

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.

	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	$\rho \ \Omega \text{ cm}$	$[O_i] \text{ cm}^{-3}$
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

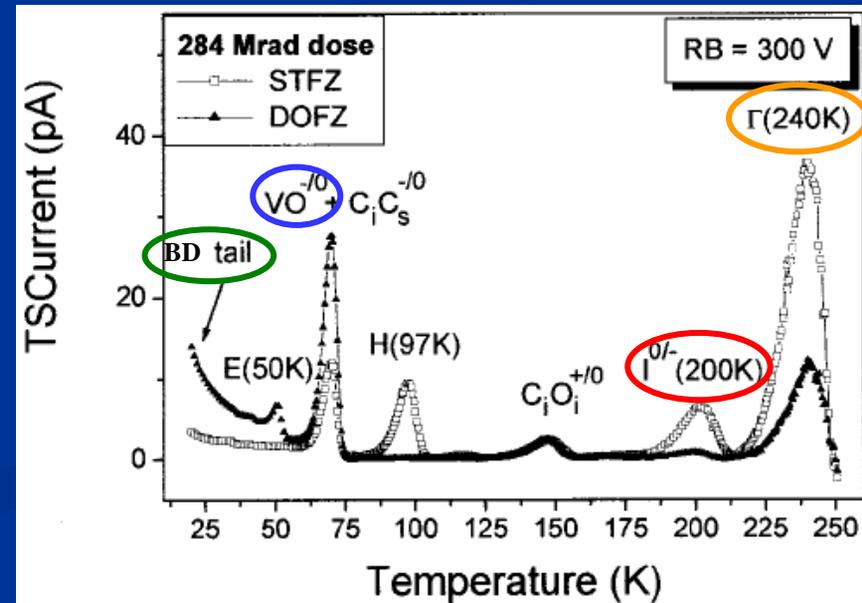
I: livello di accettore profondo a $E_C - 0.54\text{eV}$

- sviluppo proporzionale $\propto \text{dose}^2$
- è responsabile di circa l'85 % della variazione di Neff
- 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 Neff

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



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)

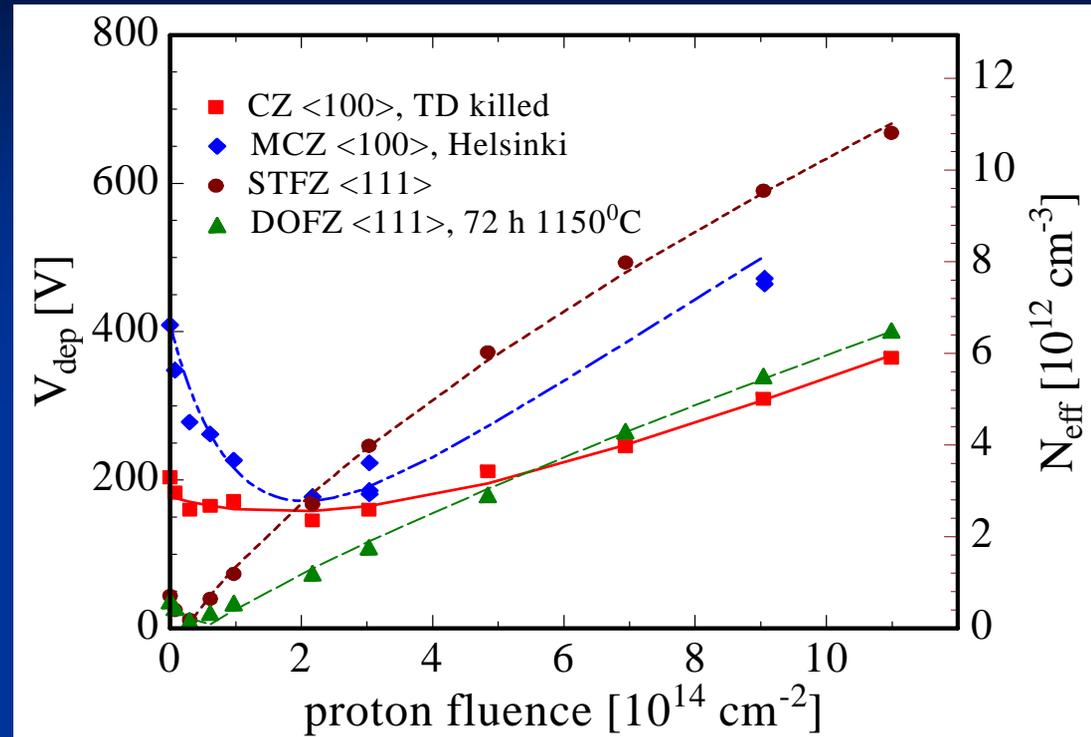
- inversione di tipo del substrato a fluenze $\sim 2 \times 10^{13}$ p/cm²
- ridotto aumento di N_{eff} ad alte fluenze

• 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



- Perchè scegliere rivelatori sottili?

- Corrente di leakage ridotta $I_{\text{leak}} \propto W$
- Tensione di svuotamento minore $V_{\text{dep}} = qW^2 N_{\text{eff}} / 2\epsilon \propto W^2$
- 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 $\Phi_{1\text{-MeV n}} = 10^{16} \text{ cm}^{-2}$

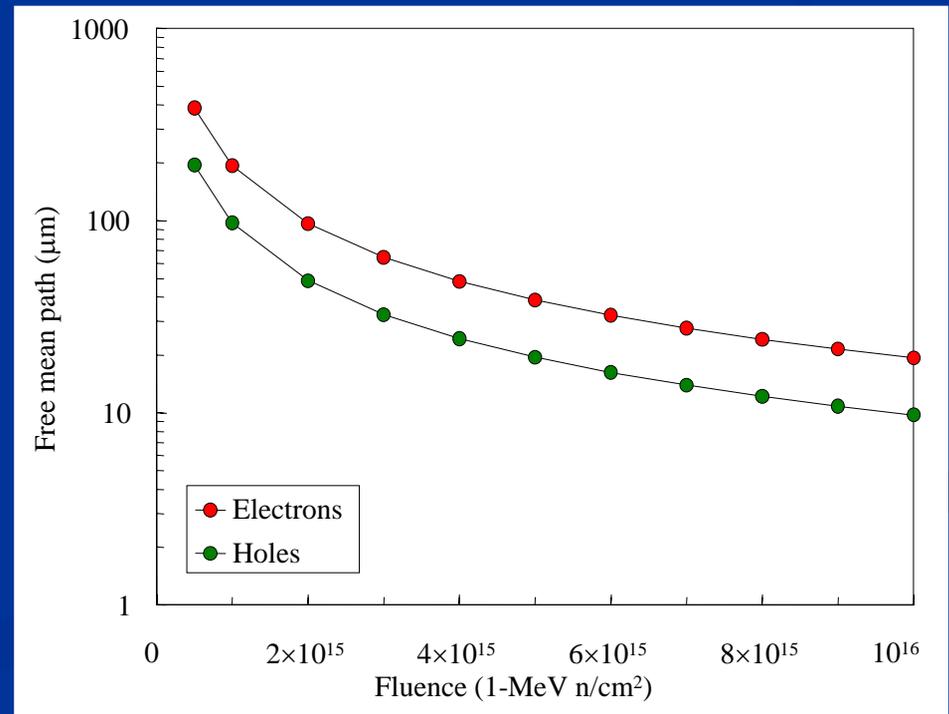
$$1/\tau_{e,h} = \beta_{e,h} \times \Phi_{1\text{-MeV n}}$$

