

Numero 22

Febbraio 1995

NUOVI APPUNTI



G.A.W.H. - C.so Monte Cucco 137 - 10141 Torino

Spazio Libero

Il TC211¹

Una lettura semplificata delle specifiche di quello che a tutt'oggi è il più diffuso CCD per uso astronomico amatoriale, e che resterà nella storia dell'astrofilia come il responsabile della diffusione dell'astronomia digitale in ambito amatoriale.

Parte prima

1. Descrizione

Il TC211 è un ccd di tipo full-frame ²(1) specificamente prodotto dalla Texas Instruments per applicazioni industriali che richiedono robustezza ed ingombri ridotti (fig.1). L'area sensibile è costituita da 165 righe orizzontali ognuna delle quali contiene 192 elementi sensibili (pixel). Sono presenti altri 12 pixel per riga, debitamente oscurati da una lamina di alluminio, il cui scopo è quello di fornire, in ambito industriale, una indicazione di massima della corrente di buio.

La superficie sensibile è un quadrato il cui lato misura 2640 μm (micrometri; $1\mu\text{m} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}$); un singolo pixel misura 13.75 μm in altezza per 16 μm in larghezza. Il TC211 viene fornito in un package ceramico quadrato di circa 7.5 mm di lato e le sue caratteristiche sono garantite dal costruttore in un campo di temperatura che va da -10 a +45 °C. È importante considerare il fatto che la temperatura gioca un ruolo fondamentale, non solo per le caratteristiche funzionali che più direttamente interessano l'astrofilo, ma soprattutto perché, facendo funzionare il TC211 al di fuori del campo termico richiesto, è possibile almeno teoricamente un qualunque malfunzionamento irreversibile del componente stesso.

2. Funzionamento

2.1. L'Anti-Blooming Gate (ABG - circuito anti abbagliamento)

Il funzionamento di un qualunque CCD è strettamente dipendente dalla sua struttura interna. Per il TC211 si può pensare ad ogni suo pixel come ad una buca di potenziale che serve a confinare elettroni. La struttura di tale buca (fig.2) non è per nulla simmetrica, e ciò a causa della presenza dell'ABG, la cui funzione è quella di abbassare l'altezza della buca di potenziale e di fornire una via di fuga preferenziale (e controllata) agli elettroni in eccesso. Ciò naturalmente impedisce a pixel sovraesposti di emettere elettroni che inevitabilmente andrebbero a ricadere sui pixel vicini. Questo innegabile vantaggio ha però un suo prezzo che si paga in due rate:

- 1 la dinamica del segnale si restringe (e questo è chiaramente dovuto all'abbassamento delle buche di potenziale);
- 2 la superficie effettiva del pixel è diminuita non solo dalle strutture che delimitano il pixel stesso, ma anche dalle strutture che costituiscono il circuito dell'ABG.

¹ Chip CCD Texas Instruments che equipaggia, ad esempio, le camere CCD SBIG ST-4, Spectra Source Lynxx PC, Electrim EDC-1000 (Ndr)

² I CCD di tipo full-frame sono quelli in cui quasi tutta la superficie sensibile è esposta alla luce. Nei CCD di tipo frame-shift invece, una metà del chip è oscurato da una lamina di alluminio e serve da memoria di transito per l'immagine che è stata rilevata nell'altra metà del chip.

2.2. L'esposizione.

Quando un fotone "colpisce" la parte sensibile del pixel, esso ha una certa probabilità di scatenare un processo fisico (la cui descrizione è al di là dei nostri scopi) che porta alla comparsa di un elettrone. Tale elettrone ha a sua volta una certa probabilità di essere intrappolato nella buca di potenziale del pixel (per inciso ciò che rende il CCD altamente efficiente è l'alta probabilità di questo evento). La caratteristica che più risalta nel confronto con una emulsione fotografica è che la quantità di carica elettrica accumulata in ogni pixel durante il tempo di esposizione (quindi il segnale) è funzione lineare della luce incidente e del tempo di esposizione.

2.3. La lettura dell'immagine

2.3.1. Primo passo: lo spostamento rigido dell'immagine.

Per quanto si possa pensare al CCD come la punta di diamante dell'elettronica digitale, la maggior parte di essi fornisce un output di tipo analogico, e non sarà proprio il TC211 a fare eccezione (fig. 3).

