

Scuola Nazionale Biennale

"Rivelatori ed Elettronica
per Fisica delle Alte Energie,
Astrofisica,
Applicazioni Spaziali e
Fisica Medica"

IV Edizione

INFN Laboratori Nazionali di
Legnaro

11-15 Aprile 2011

April 12, 2011

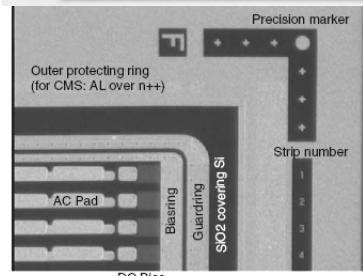
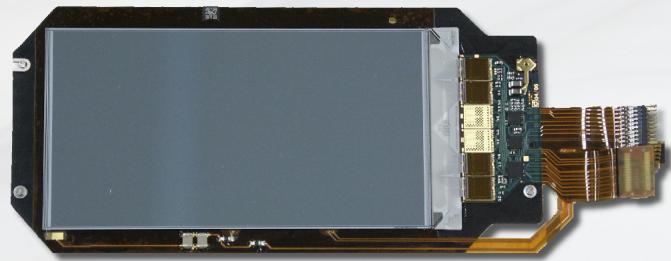
**Danno da
Radiazione
Macroscopico in
Rivelatori a
Semiconduttore**

A.Messineo
Università degli Studi di Pisa

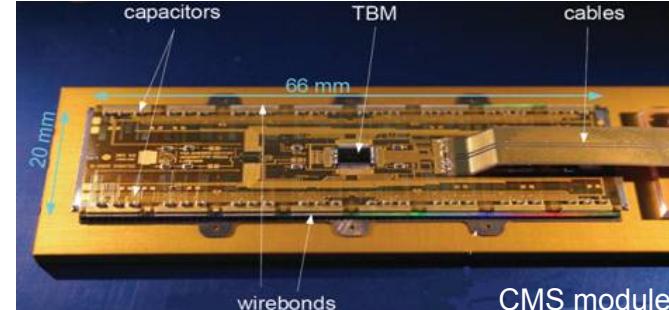
Danno da Radiazione Macroscopico in Rivelatori a Semiconduttore

Parte I

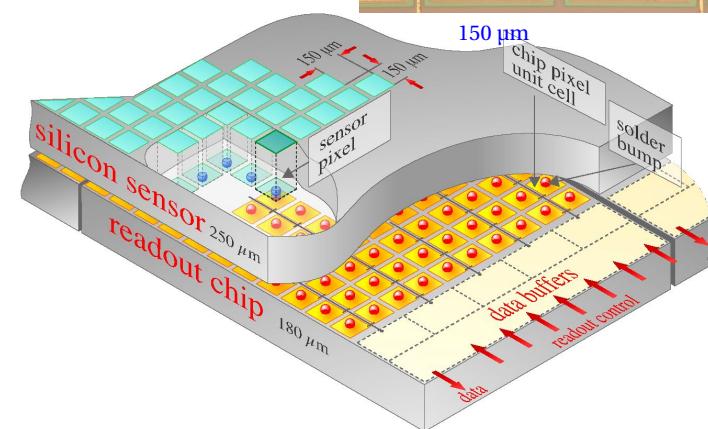
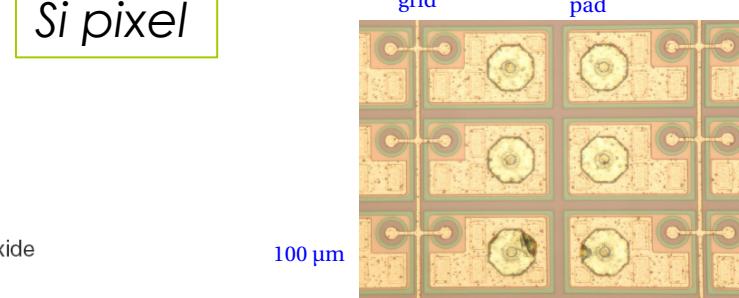
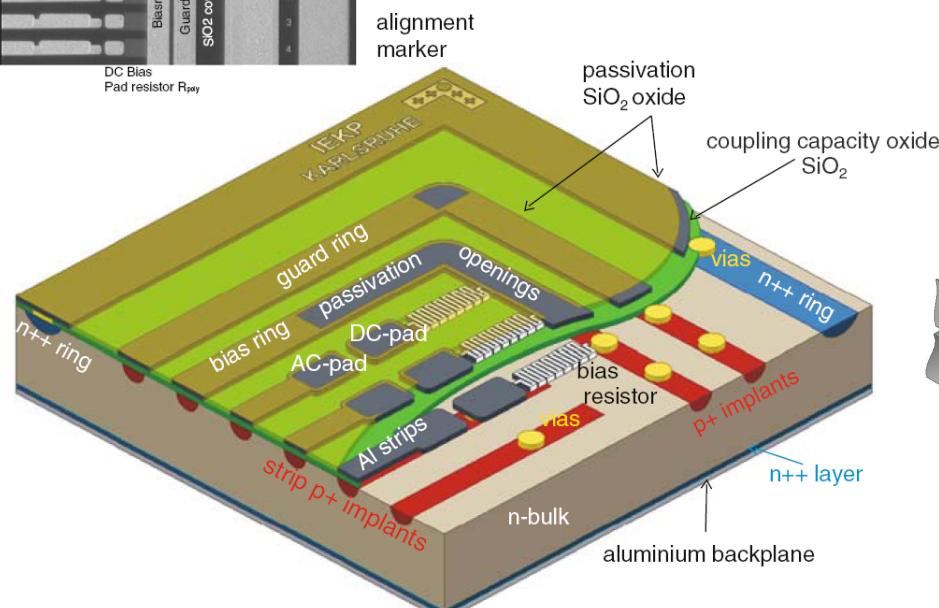
Rivelatore a semiconduttore (Si)



Si micro-strip



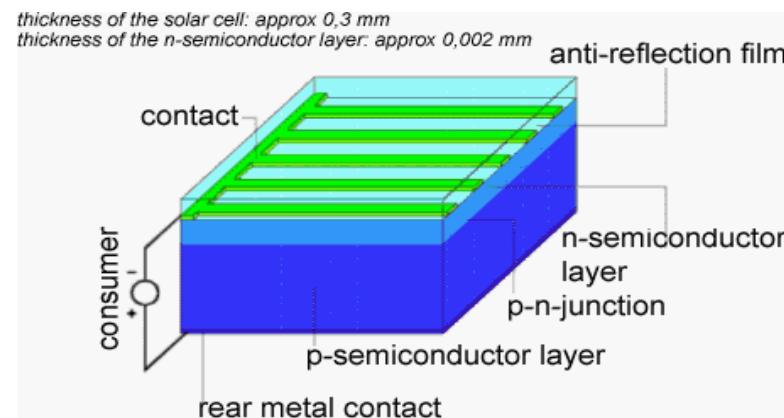
Si pixel



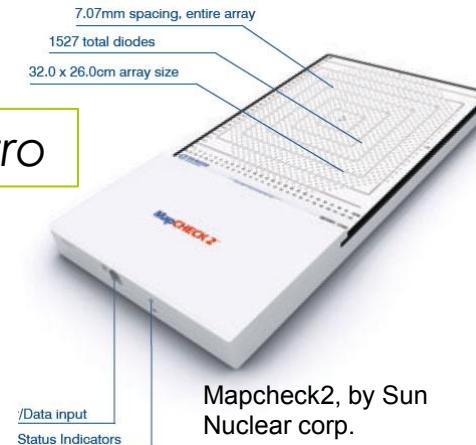
Rivelatore a semiconduttore (Si)



Si cella solare

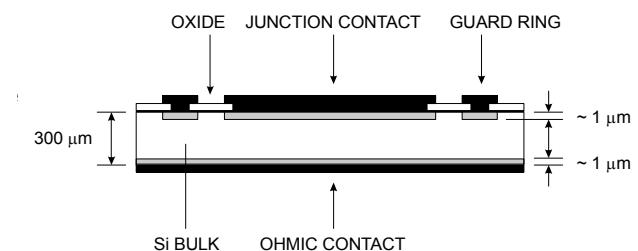


Si dosimetro



Mapcheck2, by Sun Nuclear corp.

Sensor: n-type diode, Pt doped;
Detectors active area: 0.64mm²;
Active volume: 0.019mm³;
Sensitivity: 32nC/Gy;



Rivelatori sensibili alla posizione

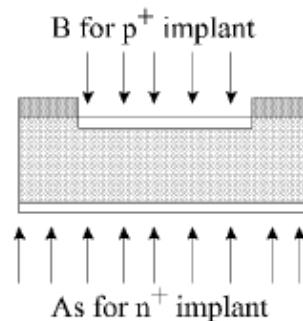
- Dal diodo planare ai rivelatori strutturati

Processi litografici

(a) n-type silicon wafer



(d) doping by ion implantation



(b) oxide passivation

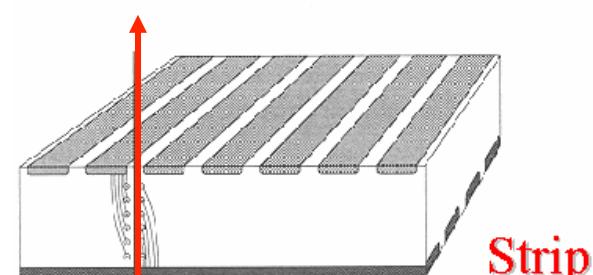


(c) opening of windows

(e) aluminum layer on both sides
patterning of front side

Segmentazione della giunzione

— n⁺ — p⁺



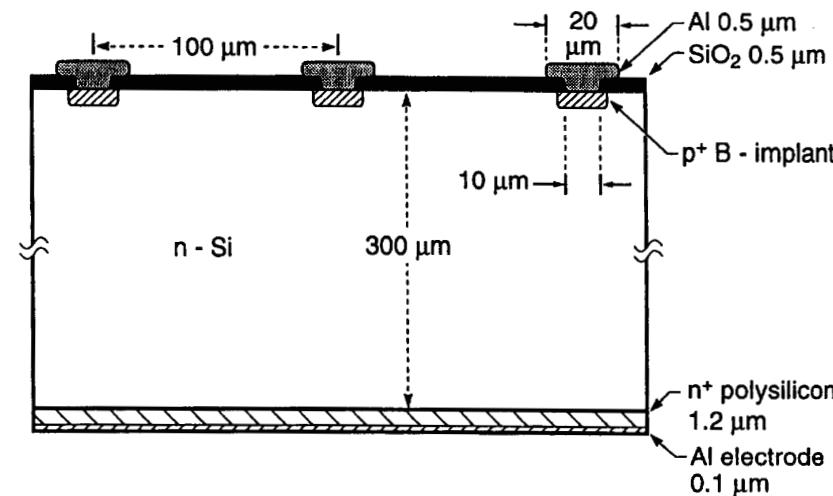
Strip

Pad/Pixel

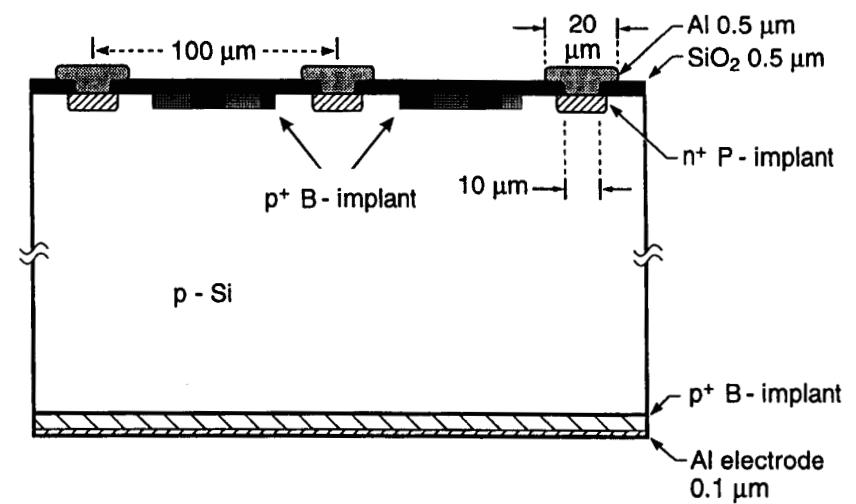
Rivelatori segmentati

- Esempio di rivelatori a strips : impiantazioni e strati principali

Bulk di tipo n

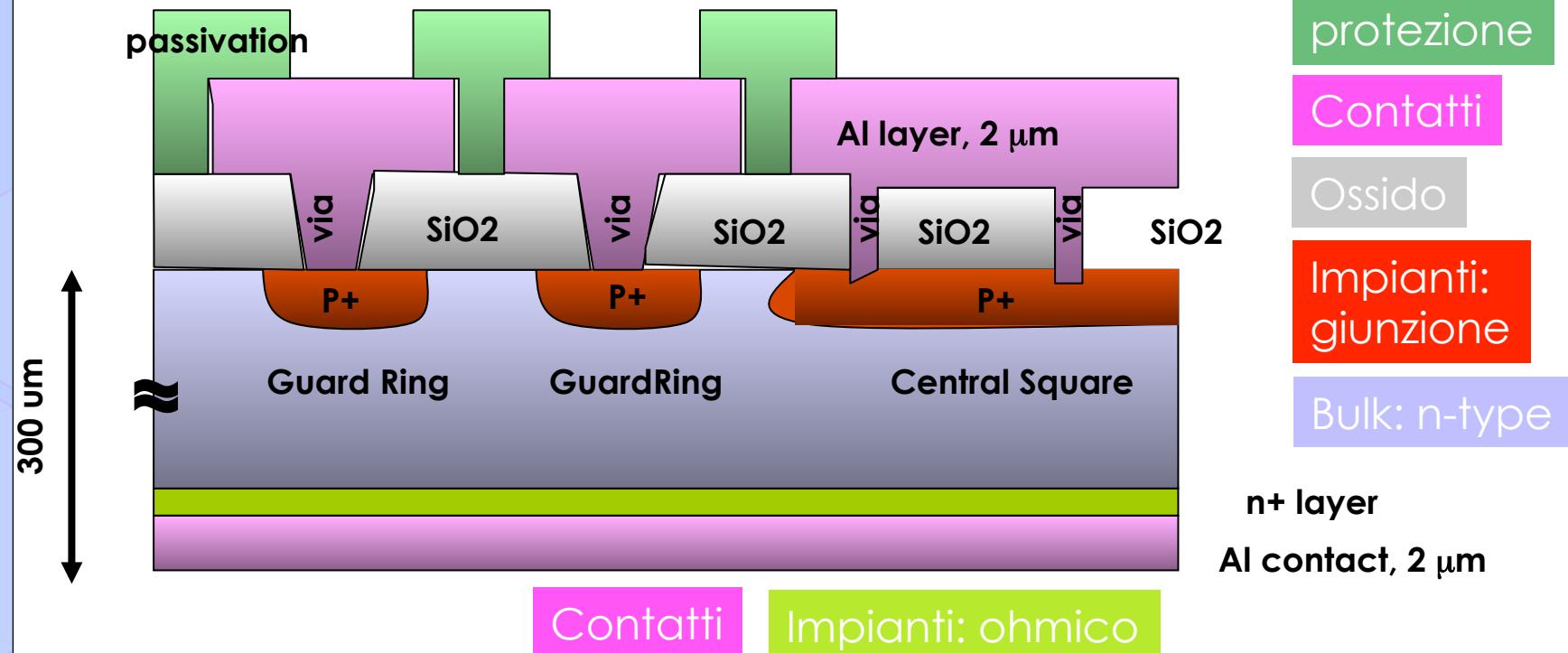


Bulk di tipo p



Parti essenziali di un rivelatore: diodo

Disegno non in scala



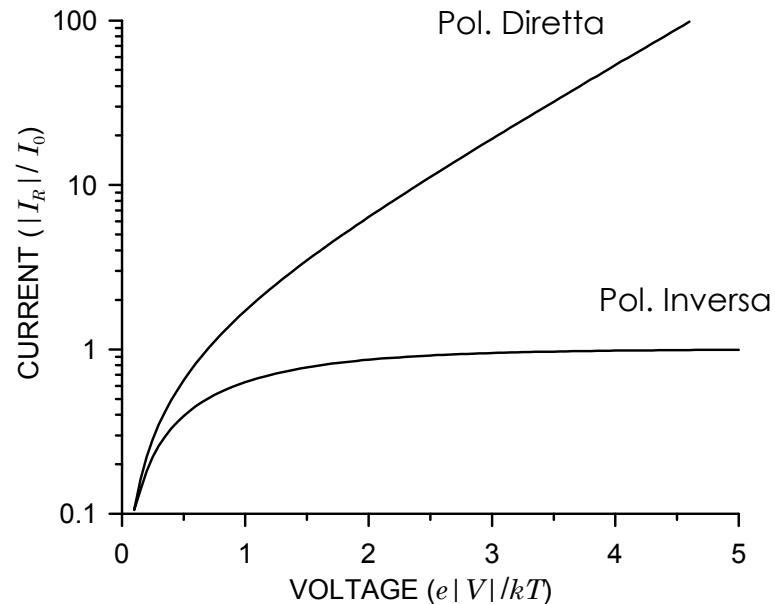
- I dettagli geometrici di ciascun componente sono finalizzati alle prestazioni di rivelazione

Caratteristica Corrente-Tensione (Leakage current)

- La tecnologia attuale permette di costruire rivelatori al Si su wafer con diametro di 6" con densità di leakage current pari a 100-150 nA/cm² registrata a tensione di bias elevata (500V)
- E' questo il livello di qualità su cui si sono costruiti gli apparati che gli esperimenti ai presenti colliders e raggiunto con la tecnologia di crescita dei lingotti con metodo Fz n-type.

$$J_0 = \frac{ni}{2\tau_0} qeW \propto \sqrt{V_{rev}}$$

$$I = I_0 (e^{\left(\frac{q_e V}{K_b T}\right)} - 1)$$



$$\frac{I(T_1)}{I(T_2)} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right)$$

Stabilità ad alta tensione di Polarizzazione inversa (500-1000V)

Capacità di bulk e drogaggio effettivo

- Da accesso alla densità di carica spaziale (doping del bulk)
 - valore tipico del doping del bulk poco drogato $\sim 10^{12}$ atomi/cm³

$$\frac{1}{N_{eff}} = \frac{d(1/C^2)}{dV} \frac{q_e \epsilon}{2}$$

Bulk di tipo n

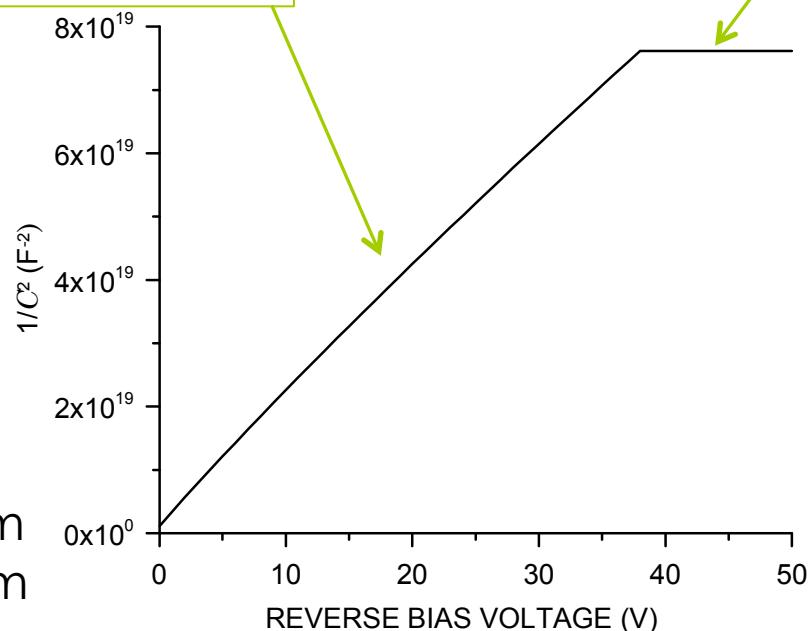
$$W = 0.5 \mu m \sqrt{\rho (\Omega cm)(V_b + V_{bi})(V)}$$

Bulk di tipo p

$$W = 0.3 \mu m \sqrt{\rho (\Omega cm)(V_b + V_{bi})(V)}$$

Curva per un diodo:
area 1 cm² e spessore attivo 100 μ m
su materiale bulk tipo-n da 1 K Ω cm

$$\frac{C}{A} = \frac{\epsilon}{W} \approx \frac{1[pF/cm]}{W}$$



Rivelatore al silicio, micro-strip: sezione

- C_{AC} = capacità di diascoppiamento AC-DC
 - Realizzata con Ossido sottile $\text{SiO}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$
 - $\sim 10 \text{ pF/cm} (\nu > 0)$

- C_{nb} (C_{pb}) = capacità degli impianti verso il lato Ohmico (bulk)
 - $\sim 0.1 \text{ pF/cm}$

- C_{nn} (C_{np}) = capacità interstrip, o tra gli impianti nel lato giunzione
 - dominante per il carico capacitivo all'amplificatore di carica
 - $\sim 1 \text{ pF/cm} (\nu_{FE-DAQ})$

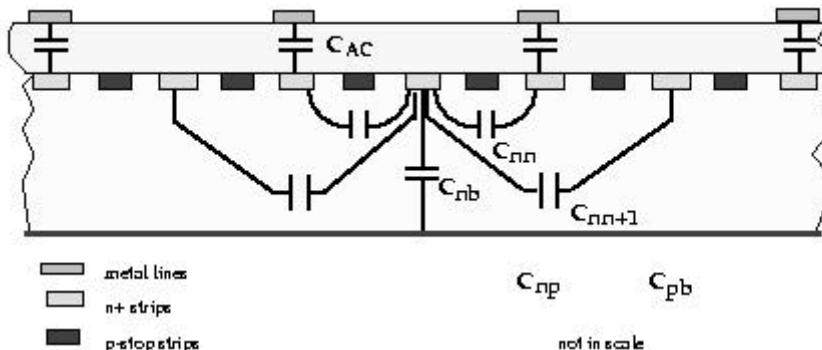


Figure 8.a.