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

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

- Svantaggi:

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



p⁺-implant

Epitaxial layer, n-type

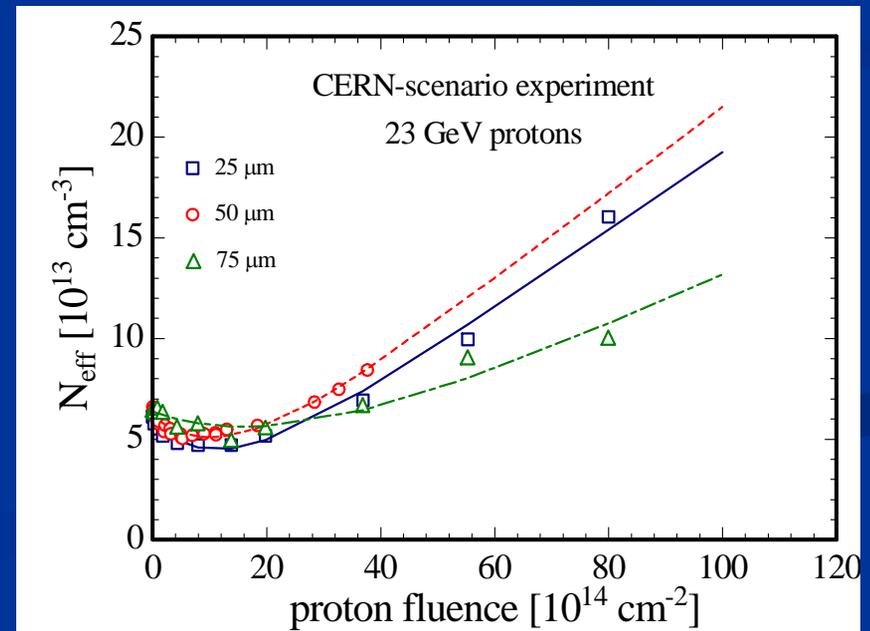
Cz substrate, n⁺-type

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

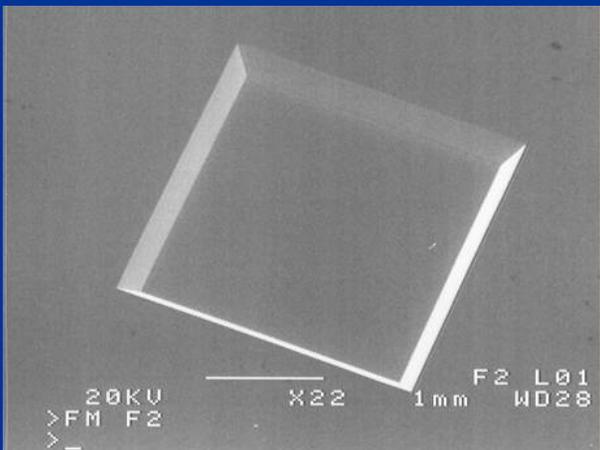
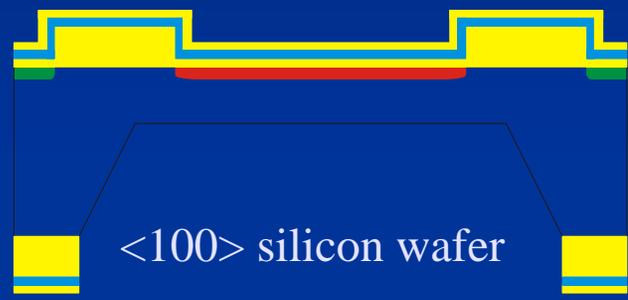
• Non si osserva l'inversione del tipo del substrato in tutto il range di interesse per SLHC.

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



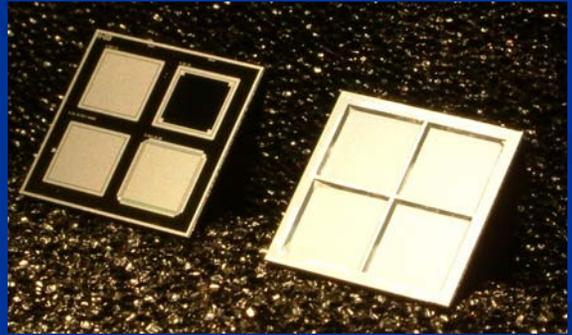
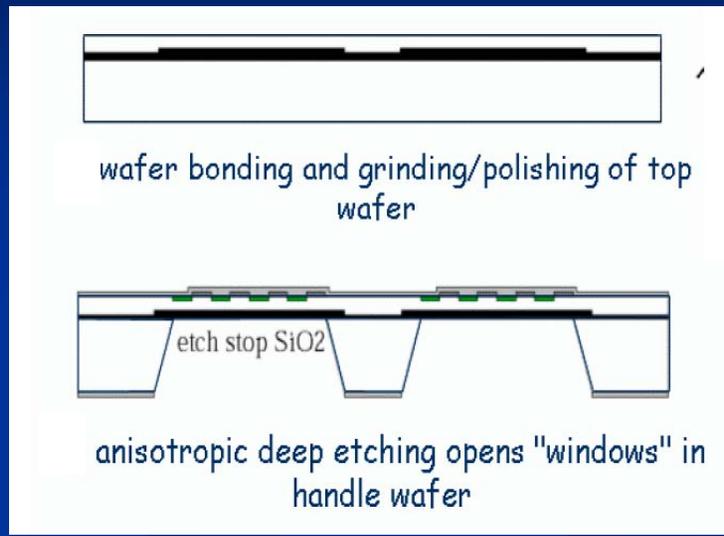
ITC-IRST, Trento

Assottigliamento con attacco chimico (TMAH)



