

Sviluppo di Rivelatori UFSD per Tracciamento in 4 dimensioni

Federico Siviero - INFN & Università di Torino

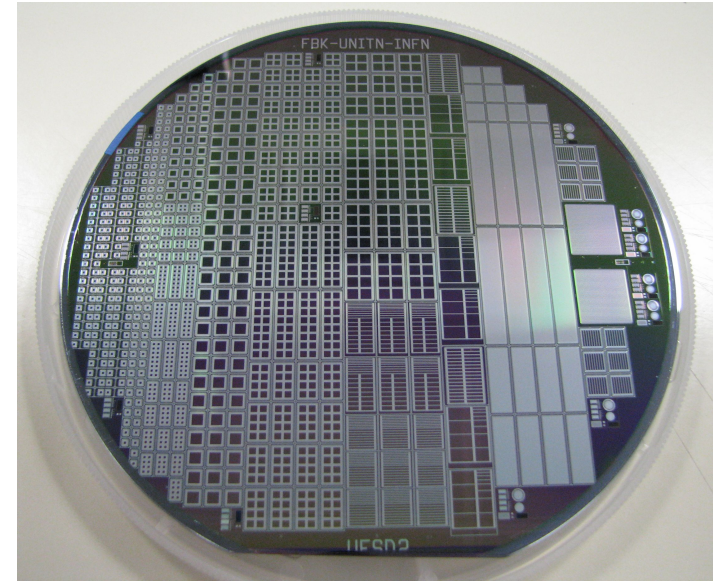
Incontri di Fisica delle Alte Energie
Milano, 6/4/2018



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Ultra-Fast Silicon Detectors (UFSD)

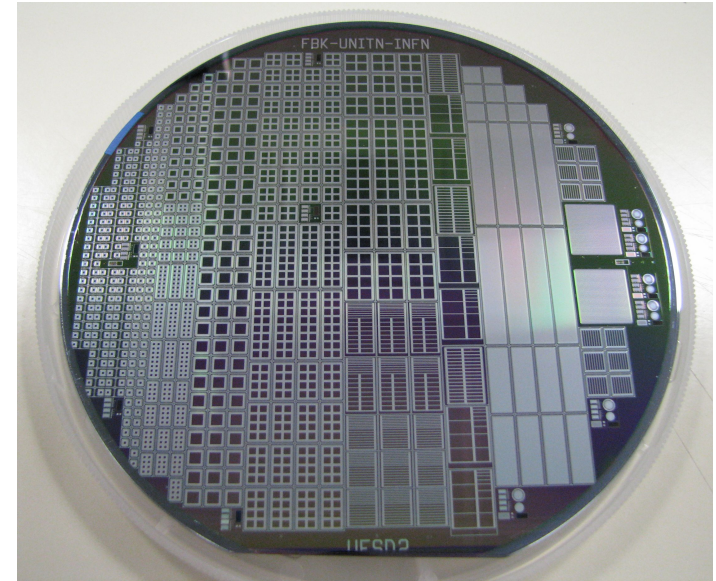
- ❑ **Rivelatori per Tracciamento 4D:**
- Misura della posizione $\sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$
- Misura del tempo $\sigma_t \sim 30 \text{ps}$



*L'ultima produzione di UFSD della FBK
(Metà 2017)*

Ultra-Fast Silicon Detectors (UFSD)

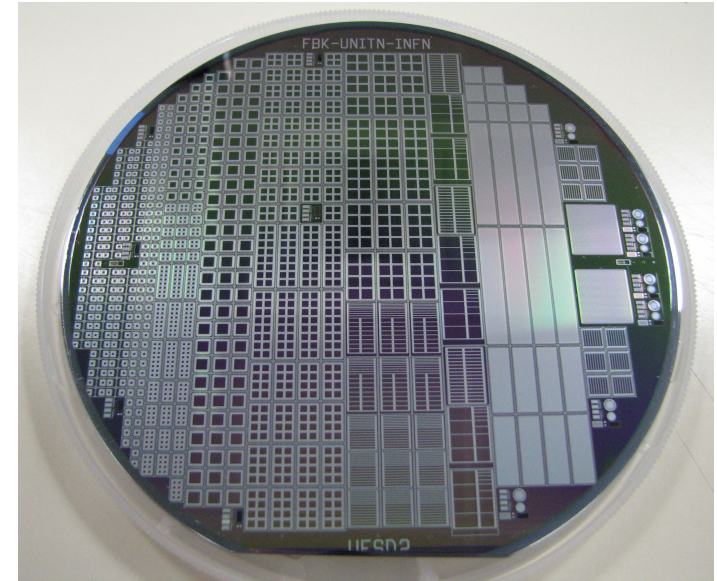
- ❑ **Rivelatori per Tracciamento 4D:**
 - Misura della posizione $\sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$
 - Misura del tempo $\sigma_t \sim 30 \text{ps}$
- ❑ **Resistenti alle radiazioni:**
 - Mantengono le prestazioni per $\Phi > 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
 - Adatti ai futuri esperimenti ad elevata luminosità



*L'ultima produzione di UFSD della FBK
(Metà 2017)*

Ultra-Fast Silicon Detectors (UFSD)

- ❑ **Rivelatori per Tracciamento 4D:**
 - Misura della posizione $\sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$
 - Misura del tempo $\sigma_t \sim 30 \text{ps}$
- ❑ **Resistenti alle radiazioni:**
 - Mantengono le prestazioni per $\Phi > 10^{15} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
 - Adatti ai futuri esperimenti ad elevata luminosità
- ❑ **Basati sul disegno dei Low-Gain Avalanche Diodes (LGAD)**



L'ultima produzione di UFSD della FBK (Metà 2017)

Low-Gain Avalanche Diodes



*Come ottenere guadagno nei rivelatori al Silicio?
 $E > 300 \text{ kV/cm} \rightarrow$ moltiplicazione cariche primarie*

Low-Gain Avalanche Diodes



Come ottenere guadagno nei rivelatori al Silicio?

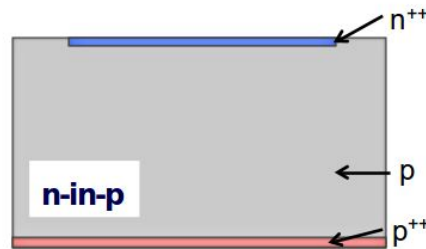
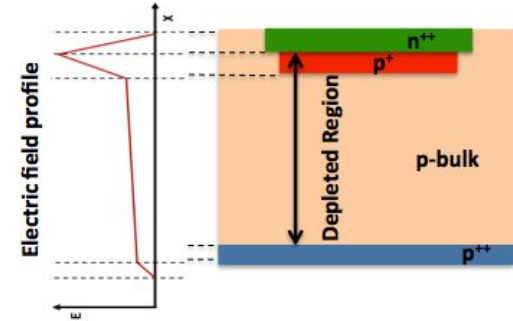
$E > 300 \text{ kV/cm} \rightarrow$ moltiplicazione cariche primarie

- **Applicando V esterno?** sensore da $100 \mu\text{m}$:
 $E \sim 300 \text{ kV/cm} \rightarrow V = 3 \text{ kV} \rightarrow$ **Breakdown!**

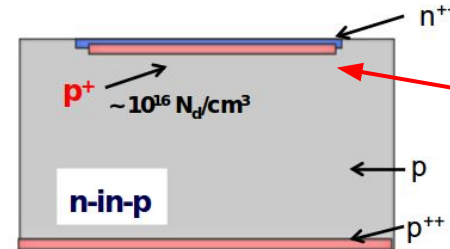
Low-Gain Avalanche Diodes

Come ottenere guadagno nei rivelatori al Silicio?
 $E > 300 \text{ kV/cm} \rightarrow$ moltiplicazione cariche primarie

- **Applicando V esterno?** sensore da $100 \mu\text{m}$:
 $E \sim 300 \text{ kV/cm} \rightarrow V = 3 \text{ kV} \rightarrow$ **Breakdown!**
- **Tecnologia LGAD:** sottile strato fortemente drogato vicino alla giunzione p-n
 \rightarrow **campo elettrico localmente molto elevato** \rightarrow **moltiplicazione** e^- primari
- NO moltiplicazione di lacune \rightarrow guadagno controllato, non effetto valanga (non è un APD!)



Traditional silicon detector



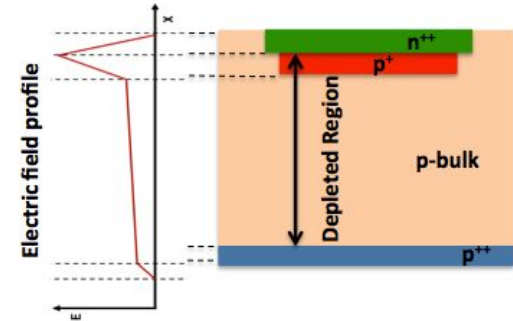
Low gain avalanche detectors

Layer di guadagno

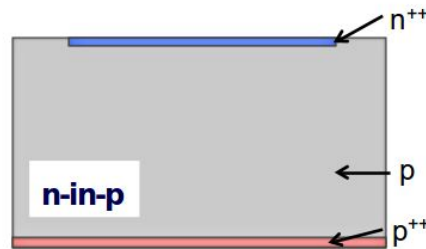
Low-Gain Avalanche Diodes

Come ottenere guadagno nei rivelatori al Silicio?
 $E > 300 \text{ kV/cm} \rightarrow$ moltiplicazione cariche primarie

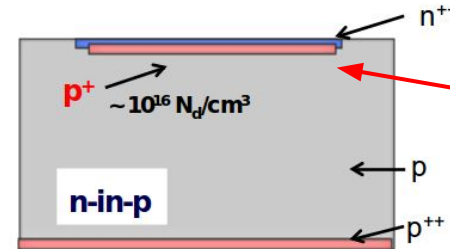
- **Applicando V esterno?** sensore da $100 \mu\text{m}$:
 $E \sim 300 \text{ kV/cm} \rightarrow V = 3 \text{ kV} \rightarrow$ **Breakdown!**
- **Tecnologia LGAD:** sottile strato fortemente drogato vicino alla giunzione p-n
 \rightarrow **campo elettrico localmente molto elevato** \rightarrow **moltiplicazione** e^- primari
- NO moltiplicazione di lacune \rightarrow guadagno controllato, non effetto valanga (non è un APD!)



