



SENSORI A STATO SOLIDO

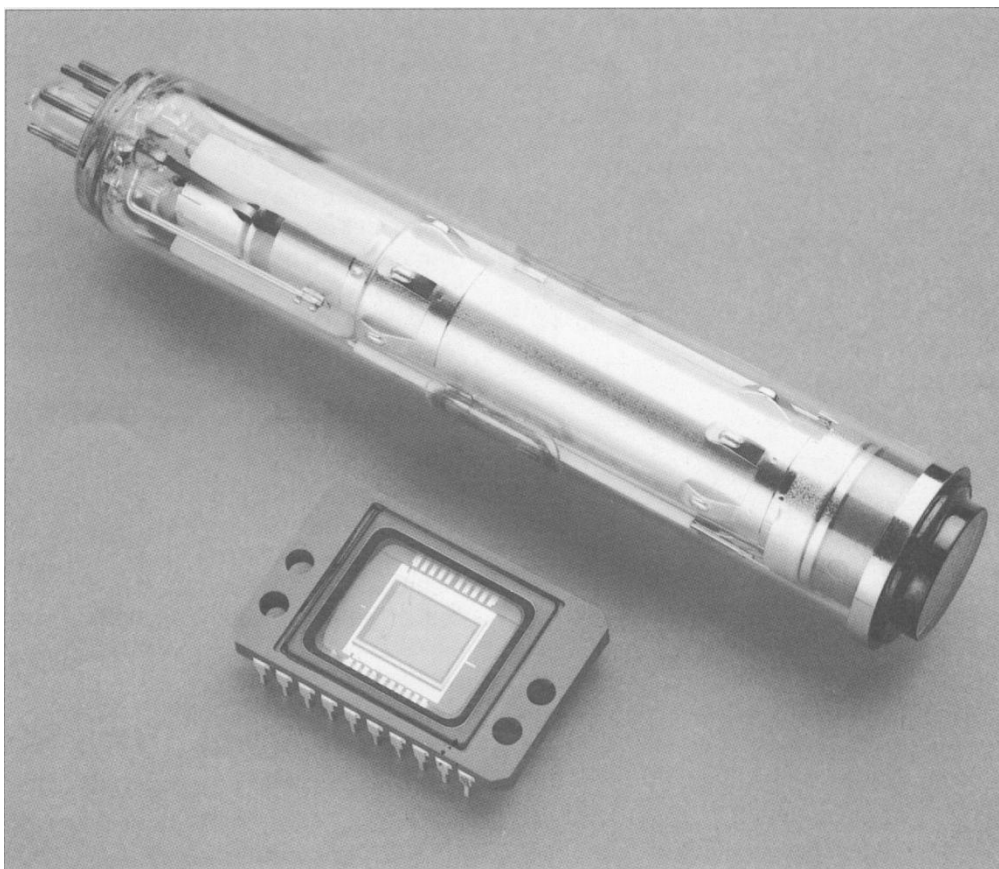
Sommario

Tubi a vuoto e fotosensori a stato solido.....	2
Vantaggi dei fotosensori a stato solido.....	4
Tipologie di analisi.....	7
CCD.....	9
Strutture di trasferimento dei CCD.....	16
CMOS.....	33
CCD vs CMOS.....	35
Immagini a colori.....	41
Microlenti	50
Digitalizzazione del segnale dei fotosensori.....	53
Potere risolvante e risoluzione spaziale.....	58
Off-set spaziale.....	61
Binning.....	63
Sensibilità ISO	65
Rumore dei fotosensori.....	66
Gamma dinamica	69
Effetti indesiderati.....	73
Formati	76
Riprese video con sorgenti luminose a scarica elettrica.....	78

Tubi a vuoto e fotosensori a stato solido

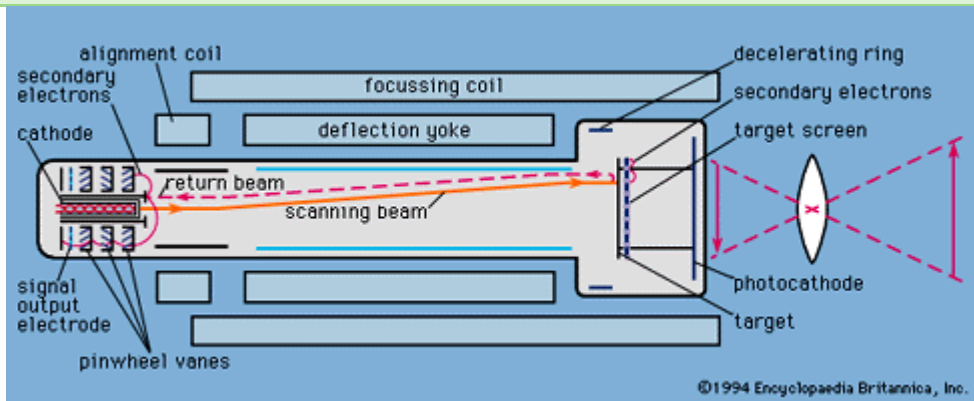
Per i 50 anni successivi alle invenzioni dell'Emitron e dell'iconoscopio, nei primi anni '30 del XX secolo, il tubo di ripresa termoionico è rimasto l'unico dispositivo pratico per la ripresa delle immagini. Nel corso del suo sviluppo, le prestazioni di questo tubo sono aumentate enormemente, con una radicale riduzione delle sue dimensioni: dall'Image Orthicon da 4,5" degli anni '50 al Plumbicon da 2/3" degli anni '70. Questi dispositivi erano comunque fragili, di durata limitata, ed era indispensabile utilizzarli e allinearli con molta attenzione.

La messa a punto, nel 1970, dei **CCD (Charge Coupled Device, dispositivo a trasferimento di cariche)** come componenti di memoria a basso costo, ha costituito invece un punto di svolta decisivo nello sviluppo delle telecamere. Si è subito capito che questa tecnologia poteva essere applicata nella ripresa delle immagini e che i molti vantaggi dei dispositivi a stato solido, utilizzati ormai universalmente nelle apparecchiature elettroniche, potevano alla fine essere estesi in tutta la catena delle riprese televisive.

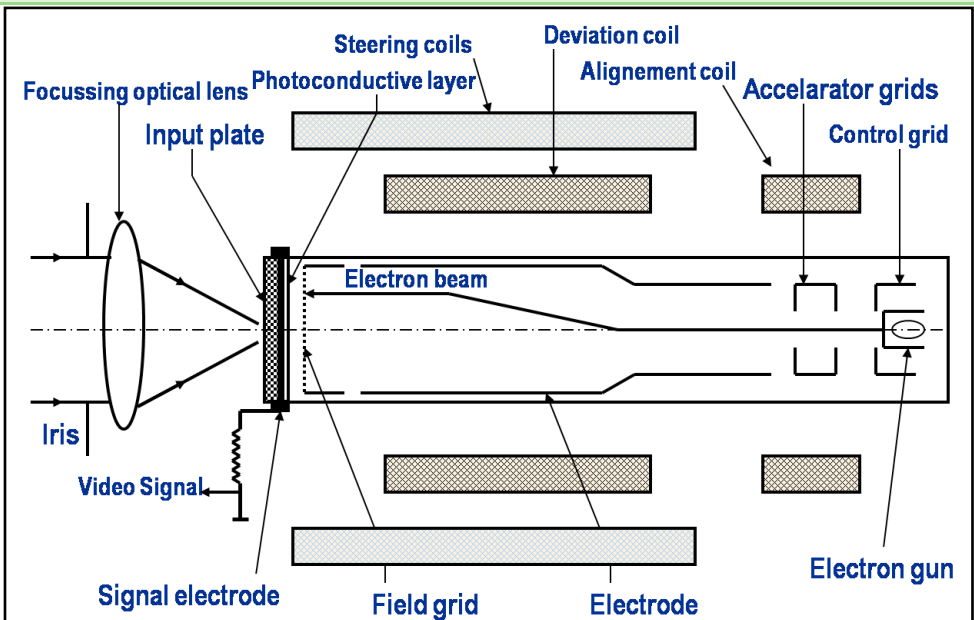


Tubi a vuoto

Image Orthicon



Plumbicon

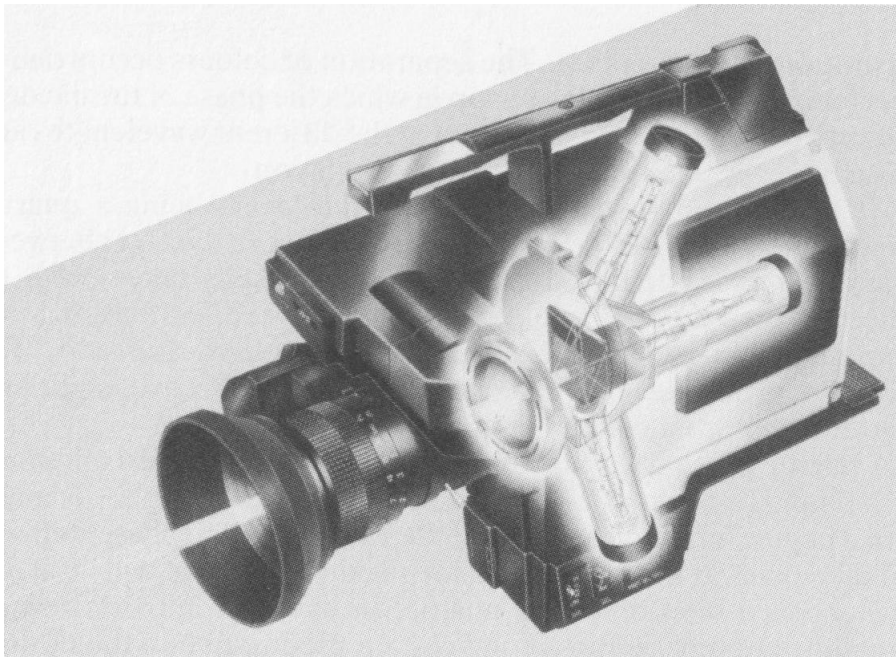


Nel 1975 la RCA presentò un esemplare di telecamera a colori con tre CCD.

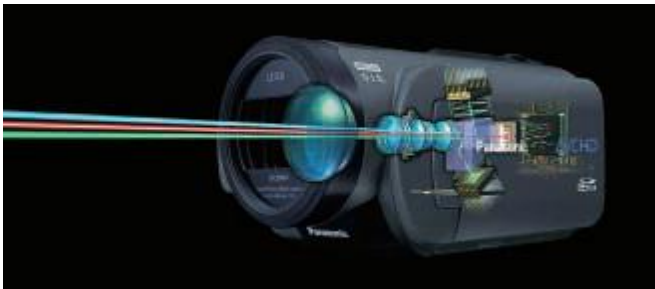
Il prototipo suscitò grande interesse per via dei suoi potenziali vantaggi, ma il passaggio da esperimento di laboratorio a prodotto fattibile su scala industriale, pratico e affidabile richiese tempo e impegno. Solo dalla seconda metà degli anni '80 la telecamera a 3 CCD divenne una reale alternativa alle telecamere con tubi a vuoto per l'utilizzo televisivo.

Vantaggi dei fotosensori a stato solido

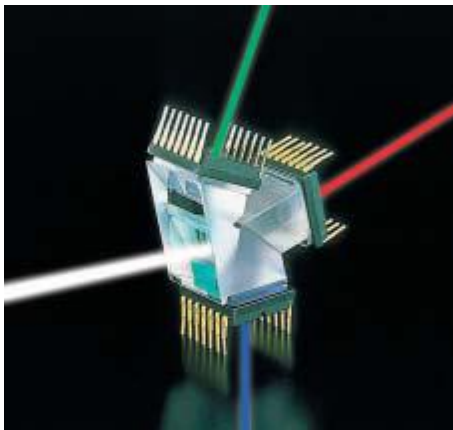
La diffusione dei fotosensori a stato solido è iniziata negli anni '80 del XX secolo nel settore video professionale, è proseguita negli anni '90 includendo anche il settore video amatoriale ed ha rapidamente conquistato il settore fotografico amatoriale e professionale nel primo quinquennio del XXI secolo. La motivazione alla base di questo straordinario successo va ricercata nei molteplici e consistenti vantaggi di questi fotosensori.



JVC, telecamera analogica tritubo



Panasonic AG-HSC1U, telecamera HD a 3 CCD



Panasonic AG-HSC1U, gruppo prisma tricromatico - 3 CCD

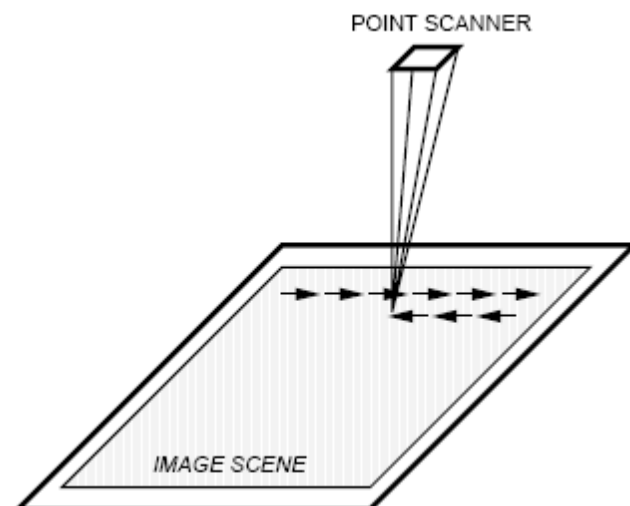
Vantaggi dei fotosensori a stato solido

Parametri	Descrizione
<i>Dimensioni/peso</i>	L'abolizione delle bobine di deflessione e del gruppo tubi e l'adozione dei circuiti integrati hanno portato a ridurre drasticamente le dimensioni e il peso delle telecamere a CCD.
<i>Basso assorbimento di potenza</i>	Le telecamere a CCD richiedono solo una limitata frazione della potenza assorbita dalle equivalenti telecamere a tubi, con un consistente aumento dell'autonomia e riduzione di dimensioni e peso delle batterie.
<i>Elevata sensibilità</i>	Migliorata di molti stop.
<i>Stabilità</i>	Le telecamere a CCD sono stabili e le loro ottime prestazioni non sono influenzate da urti, vibrazioni, tempo o temperatura.
<i>Assenza di stick, lag o burn-in</i>	Con un tubo di ripresa convenzionale, una zona molto luminosa restava immagazzinata nel tubo per un considerevole intervallo temporale, talvolta per sempre. Questo fenomeno poteva facilmente manifestarsi quando la telecamera veniva puntata verso il sole, una finestra o una lampada da studio. Con i CCD, invece, lag e burn-in sono inesistenti: la telecamera è quindi utilizzabile facilmente anche da persone non esperte.
<i>Bassa rumorosità</i>	Il rapporto segnale/rumore (S/N) delle telecamere a CCD è considerevolmente migliore rispetto alle telecamere a tubi. Inoltre, nell'utilizzo in determinate applicazioni, soprattutto nei servizi giornalistici, le prestazioni delle telecamere a tubo sono penalizzate da fenomeni come il lag, dovuto all'effetto delle lampade stradali notturne, assenti nelle telecamere a CCD.
<i>Riprese con forti contrasti di luce</i>	Le telecamere a CCD sono in grado di riprendere con chiarezza oggetti molto luminosi, per esempio una finestra, senza le colorazioni ai bordi generate dai tubi a causa della deviazione dei fasci elettronici. Inoltre, l'elettronica di elaborazione del segnale permette di comprimere il campo dinamico dei soggetti ad elevato contrasto entro i limiti del segnale video standard.
<i>Insensibilità ad urti, vibrazioni e campi elettromagnetici</i>	Le telecamere a CCD non sono influenzate nemmeno dalle più gravose condizioni ambientali.
<i>Assenza di regolazioni</i>	Le telecamere a tubi avevano bisogno di precise regolazioni periodiche di parametri come la corrente nel fascio elettronico, la geometria e la messa a registro. Le telecamere a CCD, invece, non richiedono praticamente regolazioni, rendendo così massima la resa delle immagini e minimo il tempo da dedicare a manutenzione e messa a punto.
<i>Lunga durata</i>	I CCD non soffrono del graduale deterioramento qualitativo che si manifesta lungo la vita utile di un tubo. Come qualsiasi altro dispositivo a semiconduttore, permettono una lunga durata e prestazioni pressoché costanti.
<i>Costi ridotti di manutenzione</i>	Tutti questi fattori si combinano per produrre una telecamera con bassi costi di gestione.

Tipologie di analisi

Analisi per punti

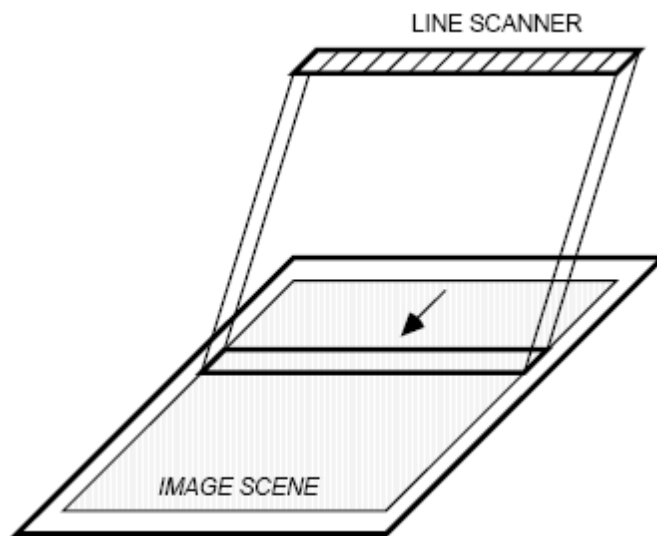
Se si dispone di un sensore a singola cella, o pixel, è possibile analizzare sequenzialmente la scena variando conseguentemente le coordinate di scansione sugli assi X e Y. Questo tipo di analisi presenta il vantaggio di un'elevata risoluzione, una misurazione uniforme grazie all'utilizzo di un unico rivelatore, una struttura semplificata e di basso costo del fotosensore. Per contro, il sistema di lettura su due assi è complesso, il posizionamento del fotosensore può comportare errori, la velocità di analisi è bassa a causa dell'elevato numero di singole esposizioni.



Analisi per linee

Se si dispongono i sensori a singola cella in fila lungo uno dei due assi X e Y, il movimento di scansione è limitato ad una sola direzione: l'analisi della scena avviene quindi riga per riga. Questo tipo di analisi comporta una velocità di analisi significativamente maggiore, una risoluzione ragionevolmente elevata, una meccanica semplificata. Per contro, la spaziatura e le dimensioni dei pixel in una direzione limitano la risoluzione, la precisione di misurazione non è uniforme, la durata della scansione (dell'ordine di alcuni secondi o minuti) non è idonea ad analizzare scene in rapida

mutazione, il costo dei fotosensori lineari è sensibilmente superiore a quello dei rivelatori a singola cella.

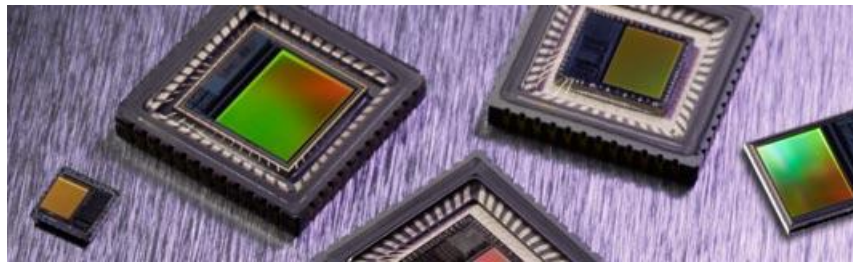
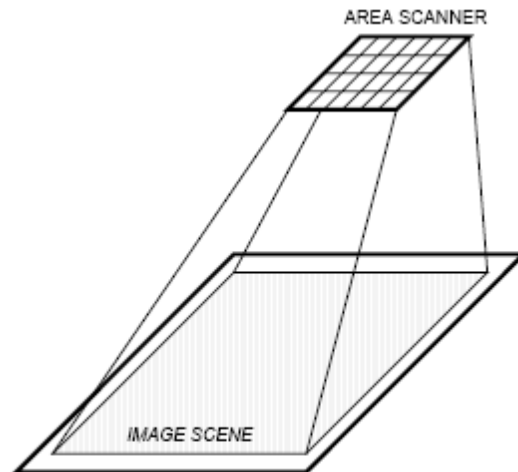


CCD a colori trilineare Kodak KLI-8023
chip: 72,0 mm (H) x 0,225 mm (V)
risoluzione: 3 x 8002 pixel
pixel: 9 μm^2

Analisi per aree

Se si dispongono i sensori a singola cella in una griglia bidimensionale lungo i due assi X e Y, l'immagine è analizzata nella sua interezza con una sola esposizione, non essendo più necessario alcuno spostamento nelle due direzioni. Questo tipo di analisi permette velocità di scansione molto elevate, con la massima precisione e

con una complessità ragionevole. Per contro, la risoluzione è limitata in entrambe le direzioni, il rapporto segnale/rumore (S/N) è meno favorevole, il costo dei fotosensori a matrice è più elevato rispetto agli altri due tipi.



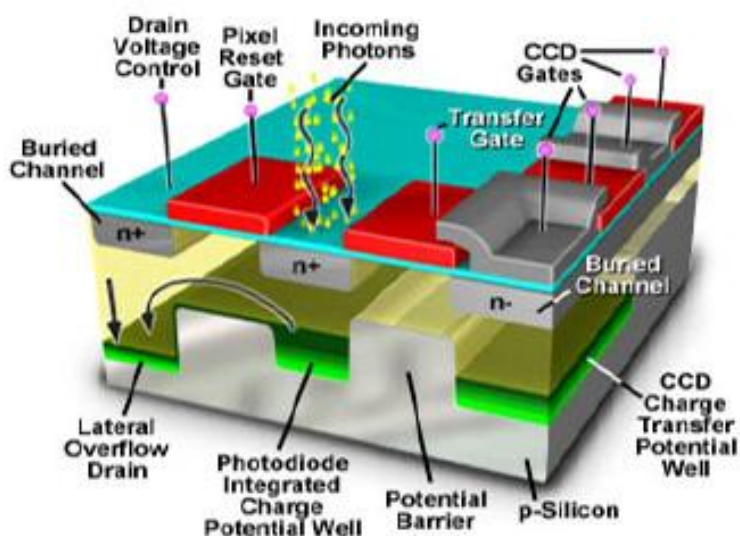
Fotosensori a matrice CMOS - Kodak

CCD

Componenti base

Un fotosensore CCD è costituito da elementi sensibili alla luce disposti in linea (CCD lineari) o in piano (CCD a matrice) su un substrato in silicio drogato.