SEM: vista della superficie posteriore di un wafer assottigliato

MPI, Semiconductor Detector Laboratory, Munich

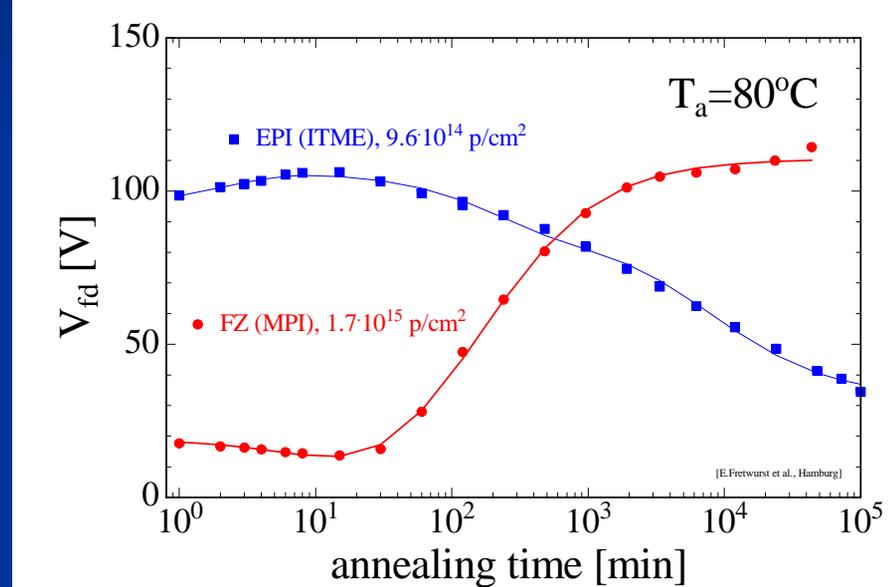
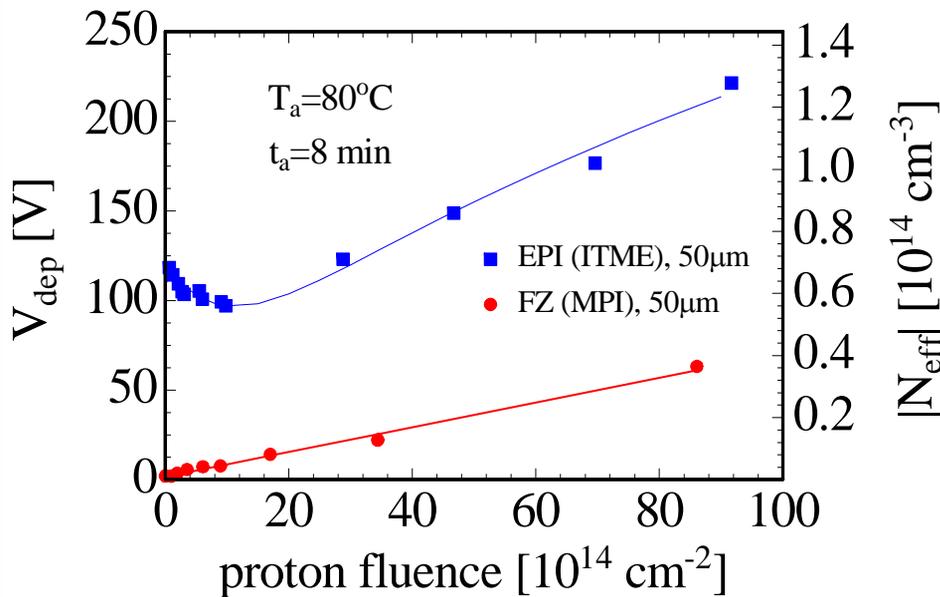


Lato superiore (sinistra) e inferiore (destra) dei dispositivi assottigliati

Area: 10 mm² e I < 1 nA/cm² a 20 V

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)



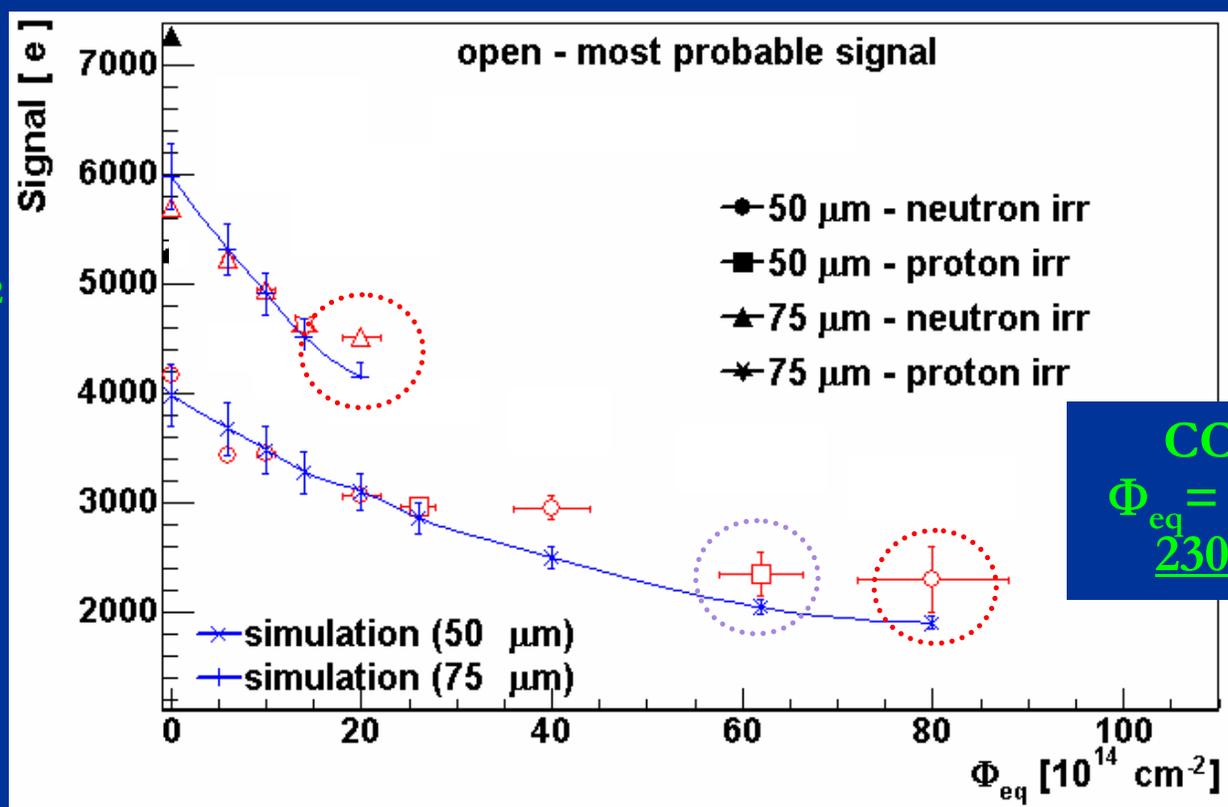
[E.Fretwurst et al., RESMDD - October 2004]

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

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 μm** e **75 μm**

[G.Kramberger, RESMDD, Oct.2004]



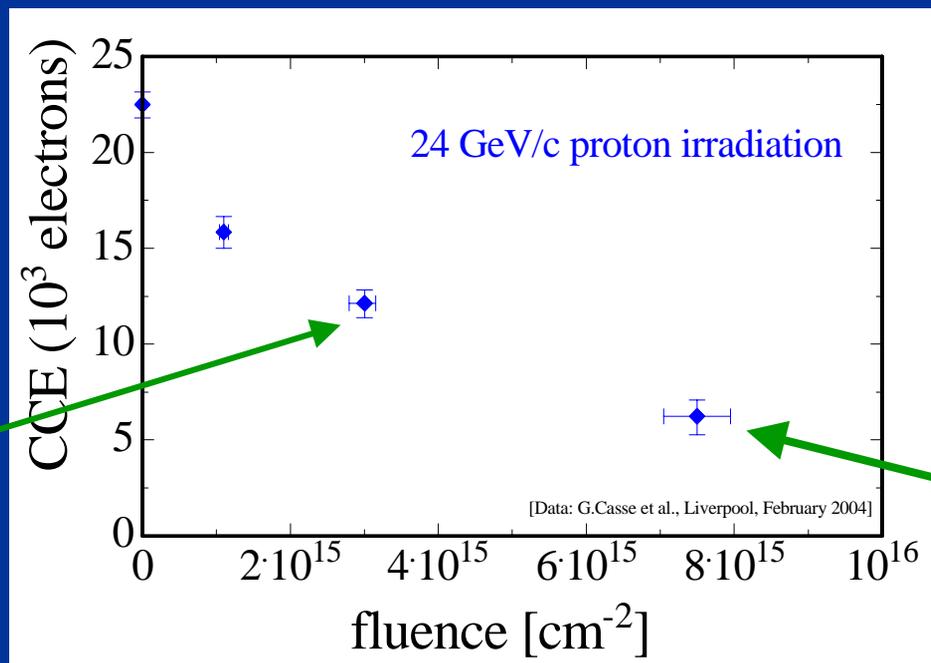
CCE (75 μm)
 $\Phi = 2 \times 10^{15} \text{ n/cm}^{-2}$
4500 electrons

