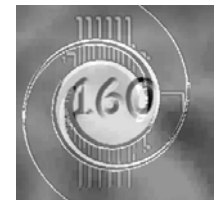
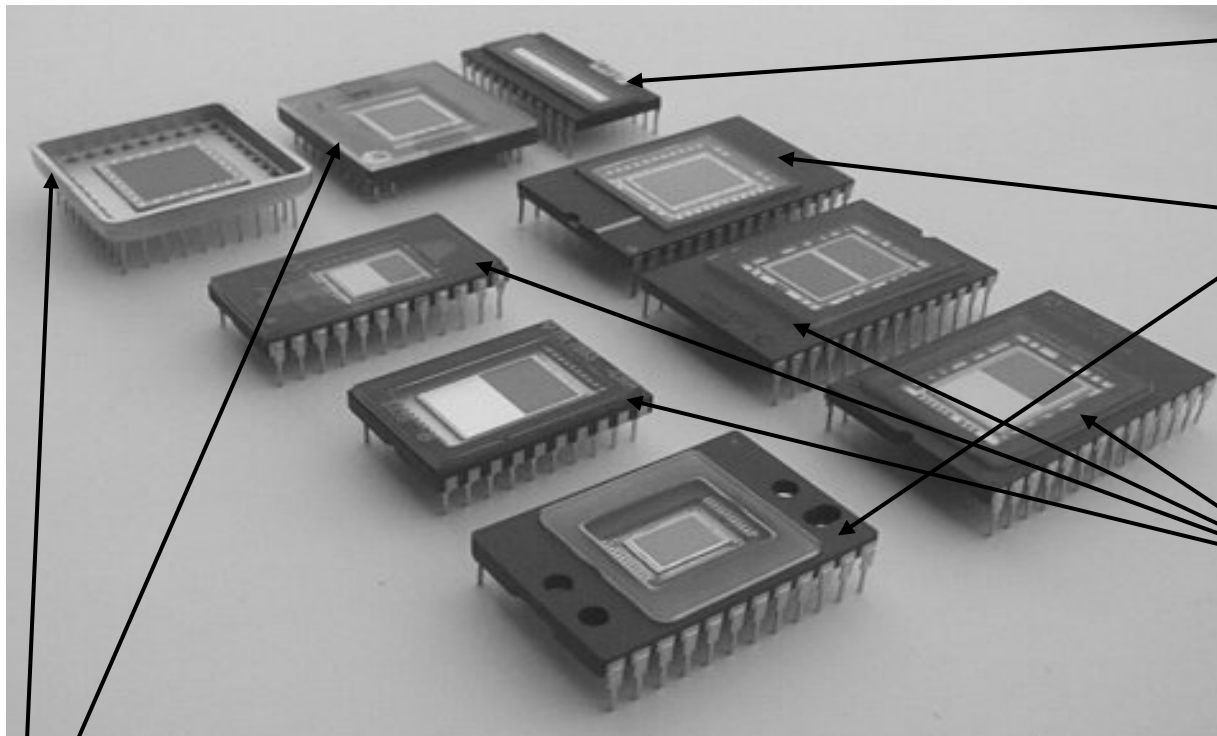


CCD per Applicazioni Scientifiche (riprese astronomiche)

Ing. Enrico Prosperi
Osservatorio
160 Castelmartini, Larciano (PT)



