



**UNIVERSITÀ
DI TORINO**

Corso di Laurea Triennale in Fisica – Anno accademico 2021/22

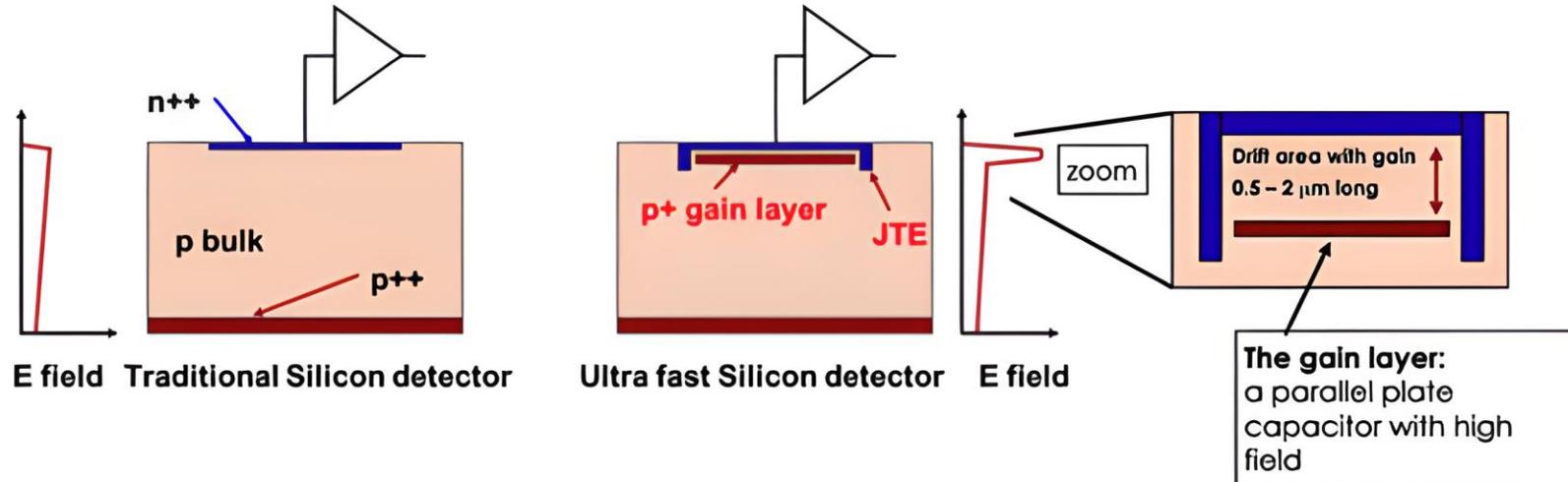
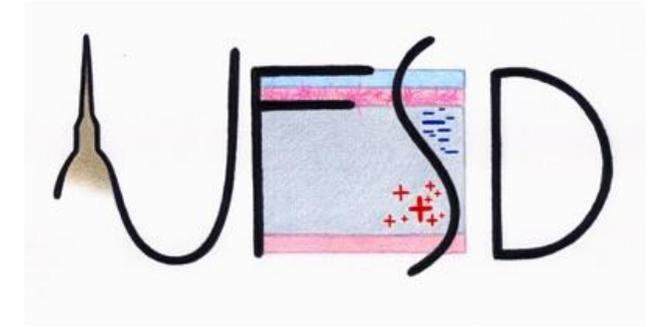
Caratterizzazione di sensori al silicio con guadagno ottimizzati per resistere a fluenze di $1E17$ particelle/cm²

Simone Galletto



Relatore: Valentina Sola

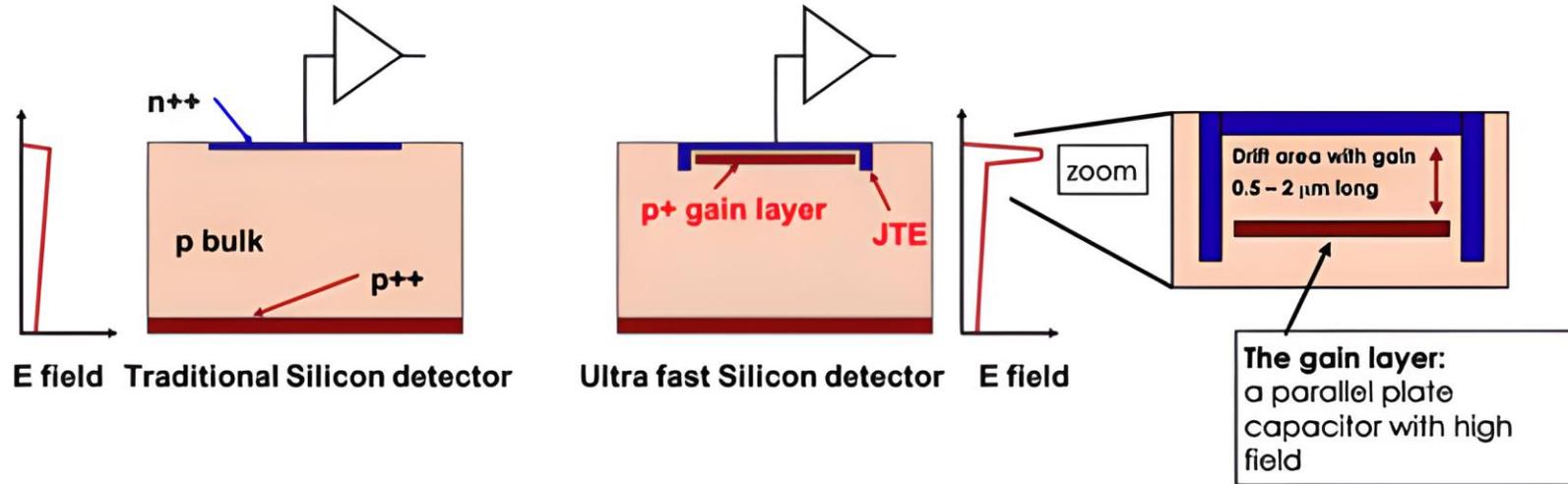
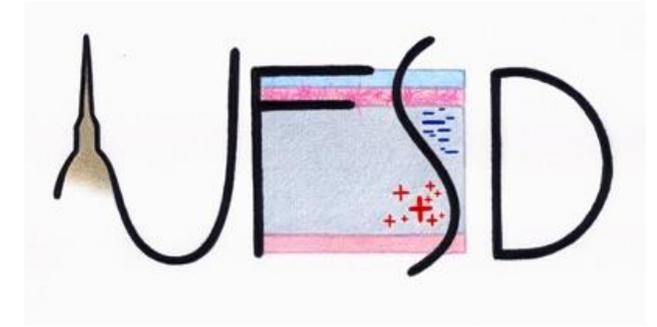
Ultra Fast Silicon Detectors



$p^+ \sim 1\text{E}16 \text{ atomi/cm}^3$
 $p\text{-bulk} \sim 1\text{E}12 \text{ atomi/cm}^3$

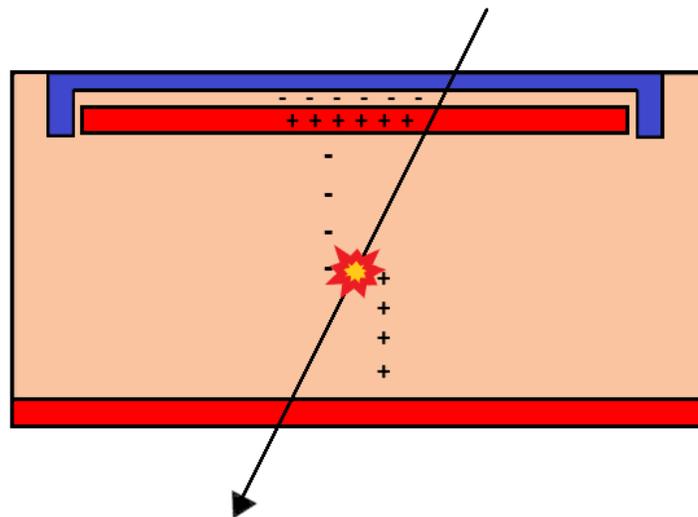
Gli **LGAD** permettono una moltiplicazione controllata del segnale e hanno ottime caratteristiche temporali.

Ultra Fast Silicon Detectors



p+ $\sim 1E16$ atomi/cm³
 p-bulk $\sim 1E12$ atomi/cm³

Gli **LGAD** permettono una moltiplicazione controllata del segnale e hanno ottime caratteristiche temporali.



MIP genera **0,1 fC** di carica ogni **10 μm** di silicio

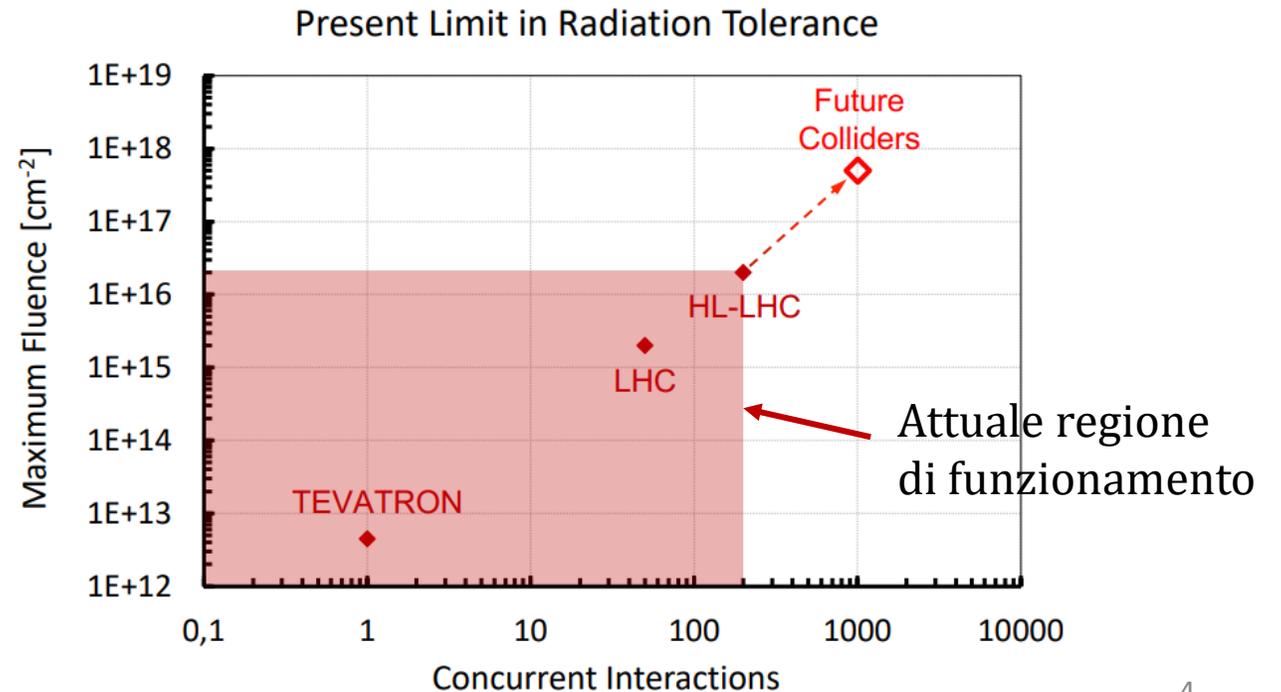
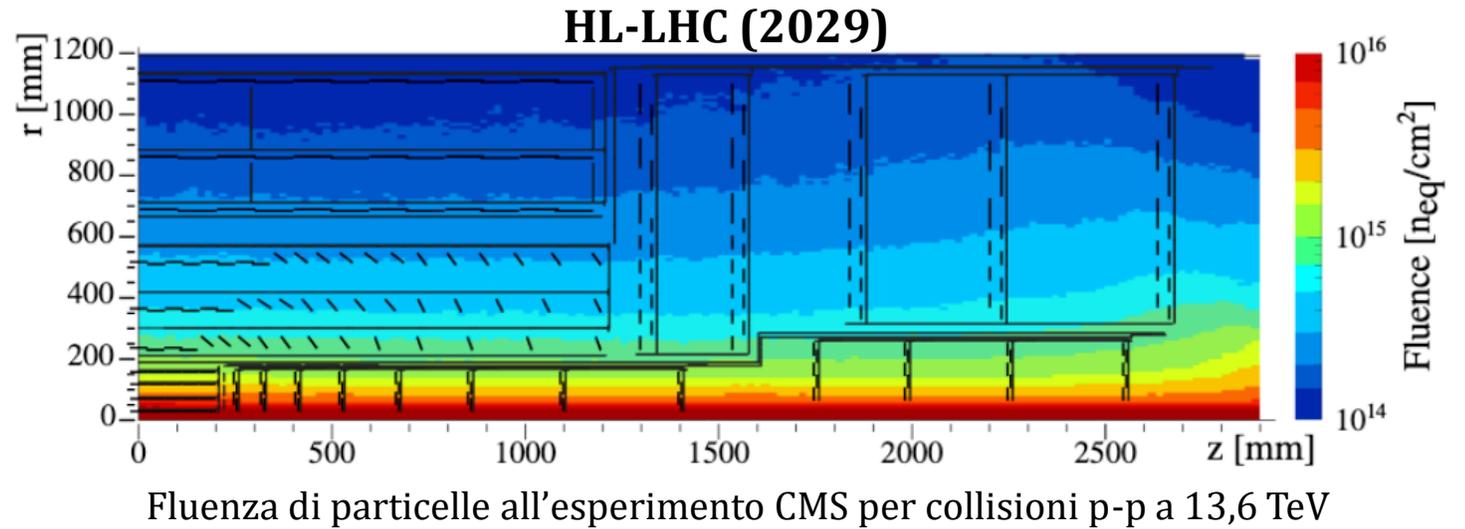
Carica minima richiesta dall'elettronica:

- **1 fC** per il **tracciamento**
- **~ 5 fC** per **misure precise di tempo**

→ Un sensore di 50 μm di spessore necessita di un guadagno pari (o superiore) a 10

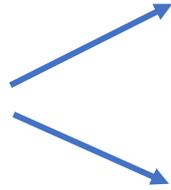
Perché vogliamo migliorare la resistenza dei sensori al silicio alla radiazione?

I collisori del futuro raggiungeranno fluenze **10-100 volte superiori** a quelle attuali.