Anatomy of a Charge Coupled Device (CCD)

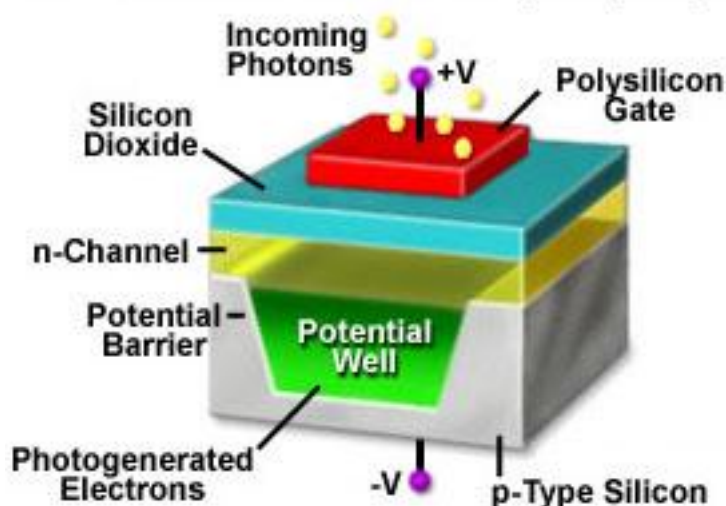


Se si applica una tensione elettrica, il silicio drogato, grazie alle sue proprietà di semiconduttore, è in grado di intrappolare e trattenere gli elettroni liberati per assorbimento dell'energia dei fotoni. I pixel sono definiti sulla matrice di silicio da una griglia ortogonale di elettrodi (**Gates**) trasparenti alla luce, depositati sul chip.

Condensatore MOS

L'unità fondamentale sensibile alla luce del CCD è il condensatore **MOS (Metal Oxide Semiconductor, metallo-ossido-semiconduttore)**, che funge sia da fotodiode sia da memoria. È costituito da un elettrodo in silicio policristallino, uno strato isolante in biossido di silicio (SiO_2) ed un substrato di silicio tipo p (Si-p).

Metal Oxide Semiconductor (MOS) Capacitor



L'applicazione di una tensione positiva provoca la migrazione dei fotoelettroni verso la zona sottostante l'elettrodo caricato positivamente. I fotoelettroni sono intrappolati nella regione di svuotamento fino alla saturazione del **pozzo di potenziale (Potential Well)**.

I fotodiodi che compongono la matrice del CCD sono separati in una direzione dalle tensioni applicate agli elettrodi e sono isolati elettricamente da quelli adiacenti nell'altra direzione da **barriere isolanti (Channel Stops)** nel substrato di Si-p.

I fotodiodi reagiscono ai fotoni incidenti assorbendo la loro energia, con conseguente liberazione di elettroni di valenza e formazione di lacune positive nel reticolo cristallino, in misura di una coppia elettrone-lacuna per fotone. La carica che si accumula nei singoli fotodiodi è proporzionale al numero di fotoni incidenti. La tensione applicata a ciascun elettrodo controlla l'accumulo e lo spostamento della carica in uno specifico intervallo di tempo.

Inizialmente, ogni fotodiodo della matrice agisce da pozzo di potenziale per accumulare i fotoelettroni, potendoli trattenere anche per lunghi periodi di tempo prima di essere trasferiti all'elettronica della fotocamera o telecamera per la conseguente elaborazione dell'immagine.

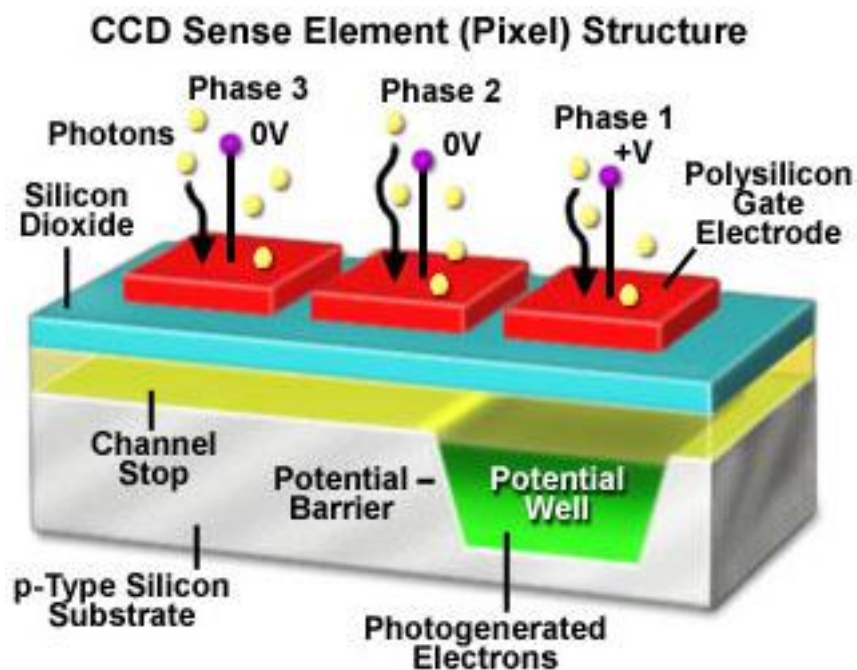
Registri

Il processo di formazione dell'immagine è costituito da quattro fasi:

- 1) generazione della carica per interazione fotonica con la regione fotosensibile del dispositivo,
- 2) raccolta e conservazione della carica liberata,
- 3) trasferimento delle cariche,
- 4) misurazione della carica.

Inizialmente, si ha la generazione delle coppie elettrone-lacuna in risposta ai fotoni incidenti nella regione di svuotamento del condensatore MOS e gli elettroni liberati migrano nel pozzo di potenziale situato sotto

l'elettrodo caricato positivamente. I canali di trasferimento della carica sono inglobati in uno strato isolante di biossido di silicio posto tra gli elettrodi in alluminio o silicio policristallino ed il substrato di Si-p. Il silicio policristallino degli elettrodi è trasparente alle lunghezze d'onda superiori a circa 350 nm ed aumenta la porzione di superficie utile per la raccolta di luce da parte del dispositivo. Gli elettroni liberati nella regione di svuotamento sono inizialmente raccolti nel pozzo di potenziale positivo di ciascun fotodiodo. Successivamente, la carica accumulata è spostata lungo i canali di trasferimento tramite le tensioni applicate al sistema di elettrodi.



In generale, la carica accumulata è proporzionale al flusso luminoso incidente sul fotodiodo fino alla **FWC (Full-Well Capacity, saturazione del pozzo di potenziale)**, che determina il segnale massimo rilevabile nel pixel e rappresenta il fattore più importante per la gamma dinamica del CCD. La capacità del pozzo di potenziale del CCD dipende in larga misura dalle dimensioni fisiche del fotodiodo.

Prima che la carica accumulata da ciascun fotodiodo possa essere misurata per determinare il flusso luminoso del corrispondente pixel, è necessario trasferirla

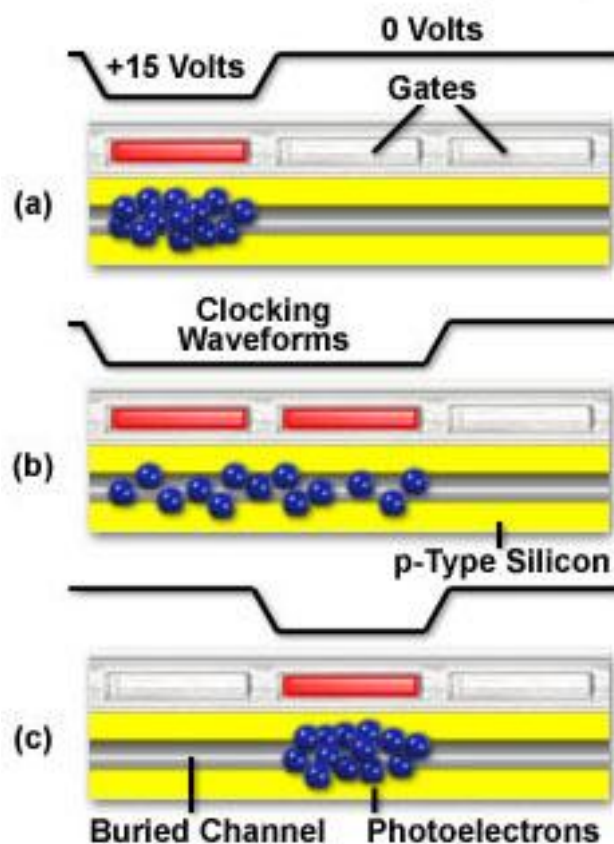
mantenendo assolutamente l'integrità del pacchetto di fotoelettroni. Poiché i fotosensori lineari o a matrice sono composti da un numero elevatissimo di condensatori MOS, la carica è trasferita attraverso il dispositivo mediante variazione delle tensioni applicate agli elettrodi in modo da spostarla da un condensatore a quello successivo o da una fila di condensatori a quella successiva. Lo spostamento della carica nel silicio è collegato allo schema di clock della tensione applicata al sistema di elettrodi, da cui il termine **dispositivo ad accoppiamento di carica**. Poiché il CCD è nato come dispositivo di memoria seriale, il processo di trasferimento della carica soddisfa il requisito fondamentale di stabilire una quantità fisica che rappresenti un bit di informazione e di mantenerne l'integrità fino al momento della lettura. Se il CCD è utilizzato come fotosensore, i bit di informazione sono rappresentati da pacchetti di fotoelettroni letti uno alla volta.

La carica da misurare è quella accumulata in ciascun fotodiodo in uno specifico intervallo di tempo, denominato **tempo di integrazione** o **tempo di esposizione**. La quantificazione delle cariche avviene sequenzialmente mediante una combinazione di trasferimenti in parallelo ed in serie. La rete di elettrodi costituisce il **registro a scorrimento**. Il concetto alla base del trasferimento di cariche, che consente la lettura sequenziale in un CCD, consiste nello spostamento simultaneo dei pacchetti di fotoelettroni lungo l'intera matrice, costituente il **registro parallelo**, fino al **registro di lettura incrementale** o **registro seriale a singola riga**. Da qui, i pacchetti vengono inviati in sequenza ad un chip amplificatore per la misurazione. Una volta svuotato, il registro seriale è riempito da una nuova riga del registro parallelo ed il ciclo si ripete fino al completo trasferimento dei pacchetti.

La configurazione di trasferimento più semplice e di uso più comune è quella in tre fasi, dove ciascun fotodiodo (pixel) è suddiviso in tre porzioni uguali con tre pozzi di potenziale in parallelo delimitati dagli elettrodi di gate. In questo schema, tutti i gate di porzioni analoghe sono

collegati ad un unico circuito di clock. Il fotodiodo, corrispondente ad un pixel, comprende tre gate ed è collegato a tre diversi circuiti di clock, denominati clock fase 1, clock fase 2 e clock fase 3. Ogni sequenza di tre gate in parallelo costituisce il registro di un singolo pixel e le migliaia di fotodiodi che ricoprono la superficie del CCD formano il registro parallelo. Una volta intrappolati in un pozzo di potenziale, i pacchetti di elettroni vengono spostati da una fila di fotodiodi a quella successiva, in un processo a tre fasi.

Three Phase CCD Clocking Scheme



Super CCD

Il Super CCD è un dispositivo ad accoppiamento di carica sviluppato e brevettato da Fujifilm nel 1999.

La sua particolarità consiste nell'utilizzo di fotodiodi ottagonali, con conseguente aumento della risoluzione orizzontale e verticale (ma con una diminuzione di quella diagonale) rispetto ai chip convenzionali con un numero equivalente di fotodiodi quadrati o rettangolari.

Nel 2003 Fujifilm ha presentato due evoluzioni del chip base.

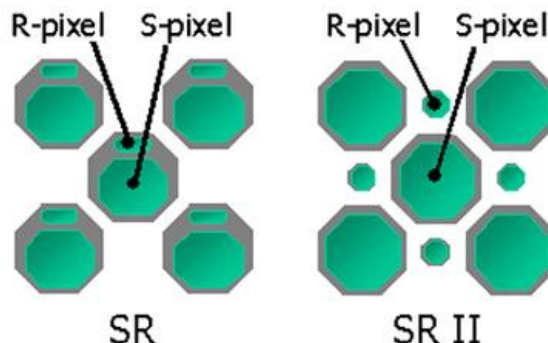
Super CCD HR

I fotodiodi sono disposti a 45° al fine di ottenere una risoluzione più elevata, da cui la sigla **HR (High Resolution)**. Nei chip di IV generazione, la conversione dell'immagine in pixel orizzontali e verticali avviene per interpolazione tra coppie di fotodiodi raggiungendo una risoluzione pari al doppio del loro numero. Nei chip di V generazione, la conversione avviene senza interpolazione, ma Fujifilm non ha fornito spiegazioni al riguardo.



Super CCD SR

I fotodiodi sono disposti a 45°, sempre al fine di ottenere una risoluzione più elevata, ma sono doppi per ciascun fotosito e con dimensioni diverse. Questa configurazione consente, secondo Fujifilm, di raggiungere una maggiore gamma dinamica, cioè un intervallo di luminosità più esteso, da cui la sigla **SR (Super Dynamic Range)**. Gli R-pixel sono fotodiodi ad alta gamma dinamica e gli S-pixel sono fotodiodi ad alta sensibilità.



Strutture di trasferimento dei CCD

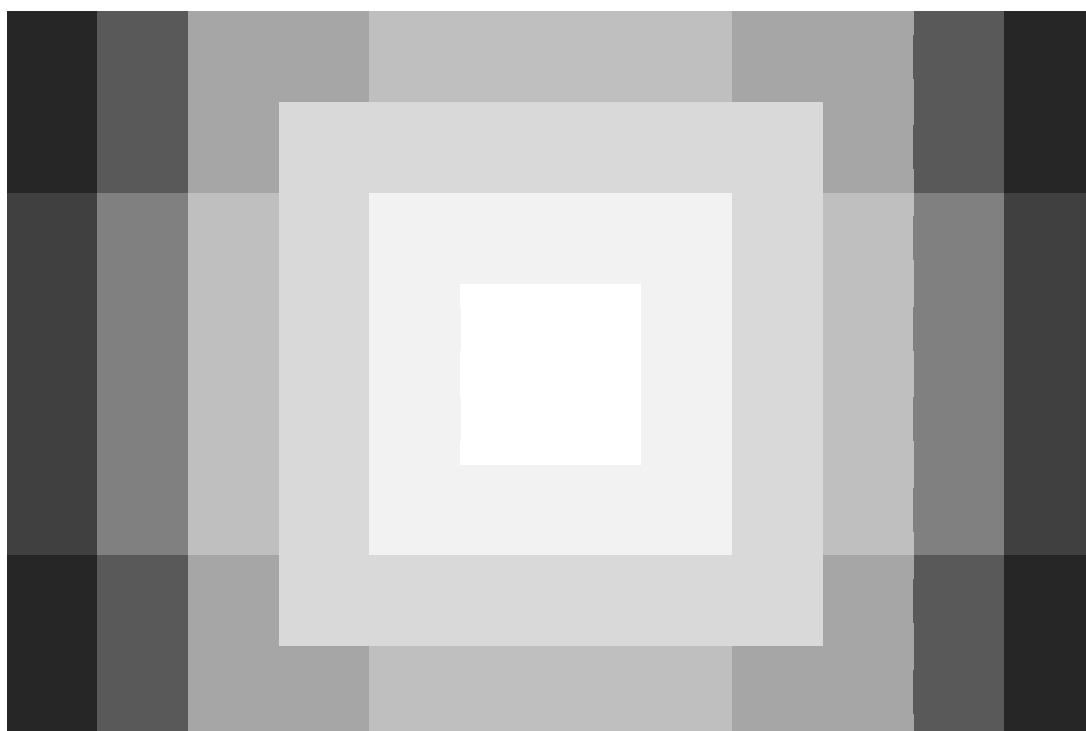
Come visto, è possibile costruire fotosensori a semiconduttore ed utilizzare componenti a trasferimento di cariche per spostare gli elettroni entro la struttura del dispositivo.

Le fotocamere e le telecamere hanno bisogno di fotosensori a matrice, in modo da analizzare simultaneamente tutta l'immagine messa a fuoco sulla loro superficie dal sistema ottico. Per conseguire questo risultato, si utilizza una matrice formata da centinaia di migliaia o da milioni di fotodiodi. Questa matrice analizza la luminosità dell'immagine nei diversi punti, rappresentata dalla carica presente in ogni elemento del fotosensore.

Si ricorre alla tecnica del registro a scorrimento analogico per spostare fuori della matrice le cariche generate dai singoli fotodiodi ed inviarle al terminale d'uscita della struttura. La scansione viene effettuata applicando i corretti segnali di clock ai registri. In questo modo le cariche generate in ciascun elemento dell'immagine (pixel) sono trasferite, in sequenza, all'uscita del dispositivo CCD.

Le funzioni di rilevamento della luce e di registro a scorrimento possono essere svolte dallo stesso elemento o da un elemento separato, secondo il tipo di dispositivo.

Gli schemi di funzionamento riportati qui di seguito si basano sull'ipotesi che sui chip sia proiettata questa immagine:

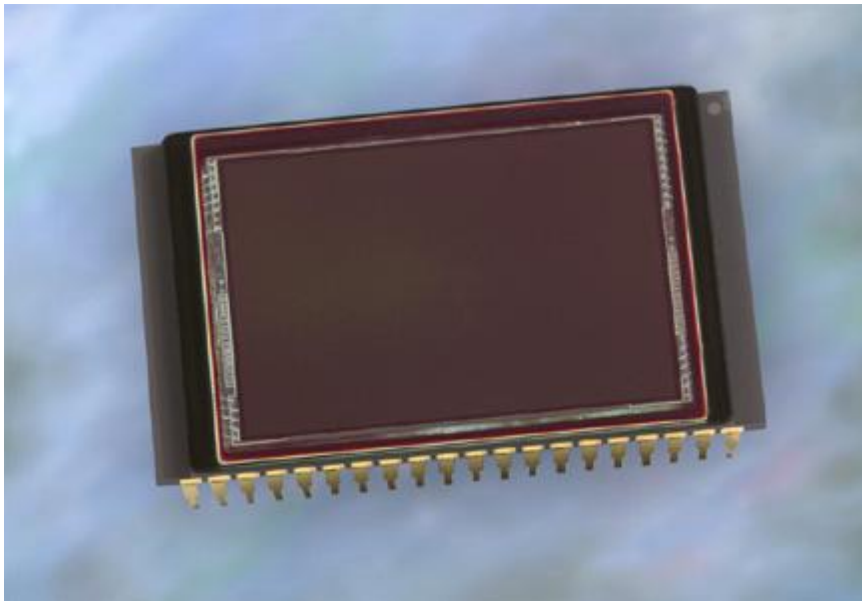


Il numero riportato in ogni pixel è indicativo della carica ivi generata.

Full Frame (FF)

Il chip è suddiviso in due zone:

- 1) il fotosensore a matrice con registro a scorrimento parallelo,
- 2) il registro di lettura seriale, schermato alla luce.



CCD a colori Full Frame Kodak KAF-10010
chip: 29,0 mm (H) x 19,1 mm (V)
risoluz.: 3876 (H) x 2584 (V) pixel
pixel: 6,8 μm (H) x 6,8 μm (V)

È la struttura più semplice sia da produrre sia da gestire e comprende un amplificatore del segnale in uscita.

L'immagine è proiettata otticamente sulla matrice di fotodiodi che funge da piano di messa a fuoco. Il dispositivo analizza l'immagine segmentandola in elementi discreti, i cosiddetti **pixel (Picture Element)**, quantizzando così la scena. Le righe di dati relativi alla scena sono quindi fatti scorrere in parallelo fino al registro di lettura che, a sua volta, invia ciascuna riga all'uscita sotto forma di flusso seriale di dati; il processo si ripete fino al completamento della trasmissione di tutti i dati all'esterno del chip.

Poiché il registro a scorrimento parallelo è utilizzato sia per l'analisi dell'immagine sia per il trasferimento dei relativi dati, è necessario servirsi di un otturatore o di un'illuminazione stroboscopica sincronizzata per preservare l'integrità dei dati acquisiti.

La semplicità della struttura FF permette di raggiungere i valori più elevati di risoluzione e densità dei fotodiodi ed è, di conseguenza, quella utilizzata nei chip per fotocamere (compatte di fascia medio-alta e reflex).

- Analisi dati quadro (otturatore aperto):

1	3	5	5	6	6	6	6	5	5	3	1	fotosensore a matrice (registri a scorrimento)
1	3	5	7	7	7	7	7	7	5	3	1	
2	4	6	7	8	8	8	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	9	9	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	9	9	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	8	8	8	7	6	4	2	
1	3	5	7	7	7	7	7	7	5	3	1	
1	3	5	5	6	6	6	6	5	5	3	1	
registro di lettura schermato											amplificatore e terminale	

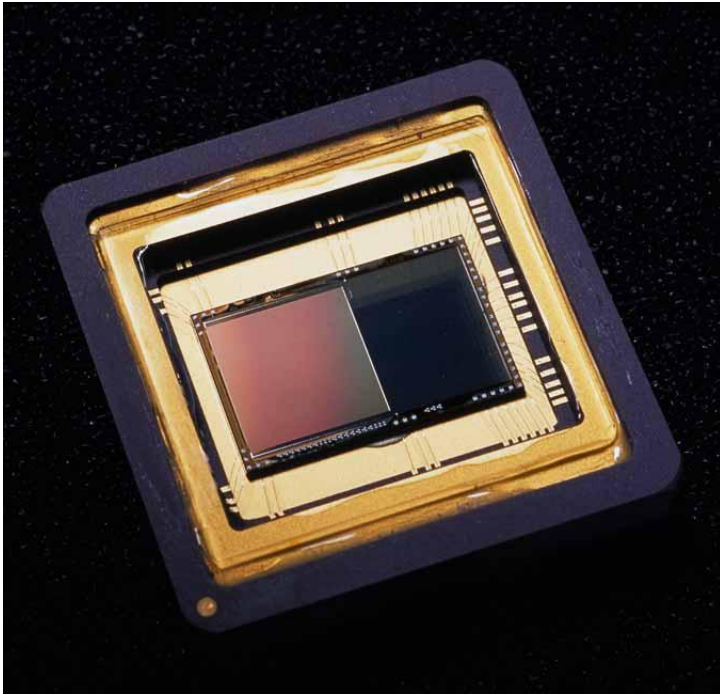
- Trasferimento dati quadro (otturatore chiuso):

↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓		
1	3	5	5	6	6	6	6	5	5	3	1	scorrimento parallelo	
1	3	5	7	7	7	7	7	7	5	3	1		
2	4	6	7	8	8	8	8	7	6	4	2		
2	4	6	7	8	9	9	8	7	6	4	2		
2	4	6	7	8	9	9	8	7	6	4	2		
		→	2	4	6	7	8	8	8	8	7		6
scorrimento seriale													lettura

Frame Transfer (FT)

Il chip è suddiviso in tre zone:

- 1) la metà superiore è il fotosensore a matrice con registro a scorrimento parallelo,
- 2) la metà inferiore è uguale a quella superiore, schermata alla luce per fungere da area di memoria,
- 3) il registro di lettura seriale, schermato alla luce.