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

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

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



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

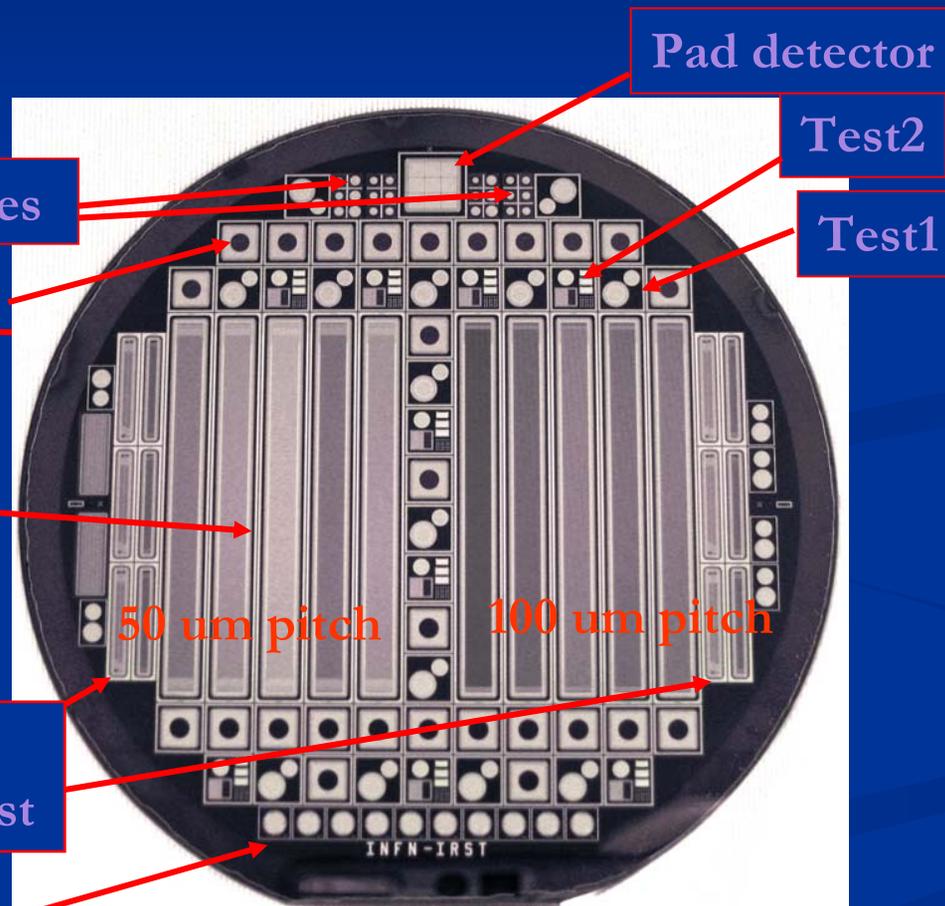
G. Casse et al., Feb 2004

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

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

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

Round MG-diodes

• **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

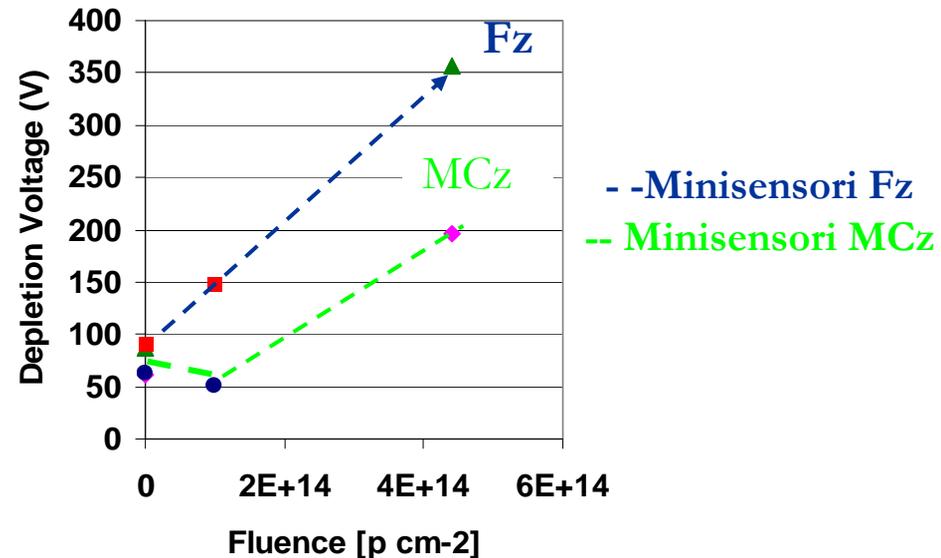
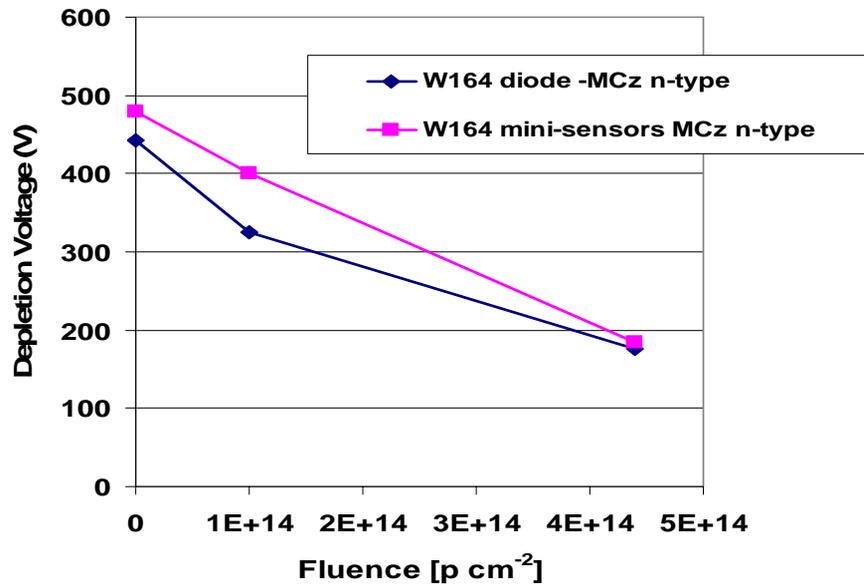
Irraggiamenti: **SPS Cern-** protoni 23 GeV/c fino a fluenze di 5.5×10^{15} p/cm².