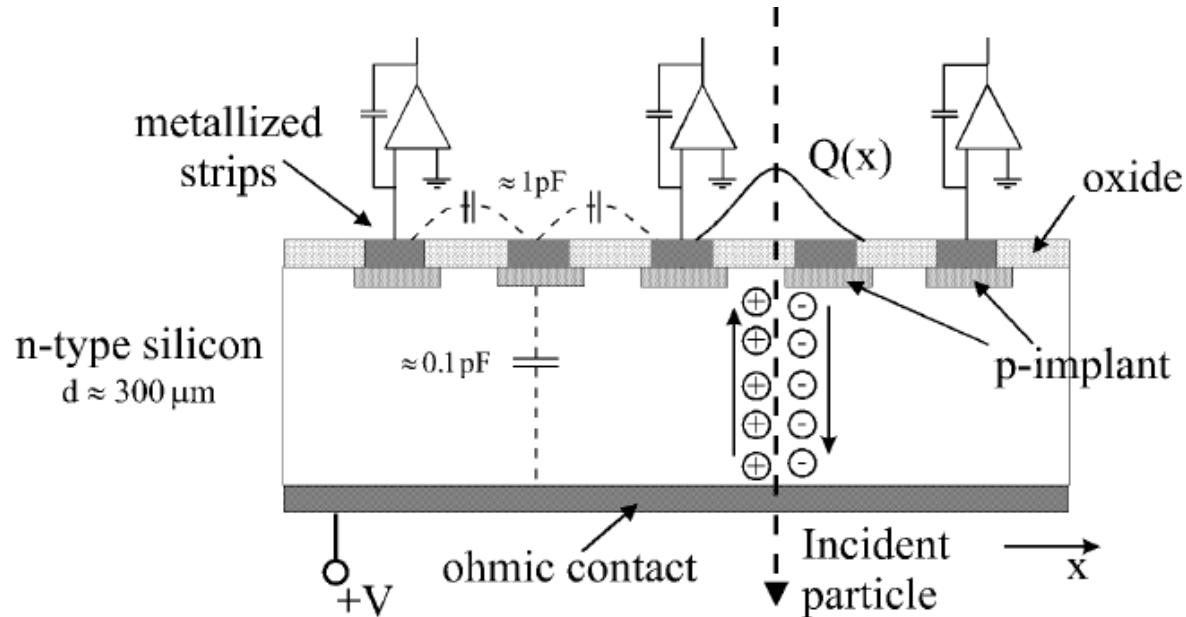
$$C_{nb} = \epsilon_0 \epsilon_{si} \frac{p}{d} \frac{1}{1 + \frac{p}{d} f(w/p)} \text{ pF/cm}$$

$$C_{nn} = [0.03 + 1.62 \frac{w + 20 \mu m}{p}] \text{ pF/cm}$$

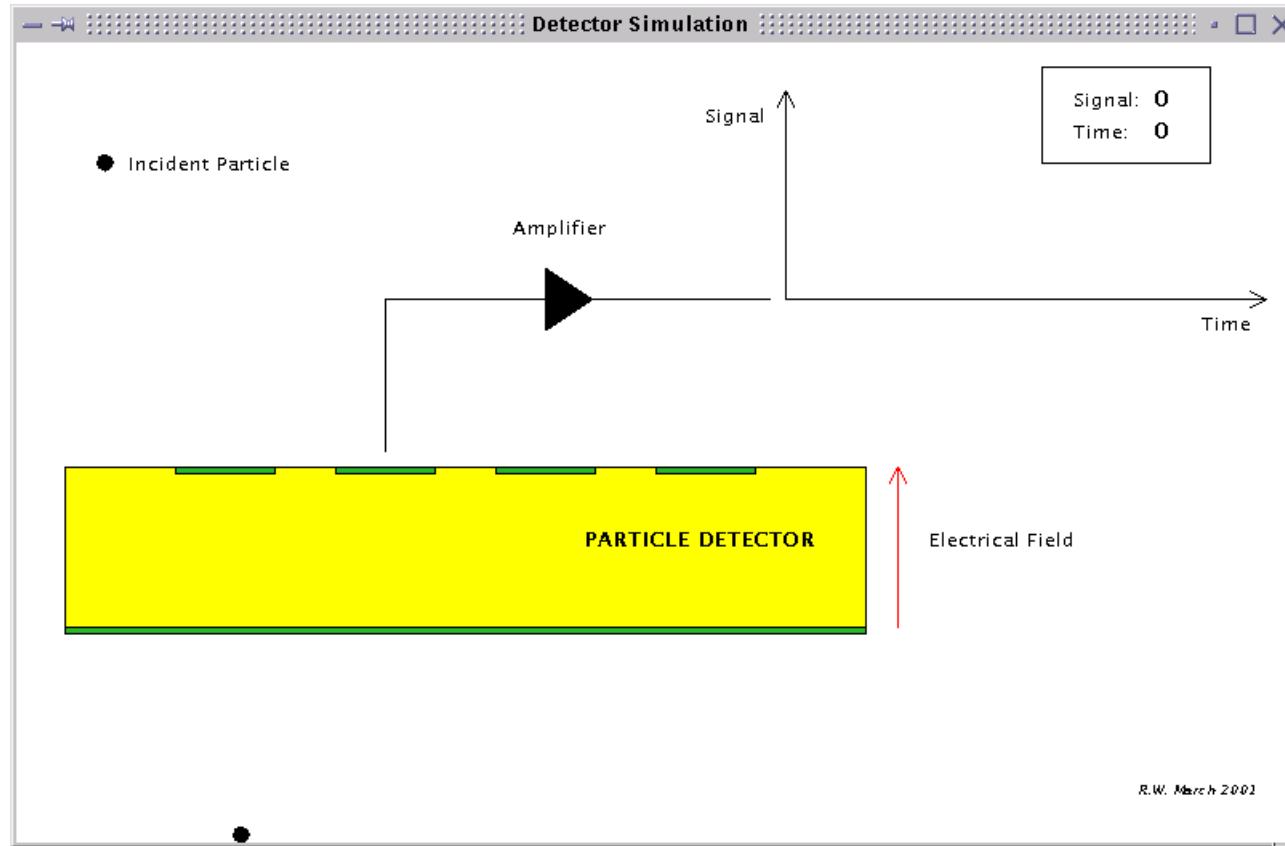
Valori tipici per rivelatori a micro strips:
dipendono dalle geometria degli impianti
e dalle caratteristiche dell'ossido.

Rivelatore di silicio segmentato : il segnale

- Segnale generato da una particella carica che attraversa il rivelatore



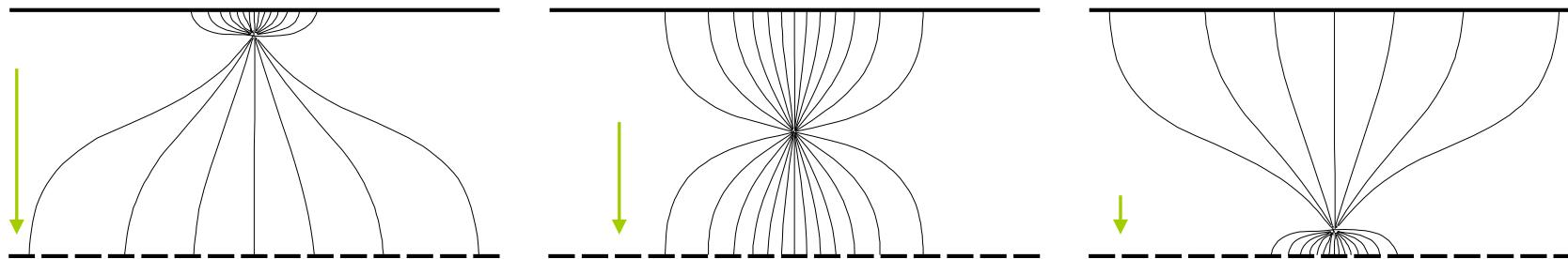
Principio di funzionamento di un rivelatore al Si



Il rivelatore Si, un diodo sofisticato inversamente polarizzato, che fornisce tramite la carica raccolta sulla struttura segmentata un'informazione posizione delle particelle che lo attraversano.

Segnale indotto in un rivelatore a strips

- Segnale dato non dal conteggio delle cariche ma dalla corrente
- Pensiamo ad una carica generata lontana dalla parte strutturata (strips) che si muove verso le strips



Inizialmente la carica induce segnale su molte strips, ma essendo lontana da esse il segnale è basso

Durante il moto di deriva il segnale indotto si concentra su poche strips

In prossimità del piano strutturato la carica è indotta in poche strips, in questa regione si ha l'effetto maggiore

- La grandezza della corrente indotta (che rappresenta il nostro segnale disponibile) dipende dall'accoppiamento della carica in moto di deriva con ciascun elettrodo

Induzione sugli elettrodi

- Rivelatore segmentato (strip/pixel)

$$Q = \int_{t=0}^t Idt = q \int_{t=0}^t \vec{v} \vec{E}_w dt = q \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}(t)} \vec{E}_w d\vec{r}$$

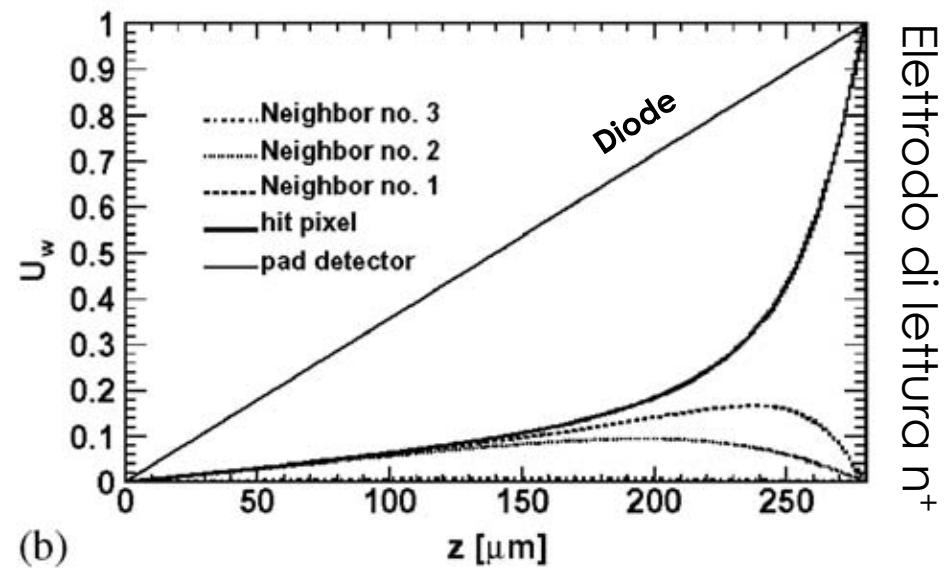
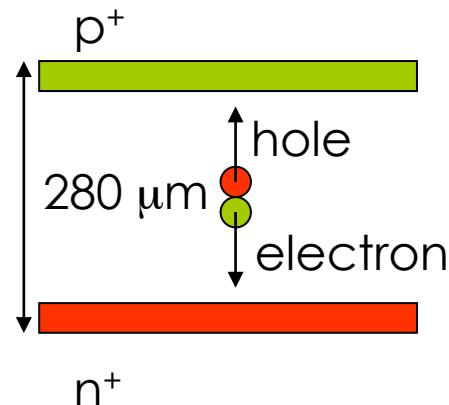
$$Q = q[U_w(\vec{r}) - U_w(\vec{r}_0)]$$

$$Q_{e-h} = Q_e + Q_h$$

Weighting field
 $\Delta U_w = 0$

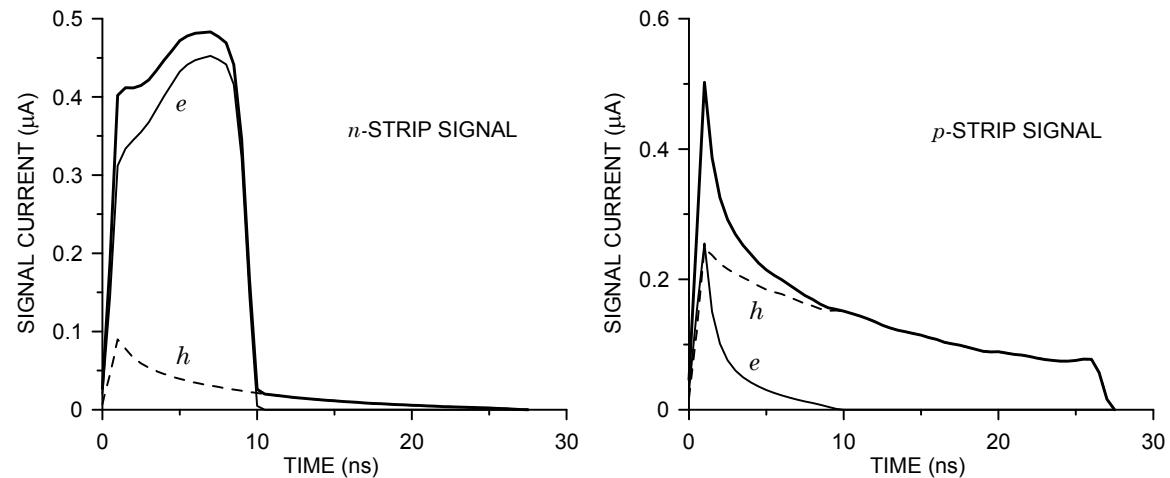
$U_w = 1$ → sensing electrode

$U_w = 0$ → all other electrodes



Sviluppo temporale del segnale striscia

- Il segnale più veloce è dovuto agli elettroni
- La predominanza del segnale dipende dal tipo di bulk
- In realtà dobbiamo aggiungere anche un termine di trapping



$$I = q\vec{v}\vec{E}_w \quad Q(t) = \int_{t=0}^{t_{\text{int}}} I dt = q_0 \int_{t=0}^{t_{\text{int}}} \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{eff},e,h}}\right) \mu_{e,h} \vec{E} \cdot \vec{E}_w dt$$

$\lambda_{e,h} = \mu_{e,h} \tau_{\text{eff},e,h}$ E rappresenta la lunghezza di raccolta di carica

In silicio non danneggiato e di buona qualità:

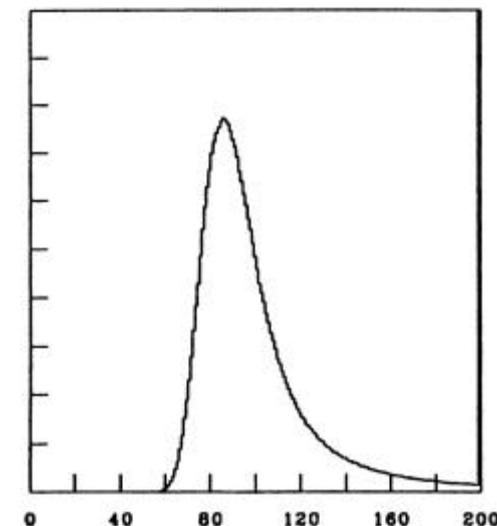
$$\tau_{\text{eff},e} = 10 \text{ ms}$$

$$\mu_e = 1350 \text{ V/cm s}^2$$

per un V_{bias} tale che $E \sim 10^4 \text{ V/cm}$ $\lambda \sim 10^4 \text{ cm}$

Segnale di particella carica

- Un a particella carica al minimo della ionizzazione (m.i.p.) rilascia in Si $\sim 390 \text{ eV}/\mu\text{m}$ e produce circa 108 coppie $(e,h)/\mu\text{m}$ di spessore attraversato.
- Per un rivelatore di spessore 300 μm significa che possiamo raccogliere in media 32000 coppie primarie.
- In realtà la carica raccolta fluttua
 - secondo una distribuzione di Landau
 - statistica della creazione di coppie
 - variazione della ionizzazione primaria
- pertanto il segnale più probabile sarà invece pari a 23000 coppie (e,h) corrispondenti a 3.5 fC
- Il segnale rivelabile deve essere misurato in termini della carica raccolta in assenza di segnale di particella , cioè il noise

Si : 300 μm thick

Segnale minimo

- La distribuzione di Landau ha il picco al valore più probabile (MPV) della energy loss Q_0 (3.5 fC per 300 μm di spessore) e si estende fino a $0.5 Q_0$ se vogliamo una efficienza del 99% sul segnale stesso.
- Assumiamo che l`energia minima rilasciata dalla tracce cariche sia $f_L Q_0$
- Una traccia carica che attraversa un silicio segmentato deposita carica su più elettrodi (sharing) quindi la carica minima a cui dobbiamo essere sensibili è $Q_{\min} \sim f_{sh} f_L Q_0$
- Possono presentarsi 2 casi
 - Se lo sharing è trascurabile $f_{sh} = 1$, $Q_{\min} = 1.75 \text{ fC}$
 - Se invece il sistema opera per una risoluzione in posizione ottimale dovremmo avere un equo-sharing tra elettrodi vicini quindi ad esempio $f_{sh} = 0.5$, $Q_{\min} = 0.85 \text{ fC}$

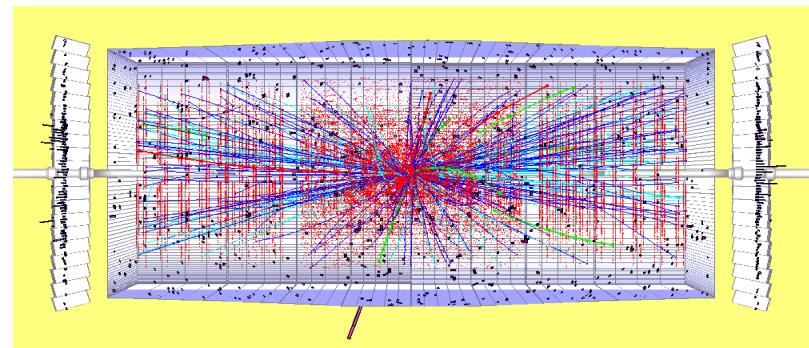
Soglia per il rumore

- Sicuramente $Q_{\min} > \text{Soglia} = n Q_{\text{noise}}$ ($n=4-5$) in modo da essere lontani sulla coda della gaussiana della distribuzione di rumore
- Per sopprimere falsi segnali di particella
 - $\text{Soglia} = n Q_{\text{noise}} + \text{dispersione}$
- per strips
 - $Q_{\text{noise}} \approx 600 + C * 40 \approx 1100 e^-$ $n = 4$
 - $\text{Soglia} \approx 4500 e^-$ (0.7 fC)
- Per pixel in versione Hybrid
 - $Q_{\text{noise}} = 260 e^-$, $\delta \text{Thr} = 40 e^-$ $n = 5$
 - $\text{Soglia} \approx 1,300 e^-$
 - La soglia effettiva tiene conto anche di variazioni /correlazioni della elettronica di read-out pertanto si assume una valore tipico di $2500-3000 e^-$ (0.5 fC)

Tolleranza al danno da radiazione: presente

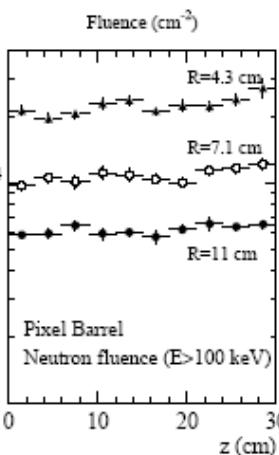
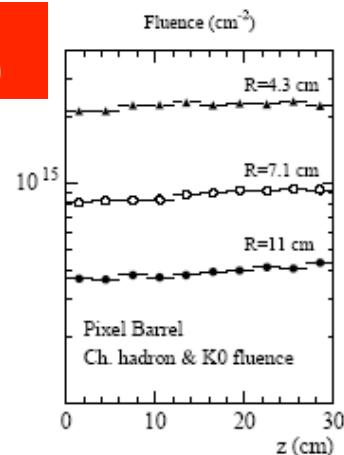
- I collider ad alta anergia (LHC) determinano il limite massimo della radiation tolerance

Alla luminosità istantanea di progetto di LHC $10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ abbiamo 40 milioni di eventi al secondo simili a questo con circa 1000 tracce

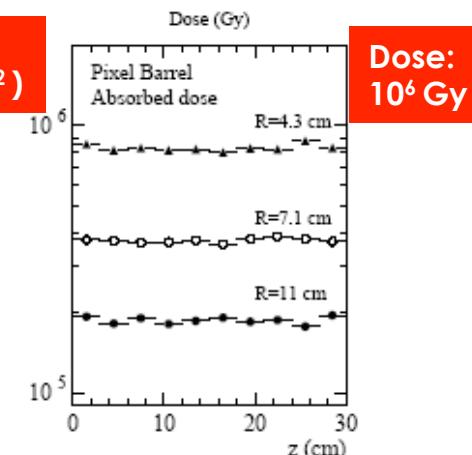


Alla fluenza integrata 500 fb^{-1} (prevista per 10 anni di funzionamento)

Carica: $2 \cdot 10^{15}$
($1 \text{ MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)



Neutra: $2 \cdot 10^{14}$
($1 \text{ MeV n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)