Gli UFSD sono LGAD
 ottimizzati per il
 Tracciamento in 4D



Traditional silicon detector



Low gain avalanche detectors

Tracciamento in 4D

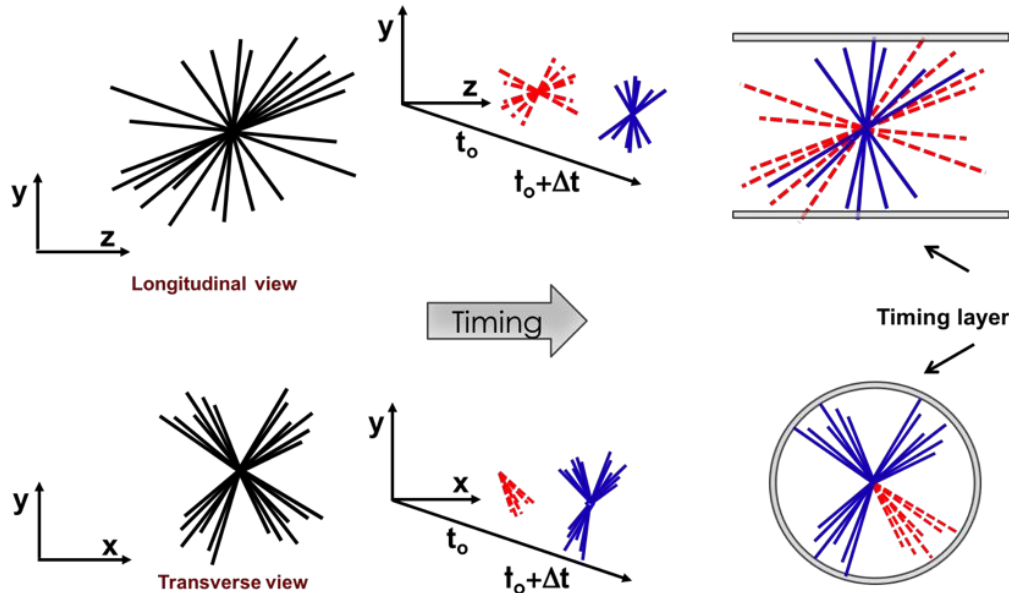


Perchè aggiungere la misura del tempo (la 4° dimensione) a quella della posizione?

Tracciamento in 4D

Perchè aggiungere la misura del tempo (la 4° dimensione) a quella della posizione?

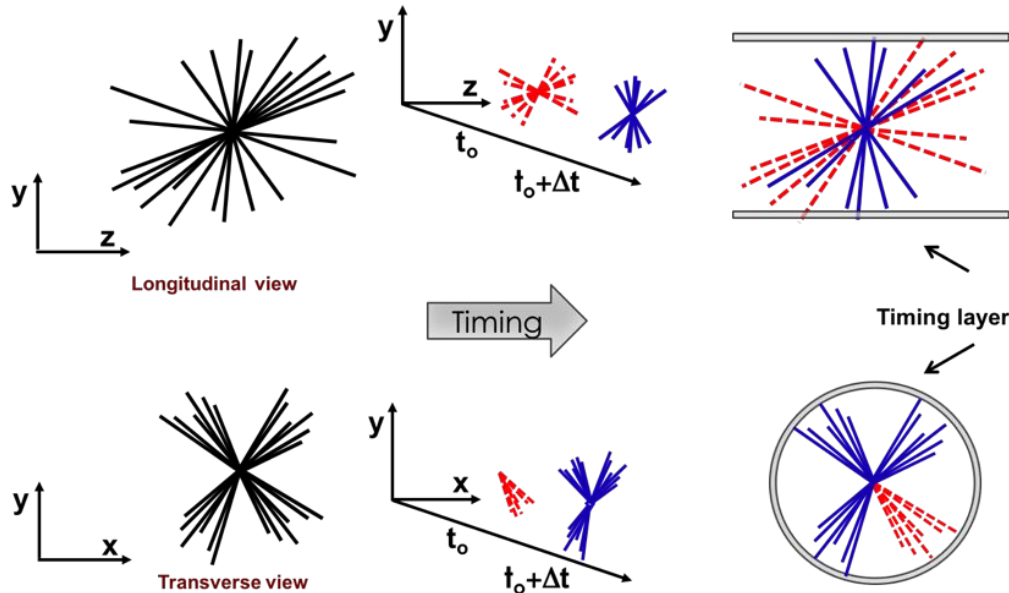
- ➔ Distinguere eventi sovrapposti nello spazio ma che hanno tempi diversi
- ➔ Significativa semplificazione del processo di ricostruzione degli eventi



Tracciamento in 4D

Perchè aggiungere la misura del tempo (la 4° dimensione) a quella della posizione?

- Distinguere eventi sovrapposti nello spazio ma che hanno tempi diversi
- Significativa semplificazione del processo di ricostruzione degli eventi



Gli UFSD sono considerati per molti esperimenti di fisica delle alte energie tra cui
CMS ed ATLAS

→ **Timing Layer di CMS
@ HL-LHC**

Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

Misura della posizione: elettrodi finemente segmentati

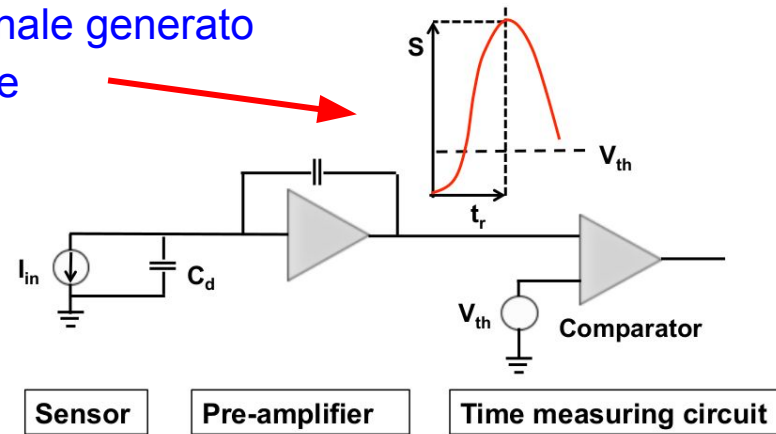
Gli UFSD possono essere segmentati come i rivelatori al Si standard $\rightarrow \sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$

Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

Misura della posizione: elettrodi finemente segmentati

Gli UFSD possono essere segmentati come i rivelatori al Si standard $\rightarrow \sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$

Misura del tempo: tempo di arrivo fissato quando il segnale generato dalla particella incidente supera la soglia del comparatore



Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

Misura della posizione: elettrodi finemente segmentati

Gli UFSD possono essere segmentati come i rivelatori al Si standard $\rightarrow \sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$

Misura del tempo: tempo di arrivo fissato quando il segnale generato dalla particella incidente supera la soglia del comparatore

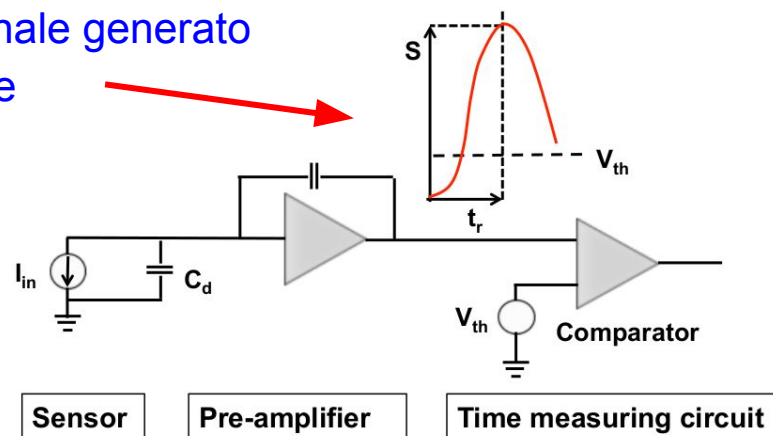
Risoluzione temporale somma di più termini

$$\sigma_t^2 = \cancel{\sigma_{\text{Time-Walk}}^2} + \cancel{\sigma_{\text{TDC}}^2} + \sigma_{\text{Jitter}}^2 + \sigma_{\text{Landau}}^2$$

