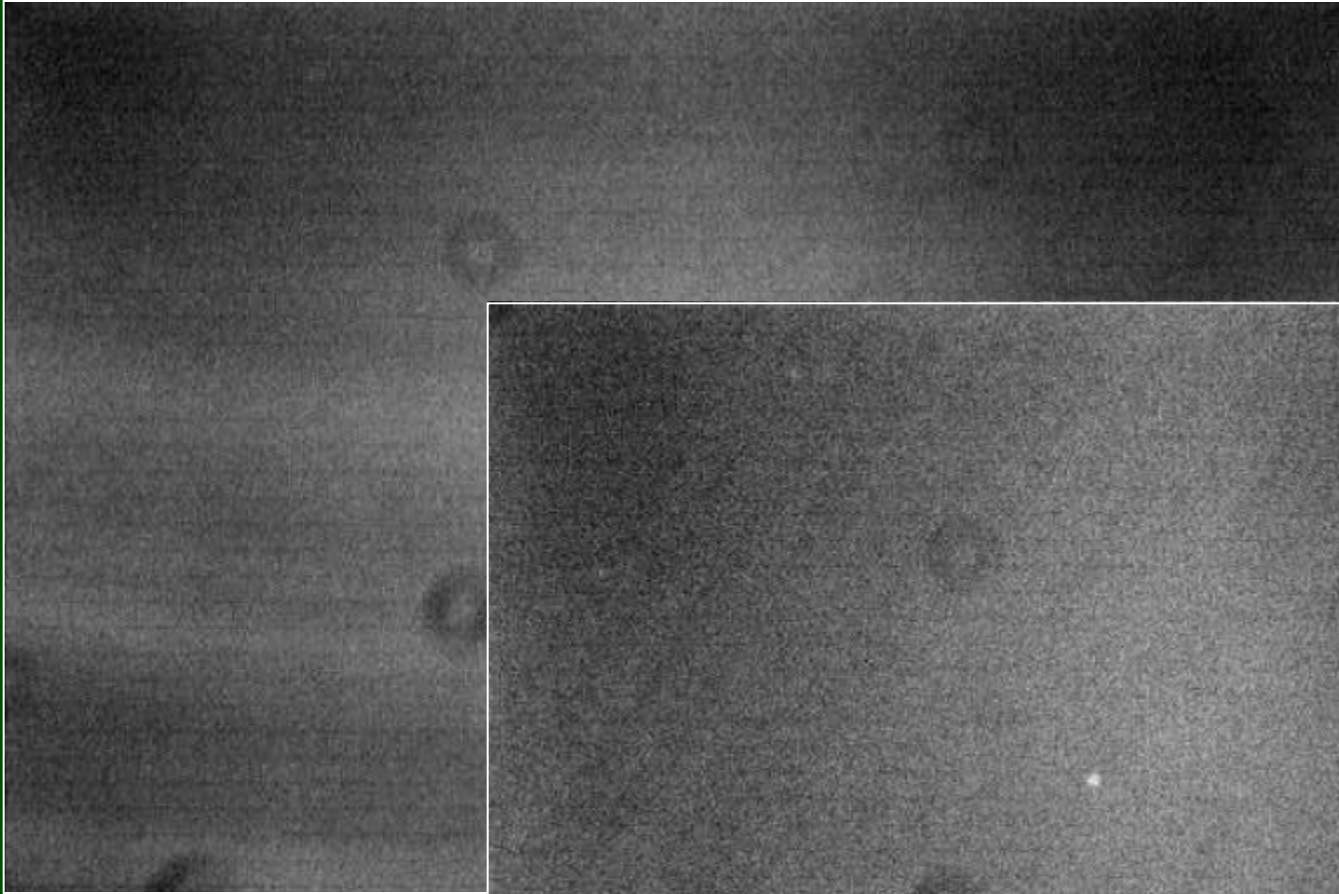
Kalibracja obrazów CCD: dark



Kalibracja obrazów CCD: flat-field



Kalibracja obrazów CCD: flat-field



Kalibracja obrazów CCD

Ogólny przepis na kalibrację:

$$C = \frac{I - B - (D_1 - B)}{FF - B - (D_{FF} - B)} \cdot \langle FF \rangle,$$

gdzie:

I – obrazek oryginalny,
 B – obrazek typu BIAS,
 D – obrazek typu DARK,
 FF – obrazek typu FLAT-FIELD,
 $\langle FF \rangle$ - średnia wartość FLAT-FIELD-u.

Kalibracja obrazów CCD

Ogólny przepis na kalibrację:

$$C = \frac{I - B - (D_1 - B)}{FF - B - (D_{FF} - B)} \cdot \langle FF \rangle,$$

gdzie:

I – obrazek oryginalny,
 B – obrazek typu BIAS,
 D – obrazek typu DARK,
 FF – obrazek typu FLAT-FIELD,
 $\langle FF \rangle$ - średnia wartość FLAT-FIELD-u.

W praktyce może być prościej lub trudniej...

Kalibracja obrazów CCD



Kalibracja obrazów CCD

