I *CHARGED COUPLED DEVICES* (CCD)

Emanuele Pace

Versione: 22 Novembre 2004

1. GENERALITÀ 3

2. i ccd come fotorivelatori 12

3. Parametri elettro-ottici 16

3.1 FATTORE DI CONVERSIONE E RUMORE DI LETTURA 17
3.2 EFFICIENZA QUANTICA 22
3.3 EFFICIENZA DELLA RACCOLTA DI CARICA (CCE) 25
3.4 EFFICIENZA DI TRASFERIMENTO DELLA CARICA 28
3.5 RISOLUZIONE SPAZIALE 30
3.6 LINEARITÀ E UNIFORMITÀ DELLA RISPOSTA 30
3.7 RANGE DINAMICO 33

4. Rumore nei sistemi con CCD 34

4.1 RUMORE DEL CCD 34
Corrente di buio 34
Carica spuria 36
Fixed pattern noise 38
4.2 RUMORE DELL'AMPLIFICATORE 38
Rumore termico 38
Rumore KTC o rumore di reset 40
Rumore del sistema di controllo 42
4.3 CARATTERISTICHE QUALITATIVE DEL CCD COME RIVELATORE DI IMMAGINI 44

1. GENERALITÀ

I charge coupled devices (CCD) sono dispositivi nati nel 1970 nel tentativo di ottenere dei dispositivi di memoria. Le informazioni venivano immagazzinate mediante la raccolta di carica elettrica in "pacchetti" distinguibili che venivano poi trasferiti, attraverso l'area del dispositivo, ad un unico nodo di lettura.

I meccanismi di raccolta e trasferimento della carica possono essere facilmente compresi facendo riferimento dapprima all'elemento principale del CCD: la struttura metallo-isolante-semiconduttore, denominata *condensatore MOS*. Il CCD infatti è costituito da un numero elevato di questi condensatori disposti in forma di matrice n x m.

In Figura 1 è riportato un disegno schematico di un elemento MOS. Sopra un substrato di silicio cristallino drogato con atomi accettori (di solito fosforo), dello spessore di 200-300 μm, viene depositato un sottile strato di ossido di silicio (SiO_2) di spessore 0.1 μm, la cui funzione è di isolare il substrato di silicio dall'elettrodo metallico, spesso 0.5 μm, depositato sopra lo strato di ossido. Nella figura è riportata anche la disposizione dei livelli di energia che si crea nella giunzione dei tre materiali, rispetto al livello di Fermi.

Applicando un potenziale esterno ai capi dell'elettrodo metallico e del substrato si nota che la buca di potenziale presente alla giunzione Si-SiO_2, aumenta notevolmente.

Infatti il substrato di silicio contiene una distribuzione uniforme di lacune e nel momento in cui si applica il potenziale esterno, le lacune che si trovano in prossimità dell'elettrodo, positivo rispetto al substrato, tendono ad allontanarsi, creando una cosidetta *zona di svuotamento*, associata ad una buca di potenziale per gli elettroni (portatori minoritari).

Aumentando il valore della differenza di potenziale applicata al condensatore MOS, si aumenta la profondità della buca di potenziale e si amplia quindi la zona di svuotamento. Questo processo non è illimitato: per un certo valore del potenziale, la buca è così profonda che il campo elettrico associato riesce ad attirare gli elettroni verso la buca e quindi a raccoglierli presso la giunzione Si-SiO_2 (minimo della buca di potenziale). Si forma così uno

strato di elettroni che viene chiamato *strato di inversione* e che non consente alla buca di essere più profonda.

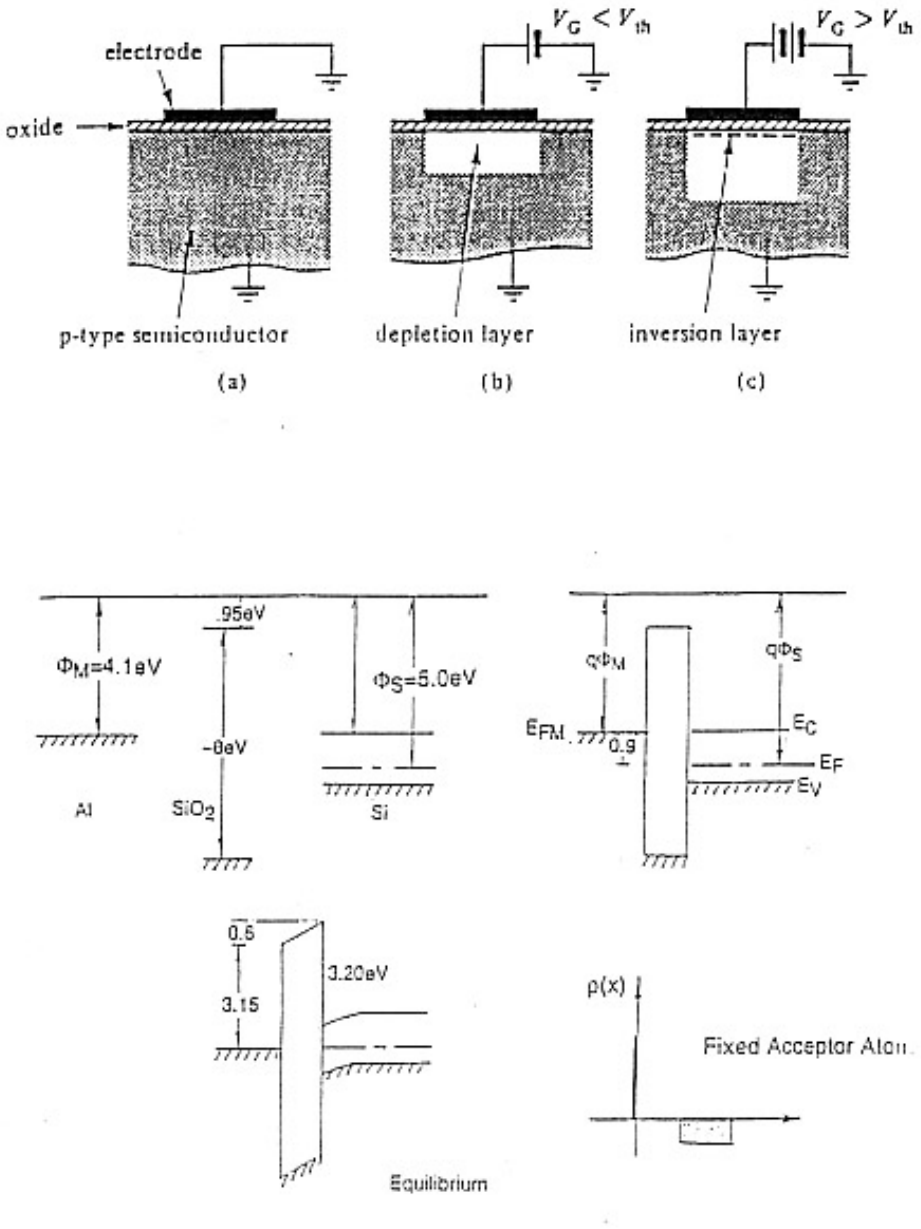

Figura 1 (A) Funzionamento di un condensatore MOS. La sua struttura (a), è tale che fornendo un potenziale VG all'elettrodo (b) si crea una zona di svuotamento; aumentando il potenziale oltre la soglia Vth si ottiene lo strato di inversione (c). (B) Disposizione dei livelli e distribuzione di carica nella giunzione metallo-ossido (isolante)-semiconduttore (tipo p).

Nel caso che, per qualche meccanismo esterno al condensatore MOS, si creino altri portatori liberi, questi verranno immediatamente attirati verso la zona di svuotamento, aumentando la carica negativa raccolta e diminuendo di conseguenza la profondità della buca di potenziale.

Se si riuscisse a raffeddare a bassa temperatura la struttura MOS, pur applicando un potenziale alto (circa 10-20 Volt) non si otterrebbe lo strato di inversione in quanto i portatori minoritari non hanno sufficiente energia per liberarsi. Tuttavia se si verificasse un fenomeno esterno grazie al quale si riuscisse ad avere degli elettroni liberi, si avrebbe nuovamente accumulo di carica nella zona di svuotamento sotto l'elettrodo e la quantità raccolta dipenderebbe esclusivamente dal tipo di fenomeno che l'ha prodotta.

In Figura 2 è mostrato cosa accade ad una struttura MOS qualora si porti a 10 V il potenziale dell'elettrodo rispetto al substrato di silicio, mantenuto al potenziale di terra. Nel momento in cui una carica di 100 nc/cm^2 viene accumulata nella zona di giunzione Si-sio$_2$, la profondità della buca di potenziale diminuisce da 8 V a 5.5 V.

La misura della quantità di carica raccolta non avviene sul singolo condensatore MOS, ma trasferendo il "pacchetto" di elettroni attraverso più condensatori contigui fino ad un unico nodo di lettura. Questo metodo ha il vantaggio di avere una sola elettronica adibita alla misura della carica, piuttosto che una per ogni condensatore che forma il CCD.

Facendo riferimento alla Figura 3 si immagini di porre su un unico substrato di silicio di tipo p quattro elettrodi vicini. Si supponga quindi di porre un elettrodo a 10 V e gli altri a 0 V. Al di sotto dell'elettrodo polarizzato a 10 V, si forma la zona di svuotamento che attrae tutt gli eventuali portatori minoritari che vengono liberati nel substrato si silicio. Terminato il tempo dedicato all'accumulo di carica, si procede al trasferimento, che si ottiene abbassando gradualmente il potenziale da 10 V a 0 V sull'elettrodo di raccolta e contemporaneamente

innalzando da 0 V a 10 V il potenziale sull'elettrodo contiguo. Il pacchetto di carica viene così spostato gradualmente da una zona di svuotamento a quella dell'elettrodo vicino.

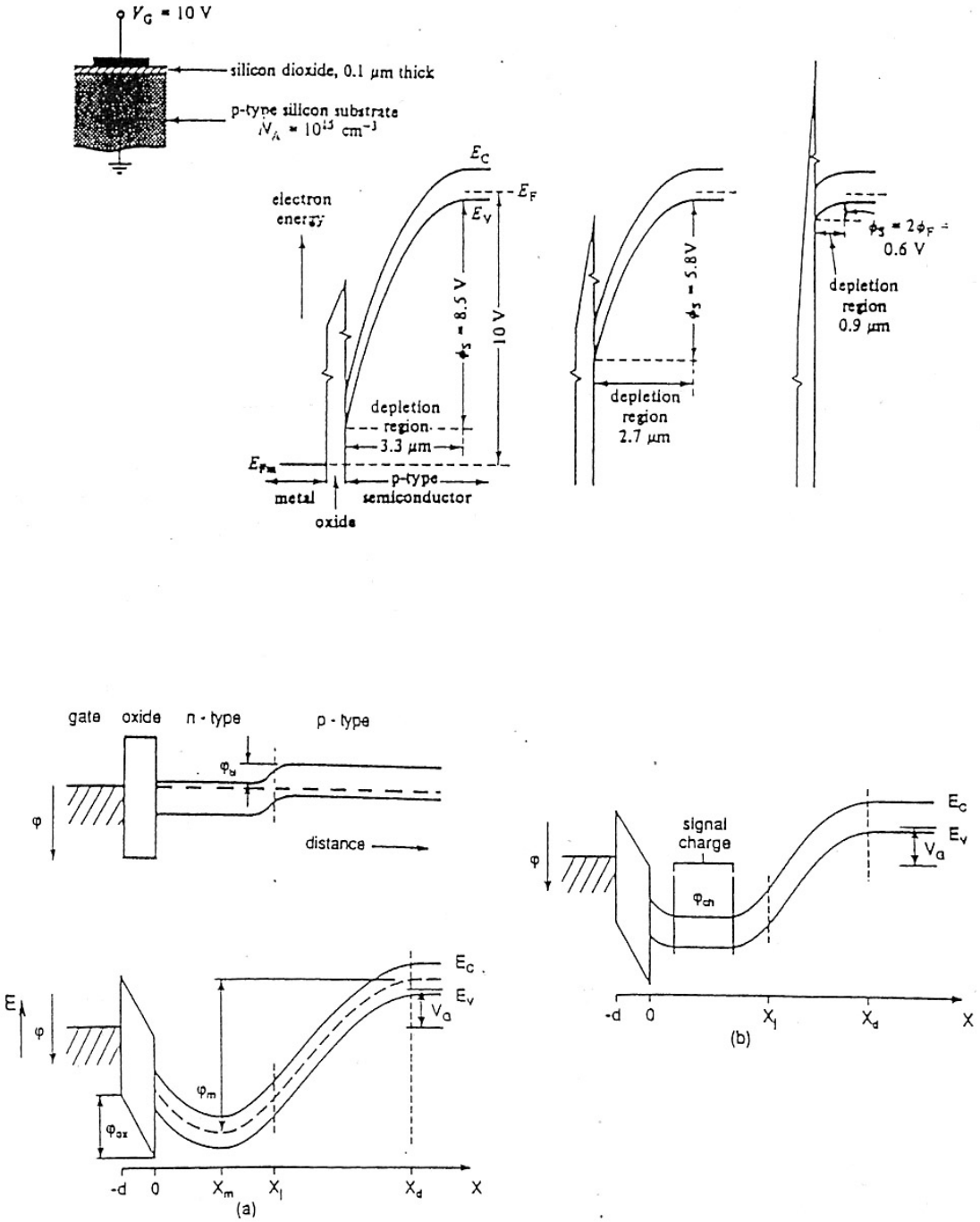

Figura 2 Disposizione dei livelli energetici in un *surface channel CCD* (in alto) e di un *buried channel CCD* (in basso).