Come la radiazione danneggia i sensori al silicio

Particella incidente sul sensore
perde energia mediante:



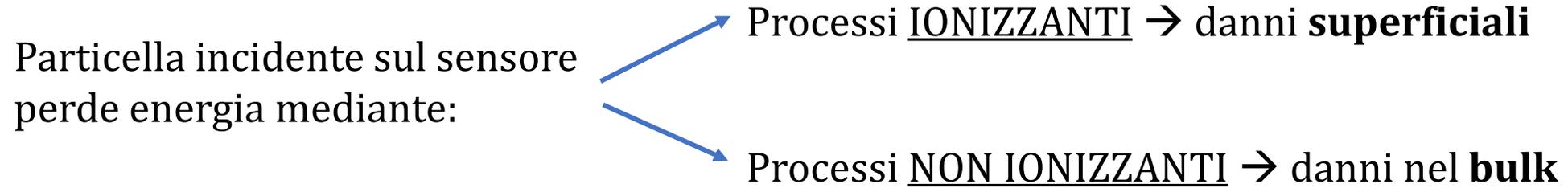
Come la radiazione danneggia i sensori al silicio

Particella incidente sul sensore
perde energia mediante:

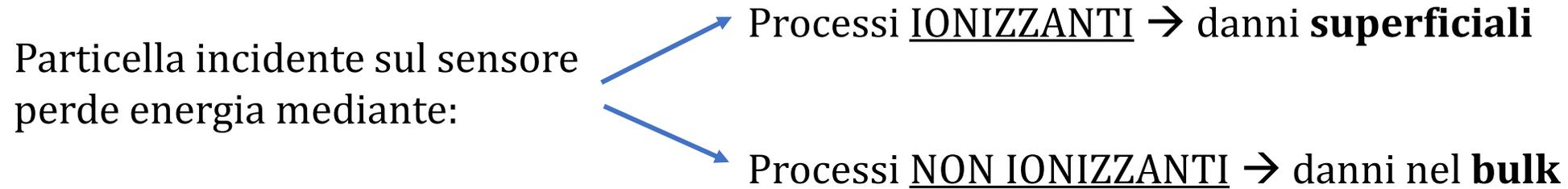


Processi IONIZZANTI → danni **superficiali**

Come la radiazione danneggia i sensori al silicio



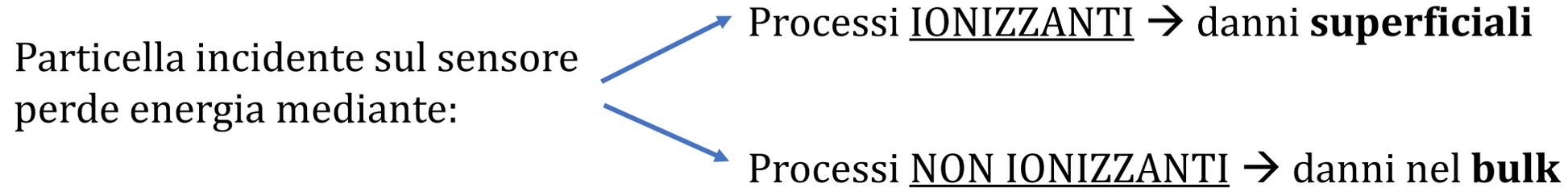
Come la radiazione danneggia i sensori al silicio



I principali effetti provocati dalla radiazione sono:

- **Aumento della leakage-current**

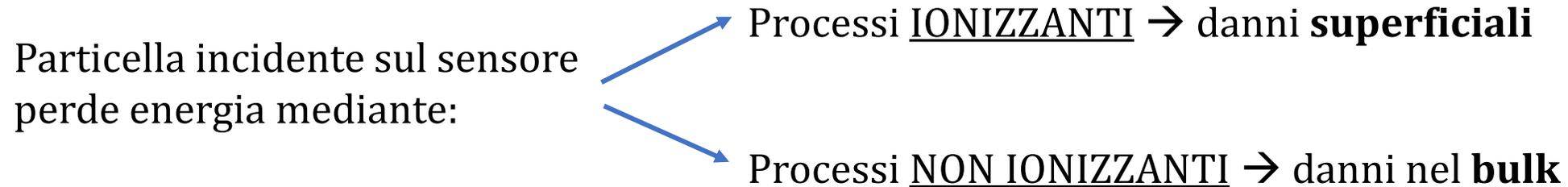
Come la radiazione danneggia i sensori al silicio



I principali effetti provocati dalla radiazione sono:

- **Aumento della leakage-current**
- **Donor/Acceptor-removal**

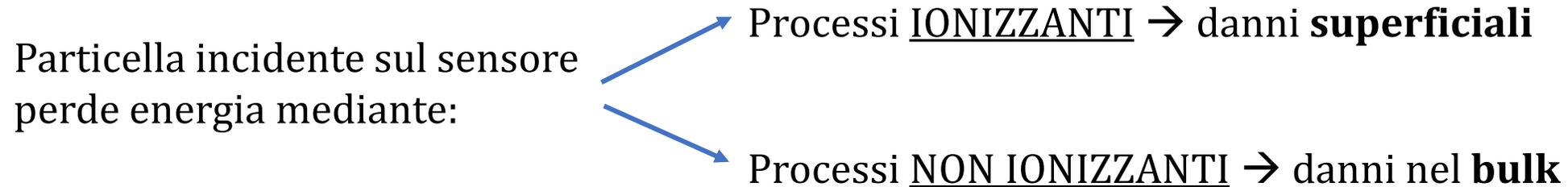
Come la radiazione danneggia i sensori al silicio



I principali effetti provocati dalla radiazione sono:

- **Aumento della leakage-current**
- **Donor/Acceptor-removal**
- **Charge Trapping** → diminuisce l'efficienza con cui vengono collezionate le cariche

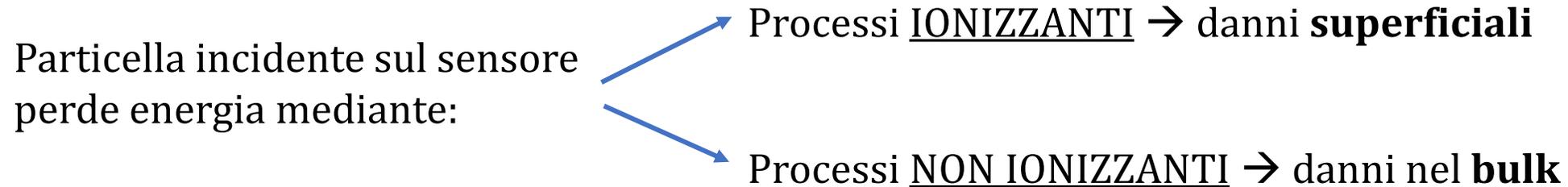
Come la radiazione danneggia i sensori al silicio



I principali effetti provocati dalla radiazione sono:

- **Aumento della leakage-current**
- **Donor/Acceptor-removal**
- **Charge Trapping** → diminuisce l'efficienza con cui vengono collezionate le cariche
- **Riduzione della mobilità** dei portatori → la mobilità di elettroni e lacune cala con l'aumentare delle fluenze.

Come la radiazione danneggia i sensori al silicio



I principali effetti provocati dalla radiazione sono:

- **Aumento** della **leakage-current**
- **Donor/Acceptor-removal**
- **Charge Trapping** → diminuisce l'efficienza con cui vengono collezionate le cariche
- **Riduzione** della **mobilità** dei portatori → la mobilità di elettroni e lacune cala con l'aumentare delle fluenze.

Tutti questi sono effetti **volumetrici** → Sensori più **sottili** sono intrinsecamente meno affetti dai danni da radiazione!

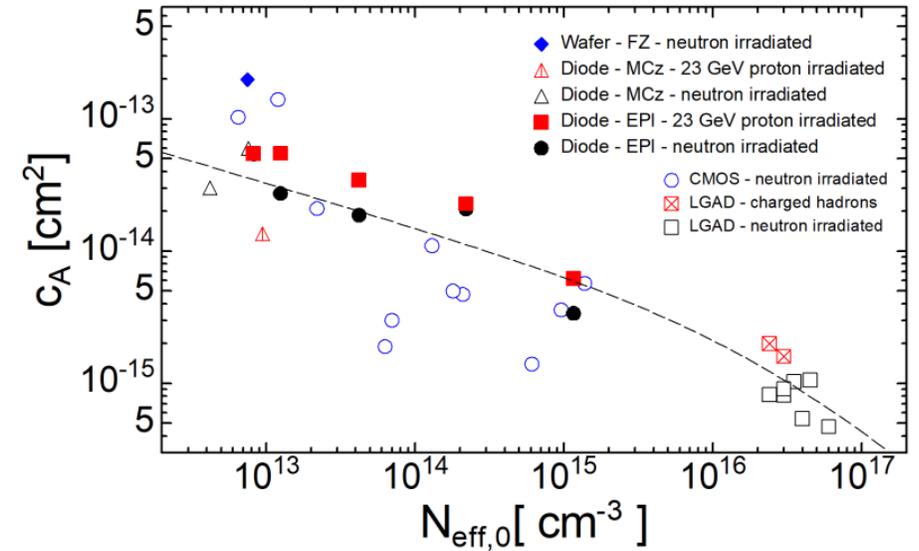
Acceptor removal

Effetto particolarmente dannoso per gli LGAD in quanto va a deattivare gli atomi accettori presenti nel *gain layer*, **riducendo il guadagno del sensore.**

La **concentrazione di atomi accettori** attivi diminuisce secondo la legge:

$$N_A(\phi_{eq}) = N_A(0) \cdot e^{-C_A \phi_{eq}}$$

dove C_A è il coefficiente di *acceptor removal*.



Acceptor removal

Effetto particolarmente dannoso per gli LGAD in quanto va a deattivare gli atomi accettori presenti nel *gain layer*, **riducendo il guadagno del sensore.**

La **concentrazione di atomi accettori** attivi diminuisce secondo la legge:

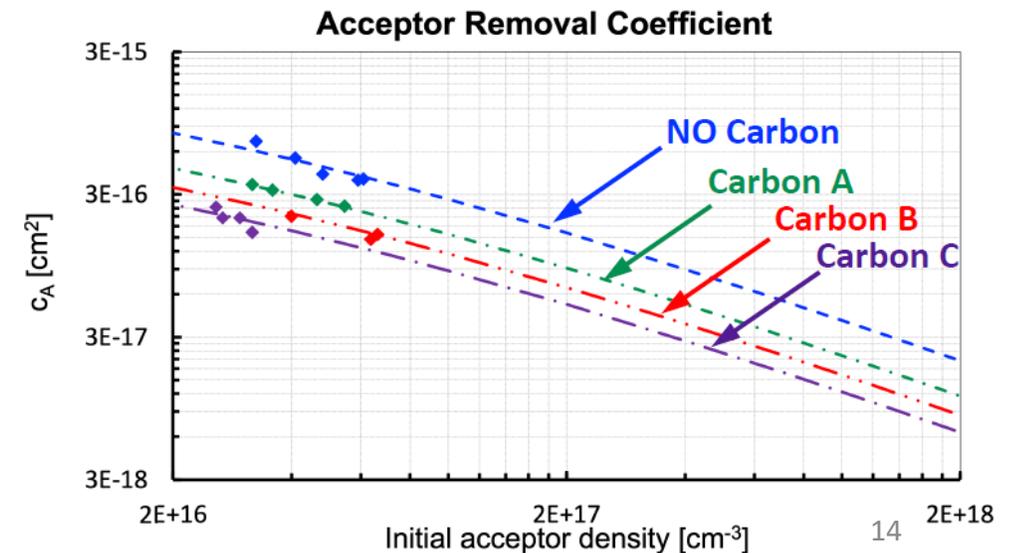
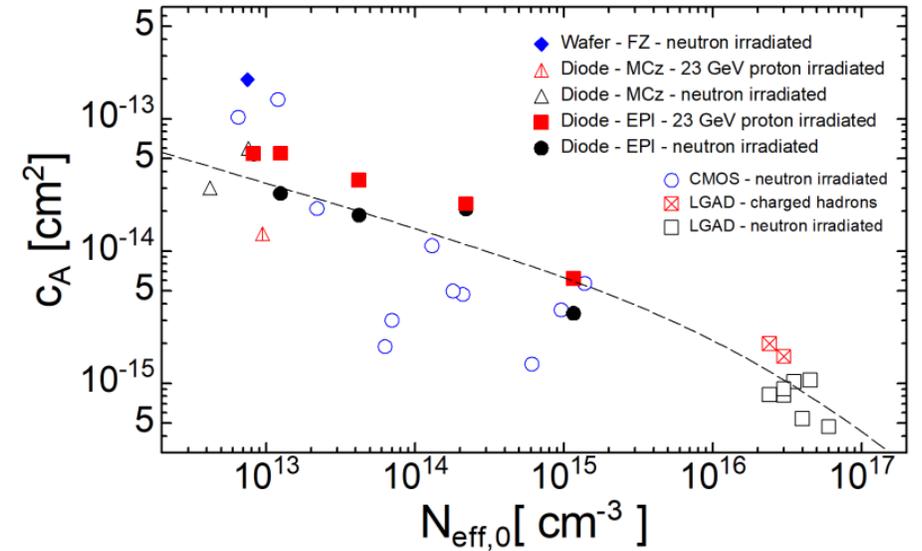
$$N_A(\phi_{eq}) = N_A(0) \cdot e^{-C_A \phi_{eq}}$$

dove C_A è il coefficiente di *acceptor removal*.