Il processo di lettura comincia con lo spostamento di tutti i pixel di una riga nella riga seguente in direzione del registro seriale (SRG di cui parleremo più avanti). Ciò viene fatto operando su un clock chiamato Image Area Gate. La struttura fisica dell'Image Area Gate è costituita da un insieme di 165 elettrodi lineari disposti orizzontalmente (parallelamente al registro seriale) la cui funzione è quella di delimitare in orizzontale tutti i pixel del CCD.

Mentre la struttura verticale del CCD (perpendicolarmente al registro seriale) è rigida, la struttura dell'IAG è dinamica: durante il tempo di esposizione viene applicato al pin IAG un valore LOW, il che impone alla struttura IAG di costituire delle barriere fisiche al movimento degli elettroni in direzione

perpendicolare al registro seriale. Applicando un valore HIGH al pin IAG si ha la scomparsa contemporanea di tutte le barriere (e la cancellazione del registro seriale che vedremo dopo). Ora, poiché come si evince dalla fig.2, le buche di potenziale che costituiscono il pixel sono elettricamente asimmetriche, gli elettroni sono costretti a precipitare verticalmente nel pixel successivo in direzione del registro seriale. Così tutti gli elettroni che si trovavano nei 192 pixel della riga 165 si ritrovano nei pixel sottostanti della riga 164, e così via fino alla riga 1. Gli elettroni che appartenevano alla riga 1 precipitano nella riga successiva che però non fa più parte dell'area sensibile del CCD e che non ha la sua stessa struttura: si tratta del registro seriale.

2.3.2. La lettura del singolo pixel

La struttura del registro seriale differisce da quella di una singola riga appartenente all'area sensibile del CCD per il fatto che qui le barriere verticali al flusso di elettroni non sono rigide: esse sono erette e rimosse con un meccanismo che richiama quanto detto per il circuito IAG. Applicando un segnale LOW all'SRG tali barriere sono attive e gli elettroni intrappolati nel registro seriale sono costretti a permanere nella loro locazione. Abbassando tali barriere e tenendo presente che anche qui i pixel sono elettricamente asimmetrici, gli elettroni sono costretti a spostarsi in pacchetti discreti verso la locazione successiva in direzione dell'amplificatore d'uscita. Si realizza di fatto uno spostamento di una locazione di tutti i pixel verso l'amplificatore, cosicché l'ultima locazione diventa la penultima, e così via fino alla prima locazione, il cui contenuto si presenta come pacchetto di carica all'ingresso dell'amplificatore.

L'amplificatore ³ in tale istante converte la carica in tensione con un fattore pari a $4 \mu\text{V}/e^-$ (microvolts per elettrone), fornendo sul piedino OUT del CCD un segnale ANALOGICO la cui tensione è proporzionale al flusso di fotoni attraverso la superficie del pixel, e al tempo di esposizione. Ripetendo l'intero processo per il numero di locazioni⁴ del registro seriale e per tutte le righe del CCD, si realizza la lettura completa dell'immagine. Se quanto detto risulta chiaro, sarà anche immediata la comprensione della funzione di cancellazione (di per sé non implementata nel CCD): agendo 165 volte sul circuito IAG senza agire sul SRG si cancella effettivamente tutta l'area sensibile.

Tale operazione non è quasi mai richiesta in ambito industriale o commerciale, ove le frequenze di lettura del CCD sono tipicamente di qualche decina di Hz come minimo (sono ormai comuni le videocamere con tempi d'otturazione di 1/10000 di secondo). È indispensabile invece in ambito astronomico "svuotare" prima di ogni ripresa il CCD delle cariche elettriche che si generano spontaneamente nel silicio a causa della temperatura. È importante anche seguire l'ordine logico dei passi di lettura in quanto il componente non possiede alcun circuito di protezione contro la "stupidità" dell'utente: se non si rispetta l'esatta sequenza di eventi (clocks), nel migliore dei casi l'immagine viene letta male o non viene letta per niente, nel peggiore dei casi si può danneggiare irrimediabilmente il componente.