Struttura di un sensore d'immagine CCD



Line sensor CCD

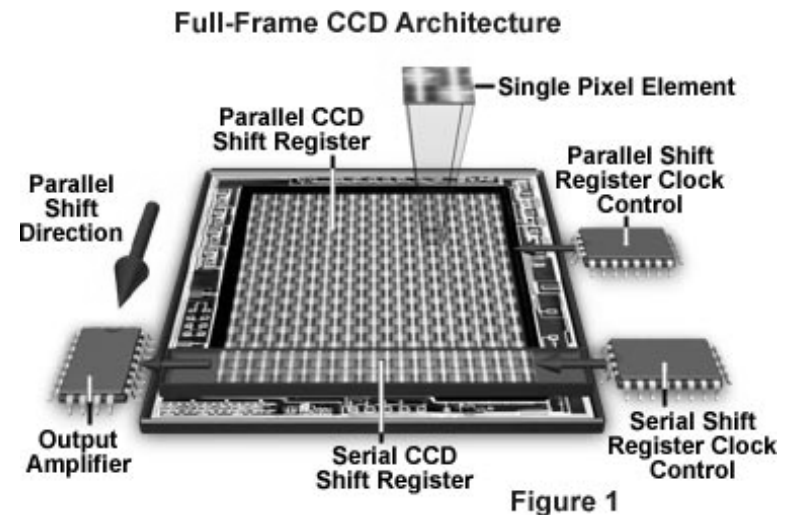
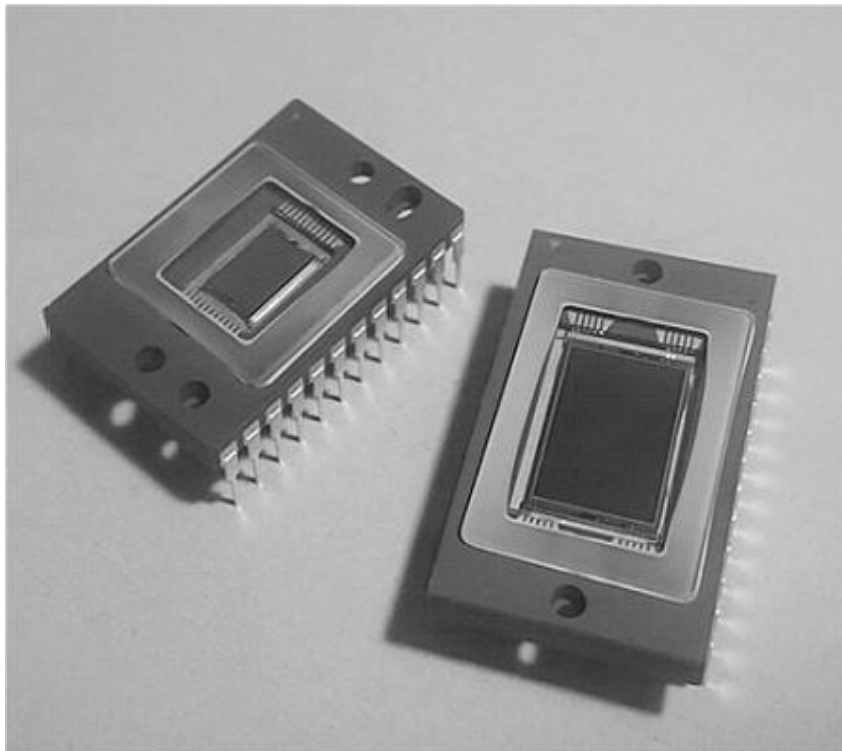
Full frame image sensor Front Illuminated CCD

Half frame image sensor Front Illuminated CCD

Full frame image sensor Back Illuminated CCD

Full frame CCD

Nei CCD Full Frame tutta la superficie è dedicata alla cattura dei fotoni e non ci sono aree appositamente schermate per la realizzazione di otturatori elettronici.

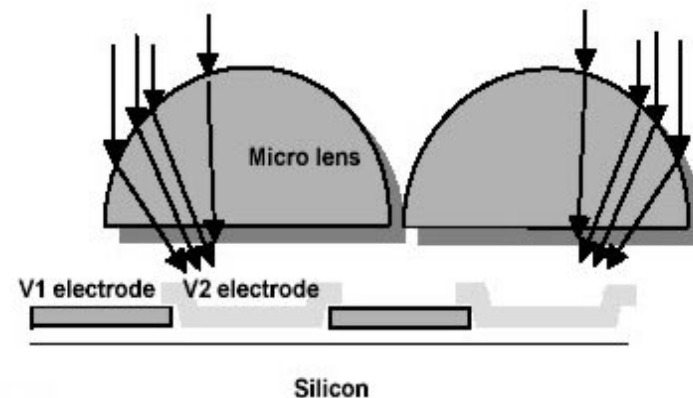
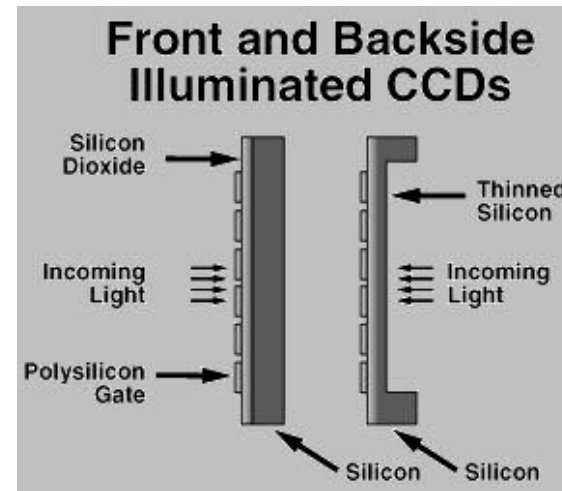


