

# *Sviluppo di Rivelatori UFSD per Tracciamento in 4 dimensioni*

Federico Siviero - INFN & Università di Torino

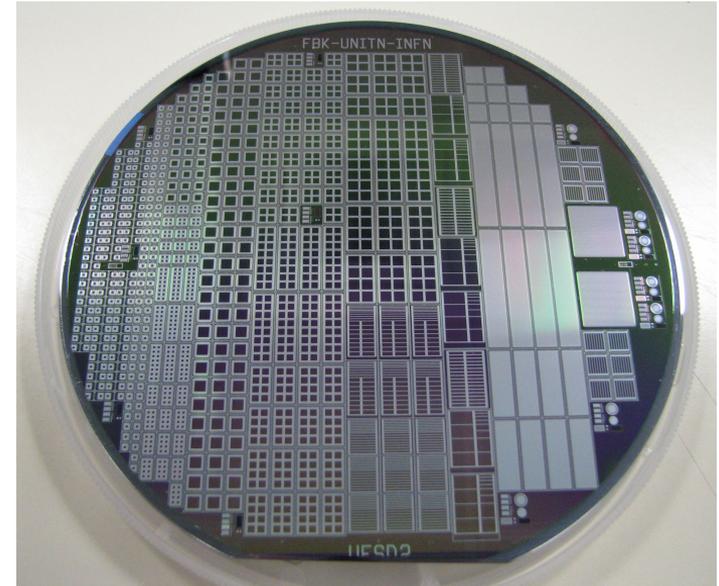
Incontri di Fisica delle Alte Energie  
Milano, 6/4/2018



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

# Ultra-Fast Silicon Detectors (UFSD)

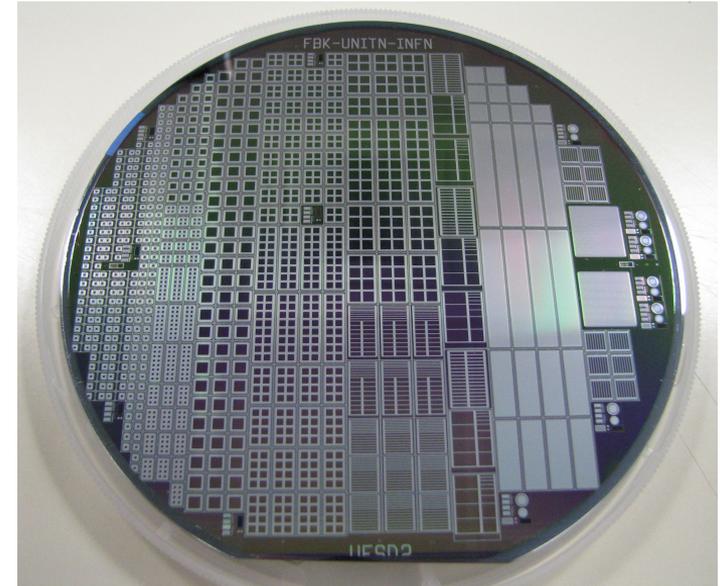
- ❑ **Rivelatori per Tracciamento 4D:**
- Misura della posizione  $\sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$
- Misura del tempo  $\sigma_t \sim 30 \text{ps}$



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

# Ultra-Fast Silicon Detectors (UFSD)

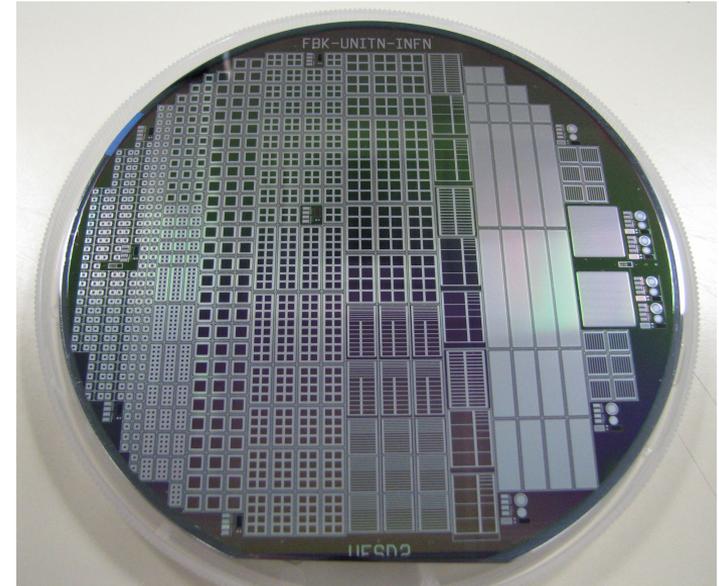
- ❑ **Rivelatori per Tracciamento 4D:**
- Misura della posizione  $\sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$
- Misura del tempo  $\sigma_t \sim 30 \text{ps}$
- ❑ **Resistenti alle radiazioni:**
- Mantengono le prestazioni per  $\Phi > 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- Adatti ai futuri esperimenti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

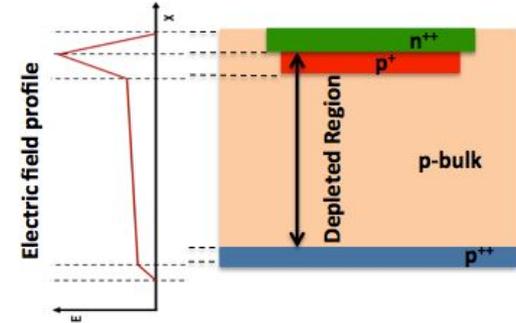
*$E > 300 \text{ kV/cm} \rightarrow$  moltiplicazione cariche primarie*

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

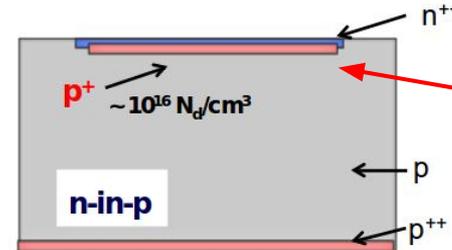
# Low-Gain Avalanche Diodes

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



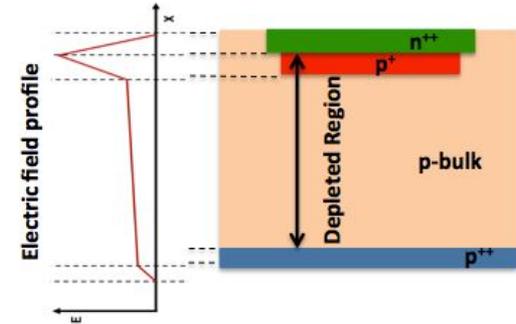
Low gain avalanche detectors

Layer di guadagno

# Low-Gain Avalanche Diodes

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

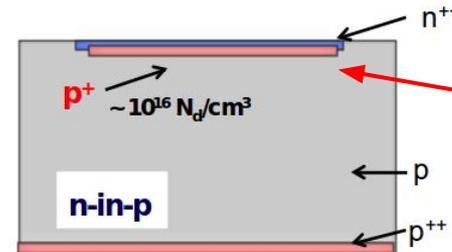
- **Applicando V esterno?** sensore da  $100 \mu\text{m}$ :  
 $E \sim 300 \text{ kV/cm} \rightarrow V = 3 \text{ kV} \rightarrow$  **Breakdown!**
- **Tecnologia LGAD:** sottile strato fortemente drogato vicino alla giunzione p-n  
 $\rightarrow$  **campo elettrico localmente molto elevato**  $\rightarrow$  **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