3. Raccomandazioni sulle condizioni operative

Forniamo qui di seguito i valori dei principali parametri fisici cui deve essere soggetto il progetto di una camera CCD che preveda l'impiego del TC211. In parentesi sono riportate le tolleranze ammesse.

Alimentazione al pin ADB:	+12 (+1,-1) volts
Voltaggio del substrato:	0 volts ⁵
clock IAG livello HIGH:	+1 (+1,-1) volts
clock IAG livello LOW:	-9.5 (+1,-0.5) volts
clock SRG livello HIGH:	+2 (+0.5,-0.5) volts
clock SRG livello LOW:	-9.5 (+1,-0.5) volts
clock ABG livello HIGH:	+3.5 (+0.5,-1) volts
clock ABG livello LOW:	-7 (+1,-1) volts
clock ABG livello MID:	-2.5 (+0.5,-0.5) volts ⁶
frequenza massima IAG:	1.5 MHz
frequenza massima SRG:	10 MHz
frequenza massima ABG:	2 MHz
carico capacitivo medio al pin OUT:	12pF ⁷

³Per i più curiosi si tratta in realtà di un doppio stadio in configurazione "inseguitorc di emettitore a basso rumore.

⁴Per essere precisi tale numero è uguale a $192+12+6$: 192 è il numero di pixel per riga; 12 è il numero di pixel ciechi (quelli oscurati dalla bandella d'alluminio); 6 è il numero di falsi pixel, cioè locazioni presenti nel primo tratto del registro seriale, usati come canale per il trasporto dei pacchetti di elettroni verso l'ingresso dell'amplificatore.

⁵ È la "massa" del componente. La Texas Instruments non fornisce alcuna tolleranza su tale valore, volendo con ciò dire che una massa "rumorosa" può affliggere in maniera determinante ed imprevedibile le performance del CCD.

⁶ Il livello MID dell'ABG è la tensione continua da applicare al pin ABG quando la funzione di anti-blooming è disabilitata.

⁷ Questo è un parametro fondamentale per la corretta digitalizzazione del segnale in uscita dal componente. Non tener conto di tale parametro significa quasi sicuramente ridurre la banda passante utile per il circuito di conversione a valle del CCD.

intervallo operativo di temperatura in aria libera:	-10 +45 °C
intervallo di temperatura di conservazione:	-30 +85 °C
temperatura massima di saldatura:	260 °C ⁸

4. Performance

Di seguito sono riportati i parametri di performance previsti per il TC211 in condizioni ideali⁹

range dinamico:	60 dB ¹⁰
range dinamico con ABG attivo:	57 dB ¹¹
tempo di risposta sul pin OUT:	25 ns ¹²
coefficiente di contrasto:	0.98 ¹³
figura di rumore:	70 =< fn =< 370 nV/sqrt(Hz) (nanovolts su radice di hertz) (fig. 4)
rumore equivalente:	150 elettroni
massima corrente assorbita:	10 mA
sensibilità al centro della scala dinamica:	260 mV/lux
sensibilità al centro della scala dinamica con filtro IR:	33 mV/lux
livello minimo di saturazione:	400 mV
livello minimo di saturazione con ABG attivo:	350 mV
massima disuniformità dell'output:	20%

5. Conclusione

Riportiamo in appendice tutte le figure richiamate nel testo accompagnate da altre che saranno richiamate e chiarite nella parte seconda di questo articolo. Con ciò risulta quasi interamente esaurita la parte illustrativa delle specifiche del TC211. La seconda parte sarà dedicata all'analisi critica di quanto esposto alla luce delle specifiche dichiarate dai costruttori dei sistemi ccd più

⁸ A tale temperatura la saldatura può protrarsi per un massimo di 10 secondi, e comunque la saldatura non può essere effettuata a meno di 1.6 mm di distanza dall'involucro del CCD.

⁹ Naturalmente la condizione ideale è quella in cui sono rispettati tutti i vincoli imposti al par.3.

¹⁰ Il range dinamico è definito come: $D = -20 \log \left(\frac{N}{M} \right)$ dove N è il rumore medio, ed M è il massimo segnale di saturazione

¹¹ Ciò significa che la saturazione con ABG attivo avviene ad un livello che è il 70% circa del livello di saturazione che si raggiunge in assenza di ABG.

