

UNIVERSITÀ  
DI TORINO



# Caratterizzazione di rivelatori Ultra Fast al silicio con strato resistivo



---

RELATORE:  
PROF. RICCARDO BELLAN  
CORELATORE:  
DOTT. MARCO FERRERO

---

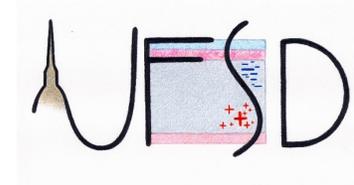
CANDIDATO:  
AURORA LOSANA  
MATRICOLA #920006

# Sommario

---

- I. Introduzione e Obiettivi**
- II. DC RSD-0**
  - Struttura del sensore
  - Analisi
  - Risultati
- III. DC RSD-eXFlu**
  - Struttura del sensore
  - Analisi
  - Risultati
- IV. Conclusioni**

Ho lavorato nel **Laboratorio di Rivelatori Innovativi al Silicio**, collaborando con il gruppo di ricerca Ultra Fast Silicon Detectors (UFSD).



## La mia tesi verte sulla caratterizzazione elettrica dei PRIMI PROTOTIPI dei sensori al silicio resistivi in corrente diretta.

In particolare l'analisi è stata fatta su due lotti di sensori prodotti dalla fondazione Bruno Kessler (FBK).

### Obiettivi

- Vedere l'effettivo funzionamento dei sensori e studiarne gli intervalli di operatività.
- Studiare la variazione del segnale in diverse regioni del sensore attraverso mappe bidimensionali della superficie del sensore.

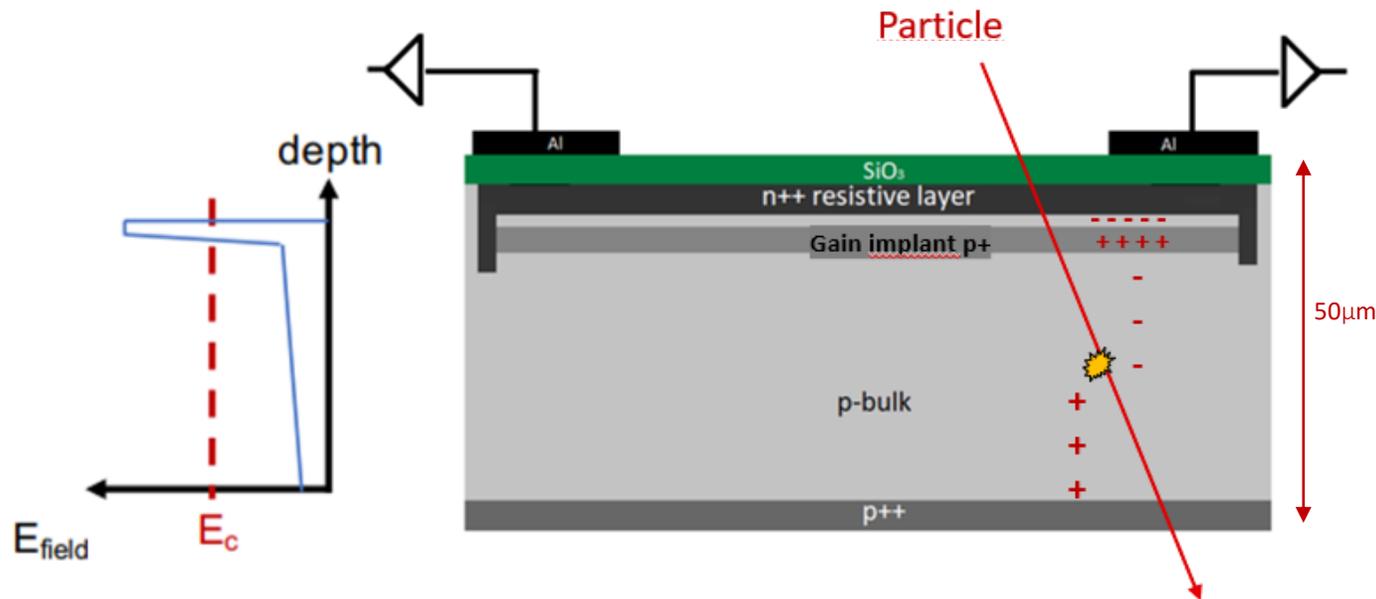


# RIVELATORI ULTRA FAST CON STRATO RESISTIVO

Sono sensori al silicio con guadagno intrinseco e lettura resistiva (RSD) per il tracciamento spaziale e temporale di particelle cariche.