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



■ 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

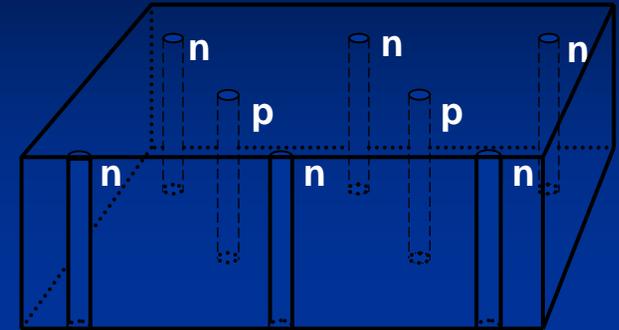
Irraggiamento fino a $5 \times 10^{14} \text{ p/cm}^2$ e $5 \times 10^{14} \text{ } \pi/\text{cm}^2$:

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

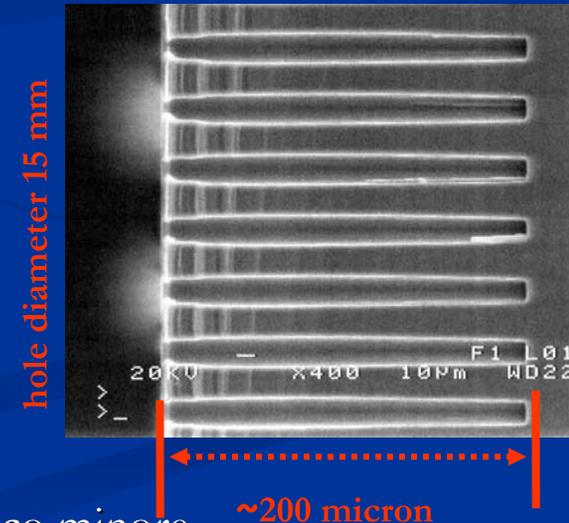
– IRST-Trento e CNM Barcelona

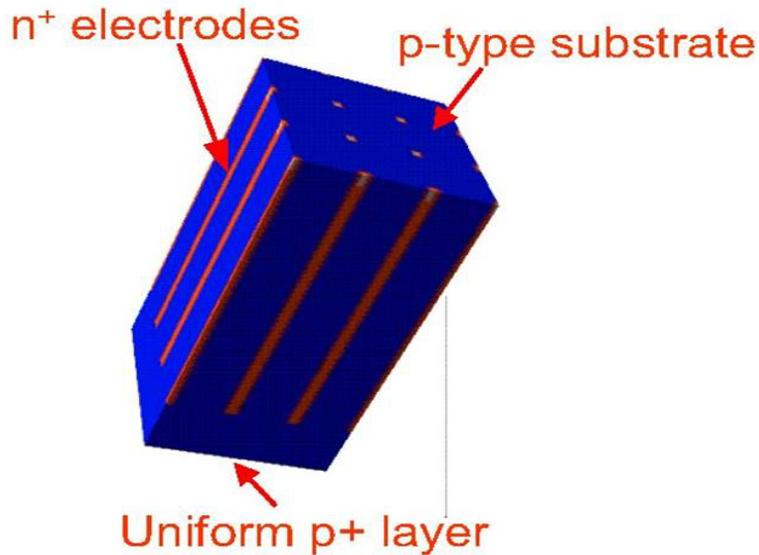
■ Problemi

- 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)





■ Architettura 3-D semplificata

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

■ Processo semplificato

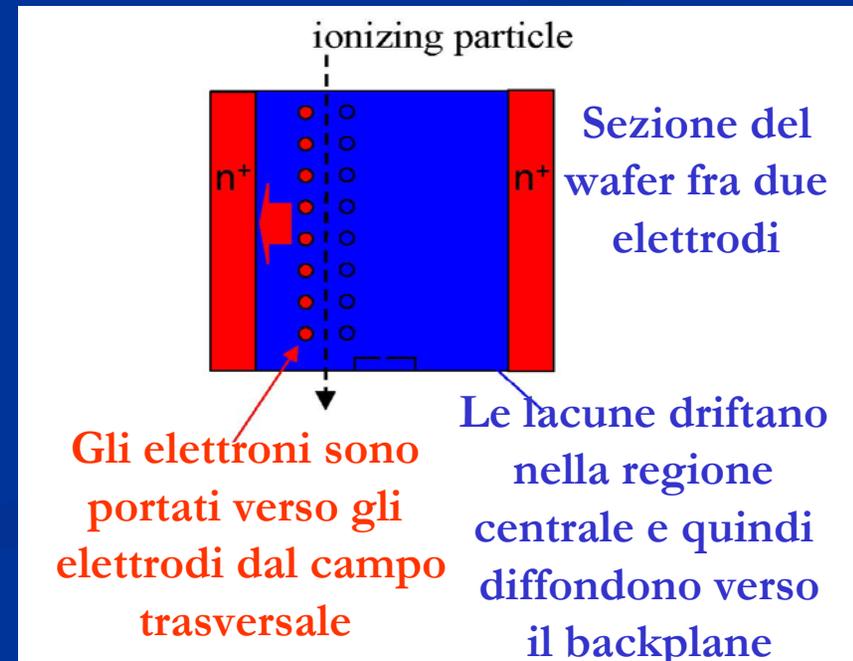
- Perforatura della colonna e doping in una sola fase per tutto il wafer
- Non è necessaria la tecnica del wafer bonding