$\sigma_{\text{Time-Walk}} \rightarrow$ Time Walk corretto dall'elettronica

$\sigma_{\text{TDC}} \rightarrow$ trascurabile utilizzando un High-Precision TDC

\rightarrow Risoluzione temporale dominata da σ_{Jitter} e σ_{Landau}



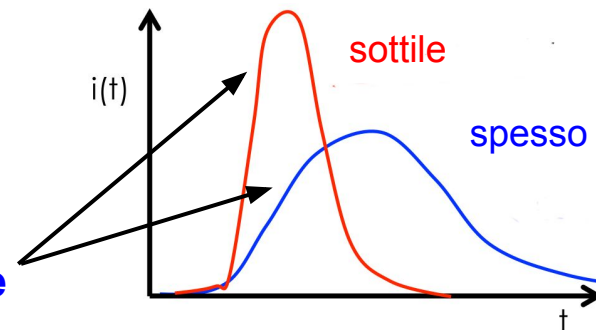
Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

◆ **Termine di Jitter:** $\sigma_{jitter} = \frac{N}{dV/dt}$

$$dV/dt \sim S/t_{rise} \rightarrow \sigma_{jitter} = \frac{t_{rise}}{S/N}$$

jitter ridotto quando:

- S/N elevato → **Guadagno**
- t_{rise} piccolo → **sensore sottile**



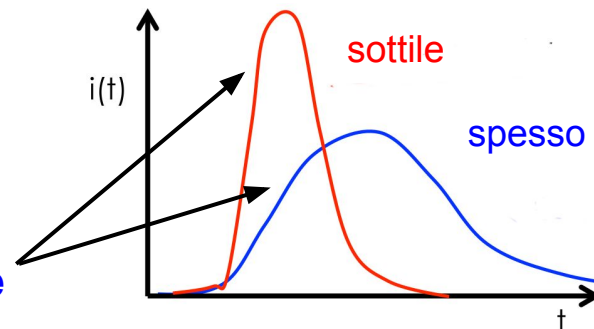
Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

◆ **Termine di Jitter:** $\sigma_{jitter} = \frac{N}{dV/dt}$

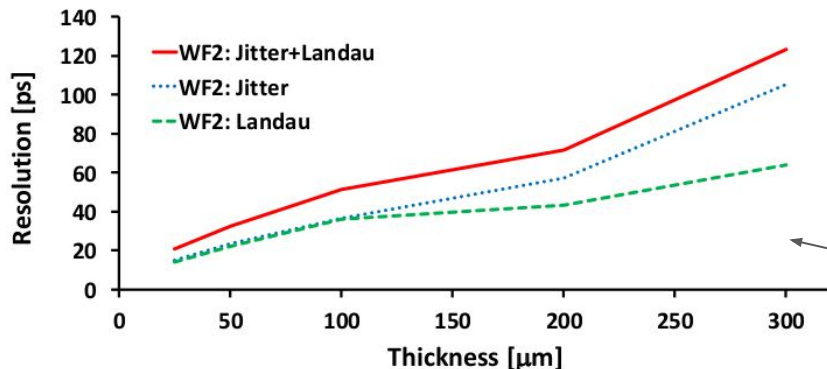
$$dV/dt \sim S/t_{rise} \rightarrow \sigma_{jitter} = \frac{t_{rise}}{S/N}$$

jitter ridotto quando:

- S/N elevato → **Guadagno**
- t_{rise} piccolo → **sensore sottile**



◆ **Termine di Landau:** densità non uniforme di coppie e-h generate dalla particella incidente → irregolarità nel segnale → σ_{Landau} **minimizzato per sensori sottili**



Risultato di una simulazione con Weightfield2, un simulatore per rivelatori al Si o Diamante

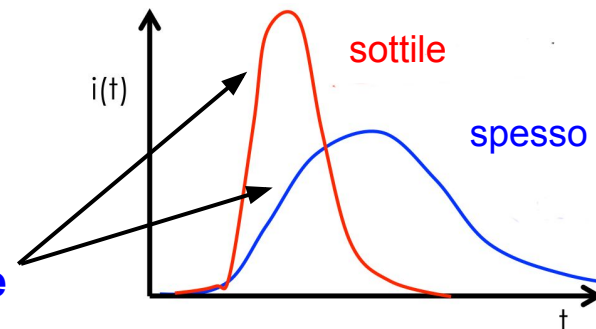
Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

◆ **Termine di Jitter:** $\sigma_{jitter} = \frac{N}{dV/dt}$

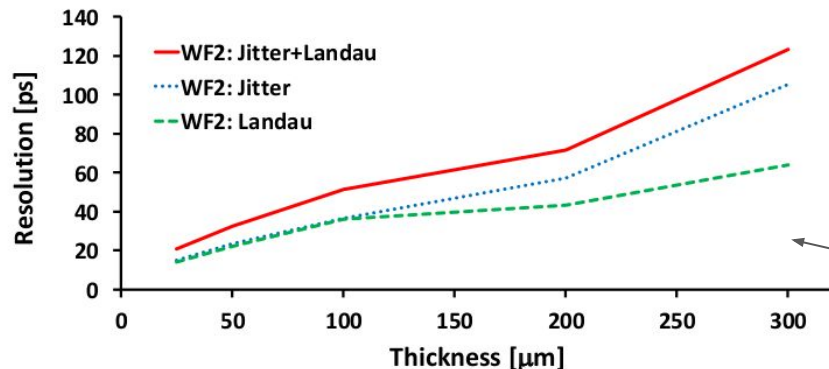
$$dV/dt \sim S/t_{rise} \rightarrow \sigma_{jitter} = \frac{t_{rise}}{S/N}$$

jitter ridotto quando:

- S/N elevato → **Guadagno**
- t_{rise} piccolo → **sensore sottile**



◆ **Termine di Landau:** densità non uniforme di coppie e-h generate dalla particella incidente → irregolarità nel segnale → σ_{Landau} **minimizzato per sensori sottili**



**Ingredienti per una buona σ_t :
elevato S/N, spessore ridotto**

Risultato di una simulazione con Weightfield2, un simulatore per rivelatori al Si o Diamante

Un equilibrio delicato

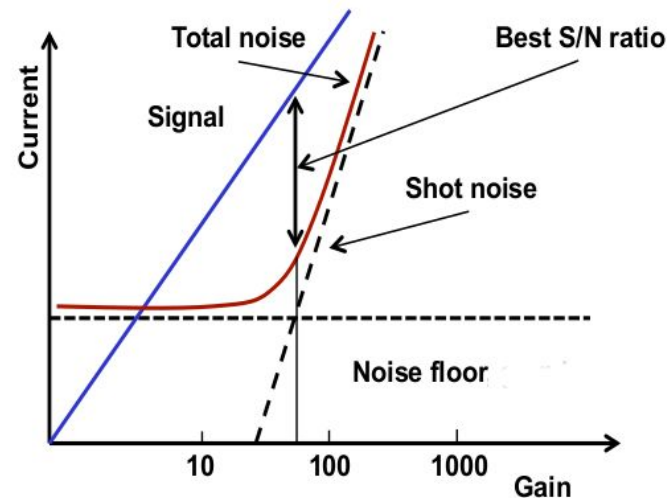


Per ottenere un'ottima σ_t il guadagno e lo spessore del rivelatore devono essere calibrati con attenzione

Un equilibrio delicato

Per ottenere un'ottima σ_t il guadagno e lo spessore del rivelatore devono essere calibrati con attenzione

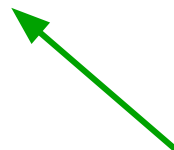
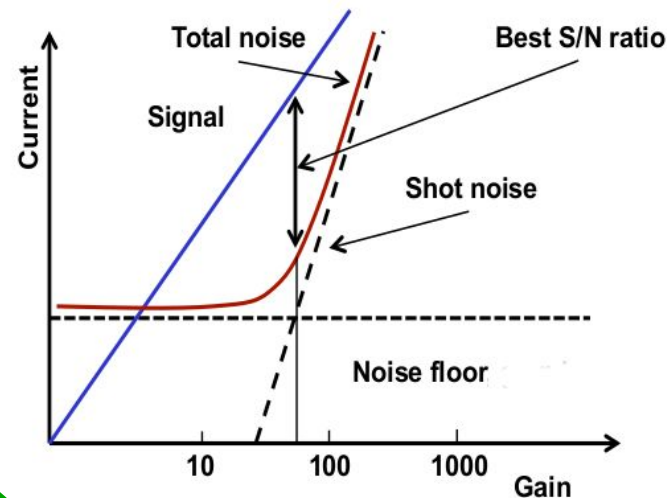
- S/N aumenta col guadagno fino a $G \sim 50$
- Per $G > 50$ il rumore aumenta più rapidamente del segnale \rightarrow **S/N peggiora**
- **Per massimizzare S/N \rightarrow guadagno moderato (10-30)**



Un equilibrio delicato

Per ottenere un'ottima σ_t il guadagno e lo spessore del rivelatore devono essere calibrati con attenzione