È noto come il carbonio permetta una **mitigazione** degli effetti **dell'acceptor removal.**

→ Riduzione fino a un fattore 3

[R&D tra Torino e FBK]



Design Compensato

Acceptor removal

$$N_A(\phi_{eq}) = N_A(0) \cdot e^{-C_A \phi_{eq}}$$

Donor removal

$$N_D(\phi_{eq}) = N_D(0) \cdot e^{-C_D \phi_{eq}}$$

3 possibili scenari

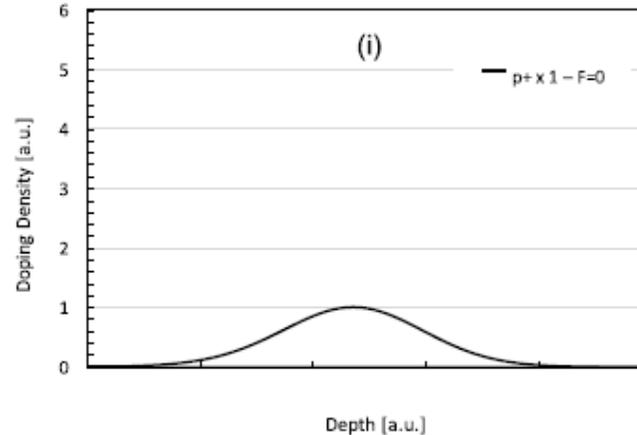
$$C_A < C_D$$

$$C_A \approx C_D$$

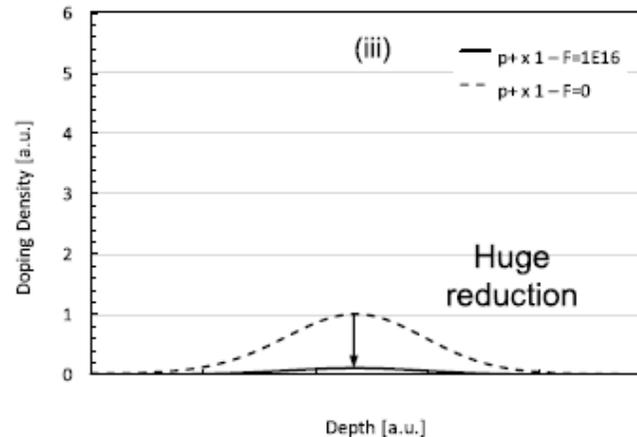
$$C_A > C_D$$

LGAD STANDARD

Doping Profile – Standard Gain Layer Design

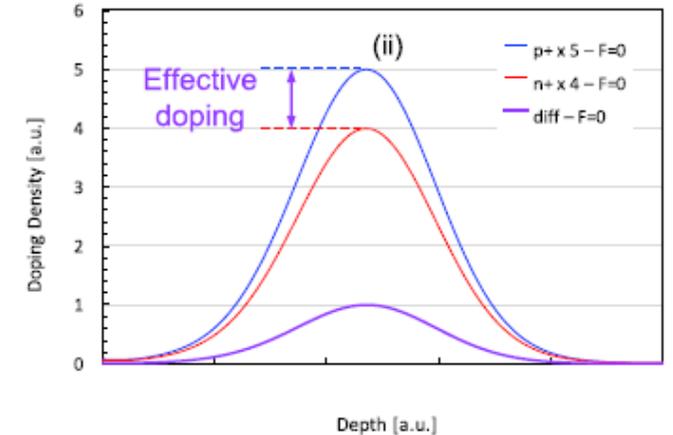


Doping Profile – Standard Gain Layer Design

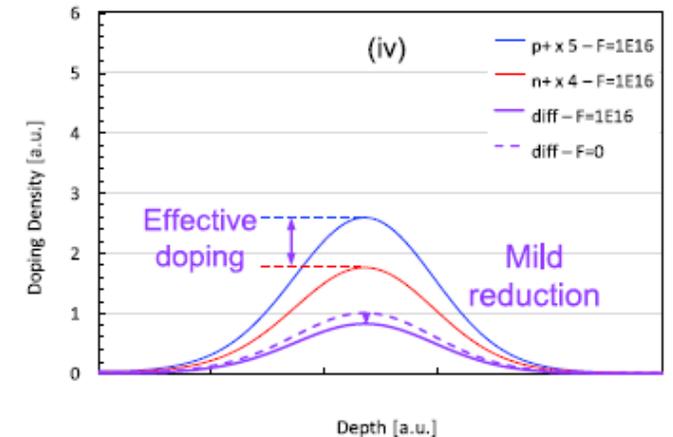


LGAD COMPENSATO

Doping Profile – Compensated Gain Layer Design



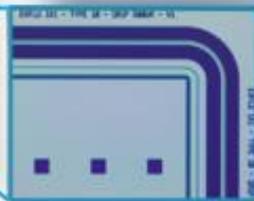
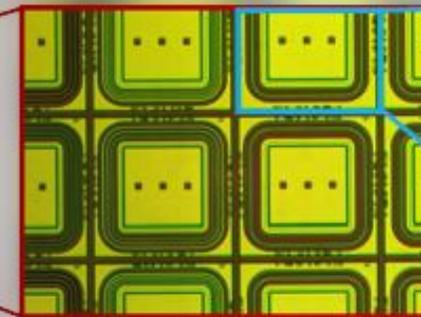
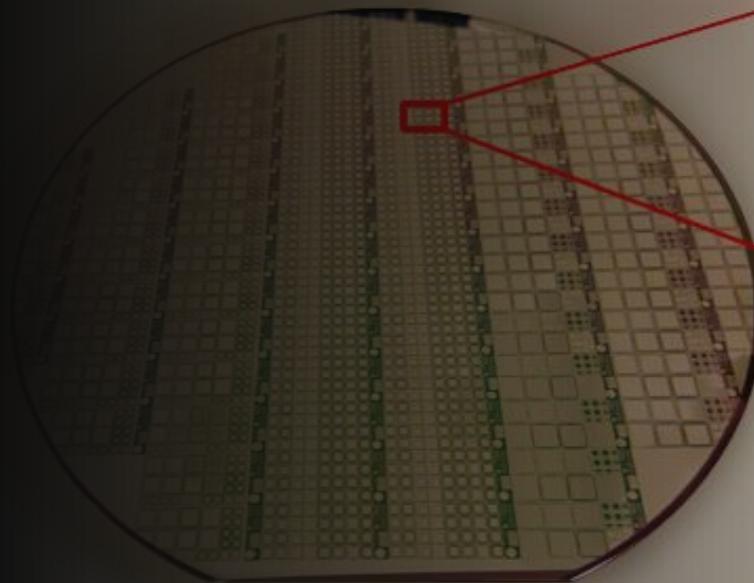
Doping Profile – Compensated Gain Layer Design



Produzione eXFlu1

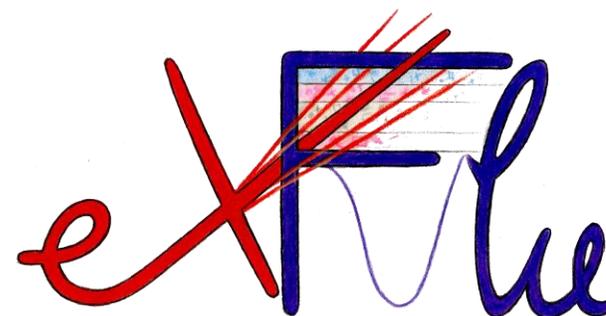


FONDAZIONE
BRUNO KESSLER



Produzione eXFlu1

18 Wafer prodotti in collaborazione con la **Fondazione Bruno Kessler** (FBK) di Trento ottimizzati per le alte fluenze.



8 Wafer «Standard»

Wafer #	Thickness	p+ dose	C dose	C shield	Diffusion
1	45	1.14	1.0		CBL
2	45	1.00		0.6	CBL
3	45	1.16	1.0	0.6	CBL
4	45	1.16	1.0	1.0	CBL
5	30	1.12	1.0		CBL
16	20	0.80	1.0		CHBL
17	20	0.96	1.0		CBL
18	15	0.94	1.0		CBL

} 4 Wafer (45 μm)
→ 1 Wafer (30 μm)
} 3 Wafer Sottili (20-15 μm)

NB: I valori riportati in tabella si riferiscono a valori di riferimento espressi in unità arbitrarie (i valori reali sono coperti da NDA)

Analisi misure su wafer svolte ad FBK

BLOCCO SINISTRO WAFER

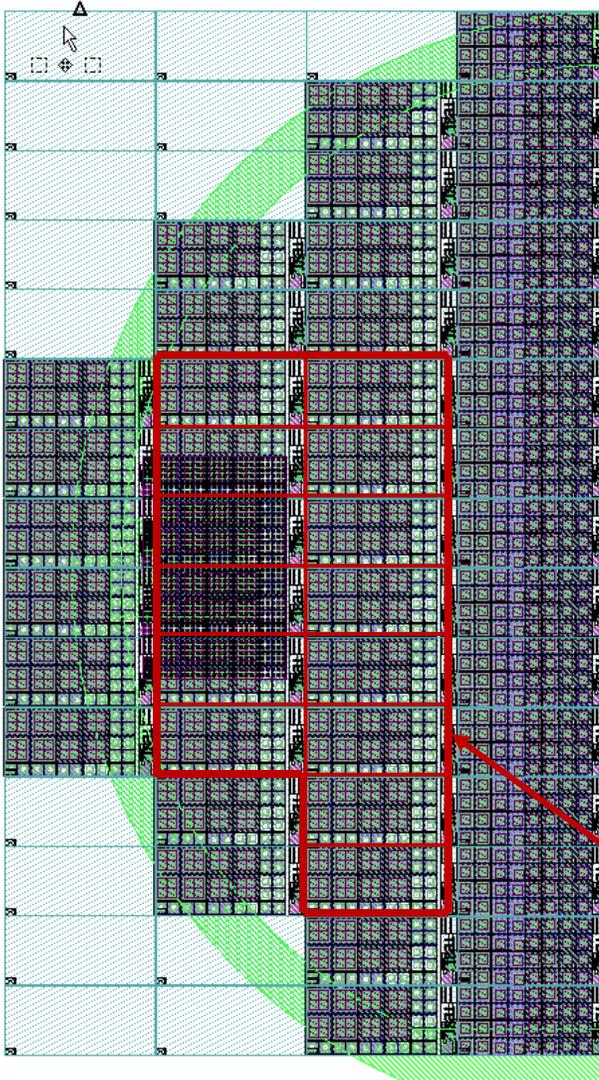


Misure svolte in queste 14 strutture di ogni wafer



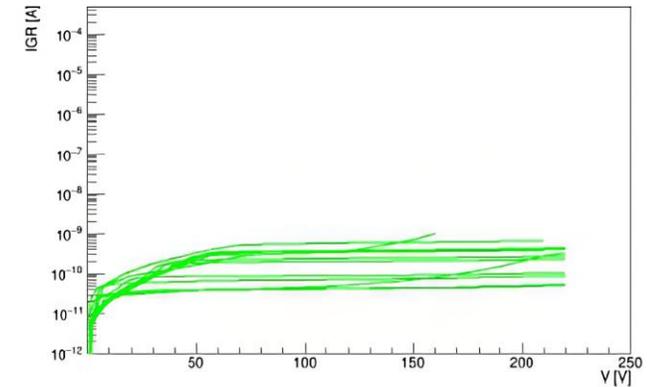
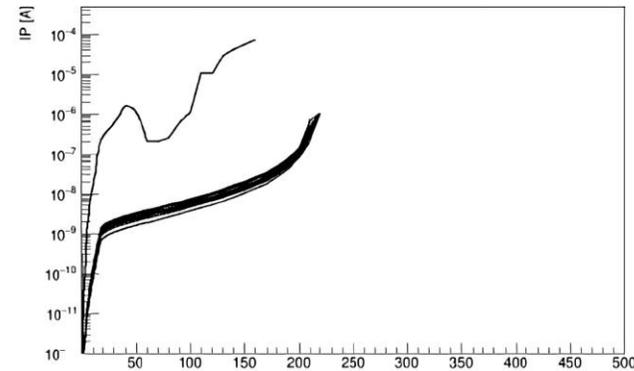
Analisi misure su wafer svolte ad FBK