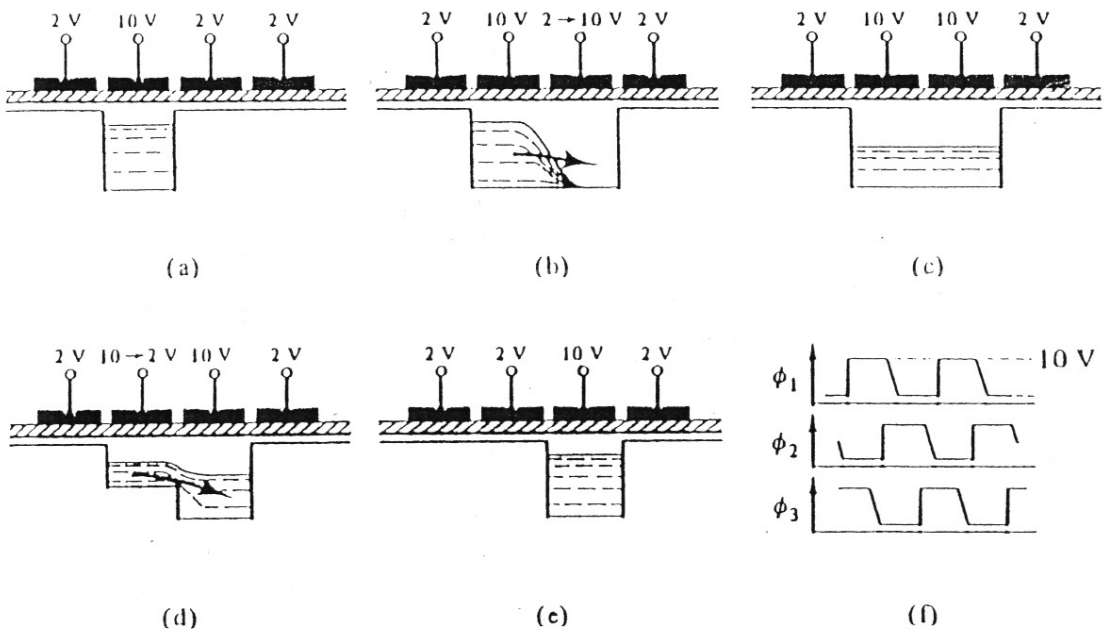

Figura 3 Trasferimento della carica: (a) la carica raccolta sotto un elettrodo viene trasferita all'elettrodo successivo (e) mediante tre passaggi (b,c,d) ottenuti con una opportuna modulazione dei potenziali (f).

Applicando più volte questa tecnica si fa in modo che ciascun pacchetto di carica trasli sotto numerosi elettrodi. In generale questo processo è molto efficiente e consente di trasferire la carica in modo controllato, anche su distanze di 1-2 cm. E' importante però fare in modo che i potenziali sugli elettrodi siano opportunamente modulati (e per quasto vengono chiamati *fasi*) per raccogliere e trasferire correttamente la carica senza alcuna perdita.

In Figura 4 è mostrato come vengono organizzati i vari condensatori MOS che formano l'intera matrice del CCD. Si considerino tre elettrodi contigui disposti lungo una particolare direzione. Ponendo, ad esempio, a 10 V l'elettrodo centrale e a 0 V i due laterali, la zona di svuotamento risulta ben delimitata, così che gli elettroni raccolti siano ben confinati. Inoltre per evitare la dispersione della carica nella direzione ortogonale a quella definita dagli elettrodi, si dispongono parallelamente ad essi due strisce sottili di impiantazione di lacune ad alta concentrazione, dette *channel stops*.

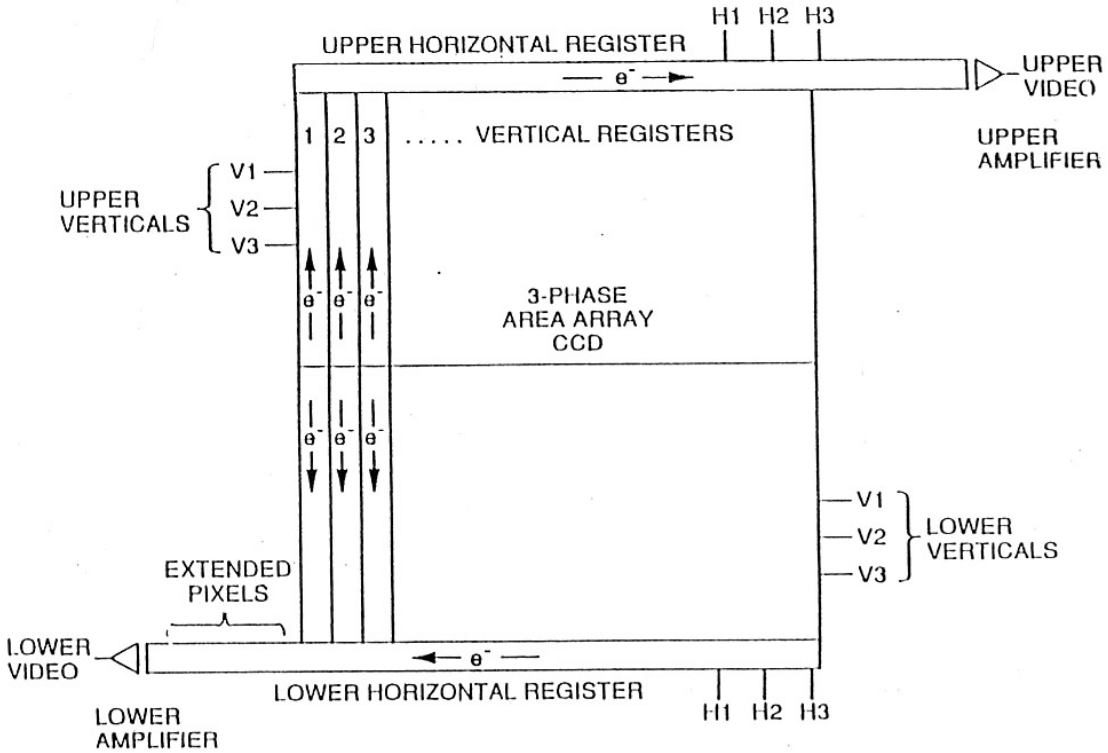

Figura 4 Organizzazione di una matrice CCD. L'area sensibile è divisa in due zone e in ciascuna di esse i pacchetti di elettroni vengono trasferiti verticalmente ad un registro di lettura e da questo orizzontalmente ad un amplificatore di uscita.

Modulando fra 10 e 0 V, secondo un'opportuna sequenza temporale, i potenziali dei tre elettrodi, si riesce a traslare la carica in uno dei due versi lungo la direzione definita dagli elettrodi. La struttura sin qui descritta viene denominata *pixel*.

Affiancando in forma matriciale n x m pixels, si ottiene il CCD. I potenziali dei tre elettrodi sono comuni a tutti i pixels: in questo modo quando l'elettrodo centrale è a 10 V, lo è in tutti i pixels e ciascuno di essi può raccogliere carica. Modulando i tre potenziali, tutti i pacchetti si muovono da un pixel all'altro contemporaneamente. Questo tipo di CCD viene detto a tre fasi; esistono anche CCD con pixel di due o quattro elettrodi detti a 2 e 4 fasi.

Per descrivere infine come i vari pacchetti di carica possano essere portati ad un unico nodo di lettura, si consideri la condizione iniziali in cui tutti i pixels hanno l'elettrodo centrale polarizzato a 10 V. Successivamente si modulano i potenziali in modo che i pacchetti di

carica vengano trasferiti da una riga della matrice a quella sottostante. La riga n-esima verrà così traslata nella riga più in basso che serve unicamente da registro di lettura, laddove il trasferimento della carica avviene solo in direzione orizzontale, verso il nodo di lettura.

In un CCD così strutturato, detto *surface channel*, si è rilevata però una notevole perdita di carica dovuta all'intrappolamento degli elettroni nei cosidetti stati superficiali.

Infatti l'accumulo e il trasferimento degli elettroni avviene in prossimità della zona di giunzione Si-SiO_2, luogo di una notevole quantità di imperfezioni reticolari dovute alla differenza tra i reticoli del semiconduttore e dell'isolante.

Tali imperfezioni determinano degli stati energetici, disposti nella gap fra la banda di conduzione e quella di valenza del silicio, che vengono occupati dai portatori minoritari. Ciò causa una perdita di efficienza nel raccogliere e trasferire la carica ed in più il rumore di lettura aumenta per via del successivo rilascio casuale degli elettroni.

Si è pensato allora di modificare la struttura del substrato di silicio in modo da portare più in profondità il canale di movimento dei portatori minoritari, allontanandolo dalla zona di giunzione (v. Figura 2). Nella struttura MOS già descritta, il substrato di silicio viene diviso in due parti: la prima, vicina all'isolante, è di tipo *n*; la seconda, più lontana, è di tipo *p*. Si forma così una giunzione *pn* che viene polarizzata inversamente. Un CCD così fatto è chiamato *buried channel* e la carica viene trasportata con maggior efficienza e minore rumore. L'unica forma di perdita di elettroni è legata alla presenza di imperfezioni e dislocamenti nel reticolo del silicio, che, con le moderne tecnologie, può essere resa trascurabile.

La scelta tra un surface channel e un buried channel CCD, dipende dal tipo di applicazione. Ad esempio, in campo scientifico i più diffusi sono i buried channel, perchè consentono una maggiore efficienza di trasferimento, un minor rumore dovuto agli stati trappola e la possibilità di alte velocità di lettura.

Infine occorre esaminare il sistema che permette di misurare la quantità di carica presente in ogni pixel. Come si è detto, il contenuto di tutti i pixels viene trasferito ad un unico nodo di lettura, al quale è collegato un sistema di amplificazione il cui schema è riportato in Figura 5.