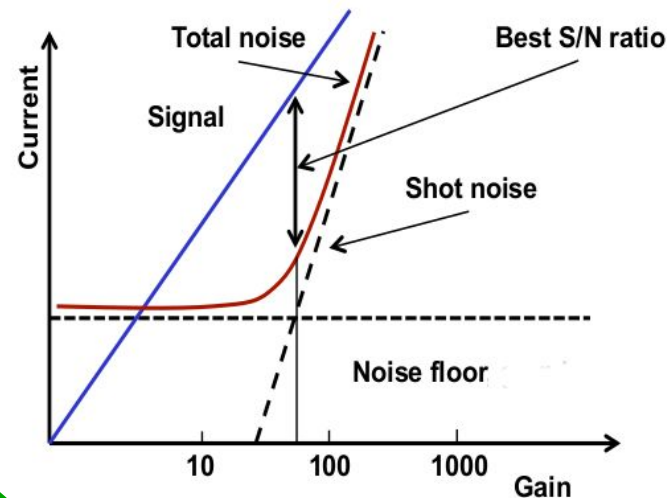
- S/N aumenta col guadagno fino a $G \sim 50$
- Per $G > 50$ il rumore aumenta più rapidamente del segnale → **S/N peggiora**
- **Per massimizzare S/N → guadagno moderato (10-30)**
- **Spessore ridotto** = t_{rise} e σ_{Landau} piccoli
- Però... **elevata capacità**
- C elevata → per avere segnale grande → **necessario guadagno molto elevato**
- **Spessore = 50 μm** → **compromesso tra sensore sottile e guadagno moderato**



Un equilibrio delicato

Per ottenere un'ottima σ_t il guadagno e lo spessore del rivelatore devono essere calibrati con attenzione

- S/N aumenta col guadagno fino a $G \sim 50$
- Per $G > 50$ il rumore aumenta più rapidamente del segnale → **S/N peggiora**
- **Per massimizzare S/N → guadagno moderato (10-30)**
- **Spessore ridotto** = t_{rise} e σ_{Landau} piccoli
- Però... **elevata capacità**
- C elevata → per avere segnale grande → **necessario guadagno molto elevato**
- **Spessore = 50 μm** → compromesso tra sensore sottile e guadagno moderato



Simulazioni & Ris. sperimentali: **Guadagno ~ 20 + Spessore = 50 μm**

→ UFSD: $\sigma_t \sim 30$ ps

Resistenza alle radiazioni

- Effetti della radiazione:
 - **Aumento** della corrente di **leakage**
 - **Diminuzione efficienza** di raccolta carica
 - Riduzione del drogaggio del layer di guadagno → **diminuzione del guadagno**

Resistenza alle radiazioni

- Effetti della radiazione:
 - **Aumento** della corrente di **leakage**
 - **Diminuzione efficienza** di raccolta carica
 - Riduzione del drogaggio del layer di guadagno → **diminuzione del guadagno**
- Futuri esperimenti ad elevata luminosità: rivelatori fortemente irraggiati
 - *es. Timing Layer di CMS @ HL-LHC $\Phi \sim 10^{15} n_{eq}/cm^2$*
 - Solitamente le prestazioni dei rivelatori peggiorano molto con l'irraggiamento

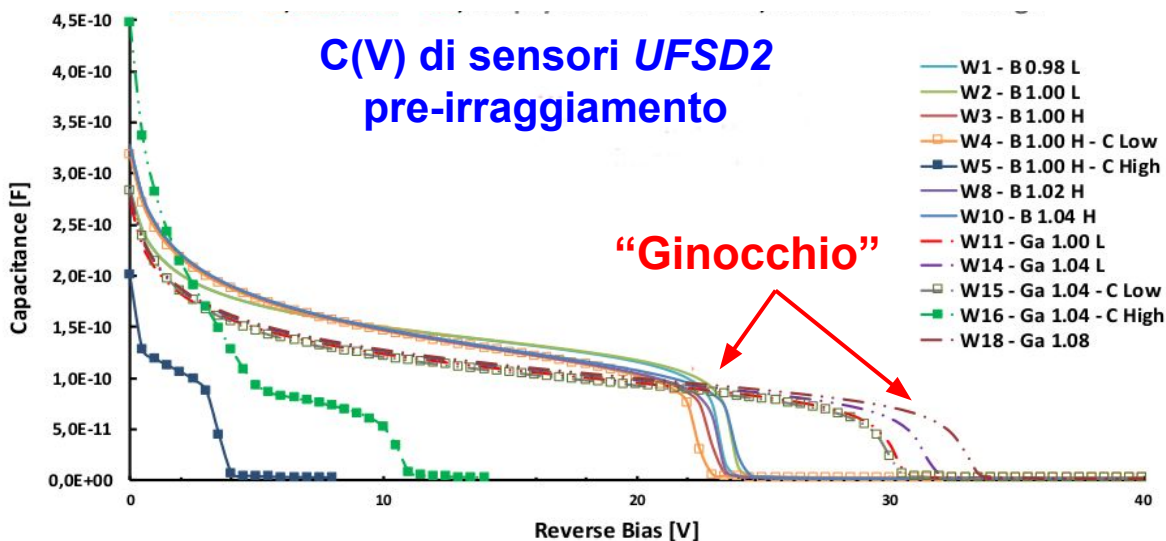
Resistenza alle radiazioni

*Più dettagli su UFSD2 nelle
slide di backup*

- Effetti della radiazione:
 - **Aumento** della corrente di **leakage**
 - **Diminuzione efficienza** di raccolta carica
 - Riduzione del drogaggio del layer di guadagno → **diminuzione del guadagno**
- Futuri esperimenti ad elevata luminosità: rivelatori fortemente irraggiati
 - *es. Timing Layer di CMS @ HL-LHC $\Phi \sim 10^{15} n_{eq}/cm^2$*
 - **Solitamente le prestazioni dei rivelatori peggiorano molto con l'irraggiamento**
- **Fondazione Bruno Kessler** (Trento) → **UFSD2**
 - Due soluzioni innovative per aumentare la resistenza alle radiazioni:
 - Utilizzo del **Gallio** come elemento dopante **invece del Boro**
 - **Aggiunta di Carbonio nel layer di guadagno** sia nei sensori con B che in quelli con Ga

Caratteristiche C(V) di Sensori FBK *UFSD2*

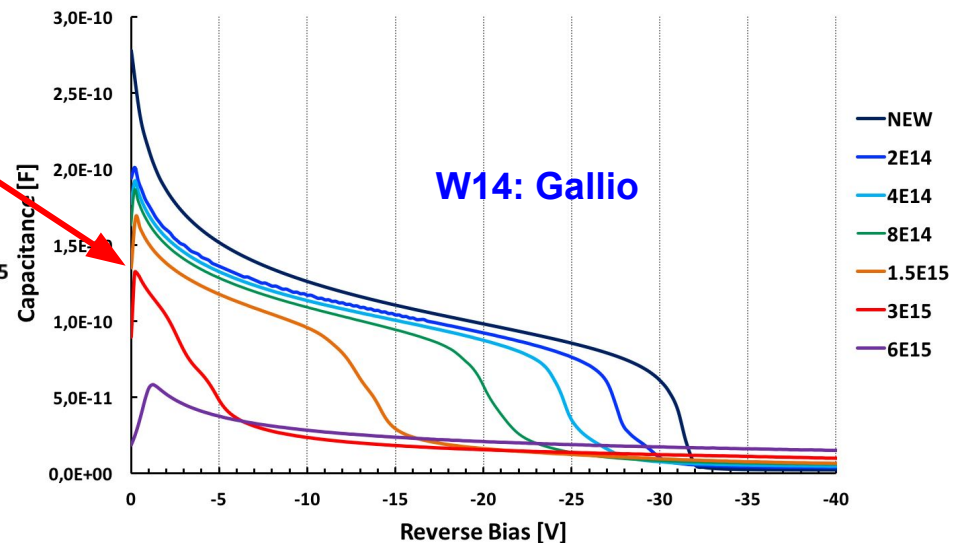
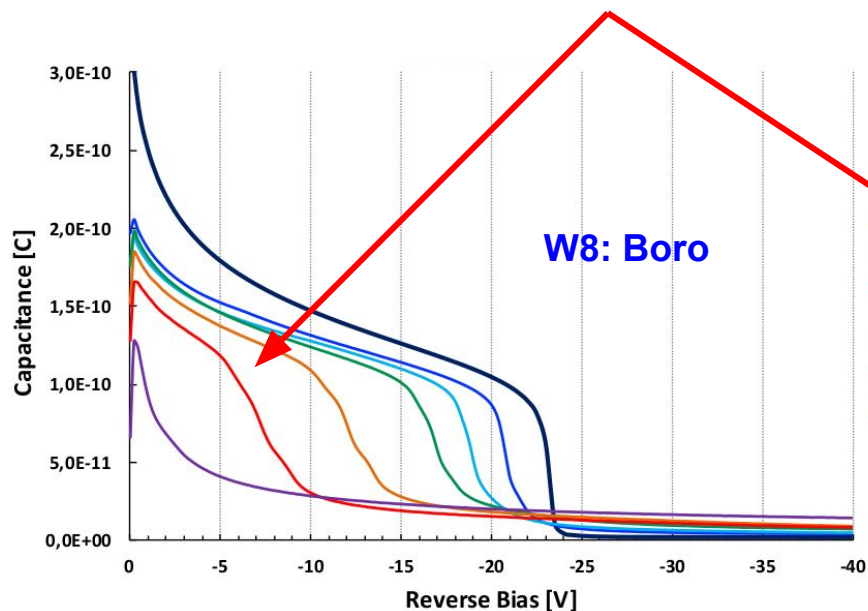
- ❑ La caratteristica C(V) di un UFSD presenta un “ginocchio” che rappresenta lo svuotamento del layer di guadagno
- ❑ Il potenziale a cui si presenta il “ginocchio” è proporzionale al guadagno del sensore
- ❑ L’irraggiamento riduce il guadagno → Il “ginocchio” si sposta a V inferiori



