

RD50

Sviluppo di rivelatori a semiconduttore resistenti alla radiazione

Anna Macchiolo

Università degli Studi di Firenze e INFN Firenze

in rappresentanza della Collaborazione RD50

(<http://rd50.web.cern.ch/rd50/>)

- ❖ **Motivazione**
- ❖ **La collaborazione RD50**
- ❖ **Materiali resistenti alla radiazione: silicio Fz, Cz, MCz, Epi**
- ❖ **Dispositivi innovativi: rivelatori sottili, n-in-p, 3D**
- ❖ **Sommario**

Da LHC a Super-LHC (I)

- **Potenziale di scoperta:** nel 2012 (dopo 2 anni al picco di luminosità di LHC) il tempo di dimezzamento degli errori statistici sale a circa 8 anni
- **Danno da radiazione:** dopo 8-10 anni di presa dati i tracciatori degli esperimenti di LHC inizieranno ad avere prestazioni molto ridotte.

2

	LHC	SLHC
Energia del fascio	7 TeV	12.5 TeV
Rate di collisioni	40 MHz	40 (80?) MHz
Luminosità istantanea	$10^{34} \text{ cm}^{-2} \times \text{s}^{-1}$	$10^{35} \text{ cm}^{-2} \times \text{s}^{-1}$
Luminosità integrata	500 fb ⁻¹ (dopo 10 anni)	2500 fb ⁻¹ (dopo 5 anni)

Da LHC a Super -LHC (II)

Distanze radiali del tracker 'attuale' di CMS		Fluenze previste a S-LHC	
Pixel:	4 cm	=>	$1.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$
	11 cm	=>	$2.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$
Microstrip:	22 cm	=>	$8 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$
	115 cm	=>	$1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

Le tecnologie attuali (**pixel n-on-n**) lavorano solo fino a fluenze di circa 10^{15} cm^{-2}

Il volume del tracker può essere diviso in tre regioni

R > 60 cm

miglioramento della tecnologia dei rivelatori a micro-strip

20 < R < 60 cm

miglioramento della tecnologia dei rivelatori a pixel (il rate più alto richiede un aumento di granularità rispetto a LHC)

R < 20 cm

richiesta attività di R&D sui materiali e la struttura dei sensori

RD50 – Strategia scientifica

RD50: Esperimento approvato dal Cern nel 2002 - 271 membri da 52 istituti

Obiettivo: sviluppo di rivelatori a semiconduttore resistenti alle radiazioni fino a fluenze di 10^{16} cm⁻²

- Ingegnerizzazione dei materiali
 - Caratterizzazione microscopica dei materiali, corrispondenza con il comportamento macroscopico
 - Ingegnerizzazione dei difetti nel silicio (Fz, DOFz, Cz, MCz)
 - Nuovi materiali (GaN, SiC)
- Ingegnerizzazione dei dispositivi
 - Miglioramento delle strutture planari attuali (rivelatori 3D, rivelatori sottili, semi 3-D, rivelatori stripixel)
 - Test di sistemi di rivelatori di tipo LHC ma prodotti con substrati radiation-hard
 - Variazione delle condizioni operative

Materiali	Simbolo	$\rho \Omega \text{ cm}$	$[\text{O}_i] \text{ cm}^{-3}$
Fz standard di tipo n e p	FZ	$1 - 7 \cdot 10^3$	$< 5 \cdot 10^{16}$
Fz di tipo n e p ossigenato per diffusione	DOFZ	$1 - 7 \cdot 10^3$	$\sim 1 - 2 \cdot 10^{17}$
Czochralski n type	CZ	$1.2 \cdot 10^3$	$\sim 8 - 9 \cdot 10^{17}$
Czochralski magnetico, tipo n e p	MCZ	$1.2 \cdot 10^3$	$\sim 5 - 9 \cdot 10^{17}$
Silicio epitassiale su substrato CZ	EPI	50-100	substrato 10^{18}

Si Czochralski

- Cresciuto in un crogiuolo di quarzo (SiO_2) che favorisce una alta contaminazione di ossigeno ($10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)
- Recentemente si è reso disponibile materiale Cz di alta resistività ($> 1 \text{ K } \Omega \text{ cm}$) che permette l'uso in fisica delle alte energie.
- Costo minore rispetto a FZ perchè è un materiale standard nell'industria IC

1. Un'alta concentrazione di ossigeno favorisce la formazione del complesso **VO**
 1. **VO** è neutro a temperatura ambiente
 2. La formazione di **VO** è competitiva con il processo **VO+V=V₂O** oppure con la formazione di **V₂** (accettori profondi) \Rightarrow minore carica negativa
2. Alta [O] favorisce la formazione di donori termici durante l'irraggiamento
 1. **I+O₂=IO₂** precursore dei donori termici \Rightarrow carica positiva

(I. Pintilie et al., NIM A 514 (2003) 18)

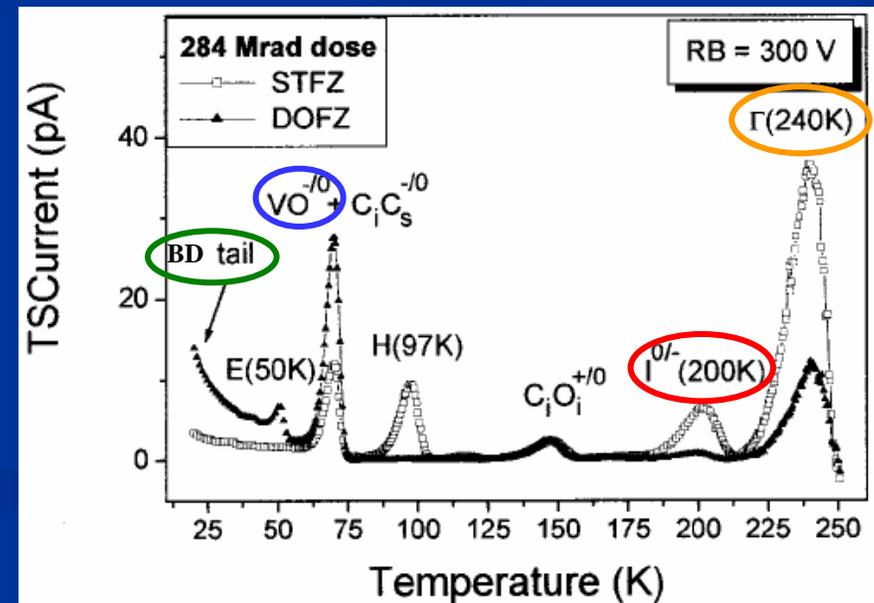
I: livello di accettore profondo a $E_C - 0.54\text{eV}$

