



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Sensori d'immagine CCD e CMOS

Laureando:
Carlo DALL'ALBA

Relatore:
Prof. Alessandro
PACCAGNELLA

Correlatore:
Dr. Simone
GERARDIN

Anno Accademico 2011/2012

Indice generale

Introduzione.....	1
Sensori Charge Coupled Device.....	3
Descrizione generale.....	3
Il Condensatore MOS.....	6
Trasferimento della carica.....	9
Full Frame Transfer.....	10
Frame Transfer.....	10
Interline Transfer.....	11
Conversione della carica elettrica in segnale analogico.....	13
Rumore e performance di un CCD.....	15
Efficienza quantica (quantum efficiency) e sensibilità spettrale.....	15
Capacità elettronica per pixel (full well capacity).....	18
Corrente di buio (dark current)	18
Sensore Attivo C-MOS.....	21
Descrizione generale.....	21
Filtro di colori.....	22
Matrice dei pixel.....	23
Convertitore analogico digitale.....	23
Controllore digitale.....	24
Schema circuitale del pixel attivo.....	25
Rumore.....	29
Tecniche di correzione del rumore.....	29
Efficienza quantica e sensibilità spettrale.....	30
Hot pixel.....	34
Possibile risoluzione del problema.....	35
APS e CCD a confronto.....	39
Analisi tecnica.....	39
Analisi pratica.....	43
Conclusione.....	47
APPENDICE.....	49
L'effetto fotoelettrico.....	49

Introduzione

Il seguente elaborato si occuperà dell'analisi di due sensori d'immagine digitali: i Charge Coupled Device (CCD) o in italiano dispositivi ad accoppiamento di carica, e gli active pixel sensor (APS) o sensori CMOS.

I sensori CCD e CMOS, questi ultimi detti anche active pixel sensor (APS), sono due differenti tipi di sensori d'immagine che si prefiggono lo stesso fine, ossia trasformare un segnale luminoso in un segnale elettronico analogico o digitale che quindi permetta di ricostruire, elaborare e memorizzare l'immagine inquadrata. Questi due tipi di sensori sono tra i più diffusi nel XXI secolo e trovano applicazioni negli ambiti più disparati come l'astronomia e la microscopia, senza dimenticare gli utilizzi in ambito commerciale e consumistico nelle macchine fotografiche digitali, telecamere varie, fotocamere di cellulari e webcam.

Tuttavia si può affermare che gli APS hanno una storia molto più recente rispetto ai CCD, infatti solo i recenti progressi di miniaturizzazione nella costruzione dei circuiti integrati e i continui lavori di ricerca, hanno permesso ai sensori CMOS di diventare competitivi sia dal punto di vista commerciale che da quello prestazionale rispetto ai CCD.

L'obiettivo di questa tesina è quello di analizzare e descrivere le funzioni basilari dei CCD e dei sensori CMOS, per poi metterle a confronto, evidenziando anche i differenti ambiti in cui questi due sensori trovano tipica applicazione.

Sensori Charge Coupled Device

Descrizione generale

Il Charge Coupled Device (CCD), ossia dispositivo ad accoppiamento di carica, fu realizzato nel 1969 presso i Bell Lab durante delle ricerche svolte sulle memorie a bolle magnetiche. La domanda che si posero Bill Boyle e George Smith, due dei ricercatori, era se era possibile realizzare una “bolla” elettrica. Da ciò iniziarono studi al riguardo, fino a giungere alla realizzazione non di una memoria ma del primo CCD.

Fondamentalmente un CCD è un circuito integrato realizzato su del silicio che utilizza elementi sensibili alla luce, chiamati pixel e uno o più circuiti che portano all'esterno le cariche generate nei singoli pixel proprio utilizzando il sistema ideato da Boyle e Smith.

Per rendere in maniera semplice l'idea di come funziona un CCD utilizzando una similitudine “idraulica” si può pensare a una matrice di secchi (i pixel) che raccolgono l'acqua della pioggia (i fotoni di luce): ogni secchio è esposto per lo stesso tempo alla pioggia, poi si procede alla “lettura” del contenuto di ciascun secchio. Ogni riga della matrice “svuota” il proprio contenuto nella riga successiva vuota, finchè non si giunge ad una riga adibita alla sola lettura (uno shift register effettuato lungo le colonne). Quindi l'informazione, il contenuto dei secchi, si muove lungo due direzioni chiamate parallela e seriale. La prima si tratta dello spostamento da una riga all'altra, mentre la seconda è lo spostamento da una colonna all'altra nell'ultima riga.

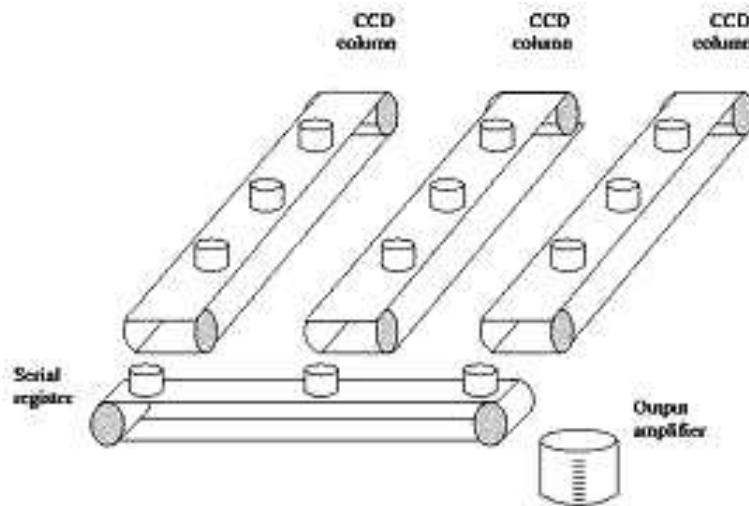


Figura 1: Esempio semplificato del funzionamento di un sensore CCD.

Il sensore CCD è formato da due parti fondamentali: la matrice di pixel e il filtro di luce.

La matrice di pixel, è costituita da condensatori metallo-ossido-semiconduttore (MOS) disposti a scacchiera, uno accanto all'altro, che in determinate condizioni per mezzo dell'effetto fotoelettrico possono liberare elettroni sfruttando l'energia dei fotoni della luce incidente il condensatore. Il tempo durante il quale il sensore CCD viene lasciato esposto alla luce viene denominato periodo di integrazione.

Il secondo è un filtro che permette su ogni singolo pixel solo il passaggio di determinate frequenze di luce (solitamente rosso, verde o blu), consentendo dopo una opportuna fase di rielaborazione dei dati una visione dell'immagine a colori.

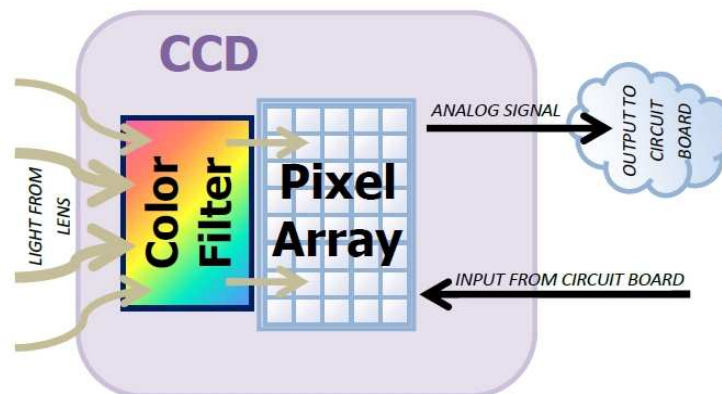


Figura 2: Parti principali di un sensore CCD

È importante evidenziare, per le valutazioni successive, che durante la fase di integrazione (esposizione), avviene la conversione dell'intensità del segnale luminoso in carica elettrica, mentre la trasformazione della carica elettrica in un segnale analogico di tensione avviene solo quando si arriva alla riga di lettura (shift register) alla fine della quale è posto un opportuno amplificatore che manda il segnale in uscita.

La conversione del segnale da analogico a digitale, infine, è affidata a un convertitore A/D che generalmente è esterno al sensore. Bisogna far notare che il risultato finale che si vuole ottenere è quello di trasformare un segnale luminoso in uno digitale, in modo tale che i dati in seguito possano essere elaborati da un calcolatore o da altri opportuni circuiti connessi al sensore.

Passiamo ora ad una visione più approfondita del funzionamento dei sensori CCD.

Il Condensatore MOS

Il condensatore MOS è l'elemento fondamentale del CCD, senza il quale non si riuscirebbe a convertire la luce in segnale elettrico.

Esso si ottiene sovrapponendo tre materiali: il metallo chiamato gate, che forma una delle due facce del condensatore, un isolante, comunemente SiO_2 , posto fra le due facce, e per ultimo da un substrato di silicio solitamente definito bulk. Di rilevante importanza è che il silicio sia drogato in modo tale che sia di tipo p, cioè deve essere arricchito di atomi accettori di elettroni, come il boro o elementi della terza colonna della tavola periodica.

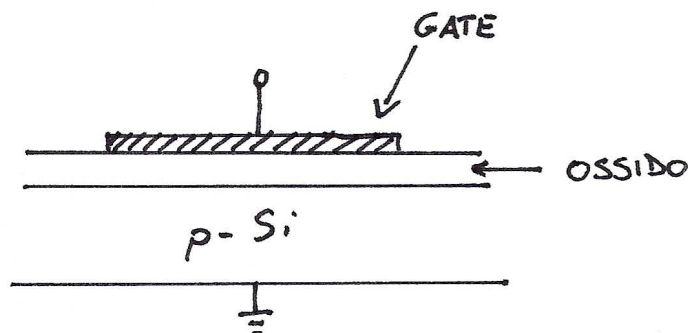


Figura 3: Struttura tipica del condensatore MOS

Per una più facile comprensione, da ora consideriamo il bulk collegato al terminale di massa. Una caratteristica fondamentale del condensatore MOS è la tensione di soglia V_T .

Facendo variare la tensione di gate V_g infatti si possono ottenere diverse regioni nello strato di silicio in base alla relazione di quest'ultima con V_T :

- Regione di accumulazione, ottenuta per $V_g \ll V_T$, o meglio negativa
- Regione di svuotamento, ottenuta per $V_g < V_T$
- Regione di inversione, ottenuta per $V_g > V_T$

La prima non è di particolare interesse per quel che concerne i ccd, la carica negativa presente sul gate è controbilanciata da una carica positiva nella regione superficiale del semiconduttore sottostante l'elettrodo metallico e l'ossido costituita da lacune. La distribuzione di carica positiva può essere considerata

superficiale.

All'aumentare della tensione V_g si ha un progressivo allontanamento delle lacune dalla superficie fin tanto che la concentrazione superficiale diventa inferiore al valore relativo alle regione interne del substrato di silicio. Tale effetto è detto svuotamento. La carica positiva accumulata sul gate è bilanciata dalla carica negativa degli atomi accettori ionizzati nella regione di svuotamento. La quantità di carica per unità d'area in una delle due facce del condensatore è data da

$$\frac{Q}{Area} = qN_A w_d \quad (1)$$

dove q è la carica elementare, N_A è la concentrazione di droganti accettori per unità di volume e w_d è la profondità della regione di svuotamento.

La profondità w_d dipende in particolare modo alla caduta di tensione tra gate e bulk e al drogaggio del substrato del silicio. Nell'ultimo stato, ossia quello della regione di inversione, ottenibile applicando tensioni superiori a V_T , si ha un ulteriore ispessimento della regione di svuotamento, ma questa condizione è molto instabile e se la si lascia così per un sufficiente periodo di tempo, chiamato tempo di vita, si ha la formazione di un sottile strato superficiale nel substrato di silicio di cariche libere, elettroni, ottenendo quindi una zona caricata in maniera opposta a quello che sarebbe il drogaggio del silicio. Essendo gli elettroni degli atomi accettori ionizzati gli unici disponibili per essere liberati, come inevitabile conseguenza si ha una diminuzione di w_d . In questo caso la carica totale per unità d'area si ottiene da

$$\frac{Q}{Area} = qN_A w' + qn_{surf} \quad (2)$$

dove w' è la nuova w_d e n_{surf} è la densità superficiale di elettroni. Il primo addendo rappresenta la carica non libera, mentre il secondo rappresenta gli elettroni che sono liberi di muoversi che sono quelli che più interesseranno al CCD.

Quest'ultimo stato è vitale per permettere la conversione fotone-carica. Infatti la fase di integrazione si sviluppa secondo quanto segue. I condensatori adibiti alla rilevazione della luce vengono portati ad una tensione di gate superiore a quella di soglia (valori che vanno dai 5V ai 10V) e subito vengono fatti esporre alla luce o meglio al fascio di fotoni. Una percentuale dei fotoni che raggiunge il substrato di silicio viene assorbita in funzione dell'energia di ciascun fotone E , equivalente a:

$$E = \frac{hc}{l} , (3)$$

dove h è la costante di Plank, c la velocità della luce e l la lunghezza d'onda della radiazione luminosa. Tale energia viene utilizzata, se sufficiente, per liberare l'elettrone di un atomo accettore creando così una coppia elettrone lacuna. Nel caso del silicio l'energia minima per consentire ciò, energy gap, equivale a 1,12 eV a temperatura ambiente. Sotto l'effetto del campo elettrico applicato, la lacuna viene allontanata nel substrato, mentre l'elettrone si porta verso il gate, arrivando fino a sotto l'ossido. In questa maniera gli elettroni che si addensano sulla superficie sono direttamente relazionati all'intensità di luce incidente. Per funzionare correttamente bisogna che il tempo di integrazione sia minore del tempo di vita della regione di svuotamento, altrimenti si perderebbe la relazione tra elettroni liberi e intensità di luce.

I pacchetti elettroni così ottenuti necessitano ora di essere “letti” per essere convertirli in un segnale analogico, devono quindi essere prelevati dai pixel e portati nella zona adibita alla lettura.

Trasferimento della carica

Il trasferimento della carica all'interno della matrice di pixel per raggiungere lo shift register può essere effettuato in svariati modi, ma tutti sono caratterizzati da un movimento fondamentale: lo spostamento della carica da un condensatore a quello adiacente.

Il procedimento in linea di principio è semplice: limitandoci per ora a considerare due soli condensatori adiacenti, lo spostamento del pacchetto di carica avviene semplicemente facendo passare la tensione di gate dell'elettrodo con la carica da trasferire dal valore alto (10V supponiamo) a 0V, mentre contemporaneamente la tensione dell'elettrodo adiacente viene portata progressivamente da 0V ai supposti 10V. In questo modo alla fine si avrà che la carica sarà stata trasferita da un elettrodo all'altro, quindi dal primo al secondo condensatore.