È una struttura relativamente simile a quella FF, con l'aggiunta dell'area di memoria dei dati dell'immagine, e comprende un amplificatore del segnale in uscita.

Il quadro dell'immagine genera una configurazione di cariche proporzionale alla luce incidente. Durante la cancellazione verticale, le cariche generate nell'area fotosensibile vengono trasferite molto rapidamente, in direzione verticale, nell'area di memoria. In questo modo, all'inizio del quadro successivo, i fotodiodi sono vuoti, mentre la matrice di memoria contiene la configurazione di cariche precedente. Durante il quadro successivo, queste cariche vengono spostate verso il basso, una riga alla volta, nel registro di lettura seriale e quindi inviate, con una frequenza di clock decisamente più elevata, al terminare di uscita.

Oltre ad analizzare i quadri, i rivelatori del fotosensore partecipano anche al processo di trasferimento verticale: ognuno di essi è, infatti, attraversato dagli elettroni provenienti dagli altri elementi sovrastanti. Se il fotosensore rimanesse esposto alla luce durante il trasferimento del quadro, una carica supplementare verrebbe aggiunta a tutti i pacchetti di elettroni che passano in successione attraverso i fotodiodi e sarebbe quindi problematico ottenere una buona efficienza del processo nel suo insieme. Per evitare che il dispositivo sia illuminato durante il trasferimento, è inevitabilmente necessario servirsi di un otturatore o di un'illuminazione stroboscopica sincronizzata.

Poiché occorre raddoppiare l'area della base di silicio, i chip con struttura FT hanno una risoluzione inferiore ed un costo superiore a quelli FF, relegandoli all'utilizzo in fotocamere e telecamere di fascia medio-bassa.

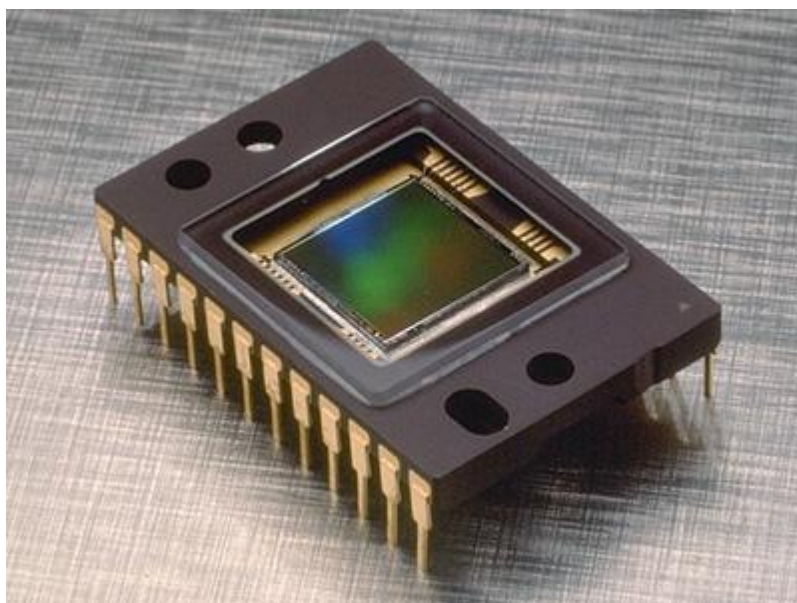
- Analisi dati quadro (otturatore aperto):

1	3	5	5	6	6	6	6	5	5	3	1	fotossensore a matrice (registri a scorrimento)
1	3	5	7	7	7	7	7	7	5	3	1	
2	4	6	7	8	8	8	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	9	9	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	9	9	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	8	8	8	7	6	4	2	
1	3	5	7	7	7	7	7	7	5	3	1	
1	3	5	5	6	6	6	6	5	5	3	1	
												area di memoria schermata
												registro di lettura schermato
												amplificatore e terminale

Interline Transfer (IT)

Il chip è suddiviso in tre zone:

- 1) il fotosensore a matrice, a colonne separate,
- 2) il registro a scorrimento parallelo, a colonne separate alternate con quelle dei pixel, schermato alla luce,
- 3) il registro di lettura seriale, schermato alla luce.



CCD a colori Interline Transfer Kodak KAI-1011
chip: 10,15 mm (H) x 10,0 mm (V)
risoluzione: 1008 (H) x 1018 (V) pixel
pixel: 9 μ m (H) x 9 μ m (V)

È una struttura che non necessita di otturatore o illuminazione stroboscopica sincronizzata, nella quale si utilizzano elementi separati e interlacciati per i fotosensori e gli elementi di memoria; comprende un amplificatore del segnale in uscita.

I registri a scorrimento sono ricoperti da una maschera schermante. Durante la cancellazione di quadro, tutte le cariche generate nei fotodiodi vengono spostate lateralmente nella corrispondente serie di elementi di memoria, il cui contenuto viene prelevato durante il quadro successivo.

In confronto alla struttura FT, è evidente la maggiore complessità della struttura IT, con conseguente aumento dei costi di produzione; inoltre, poiché parte dell'area di proiezione dell'immagine è occupata dai registri di memoria, la sensibilità per unità di superficie è inferiore e gli errori di campionamento tendono ad aumentare al diminuire del numero degli elettroni liberati in ciascun fotodiodo.

Nel complesso, questo dispositivo presenta comunque un'elevata efficienza nel trasferimento delle cariche, con lag e blooming ridotti quasi a zero, insieme ad un ampio campo dinamico ed una minima quantità di rumore. Tutto questo rende il trasferimento interlinea una soluzione molto efficiente e vantaggiosa nei chip per le telecamere amatoriali di fascia medio-alta e per quelle professionali.

- Analisi dati quadro:

fotosensore a matrice
(colonne di scorrimento schermate alternate a colonne di fotodiodi)

1	3	5	5	6	6	6	6	5	5	3	1	
1	3	5	7	7	7	7	7	7	5	3	1	
2	4	6	7	8	8	8	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	9	9	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	9	9	8	7	6	4	2	
2	4	6	7	8	8	8	8	7	6	4	2	
1	3	5	7	7	7	7	7	7	5	3	1	
1	3	5	5	6	6	6	6	5	5	3	1	

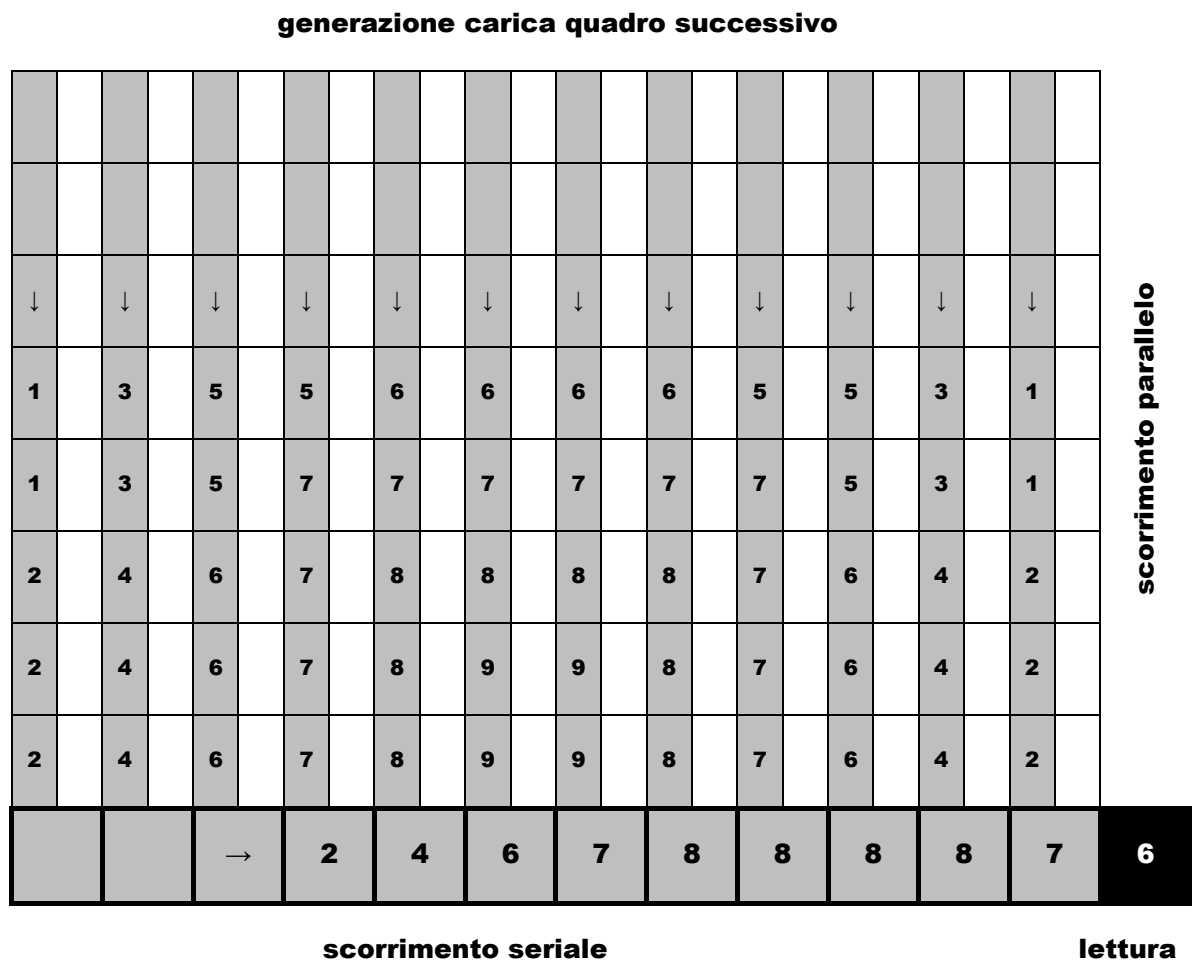
registro di lettura schermato **amplificatore e terminale**

- Trasferimento dati in memoria:

scorrimento parallelo

1	←	3	←	5	←	5	←	6	←	6	←	6	←	6	←	5	←	5	←	3	←	1	←
1	←	3	←	5	←	7	←	7	←	7	←	7	←	7	←	7	←	5	←	3	←	1	←
2	←	4	←	6	←	7	←	8	←	8	←	8	←	8	←	7	←	6	←	4	←	2	←
2	←	4	←	6	←	7	←	8	←	9	←	9	←	8	←	7	←	6	←	4	←	2	←
2	←	4	←	6	←	7	←	8	←	9	←	9	←	8	←	7	←	6	←	4	←	2	←
2	←	4	←	6	←	7	←	8	←	8	←	8	←	8	←	7	←	6	←	4	←	2	←
1	←	3	←	5	←	7	←	7	←	7	←	7	←	7	←	7	←	5	←	3	←	1	←
1	←	3	←	5	←	5	←	6	←	6	←	6	←	6	←	5	←	5	←	3	←	1	←

- Trasferimento dati al terminale di uscita ed avvio analisi dati quadro successivo:



Frame Interline Transfer (FIT)

Il chip è suddiviso in quattro zone:

- 1) il fotosensore a matrice nella metà superiore, a colonne separate,
- 2) il registro a scorrimento parallelo nella metà superiore, a colonne separate alternate con quelle dei pixel, schermato alla luce,
- 3) la metà inferiore è uguale a quella superiore, schermata alla luce per fungere da area di memoria,
- 4) il registro di lettura seriale, schermato alla luce.



CCD monocromatico/a colori Frame Interline Transfer Texas Instruments TC247SPD/TC246RGB
risoluzione: 658 (H) x 496 (V) pixel
pixel: 10 μm (H) x 10 μm (V)

È una struttura estremamente complessa, e quindi molto costosa, che incorpora funzioni sia IT sia FT; comprende un amplificatore del segnale in uscita.

La carica viene trasferita dal fotosensore ai registri a scorrimento durante la cancellazione di quadro, ma poi è applicato un sincronismo pari a 50 volte la frequenza di riga per estrarre la carica e trasferirla in una matrice di memoria separata, ricoperta da una maschera opaca, dove i pacchetti di cariche sono immunizzati dall'effetto di una forte illuminazione. A causa del mascheramento separato, vengono utilizzati registri a scorrimento verticali, pertanto il sensore FIT non necessita di otturatore o illuminazione stroboscopica sincronizzata. Il tempo durante il quale una carica è trattenuta nel registro verticale è quindi ridotto di 50 volte, rispetto ai sensori IT; anche lo smear verticale è ridotto di un fattore analogo, a livelli praticamente non rilevabili.

La struttura FIT offre quindi le migliori prestazioni disponibili ad oggi, ma utilizza un sensore di maggiore area totale, per via dell'area di memoria separata.

CMOS

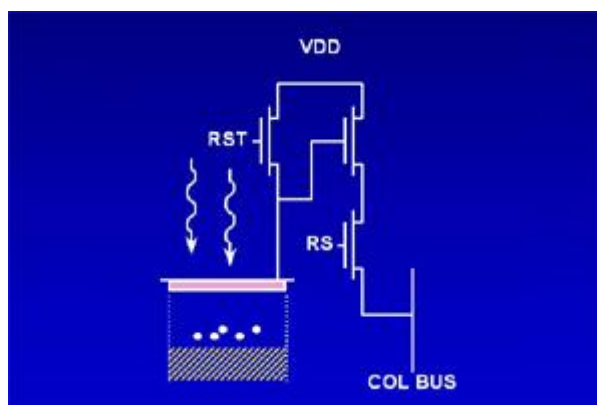
L'**APS (Active-Pixel Sensor, fotosensore a pixel attivi)** è una matrice di pixel su circuito integrato, dove ogni elemento è costituito non solo dal fotodiodo, ma anche da un circuito di amplificazione a transistor per la lettura del segnale in uscita. Il suo nome deriva dalla tecnologia a semiconduttori utilizzata per produrlo (**CMOS, Complementary Metal Oxide Semiconductor**).

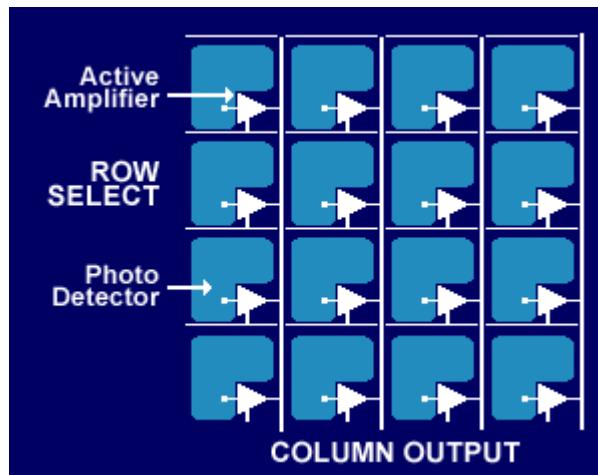
Benchè i vantaggi della sua configurazione fossero noti in teoria fin dagli anni '60 del XX secolo, la sua produzione ha potuto iniziare solo dagli anni '90, grazie alla ricerca condotta dal Jet Propulsion Laboratory della NASA ed attualmente rappresenta l'alternativa al CCD.

Configurazione pixel

Il pixel standard dell'APS comprende un rivelatore e tre transistor. Il rivelatore può essere un fotodiodo, di utilizzo più frequente, o un fotogate:

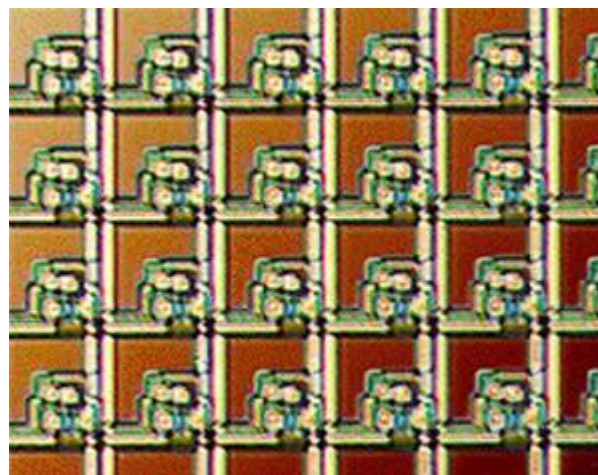
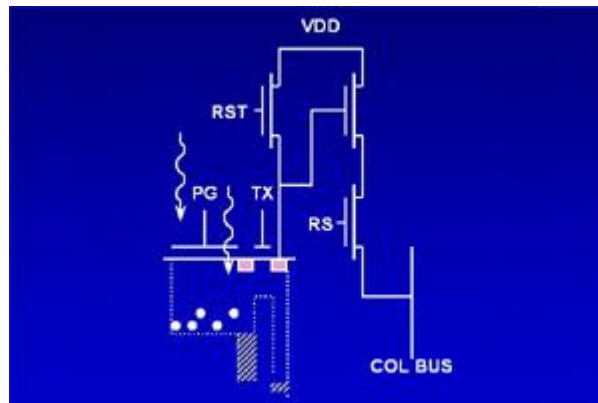
- **fotodiodo**





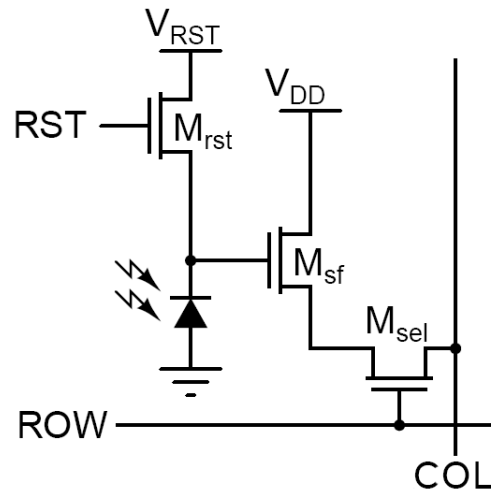
CMOS,
fotodiodi
(schema)

- *fotogate*



CMOS,
fotogate
(foto)

Facendo riferimento al seguente schema:



l'esposizione alla luce innesca un accumulo, o integrazione, di carica nel fotodiodo, generando una variazione di tensione.

Il primo transistor, M_{rst} , funge da interruttore per il reset del dispositivo: quando è attivo, il fotodiodo è collegato alla tensione di alimentazione, V_{rst} , con conseguente azzeramento della carica.

Il secondo transistor, M_{sf} , funge da buffer, un amplificatore che consente di tenere sotto controllo la tensione del pixel senza rimuovere la carica accumulata; la tensione di alimentazione, V_{DD} , è legata a quella del transistor di reset.

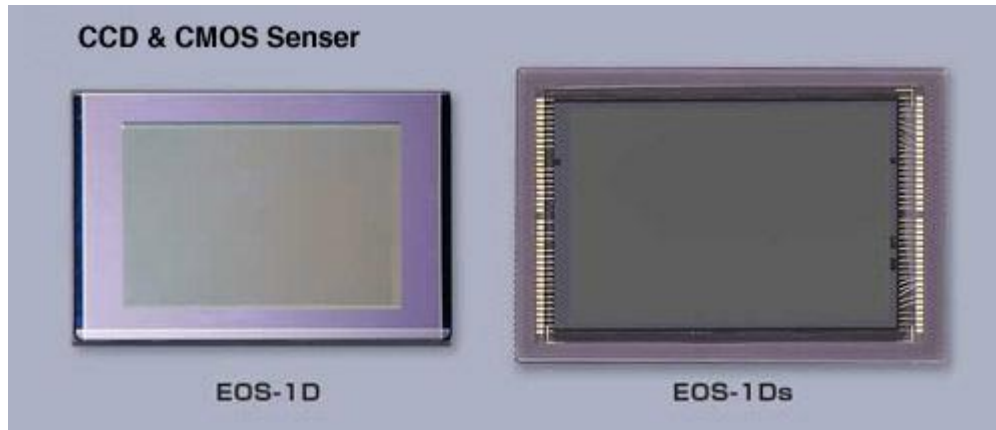
Il terzo transistor M_{sel} funge da selettore di riga: consente all'elettronica di elaborazione di leggere i dati di una singola riga di pixel.

I pixel di ciascuna riga condividono sia le linee di reset, in modo da essere resettati contemporaneamente, sia quelle di selezione della riga. Di conseguenza, i segnali in uscita da ciascun pixel di una data colonna sono legati tra loro. Poiché la selezione riguarda solo una riga per volta, non c'è conflitto per la linea in uscita.

CCD vs CMOS

I fotosensori a stato solido CCD e CMOS sono entrambi in grado di catturare immagini elettroniche, ma, come visto in precedenza, il loro funzionamento si basa su due diverse tecnologie. Le specifiche

caratteristiche dei due tipi di fotosensori non consentono di decretare un vero e proprio vincitore, adatto a tutte le applicazioni del settore dell'immagine, a dispetto di quanto invece affermano i fabbricanti ed i sostenitori dell'uno o dell'altro campo.

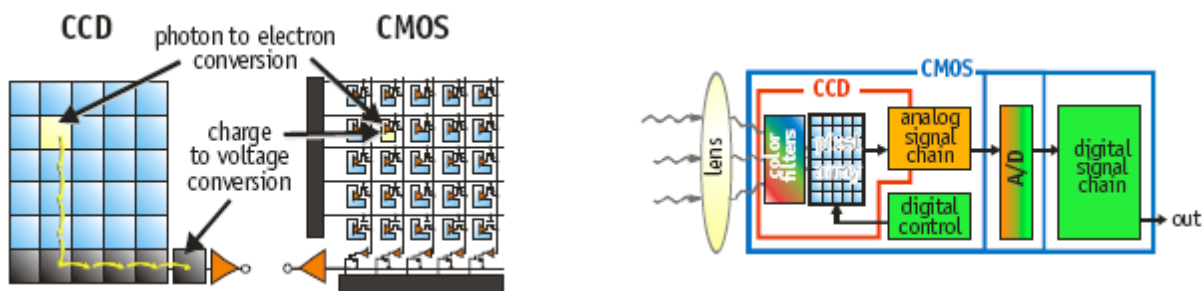


Negli ultimi anni si è avuto uno sviluppo senza sosta di entrambe le tecnologie e le numerose previsioni riguardanti l'ascesa o la caduta di una o dell'altra si sono dimostrate prive di fondamento. Tenuto conto che la situazione attuale e le prospettive sono eccellenti sia per il CCD sia il CMOS, è comunque possibile tracciare un quadro generale dei rispettivi punti di forza e delle loro peculiarità.

Entrambi i tipi di fotosensore convertono i segnali luminosi in cariche elettriche da cui trarre segnali elettronici.