¹² È il tempo tipico che intercorre fra l'istante in cui SRG è LOW e l'istante in cui si può considerare stabilizzato il segnale da leggere sul pin OUT.

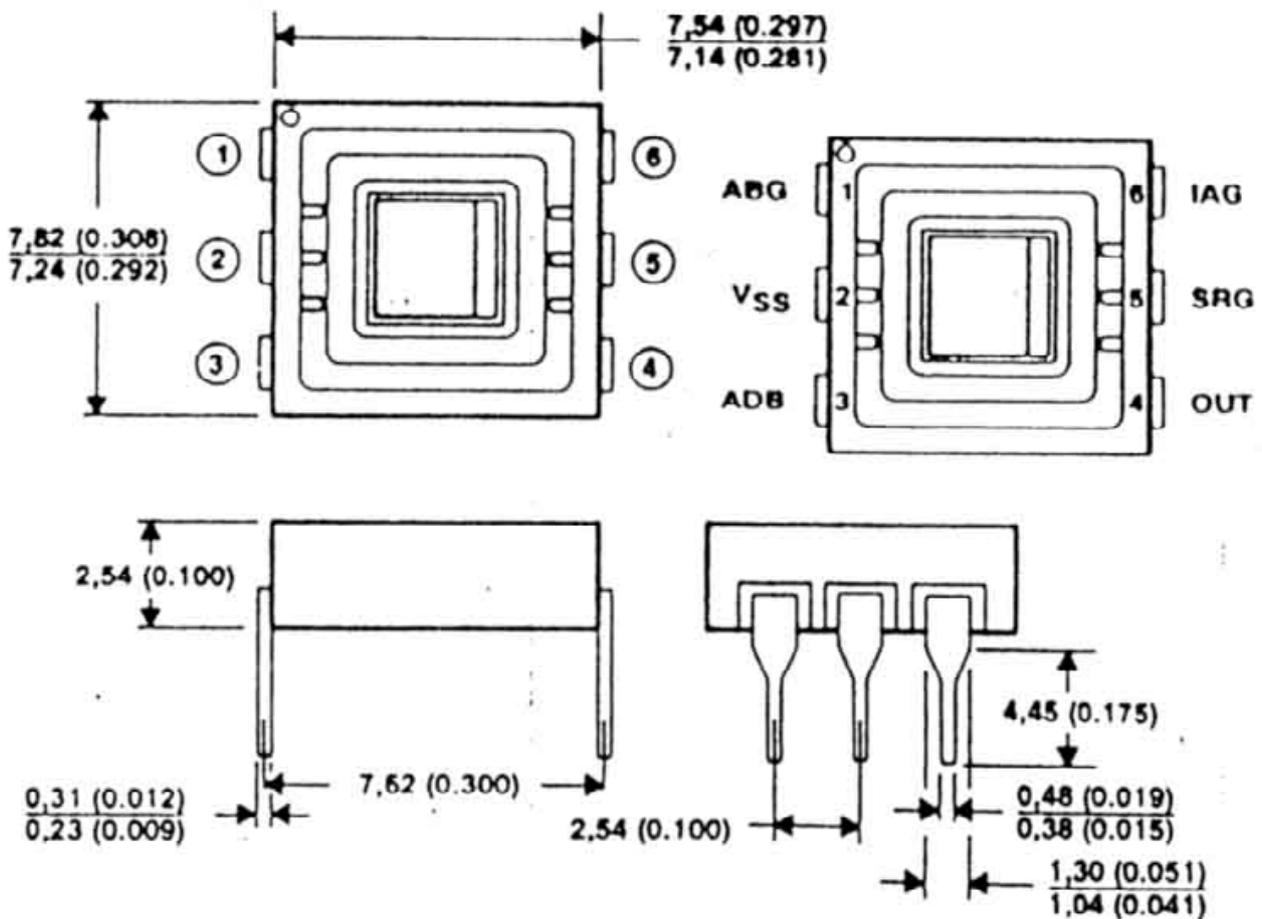
¹³ Il coefficiente di contrasto "g" è dato teoricamente dall'equazione: $\left(\frac{E_2}{E_1} \right)^g = \left(\frac{O_2}{O_1} \right)$ dove, a parità di flusso luminoso incidente, E_1, E_2 sono due differenti tempi d'esposizione ed O_1, O_2 sono i rispettivi segnali medi in uscita. Tale relazione è puramente indicativa e si rivela sempre meno valida man mano che ci si allontana da valori di O_1, O_2 uguali a metà del livello di saturazione. Il valore 0.98 indica semplicemente che in tali condizioni il CCD tende a restituire i toni della sorgente luminosa NON fedelmente, ma conferendo all'immagine un contrasto maggiore nelle zone più scure e minore alle zone più chiare. Per inciso non è per niente detto che questo comportamento non si inverta per livelli di segnale diversi da quelli citati.