# RIVELATORI ULTRA FAST CON STRATO RESISTIVO

Sono **sensori al silicio con guadagno intrinseco** e lettura resistiva (RSD) per il tracciamento spaziale e temporale di particelle cariche.



I sensori sono **molto sottili**, hanno **spessore di  $50\mu\text{m}$**  quindi necessitano di un'ulteriore struttura interna.

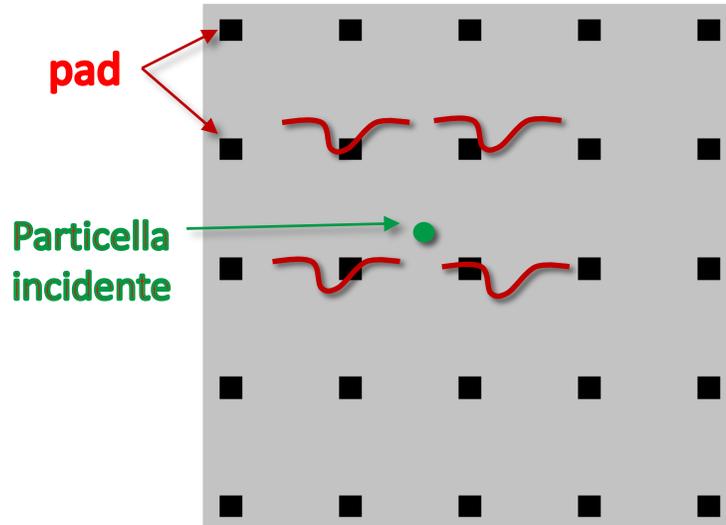
Una particella elementare in  $50\mu\text{m}$  di silicio genera  $0.5 \text{ fC}$ .

$1 \text{ fC}$  per il tracciamento  
 $5 \text{ fC}$  per misure di tempo precise  
 (risoluzione temporale  $30\text{ps}$ )

Questa tipologia di sensori sono chiamati Low-Gain Avalanche Detectors (LGAD).  
 I sensori senza impianto di guadagno sono chiamati PIN.

# RIVELATORI ULTRA FAST CON STRATO RESISTIVO

Sono sensori al silicio con guadagno intrinseco e **lettura resistiva (RSD)** per il tracciamento spaziale e temporale di particelle cariche.



Questa tipologia di rivelatori ha un metodo di **analisi del segnale** che avviene attraverso lo studio della **differenza temporale e di intensità del segnale rilevata dai singoli pad**.

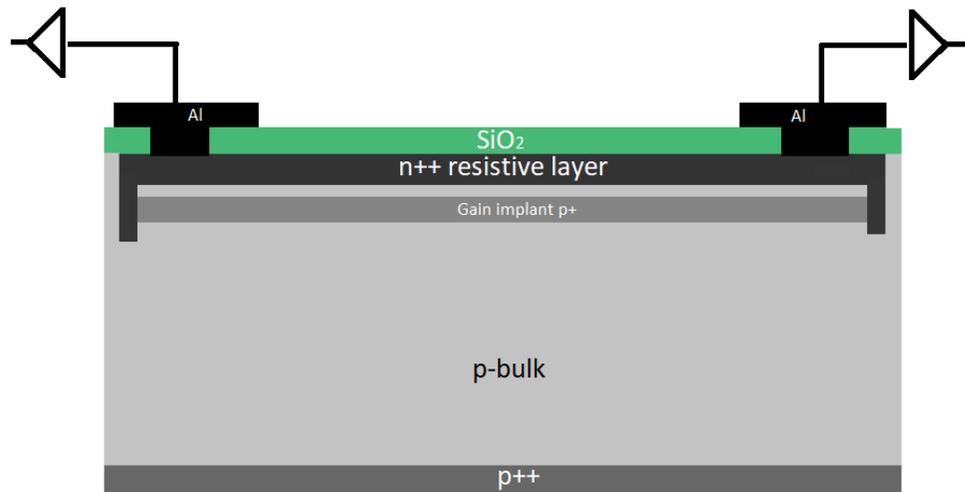
**Il segnale** generato dalla particella incidente si **divide** e si **propaga nello strato resistivo** arrivando agli elettrodi di lettura limitrofi.