BLOCCO SINISTRO WAFER

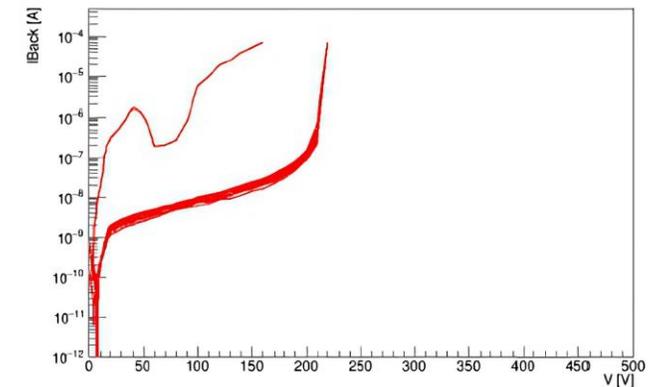


Misure svolte in queste 14 strutture di ogni wafer

WAFER 16 – IV - LGAD

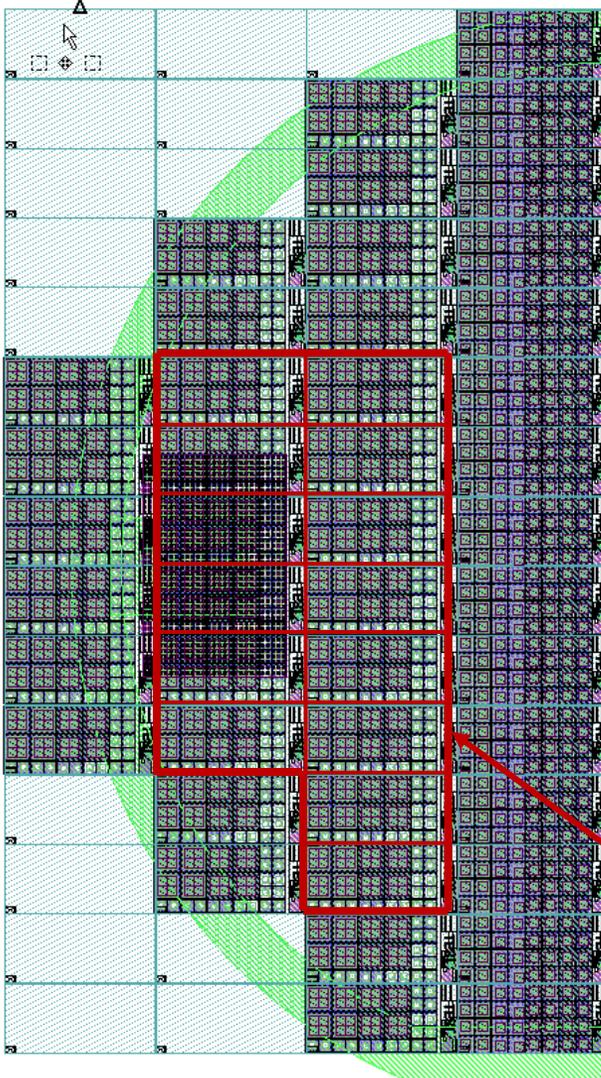


BLACK → I_P
GREEN → I_{GR}
RED → I_{BACK}

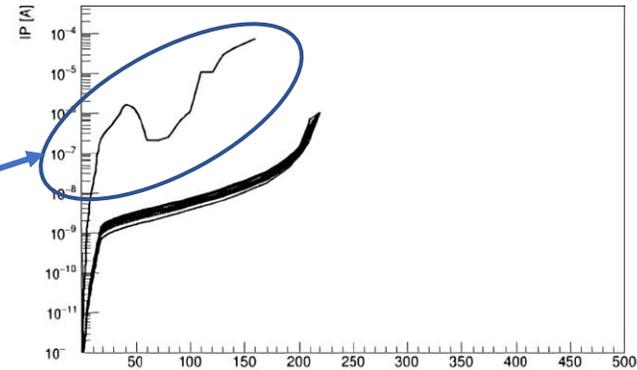


Analisi misure su wafer svolte ad FBK

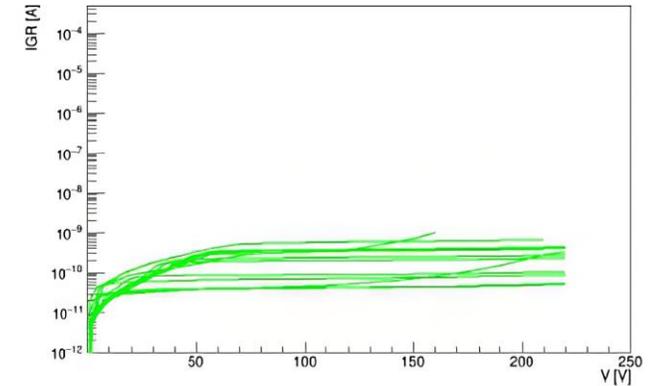
BLOCCO SINISTRO WAFER



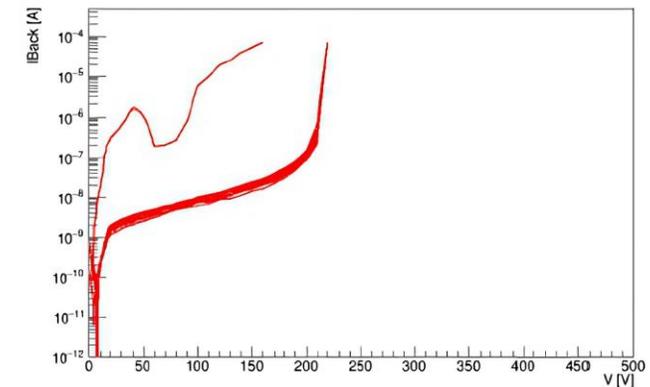
BAD PAD



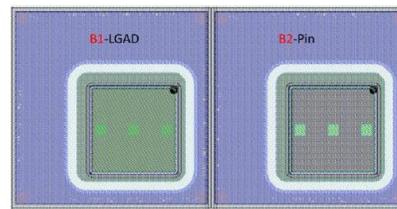
WAFER 16 – IV - LGAD



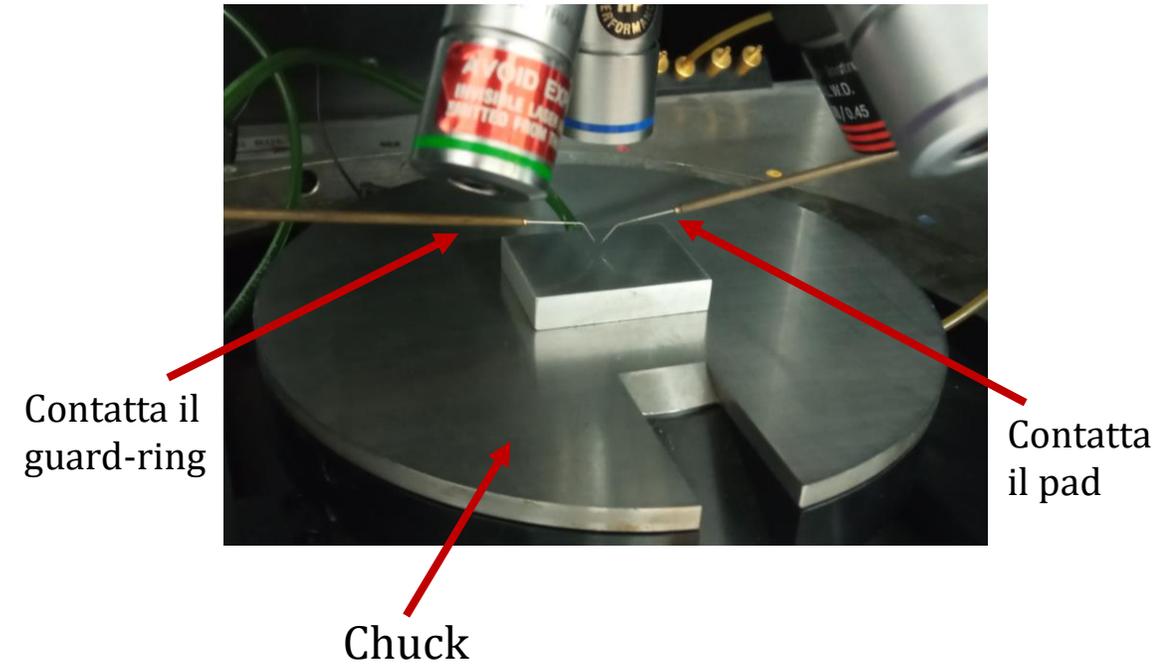
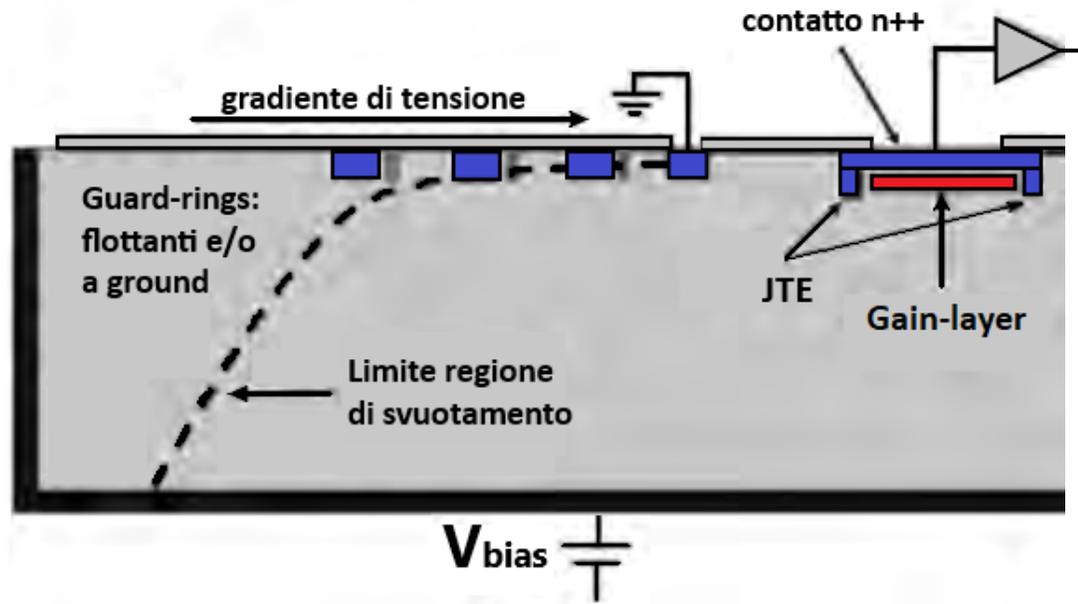
BLACK → I_P
GREEN → I_{GR}
RED → I_{BACK}



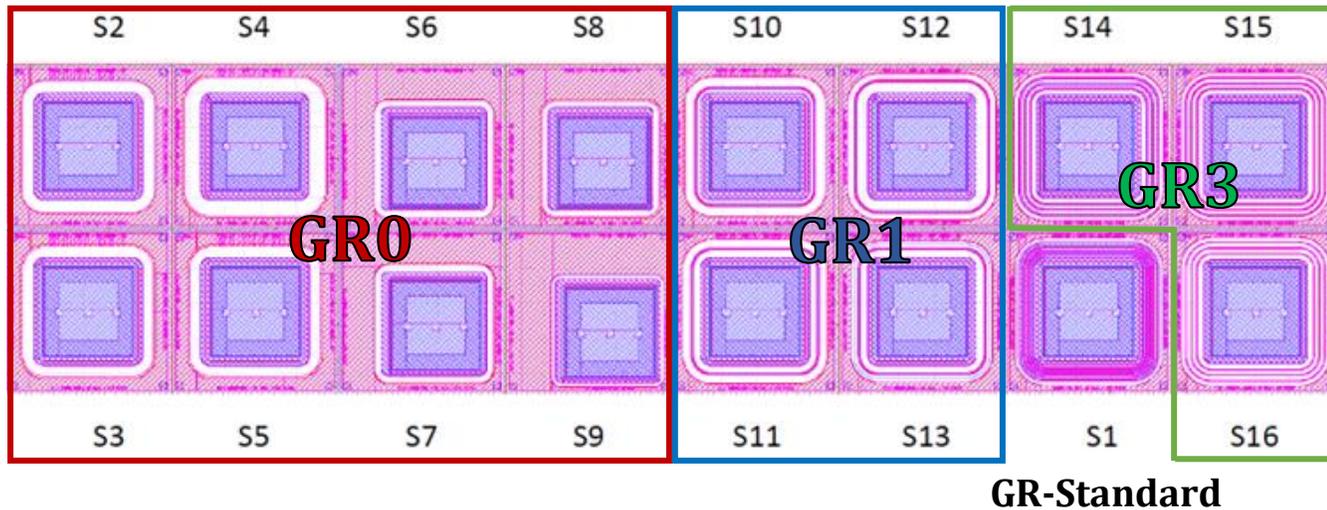
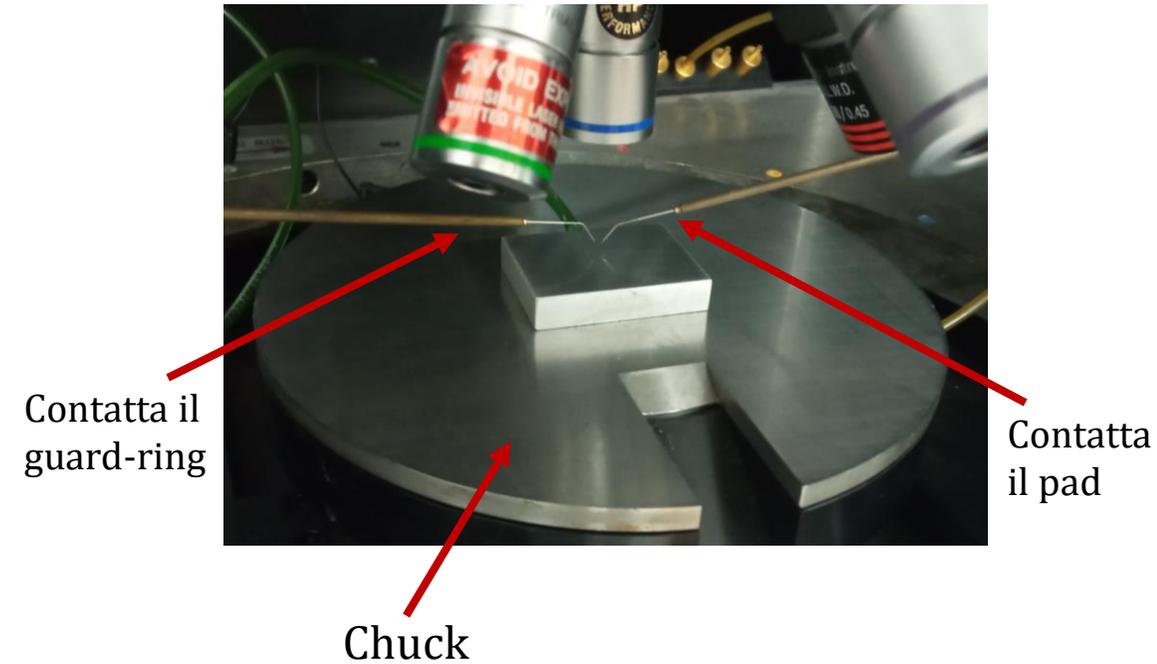
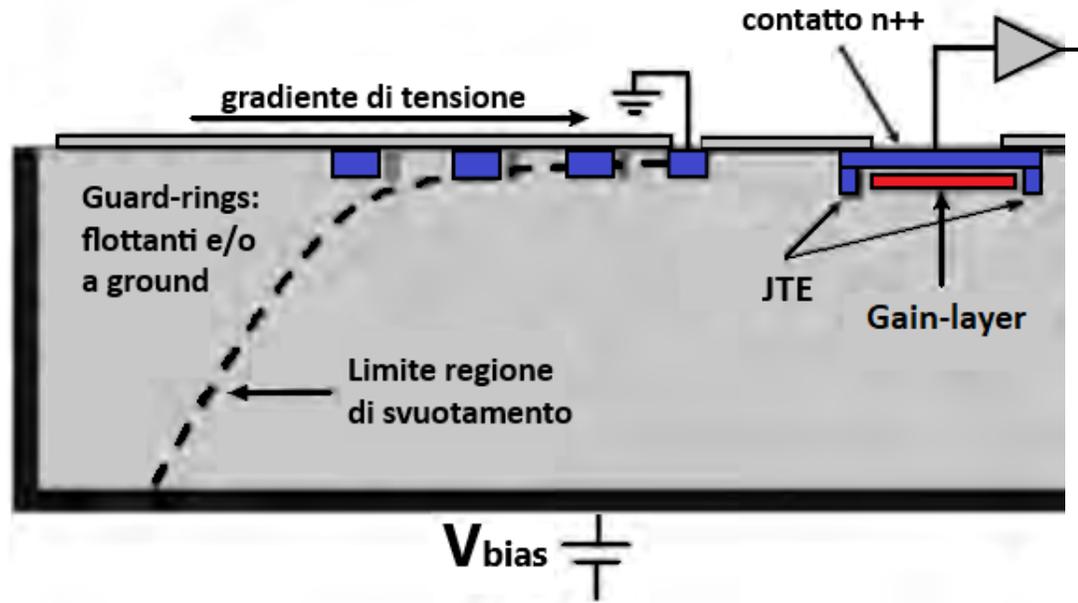
Misure svolte in queste 14 strutture di ogni wafer