Layer di guadagno

# Tracciamento in 4D

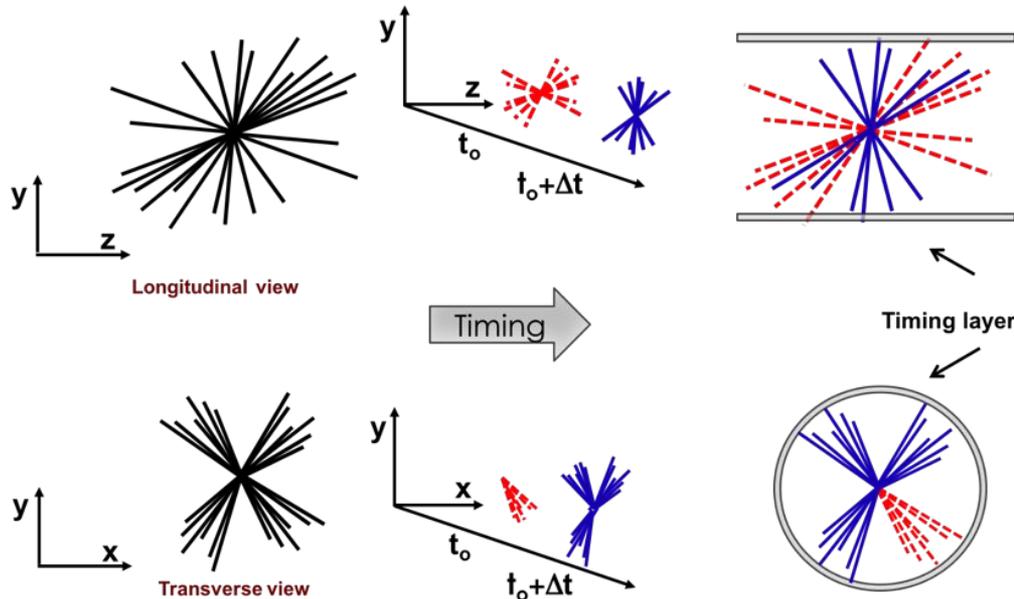


*Perchè aggiungere la misura del tempo (la 4° dimensione) a quella della posizione?*

# Tracciamento in 4D

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

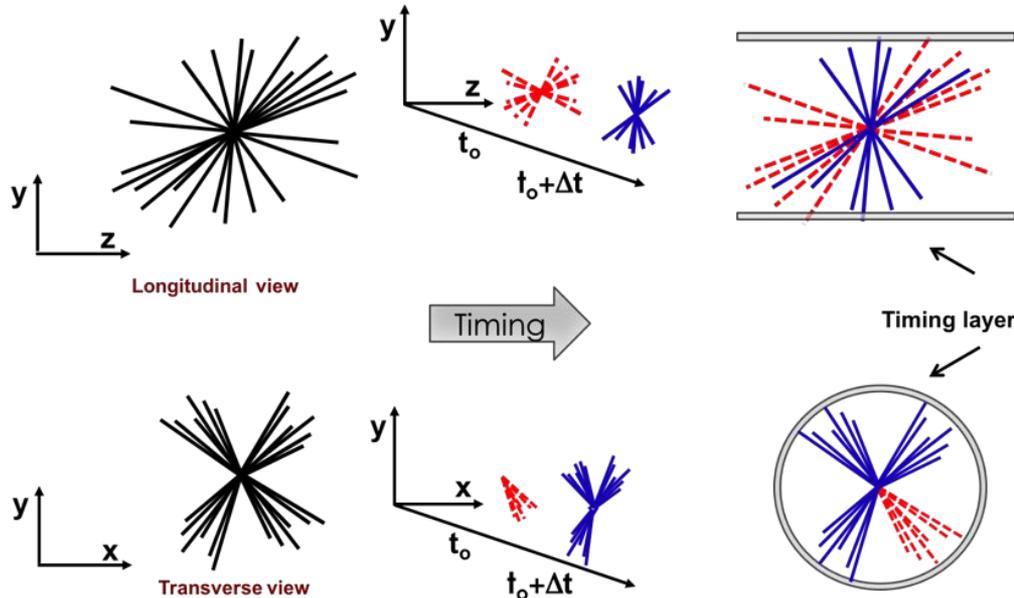
- Distinguere eventi sovrapposti nello spazio ma che hanno tempi diversi
- Significativa semplificazione del processo di ricostruzione degli eventi



# 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

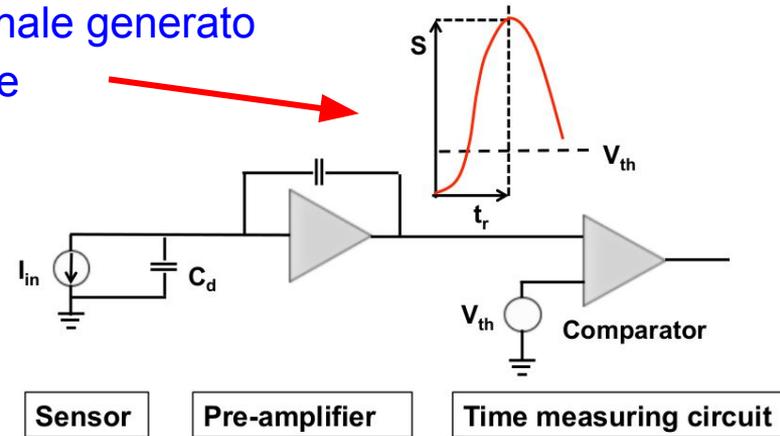
Gli UFSD possono essere segmentati come i rivelatori al Si standard  $\rightarrow \sigma_{\text{pos}} \sim 10 \mu\text{m}$

# 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

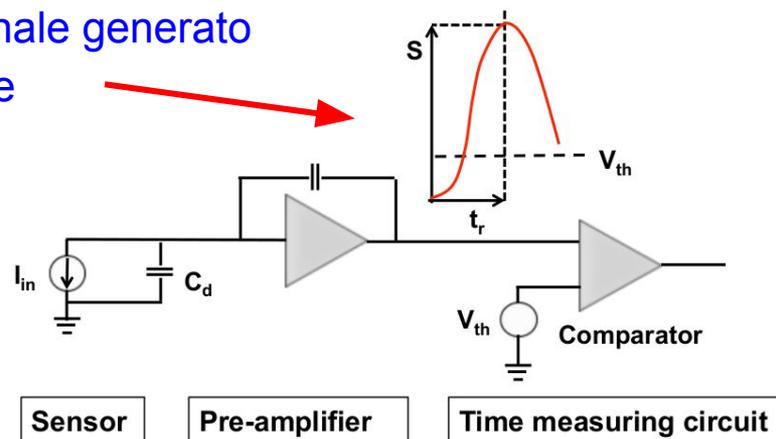
Risoluzione temporale somma di più termini

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

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

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

$\rightarrow$  Risoluzione temporale dominata da  $\sigma_{\text{Jitter}}$  e  $\sigma_{\text{Landau}}$



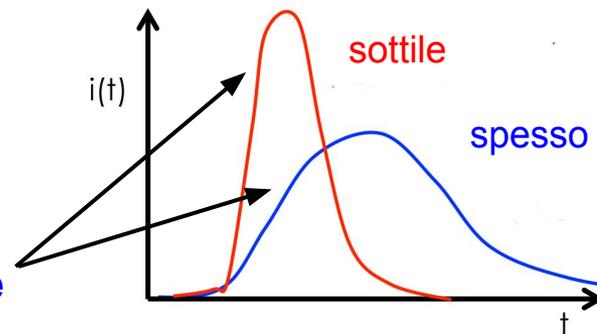
# Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

