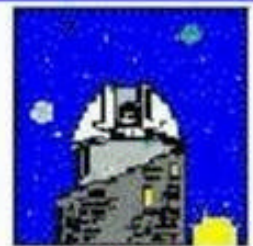


***RIVELATORI BIDIMENSIONALI  
PER L'ASTROFISICA:  
CCD, SISTEMI A CONTEGGIO DI  
FOTONI E RIVELATORI INFRAROSSI***

Giovanni Bonanno



OSSERVATORIO  
ASTROFISICO  
DI CATANIA



VIALE A. DORIA, 6 95125 CATANIA

# RIVELATORI BIDIMENSIONALI PER L'ASTROFISICA: CCD, SISTEMI A CONTEGGIO DI FOTONI E RIVELATORI INFRAROSSI

## *Sommario*

Questo lavoro è una raccolta di dati tecnici relativi ai rivelatori bidimensionali più usati in Astronomia. Tale raccolta è stata realizzata attingendo dalla letteratura e dalla mia personale esperienza.

Il lavoro inizia con una breve introduzione sulla differenza che esiste tra i due tipi principali di rivelatori usati in modo diretto e in strumentazione ausiliaria per telescopi sia terrestri che spaziali (**capitoli 1 e 2**). Per capire bene la loro funzionalità ed il loro utilizzo, viene considerato il caso dell'“Advanced Camera for Survey” (ACS) del telescopio spaziale Hubble.

Tra i vari rivelatori a integrazione, quello sicuramente più importante è il CCD, che per tale motivo viene trattato in dettaglio: viene descritto il principio di funzionamento (**capitolo 3**), vengono descritte le caratteristiche principali affinché possa essere utilizzato come sensore di immagine (**capitolo 4**) e viene presentato brevemente, nel **capitolo 5**, lo stato attuale della tecnologia.

Come rivelatore a conteggio di fotoni, viene descritto in dettaglio il “Micro Channel Plate” (MCP) con vari fotocatodi e vari anodi utilizzati come sensori di posizione (**capitolo 6**).

L'argomento che costituisce il **capitolo 7** riguarda la tecnica di realizzazione di un controller CCD per applicazioni scientifiche. In tale capitolo vengono analizzati gli aspetti salienti sia dal punto di vista hardware che software, di un tipico controller CCD (viene preso ad esempio il controller CCD realizzato per il Telescopio Nazionale Galileo).

Nel **capitolo 8** vengono discussi alcuni risultati, ottenuti sperimentalmente in laboratorio, sulla caratterizzazione di vari CCD.

Infine, nel **capitolo 9**, viene fatta una breve panoramica sui rivelatori bidimensionali sensibili nella banda compresa tra 1 e 5 $\mu$ m.

<i>Sommario</i> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUZIONE</b> .....	<b>4</b>
1.1. Tipi di rivelatori bidimensionali utilizzati in Astrofisica.....	5
1.2. La Advanced Camera for Surveys (ACS) di HST .....	6
1.3. I tre rivelatori della ACS in dettaglio.....	7
1.4. La camera infrarossa di HST: la Near Infrared Camera Multi-Object Spectrometer (NICMOS).....	8
<b>2. RIVELATORI A INTEGRAZIONE E A CONTEGGIO DI FOTONI</b> .....	<b>9</b>
2.1. Differenza tra Rivelatori a Integrazione e a Conteggio di fotoni.....	10
2.2. Utilizzazione dei rivelatori in funzione della lunghezza d'onda.....	11
<b>3. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UN CCD</b> .....	<b>12</b>
3.1. Il CCD come rivelatore di radiazione nel range spettrale 1 - 10000 Å.....	13
3.2. Descrizione fisica di un elemento CCD.....	14
3.3. Funzioni principali di un CCD.....	15
3.4. Generazione della carica, effetto fotoelettrico.....	16
3.5. Accumulo della carica .....	17
3.6. Trasferimento della carica.....	18
3.7. Diagramma temporale del trasferimento di carica .....	19
3.8. Estrazione della carica e trasformazione in segnale .....	20
3.9. Struttura tipica di un CCD a 3 fasi.....	21
3.10. Chips per applicazioni televisive e scientifiche .....	22
3.11. Note sulla realizzazione dei chips (Wafer di Silicio).....	23
<b>4. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DI UN CCD COME SENSORE DI IMMAGINE</b> .....	<b>24</b>
4.1. Parametri geometrici: risoluzione spaziale e area sensibile .....	25
4.2. Influenza delle dimensioni dell'area sensibile sul campo di vista di un Telescopio ....	26
4.3. Aree tipiche di CCD .....	27
4.4. Precisione geometrica.....	28
4.5. Efficienza quantica: definizione e profondità di assorbimento.....	29
4.6. Schematizzazione dell'interazione dei fotoni con un CCD.....	30
4.7. Tecniche per il miglioramento della risposta nell'UV.....	31
4.8. Apparato per la misura di efficienza quantica .....	32
4.9. Efficienza quantica del CCD comparata con altri rivelatori.....	33
4.10. Rumore, sensibilità e dinamica.....	34
4.11. Il rumore di lettura dipende dalla frequenza con cui si estrae la carica.....	35
4.12. Calcolo del range dinamico.....	36
4.13. Efficienza di trasferimento (CTE).....	37
4.14. Misure di CTE mediante sorgenti a raggi X.....	38
4.15. Apparato sperimentale per la misura di CTE .....	39
4.16. Alcuni risultati.....	40
4.17. Trappole dovute al processo di fabbricazione .....	41
4.18. Trappole indotte da radiazioni ad alta energia .....	42
4.19. Carica differita .....	43
4.20. Uniformità ed "image processing" .....	44
4.21. Esempio: uniformità in un CCD assottigliato e retro-illuminato .....	45
4.22. Linearità ed accuratezza fotometrica.....	46
4.23. Confronto con la pellicola fotografica.....	47
4.24. Corrente di fondo.....	48
4.25. CCD per la rivelazione dei raggi X .....	49

<b>5. STATO DELL'ARTE.....</b>	<b>50</b>
5.1. Multi Pinned Phase (MPP) CCD .....	51
5.2. Confronto tra un CCD MPP ed uno normale .....	53
5.3. Open Electrode (OE) CCD o Open Phase CCD .....	54
5.4. Skipper CCD.....	55
5.5. Misure di rumore su un CCD Skipper sperimentale .....	56
5.6. Problemi della tecnica "Flash Gate".....	57
5.7. Nuova tecnica per migliorare la risposta nell'UV: "Catalizzazione" mediante Ag o Cu.....	58
<b>6. RIVELATORI A CONTEGGIO DI FOTONI.....</b>	<b>59</b>
6.1. Il Micro Channel Plate (MCP).....	60
6.2. Diverse configurazioni di MCP .....	61
6.3. MCP a canale curvo.....	62
6.4. "Pulse Height Distribution" .....	63
6.5. Caratteristiche principali di un MCP .....	64
6.6. Fotocatodi: efficienza quantica .....	65
6.7. Sensori di posizione: anodi conduttivi, schermi di fosforo accoppiati a CCD .....	66
6.8. L'anodo "Wedge&Strip" (WSA): determinazione della posizione X, Y della nuvola elettronica .....	67
6.9. Il MAMA.....	68
6.10. MCP con schermo di fosforo accoppiato a CCD.....	69
<b>7. CAMERA CCD PER APPLICAZIONI SCIENTIFICHE: IL CONTROLLER CCD PER IL TELESCOPIO NAZIONALE GALILEO (TNG) .....</b>	<b>70</b>
7.1. Funzioni di Trasferimento di una camera CCD.....	71
7.2. Elettronica di controllo ed interfaccia con computer.....	72
7.3. Dettaglio dell'elettronica di controllo .....	73
7.4. Considerazioni sul convertitore A/D e sul guadagno dell'amplificatore .....	74
7.5. Modi di lettura disponibili con il CCD controller TNG.....	75
<b>8. ALCUNI RISULTATI SPERIMENTALI.....</b>	<b>76</b>
8.1. Uniformità nel Visibile e nell'UV per diversi tipi di CCD .....	77
8.2. Efficienza quantica nel range 2000 - 11000 Å.....	78
8.3. Efficienza quantica nel range 250 - 2500 Å .....	79
8.4. Efficienza quantica, problemi nel range 250 - 2500 Å .....	80
8.5. Efficienza quantica nel range 3000 - 11000 Å per uno dei CCD di TNG ottenute da Lesser .....	81
8.6. Efficienza quantica nel range 1400 - 10500 Å per un CCD Loral trattato con la tecnica della "catalizzazione" (assorbimento chimico).....	82
8.7. Efficienza quantica misurata nel range 3500 - 10500 Å per due CCD del TNG (laboratorio COLD dell'Osservatorio di Catania).....	83
8.8. Coefficiente di assorbimento in funzione della temperatura .....	84
<b>9. RIVELATORI BIDIMENSIONALI PER LA BANDA 1-5 mm.....</b>	<b>85</b>
9.1. Differenti tecnologie di realizzazione: InSb, HgCdTe, PtSi.....	86
9.2. Confronto fra le tre tecnologie .....	87
9.3. Lettura della carica .....	88
9.4. Tecniche di lettura più usate per questi rivelatori.....	89

# 1. INTRODUZIONE

- 1.1. Tipi di rivelatori bidimensionali utilizzati in Astrofisica
- 1.2. La Advanced Camera for Surveys (ACS) di HST
- 1.3. I tre rivelatori della ACS in dettaglio
- 1.4. La camera infrarossa di HST: la Near Infrared Camera Multi-Object Spectrometer (NICMOS)

## 1.1. Tipi di rivelatori bidimensionali utilizzati in Astrofisica

In Astrofisica vengono utilizzati diversi tipi di rivelatori bidimensionali a matrice, ad esempio i "Charge Coupled Devices" (CCD), i "Charge Injection Devices" (CID), i rivelatori a "Micro Channel Plate" (MCP), con fotocatodi di vario tipo per ottimizzare l'osservazione nella lunghezza d'onda d'interesse. In ogni caso, questi rivelatori possono essere classificati in due grandi categorie:

- Rivelatori a "Integrazione"
- Rivelatori a "Conteggio di Fotoni"

I primi sono essenzialmente caratterizzati dal fatto che presentano un rumore detto "di lettura" che si ha al momento dell'estrazione della carica. Tale rumore non è presente nei rivelatori a conteggio di fotoni perché viene discriminato.

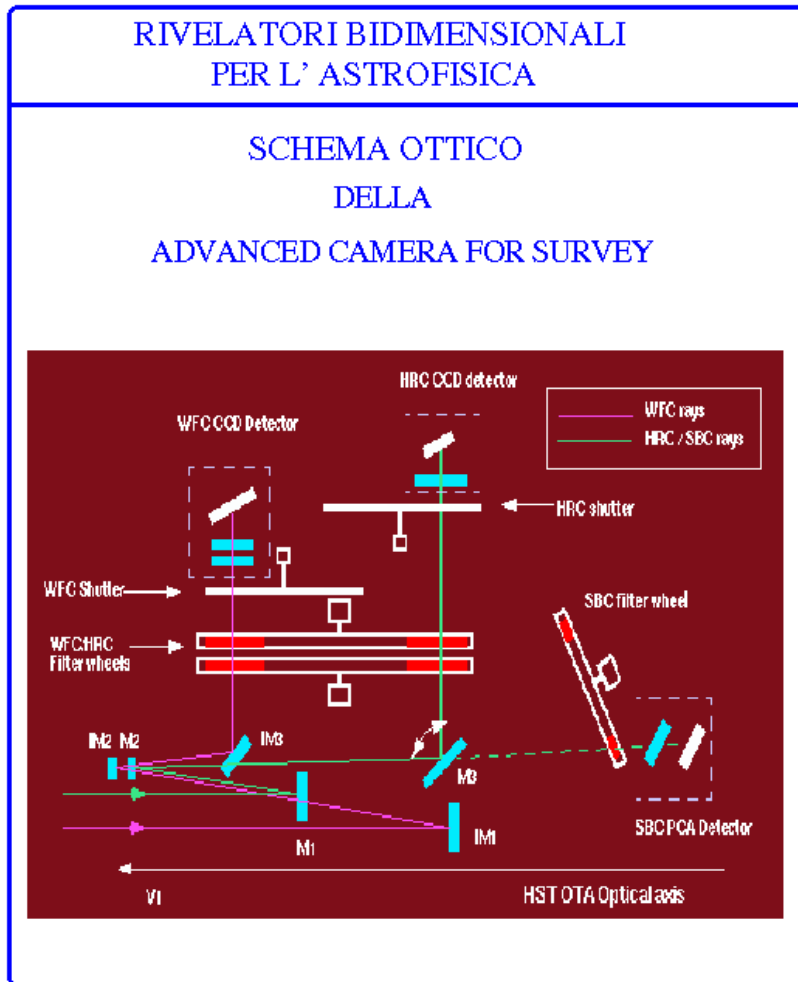


Di contro, mentre i rivelatori a integrazione possono vantare una elevata dinamica (ovvero possono essere usati per l'osservazione di sorgenti molto luminose che hanno un flusso fotonico abbastanza elevato), quelli a conteggio di fotoni avendo una bassa velocità di conteggio, possono essere utilizzati solo per sorgenti deboli, ovvero con un basso flusso (fotoni/sec).

La differenza tra i due tipi di rivelatori sarà discussa in dettaglio più avanti.

## 1.2. La Advanced Camera for Surveys (ACS) di HST

Per renderci conto meglio dei due tipi di rivelatori e della loro utilizzazione in campo astronomico, citiamo come esempio una tra le più interessanti applicazioni di entrambi: l'**Advanced Camera for Survey (ACS)** di Hubble Space Telescope. In questa figura è mostrato lo schema.



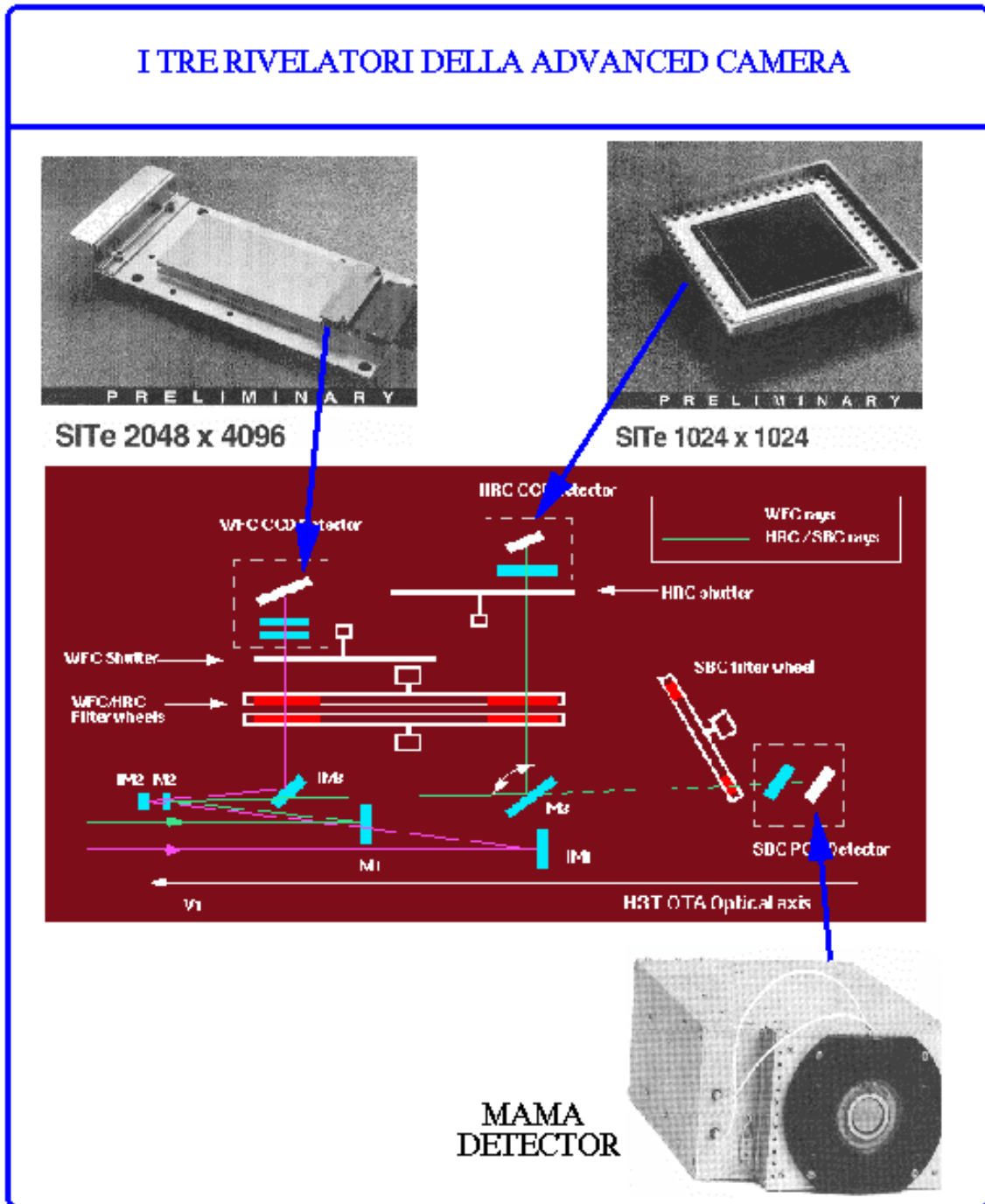
La **ACS** è composta da tre camere fotometriche a multibanda, e ciascuna camera ha un rivelatore appropriato. La prima, la "Wide Field Camera" (**WFC**), utilizza due CCD thinned back-illuminated da  $2048 \times 4096$  pixel (pixel size =  $15 \mu\text{m}$ ) realizzati dalla SITE, che vengono montati a mosaico per un totale di  $4096 \times 4096$  pixel, ed ha un campo di vista di  $200'' \times 204''$  ed una scala di  $0.051''/\text{pixel}$ . Questa camera viene utilizzata per le osservazioni nelle bande V ed I.

La seconda, la High Resolution Camera (**HRC**), utilizza un CCD (SITE) da  $1024 \times 1024$  pixel (pixel size =  $24 \mu\text{m}$ ) che ha uno speciale trattamento per ottenere elevata sensibilità nel range spettrale 200 - 400 nm. La **HRC** permette un campo di vista di  $26'' \times 29''$  ed una scala di  $0.025''/\text{pixel}$ , e viene utilizzata per le osservazioni ad alta risoluzione nella banda 200 - 1000 nm.

La terza, la Solar Blind Camera (**SBC**), è ottimizzata per ottenere una elevata efficienza di rivelazione nel range spettrale 150 - 170 nm. Essa fa uso di un rivelatore a "conteggio di fotoni" chiamato Multi Anode Microchannel Array (**MAMA**) formato da un Micro Channel Plate (**MCP**) a canali curvi con un fotocatodo allo Ioduro di Cesio (CsI) e da un anodo a multi-elettrodi capace di ottenere un'area di  $1024 \times 1024$  pixel con ciascun pixel da  $25 \mu\text{m}$ . La **SBC** permette un campo di vista di  $26'' \times 29''$  ed una scala di  $0.030''/\text{pixel}$  e viene impiegata per osservazioni nella banda 150 - 200 nm. Questa camera è simile ad una delle due camere previste per lo Space Telescope Image Spectrograph (**STIS**) di HST. Anzi, verrà utilizzata una delle camere in più ("spare") realizzate dalla Ball Aerospace per STIS. Nel corso di queste lezioni sarà data una spiegazione dettagliata dei vari rivelatori.

### 1.3. I tre rivelatori della ACS in dettaglio

In questa figura sono mostrati i vari rivelatori usati nella ACS, così come si trovano nei "DATA SHEET" della SITE ed in letteratura.







## **2. RIVELATORI A INTEGRAZIONE E A CONTEGGIO DI FOTONI**

- 2.1. Differenza tra Rivelatori a Integrazione e a Conteggio di fotoni
- 2.2. Utilizzazione dei rivelatori in funzione della lunghezza d'onda

## 2.1. Differenza tra Rivelatori a Integrazione e a Conteggio di fotoni

In questa figura vengono espressi i concetti fondamentali che differenziano i due tipi di rivelatori.



Come si può vedere dalla figura, esistono vari tipi di rivelatori a integrazione. Questo tipo di rivelatore, per il modo in cui viene letta la carica, ha insito un rumore di lettura che ne limita le applicazioni per le osservazioni a bassissimi livelli di segnali, come per esempio nelle applicazioni di spettrografia di sorgenti deboli.

I rivelatori bidimensionali a conteggio di fotoni sono tutti caratterizzati dall'aver come rivelatore primario un MCP con opportuno fotocatodo, e come sensore di posizione una varietà di anodi: conduttivi, resistivi, a schermo di fosforo. Per il modo in cui viene integrato il segnale, questo tipo di rivelatore non introduce rumore di lettura, per cui le sorgenti deboli possono essere osservate considerandole inficciate del solo rumore statistico "Poissoniano".

## 2.2. Utilizzazione dei rivelatori in funzione della lunghezza d'onda

Non esiste un rivelatore ideale che offra una risposta elevata a tutte le lunghezze d'onda. Nei rivelatori a conteggio di fotoni, l'elemento che stabilisce l'efficienza quantica (di cui si parlerà più in dettaglio nel seguito) è il fotocatodo, ottenuto depositando direttamente il materiale fotosensibile nei pori dell'MCP. Come si vede da questa figura, vengono impiegati diversi materiali in funzione della banda spettrale di interesse.

Range Spettrale	DEF.	SCINTIL. + MCP + FOTOC + ANODO	MCP APERTO + FOTOC OPACO CsI + ANODO	MCP APERTO + FOTOC OPACO KBr + ANODO	MCP FINEST. + FOTOC MgF <sub>2</sub> + ANODO	CCD Subst. 1500 Ohm/cm	CCD Thinned Back illum. Coated	CCD Front illum.	CID	IR Hg Cd Te	IR In Sb
100 - 30 KeV	X	██████████				██████████					
30 - 1 KeV	XUV	██████████				██████████					
1000 - 100 eV	FUV		██████████			██████████	██████████				
10 - 120 nm	EUV			██████████			██████████				
120 - 190 nm	VUV			██████████	██████████		██████████				
190 - 390 nm	UV				██████████		██████████	██████████			
390 - 700 nm	VIS						██████████	██████████			
700 - 1100 nm	NIR						██████████				
1 - 2.5 μm	NIR									██████████	██████████
1 - 5 μm	IR										██████████

In seguito, si vedrà come i CCD che hanno un substrato con elevata resistività possano essere dei buoni rivelatori per la banda X.

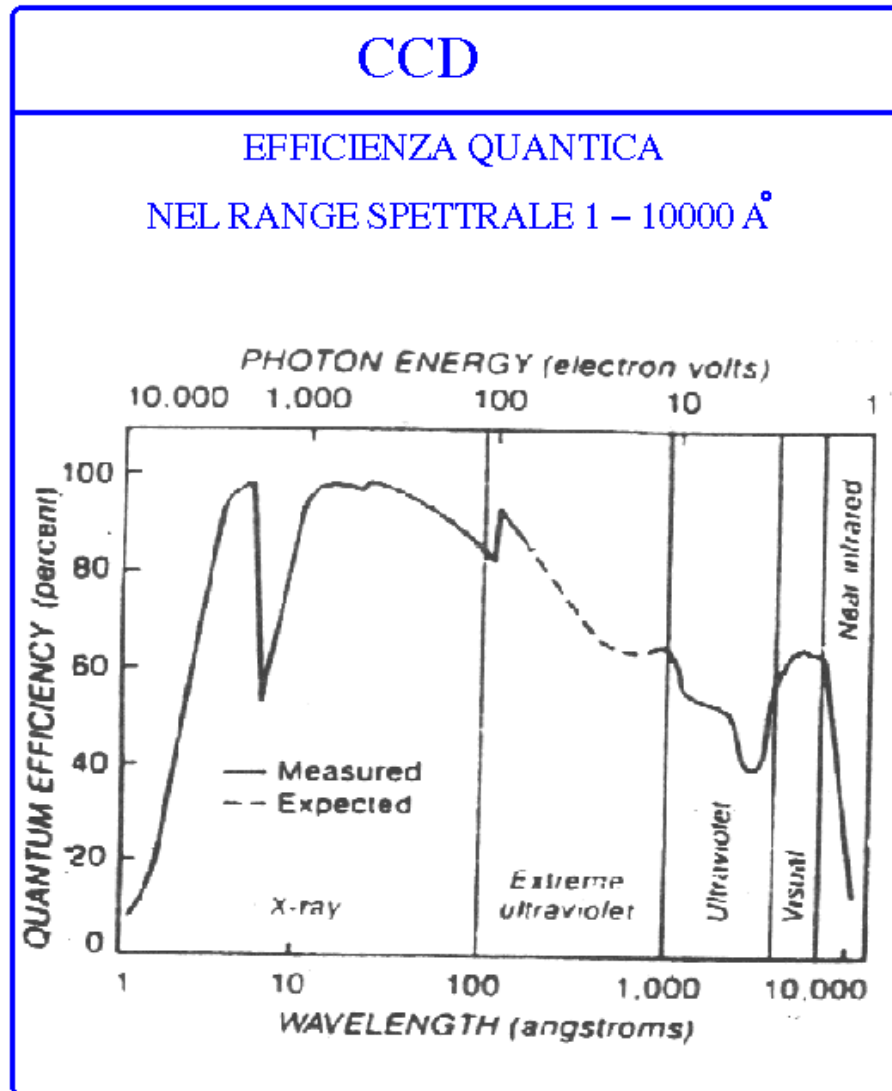
Appare abbastanza evidente che il CCD "Thinned Back-illuminated" con uno speciale trattamento della superficie sensibile, il "coating", potrebbe essere usato benissimo anche nella banda spettrale dell'Ultravioletto da Vuoto "Vacuum Ultra Violet" (VUV). Allora ci si potrebbe chiedere come mai non venga usato sulla ACS, al posto della SBC. La risposta sta nel nome stesso della camera SBC, infatti "Solar Blind" significa appunto che si vuole eliminare il contributo della luce solare (Visibile). Infatti, mentre un MCP con fotocatodo KBr o CsI non produce alcun fotoevento nel visibile, il CCD, al contrario, ha la sua risposta massima nel visibile. Per ottenere, allora, un adeguato segnale nel VUV occorre filtrare pesantemente il Visibile. I filtri che occorrerebbero per eliminare il contributo Visibile sarebbero così complicati che comprometterebbero la risposta dello strumento anche nel range VUV (120 - 190 nm).

### **3. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DI UN CCD**

- 3.1. Il CCD come rivelatore di radiazione nel range spettrale 1 - 10000 Å
- 3.2. Descrizione fisica di un elemento CCD
- 3.3. Funzioni principali di un CCD
- 3.4. Generazione della carica, effetto fotoelettrico
- 3.5. Accumulo della carica
- 3.6. Trasferimento della carica
- 3.7. Diagramma temporale del trasferimento di carica
- 3.8. Estrazione della carica e trasformazione in segnale
- 3.9. Struttura tipica di un CCD a 3 fasi
- 3.10. Chips per applicazioni televisive e scientifiche
- 3.11. Note sulla realizzazione dei chips (Wafer di Silicio)

### 3.1. Il CCD come rivelatore di radiazione nel range spettrale 1 - 10000 Å

Disporre di un rivelatore che abbia un'elevata sensibilità in un ampio intervallo spettrale è il sogno di qualsiasi ricercatore che lavora nel campo delle misure fotometriche. In natura esiste un materiale chiamato *Silicio* che presenta un'elevata sensibilità nell'intervallo di lunghezze d'onda da 1 a 10000 Å, e che quindi copre lo spettro dal vicino-infrarosso ai raggi X (molli) e include l'UV, l'EUV e l'XUV.



Se poi il *Silicio* viene trattato opportunamente e vengono usate le stesse tecniche di produzione dei cosiddetti “chips”, cioè dei circuiti integrati, si possono ottenere degli ottimi sensori di immagine. Oggi il CCD è assai diffuso, in quanto viene utilizzato non solo nelle videocamere commerciali ma anche nelle macchine fotografiche, le quali digitalizzano l'immagine e la immagazzinano in supporti di memorizzazione uguali a quelli usati nei computer. In tal modo la lettura viene effettuata da sistemi computerizzati che eliminano l'uso del processo fotografico tradizionale e permettono di vedere le foto sul proprio televisore di casa.

Come si vede dalla figura, il *Silicio*, o meglio il *CCD*, ha una efficienza quantica (cioè il rapporto tra i fotoeventi prodotti e i fotoni incidenti) che si avvicina al 100% nel range 10 - 100 Å, e supera circa il 70% nel visibile.

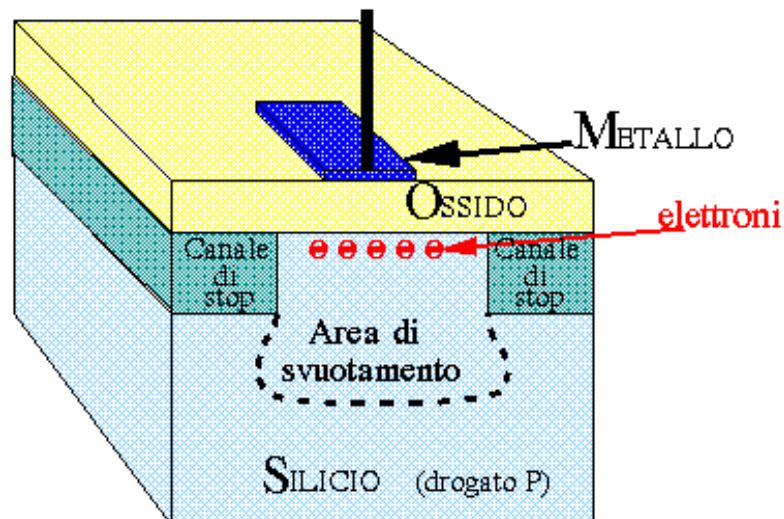
### 3.2. Descrizione fisica di un elemento CCD

Il CCD è una targhetta di *Silicio* organizzata in modo da formare una matrice di elementi fotosensibili in cui accumulare cariche (prodotte dalla radiazione incidente) e leggerne il contenuto successivamente.

La struttura di un elemento base di un CCD può essere schematizzata come si vede nella figura. Si tratta di un elemento detto **M.O.S.** (**M**etallo, **O**ssido, **S**ilicio). Applicando un potenziale all'elettrodo, questa particolare struttura consente di creare una regione dove accumulare cariche generate per effetto fotoelettrico.

ELEMENTO BASE DI UN CCD:

#### IL CONDENSATORE MOS



- Lo strato isolante di  $\text{SiO}_2$  (Ossido) separa l'elettrodo di alluminio (Metallo) dal substrato di Silicio
- Una tensione positiva applicata all'elettrodo respinge le buche creando una regione di svuotamento, nella quale possono accumularsi le cariche (in questo caso elettroni)
- Due canali di stop (pesantemente drogati P) limitano l'estensione laterale della zona di svuotamento

### 3.3. Funzioni principali di un CCD

Schematizzando, si possono individuare quattro momenti fondamentali:

- a) la *generazione* delle cariche per effetto fotoelettrico;
- b) la *raccolta* delle cariche, tramite la creazione di una buca di potenziale;
- c) il *trasferimento* delle cariche, variando i potenziali degli elettrodi in modo opportuno;
- d) l'*estrazione* della carica mediante il circuito di uscita.

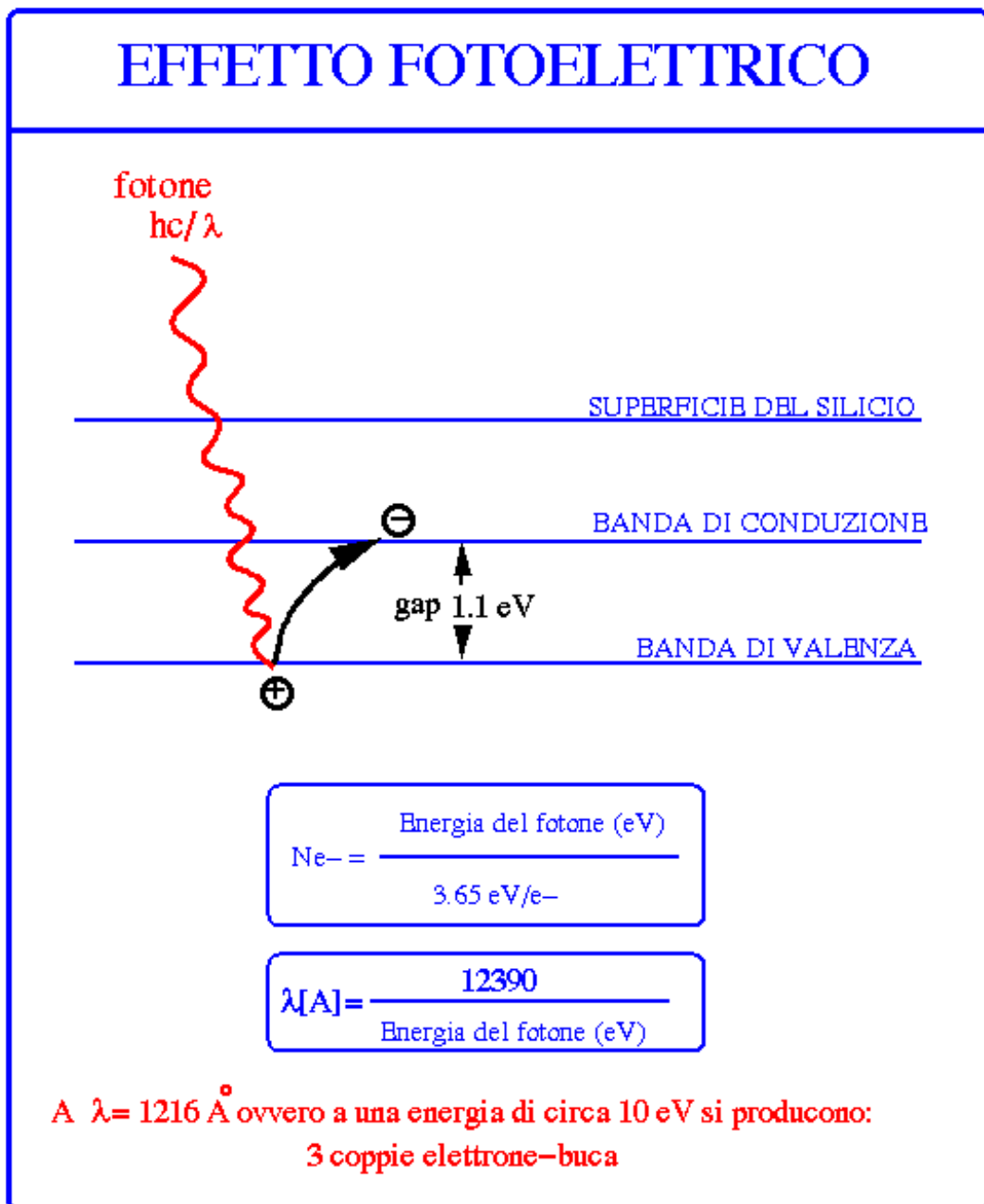




### 3.4. Generazione della carica, effetto fotoelettrico

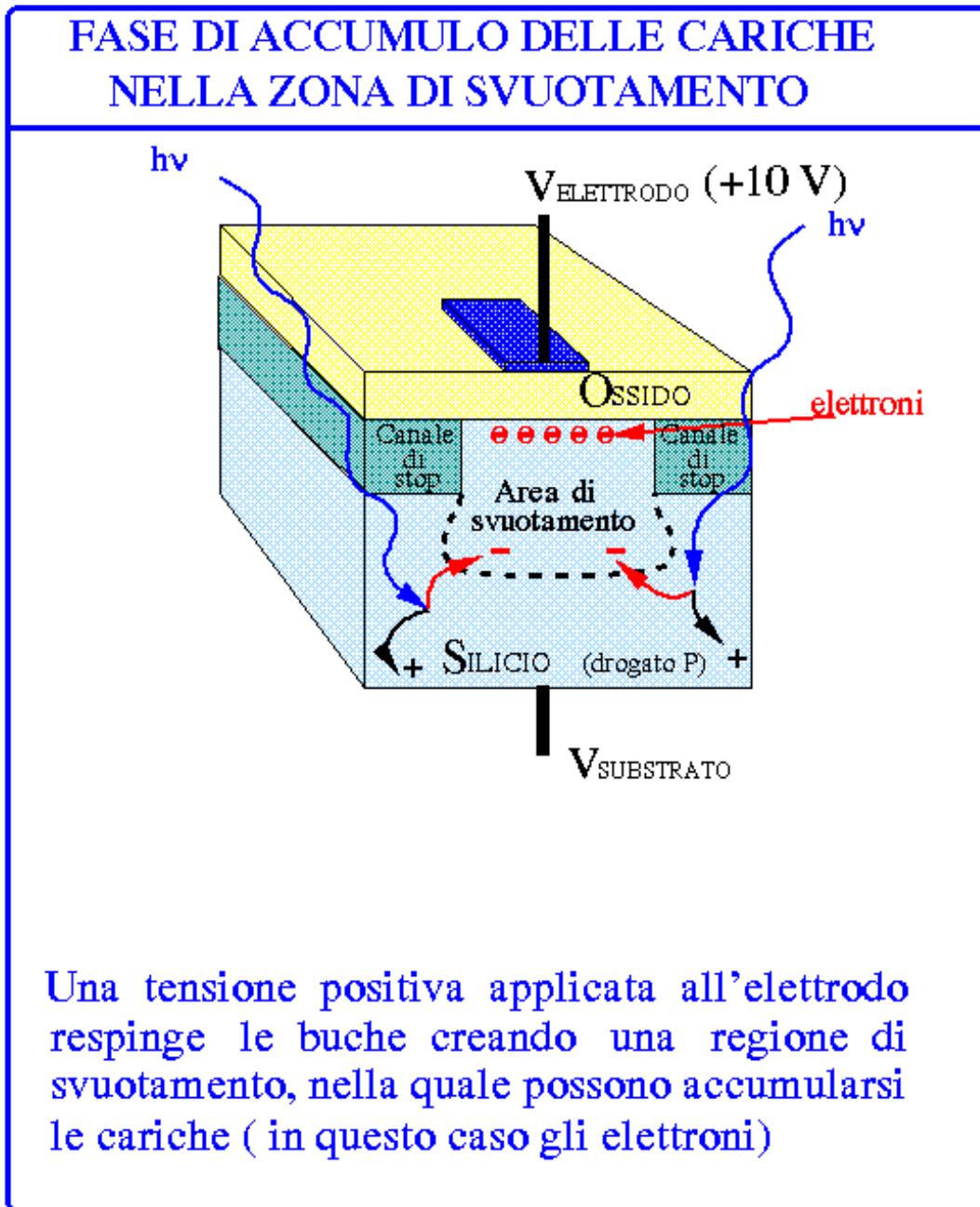
I fotoni con una certa energia, che dipende dalla lunghezza d'onda ( $hc/\lambda$ ), interagendo con il *Silicio*, eccitano gli elettroni di valenza e li fanno passare nella banda di conduzione, creando così una coppia elettrone-buca.

