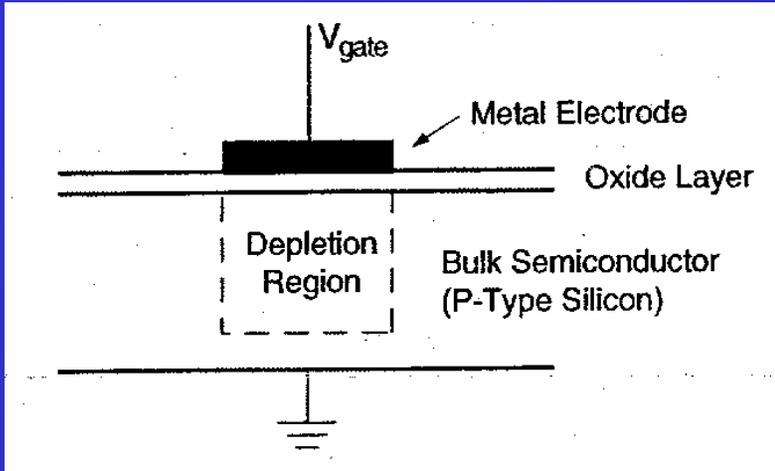




CCD per uso spaziale

Marco Albi – Dipartimento di Astronomia, Università di Trieste

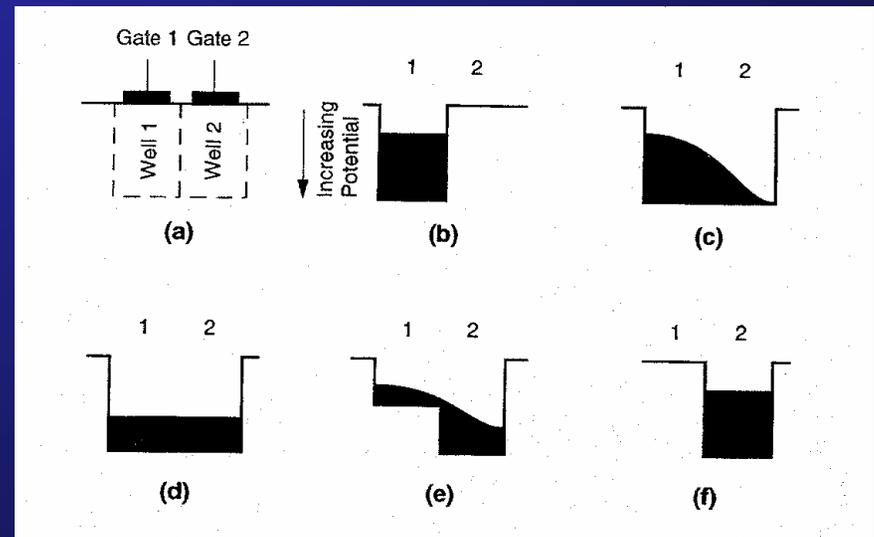
1) cenni sui principi di funzionamento dei CCD



I CCD sfruttano la capacità di raccolta di carica dei condensatori MOS. Applicando al gate un voltaggio positivo, si crea una regione di svuotamento dove si forma una “potential well” (PW) in grado di raccogliere elettroni.

Se questi sono il frutto di una radiazione incidente (effetto fotoelettrico), il numero di cariche raccolte sarà proporzionale alla sua intensità.

In presenza di “gate” attigui, le cariche raccolte possono quindi essere trasferite modulando opportunamente il voltaggio dei “gate”, che determinano profondità e forma delle PW.

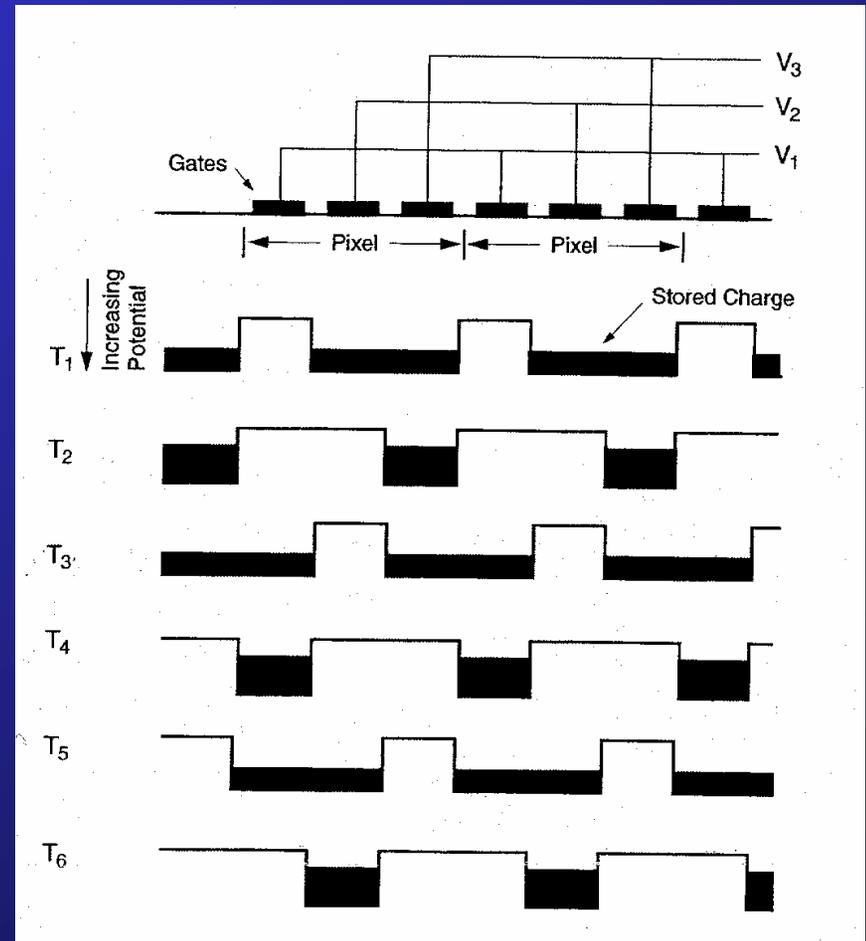


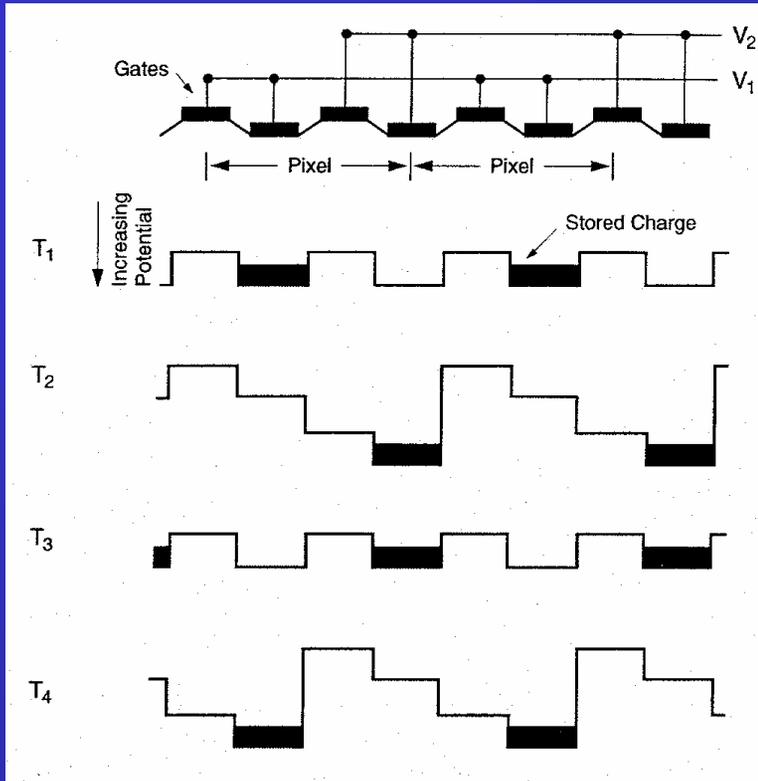
I CCD sono composti da una matrice bidimensionale di condensatori MOS posti uno accanto all'altro. La raccolta di carica avviene quindi in queste celle base (pixel) confinate dai "gates".

Il trasferimento di carica avviene lungo registri verticali, operando in maniera sistematica sulle tensioni di pilotaggio.

Nel caso in figura è rappresentato un CCD a tre fasi, con l'andamento temporale delle tensioni necessario ad un corretto trasferimento del segnale.

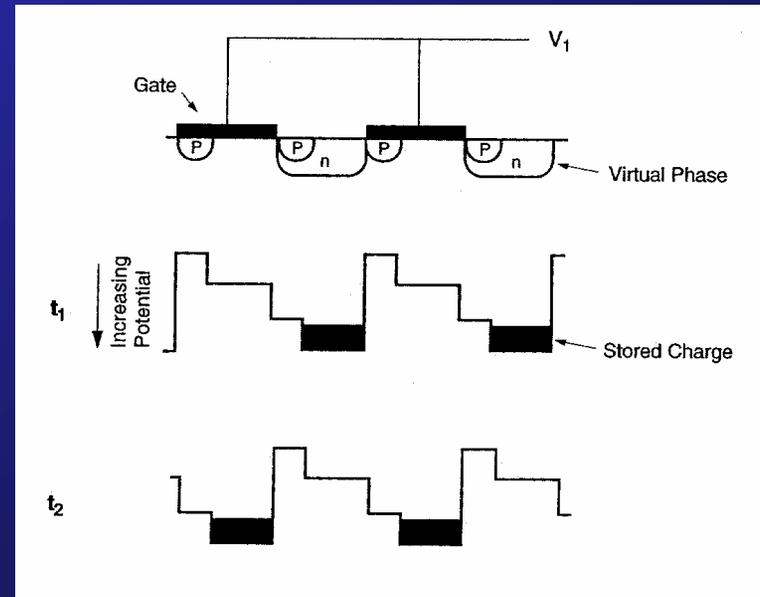
Molto comuni oggi sono CCD a quattro fasi.





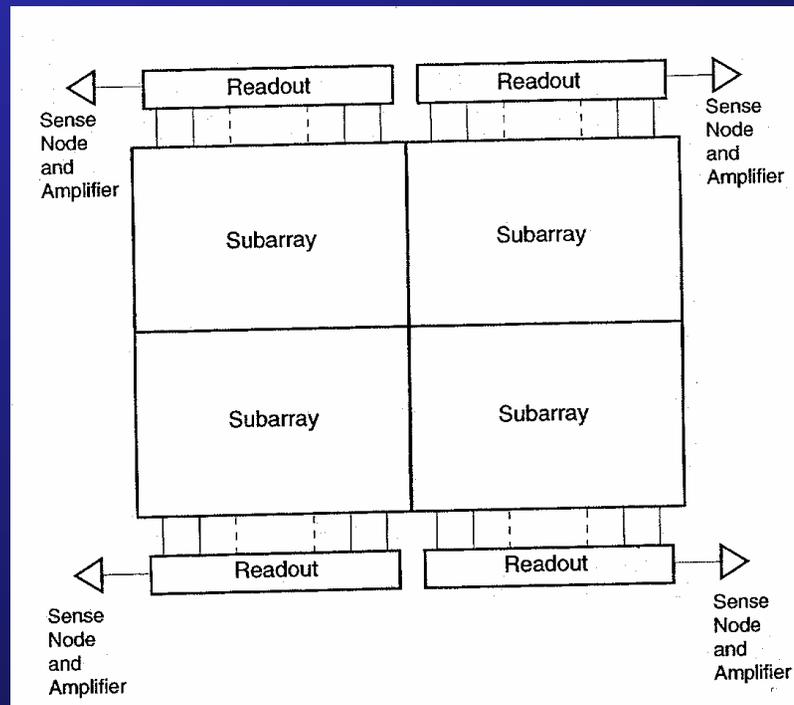
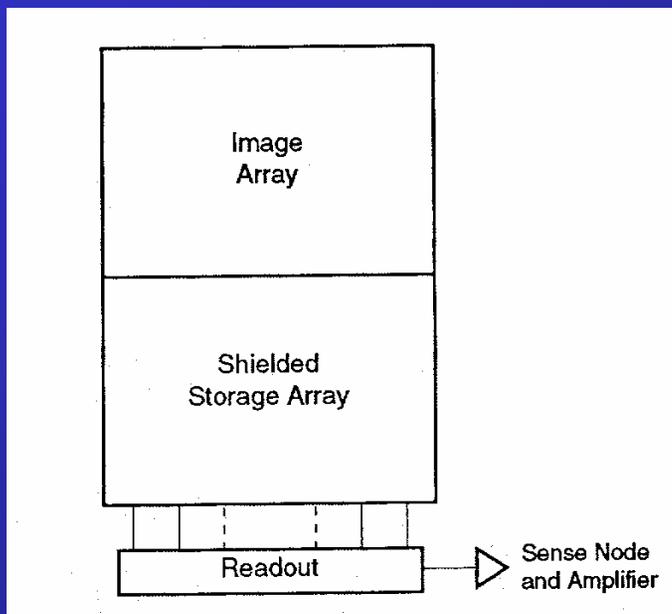
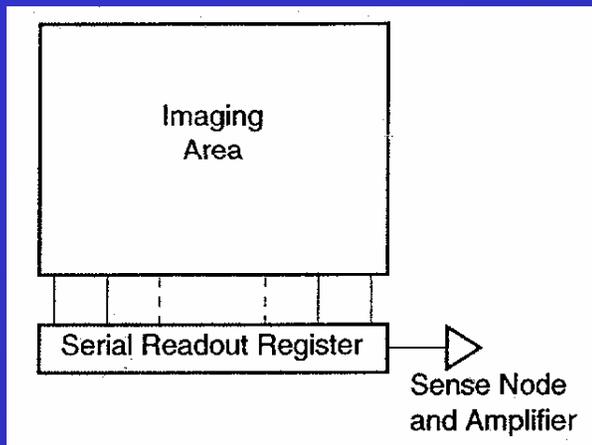
Esistono anche CCD a due fasi, in cui la forma della PW è determinata dalla profondità geometrica del "gate"...