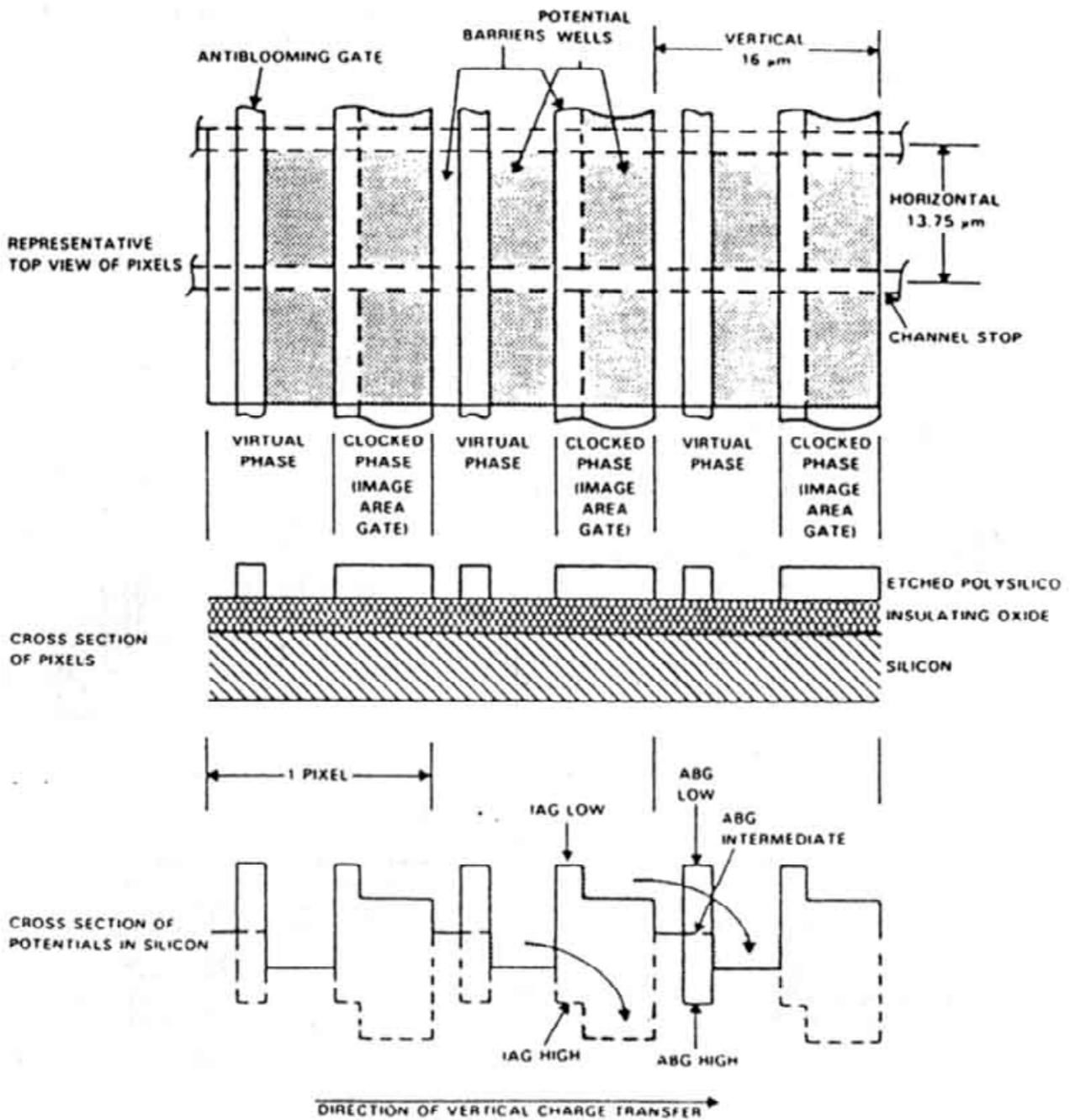
diffusi. Saranno forniti ulteriori dettagli in relazione alla progettazione di un sistema ccd che faccia uso del TC211.