Nel fotosensore CCD, la carica di ciascun pixel viene trasferita attraverso un numero limitato di nodi di uscita (sovente uno solo) per convertirla in una tensione, da memorizzare temporaneamente ed inviare fuori dal chip sotto forma di segnale analogico. È possibile assegnare tutti i pixel alla cattura della luce e l'uniformità in uscita (un fattore chiave per la qualità dell'immagine) è elevata.

Nel fotosensore CMOS, ciascun pixel provvede alla conversione della carica in tensione ed il chip può comprendere circuiti di amplificazione, riduzione del rumore e digitalizzazione, in modo da rilasciare un segnale digitale. Queste funzioni ausiliarie aumentano la complessità del fotosensore e riducono l'area utile per la cattura della luce. Poiché la conversione è eseguita nei singoli pixel, l'uniformità è inferiore; in compenso, il trattamento del segnale esternamente al chip si può basare su un'elettronica meno complessa.



L'invenzione dei fotosensori CCD e CMOS risale agli anni '60 e '70 del XX secolo. Il CCD acquisì ben presto una posizione dominante, grazie alla qualità superiore delle sue immagini in rapporto alla tecnologia di produzione disponibile; il CMOS necessitava infatti di un'uniformità maggiore e di elementi più piccoli di quelli ottenibili all'epoca.

Solo a partire dagli anni '90 lo sviluppo dei processi litografici permise di riprendere in considerazione i fotosensori CMOS. Il rinnovato interesse per questo tipo di chip si basava sulla prospettiva di consumi elettrici più contenuti, integrazione su larghissima scala dell'elettronica e costi di fabbricazione ridotti grazie all'utilizzo di circuiti logici e memorie messi a punto per il settore elettronico-informatico. Nonostante l'indubbia validità sulla carta, il conseguimento reale di questi benefici, unitamente ad un'elevata qualità delle immagini, a richiesto tempi, investimenti e processi di adattamento superiori a quelli stimati inizialmente.

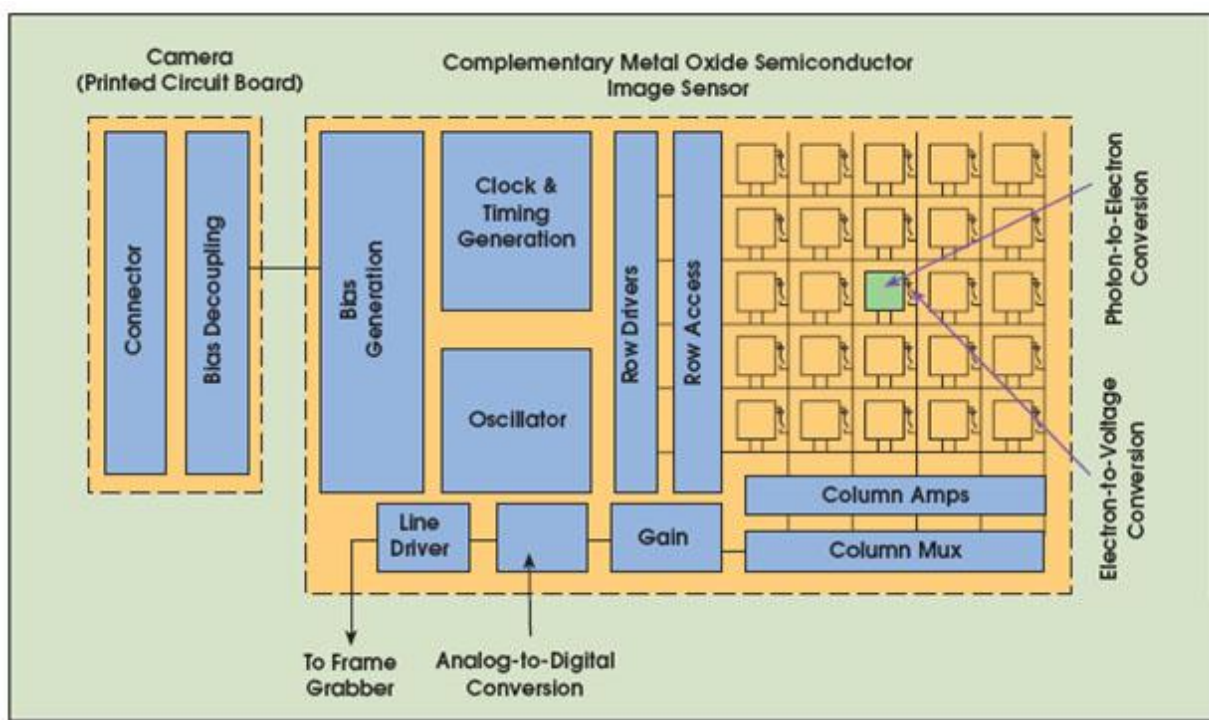
Entrambi i tipi di fotosensore sono in grado di fornire prestazioni eccellenti se progettati adeguatamente. Il CCD ha costituito da sempre il riferimento per le applicazioni fotografiche, scientifiche ed industriali che richiedono la massima qualità dell'immagine (in termini di efficienza quantistica e bassa rumorosità) anche se a scapito della compattezza del sistema. Per contro, il CMOS permette un maggior grado di integrazione (più funzioni sul chip), un minor consumo elettrico (a livello del chip) e dimensioni del sistema più contenute, costringendo però sovente a compromessi tra qualità dell'immagine e costi di produzione.

Oggi non c'è una linea di demarcazione ben definita tra le applicazioni più adatte all'uno o all'altro. I progettisti di fotosensori CMOS hanno puntato con grande determinazione al raggiungimento di un'elevata qualità dell'immagine, mentre i progettisti di fotosensori CCD sono riusciti a ridurre il consumo elettrico e le dimensioni dei pixel. Di conseguenza, si possono trovare CCD nelle fotocamere dei telefoni cellulari di fascia bassa, con ridotti consumi elettrici, e CMOS ad alte prestazioni nelle fotocamere professionali ed industriali, in controtendenza al passato anche recente. Vale la pena notare che i produttori in grado di procedere a questi "salti di

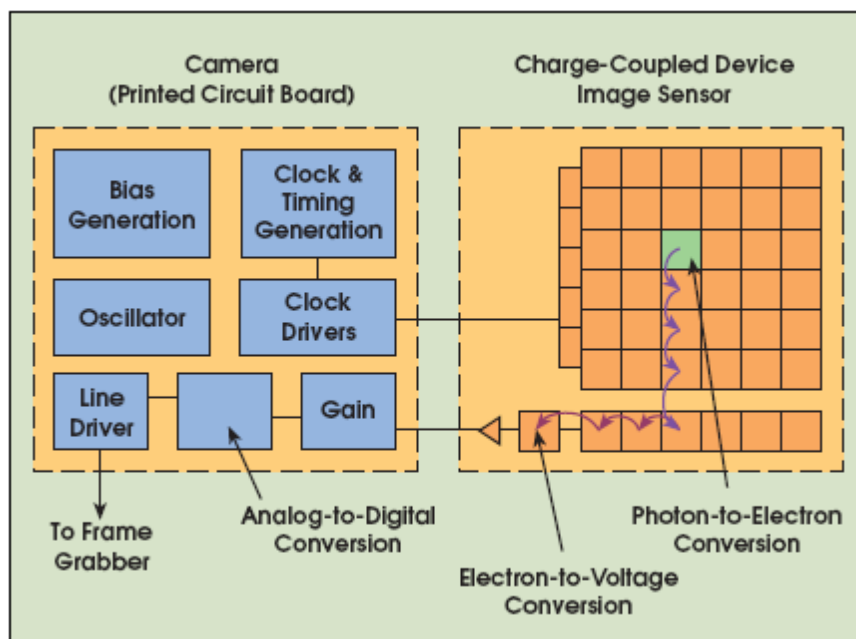
campo" sono quasi sempre quelli con più anni di esperienza alle spalle in entrambe le tecnologie.

A livello di chip, i costi sono simili. In passato, i fautori del CMOS ritenevano che questo fotosensore sarebbe stato prodotto ad un costo decisamente basso grazie all'erronea convinzione di poter sfruttare le stesse linee di produzione per grandi volumi di chip del settore elettronico-informatico tradizionale. I progettisti di fotosensori CMOS sono stati invece obbligati a sviluppare ed affinare impianti specializzati ed ottimizzati per volumi produttivi ridotti di chip ad alte prestazioni, analogamente a quanto verificatosi per i fotosensori CCD. L'adattamento dei processi litografici per elementi progressivamente sempre più piccoli (0,35 μm , 0,25 μm , 0,18 μm , ecc.) si è rivelato lento e costoso.

In linea teorica, le fotocamere e telecamere con sensori CMOS avrebbero bisogno di meno componenti con consumi elettrici più contenuti; in realtà, necessitano ancora di chip ausiliari per l'ottimizzazione della qualità dell'immagine, aumentando così i costi e riducendo il vantaggio del minor consumo elettrico:



I dispositivi CCD sono viceversa meno complessi e quindi meno costosi da progettare:



Inoltre, i processi produttivi sono più maturi ed ottimizzati: in generale, i costi di progetto e fabbricazione di CCD per specifiche applicazioni ad alte prestazioni sono inferiori a quelli dei corrispondenti fotosensori CMOS.

Occorre però tenere conto anche delle dimensioni del wafer, che possono avere un'influenza determinante sui costi dei dispositivi: all'aumentare del diametro del wafer cresce il numero dei fotosensori ottenibili, con un minor costo per unità di prodotto. Il diametro può variare da 150 mm per i CCD e 200 mm per i CMOS a 300 mm per ambedue i dispositivi.

Il maggiore problema relativamente al prezzo è la sua sostenibilità. Le politiche commerciali aggressive, che puntano su margini di guadagno molto ridotti per conquistare quote di mercato, non sempre pagano e non poche aziende hanno abbandonato la produzione di fotosensori CMOS; tanto più che il cliente, in genere, necessita di stabilità e supporto a lungo termine.

Mentre l'obiettivo dei minori costi è stato difficile da conseguire e l'integrazione su chip ha richiesto tempi lunghi, la velocità di funzionamento è il campo dove i fotosensori CMOS possono dimostrare le loro grandi potenzialità, soprattutto nelle applicazioni industriali, grazie alla configurazione in parallelo delle linee.

CCD e CMOS rimangono complementari. La scelta continua a dipendere dall'applicazione e dal fornitore piuttosto che dalla tecnologia.

Le tabelle seguenti mettono a confronto le caratteristiche e le prestazioni dei due tipi di fotosensori e tracciano un quadro delle aspettative e della situazione reale del CMOS.

CCD vs CMOS: caratteristiche

Caratteristiche	CCD	CMOS
Segnale in uscita da pixel	Pacchetto di fotoelettroni	Tensione
Segnale in uscita da chip	Tensione (segnale analogico)	Bit (segnale digitale)
Segnale in uscita da foto/telecamera	Bit (segnale digitale)	Bit (segnale digitale)
Fattore di riempimento	Alto	Moderato
Errore amplificatore	Non pertinente	Moderato
Rumore sistema	Basso	Moderato
Complessità sistema	Alta	Bassa
Complessità sensore	Bassa	Alta
Componenti foto/telecamera	Sensore + chip ausiliari + obiettivo	Sensore + eventuali chip ausiliari (utilizzo diffuso) + obiettivo
Costi di ricerca e sviluppo	Minori	Maggiori
Costi sistema	In funzione dell'applicazione	In funzione dell'applicazione

CCD vs CMOS: prestazioni

Prestazioni	CCD	CMOS
Linearità di risposta	Moderata	Leggermente migliore
Gamma dinamica	Alta	Moderata
Uniformità	Alta	Bassa - moderata
Shuttering uniforme	Rapido, comune	Scarso
Velocità	Moderata - alta	Maggiore
Windowing	Limitato	Esteso
Antiblooming	Alto - nullo	Alto
Biasing e clocking	Multiplo, tensione maggiore	Singolo, tensione bassa

Evoluzione dei fotosensori CMOS		
Prospettive	Problematiche	Risultati
Prestazioni equivalenti al CCD	Sviluppo del processo produttivo più complesso e litografia su scala più ridotta di quanto previsto inizialmente	Prestazioni del CMOS elevate, ma con costi di sviluppo superiori a quelli del CCD
Integrazione su chip	Cicli di sviluppo più lunghi, incremento dei costi, compromesso sul rumore, flessibilità di utilizzo	Maggiore integrazione nel CMOS, ma chip ausiliari ancora presenti in entrambi i fotosensori
Consumi elettrici ridotti	Miglioramenti costanti del CCD	CMOS in vantaggio, ma con divario ridotto
Dimensioni ridotte dei sottosistemi	Dimensioni dei sottosistemi dipendenti in larga misura da ottica, chip ausiliari ed assemblaggio	CCD e CMOS all'incirca equivalenti
Economie di scala derivanti da utilizzo di impianti del settore elettronico-informatico	Necessità di sviluppare ed ottimizzare i processi produttivi	Linee di produzione ampiamente modificate ed adattate, in misura analoga a quanto verificatosi per il processo di fabbricazione del CCD

Immagini a colori

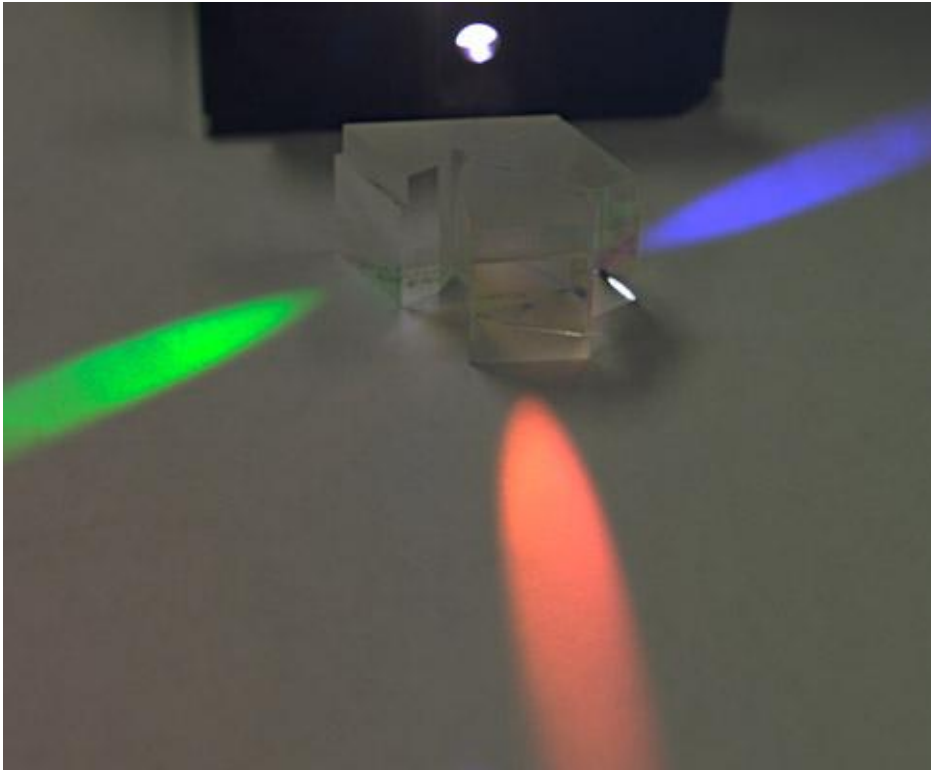
I fotosensori a stato solido, come tali, sono ciechi ai colori e, pertanto, acquisiscono immagini esclusivamente in toni di grigio, cioè monocromatiche. Il silicio, come gli altri semiconduttori, è in grado di discriminare i vari livelli di luminosità ma non le differenti lunghezze d'onda presenti nell'immagine.

Per catturare immagini a colori, è quindi necessario operare una selezione cromatica prima della conversione del segnale luminoso in un segnale elettrico.

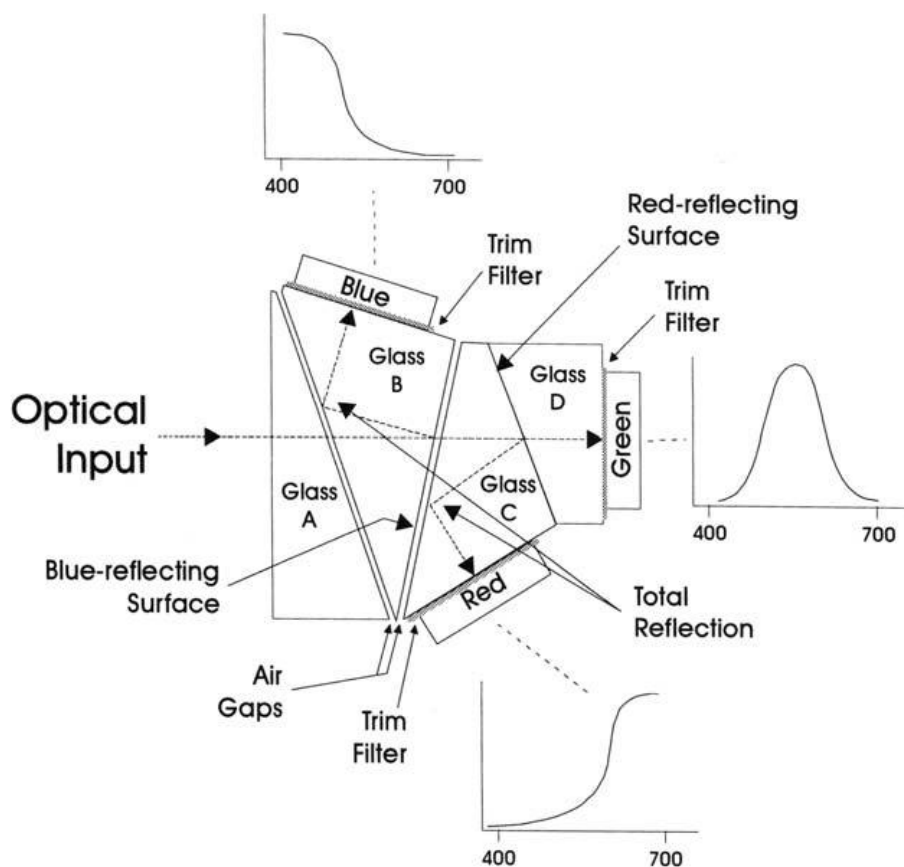
Prisma tricroico

La combinazione di tre prismi di rifrazione e riflessione, opportunamente spazati tra loro da sottilissimi strati di aria, permette di ottenere un

gruppo prismatico tricromatico, in grado di scomporre la luce proveniente dall'obiettivo nelle tre bande spettrali del blu, verde e rosso indirizzandole in tre direzioni complanari diverse.



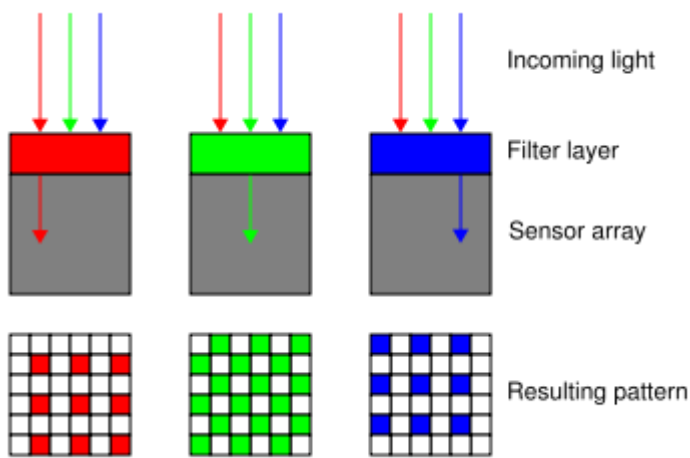
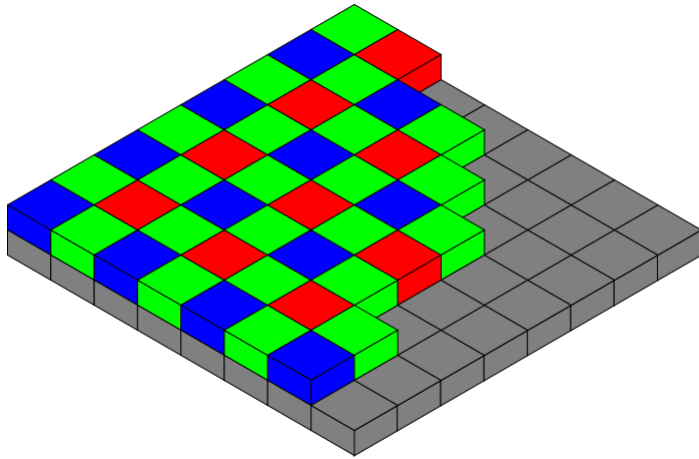
In teoria, rispetto al sistema Bayer ed a parità di dimensioni dei pixel, il sistema tricromatico è teoricamente caratterizzato da una maggiore sensibilità in condizioni di scarsa luminosità, non essendoci assorbimenti di luce dovuti a filtri di selezione. In pratica, questo vantaggio può rivelarsi aleatorio: se il prisma tricromatico non è in grado di assicurare una separazione cromatica sufficientemente precisa, diventa indispensabile dotarlo di specifici filtri.



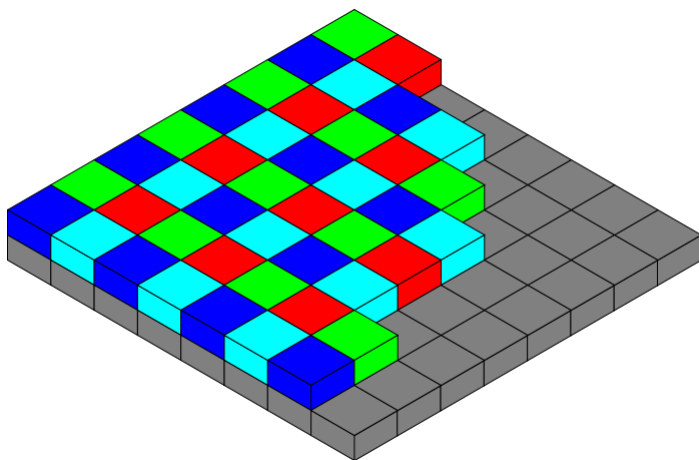
Inoltre, il percorso ottico aggiuntivo all'interno del prisma tricroico aumenta l'aberrazione cromatica assiale ed extrassiale dell'immagine. L'aberrazione assiale determina lunghezze focali differenti per ciascun colore; è possibile posizionare indipendentemente i CCD in ciascun punto focale, ma al prezzo di rapporti di ingrandimenti diversi per ciascun colore a causa dell'aberrazione extrassiale. I problemi originati dall'aberrazione cromatica diventano risolvibili solo utilizzando obiettivi di notevole complessità ottica. Sulla base di queste considerazioni, è facile comprendere perché il prisma tricroico è la soluzione universalmente adottata nelle telecamere a 3 CCD e non in altri tipi di apparecchiature.