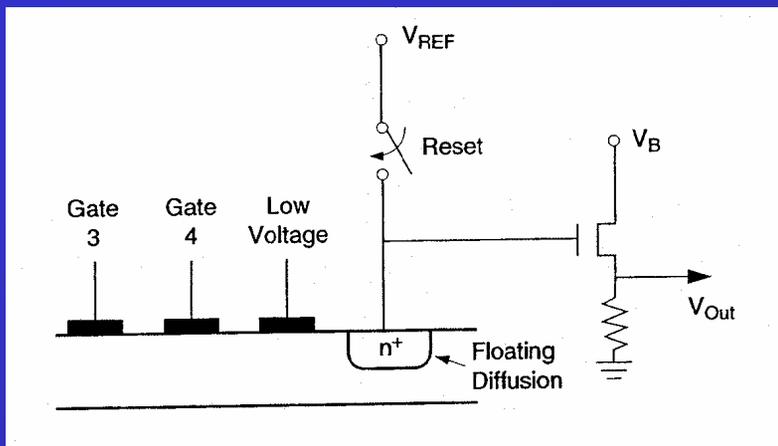
... o ad una fase, in cui tramite un opportuno drogaggio del substrato si ottiene la forma della PW necessaria.



Al termine di tutti i registri verticali, il segnale entra in un registro orizzontale di lettura, che punta verso il nodo di lettura seriale.

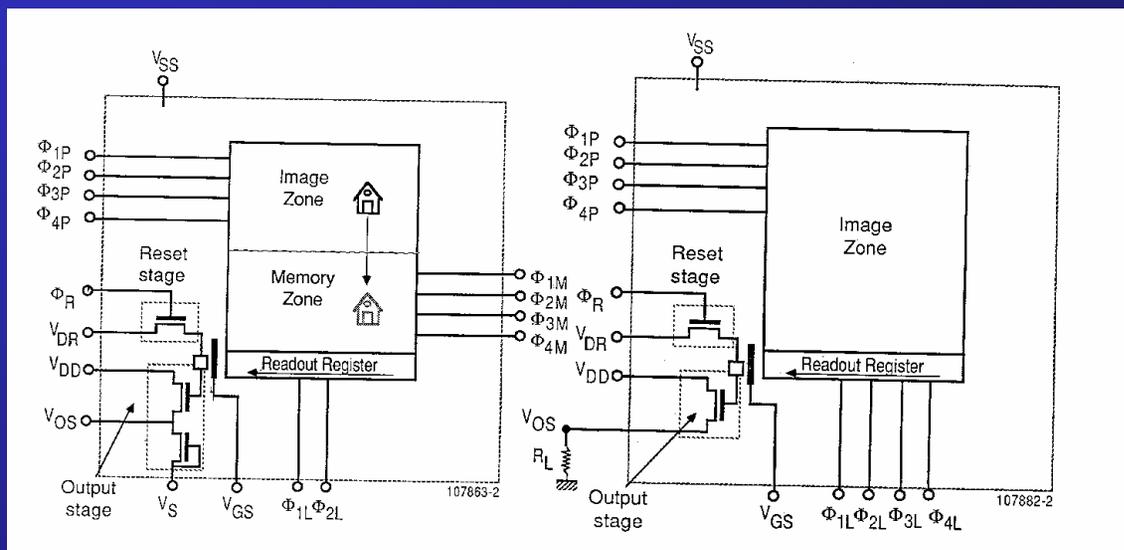
Le configurazioni possono variare e prevedere anche la presenza di zone di "storage" dove l'immagine viene memorizzata prima di essere letta.





Il segnale è infine trasferito dal registro orizzontale ad un nodo formato di materiale n+ che raccoglie le cariche di ogni pacchetto, le quali vengono trasformate in tensione da un condensatore. Il nodo è connesso all'entrata di un amplificatore MOSFET.

Avvenuta la lettura, il nodo viene resettato.



2) parametri indicatori di performance

PTC – Curva di trasferimento dei fotoni.

Si ottiene graficando il rumore in funzione del segnale su un'area tipica del CCD (p.e. 20 x 20 pixel) illuminata uniformemente.

La PTC è caratterizzata da 3 livelli di rumore:

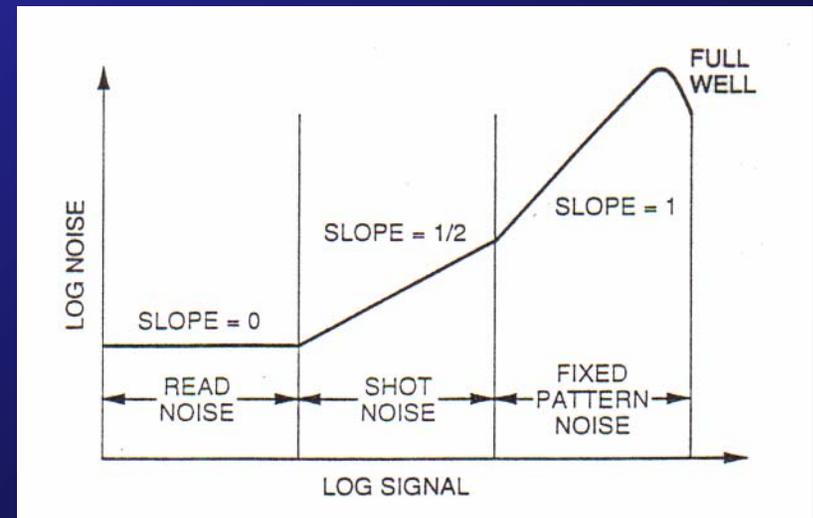
Read Noise – intrinseco, associato al CCD e al circuito di lettura

Shot Noise – fluttuazioni statistiche dei fotoni in arrivo (statistica di Poisson)

Fixed Pattern Noise – non uniformità dei pixel per difetti nei materiali o nel processo di produzione.

La costante di guadagno del sistema $K(e^-/DN)$ si può determinare graficamente come l'intersezione del prolungamento della curva di "shot noise" con l'asse del segnale.

Da K si può quindi esprimere il "read noise" e la "full well" (la carica che satura la singola PW) in termini di numero di elettroni.



Dark current

Il rumore dovuto alla “dark current” è dovuto alla corrente prodotta dallo spostamento di elettroni generati termicamente nel CCD. Tali cariche possono originarsi nella PW, nella zona di interfaccia Si/SiO₂ o nella regione “bulk”.

La densità di corrente può assumere valori tipici dell'ordine dei 0.1 – 10 na/cm² ed è fortemente dipendente dalla temperatura.

La densità di corrente aumenta di due ordini di grandezza ogni 7 – 8 °C.

Esempio:

Un CCD con pixel di 24 μm di lato e una “dark current” di 1000 pa/cm² produce 36000 e-/px/s. Se la sua “full well” è di 360000 elettroni, la PW sarà completamente saturata dalla “dark current” in 10 secondi.

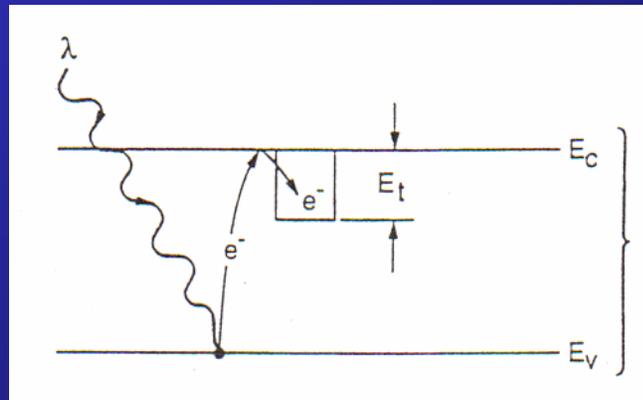
Questo non sarà un problema per applicazioni ‘normali’, ma diventerà importante nelle applicazioni astronomiche.

Charge Transfer Efficiency (CTE)

La CTE è la frazione di carica (<1) che viene trasferita nel pixel successivo. Spesso si fa riferimento alla “Charge Transfer Inefficiency” ε , definita come la quantità di carica non trasferita.

$$\varepsilon = 1 - \text{CTE}$$

Valori tipici della CTE sono compresi tra 0.99999 e 0.999999

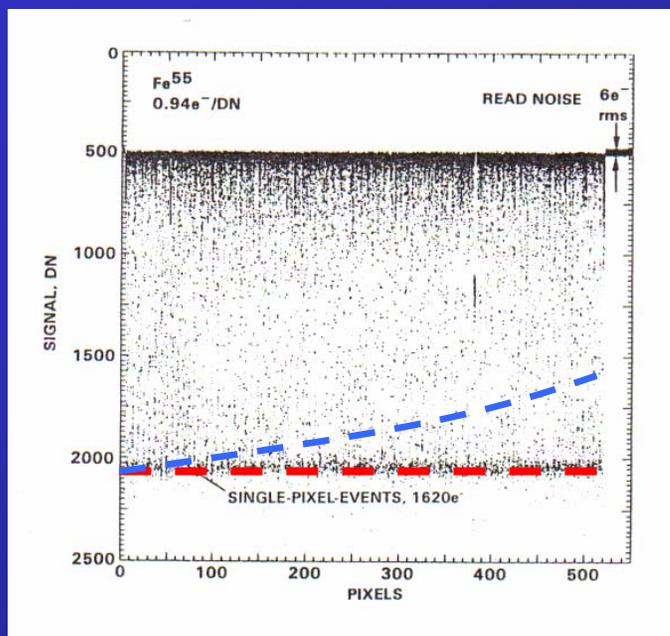
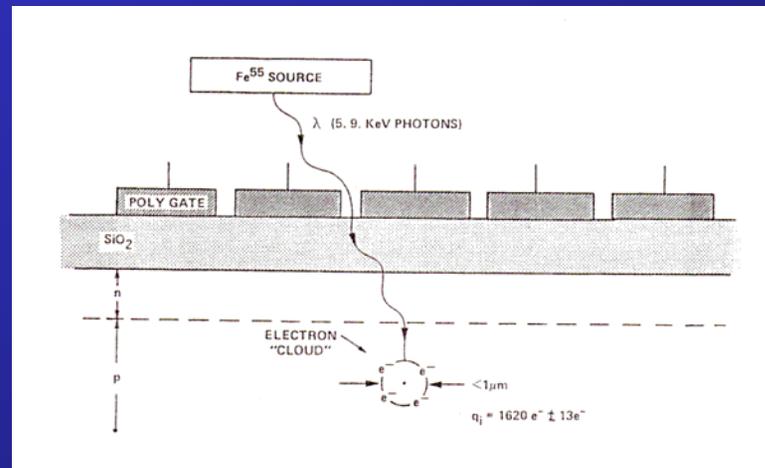


Le trappole di elettroni sono le principali cause di degradamento della CTE. In esse un elettrone viene bloccato per un certo periodo e poi rilasciato come carica differita. Il risultato è la degradazione della definizione dell'immagine.