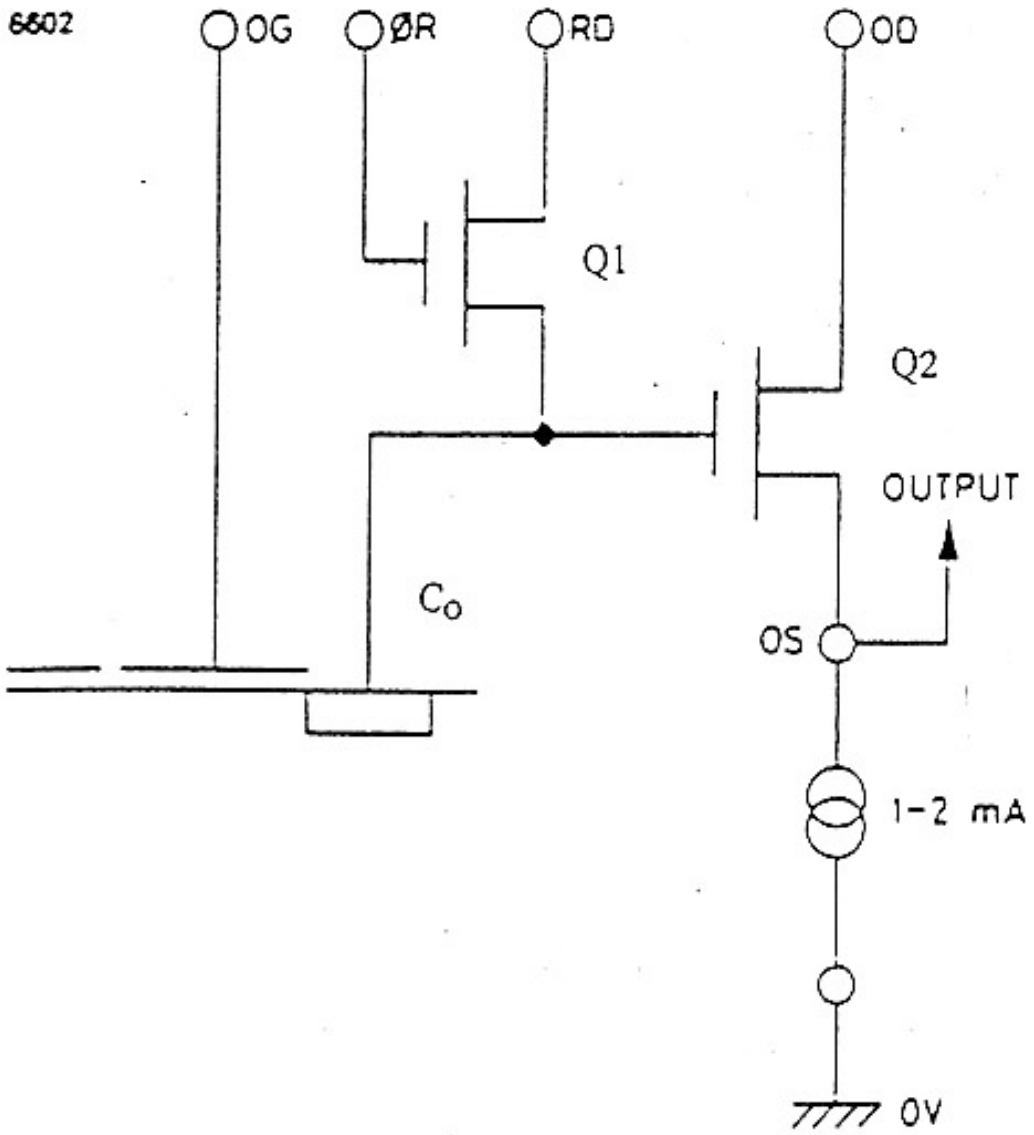

Figura 5 Il nodo di lettura è costituito da una capacità C_0 che raccoglie gli elettroni di ciascun pixel e si carica ad un potenziale V_0. Il FET di uscita Q_2 fornisce in uscita tale potenziale ed il FET Q_1 annulla la carica sul condensatore dopo la lettura.

L'elemento chiave è la capacità C_0 che assume un potenziale V_0 dato da:

$$V_0 = \frac{Q}{C_0} \tag{1}$$

dove Q è la carica presente sull'ultimo pixel del registro di lettura orizzontale.

Inizialmente, poco prima che la carica da misurare arrivi all'ultimo pixel, viene dato un impulso di reset al FET Q_1, il quale porta la tensione ai capi di C_0 a più di 10 V, in modo da eliminare la presenza di qualsiasi elettrone sul nodo di lettura. Quest'ultimo è collegato al FET Q_2 di uscita, che in configurazione source follower consente di misurare, ai capi di una resistenza di carico esterna al CCD, la tensione presente su C_0.

Subito dopo l'impulso di reset, il contenuto di carica Q del pixel viene portato al nodo di lettura ed il potenziale V_0 ai capi di C_0 si porta ad un valore corrispondente a Q. Allora ai capi della resistenza di carico esterna si misura un potenziale V_{0S} dato da:

$$V_{0S} = GV_0 = G\frac{Q}{C_0} \tag{2}$$

dove G è il guadagno del FET in configurazione source follower.

La (2) può anche essere scritta nella forma:

$$\frac{V}{n} = G\frac{e}{C_0} = S_V \left[Volt / e^- \right] \tag{3}$$

dove n è il numero di elettroni di carica e = $1.602 \cdot 10^{-19}$ C, esprimendo in modo esplicito la sensibilità S_V del nodo di lettura.

2. I CCD COME FOTORIVELATORI

Fin dai primi anni della sua invenzione, il CCD fu riconosciuto come un buon rivelatore di luce. Il principio di funzionamento su cui si basa il CCD come fotorivelatore è quello della conversione fotone-elettrone nel silicio, grazie all'effetto fotoelettrico. Un fotone proveniente da una sorgente di radiazione penetra nel silicio e ad una certa profondità, dipendente sia dal materiale che dalla lunghezza d'onda, viene assorbito, creando, con la sua energia hν, una coppia elettrone-lacuna.

Per capire meglio tale processo conviene analizzare le proprietà ottiche del silicio. L'assorbimento della radiazione da parte di un certo materiale, è espressa in termini di un coefficiente α (hν), che dipende essenzialmente dai meccanismi di assorbimento della radiazione da parte del materiale, è indipendente dall'intensità della radiazione incidente ed è costante per ogni lunghezza d'onda (v. Figura 6).

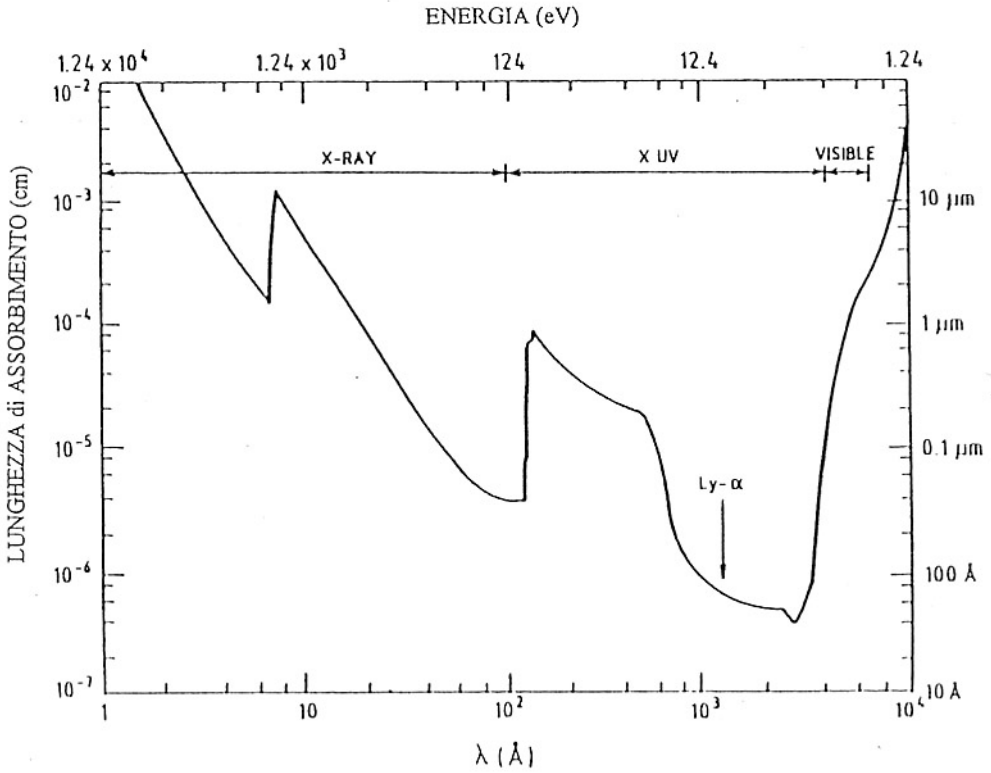

Figura 6 Curva del coefficiente di assorbimento dei fotoni nel silicio.

La relazione che lega a alla diminuizione dell'intensità della radiazione incidente I_0 in funzione del cammino di propagazione x nel materiale è:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) \tag{4}$$

I meccanismi di assorbimento identificabili nel silicio e nei semiconduttori, sono principalmente dovuti a cessione di energia del fotone a:

1. elettroni della banda di valenza;
2. elettroni delle shell interne degli atomi;
3. portatori liberi;
4. elettroni legati a difetti o impurezze localizzati.

Generalmente il meccanismo prevalente nel silicio è il primo (v. Figura 7). Il fotone che è penetrato all'interno del silicio, cede la sua energia agli elettroni presenti in banda di valenza, in modo che questi riescano ad andare in conduzione, superando il gap di energia e creando così una coppia elettrone-lacuna.

Nel caso del silicio, il processo è complicato dal fatto che nella relazione energia-momento E(K) il massimo della banda di valenza ed il minimo della banda di conduzione non corrispondono allo stesso momento K(v. Figura 7). Una transizione allora può aver luogo solo se cambia il momento dell'elettrone. Poichè il fotone ha un momento estremamente piccolo, l'elettrone, per transire, deve guadagnare o perdere energia con l'emissione e l'assorbimento di un fonone.

L'energia della gap nel silicio è 1.12 eV e, poichè lo scambio di energia con il fonone è molto piccolo (circa 0.01 eV), è sufficiente che i fotoni abbiano un'energia pari a quella della gap E_g o di poco superiore per permettere ad un elettrone di transire.

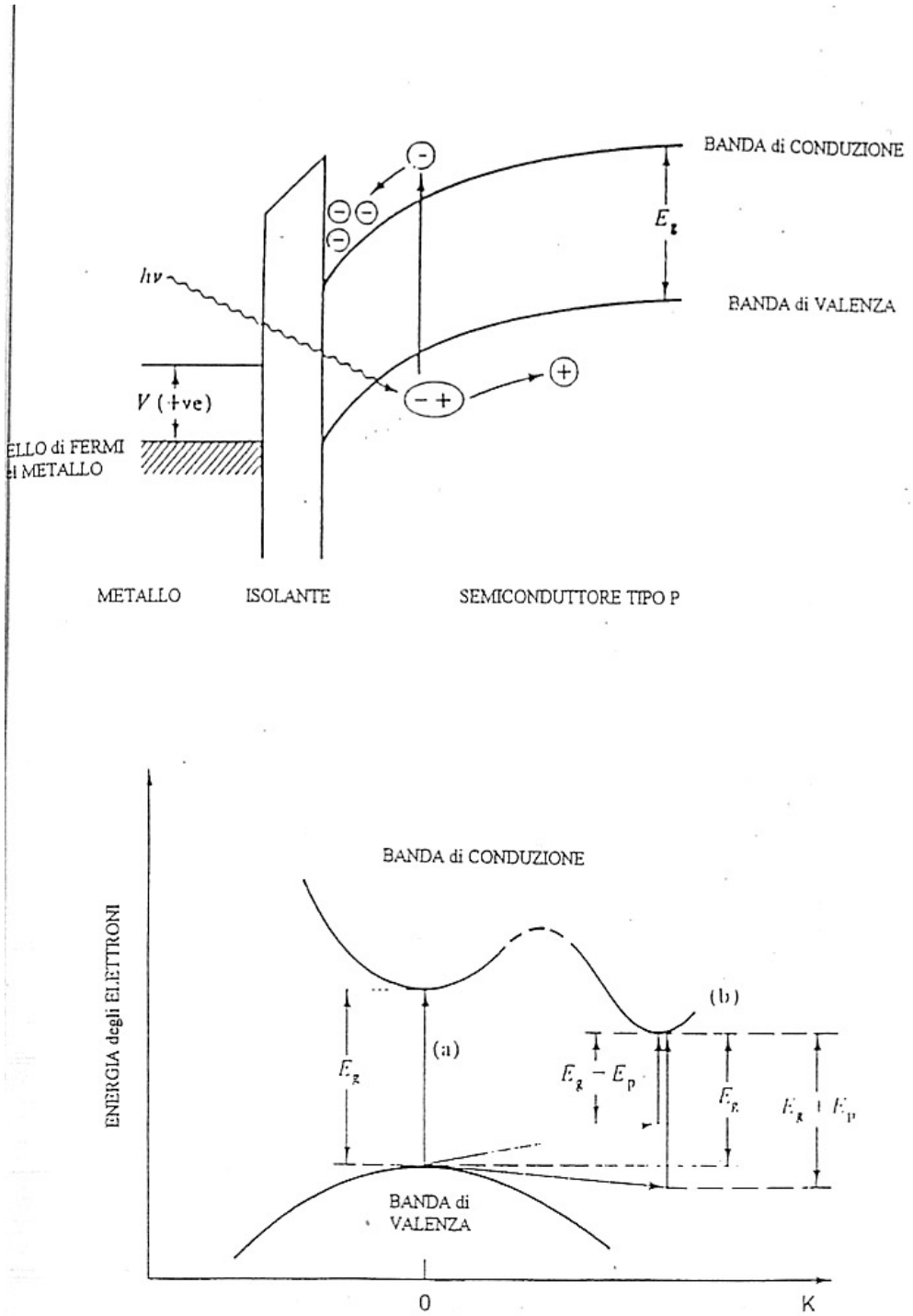

Figura 7 Meccanismo di generazione di una coppia elettrone-lacuna all'interno del substrato di silicio in una giunzione MOS (in alto); transizione diretta (a) e indiretta (b) degli elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione nel silicio (in basso).