■ 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

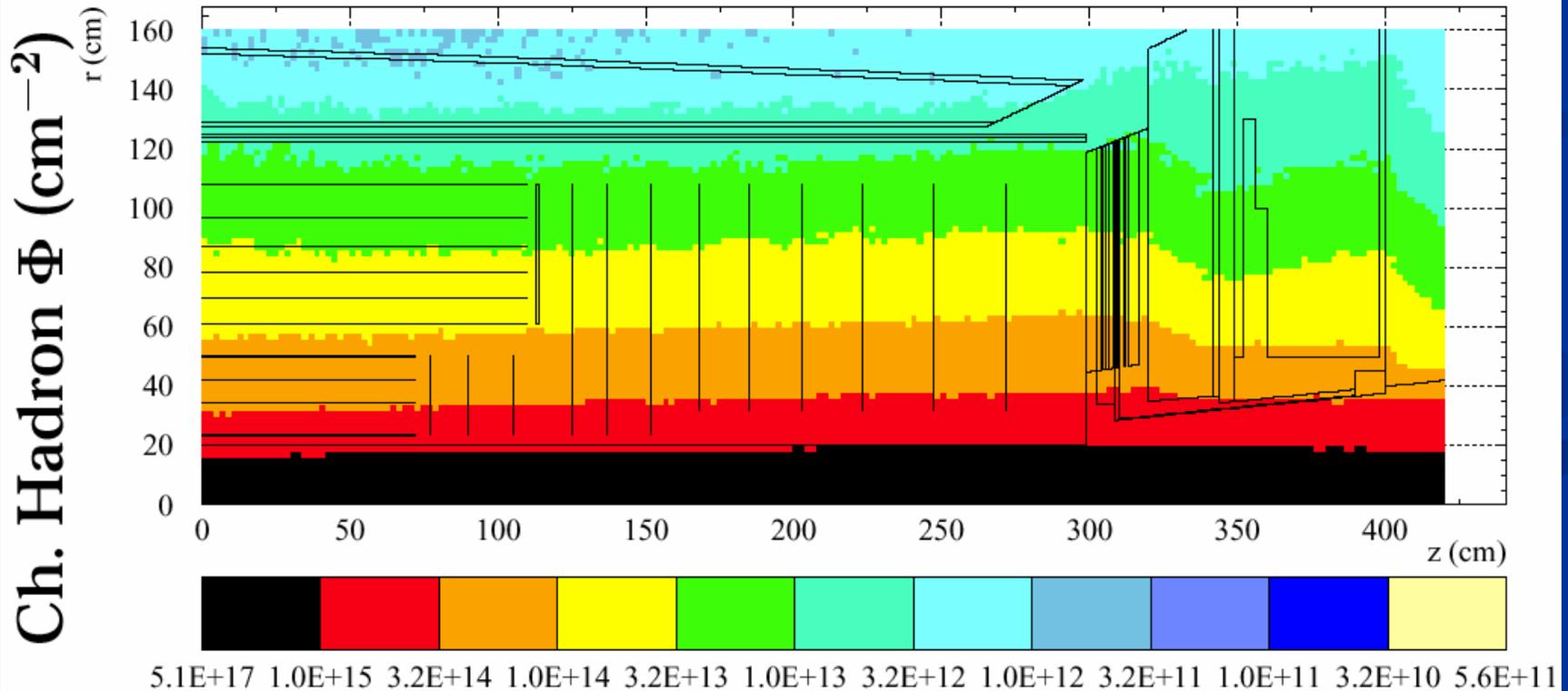
BACKUP SLIDES

LHC

SLHC

Energia del fascio	7 TeV	12.5 TeV
Rate di collisioni	40 MHz	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)

M. Huhtinen SLHC Electronics Workshop 26 February 2004



Da LHC a Super-LHC (I)

- **Danno da radiazione:** dopo 8-10 anni di presa dati i tracciatori degli esperimenti di LHC inizieranno ad avere prestazioni ridotte.
- **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

Upgrade di LHC in tre fasi

- | | |
|--|---|
| <u>Fase 0:</u> nessuna modifica hardware
solo Atlas e CMS, aumenta N_b | → $2.6 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
→ $E=7.5 \text{ TeV}$ |
| <u>Fase 1:</u> limitate modifiche hardware
β^* diminuisce, aumenta # bunch | → $9.6 \cdot 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
→ $E = 7.5 \text{ TeV}$ |
| <u>Fase 2:</u> modifiche pesanti
nuovi magneti ed iniettori | → $2 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
→ $E= 12.5 \text{ TeV}$ |

- 1) **VO** (difetto neutro) è un processo competitivo con $\text{VO} + \text{V} = \text{V}_2\text{O}$ oppure con la formazione di V_2 (accettori profondi): **VO** è favorito da "alta" [O]:
- raggi γ : difetti localizzati (interstiziali I and vacanze V)
[O] \gg [V] (in DOFZ, MCZ e CZ): VO favorito, V_2O e V_2 soppressi
 - Neutroni**: difetti in clusters (regione ad alta densità di difetti)
[O] \ll [V] (Fz, DOFZ, MCZ and CZ): V_2O e V_2 vengono formati;
 - Protons**: condizione intermedia fra difetti localizzati e clusters
- 2) La formazione di donori termici durante l'irraggiamento è caratteristica di alta [O].

[I.Pintilie, RESMDD, Oct.2004]

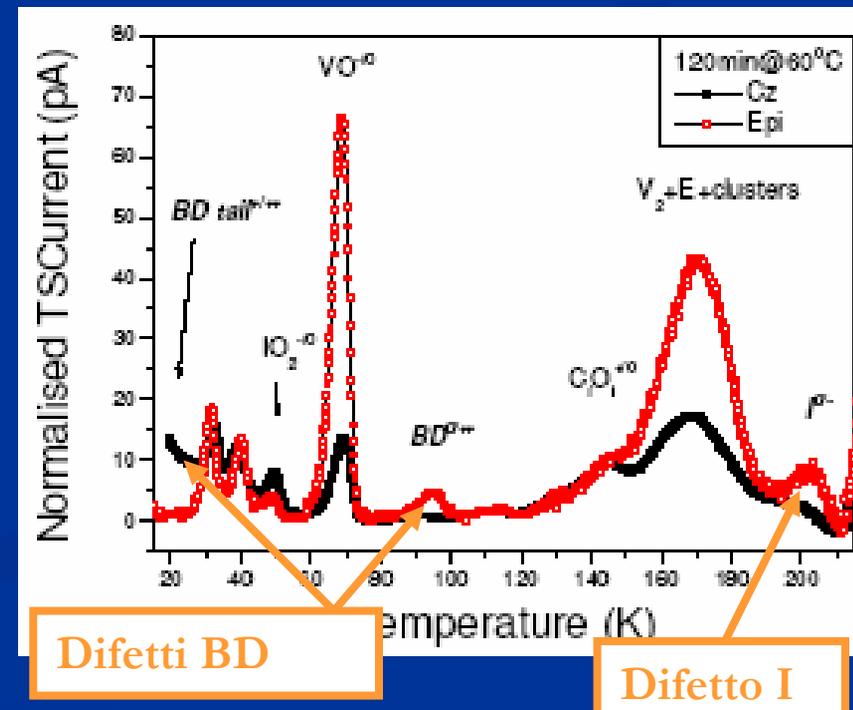
Livelli responsabili per la variazione della tensione di svuotamento dopo l'irraggiamento con protoni:

- I: livello di accettore profondo a $E_C - 0.54\text{eV}$
sviluppo proporzionale $\propto \text{dose}^2$

Buon candidato per il difetto V_2O
 \Rightarrow carica negativa

- Bistable shallow thermal donor**
(formed via oxygen dimers O_{2i})

\Rightarrow positive charge
IFAE 30 Marzo – 1 Aprile 2005



SCT: $\sigma \approx 600 + C \cdot 40 \approx 1500e^-$, $n = 4 \longrightarrow \text{Thr} \approx 6,000e^-$