Metodo del Fe^{55} per determinare la CTE.

L'isotopo Fe^{55} è instabile e decade in un atomo di Manganese con emissione di raggi X di $E=5.9$ KeV (riga K_{α}) e $E=6.5$ KeV (riga K_{β}).

Il primo genera nel Silicio un segnale di $1620 e^-$, il secondo di $1778 e^-$.



Illuminando uniformemente il CCD con la sola sorgente Fe^{55} e riportando i DN relativi ai pixel, si noterà chiaramente l'affollamento dovuto agli eventi singoli, in cui i $1620 e^-$ sono stati raccolti in una singola PW. Se essi seguono una linea orizzontale, abbiamo una buona CTE.

Altrimenti l'andamento sarà obliquo.

3) Richiami sui danni da radiazione

Unità di misura

Energia -> joule

$$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ joule}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ joule}$$

Flusso -> $\text{cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (fluenza = flusso x t -> cm^{-1})

Dose -> misura dell'energia depositata

$$1 \text{ Roentgens} = \text{dose che crea in aria } 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Coulombs/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

$$1 \text{ Gray} = 100 \text{ rad}$$

Biological Dose = Dose (rad o gray) x RBE (sievert Sv)

RBE = Relative Biological Effectiveness

Per il singolo ione (e i suoi effetti...)

Lo Stopping Power misura la capacità di una particella di liberare energia in uno specifico materiale.

Per rendere i valori dei vari ioni sui diversi materiali confrontabili si definisce il

LET = Linear Energy Transfer

$$\frac{dE}{dx} \cdot \frac{1}{\rho}$$

Valori tipici $\rightarrow 0.1 < \text{LET} < 100 \text{ MeV}\cdot\text{mg}/\text{cm}^2$

Danni a lungo termine

- Ionizzazione del Materiale: gli atomi vengono ionizzati. A questo può o meno seguire la ricombinazione.

Unità di Misura: TID Total Ionising Dose (in rad)

- Rilascio di E non ionizzante: principalmente lo spostamento di atomi dal reticolo.

Unità di misura più difficile da definire: si cerca di stabilire il danno prodotto da una particella standard, quindi si riferisce tutto a quella tramite un coefficiente (es. il danno equivale a 10^8 elettroni di 1 MeV).

Non esiste un modello definitivo (Simple NIEL rule).

Danni “transienti” (Single Event Effect):

1. **Single Event Upset:** cambio di stato logico $0 \leftrightarrow 1$; evento non distruttivo, l'elemento logico può essere riscritto o resettato (al massimo si ha una momentanea perdita di funzionalità).
2. **Single Event Latch-up:** stato permanente e potenzialmente distruttivo dove una corrente parassita viene attivata lungo un percorso a bassa resistenza.
3. **Single Event Gate-Rupture:** rottura distruttiva di un gate dovuta al passaggio di un singolo ione energetico negli strati di ossido.

**Se un componente è sensibile a SEE non c'è molto da fare:
o si accetta il rischio, o si sceglie un altro componente...**

Annealing:

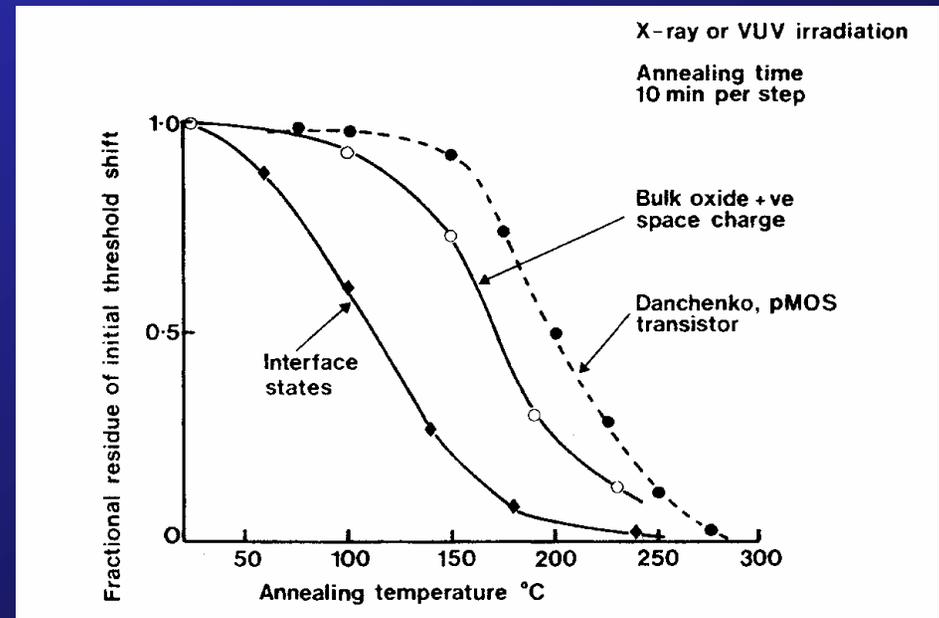
- Col tempo i dispositivi *possono* migliorare e recuperare in parte le loro prestazioni.
- Il processo è – in genere – accelerato dalla temperatura.
- Nello spazio, dove il flusso di radiazione è costante, si può agire sulla temperatura tramite “heaters”. In questo modo si possono mantenere le prestazioni entro livelli accettabili per tutta la durata della missione.

Esempio in figura.

Recupero delle prestazioni da parte di un MOS.

Il dispositivo viene riscaldato a step successivi.

Il ‘voltage shift’ causato dalla radiazione si riduce fino a tornare a valori simili a quelli originali.



4) danno da radiazioni su CCD

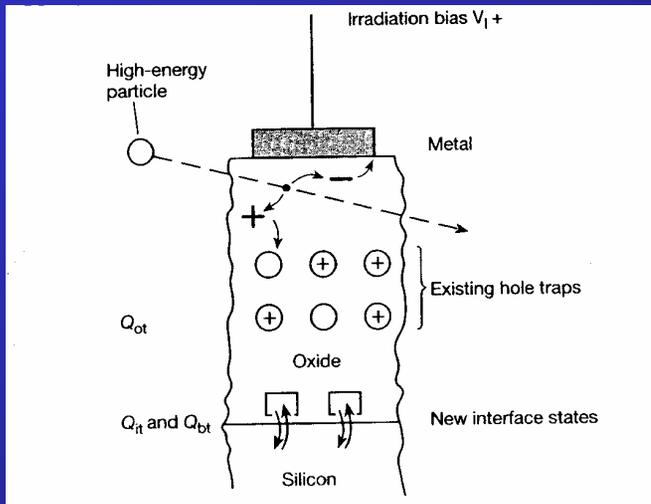
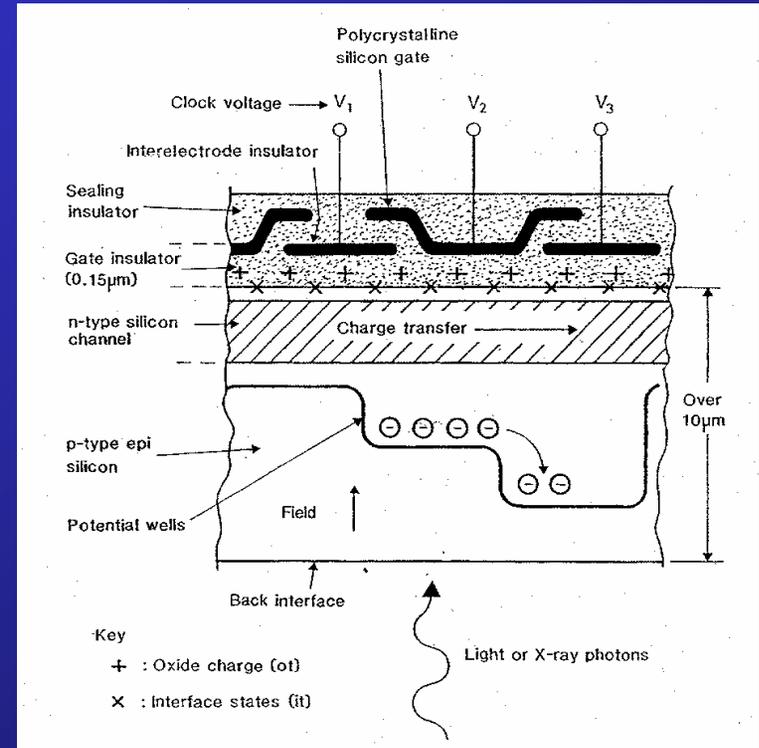
Danno da ionizzazione

Meccanismo di danneggiamento di un MOS (fig. sotto):

La particella ionizzante crea delle coppie $e^- - h^+$

Il voltaggio del gate separa le coppie che hanno diverse velocità di diffusione

Le h^+ rimangono intrappolate creando dei nuovi stati.



Nel CCD (sopra) le cariche vengono intrappolate nel layer isolante creando anche stati di interfaccia.

La presenza del "n-type channel" rende la presenza degli stati di interfaccia un problema secondario nei CCD.

L'effetto delle cariche intrappolate nell'ossido provoca uno "shift" nei potenziali.

Le linee sotto i "gates" rappresentano il potenziale di superficie ϕ_s . La linea continua rappresenta lo stato prima dell'irradiazione (ϕ_s) e quella tratteggiata dopo (ϕ_s').

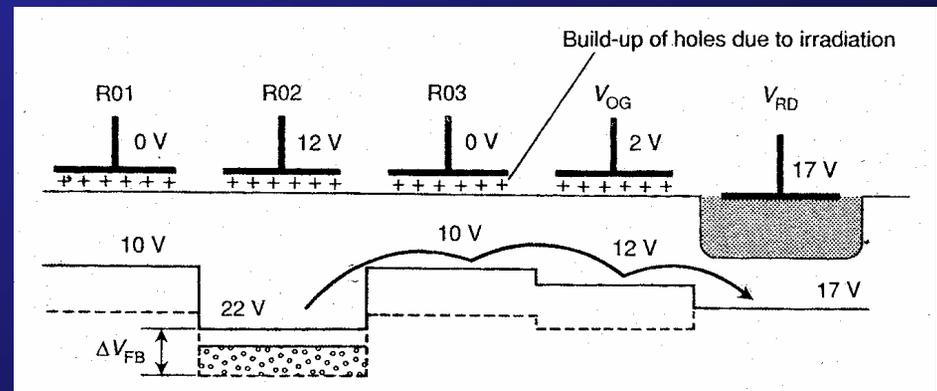
La carica intrappolata nello strato isolante equivalgono a un voltaggio addizionale.