◆ **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**



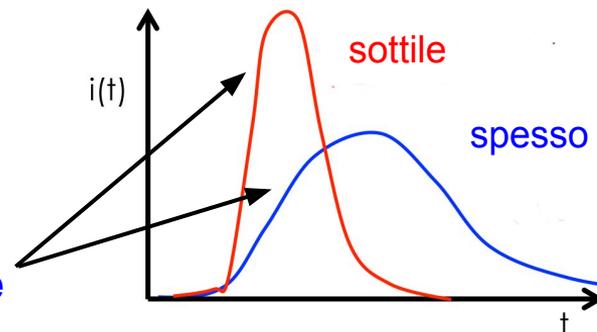
# Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

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

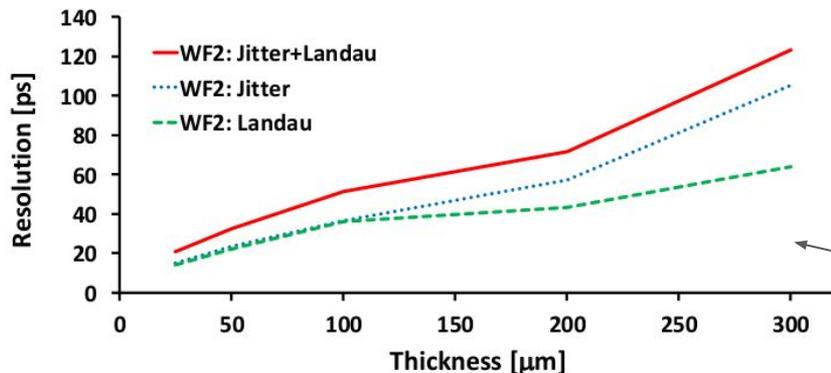
$$dV/dt \sim S/t_{rise} \rightarrow \sigma_{jitter} = \frac{t_{rise}}{S/N}$$

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 →  $\sigma_{Landau}$  **minimizzato per sensori sottili**



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

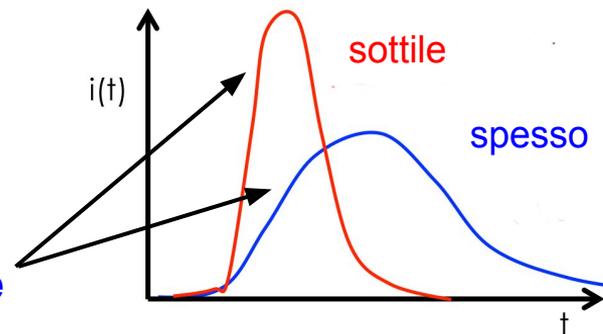
# Gli ingredienti per il tracciamento in 4D

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

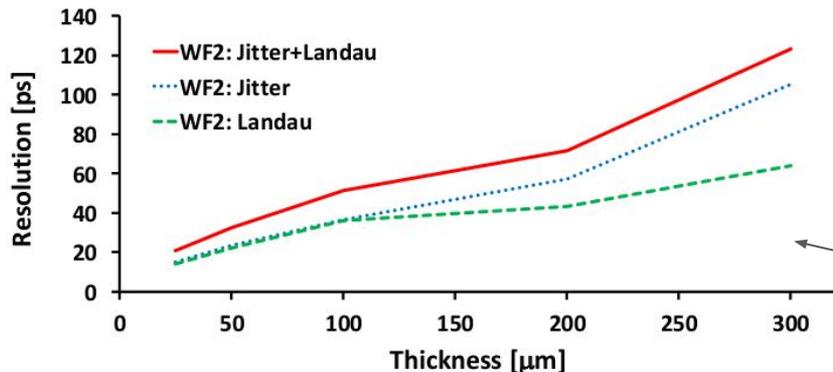
$$dV/dt \sim S/t_{rise} \rightarrow \sigma_{jitter} = \frac{t_{rise}}{S/N}$$

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 →  $\sigma_{Landau}$  **minimizzato per sensori sottili**



**Ingredienti per una buona  $\sigma_t$  :  
elevato S/N, spessore ridotto**

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

# Un equilibrio delicato

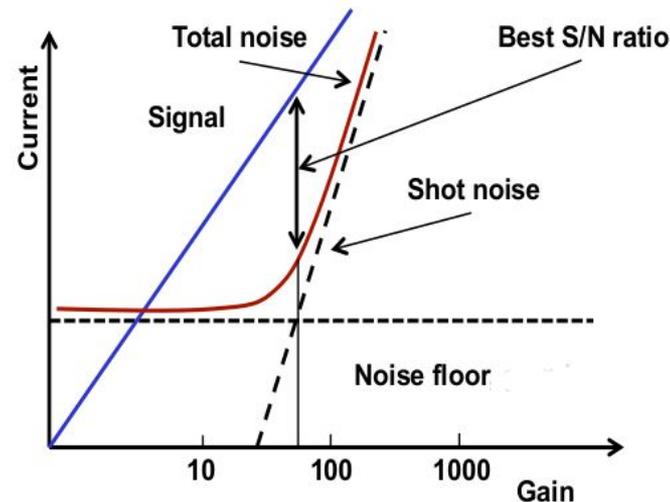


*Per ottenere un'ottima  $\sigma_t$  il guadagno e lo spessore del rivelatore devono essere calibrati con attenzione*

# Un equilibrio delicato

*Per ottenere un'ottima  $\sigma_t$  il guadagno e lo spessore del rivelatore devono essere calibrati con attenzione*

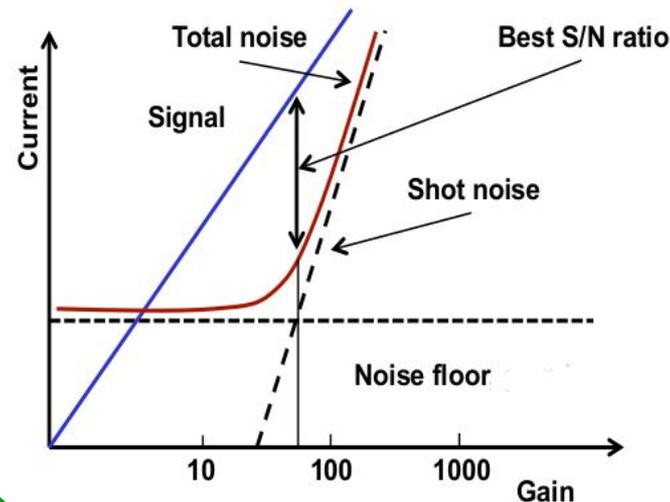
- S/N aumenta col guadagno fino a  $G \sim 50$
- Per  $G > 50$  il rumore aumenta più rapidamente del segnale → **S/N peggiora**
- **Per massimizzare S/N → guadagno moderato (10-30)**



# Un equilibrio delicato

*Per ottenere un'ottima  $\sigma_t$  il guadagno e lo spessore del rivelatore devono essere calibrati con attenzione*