Filtro Bayer (filtro a mosaico)

Prende il nome dal suo ideatore, Bryce E. Bayer della Eastman Kodak. È una **matrice ordinata di microfiltri RGB** posta a contatto con la superficie del fotosensore, in modo che ad ogni pixel corrisponda uno specifico colore. Poiché la superficie fotosensibile è esposta per il 25% alla luce rossa, per il 50% alla luce verde (a simulare la maggiore sensibilità dell'occhio umano a questo colore) e per il 25% alla luce blu, questo tipo di filtro è anche denominato **RGBG** o **GRGB**.



Una variante a questo schema è rappresentata dal filtro **RGBE**, messo a punto da Sony, che sostituisce metà dei microfiltri di colore verde con altri di colore smeraldo (in inglese **emerald**, da cui la **E** della sigla), alternando i due tipi, al fine di estendere la gamma tonale della banda intermedia dello spettro visibile.

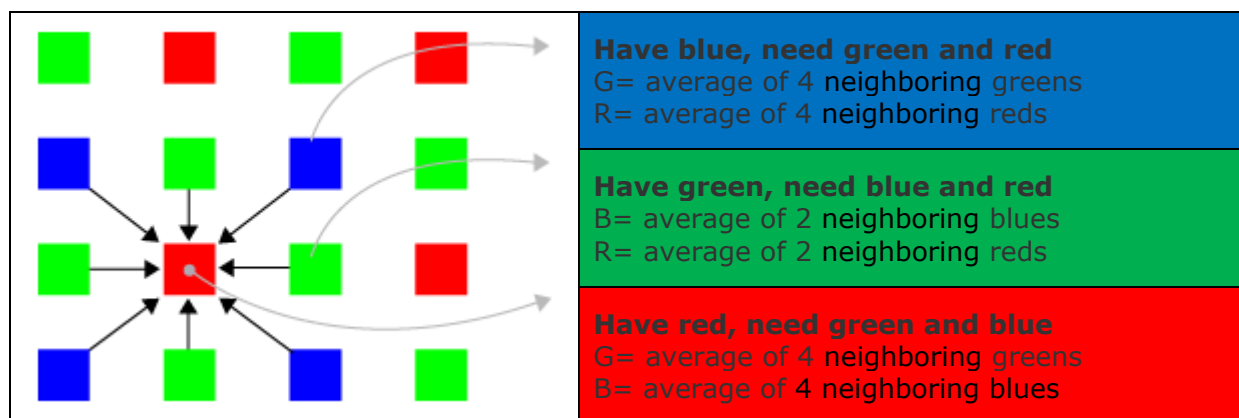


Il filtro Bayer è la soluzione adottata per tutti i fotosensori, Foveon a parte, che equipaggiano le fotocamere di qualsiasi fascia di prezzo e le telecamere a singolo CCD.

Se si mettono a confronto due fotosensori di caratteristiche identiche, uno senza filtro a mosaico e l'altro con filtro a mosaico, la risoluzione spaziale del secondo chip si riduce quasi al 30%. Per ricondurla alla sua integrità, è allora necessario procedere all'interpolazione dei dati in uscita dal fotosensore a colori per ricostruire i valori cromatici di ogni pixel.

Per ottenere i valori di rosso, verde e blu in ciascun pixel (ad esempio con 8 bit/canale colore, per un totale di 24 bit RGB/pixel), il processore di interpolazione calcola i valori cromatici medi dei pixel circostanti in base ai quali risalire a quelli incogniti nel punto in esame.

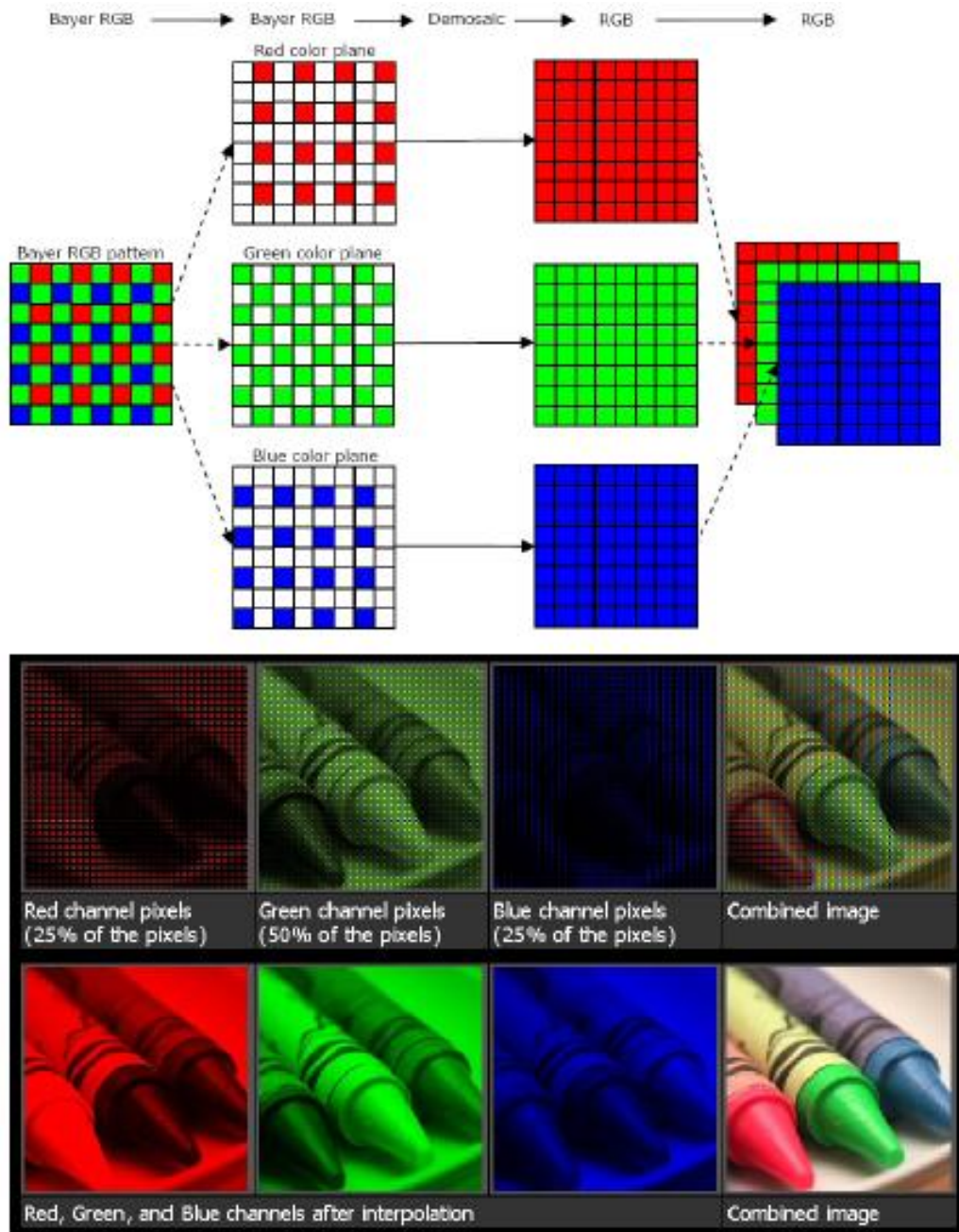
Per esempio, una volta letti i dati di uno dei pixel verdi nella riga GRGR del filtro Bayer, il processo di interpolazione stima il suo valore di blu come media dei dati dei due pixel blu posti sopra e sotto; il suo valore di rosso è invece la media dei dati dei due pixel rossi posti a fianco.



Finché il colore varia con gradualità nell'area dell'immagine, l'interpolazione cromatica svolge un eccellente lavoro. Tuttavia, ai bordi degli oggetti o nei dettagli fini, il processo può incorrere in errore generando artefatti.

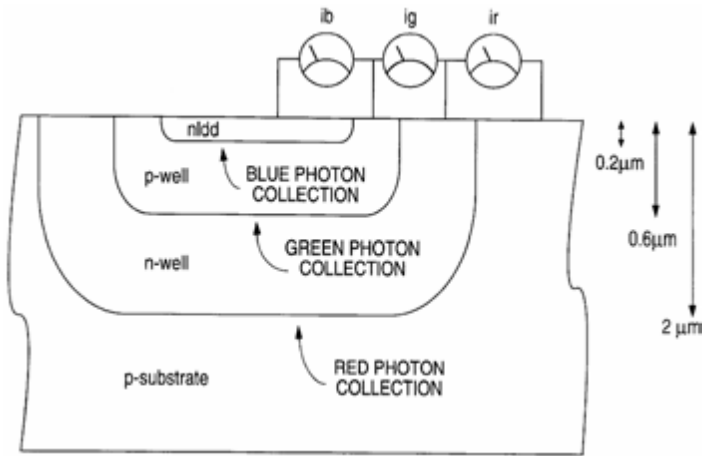
Si supponga, ad esempio, che un piccolo punto bianco della scena illumini unicamente un pixel blu; l'immagine interpolata potrebbe allora restituire il punto come blu nel caso che sia circondato da nero od altri colori, incorrendo in un caso di aliasing. Per ridurre l'aliasing, si può usare un **filtro passa-basso ottico**, o **filtro antialiasing**, che elimina deliberatamente i dettagli più piccoli, oppure mettere leggermente fuori fuoco l'obiettivo.

In definitiva, l'intero processo è riassumibile nel seguente schema:

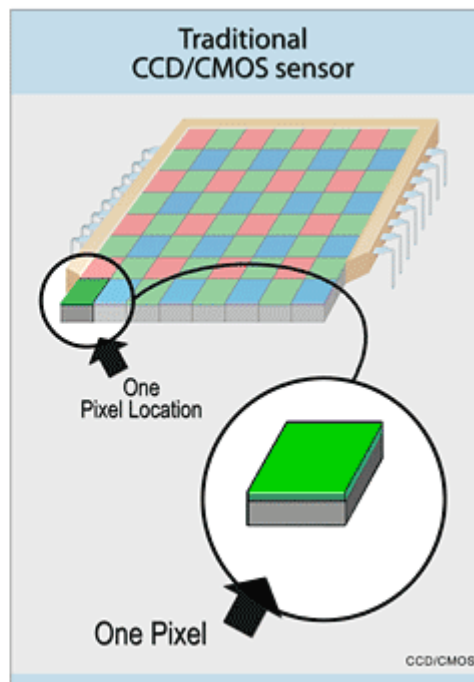
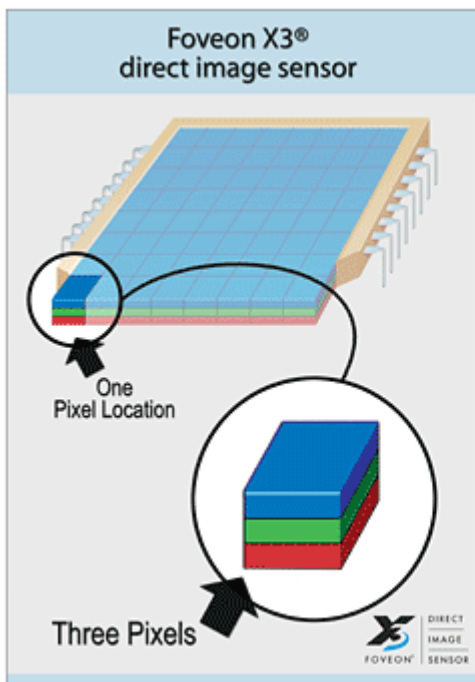
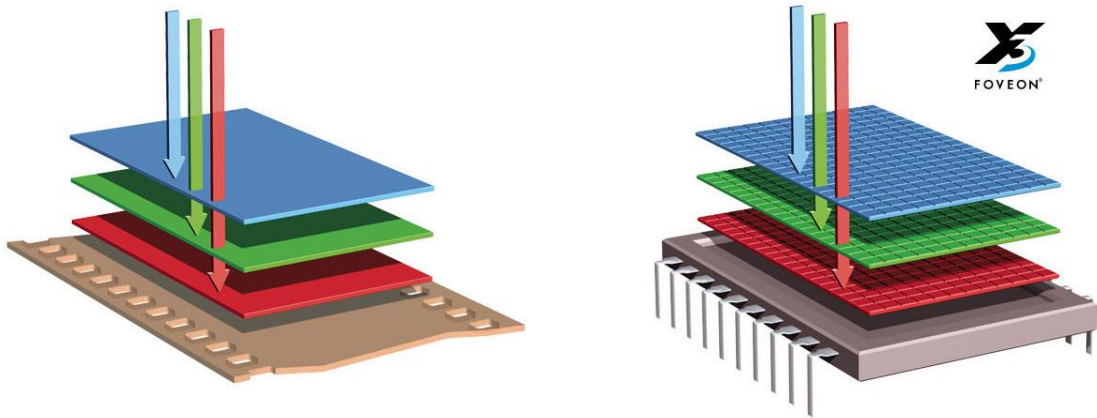


Foveon

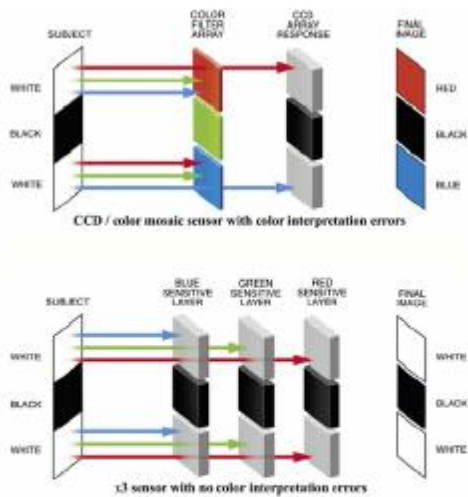
Un approccio alla selezione cromatica completamente differente, rispetto alle soluzioni precedenti, consiste nello sfruttare la diversa capacità di penetrazione nel silicio delle varie lunghezze d'onda dello spettro visibile. La profondità di penetrazione dei fotoni, prima del loro assorbimento e conseguente liberazione di elettroni, è infatti direttamente proporzionale alla loro lunghezza d'onda. È così possibile sovrapporre tre fotodiodi, ottenendo tre segnali cromatici distinti, senza necessità di filtrare preventivamente la luce in arrivo dall'obiettivo:



Questo è il principio di funzionamento dei fotosensori CMOS **Foveon X3**, veri e propri contrattari a stato solido delle pellicole fotografiche a colori:



Poiché ciascuna terna verticale di fotodiodi fornisce nativamente i tre segnali cromatici, l'architettura brevettata dei chip Foveon X3 non necessita di alcun processo di interpolazione, evitando gli errori tipici dei fotosensori con filtro a mosaico.



In teoria, questi fotosensori sono quindi in grado di restituire dettagli più fini e colori più fedeli e di minimizzare il moiré, gli artefatti e l'aliasing.

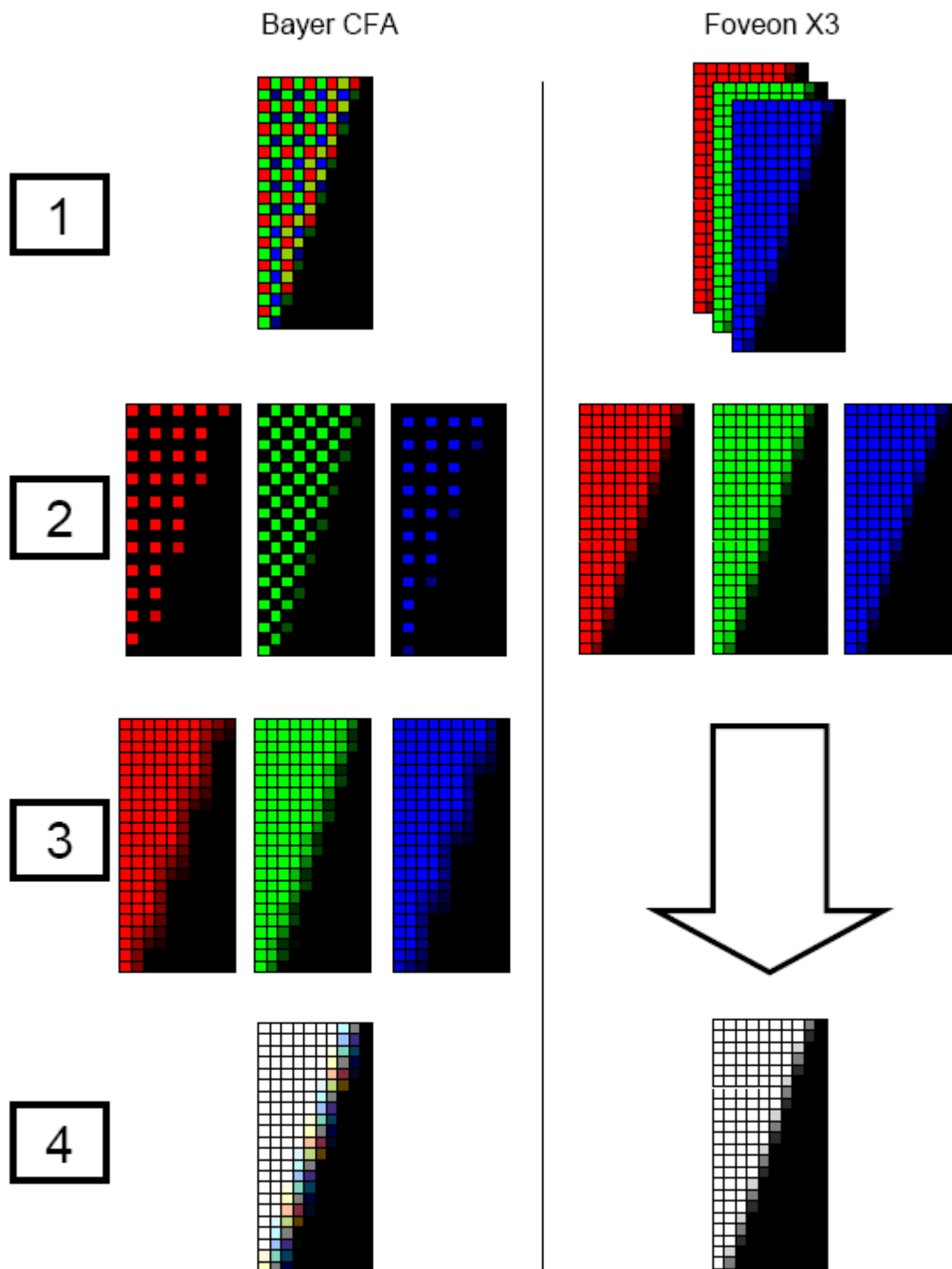


Figure 6: Comparison of color image capture planes and resulting images for a simulated edge.
 1. Edge image projected onto image sensor.
 2. R, G, and B planes immediately after capture. Missing data for the Bayer case is evident.
 3. Bayer image planes after color interpolation, a step not required for Foveon X3 sensors.
 4. Resulting edge images.

L'idea alla base dei fotosensori Foveon X3 non è nuova: Kodak aveva svolto ricerche al riguardo già negli anni '70 del XX secolo, ma senza arrivare alla

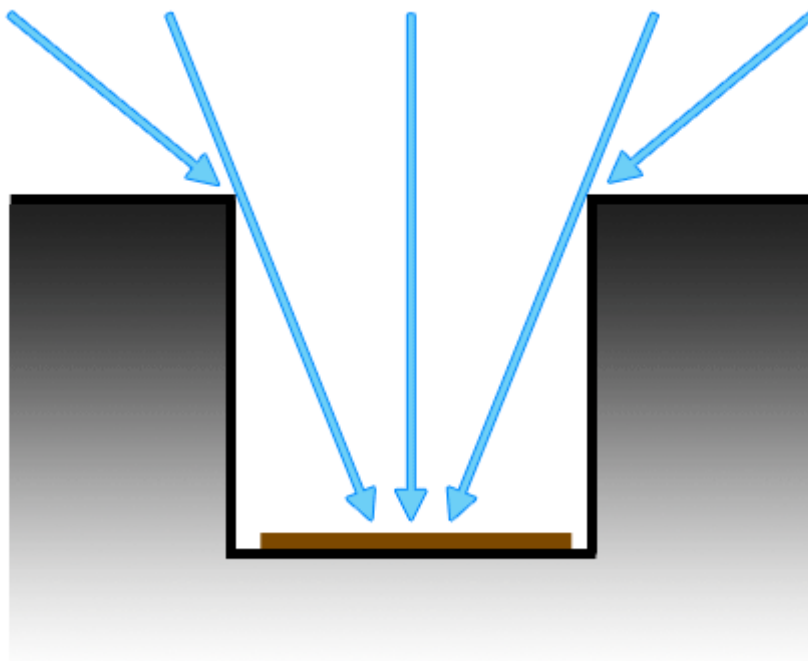
fase di produzione a causa dei notevoli problemi tecnici che questa soluzione comporta.

In pratica, la precisione di selezione cromatica del silicio non è paragonabile a quelle del prisma tricromatico e del filtro a mosaico. Inoltre, l'altezza della terna di fotodiodi tende ad amplificare effetti indesiderati, quali vignettatura, interferenza tra pixel, diffusione luminosa, diffrazione, sconfinamento in pixel adiacenti di raggi luminosi ad alti angoli di incidenza con generazione di segnali errati. Ed infine, l'elettronica necessaria al corretto funzionamento dei fotosensori impilati aggiunge altro rumore a quello generato dal chip.

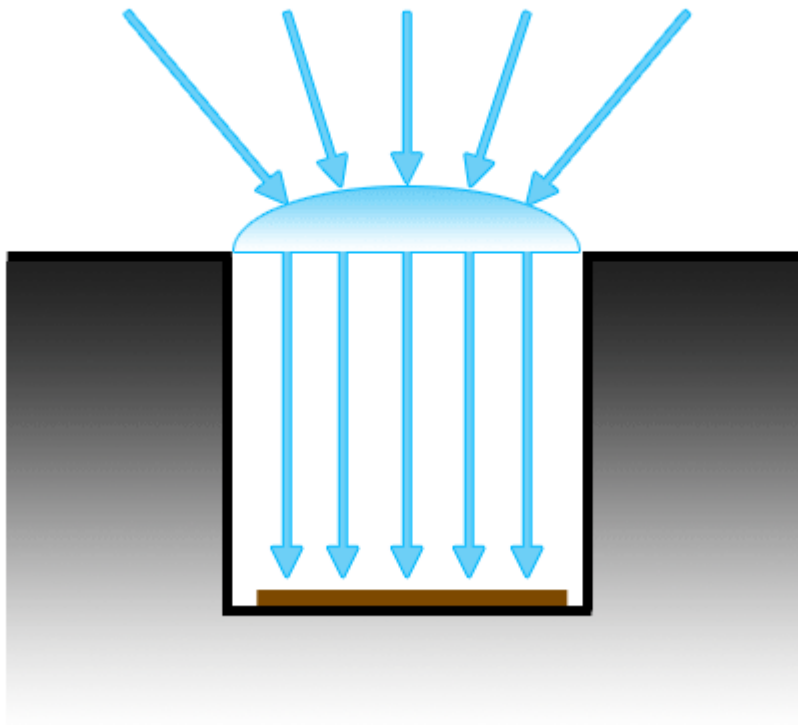
La risoluzione di questi problemi comporta inevitabilmente un aumento della complessità del sistema, in particolare al crescere delle prestazioni, e quindi dei costi.

