

Ccd: una tecnologia ancora attuale

Mariano Severi

Grazie ad alcuni indubbi vantaggi i sensori CCD riescono a mantenere un ruolo fondamentale in alcune interessanti applicazioni soprattutto nei settori dove sono richieste caratteristiche particolari

La fotografia digitale ha rivoluzionato nell'ultimo decennio la maggior parte delle applicazioni, non soltanto in ambito commerciale e industriale ma anche in diversi settori della ricerca scientifica e medica; le macchine fotografiche digitali hanno ormai completamente sostituito i dispositivi analogici che impiegavano rullini. Alla base di tale rivoluzione c'è stato il sensore CCD (Charge Coupled Device). Inventato nel 1969 da Willard Boyle e George E. Smith presso i laboratori AT&T Bell Labs, ha rappresentato il primo dispositivo di acquisizione di immagini in formato digitale; grazie a tale invenzione i due ricercatori hanno ricevuto il premio Nobel per la fisica nel 2009.

Purtroppo, o per fortuna, il destino di ogni tecnologia è inevitabilmente quello di essere sostituita dalle innovazioni più recenti finendo per scomparire o essere relegata ad applicazioni di nicchia. Nel caso dei sensori CCD, secondo le ultime stime, entro il 2014 la tecnologia dovrebbe interessare solo il 4% del mercato, dominato ormai dai dispositivi CMOS APS. In realtà, forse sull'onda proprio dell'entusiasmo per queste innovazioni, qualche anno fa le previsioni sul destino dei CCD erano anche peggiori, con molti da più parti a scommettere che sarebbero presto spariti dal mercato.

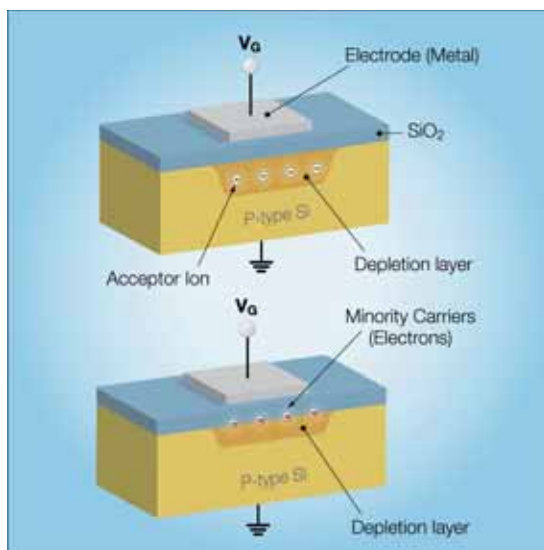


Fig. 1 - Impiego di un condensatore MOS in CCD : creazione di una regione di svuotamento (a) e raccolta di fotoelettroni (b) (da [1])

Grazie ad alcuni indubbi vantaggi i CCD riescono invece ancora a mantenere un ruolo fondamentale in alcune interessanti applicazioni soprattutto nei settori dove siano richieste caratteristiche particolari. Molti dei sistemi usati in astronomia, tanto per citarne uno, impiegano sensori CCD. Nel marzo 2009, ad esempio, è stato lanciato dalla Nasa il satellite Kepler, che ha lo scopo di individuare nella galassia pianeti simili al nostro; a bordo del satellite è imbarcato un fotometro basato su 42 sensori CCD affiancati per una risoluzione complessiva di 95 milioni di pixel.

Come si avrà modo di vedere in seguito, i sensori CCD sono caratterizzati da un elevato rapporto segnale-rumore e un ampio range dinamico, buona efficienza quantica, filling factor (ovvero la percentuale di area del sensore che risulta sensibile alla luce e quindi impiegata per la rivelazione) elevato, maggiori risoluzioni e migliore uniformità nella risposta; gli svantaggi principali sono invece una significativa dissipazione di potenza, un'architettura di clocking non sempre semplice, supporto per frame rate non troppo elevati, costi di produzione relativamente alti visto che i processi non sono sempre standard, scarsa tolleranza alle radiazioni, presenza di problemi di smearing e blooming.