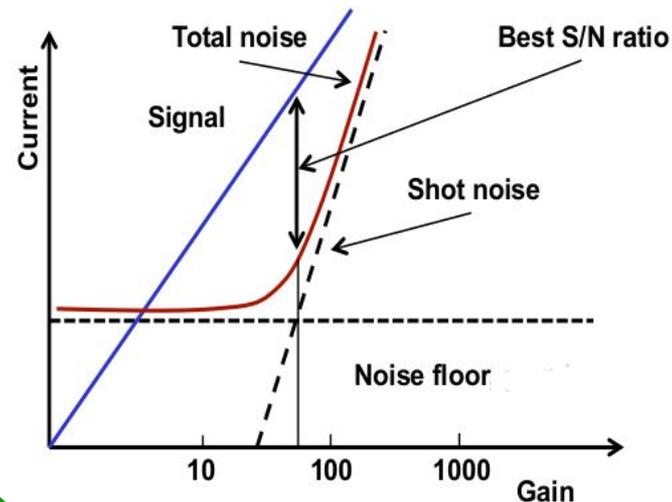
- S/N aumenta col guadagno fino a  $G \sim 50$
- Per  $G > 50$  il rumore aumenta più rapidamente del segnale → **S/N peggiora**
- **Per massimizzare S/N → guadagno moderato (10-30)**
- **Spessore ridotto** =  $t_{\text{rise}}$  e  $\sigma_{\text{Landau}}$  piccoli
- Però... **elevata capacità**
- C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



# Un equilibrio delicato

*Per ottenere un'ottima  $\sigma_t$  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** =  $t_{\text{rise}}$  e  $\sigma_{\text{Landau}}$  piccoli
- Però... **elevata capacità**
- C elevata → per avere segnale grande → **necessario guadagno molto elevato**
- **Spessore = 50  $\mu\text{m}$**  → compromesso tra sensore sottile e guadagno moderato



Simulazioni & Ris. sperimentali: **Guadagno ~ 20 + Spessore = 50  $\mu\text{m}$**

**→ 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

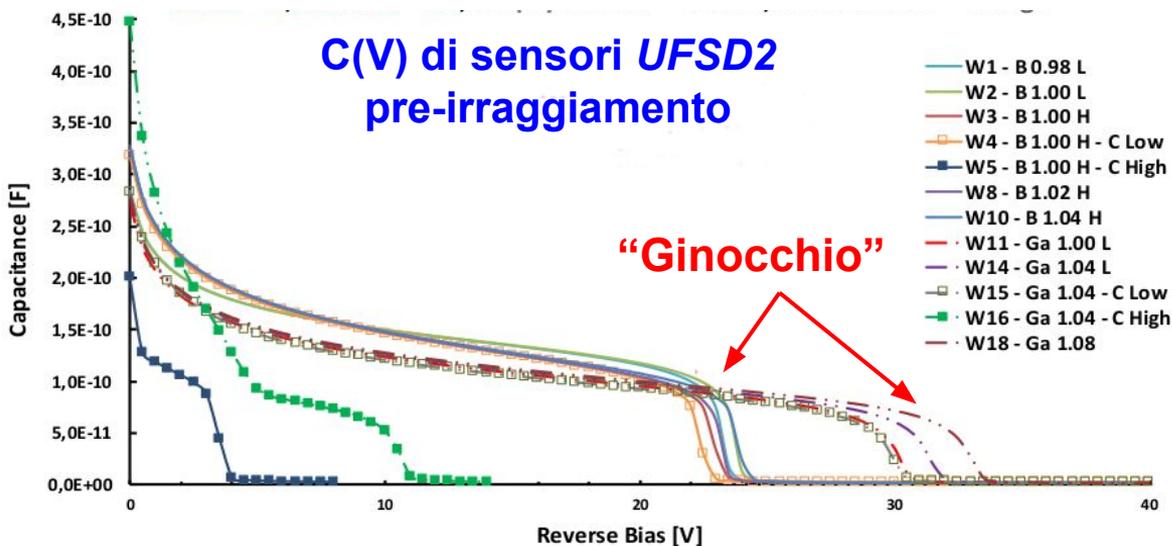
# Resistenza alle radiazioni

*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*

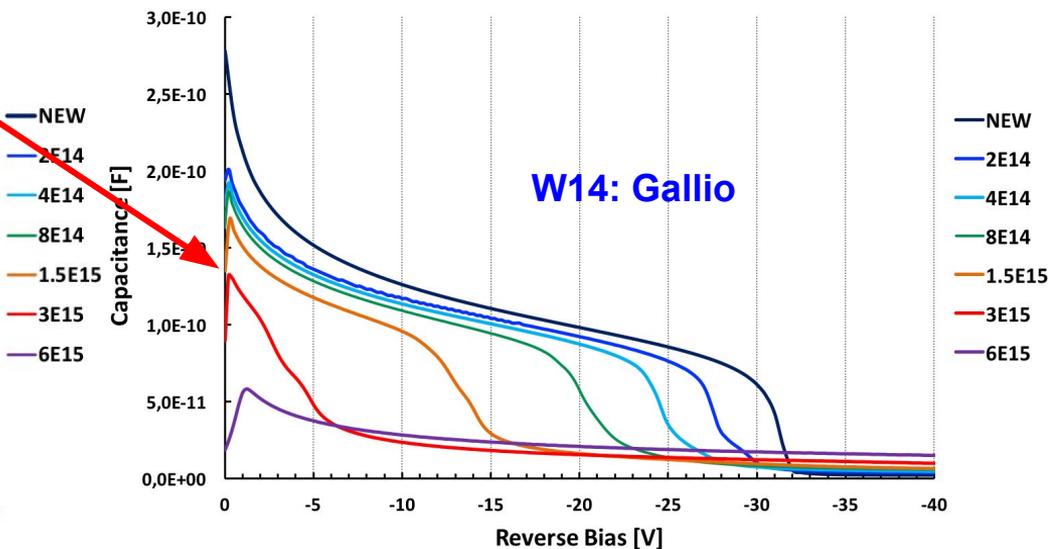
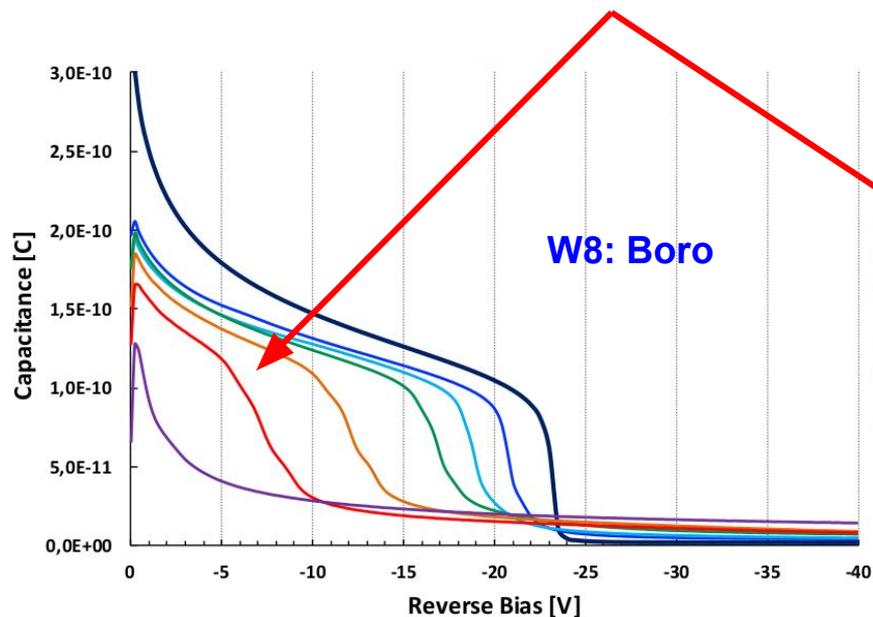
- ❑ La caratteristica C(V) di un UFSD presenta un “ginocchio” che rappresenta lo svuotamento del layer di guadagno
- ❑ Il potenziale a cui si presenta il “ginocchio” è proporzionale al guadagno del sensore
- ❑ L’irraggiamento riduce il guadagno → Il “ginocchio” si sposta a V inferiori