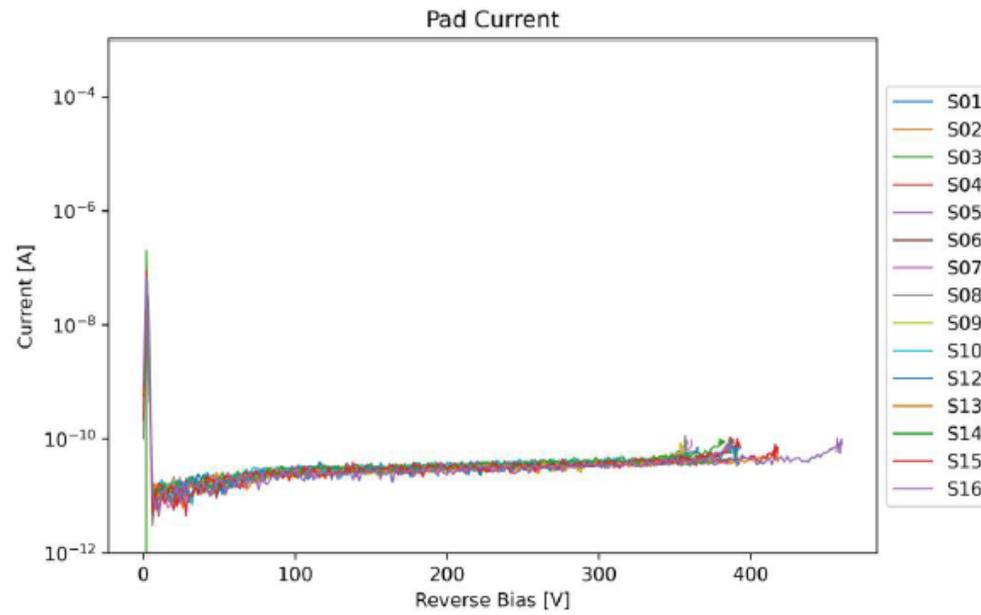
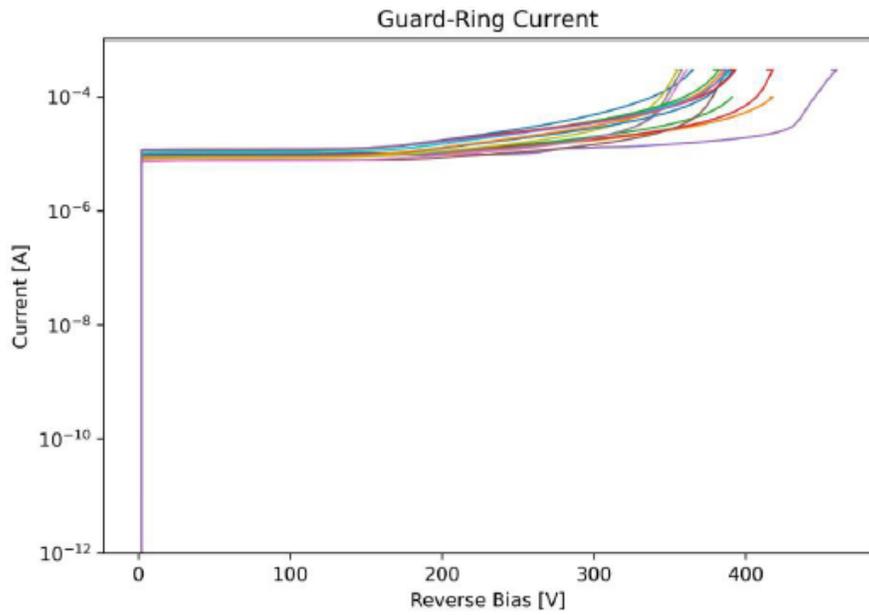
Studio Guard-Ring design



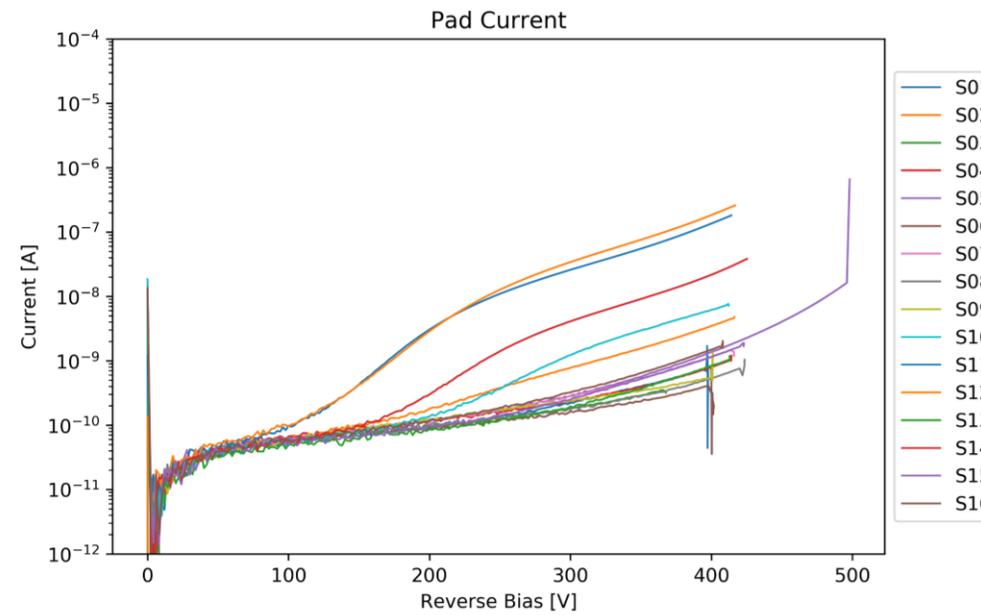
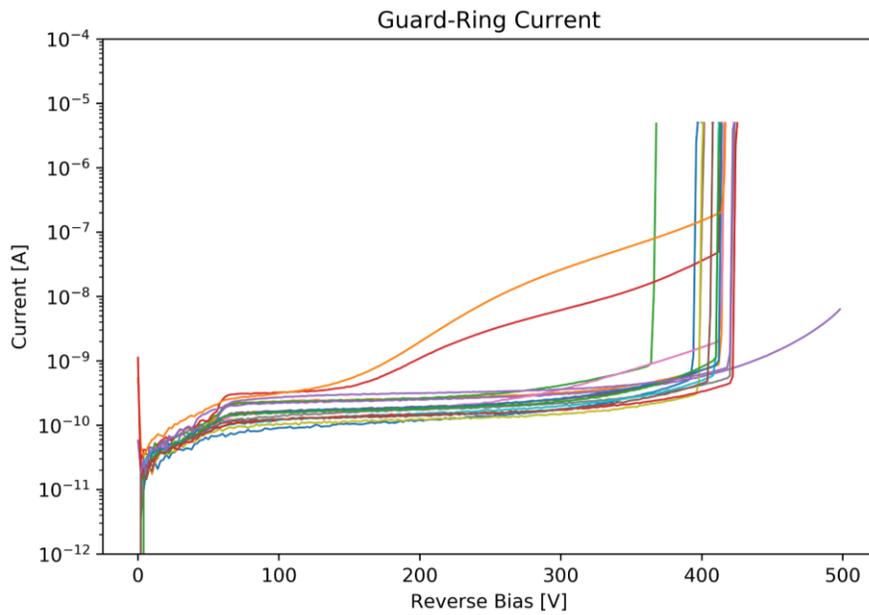
Studio Guard-Ring design



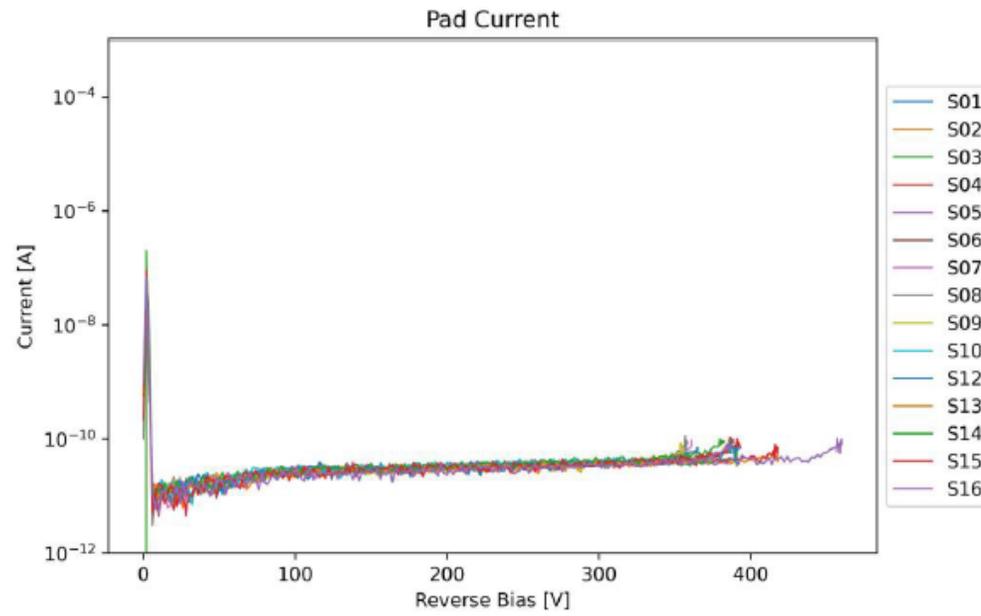
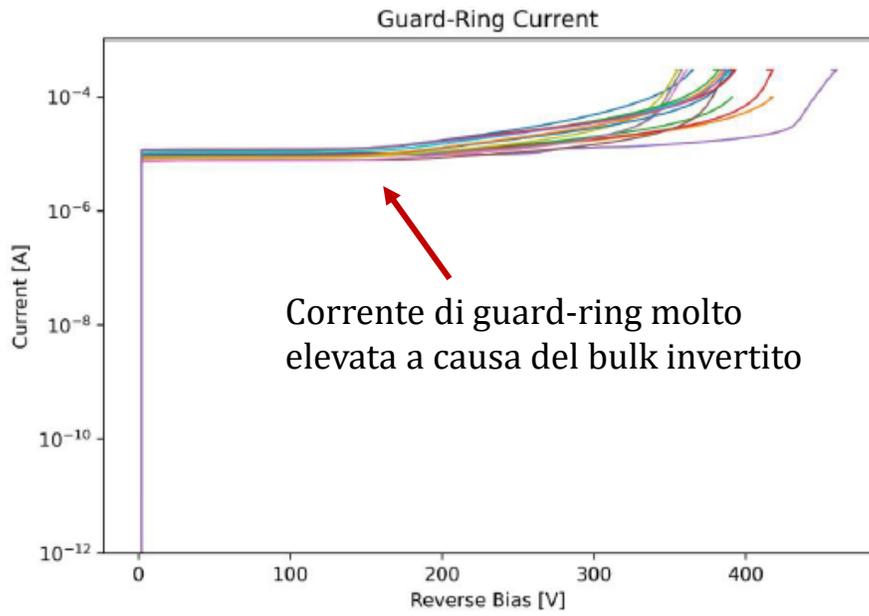
Shot di 16 PiN con differenti guard-ring design **ottimizzati per sensori sottili**



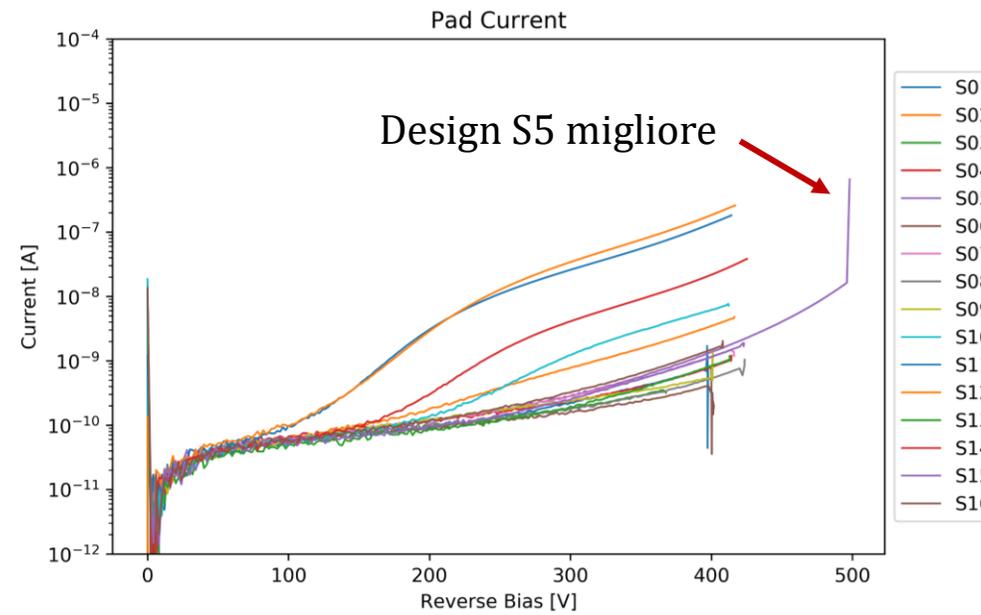
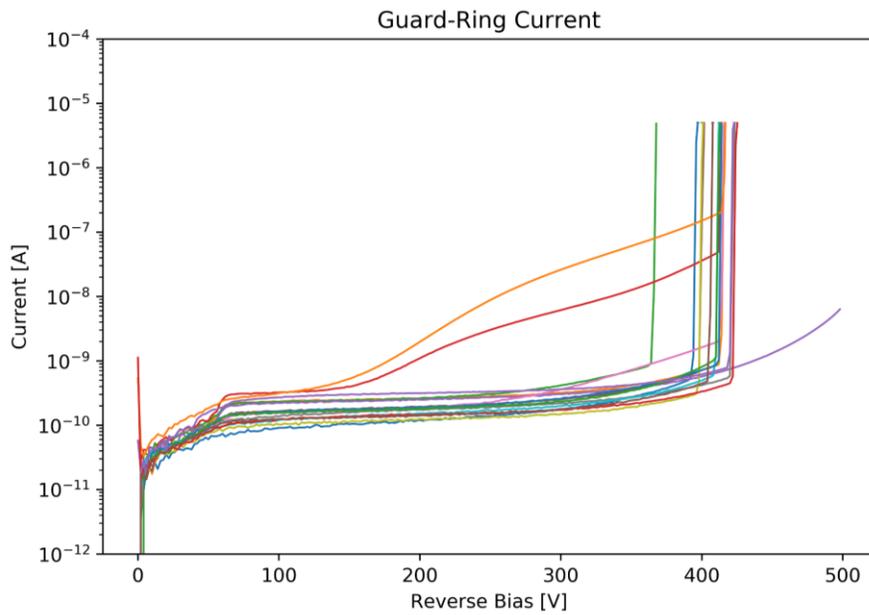
← EXFLU 1 - 45 μm
PiN