C(V) - Boro vs Gallio

- C(V) di 2 sensori *UFSD2* per diversi irraggiamenti
- Quando il “ginocchio” scompare non c’è più guadagno
- $\Phi = 3e15 \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$: B presenta ancora un “ginocchio”, Ga NO
→ Il Boro è più resistente alla radiazione del Gallio

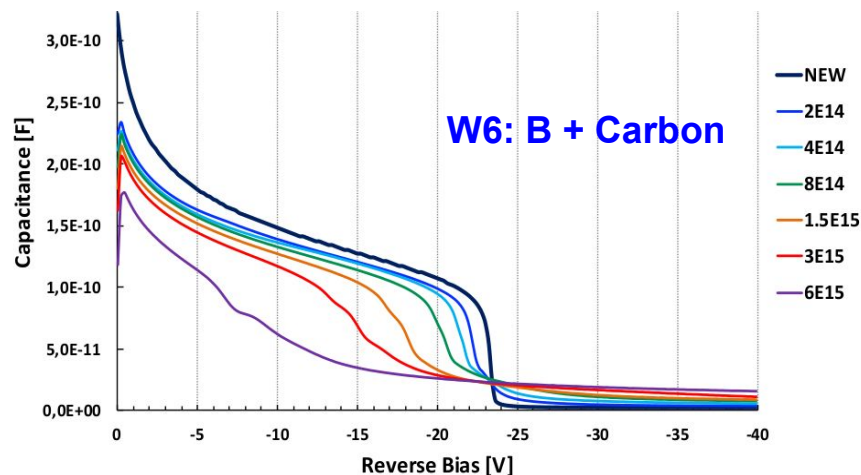
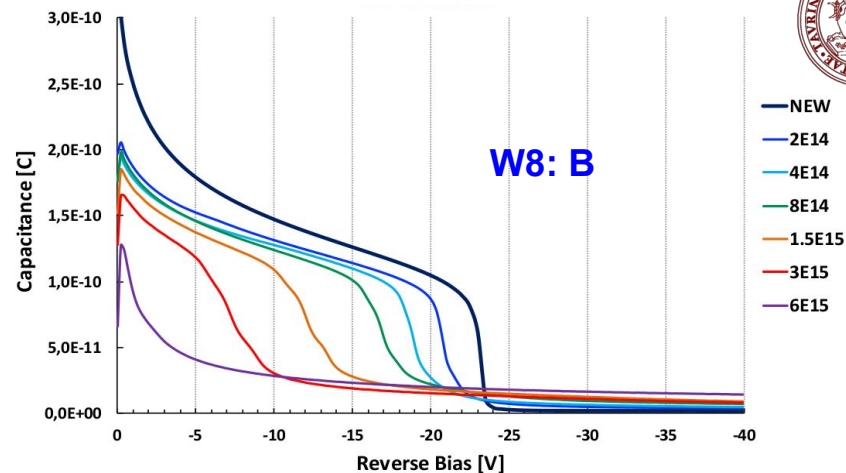
N.B. la riduzione del guadagno peggiora σ_t



C(V)

Carbonio vs Non-Carbonio

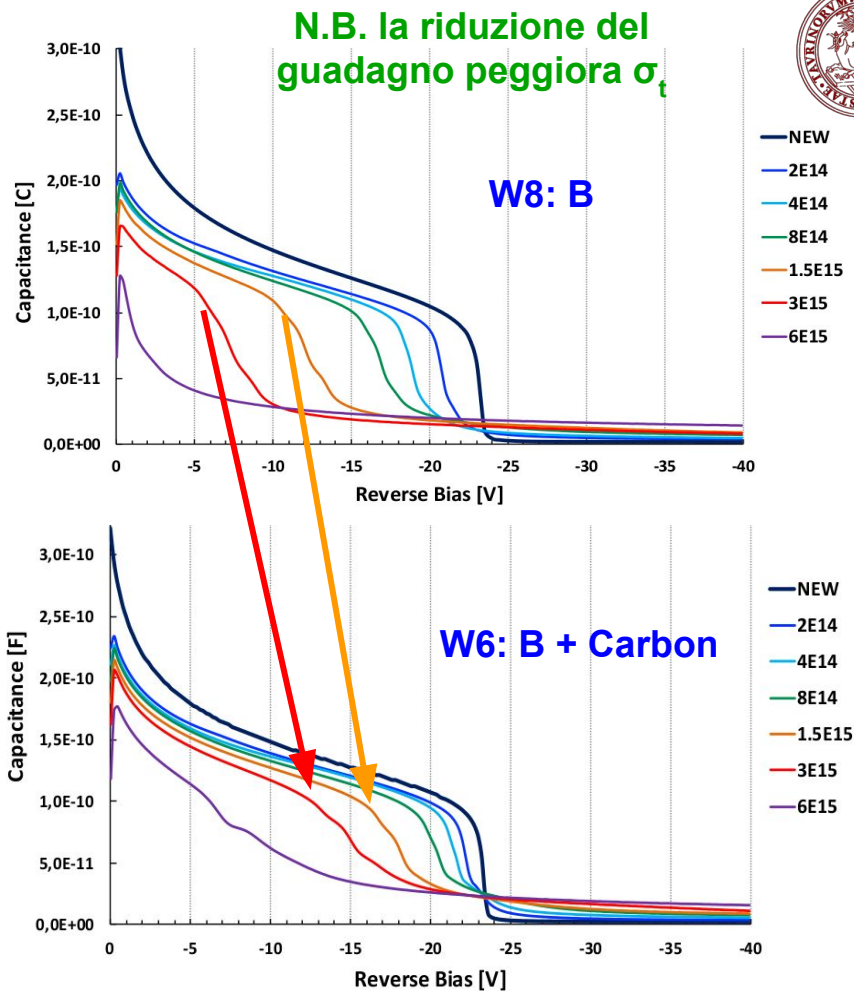
- ❖ C(V) di 2 sensori *UFSD2* per diversi irraggiamenti (fino a $\Phi = 6e15 \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$)
- ❖ C(V) del sensore con Carbonio: andamento simile a quello senza C
→ **Il Carbonio non modifica le proprietà del sensore**



C(V)

Carbonio vs Non-Carbonio

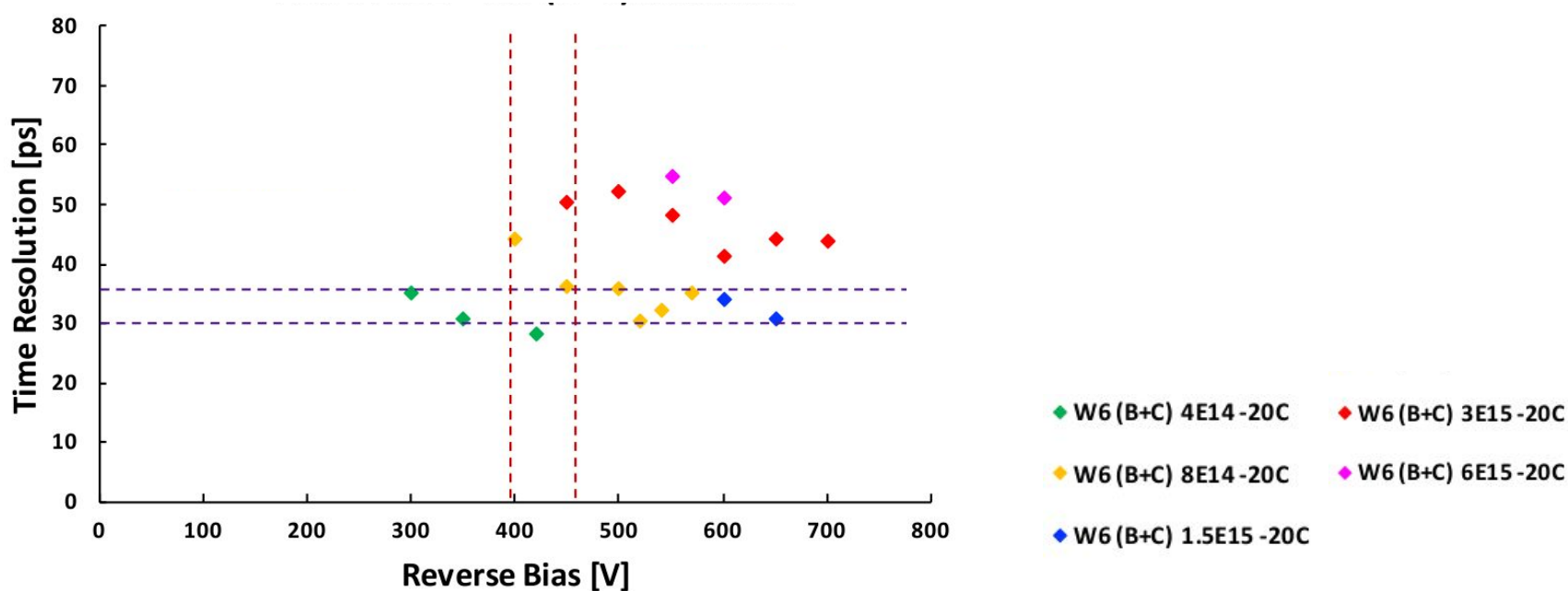
- ❖ C(V) di 2 sensori *UFSD2* per diversi irraggiamenti (fino a $\Phi = 6e15 \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$)
- ❖ C(V) del sensore con Carbonio: andamento simile a quello senza C
→ **Il Carbonio non modifica le proprietà del sensore**
- ❖ Sensore con Carbonio: diminuzione minore del V del ginocchio con l'irraggiamento
→ **Il Carbonio aumenta la resistenza alla radiazione**