I fotoni con una energia compresa tra 1.1 e 5 eV generano una coppia elettrone-buca, mentre i fotoni con energia maggiore di 5 eV producono più di una coppia. Per esempio, alla lunghezza d'onda corrispondente alla Lyman- $\alpha$  ( $\lambda = 1216\text{\AA}$ ), per ogni fotone si producono 3 coppie elettrone-buca.



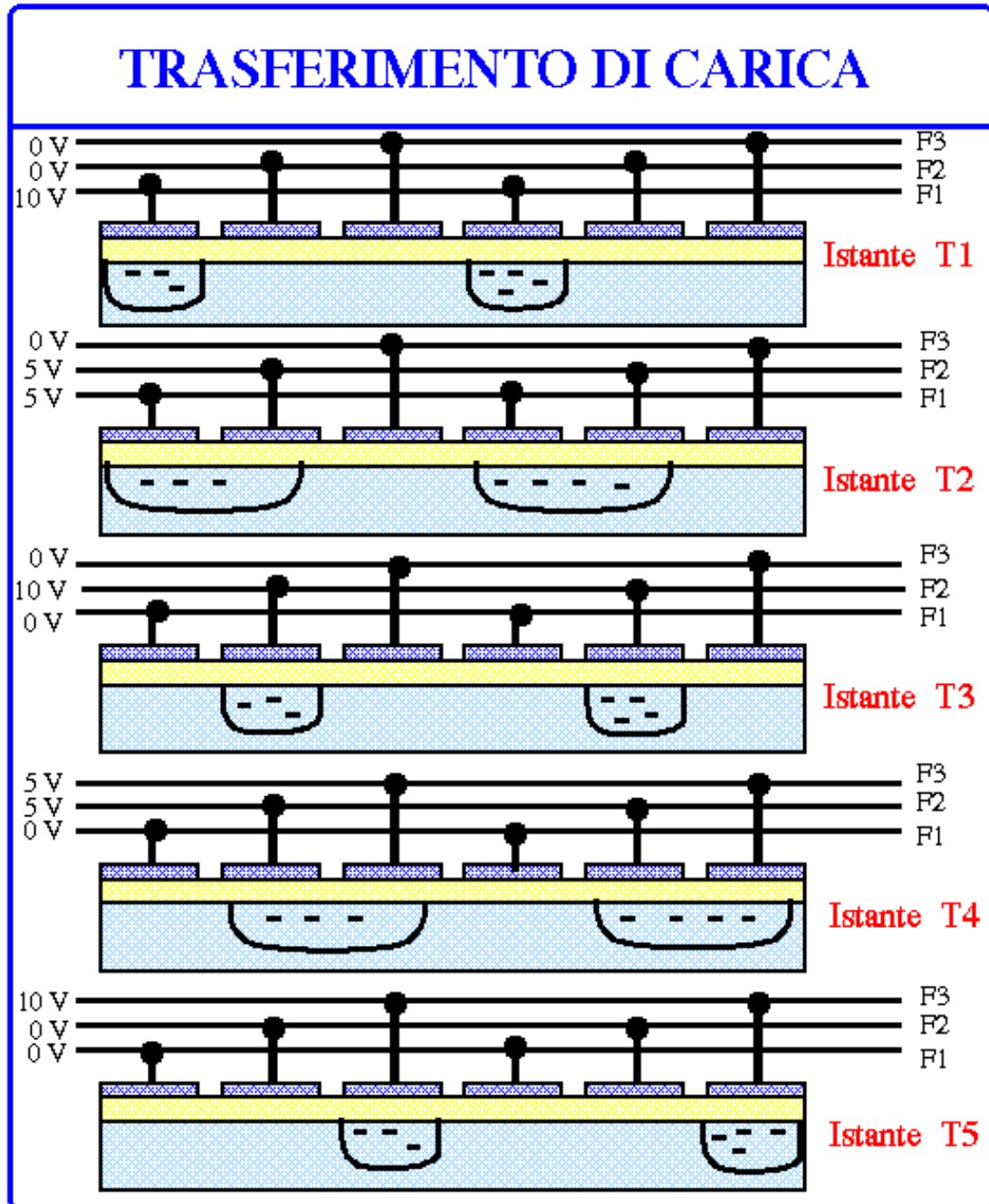
### 3.5. Accumulo della carica

Come detto in precedenza, un potenziale positivo sull'elettrodo di un elemento MOS crea una buca di potenziale. Durante il tempo di integrazione il dispositivo si mantiene in queste condizioni, e quindi le cariche fotogenerate sono libere di diffondersi nel silicio. Gli elettroni che arrivano nella zona di svuotamento diventano cariche utili e costituiscono il segnale.



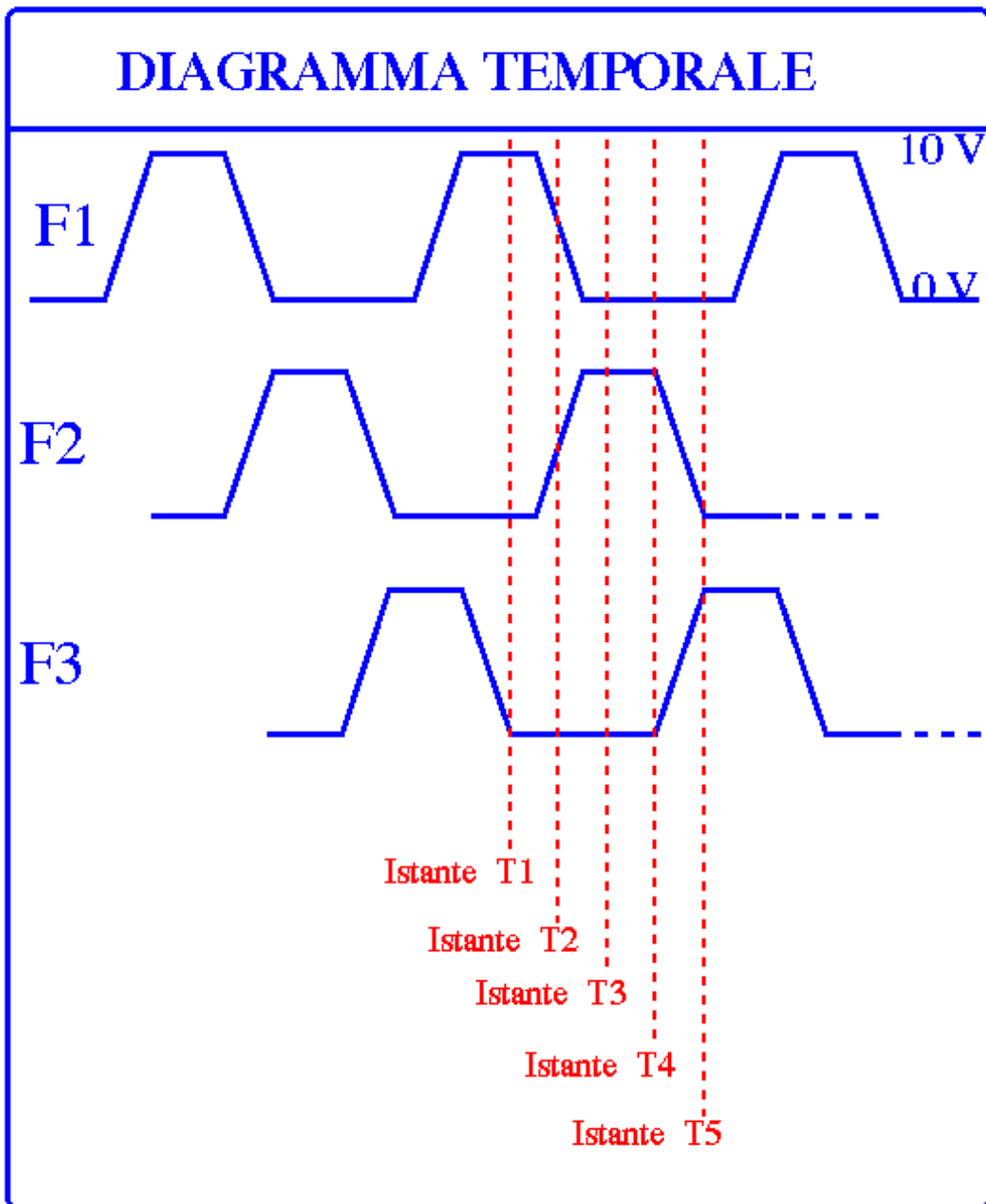
### 3.6. Trasferimento della carica

La fase successiva riguarda il trasferimento o l'accoppiamento di una carica accumulata sotto l'elettrodo con l'elemento successivo, per arrivare così al circuito di uscita, dove verrà letto. In questa figura si può vedere come, variando i potenziali nei vari elettrodi, variano le buche di potenziale, e quindi come vengono spostate le cariche. Da notare i vari istanti (da T1 a T5) che sono riportati nel diagramma temporale della figura successiva.



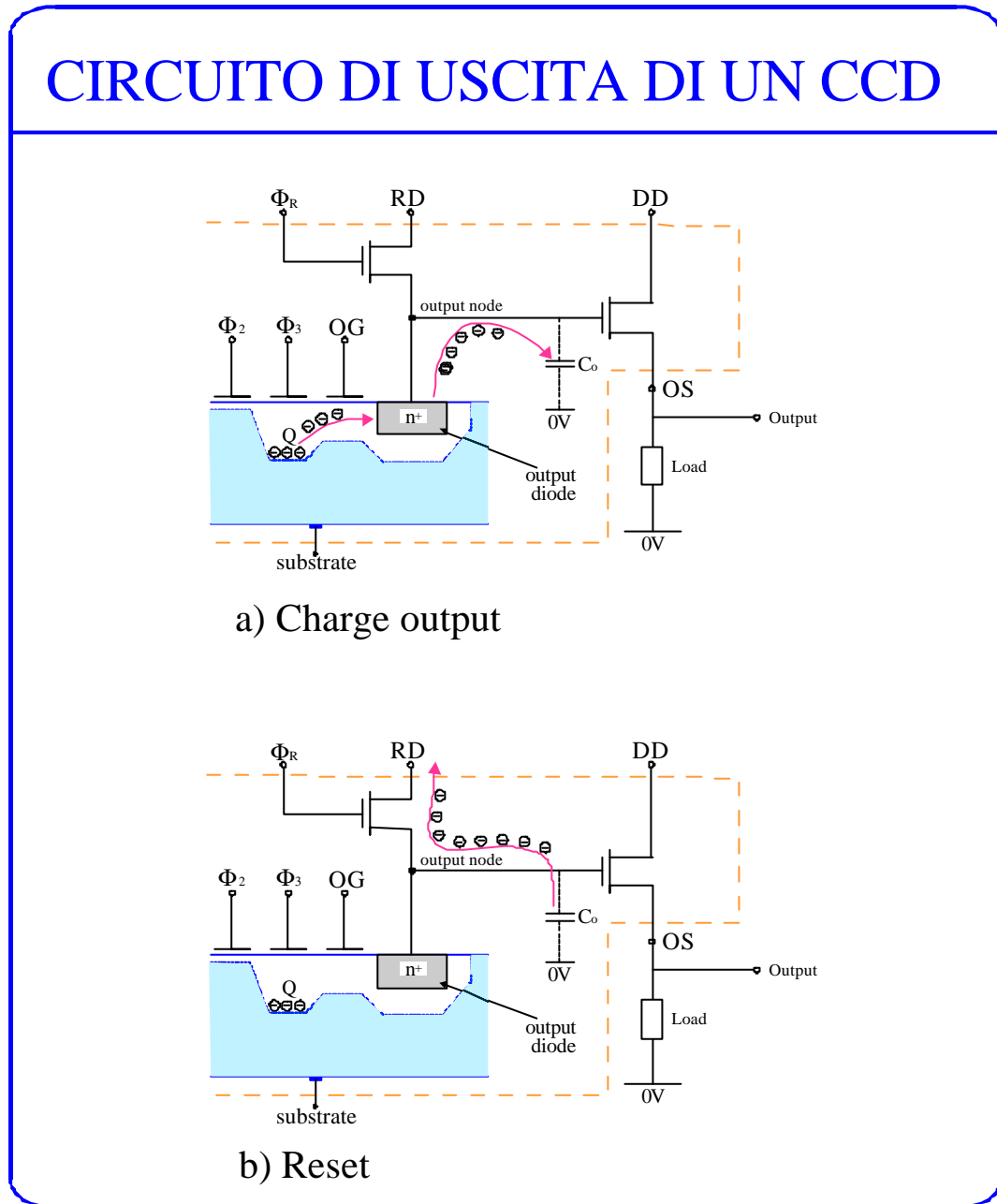
### 3.7. Diagramma temporale del trasferimento di carica

In questa figura è riportato il diagramma temporale della sequenza di segnali che servono a spostare le cariche dall'elettrodo **F1** all'elettrodo **F3**.



### 3.8. Estrazione della carica e trasformazione in segnale

L'estrazione della carica avviene mediante il circuito di uscita mostrato in figura.

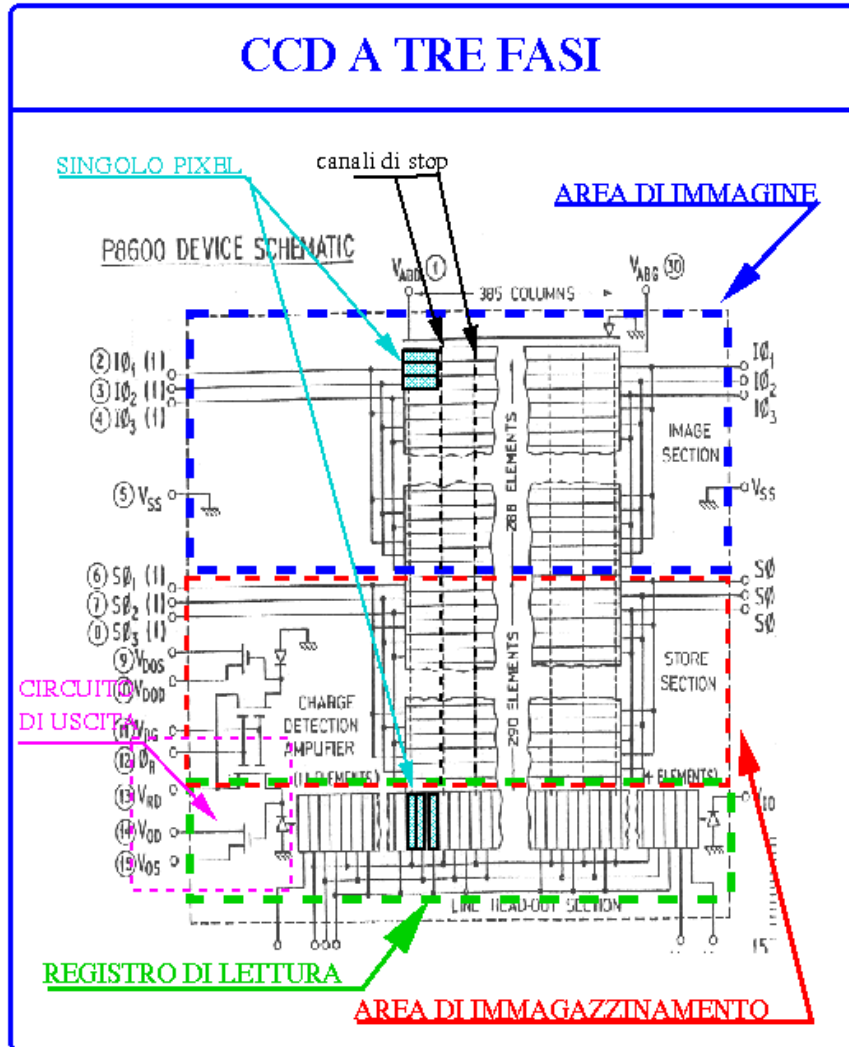


Si distinguono due momenti:

1. il trasferimento della carica dall'elettrodo  $\Phi_3$  al diodo di uscita e da questo al nodo di uscita (costituito da una capacità), e tramite il transistor ad effetto di campo (FET) che funziona come adattatore di impedenza al carico (load);
2. successivamente, tramite l'impulso di "reset"  $\Phi_R$ , il nodo di uscita viene ricaricato, e quindi reso pronto per ricevere la carica corrispondente al pixel successivo.

### 3.9. Struttura tipica di un CCD a 3 fasi

Questa figura mostra lo schema di un CCD a tre fasi. In tal caso il pixel è realizzato con 3 elementi MOS. Lungo le colonne verticali la separazione è ottenuta con i canali di stop (linee tratteggiate).

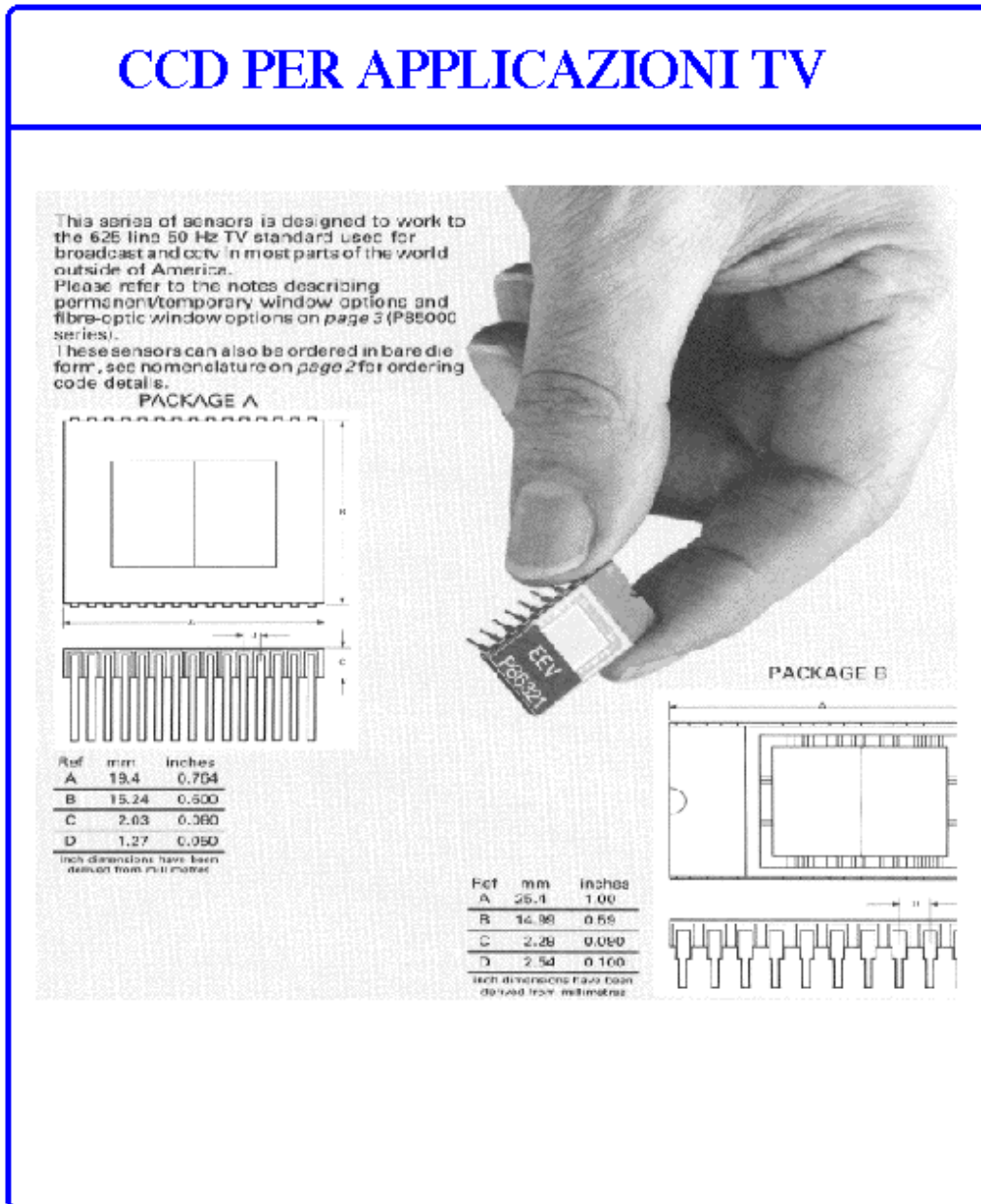


In tale schema si possono individuare 4 zone fondamentali:

1. L'area d'immagine, sensibile alla radiazione e nella quale si accumulano le cariche.
2. L'area di memoria o immagazzinamento, che viene coperta in modo da non essere sensibile alla radiazione, nella quale vengono spostate le cariche generate nell'area d'immagine per consentirne una lettura esente da contaminazione di ulteriore radiazione (in pratica viene eliminato l'uso dell'otturatore).
3. Il registro di lettura, dove una intera riga di pixel viene trasferita, e dove inizia il trasferimento di ciascun pixel verso il circuito di uscita. Anche in tale registro il pixel viene realizzato con 3 elementi MOS.
4. Il circuito di uscita descritto precedentemente che consente l'estrazione della carica.

### 3.10. Chips per applicazioni televisive e scientifiche

Questa figura mostra l'aspetto di un tipico CCD per applicazioni televisive. Si può notare la parte oscurata sotto cui si trova l'area di immagazzinamento.

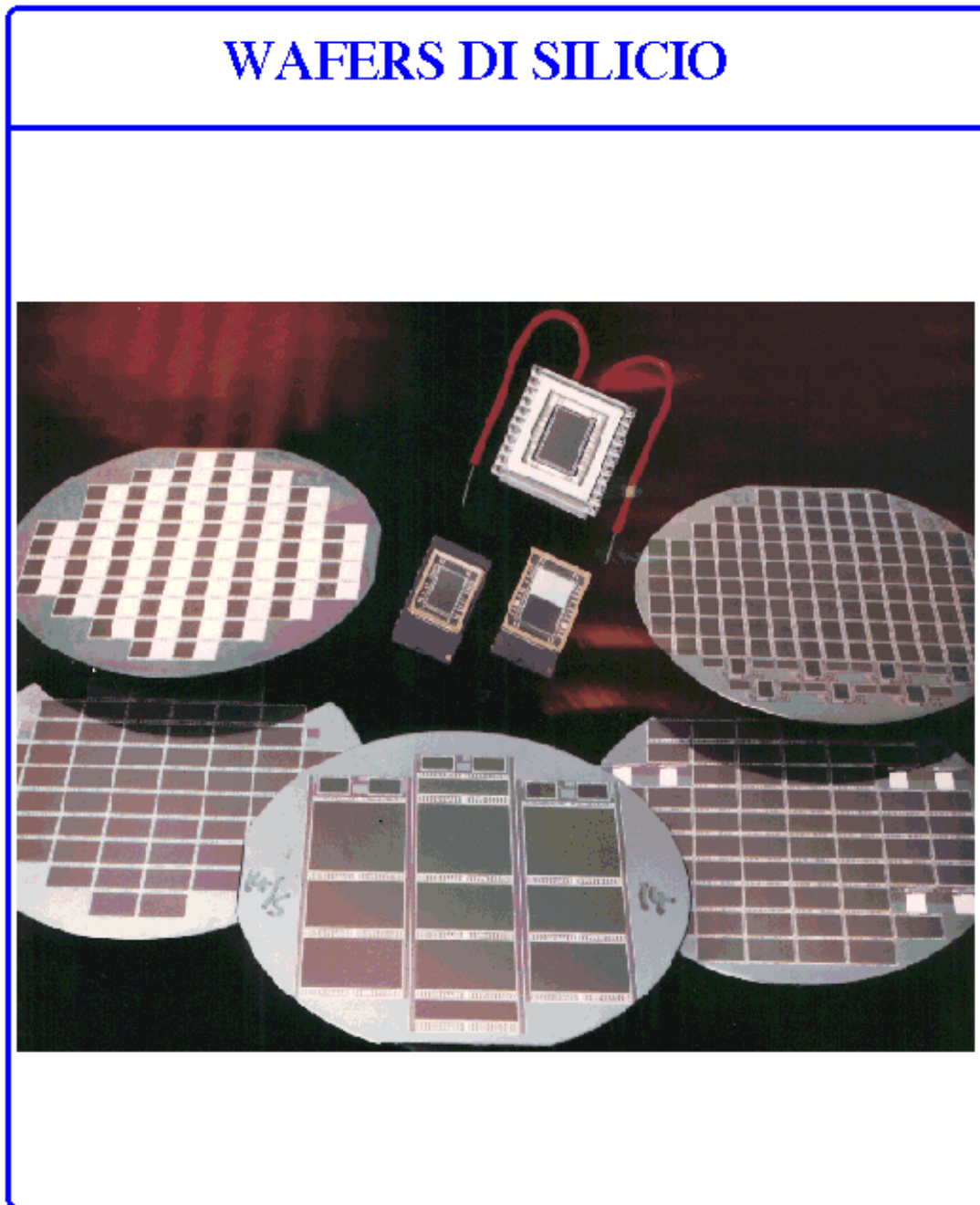


Le differenze sostanziali tra un chip di tipo televisivo e un chip di tipo scientifico sono due:

1. L'area sensibile, che risulta essere tutta quella possibile, cioè si rimuove la copertura sull'area di immagazzinamento facendola diventare area sensibile (viene usato un otturatore per la lettura dell'intera area sensibile); in questo caso il CCD si dice di tipo "Full Frame".
2. Si usa una frequenza di scansione minore di quella usata per i CCD di tipo televisivo, in tal modo si può ridurre il rumore di lettura e si può migliorare l'efficienza di trasferimento del CCD. In questo caso si dice che il CCD viene fatto funzionare in "slow scan".

### 3.11. Note sulla realizzazione dei chips (Wafer di Silicio)

Come detto, i CCD sono targhette di silicio. Queste vengono ricavate dai cosiddetti "Wafer", che normalmente sono di 4 pollici. Come si vede nella figura, nei *wafers* si realizzano CCD di diverse dimensioni: per applicazioni televisive e di tipo "Full Frame". I *wafers* con delle apposite apparecchiature vengono tagliati in modo da avere i singoli CCD, e poi vengono messi nei cosiddetti "package", che sono i contenitori dei circuiti integrati.





## **4. CARATTERISTICHE PRINCIPALI DI UN CCD COME SENSORE DI IMMAGINE**

- 4.1. Parametri geometrici: risoluzione spaziale e area sensibile
- 4.2. Influenza delle dimensioni dell'area sensibile sul campo di vista di un Telescopio
- 4.3. Aree tipiche di CCD
- 4.4. Precisione geometrica
- 4.5. Efficienza quantica: definizione e profondità di assorbimento
- 4.6. Schematizzazione dell'interazione dei fotoni con un CCD
- 4.7. Tecniche per il miglioramento della risposta nell'UV
- 4.8. Apparato per la misura di efficienza quantica
- 4.9. Efficienza quantica del CCD comparata con altri rivelatori
- 4.10. Rumore, sensibilità e dinamica
- 4.11. Il rumore di lettura dipende dalla frequenza con cui si estrae la carica
- 4.12. Calcolo del range dinamico
- 4.13. Efficienza di trasferimento (CTE)
- 4.14. Misure di CTE mediante sorgenti a raggi X
- 4.15. Apparato sperimentale per la misura di CTE
- 4.16. Alcuni risultati
- 4.17. Trappole dovute al processo di fabbricazione
- 4.18. Trappole indotte da radiazioni ad alta energia
- 4.19. Carica differita
- 4.20. Uniformità ed "image processing"
- 4.21. Esempio: uniformità in un CCD assottigliato e retro illuminato
- 4.22. Linearità ed accuratezza fotometrica
- 4.23. Confronto con la pellicola fotografica
- 4.24. Corrente di fondo
- 4.25. CCD per la rivelazione dei raggi X

## 4.1. Parametri geometrici: risoluzione spaziale e area sensibile

Quando si considerano i parametri geometrici di un CCD si fa riferimento essenzialmente a tre parametri fondamentali:

- area sensibile;
- dimensioni del pixel;
- planarità della superficie sensibile.

Per capire meglio come sono legate tra loro la dimensione del pixel e l'area sensibile facciamo un esempio. Cosa accade se sul piano focale del telescopio "Galileo" (TNG), che ha le caratteristiche mostrate nella figura, poniamo un CCD che ha un pixel di 15  $\mu\text{m}$  di lato?

PARAMETRI GEOMETRICI :

**AREA SENSIBILE & DIMENSIONI DEL PIXEL**

DIMENSIONI DEL PIXEL

Esempio: Il telescopio Nazionale "Galileo" ha:

un diametro  $D = 3600 \text{ mm}$   
 un rapporto focale  $F = 11$   
 ovvero una distanza focale  $f = D * F = 39600$

Con questi parametri la scala sul piano focale (PS) risulta:

$$PS = \frac{\text{N di arcosecondi in un radiante}}{f} = \frac{206264}{39600} ["/\text{mm}] = 5.2 ["/\text{mm}]$$

Riferendo la PS ad un CCD con pixel da 15  $\mu\text{m}$  possiamo scrivere:

**PS = 0.08 ["/pixel]**

E' plausibile supporre che in media l'immagine di seeing di una sorgente puntiforme luminosa sul piano focale del TNG a Roque de los Muchachos sia di 0.5" - 0.7", quindi possiamo dire che tale immagine verra' campionata con circa 6 - 9 pixel.

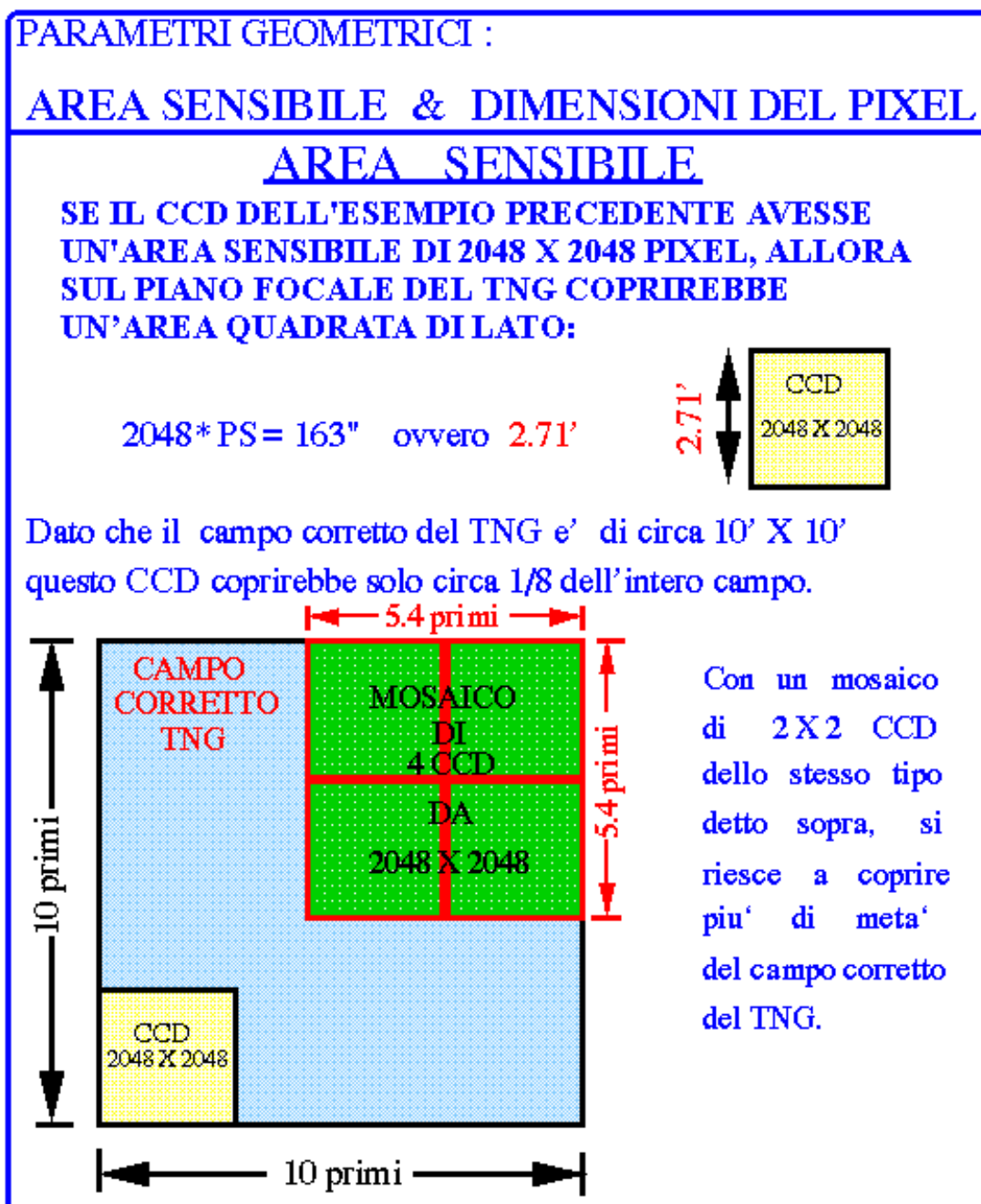
**Binning on chip!!!!**

I risultati mostrano che se accettiamo per una sorgente luminosa puntiforme una cosiddetta "figura di seeing" di circa 0.5", vuol dire che con il CCD in questione possiamo campionarla con  $6 \times 6$  pixel. Tale campionamento è più che sufficiente per fare *analisi dati* di tipo fotometrico. Per sorgenti molto deboli si potrebbe anche adottare una tecnica detta di "**Binning on Chip**", che consiste nel far scorrere la carica su più righe di pixel e su più pixel prima di essere letta. Questo si ottiene con una opportuna configurazione dei segnali di pilotaggio del CCD (par. 7.5.).

## 4.2. Influenza delle dimensioni dell'area sensibile sul campo di vista di un Telescopio

Per l'area di piano focale ricoperta dal CCD (detta CAMPO DI VISTA) il calcolo è abbastanza semplice e si vede che con CCD da  $2048 \times 2048$  pixel si coprono circa  $2.7'$ , che sono circa un ottavo del campo corretto offerto da TNG. Per migliorare la copertura del piano focale allora si ricorre all'uso di CCD componibili a mosaico, detti "Buttable" (interspazio di  $400 \mu\text{m}$ ). Naturalmente, tutto ciò avviene a spese di una più complicata elettronica di controllo di tali dispositivi.

Come si vede nella figura, con un mosaico di  $2 \times 2$  si riesce a coprire più della metà del campo corretto del TNG.



### 4.3. Aree tipiche di CCD

In questa figura si possono vedere alcuni esempi di CCD attualmente realizzati, in modo che possano formare il cosiddetto "mosaico di CCD". Sono riportate le superfici sensibili ottenibili nel caso di funzionamento del singolo chip e nel caso del mosaico di chip.

PARAMETRI GEOMETRICI :				
AREA SENSIBILE & DIMENSIONI DEL PIXEL				
SELEZIONE DI CCD				
Aggiornamento : settembre 1997				
Rivelatore	Costruttore	dim. pixel $\mu\text{m}$	area sensibile pixels	area sensibile $\text{mm}^2$
ST-002	SITe	15	2048x4096	30.7 x 61.4
SI-003A	SITe	24	1024x1024	24.6 x 24.6
2K3eb	LORAL	15	2048x2048	30.7 x 30.7
CCD42-80	EEV	13.5	2048x4096	27.6 x 55.2

I CCD della tabella superiore sono, ad eccezione del SITe SI-003, tutti di tipo "butable" e si possono mettere insieme per comporre "MOSAICI".