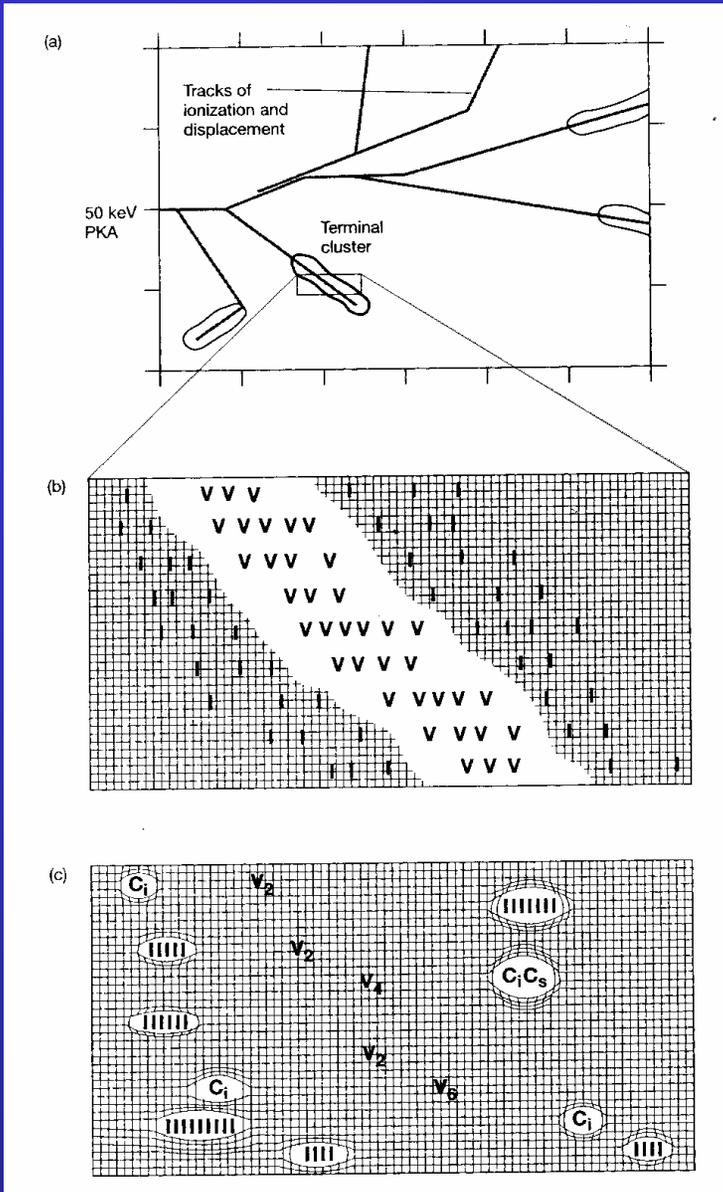
$$\phi_s = V_G + 10 = 22 \text{ V}$$

$$\phi_s' = \Delta V_{FB} + V_G + 10 = 32 \text{ V}$$

L'incremento del potenziale non ha effetti sulla capacità di trasferimento, fintanto che l'irradiazione è uniforme.

I problemi di efficienza si hanno al termine della riga, nel trasferimento al nodo di output.





Danno NON ionizzante di neutroni o particelle leggere energetiche

- PKA Primary Knock-on-Atoms. Viene prodotto un 'displacement tree' di molte migliaia di PKA. Le linee solide rappresentano piccoli volumi di danno; al termine di ogni ramo si forma un "terminal cluster", una zona caratterizzata da un'alta concentrazione di "vuoti" (V) e atomi interstiziali (I).
- Il terminal cluster appena formato.
- La struttura poi evolve nel tempo: quello che rimane sono gruppi di "vuoti" e di interstiziali. I "vuoti" possono essere occupati da impurità (C).

L'effetto finale è il cambiamento delle caratteristiche del materiale.

I problemi di trasferimento nascono dalle trappole nel semiconduttore che trattengono le cariche che formano il segnale e le rilasciano in maniera ritardata. Questo provoca deterioramento della CTE e aumento della *dark current*.

1) perdita di CTE (aumento CTI)

Sperimentalmente con:

N_T = densità di una trappola elettr.

N_S = la densità di segnale

G = parametro legato alla frequenza di rilascio di una trappola

F_i = grado di riempimento dell'*i*-sima *potential well*

$$\Delta \text{CTI} = N_T/N_S \cdot G \cdot \sum F_i \sim KN_T \text{ (quasi un damage factor... } K_c \cdot \phi)$$

2) aumento di dark-current.

Si tratta di cariche generate dai difetti nella zona di raccolta del segnale (*bulk dark current*), cioè nella regione di svuotamento. Esse si sommano al segnale come corrente “parassita”.

Come nel caso dei diodi, si può definire una “*volumetric leakage current*” ΔJ_v proporzionale alla fluenza di particelle ϕ e a un fattore di danneggiamento α

$$\Delta J_v = \alpha \cdot \Phi$$

Nel caso dei CCD, dove abbiamo una *array* di volumi generatori, la *dark current* ha una distribuzione Gaussiana sommata a una coda non-Gaussiana dovuta a ‘hot-spots’ (spikes) generati da cluster di difetti.

5) test di qualifica

Norma ESA/SCC Basic Specification No. 22900

“Total Dose Steady-State Irradiation Test Method”

“The purpose of this specification is to define the requirements for testing semiconductor devices and integrated circuits, for the effects of total ionising dose and/or displacements damage.”

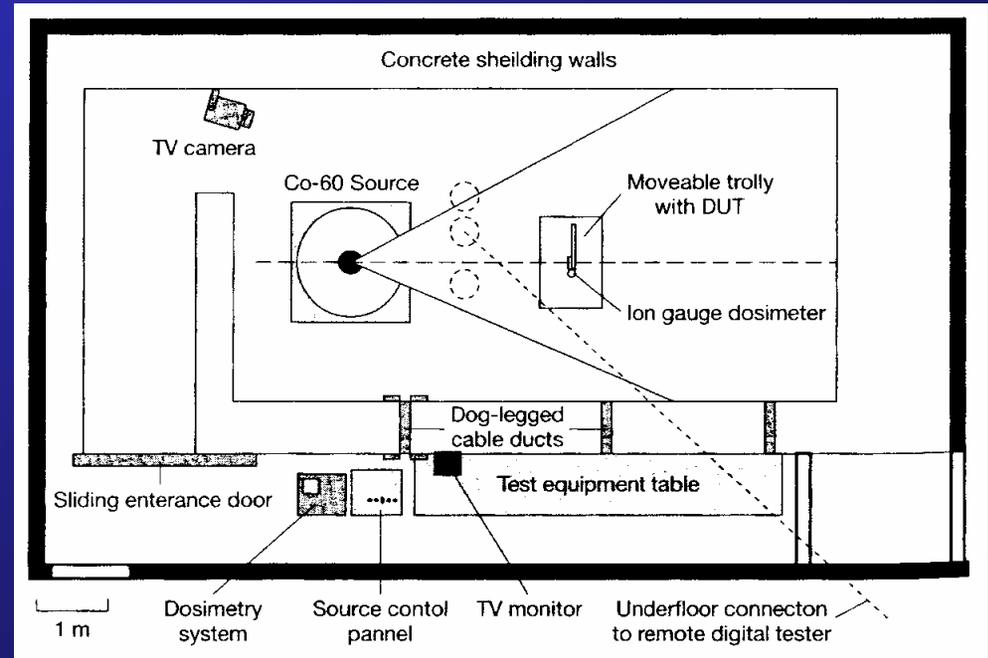
In pratica testare un dispositivo significa esporlo ad una sorgente di radiazione e compiere test funzionali.

Sorgenti “consigliate”:

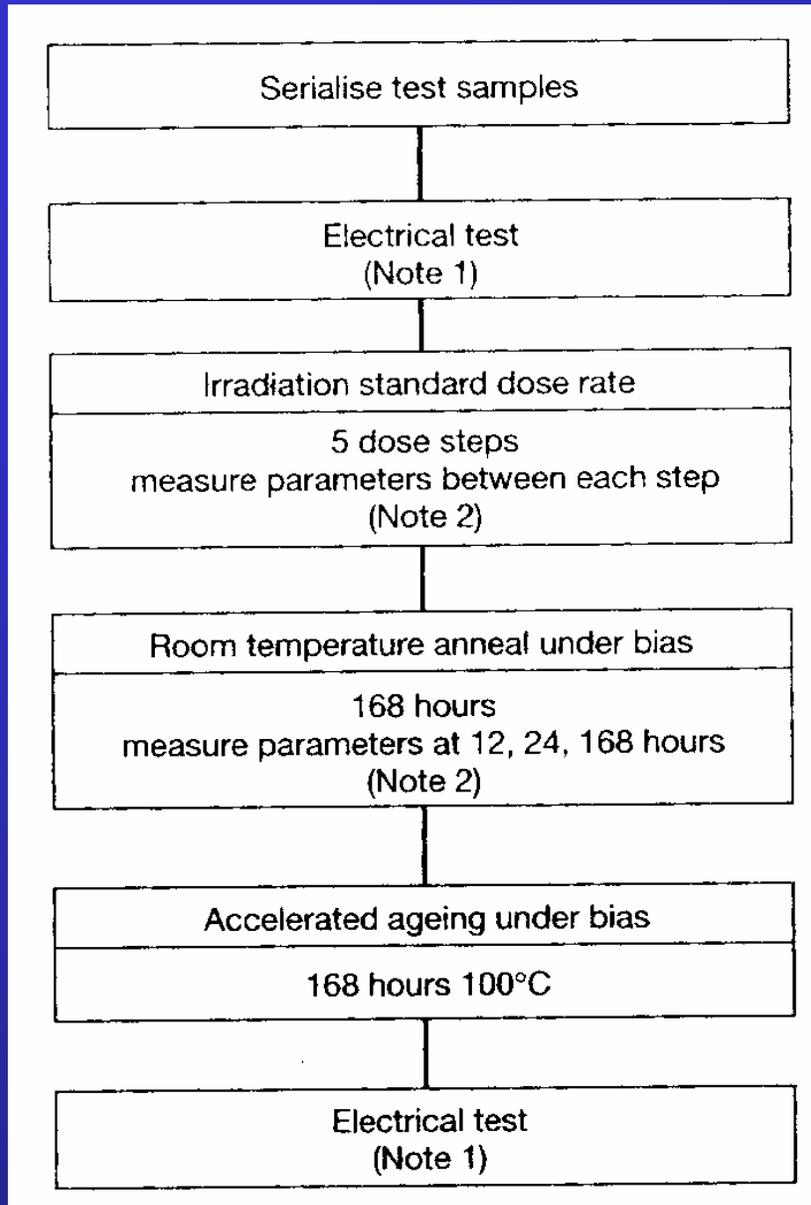
NIEL -> elettroni min. 2.5 MeV

TID -> Cobalto 60

Altre sorgenti si possono usare a patto di dimostrarne l'equivalenza.

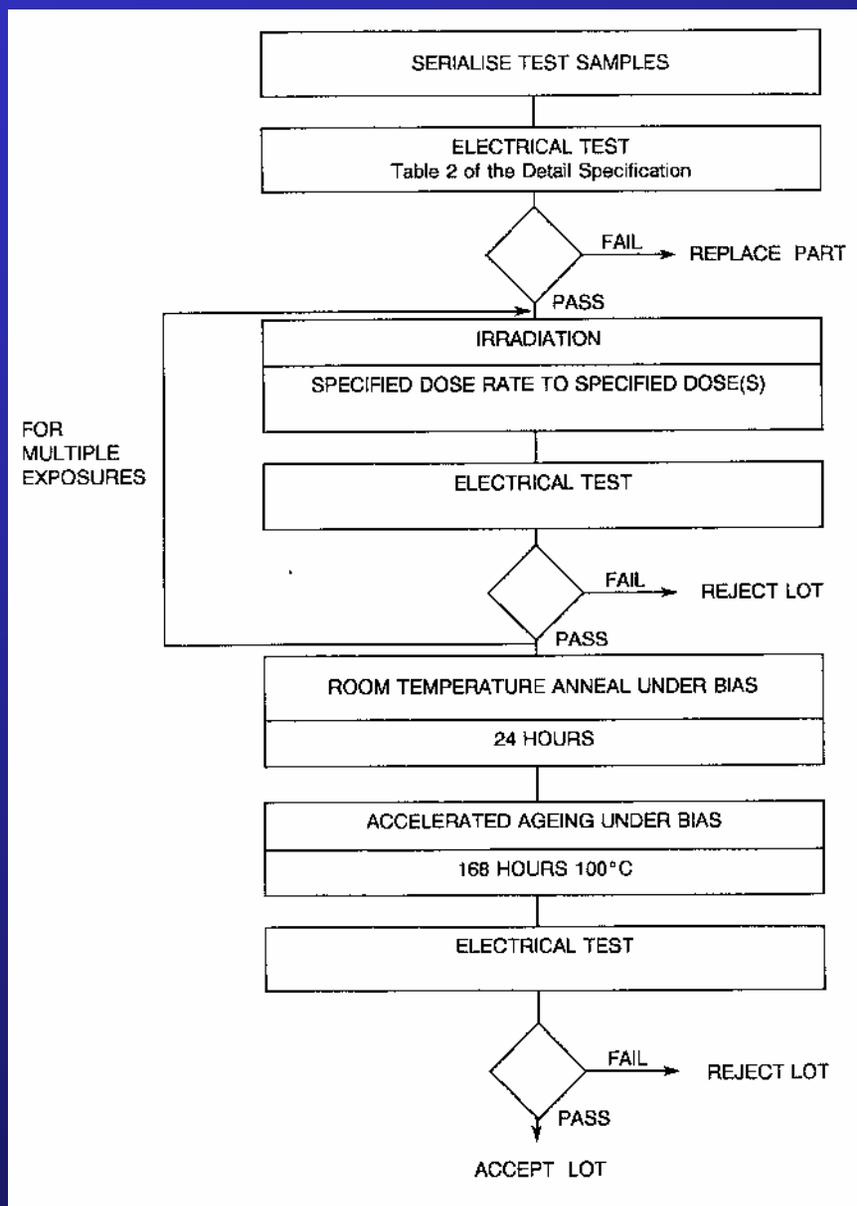


Laboratorio per test di irradiazione all'ESTEC (Olanda)



Componente nuovo.