Cieli sereni
Saro Pomillo

Nota:

Per massima disuniformità dell'output (per un flusso di luce uniforme su tutta la superficie del CCD) si intende il rapporto fra la differenza degli output relativi al pixel più luminoso e a quello meno luminoso, ed il livello medio del centro della scala dinamica. Questa misura non tiene conto a priori dei pixel difettosi (per intendersi dark pixel e hot pixel).





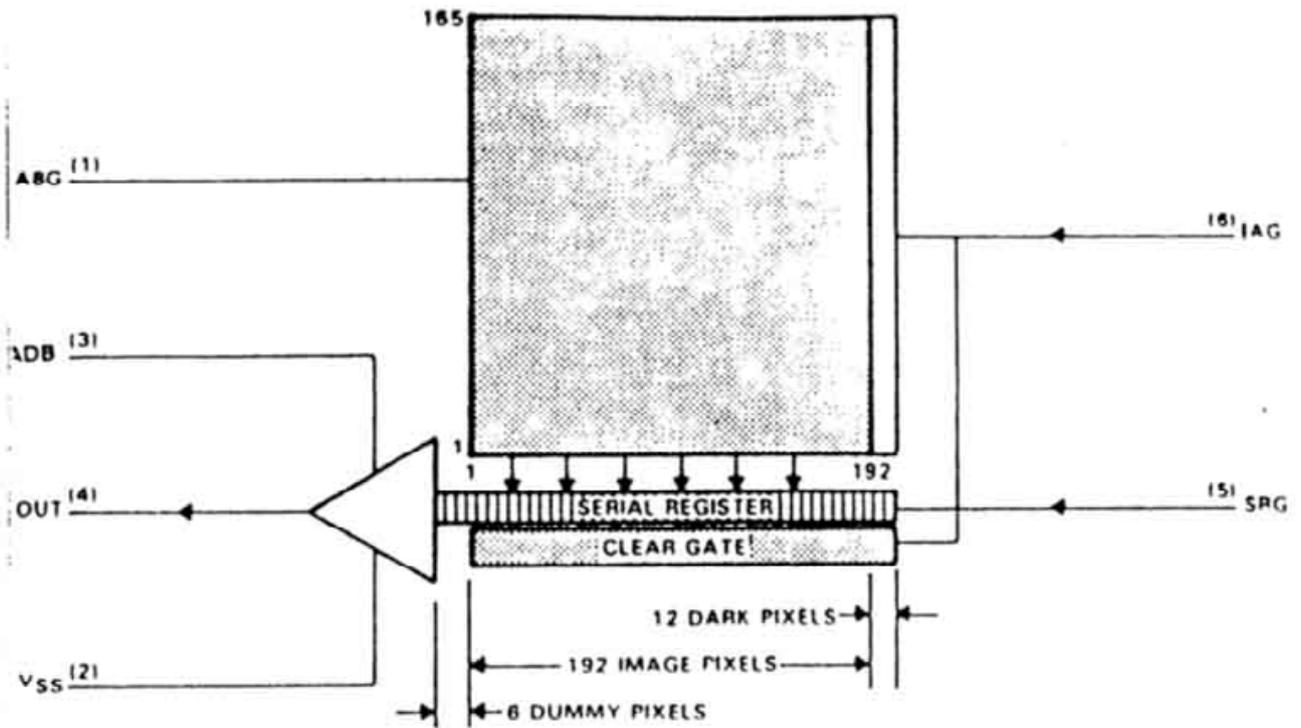


Fig.3