Inoltre affinchè due o più elettroni transiscano in conduzione è necessario che l'energia del fotone sia almeno 3.65 eV. Se si considera la relazione di Planck:

$$\lambda_s = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g}(\mu m) \tag{5}$$

si ha che $\lambda_S \sim 1.1$ µm, ovvero nel vicino infrarosso. Il silicio quindi è in grado di produrre coppie elettrone-lacuna per $\lambda > \lambda_S$ e con i meccanismi tipici del CCD, è possibile raccogliere tali elettroni liberi nelle zone di svuotamento prossime al punto in cui il fotone è stato assorbito e trasferirli al nodo di lettura.

L'intervallo di lunghezze d'onda in cui generalmente il CCD funziona bene come fotorivelatore, è compreso fra i 3000 e i 10000 Å, con il massimo di efficienza di conversione intorno a 6000 Å, quindi nel visibile. Inoltre, con opportuni trattamenti che saranno descritti più avanti, è possibile raccogliere elettroni generati da fotoni con lunghezze d'onda < 3000 Å, fino ai raggi X, con ~ 10 KeV. In conclusione quindi risulta che l'intervallo spettrale in cui il CCD può essere usato come fotorivelatore è allargato a 1-10^4 Å.

L'esposizione alla radiazione incidente può essere sia frontale, dalla parte degli elettrodi, che dal retro, dalla parte del substrato: la scelta dipende dalla lunghezza d'onda. Nella regione spettrale compresa nell'intervallo di 3000-10000 Å, il CCD viene di solito esposto frontalmente. Ciò significa che i fotoni investono la superficie del CCD, attraversano i vari elettrodi di polisilicio cristallino ed arrivano fino al silicio. Infatti il fotone, alle lunghezze d'onda cui facciamo riferimento, ha una lunghezza di assorbimento nel silicio minore di 1µm, superiore quindi agli spessori degli elettrodi e dell'isolante. In particolare la lunghezza di assorbimento è tale che la quasi totalità dei fotoni viene assorbita nei primi 10 µm, ossia in piena zona di svuotamento, per cui la rivelazione di radiazione nel visibile, vicino UV e vicino IR è molto efficiente.

Per lunghezze d'onda inferiori ai 3000 Å, è necessario illuminare il CCD dal retro, poichè a tali energie i fotoni vengono assorbiti a livello quasi superficiale ed incontrando gli elettrodi e l'isolante produrrebbero elettroni che non possono raggiungere la buca di potenziale ed essere rivelati. In genere lo spessore di un CCD è di circa 250 μm e la profondità della zona di svuotamento nel silicio è di circa 10 μm. per cui oltre 200 μm hanno un campo elettrico nullo e gli elettroni ivi creati si diffondono liberamente nel substrato, allontanandosi notevolmente dal punto di generazione. La conseguenza è che gli elettroni o vengono raccolti su più pixels, perdendo l'informazione puntuale sulla sorgente di fotoni, oppure si ricombinano con le lacune.

Si è allora provveduto ad assottigliare il substrato di silicio, portandolo a 20-30 μm ed in alcuni casi ad aumentare la resistività del substrato in modo che la zona di svuotamento si espandesse fino quasi alla superficie retrostante. In entrambi i casi si ottiene una riduzione della zona a campo elettrico nullo e quindi un aumento notevole di efficienza.

Nel caso di fotoni X con energie $E\gamma \geq 8$ KeV, il CCD può essere illuminato frontalmente, in quanto a tali energie, i fotoni sono nuovamente penetranti nel silicio, arrivando a diverse decine di micron di profondità.

3. PARAMETRI ELETTRO-OTTICI

In questo paragrafo si esaminano e descrivono i parametri che caratterizzano il funzionamento di un CCD. La Figura 8 riporta schematicamente i vari passaggi fisici dalla interazione del fotone con il silicio alla conversione digitale del segnale, specificando tutti i parametri che caratterizzano il processo.

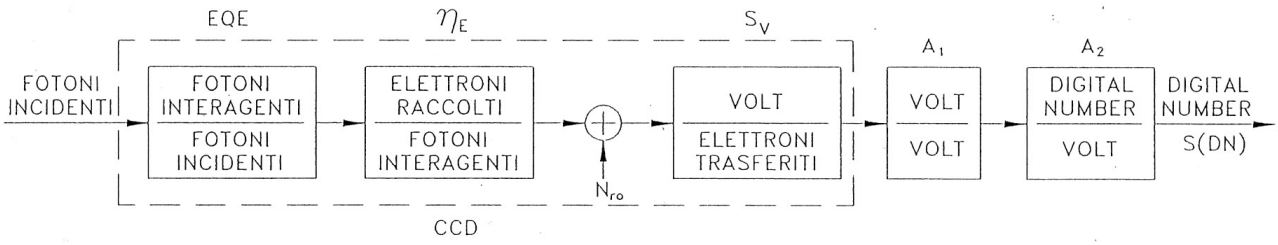

Figura 8 Processo di generazione di segnali digitali per l'elaborazione delle immagini di un CCD a partire da un flusso di fotoni incidenti. Per ogni passaggio della conversione fotone-segnale sono specificati i parametri elettro-ottici caratteristici.

3.1 Fattore di conversione e rumore di lettura

Il fattore di conversione F definisce il valore della sensibilità del sistema che misura la quantità di elettroni accumulati in ogni pixel del CCD. Partendo dal segnale in unità digitali S (DN) (DN, dall'inglese Digital Number), ottenuto in uscita al convertitore A/D che chiude la catena analogica di condizionamento segnale CCD, si ha:

$$S\,(DN) \;=\; I_0 \cdot EQE \cdot \eta_E\, S_V\, A_1\, A_2 \tag{6}$$

dove I_0 è il flusso della radiazione incidente (fotoni s^{-1} $pixel^{-1}$), S_V (V/e^-) è la sensibilità del nodo di lettura del CCD, A_1 è il guadagno dell'amplificazione del segnale video e A_2 (DN/Volt) è il guadagno del convertitore A/D. Il parametro η_E viene chiamato *quantum yield* e rappresenta il numero di elettroni raccolti per fotone interagente.

Per esprimere il segnale raccolto dal CCD con grandezze che abbiano un significato fisico, occorre esplicitare S (DN) in termini di elettroni e fotoni. A questo scopo si introducono due parametri:

$$F = \frac{1}{S_V A_1 A_2}\left[{e^-}/{DN}\right] \tag{7}$$

$$J = \frac{1}{\eta_E S_V A_1 A_2} \left[{}^{fotoni}\!/_{DN} \right] \tag{8}$$

da cui si ricava che η_E è dato dal rapporto:

$$\eta_E = \frac{F}{J} \left[{}^{e^-}\!/_{fotoni} \right] \tag{9}$$

A partire dalla misura del valore quadratico medio (r.m.s.) del rumore N in funzione del segnale S nelle immagini del CCD, esistono diversi metodi per stimare il parametro F.

Innanzitutto il segnale S può essere ottenuto in due modi diversi: o si aumenta il tempo di esposizione ad illuminamento costante, o si varia il flusso della radiazione incidente a parità di tempo di esposizione.

Il valore r.m.s. del rumore N in termini di numero di elettroni può essere espresso nella forma:

$$N^2(e^-) = N_{ro}{}^2 + N_{SH}{}^2 + N_{Sp}{}^2 \tag{10}$$

che tiene conto dei contributi dati dal rumore di lettura N_{ro} del sistema CCD-elettronica di controllo, dallo shot noise N_{SH} e dal rumore dovuto agli spikes di buio N_{SP}. Il valore sperimentale che si ottiene per N (e^-) è in forma digitale, per cui occorre esplicitare la (10) in termini di DN e, ricordando che $N_{SH} = \sqrt{S}$ (e^-), si ha:

$$N^2(DN) - N_{SH}{}^2(DN) = N_{ro}{}^2(DN) + \frac{S(DN)}{F} \tag{11}$$

Si consideri adesso una coppia di immagini ottenute nelle stesse condizioni sperimentali. L'i-esimo pixel ha registrato un segnale S_1 nella prima immagine ed un segnale S_2 nella seconda.

Si può allora stimare il valore [$N^2(DN)$-$N^2_{SP}(DN)$] dalla seguente relazione:

$$N^2(DN) - N_{Sp}{}^2(DN) = \frac{\sum_i (S_1 - S_2)_i^{\,2}}{2n_p} \tag{12}$$

dove n_p è il numero totale di pixels.

Graficando la (12) con i valori del primo membro ottenuti dalla (11), si ottiene la retta riportata in Figura 9, avente coefficiente angolare $1/F$ e termine noto N^2_{ro} (DN).

Quindi con questo metodo, detto di Gudheus-Hegyi, è possibile misurare il valore del fattore di conversione e del rumore di lettura del rivelatore.

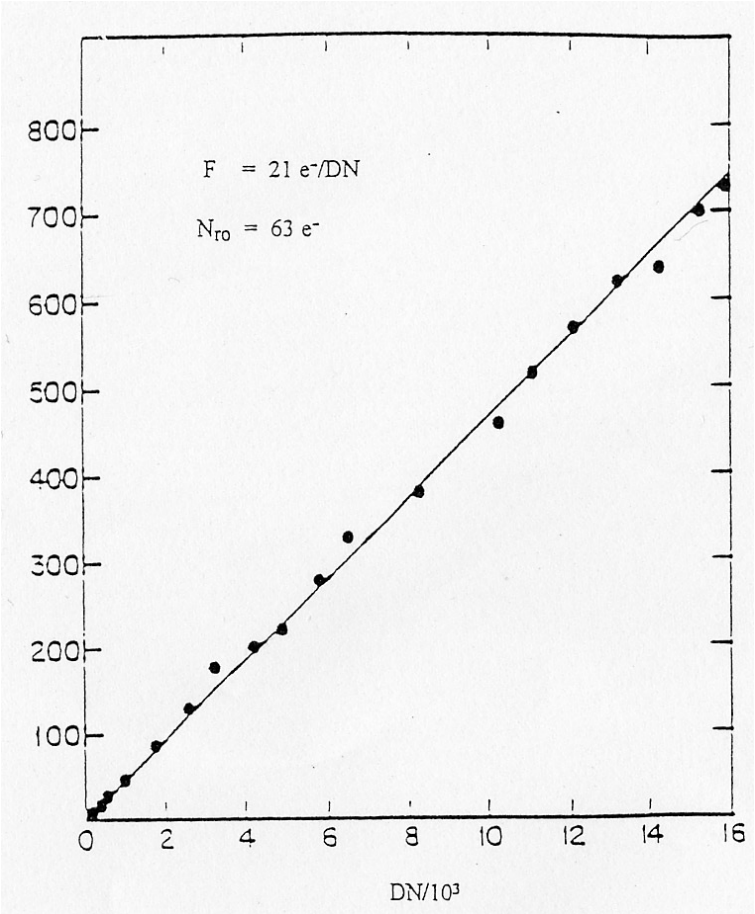

Figura 9 Esempio di ndamento lineare di N_t^2 in funzione del segnale, ottenuto con il metodo di Gudehus-Hegyi.