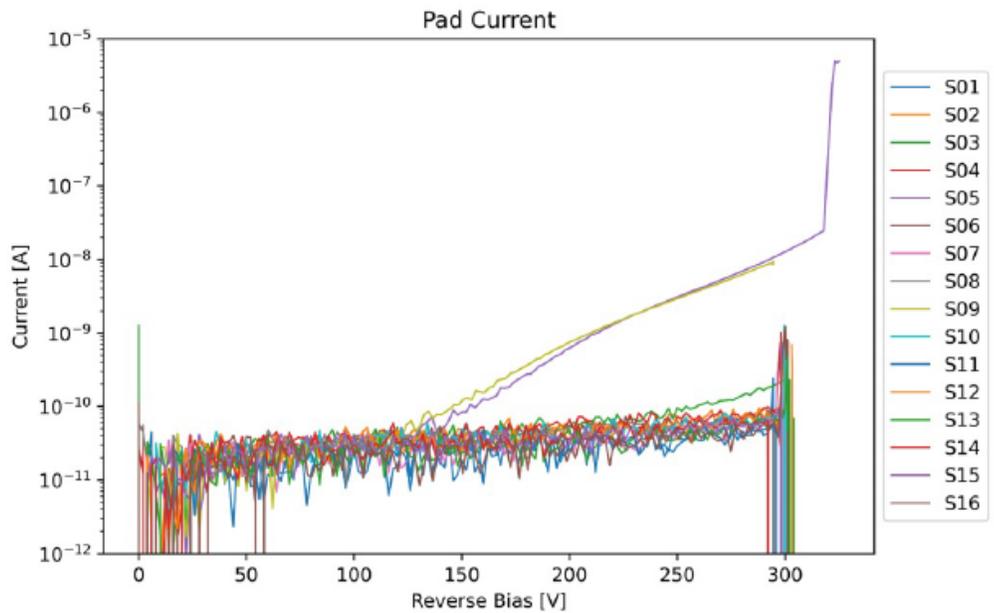
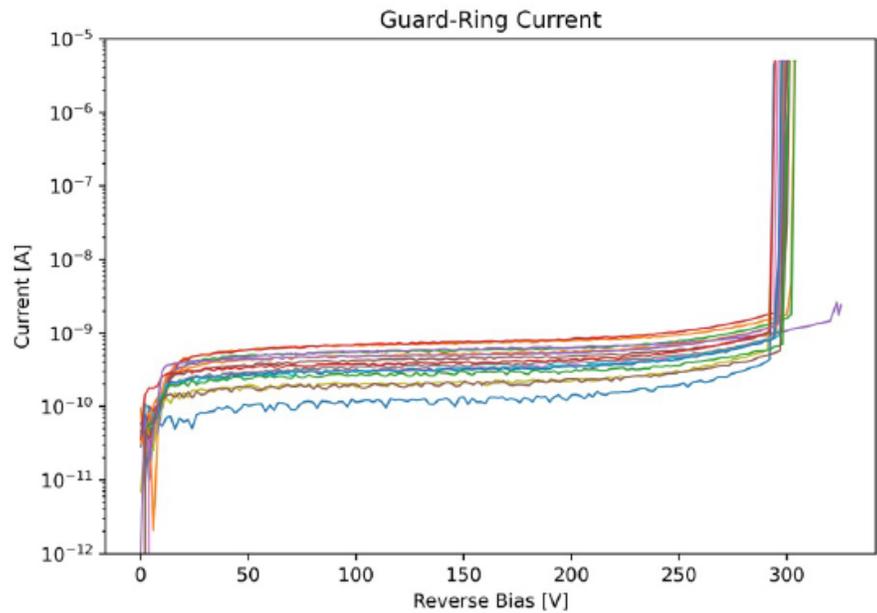
← EXFLU 1 - 30 μm
PiN



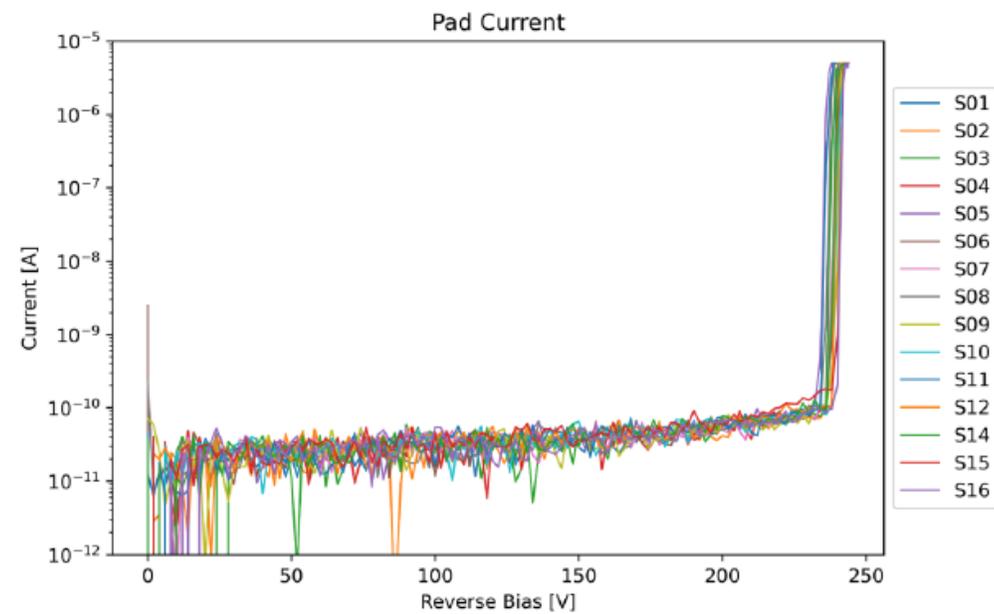
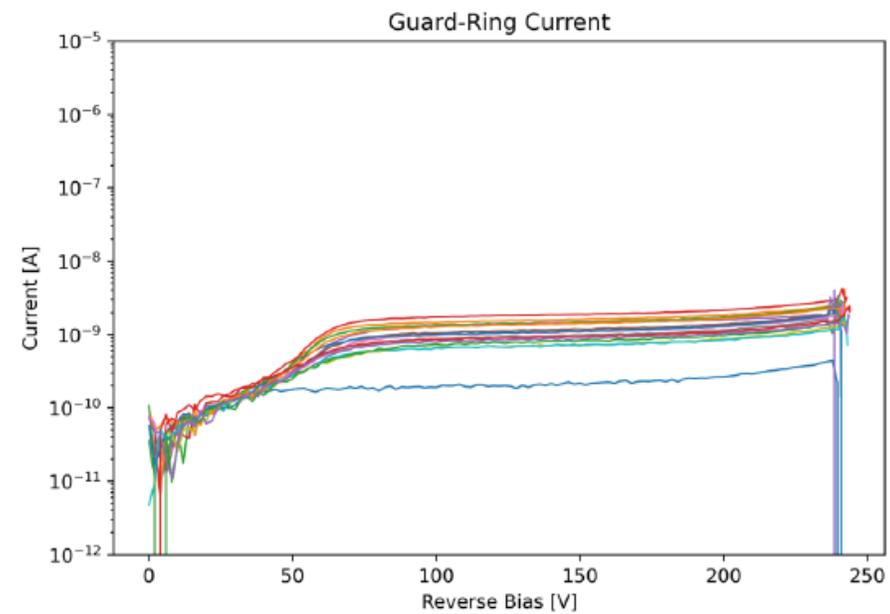
← EXFLU 1 - 45 μm
PiN



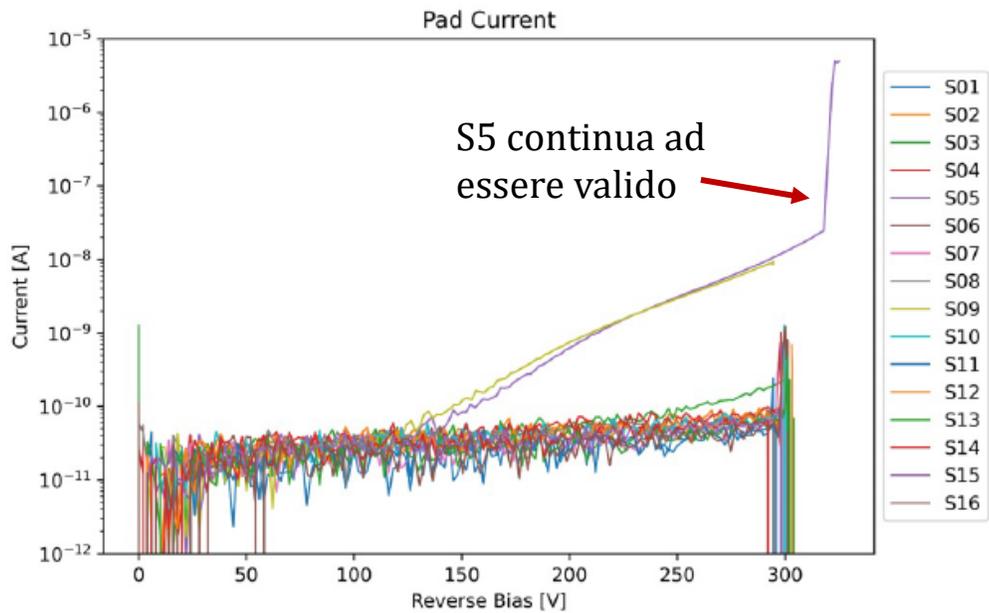
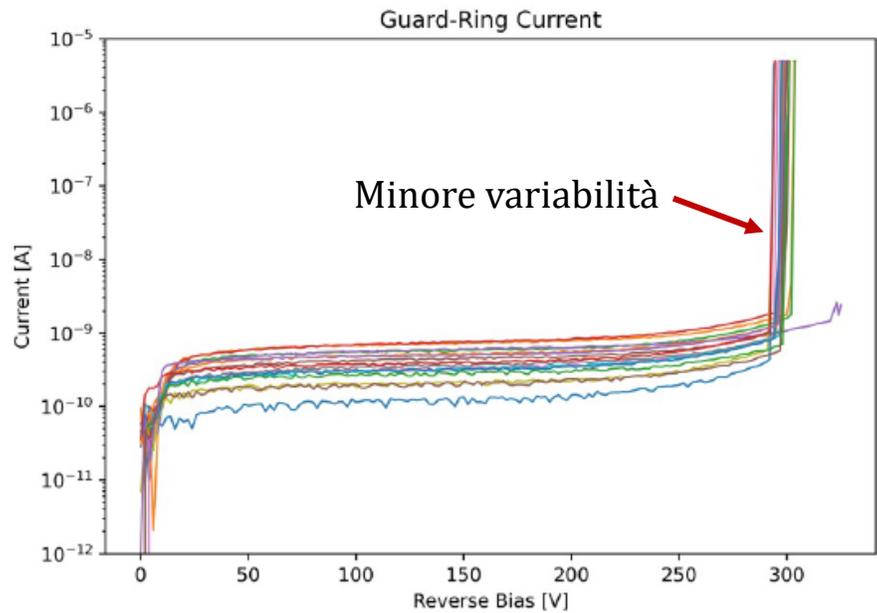
← EXFLU 1 - 30 μm
PiN



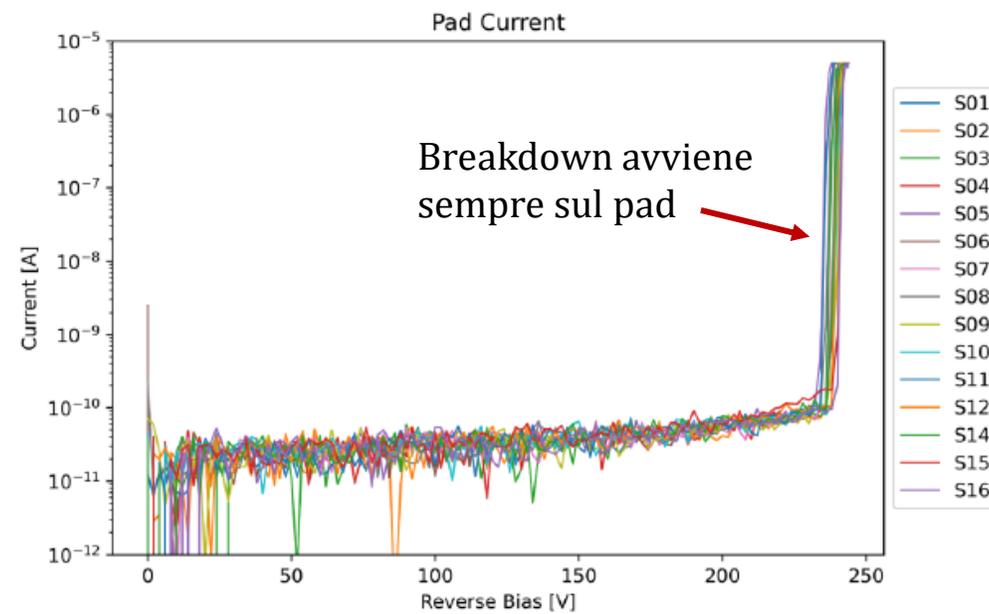
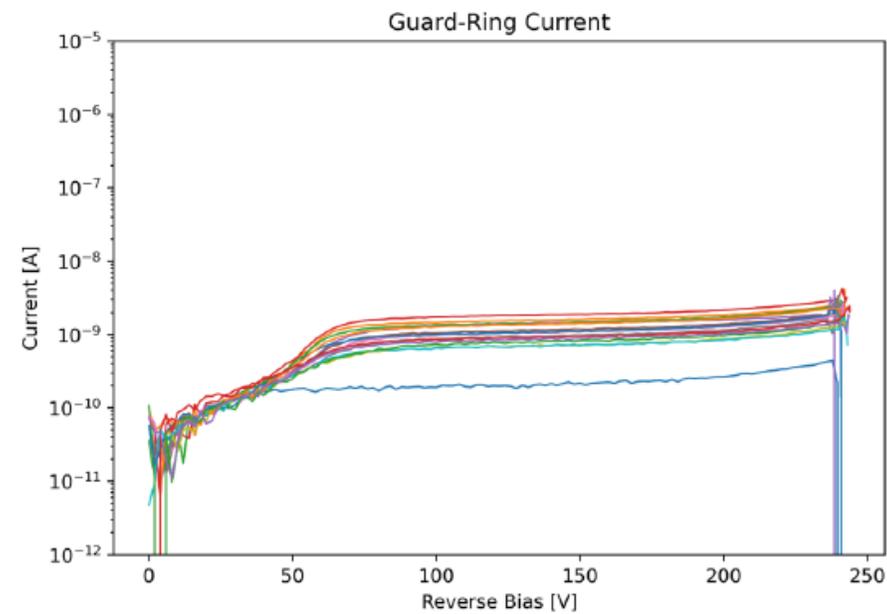
← EXFLU 1 - 20 μm
PiN