E' possibile ricostruire la posizione d'impatto utilizzando il metodo del centroide , dove la posizione di ciascun pad è pesata sull'ampiezza del segnale visto da quel pad.

# RIVELATORI RESISTIVI A LETTURA DIRETTA

Gli ultimi sviluppi del gruppo UFSD si sono focalizzati sui **rivelatori resistivi a lettura diretta**.

In particolare, essendo i **primi prototipi**, i sensori con questa tipologia di lettura non erano mai stati realizzati. Ho quindi avuto il privilegio di vedere i **primi segnali in corrente diretta** dati da un rivelatore al silicio resistivo.

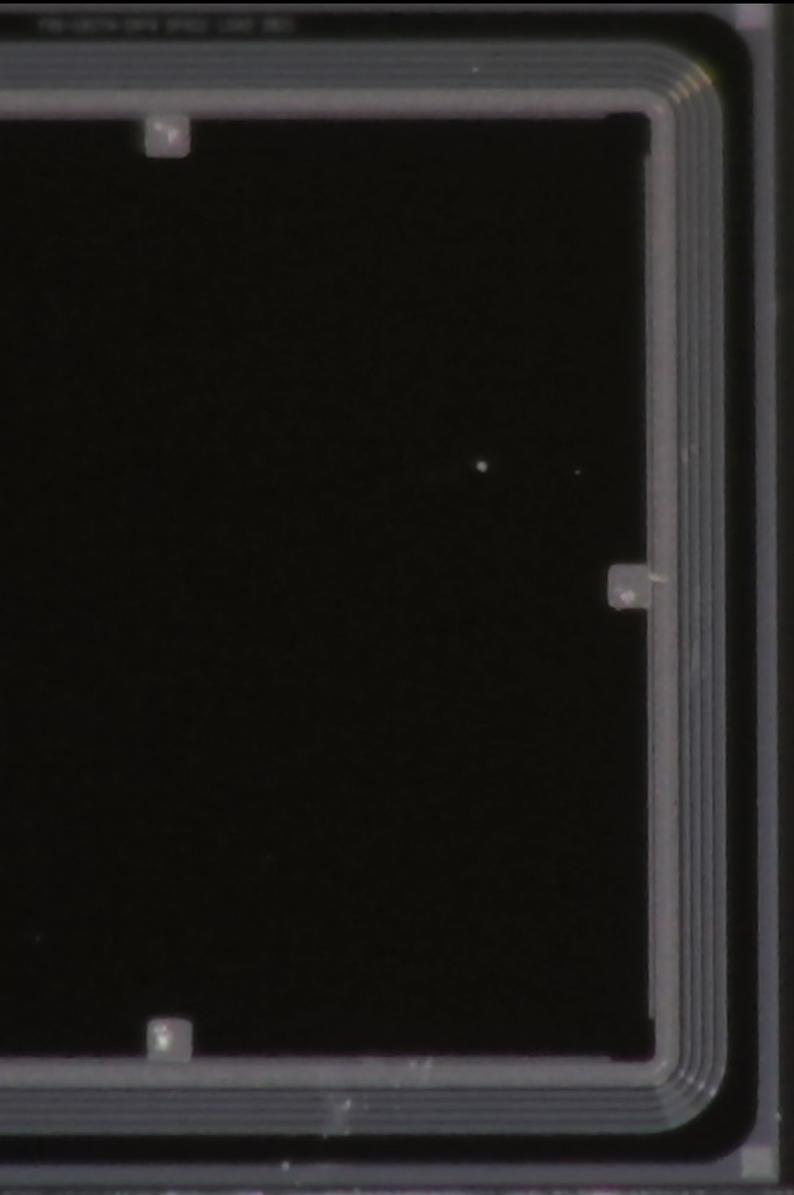


Il metallo dell'elettrodo di lettura è a diretto contatto con il silicio drogato n++.

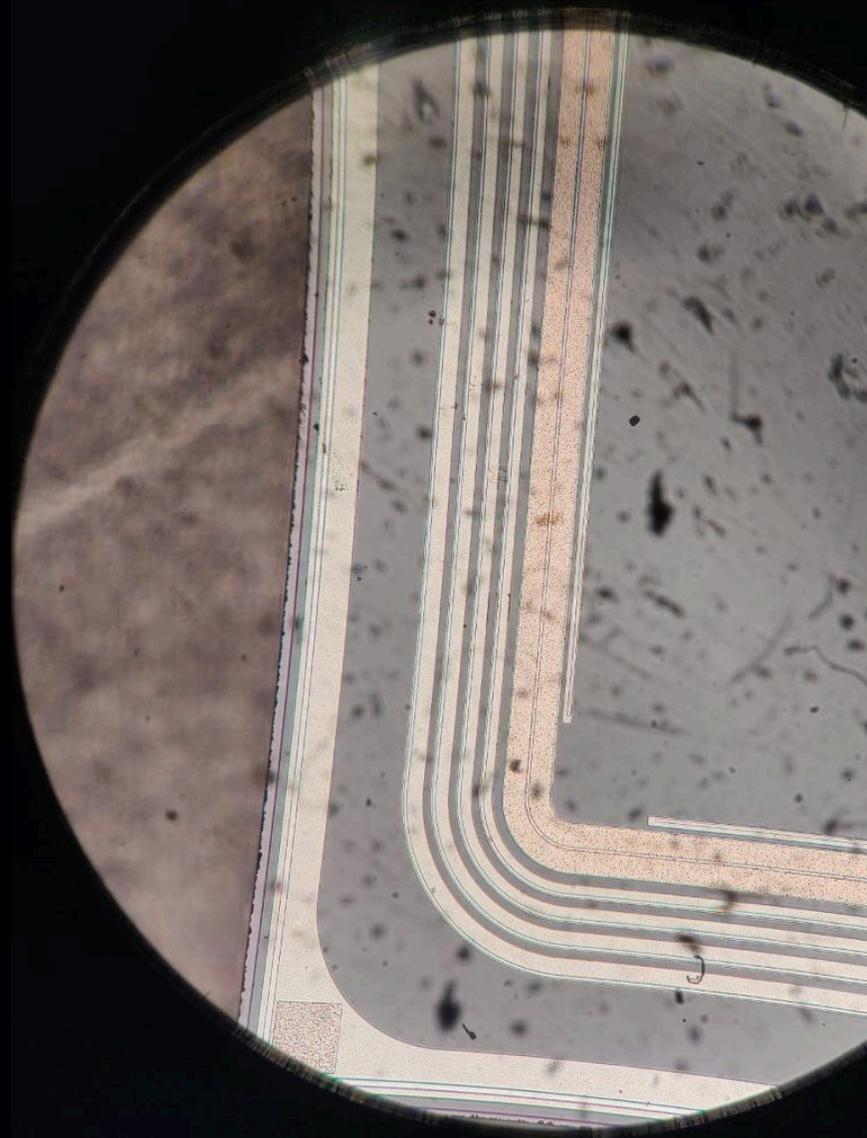
Effettivo passaggio di carica del segnale.

Minori fluttuazioni base-line.

Facilitazione nella lettura del segnale.