Un altro metodo per la misura di F è basato sull'andamento di N (S), riportato in Figura 10 in scala logaritmica. I contributi di N_{ro}, N_{SH} e N_{SP} sono evidenziati nel grafico da tre andamenti diversi di N (S). A bassi livelli di segnale prevale il contributo del rumore di lettura N_{ro}, per cui si ha un andamento costante della funzione.

A valori pià alti del segnale, prevale lo shot noise che è proporzionale a √S, per cui l'andamento di N (S) è una retta con pendenza 1/2. Infine per alti valori di segnale, si una prevalenza del rumore spaziale; perciò l'andamento di N (S) diventa una retta con pendenza unitaria.

Si consideri a questo punto la parte centrale del grafico di N (S) che dipende principalmente dallo shot noise e si prolunghi la retta fino ad intercettare l'asse delle ascisse N (DN) = 1. Il valore del segnale $S|_{N=1}$ corrisponde al valore del fattore di conversione del rivelatore. Infatti:

$$N_{SH}{}^2 = S(e^-)$$

$$N_{SH}{}^2 = F^2 N_{SH}{}^2(DN)$$

$$S(e^-) = FS(DN) \tag{13}$$

$$N_{SH}{}^2(DN) = S(DN)$$

e nel caso che N_{SH} = 1, si ha che S (DN) = *F*.

Il valore del rumore di lettura è immediatamente determinato dall'andamento costante della prima parte della funzione N (S).

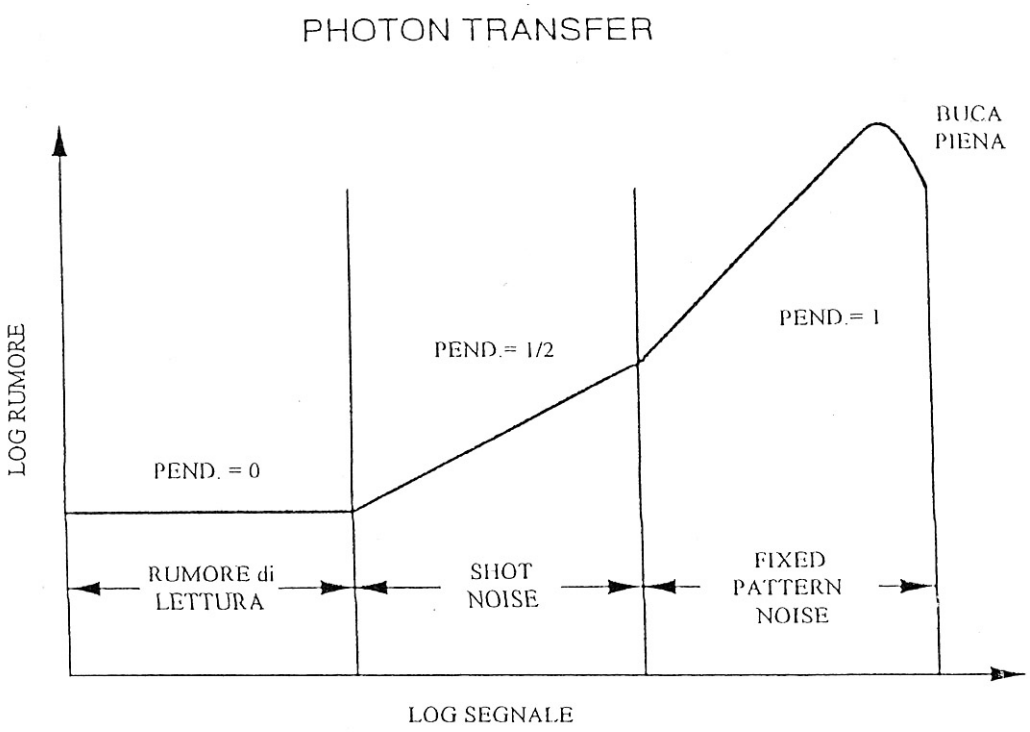

Figura 10 Grafico del rumore in funzione del segnale (*photon transfer curve*).

Il terzo metodo per misurare F in modo più preciso, ricorre alla seguente relazione, nell'ipotesi di segnali tali da poter trascurare N_{SP} (DN):

$$S(DN) = N_{SH}^{\ 2}(DN)F = \left[N^2(DN) - N_{ro}^{\ 2}(DN)\right]F \tag{14}$$

$$F = \frac{S(DN)}{N^2(DN) - N_{ro}^{\ 2}(DN)} \tag{15}$$

Considerando i valori sperimentali dei termini che compaiono al secondo membro della () è possibile calcolare F e disporre i valori ottenuti per vari livelli di S (DN), in un istogramma. Il valore di F che si assume è quello del picco e la larghezza dell'istogramma fornisce la precisione per quel valore.

Per stimare il quantum yield è necessario ripetere una misura con uno di questi metodi a lunghezze d'onda $\lambda < 3400$ Å, in modo che oltre ad F si misura anche il valore del parametro J.

3.2 Efficienza quantica

L'efficienza quantica è il parametro più importante del CCD, in quanto fornisce una misura precisa della sensibilità del rivelatore. Il suo valore è dato dal rapporto percentuale tra il numero di elettroni raccolti e quello dei fotoni incidenti. In realtà non sempre tutti i fotoni incidenti interagiscono con gli atomi del silicio, concorrendo a produrre gli elettroni. Si può allora definire un parametro, l'efficienza quantica effettiva (EQE), che fornisce il valore percentuale del numero fotoni interagenti rispetto a quello dei fotoni incidenti.

I fotoni che riescono ad interagire con il silicio producono a loro volta degli elettroni, il cui numero dipende dall'energia del fotone. Il *quantum yield* η_E indica il numero degli elettroni raccolti per fotone interagente.

Si può quindi scrivere:

$$QE = \eta_E EQE \tag{16}$$

Il valore di η_E può essere stimato considerando l'energia del fotone interagente E_g e calcolando $E_g / 3.65$, dove 3.65 eV è l'energia necessaria a creare una coppia elettrone-lacuna nel silicio.

Se l'energia del fotone è inferiore a circa 3.65 eV, ovvero $\lambda > 3400$ Å, si crea un solo elettrone per fotone interagente ($\eta_E = 1$) e allora EQE = EQ.

Se invece $E_g > 3.65$ eV, il numero degli elettroni prodotti aumenta con l'energia del fotone. Un esperimento di caratterizzazione permette di misurare i valori dell'EQ e per

conoscere il valore di EQE bisogna stimare η_E o sperimentalmente oppure assumendo che valga E_g / 3.65.

E' bene notare che il valore calcolato di η_E è una sovrastima del numero di elettroni effettivamente raccolti, perchè parte di quelli prodotti può essere persa per ricombinazione o intrappolamento, perciò a partire da un valore misurato di EQ, dividere per η_E significa sottostimare EQE. Normalmente però l'errore che si commette è inferiore a quello sulla misura e comunque la stima sperimentale di η_E è sempre possibile con il metodo descritto in precedenza

I fattori principali che concorrono a limitare il valore della EQ sono:

- la perdita di fotoni per riflessione dalla superficie del silicio;
- l'assorbimento da parte degli elettrodi o dello strato isolante nel caso di illuminamento frontale;
- la perdita di elettroni a causa della ricombinazione elettrone-lacuna nel silicio;
- l'intrappolamento da parte di difetti reticolari o degli stati superficiali.

I valori più alti di EQ si raggiungono nel visibile, perchè a queste lunghezze d'onda i fotoni sono abbastanza penetranti da interagire nella zona di svuotamento, cosicchè gli elettroni vengono raccolti senza perdite. I valori che normalmente si raggiungono sono sempre superiori al 20 % fra 4000 e 8000 Å fino ad un massimo del 60-70 % a circa 6000 Å, illuminando il sensore sia frontalmente che dal retro (v. Figura 11).

Tale efficienza diminuisce sia nell'infrarosso, perchè il silicio diventa quasi trasparente e gli elettroni sono prodotti lontano dalla zona di svuotamento, sia nell'UV, dove i fotoni interagiscono superficialmente e, come si vedrà più avanti, alcuni fenomeni provocano la quasi totale perdita degli elettroni prodotti.

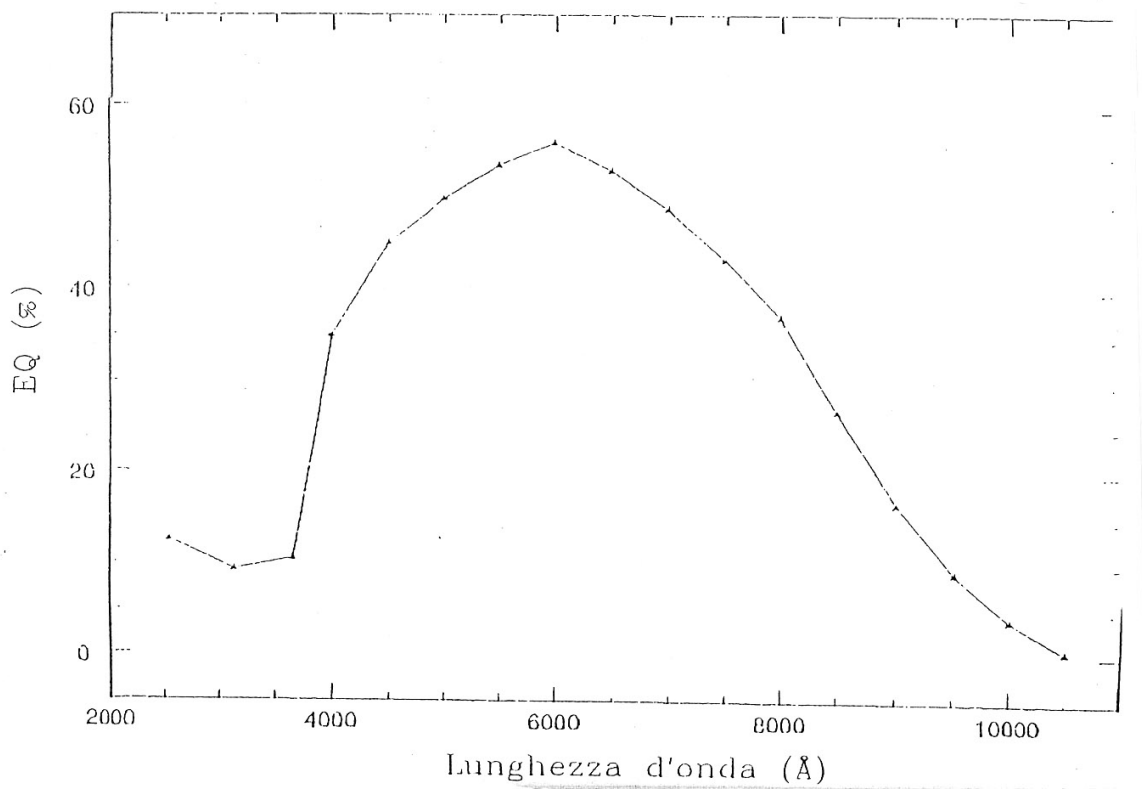

Figura 11 Curva tipica di efficienza quantica nel visibile di un CCD.

Alle lunghezze d'onda maggiori di 40 eV e fino a 10 KeV, la EQ risale verso vabri maggiori del 50 %, perchè i fotoni sono nuovamente penetranti.

Per misurare sperimentalmente l'EQ, è necessario illuminare il CCD con radiazione monocromatica ad una certa lunghezza d'onda e di l'intensità nota. Si deve disporre quindi anche di un rivelatore calibrato, tipo un fotodiodo, che consenta di conoscere il valore assoluto dell'intensità della radiazione incidente.

Allora l'EQ può essere ottenuta dalla:

$$EQ = \eta_{ph} \frac{S_{CCD}}{I_{ph}\, t_{exp}} F\, e \qquad (17)$$

dove S_{CCD} è il segnale totale rivelato dal CCD, I_{ph} è la corrente misurata dal fotodiodo di efficienza quantica η_{ph}, $t_{\exp}$ è il tempo di esposizione del CCD, F è il fattore di conversione (e^-/DN) del rivelatore ed e è la carica elettrica.