# 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

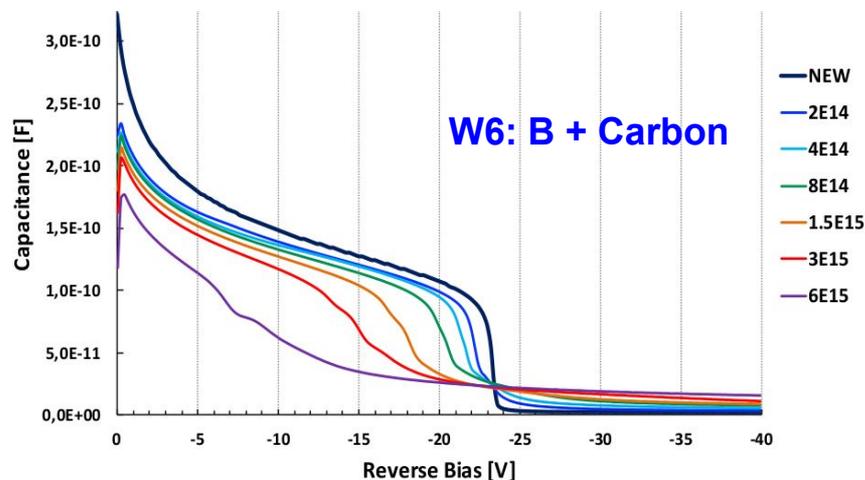
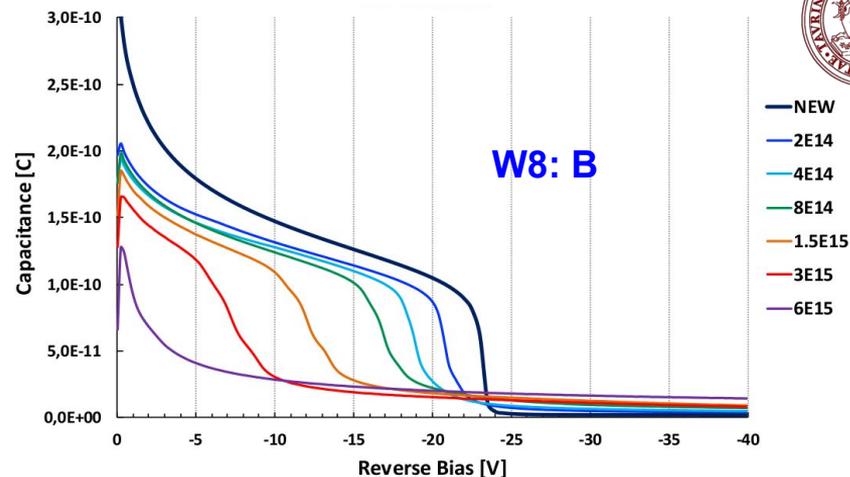
N.B. la riduzione del guadagno peggiora  $\sigma_t$



# C(V)

## Carbonio vs Non-Carbonio

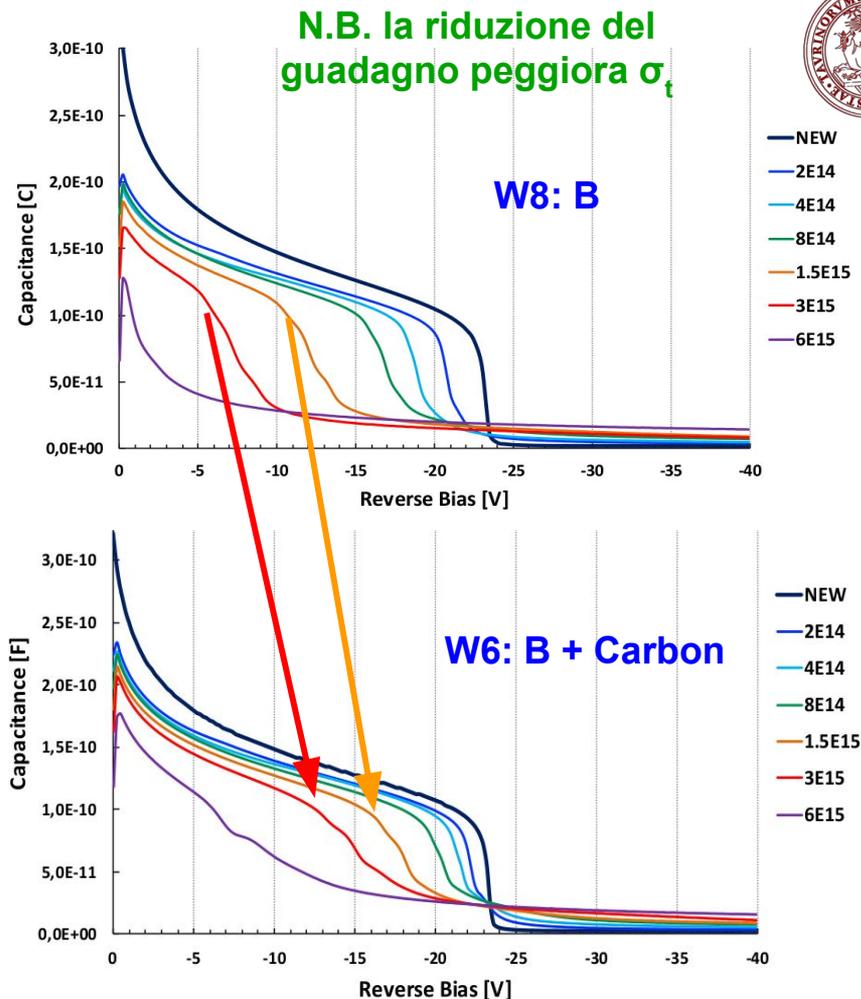
- ❖ C(V) di 2 sensori *UFSD2* per diversi irraggiamenti ( fino a  $\Phi = 6e15 \text{ n}_{eq}/\text{cm}^2$  )
- ❖ C(V) del sensore con Carbonio: andamento simile a quello senza C  
→ **Il Carbonio non modifica le proprietà del sensore**