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

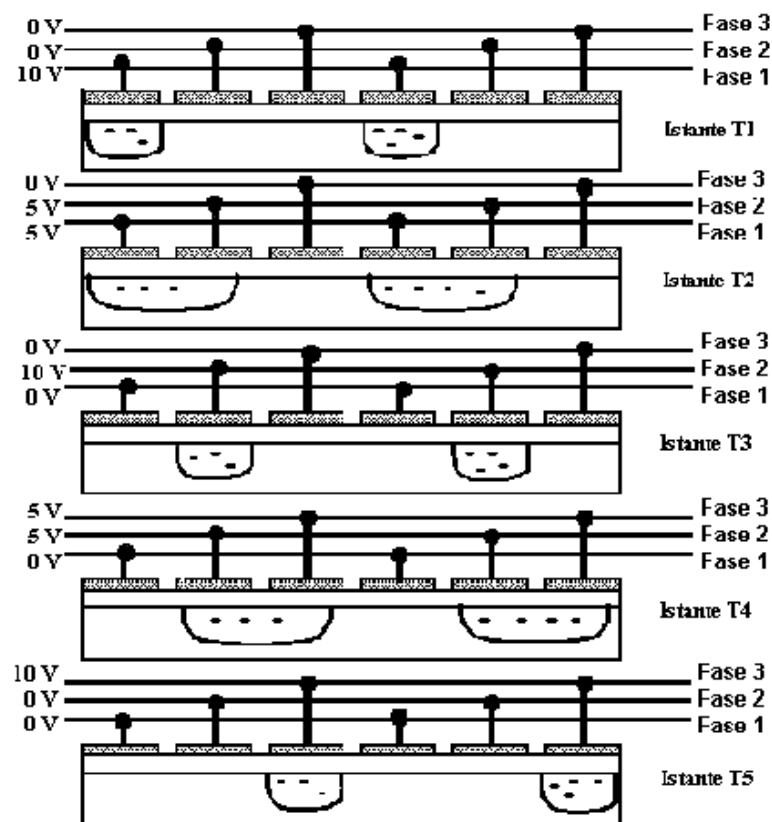


Figura 4: Trasferimento di carica a tre fasi

consente di trasferire la carica in modo controllato, anche su distanze di 1-2 cm. È importante però fare in modo che i potenziali sugli elettrodi siano opportunamente modulati (e per questo i vari momenti vengono chiamati fasi) per raccogliere e trasferire correttamente la carica senza alcuna perdita. Un modo per rendere sicuro lo spostamento di carica è quello di rendere un pixel formato da tre elettrodi disposti in successione lungo la direzione in cui vogliamo avvenga lo spostamento, il primo adibito a integratore, mentre gli altri due fungono solo da supporto per spostare in maniera efficiente la carica.

Tornando ora alla matrice di pixel, come già detto precedentemente esistono due tipi di movimenti, quello parallelo e quello seriale. Nel primo i pacchetti si muovono lungo le colonne della matrice, mentre nel secondo si muovono lungo l'ultima riga, lo shift register. Per evitare che durante il movimento parallelo avvengano dispersioni ortogonali rispetto alla direzione stabilita dagli elettrodi, si dispongono parallelamente ad essi due strisce sottili di impianto di lacune altamente concentrate, chiamate "channel stop".

Esistono vari metodi per il trasferimento dei pacchetti, di cui tre sono i principali e ora saranno descritti singolarmente.

Full Frame Transfer

I CCD Full Frame Transfer sono formati da soli pixel sensibili alla luce e per questo motivo sono quelli che occupano minor area a parità di numero di pixel. Come si vede in Figura 5, la lettura dell'immagine, al termine dell'esposizione, avviene mediante il trasferimento verticale del contenuto delle righe della matrice del sensore dalla prima all'ultima, dalle quali poi attraverso lo shift register il segnale sarà prelevato e poi campionato. Il processo può durare a lungo, anche alcuni secondi, inoltre è necessario che durante il trasferimento l'area del sensore sia schermata dalla luce, altrimenti l'immagine finale sarà affetta da smearing, cioè da un alone luminoso provocato dall'incessante assorbimento di luce.

Frame Transfer

I CCD Frame Transfer presentano due aree completamente identiche sul sensore, solo che una è sensibile alla luce, mentre l'altra è schermata da una lamina

metallica e funge da memoria in cui saranno depositati i pacchetti al termine del processo di integrazione dell'area sensibile. Generalmente tale spostamento richiede generalmente 1-2 ms.

Interline Transfer

I CCD Interline Transfer sono caratterizzati dal fatto che ad ogni colonna di elettrodi fotosensibili è associata una colonna adiacente, un registro, che gode in generale delle stesse proprietà. Al termine del processo di integrazione, i pacchetti di cariche vengono subito spostati nei registri verticali per poi essere trasferiti riga per riga allo shift register di lettura. Lo spostamento di carica dai pixel al registro verticale avviene in poco più di $1\mu\text{s}$.

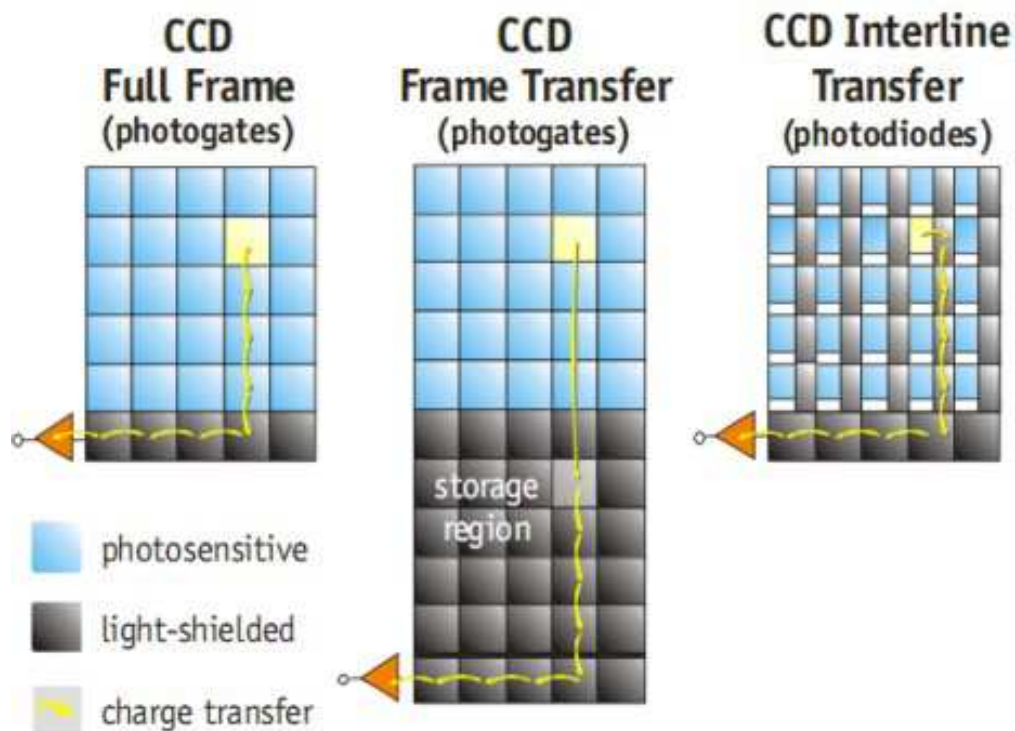


Figura 5: Differenti tipologie di trasporto di carica nella matrice di un ccd

Un ulteriore accorgimento per accelerare la fase di lettura dei pacchetti può essere quello di inserire uno shift register, con relativo amplificatore, oltre che alla base anche sulla sommità della matrice in modo da dimezzare il numero di pixel che ciascun registro deve leggere.

Tale artificio può essere ulteriormente migliorato aggiungendo un amplificatore su ciascun angolo del sensore e mandando metà del contenuto del registro in un

amplificatore e l'altra metà nell'altro. In questo modo si quadruplica, almeno teoricamente, la velocità di lettura, a discapito ovviamente di una complessità circuitale e un costo maggiori.

Conversione della carica elettrica in segnale analogico.

Una volta che il pacchetto di elettroni giunge in fondo al registro di lettura (shift register) non resta che convertire la quantità di carica in un segnale analogico. Un modo per rendere ciò possibile è illustrato nel circuito di Figura 6, dove S, SW e LG rappresentano gli ultimi tre elettrodi del registro. Prima di giungere all'ultima "casella" del registro, viene fornito un impulso di reset sul ramo RG, ossia viene attivato il Reset FET che scaricherà il condensatore C, la cui funzione è quella di accogliere gli elettroni dei pixel attraverso LG. Il reset FET deve restare

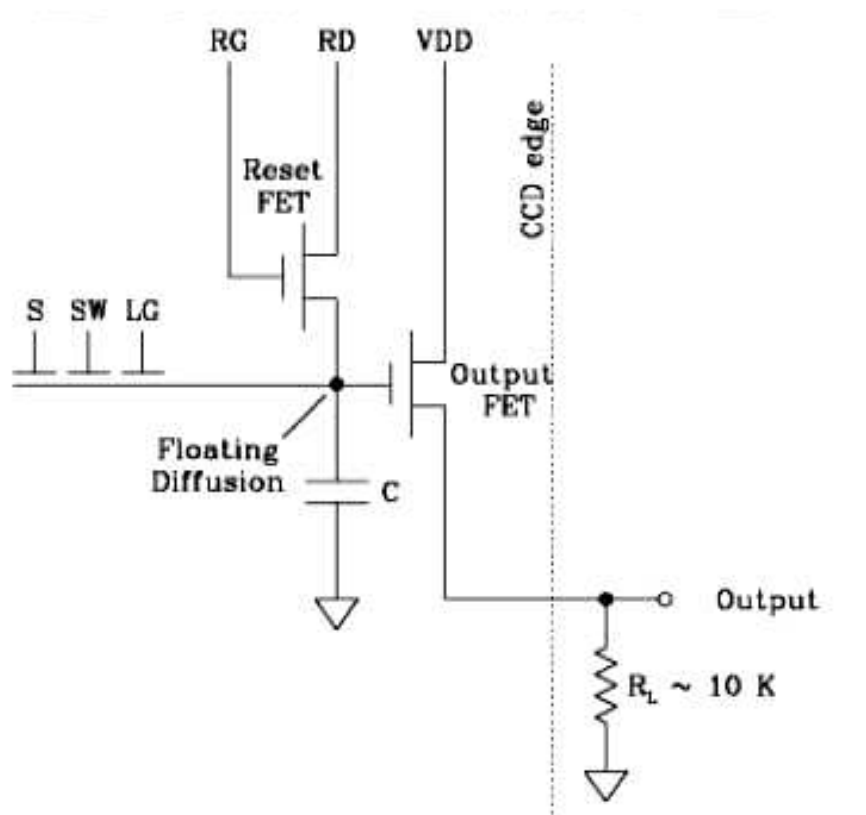


Figura 6: Schema circuitale per la lettura del pacchetto di carica

attivo fintanto che la capacità C non sia sufficientemente scarica. A quel punto il pacchetto di elettroni in ingresso viene caricato sulla capacità C portando così il nodo di uscita, o floating diffusion, ad una tensione V_0 pari a

$$V_0 = \frac{Q}{C} \quad (4)$$

dove Q è la carica che si trovava sull'ultimo elettrodo del registro di lettura orizzontale.

Tale tensione viene poi portata all'output attraverso un amplificatore source follower (drain comune) portando la resistenza di carico esterna a una tensione V_{os} pari a:

$$V_{os} = G V_0 = G \frac{Q}{C} \quad (5)$$

dove G è il guadagno del MOSFET in configurazione di drain comune.

Dalla formula (5) si può inoltre esprimere il valore della sensibilità S_v del nodo di lettura, cioè

$$S_v = G \frac{e}{C} = \frac{V_{os}}{n} \quad [\text{Volt}/e] \quad (6)$$

dove n è il numero di elettroni di carica $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Il potenziale di uscita V_{os} , a sua volta, sarà inviato all'ingresso di un convertitore Analogico Digitale dopo essere passato per un opportuno amplificatore. Il segnale digitale così ottenuto successivamente sarà usato e elaborato da altri circuiti e software per restituire l'immagine desiderata.

Seguirà ora un'analisi dei vari tipi di rumore che affliggono i CCD.

Rumore e performance di un CCD.

Come qualsiasi strumentazione elettronica, anche i segnali creati dai CCD sono affetti da vari tipi di rumore, tra i quali i principali sono il rumore al nodo di lettura e dell'amplificatore di uscita, il rumore dell'elettronica di analisi del segnale e di pilotaggio del sensore e infine il rumore legato alle caratteristiche proprie del CCD.

Efficienza quantica (quantum efficiency) e sensibilità spettrale.

Prima di iniziare la trattazione del rumore nei CCD è utile introdurre i concetti di efficienza quantica e di sensibilità spettrale. Questi sono due parametri di grande importanza per la classificazione prestazionale dei sensori ottici in generale. Come ci si potrà immaginare, non tutti i fotoni incidenti un generico pixel sono sfruttati per la liberazione di elettroni. Per questo motivo chiameremo fotoelettroni quei fotoni che riescono in tale fine. L'efficienza quantica può essere quindi definita come il rapporto, solitamente espresso in percentuale, tra i fotoelettroni e i fotoni incidenti,

$$E.Q. = \frac{\text{fotoelettroni}}{\text{fotoni incidenti}} \quad (7).$$

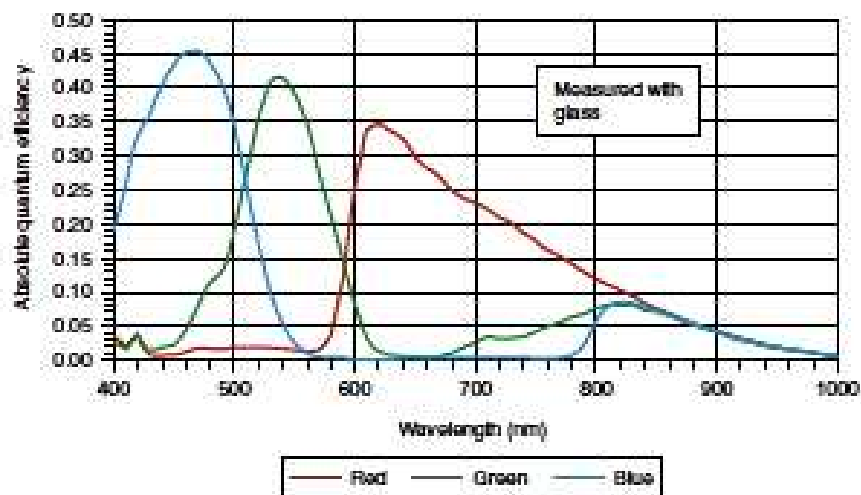


Figura 7: Sensibilità spettrale di un CCD, in base al tipo di luce che il filtro di Bayer permette di rilevare

La sensibilità spettrale, infine, non è altro che l'efficienza quantica misurata per una determinata lunghezza d'onda di luce incidente. In figura 7 è riportato un esempio di sensibilità spettrale di un CCD.