- sviluppo proporzionale $\propto \text{dose}^2$
- è responsabile di circa l'85 % della variazione di N_{eff}
- buon candidato per il difetto **V₂O**

Difetto Γ : livello di accettore $E_V + 0.68\text{eV}$

- responsabile di circa il 10% della variazione di N_{eff}

IFAE 30 Marzo – 1 Aprile 2005



RD50

Standard FZ, DOFZ, Cz and MCz Silicon

Irraggiamento con protoni da
24 GeV/c

• Silicio standard Fz

- inversione del substrato da tipo n a tipo p a fluenze di $\sim 2 \times 10^{13}$ p/cm²
- forte aumento di N_{eff} ad alte fluenze

• Fz ossigenato (DOFZ)

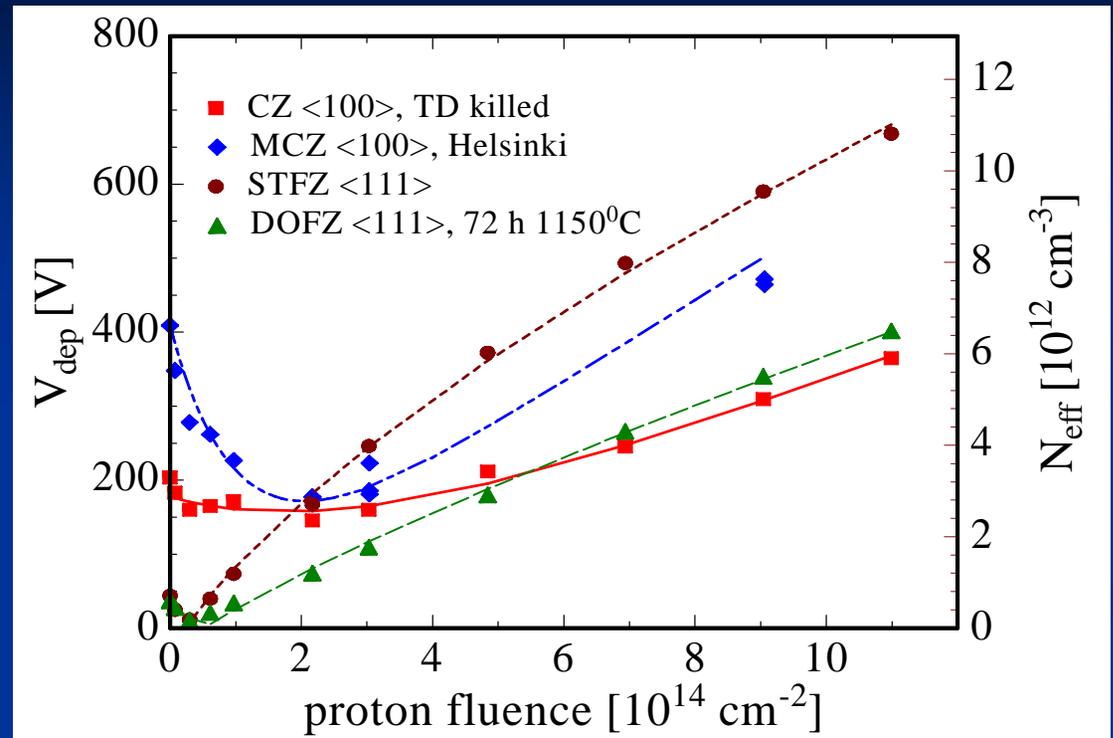
- inversione di tipo del substrato a fluenze $\sim 2 \times 10^{13}$ p/cm²
- ridotto aumento di N_{eff} ad alte fluenze

• Silicio di tipo Cz e MCz

- non si verifica nessuna inversione del substrato su tutto il range di fluenze fino a 10^{15} p/cm² (confermato con misure di TCT per Cz)
- la generazione di donori compensa quella di accettori nel range di alte fluenze

• Comportamento comune a tutti i materiali

- La corrente di leakage aumenta con la stessa costante di proporzionalità per tutti i materiali in funzione della fluenze
- stesso aumento di trappole ($\sim 20\%$) per i portatori di carica



RD50

Rivelatori sottili

• Perché scegliere rivelatori sottili?

- Corrente di leakage ridotta $I_{\text{leak}} \propto W$
- Tensione di svuotamento minore $V_{\text{dep}} = qW^2 N_{\text{eff}} / 2\varepsilon \propto W^2$
- Alle fluenze di SLHC la raccolta di carica per rivelatori planari è limitata dal cammino libero medio, non da W

10 μm per lacune, 20 μm per elettroni per $\Phi_{1\text{-MeV n}} = 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