Caratteristiche (e specifiche) dei CCD

- Dimensioni (e forma) del pixel
- Dimensione del sensore (Area)
- Pixel Fill factor (%)
- Capacità (Full Well Capacity)
- Efficienza quantica media e spettrale
- Rumore di buio (o termico)
- Rumore di lettura
- Efficienza di trasferimento delle cariche
- Linearità
- Classe

Fill factor

- Nominalmente è il 100% per i full frame, ma ... in realtà una porzione importante della superficie (per i FRONT-ILLUMINATED) è occupata dalle metallizzazioni opache che costituiscono i terminali. Quindi per migliorare le prestazioni a questo riguardo si sono introdotti CCD:
 - Back-Illuminated
 - con Micro-lenti



Full Well Capacity

La FWC rappresenta il massimo numero di e⁻ che possono essere accumulati dagli elettrodi di cattura in corrispondenza di ciascun pixel. Se si supera la FWC si può avere la saturazione con il conseguente fenomeno di traboccamento (blooming).

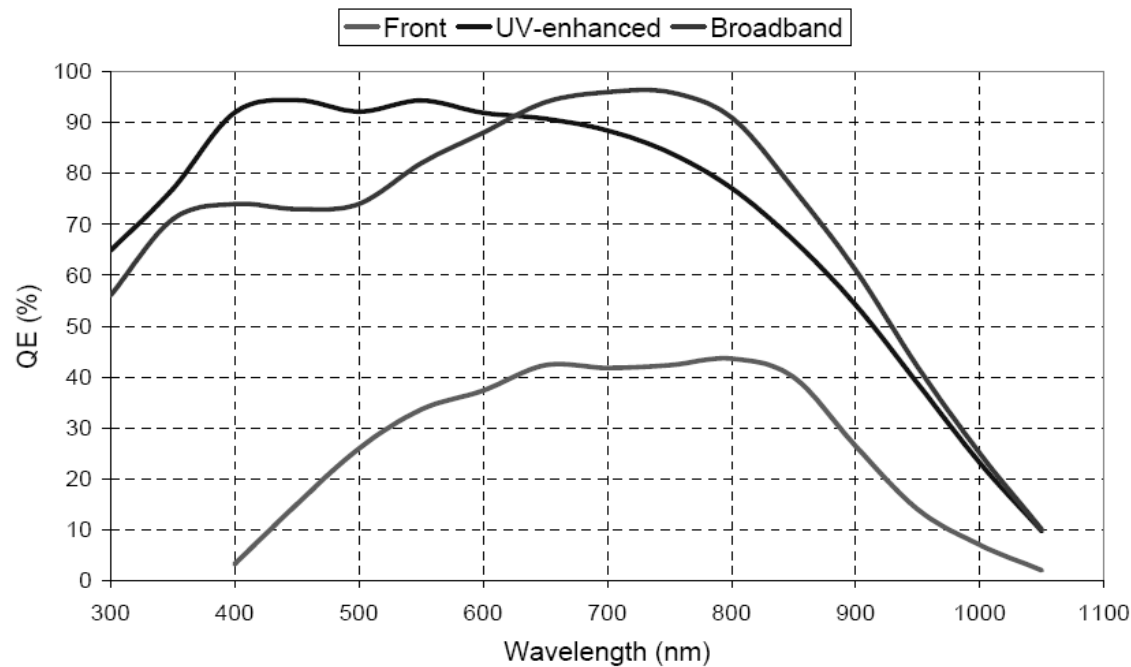
La FWC è, in prima approssimazione, proporzionale all'area associata al singolo pixel, come si può verificare anche dalla lettura della tabella sottostante relativa ad alcuni sensori CCD full frame.