Microlenti

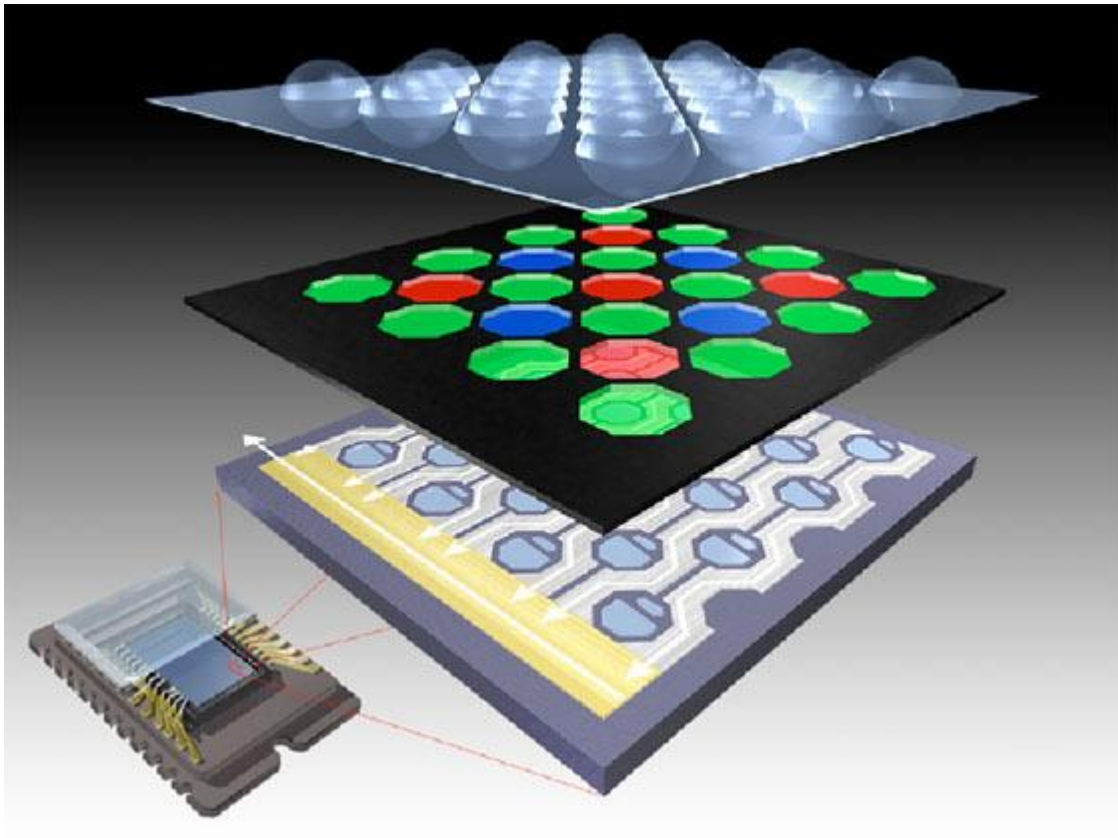
Mentre la superficie del fotogramma di una pellicola fotografica è ricoperta in modo pressochè ininterrotto da milioni di cristalli di alogenuro di argento ed è quindi in grado di reagire ai raggi luminosi indipendentemente dai loro angoli di incidenza, i fotodiodi non ricoprono integralmente la superficie dei fotosensori CCD e CMOS e, per giunta, sono posti al fondo di micropozzetti.



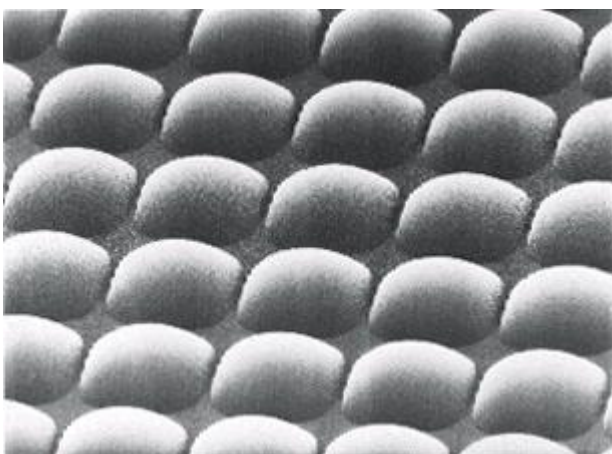
Questo schema aiuta a prevenire interferenze e dispersioni di cariche tra fotodiodi, migliorando la qualità dell'immagine, ma comporta un problema. Solo la luce che entra nel pozzetto con un piccolo angolo di incidenza colpisce l'area fotosensibile. Poiché all'aumentare dell'angolo di incidenza diminuisce la quantità di luce utile, l'immagine potrà essere affetta da vignettatura nel caso di impiego di obiettivi grandangolari spinti, specialmente quelli inizialmente progettati per un utilizzo con pellicole. Per attenuare, se non eliminare del tutto, questo inconveniente, si pone su ciascun fotodiodo una microlente che permette di raccogliere anche i raggi luminosi ad alti angoli di incidenza e quelli che altrimenti andrebbero a colpire il chip tra un fotodiodo e l'altro andando così persi. In pratica, le microlenti fungono da amplificatori dell'area fotosensibile, portandola dal 50% circa ad oltre il 90%.



Uno svantaggio delle microlenti è la diffusione di luce proprio in prossimità del singolo rivelatore, luce che può essere captata anche dal pixel adiacente. Questo fenomeno negativo è tuttavia compensato dall'aumentata sensibilità del sistema. Un ulteriore beneficio è la riduzione del pur già ridottissimo fenomeno dello smear verticale.



Le microlenti vengono generate direttamente sul fotosensore: si deposita un sottilissimo strato di materiale plastico trasparente sulla superficie del chip e lo si incide formando una matrice di piccoli blocchi su ciascun pixel. Si scalda quindi il chip in modo che il materiale rammollisca e la sua tensione superficiale deformi ciascun blocco fino a fargli assumere una configurazione piano-convessa. Le dimensioni del blocco, lo spessore dello strato depositato e la tensione superficiale del materiale sono i fattori che determinano l'esatta forma finale della microlente.

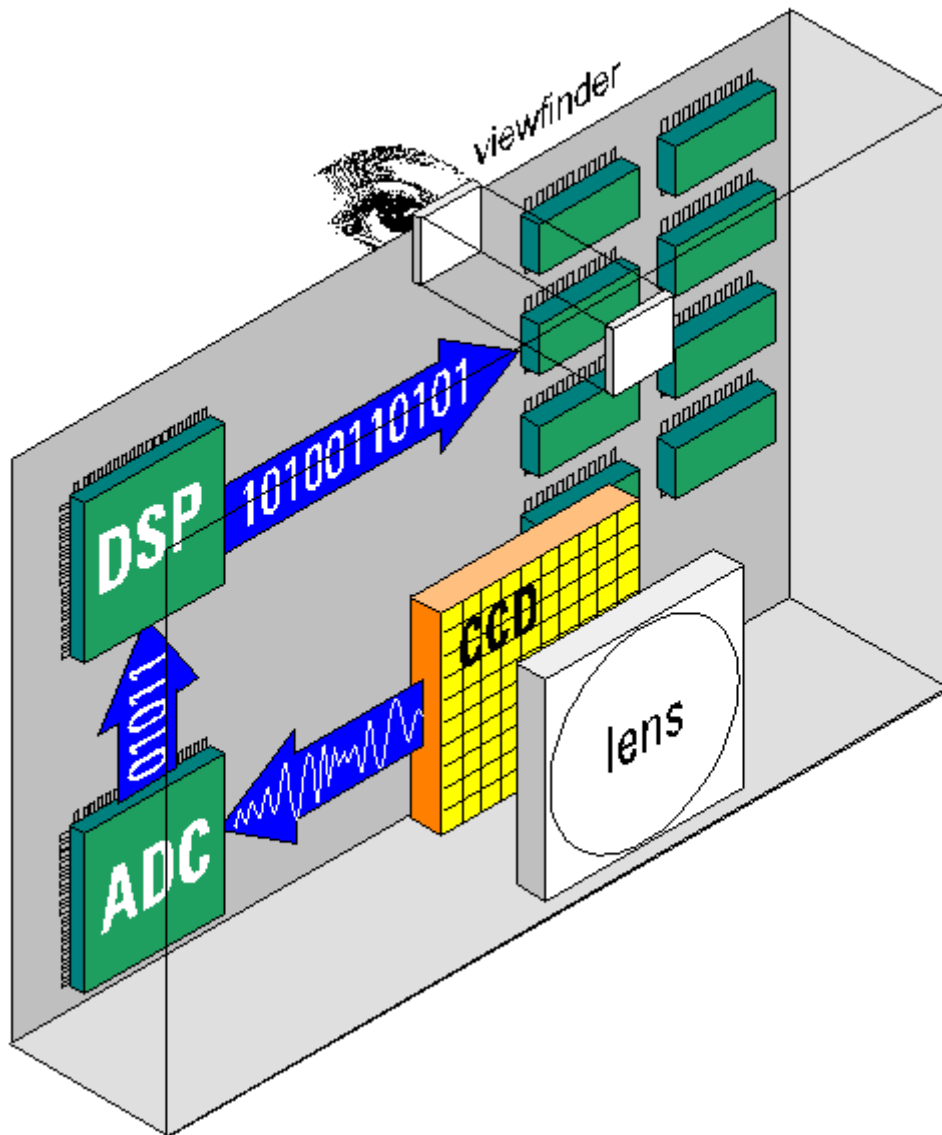


Non tutti i CCD e CMOS vengono dotati di microlenti; ad esempio, i fotosensori della Kodak per dorsali digitali medio formato (come il CCD KAF-22000CE da 22 milioni di pixel, con lato di 9 μm), ne sono sprovvisti. Le microlenti, infatti, se per un verso aumentano l'efficienza quantistica del fotosensore, per un altro aggiungono un ulteriore elemento ottico al sistema rendendolo inadatto all'utilizzo con obiettivi decentrabili/basculabili.

Digitalizzazione del segnale dei fotosensori

Dopo che l'amplificatore in uscita ha portato a termine la moltiplicazione della carica dei pacchetti e la sua conversione in una tensione proporzionale, il segnale viene trasmesso ad un **ADC (Analog-to-Digital Converter, convertitore analogico-digitale)**, che traduce i valori di tensione in codice binario, indispensabile per essere preliminarmente trattato ed archiviato ed essere eventualmente elaborato al computer in una fase successiva.

Ad ogni pixel è assegnato il valore binario corrispondente all'ampiezza del segnale, ad intervalli proporzionali alla risoluzione, o **profondità di bit**, dell'ADC. A titolo di esempio, un ADC capace di una risoluzione di 12 bit assegna a ciascun pixel un valore compreso tra 0 e 4095, corrispondente a $2^{12} = 4096$ possibili livelli di grigio. Ogni livello di grigio è un'**ADU (Analog-to-Digital Unit, unità analogico-digitale)**.



Campionamento

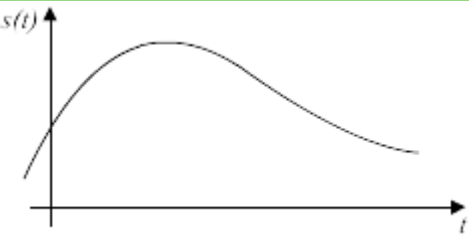
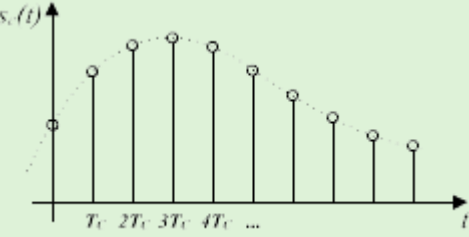
È una tecnica che consiste nel convertire un segnale continuo nel tempo in un segnale discreto, valutandone l'ampiezza a intervalli di tempo regolari. In questo modo, a seguito di una successiva operazione di quantizzazione e conversione, è possibile ottenere una stringa digitale (discreta nel tempo e nell'ampiezza) che approssima quella continua originaria.

In altri termini, il campionamento consiste nel misurare il valore del segnale analogico ad intervalli temporali costanti. La **frequenza di campionamento** è data dalla relazione seguente:

$$f_c = 1 / \Delta t$$

dove Δt è l'**intervallo di campionamento**.

Il risultato è un segnale analogico a tempi discreti, che sarà successivamente quantizzato, codificato e quindi reso accessibile a qualsiasi elaboratore digitale.

Campionamento di segnali analogici	
Tipo di segnale	Grafico
Segnale analogico	
Segnale analogico campionato	

Teorema del campionamento

Questo teorema di Nyquist-Shannon definisce la frequenza minima di campionamento di un segnale, necessaria per evitare distorsioni dello stesso:

$$f_c \geq 2 \cdot f_m$$

dove f_c = frequenza di campionamento
 f_m = massima frequenza dello spettro del segnale da campionare.

In pratica, il teorema del campionamento pone un vincolo per la progettazione del dispositivo di conversione analogico-digitale: se il campionatore opera alla frequenza f_c , è necessario inviargli un segnale con banda limitata a $f_c/2$. Poiché generalmente un segnale analogico non è limitato in frequenza, dovrà essere filtrato per eliminare le componenti di frequenza maggiore di $f_c/2$, utilizzando a tale fine un filtro antialiasing.

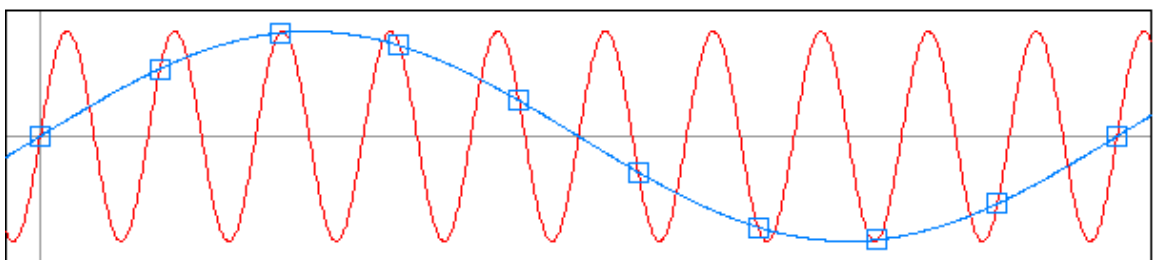
Aliasing

Durante la conversione analogico-digitale il segnale è soggetto a due distinte discretizzazioni: la discretizzazione dei tempi, detta

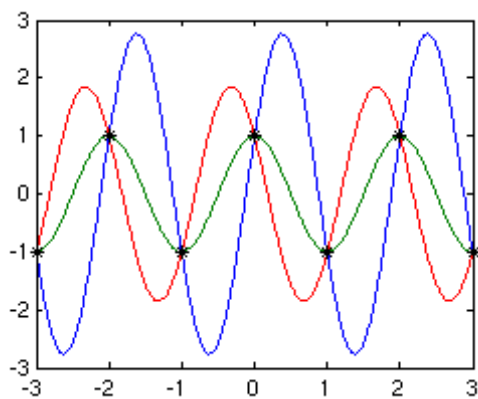
campionamento, e la discretizzazione delle ampiezze, detta quantizzazione. Nella conversione digitale-analogica, il segnale digitale viene trasformato nuovamente in un segnale analogico operando un'interpolazione. L'**aliasing** (dal latino **alias**, in italiano **altrove**) è il fenomeno per il quale due o più segnali analogici diversi possono diventare indistinguibili una volta campionati.

Quelli che seguono sono esempi di aliasing con segnali sinusoidali:

- campionamento con frequenza genericamente insufficiente; la senoide sarà ricostruita con una frequenza più bassa, detta **frequenza di battimento**:



- campionamento di una famiglia di sinusoidi alla frequenza critica, pari a metà della frequenza di campionamento; saranno tutte ricostruite con una medesima senoide essendo alias le une delle altre:



Nel caso specifico delle immagini, l'aliasing si manifesta con artefatti o effetti moiré:

Aliasing nelle immagini digitali

Campionamento

Effetto moiré

$$f_c < 2 \cdot f_m$$



$$f_c \geq 2 \cdot f_m$$



Filtro antialiasing

È utilizzato prima del campionamento di un segnale, al fine di restringere la banda del segnale stesso per soddisfare approssimativamente il teorema del campionamento di Nyquist-Shannon. Dal momento che il teorema dice che un'interpretazione non ambigua del segnale, a partire dal campionamento, è possibile solo quando non vi sono frequenze all'esterno della banda di Nyquist, il filtro antialiasing potrebbe soddisfare il teorema. Ogni possibile filtro antialiasing permetterà la presenza di qualche alias; l'ammontare dell'alias presente nel risultato dipende dalla qualità del filtro. I filtri antialiasing vengono solitamente usati nei sistemi di elaborazione numerica dei segnali, ad esempio in operazioni di audio digitale o fotografia digitale; filtri simili vengono utilizzati anche nella ricostruzione dell'output nei lettori musicali. Infine, il filtro evita l'alias durante la conversione di un campionamento in un segnale continuo.

In caso di campionamento ottico di un'immagine, ad esempio per i sensori delle fotocamere digitali, il filtro si chiama anche **filtro passa-basso ottico**, **filtro di blur** o **AA filter**. L'implementazione tipica delle fotocamere digitali si basa su un materiale bi-rifrangente a due strati come il litio niobato (LiNbO_3), che rilancia ogni punto ottico in un gruppo di quattro altri punti. La scelta di un particolare filtro obbliga ad una mediazione tra precisione, aliasing e fattore di riempimento. Nei sistemi con fotosensore monocromatico, 3 CCD o fotosensore Foveon X3, il fattore di riempimento da solo, se prossimo al 100% (anche grazie all'impiego di microlenti), è in grado di fornire un buon effetto antialiasing, mentre nei sistemi con filtro a mosaico di solito serve un ulteriore filtro per ridurre l'aliasing ad un livello accettabile.

Potere risolvante e risoluzione spaziale

Tecnicamente, la capacità di riprodurre frequenze spaziali elevate, come nei particolari fini, mediante un sistema ottico è definita **risoluzione**.

Nella fotografia digitale, questo termine, o il suo equivalente **risoluzione spaziale**, è però usato in modo improprio per indicare il numero di pixel che compongono l'immagine, mentre sarebbe corretto parlare di **potere risolvante**.

Risoluzione spaziale

Bassa risoluzione spaziale



Alta risoluzione spaziale

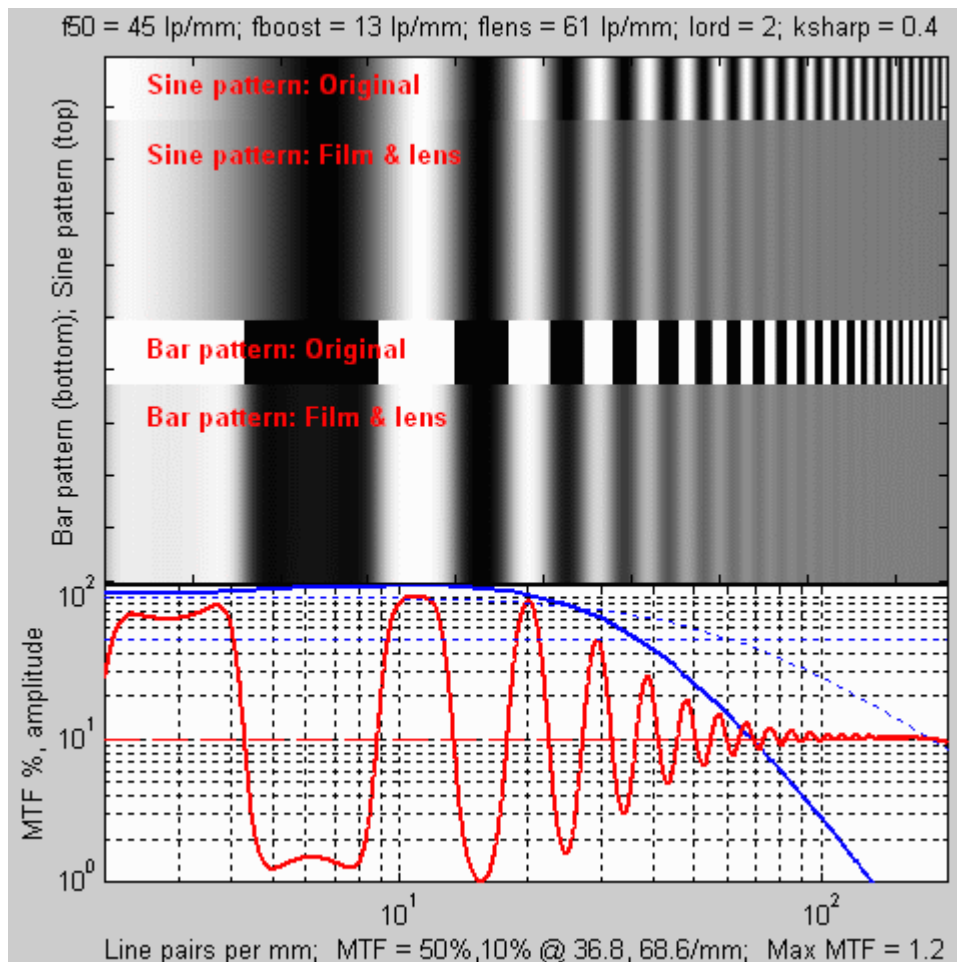


Il potere risolvete si misura in **coppie di linee / grado di arco** (dal punto di vista dell'osservatore), **coppie di linee / millimetro** (sulla superficie dell'immagine), **coppie di linee / altezza immagine** (in termini di dispositivo visualizzatore, per una data distanza di osservazione).

È evidente che il potere risolvete è differente dal numero di pixel. Le prestazioni dei pixel (e dell'obiettivo che focalizza l'immagine su di essi) hanno un forte impatto sul valore del potere risolvete del sistema fotografico. **Nitidezza** e **dettaglio** sono due termini correlati, entrambi usati per descrivere la quantità ed il tipo di informazione fine disponibile nell'immagine e fortemente influenzati dal valore del contrasto disponibile a varie frequenze, sempre nell'immagine.