Accettazione Lotto.



Norma ESA/SCC Basic Specification No.25100

Single Event Effects Test Method and Guidelines

“The purpose of this specification is to define the requirements for the testing of integrated circuits and discrete semiconductors for SEE arising from irradiation by energetic heavy ions or protons.”

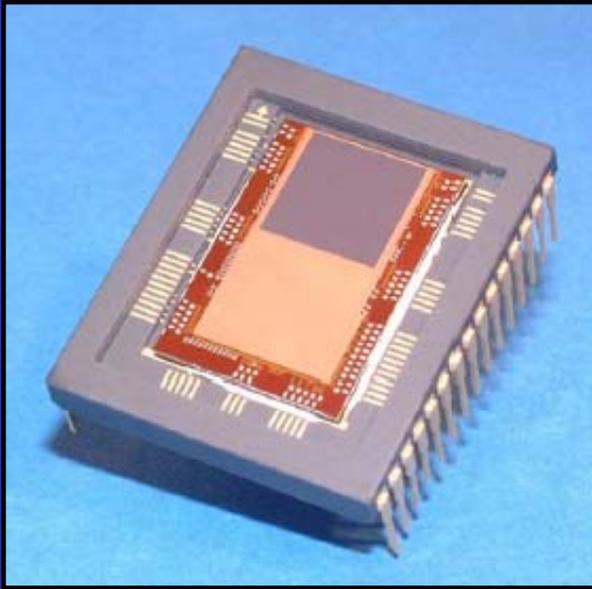
In questo caso e' necessaria una previsione statistica. Non si può essere certi che un SEE, anche distruttivo, non avverrà. Testando il dispositivo si può *stimare la probabilità* che questo avvenga e decidere se accettare il rischio.

Il test avviene bombardando il chip con flussi di ioni pesanti con LET crescente (almeno da 10 a 45 MeV-cm²/mg) e contando il numero di SEE.

Poi tramite i modelli orbitali si stima il flusso di particelle che investirà il dispositivo durante la missione.

Unendo i risultati si ottiene un *“occurrence rate”* (numero di eventi al secondo) che dovrà essere valutato dal *“risk management”*.

6) Test di caratterizzazione CCD per AMICA (CARSO, Trieste)



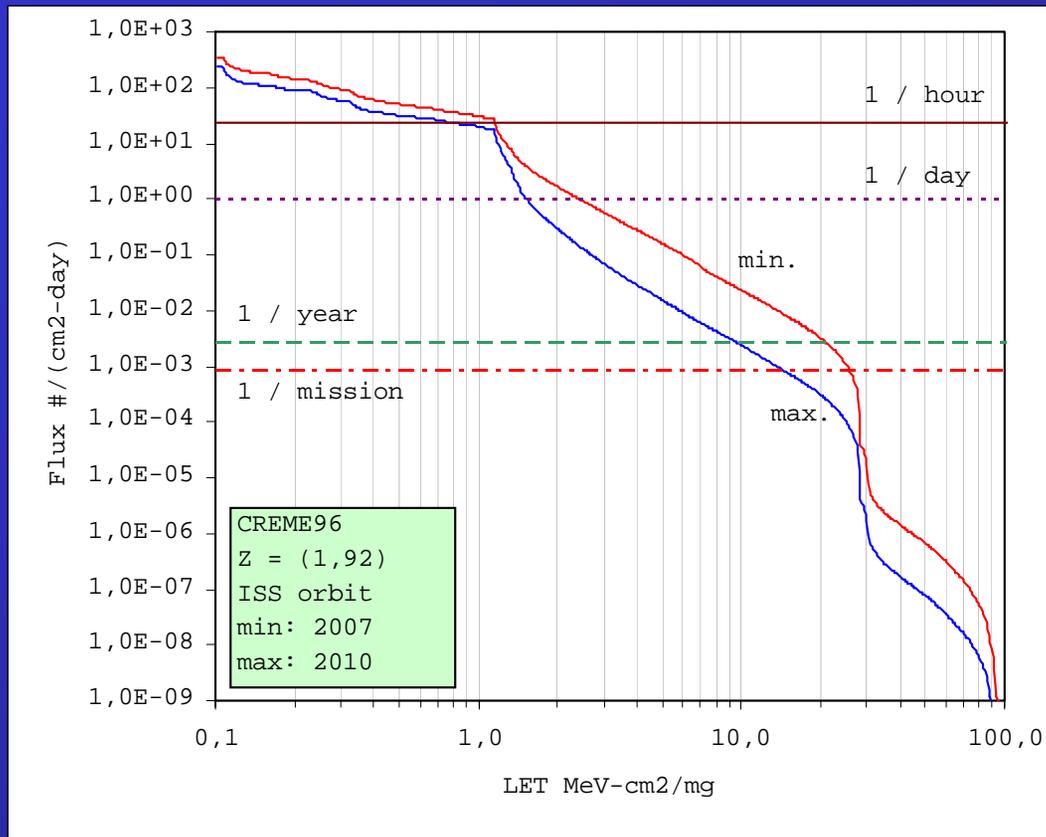
The design of AMICA with its tight requirements on speed, sensitivity and compactness, can receive great benefits from the adoption of the new e2v CCD87-00.

Active image area	8.192 x 8.192 mm
Image section active pixels	512(H)x512(V)
Total horizontal pixels	536
Total vertical pixels	528
Overscanning pixels – dark reference	24
Overscanning rows	16
Pixel size	16x16 μ m
Number of output amplifiers	2
Output HR amplifier responsivity	5.3 μ V/e-
Output LS amplifier responsivity	1.15 μ V/e-
Fill factor	1
Spectral range	400 \pm 1060 nm

The technology improvement which resides on this new type of CCD brings both high read-out speed and high sensitivity.

Can this device be utilized on ISS orbit for a period of 3 years?

COSMIC RAYS:



In general not a problem for “ordinary” CCD.

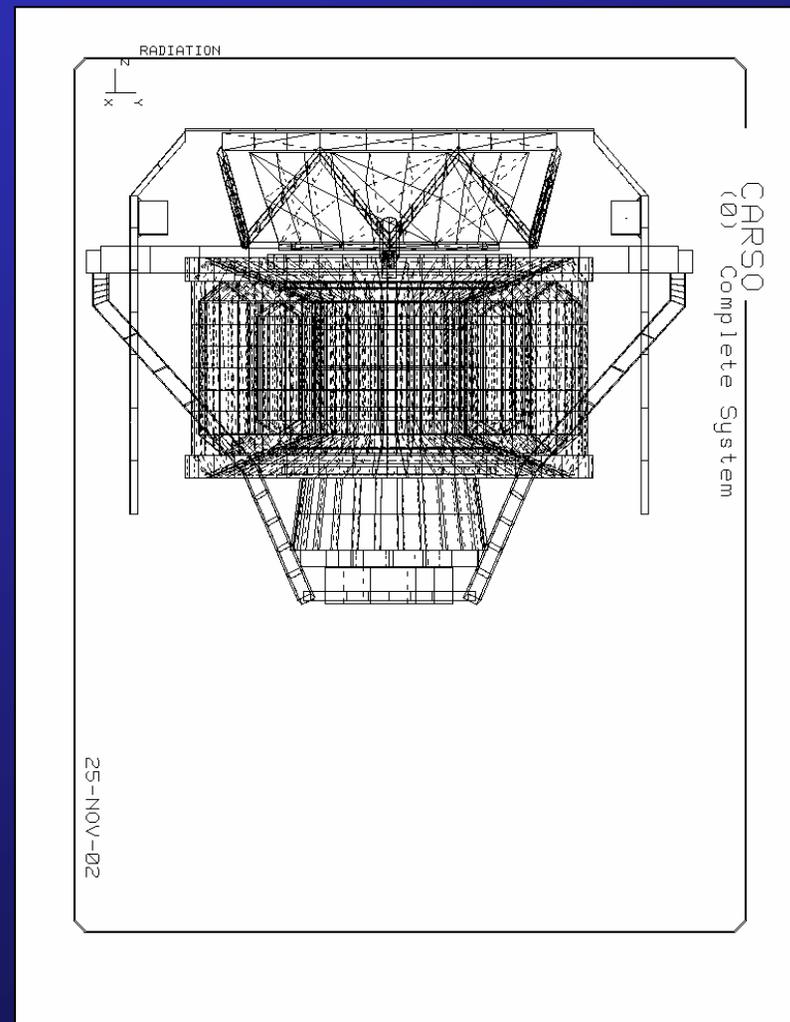
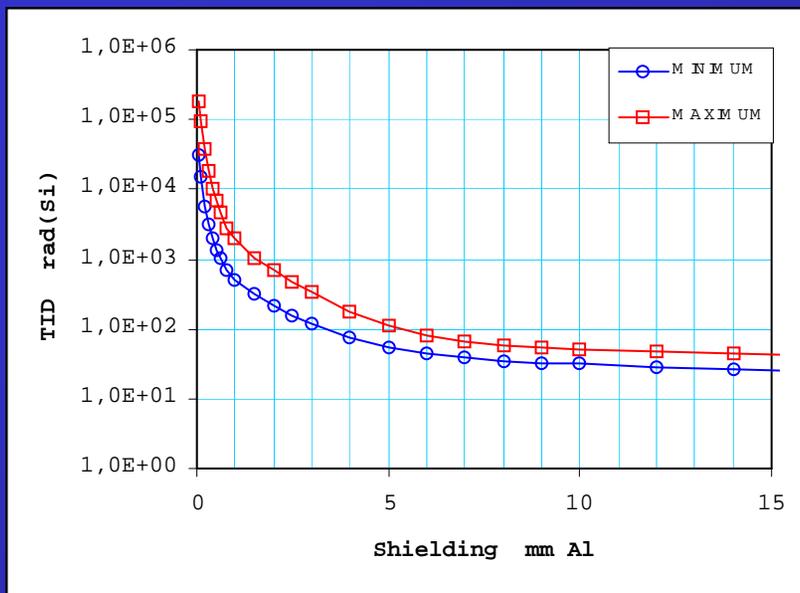
In CCD87 high voltage (~40V) and very thin layers coexist.

We cannot a priori exclude the possibility of destructive SEE occurrence.

e2v do not give any indication about this, and few radiation test reports exist.

The risk of possible activation of destructive phenomena is considered unacceptable: this is the main motivation of the performed HI test.

TOTAL IONISING DOSE:



A well known CCD problem (CTE, dark current).