Questi due parametri sono molto importanti perché danno già un'idea di quanta informazione luminosa viene persa e soprattutto in quale range spettrale è in grado di operare il sensore. I valori tipici di efficienza quantica di un CCD, vanno dallo 0 al 60%, mentre nelle vecchie pellicole che usavano emulsioni si arrivava a valori, nel migliore dei casi, del 4%.

L'obiettivo di un buon progettista è quello di costruire sensori con efficienza quantica il più vicino possibile all'unità. Un modo per ottenere ciò può essere quello di usare pixel "back illuminated". Questi non sono altro che dei pixel capovolti, ossia illuminati dal lato del substrato di silicio, che prima era parzialmente schermato dal gate (front illuminated). In questa maniera tutto il pixel viene messo a contatto diretto con il fascio luminoso. Viene applicato comunque un sottile strato protettivo trasparente.

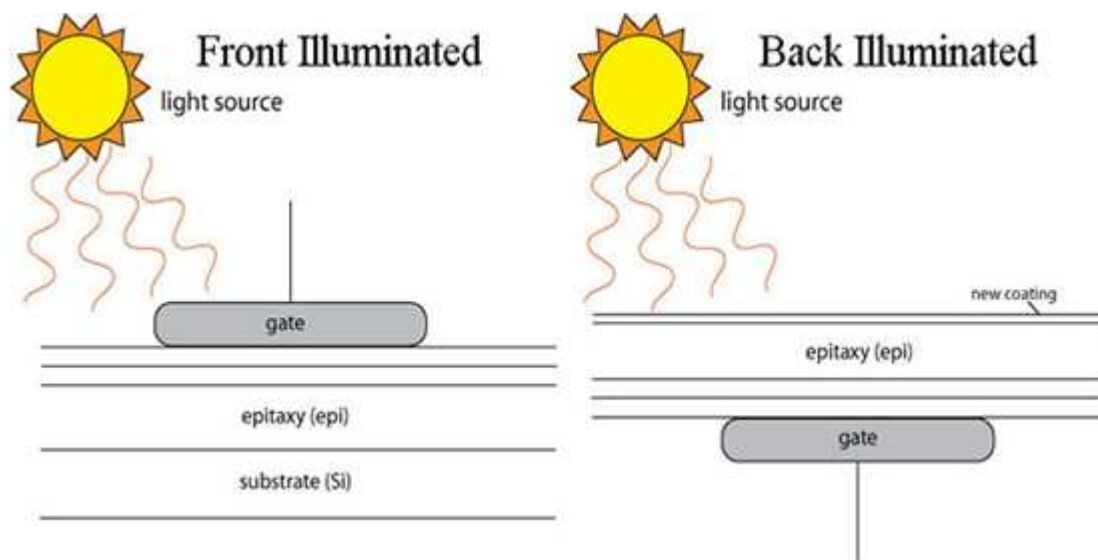


Figura 8: Differenti tipologie di realizzazione dei pixel del CCD

In questa maniera, come si può vedere nelle figure 9 e 10 si ottiene un aumento della prestazione per un buon intervallo di lunghezze d'onda, raggiungendo un livelli di efficienza quantica anche del 90% per certe lunghezze d'onda.

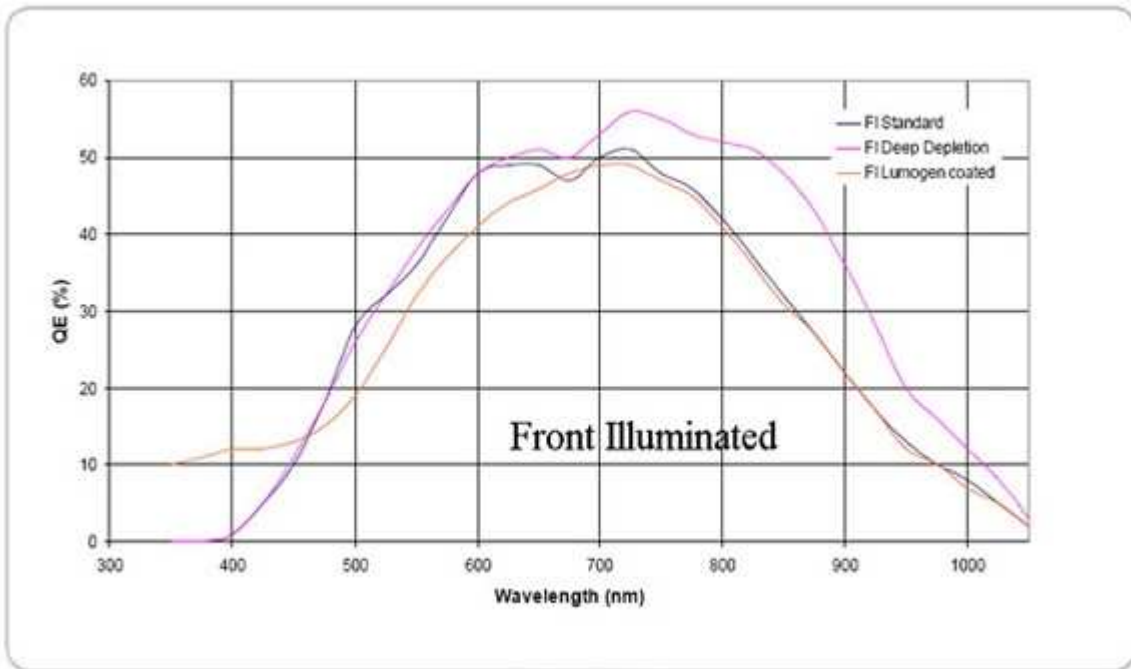


Figura 9: Efficienza quantica in un CCD Front Illuminated

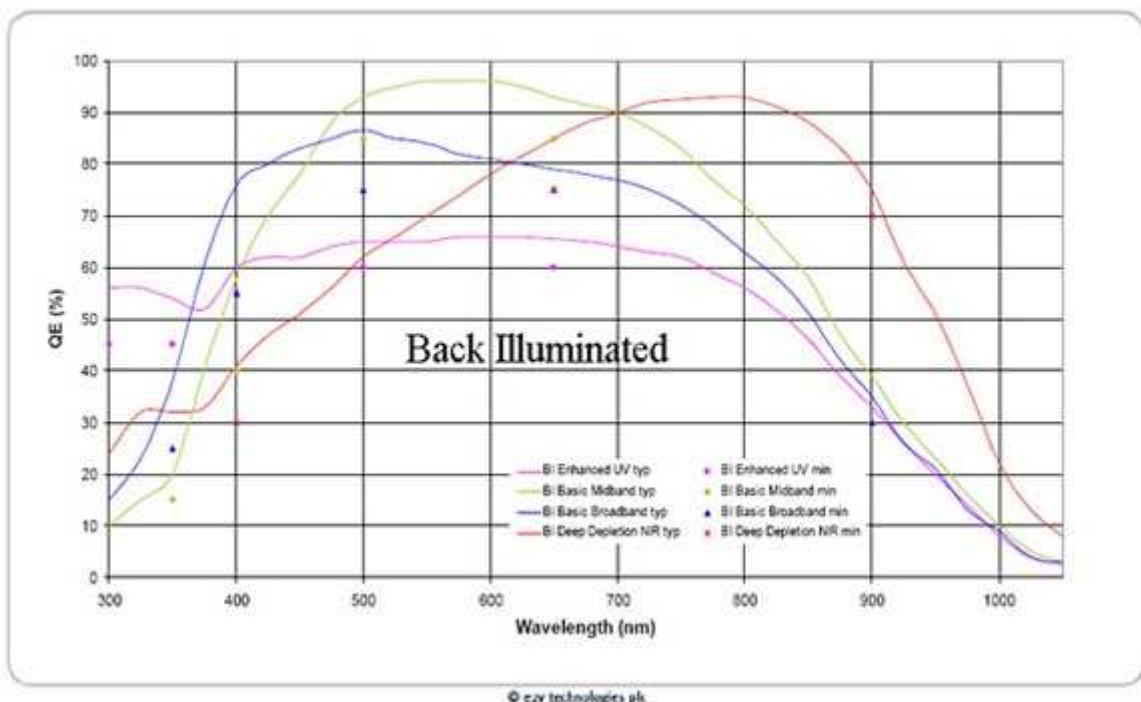


Figura 10: Efficienza quantica in un CCD Back Illuminated

Nelle seguenti sezioni si tratterà ora di due particolari tipologie di rumore legate alle caratteristiche fisiche del CCD.

Capacità elettronica per pixel (full well capacity).

I pixel non sono in grado di accumulare quanti elettroni si vogliono. Il numero massimo di fotoelettroni che un singolo pixel è in grado di raccogliere è una caratteristica molto importante, che prende il nome di capacità elettronica. Una elevata capacità elettronica implica tempi di integrazione più grandi perché il pixel saturi, a parità di intensità di luce incidente. Una volta che è stata raggiunta la saturazione del pixel gli eventuali elettroni in eccesso si spostano nei pixel adiacenti creando quindi rumore e una immagine sfalsata. Tale effetto nelle immagini prende il nome di “blooming”.

Esistono tuttavia metodi, non qui presentati, per minimizzare l'effetto di blooming.

Corrente di buio (dark current)

Statisticamente nella materia vi sono particelle con energia cinetica maggiore rispetto a quella media. Ciò avviene anche nei pixel del sensore CCD. Può capitare quindi che alcuni elettroni riescano a liberarsi e vengano accumulati nonostante il sensore sia schermato dalla luce o sia al buio. Questo fenomeno nei CCD prende il nome di corrente di buio (dark current). Una prima idea che viene per risolvere il problema potrebbe essere quella di azzerare le cariche nei pixel prima di esporre quest'ultimi alla luce.

Tuttavia la produzione spontanea di coppie elettrone - lacuna avviene anche durante il periodo di integrazione e a questo punto non si è più in grado di distinguere gli elettroni prodotti per effetto fotoelettrico da quelli prodotti spontaneamente. Tutto ciò crea degli errori nell'immagine. La corrente di buio è un rumore di tipo termico, infatti la quantità di elettroni prodotti spontaneamente è strettamente legata alla temperatura in cui opera il sensore. Proprio per questo motivo la corrente di buio prende anche il nome di corrente termica.

In generale il suo effetto si attenua circa di un fattore 2 ogni volta che la temperatura si abbassa di 6 °C circa. Come si può osservare dalla figura 11 a temperature di circa -100 °C il rumore generato dalla corrente di buio è praticamente assente. Inoltre il fenomeno della dark current è perfettamente riproducibile: in identiche condizioni di temperatura e durata di esposizione, un dato sensore genera circa la stessa quantità di elettroni a meno di un fattore di

dispersione statistica (rumore termico), variabile da sensore a sensore.

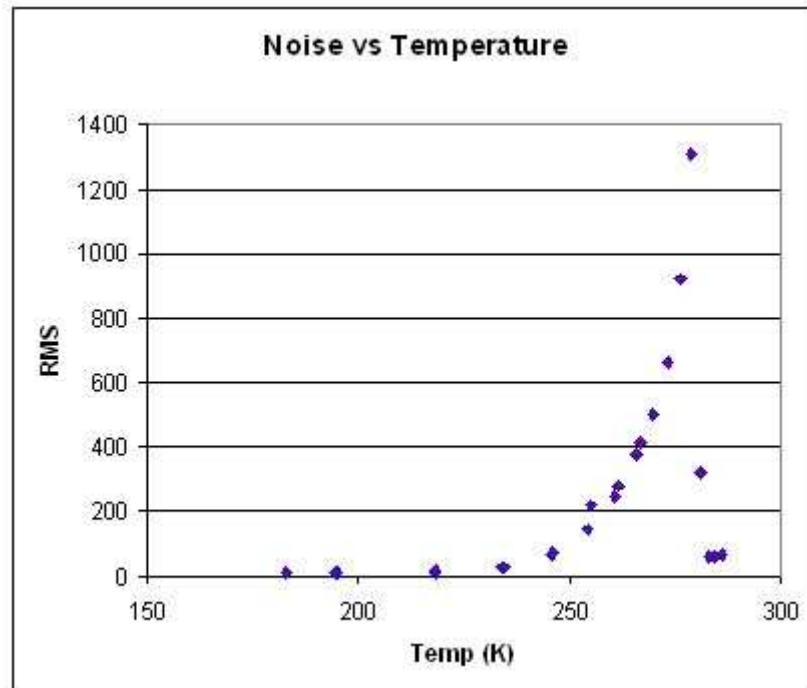


Figura 11: Grafico che confronta il rapporto segnale rumore (Root Mean Square) con la temperatura di un CCD

Conseguentemente a queste osservazioni, esistono vari modi per ridurre al minimo questo fastidioso fenomeno:

- Abbassare la temperatura in cui opera il sensore;
- Fare un'esposizione con il CCD schermato dalla luce (Dark Frame) di durata uguale a quella fatta per la normale esposizione (Light Frame), mantenendo possibilmente la medesima temperatura
- Sottrarre infine il dark frame al light frame.

Con i precedenti metodi tuttavia occorre evidenziare che abbiamo eliminato il segnale termico e non il rumore termico. Quest'ultimo non può essere eliminato completamente, in quanto aleatorio.

Abbassare di molto la temperatura del sensore ove possibile è comunque il metodo più efficace per ridurre fino a quasi eliminare la dark current. E' questo il metodo principalmente utilizzato ad esempio nei sensori per uso astronomico, che devono rilevare intensità luminose molto ridotte e quindi richiedono tempi di integrazione (esposizione) particolarmente lunghi. Nei sensori per uso astronomico per

migliorare il più possibile l'efficienza quantica viene anche omesso di applicare il filtro ottico, in quanto in questo caso l'informazione del colore non è significativa.

Sensore Attivo C-MOS

Descrizione generale

Il sensore attivo C-MOS, o Active Pixel Sensor, è un sensore d'immagine che, a differenza del CCD, contiene gran parte delle funzionalità necessarie in ogni singolo pixel, sfruttando appunto la tecnologia C-MOS. Sebbene l'idea di un pixel con amplificatore incorporato esistesse già negli anni '70, solo negli ultimi decenni si è dato avvio alla fabbricazione di tali sensori proprio grazie ai continui sviluppi di integrazione dei circuiti C-MOS che hanno permesso agli APS di diventare competitivi, sia dal punto di vista prestazionale che da quello commerciale, nei confronti dei diretti concorrenti CCD.