Risoluzione temporale *UFSD2*



- ❑ *Misure fatte dall'Università di Santa Cruz con sorgente β (-20°C)*
- ❑ *Utilizzato un sensore **UFSD2** del Wafer 6 (**Boro + Carbonio**)*



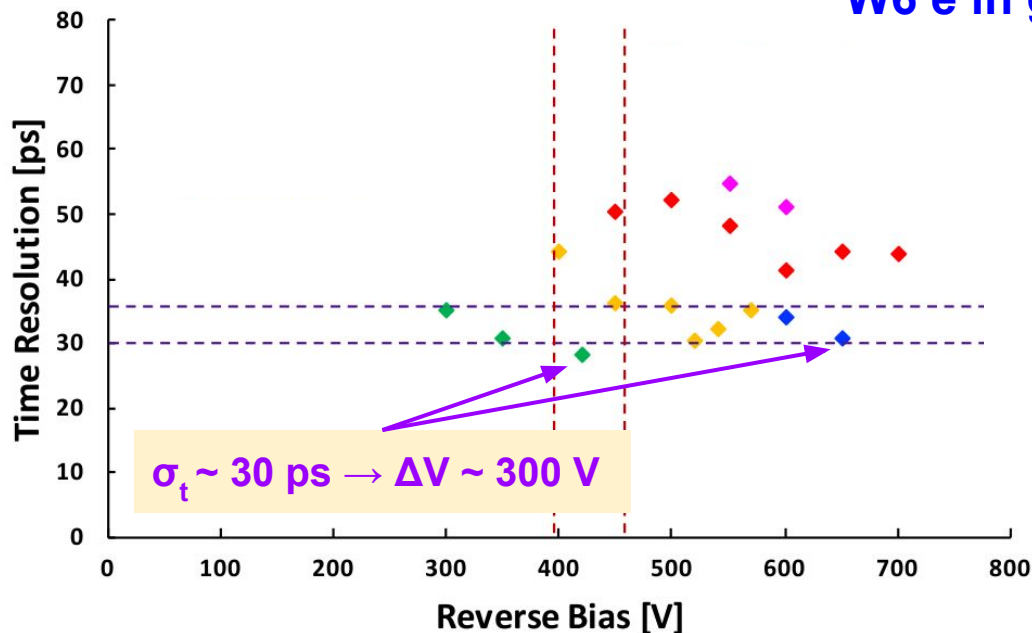
Risoluzione temporale *UFSD2*

- ❑ Misure fatte dall'Università di Santa Cruz con sorgente β (-20°C)
- ❑ Utilizzato un sensore *UFSD2* del Wafer 6 (**Boro + Carbonio**)

Timing Layer di CMS

$$\Phi \sim 10^{15} n_{eq}/\text{cm}^2$$

W6 è in grado di resistere a $\Phi > 10^{15} n_{eq}/\text{cm}^2$



- 1) σ_t costante, il bias aumenta
 $\Delta V \sim 300 \text{ V}$ durante la vita del sensore

◆ W6 (B+C) 4E14 -20C

◆ W6 (B+C) 3E15 -20C

◆ W6 (B+C) 8E14 -20C

◆ W6 (B+C) 6E15 -20C

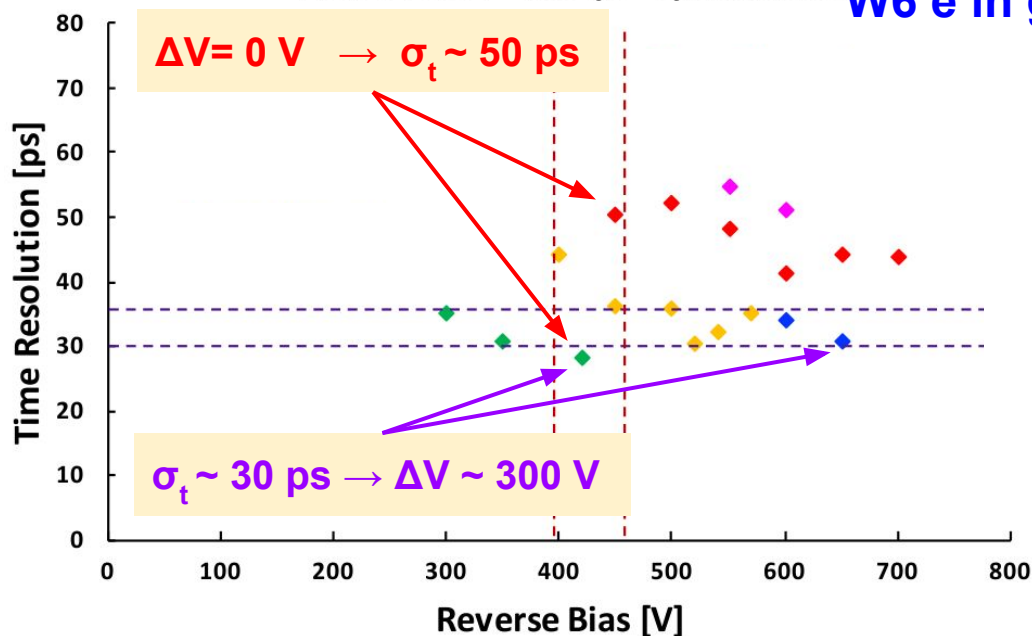
◆ W6 (B+C) 1.5E15 -20C

- ❑ Misure fatte dall'Università di Santa Cruz con sorgente β (-20°C)
- ❑ Utilizzato un sensore *UFSD2* del Wafer 6 (Boro + Carbonio)

Timing Layer di CMS

$$\Phi \sim 10^{15} n_{eq}/\text{cm}^2$$

W6 è in grado di resistere a $\Phi > 10^{15} n_{eq}/\text{cm}^2$



- 1) σ_t costante, il bias aumenta $\Delta V \sim 300 \text{ V}$ durante la vita del sensore
- 2) V costante, σ_t peggiora di $\sim 20 \text{ ps}$ durante la vita del sensore



Conclusioni e passi futuri

- ❖ Gli UFSD sono sensori in grado di fare tracciamento in 4D con la risoluzione spaziale di un tipico rivelatore al Si ($\sim 10 \mu\text{m}$) e una risoluzione temporale $\sigma_t \sim 30 \text{ ps}$
- ❖ Per farlo sfruttano un guadagno interno ~ 20 e uno spessore di $50 \mu\text{m}$
- ❖ La **FBK** di Trento ha prodotto dei sensori UFSD con delle soluzioni innovative per **migliorare la resistenza alle radiazioni**:
 - Il **Gallio** si è rivelato un drogante **meno resistente del Boro**
 - L'aggiunta di **C nel layer di guadagno aumenta la resistenza alle radiazioni**
 - **Sensori del Wafer 6 (Boro + Carbonio)**: $\sigma_t \sim 30 \text{ ps}$ dopo irraggiamento a $\Phi > 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

Prossimamente:

- Analisi dati di un **beam test a FNAL su sensori UFSD2** in corso
- un secondo beam test a FNAL verrà fatto ad Aprile
- Estate 2018: produzione FBK **UFSD3**, primi prototipi di **matrici UFSD per Timing Layer di CMS**

FBK-UNITN-INFN

Grazie per l'attenzione!

TIFSONLINE

Referenze

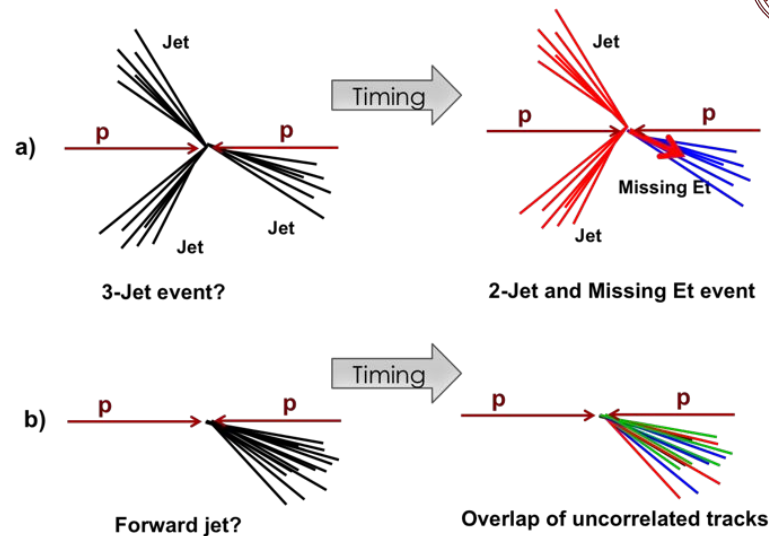
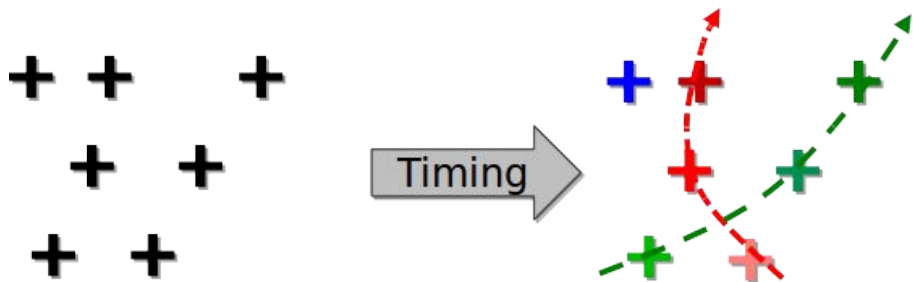
- [1] H.F.-W.Sadrozinski et al., “Ultra-fast silicon detectors (UFSD)”, NIMA 765 (2014) 7-11
- [2] N.Cartiglia et al., “Tracking in 4 Dimensions”, NIMA 845 (2017) 47-51
- [3] G. Pellegrini et al., “*Technology developments and first measurements of Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for High Energy Physics applications*”, NIM A (2014)
- [4] N.Cartiglia et al., “Radiation resistant LGAD design”, Submitted to NIM A, 2018
- [5] V.Sola, “Developments of Ultra-Fast Silicon Detectors for 4D Tracking”, 14th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors
- [6] F. Cenna et al, Weightfield2: “A fast simulator for silicon and diamond solid state detector”, NIMA 796 (2015)
- [7] H. Sadrozinski, A. Seiden, N. Cartiglia, “*4-Dimensional tracking with Ultra-Fast Silicon Detectors*” <https://arxiv.org/abs/1704.08666>