Potere risolvete, contrasto e frequenze sono inglobati nel concetto di **MTF (Modulation Transfer Function, funzione di trasferimento di modulazione)**, che descrive le prestazioni di visualizzazione geometrica di un sistema, rappresentate di solito su un grafico che riporta la modulazione (contrasto) in funzione della frequenza spaziale (coppie di linee / unità lineare o angolare). Al diminuire dell'MTF, le linee alternativamente bianche

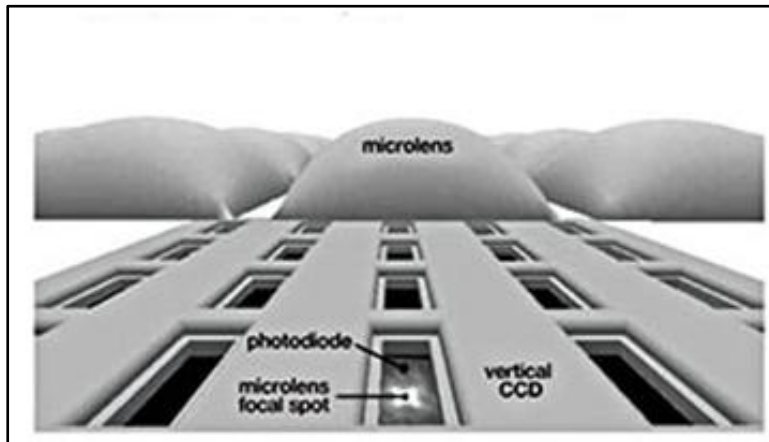
e nere sono sempre meno contrastate, fino a dare un fondo grigio uniforme.



Se l'incremento del numero di pixel si accompagna alla riduzione dell'MTF, non si ottiene alcun miglioramento del potere risolvante del fotosensore a matrice. Questo può succedere quando i pixel diventano troppo piccoli, in particolare se le loro dimensioni scendono sotto il potere risolvante dell'obiettivo.

Se si considera, ad esempio, il caso specifico dell'industria cinematografica, è evidente che i fotosensori per riprese digitali devono avere migliaia di pixel sia in orizzontale sia in verticale, ma quanti esattamente è meno chiaro. Indipendentemente dalla risoluzione di visualizzazione, è preferibile catturare quanti più dettagli possibile all'inizio della catena ripresa - proiezione, al fine di disporre della massima flessibilità in postproduzione ed in archiviazione. Se nell'industria cinematografica non c'è consenso sulla risoluzione da adottare, è comunque lampante che lo **standard HD (1920x1080)** non registra una quantità di dati paragonabile a quella della pellicola negativa da 35 mm.

Un altro fattore che influisce sul potere risolvete sono le dimensioni dei pixel, che si misurano in micrometri e variano da sensore a sensore. Un micrometro è pari a $1 \cdot 10^{-6}$ m, il punto al termine di questa frase ha un diametro di circa 500 μm ed i lati dei fotodiodi di CCD e CMOS sono compresi tra 2 μm e 10 μm circa.



La tendenza produttiva per il mercato di fascia medio-bassa è verso pixel sempre più piccoli per poterne aumentare il numero totale a parità di formato ottico.

Ma pixel più grandi, pur occupando più spazio sul chip, sono in grado di accumulare una carica maggiore e di gestire tensioni operative più elevate, con una superiore efficienza di trasferimento della carica ed un minore ritardo di immagine. Inoltre, pur a fronte di un consumo elettrico più elevato (minore durata delle batterie e maggiore produzione di calore), generano meno rumore e presentano una gamma dinamica nettamente superiore.

Pixel più grandi e numerosi comportano CCD e CMOS di dimensioni maggiori e più costosi. Ma un dispositivo digitale 24 x 36 mm permette di sfruttare integralmente l'immagine generata dagli obiettivi per il formato 35 mm, ottenendo eccellenti curve MTF. Oltre una data risoluzione spaziale, è la qualità dei pixel e degli obiettivi che determina la qualità complessiva dell'immagine.

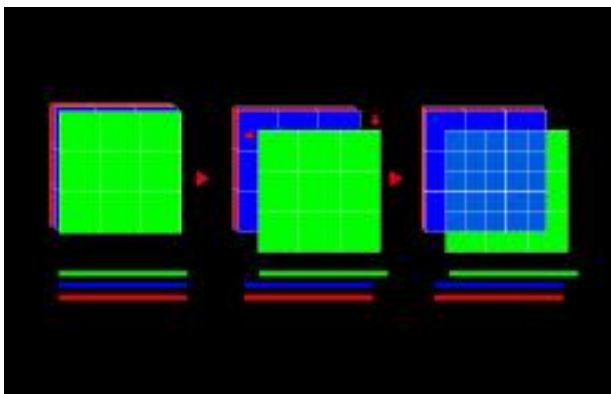
Off-set spaziale

Quello dell'off-set spaziale è un concetto poco noto e che vale la pena di esaminare. In pratica si riesce ad aumentare il potere risolvete ed a

minimizzare l'aliasing nei sistemi di acquisizione basati su 3 CCD senza aumentare il numero degli elementi singoli di ogni CCD.

A differenza del CCD FT che possiede singoli elementi praticamente contigui, la presenza dell'Interline Storage Register nei CCD IT e FIT riduce l'area fotosensibile disponibile nel singolo pixel. I pixel sono disposti lontani gli uni dagli altri e non contigui. Questo provoca inevitabilmente un minore potere risolvante del sistema che viene corretto con l'utilizzo dell'off-set spaziale.

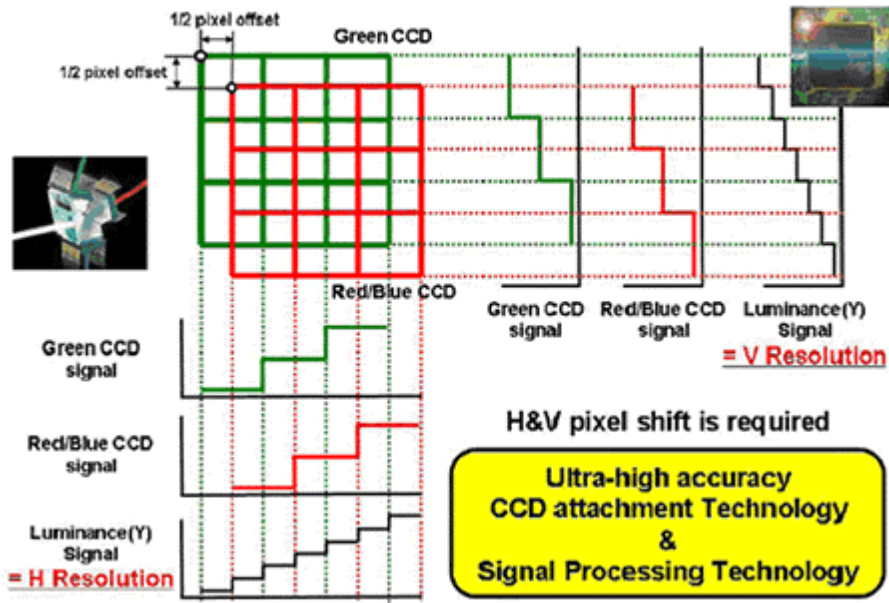
È un metodo molto efficace, poco costoso e pratico e consiste nell'aumentare la risoluzione della luminanza della camera. Quando si utilizza l'off-set spaziale i CCD del canale del rosso e del blu vengono posizionati fisicamente con uno spostamento orizzontale di $\frac{1}{2}$ pixel rispetto al posizionamento del CCD del canale verde. L'off-set spaziale non aumenta la risoluzione dei canali del rosso, del verde e del blu individualmente ma aumenta sensibilmente il numero effettivo di campionature eseguite.



Una camera che utilizza un rilevatore con 768 pixel per riga e senza off-set spaziale raggiunge la risoluzione limite della luminanza in 560 linee TV. Utilizzando l'off-set spaziale la stessa camera raggiungerà la risoluzione di 700 linee TV. Questo a costo praticamente nullo in quanto l'accuratezza nel posizionare i sensori sul retro del prisma dicroico resta la medesima, solo con un piccolo off-set del CCD del verde. La circuitazione preposta alla gestione dell'off-set spaziale ha costo ininfluenza.

Il valore della luminanza è ricavabile per somma dei valori di percentuali del rosso, verde e blu e pertanto spostando di $\frac{1}{2}$ pixel i rilevatori del rosso e del blu è come se si campionasse due volte la luminanza, una volta con il canale del verde e l'altra volta con i due canali del rosso e del blu ma spostati di $\frac{1}{2}$ pixel, il che significa che la frequenza di campionatura aumenta del valore di off-set dei rilevatori del rosso e del blu.

Advanced Spatial Offset Technology Horizontal and Vertical Offset Spatial Technology



Infine, le componenti di aliasing per il verde e il rosso (o il blu) hanno fase opposta e quindi si cancellano. Il segnale di luminanza non contiene esattamente il 50% di verde e quindi l'aliasing non viene del tutto eliminato, ma ridotto in maniera significativa.

Binning

Il binning è una modalità di funzionamento dei CCD che consiste nel combinare le cariche di pixel adiacenti, ottenendo così maggiori velocità di lettura e rapporti segnale/disturbo più alti, ma con una risoluzione spaziale ridotta.

Per comprenderne il funzionamento, può essere utile mettere a confronto il processo di lettura a singolo pixel e quello a quattro pixel (binning 2x2). A questo scopo, si consideri un fascio di luce che illumina un CCD costituito da 4 pixel, in grigio, e da un registro di lettura, in blu, generando una carica di 20 elettroni, come indicato dal numero nell'angolo in basso a destra di ciascun pixel.

Schemi di lettura dei CCD: singolo pixel e binning 2x2

	Singolo pixel	Binning 2x2	
1)			La luce illumina uniformemente i 4 pixel e genera una carica di 20e in ogni pixel.
2)			Le cariche scendono di una riga e quelle dei pixel inferiori entrano nel registro di lettura.
3)			Le cariche nel registro traslano verso destra e quella del pixel di destra entra nell'amplificatore di lettura.
4)			La carica del pixel di destra viene letta, mentre quella del pixel di sinistra entra nell'amplificatore di lettura.
5)			La riga successiva entra nel registro di lettura.
6)			Le cariche nel registro traslano verso destra e quella del pixel di destra entra nell'amplificatore di lettura.
7)			La carica del pixel di destra viene letta, mentre quella del pixel di sinistra entra nell'amplificatore di lettura.
8)			L'ultima carica viene letta, completando il ciclo.

Lo schema di lettura a singolo pixel permette di sfruttare il fotosensore alla sua piena risoluzione spaziale.

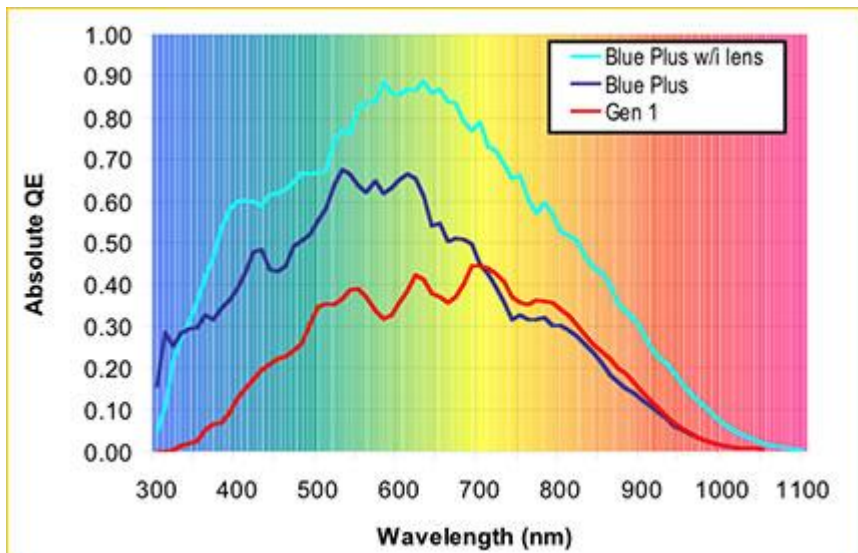
Invece, nello schema con binning 2x2, il gruppo di 4 pixel funziona come un unico pixel. Così facendo, si riduce la risoluzione spaziale del fotosensore, ma la lettura richiede due passaggi in meno ed è quindi più veloce. Tipicamente, il binning 2x2 è 2 volte più rapido, avendo solo 1 traslazione orizzontale ogni 2 traslazioni verticali. Con un binning 3x3 ed un binning 4x4, la lettura sarebbe rispettivamente 3 e 4 volte più rapida.

Inoltre, il binning permette di migliorare il rapporto S/N. Rifacendosi all'esempio in tabella, si supponga che il CCD abbia un rumore di lettura di 10e. Mentre nello schema a singolo pixel ogni fotodiodo ha un rapporto S/N di 2:1 (20e/10e), i 4 pixel del binning 2x2 raggiungono un rapporto 4:1. Infatti, i 4 pixel sommano i loro segnali ($4 \cdot 20e = 80e$) ed il rumore è pari alla radice quadrata della somma dei rumori al quadrato ($\sqrt{4 \cdot (10e)^2} = 20e$).

Sensibilità ISO

Le fotocamere digitali hanno un valore ISO di base, cioè l'impostazione di sensibilità minima, corrispondente al livello di rumore minimo. D'altra parte, modelli di fotocamere di marchi diversi, ma dotati dello stesso chip presentano tarature di base differenti: 50, 64 o 100 °ISO.

Queste differenze derivano dal fatto che i produttori di fotosensori pubblicano non i dati relativi alla sensibilità, bensì quelli attinenti alla **QE (Quantum Efficiency, efficienza quantistica)**, che è la resa di conversione del segnale luminoso in segnale elettrico (fotoelettroni) operata dai chip. Spetta quindi al produttore della fotocamera raggiungere il livello prestabilito di sensibilità ISO mediante l'utilizzo di adeguati componenti elettronici di supporto, comprendenti sovente circuiti integrati di amplificazione e di riduzione del rumore.



Il diagramma illustra l'incremento di QE ottenuto negli ultimi anni per chip monocromatici (un fotosensore a colori avrebbe curve separate per il rosso, il verde ed il blu):

- la linea rossa si riferisce ai chip di prima generazione della Kodak,
- la linea blu è relativa alla QE del chip Kodak usato nel DCS Pro Back ed evidenzia la maggiore efficienza ed il minore rumore nella banda del blu conseguenti all'utilizzo della tecnologia brevettata Indium Tin Oxide (Blue Plus),
- la linea azzurra mostra un aumento più che doppio della QE alla lunghezza d'onda di 600 nm conseguente all'adozione di microlenti sul chip.

Rumore dei fotosensori

La sensibilità di CCD e CMOS, in termini di segnale minimo rilevabile, è determinata sia dal rumore fotonico statistico sia dal rumore elettronico generato nel chip. Secondo una stima prudente, è possibile discriminare il segnale dal rumore di fondo se il rapporto **S/N (Signal/Noise, segnale/disturbo)** è superiore a 2,7.

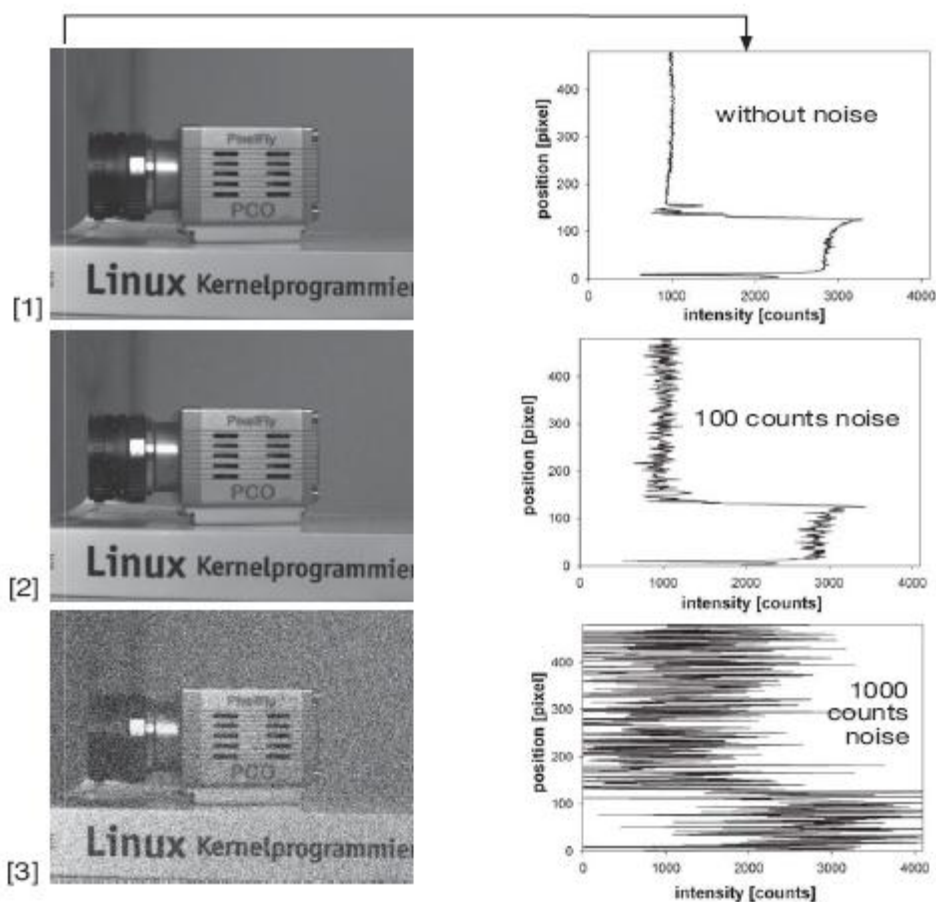
Il segnale minimo teoricamente in grado di produrre un dato valore S/N è determinato dalle variazioni casuali del flusso fotonico, una fonte di rumore associata al segnale presente anche nel caso di un fotosensore ipoteticamente esente da rumore. Questo rumore fotonico statistico è pari alla radice quadrata del numero di fotoni del segnale e, poiché non è eliminabile, determina il valore massimo di S/N ottenibile per un rivelatore esente da rumore. Il rapporto S/N è quindi dato dalla seguente relazione:

$$S/N = S / \sqrt{S} = \sqrt{S}$$

dove S è il livello del segnale.

Se è necessario un valore di 2,7 di S/N per discriminare il segnale dal rumore, un livello di segnale pari a 8 fotoni è il flusso luminoso teoricamente rilevabile.

In pratica, il fotosensore e l'elettronica della foto/telecamera introducono altre componenti di disturbo, non legate al segnale fotonico campione, che sono aggiunte rumore fotonico statistico inerente.



Una volta accumulata nei pozzi di potenziale, la carica generata dalle fonti di rumore è indistinguibile da quella di origine luminosa. La maggior parte del rumore del sistema è dovuta al disturbo dell'amplificatore di lettura ed alla liberazione di elettroni per effetto termico nel silicio del chip. Il rumore termico è attribuibile alle vibrazioni degli atomi nel substrato di silicio che liberano elettroni o lacune, anche quando il fotosensore è completamente al buio, e che si accumulano nei pozzi di potenziale. Questo rumore è quindi denominato **rumore di buio** e rappresenta l'incertezza sulla quantità di

carica accumulata al buio in uno specifico intervallo temporale. Il tasso di generazione della carica di buio, noto come **corrente di buio**, è indipendente dal segnale, ma strettamente dipendente dalla temperatura. Analogamente al rumore fotonico, il rumore di buio è legato alla radice quadrata della corrente di buio e non è quindi possibile detrarlo semplicemente dal segnale.

Il raffreddamento del chip riduce il rumore di buio in misura pari ad un ordine di grandezza ogni 20 °C in meno della temperatura; a 0 °C il disturbo risulta già notevolmente ridotto ed a -30 °C è pressoché trascurabile. Il raffreddamento è di uso comune in molte applicazioni tecnico-scientifiche, come la fotografia astronomica digitale.

Una volta effettuato il raffreddamento, la principale componente elettronica di disturbo restante è il **rumore di lettura**, dovuto principalmente alla preamplificazione su chip durante il processo di conversione del segnale di carica accumulata in segnale di tensione. Sebbene il rumore di lettura sia distribuito uniformemente su ogni pixel, è possibile determinarne il valore quadratico medio (rms), in unità di elettroni per pixel, ma non il valore esatto. Alcuni tipi di rumore dell'amplificatore di lettura dipendono dalla frequenza e, in generale, il loro valore aumenta con la velocità di misurazione della carica in ciascun pixel. L'incremento di rumore ad elevate velocità di lettura e di quadro è in parte il risultato della più ampia larghezza di banda dell'amplificatore necessaria alle frequenze di clock più elevate.

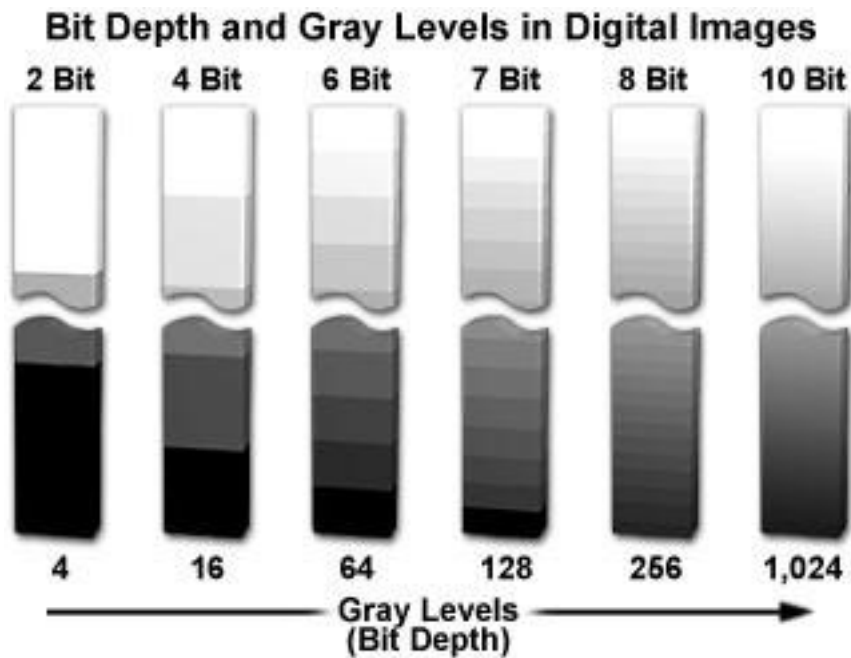
Il raffreddamento ha l'ulteriore vantaggio di migliorare la **CTE (Charge Transfer Efficiency, efficienza di trasferimento della carica)** del dispositivo. Questo fattore ha assunto sempre più rilevanza a causa dell'aumento delle dimensioni e delle velocità di lettura più rapide di molti fotosensori di fascia alta. Nei CCD, ad ogni spostamento di pacchetto di fotoelettroni lungo i canali di trasferimento in fase di lettura, una piccola porzione di carica può rimanere indietro. Se le singole perdite per trasferimento in ogni pixel sono quasi sempre minime, il grande numero di trasferimenti necessari, specialmente nei fotosensori con milioni di pixel, può dare luogo a perdite significative per i pixel più distanti dalla sezione di amplificazione del CCD a meno che l'efficienza del processo sia molto alta. Il trasferimento incompleto di cariche può comportare la velatura dell'immagine a causa del rimescolamento di cariche tra pixel adiacenti. Inoltre, la perdita di carica cumulativa ad ogni trasferimento di pixel, in particolare con grandi matrici, può generare il fenomeno di **oscuramento (shading)**, dove le zone dell'immagine più distanti dalla sezione di amplificazione appaiono più offuscate di quelle vicine al registro di lettura seriale. Grazie al raffreddamento, l'efficienza di trasferimento della carica

può assumere valori pari o superiori a 0,9999 rendendo trascurabile lo shading.