Per formare una area sensibile di 4096 X 4096 pixel occorre:

Rivelatore	Costruttore	area sensibile pixels	Num. Riv.	area totale $\text{mm}^2$
ST-002	SITe	2048x4096	2	61.4 x 61.4
2K3eb	LORAL	2048x2048	4	61.4 x 61.4
CCD42-80	EEV	2048x4096	2	55.2 x 55.2

## 4.4. Precisione geometrica

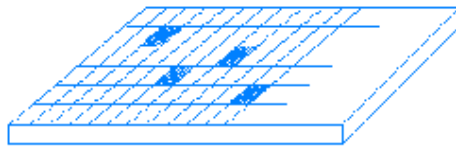
La precisione geometrica è una caratteristica che ha fatto sì che il CCD venga usato in moltissime applicazioni scientifiche che richiedono una elevata *ripetibilità* della risposta.

PARAMETRI GEOMETRICI :

### PRECISIONE GEOMETRICA

**La precisione geometrica (o stabilità) è la capacità del rivelatore di individuare l'esatta posizione di un oggetto**

*La precisione geometrica del CCD è assicurata dal fatto che i singoli elementi dell'immagine (i pixel) sono definiti dalla struttura fisica del chip*



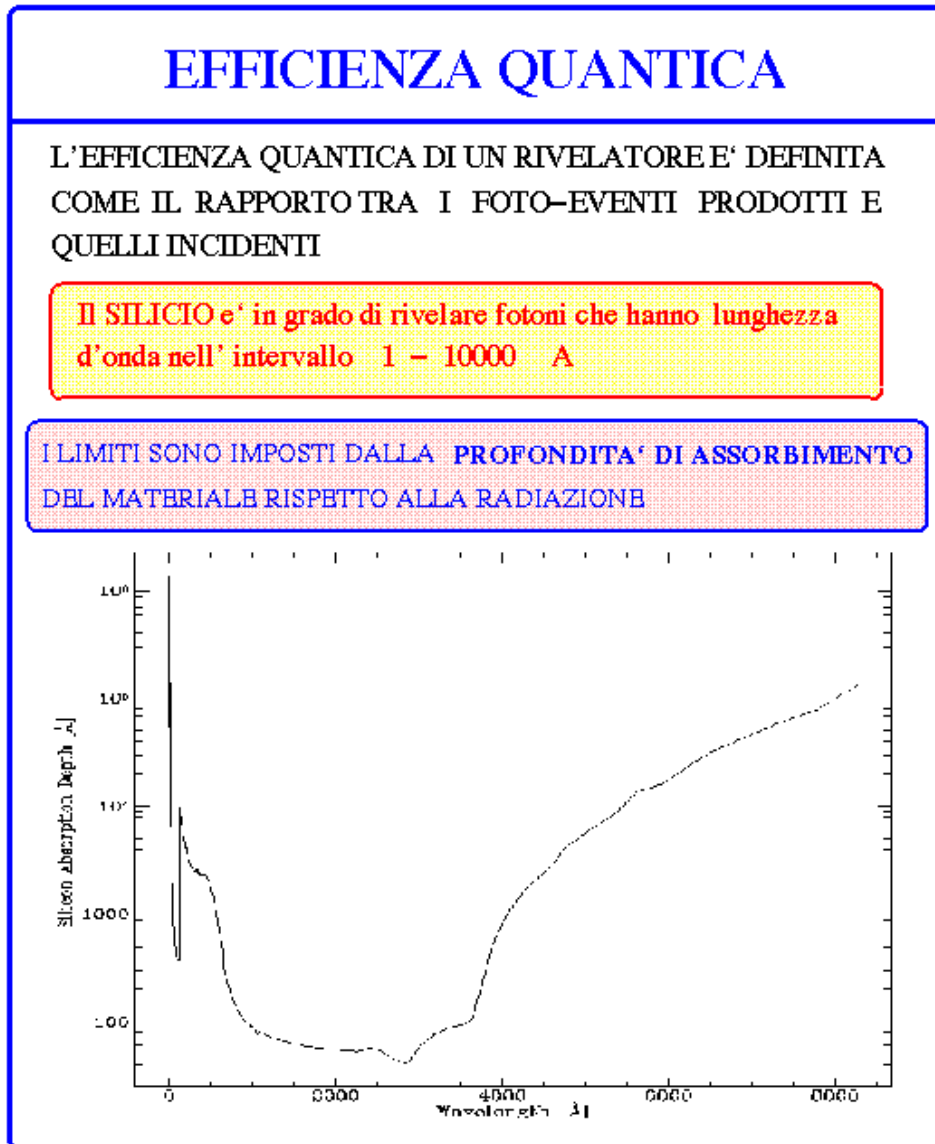
*Nelle telecamere a "Vidicon" il pannello elettronico non è così preciso nell'individuare il pixel e soprattutto non è ripetibile tra una scansione e la successiva*



La differenza tra un CCD e una telecamera a tubo "Vidicon" sta nel fatto che il CCD ha una *stabilità* geometrica definita dalla stessa struttura realizzativa, mentre la telecamera tradizionale produce una non perfetta ricostruzione dell'immagine e non *ripetibile geometricamente*. Infatti, per individuare i pixel sullo schermo fotosensibile, la telecamera necessita di un fascio elettronico (pilotato dalle placchette deflettrici) che ha una certa imprecisione nel colpire lo schermo, (per esempio, il fascio elettronico risente delle variazioni di temperatura, dei campi magnetici ecc.).

## 4.5. Efficienza quantica: definizione e profondità di assorbimento

L'efficienza quantica è una delle più importanti caratteristiche di un rivelatore, infatti esprime la capacità di generare un fotoevento per ogni fotone che lo colpisce. In un CCD, ed in generale in un qualsiasi rivelatore a stato solido, l'efficienza quantica è determinata dalla profondità di assorbimento.

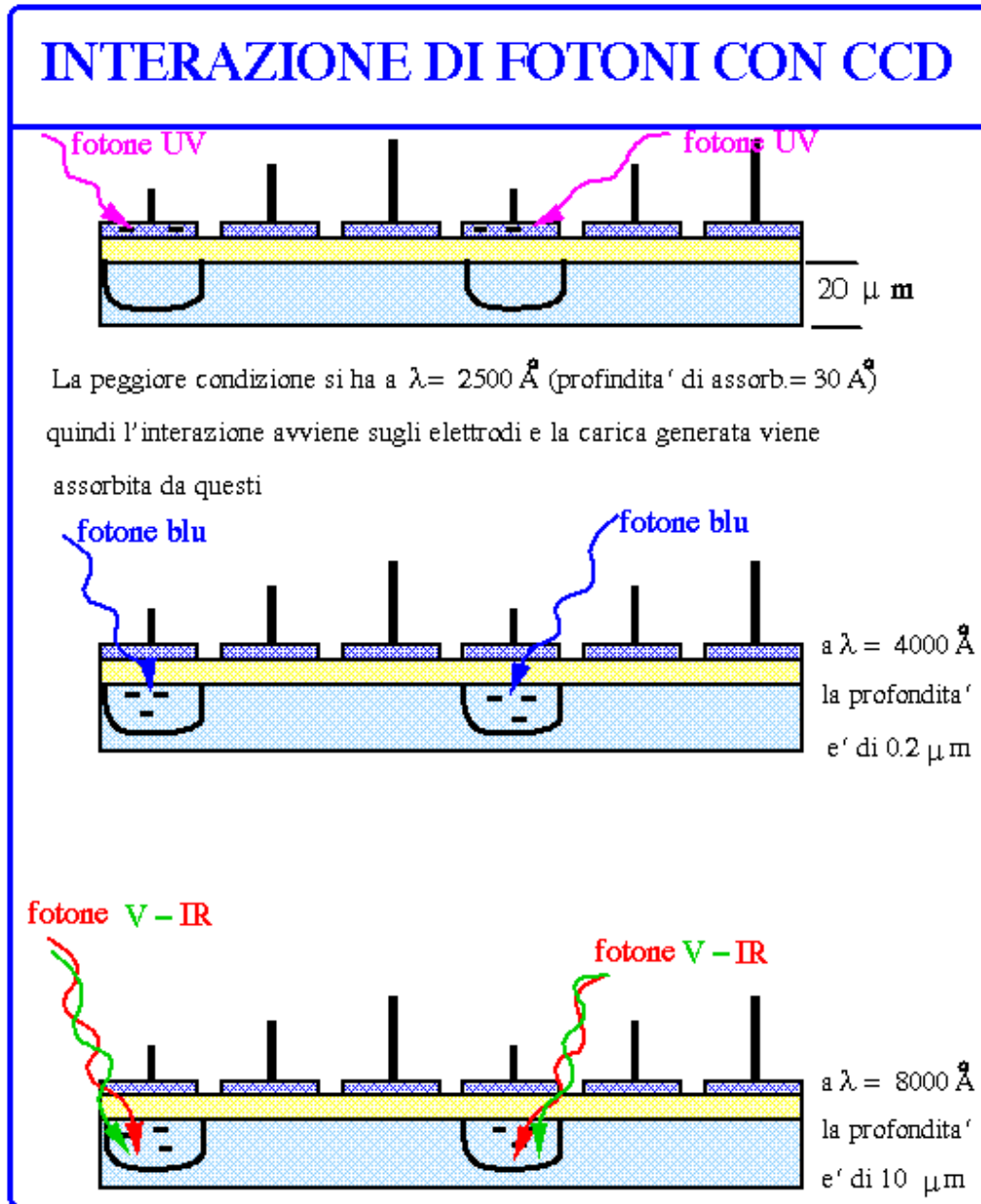


Come si vede dalla figura, a 2500 Å la profondità di assorbimento è circa 30 Å, e ciò significa che l'interazione della radiazione a questa lunghezza d'onda avviene nei primi strati del materiale.

Dopo i 10000 Å invece il CCD, che ha uno spessore (quello utile per l'effetto fotoelettrico) di circa 15 - 20 μm, diventa "trasparente".

## 4.6. Schematizzazione dell'interazione dei fotoni con un CCD

In questa figura vengono rappresentati i casi di interazione dei fotoni UV, Visibili e NIR con un CCD "front-illuminated". La carica che si forma per effetto fotoelettrico deve poter essere raccolta dall'elettrodo, e quindi un fotone UV che rilascia la sua energia ad una profondità di 30 Å, genera la carica proprio sull'elettrodo.

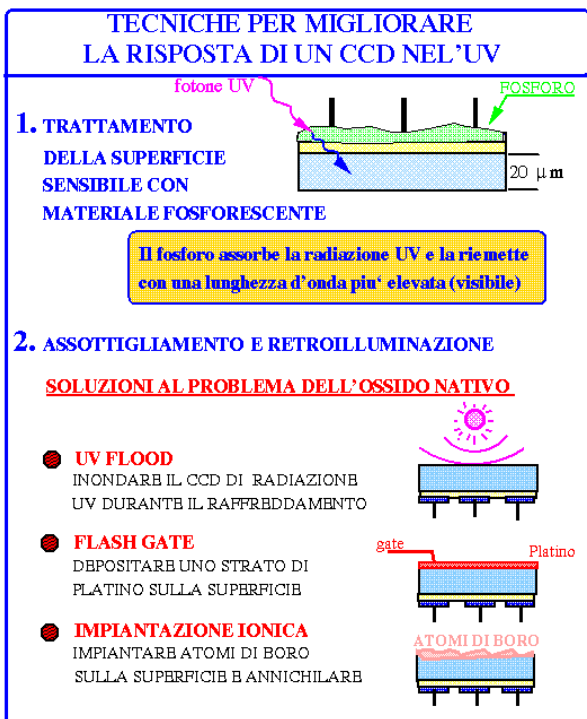


In questo caso, la carica viene persa perché entra nel circuito come corrente. Per un fotone blu la profondità è di  $0.2 \text{ \mu m}$ , e quindi tale fotone può generare la coppia  $e^-$  lacuna proprio sotto l'elettrodo. Per un fotone rosso o del vicino-Infrarosso, invece, la profondità di assorbimento è tale da generare la carica in una zona utile per poter essere raccolta.

## 4.7. Tecniche per il miglioramento della risposta nell'UV

Esistono essenzialmente due tecniche per migliorare la risposta del CCD nell'UV:

1. **Trattare la superficie sensibile con materiale fosforescente** che opera un cosiddetto “*shift*” di frequenza, cioè trasforma la radiazione ultravioletta in radiazione visibile (4500 - 5200 Å). In tal modo i fotoni trasformati in visibili possono raggiungere la zona utile affinché la carica generata possa essere raccolta dall'elettrodo. Tale tecnica non offre una elevata efficienza quantica ed ha lo svantaggio che a 70 °C la sostanza fosforescente evapora sotto vuoto (queste possono essere, ad esempio, le condizioni nelle applicazioni spaziali).
2. **Assottigliare il CCD e illuminarlo da dietro.** In tal modo si elimina l'effetto di assorbimento da parte degli elettrodi. Durante il processo di assottigliamento sulla superficie sensibile si viene a creare un ossido (detto *nativo*) che forma una *trappola* per le cariche fotogenerate nella zona vicina alla superficie sensibile (e i fotoni UV vanno a finire proprio in questa zona). Esistono tre tecniche che tentano di compensare tale trappola:



a) L'“*UV Flood*”, che consiste nell'irradiare il CCD con una sorgente UV e raffreddarlo durante l'inondazione. Se il CCD non viene più riscaldato, questa inondazione di radiazione UV fa sì che in parte la *trappola* venga colmata e il CCD diventi sensibile nell'UV;

b) la tecnica che è conosciuta col nome di “*Flash Gate*” consiste nel depositare sotto vuoto uno strato di metallo sulla superficie sensibile: in tal modo si può controllare il potenziale di tale superficie e quindi si può compensare la *trappola* naturale per le cariche.

Purtroppo però questa tecnica presenta un problema: il CCD viene fatto funzionare sotto vuoto, e se si raffredda e si riscalda tale deposito può deteriorarsi;

c) l'“*Impiantazione Ionica*” è una tecnica che realizza la stessa compensazione operata dalle tecniche precedenti ma con una maggiore stabilità, cioè senza degradare nel tempo le prestazioni raggiunte. Tale tecnica consiste nell'impiantare atomi di *Boro* nel reticolo del *Silicio*, e dopo operare un annichilimento per ottimizzare l'uniformità della risposta su tutto il chip.

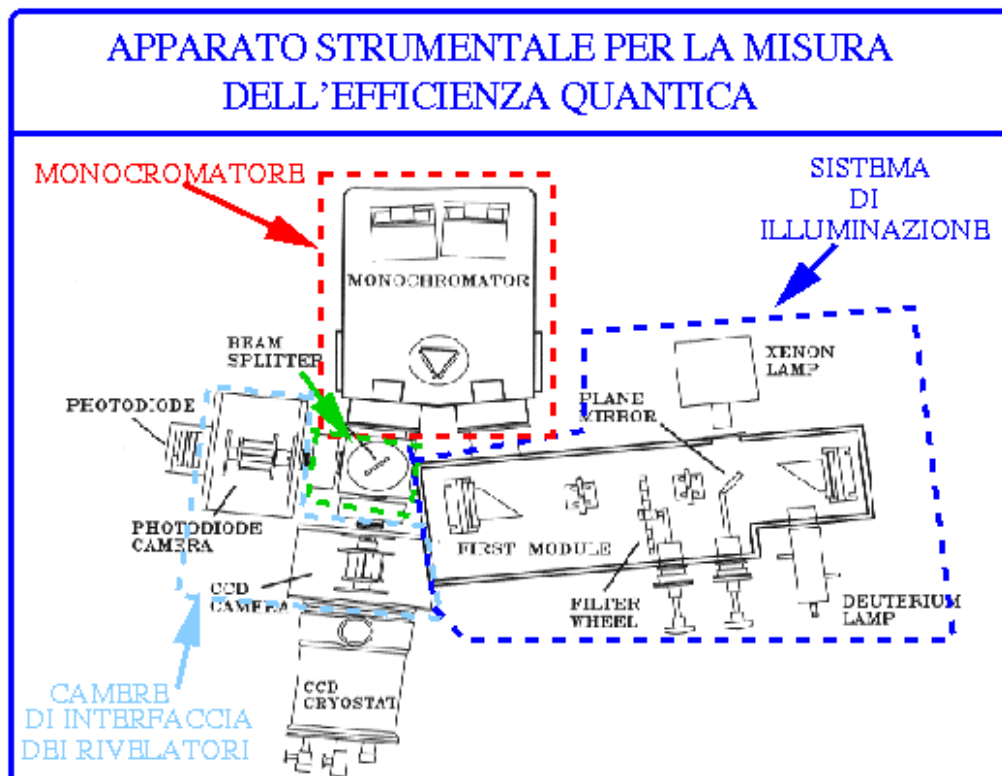


## 4.8. Apparato per la misura di efficienza quantica

Come si può misurare l'efficienza quantica di un CCD?

La procedura più semplice consiste nell'utilizzare un monocromatore, per selezionare una determinata lunghezza d'onda dello spettro che emette la sorgente, e poi tramite un rivelatore calibrato di riferimento si misura il numero di fotoni che ci sono all'uscita del monocromatore. Successivamente, all'uscita del monocromatore si mette il CCD e si misurano i fotoelettroni prodotti in ciascun pixel. Dal rapporto di queste due misure si ricava l'efficienza quantica.

Tale procedura, però, potrebbe essere affetta da errori dovuti a instabilità della sorgente. Per ottenere delle misure più accurate si fa uso di un deviatore di fascio detto "Beam Splitter", che divide il flusso di uscita del monocromatore in due parti: una diretta verso il rivelatore calibrato e una diretta verso il CCD. Tale tecnica consente di fare misure contemporanee, e quindi risolve l'inconveniente detto prima. Lo schema mostrato in questa figura usa quest'ultima tecnica.



Tale apparato è stato realizzato per la misura di efficienza quantica anche a lunghezze d'onda del UV da vuoto (VUV).

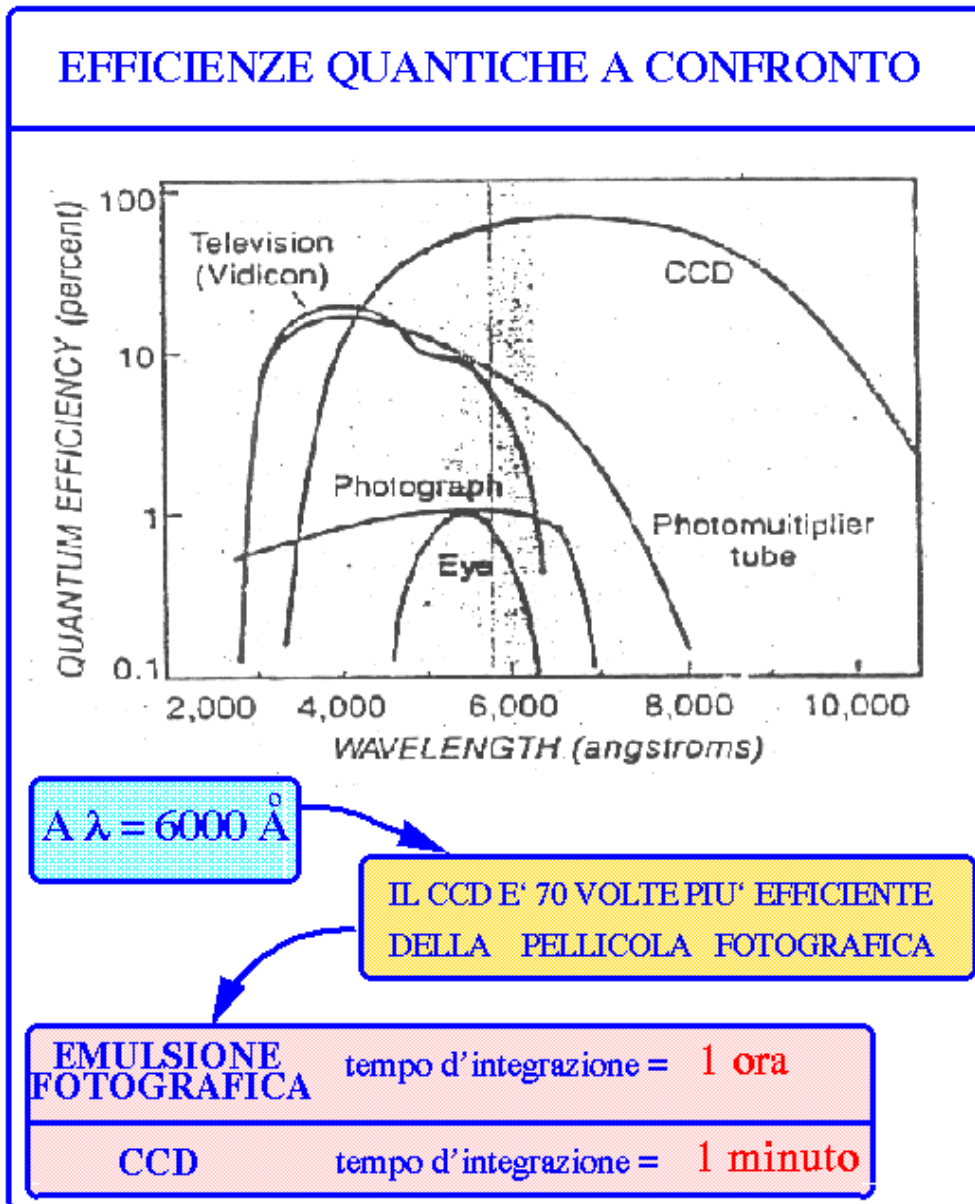
Si possono individuare quattro grandi parti:

1. sistema di illuminazione del monocromatore
2. Il monocromatore
3. Il "Beam Splitter"
4. Le camere di interfaccia con i rivelatori

## 4.9. Efficienza quantica del CCD comparata con altri rivelatori

Qui vengono messe a confronto le efficienze quantiche di un CCD assottigliato e retro-illuminato (non trattato per l'estensione nell'UV) e di vari altri rivelatori, compresi l'occhio e l'emulsione fotografica.

Se consideriamo che i CCD con risposta estesa nell'UV raggiungono efficienze quantiche superiori al 30%, si può dire che dal punto di vista dell'efficienza quantica, questo sensore è il migliore rispetto a tutti gli altri.



Se paragoniamo poi il CCD con l'emulsione fotografica, risulta immediato che a 6000 Å il CCD è **70 volte più efficiente della pellicola fotografica**, ovvero, a parità di condizioni, se per una sorgente debole con la lastra fotografica si deve integrare per **1 ora**, con il CCD basta meno di **1 minuto**.

## 4.10. Rumore, sensibilità e dinamica

Il rumore di un rivelatore è il responsabile della soglia inferiore della cosiddetta rivelabilità. Per poter osservare segnali molto deboli occorre che questo rumore sia il più basso possibile. Al limite, se il rivelatore non introducesse nessun rumore, l'unico a restare sarebbe quello della sorgente stessa ( $R_{\text{SHOT}} = \sqrt{N_{\text{fotoni}}}$ ).

In un CCD le cause di rumore sono essenzialmente due:

1. l'agitazione termica, che può essere ridotta drasticamente abbassando la temperatura di funzionamento;
2. l'estrazione della carica o il circuito d'uscita. Questo rumore dipende dalla capacità del nodo di uscita e non si può eliminare.

### RUMORE - SENSIBILITA' - DINAMICA

IN UN RIVELATORE, **IL RUMORE INTRINSECO** SI PUO' CONSIDERARE COME TUTTO CIO' CHE VIENE INTRODOTTO DALLO STESSO E CHE FALSA LA MISURA EFFETTIVA

**BASSO RUMORE INTRINSECO** → **SORGENTI DEBOLI**

PER POTER FARE ANALISI QUANTITATIVE SUL SEGNALE OCCORRE CHE QUESTO SUPERI ALMENO DI TRE VOLTE IL RUMORE

IL MINIMO VALORE DI SEGNALE MISURABILE VIENE DETTO **SENSIBILITA'** E SI PUO' CONSIDERARE DATO DAL RUMORE DEL RIVELATORE

IL RUMORE INTRINSECO DI UN CCD E' DOVUTO A DUE CAUSE:

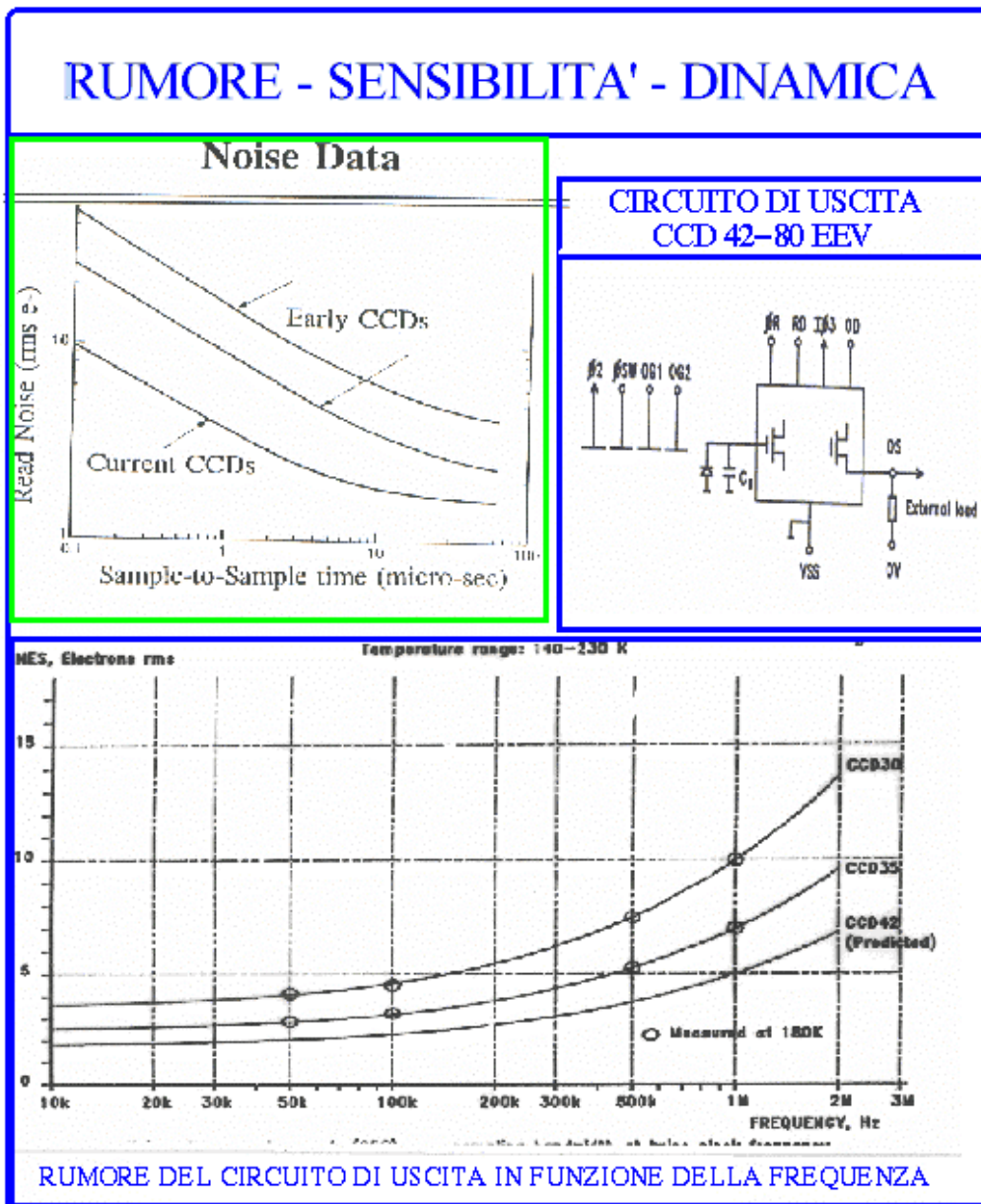
**1. AGITAZIONE TERMICA** ←

**2. LETTURA DELLA CARICA**

- Il rumore dovuto all'agitazione termica diventa trascurabile quando il CCD viene raffreddato a temperature al di sotto di  $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Il rumore di lettura dipende dal circuito di uscita ed e' ineliminabile

## 4.11. Il rumore di lettura dipende dalla frequenza con cui si estrae la carica

Il *rumore di lettura* dipende dal tempo che si impiega a leggere il singolo pixel. Si usano tecniche di processamento (o campionamento) del segnale per attenuare tale rumore che richiedono un certo tempo (alcuni  $\mu\text{s}$ ). In figura si vede come i recenti CCD letti con un tempo di campionamento di circa 10 - 20  $\mu\text{s}$  presentano un rumore di circa 2 - 5  $e^-$  r.m.s. Un ulteriore passo avanti in questa direzione si deve alla ditta inglese EEV, che ha sviluppato un nuovo tipo di circuito di uscita. Questo è basato essenzialmente sul concetto di avere un doppio stadio: il primo a bassissima capacità di nodo e il secondo che funge da "buffer", cioè da vero amplificatore. Come si vede dalla figura, con questo nuovo circuito si possono ottenere valori di rumore di lettura più bassi di 5  $e^-$  r.m.s. anche a frequenze di **500000 pixel/s**, mentre alle frequenze di scansione tipiche dei CCD scientifici (30000 - 50000 pixel/s) si possono avere 1 - 2  $e^-$  r.m.s.



## 4.12. Calcolo del range dinamico

La *dinamica* in un rivelatore di immagini è un parametro importante. Esso è espresso dal rapporto tra il massimo segnale rivelabile (saturazione) ed il minimo segnale (sensibilità). Nel caso di un CCD da 27 μm si ha una *dinamica* di 250000, se il rumore di lettura è di 3 e<sup>-</sup> r.m.s.

RUMORE - SENSIBILITA' - DINAMICA

---

LA DINAMICA E' IL RAPPORTO:

$$\text{DINAMICA} = \frac{\text{MAX SEGNALE MISURABILE}}{\text{MIN SEGNALE MISURABILE}}$$

MAX SEGNALE

CARICA DI SATURAZIONE

MIN SEGNALE

RUMORE DI LETTURA

DIMENSIONI DEL PIXEL

QUINDI :

$$\text{DINAMICA} = \frac{\text{CARICA DI SATURAZIONE}}{\text{RUMORE DI LETTURA}}$$

**ESEMPIO:**

Un CCD con pixel da 27 μm letto ad una frequenza di 50 Kpixel/s presenta un rumore di lettura di circa 3 e<sup>-</sup> r.m.s. , per cui la dinamica risulta essere 250000.

Con questo CCD si possono osservare sorgenti che differiscono tra loro di 250.000 volte (mentre una emulsione fotografica ha una dinamica di 100).

Nelle applicazioni astronomiche la dinamica e' particolarmente importante nelle osservazioni di galassie, dove la differenza di luminosita' tra il nucleo e le parti periferiche e' elevata.

La dinamica del CCD, paragonata a quella della pellicola fotografica che è di 100, risulta impressionante.

### 4.13. Efficienza di trasferimento (CTE)

La capacità di trasferire la carica da un pixel al successivo viene detta *efficienza di trasferimento*. Questa può diventare un parametro molto critico per CCD di grandi dimensioni, infatti per un CCD con  $2000 \times 2000$  pixel che avesse una efficienza di trasferimento tale da far perdere lo **0.01%** di carica tra un pixel ed il successivo, alla fine il pixel più distante dal circuito di uscita avrebbe lasciato il **40%** di segnale lungo i vari pixel.

## EFFICIENZA DI TRASFERIMENTO (CTE)

LA CTE ESPRIME L'ATTITUDINE A TRASFERIRE LA CARICA DA UN PIXEL AL SUCCESSIVO, FINO AL CIRCUITO DI USCITA

LA CTE VIENE ESPRESSA CON UN NUMERO COMPRESO TRA 0 E 1

NEI CCD A TRE FASI CON PIU' DI  $2000 \times 2000$  PIXEL, LA CTE DIVENTA UN PARAMETRO CRITICO. INFATTI, LA CARICA CHE SI TROVA NEL PIXEL IN ALTO A DESTRA DEVE SUBIRE 12000 TRASFERIMENTI PRIMA DI ESSERE LETTA



Se i trasferimenti fossero solo  $2000 + 2000$ , e ad ogni trasferimento la carica persa fosse dello **0.01%**, alla fine, si avrebbe una perdita del **40%**.

UN CCD A TRE FASI CON  $2048 \times 2048$  PIXEL E UNA CTE DI **0.999996** DOPO **2048** TRASFERIMENTI AVREBBE UNA EFFICIENZA DI:

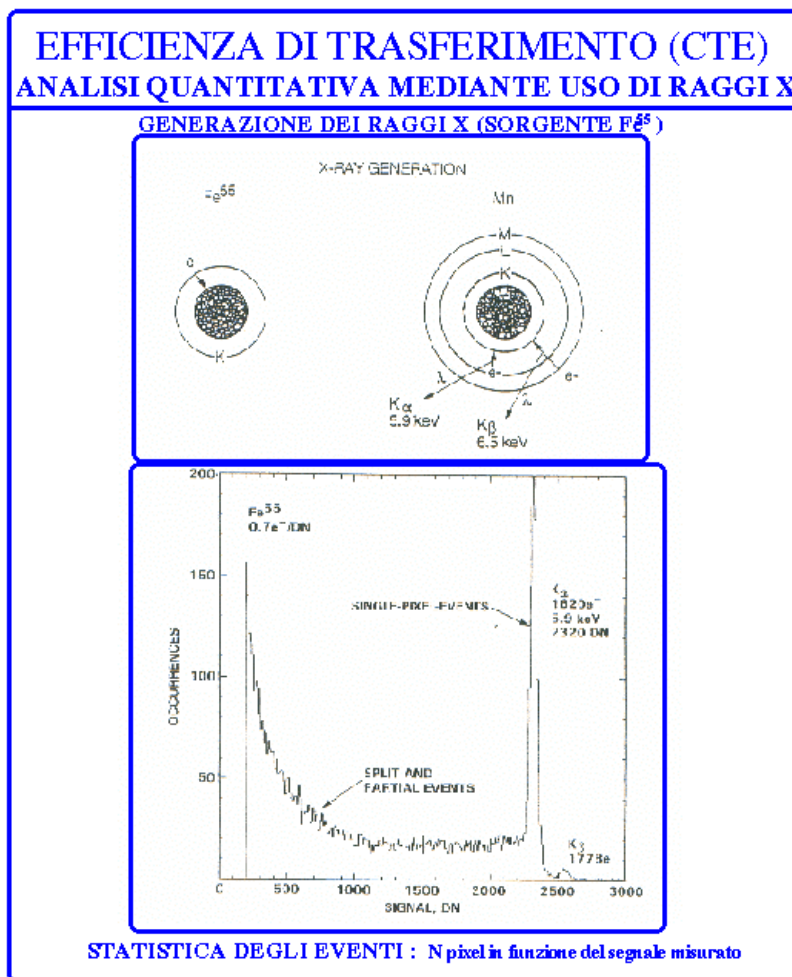
$0.999996^{(2048 \times 2048)} = 97.5 \%$

OVVERO SOLO IL **2.5%** DELLA CARICA SAREBBE PERSO

Nella pratica i CCD vengono realizzati con efficienze di trasferimento tali che per più di 2000 trasferimenti si perde solo lo **0.25%** di carica, come è dimostrato nel calcolo in fondo alla figura.

## 4.14. Misure di CTE mediante sorgenti a raggi X

Per misurare la carica di trasferimento in modo assoluto, esiste una tecnica detta di “*stimolazione con raggi X*”. Nella parte superiore della figura è mostrato come vengono originati i raggi X  $K_{\alpha}$  (5.9 KeV) e  $K_{\beta}$  (6.5 KeV) da una sorgente radioattiva  $Fe^{55}$ . L'atomo  $Fe^{55}$  si trasforma in atomo di Manganese quando il nucleo assorbe un elettrone dal **guscio K**. Successivamente si producono raggi X di tipo  $K_{\alpha}$  se l'elettrone del **guscio L** va al **guscio K**, oppure si producono raggi X di tipo  $K_{\beta}$  se è l'elettrone del **guscio M** che va ad occupare il **guscio** inferiore **K**. I raggi X  $K_{\alpha}$  sono più numerosi dei  $K_{\beta}$  (circa 10 a 1). Nella parte bassa della figura si può vedere l'effetto di tale radiazione su un CCD. Il grafico mostra il numero di volte (che equivale al numero di pixel) che si ripete il valore del segnale corrispondente alla carica generata dal fotone X. Come si vede, le volte che si ripetono i valori 1620  $e^{-}$  ( $K_{\alpha}$ ) e 1778  $e^{-}$  ( $K_{\beta}$ ) sono in accordo con quanto ci si aspetta.