Il sensore è costituito da un circuito integrato e una matrice di pixel. Ciascuno di questi contiene un sensore di luce e un amplificatore di segnale. Inoltre, sempre nello stesso circuito integrato, sono allocati anche un convertitore analogico digitale e un controllore digitale.

La luce arriva attraverso le lenti dell'obiettivo e viene elaborata dal filtro di colore prima di raggiungere la matrice di pixel. Una volta che la luce filtrata raggiunge la matrice, ogni singolo pixel converte la luce in una tensione amplificata che verrà elaborata dal resto del sensore.

Le principali parti di un sensore C-MOS sono: il filtro di colori, la matrice di pixel, il controllore digitale e il convertitore analogico digitale.

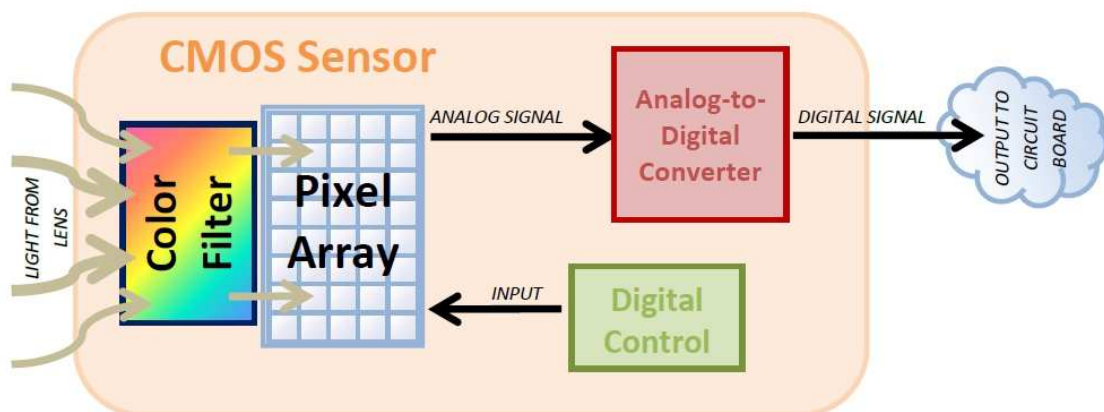


Figura 12: Parti principali di un APS

Filtro di colori

Sopra la matrice di pixel normalmente viene posta una matrice di filtri di colori primari per catturare l'informazione sui colori che compongono la luce incidente. Ciascun filtro della matrice corrisponde ad un singolo pixel e permette solo ad alcune lunghezze d'onda (colori) della luce di passare verso il pixel, quelle non desiderate invece vengono bloccate. Tali filtri sono indispensabili per la fotografia, in quanto i sensori di luce sono in grado di rilevare semplicemente l'intensità della radiazione incidente che non fornisce alcuna informazione sulla sua lunghezza d'onda e quindi sul suo colore, nel caso di luce visibile.

Si possono creare filtri che permettono la trasmissione di qualsiasi colore, ma comunemente i più usati utilizzano i colori primari rosso, verde e blu oppure ciano, magenta e giallo. Inoltre i differenti colori vengono disposti in determinate configurazioni per potere successivamente riottenere attraverso un opportuno algoritmo il colore reale (per l'occhio umano) di ciascun pixel. La disposizione più comune prende il nome di filtro di Bayer, dal nome del suo creatore. Il mosaico di questo filtro può essere scomposto in sotto-mosaici di dimensione 2x2 formati da due filtri verdi, uno rosso e uno blu, disposti uno accanto all'altro in modo tale che il rosso e il blu non siano adiacenti. Vengono usati il doppio di filtri verdi per

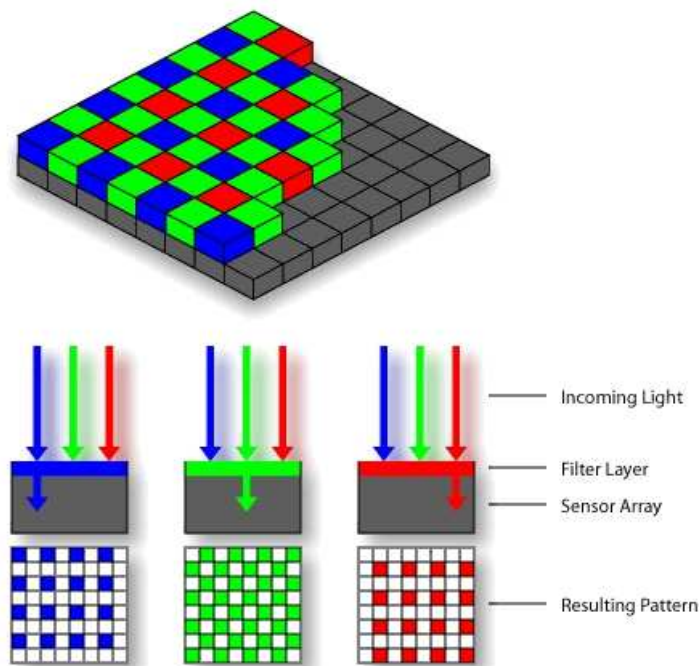


Figura 13: Tipico filtro di Bayer

mimare la maggiore sensibilità alla luce verde dell'occhio umano. Per ricostruire l'informazione completa di colore di ogni singolo pixel viene successivamente applicato un algoritmo che approssima il colore in base alle intensità dei colori primari dei pixel adiacenti.

Un diverso metodo per ottenere sempre l'informazione di colore è quello di utilizzare tre sensori identici su cui incide la stessa immagine filtrata in ciascun sensore secondo uno solo dei tre colori primari. In questo caso per ricostruire il colore di ogni pixel è sufficiente sommare le intensità dei tre colori dei pixel nella medesima posizione dei tre sensori. Questo metodo viene utilizzato ad esempio nelle telecamere di fascia alta.

Matrice dei pixel

La matrice di pixel consiste in milioni di pixel sensibili alla luce disposti a scacchiera e responsabili della cattura della luce filtrata in precedenza. Lo stesso pixel in seguito, sempre sfruttando l'effetto fotoelettrico, convertirà l'intensità di luce in un segnale di tensione già amplificato che poi sarà trasmesso al convertitore analogico digitale.

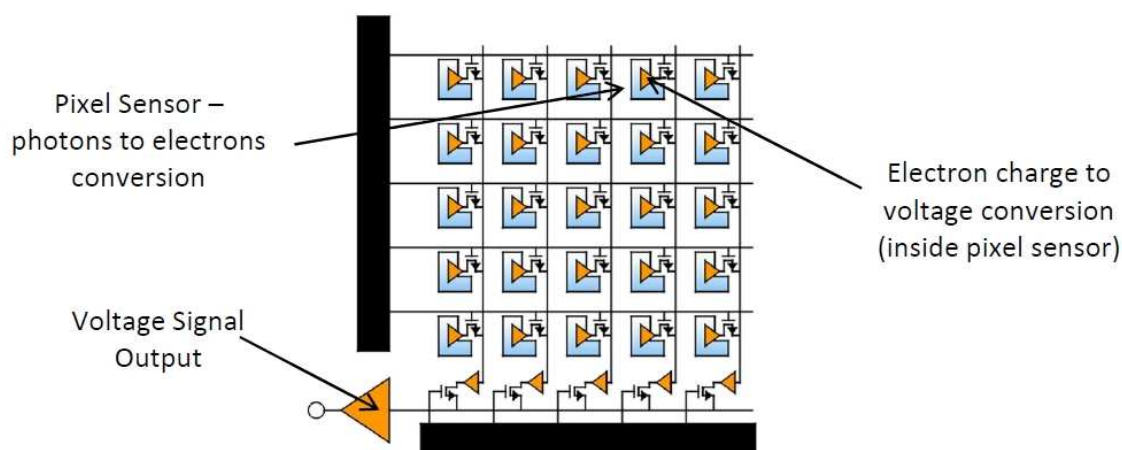


Figura 14: La matrice di pixel di un Active Pixel Sensor

Convertitore analogico digitale

Il convertitore analogico digitale è quel dispositivo elettronico che ha il compito di trasformare il segnale analogico in uscita dalla matrice del sensore in un segnale

digitale che sarà inviato ad un elaboratore di immagine esterno al sensore che provvederà a rendere il segnale digitale in un formato visualizzabile all'utente finale.

Controllore digitale

Il controllore digitale è l'insieme dei circuiti adibito alla gestione e alla regolazione della matrice di pixel. È costituito da diverse parti, tra le quali anche il generatore di clock e l'oscillatore che permettono la sincronia di lavoro di ciascun pixel con gli altri. Inoltre è il controllore a determinare quando iniziare la rilevazione di luce (integrazione) e quando concluderla.

Schema circuitale del pixel attivo

In questa sezione ci occuperemo dell'analisi dell'architettura di un singolo pixel della matrice del sensore attivo C-MOS. Come vedremo tra breve le parti principali che costituiscono il pixel sono il fotodiodo, responsabile della rilevazione del segnale luminoso, e l'amplificatore.

In Figura 15 è rappresentato un tipico schema circuitale del pixel, costituito complessivamente da un fotodiodo, un condensatore C, un transistor p-MOS M_1 e 2 n-MOS M_2 , M_3 . I gate dei transistor M_1 e M_3 sono pilotati rispettivamente dai segnali digitali RESET negato e ROWSEL (selezione della riga), mentre V_{DD} rappresenta la tensione di alimentazione del pixel. Occorre specificare che il condensatore C è il risultato della somma della capacità di giunzione del diodo e della capacità in ingresso al gate di M_2 .

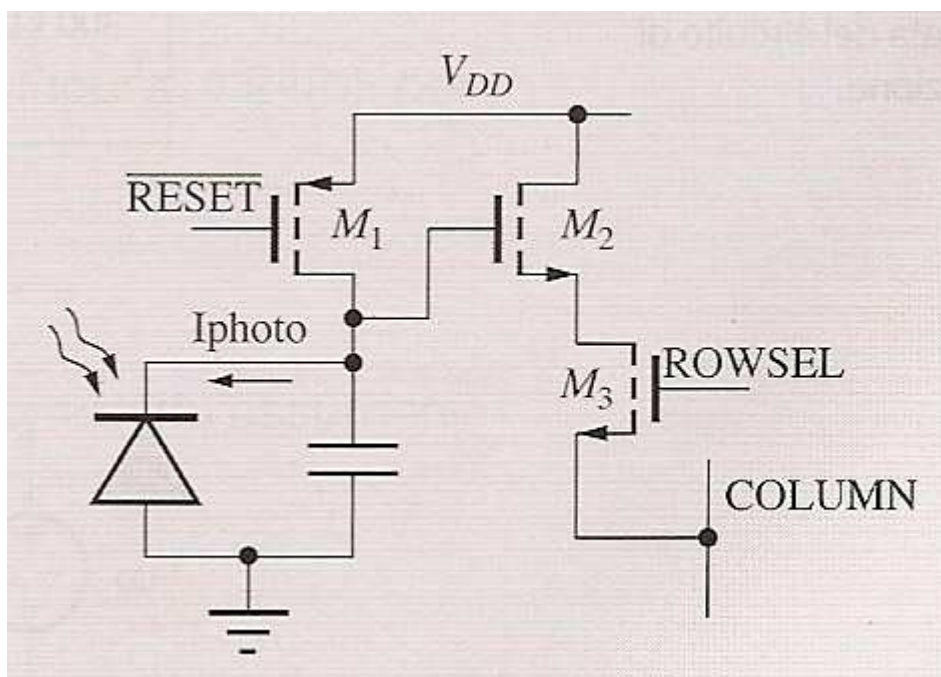


Figura 15: Circuito tipico di un pixel di un APS

Il fotodiodo non è altro che un diodo che in polarizzazione diretta si comporta normalmente, mentre quando è polarizzato inversamente (potenziale al catodo maggiore di quello all'anodo), e viene investito da un fascio di luce, consente il passaggio di corrente da catodo a anodo in relazione all'intensità di luce.

L'intensità di questa corrente, nel caso di polarizzazione inversa, è abbastanza costante al variare di tensione (Figura 16, quadrante III).

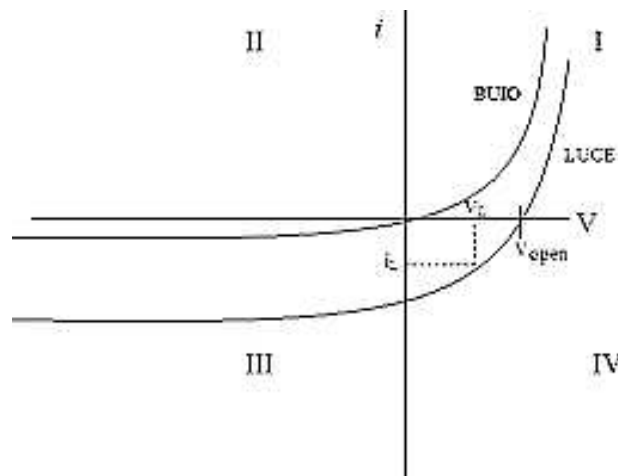


Figura 16: Caratteristica i-v di un fotodiiodo

Il fotodiiodo è posto in parallelo ad un condensatore che prima dell'esposizione tramite il comando $\overline{\text{RESET}}$, che manda in conduzione il MOS M1, viene portato alla tensione V_{DD} , polarizzando quindi inversamente il fotodiiodo. Durante il periodo di integrazione il fotodiiodo inizierà a far passare una corrente I_{photo} che scaricherà progressivamente la capacità C, abbassando la tensione al gate di M_2 a un valore V_{lux} tale che

$$V_{lux} = V_{DD} - CI_{photo}t_{esp} \quad (8)$$

in prima approssimazione, dove t_{esp} è il tempo di integrazione cui è stato sottoposto il pixel. Allo stesso tempo la tensione V_{lux} viene riportata al source di M_2 che non è altro che un amplificatore a drain comune (source follower) con un valore V_s del tutto analogo a quello della formula (2) nel capitolo 1. Fino a questo momento però il segnale non è ancora stato inviato sulla linea di colonna in comune con gli altri pixel della stessa colonna, solo quando ROWSEL sarà alto M_3 , che funge da interruttore, si accenderà e trasmetterà il segnale V_s al convertitore analogico digitale. Terminata la fase di lettura ROWSEL torna basso e si può preparare il pixel per un nuovo ciclo di rilevazione. A tale fine ci pensa di nuovo il MOSFET di reset M_1 . Per iniziare una nuova lettura basterà mettere il segnale di $\overline{\text{RESET}}$ alto, in modo

che il p-MOS si spenga, e permettere il flusso luminoso.