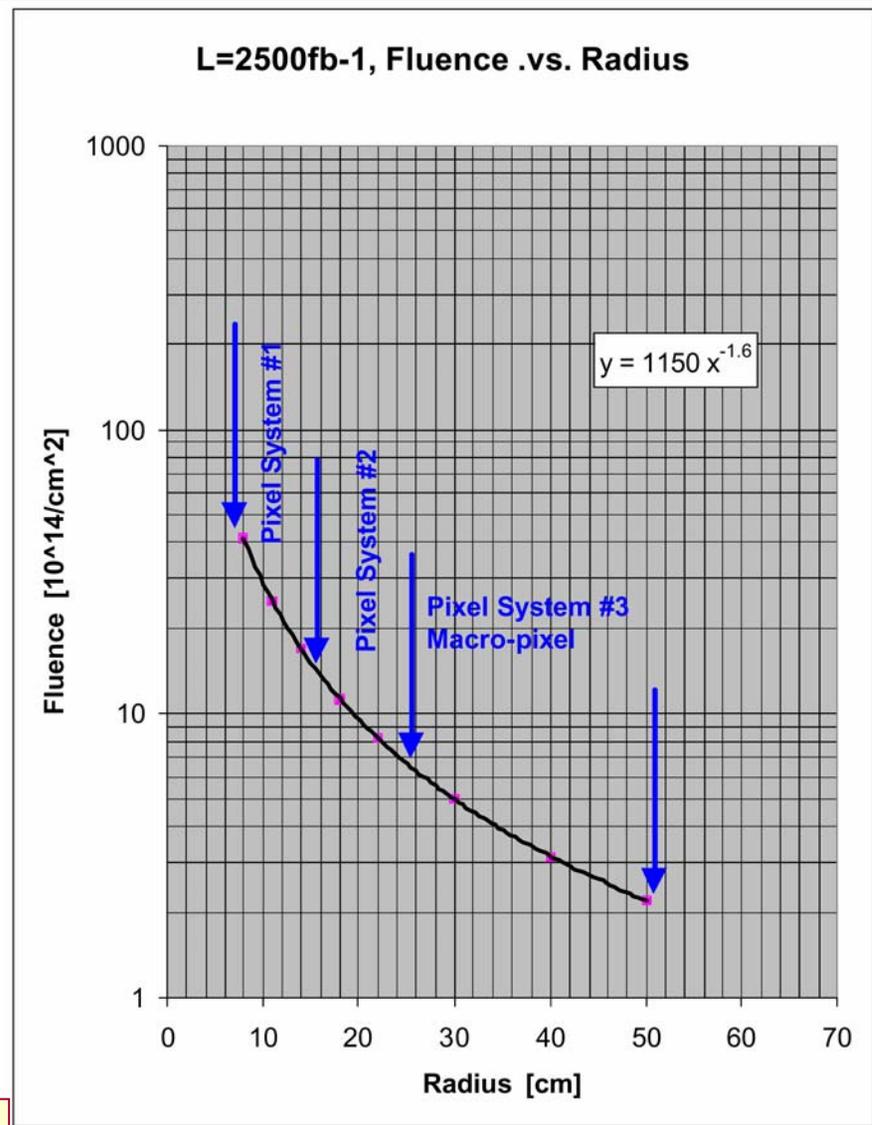
Pixels: $\sigma = 260e^-$, $\delta\text{Thr} = 40 e^-$, $n = 5 \longrightarrow \text{Thr} \approx 1,300e^-$

Radius [cm]	Detector	Threshold [e ⁻]	Signal / Threshold			Comment
			Pre-Rad	After 1250 fb ⁻¹	After 2500 fb ⁻¹	
> 55	Long strips	6250	3.7	3.7	3.7	~ SCT n-on-p
20 - 55	Short strips	4400	5.3	3.9	3.2	n-on-p
8 cm	Thick Pixel	2000	11.5	5.5	3.0	n-on-p
5 cm	Thin Pixel	2000	3.0	1.5	1.0	Epi 75 μm
5 cm	3-D	2000	11.5	7.5	5.0	100 μm cells

Modifica della parte interna del tracker di CMS

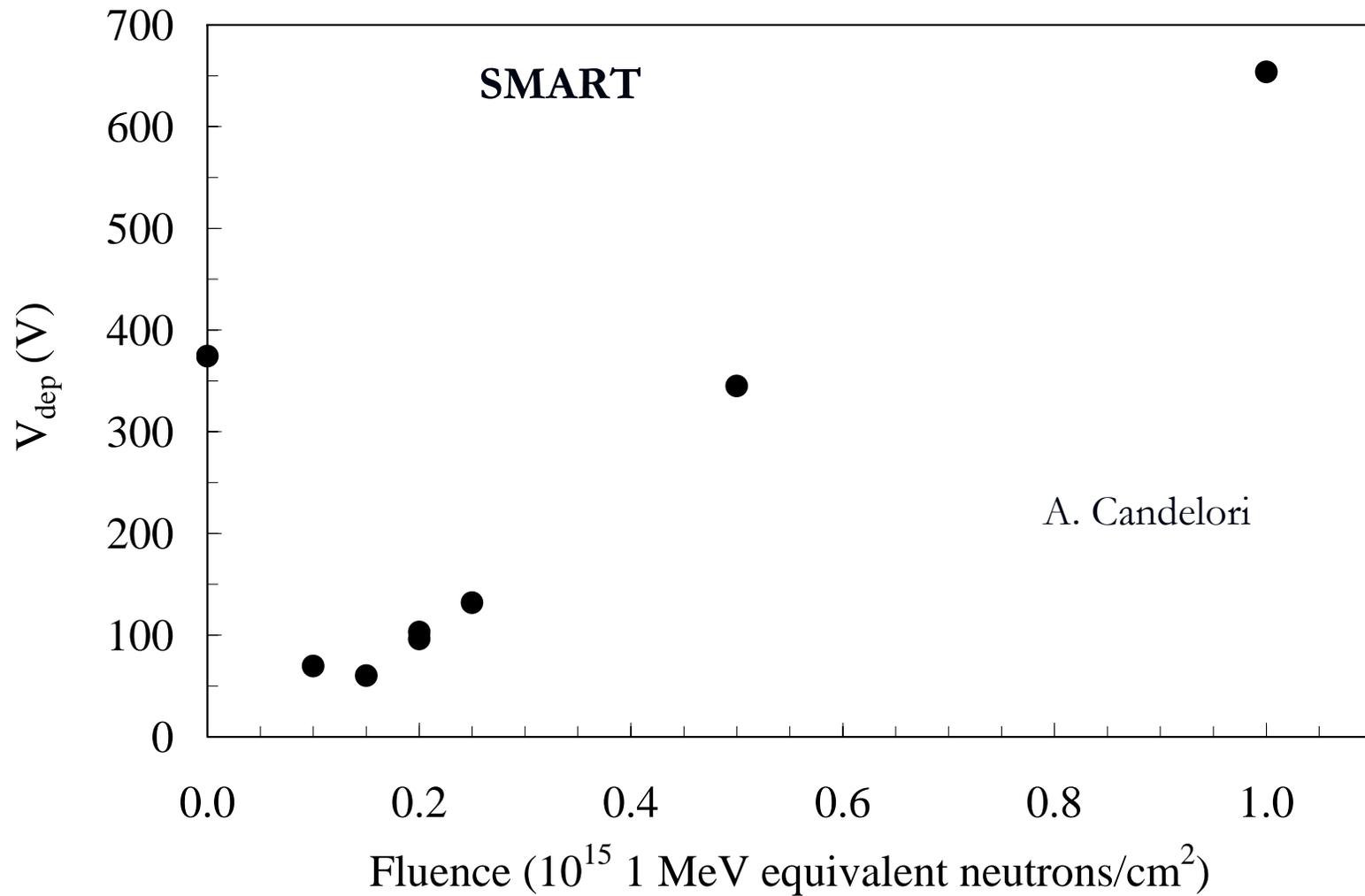
Summary

- Propose 3 Pixel Systems that are adapted to fluence/rate and cost levels
- Pixel #1 max. fluence system
 $100 \mu * 150 \mu$ $\sim 400 \text{ SFr/cm}^2$
- Pixel #2 large pixel system
 $160 \mu * 650 \mu$ $\sim 100 \text{ SFr/cm}^2$
- Pixel #3 large area system
Macro-pixel $\sim 40 \text{ SFr/cm}^2$
 $200 \mu * 5000 \mu$
- 8 Layer pixel system can eventually deal with 1200 tracks per unit pseudo – rapidity
- Use cost control and cheap design considerations from very beginning.
- Can this be done for 2012/13 ????