Tolleranza al danno da radiazione: futuro

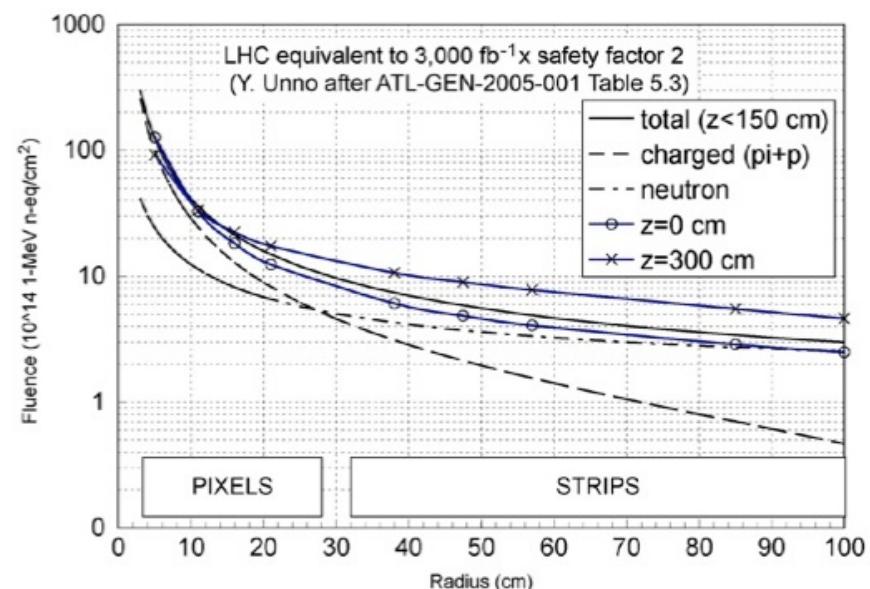
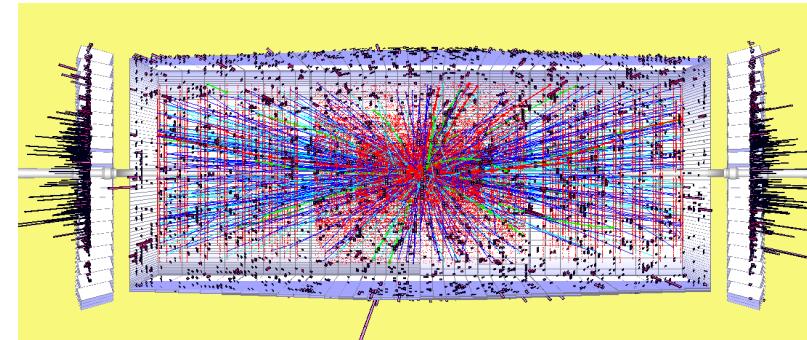
- La fase II di LHC (SLHC) prevede un aumento della luminosità istantanea, realisticamente, a $5.4 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- SLHC (Phase II upgrades)

⇒ LHC (2009) $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$$\phi(r=4\text{cm}) \sim 3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$$

⇒ Super-LHC (2020 ?) $L = 10^{35} \text{ cm}^{-2}$

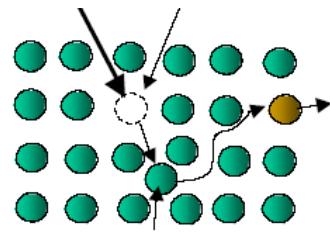
$$\phi(r=4\text{cm}) \sim 1.6 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$$



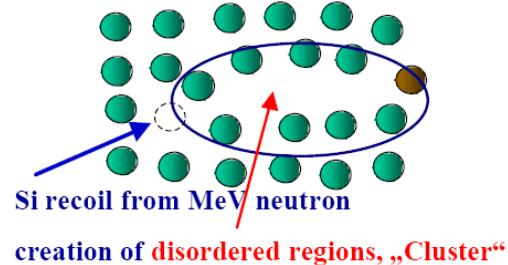
**Danno da Radiazione Macroscopico in Rivelatori a
Semiconduttore**
Parte II

Danno da radiazione: N.I.E.L.

- Fatti fondamentali



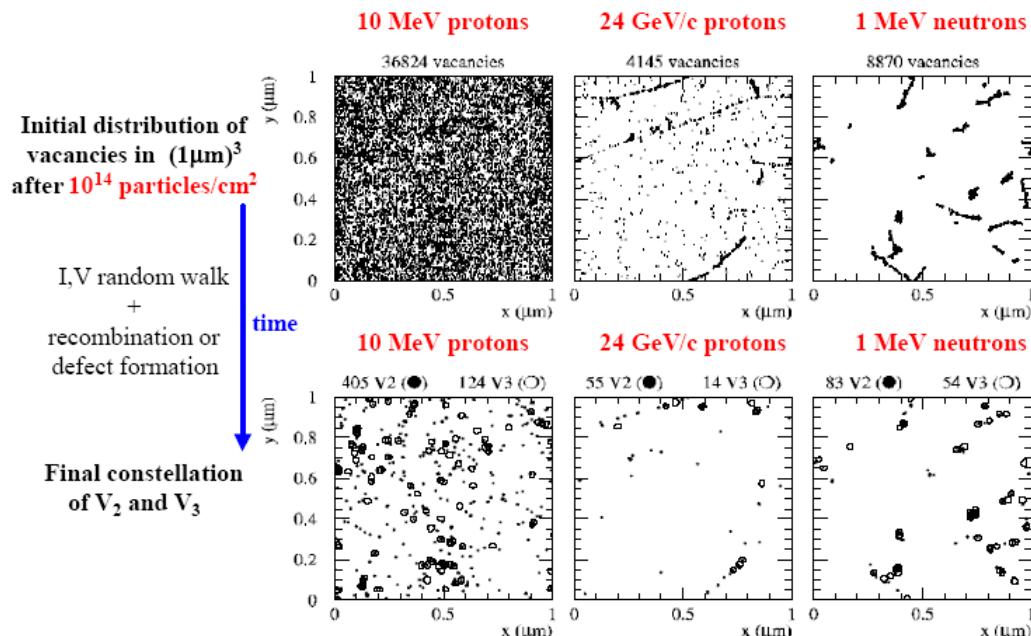
mobile Interstitial I
creation of point defects



Si recoil from MeV neutron
creation of disordered regions, „Cluster“

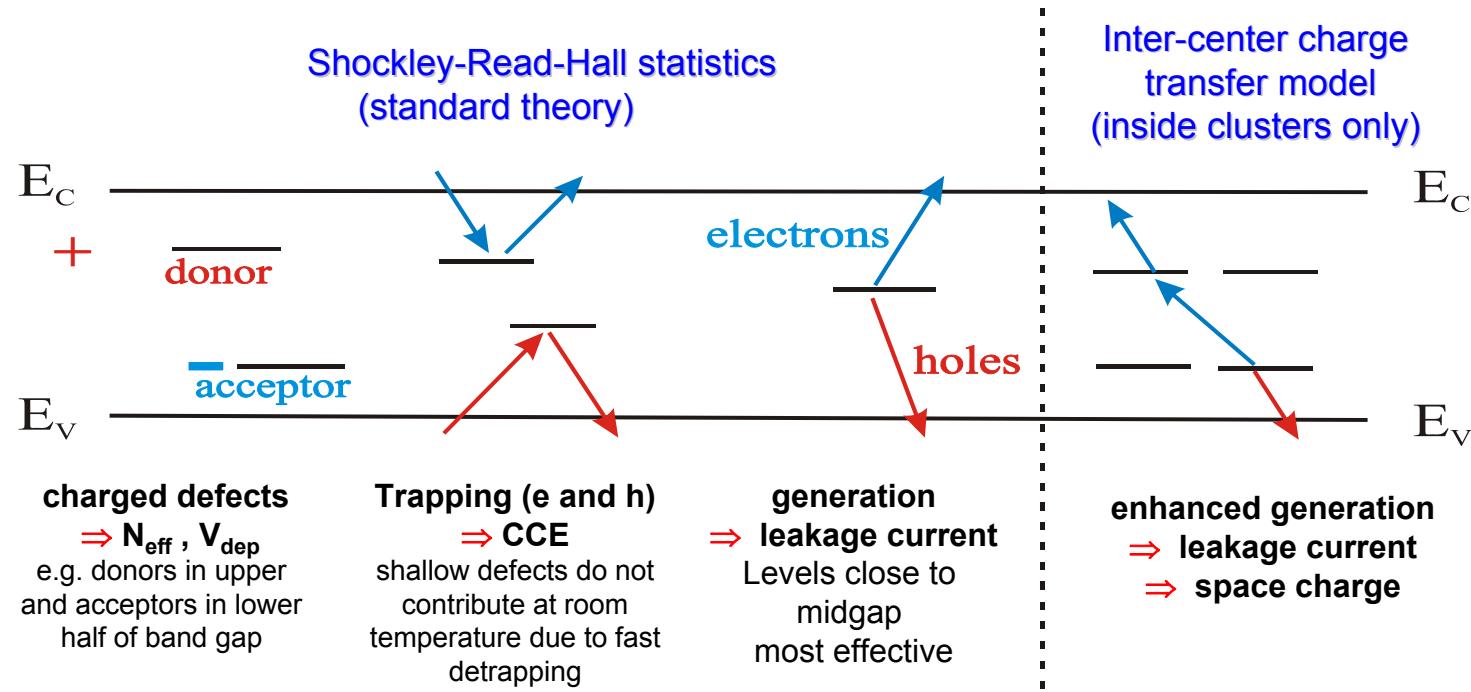
- Simulazione

V , V_2 and V_3 Formation - Particle Dependence



Impact of Defects on Detector Properties

- Come il danno da radiazione agisce sul materiale



Impact on detector properties can be calculated if all defect parameters are known:

$\sigma_{n,p}$: cross sections

ΔE : ionization energy

N_t : concentration

Sommario degli effetti del danno

- Bulk (Crystal) damage due to Non Ionizing Energy Loss (N.I.E.L.)
 - displacement damage, built up of crystal defects- affects:
 - I. leakage current
 - II. effective bulk doping concentration
 - III. charge carrier trapping

Abbiamo dimenticato una parte della energia

- Bulk (Crystal) damage due to Non Ionizing Energy Loss (N.I.E.L.)
 - displacement damage, built up of crystal defects- affects:
 - I. leakage current
 - II. effective bulk doping concentration
 - III. charge carrier trapping
- Surface damage due to Ionizing Energy Loss (I.E.L.)
 - accumulation of charge in the oxide (SiO_2) and Si/SiO_2 interface affects:
 - Inters-trip capacitance
 - Breakdown

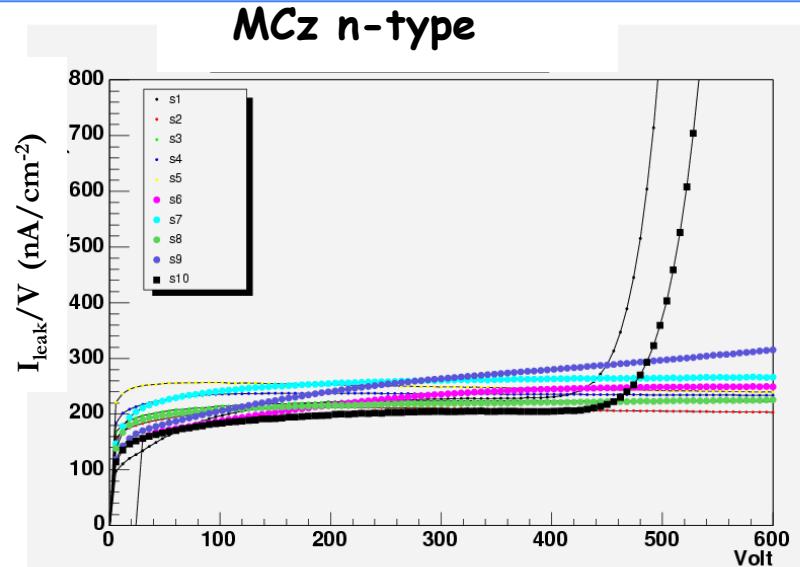
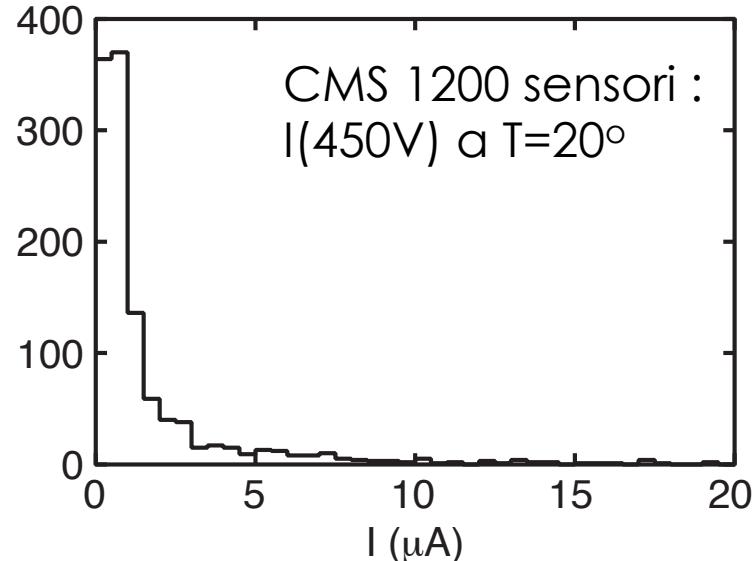
Abbiamo trascurato la dipendenza dal tempo

- Bulk (Crystal) damage due to Non Ionizing Energy Loss (N.I.E.L.)
 - displacement damage, built up of crystal defects- affects:
 - I. leakage current
 - II. effective bulk doping concentration
 - III. charge carrier trapping
- Surface damage due to Ionizing Energy Loss (I.E.L.)
 - accumulation of charge in the oxide (SiO_2) and Si/ SiO_2 interface – affects:
 - Inters-trip capacitance
 - Breakdown

All these effects are not stable: they evolve as a function of time and temperature.

Impact on detector performance ad detected signal.

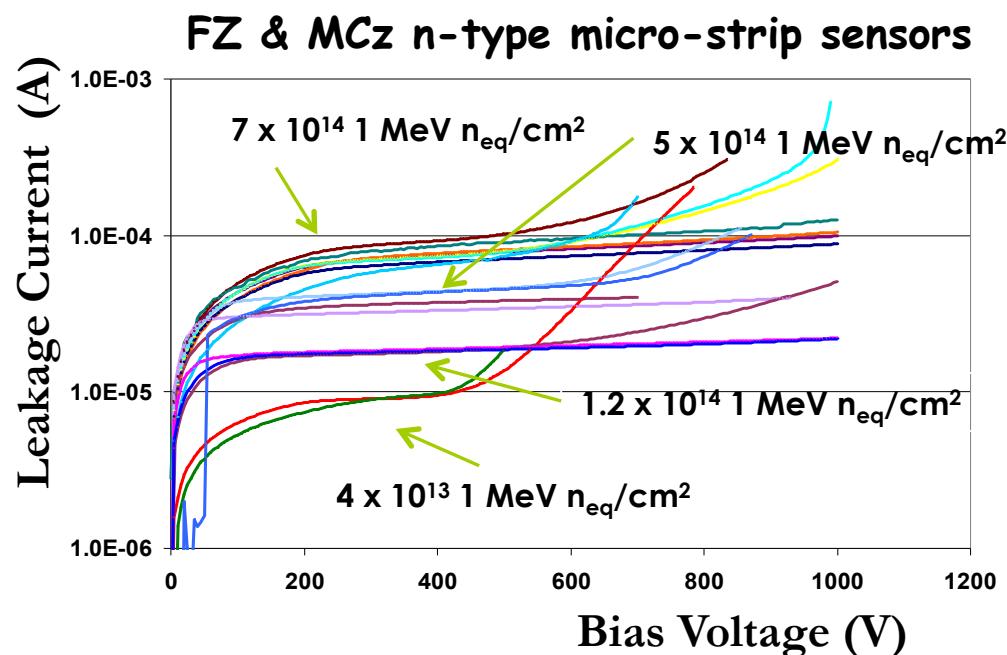
Danno da radiazione : Leakage current(I-V)



- Livello di qualità di sensori Fz n-type. Area del sensore a micro strips circa 100 cm^2 , il 95 % registra meno di $10 \mu\text{A}$, entro i limiti di di leakage current pari a $100-150 \text{ nA/cm}^2$
- La differenza tra i due sensori : tecnica di crescita del lingotto e contenuto di atomi di $[\text{O}_i]$ (atomi/cm^3)
 - Fz $\sim 5 \cdot 10^{15}$
 - MCz $\sim 8-9 \cdot 10^{17}$
- Anche nel caso di materiale di partenza più esotico (MCz-n) i risultati sono paragonabili.

Danno da radiazione : Leakage current(I-V)

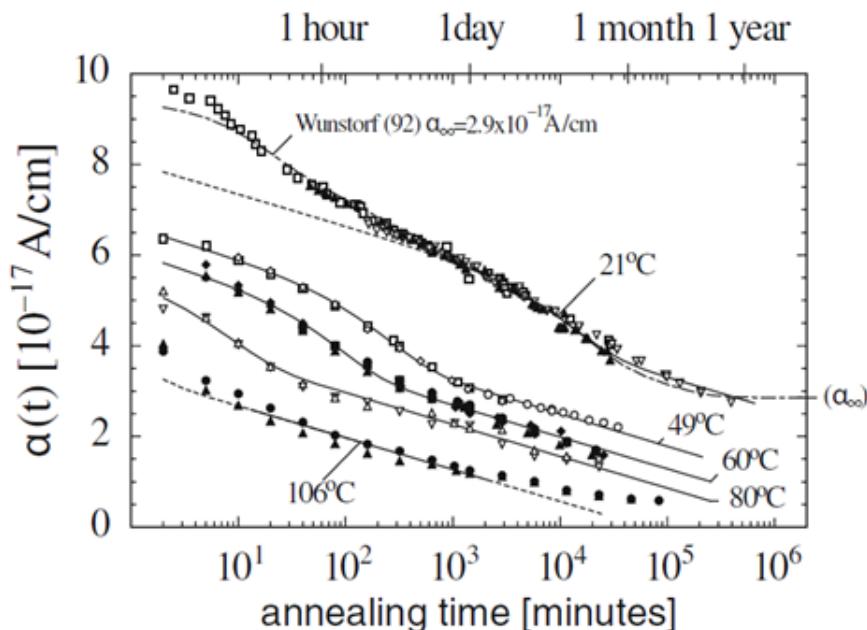
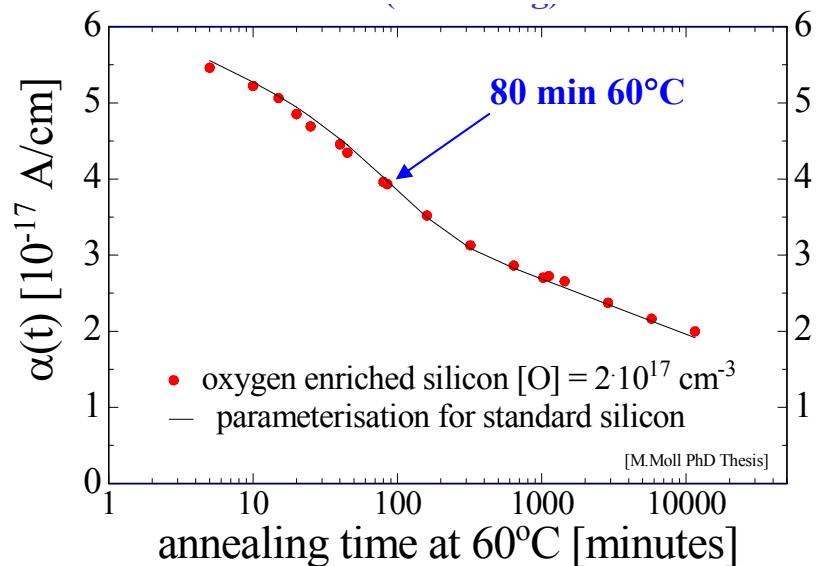
- Come conseguenza del danno da radiazione si osserva un aumento della corrente
- L'incremento osservato è:
 - proporzionale alla fluenza alla fluenza integrata
(riferita ad $1 \text{ MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$)
 - indipendente dal materiale di partenza



Rivelatori a micro strips, $300 \mu\text{m}$, $<100>$, pitch 50-100 μm .