Fase	M_1	M_2	
Reset	ON	OFF	Il fotodiodo viene polarizzato in inversa, portando il catodo e la capacità C a V_{DD} .
Integrazione	OFF	OFF	Il fotodiodo inizia a scaricare la capacità C in proporzione all'intensità di luce.
Lettura	OFF	ON	Il pixel è collegato alla linea di colonna. Il valore del pixel è disponibile per la lettura.

Tabella 1: Riassunto delle fasi di funzionamento di un pixel APS

Il sensore nella sua interezza è costituito da una serie di repliche del pixel finora descritto disposti in una matrice in cui ogni riga e ogni colonna hanno in comune una linea di bus. L'insieme di queste linee si connette ai circuiti che implementano il decoder di riga e di colonna che gestiranno la lettura sequenziale di righe e colonne come mostrato in figura 17. In fondo a ciascuna colonna infine è posto un transistor che, quando è acceso, determina la lettura della colonna cui è connesso. L'interfaccia finale tra la matrice e l'esterno è un buffer.

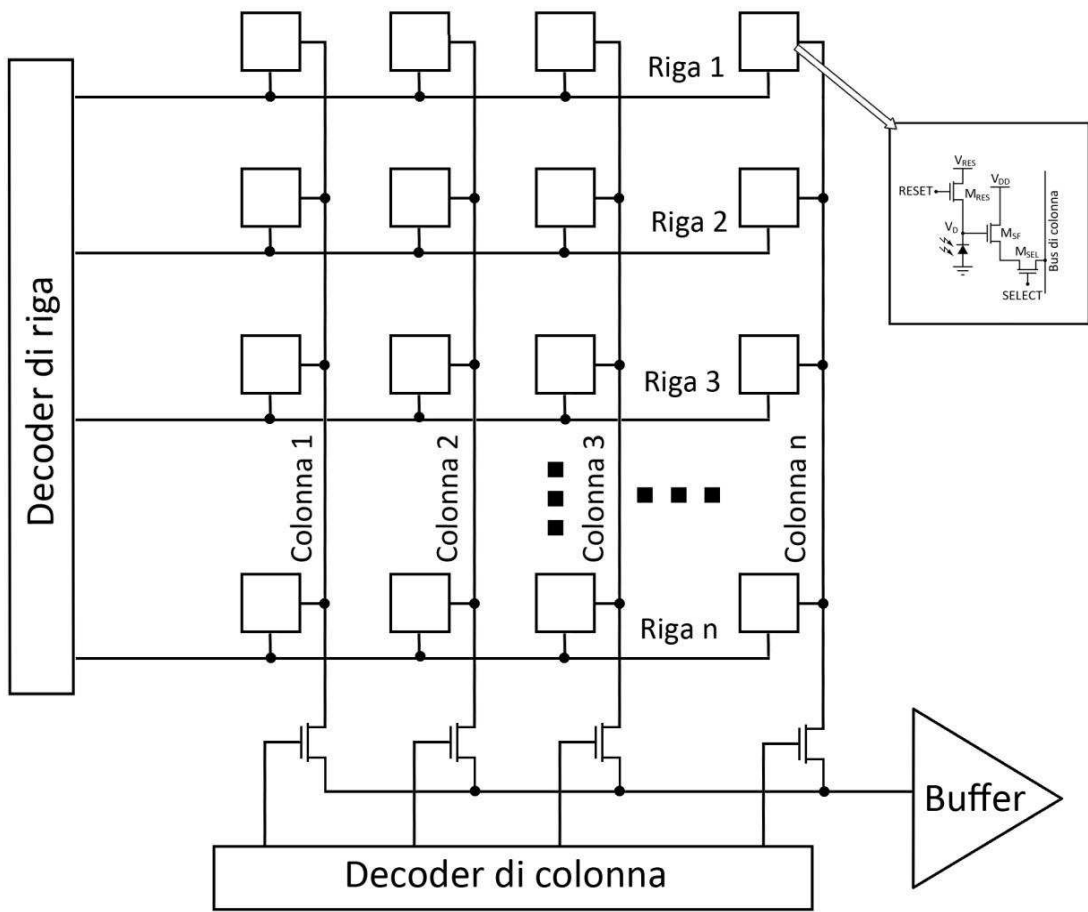


Figura 17: Schema di un sensore APS

Rumore

Negli APS sono presenti molti tipi di rumore che possono dipendere da fattori esterni come fluttuazione della tensione di alimentazione, segnali digitali di controllo non puliti, disturbi elettromagnetici oppure da caratteristiche propriamente intrinseche al sensore. Le cause principali di quest'ultimo tipo di rumore sono resistive/termiche.

Come i CCD anche i sensori APS sono affetti dall'effetto della corrente nera, infatti alla normale corrente di polarizzazione del diodo può aggiungersi una piccola corrente, dell'ordine dei fA a temperatura ambiente, che contribuisce alla scarica del condensatore fornendo quindi un dato non più veritiero sull'intensità della luce. Questo effetto è molto più evidente quando si effettuano lunghe esposizioni rispetto a quelle brevi, infatti la corrente nera ha più tempo a disposizione per scaricare il condensatore. Altra causa di rumore è quella legata ai transistor che formano il pixel, infatti l'amplificatore a drain comune è affetto da rumore termico, così pure come il transistor di reset (M_1 in figura 15).

Altre due forme di rumore che affliggono gli APS, di cui si darà solo un accenno sono il rumore Shot e il rumore Flicker (o rumore $1/f$), legati alla fluttuazione del numero di portatori. Il primo si presenta ogni qual volta che le cariche elettriche passano da una regione di diffusione a un'altra, come ad esempio in un diodo o in un transistor bipolare, dove le cariche minoritarie vengono iniettate da una regione ad un'altra attraversando una barriera di potenziale, mentre il rumore Flicker è una conseguenza della presenza di trappole dovute ai difetti cristallografici del dispositivo, che catturano o rilasciano portatori di carica causando delle fluttuazioni.

Tecniche di correzione del rumore

Per il rumore termico, il rumore Shot e il rumore Flicker non è possibile intervenire più di tanto, data la loro aleatorietà: i primi due sono approssimabili a rumore bianco con spettro di densità di potenza per unità di frequenza costante, nell'ultimo invece lo spettro di densità è in funzione inversa della frequenza.

L'unico rimedio possibile è quello di affinare le tecniche di costruzione dei sensori e possibilmente mantenerli a temperature operative basse.

Per quanto riguarda la corrente nera invece esiste un procedimento per attenuare, se non annullare nel migliore dei casi, il suo effetto.

Il metodo è del tutto analogo a quello sfruttato nei CCD, ossia viene misurato il Dark Frame che successivamente viene sottratto al Light Frame, mantenendo le stesse condizioni di temperatura ed esposizione.

Efficienza quantica e sensibilità spettrale

In figura 18 viene presentato un esempio tipico della sensibilità spettrale dei sensori attivi CMOS sempre considerando la luce che ha già attraversato il filtro di Bayer. Come si può osservare i pixel risultano più sensibili alla luce rossa e inoltre si evince che l'efficienza quantica varia dallo 0 al 40% circa. Questo risultato è fortemente in relazione alle caratteristiche di progettazione e costruzione del fotodiodo.

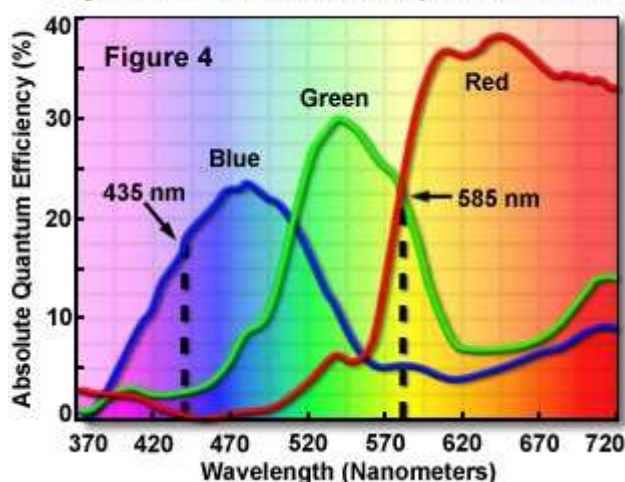


Figura 18: Esempio di sensibilità spettrale in un APS

Come nei CCD, anche nei sensori CMOS è possibile incrementare l'efficienza quantica mediante la tecnica della retro-illuminazione. Infatti tutte le linee di interconnessione tra i MOSFET dei singoli pixel e dei bus di riga e colonna sono causa di ostruzione al passaggio di luce, in quanto nella normale procedura di costruzione sono realizzati sopra i foto-elementi (vedi figura 19). Con la tecnica

della retro-illuminazione le interconnessioni metalliche sono poste sotto i foto-recettori e quindi può essere raccolta una maggiore quantità di luce. Questo porta a un incremento dell'efficienza quantica dei sensori, in pratica porta a ottenere una maggiore sensibilità nelle condizioni di bassa illuminazione (Figura 20).

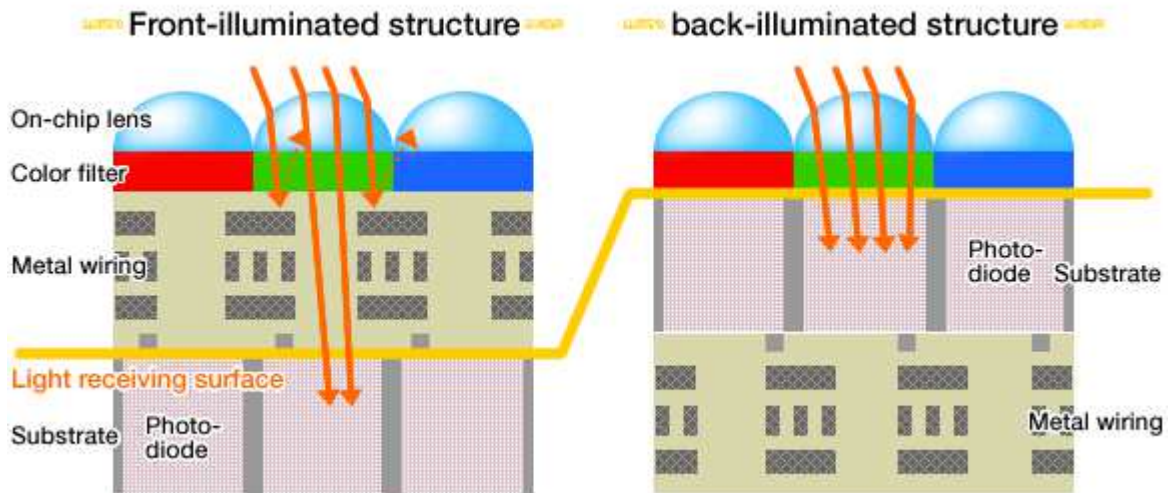


Figura 19: Due differenti tecniche di costruzione dei sensori CMOS.

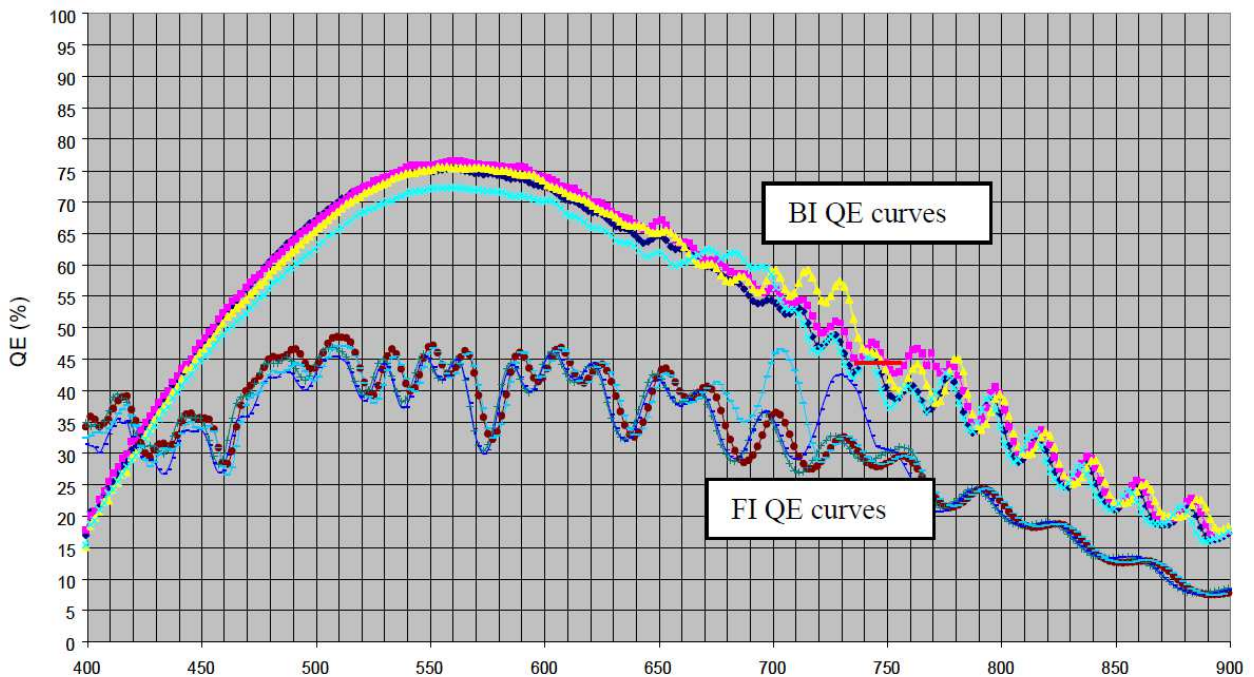


Figura 20: Efficienze quantiche di un sensore CMOS da 2 Mpixel front-illuminated (FI QE curves), e back-illuminated (BI QE curves)

Naturalmente dal punto di vista tecnologico non è affatto semplice realizzare dei sensori back-illuminated, sia che siano CCD che CMOS. Una volta esaurite le classiche fasi di realizzazione dei sensori, bisogna adottare ulteriori fasi di lavorazione per ottenere il risultato finale del sensore retro-illuminato.