CCD come registro a scorrimento della carica elettrica

Un sensore CCD è, in maniera piuttosto semplificata, una matrice di foto-diodi e di condensatori in tecnologia MOS; i fotodiodi consentono di convertire la luce incidente in coppie elettrone-lacuna mediante effetto foto-elettrico mentre i condensatori servono per raccogliere la carica prodotta. Come mostrato in figura 1a, polarizzando un condensatore MOS si crea, in una condizione di non equilibrio termico, una regione di svuotamento in corrispondenza della superficie di separazione Si-SiO₂; gli elettroni creati per effetto fotoelettrico dalla radiazione incidente sono quindi attratti in tale regione (Fig. 1b).

Se la distanza di separazione tra i pixel è piuttosto piccola (inferiore a 0,1 μ m), le

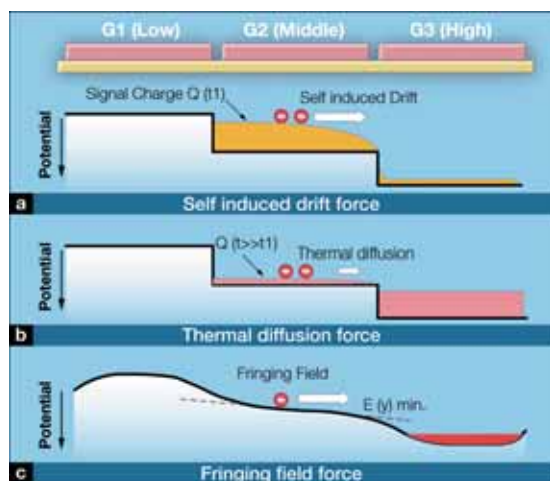


Fig. 2 - Trasferimento di carica in un sensore CCD (da [1])

regioni di svuotamento per ogni condensatore tendono a sovrapporsi creando un vero e proprio canale che può essere usato per acquisire la carica così raccolta e convertirla in un segnale misurabile per generare infine la versione digitale dell'immagine. Il principio, mostrato in figura 2, è il seguente. Variando la tensione di polarizzazione applicati agli elettrodi contigui è possibile infatti creare delle discontinuità nei potenziali all'interno proprio della regione di svuotamento; in questo modo si genera un trasferimento di carica nel canale. Tale trasferimento di carica avviene in diverse fasi sulla base, dapprima, di meccanismi di drift indotti dalla repulsioni tra i portatori di carica (a), quindi di diffusione termica degli elettroni (b) e, in ultimo, per effetto del campo ai bordi (fringing field) (c); tale ultimo processo riveste importanza particolare soprattutto nei sensori a elevata frequenza di lettura (oltre 10 MHz) consentendo lo svuotamento completo della regione. Un sensore CCD è quindi, dal punto di vista pratico, un vero e proprio registro a scorrimento; la carica viene trasferita tra pixel

contigui e infine convertita mediante un'unica catena di acquisizione. Del resto le prime realizzazioni di tali sensori nascevano proprio dalle ricerche di Boyle e Smith sulle memorie a bolle a semiconduttore.

CCD 'buried channel'

Uno dei parametri principali nella caratterizzazione dei sensori è quindi l'efficienza di trasferimento, data dalla frazione di carica trasferita tra due elettrodi elevata a $1/N$, dove N è il

numero di pixel nella catena di read-out. La capacità di raggiungere elevati livelli di efficienza di trasferimento consente di ridurre significativamente le variazioni

di separazione tra metallo e semiconduttore che creano livelli elettronici nella banda proibita dove sono intrappolati i portatori durante il trasferimento di carica. Fin dagli inizi furono quindi studiate soluzioni alternative; già nel 1972, ad esempio, furono proposti in particolare i CCD 'buried channel' (letteralmente a 'canale seppellito') che hanno rappresentato la soluzione più diffusamente adottata. L'idea di fondo, in questo caso, è quella di creare appunto un canale di trasferimento lontano dalla superficie di separazione Si-SiO₂ così da evitare che gli elettroni restino intrappolati negli stati di interfaccia. Come mostrato in figura 3, questo può essere fatto impiantando, ad esempio, una regione drogata di tipo n sul substrato di tipo p e che viene svuotata completamente applicando una tensione di polarizzazione inversa alla giunzione così formata.

Si crea in questo modo una banda energetica spostata verso la regione di semiconduttore e dove sono raccolti gli elettroni generati dalla luce incidente; tale banda può essere usata come canale per lo spostamento degli elettroni durante il trasferimento di carica per la lettura del sensore.