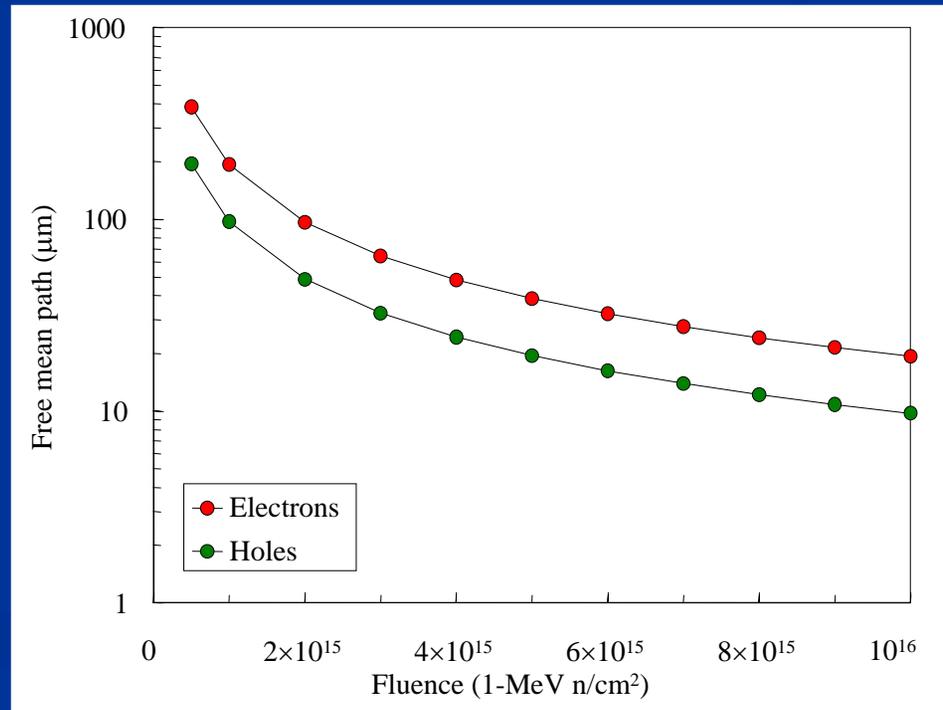
$$1/\tau_{e,h} = \beta_{e,h} \times \Phi_{1\text{-MeV n}}$$

$$\beta_e = 5.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{ns}$$

$$\beta_h = 7.7 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{ns}$$

• Svantaggi:

- segnale basso nel range di basse fluenze - il segnale di una MIP è circa 3500 elettroni per uno spessore epitassiale di 50 μm



RD50

Strutture di silicio epitassiale

p⁺-implant

Epitaxial layer, n-type

Cz substrate, n⁺-type

Silicio epitassiale cresciuto da ITME

Spessore dello strato epi: 25, 50, 75 μm

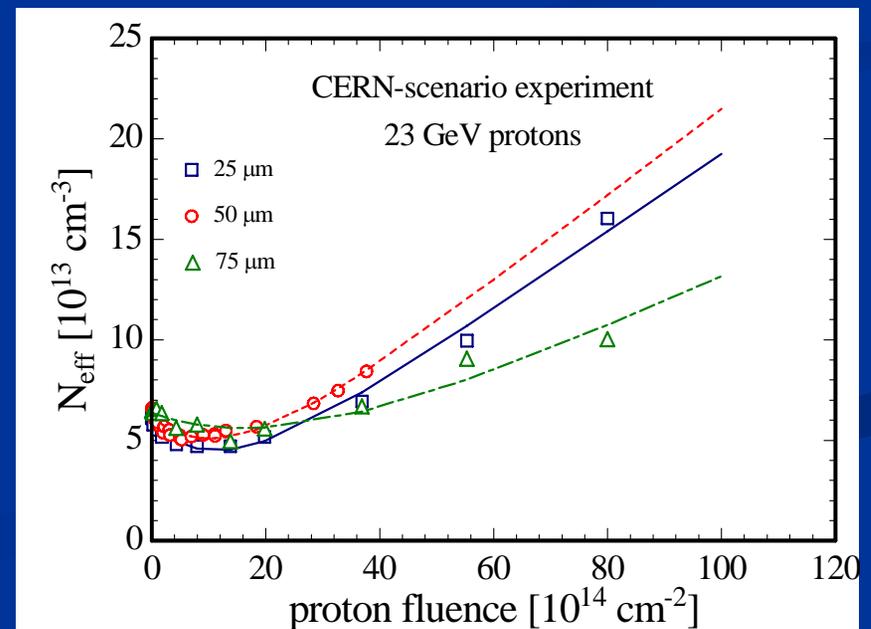
Resistività epi: $\sim 50 \Omega \text{ cm}$

Resistività substrato Cz: $< 0.02 \Omega \text{ cm}$

Ossigeno: $[\text{O}] \sim 9 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ diffuso dal substrato Cz
nello strato epi

• Non si osserva l'inversione del tipo del substrato in tutto il range di interesse per SLHC.

• Spiegazione proposta: il rate di introduzione dei donori termici compensa quello di accettori profondi ad alte fluenze

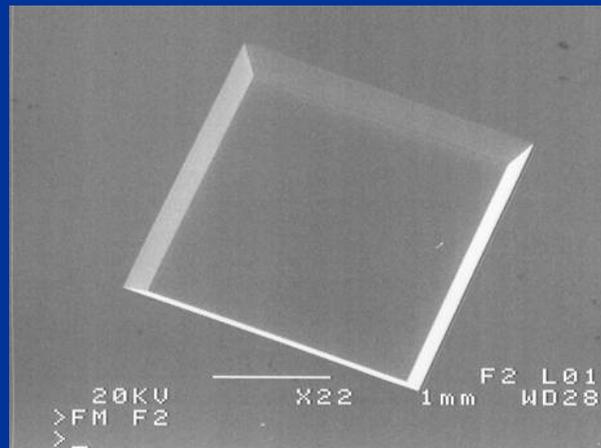
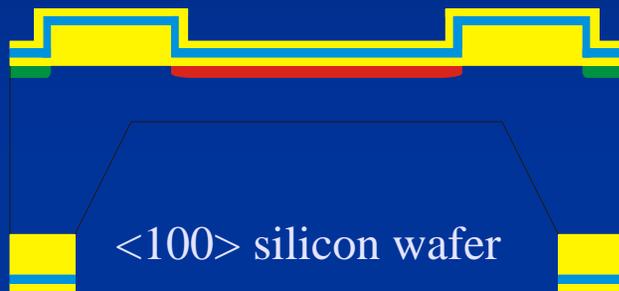