Dipendenza da $t(s)$ e $T(^{\circ}\text{C})$: Beneficial Annealing

- Corrente misurata in condizione di rivelatore svuotato
- Dipende in maniera banefica dalla storia in tempo e temperatura seguita dopo il danno da riadiiazione



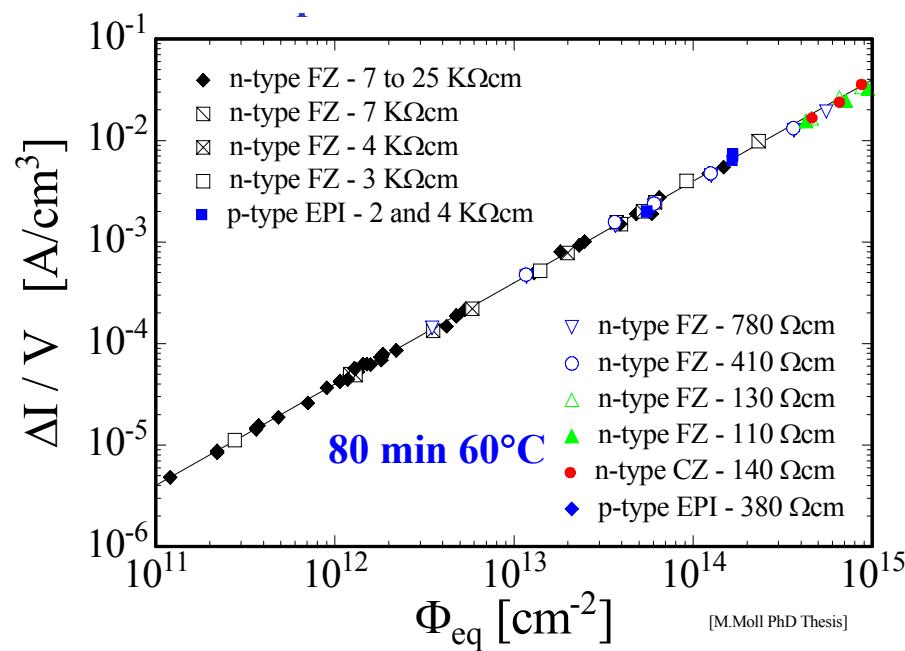
$$\alpha(t, T_a) = \frac{\Delta I(t, T_a)}{\Phi_{eq} V} = \alpha_{\infty} \sum_i \frac{b_i}{b_{\infty}} e^{\left(-\frac{t}{\tau_i(T_a)} \right)}$$

Sovrapposizione di esponenziali decrescenti con costanti tempo da brevi (~ 10 min) a lunghe ($\sim 10^4$ min)

- La corrente di bulk è proporzionale alla fluenza ed al volume, definita come frazione svuotata del sensore

$$\frac{\Delta I(t, T_a)}{V} = \alpha_{60/80} \cdot \Phi_{eq}$$

$$\alpha_{60/80}(T = 20^\circ) \approx 4 \times 10^{-17} A/cm$$



Estrapoliamo alla fluenza massima prevista

$$1.6 \times 10^{16} \text{ 1 MeV } n_{eq}/cm^2$$

$$\frac{\Delta I(t, T_a)}{V} = \alpha_{60/80} \cdot \Phi_{eq} \approx 0.64 A/cm^3$$

$$\frac{I(T_1)}{I(T_2)} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right)$$

Strategia :

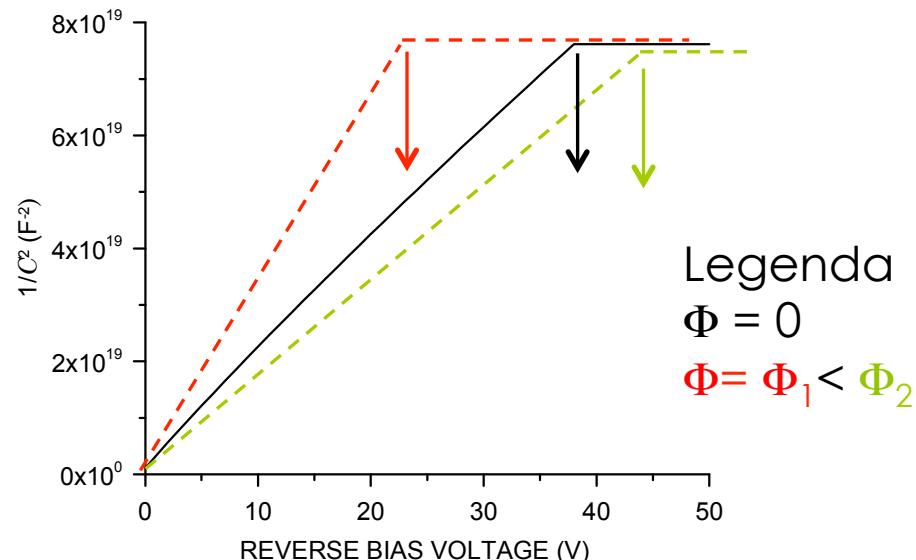
Rivelatori più sottili

Rivelatori raffreddati

Esempio : $I(-10^\circ C) \sim 1/16 I(20^\circ C)$

Danno da radiazione: Drogaggio efficace

- Abbiamo accesso al drogaggio del bulk (N_{eff}) tramite la misura CV



Legenda
 $\Phi = 0$
 $\Phi = \Phi_1 < \Phi_2$

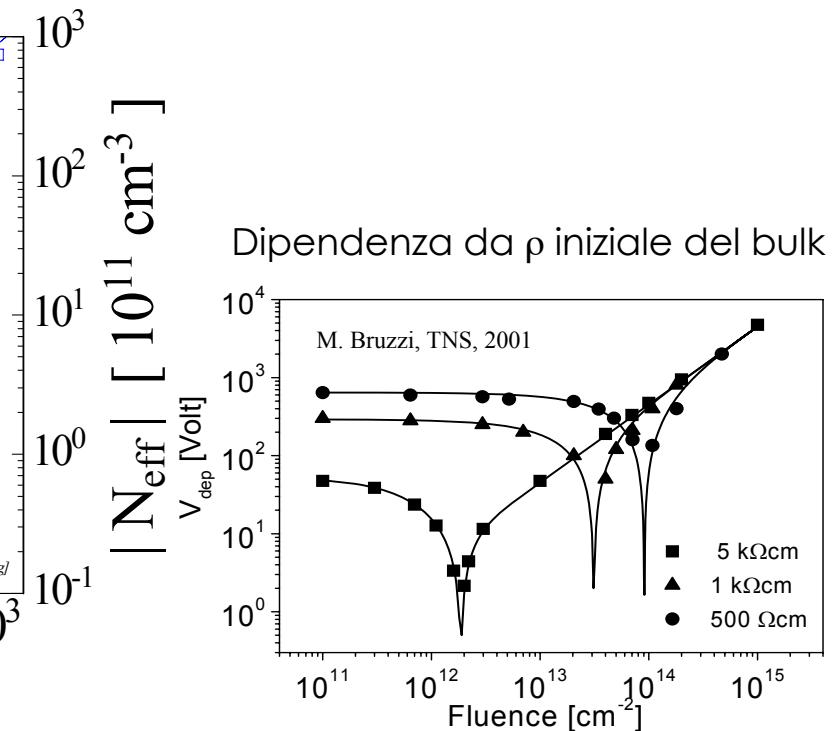
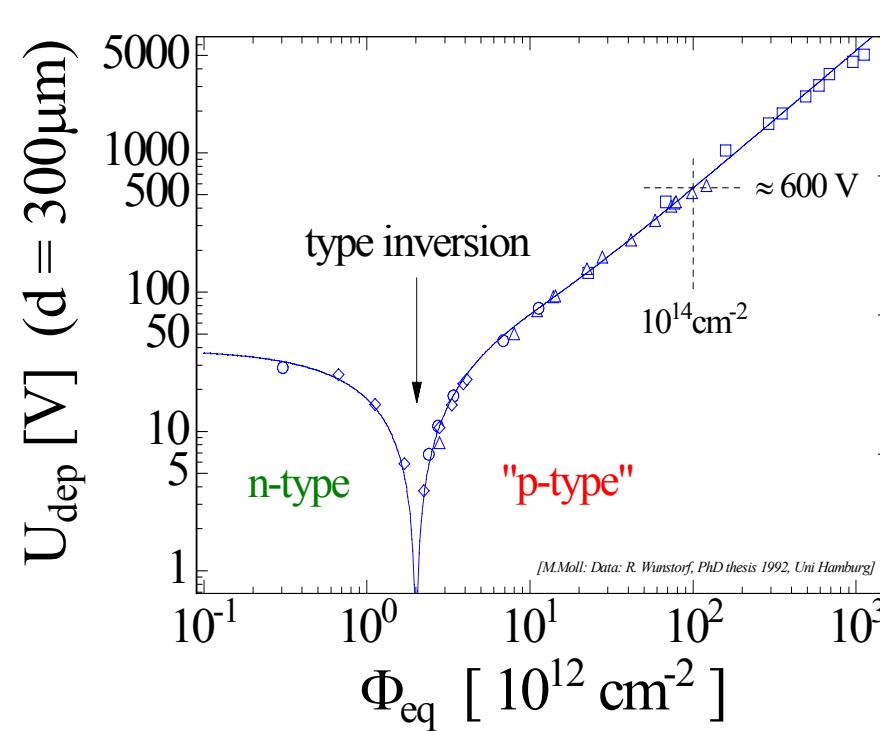
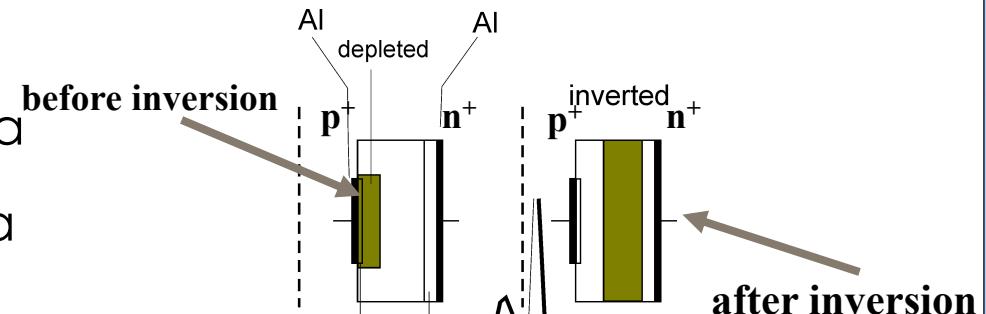
$$\frac{1}{N_{eff}} = \frac{d(1/C^2)}{dV} \frac{q_e \epsilon}{2}$$

$$V_{DEP} = \frac{ed^2 |N_{EFF}|}{2\epsilon}$$

- La misura è resa complicata da molti fattori:
 - Valore della fluenza, risposta in frequenza dei difetti, temperatura,.....

Drogaggio efficace del bulk dopo irraggiamento

- Il V_{DEP} misurato per dispositivi tipo-n Fz mostra una dipendenza complicata dalla fluenza
- Fenomeno della SCSI



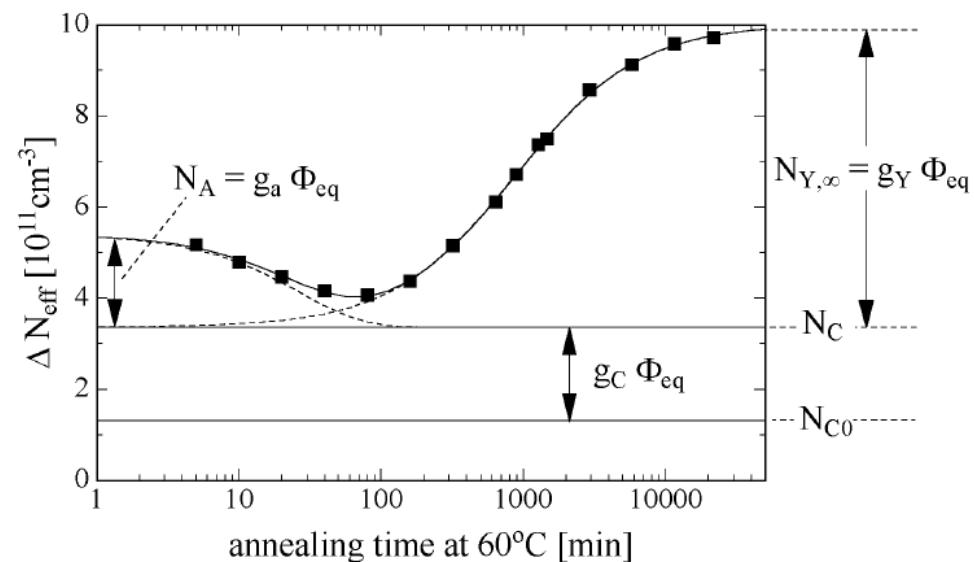
Doping efficace del bulk : funzione di $t(s)$ e $T(^{\circ}\text{C})$

$$\Delta N_{EFF}(\Phi_{eq}, T, t) = \Delta N_C(\Phi_{eq}) + \Delta N_A(\Phi_{eq}, T, t) + \Delta N_Y(\Phi_{eq}, T, t)$$

$$\Delta N_c(\Phi_{eq}) = N_{c0}(1 - e^{-\frac{t}{\tau_a}}) + g_c \Phi_{eq}$$

$$\Delta N_A(\Phi_{eq}, t, T) \approx \Phi_{eq} g_a e^{-\frac{t}{\tau_a(T)}}$$

$$\Delta N_Y(\Phi_{eq}, t, T) = \Phi_{eq} g_y(1 - e^{-\frac{t}{\tau_Y(T)}})$$



$T [{}^{\circ}\text{C}]$	τ_a	τ_Y
-10	306 d	516 y
0	53 d	61 y
10	10 d	8 y
20	55 h	475 d
40	4 h	17 d
60	18 min	21 h

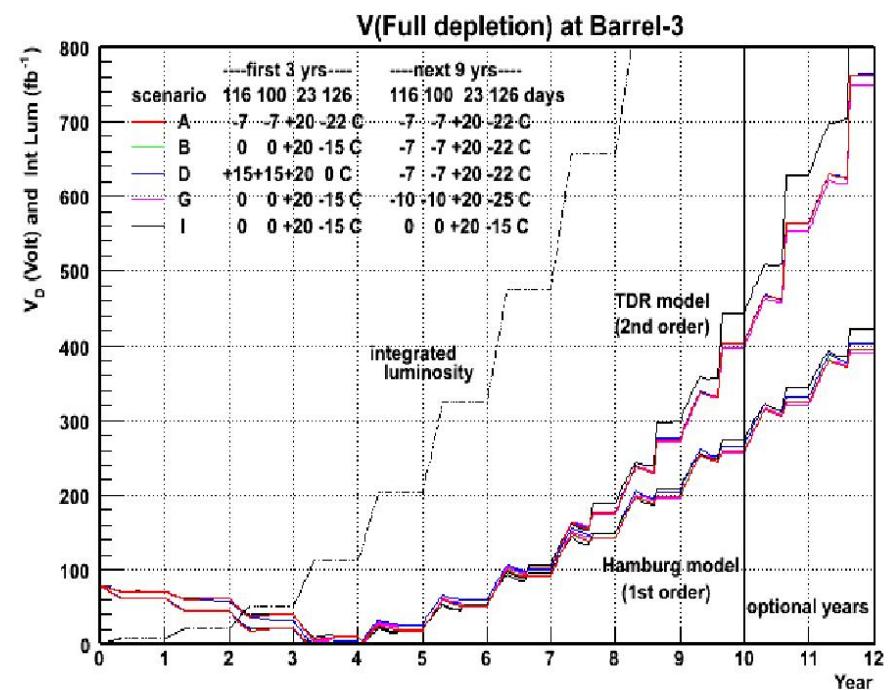
Tempi brevi :
Annealing benefico
 Tempi lunghi :
Annealing inverso

- La costante tempo dipende dalla temperatura

Scenario sperimentale: evoluzione V_{DEP}

- Approssimiamo il danno con la parte “stabile”

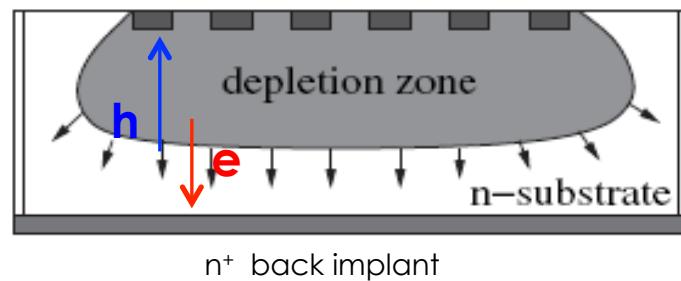
$$\Delta N_{EFF}(\Phi_{eq}, T, t) \approx g_c \Phi_{eq}$$
- La combinazione di annealing e tempi di irraggiamento dipende fortemente dalla strategia sperimentale adottata
- Caso del tracciatore di ATLAS



p⁺-n-type Fz bulk, inversione di tipo: conseguenze

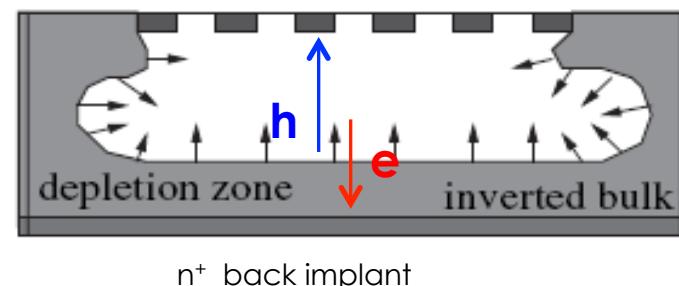
non-inverted, under-depleted:

- Limited loss in CCE
- Less degradation with under-depletion
p⁺ strip implants

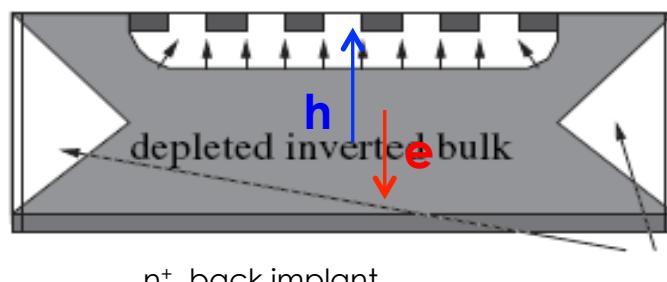


inverted to "p-type", under-depleted:

- Charge spread – degraded resolution
- Charge loss – reduced CCE
p⁺ strip implants



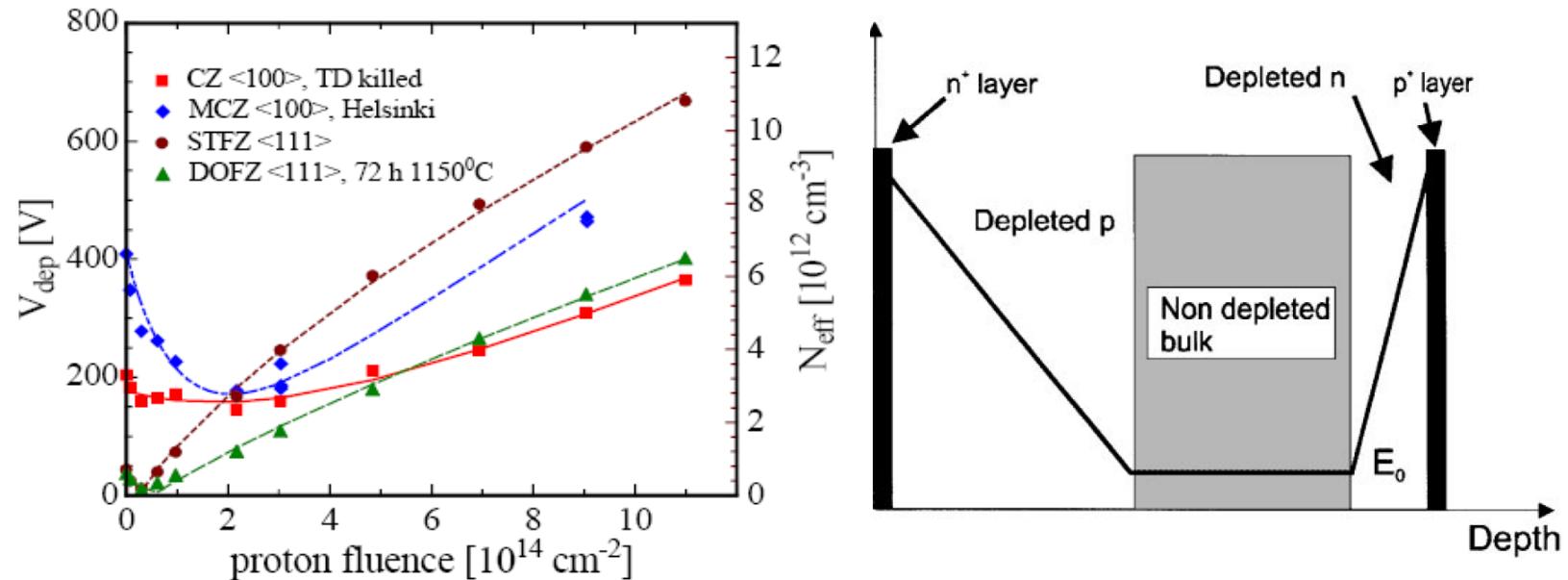
p⁺ strip implants



After heavy irradiation
Contribution of charge carrier from cut edge

p⁺-n-type Fz bulk, inversione di tipo: doppia giunzione

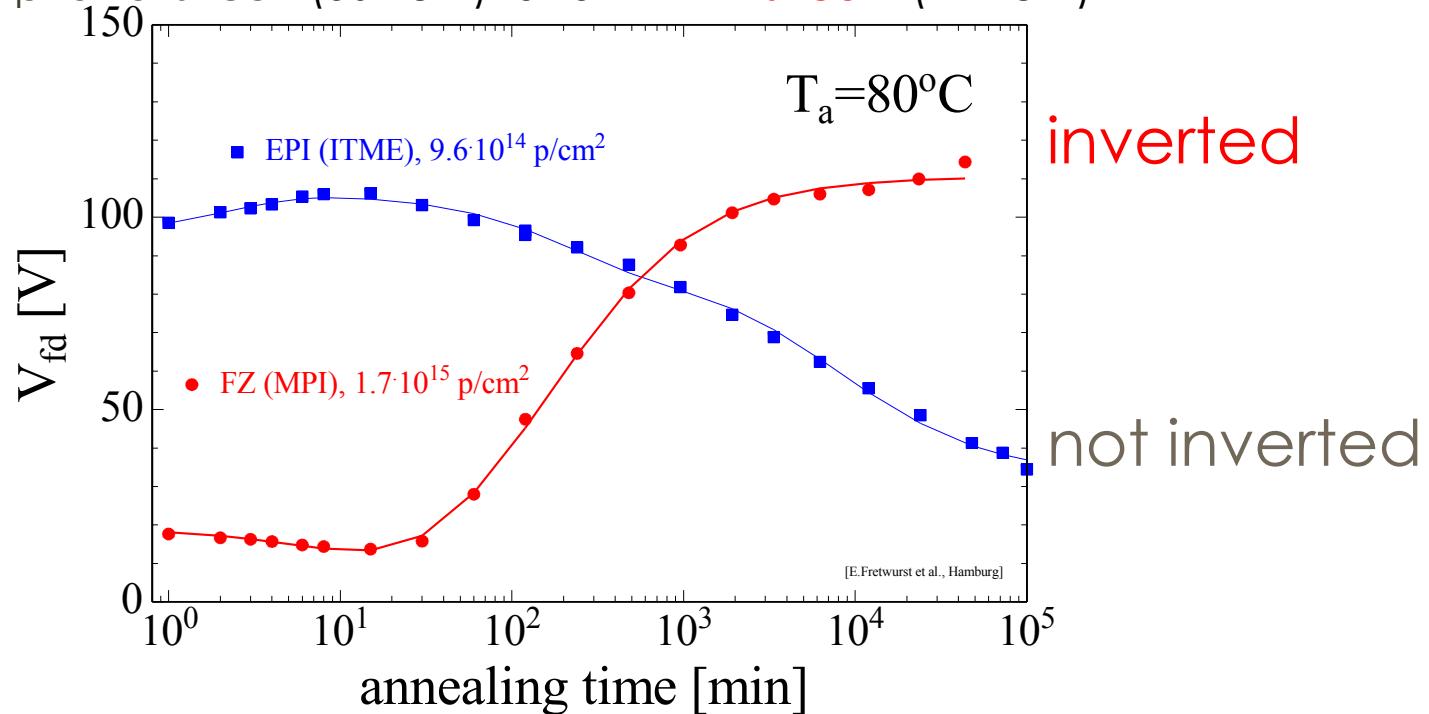
For MCz the curve V_{dep} vs fluence has a minimum, but it does not go to 0 as for STF_Z