← EXFLU 1 - 15 μm
PiN

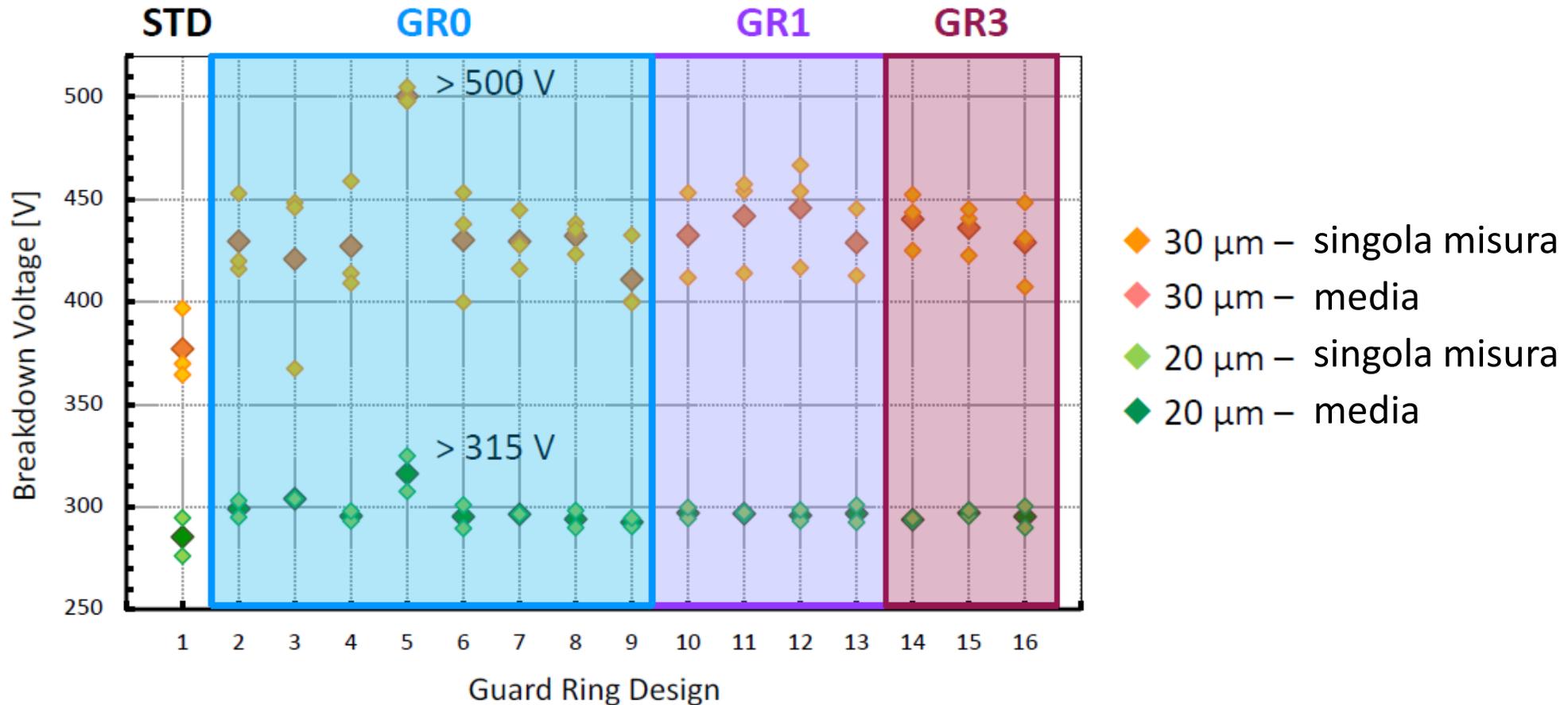


← EXFLU 1 - 20 μm
PiN

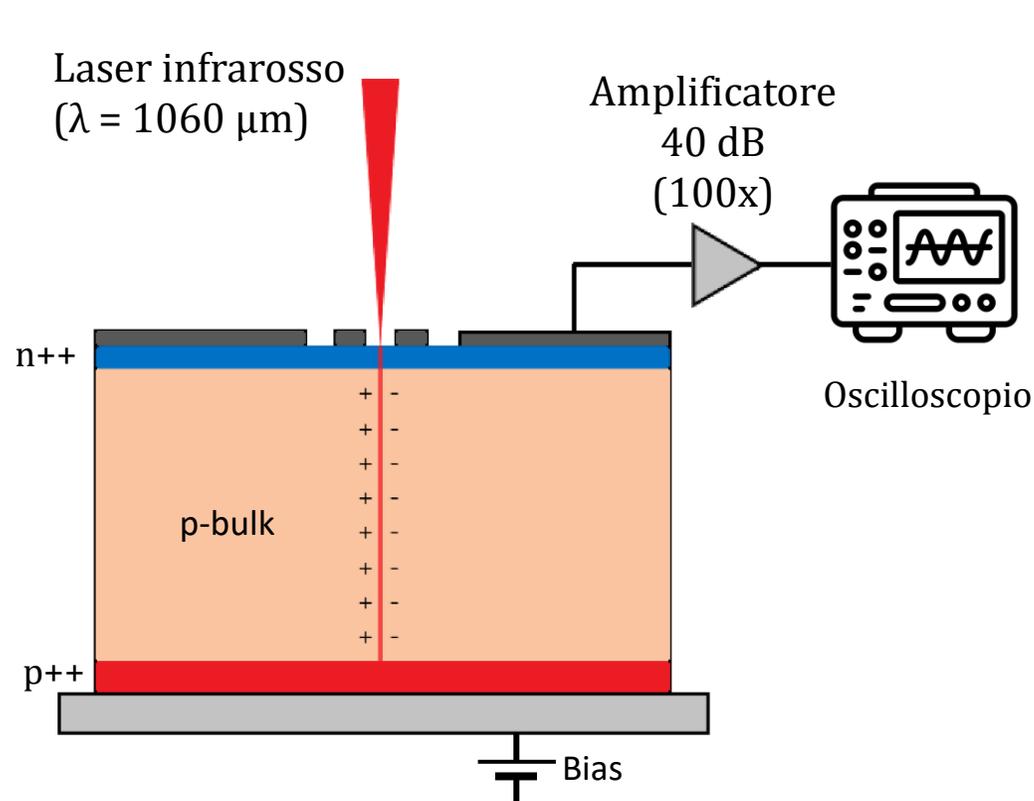


← EXFLU 1 - 15 μm
PiN

Tensione di breakdown vs spessore

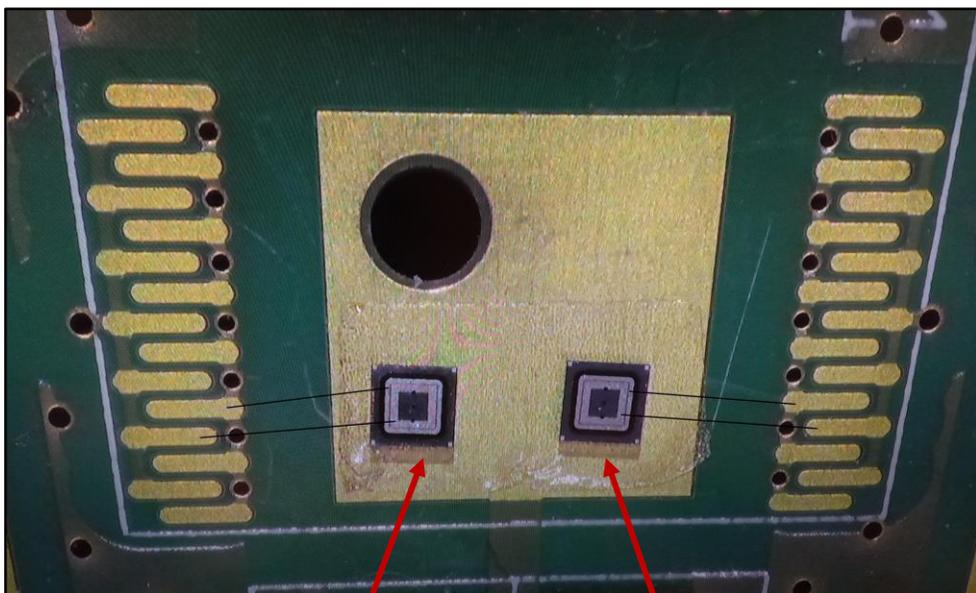


Misure di guadagno alla TCT



Setup TCT

Grazie al laser infrarosso è possibile generare carica all'interno del sensore, misurando poi il segnale prodotto grazie ad un oscilloscopio.



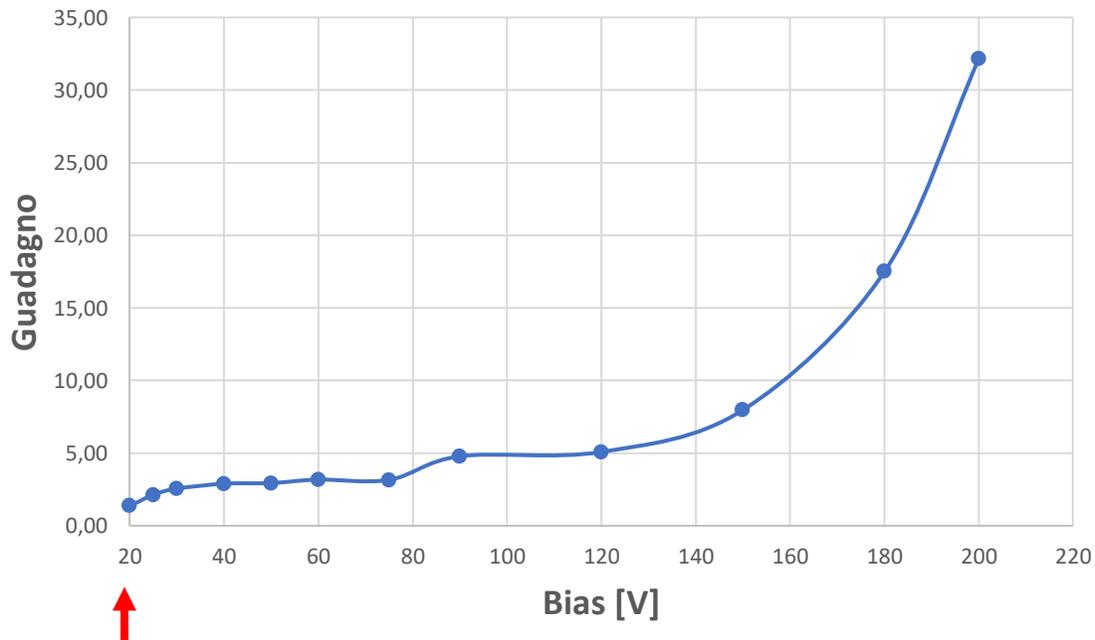
PiN

LGAD

Il guadagno può essere ottenuto dalla formula:

$$G = \frac{Area_{LGAD}}{Area_{PiN}}$$

Guadagno vs Bias



Misura effettuata sul wafer 16 (20 μm) →



Tensione di svuotamento *gain layer* ~20 V

Conclusioni

Analisi dati misure su wafer

- Plot dei dati forniti da FBK

Studio guard-ring design

- Non effettuabile prima del taglio del wafer
- Individuazione del design ottimale
- Studio del breakdown in funzione dello spessore

Misure di guadagno alla TCT

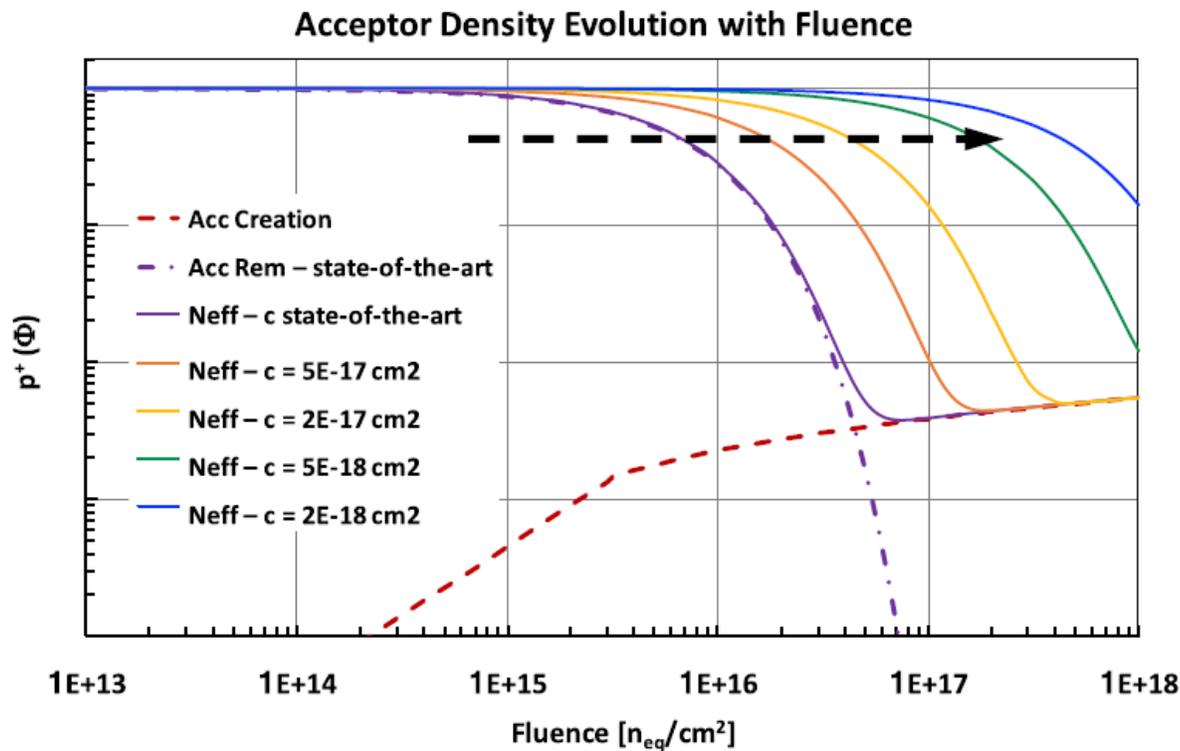
- Sensori sottili presentano un andamento del guadagno tipico degli LGAD convenzionali

Grazie per l'attenzione

Backup

Evoluzione densità doping

$$N_{eff}(\phi_{eq}) = N_D(0) \cdot e^{-C_D \phi_{eq}} - N_A(0) \cdot e^{-C_A \phi_{eq}} - g_{eff} \cdot \phi_{eq}$$



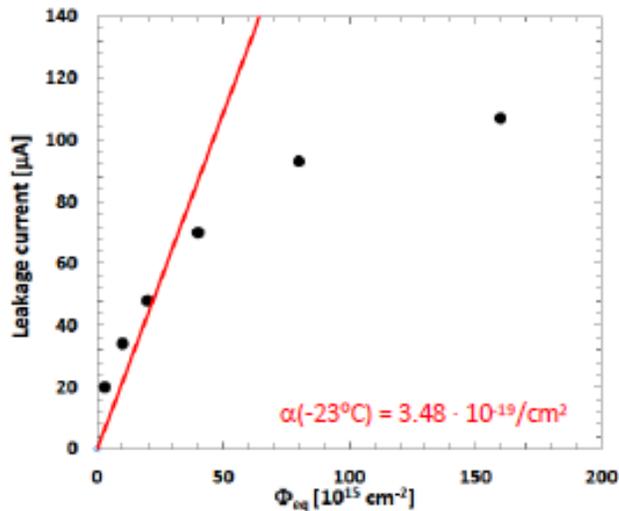
Donor/Acceptor Removal

Acceptor Creation

↓
Predominante
nel *gain layer*

↓
Predominante
nel *bulk*

Per fluenze superiori a $5 \cdot 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ si assiste ad una saturazione degli effetti dovuti alla radiazione