RD50

Strutture di silicio assottigliato

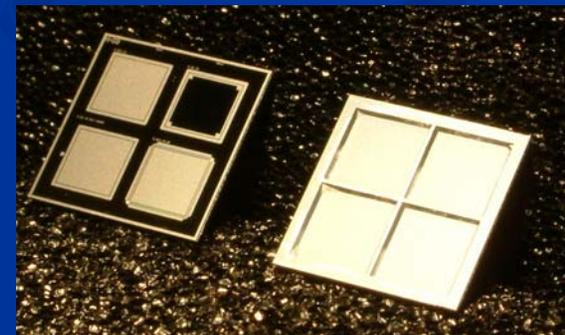
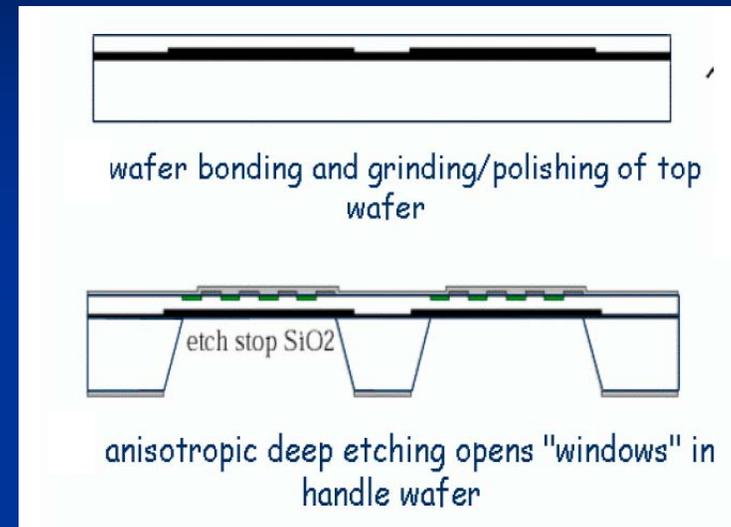
ITC-IRST, Trento

Assottigliamento con
attacco chimico (TMAH)



SEM: vista della superficie posteriore di un wafer
assottigliato

MPI, Semiconductor Detector Laboratory, Munich



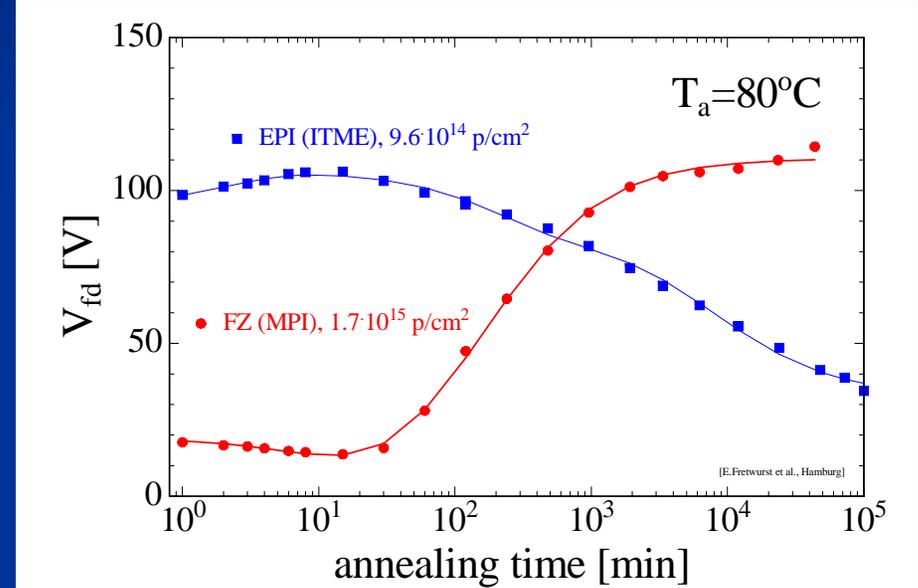
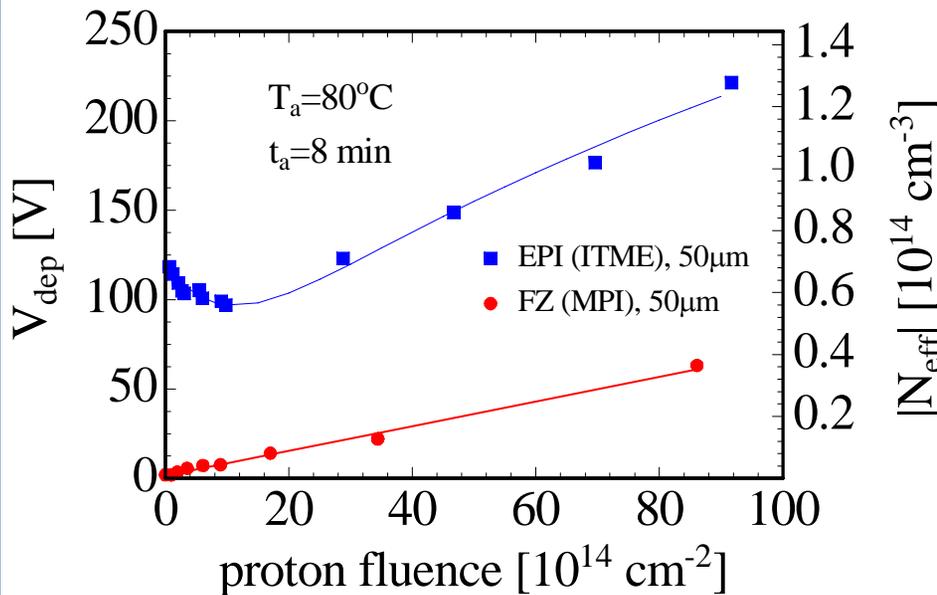
Lato superiore (sinistra) e inferiore (destra)
dei dispositivi assottigliati