CCD	Pixel Size (μm)	Typical Full Well
Kodak KAF1400	6.8 x 6.8	45,000 e ⁻
E2V CCD37-10	15 x 15	165,000 e ⁻
Kodak KAF1000	24 x 24	630,000 e ⁻

QE – Efficienza quantica

L'efficienza quantica rappresenta l'efficienza di conversione fotoni-e⁻ del sensore ed è funzione della lunghezza d'onda (frequenza = energia) dei fotoni incidenti.

La figura qui sotto rappresenta tre esempi di risposte spettrali: quella di un front illuminated e quella di due back illuminated, di cui uno con trattamento UV enhanced.

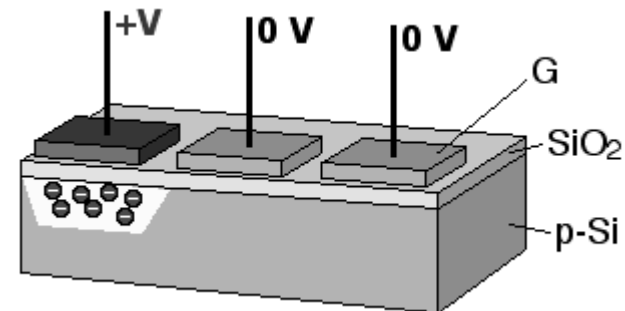


Rumore di buio

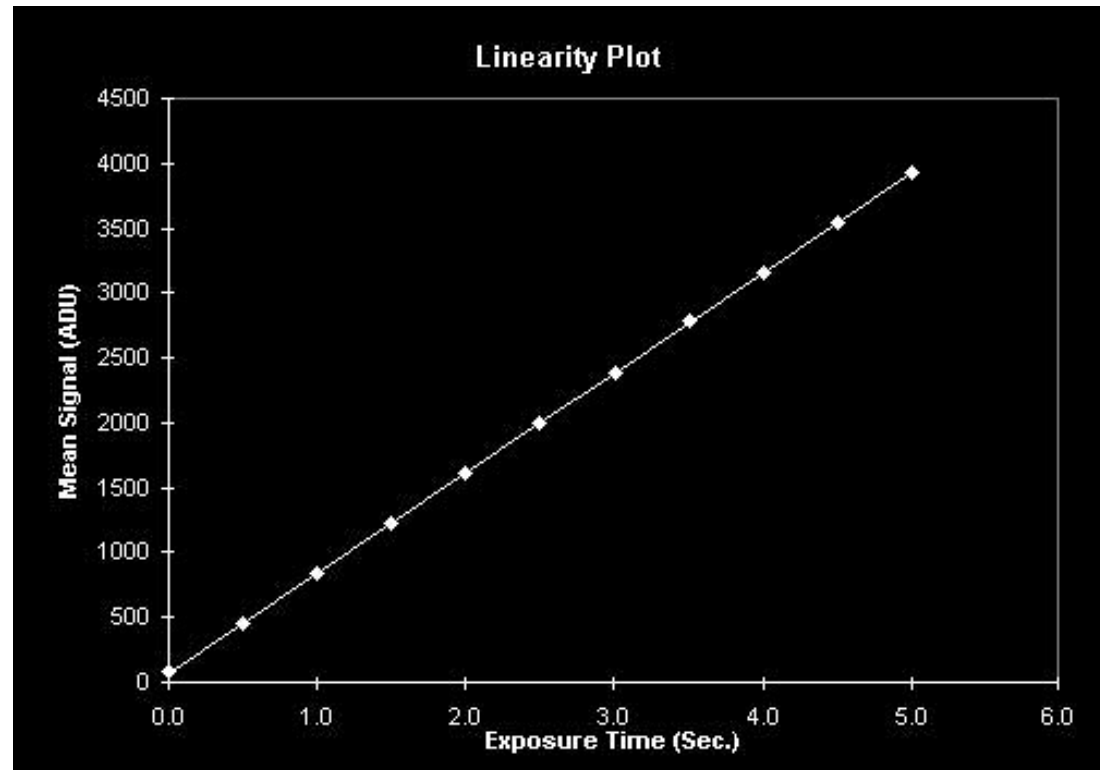
- Rumore dato dagli e^- che si originano all'interno del substrato di silicio e che vengono catturati dai singoli terminali in corrispondenza di ciascun pixel (Dark Noise). Si chiama così perché la così detta immagine di buio (che è caratteristica di ciascun sensore) si ottiene mediante una ripresa durante la quale la luce incidente viene schermata. Questo tipo di rumore si può ridurre significativamente:
 - con la tecnica MPP – Multi Pinned Phase. Si tratta di una tecnica costruttiva che tende a limitare la componente di rumore termico più consistente: quella che si origina alla superficie del substrato. In tal modo i CCD che adottano tale tecnica hanno un basso rumore anche a T non eccessivamente basse.
 - con il Raffreddamento del sensore CCD in modo da diminuire la T di lavoro.