BACKUP

Diversi tipi di Timing

Oltre al timing evento per evento (*timing layer*):

- **Timing a livello del trigger:** si riduce il trigger rigettando topologie che sembrano simili

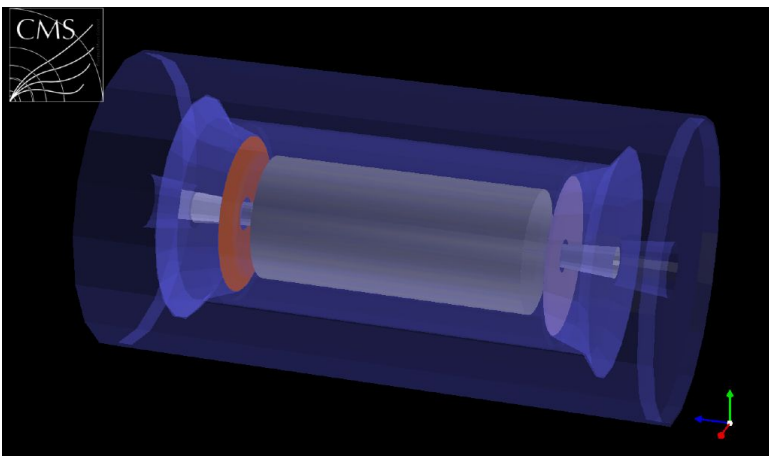


- **Timing per ogni punto lungo la traccia:** si considerano solo punti temporalmente compatibili

→ L'obiettivo finale per il Tracciamento 4D

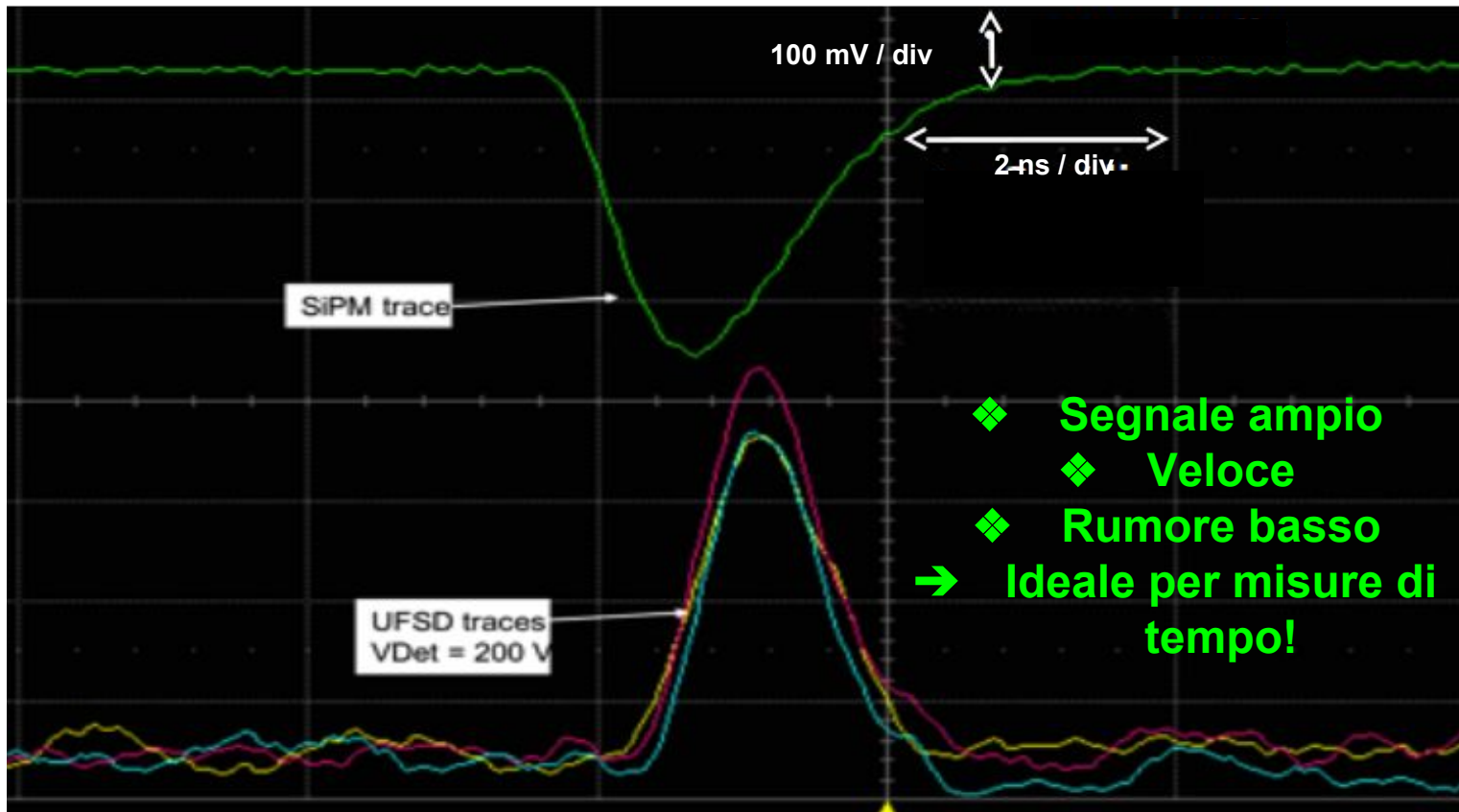
Il Timing Layer di CMS

- **HL-LHC**: 140-200 collisioni per bunch crossing → **rate di pile-up molto elevato**
→ l'attuale **Rivelatore di CMS** avrebbe **prestazioni fortemente ridotte**
→ Phase 2 CMS Upgrade
- Aggiunta di un **Timing Layer**: distinguere eventi separati di poche decine di ps
→ riduzione del rate di pile-up ai livelli attuali → **recupero dell'efficienza del rivelatore di CMS attuale nel nuovo ambiente ad alta luminosità !**



- Impatto sulla fisica di CMS: alta efficienza + alta luminosità → **studio di processi rari** (Higgs, BSM), **riduzione incertezze sperimentali** dei processi attualmente studiati

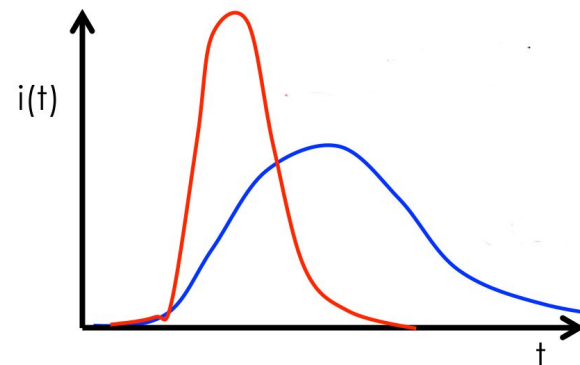
Segnali di UFSD a confronto con un SiPM



Rise time & Segnale massimo

- Rise time: tempo impiegato dal segnale per passare da 10% a 90%
 - Il segnale in un UFSD è determinato dal momento in cui gli e⁻ primari raggiungono il layer di guadagno
 - Maggiore è il tempo che gli e⁻ primari impiegano a raggiungere il layer di guadagno maggiore è il rise time
- **Maggiore è lo spessore maggiore è il rise time**
- **sensore spesso = termine di jitter maggiore**

- Teorema di Ramo: $I = q \cdot v_{\text{drift}} \cdot E_w$ → E_w rappresenta il weighting field
 - v_{drift} costante → velocità di drift saturata
 - assumendo q costante
 - $E_w \propto 1/d$ → geometria a facce piane parallele
- **$I \propto 1/d$ segnale maggiore (a parità di carica) nei sensori più sottili**



Excess Noise Factor

- Meccanismo fondamentale uguale allo Shot Noise:
 - Il guadagno G è il numero di coppie mediamente generate da un e^- che entra nel layer di guadagno
 - Il valore G è soggetto a delle fluttuazioni che sono causa di incertezza
- Il segnale è proporzionale a G
- Il rumore è proporzionale a $\sqrt{F} \rightarrow F \sim Gk + (2 - 1/G)(1-k)$
- Per $G > 50$ il rumore aumenta più rapidamente del segnale