## C(V)

# Carbonio vs Non-Carbonio

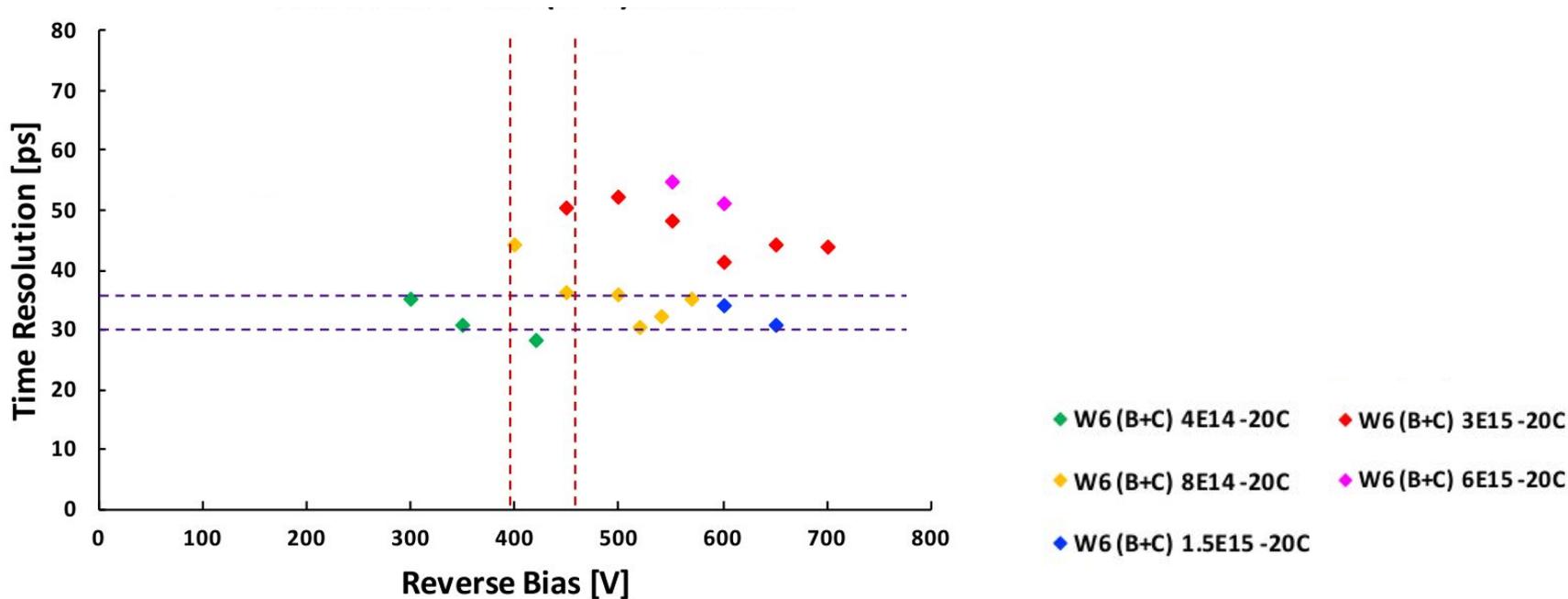
- ❖ C(V) di 2 sensori *UFSD2* per diversi irraggiamenti ( fino a  $\Phi = 6e15 \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ )
- ❖ C(V) del sensore con Carbonio: andamento simile a quello senza C  
→ **Il Carbonio non modifica le proprietà del sensore**
- ❖ Sensore con Carbonio: diminuzione minore del V del ginocchio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



# Risoluzione temporale *UFSD2*



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



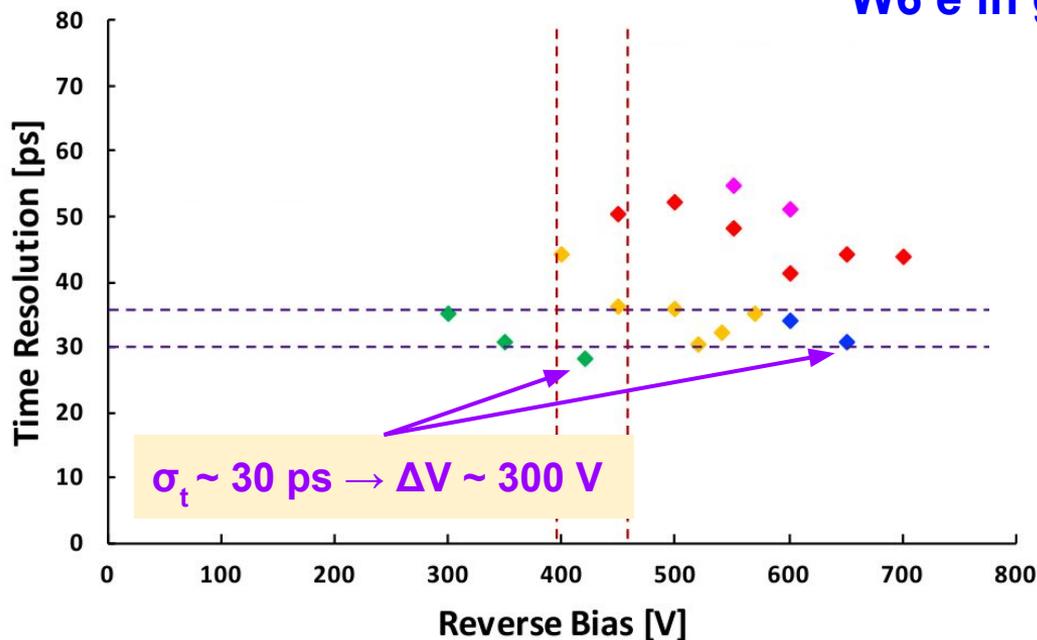
# Risoluzione temporale *UFSD2*

- ❑ Misure fatte dall'Università di Santa Cruz con sorgente  $\beta$  ( $-20^{\circ}\text{C}$ )
- ❑ 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)  $\sigma_t$  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

# Risoluzione temporale *UFSD2*

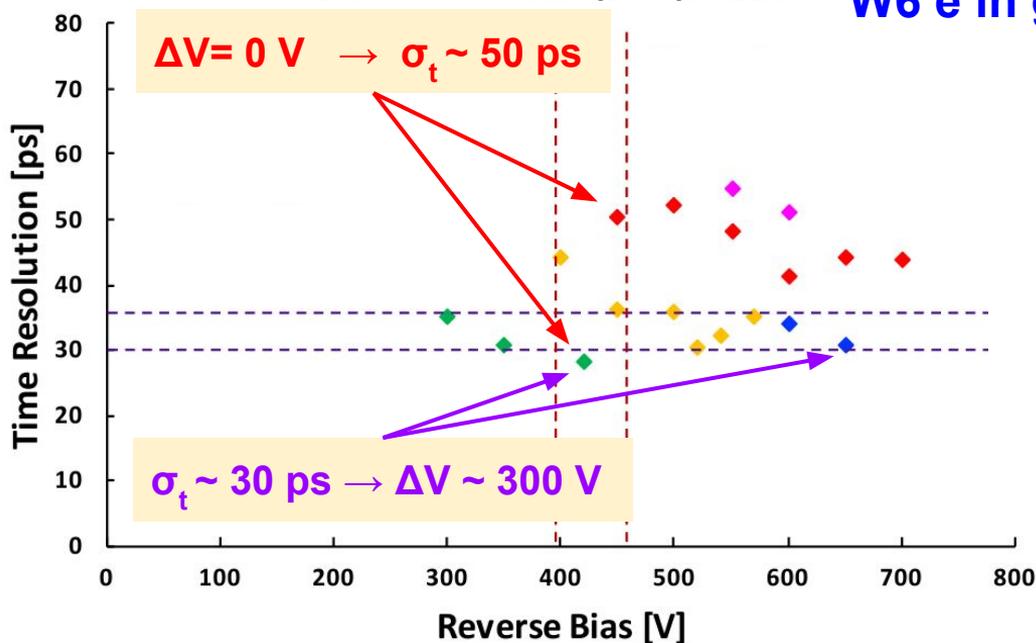


- ❑ Misure fatte dall'Università di Santa Cruz con sorgente  $\beta$  ( $-20^{\circ}\text{C}$ )
- ❑ Utilizzato un sensore *UFSD2* del Wafer 6 (Boro + Carbonio)

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)  $\sigma_t$  costante, il bias aumenta  $\Delta V \sim 300 \text{ V}$  durante la vita del sensore
- 2)  $V$  costante,  $\sigma_t$  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  $\sim 20$  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  $\Phi > 10^{15} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