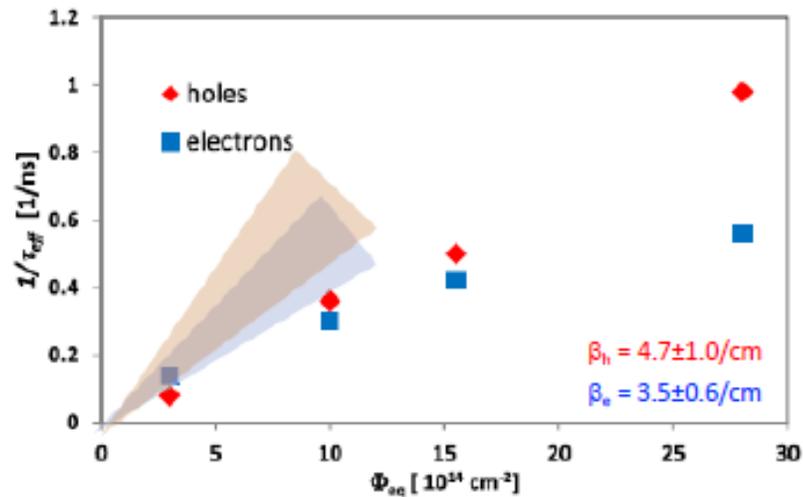


[G. Kramerberger et al.,
doi:10.1088/1748-0221/8/08/P08004]

Leakage current saturation

$$I = \alpha V \Phi$$

α from linear to logarithmic

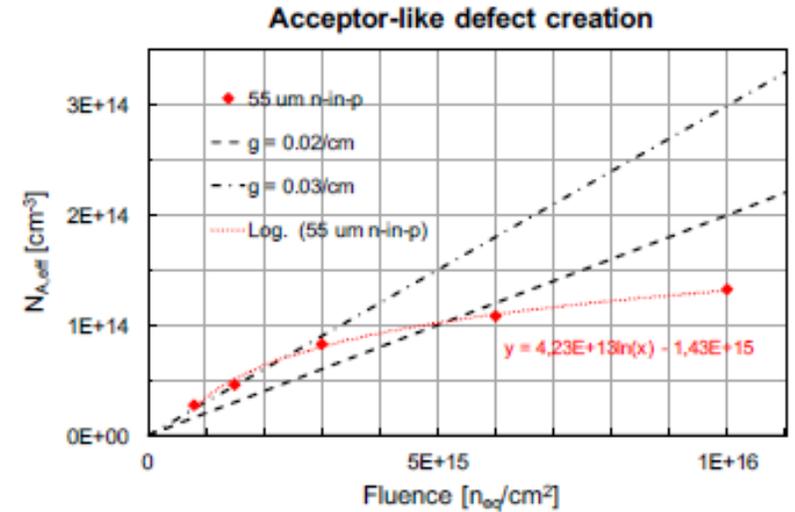


[G. Kramerberger et al.,
doi:10.1016/j.nima.2018.08.034]

Trapping probability saturation

$$1/\tau_{\text{eff}} = \beta \Phi$$

β from linear to logarithmic



[M. Ferrero et al.,
34th RD50 Workshop, Lancaster, UK]

Acceptor creation saturation

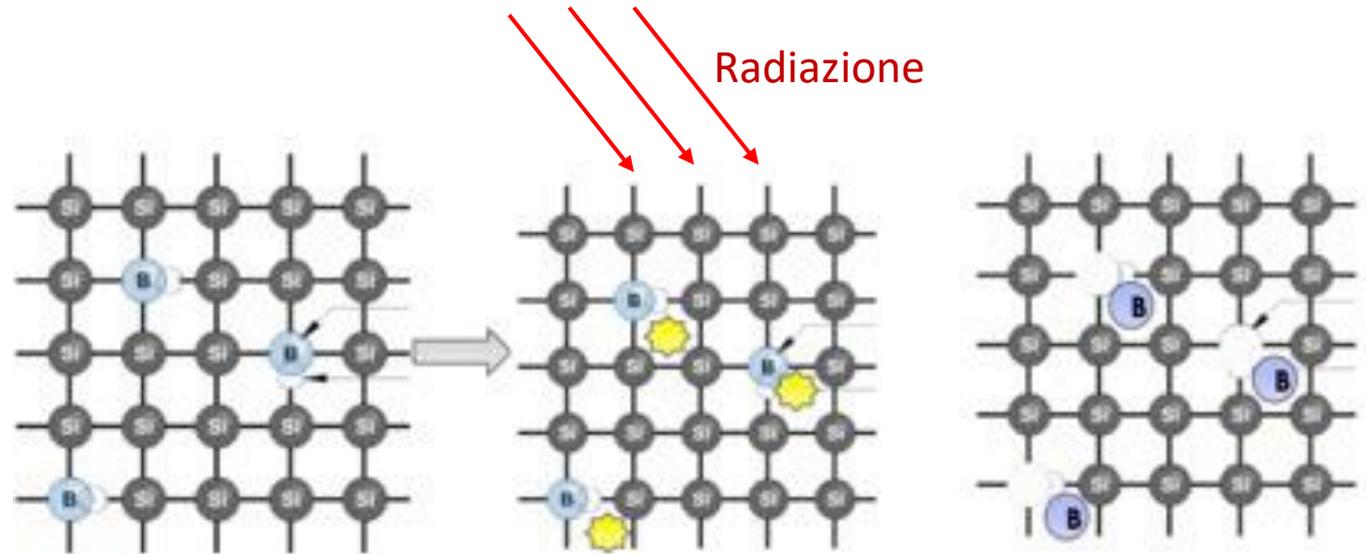
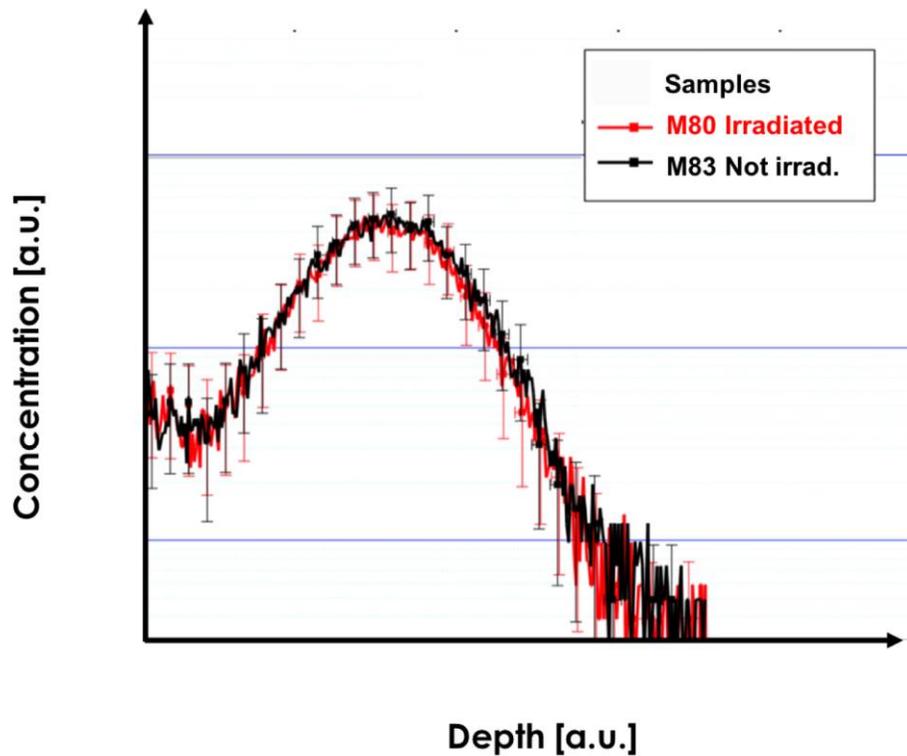
$$N_{A,\text{eff}} = g_c \Phi$$

g_c from linear to logarithmic

Sensori al silicio irraggiati con fluenze di $10^{16} - 10^{17} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ non si comportano come atteso, **ma meglio!**

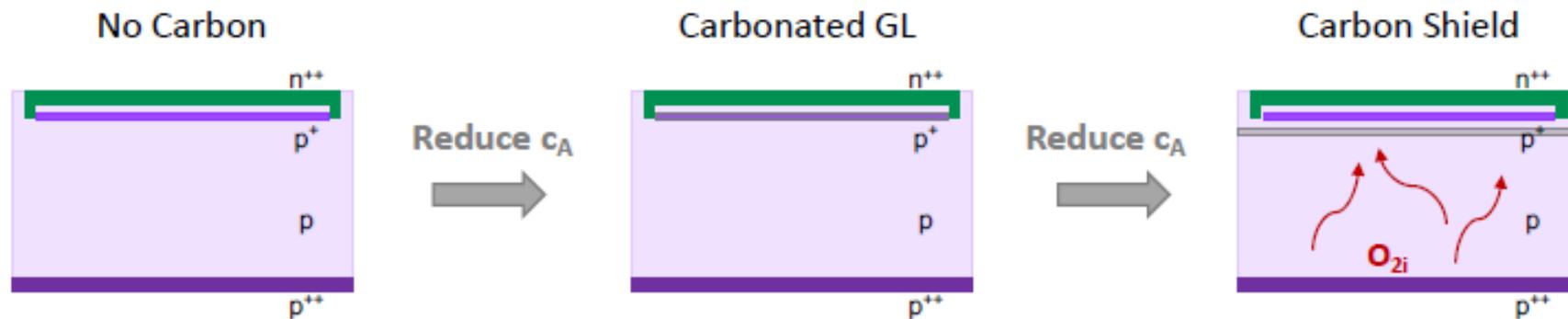
Disattivazione atomi accettori

→ Si parla di **disattivazione** in quanto non vi è una vera e propria riduzione del drogaggio.



Uno «Scudo in Carbonio» (Carbon Shield) per migliorare ulteriormente C_A

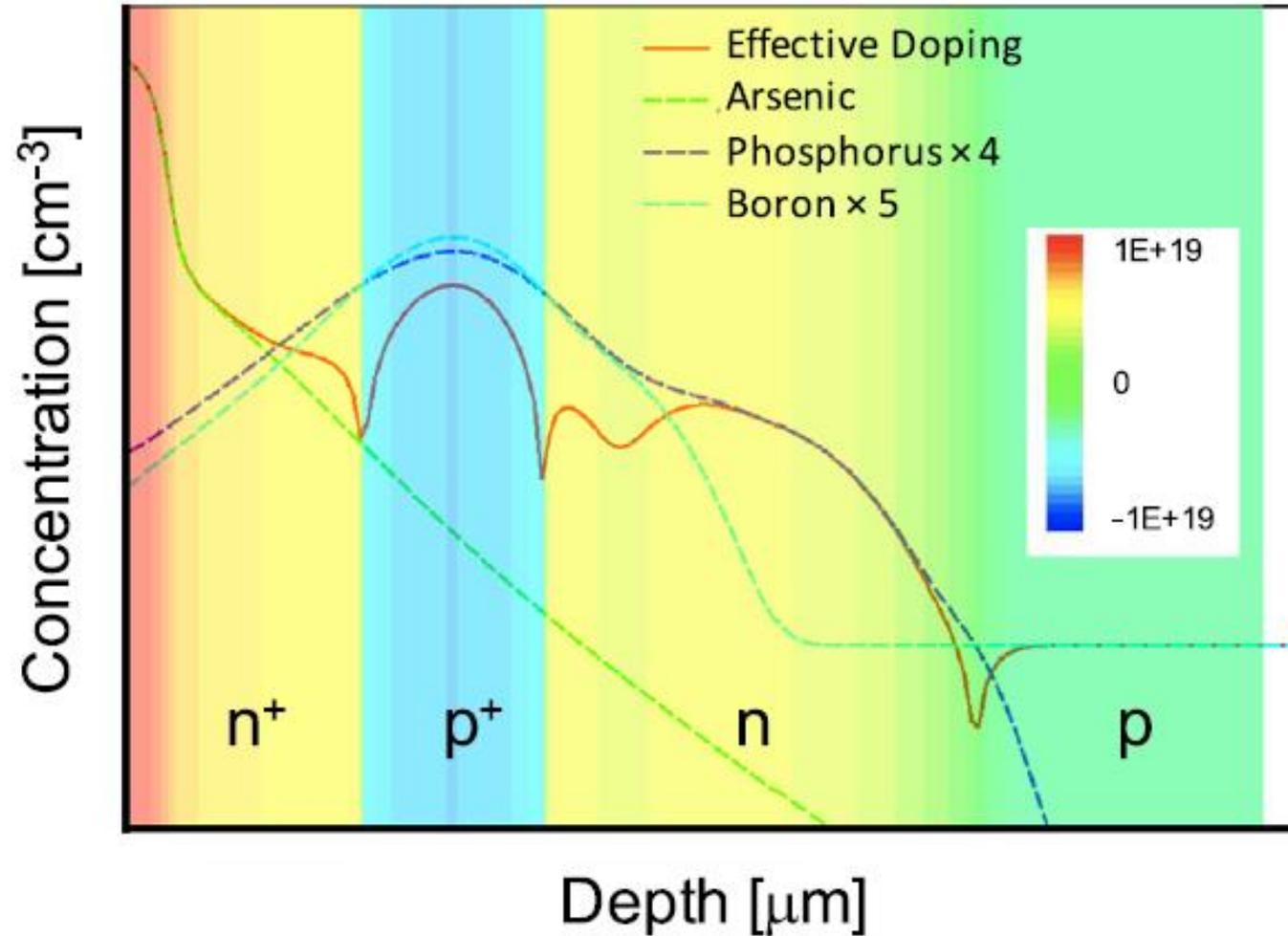
→ Un **carbon shield** viene impiantato al di sotto del *gain layer* per proteggerlo dalla diffusione di difetti presenti nella regione del bulk e wafer di supporto (ad es. O_{2i})



→ Il **carbon shield** può ulteriormente ridurre il coefficiente C_A , estendendo l'operatività dell'LGAD a più alte fluenze.

Profilo di doping sensore compensato

Doping Profiles from Process Simulation



Fluenze attese nel Future Circular Collider (FCC)