- Dominant junction close to n+ readout strip for FZ n+-in-p
- For MCZ p+-in-n even more complex fields have been reported:
 - no “type inversion” (SCSI) = dominant field remains at p implant
 - “equal double junctions” with almost symmetrical fields on both sides

p⁺-n-type bulk, non-inversione di tipo: conseguenze

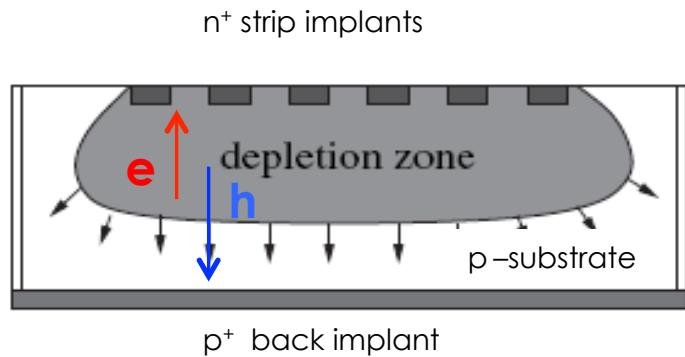
- Example: 50 μm thick silicon detectors:
 - Epitaxial silicon (50Ωcm) and **Thin FZ silicon** (4KΩcm)



- FZ silicon:** Type inverted, increase of depletion voltage with time
- Epitaxial silicon:** No type inversion, high content of $[\text{O}_i]$ $[\text{O}_{2i}]$, decrease of depletion voltage with time
⇒ No need for low temperature during maintenance of SLHC detectors!

[E.Fretwurst et al., RESMDD - October 2004]

n⁺-p-type bulk, “non” inversione di tipo



p-type silicon after high fluences:

- remain p-type
- acceptor defects increase V_{DEP}

n-on-p silicon, under-depleted:

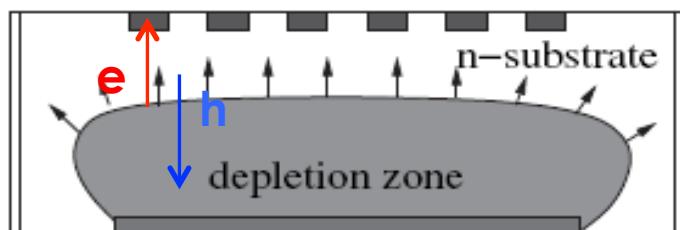
- Limited loss in CCE
- Less degradation with under-depletion
- Collect electrons (3 x faster than holes)

n^+ - n -type bulk, inversione di tipo: utile

Before type inversion

- Charge spread
- Charge loss
- detector need to be over-depleted

n^+ strip implants



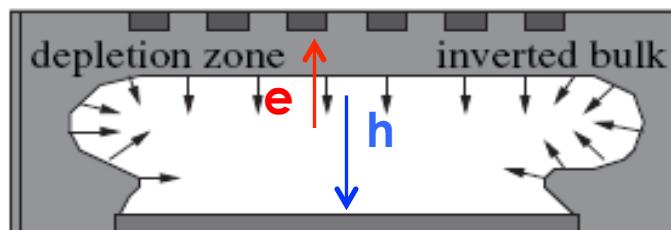
p+ back implant

n^+ strip implants

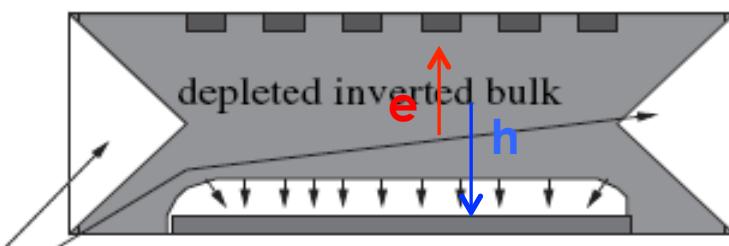
After type inversion

- limited loss in Charge
- less degradation with under depletion
- Detector can be operated under depleted

n^+ strip implants



p+ back implant



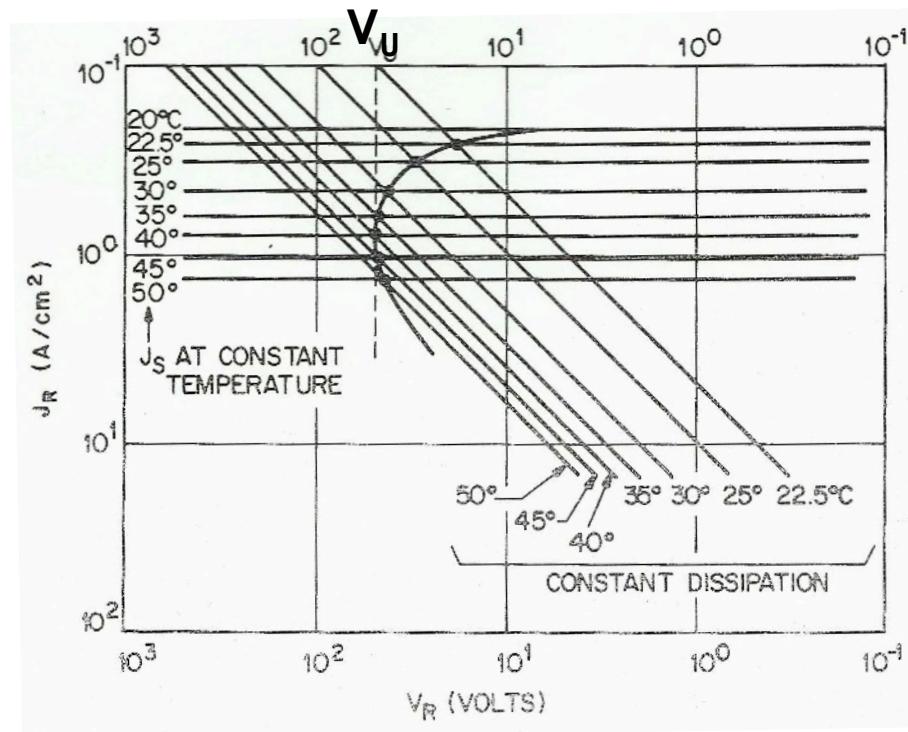
p^+ back implant
After heavy irradiation, contribution of charge carrier from cut edge

Stabilità dopo irraggiamento

- A seguito del danno da radiazione si registra nel bulk un aumento di
 - Corrente oscura
 - Trappole e difetti strutturali
 - V bias necessario a raccogliere la carica primaria
- Ma un rivelatore dopo irraggiamento è stabile ?
 - Serve un buon modello: il campo elettrico all'interno del bulk è complicato, potrebbe raggiungere localmente il valore limite per breakdown $\sim 30V/\mu m$
 - I difetti introdotti possono essere luoghi in cui il campo elettrico diventa critico
 - il campo elettrico potrebbe diventare localmente critico in zone difettose presenti già prima del danno
 - Iniezione di corrente dalla zona di taglio
- In ogni caso dobbiamo operare ad alto tensione di polarizzazione inversa cercando di limitare la potenza dissipata

Modello teorico: instabilità termica

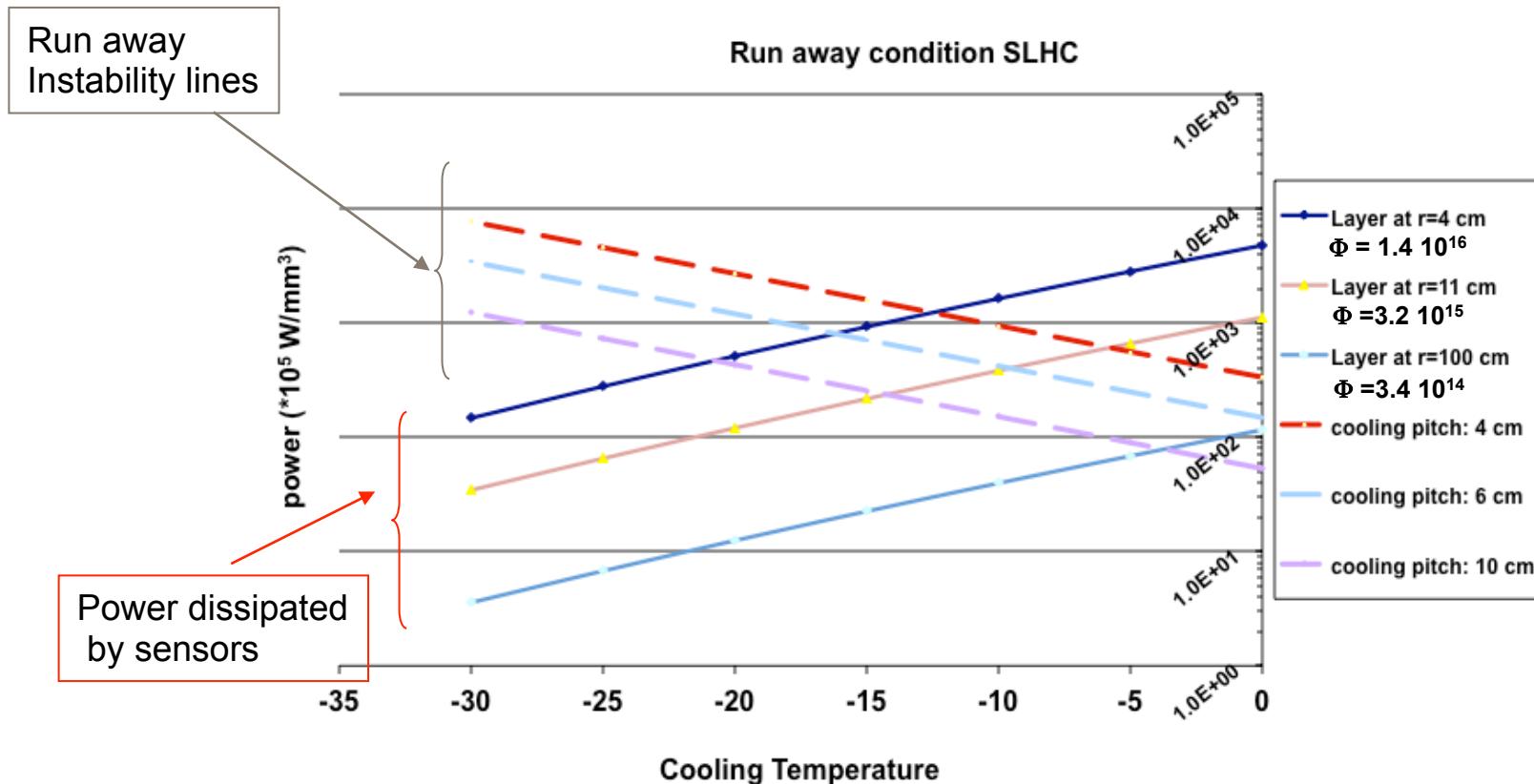
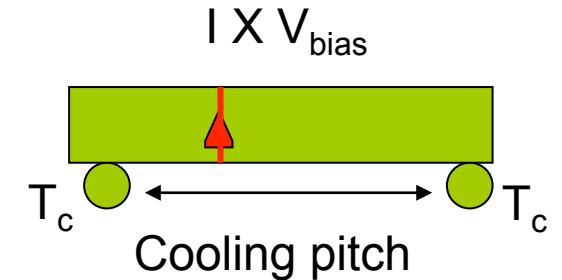
- La corrente di leakage dipende dalla temperatura
- Ad una data tensione verra dissipata potenza pari a $V \times I$
- Come conseguenza la temperatura del cristallo aumenta
 - Questo implica un ulteriore aumento della corrente di leakage
- Circolo con feedback positivo che puo diventare critico
 - Conseguente instabilità del sensore



$$\frac{I(T_1)}{I(T_2)} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^2 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{2k_B} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right)$$

Apparato sperimentale : Run-away

- First approximation of a module with perfect cooling and no convection
- Perfect cooling contact bridge
- End of SLHC lifetime & V_{bias} 600V



I.E.L.: Danno dell'ossido : effetti sulla superficie

- Dipende dalla qualita dell'ossido interstriscia
 - Interfaccia SiO₂/Si
 - Ossido
 - Orientazione del cristallo <111><100>
 - Presenza dei dangling bond, siti in cui il legame covalente non e` saturato

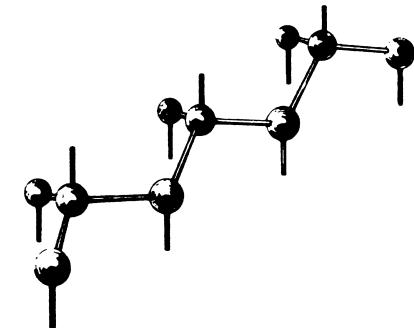
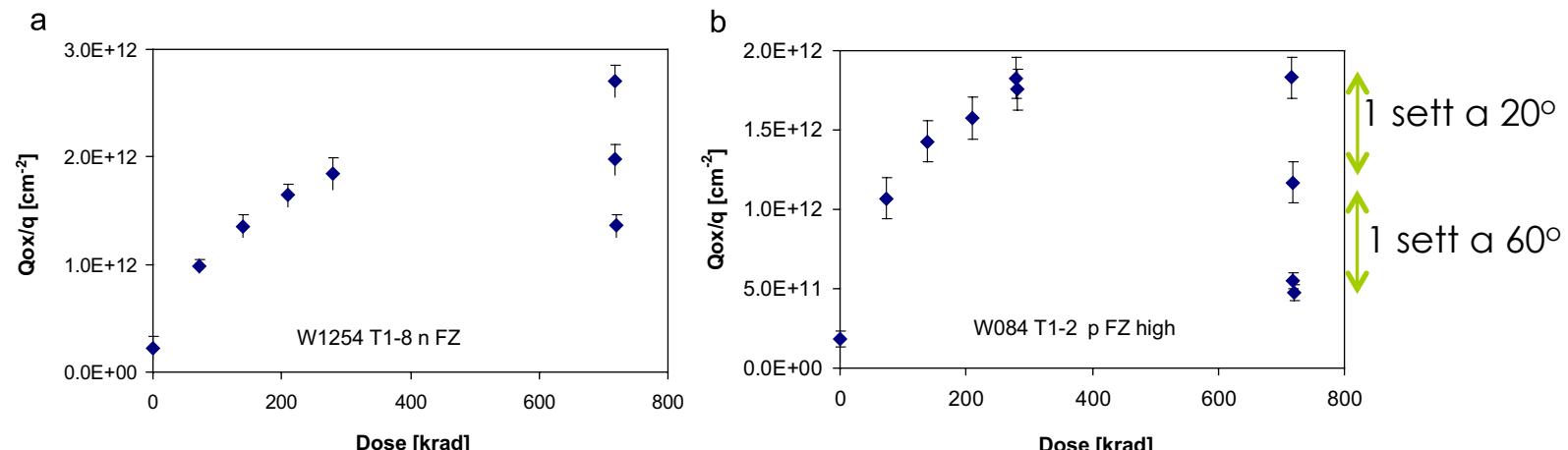


FIG. 1. Oblique view of ideal undistorted (111) surface of diamond structure material showing one broken bond per surface atom.

- Dipende dalla
 - geometria degli impianti (pitch e strip width)
 - geometria delle strutture MOS presenti

I.E.L.: Danno dell'ossido: effetti sulla superficie

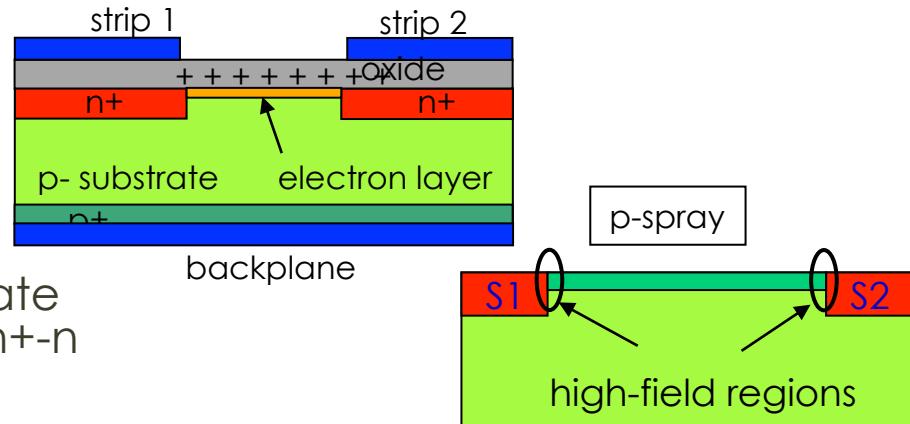
- Nel SiO_2 la mobilità delle cariche negative è più grande di quella delle cariche positive
 - Si osserva sperimentalmente un accumulo di carica positiva a seguito del danno



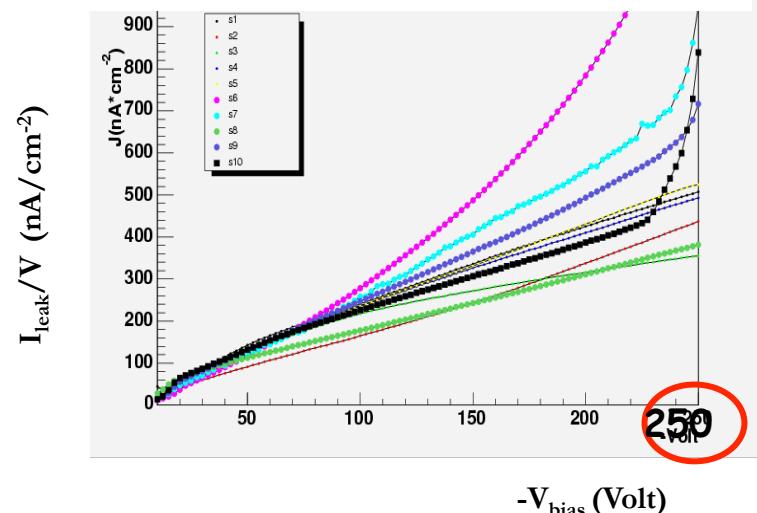
- Misuriamo l'effetto cumulativo, che mostra
 - Saturazione a $\sim 10^{12}/\text{cm}^3$
 - Annealing benefico

I.E.L.: Danno dell'ossido: breakdown

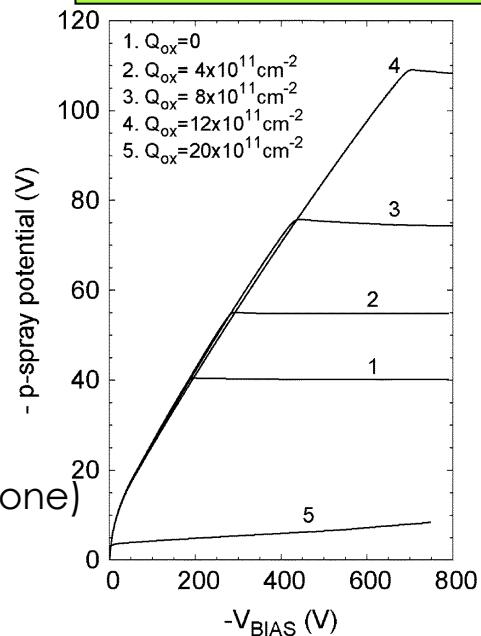
- L'accumulo della carica positiva nell'ossido a seguito del danno modifica la configurazione elettrostatica della superficie
 - Isolamento tra le strisce
 - Campo elettrico tra gli impianti
- Più sensibili nel caso di strisce isolate tramite impianti come in n+-p o n+-n