Area: 10 mm² e $I < 1$ nA/cm² a 20 V

RD50

Confronto Epi- Si assottigliato

- rivelatori di silicio spessi 50 μm
- - **silicio epitassiale** (50 Ωcm su substrato CZ, ITME & CiS)
- **Fz assottigliato** (4K Ωcm , MPI Munich, tecnica di wafer bonding)



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

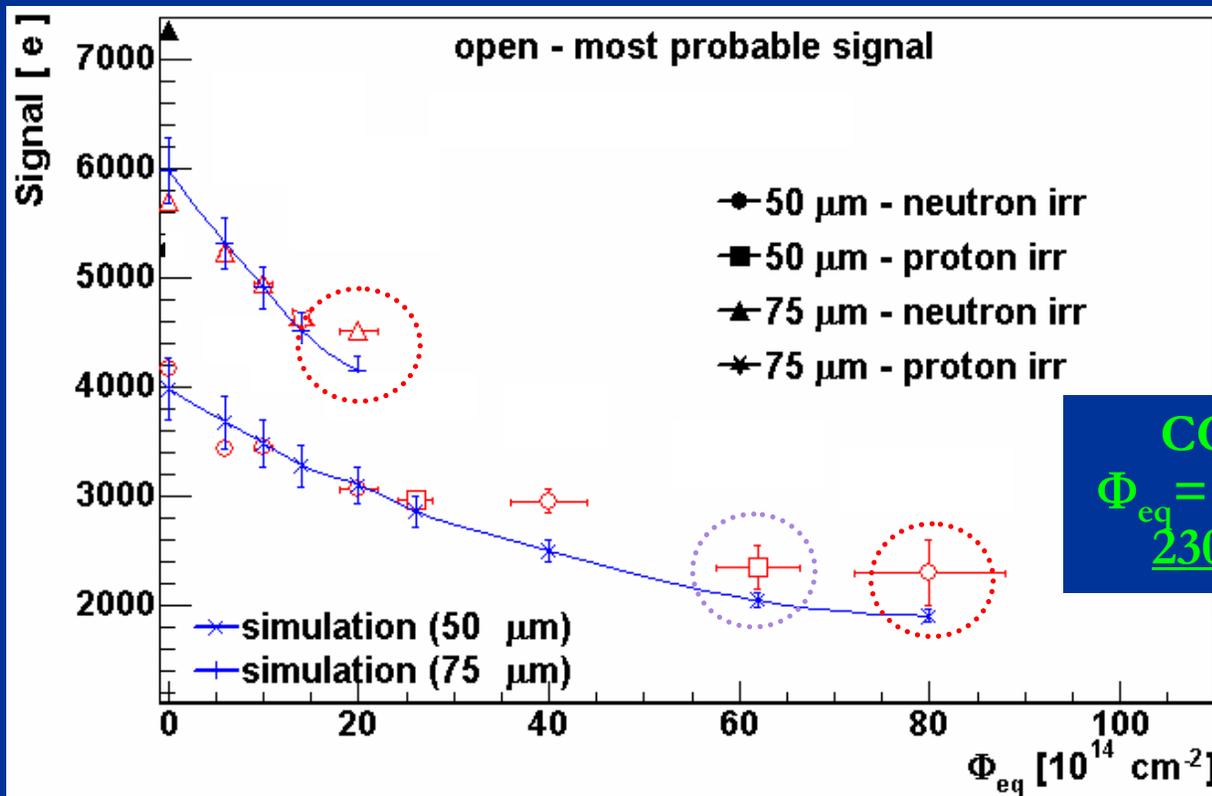
- **Fz sottile**: substrato invertito, aumento della tensione di svuotamento col tempo
- **Epi**: senza inversione, diminuzione della tensione di svuotamento col tempo
⇒ Evita la necessità di mantenere i rivelatori a bassa T durante i periodi di manutenzione per SLHC!

RD50

Segnale da silicio Epi irradiato

- **Silicio epitassiale:** CCE misurata con particelle beta (^{90}Sr)
 - Shaping time di 25ns
 - Irraggiamento con neutroni e protoni di strati di Epi spessi $50\ \mu\text{m}$ e $75\ \mu\text{m}$

[G.Kramberger, RESMDD, Oct.2004]



CCE ($75\ \mu\text{m}$)
 $\Phi = 2 \times 10^{15}\ \text{n/cm}^{-2}$
4500 electrons

CCE ($50\ \mu\text{m}$)
 $\Phi_{eq} = 8 \times 10^{15}\ \text{n/cm}^{-2}$,
2300 electrons

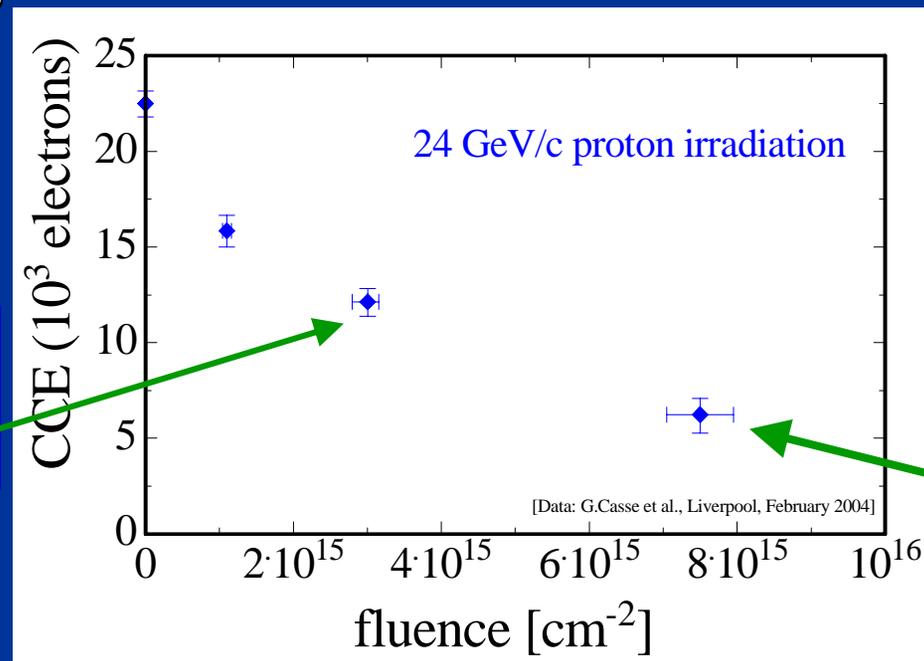
CCE ($50\ \mu\text{m}$): $\Phi = 1 \times 10^{16}\ \text{cm}^{-2}$ (24 GeV/c protons)
2400 electrons