Efficienza di trasferimento (delle cariche)

- Lo spostamento delle cariche è dato dall'applicazione ad appositi terminali di segnali impulsivi pilotati da un clock e opportunamente sfasati tra loro. Per quanto questa efficienza di trascinamento sia elevata, accade che
 - in corrispondenza di sorgenti di luminosità elevata si osservino delle scie dovute alla pur piccola frazione di cariche che si sono perse per strada.



Linearità



- La linearità dei sensori CCD è un dato fondamentale e decisivo delle loro prestazioni. Se ci si mantiene entro l'80-90% della FWC di un CCD monocromatico per applicazioni scientifiche la caratteristica di linearità approssima quella di un sensore ideale.

Classe di un chip CCD

- La classe di un dato sensore CCD indica quanti difetti siano presenti sul chip del sensore d'immagine CCD. Ad esempio per un KAF-0402ME si ha:
 - **CCD di Classe 2**
presentano un numero di pixel difettosi compreso tra 1 e 10, ovvero tali che la loro risposta varia di più del 50% rispetto a quella media. Non presentano alcun difetto di colonna.
 - **CCD di Classe 1**
hanno meno di 2 pixels non conformi ma sono sensibilmente più costosi.
 - I moderni software di image processing possono rimuovere gli effetti delle imperfezioni legate alla presenza di pixel e persino di colonne difettose. Tuttavia, se si richiedono le migliori prestazioni e la qualità dell'immagine è un dato irrinunciabile allora si richiedono i migliori dati grezzi al netto della successiva elaborazione.

Definizione: Classe di un sensore CCD

Kodak's Defect Classification						
CCD Class	Point Defect		Cluster Defect		Column Defect	
	Total	Zone A	Total	Zone A	Total	Zone A
C_0	0	0	0	0	0	0
C_1	equal to or less than 5	equal to or less than 2	0	0	0	0
C_2	equal to or less than 10	equal to or less than 5	equal to or less than 4	equal to or less than 2	equal to or less than 2	0
C_3	equal to or less than 20	equal to or less than 10	equal to or less than 8	equal to or less than 4	equal to or less than 4	equal to or less than 2

Point Defect: A pixel which deviates by more than 6% from neighboring pixels when illuminated to 70% saturation.

Cluster Defect: A grouping of not more than 5 adjacent point defects.

Column Defect: A grouping of point defects along a single column.

Neighboring Pixels: The surrounding 100 x 100 pixels or +/- 50 columns/rows.

Defects are separated by no less than 2 pixels in any one direction.