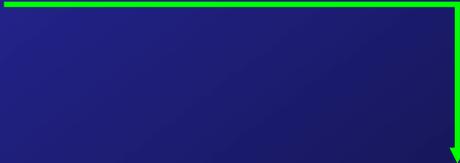
Estimates done with SPENVIS and ESABASE indicate a dose inside ASTC of less than 50 rad/y.

Utilized ions (checked with SRIM 2003):

C	@ 94 MeV	LET = 1.6	MeV-cm ² /mg
Si	@ 157 MeV	LET = 9.4	MeV-cm ² /mg
Ti	@ 196 MeV	LET = 23.0	MeV-cm ² /mg
Ni	@ 220 MeV	LET = 30.7	MeV-cm ² /mg
Ag	@ 266 MeV	LET = 46.2	MeV-cm ² /mg

Fluxes for each ion:

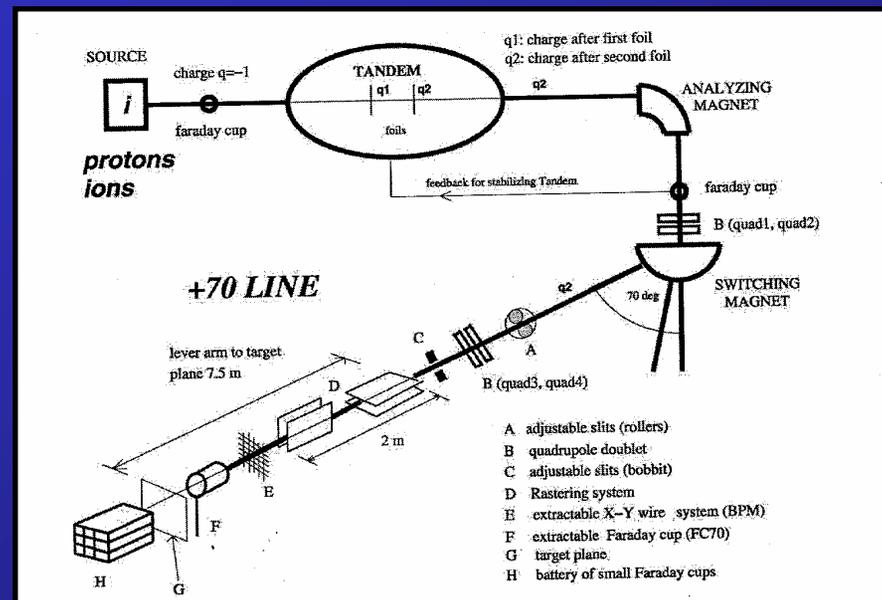
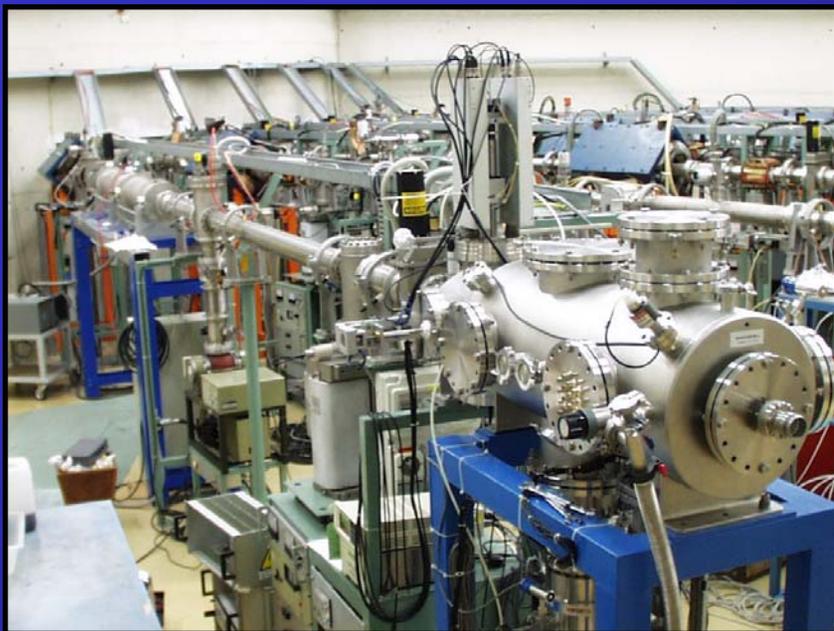
- LOW < 100 (100 images)
- MID \approx 500 (50 images)
- HIGH = 10^4 (1000 s) except Ti



Fluence/ion = 10^7 ions/cm²

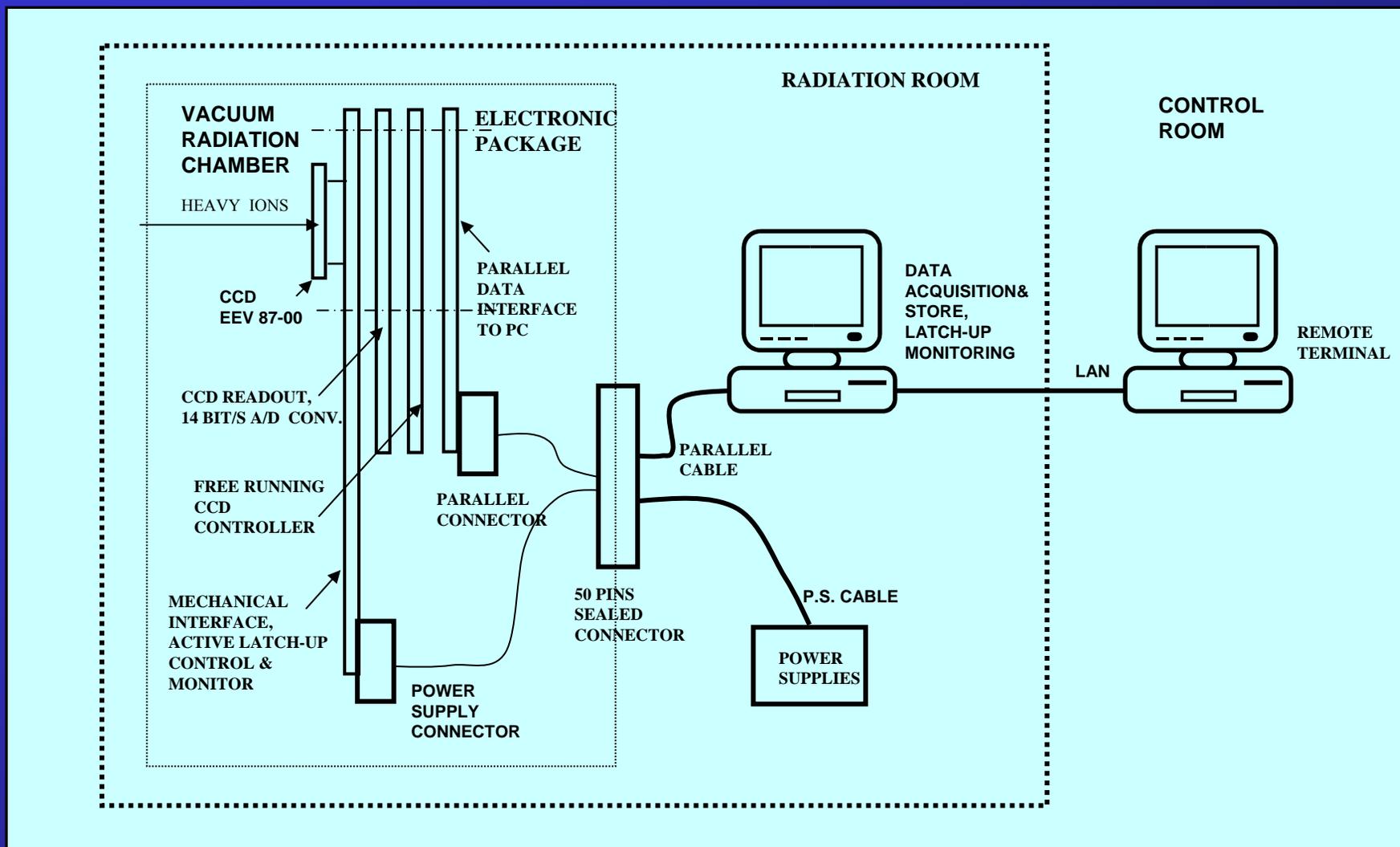
TID (test end) = 15 Krad

SIRAD facility at the LNL
TANDEM accelerator (14 MV)
capable to deliver protons and
ions up to Gold.

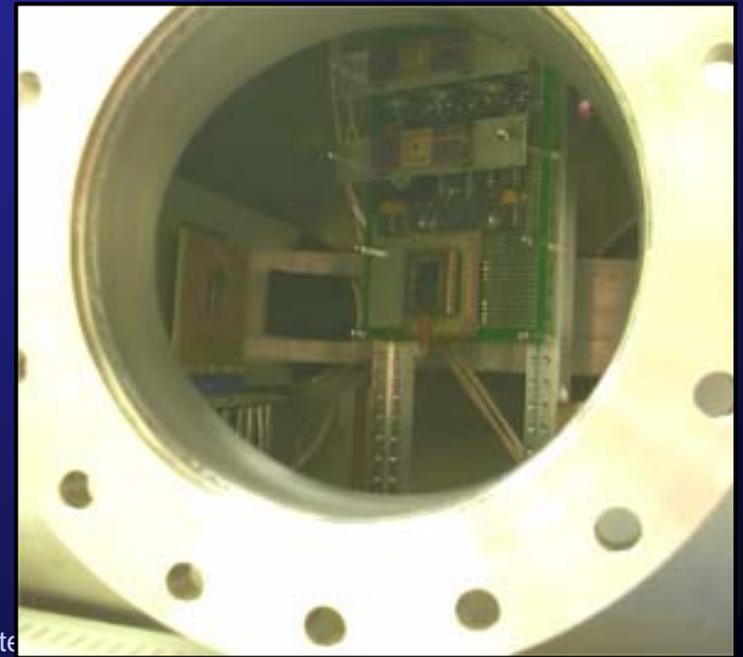
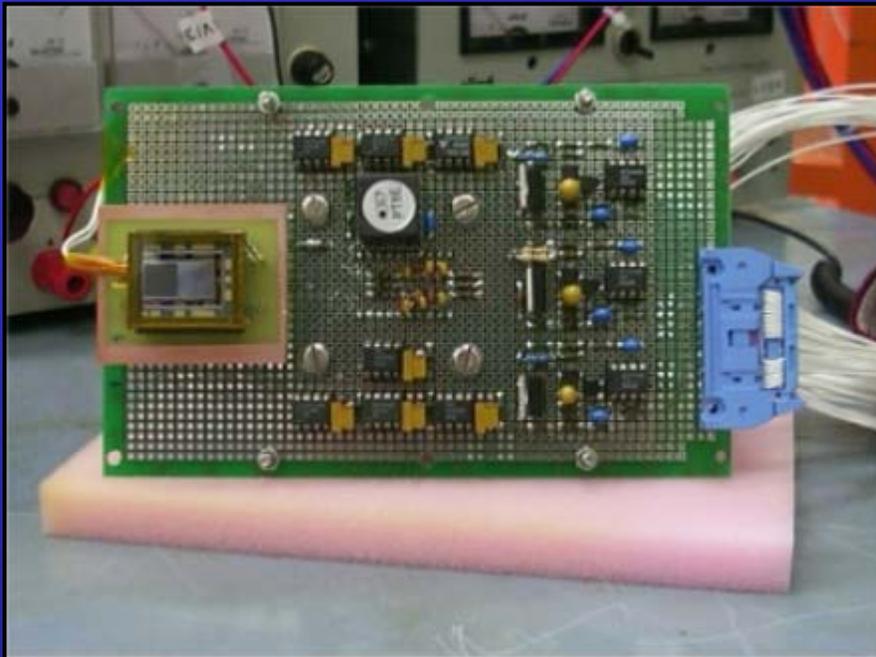


The aim was to investigate:

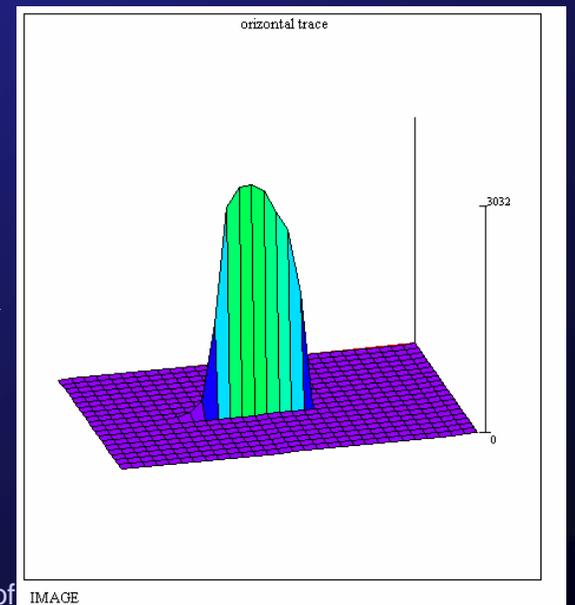
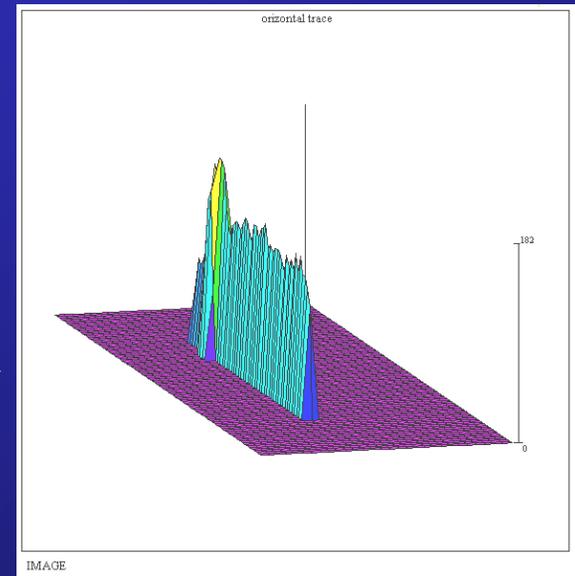
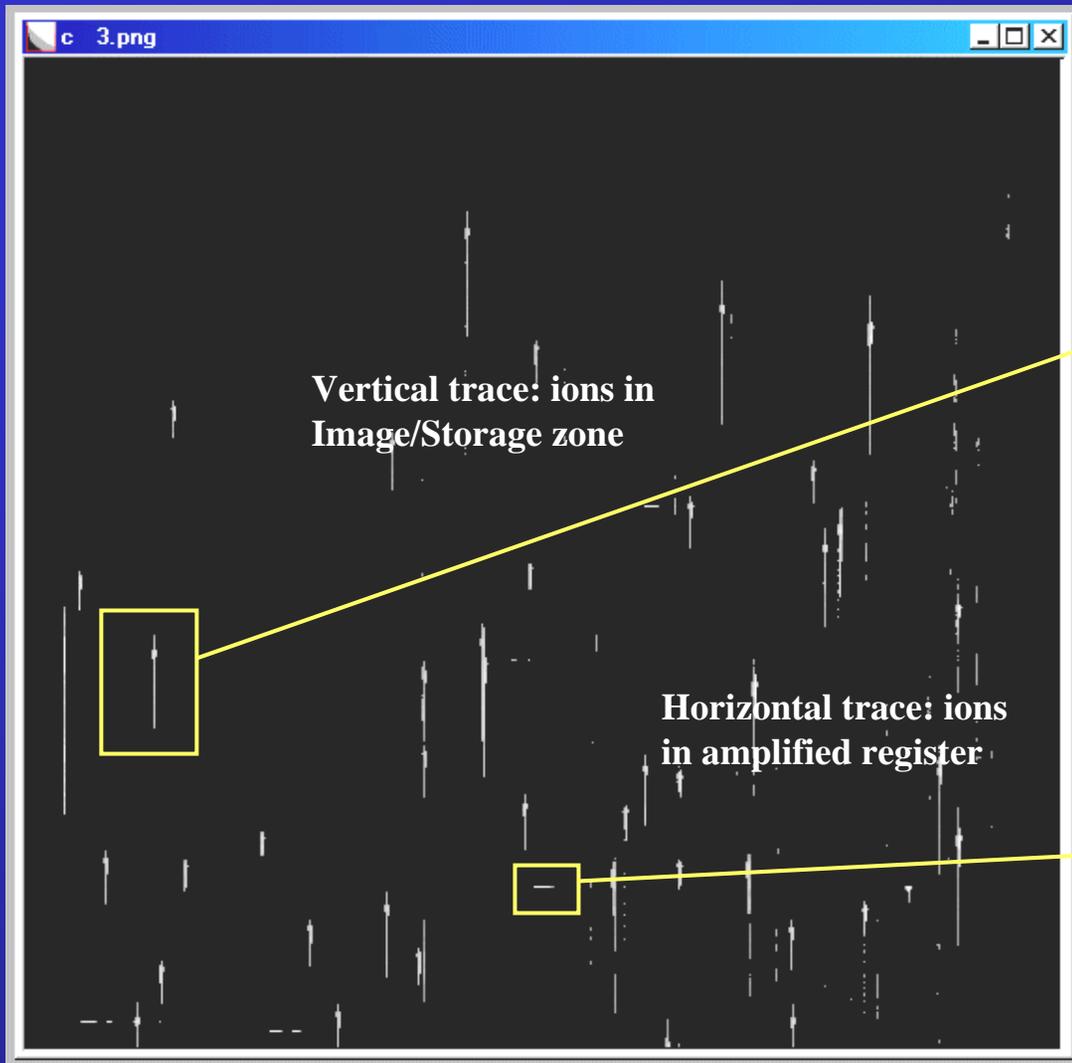
- the occurrence of destructive SEE
- the signals due to CR
- the effect of total dose

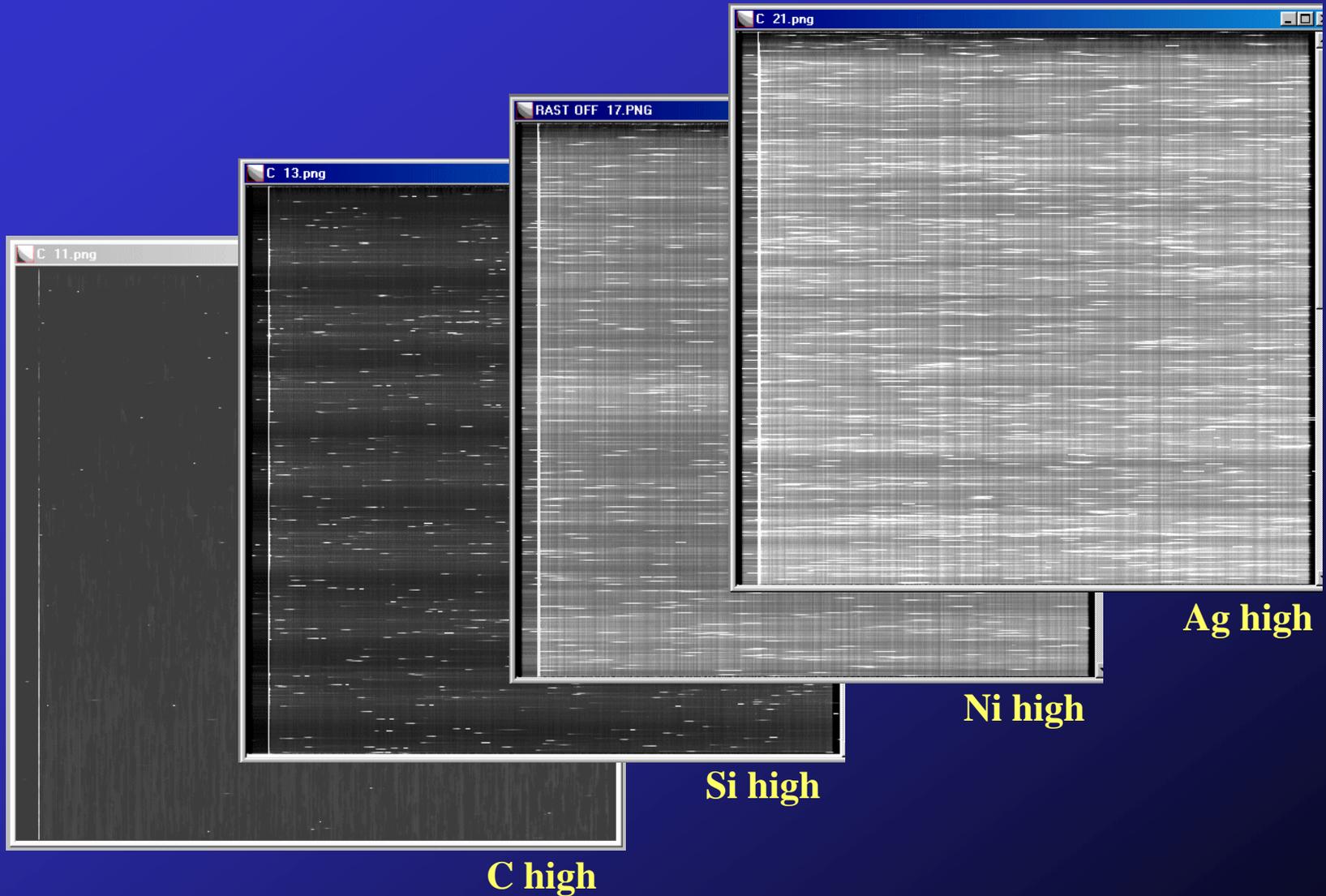


The test was performed
the 3rd and 4th may 2003



delle Alte





Neither SEL nor other destructive events occurred.

No pixel went permanently blind.

Assuming:

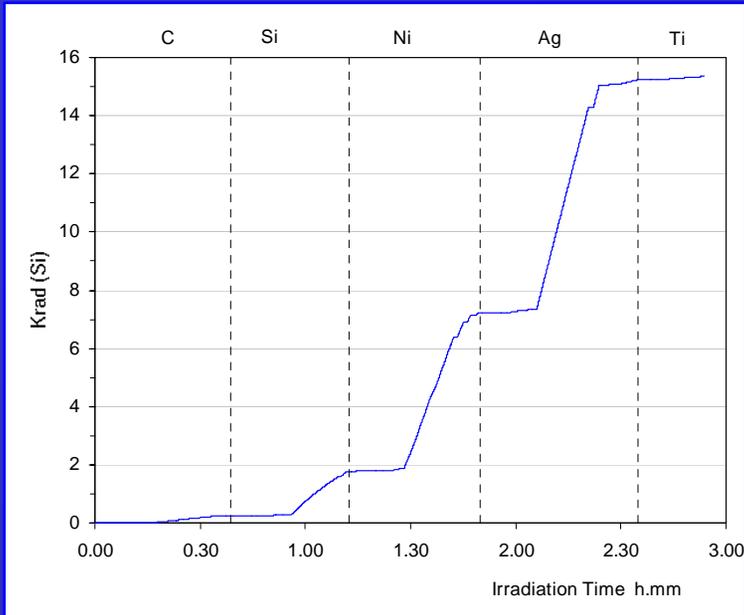
$$\text{LET}_{\text{th}} = 46 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$$

$$\sigma_{\text{SEE}} = \begin{cases} 1.5 \text{ cm}^2 ; & \text{LET} \geq \text{LET}_{\text{th}} \\ 0 \text{ cm}^2 ; & \text{LET} < \text{LET}_{\text{th}} \end{cases}$$

The occurrence rate is:

$$\sim 1.8 \cdot 10^{-6} \text{ day}^{-1}$$

This represents a very conservative estimate, as a so-assumed cross section seems unlikely.