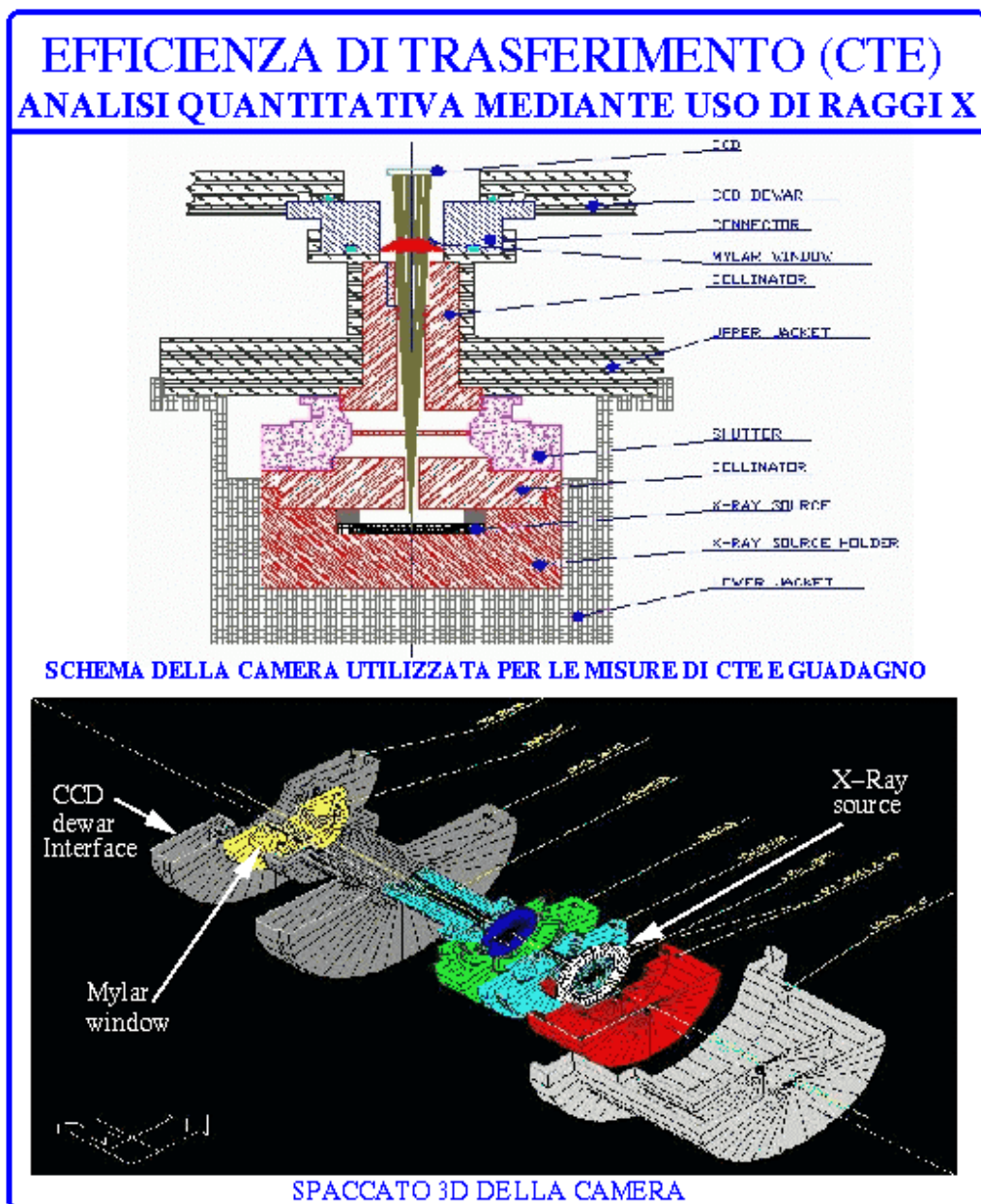
Se le “righe”  $K_{\alpha}$  e  $K_{\beta}$  si allargano troppo, vuol dire che la carica si è persa durante il trasferimento, e questo è indice di scarsa efficienza di trasferimento. Nel grafico è presente il contributo degli eventi “split” (dovuti alla carica che si può dividere una volta formata nel substrato) e “parziali” (dovuti al fatto che molti elettroni possono diffondere nel substrato e ricombinarsi con le lacune presenti).

In ogni caso, tale tecnica permette un’*analisi quantitativa* grazie al fatto che i raggi X  $K_{\alpha}$  producono una carica precisa: esattamente 1620  $e^{-}$ . Se parte di questa carica non viene trasferita, allora si può valutare l’inefficienza di trasferimento dal rapporto tra il numero di elettroni misurati e quello che ci si aspetta. Inoltre, grazie al fatto che si conosce esattamente la carica prodotta dagli X, tale tecnica viene utilizzata per misurare con estrema precisione il guadagno  $G [e^{-}/DN]$  del sistema completo (CCD + controller elettronico). Del guadagno  $G$  si discuterà più in dettaglio in seguito.

## 4.15. Apparato sperimentale per la misura di CTE

Si possono usare vari metodi per fare arrivare fotoni X sul CCD senza danneggiare la sorgente X venga. Infatti, poiché il CCD viene alloggiato in un criostato sotto vuoto (vedremo più in là il motivo), non è possibile mettere sotto vuoto anche la sorgente. D'altra parte, una normale finestra di quarzo, anche di piccolo spessore, bloccherebbe completamente i fotoni X. Allora si usano finestre di Berillio oppure altri materiali che riescano ad assicurare la tenuta del vuoto facendo passare i fotoni X.

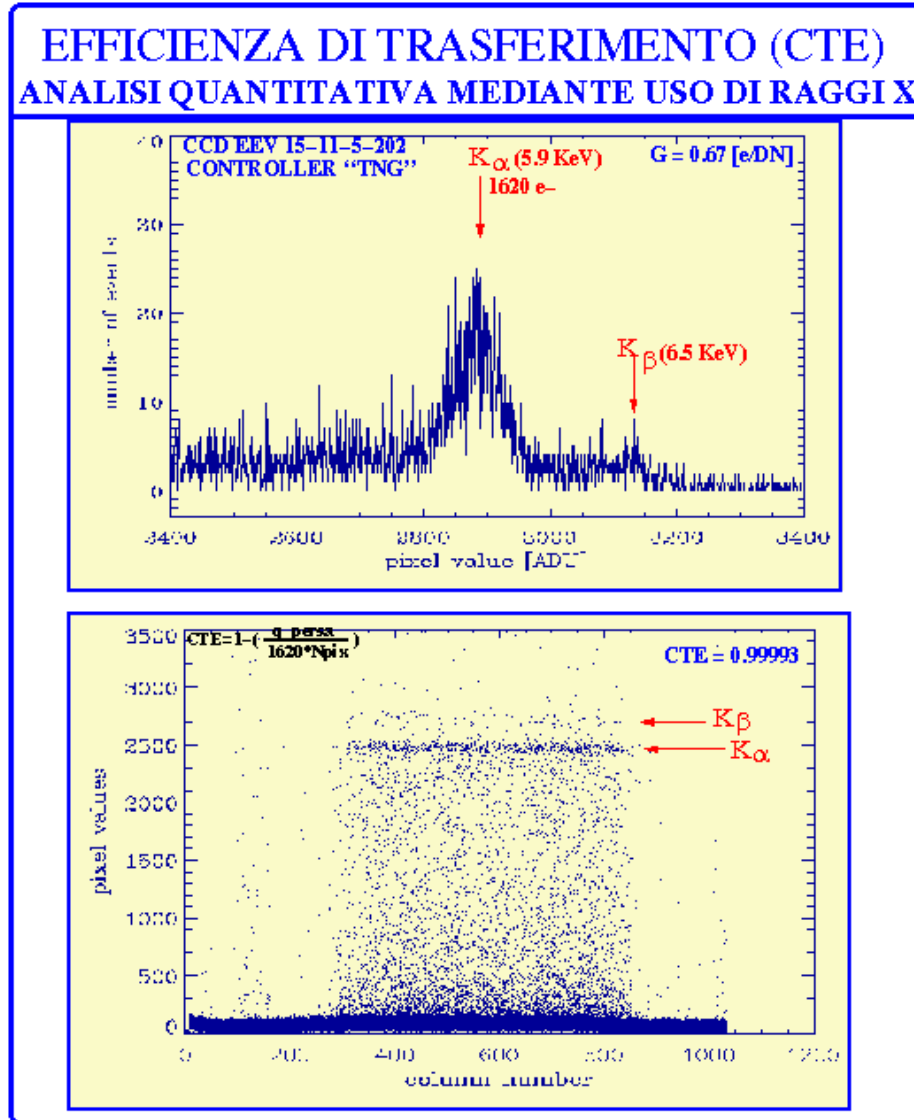
In questa figura viene mostrato un apparato realizzato per la misura di CTE e di G. Questa camera fa uso di una sorgente  $Fe^{55}$  e viene interfacciata direttamente alla flangia del criostato che contiene il CCD. Per separare l'ambiente del criostato (sotto vuoto) e l'ambiente della camera viene usato un sottilissimo foglio di Mylar (spessore  $6\ \mu m$ ) per consentire un certo flusso di fotoni X.





## 4.16. Alcuni risultati

Questa figura mostra alcuni risultati ottenuti presso il laboratorio dell'Osservatorio Astrofisico di Catania su un CCD della EEV, utilizzando l'apparato descritto nella figura precedente.



Nel grafico in alto è riportata la statistica degli eventi, che mostra in modo evidente sia la  $K_{\alpha}$  che la  $K_{\beta}$ .

Come si vede, la  $K_{\alpha}$  è in corrispondenza del valore 2890 DN (numeri del convertitore). A questo numero bisogna sottrarre il valore di fondo, che corrisponde a 450 DN, e quindi alla  $K_{\alpha}$  corrispondono 2440 DN; poiché, come abbiamo detto prima, gli elettroni prodotti devono essere 1620, si ha un  $G = 1620/2440 = 0.67$ .

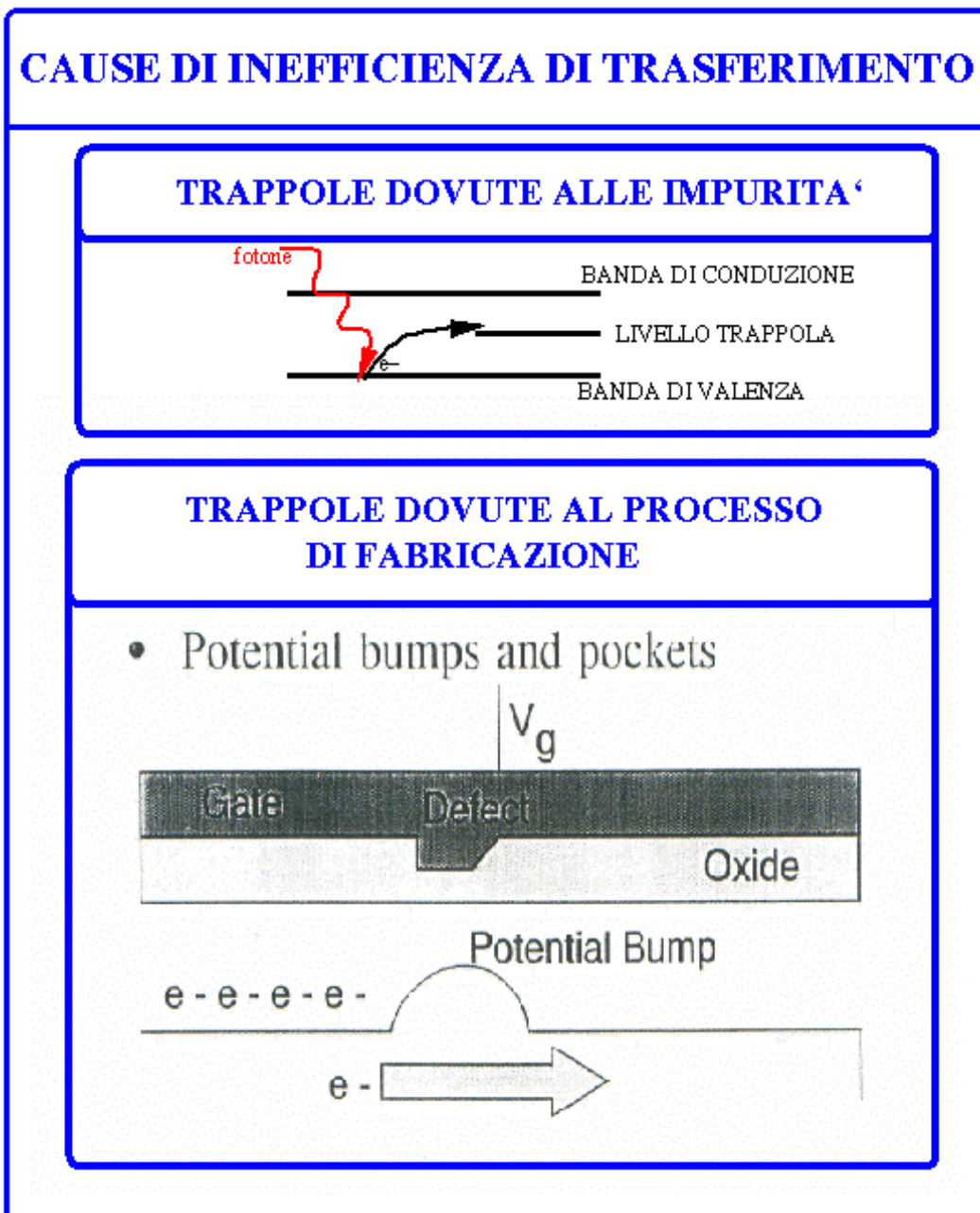
Nel grafico in basso viene riportata la statistica dei valori di DN trovati in corrispondenza dei pixel che ci sono in ciascuna riga. Anche in questo caso sono evidenti le due righe  $K_{\alpha}$  e  $K_{\beta}$ . Dalla valutazione della pendenza della linea corrispondente alla  $K_{\alpha}$  si ricava il numero di elettroni (in questo caso circa 105  $e^{-}$ ) che si sono persi, e a questo punto il calcolo della CTE è presto fatto:

$$CTE = 1 - (q_{persa}/1620 * N_{pix}) = 0.99993$$

## 4.17. Trappole dovute al processo di fabbricazione

Nel processo di fabbricazione dei CCD si possono formare certi *difetti* nella struttura. Questi *difetti* sono le cause di “**intrappolamenti**” delle cariche, cioè si vengono a formare delle *trappole* per le cariche. Quando un elettrone incontra una trappola, vi rimane per un certo tempo e successivamente viene rilasciato. In questa figura sono riportati i due tipi di difetti che si possono avere:

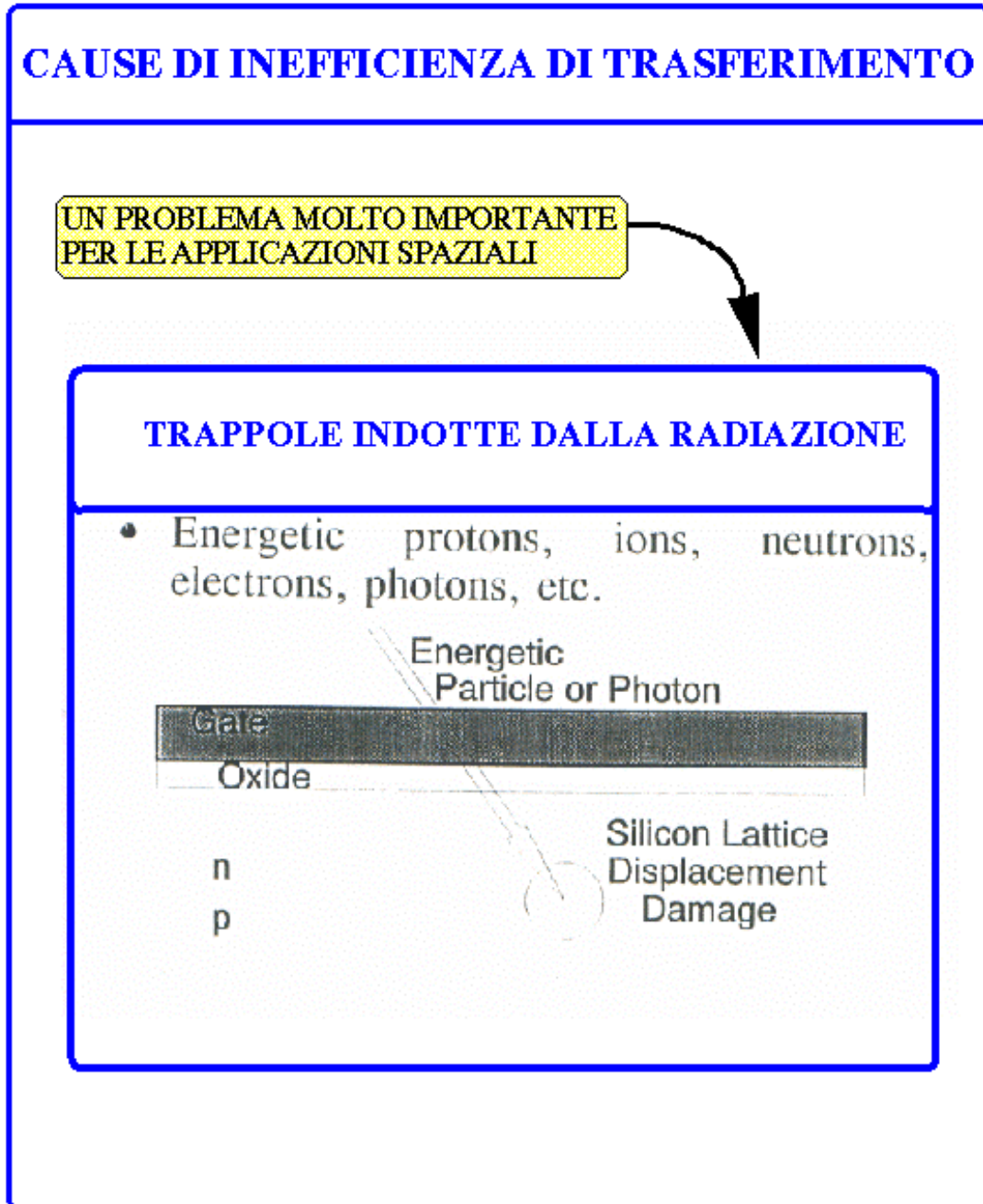
- uno dovuto al materiale (si vengono a formare dei “*livelli trappola*” dove gli elettroni possono saltare, non arrivando così alla banda di conduzione);
- l'altro dovuto a difetti nella realizzazione dell'elettrodo. In questo caso si vengono a formare delle piccole *barriere di potenziale* che impediscono alle cariche di fluire facilmente.



## 4.18. Trappole indotte da radiazioni ad alta energia

Il caso delle **trappole indotte dalla radiazione** (costituita da *protoni, elettroni, neutroni e ioni*) appartiene alla tipologia delle trappole dovute al materiale. Infatti le particelle energetiche interagiscono con gli atomi di Silicio provocandone uno spostamento e quindi generando dei "livelli trappola".

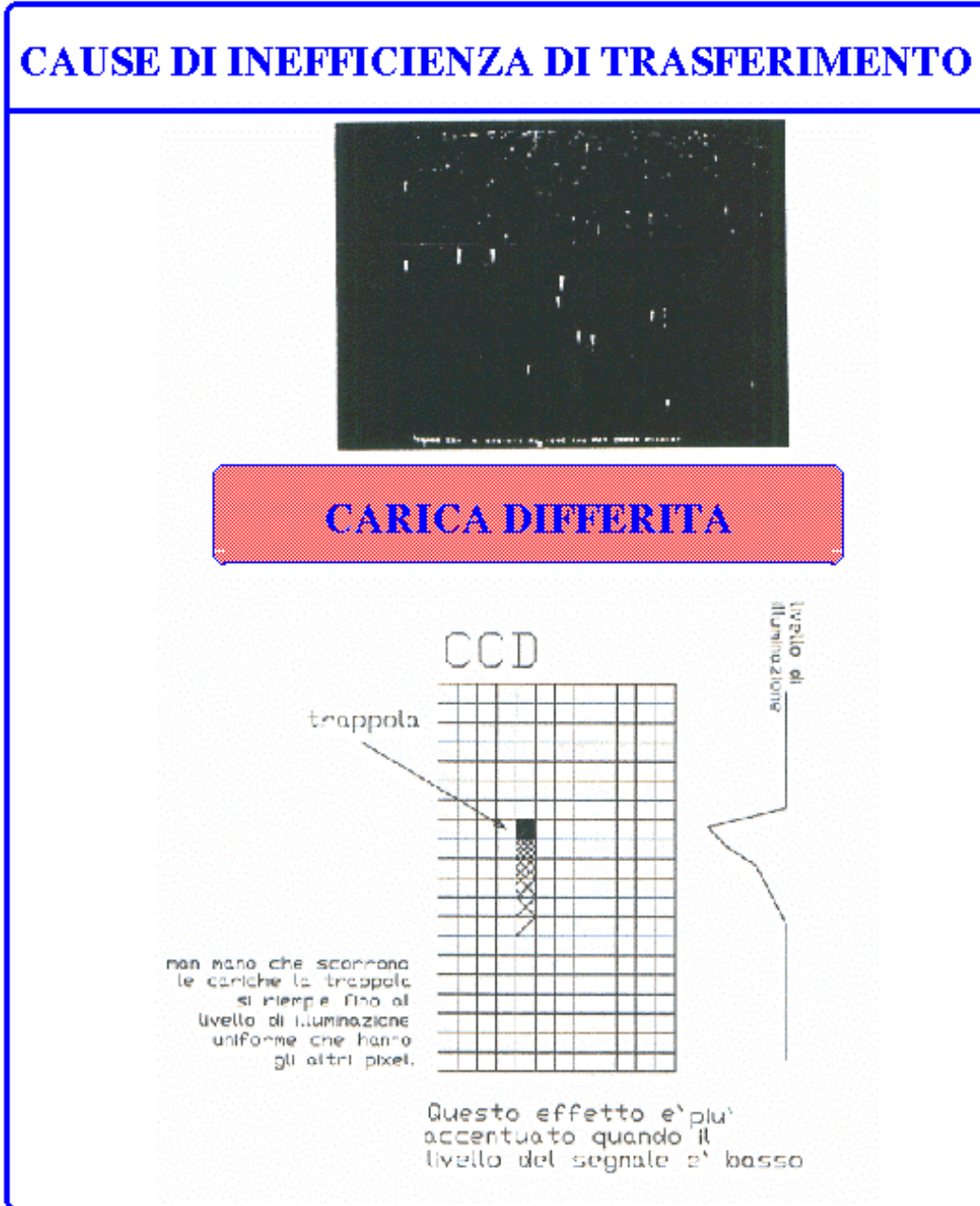
Questo tipo di trappola assume grande importanza nelle applicazioni spaziali.



## 4.19. Carica differita

Durante il trasferimento, la carica può essere intrappolata in un pixel per poi essere rilasciata successivamente. Questo fenomeno viene chiamato “carica differita”.

La figura mostra l'effetto della *carica differita* su un CCD.



Tale fenomeno è mostrato in dettaglio nella parte inferiore della figura: man mano che scorrono le cariche dei pixel precedenti, la trappola si riempie e successivamente scompare l'effetto di intrappolamento. Quando il livello di illuminazione è sufficientemente elevato, questo effetto non è riscontrabile perché si producono molte cariche e le trappole vengono tutte riempite. Una possibile correzione di questo difetto consiste nell'illuminare con un livello di luce tale da riempire le trappole (“PRE-FLASH”) prima di esporre il CCD. Ma questo peggiora ulteriormente il rapporto segnale-rumore, poiché si aggiunge anche il rumore di “shot” del pre-flash.

## 4.20. Uniformità ed “image processing”

L'uniformità di un CCD è la capacità che ha ciascun pixel di rispondere allo stesso modo se viene illuminato uniformemente. Essenzialmente esistono due tipi di cause che determinano la non uniformità dei pixel:

- a) l'imprecisione nel realizzare tutti i pixel uguali;
- b) la variazione dello spessore prodotta dalle varie tecniche di assottigliamento.

Per quanto detto in precedenza, si capisce che questa non uniformità dipende dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente. Ad esempio, per radiazione monocromatica, a  $\lambda = 8000 \text{ \AA}$  ( $0.8 \text{ \mu m}$ ) se il substrato ha dei difetti dello stesso ordine di grandezza, si formano delle frange di interferenza.

### UNIFORMITA'

L'UNIFORMITA' DI UN CCD SI PUO' DEFINIRE COME LA CAPACITA' CHE HA CIASCUN PIXEL DI RISPONDERE ALLO STESSO MODO QUANDO VIENE ILLUMINATO UNIFORMEMENTE. OVVERO, CIASCUN PIXEL NON E' IN GRADO DI ACCUMULARE LA STESSA QUANTITA' DI CARICA DEI PIXEL ADIACENTI

Sono due le cause principali di disuniformita' della risposta del pixel:

- 1 . **Impossibilita' di realizzare con estrema precisione i pixel con la stessa dimensione**

- 2 . **Assottigliamento e trattamento della superficie sensibile che producono variazioni di spessori nei pixel**


In linea di principio i difetti di non-uniformita' possono essere eliminati **normalizzando** la sua risposta.

La tecnica viene detta **“correzione per Flat-Field”** e consiste nel dividere l'immagine di interesse con una dove il CCD viene illuminato uniformemente.

$$S_{\text{corr}} = \frac{S}{FF}$$

Esiste una tecnica, detta di “*Flat fielding*”, che rimuove la disuniformità; essa consiste in:

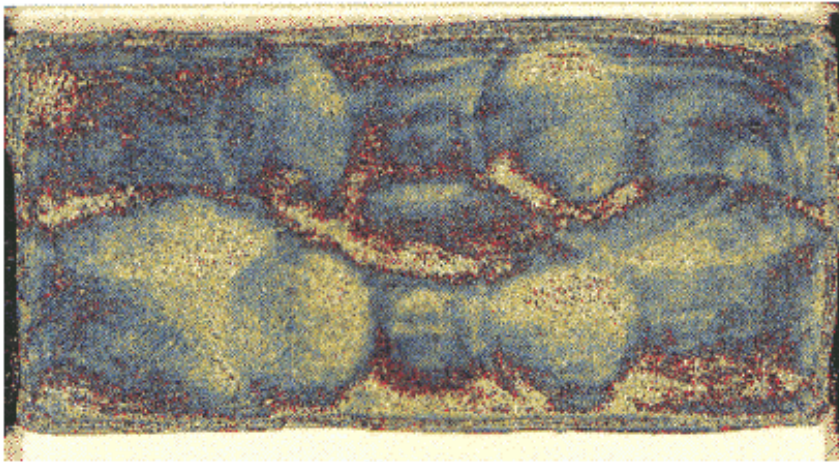
- i. illuminare uniformemente il CCD;
- ii. acquisire l'immagine di “*Flat field*”;
- iii. acquisire l'immagine dell'oggetto e dividere con l'immagine di “*Flat field*”.

## 4.21. Esempio: uniformità in un CCD assottigliato e retro-illuminato

Ecco cosa succede ad un chip che è stato assottigliato in modo non perfetto. L'assottigliamento è ottenuto usando un laser, ed in questa immagine sono visibili gli spot circolari dovuti al fascio laser. Tale immagine è stata ottenuta usando una lampada al tungsteno, un filtro centrato a  $\lambda = 4000 \text{ \AA}$  ed una sfera integratrice, come si può vedere nella parte bassa della figura.

### DISUNIFORMITA'

#### CCD ASSOTTIGLIATO IN MODO NON PERFETTO



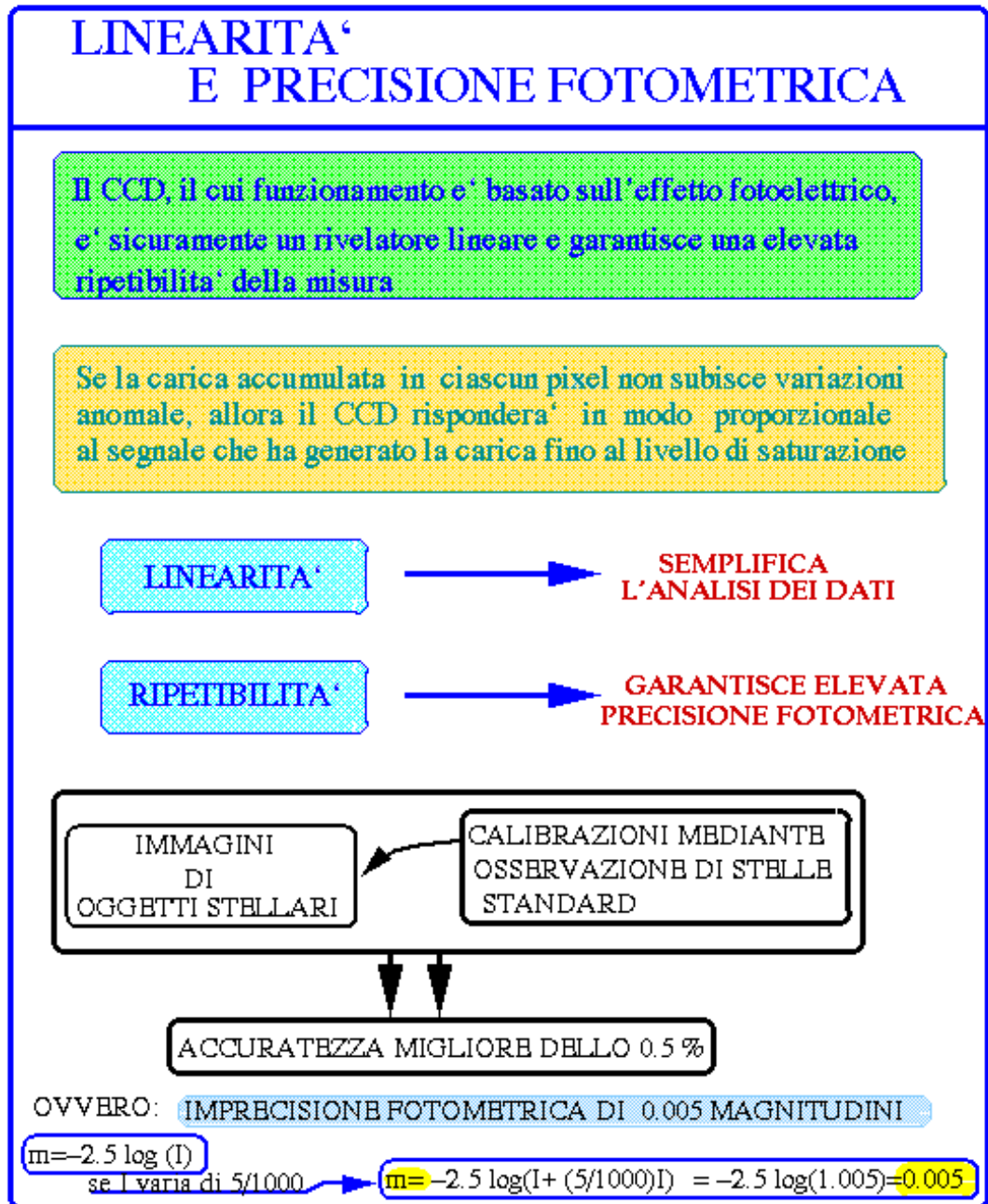
Si tratta di un CCD da 385 X 576 pixel assottigliato usando una tecnica che fa uso di un laser. L'illuminazione uniforme e' garantita dall'utilizzo di una sfera integratrice.



APPARATO  
PER LA MISURA  
DI UNIFORMITA'

## 4.22. Linearità ed accuratezza fotometrica

Anche il più sensibile dei rivelatori non potrebbe essere utilizzato per fare misure fotometriche se non avesse un'elevata accuratezza nel misurare la quantità di fotoni che lo colpisce. Questo richiede che il rivelatore sia dotato di elevata **ripetibilità**, oltre che di **linearità**.



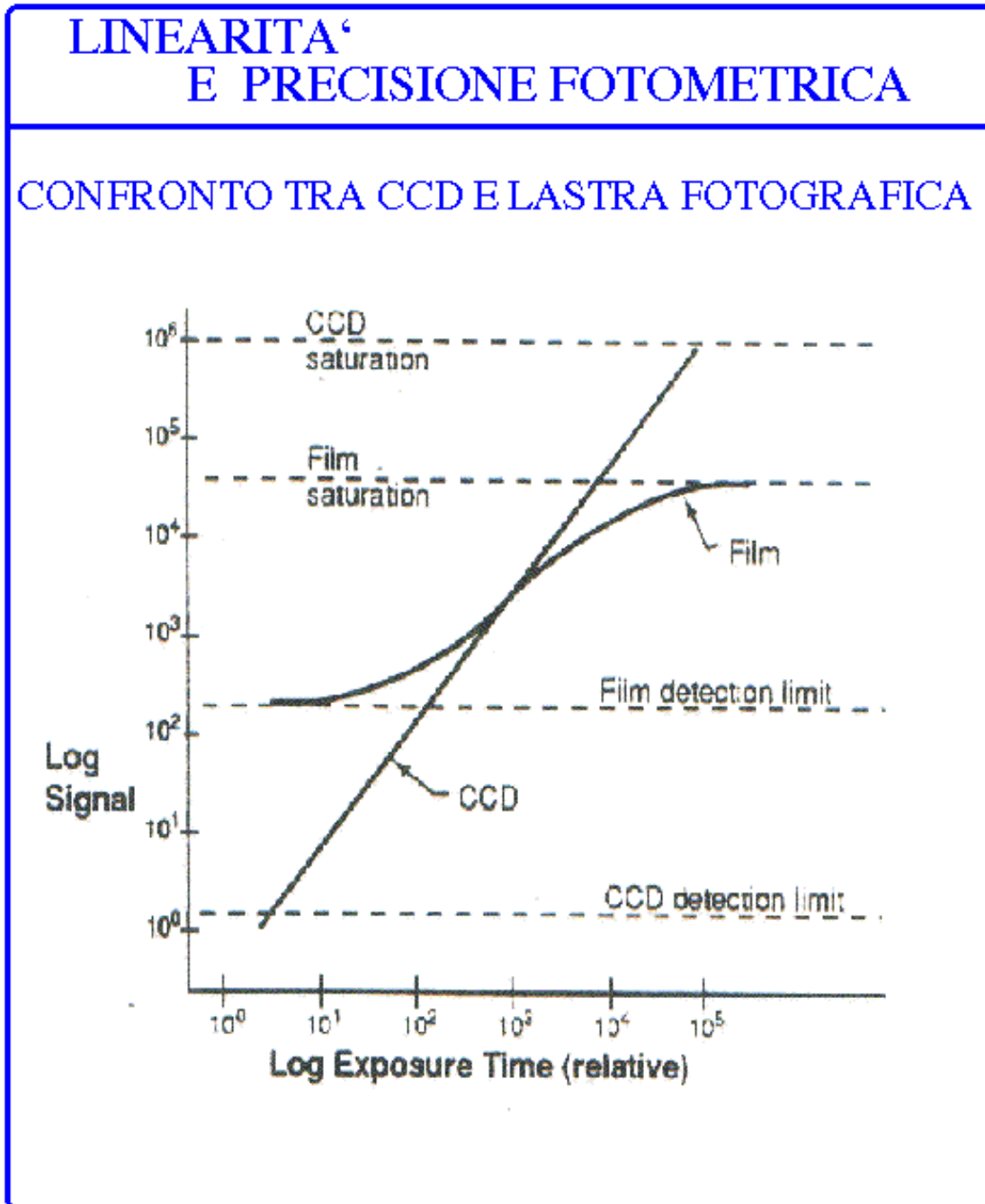
La *linearità* del CCD è automaticamente garantita dal fatto che il funzionamento del CCD è basato sull'*effetto fotoelettrico*.

La *stabilità* è invece garantita dal fatto che il CCD è un dispositivo a stato solido che intrinsecamente offre risposte *stabili e ripetibili* senza accorgimenti particolari.

Queste caratteristiche consentono accuratezze migliori dello 0.5% in misure fotometriche di oggetti stellari, che equivalgono ad accuratezze fotometriche di **0.005 magnitudini**.

## 4.23. Confronto con la pellicola fotografica

Questo grafico mostra un confronto il CCD e la pellicola fotografica dal punto di vista della *linearità*, del *range dinamico* ottenibile e del *limite di rivelabilità*.