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

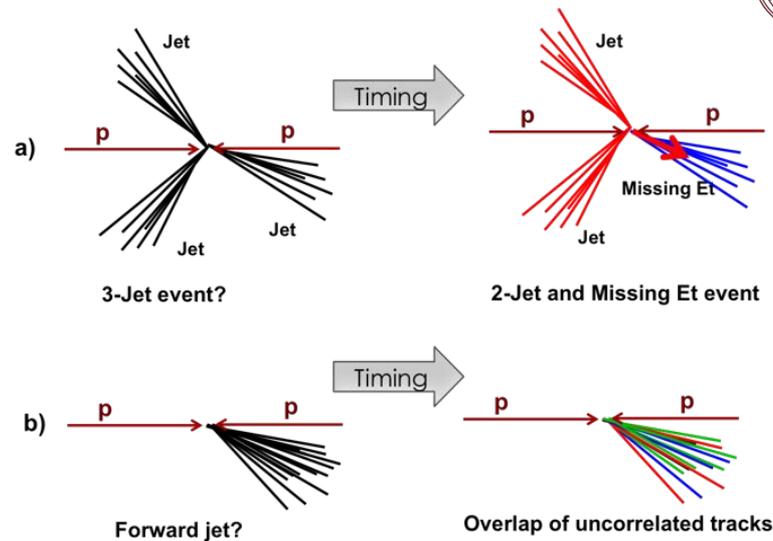
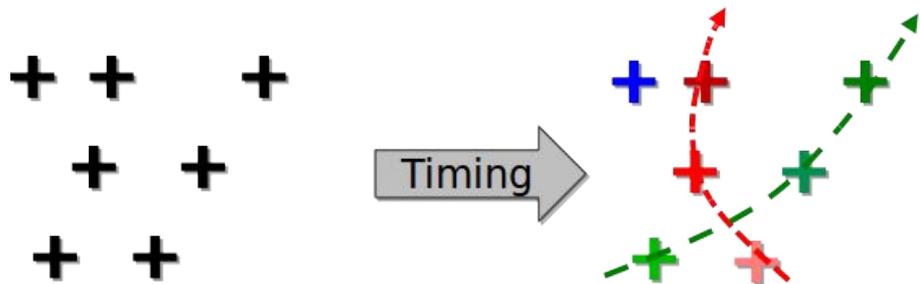
- [1] H.F.-W.Sadrozinski et al., “Ultra-fast silicon detectors (UFSD)”, NIMA 765 (2014) 7-11
- [2] N.Cartiglia et al., “Tracking in 4 Dimensions”, NIMA 845 (2017) 47-51
- [3] G. Pellegrini et al., “*Technology developments and first measurements of Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for High Energy 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

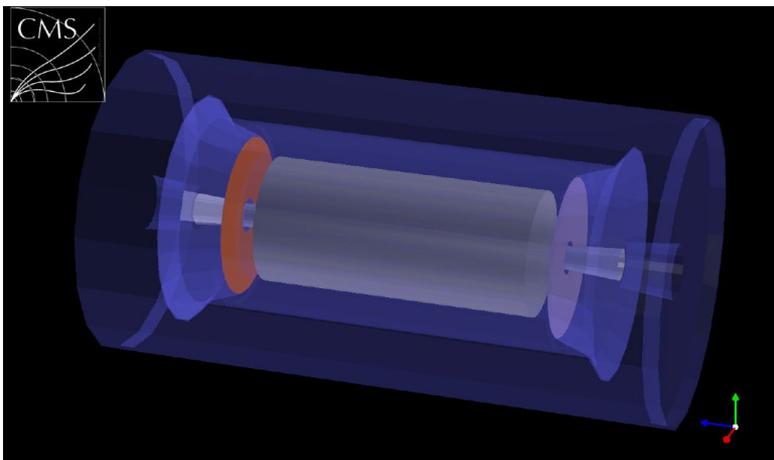


- **Timing per ogni punto lungo la traccia:** si considerano solo punti temporalmente compatibili

→ L'obiettivo finale per il Tracciamento 4D

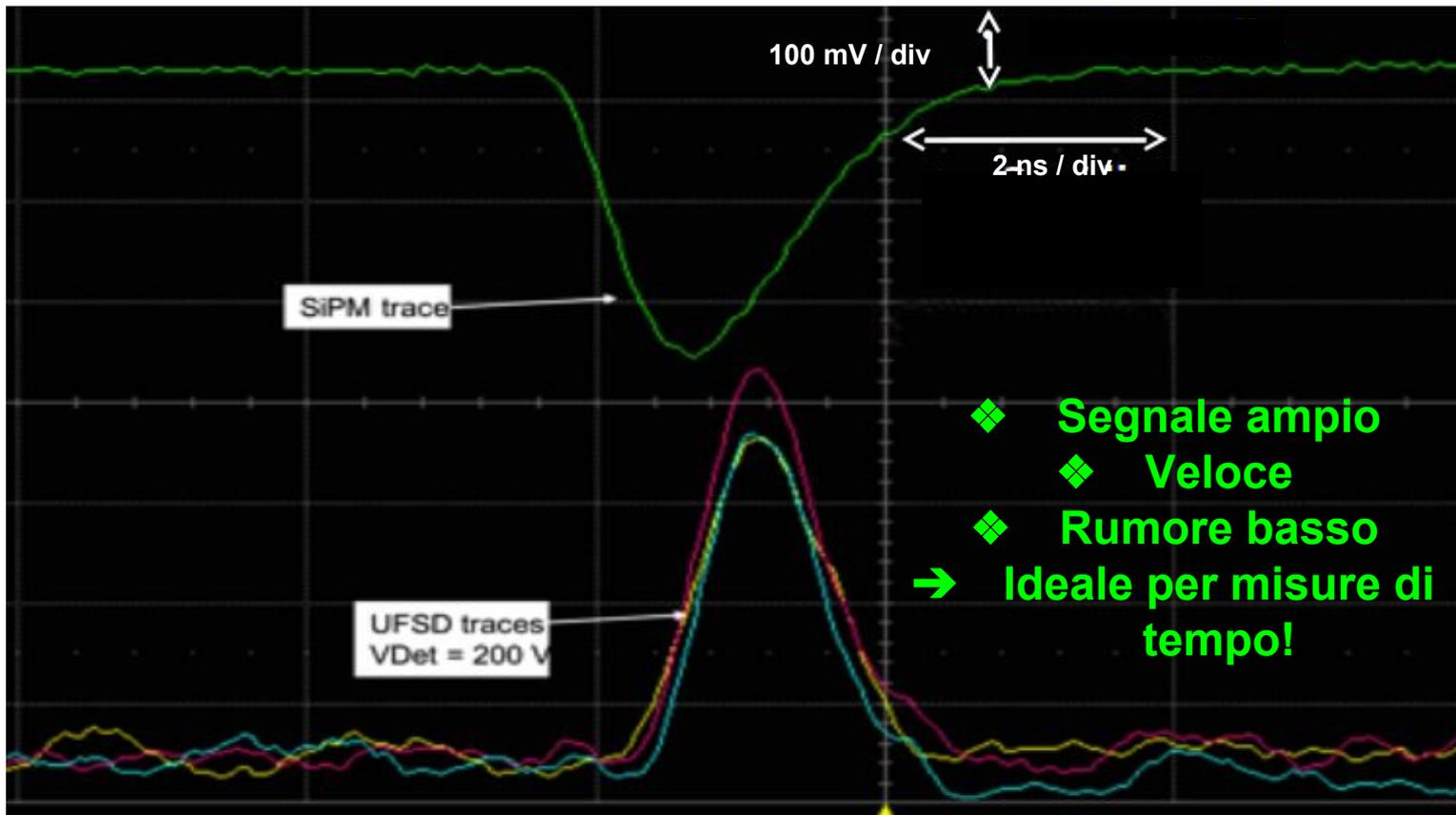
# Il Timing Layer di CMS

- **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

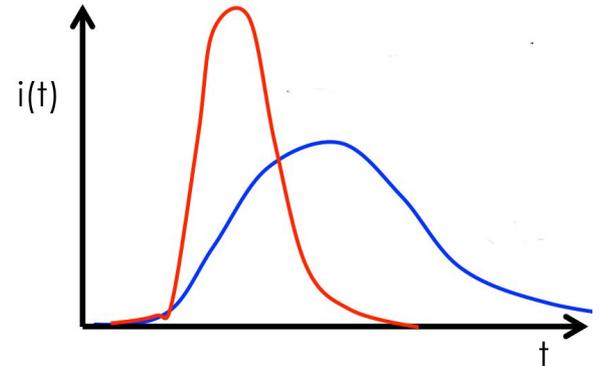
# Segnali di UFSD a confronto con un SiPM