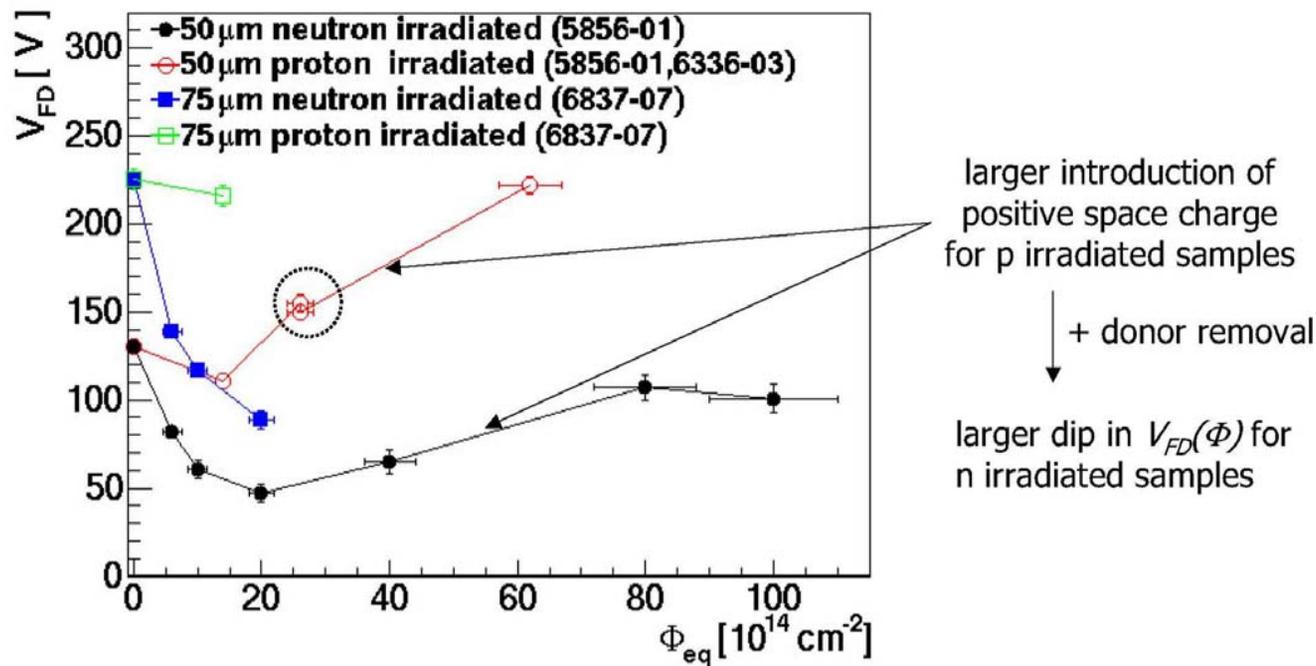
CMS: Inside out: “Fat” pixels, strips
ATLAS Outside in: “Skinny” strips, pixels

R. Horisberger



- The minimum of V_{dep} is reached at $1-1.5 \times 10^{14}$ n/cm².
- V_{dep} is ≈ 650 at 10^{15} n/cm².

Evoluzione della tensione di svuotamento con la fluenza

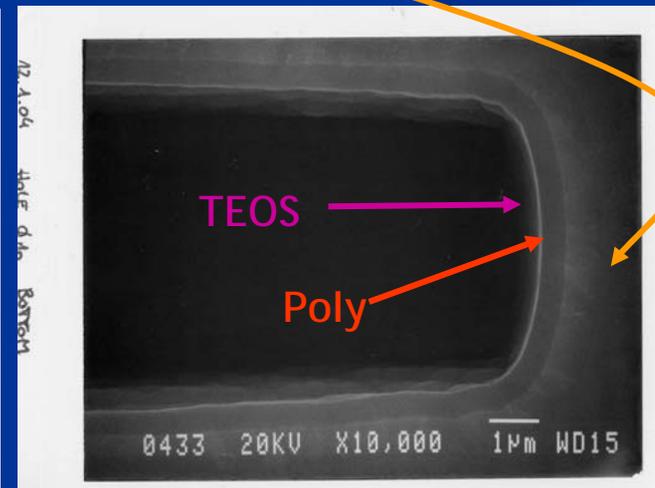
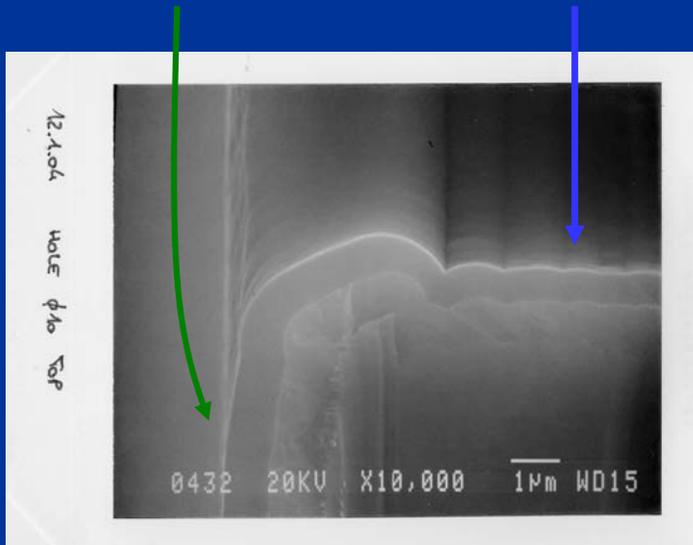
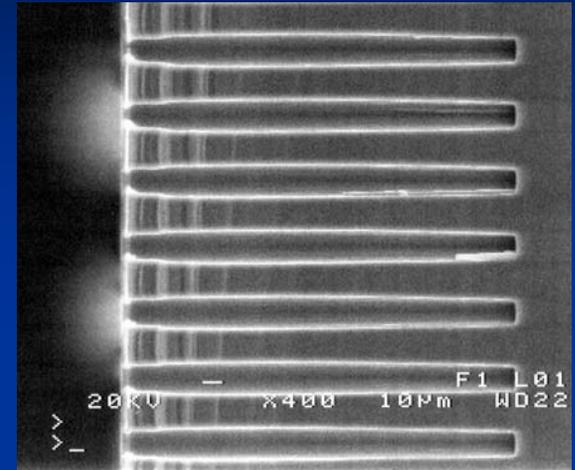


The samples reach the minimum in V_{FD} after around 300 h at 20°C – ^{90}Sr signal meas.:

- It seems that the samples are of n-type – **also neutron irradiated samples!**
- Similar behavior of 50 and 75 μm thick samples
- Good reproducibility of V_{FD} for samples from different wafers (two proton irradiated samples to $26 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$)!

- Detector masks: Glasgow University
 - Deep reaction ion etching: CNM, Barcelona
 - Detector processing: IRST, Trento
- Boron diffusion or poly-Si deposition

	Surface	Top	Bottom
Poly	1.05 μm	0.8 μm	0.7 μm
TEOS	0.96 μm	0.7 μm	0.6 μm



Proposed by Z. Li (NIM A 478 (2002) 303).
Single-side detectors with alternative p- and n- strips on the front side.

Advantages:

1. Single-side detector process.
2. Depletion occurs from both sides after SCSI reducing the depletion voltage by factor 2.5.

Under investigation:

Complex electric field distribution before and after SCSI.