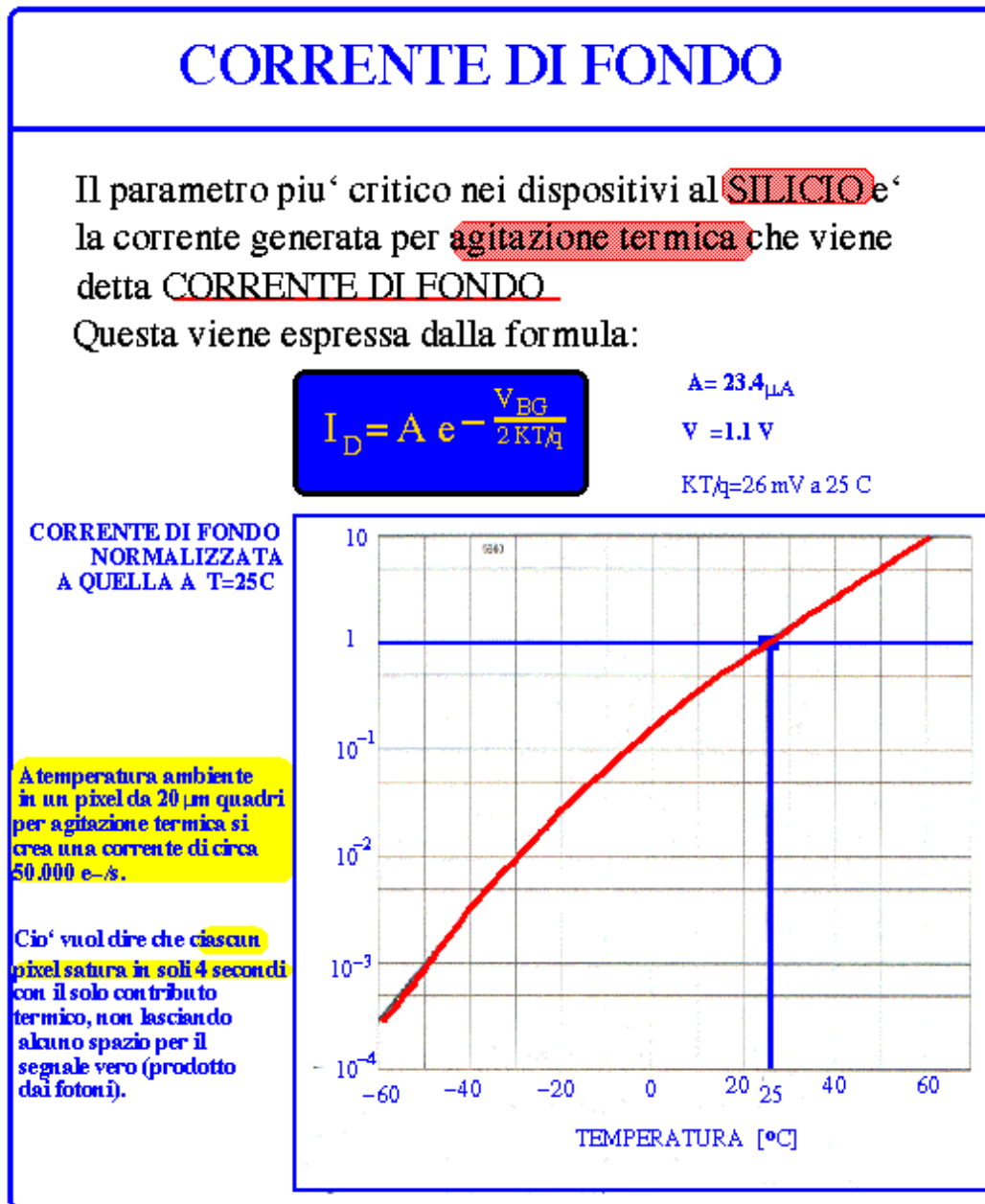


Come si vede, la lastra fotografica presenta non solo l'effetto della cosiddetta "reciprocità", e cioè che all'aumentare del tempo di esposizione non aumenta linearmente la risposta, ma anche un range dinamico ( *saturazione/limite minimo*) di circa 100, che paragonato a quello del CCD (in questo caso di circa 500000) fa risultare un evidente contrasto tra i due tipi di rivelatori.



## 4.24. Corrente di fondo

Qualsiasi dispositivo composto da *Silicio* soffre di un grande problema: l'**agitazione termica**. Infatti, data la bassa energia che separa la banda di conduzione da quella di valenza ( $E_{\text{gap}} = 1.1 \text{ eV}$ ), è facile che un elettrone salti nella banda di conduzione solo per effetto termico. Gli elettroni che vanno nella banda di conduzione costituiscono la cosiddetta *corrente di fondo*, che è dovuta all'agitazione termica ed esiste anche in assenza di segnale luminoso. Un CCD con pixel da  $20 \mu\text{m}$  alla temperatura di  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  può andare in saturazione dopo circa 4 secondi. La curva che esprime l'andamento della corrente di "fondo" o di "buio" è riportata in questa figura.



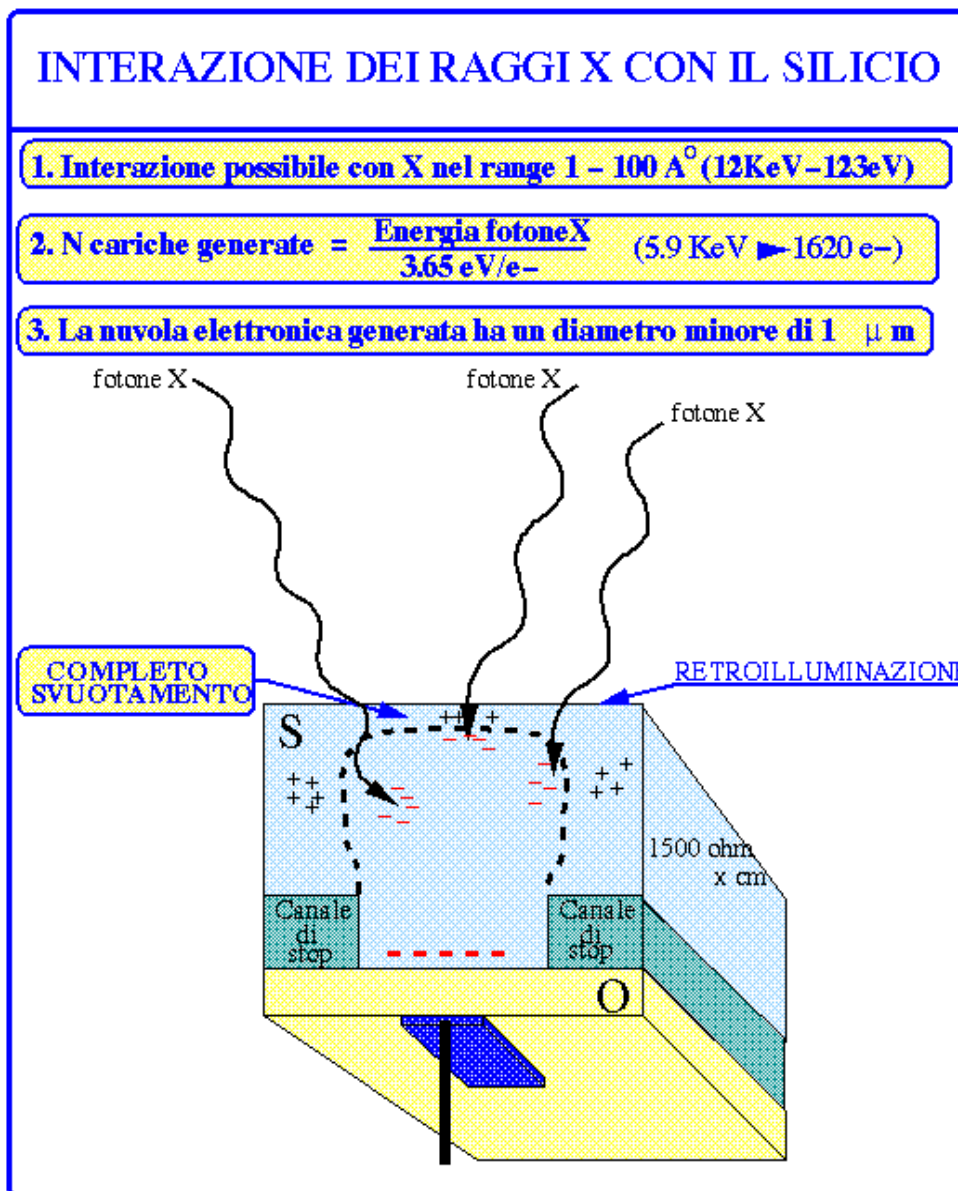
Nel *Silicio*, ad ogni diminuzione di  $7 \text{ }^\circ\text{C}$  si dimezza il valore della *corrente di buio*. A  $-130 \text{ }^\circ\text{C}$  la corrente di buio si riduce a circa 1  $\text{e}^-$  per ora per pixel. In questo modo si possono fare esposizioni su oggetti deboli anche per ore ed ore. La limitazione al tempo di esposizione non è imposta dal contributo della corrente di fondo, ma dall'effetto dei raggi cosmici.

## 4.25. CCD per la rivelazione dei raggi X

L'interazione dei raggi X con il Silicio può essere riassunta nei 3 punti riportati in questa figura:

1. l'interazione avviene con X molli (range 1 - 100 Å);
2. il numero di cariche che vengono generate segue la legge che per una energia di 3.65 eV viene generata una carica (fotoni con energia di 5.9 KeV (Fe<sup>55</sup>) producono 1620 e<sup>-</sup>);
3. la nuvola di elettroni generata ha un diametro minore di 1 μm.

Per avere il massimo dell'efficienza quantica nell'X, tali CCD devono essere retro-illuminati in modo da evitare gli effetti degli elettrodi, e devono essere realizzati con silicio (epitassiale) che abbia una resistività maggiore di 1500 Ω · cm, in modo che l'area sotto ciascun elettrodo sia completamente svuotata e quindi non presenti regioni libere in cui le cariche si possano ricombinare o disperdere in più di un pixel.



## **5. STATO DELL'ARTE**

- 5.1. Multi Pinned Phase (MPP) CCD
- 5.2. Confronto tra un CCD MPP ed uno normale
- 5.3. Open Electrode (OE) CCD o Open Phase CCD
- 5.4. Skipper CCD
- 5.5. Misure di rumore su un CCD Skipper sperimentale
- 5.6. Problemi della tecnica "Flash Gate"
- 5.7. Nuova tecnica per migliorare la risposta nell'UV: "Catalizzazione" mediante Ag o Cu

## 5.1. Multi Pinned Phase (MPP) CCD

Molte industrie elettroniche, sotto la richiesta incalzante della ricerca scientifica ed astronomica (comprese le missioni spaziali), si sono cimentate nella realizzazione di CCD con prestazioni sempre più elevate, sia per ciò che riguarda la qualità che per le dimensioni ed il modo di leggere i pixel. Come già detto nella parte introduttiva, la *SITe* (*Scientific Imaging Technology*, già Tektronix) ha sviluppato una tecnologia in grado di produrre CCD con un'area sensibile di  $2048 \times 4096$  pixel per la **ACS** per l'**Hubble Space Telescope (HST)**. La **LORAL** (già **FORD** ed **ex-RCA**) ha prodotto per diversi Osservatori Americani, come il **KPNO** o **NOAO**, e anche per il **TNG**, CCD con  $2048 \times 2048$  pixel, con ciascun pixel da  $15 \mu\text{m}^2$ . Inoltre, come è stato descritto in precedenza, i nuovi CCD per l'astronomia hanno anche l'importante caratteristica di poter essere messi vicini l'uno all'altro in modo da formare *mosaici*. Sono state sviluppate altre tecniche con lo scopo di migliorare altri parametri del CCD, per esempio la **corrente di buio**.

Il CCD chiamato **Multi Pinned Phase (MPP)**, con una particolare polarizzazione degli elettrodi e con una impiantazione di Boro sotto uno degli elettrodi che costituiscono il pixel, permette di ridurre la **corrente di buio** che si genera per agitazione termica. Quando tutti gli elettrodi delle fasi sono completamente in stato di inversione, cioè al livello negativo (es.  $-9$  V rispetto al substrato, o meglio si polarizza  $V_{ss} = +9$  V), la corrente di buio che si genera quasi tutta in superficie (sotto l'elettrodo) viene **controbilanciata** dalle lacune che fuoriescono dai canali di stop. Nella figura della pagina successiva vengono rappresentate le varie fasi per arrivare alla completa "inversione" della superficie, e il modo in cui vengono accumulate le cariche sotto gli elettrodi.

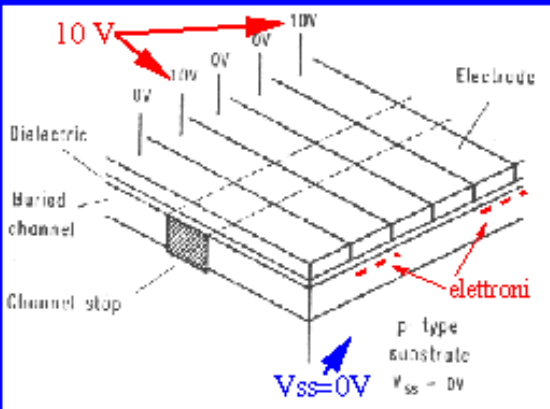
Occorre notare che il CCD è del tipo a "canale sommerso", tecnica usata per evitare lo scorrimento delle cariche in superficie, dato che quest'ultima è ricca di impurità che possono intrappolare le cariche e abbassare notevolmente l'efficienza di trasferimento. Tale tecnologia è ormai ampiamente consolidata e consiste nell'impiantare nel substrato drogato di tipo "p" un canale leggermente drogato di tipo "n", e nel far sì che le cariche si muovano al disotto di questo strato "n", in un cosiddetto "canale sommerso".

Per ottenere CCD MPP si possono individuare tre momenti fondamentali:

- si parte dalla situazione non MPP, ottenuta polarizzando a  $+10$  V l'elettrodo centrale (come descritto in precedenza), le cariche negative vanno nella buca di potenziale e le lacune si scaricano verso la  $V_{ss}$  che è a GND;
- alzando il potenziale di substrato ( $V_{ss} = +9$  V) o abbassando il potenziale degli elettrodi ( $-9$  V) non interessati all'accumulo, si ottiene uno stato detto di "inversione". In tale situazione le lacune dei "canali di stop" fluiscono in superficie e vanno a disporsi in corrispondenza degli elettrodi che sono a  $0$  V. Questa situazione, detta di "semi-inversione", permette di controbilanciare gli elettroni generati termicamente solo in due elettrodi;
- impiantando atomi di Boro sotto un elettrodo, viene compensato in parte il contributo del drogaggio "n" del canale sommerso. In questo modo si possono mettere a  $0$  Volt tutti e tre gli elettrodi, ottenendo la completa inversione della superficie, infatti si forma artificialmente una buca di potenziale sugli elettrodi adiacenti, e lì si può accumulare la carica fotogenerata. Con la completa inversione, il controbilanciamento in superficie raggiunge il suo massimo e quindi il contributo termico diminuisce notevolmente.

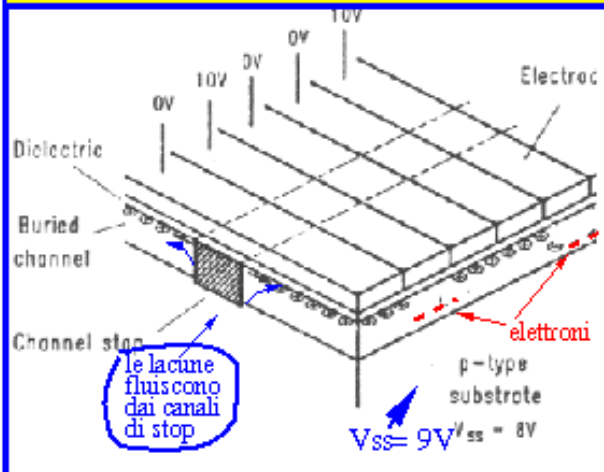
## CCD Multi Pinned Phase (MPP)

### STATO NORMALE



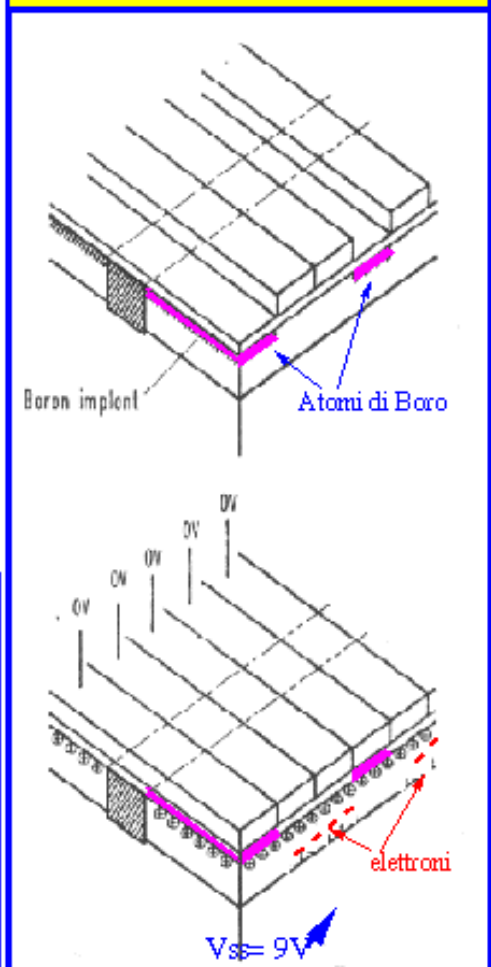
CCD a "CANALE SOMMERSO" nella fase normale di accumulo.

### STATO DI INVERSIONE PARZIALE



Se si alza il potenziale del substrato a 9 V, allora viene invertita la superficie in prossimità degli elettrodi a 0 V. Ovvero, il substrato diventa più positivo degli elettrodi e le lacune fluiscono dai canali di stop nella superficie

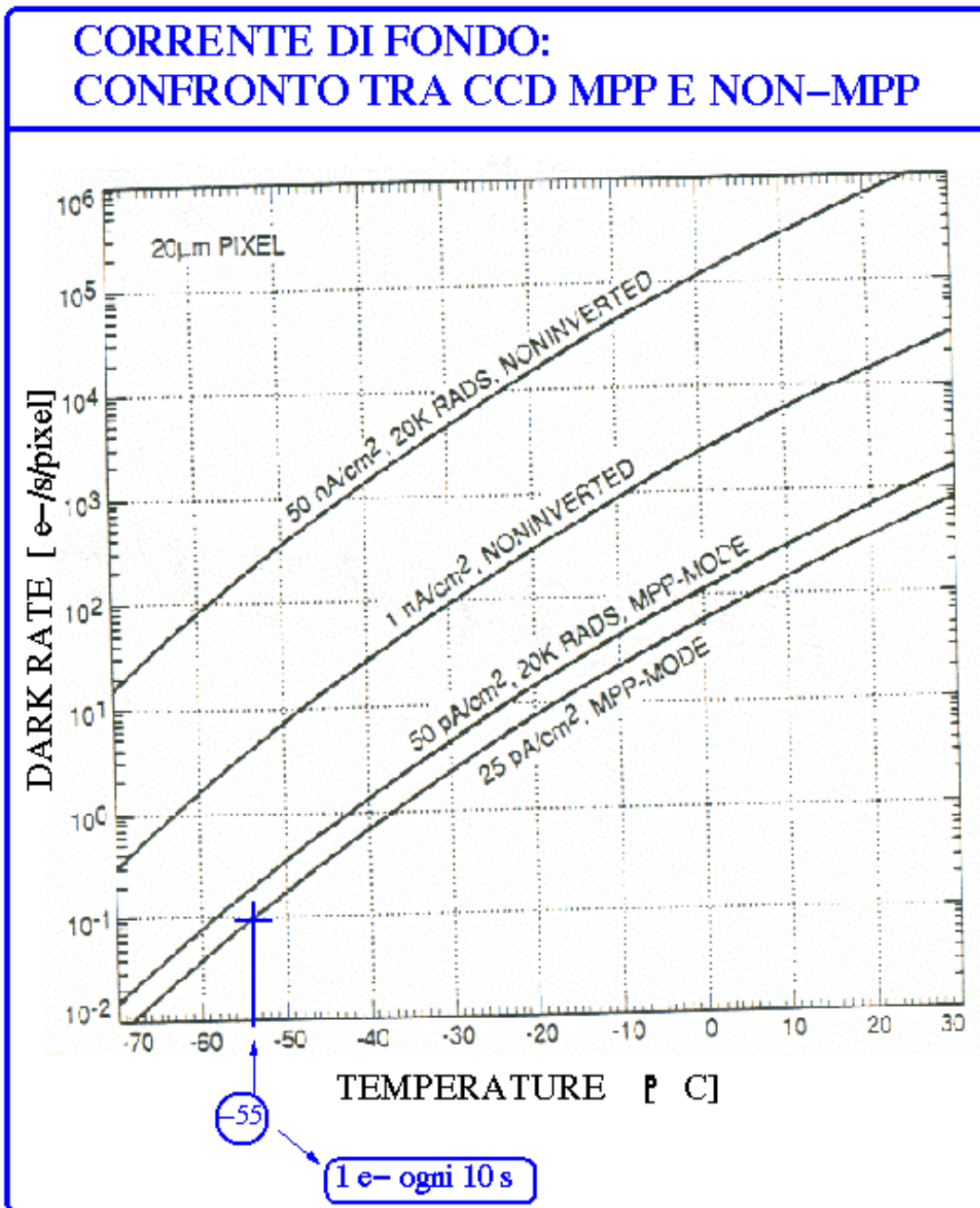
### STATO DI INVERSIONE TOTALE



Impiantando atomi di Boro sotto un elettrodo, si possono mettere tutti e tre gli elettrodi a 0V e ottenere la completa inversione. Le cariche si accumulano sotto gli elettrodi a 0V, infatti gli atomi di Boro annullando parte degli e- del canale sommerso, provocano una buca in corrispondenza degli elettrodi vicini

## 5.2. Confronto tra un CCD MPP ed uno normale

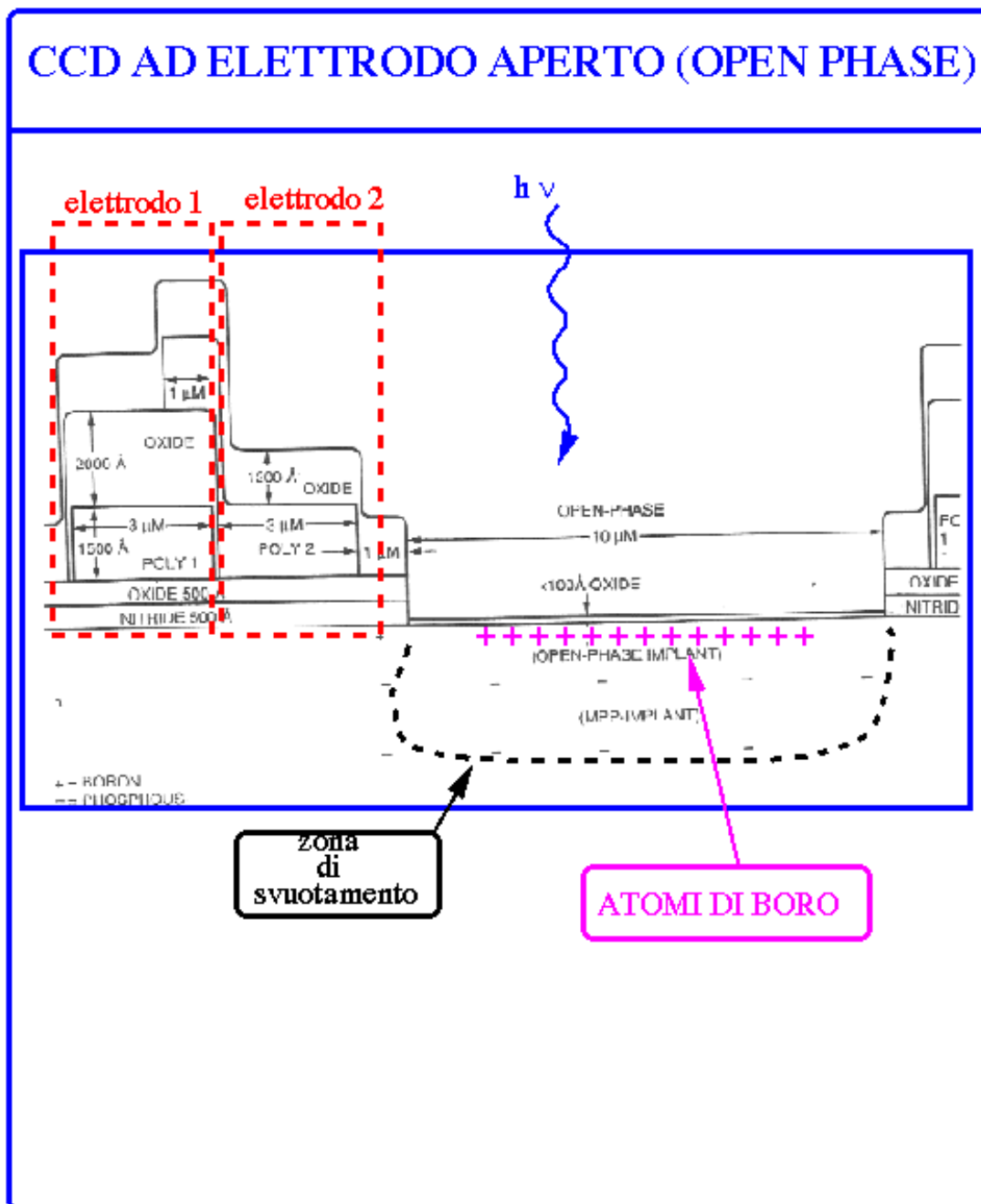
In questa figura si può notare la differenza di *corrente di buio* tra un CCD **MPP** ed uno normale. Inoltre sono riportate le curve per lo stesso CCD quando viene irradiato con radiazioni di  $20K Rads$ . Si può notare come un CCD **MPP** si comporti meglio rispetto ad uno normale e specialmente in presenza di radiazione, infatti le due curve per un CCD **MPP** differiscono di poco. Bisogna ricordare però che questa tecnica riduce la "buca di potenziale", e quindi la saturazione, di circa il 60%. Come si vede dal grafico, un CCD **MPP** a  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  ha una corrente di buio per pixel di  $1\text{ e}^-$  ogni  $10\text{ secondi}$ .



### 5.3. Open Electrode (OE) CCD o Open Phase CCD

Per poter migliorare la risposta, nell'UV e nell'X, di un CCD del tipo *fronte-illuminato*, è stata sviluppata di recente una tecnica che è conosciuta col nome di “*Open Electrode*” o “*Open Phase*”, che consiste nello scoprire uno dei 3 elettrodi, ed in corrispondenza di tale scoperta impiantare atomi di Boro, in modo da ottenere una buca di potenziale anche senza elettrodo.

La radiazione UV e X che arriva dalla parte degli elettrodi (essendo il CCD fronte-illuminato), non viene assorbita dal terzo elettrodo, e quindi può generare la carica.



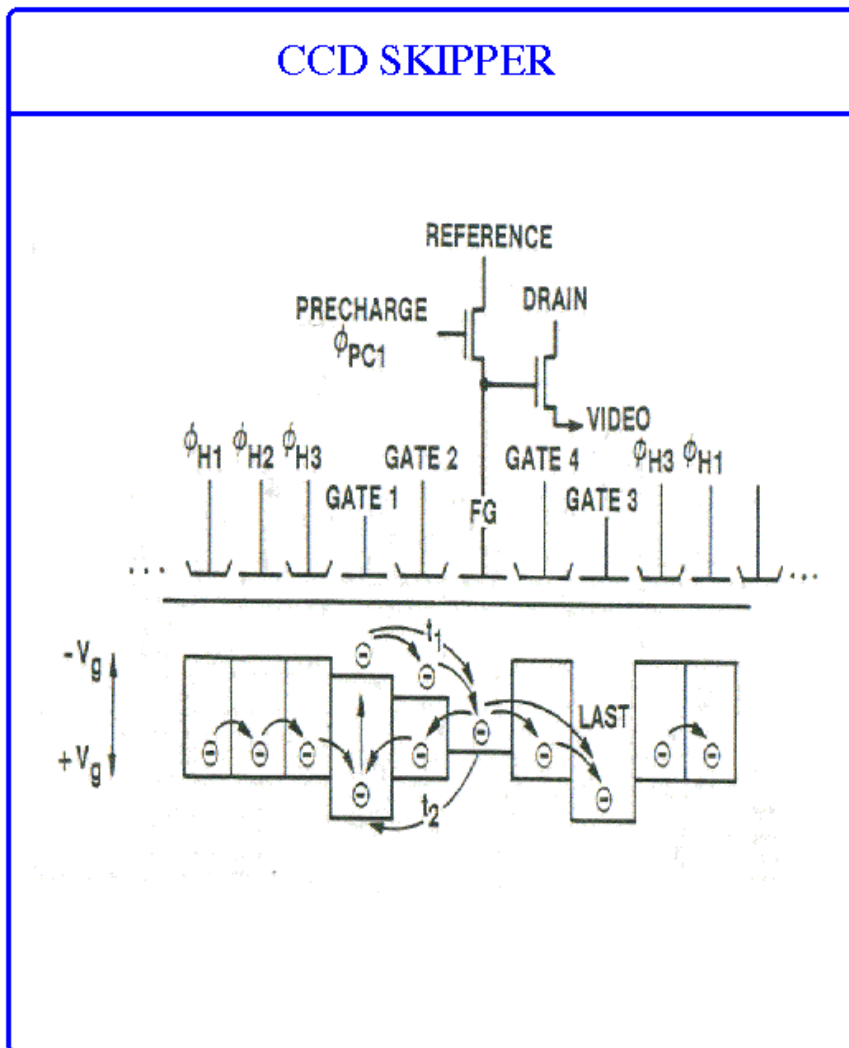
## 5.4. Skipper CCD

Il CCD Skipper è stato inventato per diminuire ulteriormente il rumore di lettura, facendolo arrivare addirittura a **decimi di elettrone**.

Il principio su cui si basa è quello di “*misurare*” la carica contenuta in un pixel molte volte senza distruggerla. Le misure vengono “*mediate*” sull’amplificatore di uscita, riducendo così il rumore di lettura di un fattore  $\sqrt{N_{\text{misura}}}$ .

Per esempio, se un pixel è misurato **100 volte**, il rumore casuale associato all’amplificatore che si trova sul CCD (on-chip amplifier) risulta diminuito di un **fattore 10**. Oggi le industrie elettroniche sono in grado di produrre CCD con rumore di lettura di 3 e<sup>-</sup> r.m.s., e quindi con 100 misure (o campionamenti) si può avere un rumore di 0.3 e<sup>-</sup> r.m.s.

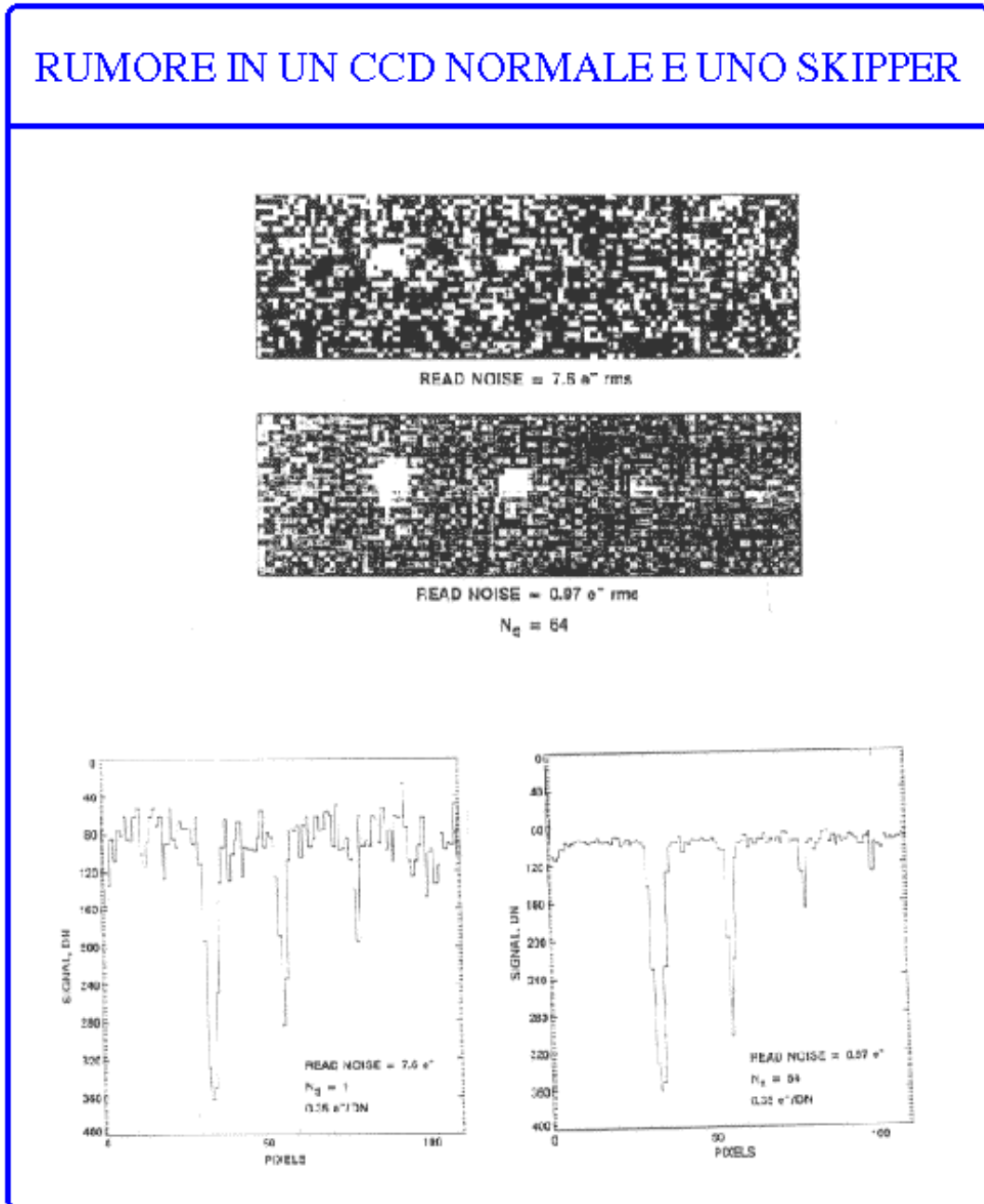
Questa figura mostra lo schema circuitale di un *CCD Skipper*. La sequenza di misure inizia spostando la carica dall’elettrodo  $\phi_{H3}$  all’elettrodo GATE 1 e poi subito al GATE 2 e quindi, con un potenziale positivo, la carica viene spostata sotto l’elettrodo FG (detto *Floating Gate*). La tensione all’uscita dell’amplificatore (VIDEO) cambia proporzionalmente alla carica trasferita sotto il gate FG. La carica viene quindi spostata, mediante gli altri elettrodi, avanti e indietro, e così via per il numero di campionamenti.





## 5.5. Misure di rumore su un CCD Skipper sperimentale

Qui si può notare la differenza nelle prestazioni di rumore usando un *CCD Skipper* con un solo campionamento (cioè in modo normale) e con 64 campionamenti (o spostamenti di carica avanti e indietro). Le immagini sono state ottenute con quattro sorgenti puntiformi in ordine decrescente di luminosità. La sorgente più debole ha un'intensità di appena  $3 - 4 e^-$ .

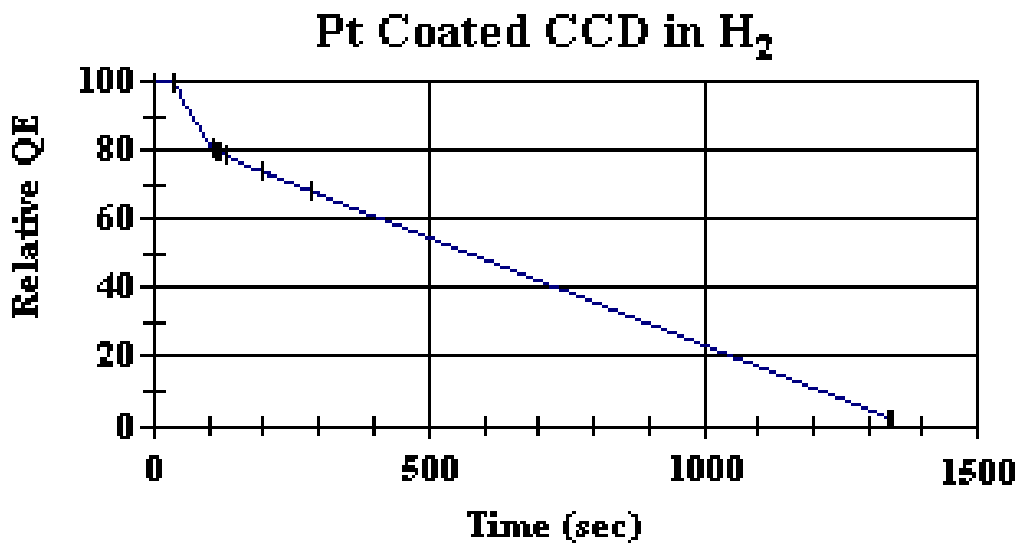


Nei grafici, che rappresentano l'estrazione di una riga di pixel, è ancora più evidente la differenza tra il caso di *semplice lettura* ed il caso di *64 campionamenti* prima della lettura.

## 5.6. Problemi della tecnica “Flash Gate”

Come detto in precedenza (vedi par. 4.7), le cariche positive che si vengono a creare sulla superficie sensibile, dovute all'ossido nativo, sono le responsabili della buca-trappola.