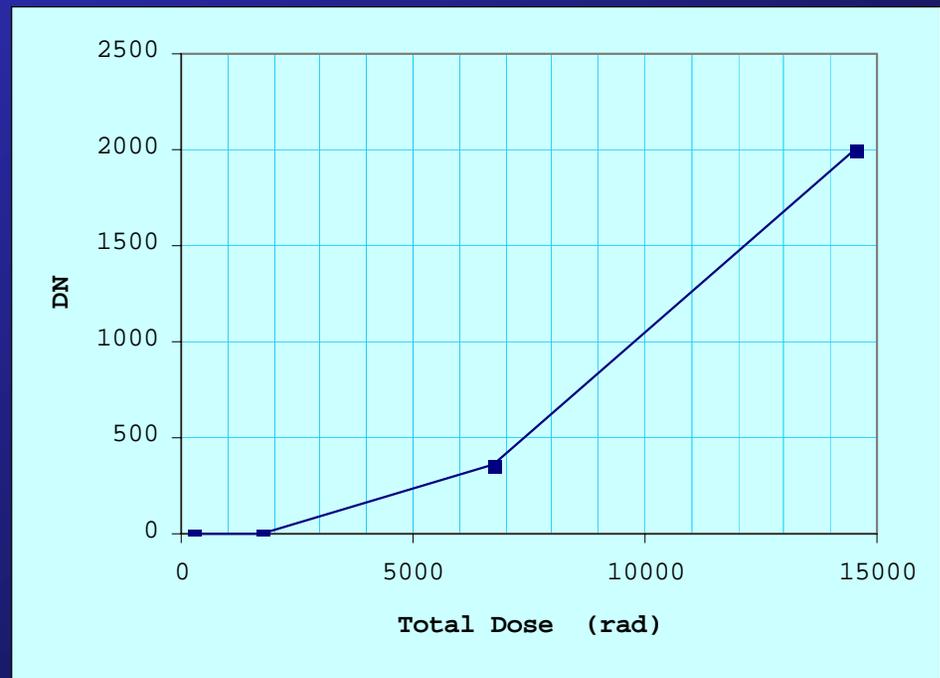


The dark current was increasing as the test went on, but remained at acceptable level till 1.5 krad.

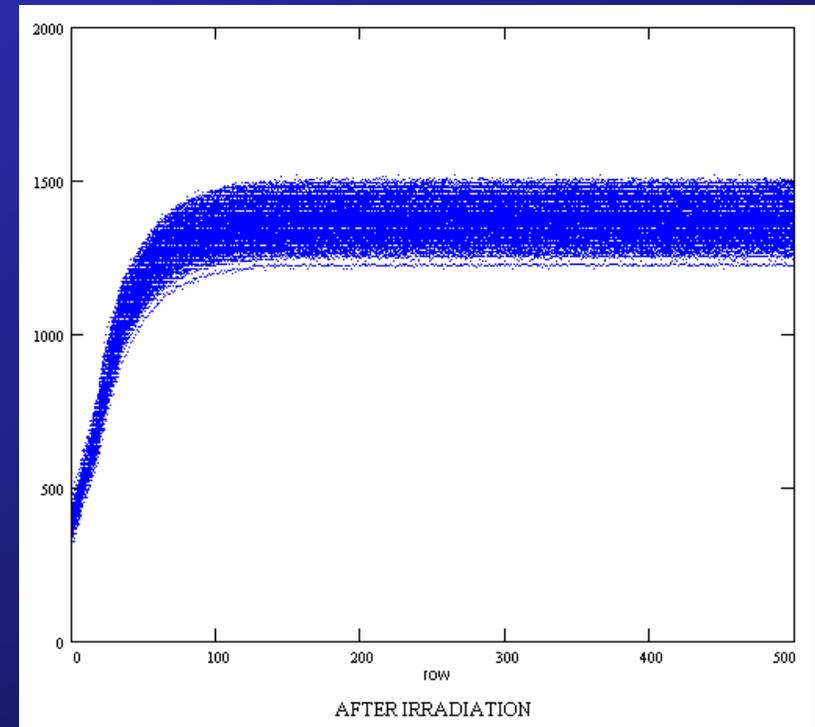
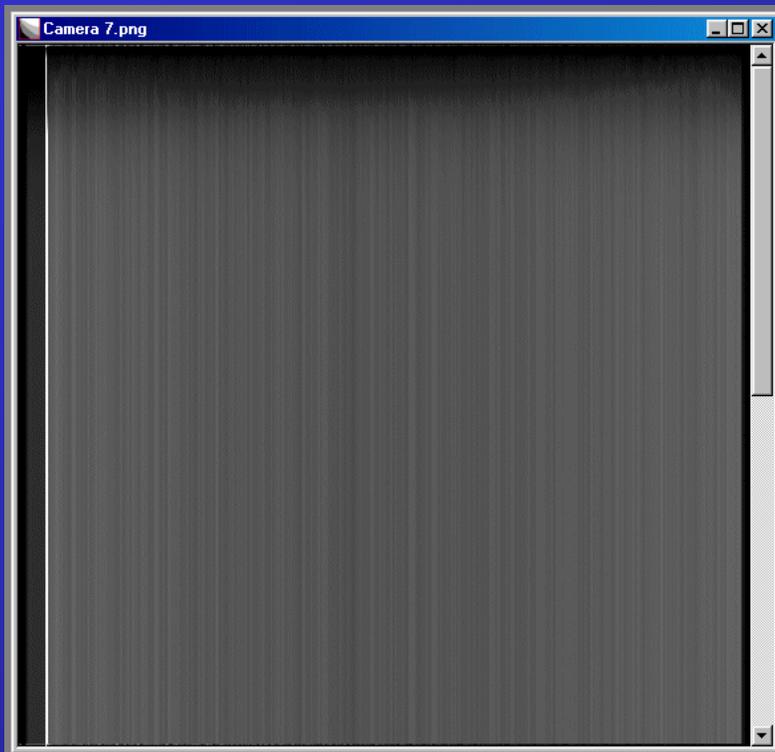
DN refer to a 13 bit sample \Rightarrow
full-well is 8191 DN

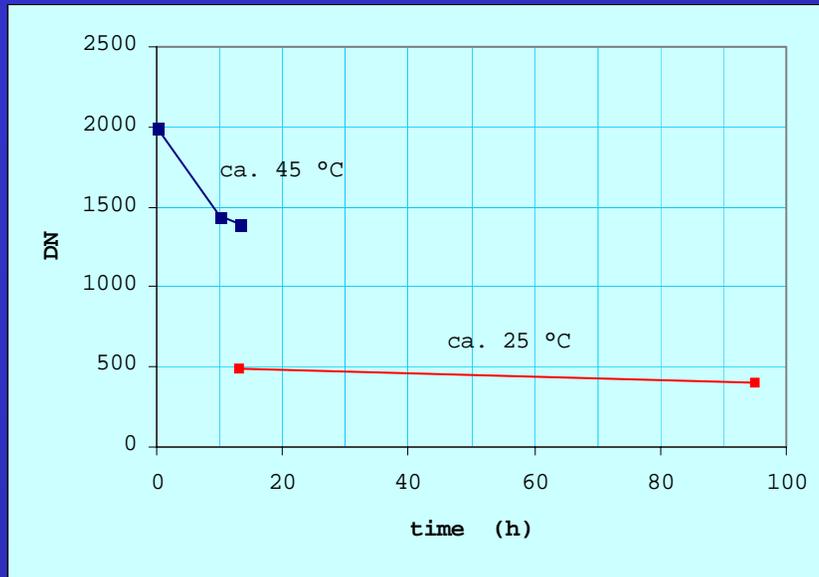
The Total Dose is computed from the LET values and the total fluence.

The final TID was of some 15 Krad, two orders of magnitude greater than that foreseen during the entire AMS mission.



At the end of the test, the dark current and the degraded CTE were sufficient to saturate the CCD.





In the hours after the irradiation, the device showed a certain recover.

This led us to perform an high-temp annealing procedure, to understand the recovery capabilities of the irradiated ccd.

Before this, we have modified the gate voltages to let the charge flow well under the interface SiO_2/Si and to compensate the possible oxide charging.

In this way we have improved CTE, but to the detriment of full-well capacity.

We have also begun to sample the output voltage at 14 bit.

We have performed:

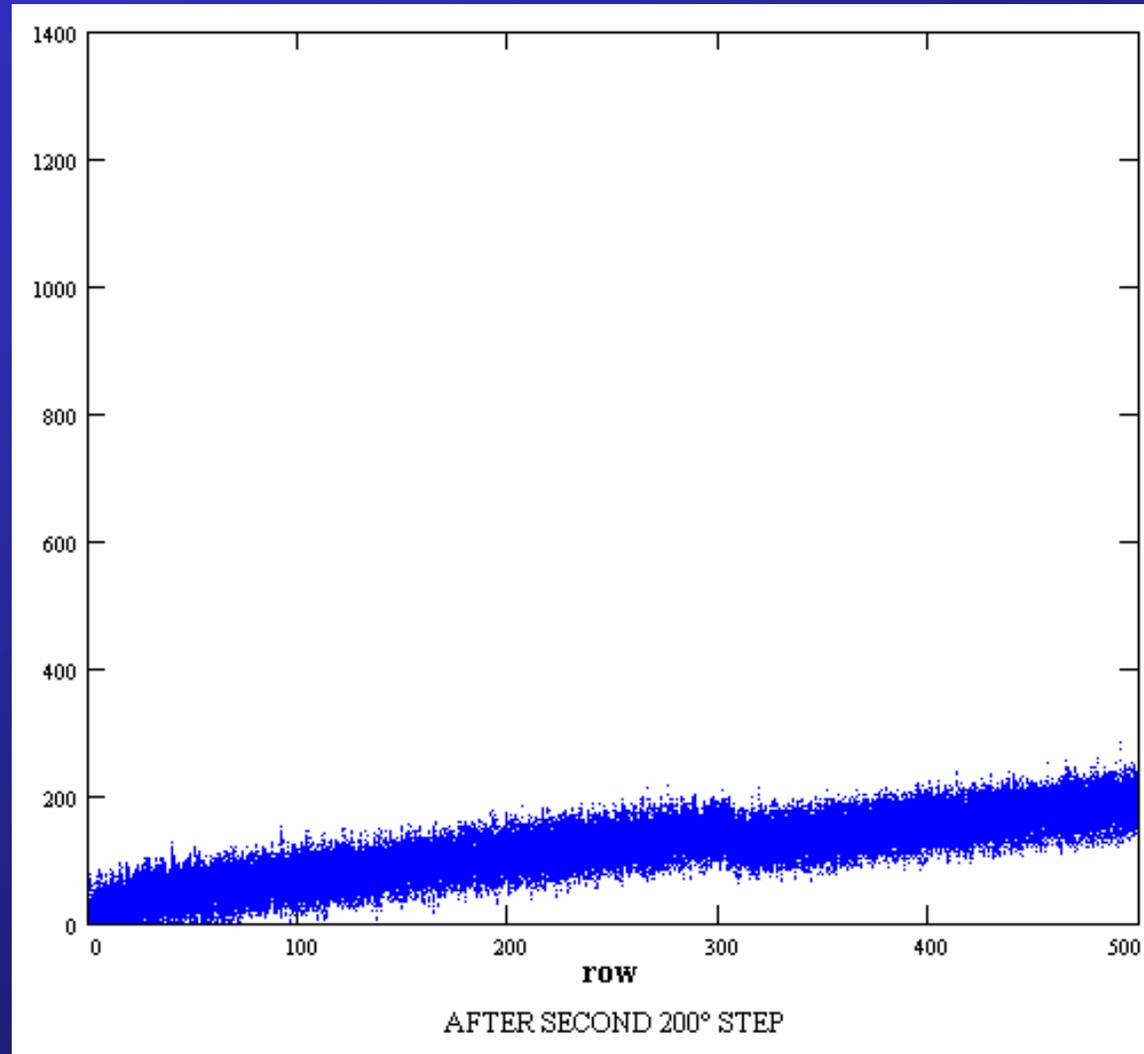
2 sessions: 180 min at 150°C

2 sessions: 150 min at 200°C

The results of annealing have been noticeable.

This improvement led us to return at nominal gate voltage.

After the optimization of parameters we are going to decide if keep on raising the temperature.



Riferimenti Bibliografici:

Gerald C. Holst, “CCD Arrays, Cameras and Displays”, JCD Publishing & SPIE Optical Engineering Press, 1996.

A. Holmes-Siedle & L. Adams, “Handbook of Radiation Effects”, Second Edition, Oxford University Press, 2002

Optical Engineering, Volume 26 Number 10, October 1987, SPIE