RD50

Rivelatori a micro-striscie n-su-p

n-in-p: - senza inversione di tipo, la zona di campo elettrico elevato rimane sul lato impiantato, i portatori raccolti sono gli elettroni

- Mini-sensori a microstrip n-in-p ($280\mu\text{m}$) $1 \times 1 \text{ cm}^2$
- Rivelatori letti alla frequenza di LHC (40MHz) con il chip (SCT128A)
- Materiale: tipo p standard e tipo p ossigenato (DOFZ)
- Irraggiamento



G. Casse et al., Feb 2004

CCE ~ 60% dopo $3 \times 10^{15} \text{ p cm}^{-2}$ a 800V (standard p-type)

CCE ~ 30% dopo $7.5 \times 10^{15} \text{ p cm}^{-2}$ 900V (oxygenated p-type)

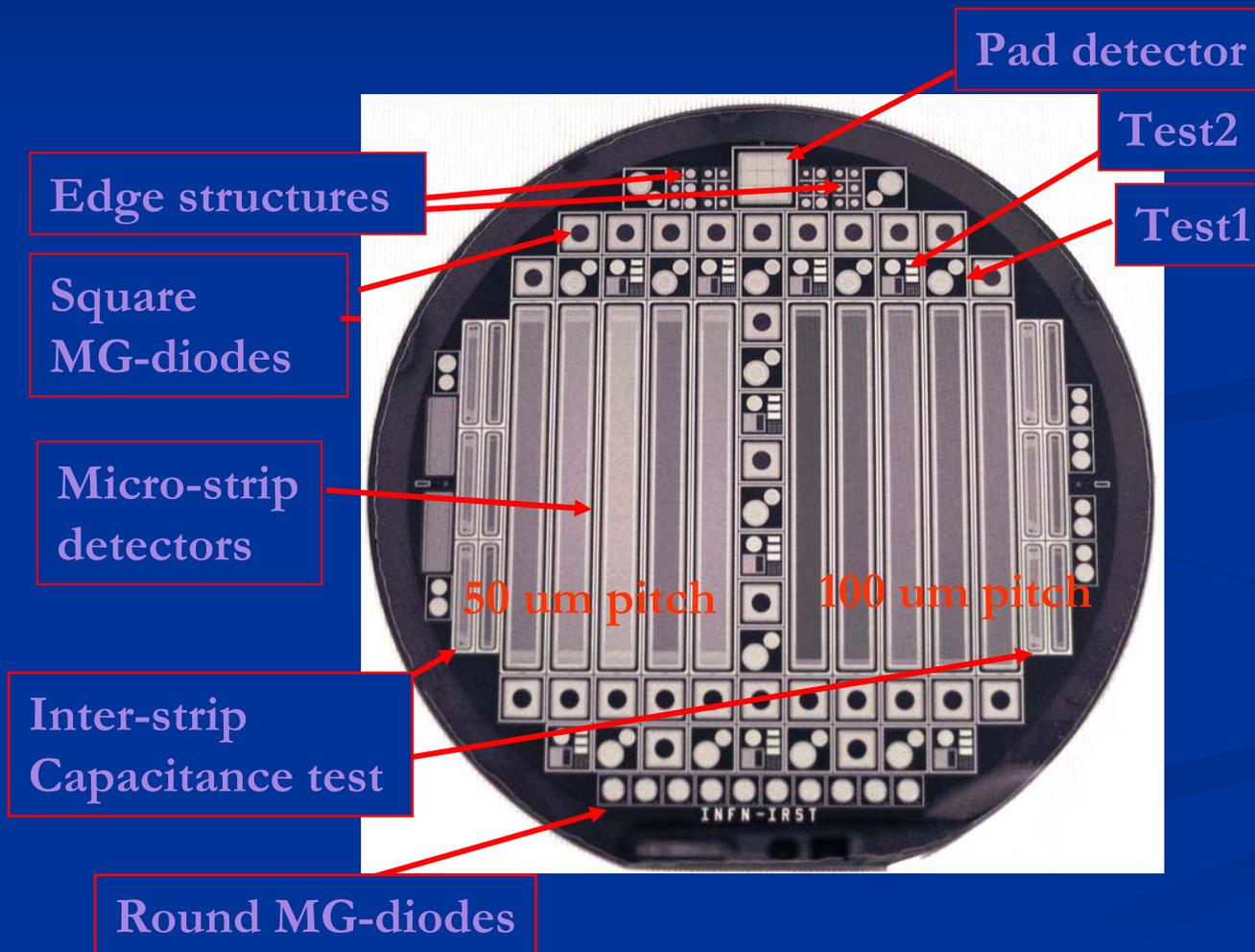
Alla più alta fluence $Q \sim 6500e$ per $V_{\text{bias}} = 900V \rightarrow S/N \sim 7$