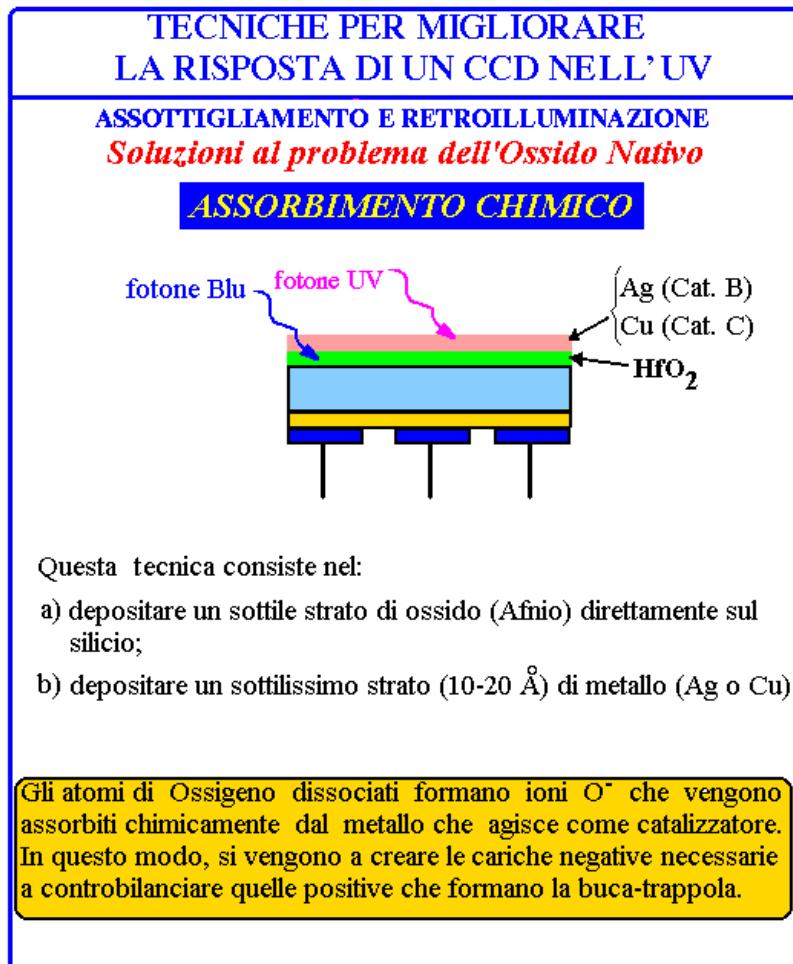
La tecnica del “Flash Gate” è in grado di compensare queste cariche positive e quindi di annullare tale buca-trappola. Ma tale tecnica ha mostrato immediatamente i suoi limiti: lo strato di Platino depositato sulla superficie è estremamente sensibile alla contaminazione dovuta all'Idrogeno, che si può trovare nel dewar o in qualsiasi involucro che contiene il CCD.



Come è mostrato in questa figura, la QE si riduce a zero dopo circa 20 minuti di contaminazione da Idrogeno a temperatura ambiente. Questo fenomeno indica quindi che la reazione chimica predomina rispetto all'effetto che dovrebbe fare il metallo, ovvero compensare le cariche positive, perché essenzialmente la “work function” del metallo è minore rispetto a quella del semi-conduttore.

## 5.7. Nuova tecnica per migliorare la risposta nell'UV: “Catalizzazione” mediante Ag o Cu

Facendo crescere dell'ossido ( $\text{HfO}_2$ ) di spessore sufficiente (da 200 a 700 Å) tra la superficie del CCD ed il metallo, che a sua volta è di spessore 10 Å, si realizza una sorta di reazione chimica: gli atomi di ossigeno dell'ossido si dissociano in presenza del metallo, che agisce da catalizzatore.



Gli atomi di Ossigeno dissociati formano ioni  $\text{O}^-$ , che vengono mantenuti nella loro posizione dal metallo. In questo modo, le cariche positive vengono compensate dagli ioni  $\text{O}^-$ . Questa tecnica, quindi, è in grado di garantire oltre ad efficienze quantiche elevate, anche la stabilità nel tempo.

Poiché il processo di dissociazione non dipende dalla “work function” del metallo, si possono usare differenti metalli, ad esempio l'Ag (0.6 eV più bassa del Si) o anche il Cu (0.2 eV più bassa del Si), ed ottenere gli stessi risultati ottenuti con il Pt.

La tecnica per depositare Cu sulla superficie del CCD si è dimostrata la più semplice da realizzare presso i laboratori dello Steward Observatory. Tale tecnica è stata chiamata “Catalizzazione C” ed è stata usata per i CCD Loral per il Telescopio Nazionale Galileo.

## **6. RIVELATORI A CONTEGGIO DI FOTONI**

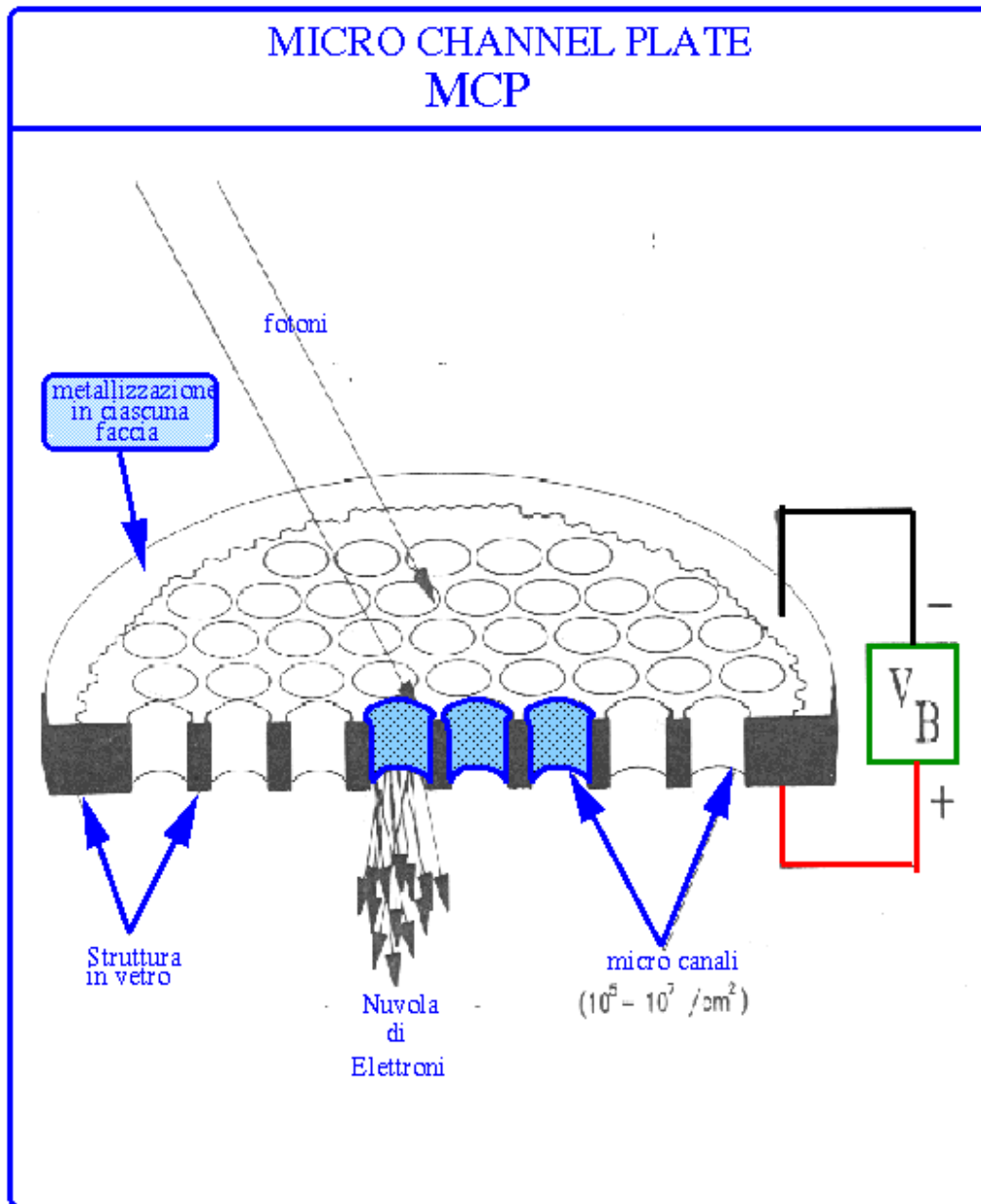
- 6.1. Il Micro Channel Plate (MCP)
- 6.2. Diverse configurazioni di MCP
- 6.3. MCP a canale curvo
- 6.4. “Pulse Height Distribution”
- 6.5. Caratteristiche principali di un MCP
- 6.6. Fotocatodi: efficienza quantica
- 6.7. Sensori di posizione: anodi conduttivi, schermi di fosforo accoppiati a CCD
- 6.8. L’anodo “Wedge&Strip” (WSA): determinazione della posizione X, Y della nuvola elettronica
- 6.9. Il MAMA
- 6.10. MCP con schermo di fosforo accoppiato a CCD

## 6.1. Il Micro Channel Plate (MCP)

Il “Micro Channel Plate” (MCP) costituisce una delle parti più importanti di un rivelatore a conteggio di fotoni. Esso è costituito da milioni di microscopici fotomoltiplicatori detti “microcanali”, indipendenti l’uno dall’altro e fusi insieme per formare un’unica piastra.

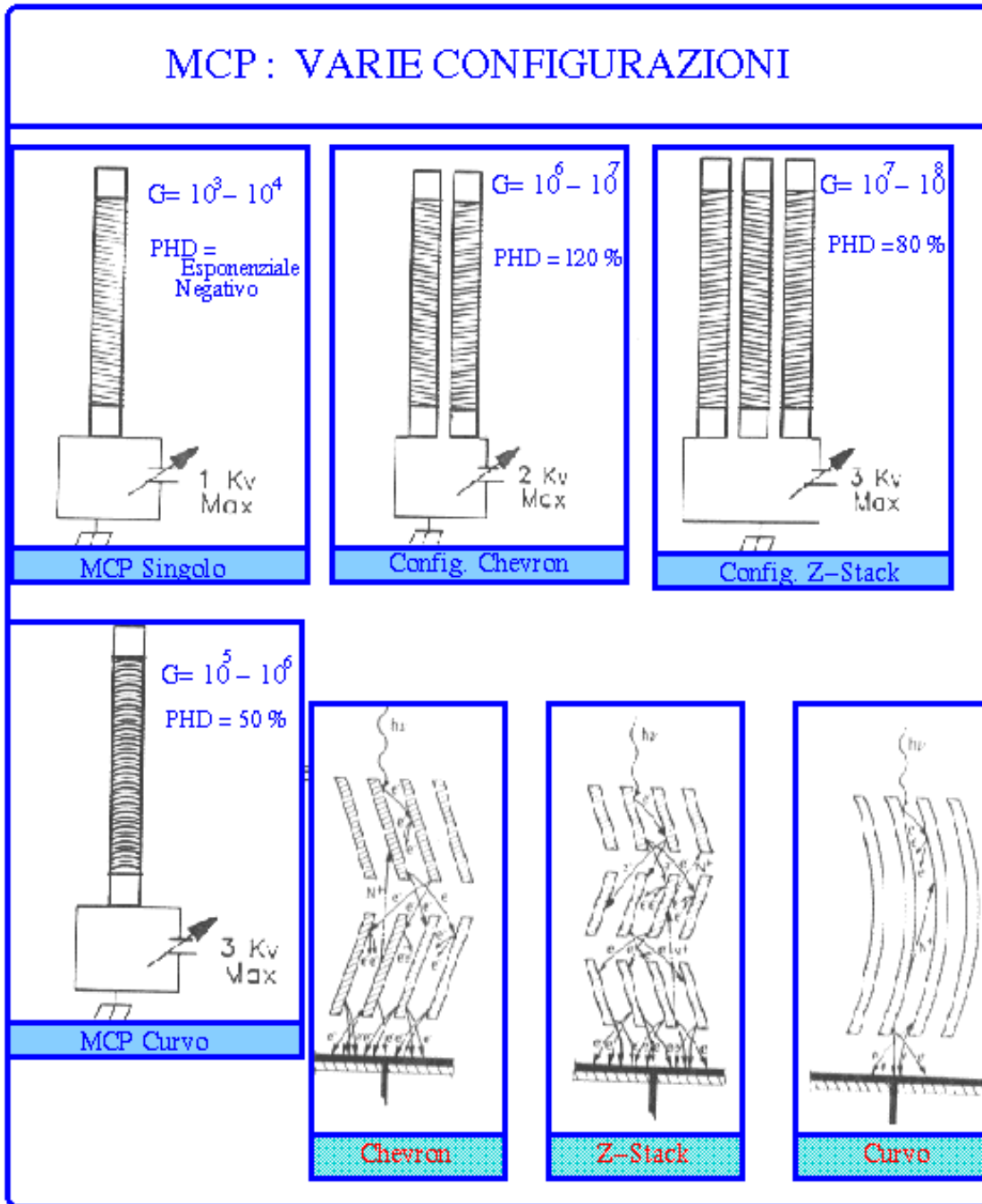
Quando un fotone arriva su un microcanale, ed ha sufficiente energia per produrre elettroni, allora lungo il canale questi vengono accelerati e moltiplicati, e all’uscita si ottiene una nuvola elettronica.

Un sottile strato di metallo viene depositato sotto vuoto sia sulla superficie d’entrata che su quella di uscita, in modo da connettere in parallelo tutti i microcanali. Successivamente, si connettono gli elettrodi su queste superfici per poter alimentare tutti i microcanali. La tensione applicata varia tra 20 e 25 volte il rapporto *lunghezza-diametro* del canale.



## 6.2. Diverse configurazioni di MCP

Questa figura illustra le varie configurazioni che si possono fare con MCP per ottenere differenti condizioni di lavoro, come per esempio maggiore guadagno o maggiore risoluzione della "Pulse Height Distribution" (PHD) che sarà discussa dopo.

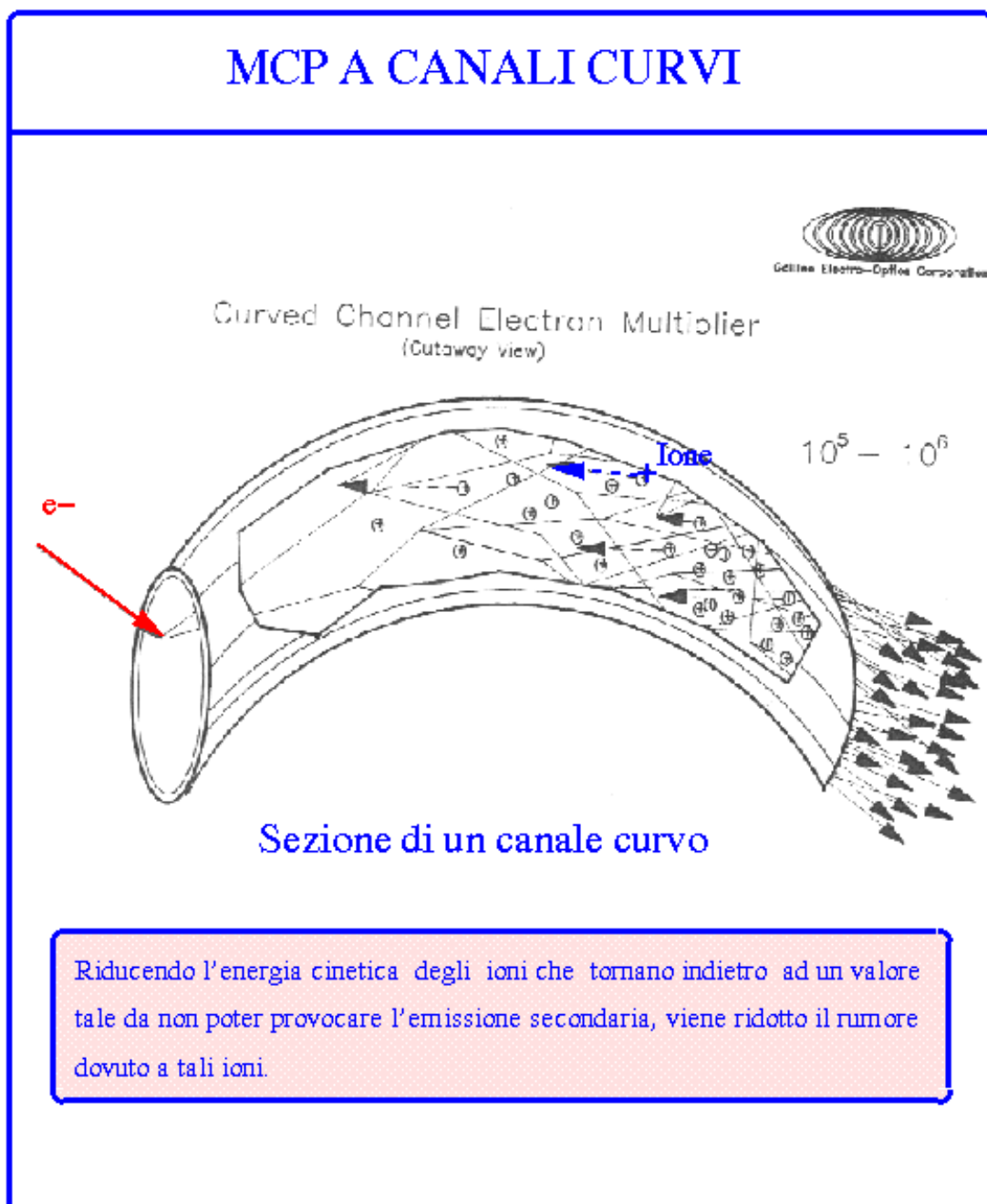


Un singolo MCP può produrre un guadagno compreso tra 1000 e 10000. Un MCP a "Canale Curvo" è capace di ottenere guadagni di  $10^5 - 10^6$ . Mettendo due MCP in cascata si possono raggiungere guadagni di  $10^6 - 10^7$  e PHD di circa 120%, mentre aggiungendo un altro MCP (configurazione Z-stack) si possono raggiungere guadagni di  $10^7 - 10^8$  e una PHD di 80%.

### 6.3. MCP a canale curvo

Il Micro Channel Plate a canali curvi risulta essere il migliore, sia dal punto di vista della PHD che da quello dell'amplificazione, rispetto a qualsiasi altra configurazione. Il motivo sta nel fatto che questi dispositivi riescono a limitare l'effetto detto di "Ion Feedback", ovvero l'effetto per cui gli ioni generati dall'urto di elettroni con molecole rilasciate dalle pareti del canale durante la moltiplicazione, tornando indietro, urtano contro le pareti del canale e provocano emissioni "non volute" di elettroni.

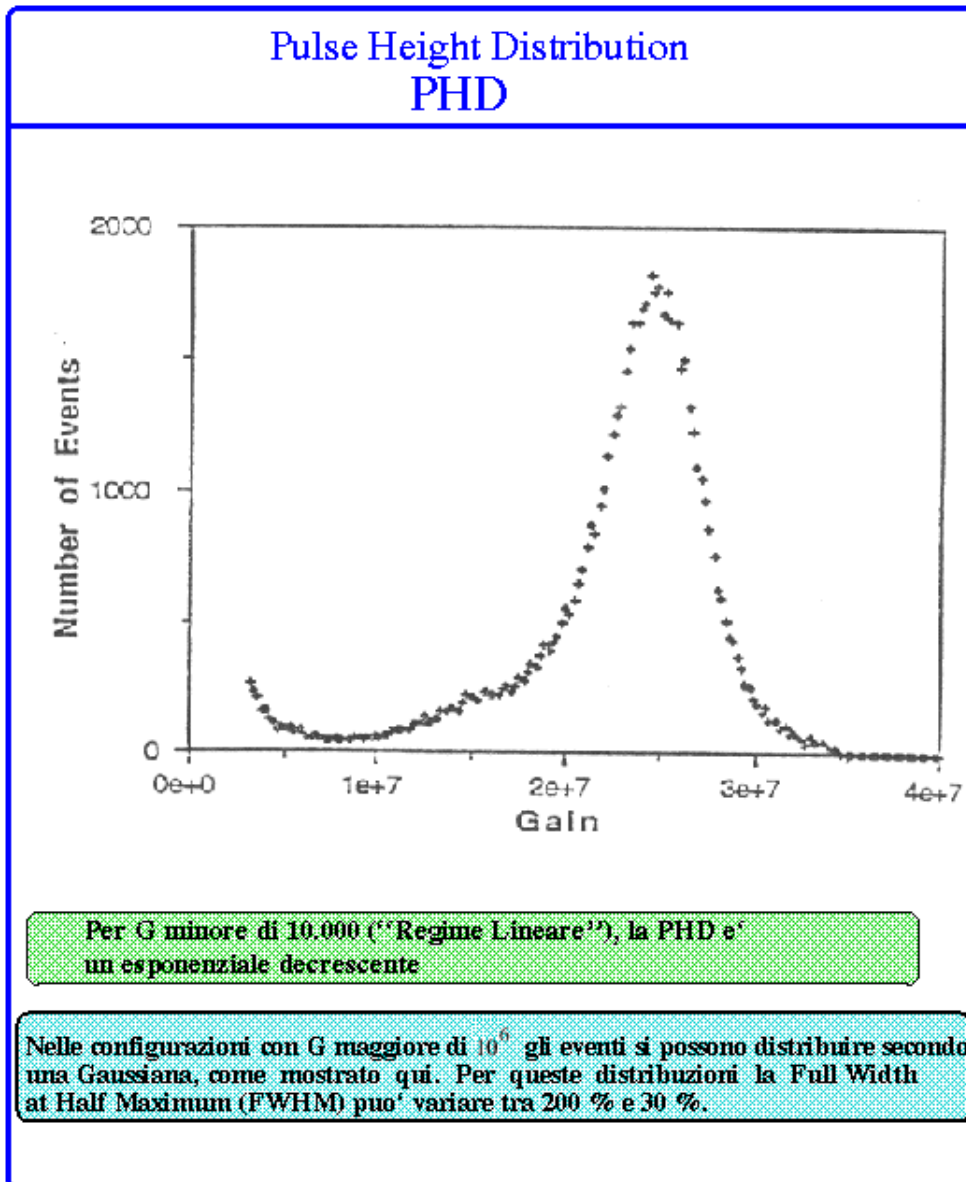
Infatti, la curvatura del canale riesce a limitare l'energia cinetica degli ioni prima che questi urtino contro le pareti del canale. Riducendo l'energia cinetica di tali ioni ad un livello tale che non possa avvenire l'emissione secondaria di elettroni, viene automaticamente ridotto il rumore dovuto a questo fenomeno.



## 6.4. “Pulse Height Distribution”

Come detto prima, le varie configurazioni influenzano il guadagno  $G$  e la distribuzione degli eventi (PHD).

In regime di basso guadagno ( $G$  minore di  $10^4$ ) detto “Regime Lineare”, la PHD è, in modo naturale, un esponenziale decrescente: gli elettroni nel microcanale possono seguire svariate traiettorie per colpire le pareti, ne segue che la produzione di elettroni secondari non risulta ben definita, e quindi all'aumentare di  $G$  si allarga la distribuzione degli eventi.



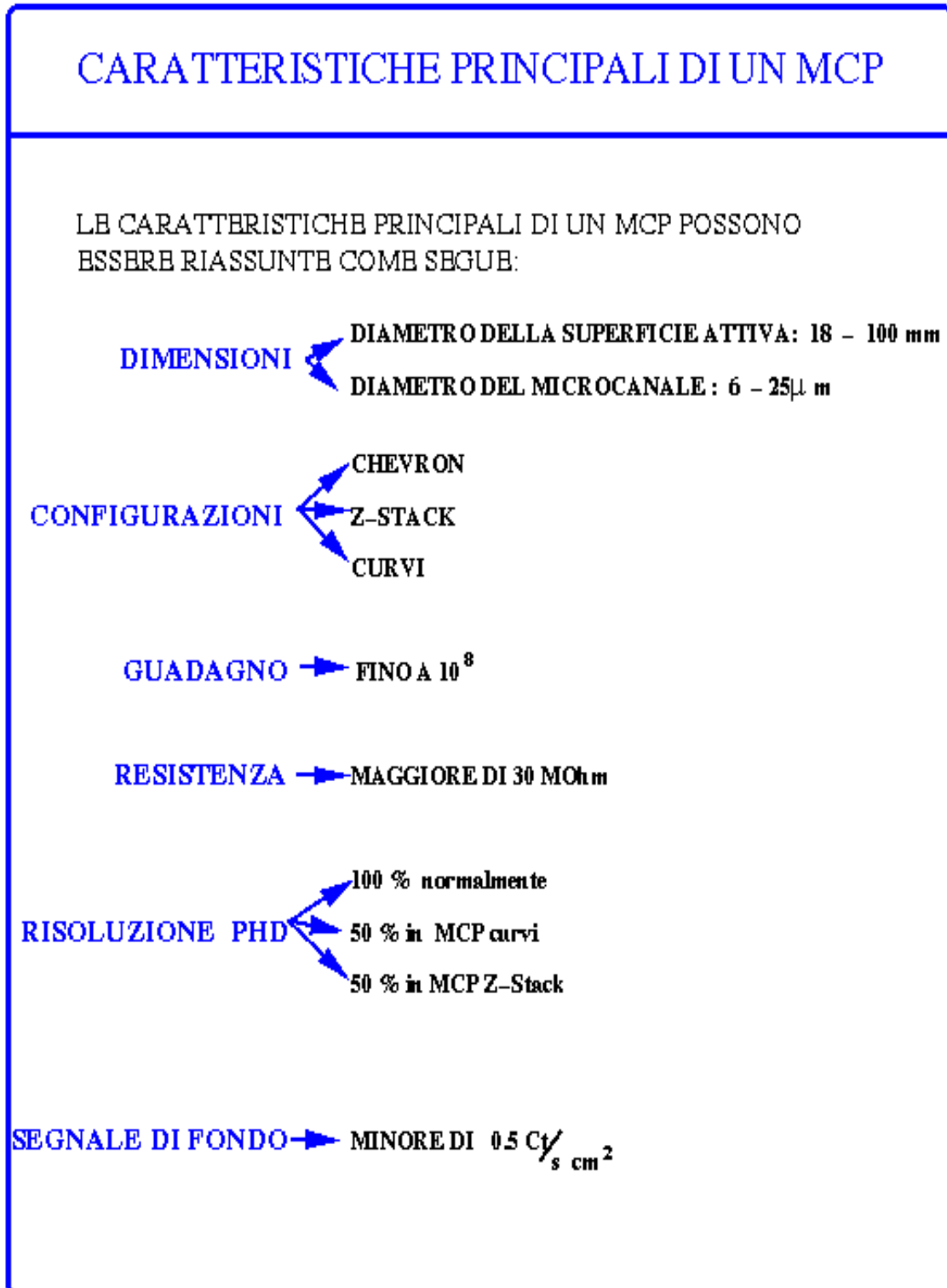
La PHD assume una forma Gaussiana per guadagni maggiori di  $10^6$ , come è mostrato in figura. La FWHM per questo tipo di distribuzioni può variare da 200% a 30%.

Distribuzioni di questo genere sono dovute all'effetto autolimitante del guadagno quando si raggiunge la saturazione. MCP con rapporti  $l/d$  piccoli possono dare origine a distribuzioni del genere perché in essi si raggiunge la saturazione a più bassi guadagni.



## 6.5. Caratteristiche principali di un MCP

Questa figura riassume le principali caratteristiche di un MCP usato come rivelatore primario di immagini.



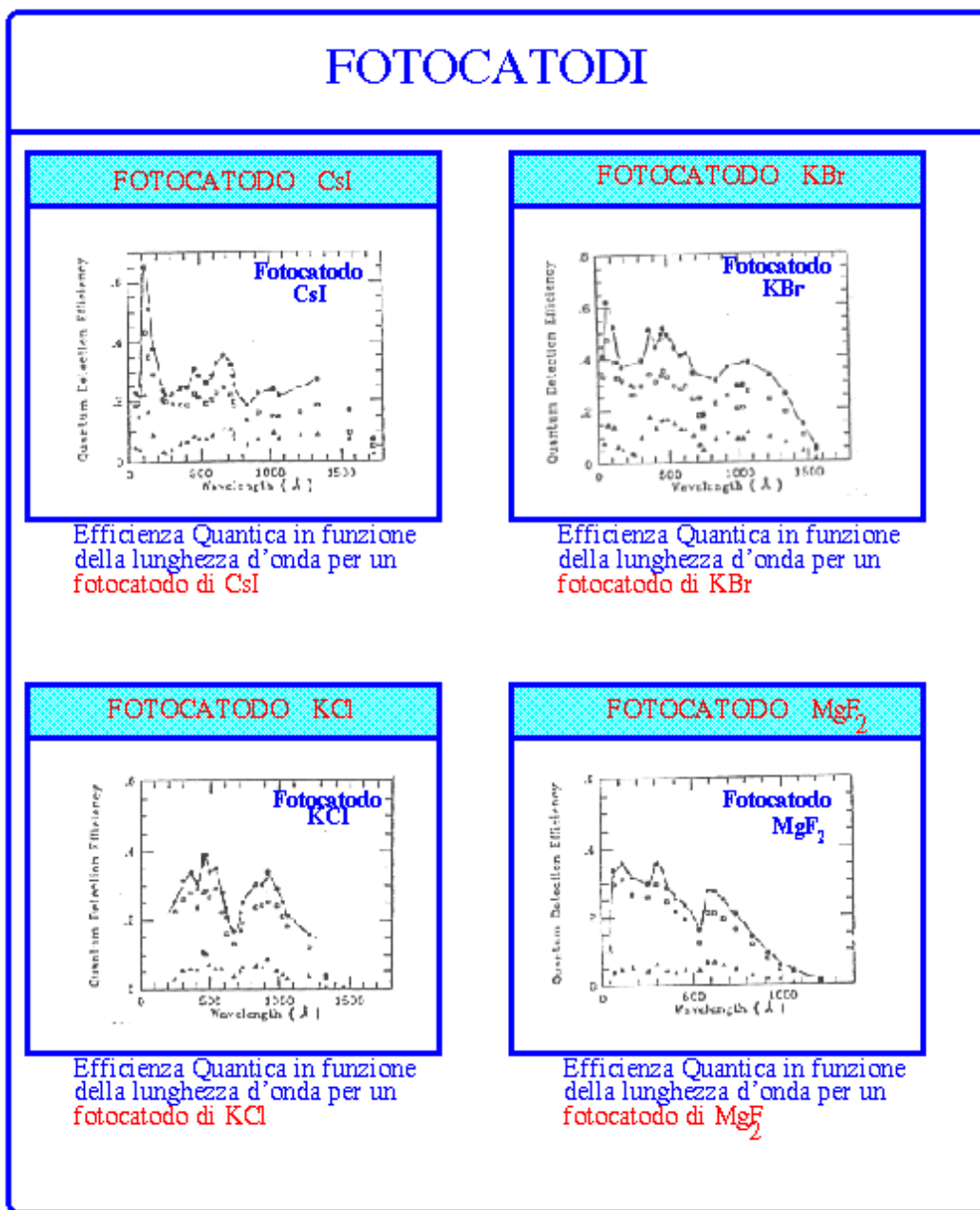
## 6.6. Fotocatodi: efficienza quantica

Per aumentare la sensibilità dei Micro Channel Plate nei vari intervalli spettrali dal soft-X al Vicino-Infrarosso, viene depositato un appropriato materiale con elevata probabilità di fotoemissione nella banda di interesse, direttamente sulla parte frontale dei microcanali, in modo che tale materiale vada a depositarsi sui bordi e anche un po' dentro i microcanali.

Usualmente gli spessori che si vengono a creare sono di circa 10000Å.

In questa figura sono riportate le efficienze quantiche di rivelazione o “*Quantum Detective Efficiency*” (*QDE*) per diversi fotocatodi da utilizzare nel soft-X e UV.

I fotocatodi utilizzati nelle bande Visibile e Vicino-Infrarosso sono quelli già conosciuti per i fotomoltiplicatori, e cioè quelli della *serie S*, come per esempio S20 e S25.



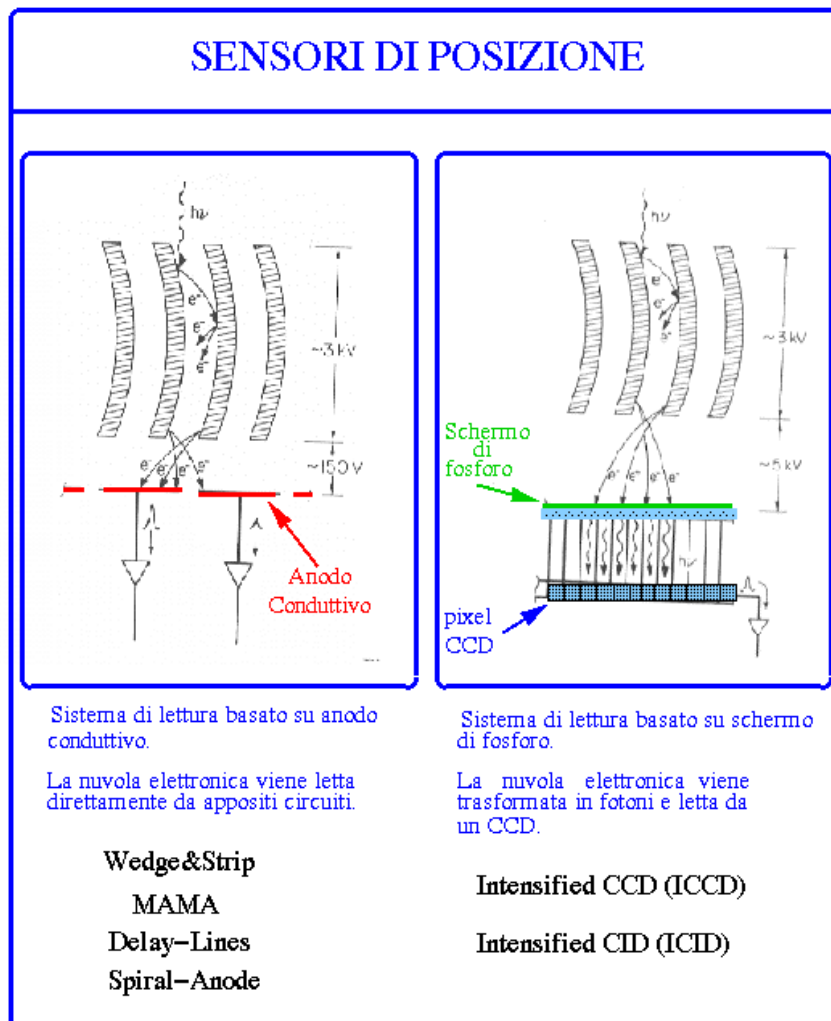
Come si vede dalla figura, depositando **KBr** su MCP si possono ottenere QDE superiori al 30% nella regione 800 - 1200 Å, con un picco di 50% a 450 Å.

## 6.7. Sensori di posizione: anodi conduttivi, schermi di fosforo accoppiati a CCD

La nuvola elettronica che esce dai microcanali può essere diretta, con un opportuno campo elettrico, verso un anodo raccogliitore, e quindi essere letta. In linea di principio, usando un'unica piastra conduttrice, il sistema MCP+anodo si potrebbe ricondurre ad un fotomoltiplicatore di quelli tradizionali, che non tiene conto della forma geometrica della sorgente; viceversa, usando altri anodi come quelli mostrati in figura, è possibile individuare la posizione  $x, y$  dell'evento e realizzare un rivelatore bidimensionale a conteggio di fotoni. Esistono diverse tecniche per stabilire la posizione della nuvola elettronica che arriva sull'anodo; le più usate sono due:

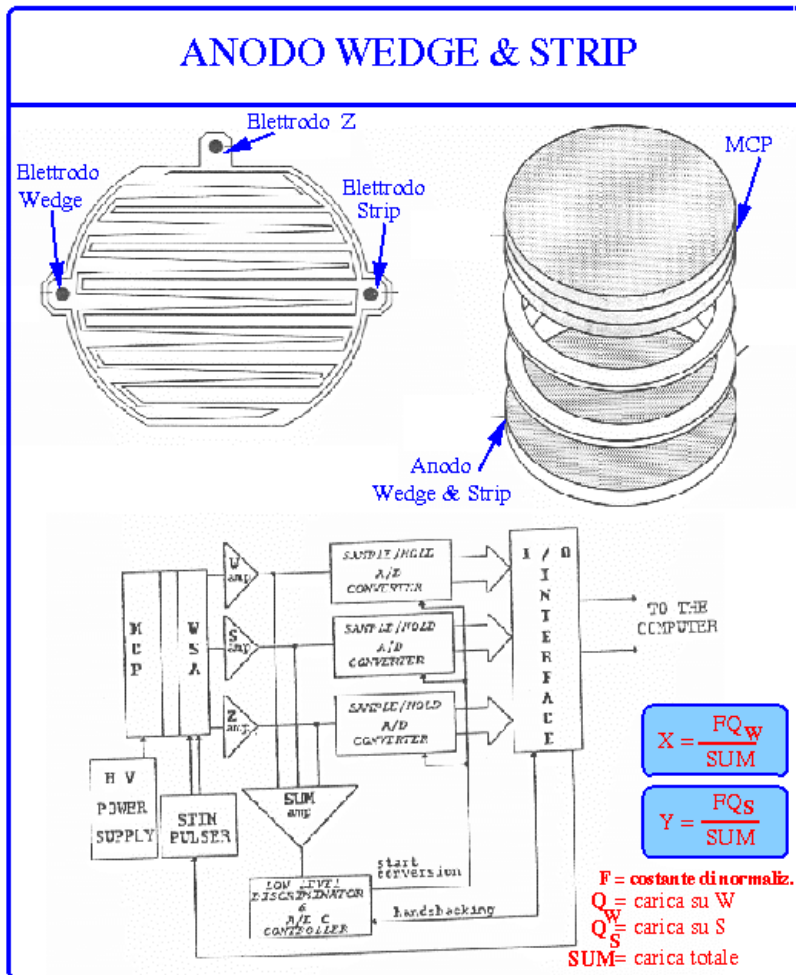
1. uso di un "Anodo Conduttivo", formato da una serie di elettrodi in grado di risentire della carica in modo proporzionale alla posizione;
2. uso di uno "Schermo di Fosforo", che trasforma la nuvola elettronica in segnale luminoso che viene letto da un sensore di immagini (CCD o CID).