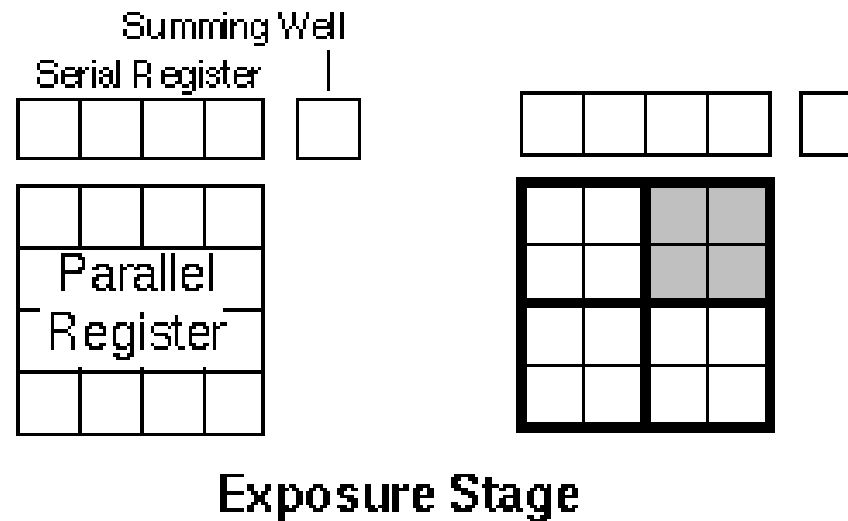
Zone A = ~ Central 2/3 region of the CCD.

Saturazione e blooming

- Si ha la saturazione quando il numero di e^- in corrispondenza di un pixel (o più di uno) risulta superiore alla FWC. Allora si ha un fenomeno di "traboccamento" (detto blooming) la cui diffusione (e forma) dipende dalla geometria dei terminali posti alla superficie del sensore.
- In alcuni sensori CCD sono stati introdotti degli ulteriori terminali (detti di anti-blooming) per limitare questo fenomeno anti-estetico. Tuttavia in ambito scientifico si tende ad evitare l'impiego di sensori "anti-blooming" perché:
 - Diminuiscono significativamente la sensibilità (efficienza quantica);
 - Tendono a peggiorare la linearità di risposta del CCD.

II Binning

- Tecnica di raggruppamento dei pixel del CCD al fine di:
 - Aumentare la sensibilità (aumentando la superficie di raccolta della luce in corrispondenza di un pixel);
 - Diminuire il tempo di downloading dell'immagine (diminuendone le dimensioni).



IL rapporto S/N (SNR)

Nel complesso, il SNR di una camera CCD può essere calcolata mediante la seguente equazione:

$$\frac{IQEt}{\sqrt{(IQEt + Nd t + Nr^2)}}$$

dove:

- I = Photon flux (photons/pixel/second)
- QE = Quantum efficiency
- t = Integration time (seconds)
- Nd = Dark Current (electrons/pixel/sec)
- Nr = Read noise (electrons RMS/pixel)

Si nota che se $IQEt \gg Nd, Nr$ allora risulta: $SNR \cong \sqrt{IQEt}$

La gamma dinamica

- La gamma dinamica è spesso rappresentata in dB come il rapporto tra la FWC e il rumore di lettura (readout noise). Ad esempio, un sistema con una FWC di 100000 e⁻ e un rumore di readout di 10 e⁻, presenta una gamma dinamica (dynamic range) di:

$$DR = 20 \text{ Log}(100000/10) = 80\text{dB}.$$

Più elevata è la gamma dinamica meglio è.

- Questo rapporto dà un'indicazione su quale sia il numero appropriato di livelli di quantizzazione con cui può essere realizzata la conversione A/D per un dato sensore.

Calibrazione delle riprese CCD

Si realizza mediante opportune immagini dette di calibrazione:

- ***Bias frame***: per riportare a 0 l'offset che viene aggiunto al fine di evitare valori negativi nel conteggio di ADU (Analog to Digital Units);
- ***Dark frame***: posa di buio di ugual durata della posa di luce;
- ***Flat field frame***: contiene l'informazione del degrado dell'immagine dovuta all'ottica impiegata nella ripresa (fenomeni di vignettatura e presenza di sporcizia presenti sulle superfici ottiche incontrate lungo il cammino della luce).