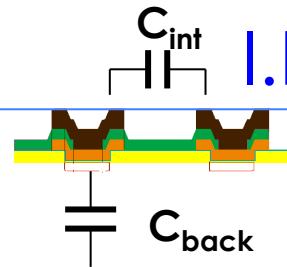
MCz p-type Low p-Spray



Simulazione
dell'effetto Q_{ox}
(danno da radiazione)

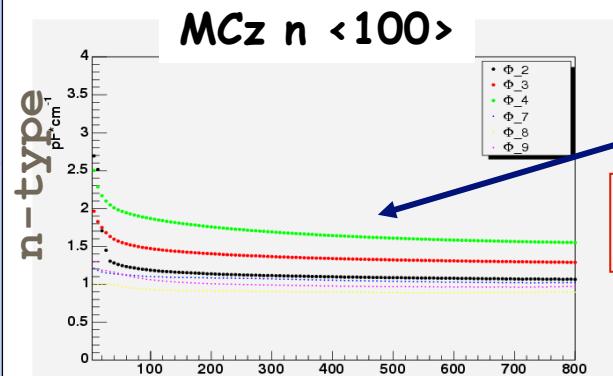


I.E.L.: Capacità inter strip



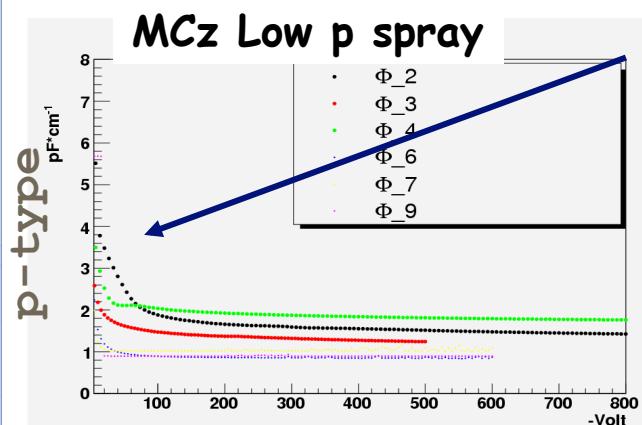
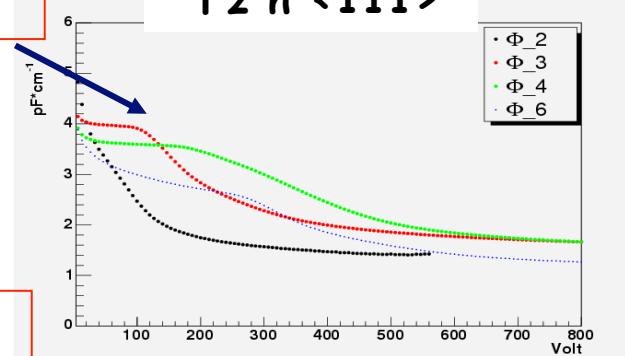
$$C_{\text{tot}} = C_{\text{back}} + 2(C_{\text{int}} \text{ 1}^{\text{st}} + C_{\text{in}} \text{ 2}^{\text{nd}} + \dots)$$

Total capacitance
to input amplifier

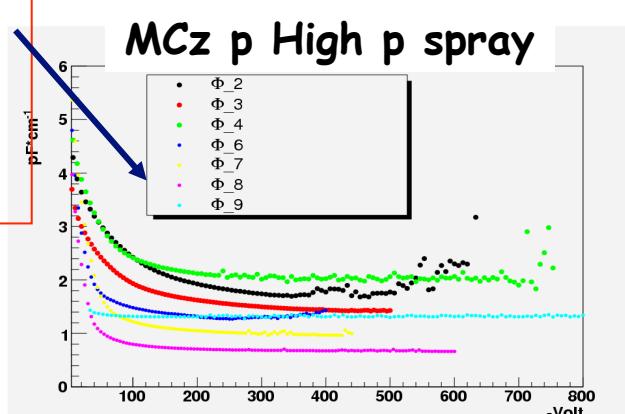


Typical of
<111> Si

Fz n <111>



Slow saturation
found for not
irradiated
sensors. Slightly
improved after
irradiation.



$$\Phi_2 = 6 \cdot 10^{13} < \dots < \Phi_9 = 10^{15} \text{ 1 MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$$

Il Segnale

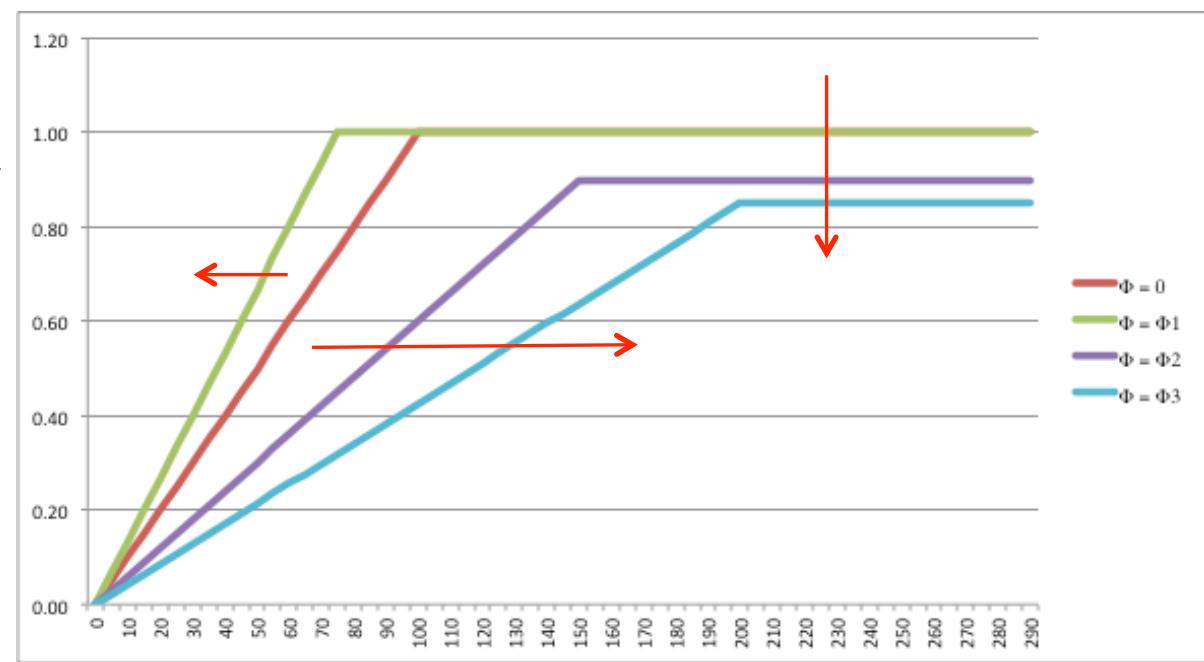
- Alla fine quello che conta è quanta carica raccolgo
 - Charge Collection Efficiency (CCE)
- Quanto il segnale è superiore al rumore
 - Signal to Noise ration (S/N)
- Il danno prodotto della energia rilasciata nelle componenti I.E.L. e N.I.E.L. modifica (peggiora) la CCE ed S/N
- Concorrono:
 - Trapping delle cariche primarie prodotte
 - Svuotamento parziale del volume attivo
 - inversione di tipo del bulk
 - Tempo di raccolta di carica
 - Geometria degli elettrodi
 - Tipo di lettura
 -

Cosa ci aspettiamo

- Efficienza nella raccolta di carica (CCE)
 - Effetto di saturazione con il V-bias
 - V_{DEP}
 - Valore limite di V_{drift}

Variazione del $V_{CCE\ sat}$

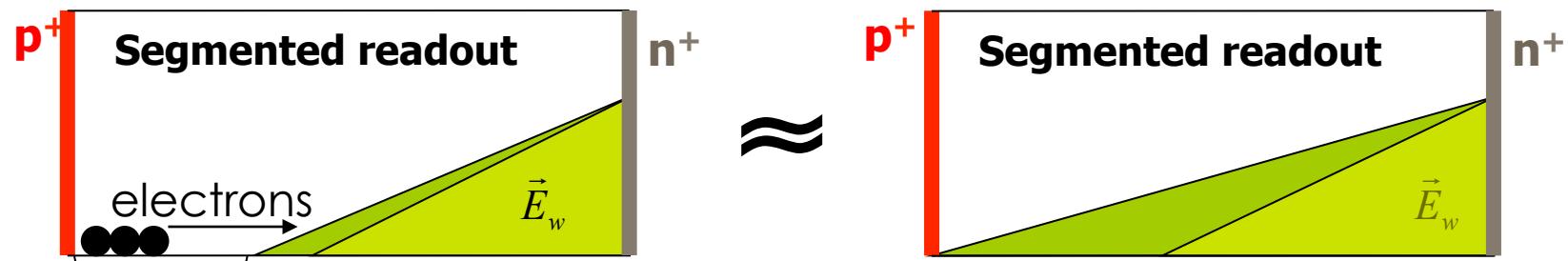
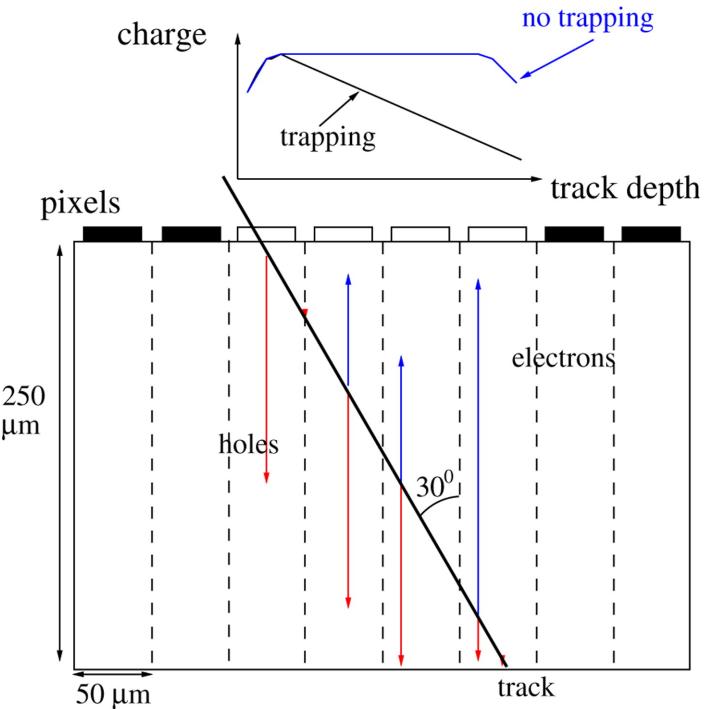
Effetto trappole:
perdita della carica
primaria (CCE<100%)



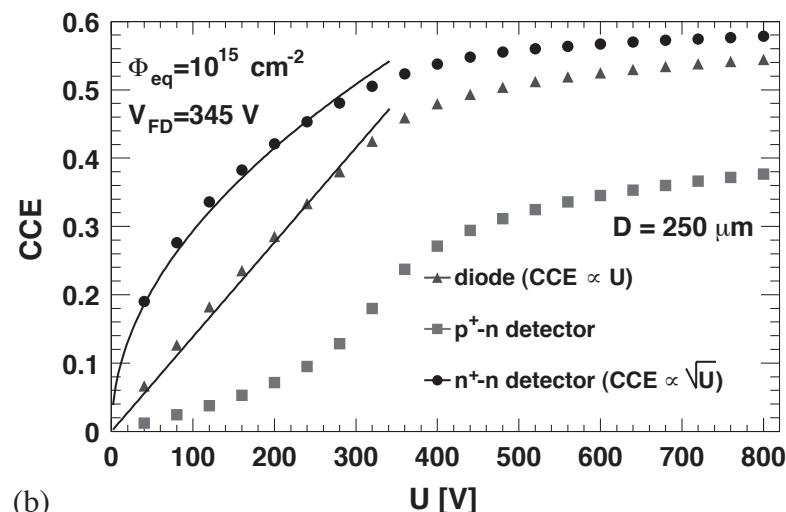
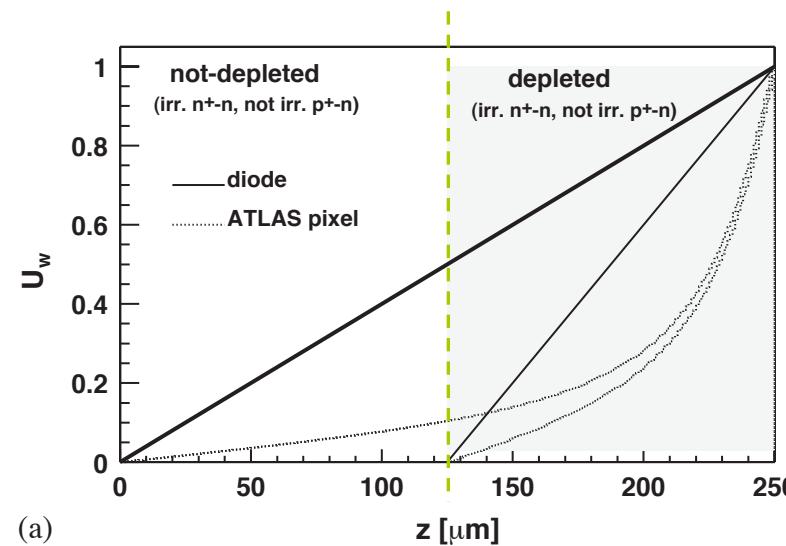
Trapping della carica in deriva

- Un rivelatore segmentato:
 - La carica raccolta dagli elettrodi diminuisce per elettrodi che raccolgono cariche "lontane"
 - Profilo del segnale agli elettrodi non uniforme

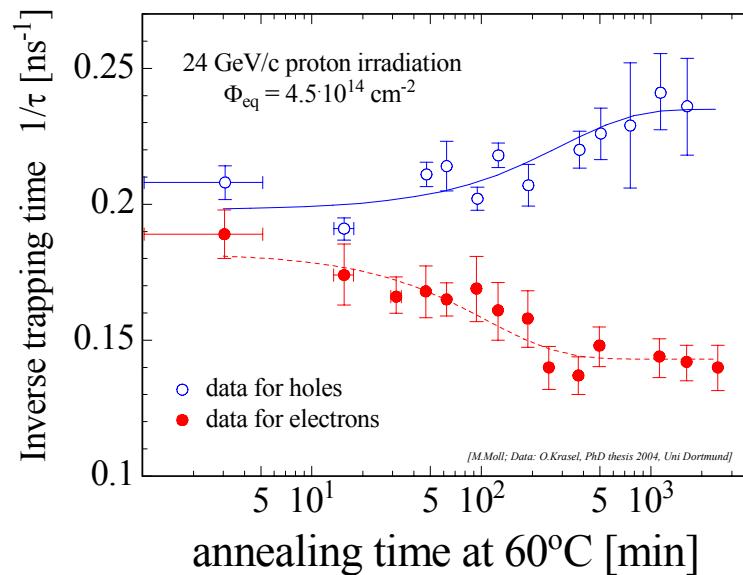
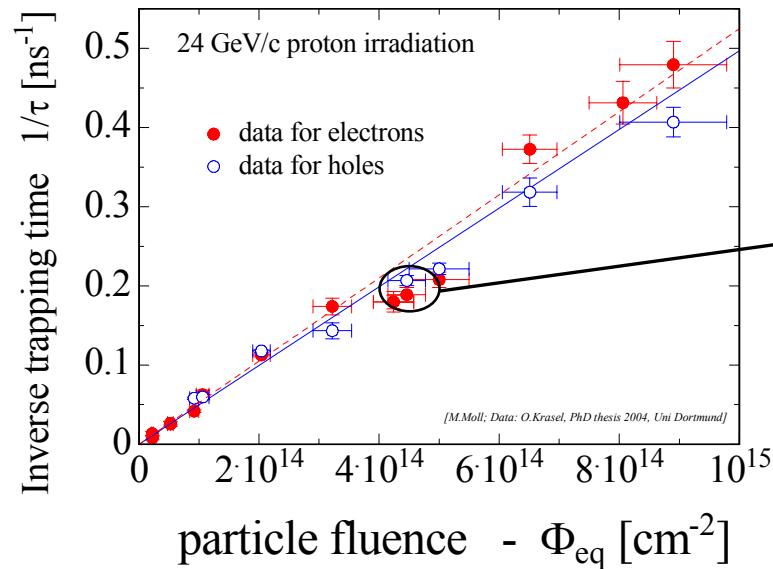
- Il segnale prodotto dipende dal E_w , campo che si modifica dopo irraggiamento
 - La carica può essere intrappolata prima di aver raggiunto una regione in cui E_w è efficace
 - Indipendente dal fatto che sia svuotata



- Misure su dispositivi a pixel:
 - Weighting Field dopo il danno da radiazione si sovrappone solo parzialmente al campo elettrico derivante dalla polarizzazione
 - L'effetto di induzione risulta diminuito e di conseguenza la carica raccolta all'elettrodo di lettura



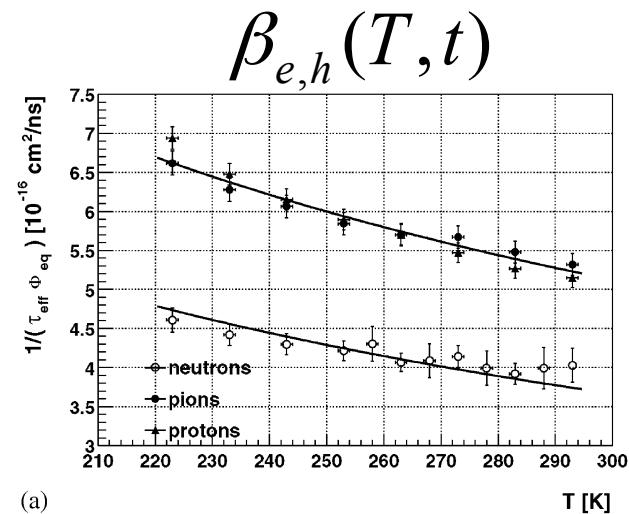
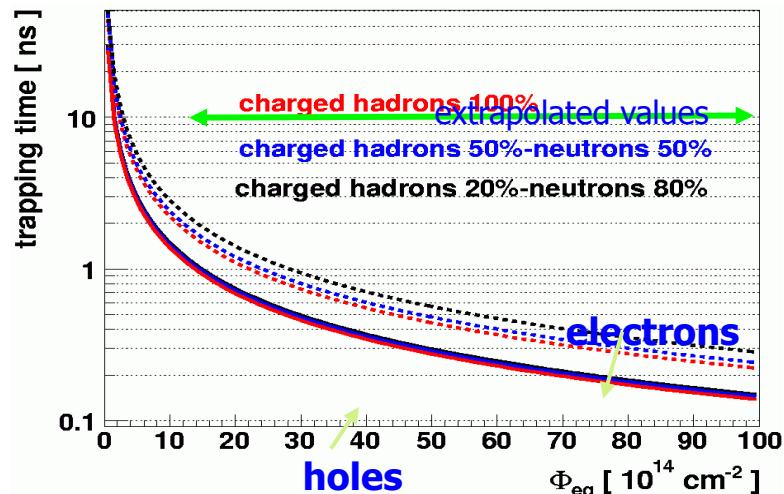
Deterioramento dovuto al trapping



$$Q_{e,h} \approx Q_{0_{e,h}} e^{-\frac{t_c}{\tau_{eff,e,h}}} \quad \frac{1}{\tau_{eff,e,h}} \propto N_{\text{defects}} \approx \beta_{e,h} \Phi_{eq} \quad \lambda_{av_{e,h}} = V_{sat_{e,h}} \tau_{eff_{e,h}}$$

$\beta_{e,h}$ indipendente da : resistività bulk, tipo di bulk (n o p), tecniche di produzione del lingotto, contaminazioni [O] [C]