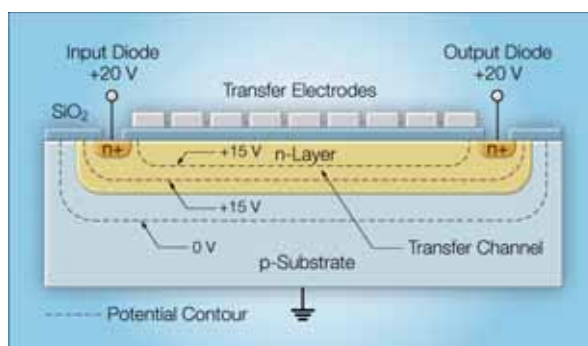


Fig. 3 - CCD buried channel (da [1])

della risposta del sensore in funzione delle diverse condizioni di tensione e corrente di alimentazione. Lo schema di trasferimento di carica descritto in precedenza, noto come CCD a canale superficiale, è stato il primo proposto. Presenta il grosso svantaggio di non consentire di ottenere efficienza di trasferimento prossima al 100% per singola unità di trasferimento di carica; pertanto non è applicabile ai sensori a elevata risoluzione.

Il problema principale sono le irregolarità della struttura cristallina sulla superficie

Diversi schemi di clocking per il trasferimento della carica

Perché lo schema descritto in precedenza funzioni, sia che si parli di CCD a canale superficiale sia di sensori buried channel, è necessario applicare opportune tensioni di polarizzazione agli elettrodi per controllare il trasferimento di carica. Diversi schemi sono stati proposti per questo. In figura 4a è mostrato ad esempio il principio di funzionamento dello schema a 4 fasi; ogni pixel integra 4 elettrodi ognuno dei quali è pilotato a ogni istante da una delle quattro diverse fasi della tensione di polarizzazione. In questo modo, due elettrodi funzionano come elementi di memorizzazione della carica, mentre altri due come barriera per controllarne il trasferi-

mento. Caratteristica principale dello schema mostrato è l'elevata efficienza di trasferimento; si può infatti dimostrare che la massima carica trasferita dipende linearmente dall'inverso del numero di fasi della tensione di polarizzazione.

In applicazioni che richiedano invece elevata frequenza di read-out del sensore, è adottato uno schema a pseudo-due fasi. Come mostrato in figura 4b, in questo caso i quattro elettrodi presenti a ogni pixel sono a due a due in contatto elettrico; le regioni sottostanti nel canale sono inoltre caratterizzate da diversi livelli di drogaggio mediante impiantazione di impurità di tipo p. Il gate avente livello di drogaggio maggiore, in particolare, si troverà allora a un potenziale più positivo nel momento in cui viene applicata tensione; ne risulta una profondità maggiore della buca di potenziale dove è raccolta la carica che permette di ridurre, quindi, il tempo di integrazione.

Il numero di gate per pixel è invece ridotto a due nello schema puro a due fasi, ideale per sensori a elevato livello di integrazione ed elevata risoluzione. Il primo esempio di sensori a due fasi fu proposto da Kodak nel 1999. In questo tipo di soluzione, l'andamento a gradino del potenziale viene creato direttamente dalla tipologia di drogaggio delle regioni al sotto degli elettrodi; i costi di produzione sono ovviamente maggiori.

Sulla base dello stesso principio, sono anche stati sviluppati sistemi a fase virtuale, in cui è usato un singolo elettrodo per pixel. Tali sensori manifestano una maggiore sensibilità alla luce soprattutto nella regione del blu (il materiale di cui sono costituiti gli elettrodi risulta infatti non trasparente a queste frequenze) ma soffrono di un degrado nel tempo delle prestazioni legato alla complessità del processo produttivo.

CCD frame-transfer e interline-transfer

Full-frame, frame-transfer e interline-transfer sono le due principali architetture adottate per la realizzazione di sensori CCD. Nel primo caso, mostrato in figura 5a, il singolo pixel integra sia l'area fotosensibile sia la matrice di condensatori MOS a essa sovrapposta; i pixel sono arrangiati in colonne lungo le quali avviene, in parallelo, il trasferimento di carica al termine del periodo di integrazione. Le linee del sensore sono così trasferite l'una

sente di produrle anche di dimensioni estremamente ridotte. Il KAF-50100, ad esempio, è un sensore full-frame di Kodak di dimensioni 61,3 mm (in diagonale) e costituito da 8304 x 6220 pixel da 6 μ m; sostiene un frame rate di fino a 1 frame al secondo. Sensori da 33 megapixel (4992x6668) operanti a 2,7 frame al secondo e con pixel di dimensioni 7,2 μ m sono analogamente correntemente disponibili presso Dalsa.