3.3 Efficienza della raccolta di carica (CCE)

Si definisce come efficienza di raccolta della carica (CCE dall'inglese Charge Collection Efficiency) la percentuale degli elettroni prodotti nell'assorbimento del fotone raccolta dal pixel più prossimo al punto di interazione:

$$CCE = \frac{\eta_E}{\eta_i} \tag{18}$$

dove η_i è il quantum yield teorico, ovvero il numero di elettroni prodotti per fotone interagente, calcolato in base alla $\eta_i = E_\gamma / 3.65$.

I fenomeni che concorrono a tale diminuizione sono due: la dispersione di carica nel substrato e la perdita di carica (detti *split e partial events*).

La dispersione di carica si ha quando un fotone interagisce con il substrato di silicio, ad esempio nel caso di retroilluminazione, e la carica prodotta si diffonde nel substrato.

Tale diffusione avviene perchè il potenziale della zona di svuotamento non è sufficiente a creare in tutto il substrato, un campo elettrico che guidi la carica a raccogliersi in un unico pixel e, quindi, essa deriva lontano dal punto di generazione e viene raccolta anche dai pixels vicini. La carica prodotta viene allora misurata sommando i contributi di tutti i pixels sui quali si sono distribuiti gli elettroni.

La perdita di carica invece, si ha quando gli elettroni vengono intrappolati da difetti reticolari, o si ricombinano con le lacune presenti nel substrato, o, infine, vengono intrappolati in una buca di potenziale determinata dalla presenza di ossido di silicio spontaneo

in prossimità della superficie retrostante del CCD. In questo caso non è comunque possibile risalire alla carica prodotta dalla misura di quella raccolta.

Esistono diversi metodi per stimare la CCE del CCD utilizzato.

I principali sono:

1. Modulation Transfer Function (MTF)
2. Immagine di un bordo netto
3. Raggi X prodotti da Fe^{55}

1. La MTF rappresenta la capacità del CCD di riprodurre un'immagine risolta di una sequenza di righe bianche e nere a diverse frequenze spaziali (definita come numero di linee per millimetro). Al crescere della frequenza, le righe avranno sempre meno contrasto, fino alla completa perdita di risoluzione. Per un sensore con una CCE non ottimale, la MTF peggiora e quindi si comincia a perdere anche la capacità di risolvere righe a bassa frequenza.

La migliore MTF ottenibile ad una data frequenza *f,* è data dalla funzione

$$\sin c\left(\pi f / 2 f_N\right) \qquad (19)$$

dove ($f = 1/2\ d$) è la frequenza di Nyquist, con d larghezza del pixel (v. Figura 12), per cui la differenza tra la MTF misurata e questo valore teorico fornisce indicazioni sulla CCE del sensore.

La MTF dipende, come la CCE, dalla lunghezza d'onda e dallo spessore del rivelatore, oltre che dalla geometria del pixel.

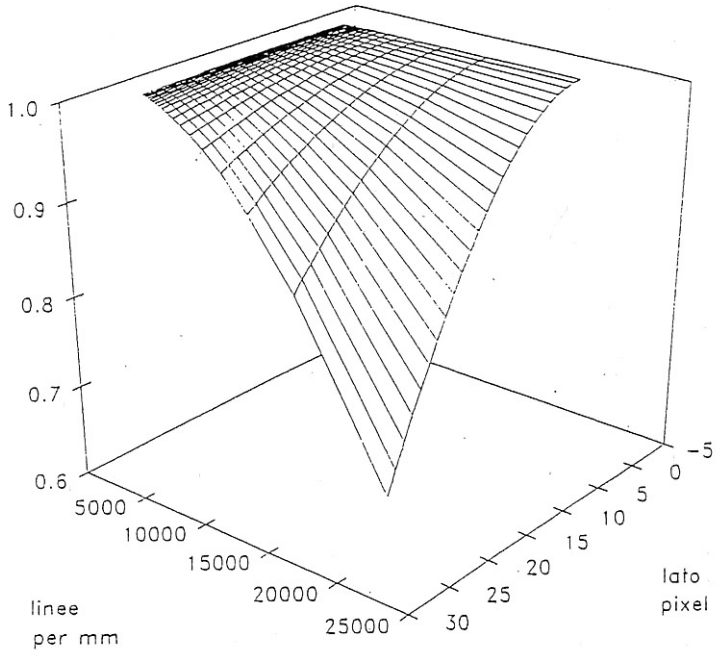

Figura 12 Grafico tridimensionale dell'andamento della MTF in funzione della frequenza spaziale e delle dimensioni del pixel.

2. Il secondo metodo è quello dell'immagine di un bordo netto, che si ottiene oscurando metà dell'area sensibile del CCD, in modo che la transizione tra la zona illuminata a quella oscura sia a gradino.

Nel caso di una CCE ideale, l'immagine del bordo tra le due metà deve risultare netto: l'ultimo pixel illuminato e il primo oscurato devono essere contigui.

Se invece la CCE è degradata si ottiene un passaggio chiaro-scuro meno netto e contrastato, con pixel di confine parzialmente carichi.

3. Il metodo per valutare la CCE con i fotoni X emessi nel decadimento radiativo del Fe^{55} consiste nel considerare la riga di emissione K_α a 5.9 KeV. A questa energia il numero di elettroni prodotti per fotone è 1620 e l'interazione è puntuale, ovvero gli elettroni vengono generati in una zona di pochi Angstrom, per cui se la CCE fosse ottimale, verrebbero raccolti tutti in un unico pixel.

In realtà gli elettroni derivano o vengono catturati e/o ricombinati, per cui sono molti gli eventi che sono interessano 2 o più pixels ed altrettanti sono quelli che non conservano la carica.

Questo metodo consente di misurare direttamente la quantità di elettroni persi o il grado di dispersione, dato che è noto il numero di elettroni prodotti dal fotone.

Si è osservato in un CCD retroilluminato e assottigliato, che circa il 50% degli eventi non conserva la carica e oltre il 60% consiste di eventi con carica dispersa su più pixels.

3.4 Efficienza di trasferimento della carica

L'efficienza di trasferimento della carica (CTE) è il parametro che esprime la capacità di un CCD di trasferire il pacchetto di elettroni presente in un pixel, a quello adiacente. Il valore tipico raggiungibile con le attuali tecnologie è 99.999 %, che a prima vista sembra eccellente. Bisogna considerare però che ogni pacchetto di carica, per arrivare al nodo di lettura, deve essere trasferito attraverso un certo numero di pixels, che in genere è molto grande ($\sim 10^6$). Per cui se n è il numero di trasferimenti subiti dalla carica raccolta, allora si ha, ovviamente, $(CTE)^n$. Il risultato è che un certo numero di elettroni, proporzionale a $[1 - (CTE)^n]$, viene perso nel trasferimento totale e questo, per bassi livelli di segnale, può costituire un problema.

I meccanismi riconosciuti per i quali si ha la perdita della carica elettrica nel trasferimento, sono: la diffusione termica degli elettroni, il campo elettrico auto-indotto ed infine la forma dei potenziali e la loro transizione tra livelli alti e bassi.

La diffusione termica è dovuta ad elettroni che acquistano energia termicamente e riescono ad opporsi al moto generale del pacchetto. Il campo elettrico auto-indotto è dovuto alla repulsione degli elettroni che tende a disperdere il pacchetto, specie quando le cariche elettriche sono molte. Il limite maggiore al trasferimento di carica è dato però dalla forma dei potenziali, dalla loro profondità, dalle irregolarità geometriche degli elettrodi.

Il metodo di misura della CTE, più diffuso è quello della rivelazione di fotoni X prodotti dal Fe^{55}. Un fotone che incide sulla superficie del CCD produce 1620 elettroni, che, nel caso di una buona CCE vengono raccolti in un unico pixel. La misura della CTE consiste nel valutare quanto il trasferimento degradi il contenuto di quel pixel. Infatti, nel caso che la CTE non sia ottimale, si osserva che l'immagine rìiprodotta è un picco meno intenso del previsto e con un coda nella direzione opposta a quella del trasferimento.

Per stimare la CTE si costruisce allora un istogramma che raccoglie tutti gli eventi prodotti da fotoni X e che in ascissa riporti il livello in DN del segnale. Se la CTE fosse ideale, si otterrebbe un picco centrato sul segnale corrisponente ai 1620 elettroni prodotti dal fotone X. In generale, invece, si trova che tale picco è spostato verso livelli più bassi di segnale e mostra un allargamento; inoltre è presente anche un fondo ad intensità molto più basse.

La CTE è un parametro importante, perchè, oltre a limitare le prestazioni ideali di un CCD, determina anche le dimensioni del sensore. Infatti fino ad oggi non si è riusciti ad ingrandire oltre 4096 x 4096 il numero dei pixels che compone un CCD e questo perchè con i valori di CTE raggiunti si ha una eccessiva perdita di carica. Aumentare la CTE significa migliorare i metodi litografici di formazione degli elettrodi, perfezionare i potenziali e la loro modulazione, ma principalmente, realizzare cristalli di silicio ancora più puri di quelli prodotti attualmente.

Per fare un esempio, si prendano i CCD più grandi costruiti oggi: 4096 x 4096 pixels, con la migliore CTE attuale: 0.999999 e si supponga di ottenere un segnale di 1000 elettroni. Si avrà che la CTE totale dopo tutti i trasferimenti (si prenda il numero massimo di trasferimenti possibile) è:

$$CTE|_{TOT} = (0.999999)^{4096+4096} = 0.99184 \qquad (20)$$

e la carica finale al nodo di lettura sarà:

$$S\ (e^-) = 991\ e^- \tag{21}$$

con una perdita di 9 elettroni. Si noti che tale valore è l'1 % del pacchetto iniziale e che il rumore massimo di lettura dei CCD è minore di 10 e^-.

3.5 Risoluzione spaziale

La risoluzione spaziale è la distanza minima fra due punti molto vicini dell'immagine che un CCD riesce a discriminare e si caratterizza illuminando una serie di forellini di diametro ~ 10-20 μm ed osservando l'allargamento spaziale dell'immagine prodotta.

Essa è determinata in primo luogo dalle dimensioni fisiche del pixel ed inoltre dipende dalla CCE e dalla CTE. Infatti un valore non ottimale di questi ultimi due parametri fa in modo che la risoluzione peggiori, allargando le dimensioni dell'immagine di una sorgente puntiforme.

3.6 Linearità e uniformità della risposta

La linearità, è la capacità di un rivelatore di fornire sempre un segnale di risposta linearmente proporzionale alla radiazione incidente. Per misurarla si espone il sensore ad illuminamenti uniformi di intensità crescente e si misura la deviazione della risposta dalla linearità.

Ad esempio si supponga di avere una sorgente di luce costante e stabile. Variando il tempo di esposizione si ottengono diversi livelli di segnale. Si può allora graficare il valore percentuale della deviazione L dalla linearità in funzione del tempo di esposizione:

$$L(\%) = 100\left[1 - \frac{ST_m}{TS_m}\right] \qquad (22)$$

dove S è il segnale misurato al tempo T e S_m è il segnale misurato ad un tempo T_m, intermedio nell'intervallo dei tempi considerato. Un sensore con una buona linearità ha tipicamente una deviazione massima dell'1%.