Trapping ad alta fluenza



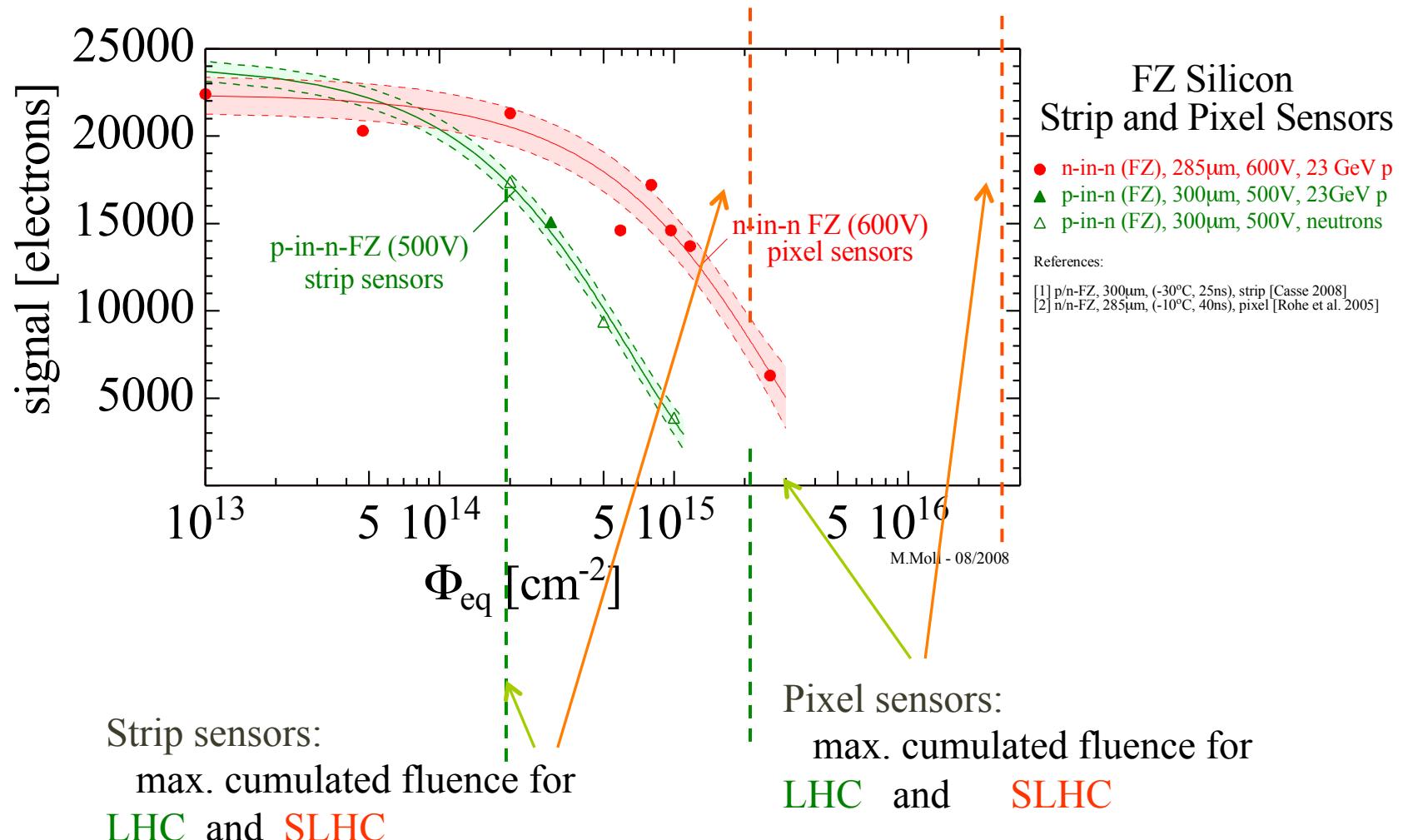
Valori estrapolati su un ordine su
grandezza in fluenza

Deficit di carica atteso

Φ_{eq} (10 ¹⁵ MeV n _{eq} /cm ²)	Trapping time (ns)	Collection length (μm)	Carge Collected (electrons)
0.5	3.9	300	23000
1	1.9	196	15000
1.5	1.3	130	10000
10	0.2	20	1500
20	0.1	10	800

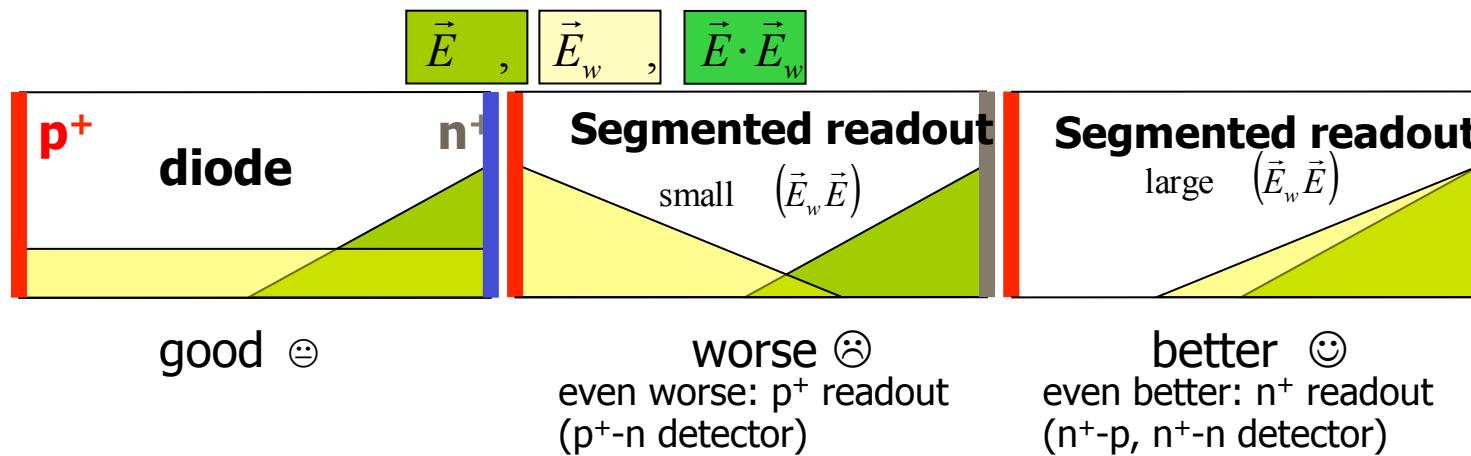
Probabilità di cattura diminuisce
con la temperatura, ma anche
la mobilità!
L'operazione a bassa T non
migliora CCE

Dove siamo oggi e cosa prevediamo



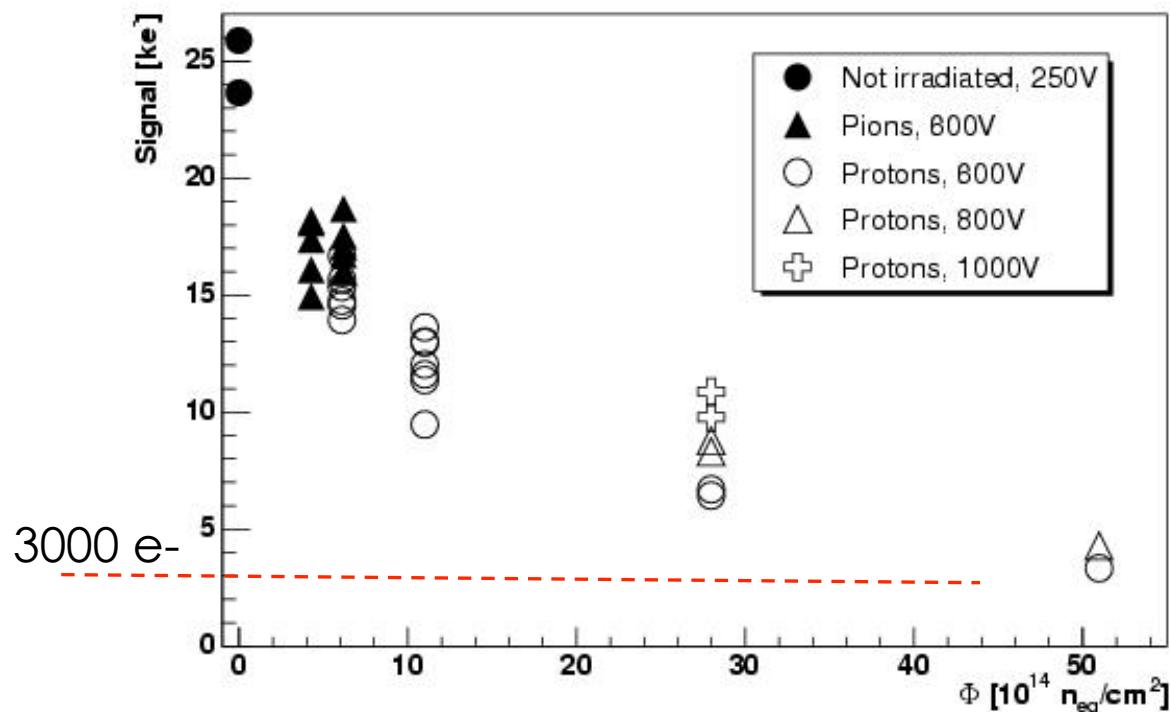
Come raccogliere il massimo del segnale

- Quello che conta è il campo elettrico che regola la deriva E ma anche il Weighting-field E_w legato alla geometria della segmentazione



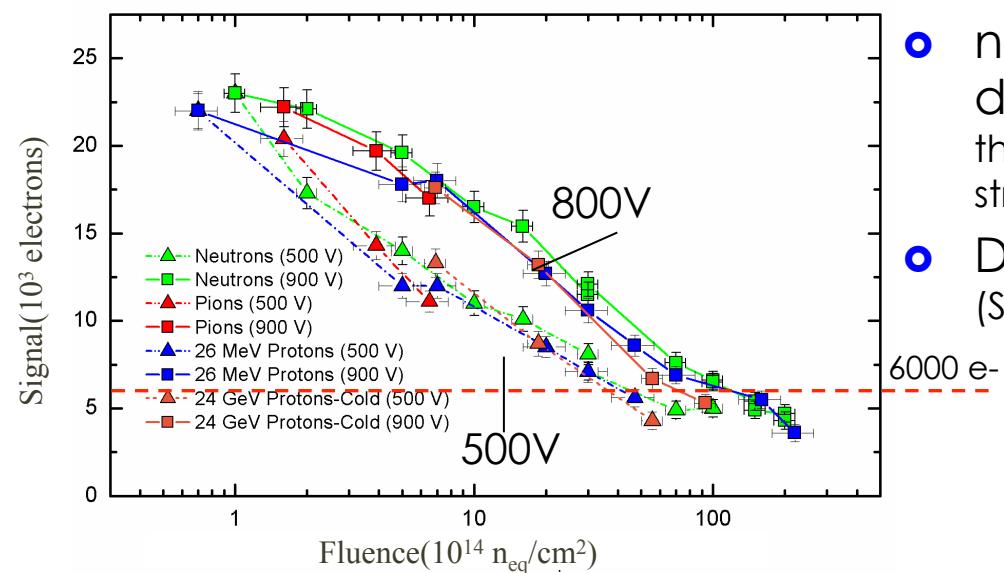
- Come ottenere il massimo segnale?
 - utilizzo di n + -n o n+ - p con passo << spessore
 - (si raccolgono elettroni e più efficacemente verso gli elettrodi)
 - larghezza impianto paragonabile al passo
 - (siamo così più simili al diodo per E_w , dipende elet FE -. capacità inter-elettrodo)

- Pixels di CMS : bulk n+-n , 270 μm spessore, segmentazione 100X150 μm^2



FZ n-in-p microstrip detectors (n, p, π - irrad)

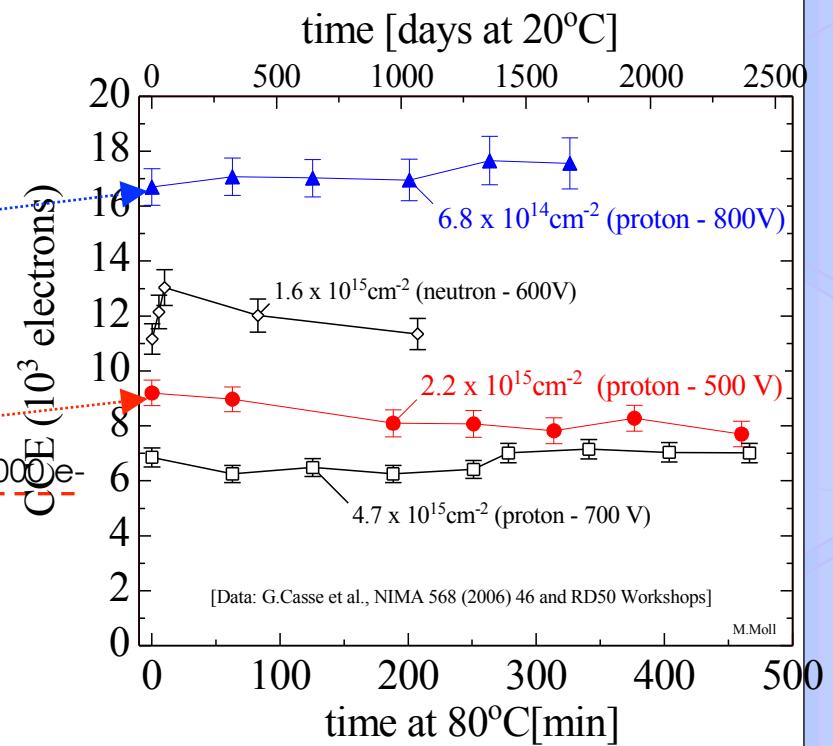
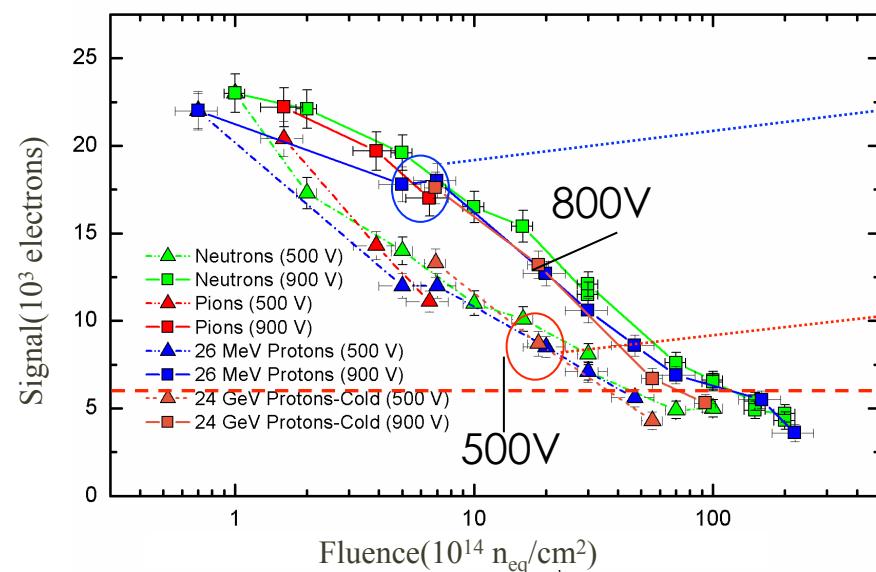
[A.Affolder, Liverpool, RD50 Workshop, June 2009]



- n-in-p microstrip (p-type Fz) detectors (Micron, 280 or 300 μ m thick, 80 μ m pitch, 18 μ m implant, ~1cm strip lenght)
- Detectors read-out with 40MHz (SCT 128A)

- CCE: ~7300e (~30%) after $\sim 1 \times 10^{16} cm^{-2}$ 800V
- n-in-p sensors are strongly considered for ATLAS upgrade

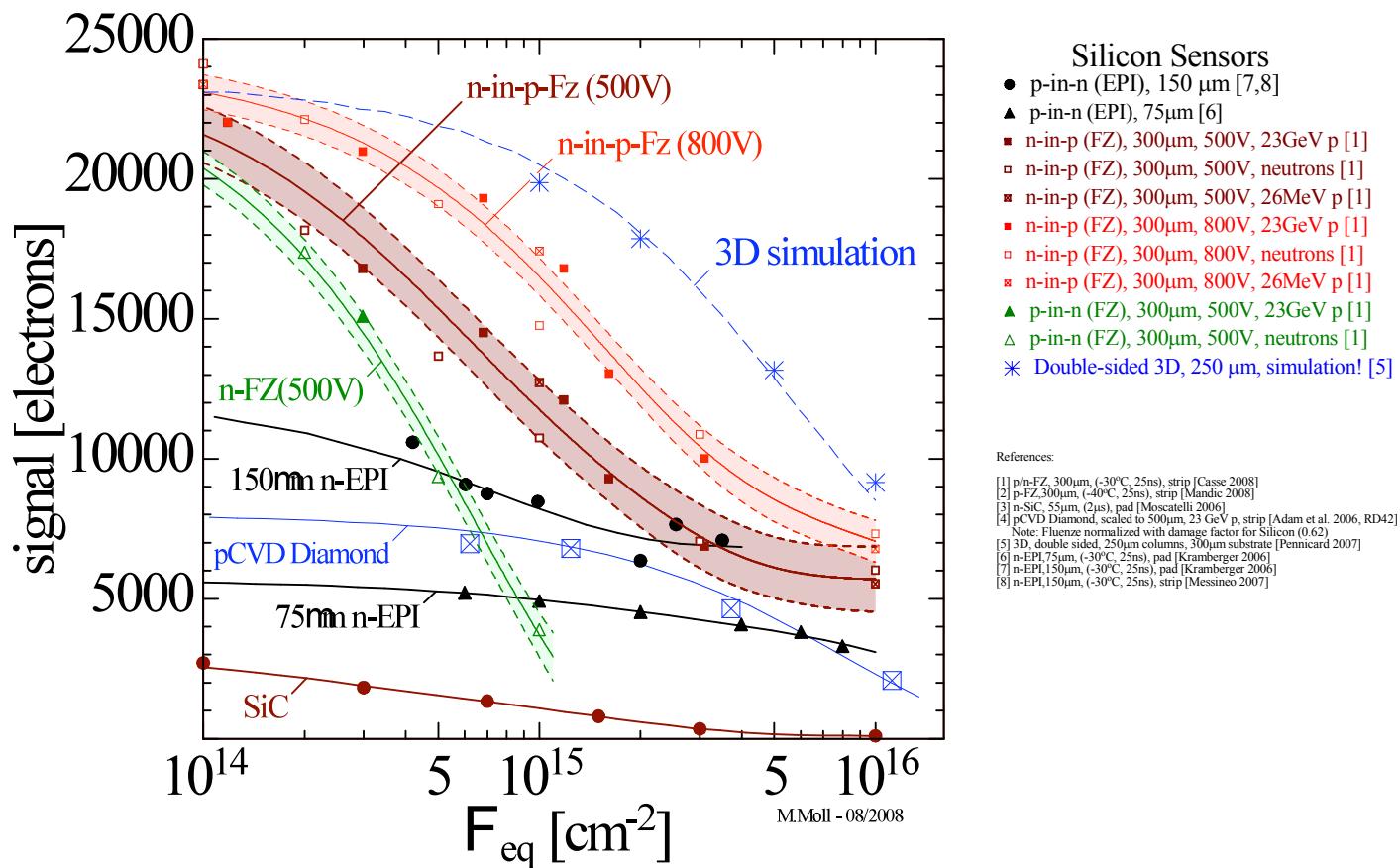
Annealing del danno sulla carica raccolta



- no reverse annealing in CCE measurements for neutron and proton irradiated detectors

Raccolta (non omogenea) di dati sulla CCE

- Possibile uso del Si nella regione 5×10^{15} 1 MeV n_{eq}/cm^2 , necessita di soluzioni innovative per la regione 10^{16} 1 MeV n_{eq}/cm^2



Detector performance S/N

- La CCE non basta
- Un rivelatore ricostruisce un segnale applicando un taglio di ricostruzione (Threshold) in generale efficace per separare i segnali dal rumore e che non taglia il segnale di particella
- Vediamo qui alcuni contributi al noise provavanti dal radiatio n damage:
 - Shot noise
 - I leakage
 - Noise capacitivo
 - Capacità di carico al canale di lettura
- Alla fine è necessario avere una stima del rapporto S/N

Contributo al noise: formule

- Nella ipotesi di uno stadio di formatura RC-CR

- Contributo shot noise

$$Q_{noise} \approx \sqrt{AI_{leakage}\tau}$$

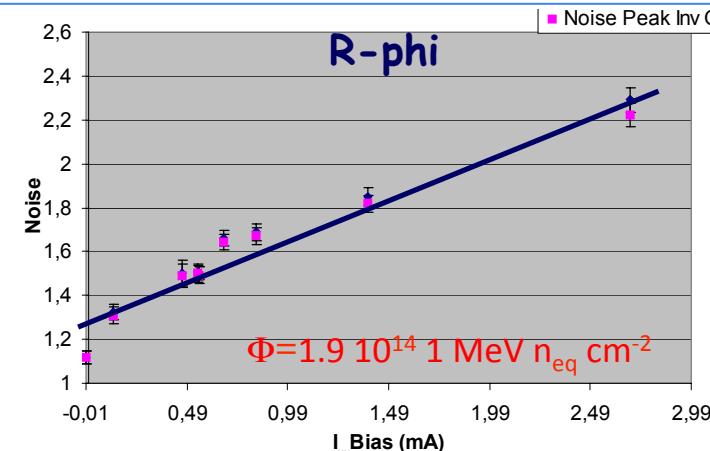
- Contributo capacitivo

$$Q_{noise} \approx \sqrt{\frac{B}{\tau}}C$$

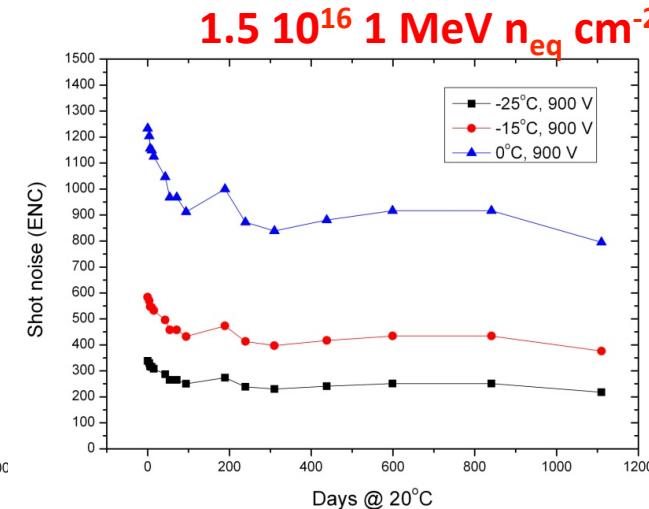
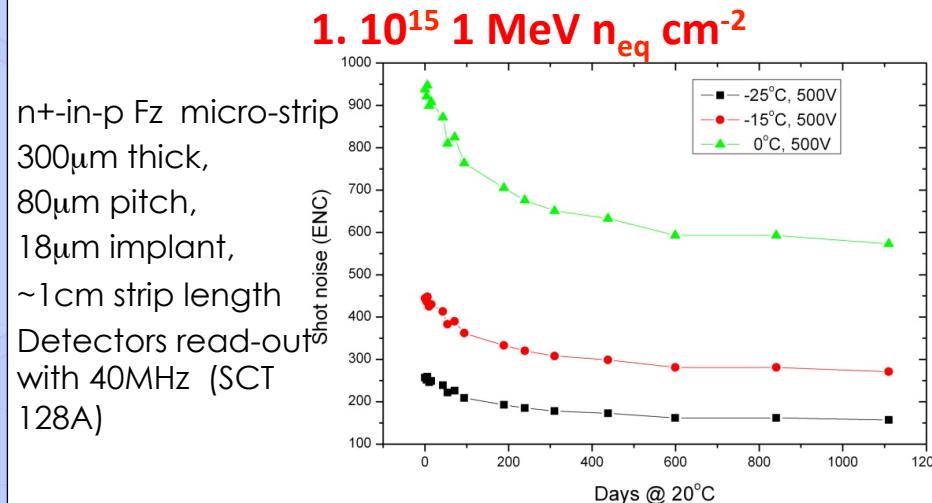
- Contribuiscono in quadratura al noise totale