Al primo gruppo appartengono gli anodi detti *Wedge & Strip*, *Multi Anode Microchannel Array (MAMA)*, *Delay Lines*, *Spiral Anode*. Al secondo gruppo appartengono i rivelatori *ICCD* e *ICID*.



## 6.8. L'anodo "Wedge&Strip" (WSA): determinazione della posizione X, Y della nuvola elettronica

L'anodo WSA è in grado di determinare la posizione X,Y dell'evento con soli 3 elettrodi. La nuvola elettronica che colpisce l'anodo WSA viene ripartita sui tre elettrodi che sono complanari ed hanno ciascuno una forma particolare (*Wedge, Strip e Zig-Zag*). Le coordinate X e Y vengono univocamente determinate dai rapporti tra la carica risentita dagli elettrodi (**Q<sub>W</sub>** e **Q<sub>S</sub>**) e la carica totale (**SUM**). I circuiti elettronici impiegati per ottenere le coordinate di un evento sono fondamentalmente di due tipi: *a*) i tre segnali vengono amplificati, convertiti in numeri e acquisiti dal computer che provvede al calcolo delle coordinate mediante le formule riportate in fondo alla figura e *b*) i tre segnali subiscono lo stesso trattamento del *caso a*), ma i calcoli vengono eseguiti da circuiti elettronici specializzati. Il computer acquisisce direttamente i valori di X e Y. Nella figura è mostrato lo schema a blocchi del circuito elettronico che utilizza la tecnica del *caso a*).



Per entrambe le tecniche, la velocità di conteggio (*count-rate*) è limitata dal tempo di conversione del convertitore A/D, che può andare da 1 μs a 20 μs (in funzione del numero di bit e dell'errore di linearità).

Con la tecnica del *caso a*) si possono avere *count rate* di 10<sup>4</sup> ct/s, mentre utilizzando la tecnica del *caso b*) si possono avere fino a 10<sup>6</sup> ct/s. Il WSA permette una risoluzione spaziale migliore di 30 μm FWHM. Quindi, con MCP che hanno un'area utile per la rivelazione di 30 mm e anodi WSA si possono realizzare rivelatori a conteggio di fotoni con 1000 × 1000 pixel.

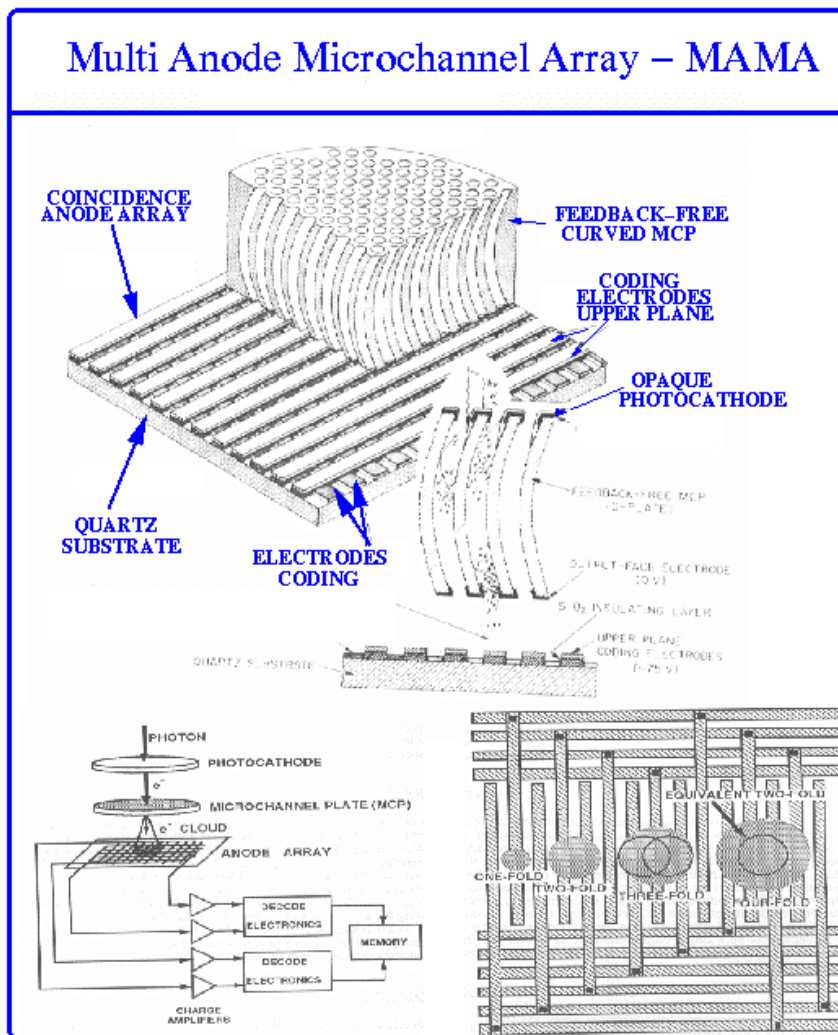
## 6.9. II MAMA

Il MAMA è costituito da tre parti fondamentali:

1. un MCP a canali curvi che produce una PHD saturata (FWHM = 50%) ed è libero da “ion feed-back”;
2. un fotocatodo depositato direttamente sulla superficie di ingresso (eliminando, in tal modo, sistemi di focalizzazione elettromagnetica);
3. un anodo formato da una matrice di elettrodi detti “anodi a coincidenza” (coincidence-anode).

Con tale tipo di anodi la risoluzione spaziale viene definita unicamente dalla geometria degli elettrodi. L’anodo a coincidenza nella sua forma più semplice impiega due insiemi di elettrodi per determinare le coordinate X, Y. La nuvola elettronica che arriva su una coppia di elettrodi viene individuata dalla coincidenza dei segnali corrispondenti agli elettrodi. In tal modo, per ottenere una matrice (n × m) di pixel, occorrono (n + m) amplificatori e circuiti discriminatori.

Un’ulteriore riduzione del numero di amplificatori si può ottenere realizzando un anodo a coincidenza con struttura multipla (ad esempio a 4 elettrodi) e ripetitiva.



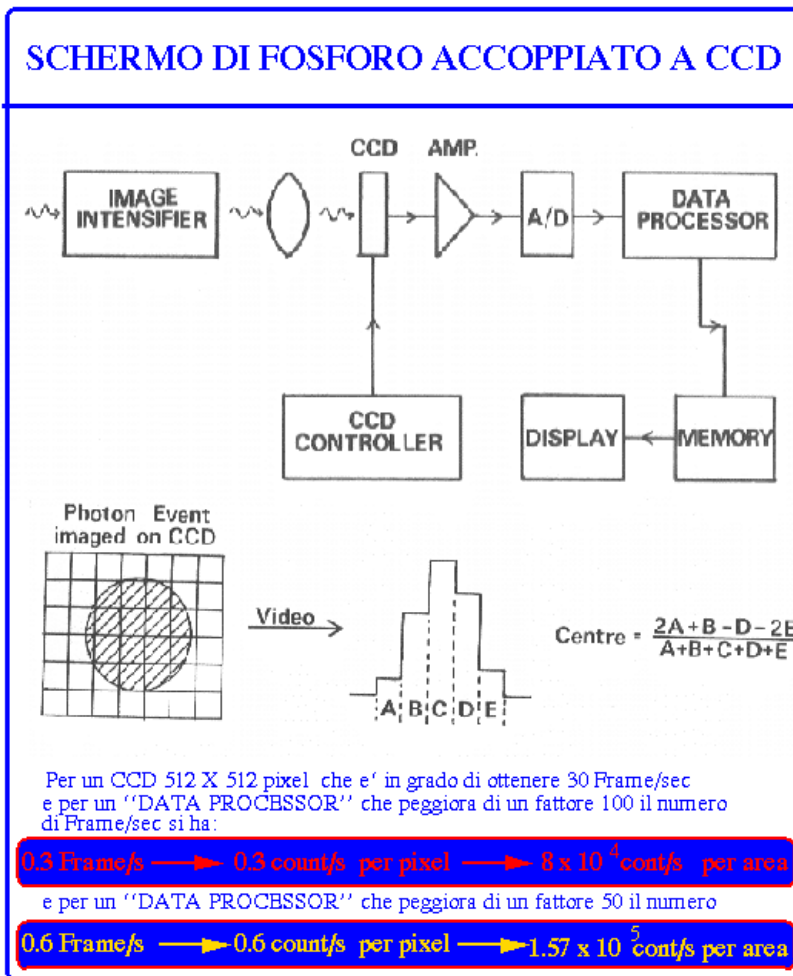
Nella parte bassa della figura è mostrata la struttura tipica di un anodo a coincidenza detto “fine-fine”, che consiste in n elettrodi (n = 4) che si ripetono ogni (n + 2) volte e (n + 2) elettrodi che si ripetono n volte.

Il MAMA permette una risoluzione spaziale migliore di 25 μm FWHM. Grazie al modo di leggere la carica, il MAMA può vantare *count rate* migliori di 10<sup>6</sup> ct/s.

## 6.10. MCP con schermo di fosforo accoppiato a CCD

Un altro metodo per rivelare la posizione della nuvola elettronica che emerge da un MCP è quello che fa uso di uno schermo di fosforo (che produce un evento luminoso) accoppiato, tramite un'opportuna ottica di trasferimento (anche fibre ottiche), ad un CCD che funziona a scansione televisiva. Come si vede dalla figura, dove è riportato lo schema a blocchi del sistema, il segnale di uscita del CCD viene collegato ad un circuito elettronico che, eseguendo un'elaborazione dell'immagine, riesce ad individuare l'evento luminoso con una precisione che è una frazione di pixel. Con tale tecnica si possono ottenere frazioni di pixel fino a 1/8. Quindi, con CCD che hanno  $512 \times 512$  pixel si possono ottenere formati del tipo  $4096 \times 4096$  elementi di risoluzione.

Nella parte bassa della figura è mostrato l'algoritmo usato per la determinazione del "centroide".



La massima velocità di conteggio (*count rate*) di questi sistemi dipende dalla frequenza di scansione e dalla dimensione dell'evento luminoso prima di essere processato. Per calcolare la *count rate* si deve partire dal numero di immagini al secondo (Frames/s). Se un CCD da  $512 \times 512$  pixel legge ad una frequenza di 30 Frames/s, allora per ciascun pixel si hanno 30 count/s. Se l'elettronica di centroiding peggiora di un fattore 100 il numero di immagini al secondo, allora realmente per pixel si hanno 0.3 count/s, che equivalgono a  $8 \times 10^4$  count/s su tutta l'area.

Utilizzando tecniche di elaborazione particolari è possibile abbassare anche a 50 volte il peggioramento in tempo e quindi si hanno 0.6 count/(s × pix), che equivalgono a  $1.57 \times 10^5$  count/s su tutta l'area.

## **7. CAMERA CCD PER APPLICAZIONI SCIENTIFICHE: IL CONTROLLER CCD PER IL TELESCOPIO NAZIONALE GALILEO (TNG)**

- 7.1. Funzioni di Trasferimento di una camera CCD
- 7.2. Elettronica di controllo ed interfaccia con computer
- 7.3. Dettaglio dell'elettronica di controllo
- 7.4. Considerazioni sul convertitore A/D e sul guadagno dell'amplificatore
- 7.5. Modi di lettura disponibili con il CCD controller TNG

## 7.1. Funzioni di Trasferimento di una camera CCD

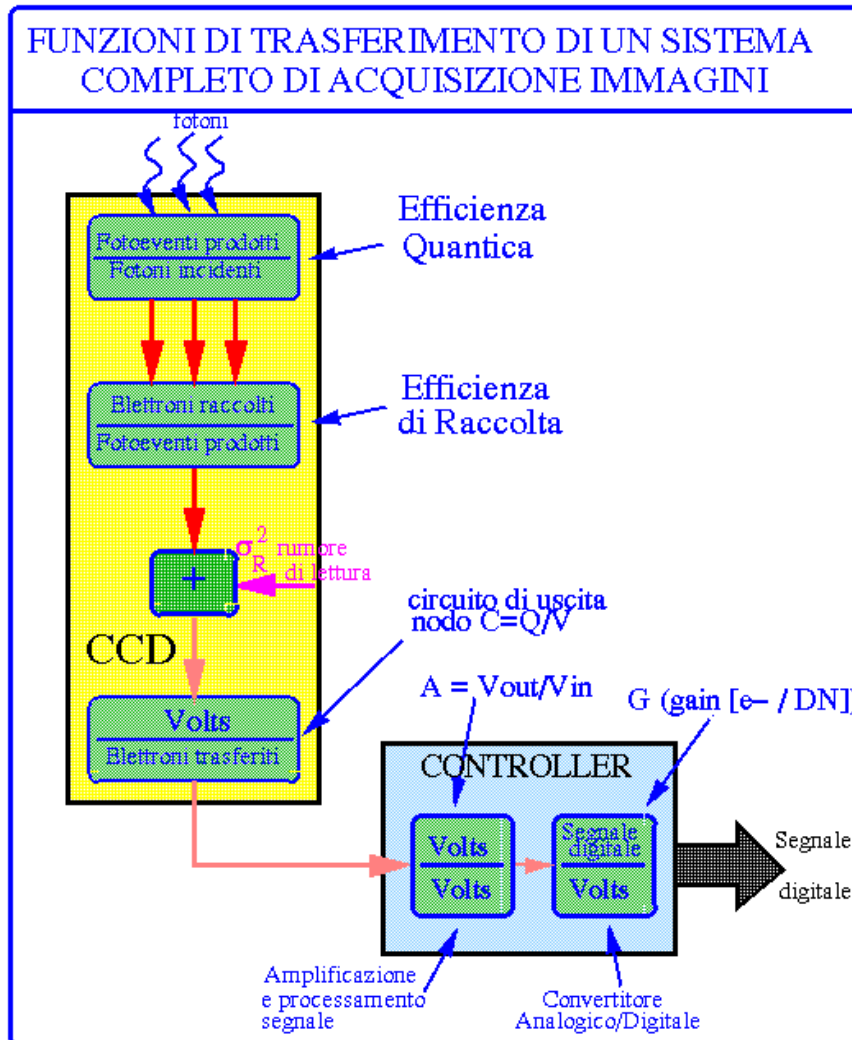
Le fasi principali per passare dai fotoni che provengono dall'immagine al segnale numerico associato a ciascun pixel del CCD sono rappresentati in questa figura, sotto forma di cosiddette "Funzioni di Trasferimento".

I fotoni incidenti vengono trasformati in fotoeventi o cariche (effetto fotoelettrico). La funzione di trasferimento che descrive questo effetto è l'**efficienza quantica**.

Le cariche che si formano si accumulano sotto gli elettrodi e vengono trasferite da un elettrodo all'altro. La funzione di trasferimento è l'**efficienza di raccolta** o *Charge Collection Efficiency (CCE)*.

Gli elettroni trasferiti vengono trasformati in volts tramite il "circuitto di uscita" del CCD, ed in questo punto si somma il rumore di lettura. La funzione di trasferimento in questo caso è espressa dal **nodo capacitivo di uscita** del CCD  $C = Q / V$  ovvero

$$V = K e^-.$$



Dal nodo di uscita del CCD il segnale in Volts viene amplificato e processato, e quindi la funzione di trasferimento è il prodotto delle varie funzioni di trasferimento della catena di amplificazione; se per esempio ci sono due amplificatori,  $A_1$  e  $A_2$ , e un doppio campionatore la cui funzione di trasferimento è rappresentata da  $I$ , allora la funzione di trasferimento sarà:

$$H = A_1 A_2 I$$

Il segnale in Volt viene trasformato in numero digitale dal Convertitore Analogico Digitale.

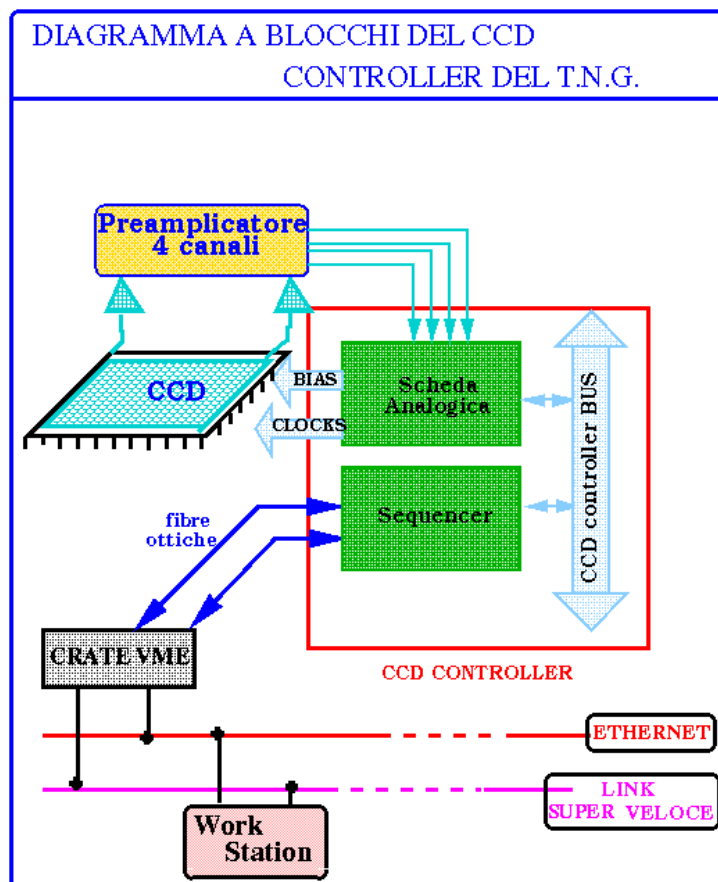
Ad esempio, con un convertitore A/D da 16 bit si possono rappresentare fino a 65535 livelli di segnale diversi. Cioè si può dividere il range dinamico (o parte di esso) in oltre 65000 parti.



## 7.2. Elettronica di controllo ed interfaccia con computer

Esistono diversi tipi di CCD: a 3 ed a 4 fasi, con elettrodi speciali per differenti tipi di lettura, a grande area con diverse dimensioni di pixel e con più circuiti di uscita e più direzioni di scorrimento della carica in modo da aumentare la velocità di lettura. Questi CCD devono essere pilotati opportunamente, ed inoltre i dati devono essere raccolti da computer che abbiano caratteristiche di velocità e memorizzazione adeguate se devono acquisire immagini superiori a  $4000 \times 4000$  pixel. Esistono essenzialmente due tipi di "controller" per CCD: uno rivolto al tipo di CCD, cioè realizzato ad "hoc" per il tipo di CCD (es.: a 3 fasi, 2 uscite video, doppio campionamento, ecc.) ed un altro che si rivolge ai diversi tipi di CCD: cambiando CCD il "controller" si adegua a tale CCD, ovvero diventa programmabile. Il primo ha il vantaggio di essere compatto, mentre il secondo offre il vantaggio di non dover cambiare niente nei diversi circuiti elettronici ed una maggiore flessibilità nel modo d'uso.

In questa figura è riportato lo schema a blocchi del sistema di acquisizione di immagini CCD per uso scientifico del Telescopio Nazionale Galileo (TNG).



Dalla Workstation l'utilizzatore *invia i comandi* che vengono interpretati dal processore che sta a bordo del controller CCD che provvede, a sua volta, a smistare le giuste impostazioni ai vari circuiti elettronici che servono a pilotare un CCD. Il processore che sta sul controller CCD provvede anche a gestire l'acquisizione dei dati e il loro trasferimento attraverso fibre ottiche al crate VME.

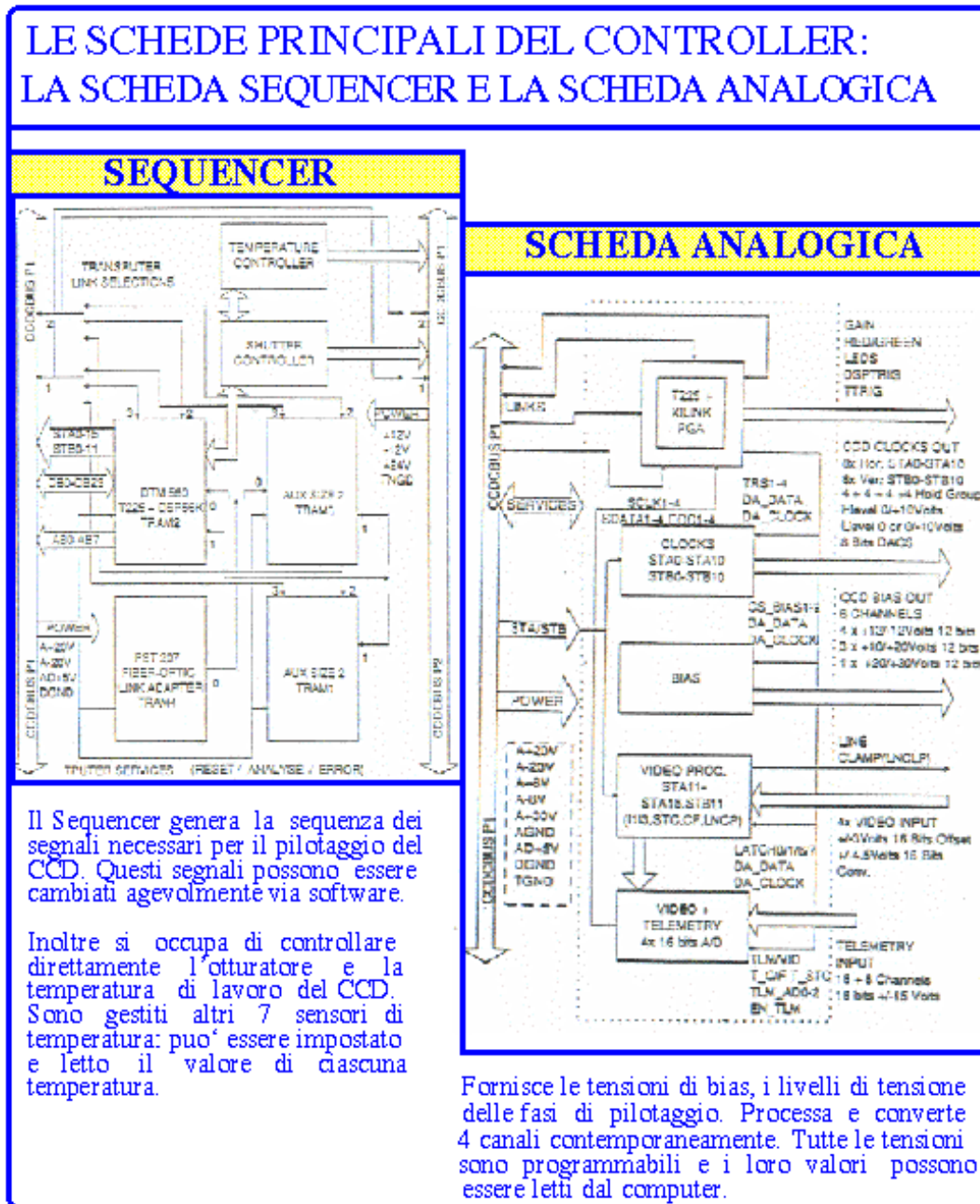
Quest'ultimo immagazzina *i dati* in memoria, ed essendo inserito nella rete di comunicazione dell'intero telescopio, li trasmette alla Workstation.

Il CCD viene pilotato tramite la "Scheda Analogica" che riceve gli impulsi digitali dal "Sequencer". Le schede verranno descritte più in dettaglio nella prossima figura. I segnali di uscita del CCD vengono preamplificati, convertiti ed inviati al computer che tiene conto di quale pixel sta arrivando e lo immagazzina nel posto giusto. Il sistema così realizzato gestisce oltre l'acquisizione dei dati, anche la memorizzazione su disco, la visualizzazione ed una pre-elaborazione semplice detta "Quick Look".

L'elaborazione dei dati avviene successivamente su un computer specializzato per questo tipo di lavoro.

### 7.3. Dettaglio dell'elettronica di controllo

In questa figura sono mostrati in dettaglio gli schemi a blocchi delle due schede principali che compongono il controller CCD. Come detto precedentemente, le parti fondamentali del controller sono due: la "Scheda SEQUENCER" e la "Scheda ANALOGICA".



Il controller è basato essenzialmente sulla tecnologia dei *transputer* e dei *Digital Signal Processing (DSP)*. Sono stati scelti i *transputer* perché offrono una grande facilitazione nelle connessioni tra loro e nelle comunicazioni (non bisogna scrivere alcun protocollo). Invece, il *DSP* è in grado di generare sequenze di segnali molto veloci. Tali sequenze possono essere scritte con un software a parte che si chiama "EDITORE DI FORME D'ONDA".

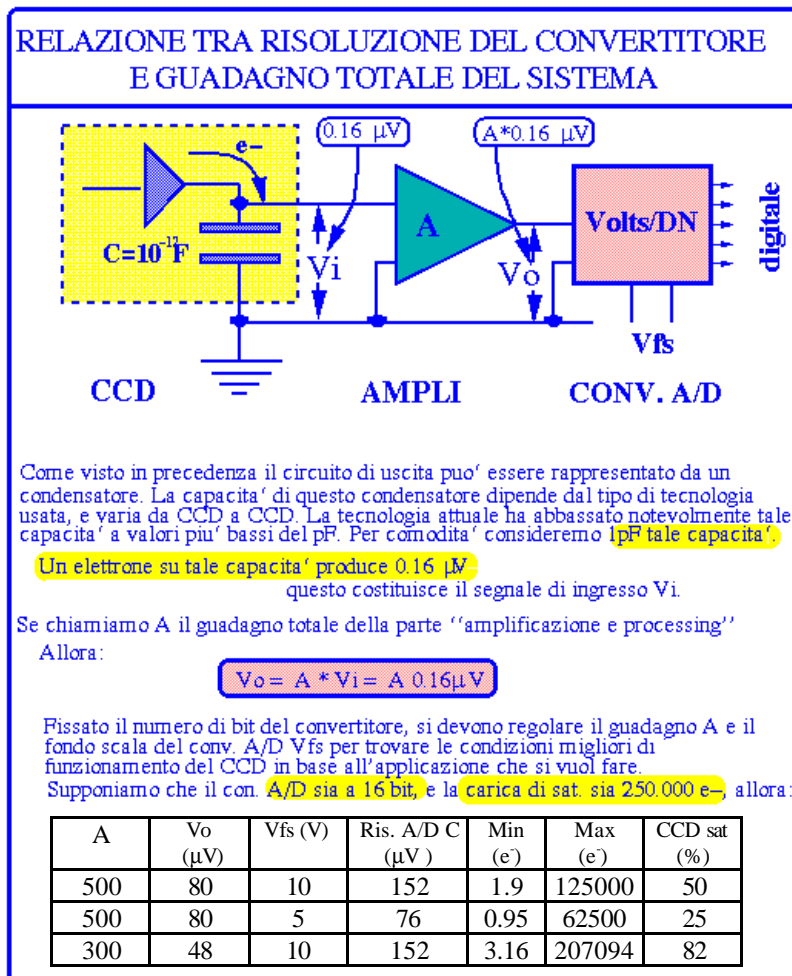
## 7.4. Considerazioni sul convertitore A/D e sul guadagno dell'amplificatore

In questa figura è mostrato il modo in cui viene influenzato il massimo segnale digitale ottenibile dal **guadagno dell'amplificatore**, dalla **risoluzione del convertitore A/D** e dal **fondo scala** impostato sul convertitore A/D. Se la dimensione dei pixel è tale da avere una saturazione con 250000 e<sup>-</sup> ed il circuito d'uscita ha un rumore di lettura di 2.5 e<sup>-</sup>, si ha una dinamica di 100000; bisogna scegliere le condizioni di funzionamento dei vari dispositivi in modo che il rumore sia misurato almeno con 2 DN e che il segnale sia il più alto possibile (livello di saturazione del pixel). In tal caso occorre che il passo del convertitore A/D sia *1.25 e<sup>-</sup> per ADU* e che il massimo numero rappresentabile sia tale da coprire tutti i livelli di carica fino alla saturazione.

Il range dinamico per un A/D C da 16 bit ( $1.25 \times 65536$ ) sarebbe:

$$D = 81920 / 2.5 = 32768.$$

Se non si vuole misurare il rumore del CCD allora, come si vede dalla figura, basta abbassare il guadagno dell'amplificatore (A) o aumentare la tensione di fondo scala V<sub>fs</sub> del convertitore per far sì che il massimo numero di elettroni misurabili aumenti a scapito della risoluzione di segnale.



Nell'ultimo caso considerato, e cioè nel caso di un convertitore a 16 bit che riceva il segnale dall'amplificatore con guadagno 300, si ha una risoluzione del convertitore di **152 mV**, e quindi una risoluzione di **3.16 e<sup>-</sup> per ADU**, ed una saturazione di 207094 e<sup>-</sup>, che costituisce l'82% della saturazione del pixel; in questo caso la dinamica è:

$$D = 207094 / 2.5 = 82837$$

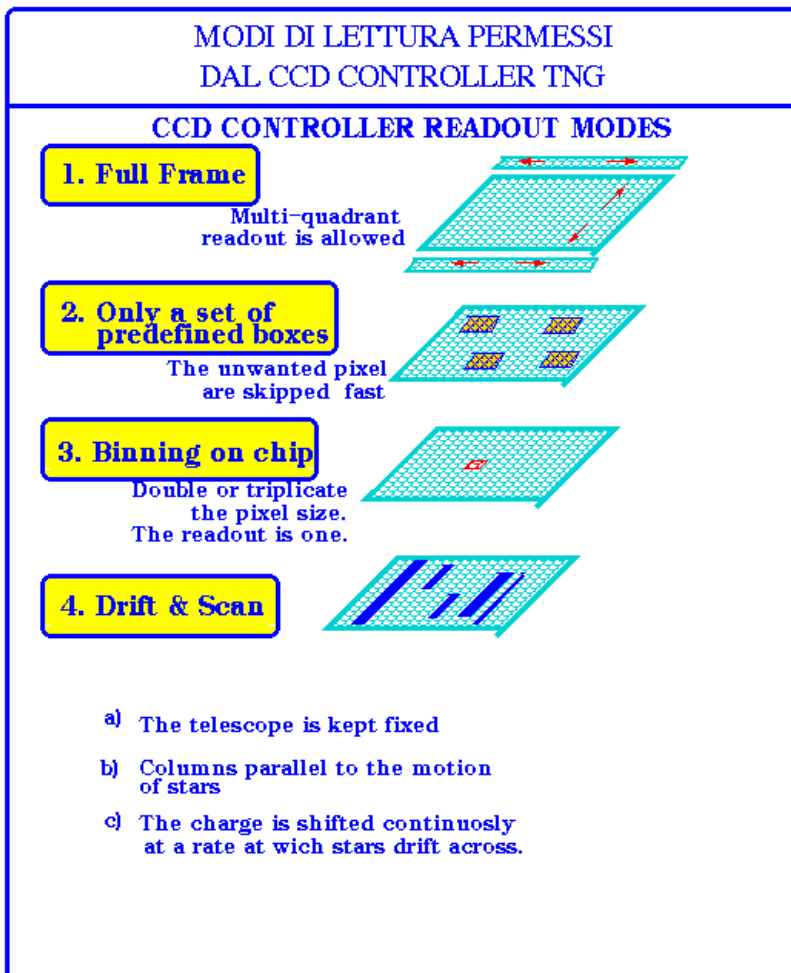
Per un CCD che avesse un **rumore di 5 e<sup>-</sup> r.m.s.** e una carica di saturazione di 250000 e<sup>-</sup>, la configurazione riportata nella tabella in basso sarebbe perfetta.

## 7.5. Modi di lettura disponibili con il CCD controller TNG

Un'importante caratteristica che deve avere un controller CCD è quella di poter ottimizzare le osservazioni di oggetti stellari, per esempio acquisendo solo determinate aree di CCD, leggendo ogni 2 o più pixel per aumentare il rapporto segnale/rumore (a scapito della risoluzione geometrica), e così via. Tutto ciò in termini di controller si traduce nel poter spostare e leggere la carica dei pixel in vari modi.

Il controller CCD del progetto TNG permette diversi modi di lettura:

- 1) intera immagine (full frame);
- 2) solo un set di sottoaree predefinite, spostando velocemente i pixel non desiderati;
- 3) "Binning on Chip", leggendo ogni 2 o più pixel;
- 4) lettura sincronizzata con impulsi esterni, ovvero "Drift & Scan".



Nel **primo** modo è inclusa la possibilità di leggere la carica non solo da una uscita ma da tutte le uscite permesse dal chip (es.: lettura dei 4 quadranti).

Il **secondo** è utile quando si vogliono osservare solo determinati oggetti del campo stellare, risparmiando tempo e memoria di massa.

Il **terzo** modo è molto utile nell'osservazione fotometrica di oggetti debolissimi, ed ancora più utile per osservazioni spettrografiche di oggetti deboli, dato che il segnale, già debole, viene anche disperso.

Infine, il **quarto** modo è molto utile nelle *osservazioni astronomiche*.

Infatti, questo modo di lettura permette di osservare come se si disponesse di un rivelatore con un'area illimitata nella direzione dello scorrimento della carica. Tale modo è costituito dalla seguente procedura: **a)** il telescopio viene tenuto fisso; **b)** il CCD viene orientato in modo da avere la direzione dello scorrimento parallela al movimento delle stelle; **c)** la carica viene fatta scorrere tramite un impulso esterno. Tale impulso stabilisce quando è il momento di spostare una riga di pixel nel registro di lettura e leggerla.

## 8. ALCUNI RISULTATI SPERIMENTALI

- 8.1. Uniformità nel Visibile e nell'UV per diversi tipi di CCD
- 8.2. Efficienza quantica nel range 2000 - 11000 Å
- 8.3. Efficienza quantica nel range 250 - 2500 Å
- 8.4. Efficienza quantica, problemi nel range 250 - 2500 Å
- 8.5. Efficienza quantica nel range 3000 - 11000 Å per uno dei CCD di TNG ottenute da Lesser
- 8.6. Efficienza quantica nel range 1400 - 10500 Å per un CCD Loral trattato con la tecnica della "catalizzazione" (assorbimento chimico)
- 8.7. Efficienza quantica misurata nel range 3500 - 10500 Å per due CCD del TNG (laboratorio COLD dell'Osservatorio di Catania)
- 8.8. Coefficiente di assorbimento in funzione della temperatura

## 8.1. Uniformità nel Visibile e nell'UV per diversi tipi di CCD

Utilizzando l'apparato per le misure di uniformità (vedi par.4.21) ed alcune tecniche di elaborazione delle immagini, è stata determinata l'uniformità della risposta di tre tipi di CCD.

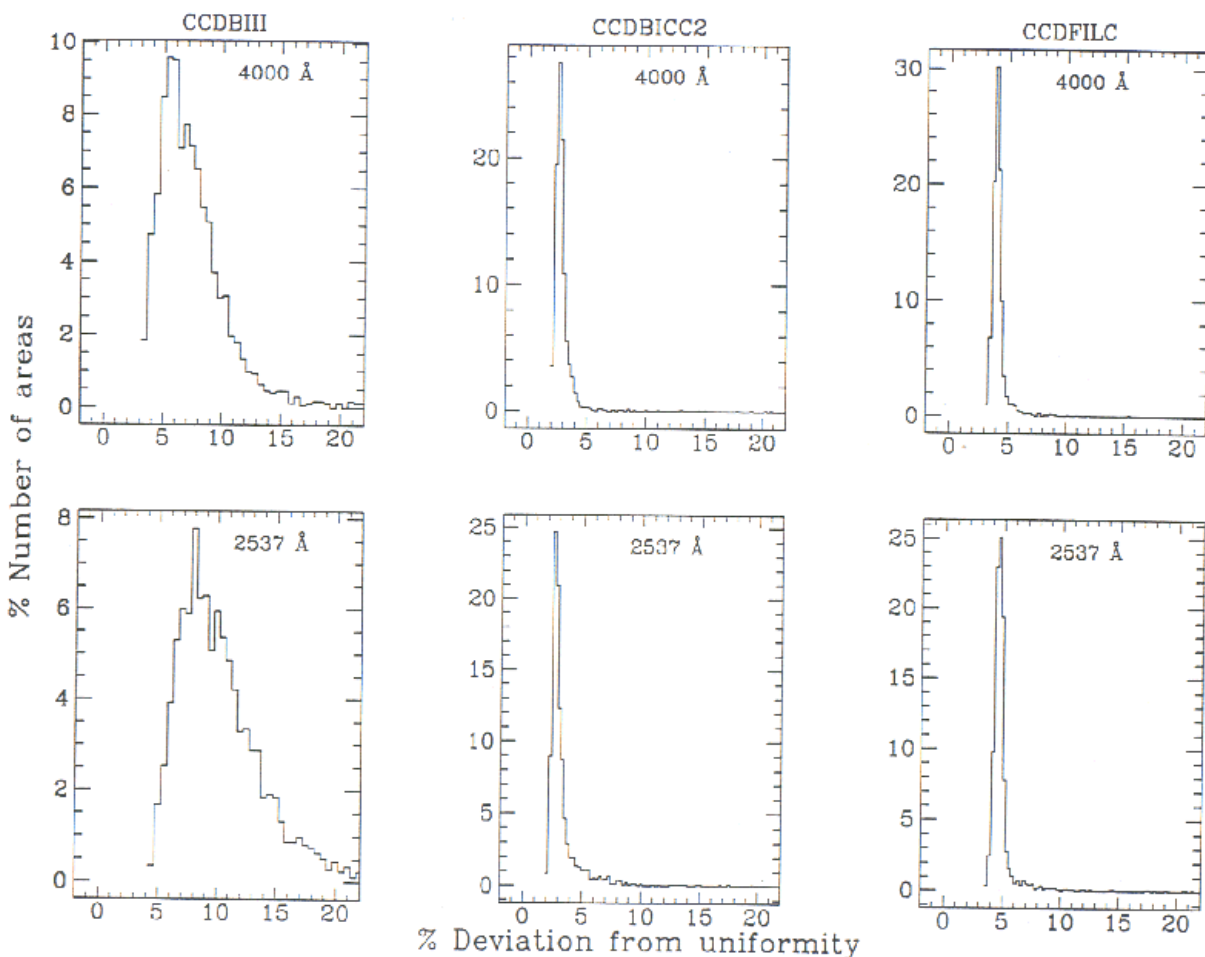
Un CCD "front-illuminated", trattato con lumigen, chiamato **CCDFILC**.