Gamma dinamica

Nei CCD e CMOS, il termine **gamma dinamica** esprime la massima variazione di intensità del segnale quantificabile dal fotosensore. Questa quantità è specificata numericamente dalla maggior parte dei produttori di foto/telecamere digitali come il rapporto tra il livello di saturazione del pozzo di potenziale (FWC) ed il rumore di lettura, con la luminosità all'interno della scena che varia da zone con pixel saturati a zone dove c'è praticamente solo rumore. La gamma dinamica determina il numero massimo di livelli di grigio in cui è scomponibile il segnale rilevato. Per sfruttare al massimo la gamma dinamica, è consigliabile adeguare la profondità di bit del convertitore analogico-digitale alla gamma dinamica, al fine di discriminare quanti più livelli di grigio possibile.

Se, ad esempio, una fotocamera presenta un'FWC di 16000 elettroni ed un rumore di lettura di 10 elettroni, ha una gamma dinamica pari a 1600 livelli di grigio e quindi necessita di una conversione A/D compresa tra 10 e 11 bit ($2^{10} = 1024 < 1600 < 2^{11} = 2048$). Poiché il bit può assumere solo due stati, il numero di gradini di intensità codificabili da un'unità ADC rispecchia la sua risoluzione, pari a 2 elevato alla specifica profondità di bit. Quindi, processori a 8, 10, 12 e 14 bit possono codificare rispettivamente fino a 256, 1024, 4096 e 16384 livelli di grigio.



La gamma dinamica, definita come il rapporto tra il livello di saturazione del pozzo di potenziale ed il rumore di lettura, non è necessariamente un indice realistico della gamma dinamica utile, ma serve a confrontare i fotosensori. In pratica, la gamma dinamica utile è limitata per due motivi:

- la risposta dei CCD diventa non lineare prima della saturazione dei pozzi di potenziale,
- un livello di segnale pari al rumore di lettura è inaccettabile sul piano visivo e virtualmente inutile su quello quantitativo.

Si noti che la gamma dinamica massima non è equivalente al valore massimo possibile del rapporto segnale/disturbo, sebbene anche questo dipenda dalla capacità del pozzo di potenziale. Il rumore fotonico statistico associato al segnale massimo possibile è la radice quadrata del valore di FWC. Tornando all'esempio precedente, il rumore fotonico statistico è pari a $\sqrt{16000} = 126$ elettroni ed il rapporto S/N massimo è quindi uguale a $16000/126 = 126$, cioè alla radice quadrata del segnale stesso. Il rumore fotonico rappresenta il minimo livello di rumore intrinseco e sia la luce dispersa sia il rumore elettronico del sistema diminuiscono l'S/N massimo a valori inferiori a 126, in quanto queste fonti riducono l'FWC reale aggiungendo cariche estranee nei pozzi.

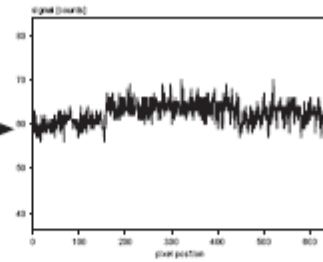
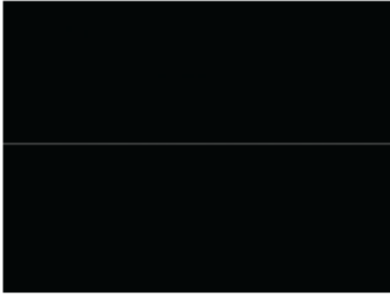
Se, ad esempio, si progetta una fotocamera con una gamma dinamica di circa 4000 e con un ADC a 12 bit (4096 livelli di grigio), i fattori da considerare nell'abbinamento tra gamma dinamica del fotosensore e capacità di digitalizzazione del processore sono vari. Per alcune delle

fotocamere più recenti con CCD Interline Transfer e digitalizzazione a 12 bit, la gamma dinamica determinata dall'FWC e dal rumore di lettura è di circa 2000, valore che normalmente non richiede una conversione a 12 bit. Tuttavia, molti degli attuali modelli prevedono un'opzione per impostare il guadagno a 0,5x, permettendo di sfruttare completamente la risoluzione a 12 bit. Questa strategia trae vantaggio dal fatto che i pixel del registro seriale sono progettati per avere una capacità doppia rispetto a quella dei pixel del registro parallelo e quando la fotocamera funziona in modalità binning 2x2, si possono ottenere immagini di alta qualità a 12 bit.

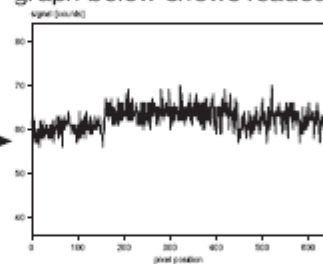
È importante conoscere i vari meccanismi di modifica del guadagno per utilizzare la profondità di bit del processore e, nel caso di confronto tra le gamme dinamiche di differenti fotocamere, è preferibile calcolarne i valori in base alla capacità del pozzo di potenziale ed al rumore di lettura. È comune vedere fotocamere dotate di elettronica di elaborazione con risoluzione di digitalizzazione superiore a quanto effettivamente richiesto dalla loro gamma dinamica. In questi sistemi, il funzionamento con il guadagno impostato sul valore usuale di 1x comporta un numero di livelli di grigio potenzialmente meno ampio. Sebbene sia possibile produrre fotocamere con un fattore di guadagno 2-4x, in modo che il segnale sfrutti completamente la profondità di bit dell'ADC, si avrebbe un aumento del rumore di digitalizzazione a causa della riduzione del numero di elettroni costituenti ciascun livello di grigio.

L'esigenza di un'elevata profondità di bit può essere messa in dubbio dal fatto che i dispositivi di visualizzazione, quali monitor e molte stampanti, utilizzano elaborazioni a 8 bit, con 256 livelli di grigio, ed altri, quali l'occhio umano, hanno una capacità di discriminazione non superiore a 5-7 bit. Nonostante questi limitati requisiti di visualizzazione, i sistemi ad ampia gamma dinamica con elevata profondità di bit sono sempre vantaggiosi e risultano indispensabili in varie applicazioni. Nel caso di lunghe sequenze di elaborazione, è possibile sottoporre le immagini risolte in un maggior numero di livelli di grigio a complessi trattamenti matematici senza degradarne la qualità a causa degli errori di arrotondamento aritmetico.

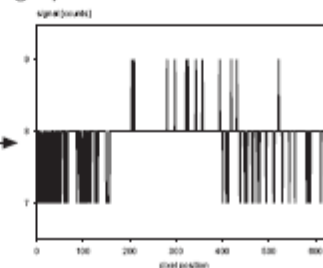
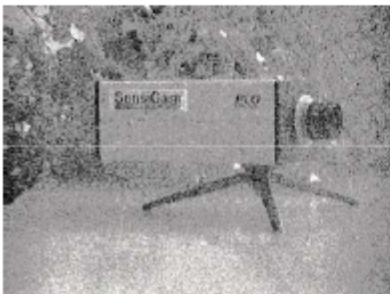
Weakly illuminated image with 12bit total dynamic displayed with 255 gray levels.
scaled: 0-4095 -> 0-255
graph below shows readout line



Same image as above with 12bit total dynamic displayed with 255 gray levels.
scaled: 53-70 -> 0-255
graph below shows readout line



Same image as above but with 8bit total dynamic displayed with 255 gray levels.
scaled: 7-9 -> 0-255
graph below shows readout line



Un ulteriore vantaggio dei sistemi ad alta profondità di bit si ha quando si visualizza una zona dell'immagine acquisita che corrisponde solo ad una parte della gamma dinamica complessiva. Per ottimizzare la rappresentazione della gamma dinamica limitata, il numero iniziale di livelli di grigio viene ampliato fino ai 256 toni di un monitor o di una stampante a 8 bit. Una maggiore profondità di bit comporta una minore espansione e, di conseguenza, una degradazione dell'immagine meno critica. Se, ad esempio, la zona selezionata dell'immagine corrisponde solo al 5% della gamma dinamica totale, i relativi livelli di grigio sono poco più di 200 rispetto ai 4096 discriminati da un processore a 12 bit e solo 12 rispetto ai 256 di un processore a 8 bit. La zona a 12 livelli di grigio espansa fino ai 256 di un monitor o di una stampante evidenzierà i pixel e livelli di luminosità a blocchi o contornati invece di gradazioni tonali uniformi.

Effetti indesiderati

Blooming

Si verifica quando un pixel riceve un numero elevatissimo di fotoni, saturando così la propria capacità di accumulare elettroni e lasciando che i fotoni in eccesso diffondano nei pixel adiacenti. Il blooming è l'equivalente elettronico della sovraesposizione dell'emulsione fotografica, eccetto che l'immagine digitale presenterà striature luminose orizzontali e/o verticali dipartenti dalla sorgente di luce presente nella scena.

La foto seguente presenta sia il blooming, con i suoi raggi luminosi in varie direzioni, sia il flare, con la sua forma luminosa a stella che dipende dall'obiettivo e non dal fotosensore.



Shading

Come già visto in precedenza, soprattutto nei CCD a matrice di grandi dimensioni, la perdita di carica cumulativa ad ogni trasferimento di pixel, può generare un offuscamento nelle zone dell'immagine più distanti dalla sezione di amplificazione rispetto a quelle vicine al registro di lettura seriale.

È possibile compensare lo shading sia via hardware sia via software.

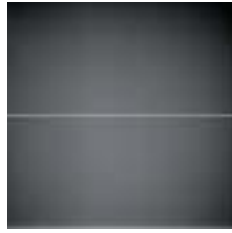


Immagine di un campo grigio uniforme
senza correzione dello shading

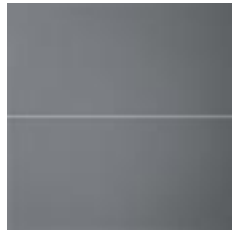


Immagine di un campo grigio uniforme
con correzione dello shading

La correzione via software richiede preliminarmente la ripresa di un campo ad intensità uniforme, che serve a generare pixel per pixel una mappa correttiva atta ad eliminare le disuniformità dovute allo shading. La correzione software è soddisfacente quando il fattore correttivo non supera generalmente il 10-20% dell'intensità locale.

Correzioni più ampie, fino ad un massimo del 500%, sono gestibili via hardware mediante regolazione del fattore di guadagno per singole righe di pixel. La determinazione del guadagno necessario viene effettuata campionando l'intensità del segnale di 5-6 pixel di riferimento mascherati, situati all'esterno dell'area dell'immagine ed all'estremità di ciascuna riga di pixel. I valori di tensione ottenuti dalle colonne dei pixel di riferimento, a margine del registro a scorimento parallelo, servono come controllo delle perdite di carica per trasferimento e generano i fattori di correzione per le tensioni di ciascuna riga. Nelle zone dell'immagine dove i fattori di correzione hanno valori elevati il livello del rumore può crescere sensibilmente. Anche se la correzione hardware rimuove lo shading senza apparente riduzione del segnale, si deve osservare che il risultante rapporto S/N non è uniforme su tutta l'area dell'immagine.

Smear verticale

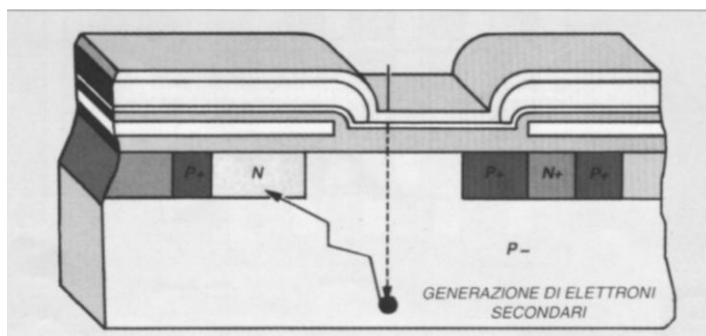
Un problema che può manifestarsi con i fotosensori a matrice FT ed IT è lo smear verticale: si presenta sotto

forma di striature verticali, che partono dai punti a più forte luminosità. Il fenomeno si manifesta soltanto in caso di un sovraccarico pari a molte volte l'esposizione normale (nelle telecamere a tubo originava anche gravi effetti di coda di cometa e lag), ma è comunque indesiderabile nel caso di applicazioni critiche.



Lo smear verticale può avere diverse origini. Nelle primi chip IT era causato da fotoni che penetravano molto profondamente nella struttura del semiconduttore. Invece di essere conservati nei fotosensori, gli elettroni prodotti trafilevano direttamente nel registro a scorrimento verticale. Questo causava l'aggiunta di una piccola quantità di cariche addizionali a tutti i pacchetti di cariche in attraversamento.

La quantità delle cariche così generate era estremamente ridotta in confronto ai normali livelli di segnale; in presenza di grossi sovraccarichi, però, poteva manifestarsi visivamente come una linea verticale attraverso il punto fortemente luminoso. Poiché solo la luce rossa, cioè quella a frequenza più bassa, era in grado di penetrare profondamente nello strato di silicio, lo smear verticale era di colore rosso o rosa.

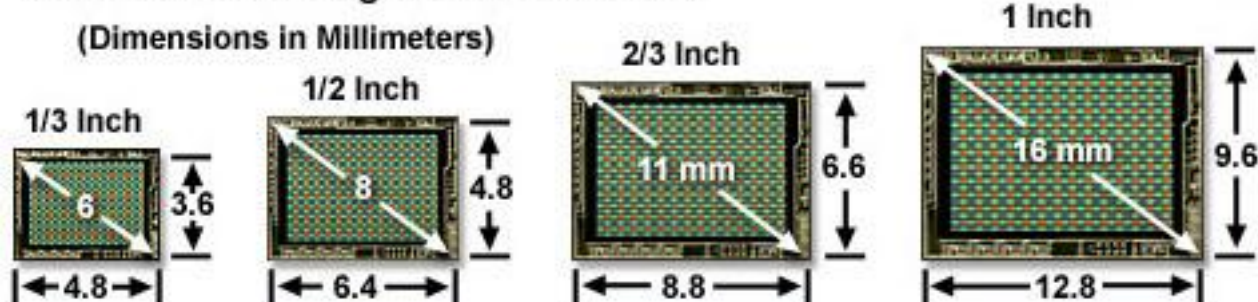


Formati

Telecamere

La geometria rettangolare e le dimensioni dei CCD sono il risultato della competizione iniziale con i tubi vidicon, che impose ai fotosensori a stato solido di generare un segnale elettronico in uscita conforme agli standard video dell'epoca. Fin dagli inizi della loro commercializzazione, i CCD sono stati quindi realizzati con fotodiodi quadrati assemblati in matrici rettangolari con un rapporto di forma preferenzialmente di 4:3. L'indicazione dimensionale in pollici non rispecchia le misure reali dei CCD, ma è pari alla diagonale dell'area rettangolare analizzata nel corrispondente tubo vidicon. A titolo di esempio, un CCD da 1" ha una diagonale di 16 mm, lati di 9,6x12,8 mm ed un'area analizzata uguale a quella di un tubo vidicon da 1" di diametro esterno (25,4 mm) ed una finestra con diametro di circa 18 mm. Sfortunatamente, questa modalità di designazione persiste tuttora, sovente in riferimento al tipo di CCD piuttosto che alle sue dimensioni, ed è utilizzata anche con fotosensori classificati con frazioni e decimali, come nel caso dei CCD da 1/1.8" che si collocano tra quelli da 1/2" e da 2/3".

Common CCD Image Sensor Formats



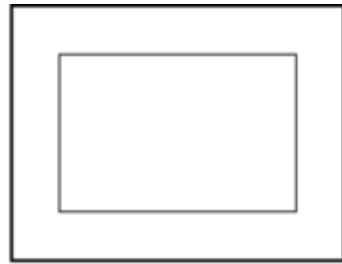
Indicativamente, si può approssimare la capacità del pozzo di potenziale di un CCD moltiplicando l'area di un suo fotodiodo (pixel) per 1000. Diversi CCD da 2/3" per apparecchiature amatoriali, con pixel da 7 - 13 μm di lato,

sono in grado di accumulare da 50.000 a 100.000 fotoelettroni. Servendosi di questo metodo di approssimazione, un fotodiodo $10 \times 10 \mu\text{m}$ ha una capacità di saturazione pari a 100.000 elettroni.

Fissate le dimensioni di un CCD, la scelta progettuale riguardante il numero totale di pixel nella matrice, e conseguentemente le loro dimensioni, è un compromesso tra la risoluzione spaziale, la capacità di saturazione del pozzo di potenziale e, nel caso delle videocamere (camcorder), il conseguimento di dimensioni sempre più compatte del sistema. L'attuale tendenza di mercato, volta a favorire la commercializzazione di dispositivi con un numero di pixel ed una risoluzione sempre più elevati, comporta l'impiego di fotodiodi di dimensioni ridottissime, anche inferiori a $3 \mu\text{m}$ nel caso dei fotosensori da $2/3''$.

Fotocamere

Mentre per le compatte vale quanto già visto per le videocamere, con fotosensori di dimensioni ridotte (si veda l'ultima riga dello schema seguente) per favorire dimensioni tascabili delle fotocamere e fotodiodi sempre più piccoli per aumentare la risoluzione spaziale anche a scapito della sensibilità, nel settore delle reflex vi sono standard ormai consolidati (il **sistema quattro terzi** è stato messo a punto da un consorzio internazionale di cui fa parte Olympus):



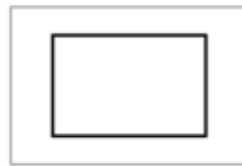
Medium format (Kodak KAF 3900 sensor)
50.7 × 39 mm
1977 mm²



35mm "full frame"
36 × 24 mm
864 mm²



APS-H (Canon)
28.7 × 19 mm
548 mm²



APS-C (Nikon, etc.)
~23.6 × 15.7 mm
~370 mm²



APS-C (Canon)
22.2 × 14.8 mm
329 mm²



Foveon (Sigma)
20.7 × 13.8 mm
286 mm²



Four Thirds System
17.3 × 13 mm
225 mm²



1/1.7"
7.6 × 5.7 mm
43 mm²



1/1.8"
7.18 × 5.32 mm
38 mm²



1/2.5"
5.76 × 4.29 mm
25 mm²

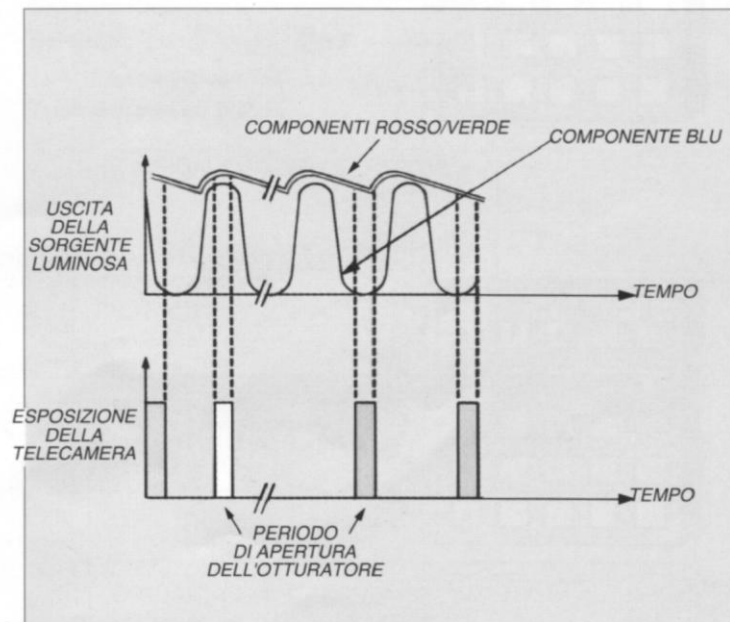
Riprese video con sorgenti luminose a scarica elettrica

Alcune sorgenti luminose, soprattutto tubi fluorescenti, lampade a scarica HMI e insegne al neon, non producono una luce costante ma piuttosto una serie di impulsi luminosi, ad una cadenza determinata dalla frequenza di rete.

Quando si utilizza una telecamera con frequenza diversa, l'immagine risulta fortemente instabile. Per evitare questo inconveniente, si può montare sulla telecamera un otturatore affinché il tempo di esposizione sia quasi uguale a un periodo completo dell'illuminazione. Anche se la telecamera non è

sincronizzata in nessun modo con la rete e quindi la reciproca relazione di fase è alquanto incerta, ogni quadro TV vede così un ciclo completo di luce, pertanto l'instabilità risulta molto minore. Un'altra difficoltà correlata alla luce impulsiva può manifestarsi quando le frequenze di quadro e di rete sono nominalmente uguali, come nel caso di un tempo di otturazione molto veloce. Con queste sorgenti luminose, i periodi dell'emissione luminosa nella parte rossa, verde e blu dello spettro sono spesso differenti; in particolare, il tempo di emissione del blu è molto breve. In queste circostanze, poiché la frequenza di quadro della telecamera e quella di rete non sono sincronizzate, la fase tra di esse varia lentamente. L'illuminazione relativa dello spettro RGB causerà quindi una variazione ciclica tra blu e giallo.

Può sorgere una difficoltà quando l'otturatore elettronico viene usato in presenza di luce pulsante (per esempio, tubi fluorescenti). Poiché la luce della lampada pulsa alla frequenza di rete ed il periodo di uscita luminosa nell'area blu dello spettro è relativamente breve, il bilanciamento del bianco nella telecamera varierà proporzionalmente alla differenza di fase tra la frequenza di rete e quella di sincronismo di quadro.



Questo effetto è di solito leggero, ma talvolta può assumere un'entità importante; se l'otturatore viene escluso, non ci saranno assolutamente problemi.