Corrente inversa e shot noise

Micro strip Fz p+n
 300 μm thick <100>
 Strip L~ 10 cm
 V bias 450 V
 T= -10 °C
 F.E. APV25 40MHz
 Pendenza=~750 e-/2.5 mA

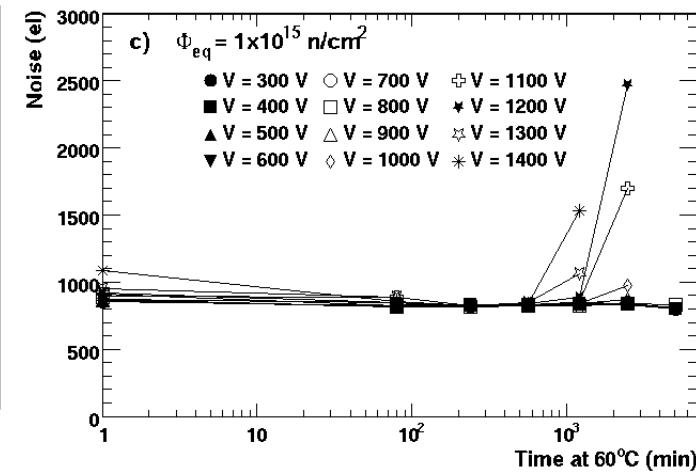
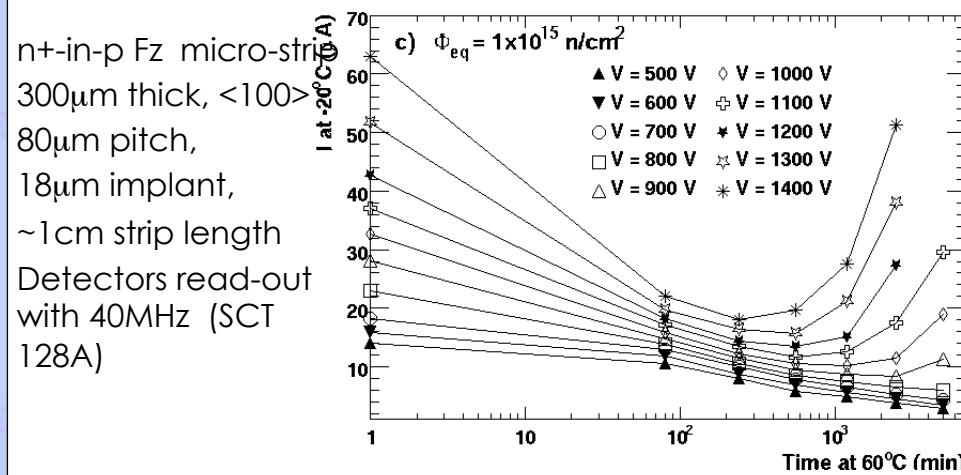


- La riduzione della corrente inversa, una corrispondente riduzione del consumo di energia dei rivelatori. Ma ha anche un impatto significativo sul rumore (shot noise)



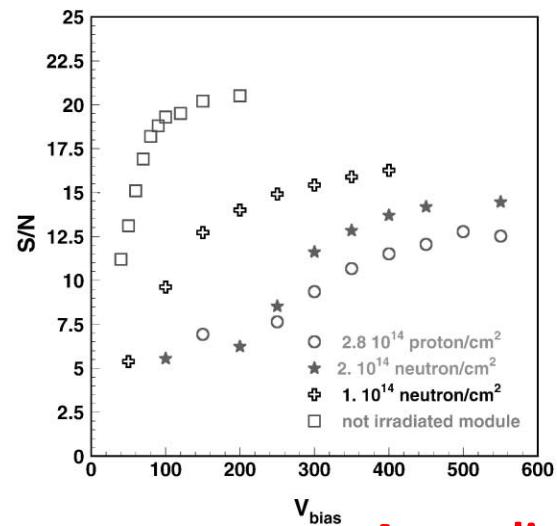
Noise medio puo aumentare ma anche il numero di strip rumorose

- Alta fluenza ed alto V polarizzazione compaiono fenomeni di moltiplicazione della carica, dovuti all'alto valore del campo elettrico ed alla forma delle impiantazioni
- L`annealing beneficiale viene alterato e di conseguenza lo shot noise cambia



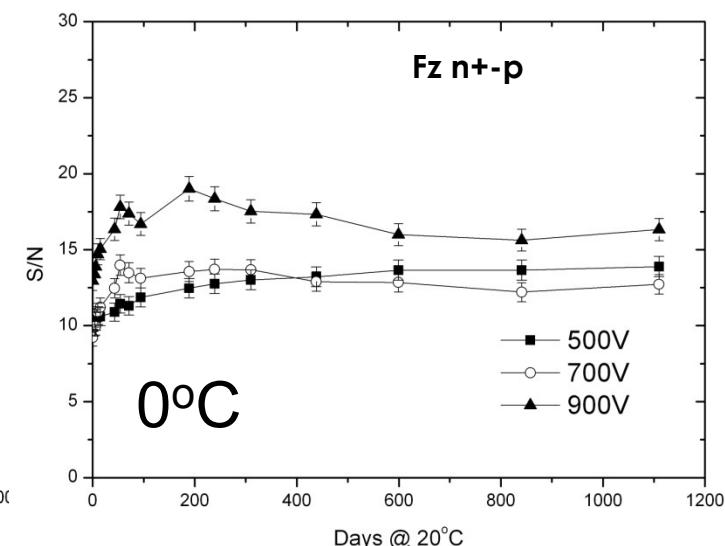
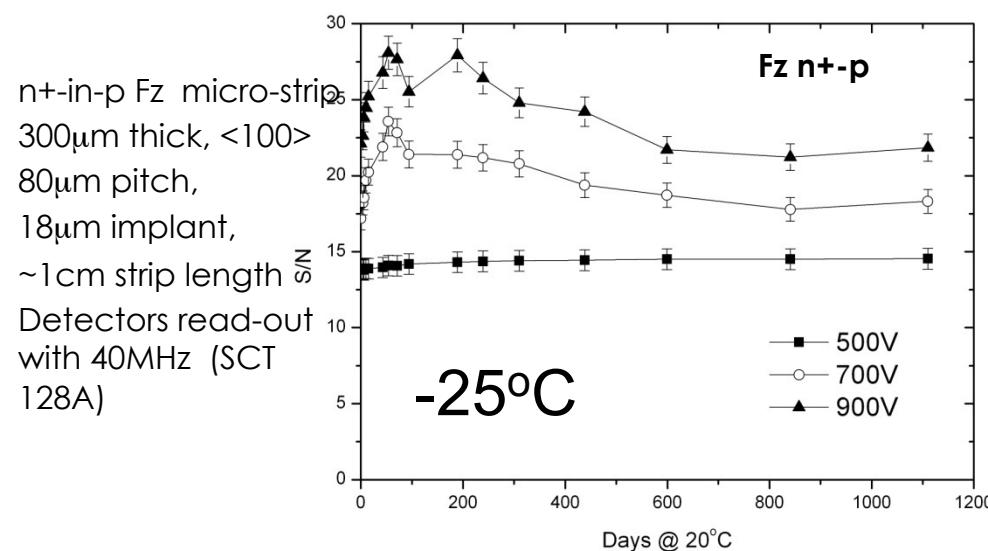
S/N

Micro strip Fz p+-n
 300 μm thick <111>
 Strip L~ 5 cm
 $T = -10^\circ\text{C}$
 F.E. APV25 40 MHz



Annealing of S/N, $\Phi = 1 \cdot 10^{15} \text{ 1 MeV n}_{\text{eq}} \text{ cm}^{-2}$

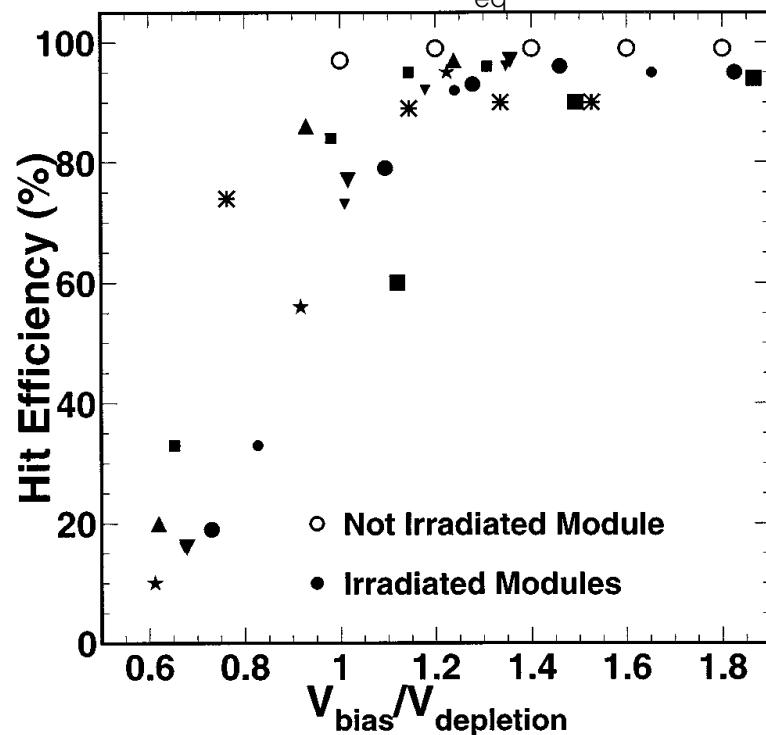
Noise is the sum in quadrature of shot noise and parallel noise (taken from the Beetle chip specs, and estimated as 600ENC)



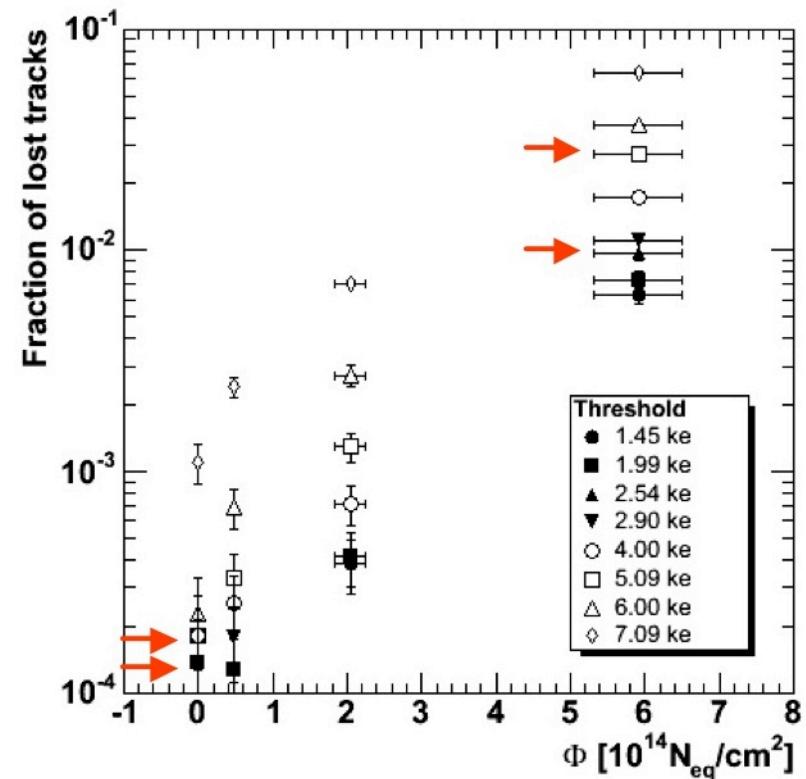
Efficienza di rivelazione

- Il noise, inversione di tipo, polarizzazione, accoppiamenti capacitivi e spread del segnale agli elettrodi contribuiscono a diminuire l'efficienza di rivelazione

Micro strip Fz p+-n 300 μm thick
 $<111>$ Strip L~5 cm
 $\Phi=2 \cdot 10^{14} \text{ 1 MeV n}_{\text{eq}} \text{ cm}^{-2}$

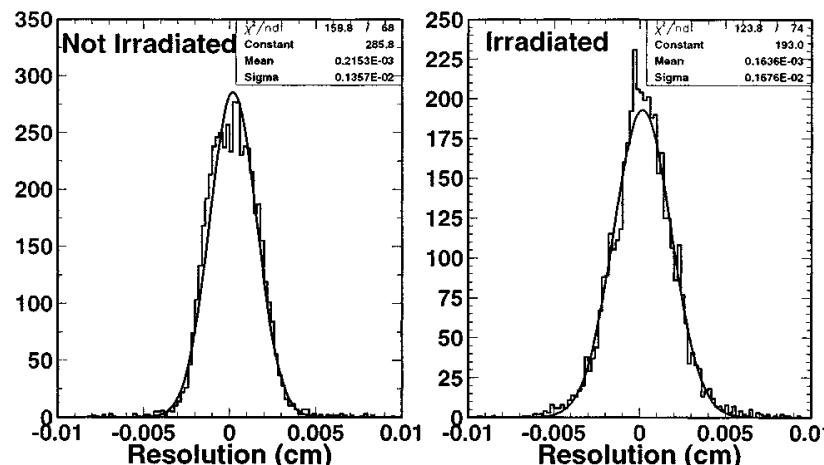


Pixels di CMS : bulk Fz n+-n , 270 μ m thick,<100> pixel 100X150 μ m²



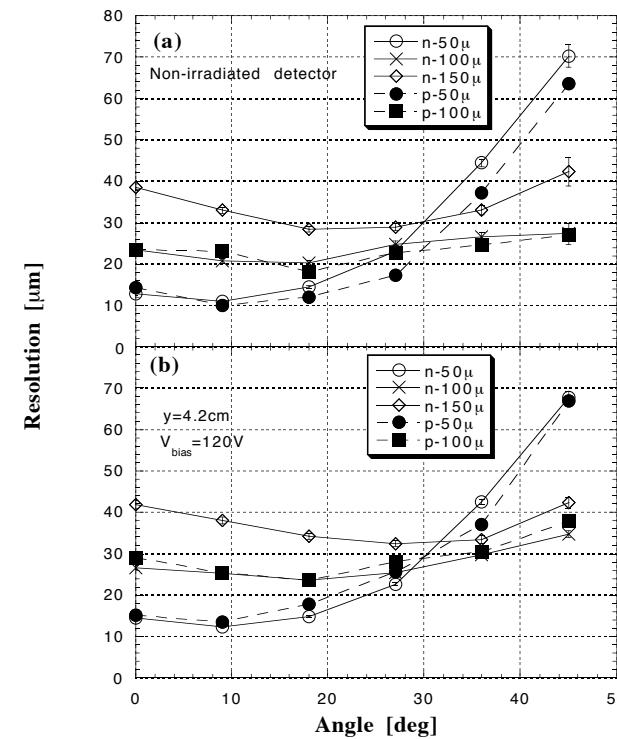
Risoluzione spaziale: esempio micro-strip

- Micro strips spessi 300 μm , <111>, Fz-n
 - Danno su ossido rilevante
 - $C_{n,n}$ cresce
- Strip pitch 61 μm implant width 14 μm
 - Accoppiamento tra le strips elevato
- Lettura analogica
- Micro strips spessi 300 μm , <100> Fz-n
 - Strip p & n (doppia faccia)
- Irraggiato a $1 \cdot 10^{14} \text{ 1 MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- Lettura binaria, soglia di 1 fC



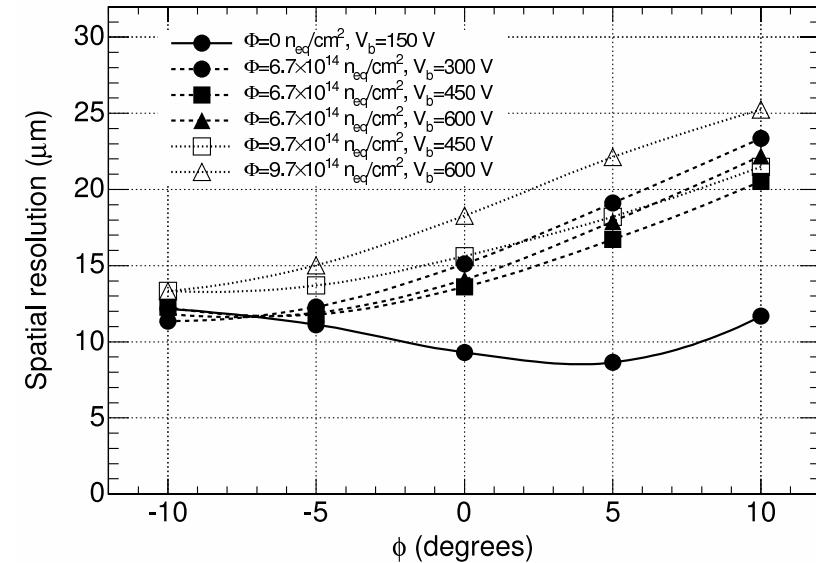
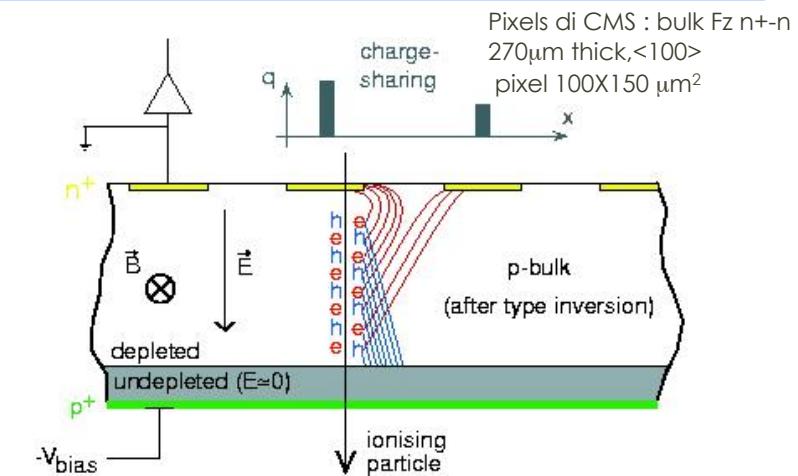
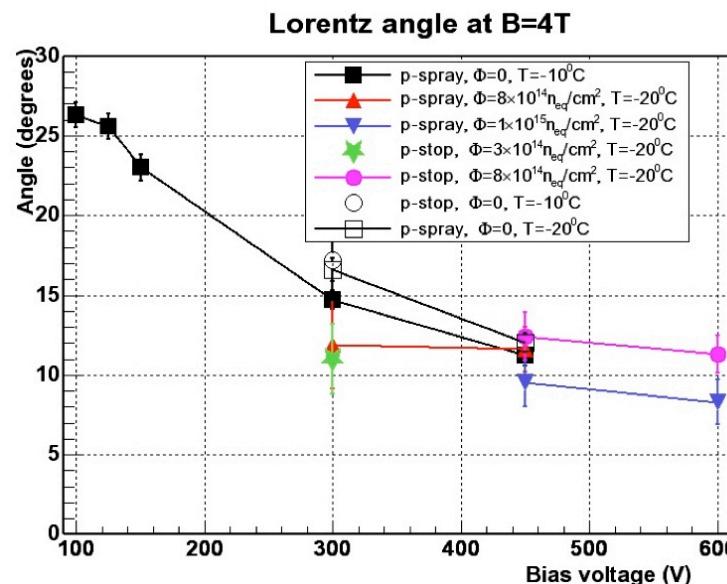
Dopo $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ 1 MeV } n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ la risoluzione peggiorata del 30 % a causa di

- 1)Inversione
- 2)Spread della carica sulle strips
- 3)Aumento di $C_{n,n}$



Risoluzione spaziale : esempio pixel

- Charge sharing gioca a favore della risoluzione spaziale tramite la misura del baricentro della carica raccolta
 - Può essere indotto anche dalla deriva dei carrier lungo una direzione definita
 - Angolo di Lorentz in campo B
- A seguito del danno da radiazione:
 - necessario applicare una tensione di polarizzazione maggiore
 - i difetti riducono la mobilità delle cariche



THE END

Lecture consigliate

- S. M. Sze: Semiconductor Devices, Physics and Technology, Wiley 1985
- R. S. Muller, T. I. Kamins: Device Electronics for Integrated Circuits, John Wiley & Sons 2003
- H. Spieler: Semiconductor Detector Systems, Oxford University Press, 2005
 - Spieler ha anche molti tutorials utilissimi
 - <http://www-physics.lbl.gov/~spieler/>
- Rossi, Fischer, Rohe, Wermes: Pixel Detectors: from Fundamentals to Applications, Springer 2006
- G.Lutz : Semiconductor radiation detectors, Device Physics, Springer 1999