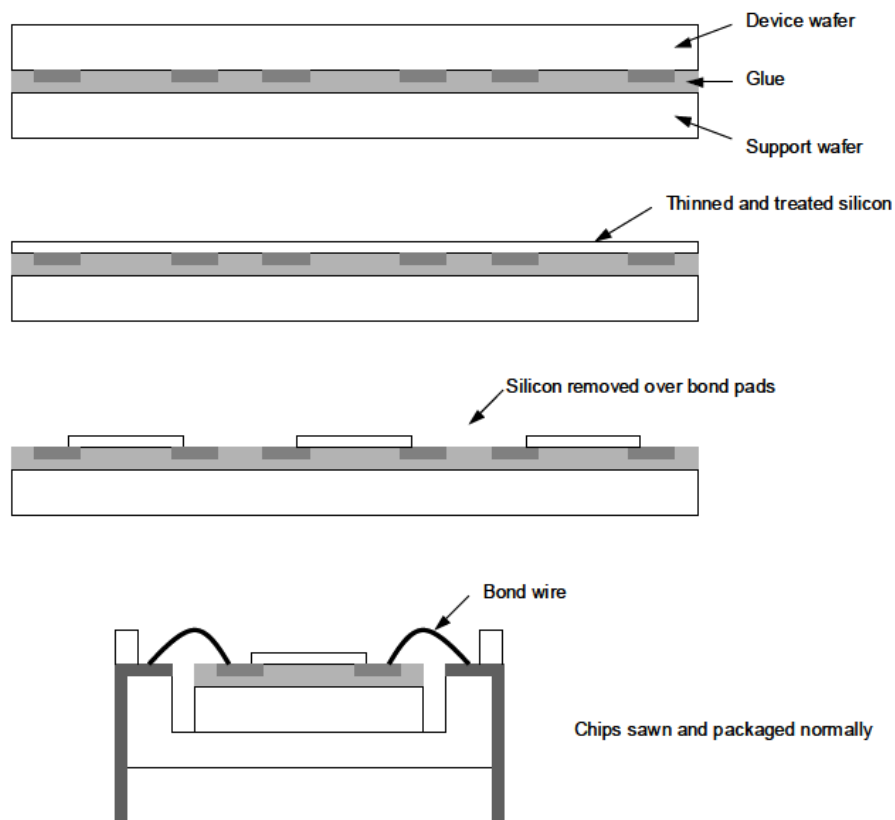


Figura 21: Fasi di realizzazione di un sensore CMOS back-illuminated

La sequenza di fabbricazione di un sensore back-illuminated generalmente è la seguente.

- a) Il wafer di silicio con i sensori già completati, viene incollato o saldato a livello molecolare a faccia in giù su un wafer di silicio non drogato che funge da supporto meccanico.
- b) Il wafer viene lavorato assottigliandolo dal lato che contiene i sensori fino a raggiungere lo spessore desiderato, scoprendo praticamente i fotodiodi. Il silicio in eccesso viene sciolto da un acido, e questo è facilitato usando una

concentrazione di acido tale che la velocità di scioglimento rallenti al cambio di drogaggio del substrato (quando incontra i fotodiodi), producendo così automaticamente uno spessore molto uniforme.

- c) Viene realizzato uno strato trasparente di passivazione.
- d) Il silicio sopra le piazzole metalliche per la saldatura dei fili di contatto viene rimosso.
- e) Vengono depositati gli eventuali filtri di Bayer.
- f) Il wafer viene tagliato per ottenere i singoli chip e questi vengono incapsulati nella stessa maniera dei dispositivi front-illuminated, ma ora i fili di saldatura sono effettivamente realizzati dal lato opposto di dove erano state realizzate le piazzole metalliche.

Alla fine di questa procedura il sensore realizzato è adatto a ricevere la luce dal lato che nei normali sensori è il lato in ombra.

Hot pixel

Nella sezione precedente si è trattato particolarmente del fenomeno della dark current. Si è inoltre evidenziato il fatto che la dark current contribuisce alla scarica del condensatore in modo che la carica totale spostata in prima approssimazione è:

$$output = m(I_{photo}t_{int} + I_{dark}t_{int}) \quad (9),$$

dove I_{photo} è la normale corrente indotta dalla luce direttamente proporzionale all'intensità d'illuminazione, m è la sensibilità del singolo pixel e t_{int} è il periodo di integrazione. Il termine I_{dark} esprime la dark current presente in ciascun pixel. Quindi il prodotto $m \times I_{dark} \times t_{int}$ rappresenta il segnale "scuro".

Finché la I_{dark} si mantiene a livelli bassi, si parla dell'ordine di fA, non ci sono problemi. Tuttavia andando avanti nel tempo, con l'invecchiamento del sensore (figura 22), si presentano dei pixel in cui il livello di I_{dark} diventa più elevato, i quali prendono il nome di hot pixel.

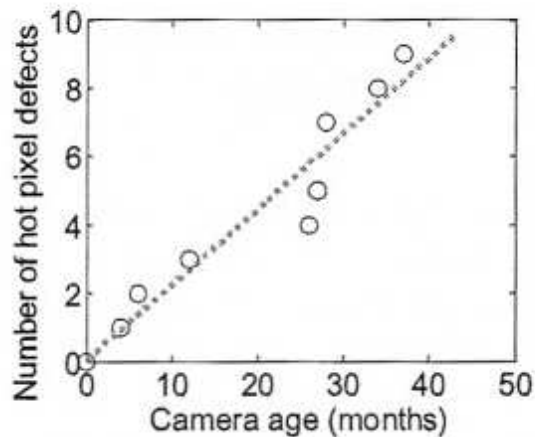


Figura 22: Crescita del numero di Hot Pixel in un sensore CMOS nel tempo

Gli hot pixel hanno la caratteristica che, anche con tempi molto brevi di esposizione, si portano velocemente in saturazione, ossia scaricano completamente la capacità del fotodiode. A questo punto il pixel non è più in grado di rilevare

ulteriore luce, anzi l'informazione può essere completamente coperta dalla anomala corrente di perdita del fotodiode. Nell'immagine finale gli hot pixel sono individuabili come dei puntini bianchi o particolarmente luminosi.

Possibile risoluzione del problema

Esistono svariati metodi per correggere questo difetto. Il primo è quello già citato del dark frame, solo che risulta poco efficace. Infatti se durante la misura del Dark Frame l'hot pixel già satura, a maggior ragione saturerà durante la misura del Light Frame, ottenendo quindi per sottrazione nell'immagine finale un punto nero invece che bianco. Una eventuale saturazione durante il Light Frame fa perdere tutta l'informazione sull'effettivo segnale luminoso.

Un altro metodo è quello di mascherare via software gli hot pixel noti, individuabili attraverso un Dark Frame, interpolandolo via software con quelli adiacenti. Questo porta però a una sicura discordanza con l'informazione che sarebbe stata raccolta in quel pixel.

Una ultima possibilità è quella di intervenire via hardware per la risoluzione del problema. Si è osservato infatti che il difetto che causa questo fenomeno molto spesso è circoscritto ad una piccola regione del fotodiode.

Pertanto gli hot pixel possono essere corretti suddividendo il pixel in più sub-pixel in modo che il difetto influenzi solo una parte del circuito del pixel stesso. Da questa idea hanno preso forma i fault-tolerant APS (FTAPS).

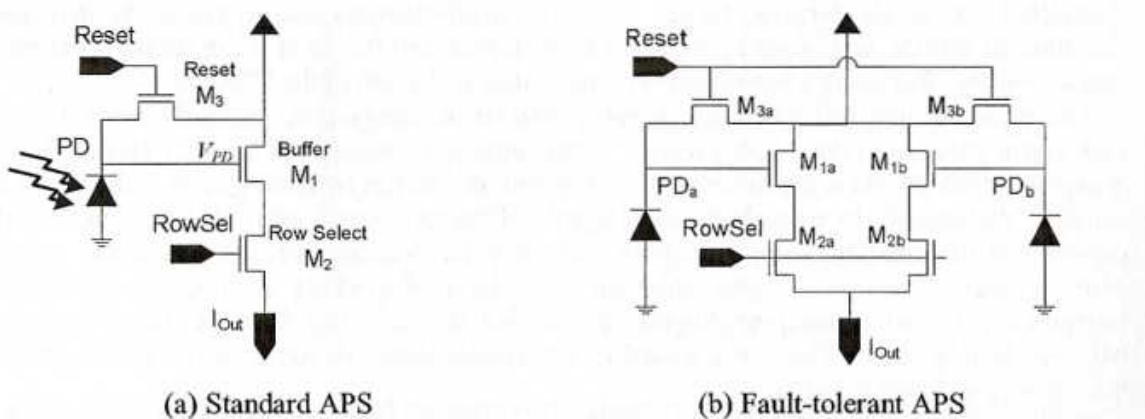


Figura 23: Schema circuitale di un normale pixel e di un fault-tolerant APS

I FTAPS compensano al problema degli hot pixel suddividendo il pixel in due sotto-pixel con una minima sovrapposizione di aree e senza aggiungere complessità ai

segnali di controllo. Questi si ottengono sempre a partire da un pixel a tre transistor, solo che ora il fotodiodo in figura 23(a) PD è suddiviso in due fotodiodi PD_a e PD_b occupando la medesima area, il circuito interno al pixel a tre transistor viene poi duplicato in modo da formare due circuiti speculari M_{1a}, M_{2a}, M_{3a} e M_{1b}, M_{2b}, M_{3b} (figura 23b). Siccome i due sub-pixel operano come dispositivi mediati da corrente, i rispettivi output vengono sommati formando un'uscita combinata I_{out}. Durante la rilevazione di luce i due sub-pixel lavorano indipendentemente in modo tale che un eventuale difetto di hot pixel rimanga circoscritto a solo una metà del pixel. In questa maniera rimane preservato l'intervallo dinamico del pixel e nel peggiore dei casi la sua sensibilità si riduce di un fattore 2. Il pixel in questa maniera saturerà solo se entrambi i sub-pixel satureranno.

Tuttavia, anche se il problema si circoscrive a solo ad uno dei due sub-pixel nel peggior caso, ciò non toglie che l'immagine finale risulti comunque leggermente alterata a causa dell' hot pixel. Per questo motivo è stato sviluppato un algoritmo che permette di rilevare e correggere l'errore.

Un' esigenza di questo algoritmo è innanzitutto che la risposta all'illuminazione di un pixel venga conservata nella camera. In un hot pixel noi consideriamo la risposta I_{out} di uscita come la somma della risposta di un buon sub-pixel e di un hot sub-pixel,

$$I_{out} = f(Q_{photo} + Q_{dark}) + f(Q_{photo}) \quad (10)$$

Dove Q_{photo} e Q_{dark} sono la carica accumulata in seguito all'illuminazione e la dark current, mentre f(Q) è la risposta all'illuminazione di un singolo sub-pixel.

Solitamente tale funzione è memorizzata in una tabella di ricerca, o come una serie di parametri associati a ciascun pixel, in modo tale che eventuali variazioni nel tempo possano essere registrate.

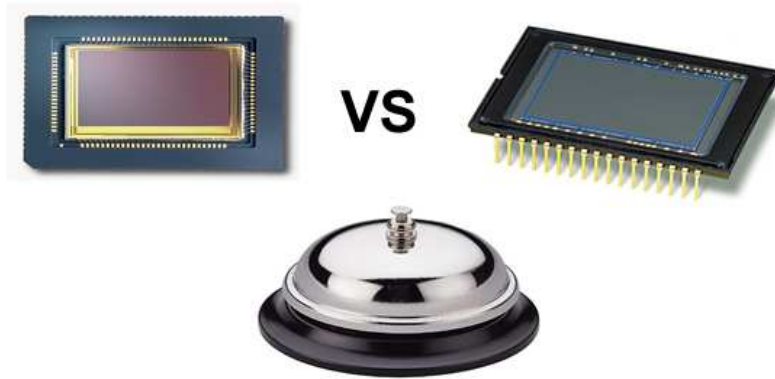
Una volta che è stata catturata l'immagine, l'algoritmo di correzione procede identificando gli hot pixel. Per fare ciò basta realizzare un dark frame dove gli hot pixel saranno i punti luminosi nell'immagine ottenuta. Per ciascuno di questi pixel vengono associati i valori I_{picture} che è la corrente misurata nel pixel durante la misurazione dell'immagine e I_{darkframe} che è il valore di dark frame.

Verranno ora presentati le principali fasi su cui procede l'algoritmo:

1. Costruzione della funzione di risposta all'illuminazione $f(Q)$.
2. Memorizzazione dell'output dell'immagine catturata, $I_{\text{picture}} = f(Q_{\text{dark}} + Q_{\text{photo}}) + f(Q_{\text{photo}})$.
3. Memorizzazione dal dark frame di $I_{\text{darkframe}} = f(Q_{\text{darkframe}})$.
4. Stimare $Q_{\text{dark}} = f^{-1}(I_{\text{darkframe}})$.
5. Stimare Q_{photo} in modo tale che $I_{\text{picture}} \approx f(Q_{\text{dark}} + Q_{\text{photo}}) + f(Q_{\text{photo}})$ sia soddisfatta.
6. Mappare Q_{photo} sull'intervallo usato dal formato di immagine e salvare il file d'immagine.

Occorre far notare che tale algoritmo viene applicato sui soli pixel anomali, che di solito sono meno dello 0,1% dei pixel totali così si minimizza il costo in tempo di elaborazione di queste operazioni. Naturalmente l'algoritmo funziona correttamente solo fino a che il pixel rimane nella zona lineare di funzionamento, ossia non satura completamente.

APS e CCD a confronto



Il seguente capitolo è dedicato ad un confronto tra le due differenti tecnologie presentate e analizzate in precedenza, evidenziandone punti di forza e debolezze. Si partirà da un'analisi più tecnica per poi passare ad una più pratica.