DC-RSD 0

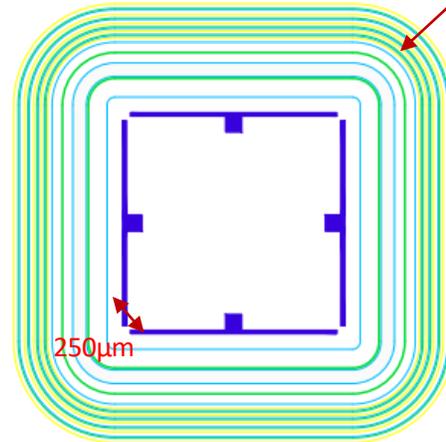
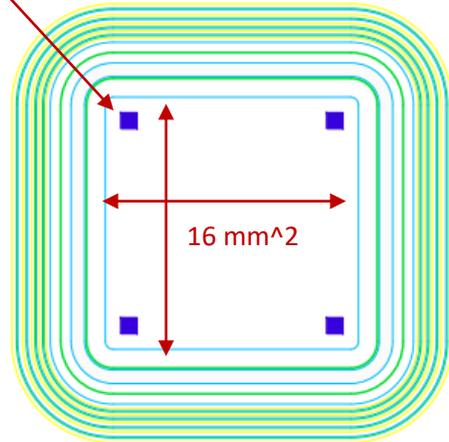


Nell'ottica dello studio della suddivisione del segnale nei singoli pad la **forma e la posizione degli elettrodi di lettura assume un'importante rilevante.**

Due layout con elettrodi di lettura di posizioni differenti.

Rivelatori sia LGAD (con impianto di guadagno) sia PIN (senza impianto di guadagno)

Pad:  $100 \mu\text{m}^2$



**Guard ring**

Proteggono il dispositivo dalla corrente di bordo e permettono di lavorare a tensioni molto alte



Ho analizzato due sensori per ogni tipologia per un totale di **8 sensori** (4 LGAD di cui 2 primo layout e 2 secondo e 4 PIN anch'esso con entrambi i layout)

# Probe station

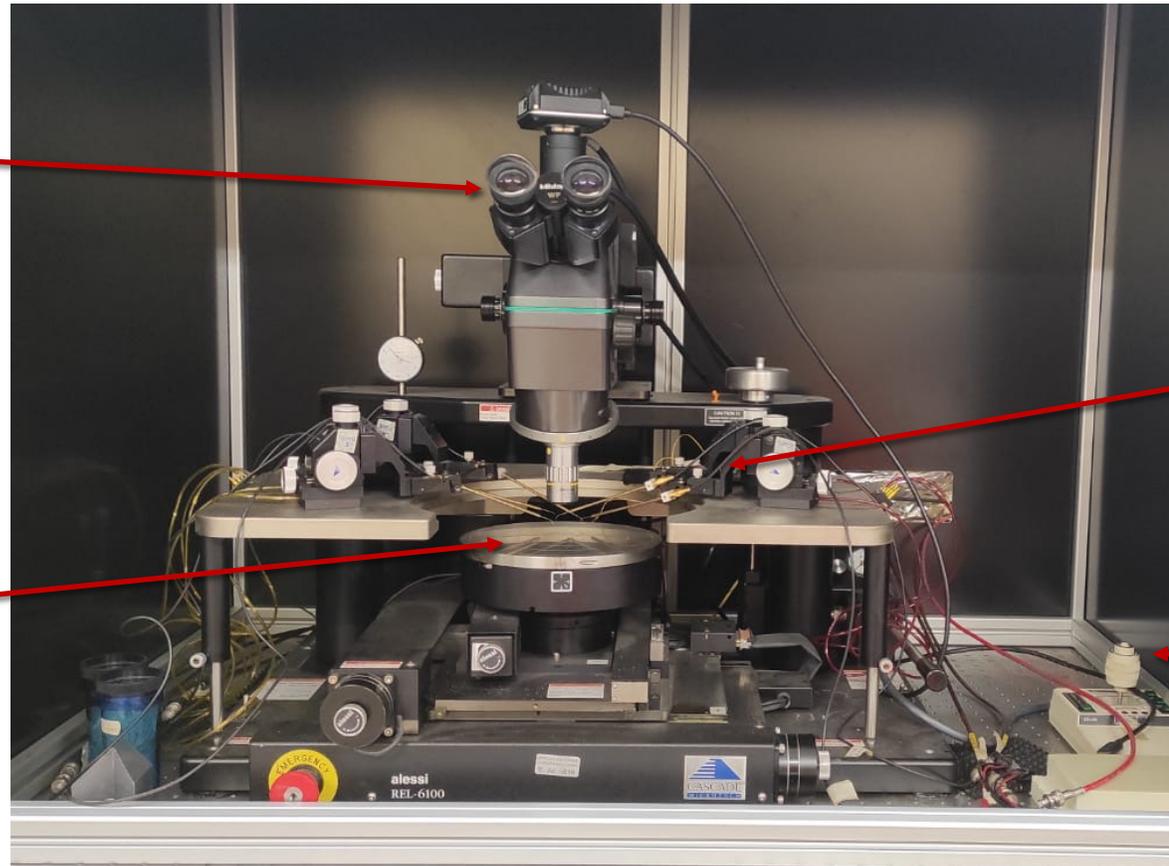
La prima parte della caratterizzazione elettrica è stata svolta alla stazione di rilevazione chiamata Probe Station.