RD50

Collaborazione SMART - INFN

Structures and Materials for Advanced Radiation hard Trackers

- Progetto finanziato dall'**INFN** - processo realizzato da **IRST - Trento**



Bari

Firenze

Padova

Perugia

Padova

IRST-Trento

Trieste

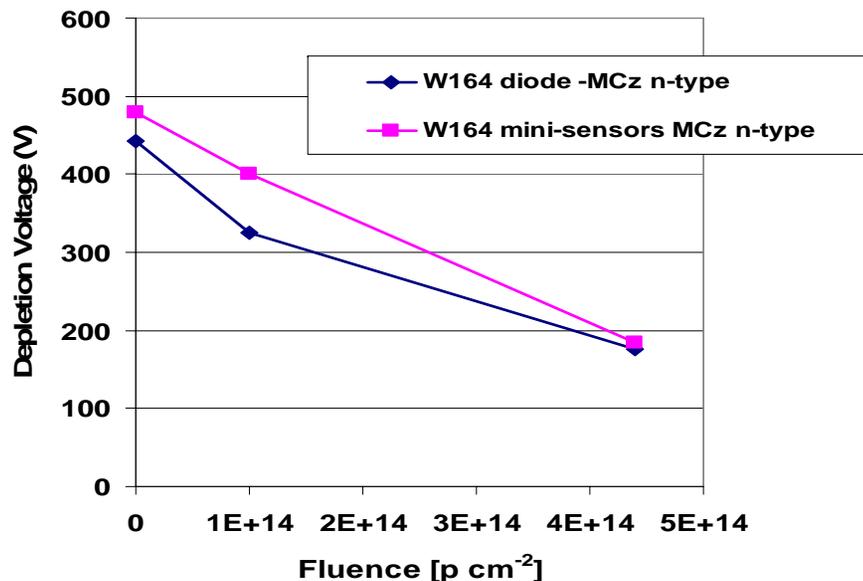
RD50

SMART- produzione e irraggiamento

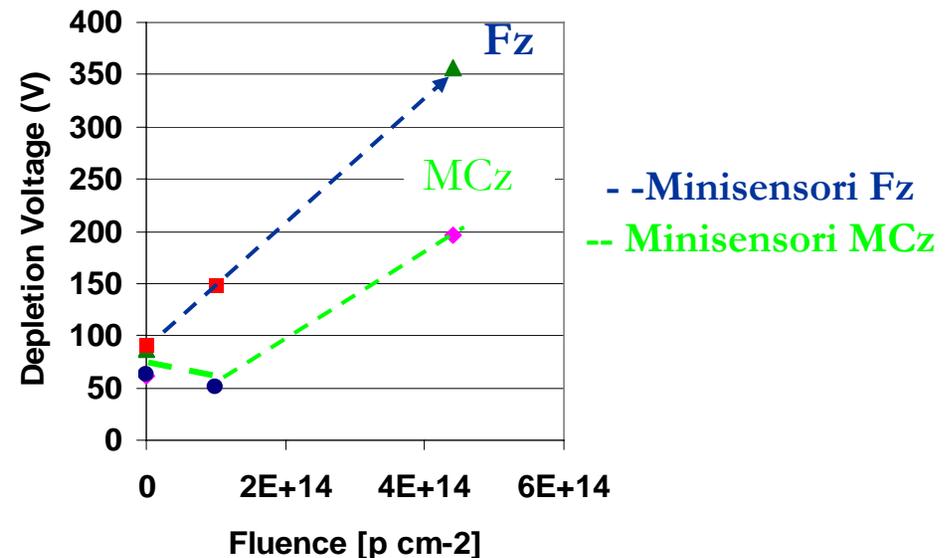
- **Run I** : p-on-n Materiali: **Fz, MCz, Epi**
 - **Run II**: n-on-p Materiali: **Fz, MCz**
- Isolamento delle strisce con la tecnica del p-spray
- Irraggiamenti:** **SPS Cern**- protoni 23 GeV/c fino a fluenze di 5.5×10^{15} p/cm² .
 Ljubjiana – neutroni da reattore nucleare fino a fluenze di 10^{16} n/cm²

Studio delle prestazioni dei mini-sensori irraggiati con protoni da 23 GeV/c

MCz p-in-n



Fz e MCz n-in-p



RD50

Rivelatori 3-D

Elettrodi:

- Sottili colonne che attraversano lo spessore-“3D”
- diametro: $10\mu\text{m}$ distanza: $50 - 100\mu\text{m}$

Svuotamento laterale

- Tensione di svuotamento minore
- Possibilità di realizzare rivelatori più spessi
- Raccolta veloce del segnale

Realizzazione in RD50

– Glasgow University

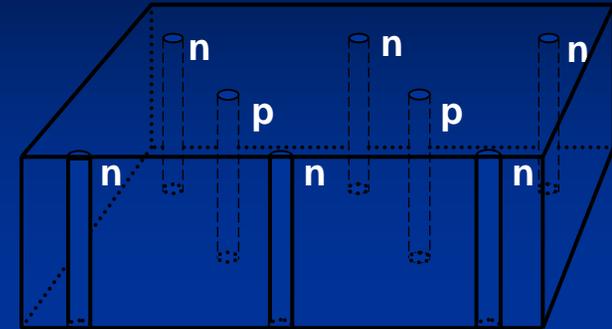
Irraggiamento fino a $5 \times 10^{14} \text{ p/cm}^2$ e $5 \times 10^{14} \text{ } \pi/\text{cm}^2$:

$V_{\text{fd}} = 19\text{V}$; Diminuzione del 25% della CCE (particelle α)