Analisi tecnica

Nonostante i CCD e gli APS siano entrambi sensori d'immagine digitale che sfruttano l'effetto fotoelettrico, essi si differenziano per le tecniche di elaborazione dei dati

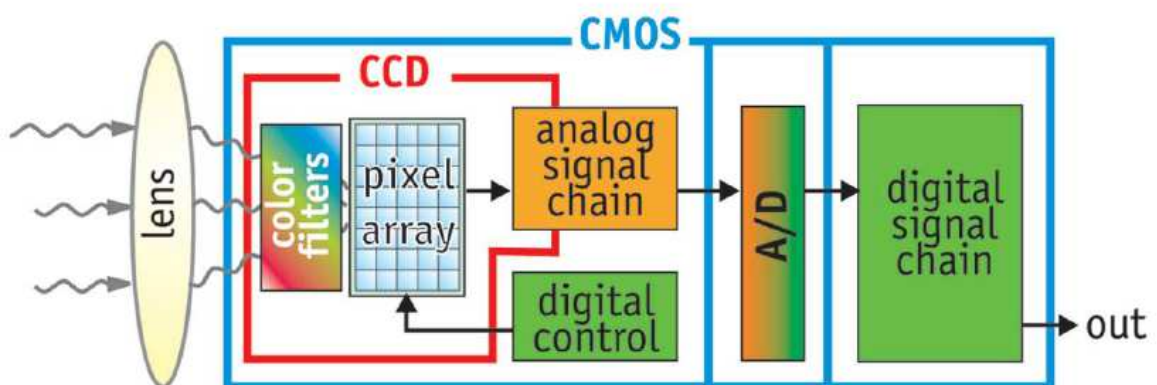


Figura 24: Architettura di un CCD e di un sensore CMOS

e per quelle di costruzione. Le differenze si evidenziano già nell'architettura dei due sensori (Figura 24). Nel CCD il sensore è costituito dai filtri di colore, dalla matrice di pixel e dall'amplificatore, mentre le funzioni restanti, come il controllore digitale e il convertitore A/D, sono esterne al sensore, implementate su un circuito stampato di appoggio al sensore. I sensori CMOS invece implementano tutte le funzioni sopracitate e altre nello stesso chip del sensore, permettendo quindi un risparmio di spazio e lasciando spazio nel circuito stampato per altre applicazioni e strumenti di elaborazione. Questa potenzialità del CMOS è resa possibile proprio grazie alla tecnologia CMOS che continua a progredire nell'ambito della litografia e della miniaturizzazione dei singoli transistor sotto la spinta della necessità di sviluppare processori sempre più performanti e a basso consumo. Questa differenza strutturale comporta anche diverse tipologie di output ad ogni livello del sensore. Infatti mentre il pixel di un CCD fornisce come output delle cariche elettriche, quello di un CMOS fornisce già un segnale analogico, essendo ogni singolo pixel fornito di un proprio amplificatore di segnale. Il segnale analogico nei CCD compare solo all'uscita del sensore, mentre il segnale digitale, risultato finale che si vuole ottenere, verrà ottenuto solo all'esterno del sensore. Il sensore CMOS invece all'uscita fornisce già un segnale digitale, proprio grazie al

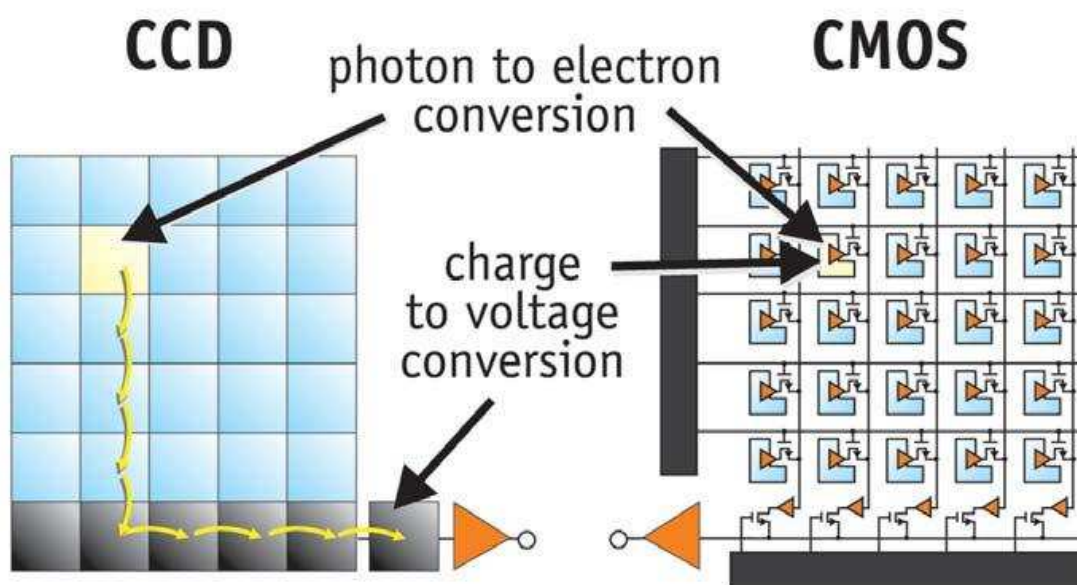


Figura 25: Matrici di pixel a confronto

fatto che il convertitore analogico digitale è normalmente inglobato nel sensore stesso.

Occorre inoltre evidenziare che la maggiore complessità circuitale nel pixel dei CMOS rispetto ai CCD si traduce in una minore complessità del sistema esterno. I due sensori si differenziano anche per la velocità di trasferimento dell'informazione all'interno della matrice: nei CCD si trasmette, in generale, di pixel in pixel per poi giungere al nodo di uscita. È necessario quindi un po' di tempo perché ciascun pixel trasmetta la propria carica al nodo di uscita. Ogni singolo pixel di un CMOS ha invece accesso diretto al nodo di uscita, mediante l'attivazione di opportuni pass-transistor (interruttori). Questo procedimento richiede certamente un minor tempo rispetto a quello necessario dai CCD e quindi si traduce in un maggiore frame rate.

Parte dei vantaggi finora elencati del CMOS sono dovuti in parte al fatto che ogni pixel possiede un proprio amplificatore. Ma questa caratteristica, oltre che vantaggi porta anche svantaggi, per esempio nell'uniformità dell'immagine. Infatti in questo ambito risultano molto migliori i CCD avendo tutti i pixel lo stesso amplificatore in comune. Un elevato numero di amplificatori, come nel CMOS comporta una maggiore possibilità di differenze di guadagno, anche leggere, che ha come conseguenza una maggiore disomogeneità nell'immagine. Un altro svantaggio dei sensori CMOS è quello relativo all'area disponibile per la rilevazione di luce: comprendendo al suo interno molte funzionalità di elaborazione e controllo di



Figura 26: Effetto di blooming (colonne di luce) presente nel sensore CCD (a) e assente in quello CMOS (b)

segnale, il sensore ha a disposizione un minor spazio da dedicare alla foto-ricerzione, a differenza del CCD che sfrutta praticamente tutta la sua area a tale fine.

Inoltre si può osservare che i sensori CCD complessivamente sono affetti da minor rumore rispetto ai sensori CMOS, e di conseguenza il loro range dinamico risulta leggermente più ampio.

Un altro aspetto degno di essere nominato è quello del blooming, mentre come spiegato nei capitoli precedenti i CCD sono affetti da tale effetto, i CMOS sembrano non risentirne (Figura 26a,26b). Esistono tuttavia per i CCD degli accorgimenti che consentono di ridurre se non addirittura di eliminare tale effetto.

Uno dei fattori che rende i CMOS competitivi nei confronti dei CCD è quello del consumo di potenza. Il sensore CMOS, sfruttando appunto tale tecnologia, è in grado di operare con tensioni di alimentazioni piuttosto basse e dispositivi sempre più miniaturizzati, il che comporta un consumo di potenza piuttosto basso. I CCD invece richiedono di operare con tensioni normalmente più elevate, il che comporta inevitabilmente una maggiore dissipazione di potenza.

Caratteristiche	CCD	CMOS
Output del pixel	carica elettrica	Voltaggio (analogico)
Output del chip	voltaggio (analogico)	bit (digitale)
Output della fotocamera	bit (digitale)	bit (digitale)
Presenza di rumore	Bassa	Moderata
Complessità del sensore	Bassa	Alta
Complessità del sistema	Alta	Bassa
Gamma dinamica	Ampia	Moderata
Uniformità	Alta	Da bassa a moderata
Velocità	Da moderata ad alta	Alta
Consumo di energia (sensore)	Basso	Moderato
Consumo di energia (sistema)	Moderato	Bassa
Precisione cromatica	Alta	Media

Tabella 2: Tabella riassuntiva delle principali differenze tra sensori CCD e APS

Analisi pratica

Le differenze tecniche tra i due sensori influenzano la maniera in cui questi due diversi dispositivi vengono utilizzati nel mondo reale.

Un aspetto che influenza la scelta tra uno o l'altro è proprio la qualità dell'immagine. Complessivamente i CCD godono di una qualità molto maggiore di immagine, grazie anche solitamente a un maggior intervallo spettrale in cui i pixel sono sensibili, a una efficienza quantica più alta e a una generale minore quantità di rumore nella rilevazione della fotografia. Proprio per questo motivo uno dei principali studi degli ultimi anni sui sensori attivi CMOS verte su metodi per migliorarne la qualità dell'immagine.

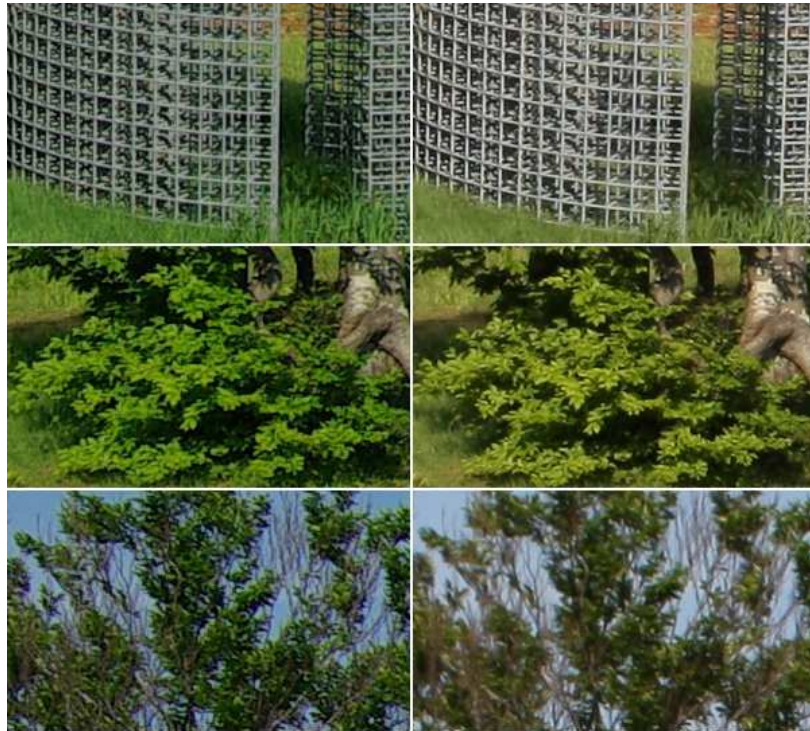


Figura 27: Foto ottenute con CCD (colonna a sinistra) e sensori CMOS (colonna a destra)

Un altro fattore che distingue i due dispositivi è il frame rate, cioè la quantità di immagini che si riescono a captare al secondo. Siccome i CCD perdono molto tempo nello svuotamento dei registri dei pixel, non è possibile raggiungere frame rate molto elevati, cosa che invece è possibile invece nei sensori CMOS grazie al fatto che ogni pixel elabora autonomamente il proprio segnale di tensione.

Altro ambito assai rilevante soprattutto perché è uno dei fattori su cui si misura la competitività è quello dei costi. A livello di chip i costi di fabbricazione di entrambe le tecnologie sono simili, sebbene si direbbe che i sensori CMOS godano di un costo minore perché fabbricati secondo le stesse tecnologie dei dispositivi logici e delle memorie, denominati appunto dal processo CMOS.

Tuttavia, il processo di produzione deve essere parzialmente rivisto perché i sensori CMOS necessitano di una maggiore qualità rispetto ai consueti chip logici proprio per poter garantire una migliore resa d'immagine, annullando così i possibili vantaggi di costo rispetto ai sensori CCD. Un punto a favore dei CCD è che il loro processo di fabbricazione è più maturo e consolidato rispetto a quello dei CMOS, rendendo i CCD in generale meno costosi da produrre.

Un vantaggio dei CMOS è che possono essere prodotti in volumi più grandi sui wafer di silicio: si possono utilizzare wafer da 200mm di diametro per il CMOS contro i 150mm dei CCD. Questo vantaggio però viene parzialmente vanificato a causa della maggiore complessità di progettazione, che implica un maggior costo di sviluppo in confronto a quella del CCD. Un particolare da non dimenticare però è che nel sensore CMOS sono inclusi anche altri circuiti che svolgono funzioni della camera, che invece nei CCD sono esterni al sensore. Tutto ciò porta a una maggiore economicità complessiva dei sistemi che utilizzano i sensori di tipo CMOS.

In base ai punti di forza e debolezza di ciascun sensore si sono sviluppati differenti ambiti di applicazione su varie strumentazioni.

I CCD grazie al loro maggiore intervallo di spettro, alla possibilità di poter sostenere lunghi tempi di integrazione mantenendo un basso rumore, sono i sensori preferiti per i telescopi astronomici elettronici. Infatti i CCD sono molto adatti per il rilevamento di immagini astronomiche, nelle quali c'è poca luce a disposizione. Un esempio è il telescopio spaziale Hubble orbitante a 600 Km dalla Terra dal 24 aprile 1990, il quale tra le varie fotocamere in suo possesso annoverava la Wide Field-Planetary Camera (WFPC, fotocamera planetaria ad ampio raggio) costituita da ben quattro sensori di 800x800 pixel in tecnologia CCD. Nel 2009 tale sensore è stato sostituito con una fotocamera sempre di CCD però di più recente tecnologia, il WFC 3 (nel 1993 era stata effettuata un'ulteriore sostituzione), formata da due

sensori CCD 2048x4096.



Figura 28: Il telescopio spaziale Hubble

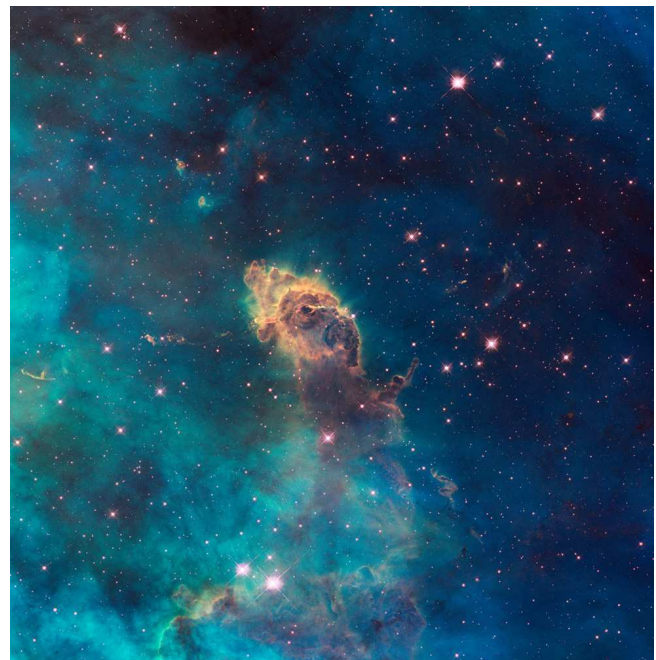
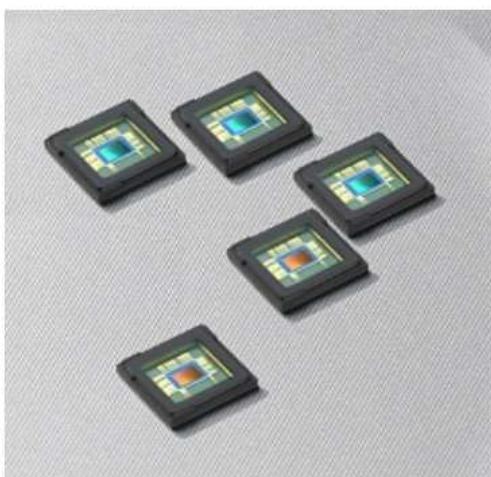


Figura 29: Immagine scattata dalla fotocamera WFC3 del telescopio Hubble

Per la loro qualità d'immagine particolarmente elevata, i sensori CCD sono preferiti nelle fotocamere di elevate prestazioni e in molti ambiti scientifici e industriali, come la già citata astronomia, la biomedica, la spettroscopia, l'ispezione industriale e altri.