Lo svantaggio principale dei dispositivi full-frame è invece legato al fatto che la

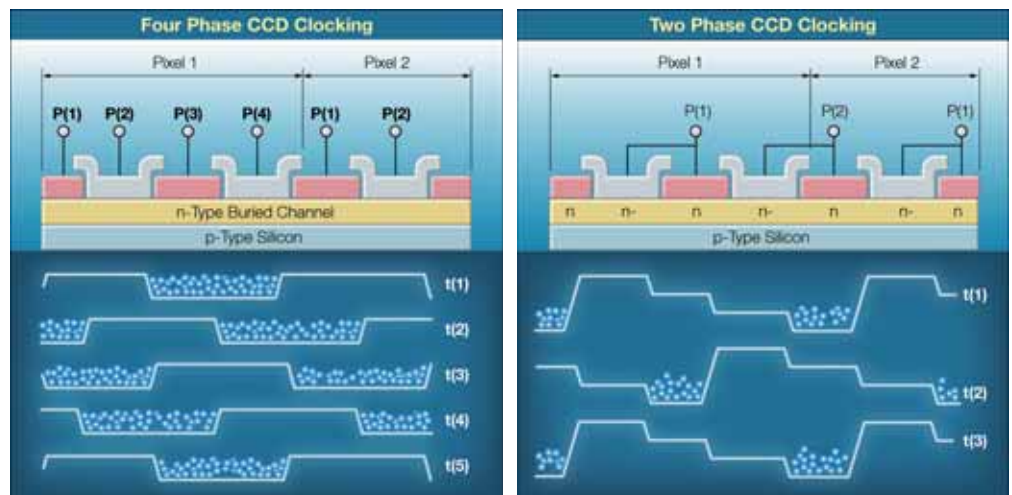


Fig. 4 - Schemi di clocking per CCD : 4-fasi (a) e pseudo 2-fasi (b) (da [3])

dopo l'altra a ogni intervallo di blanking orizzontale verso un'ultima; questa a sua volta può scorrere orizzontalmente così da portare in uscita a ogni ciclo un pixel diverso. L'uscita è infine connessa all'elettronica di acquisizione. Piuttosto simile a quella appena descritta è pure l'architettura dei sensori frame-transfer. In questo caso, per ridurre i problemi discussi in precedenza, è prevista una seconda area schermata, che funziona in pratica come una memoria analogica e in cui viene riversata la carica al termine del periodo di integrazione. I vantaggi principali dei sensori full-frame sono un fattore di filling praticamente pari a 100 e la relativa semplicità della struttura del pixel che con-

regione fotosensibile non è affatto schermata durante la fase di trasferimento di carica e, poiché i pixel sono usati sia come elemento sensibile sia per il read-out, man mano che una linea scorre in verticale nella matrice, nuova carica si sovrappone a quella originaria; ne consegue uno sgradevole effetto di smear nell'immagine, ovvero la presenza di strisce in verticale tendenti al bianco soprattutto quando si inquadrano sorgenti particolarmente luminose.

Sensori full-frame sono pertanto usati in genere in condizioni di illuminazione stroboscopica o con shutter di tipo meccanico.

Nelle architetture interline-transfer (Fig.

5b) invece le aree sensibili e di trasferimento di carica sono interlacciate tra loro, alternando fotodiodi e condensatori MOS, mentre la filosofia di read-out per colonne resta invariata. L'area di lettura è inoltre schermata dalla radiazione incidente. Una tensione dedicata consente di controllare direttamente il gate del fotodiodo abilitando il trasferimento di carica nel condensatore soltanto al termine del periodo di integrazione e per un intervallo dell'ordine di qualche microsecondo; si eliminano in questo modo appunto i problemi di smear senza necessità di impiegare shutter meccanici. La sezione di un pixel di un CCD di tipo interline-transfer è mostrata in figura 5; essendo completamente separato dalla sezione di lettura, la struttura del fotodiodo può essere progettata in modo da ottimizzare i parametri di maggiore interesse come l'efficienza quantica, il range dinamico o il rumore di fondo. Uno dei più interessanti esempi di sensore CCD interline-transfer è il KAI-08050 di Kodak; ha una risoluzione di 3296 x 2472 e in grado di operare fino a 16 frame al secondo. Il KAI-02050 è invece ideale per applicazioni full-HD fornendo una risoluzione di 1920x1080 pixel e frame rate fino a 68 frame al secondo. Tradizionalmente lo svantaggio principale dei sensori interline-transfer è rappresentato dalla riduzione del filling factor (fino anche del 20%) conseguente alla realizza-