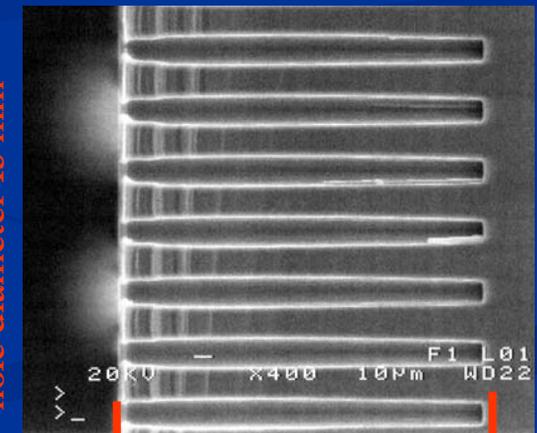
–IRST-Trento e CNM Barcelona

Problemi

- le colonne sono zone morte del rivelatore
- le zone fra colonne dello stesso tipo hanno un campo elettrico minore
- dubbi sulla possibilità di produzione di massa – efficienza e costo



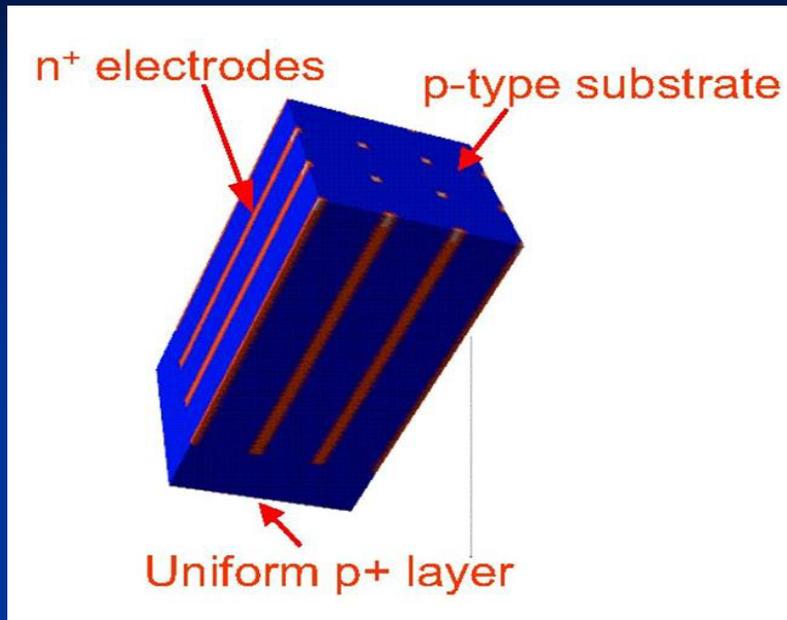
(Introduced by S.I. Parker et al., NIMA 395 (1997) 328)



~200 micron

RD50

Rivelatori 3-D Single Type Column



■ Architettura 3-D semplificata

- Colonne n⁺ in substrato di tipo p, backplane p⁺
- Funzionalità simile a quella dei 3-D standard

■ Processo semplificato

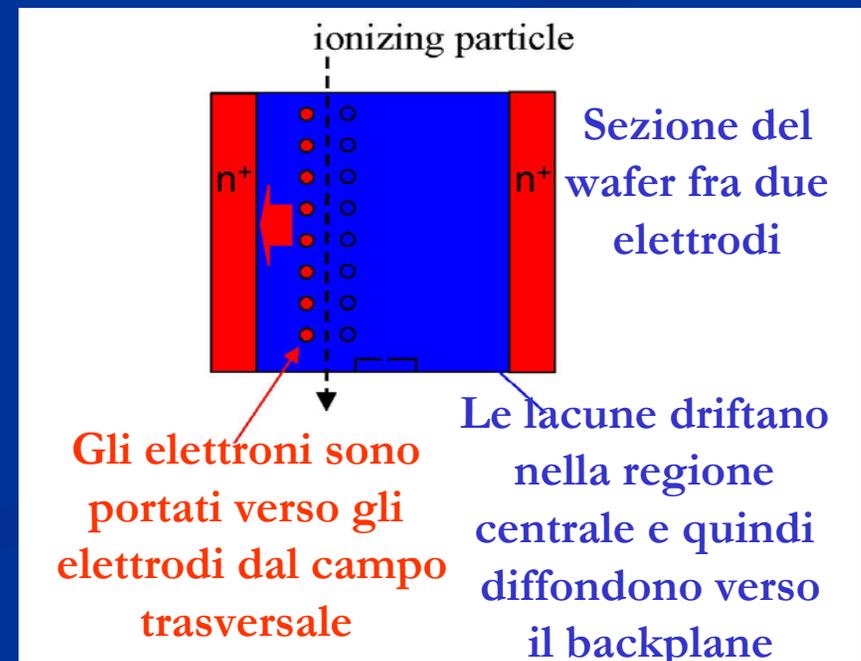
- Perforatura della colonna e doping in una sola fase per tutto il wafer
- Non è necessaria la tecnica del wafer bonding

■ Collaborazione fra IRST-Trento e CNM Barcellona

- Singoli step di processo testati, lay-out completato, produzione iniziata

■ Simulazione della raccolta di carica

- Anche nel caso peggiore (particella incidente nella regione centrale fra due elettrodi) il tempo di raccolta di carica $t < 10$ ns



- **Materiali diversi e dispositivi innovativi sono sotto esame in RD50 per realizzare i nuovi tracciatori degli esperimenti a SLHC.**
- **Lo studio è focalizzato sulle diverse problematiche che si presentano nel tracciatore dipendentemente dalla distanza dal punto di interazione**
- **Nella regione esterna con fluenze fino a 10^{15}cm^{-2} il problema è costituito dall'area estesa da coprire e dall'evoluzione della tensione di svuotamento con la fluenza.**
 - **Rivelatori di silicio MCz** - vengono esplorate le opzioni p-in-n e n-in-p
 - **Silicio di tipo p ossigenato** – S/N ~ 7 dopo 7×10^{15} pcm $^{-2}$
- **Nella regione interna con fluenze fino a 10^{16}cm^{-2} il problema è costituito dalla riduzione del cammino libero medio per la cattura dei portatori di carica da parte dei difetti**
 - **Rivelatori EPI** : è necessaria un'elettronica rad-hard per piccoli segnali
 - **3D detectors** : tecnologia complessa difficile da standardizzare