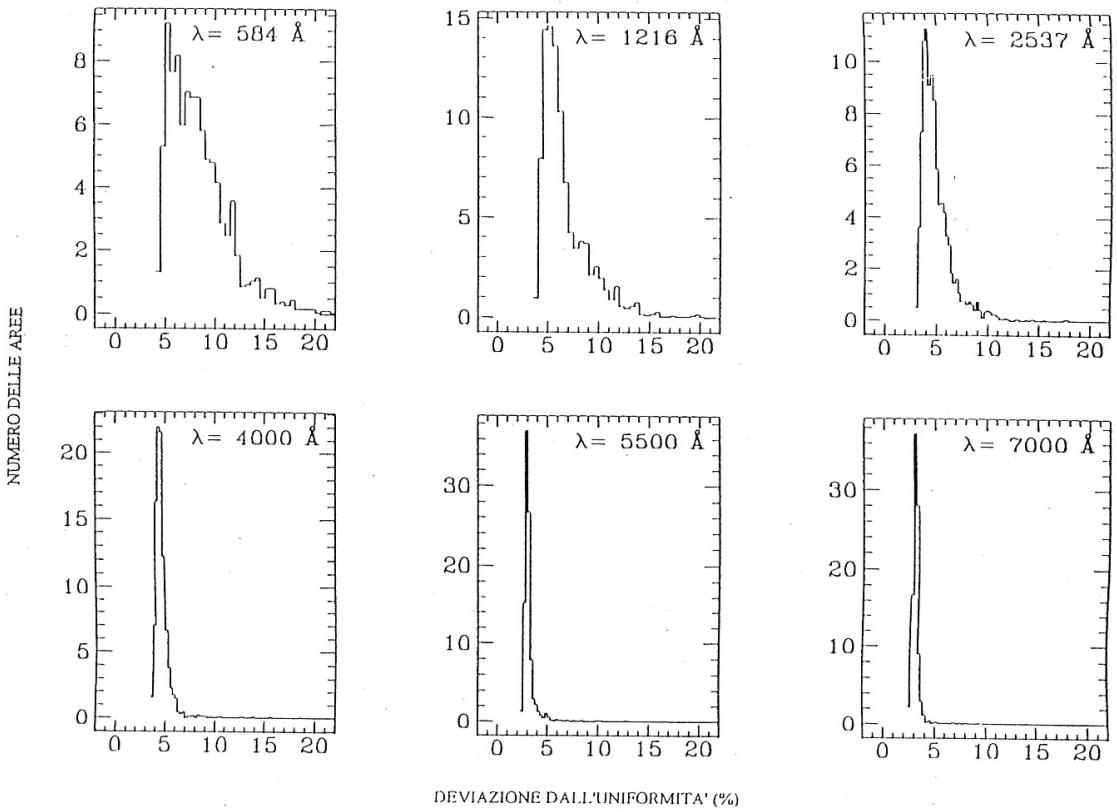

Figura 13 Uniformità della risposta di un CCD per l'EUV illuminato con radiazione a varie lunghezze d'onda. Si nota come la risposta a lunghezze d'onda del visibile sia migliore rispetto a quelle dell'EUV. Le sottoaree considerate sono di 10 x 10 pixels.

L'uniformità della risposta di un CCD è la capacità di ottenere un'immagine con piccole variazioni di segnale da un illuminamento uniforme. Il degrado dell'uniformità può essere dovuto a sensibilità differenti tra pixel e pixel o tra zona e zona, causate da assottigliamento del substrato o diversa geometria del pixel, o locali danneggiamenti.

L'uniformità viene stimata su un'unica immagine ottenuta illuminando uniformemente il CCD, ovvero facendo ciò che viene chiamato *flat-field* e valutando su larga scala o pixel per pixel la deviazione del segnale dal livello medio.

Nel caso si voglia valutare la disuniformità considerando variazioni da pixel a pixel, si suddivide l'area sensibile del CCD in tante sottoaree, ad esempio di 10x 10 pixels, e si misura in ognuna il valor medio m e la deviazione standard s del segnale.

Calcolato il valore di $2\sigma/m$ per ogni sottoarea, li si dispone tutti in un istogramma. I CCD abbastanza uniformi hanno un istogramma molto piccato, mentre CCD disuniformi hanno un notevole allargamento del picco (v. Figura 13).

Per le disuniformità su larga scala invece si considerano ad esempio sottoaree di 30x 30 pixels, nelle quali si stima la differenza fra il segnale massimo e quello minimo, si calcola il valor medio del segnale su tutto il CCD e si valuta il rapporto fra la precedente differenza ed il valore medio. In questo modo si ottengono dei valori percentuali che vengono raccolti in un istogramma, in modo da determinare a che valore percentuale si trovi il picco a e la sua larghezza.

La disuniformità dipende anche dalla lunghezza d'onda dei fotoni incidenti, poichè a diverse energie la conversione fotone-elettrone avviene a profondità differenti nel silicio. Ad esempio i fotoni dell'UV che non interagiscono in profondità risentono molto delle disuniformità della superficie retrostante, dovute ai processi di lavorazione dei chip ed ai trattamenti cui è stato sottosposto per aumentarne l'efficienza. Gli strati antiriflettenti che ricoprono la superficie retrostante del CCD, ad esempio, possono degradare l'uniformità del segnale se non vengono depositati con estrema cura.

3.7 Range dinamico

Il range dinamico è definito come il rapporto tra il segnale massimo e quello minimo ottenibile con un rivelatore.

Nel caso di un CCD, il segnale massimo è definito dalla quantità di carica che riempe totalmente la buca di potenziale e dipende da molti fattori quali il tipo di CCD (buried o un surface channel) la geometria del pixel, il potenziale della zona di svuotamento, etc. Un valore tipico è fra 10^5 e $3 \cdot 10^5$ elettroni raccolti.

Il segnale minimo di un CCD è pari al suo rumore, che normalmente è $\leq 10\ e^-$.

Sperimentalmente, il segnale massimo e quello minimo, si ottengono dal grafico N(S) del rumore in funzione del segnale (v. Figura 10).

Infatti il rumore è dato dal plateau per piccoli valori di S, a condizione che il rumore del CCD domini quello dell'elettronica, mentre il segnale massimo corrisponde a quel valore di S, superiore alla zona dominata dal rumore spaziale, per il quale si ha la saturazione del sensore e una diminuzione considerevole del rumore. Facendo il rapporto dei due valori trovati si ottiene una misura del range dinamico RD.

Ad esempio considerando i valori tipici riportati si ottiene:

$$RD = 3 \cdot 10^5 / 10 = 3 \cdot 10^4 \qquad (23)$$

che è estremamente elevato. La digitalizzazione di tali segnali richiede necessariamente un convertitore A/D che abbia almeno15 bits.

4. RUMORE NEI SISTEMI CON CCD

Uno dei vantaggi del CCD è quello di avere un rumore molto basso e perciò bisogna fare estrema attenzione nel progettare il sistema di controllo, nello scegliere la forma delle fasi e il livello dei potenziali di polarizzazione, in modo da non degradare le prestazioni del CCD.

Il rumore generato dal CCD e dalla sua elettronica di controllo, si può dividere in:

- rumore del CCD;
- rumore del nodo di lettura e dell'amplificatore di uscita;
- rumore dell'elettronica di analisi del segnale e di pilotaggio del sensore.

4.1 Rumore del CCD

Corrente di buio

Se si esegue una misura con un CCD funzionante a temperatura ambiente, si osserva che, pur in assenza totale di illuminamento, il segnale di uscita del CCD non è nullo. Questo fenomeno è dovuto alla generazione termica di cariche elettriche libere: gli elettroni, assorbendo energia termica, riescono a transire in banda di conduzione. L'equazione che descrive questo processo, chiamato generazione di corrente di buio, è:

$$D(T) = CT^{3/2} \exp\left(E_g / 2KT \right) \tag{24}$$

dove T è la temperatura in gradi Kelvin, K è la costante di Boltzmann e E_g è l'energia della gap. La costante di proporzionalità C dipende dalla corrente di buio D_{DC} a temperatura ambiente T_A (nA/cm^2) e dalle dimensioni del pixel P, secondo la:

$$C = \frac{D_{DC}\, P}{e\, T_A^{3/2}\, e^{-E_g/2KT_A}} = 2.5 \cdot 10^{15}\, D_{DC}\, P \qquad (25)$$

La corrente di buio di solito viene misurata in (nA/cm^2) oppure, in (e^- pixel^{-1} s^{-1}) se si divide per la carica $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$ C, avendo tenuto conto delle dimensioni del pixel.

La dipendenza della corrente di buio dalla temperatura permette di renderla minima, raffreddando il sensore a T ≤ 173 K. Questa esigenza è particolarmente importante in presenza di segnali deboli, tipo quelli di origine astrofisica, che richiedono lunghe esposizioni, perchè se la temperatura del CCD non fosse sufficientemente bassa, oltre agli elettroni fotogenerati, si raccoglierebbero elettroni termici che creerebbero un offset proporzionale al tempo di esposizione, diminuendo notevolmente la dinamica del sensore.

A generare la corrente di buio concorrono anche i meccanismi di intrappolamento degli elettroni da parte delle imperfezioni reticolari o degli stati superficiali, che sottraggono cariche dai pacchetti e le rilasciano in modo casuale dopo un certo tempo. Il raffreddamento del CCD accentua questo fenomeno in quanto allunga i tempi del rilascio e gli elettroni vanno ad aggiungersi ad altri pacchetti di carica, falsando così il segnale vero. Uno studio accurato sulla generazione della corrente di buio ha mostrato che il meccanismo prevalente è legato alla presenza degli stati superficiali che nascono nella transizione dal reticolo del silicio a quello del SiO_2 nella giunzione isolante-semiconduttore. La loro collocazione energetica è nella gap di energia del silicio, quindi possono essere occupati tanto dagli elettroni, quanto dalle lacune.

Tuttavia la polarizzazione positiva degli elettrodi allontana le lacune, creando le zone di svuotamento, e attrae gli elettroni fotogenerati in prossimità della giunzione, dove possono rimanere intrappolati e rilasciati successivamente.

Una tecnica sviluppata per evitare l'intrappolamento negli stati superficiali e per diminuire quindi la corrente di buio, è di operare in *modo invertito* (CCD in modo MPP, dall'inglese *multi pinned phase*). Se si polarizzano negativamente gli elettrodi del CCD oltre un valore di soglia (normalmente 5-6 Volts), la differenza di potenziale tra la giunzione isolante-semiconduttore e il substrato è nulla e tale rimane anche se si abbassa ulteriormente il potenziale sull'elettrodo. Questo comportamento è dovuto al flusso delle lacune presenti nei channel stops che, a causa del potenziale negativo, si portano sotto gli elettrodi, nella zona di giunzione: più è negativo il potenziale, maggiore è il flusso di lacune, cosicchè il potenziale alla giunzione si mantiene al valore del substrato. Queste lacune, occupano tutti gli stati superficiali, consentendo agli elettroni di rimanere liberi, diminuendo così la corrente di buio di un fattore 1000 in termini di elettroni.

E' bene notare che per un corretto funzionamento del modo MPP, occorre impiantare degli atomi accettori nella zona di giunzione di almeno uno degli elettrodi, altrimenti l'inversione del potenziale su tutti gli elettrodi non consentirebbe la presenza di alcuna zona di svuotamento durante la fase di integrazione dell'immagine.

Il trasferimento dei pacchetti di carica da un pixel all'altro avviene con le normali procedure.

Carica spuria

Questo tipo di rumore è presente nei CCD che funzionano in modo MPP.

Si è visto che, polarizzando negativamente gli elettrodi, le lacune si sistemano nella giunzione Si-SiO_2, occupando gli stati superficiali. Nel momento in cui occorre trasferire i

pacchetti di carica, i potenziali degli elettrodi transiscono dal livello negativo ad uno positivo con un certo fronte di salita. La rapidità con la quale avviene tale passaggio, fa sì che le lacune accumulate alla giunzione, vengano spinte a tornare verso i channel stops con una certa energia, che dipende da quanto repentina è la transizione. Nel loro percorso le lacune energetiche possono interagire con gli atomi di silicio del substrato e creare coppie elettrone-lacuna. Gli elettroni così liberati vengono raccolti nella zona di svuotamento più prossima, costituendo una carica spuria la cui entità dipende da quanti trasferimenti occorrono per trasportare un pacchetto di carica al nodo di lettura. Perciò più grande è l'area del CCD, maggiori sono gli effetti della carica spuria.

Il rumore R_{cs} dovuto alla carica spuria S_{cs} può essere caratterizzato come shot noise, ovvero:

$$R_{cs} = \sqrt{S_{cs}(e^-)} \quad [e^- \ r.m.s.] \tag{26}$$

per cui già con un segnale piccolo di 100 e^- di carica spuria si ha un rumore di 10 e^-. Il modo per diminuire la carica spuria a livelli tali da produrre un rumore accettabile è quello di controllare la forma d'onda dei potenziali sugli elettrodi in modo che

- la transizione non sia troppo veloce,
- la differenza fra i livelli negativo e positivo non sia grande
- il perdurare del potenziale positivo non sia lungo.