# 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
  - $v_{\text{drift}}$  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

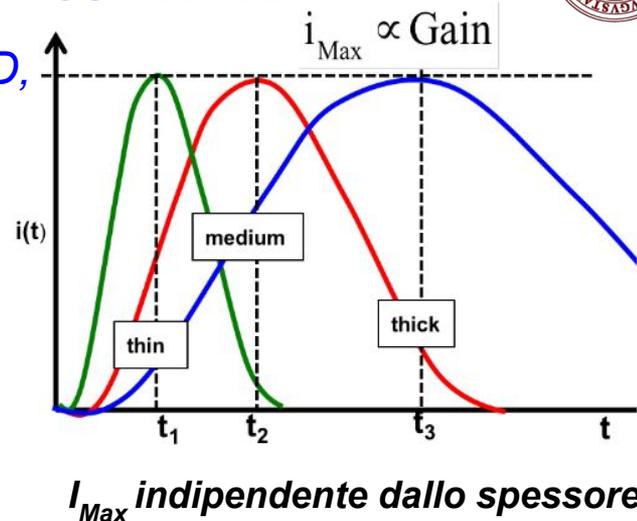
➤ **Sensori al Silicio standard (no guadagno):**

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...**



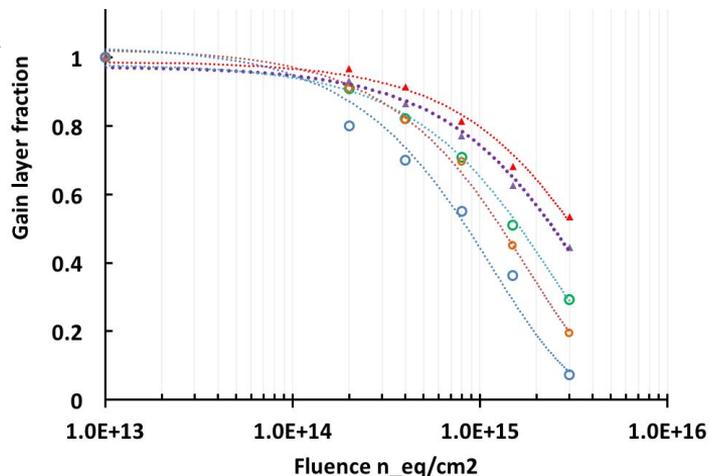
# Initial Acceptor Removal



- 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, diventando 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**

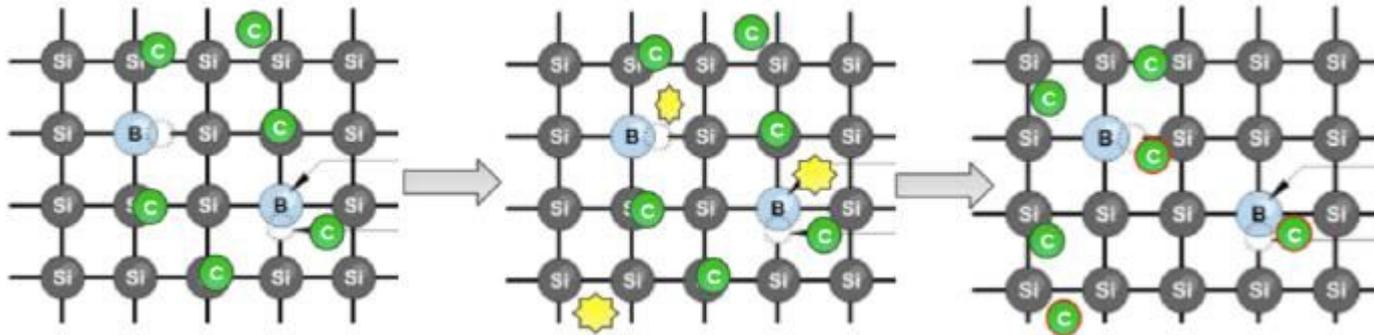


$y = 9.9\text{E-}01\text{e-}2.1\text{E-}16x$  ▲ W6 B+C <CV>  
 $y = 9.7\text{E-}01\text{e-}2.7\text{E-}16x$  ▲ W15 Ga+C <CV>  
 $y = 9.8\text{E-}01\text{e-}4.1\text{E-}16x$  ● W1 LD <CV>  
 $y = 1.0\text{E+}00\text{e-}5.5\text{E-}16x$  ● W8 B <CV>  
 $y = 1.0\text{E+}00\text{e-}8.5\text{E-}16x$  ● W14 Ga <CV>

# 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**

ki



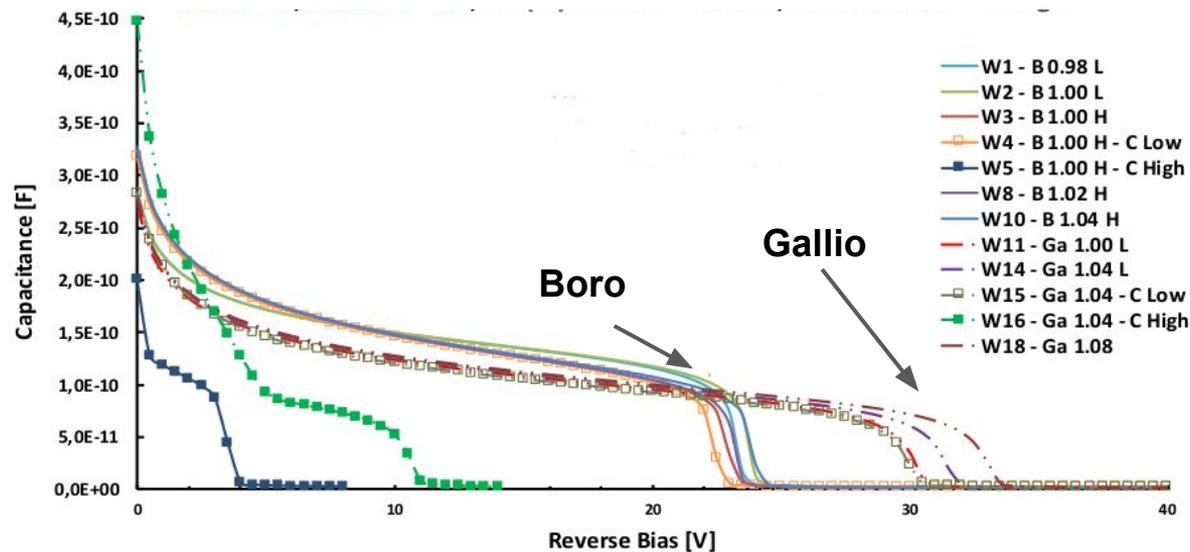
# Capacità UFSD

- 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**