Un CCD illuminato da dietro e trattato con *coronene*, chiamato **CCDBICC2**.

Un CCD illuminato da dietro e trattato con impiantazione ionica, chiamato **CCDBIII**.

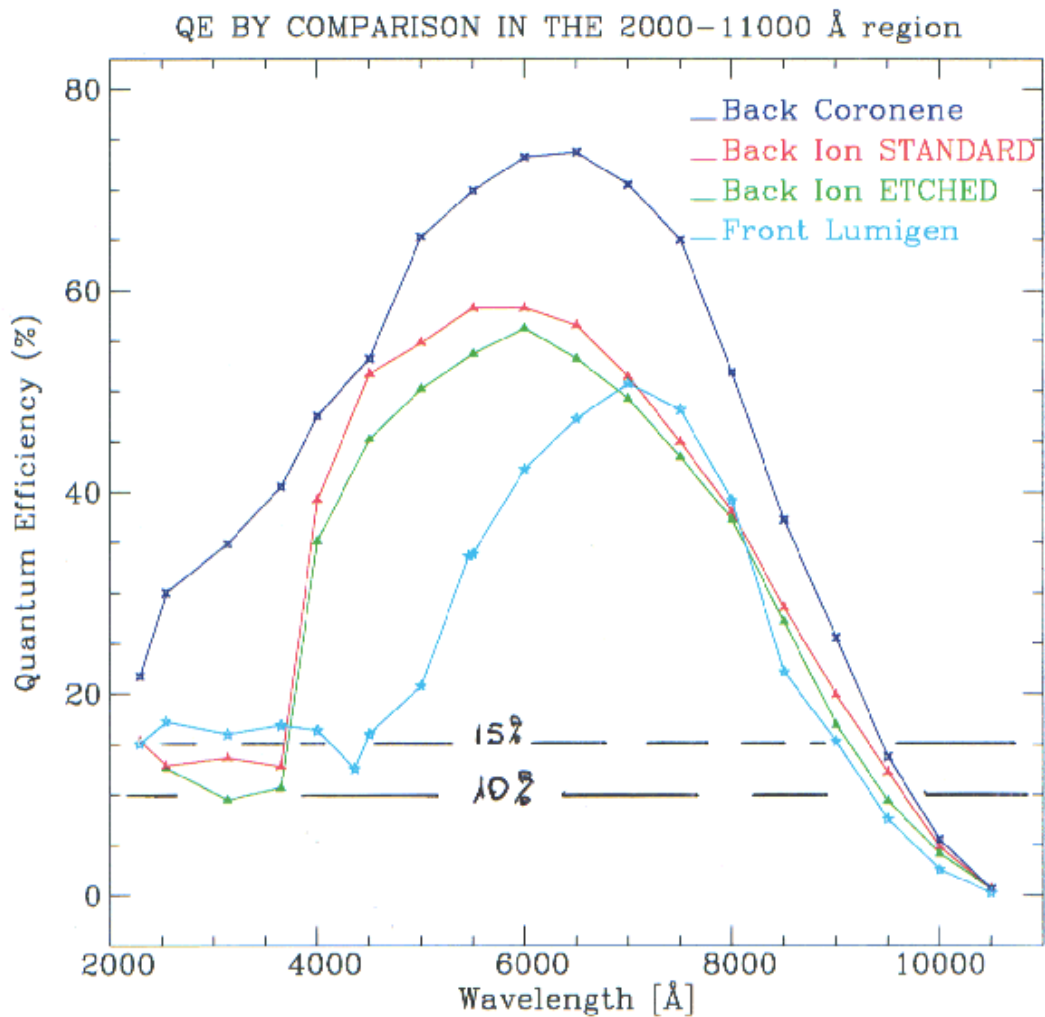
In questa figura sono riportati i risultati a due lunghezze d'onda ben precise e cioè a **4000 Å** e a **2537 Å**. Sono state prese diverse immagini illuminando i CCD attraverso una sfera integratrice (vedi fig.4.21) e ciascuna immagine è stata divisa in tante sotto-immagini da  $20 \times 20$  pixel. Per ogni sotto-immagine è stata calcolata la media e la deviazione standard. Nel grafico è stata riportata la percentuale di aree in funzione della disuniformità, intesa come due volte la deviazione standard rispetto alla media ( $2\sigma/m$ ).

Come si vede, il CCD illuminato da dietro, alle lunghezze d'onda dette, mostra una migliore uniformità rispetto agli altri due tipi di CCD.



## 8.2. Efficienza quantica nel range 2000 - 11000 Å

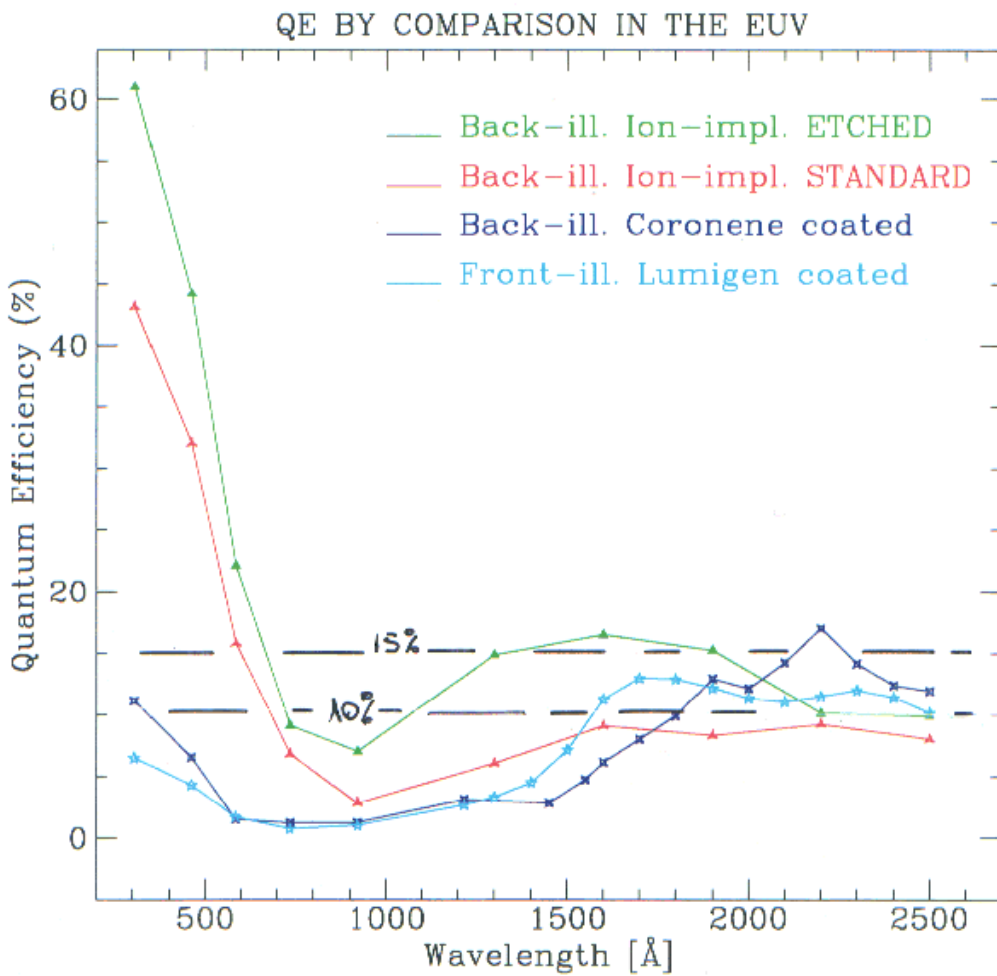
Le misure di efficienza quantica sui sensori detti prima, sono state fatte con l'apparato descritto in precedenza (vedi par. 4.8), ed i risultati sono mostrati in questa figura. Nella zona tra 4000 e 2000 Å l'efficienza quantica di tali rivelatori è compresa tra il 15 ed il 40%, mentre nel visibile (4000 - 5500 Å) si osserva il comportamento tipico dei rivelatori CCD, e risalta la differenza tra i due tipi di CCD (fronte e retro-illuminato).



### 8.3. Efficienza quantica nel range 250 - 2500 Å

Le misure di efficienza quantica nella zona tra 300 e 2500 Å sono state fatte in condizioni di vuoto (dato l'assorbimento, dovuto all'aria, della radiazione al di sotto di 1800 Å).

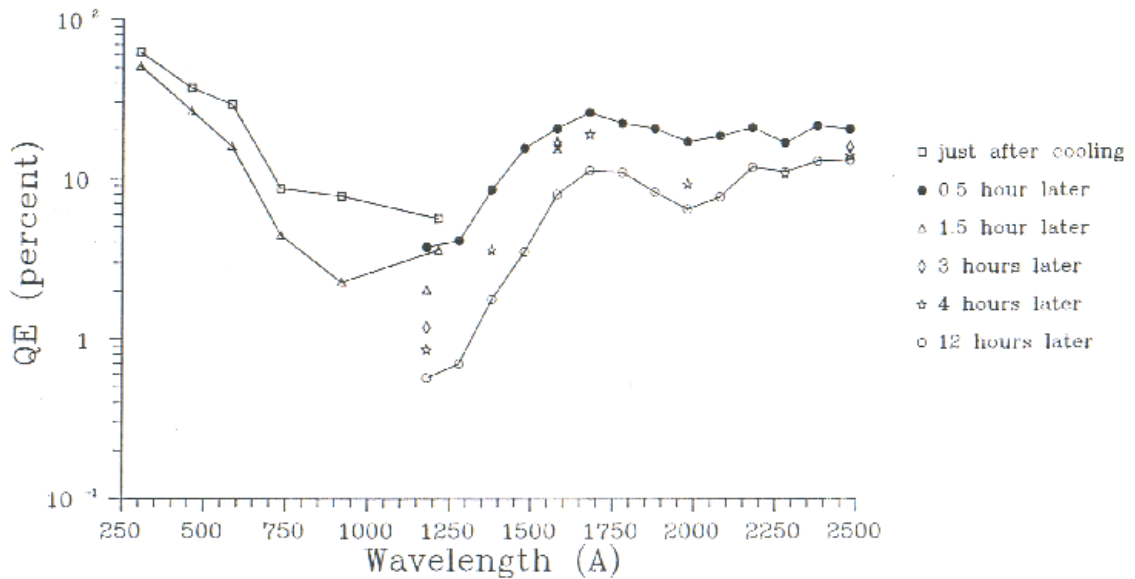
Nella regione tra 300 e 700 Å si misura una efficienza quantica superiore al 30%, con un massimo di 70% a 300 Å, dimostrando quindi che la profondità di assorbimento risale a queste lunghezze d'onda e che tale rivelatore può essere usato nell'Estremo Ultra-Violetto (EUV).





## 8.4. Efficienza quantica, problemi nel range 250 - 2500 Å

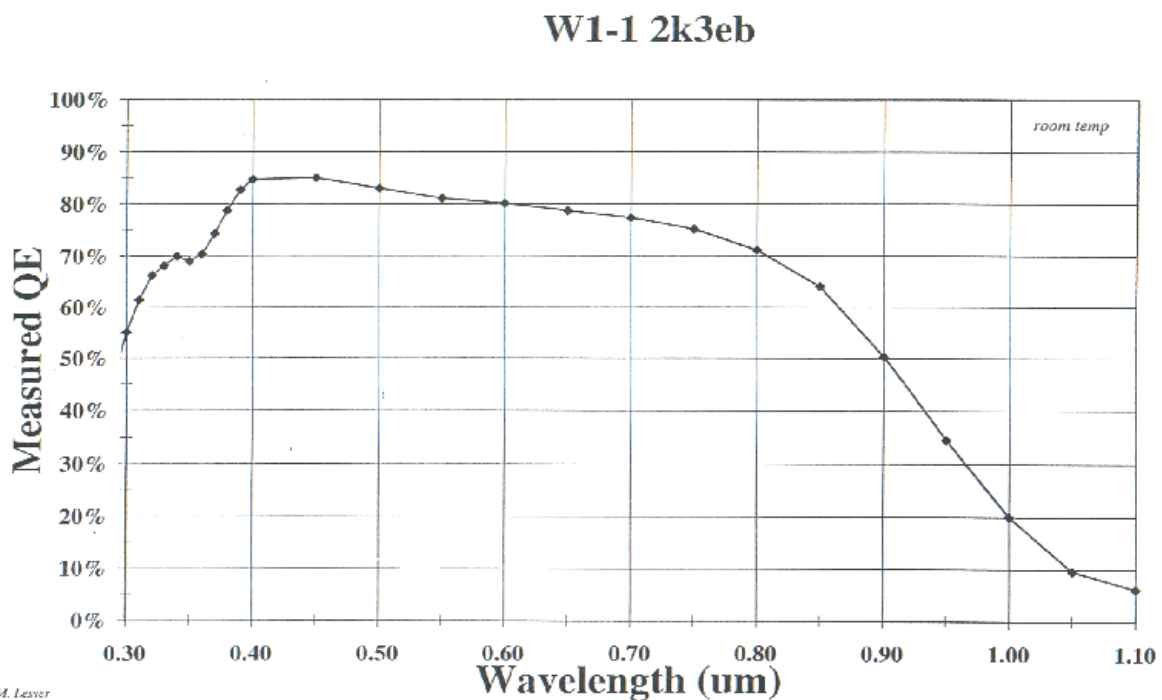
In questa figura viene mostrato un interessante fenomeno: durante le misure di efficienza quantica su un CCD assottigliato e retro-illuminato sono state osservate delle instabilità nella risposta in funzione del tempo. Questo effetto è stato studiato ampiamente in vari laboratori, oltre che nel nostro, ed è dovuto a sostanze dette "contaminanti", che non vengono completamente evacuate dall'apparato da vuoto e che si vanno a depositare sul CCD, dal momento che questo è raffreddato a -130 °C.



## 8.5. Efficienza quantica nel range 3000 - 11000 Å per uno dei CCD di TNG ottenute da Lesser

In questa figura vengono riportate le misure di efficienza quantica condotte nel laboratorio di caratterizzazione dello Steward Observatory, su uno dei CCD (a temperatura ambiente) da utilizzare per la camera fotometrica del TNG. Si tratta di un CCD assottigliato e retro-illuminato, e la superficie sensibile è stata trattata con la tecnica descritta nel paragrafo 5.7 (“catalizzazione C”).

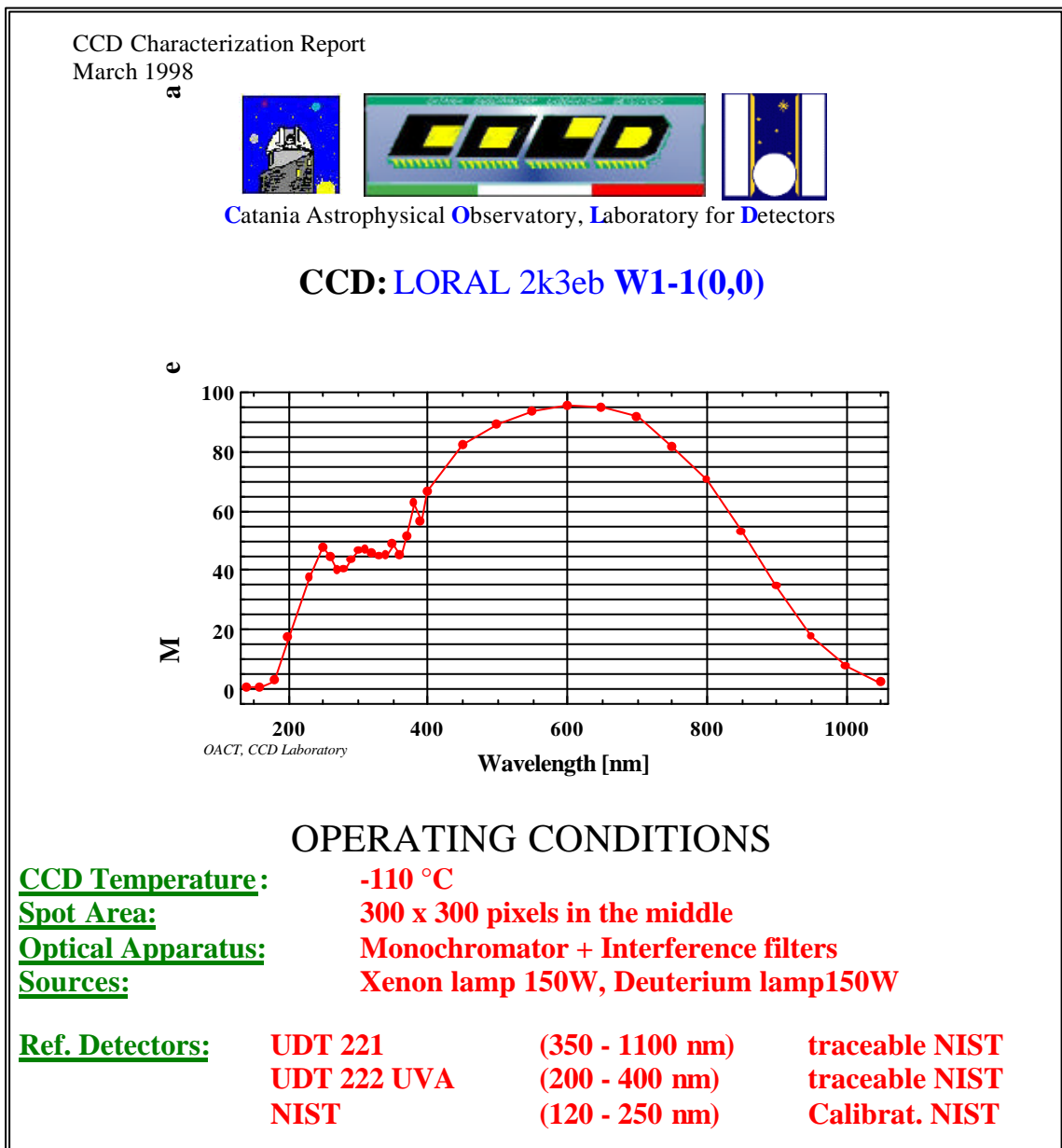
Come si vede, questo CCD ha un'elevata efficienza nella zona blu-visibile, con un picco di 85% a 4000 Å. Notevoli le percentuali a 3500 Å (75%) e a 9500 Å (50%).



## 8.6. Efficienza quantica nel range 1400 - 10500 Å per un CCD Loral trattato con la tecnica della “catalizzazione” (assorbimento chimico)

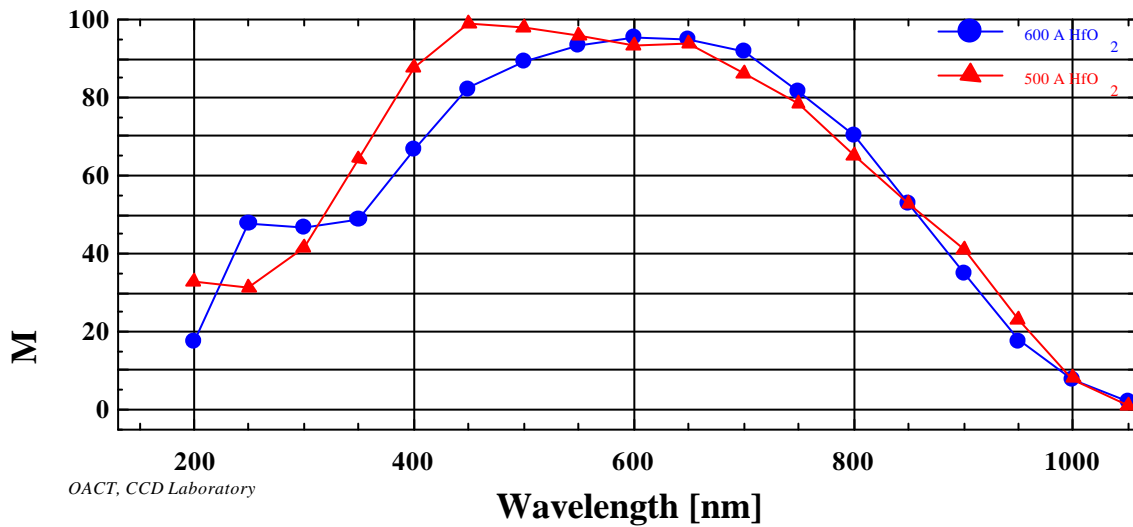
A conferma di quanto misurato nei laboratori dello Steward Observatory, ecco in questa figura il grafico riguardante le misure effettuate presso il laboratorio rivelatori dell'Osservatorio Astrofisico di Catania. Come si vede, l'efficienza quantica di questo rivelatore ha il massimo (95%) a 600 nm, ed è maggiore dell'80% negli intervalli 450-600 nm e 600-750 nm. Ottimi anche i valori di efficienza quantica a 350, 400, 800, 900 e 950 nm.

Si nota una leggera discrepanza dei dati nella regione del vicino Infrarosso: l'efficienza quantica è più bassa ad una temperatura di funzionamento più bassa. Il motivo di questa discrepanza è dovuto alla differente temperatura di funzionamento, ed è spiegato nel paragrafo 8.8.



## 8.7. Efficienza quantica misurata nel range 3500 - 10500 Å per due CCD del TNG (laboratorio COLD dell'Osservatorio di Catania)

In questa figura sono mostrate le misure di efficienza quantica per due differenti tipi di CCD trattati con la tecnica della catalizzazione mediante Cu. La differenza sostanziale tra i due trattamenti sta nello spessore di HfO<sub>2</sub>.



Come si vede, lo spessore di ossido influenza il picco di efficienza quantica: una differenza di 100 Å di spessore fa spostare il picco di efficienza quantica verso il blu.

a

s

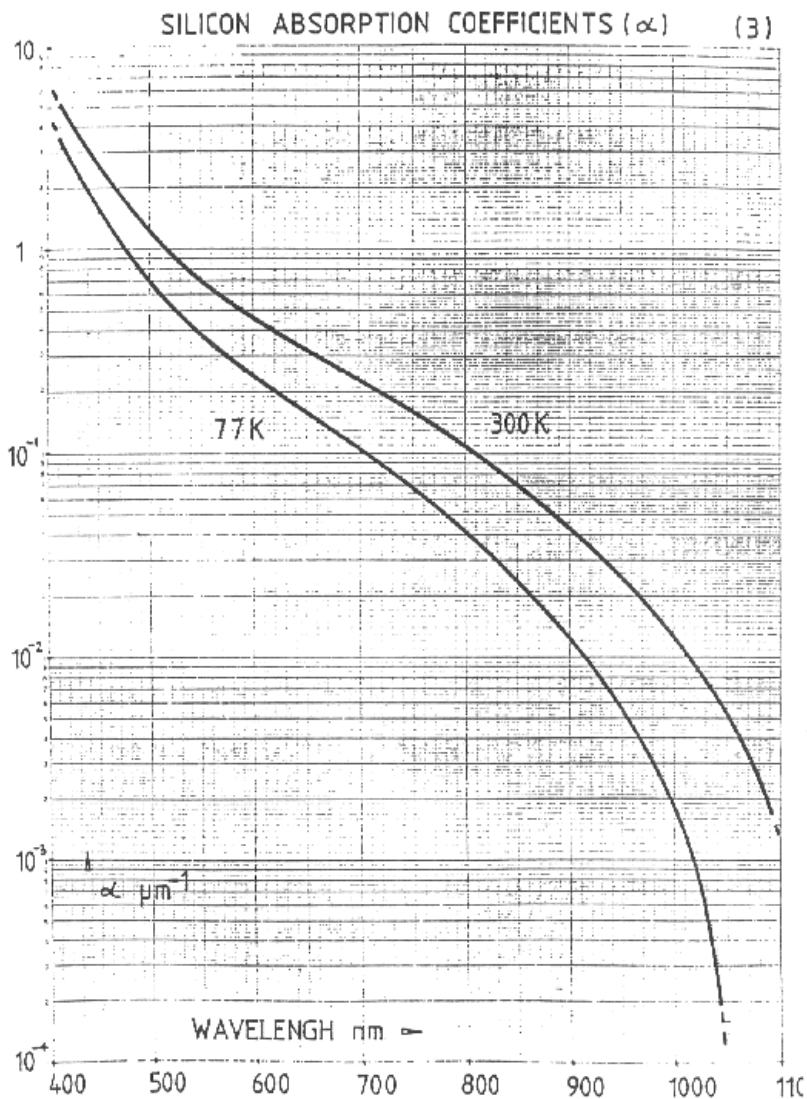
## 8.8. Coefficiente di assorbimento in funzione della temperatura

La riduzione di efficienza quantica a basse temperature è una proprietà fondamentale dell'assorbimento della radiazione nel Silicio. Essa è dovuta essenzialmente all'aumento della "bandgap" e ad una riduzione dei fononi necessari per la transizione indiretta. Questa figura mostra il coefficiente di assorbimento a temperatura ambiente e alla temperatura dell'azoto liquido. Da questi grafici si può derivare la differenza di efficienza quantica alle due temperature. La formula è:

$$eq = T_{\lambda} \times [1 - e^{-\alpha L_D} / 1 + \alpha L_0]$$

dove:

$\alpha$  è il coefficiente di assorbimento,  $L_D$  è la profondità della buca di potenziale,  $L_0$  è la lunghezza della diffusione elettronica,  $T_{\lambda}$  è la trasmissione dell'elettrodo.



## **9. RIVELATORI BIDIMENSIONALI PER LA BANDA 1-5 mm**

- 9.1. Differenti tecnologie di realizzazione: InSb, HgCdTe, PtSi
- 9.2. Confronto fra le tre tecnologie
- 9.3. Lettura della carica
- 9.4. Tecniche di lettura più usate per questi rivelatori

## 9.1. Differenti tecnologie di realizzazione: InSb, HgCdTe, PtSi

Lo sviluppo dei rivelatori bidimensionali per l'Infrarosso (range 1-5  $\mu\text{m}$ ) ha avuto inizio nel 1970 presso la General Electric, dove è stato prodotto un rivelatore a InSb di  $32 \times 32$  pixel. Attualmente esistono tre differenti tipi di tecnologia per realizzare rivelatori infrarossi:

1. Antimoniuro d'Indio **InSb**
2. Mercurio Cadmio Tellurio **HgCdTe**
3. Siliciuro di Platino **PtSi**

Allo stato attuale si riescono a produrre agevolmente matrici di  $256 \times 256$  pixel, ed esistono prototipi di sensori da  $1024 \times 1024$  pixel.

Poiché è difficile realizzare strutture di lettura nello stesso materiale utilizzato per la foto-rivelazione, questi rivelatori vengono realizzati in una forma "ibrida", ovvero sono l'unione di due materiali: uno dove avviene l'effetto fotoelettrico e l'altro (Silicio) utile per la lettura della carica.

I due materiali sono messi "in comunicazione" mediante piazzole di Indio, come si può notare in questa figura. In basso sono riportati in dettaglio gli schemi per ciascuna tecnologia.

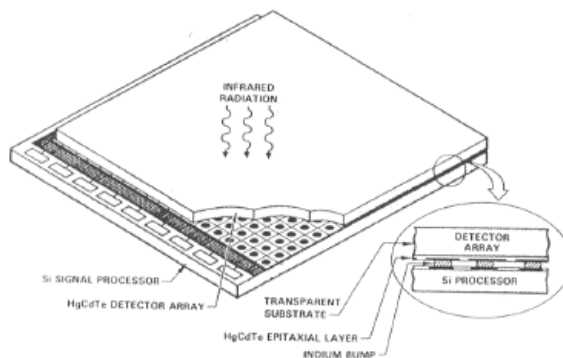


Fig. 1. Hybrid focal plane array architecture.

Nella parte superiore della figura è mostrata la struttura di un rivelatore HgCdTe, nel dettaglio si possono individuare gli elementi principali: un substrato trasparente di Zaffiro, uno strato di HgCdTe ottenuto per crescita epitassiale e le piazzole di Indio che connettono i vari pixel al "multiplexer", che deve poi leggere la carica.

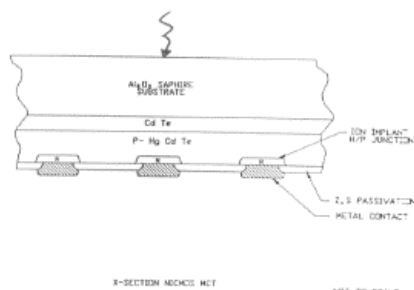


Figure 2. HgCdTe detector cross section

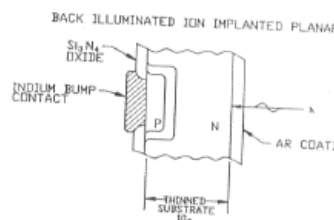
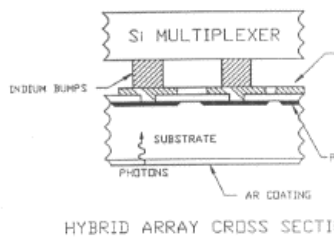


Figure 4. InSb detector cross-section

Le tre tecniche hanno in comune lo stesso principio, e cioè quello di realizzare delle giunzioni p-n che possono essere polarizzate e lette in qualsiasi maniera.

## 9.2. Confronto fra le tre tecnologie

In questa tabella sono riportate le caratteristiche principali dei tre rivelatori.

Come si può notare, il **PtSi** riesce ad essere sensibile fino a 5  $\mu\text{m}$ , ma l'efficienza quantica non è minimamente paragonabile a quella degli altri due rivelatori. D'altra parte l'**InSb** ha un'efficienza maggiore di quella dell'**HgCdTe**, ed il range è più esteso. La differenza principale tra il rivelatore **HgCdTe** e quello a **InSb** è che il primo può lavorare ad una temperatura più elevata dell'altro. Il motivo per cui è stato scelto il NICMOS come rivelatore infrarosso per HST sta proprio nel fatto che il NICMOS ha una corrente di fondo (dark) più bassa (minore di 0.1  $\text{e}^-/\text{sec}$ ) ad una temperatura di 60 - 70 K, rispetto al rivelatore a InSb (0.5  $\text{e}^-/\text{sec}$ ) ad una temperatura di 35 - 45 K.

Ma da Terra il rivelatore a InSb può vantare una efficienza quantica senza paragoni. Tale rivelatore deve l'elevata efficienza all'elevato coefficiente di assorbimento (circa  $10^4$ ) che permette di creare la coppia elettrone-buca nei primi 1-2  $\mu\text{m}$  di materiale.

DETECTORS FOCAL PLANE CHARACTERISTICS			
	<b>Hughes 256<sup>+</sup>256 PtSi</b>	<b>Rockwell 256<sup>+</sup>256 NICMOS III</b>	<b>SBRC 256<sup>+</sup>256 InSb</b>
<b>HFWPA structure</b>			
Format	1×256×256	4×128×128	1×256×256
Pixel size	30 $\mu\text{m}^2$	40 $\mu\text{m}^2$	30 $\mu\text{m}^2$
Effective Fill Factor	~ 100%	~ 100%	~ 100%
Readout Type	NMOS Direct Readout (2 outputs)	CMOS Direct Readout (1 output/quadrant)	PMOS Direct Readout (4 outputs)
IR Sensor	PtSi Schottky Barrier	PACE1 MCT	Thinned InSb
Wavelength range	1 - 5 $\mu\text{m}$	1 - 2.5 $\mu\text{m}$	0.8 - 5 $\mu\text{m}$
<b>HFWPA Performance</b>			
Operating Temperature	40 - 50 K	60 - 77 K	35 - 45 K
Dark Current	< 1 $\text{e}^-/\text{s}$ @ 40 K < 20 $\text{e}^-/\text{s}$ @ 50 K	To Be Determined	< 0.5 $\text{e}^-/\text{s}$
Noise	< 60 $\text{e}^-$ r.m.s.	29 - 30 $\text{e}^-$ r.m.s.	< 26 $\text{e}^-$ r.m.s.
Quantum Efficiency	~ 6.7% @ 1.2 $\mu\text{m}$ ~ 5.5% @ 1.65 $\mu\text{m}$ ~ 3.3% @ 2.2 $\mu\text{m}$ ~ 0.6% @ 3.3 $\mu\text{m}$ ~ 0.35% @ 4.0 $\mu\text{m}$ ~ 0.1% @ 5.0 $\mu\text{m}$	~ 32% @ 1.2 $\mu\text{m}$ 41% @ 1.65 $\mu\text{m}$ 45% @ 2.2 $\mu\text{m}$	>90% 1 - 2.2 $\mu\text{m}$ ~ 80% @ 3.3 $\mu\text{m}$



### 9.3. Lettura della carica

Come detto in precedenza, i tre tipi di rivelatori usano lo stesso principio, e cioè quello di leggere la carica con appositi “multiplexer” che vengono realizzati in tecnologia NMOS (MOS a canale N), PMOS (MOS a canale P), CMOS (Complementary MOS). L’approccio più utilizzato è quello dello “Shift Register” o “multiplexer” che seleziona ciascun pixel ricevendo una sequenza di segnali.

Nella figura sono mostrati due tipi di lettura: uno a “source follower per detector” (ovvero per ciascun pixel) e l’altro a “direct-injection”.

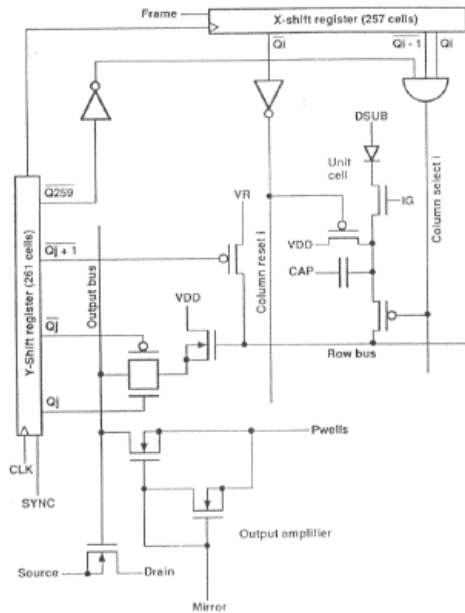


Fig. 8. 256 x 256 direct-injection readout circuit schematic.

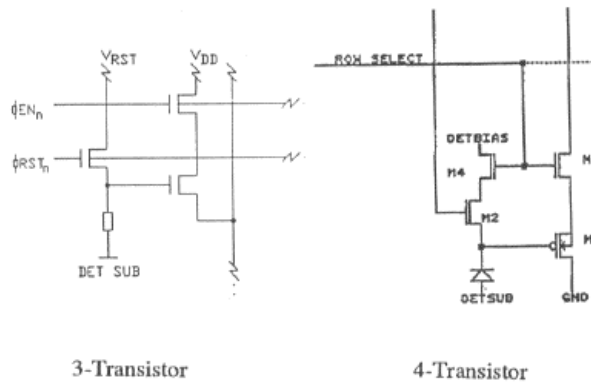


Figure 7. Source follower per detector designs

## 9.4. Tecniche di lettura più usate per questi rivelatori

In questa figura vengono mostrati vari tipi di lettura paragonati al tipo di lettura tradizionale, ovvero quello di integrare il segnale e leggere resettando. Si è osservato che il modo di lettura tradizionale produce una non-uniformità nel fondo. Allora sono stati escogitati diversi metodi per leggere la carica. La tecnica chiamata “Reset-Read-Read”, che consiste nel leggere la carica n volte tra un reset e l’altro migliora l’uniformità del dark ed il rumore di lettura del rivelatore. Invece la tecnica “Multi Correlated Sampling (MCS)” produce un miglioramento della **radice quadrata di N**.