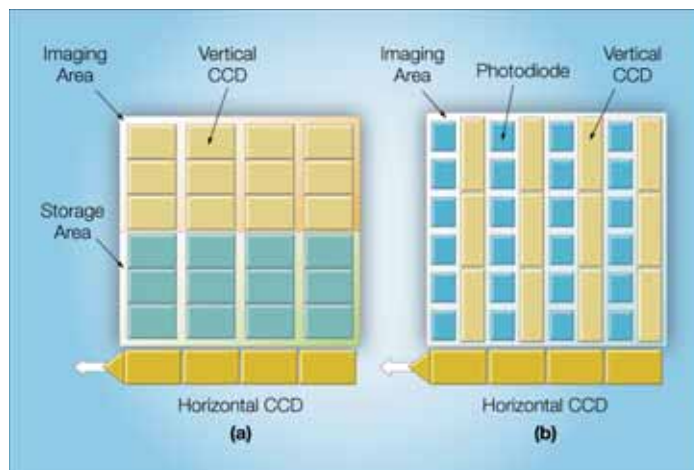


Fig. 5 - Architetture frame-transfer (a) e interline-transfer (b) per CCD (da [1])

zione della maschera per l'area di condensatori MOS per l'acquisizione e la lettura del pixel.

Significativi miglioramenti sono stati ottenuti di recente impiegando lenti on-chip per focalizzare la luce incidente nelle regioni sensibili; l'ER-150 di Hamamatsu, ad esempio, adotta una soluzione di questo tipo. Soluzioni analoghe sono disponibili come opzioni anche presso Kodak.

Sensori interlaced scan e progressive scan

Nella descrizione precedente si è implicitamente fatto riferimento a uno schema di read-out delle linee della matrice di pixel di tipo sequenziale. Si parla in questo caso di sensori progressive-scan. Sebbene più semplice da un punto di vista concettuale, la soluzione progressive-scan comporta delle difficoltà costruttive legate alla necessità di prevedere delle strutture tri-

ple-layer; ne derivano dei limiti sulle dimensioni minime dei pixel e sulla risoluzione totale del sensore. I sensori Kodak interline-transfer citati in precedenza adottano tale schema progressive-scan. Una soluzione diversa, più semplice, è invece quella di tipo interlaced-scan in cui la lettura avviene in maniera

interlacciata; in altri termini, dapprima sono acquisite tutte le righe pari e poi tutte quelle dispari, analogamente al formato impiegato, ad esempio, nelle video camere analogiche PAL. Sensori interlaced-scan possono essere realizzati con tradizionali tecnologie double-layer. Hanno però uno svantaggio non trascurabile legato al fatto che, in condizioni normali, la componente dell'immagine sulle righe pari e quella sulle dispari sono acquisite in due istanti diversi; con soggetti in movimento veloce potrebbero osservarsi distorsioni sgradevoli. In genere le camere interlaced-scan sono pertanto usate con precisi shutter di tipo meccanico.

Riferimenti

- [1] Nakamura, J. "Image sensors and signal processing for digital still cameras" - 2006, Taylor & Francis Group, LLC
- [2] www.kodak.com
- [3] www.hamamatsu.com
- [4] www.dalsa.com

Specialisti nei PCB prototipi e piccole serie

EURO
CIRCUITS

PCB proto	Il miglior prezzo per prototipi a 2 e 4 layers
STANDARD pool	ampia scelta 1-8 layers
Nuovo TECH pool	tecnologia a 100µm
Nuovo IMS pool	PCB in alluminio
On demand	Tutte le opzioni fino a 16 layers

Chiamateci al +39 02 89 75 24 40 email: euro@eurocircuits.com
Nuovo sito - Nuovi servizi

TUTTI I SERVIZI

- Calcolo prezzi istantaneo
- Inserimento ordini istantaneo
- Prezzi pooling convenienti
- Nessun costo di attrezzatura
- Consegna da 2gg lavorativi
- Servizio Lamine

www.eurocircuits.it