Ciò riduce l'energia acquisita dalle lacune e il tempo durante il quale può verificarsi la produzione della carica spuria. In alcuni CCD si è adottata la soluzione di invertire soltanto gli elettrodi dell'area sensibile, polarizzando normalmente quelli della riga di lettura. In

questo modo solo i trasferimenti verticali, che sono molto più lenti, possono produrre carica spuria.

Fixed pattern noise

Nelle immagini di CCD non raffreddati si osserva la presenza di pixels che hanno un segnale molto più elevato di quelli contigui. Questi punti luminosi vengono detti *dark spikes* e sono dovuti ad imperfezioni del reticolo del silicio, che causano disuniformità nella generazione delle cariche di buio. I dark spikes sono generati all'interno di un pixel e non mostrano caratteristiche di sparpagliamento della carica: ciò induce a pensare che si formino in prossimità della superficie Si-SiO_2.

Questo dà luogo al cosidetto *fixed pattern noise* e dipende dalla temperatura: a basse temperature la produzione di dark spikes diminuisce drasticamente.

E' possibile eliminare gli effetti del fixed pattern noise facendo la differenza fra due immagini ottenute alla stessa temperatura e medesimo tempo di integrazione, delle quali una in assenza di illuminamento. Purtroppo il fixed pattern noise non può essere eliminato completamente, data la sua natura di shot noise, inoltre la sottrazione fra le due immagini aumenta di un fattore $\sqrt{2}$ il rumore di lettura.

4.2 Rumore dell'amplificatore

Rumore termico

L'amplificatore di uscita, integrato nel CCD, è un FET in configurazione source follower, ed il suo rumore termico è il rumore Johnson N (V), indipendente dalla frequenza. La sua espressione è:

$$N(V) = \sqrt{4\,K\,T\,B\,R} \tag{27}$$

con K costante di Boltzmann, T la temperatura, B la banda passante del sistema, R l'impedenza di uscita del FET. La banda passante del CCD è limitata dalla risposta in frequenza dell'amplificatore di uscita ed il suo valore tipico è $2 \cdot 10^7$ Hz.

Per riferire il rumore al nodo di lettura, che preleva gli elettroni fotogenerati, si può scrivere:

$$N(e^-) = \frac{N(V)}{S_V\,A_1} \tag{28}$$

dove S_V è la sensibilità del nodo di lettura, espresso in V/e^- ed A_1 è l'amplificazione del FET.

<u>Rumore 1/*f*</u>

Il rumore 1/*f* dipende dalle caratteristiche costruttive del nodo di lettura e del FET di uscita. Si manifesta come un rumore il cui spettro in frequenza cresce in ampiezza alle basse frequenze con un andamento 1/*f*. Il contributo di tale rumore diminuisce con la temperatura.

Il rumore totale del FET di uscita può essere scritto, tenendo conto del rumore bianco di Johnson:

$$N_{CCD}^{\,2}(f) = N^2(f)\left[1 + \left(f_c/f\right)^m\right] \tag{29}$$

dove N(*f*) è la densità spettrale del rumore bianco ($V/Hz^{1/2}$) ed f_c è la frequenza ginocchio, alla quale la densità di potenza del rumore 1/*f* è uguale a quella del rumore bianco, cioè quando:

$$N_{CCD}^{2}(f_c) = 2N^2(f_c) \tag{30}$$

La costante m caratterizza la pendenza dello spettro $1/f$ e tipicamente varia nell'intervallo $1 < m < 2$, in funzione del potenziale di alimentazione del drain del FET di uscita.

Rumore KTC o rumore di reset

Questo rumore, di natura termica, è generato dalla resistenza drain-source R_r di un FET di reset la cui funzione è di annullare periodicamente la carica presente sul nodo di lettura. La sua espressione è:

$$N(V) = \sqrt{4\,K\,T\,B\,R_r} \tag{31}$$

La banda passante B può essere espressa in termini di:

$$B = \frac{1}{4R_r C_o} \tag{32}$$

dove C_o è la capacità del nodo di lettura. Allora si trova che:

$$N(V) = \sqrt{\frac{K\,T}{C_o}} \tag{33}$$

Riferendosi al nodo di lettura, $V/e^- = e / C_o$ e quindi:

$$N(V) = \sqrt{\frac{K\,T\,C_o}{e^2}} \tag{34}$$

E' interessante osservare come l'ampiezza di questo rumore non dipenda dalla resistenza R_r. Bisogna però considerare un altro aspetto (v. Figura 14). Quando il FET di reset è in conduzione, la resistenza R_r ha un valore piccolo (~ 2000 Ω) ed il rumore è quello appena descritto, con una larga banda passante. Nel momento in cui il FET viene interdetto, la resistenza R_r assume un valore molto alto (~10^{18} Ω). Questo cambiamento fa sì che la banda passante diventi estremamente stretta e la costante di tempo molto alta. L'effetto risultante è quello di "congelare" l'ampiezza del rumore all'ultimo valore assunto prima dell'interdizione del FET e tale livello viene mantenuto per tutta la durata della lettura del segnale del pixel. Data la natura casuale di N_r (V), l'ampiezza del livello "congelato" cambia da pixel a pixel, ma per ciscuno di essi è costante.

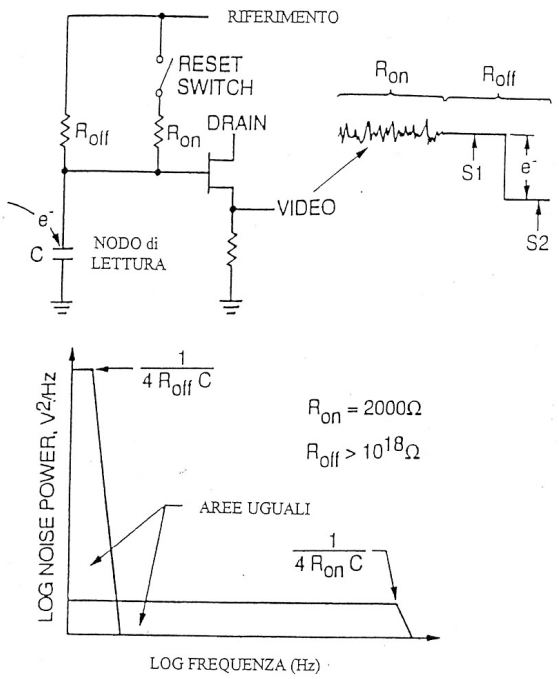

Figura 14 Rumore KTC o di reset. Viene generato dal FET di reset, identificato da un interruttore (RESET SWITCH). Il segnale VIDEO del CCD ha un rumore con larga banda passante [definitada $1/(4R_{on}C)$], fino a che l'interruttore è chiuso. Appena quest'ultimo viene aperto, la banda passante [$1/(4R_{off}C)$] si restringe intorno al valore 0 Hz della frequenza ed il segnale rimane con l'ampiezza S1, fissata al momento della chiusura dell'interruttore. Successivamente il segnale si porta al valore S2 corrispondente alla carica presente nel pixel.

Per eliminare questo rumore si utilizza una tecnica chiamata *doppio campionamento correlato* che sarà discussa nei dettagli in un altro capitolo.

Rumore del sistema di controllo

Il rumore dovuto all'elettronica esterna al CCD ha due sorgenti: la prima è connessa all'elettronica che campiona e condiziona il segnale, la seconda a quella che crea i potenziali di pilotaggio del CCD. Il maggiore fra i due contributi è dovuto al condizionamento del segnale, dato che quello associato alla generazione dei potenziali può essere facilmente disaccoppiato e reso trascurabile. A sua volta esso contiene due importanti generatori di rumore: il preamplificatore e l'amplificatore che definisce la banda passante B del sistema; per cui il rumore totale è dato da:

$$N_t\left(e^-\right) = \frac{B^{1/2}}{S_V}\left(N_{CCD}{}^2(f) + N_{A_1} + \left(\frac{N_{A_2}{}^2(f)}{A_1^2}\right)\right)^{1/2} \qquad (35)$$

dove $N_{A1}(f)$ e $N_{A2}(f)$ sono le densità spettrali del rumore dei due amplificatori con guadagno rispettivamente A_1 e A_2. Normalmente $N_{A1}(f)$ e $N_{A2}(f)$ vengono specificate dal costruttore degli amplificatori, mentre B viene stabilito con un'opportuna circuitistica collegata all'amplificatore A_2.

Un'altra componente minore del rumore generato all'interno della catena analogica del segnale è legata alla conversione A/D. Quando il segnale analogico relativo a ciascun pixel viene convertito in digitale, si introduce una incertezza dovuta al fatto che, al crescere linerare

di un segnale analogico, corrisponde una crescita a gradini del segnale digitale. Il passo *C* di ciascun gradino è definito da:

$$C\left(V/DN\right) = \frac{V}{2^N - 1} \tag{36}$$

dove N è il numero di bits della conversione e V è il segnale analogico massimo convertibile. Per variazioni del segnale analogico inferiori a *C*, il segnale digitale rimane invariato. Ad esempio, nel caso di un convertitore A/D a 16 bits, con tensione massima convertibile 10 V, si ha:

$$C = \frac{10}{2^{16} - 1} = 153\ \mu V \tag{37}$$

Il valore r.m.s. di questa incertezza è dato da:

$$Q = \sqrt{12}F \tag{38}$$

dove *F* è il fattore di conversione.

Infine è da sottolineare l'importanza della fase di ingegnerizzazione del sistema. Infatti è importante limitare il rumore dovuto alle interferenze elettriche, che durante la realizzazione del sistema sono la sorgente principale di rumore. Queste tecniche di controllo delle interferenze elettriche prevedono un opportuno sistema di messa a terra, di schermatura, di disaccoppiamento dei segnali, di formazione dei segnali alternati, di isolamento da altri sistemi rumorosi, di cablaggio.

4.3 Caratteristiche qualitative del CCD come rivelatore di immagini

Esaminati i vari parametri che caratterizzano il funzionamento del CCD, si vuole analizzare in dettaglio come questi influiscano sulle prestazioni del sensore come fotorivelatore.

La prima cosa da evidenziare è il largo intervallo spettrale su cui il CCD può essere utilizzato, grazie alle proprietà del silicio e ai vari trattamenti che ne aumentano la sensibilità anche dove questa normalmente è bassa. In generale la tecnologia del silicio, oltre a permettere miglioramenti di efficienza, ha consentito di avere materiali abbastanza puri che minimizzano la perdita della carica fotogenerata. Si ottengono così CCD con ottime prestazioni nella efficienza di raccolta e trasferimento della carica, linearità ed uniformità della risposta, oltre che una notevole dinamica consentita dai bassi livelli di rumore e dall'aumentata capacità nella zona di svuotamento.

Oltre a ciò è possibile costruire degli elettrodi sempre più piccoli, aumentando così la risoluzione spaziale intrinseca del sensore, limitata dalle dimensioni del pixel. I valori ottenuti attualmente sono minori di 10 μm.

Infine il CCD consente una estrema versatilità e facilità d'uso, in quanto richiede elettroniche esterne molto semplici, bassi potenziali di alimentazione e applicabilità in situazioni di vuoto.

Il limite maggiore alle prestazioni dei CCD è l'efficienza di trasferimento, che rende difficoltosa la costruzione di sensori a larga area e la capacità di misurare la carica effettivamente accumulata in ogni pixel.

Inoltre la inefficienza nel trasferire la carica non permette ai sensori scientifici di avere elevate velocità di lettura, perchè, per segnale deboli, si ha una alta percentuale di cariche perse. Le frequenze di scansione normalmente utilizzate sono circa 50 Kpixel/s.

Un altro aspetto che è oggetto di studio è la scarsa resistenza del silicio alle radiazioni ionizzanti e ai flussi di particelle energetiche. Diverse applicazioni, tipo esperimenti nello spazio o di fisica delle particelle, trovano nel CCD un candidato ideale come rivelatore, ma diversi sforzi devono essere impiegati per schermare opportunamente il sensore.

Ad esempio l'uso dei CCD con gli intensificatori di immagine sarebbe più efficiente impiegando il CCD come rivelatore di elettroni anzichè di fotoni, ma gli studi fatti fino ad oggi hanno mostrato che il limite maggiore è dovuto proprio ai danni da ionizzazione provocati dagli elettroni nel silicio.