Altri Sensori per Tracciamento in 4D

Esistono sensori diversi dagli UFSD per fare Tracciamento 4D, ma presentano delle criticità

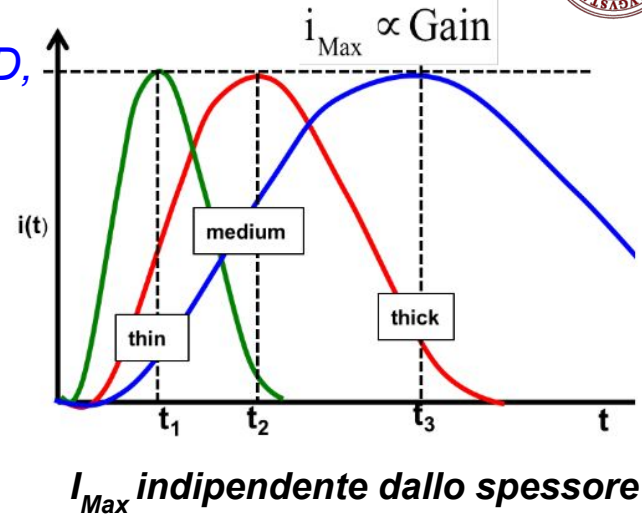
➤ Sensori al Silicio standard (no guadagno):

Teorema di Ramo : $I_{Max} = n_{e-h} q v_{sat} \sim 1.5 \mu A$

→ il rapporto **S/N** ha un **valore massimo** che limita

$$\sigma_t \sim 150/200 \text{ ps}$$

→ per aumentare S/N → *Guadagno*



➤ **Avalanche Photo Diode (APD):** guadagno ordine delle centinaia

- $\sigma_t \sim 30 \text{ ps}$
- Elettrodi difficilmente segmentabili → risoluzione spaziale ???
- Noise elevato a causa dell'elevato guadagno
- **Poco resistenti al danno da radiazione...**



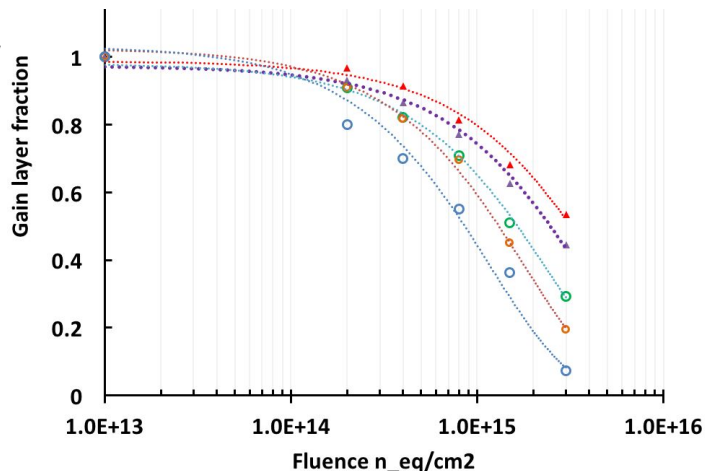
Initial Acceptor Removal



- L'irraggiamento ha due effetti contrapposti per quanto riguarda il guadagno:
 - 1) Creazione di difetti che agiscono da accettori → aumento del drogaggio → aumento del guadagno
 - 2) Riduzione del drogaggio effettivo → atomi droganti scalzati dal reticolo, diventati interstiziali → riduzione del guadagno
- **La legge che definisce la concentrazione (effettiva) di drogante:**

$$N_{A, \text{eff}}(\Phi) = N_{A,0} \exp(-c_A \Phi / \Phi_0) + g_{\text{eff}} * \Phi$$

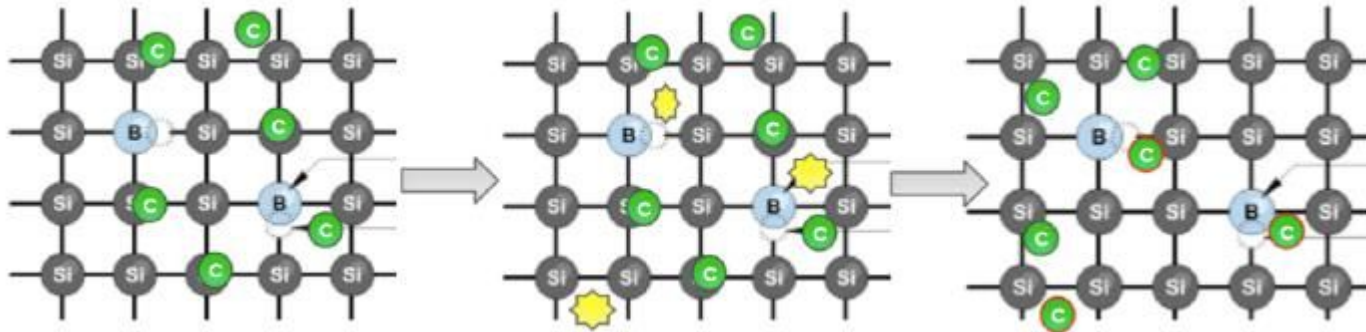
- **Drogaggio molto elevato (layer di guadagno) : il guadagno diminuisce**
- **Drogaggio basso (bulk) : il guadagno aumenta**



UFSD2

- Gallio : si pensava che il Gallio fosse meno portato a diventare interstiziale con l'irraggiamento rispetto al Boro → i risultati sperimentali per ora mostrano che il Boro è più resistente
- Carbonio : ipotesi (poi verificata sperimentalmente) che il **Carbonio compete con il Boro nel diventare interstiziale a seguito di irraggiamento**
 - meno Boro che diventa interstiziale = minor riduzione del guadagno
 - **l'aggiunta di una (moderata) concentrazione di C nel layer di guadagno aumenta**

l_k



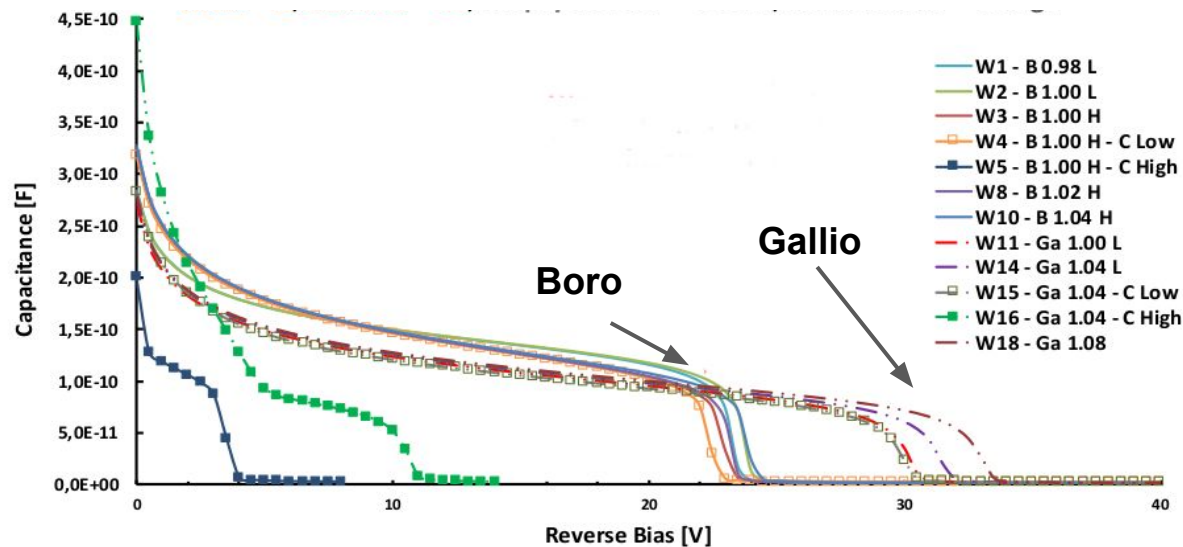
Capacità UFSD

- Geometria UFSD: facce piane parallele → Capacità $C = \epsilon^* (A/d)$
- $d \propto \sqrt{V_{Bias} / N_A} \rightarrow C \propto \sqrt{N_A / V_{Bias}}$
- UFSD: due regioni di drogaggio (Layer di guadagno e Bulk) = due pendenze diverse nella $C(V)$
- Gli **UFSD** presentano delle **$C(V)$** peculiari con due regioni distinte:
 - 1) La **prima regione** rappresenta lo svuotamento del layer di guadagno: **poco pendente** perchè N_A elevato, **svuotamento dopo decine di V**
 - 2) Dopo lo svuotamento del layer di guadagno → cambio di pendenza → “Ginocchio”
Nella regione di svuotamento del **bulk** la $C(V)$ è **molto pendente, svuotamento in pochi V**

Capacità vs Bias - Sensori FBK UFSD2



- Sensori non irraggiati
 - I sensori con Ga presentano un “ginocchio” a V maggiori
- Maggiore drogaggio rispetto a B, atteso
- Larghezza del layer di guadagno maggiore, atteso



Capacità vs Bias - Sensori FBK UFSD2

- Sensori non irradiati
- Sensori **“High Carbon”** → drogaggio del layer di guadagno fortemente ridotto → guadagno fortemente ridotto → **KO per misure di tempo**
- Sensori **“Low Carbon”**: C(V) uguali ai sensori senza C → **le proprietà dei sensori non sono toccate dall’aggiunta di C → OK per misure di tempo**
- **Effetto del C simile su sensori con Ga e B**