I sensori CMOS, che a loro vantaggio danno la possibilità di avere un sistema complessivamente meno ingombrante e soprattutto hanno un basso consumo di



(a)



(b)

Figura 30: Alcuni ambiti d'applicazione dei sensori CMOS: fotocamere per cellulari (a) e macchine fotografiche reflex (b)

potenza complessivo trovano applicazioni principalmente nell'ambito commerciale come quello delle fotocamere dei cellulari, che richiedono bassi consumi di energia per motivi di portabilità e di durata della batteria, e delle videocamere in generale, anche quelle di sicurezza. I sensori CMOS hanno anche iniziato a prendere piede nelle macchine fotografiche digitali reflex di ultima generazione soppiantando i CCD. Non bisogna dimenticare che anche i sensori CMOS se ben progettati possono avere una buona qualità d'immagine.

Uno degli obiettivi dei produttori di sensori CMOS attualmente è quello di ridurre gli svantaggi che quest'ultimi hanno nei confronti dei CCD. Questo include in particolar modo la qualità d'immagine, cercando di aumentarne l'uniformità e abbassarne il rumore, oltre che ridurre i costi di sviluppo. Tuttavia nei CCD proseguono gli studi principalmente per ridurre i consumi di potenza e colmare gli svantaggi nei confronti dei CMOS. Come risultato, è ragionevole affermare che i CMOS e i CCD rimarranno due differenti tecnologie che conviveranno in parallelo per molto tempo.

Conclusione

Nei capitoli precedenti si sono analizzati e confrontati due dei più diffusi sensori d'immagine, i Charge Coupled Device e i sensori attivi CMOS. Entrambi sono sensori d'immagine che come fine ultimo hanno quello di convertire un'immagine in un segnale elettronico idoneo per l'elaborazione.

Per raggiungere tale scopo tutti e due i dispositivi sfruttano il principio fisico dell'effetto fotoelettrico, sebbene poi l'architettura circuitale e i metodi di conversione e trasferimento della informazione siano completamente differenti. Sono proprio queste ultime caratteristiche a creare le principali differenze tra i due dispositivi.

Le differenze sostanziali sono riassumibili nei seguenti punti:

- il CCD crea un'immagine di alta qualità e basso livello di rumore, mentre il CMOS è più suscettibile al rumore;
- il CCD consuma una maggiore quantità di energia, con riferimento al sistema completo, mentre il CMOS consente applicazioni a basso consumo;
- I sensori di tipo CCD sono leggermente più costosi dei CMOS;
- I sensori CMOS hanno una maggiore complessità costruttiva rispetto ai CCD.

Sia i sensori CCD che CMOS possono offrire un'eccellente qualità dell'immagine se ben progettati. La forte pressione a ridurre consumi, costi e dimensioni complessive spingono ad investire maggiormente sul miglioramento dei sensori CMOS soprattutto nell'ambito "consumer".

I sensori CCD hanno finora rappresentato il punto di riferimento per le prestazioni in ambito fotografico, scientifico, e in applicazioni industriali che richiedono la massima qualità dell'immagine possibile, anche a discapito delle dimensioni e del consumo del sistema.

I sensori CMOS offrono più integrazione (più funzioni all'interno del chip) minore consumo di energia e la possibilità di realizzare un sistema di minori dimensioni, per questo motivo li troviamo utilizzati nelle piccole fotocamere consumer o nelle fotocamere dei cellulari.

Un altro dato degno di nota è che i CCD vantano una storia più lunga di quella dei CMOS, infatti i primi sono stati realizzati fin dagli anni '70, mentre i secondi hanno

visto la luce solo negli ultimi decenni, ma nonostante ciò ora sono in piena competizione con i più anziani CCD.

Gli sforzi dei progettisti CMOS sono stati direzionati a raggiungere una più alta qualità dell'immagine, mentre i realizzatori di CCD lavorano per diminuire il consumo energetico e le dimensioni dei pixel.

Il risultato è che mentre fino a pochi anni fa c'era una netta divisione di ambiti fra le due tecnologie, ora non è più così. Ad esempio, negli ultimi anni il mondo delle reflex digitali professionali e prosumer ha visto un proliferare di fotocamere con sensori CMOS a fianco di quelle che montano CCD.

Per il momento possiamo limitarci a dire che queste due tecnologie per i prossimi anni continueranno a coesistere con un progressivo spostamento verso i CMOS, almeno per le applicazioni consumer.

APPENDICE

L'effetto fotoelettrico

L'effetto fotoelettrico è un fenomeno fisico senza il quale i sensori di immagine non funzionerebbero. I suoi effetti furono osservati per la prima volta da Hertz nel 1880. Infatti scoprì che la scarica tra due elettrodi mantenuti ad una certa differenza di potenziale era facilitata se gli elettrodi stessi erano illuminati con la luce ultravioletta. Successivamente Hallwachs e Lenard dimostrarono che la luce ultravioletta incidente il metallo causava l'emissione di elettroni dalla superficie quest'ultimo; proprio questo fenomeno prese il nome di effetto fotoelettrico. Esiste un semplice dispositivo per misurare le caratteristiche dell'effetto

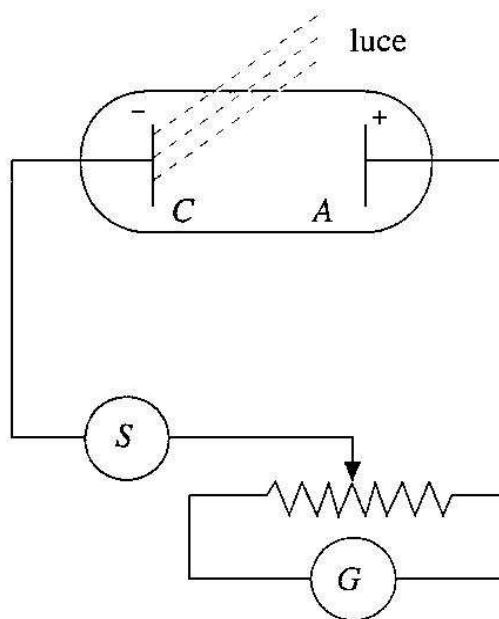


Figura 31: Dispositivo per la misura dell'effeto fotoelettrico.

fotoelettrico ed è mostrato in figura 31.

Consiste in un tubo messo sottovuoto nel quale sono posti i due elettrodi collegati a uno strumento di misura per la corrente elettrica e ad un generatore di tensione

che tiene i due elettrodi ad un potenziale fissato. Il catodo, l'elettrodo a potenziale più basso (C nella figura 31), è l'elettrodo su cui incide la luce, che si supponga entri nel contenitore attraverso una finestra trasparente, mentre l'anodo attirerà a sé gli elettroni liberati.

L'andamento della corrente in funzione della differenza di potenziale è quello

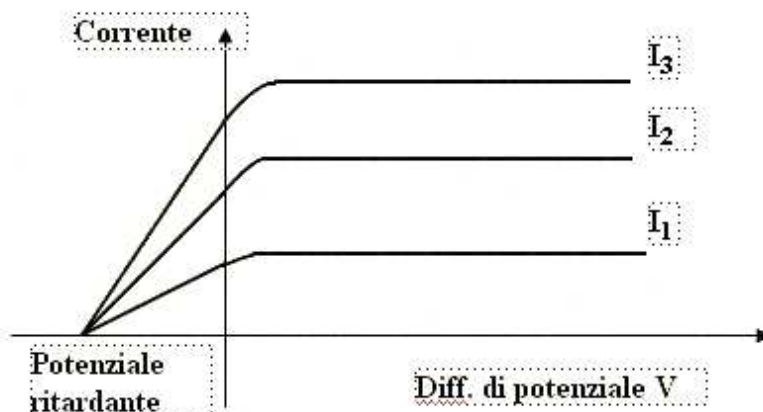


Figura 32: Grafico tensione-corrente a differenti intensità di luce monocromatica (I_1, I_2, I_3).

rappresentato in figura 32, non si rileva corrente in assenza d'illuminazione. Si può osservare che al crescere della tensione tra anodo e catodo la corrente rimane fissa a un valore costante, infatti tutti gli elettroni che vengono emessi vengono anche raccolti dall'anodo. Si osserva tuttavia corrente anche con l'anodo negativo rispetto al catodo e ciò è dovuto al fatto che certi elettroni vengono emessi con una energia cinetica in grado di superare la d.d.p. che li decellera. Ciò continua fino ad un valore $-V_0$ raggiunto il quale la corrente si annulla. Tale valore prende il nome di potenziale di arresto. Da questo dato, essendoci corrente nulla nonostante l'illuminazione, è ricavabile la massima energia cinetica con la quale vengono emessi gli elettroni dal catodo:

$$E_{k,max} = eV_0 \quad (11)$$

Se inoltre si aumenta l'intensità del fascio luminoso, a parità di frequenza, incidente, si osserva anche un aumento dell'intensità di corrente di saturazione, ma

nessun cambiamento nel potenziale di arresto.

Infine si trova che al variare della frequenza della luce incidente varia il valore di V_0 necessario per annullare la corrente: all'aumentare della frequenza ν cresce linearmente V_0 e di conseguenza l'energia cinetica massima di emissione degli elettroni (figura 33).

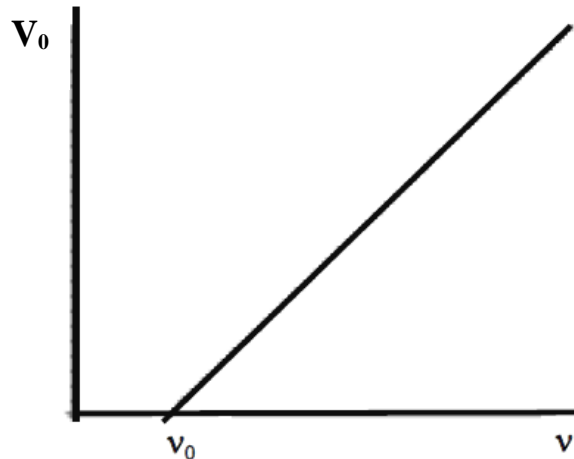


Figura 33: Grafico frequenza-potenziale d'arresto nell'effetto fotoelettrico

Inoltre, se la frequenza della luce incidente scende sotto un certo valore ν_0 , detto di soglia, non si ha più effetto fotoelettrico. Tale valore dipende dal tipo di materiale di cui è costituito il catodo.

I risultati ottenuti risultano incomprensibili in base alla teoria classica della radiazione elettromagnetica, infatti non si potrebbe spiegare perché il valore del potenziale di arresto sia indipendente dall'intensità dell'onda e invece dipenda dalla sua frequenza.

Solo nel 1905 Einstein riuscì a dare una spiegazione a tutto ciò. Egli ipotizzò, sfruttando l'ipotesi di Plank, che la radiazione elettromagnetica fosse composta da quanti di energia $U = h\nu$, chiamati fotoni, e che nell'interazione dell'onda con la materia un elettrone potesse assorbire un solo fotone. Il bilancio energetico più favorevole per l'elettrone nell'assorbimento e la successiva emissione è :

$$E_{k,max} = h\nu - W_e ; (12)$$

dove W_e rappresenta il lavoro di estrazione dal materiale del catodo, ossia la minima energia necessaria che è necessario fornire ad un elettrone per rompere il legame, mentre h è la costante di Plank.

Combinando la (12) con (11) si ha

$$E_{k,max} = h\nu - W_e = eV_0 \rightarrow V_0 = \frac{h}{e}\nu - \frac{W_e}{e} \quad (13)$$

Così si spiega la linearità di V_0 rispetto a ν e che la pendenza della retta è indipendente dal materiale preso in considerazione. Sempre dalla formula (12) è chiaro che il fenomeno avviene solo se il prodotto $h\nu$ risulta maggiore o uguale al lavoro di estrazione e quindi la frequenza di taglio è data da

$$\nu_0 = \frac{W_e}{h}, \quad (14)$$

ed è quindi caratteristica del materiale illuminato.

Un aumento di intensità implica un aumento della densità di fotoni incidenti la superficie e quindi un aumento del numero di elettroni emessi; però se $\nu \leq \nu_0$ non si ha alcun effetto qualunque sia il numero di fotoni.

Ultimo aspetto da sottolineare è che in quanto l'assorbimento di energia è finito, non si ha una continuità di assorbimento nel tempo, i tempi di emissioni sono praticamente istantanei, si parla di 10^{-9} s di ritardo tra arrivo della luce e liberazione degli elettroni.

I primi sensori di immagine utilizzati nella pratica erano dei particolari tubi a vuoto (es. i vidicon, usati nelle prime telecamere) e si basavano proprio su questo principio.

Sempre in base a questo principio si utilizzano ancora particolari sensori chiamati fotomoltiplicatori che “amplificano” le debolissime correnti dovute alle basse illuminazioni e si utilizzano nei visori notturni per uso militare, dove è sufficiente la luce fornita dalla luna o dalle stelle per ottenere una visione intellegibile dell'ambiente circostante.

BIBLIOGRAFIA

CCD

www.specinst.com/What_Is_A_CCD.html

en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device

www.castfvg.it/notiziar/1998/ccd.htm

www.microscopyu.com/articles/digitalimaging/ccdintro.html

www.arcetri.astro.it/~romoli/ccd.pdf

C-MOS

en.wikipedia.org/wiki/Active_pixel_sensor

www.writing.ucsb.edu/faculty/holms/technology_report_Alvin%20Quach2.pdf

www.olympusmicro.com/primer/digitalimaging/cmosimagesensors.html

ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01717675

Richard C. Jager, Travis N. Blalock, “Microelettronica”, McGraw-Hill, Terza edizione, 2009

“A Fault-Tolerant Active Pixel Sensor to Correct In-Field Hot-Pixel Defects”, Jozsef Dudas, Michelle L. La Haye, Jenny Leung, Glenn H. Chapman, 22nd IEEE International Symposium on efect and Fault Tolerance in VLSI Systems

Effetto fotoelettrico

P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci, “Fisica”, Volume II, Seconda edizione, EdiSES, 2007, Napoli