microscopio

Base metallica su cui posizionare il sensore e applicare un'alta tensione

Aghi metallici con cui fare contatto sul sensore

Cursore con cui muovere l'ottica o il rivelatore



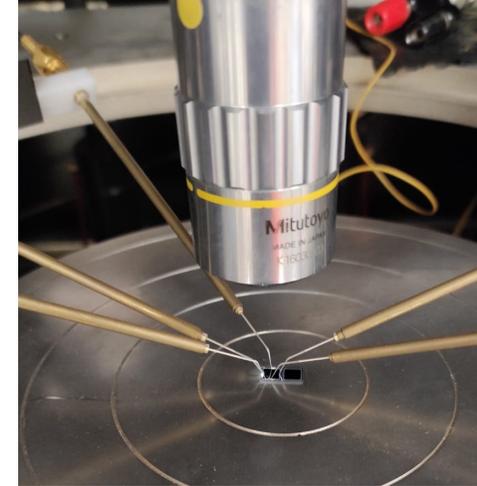
# CURVA I(V)

Verificare l'effettivo funzionamento di tutti i sensori studiando le curve caratteristiche Corrente-Tensione.

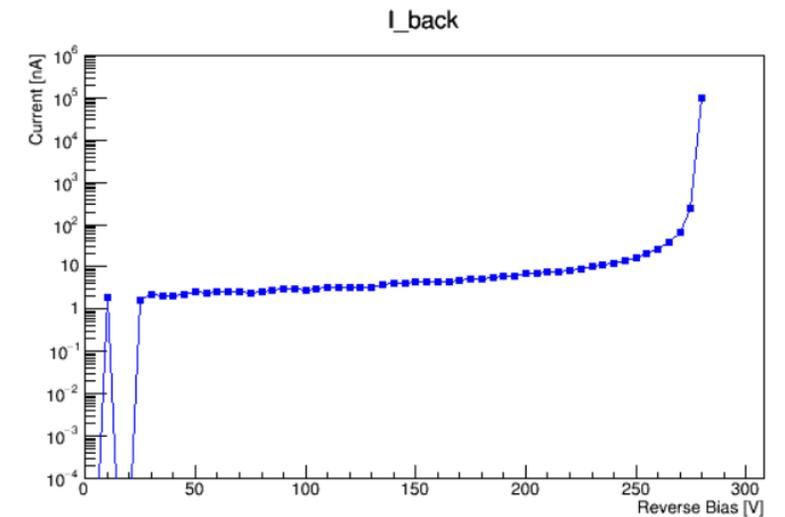
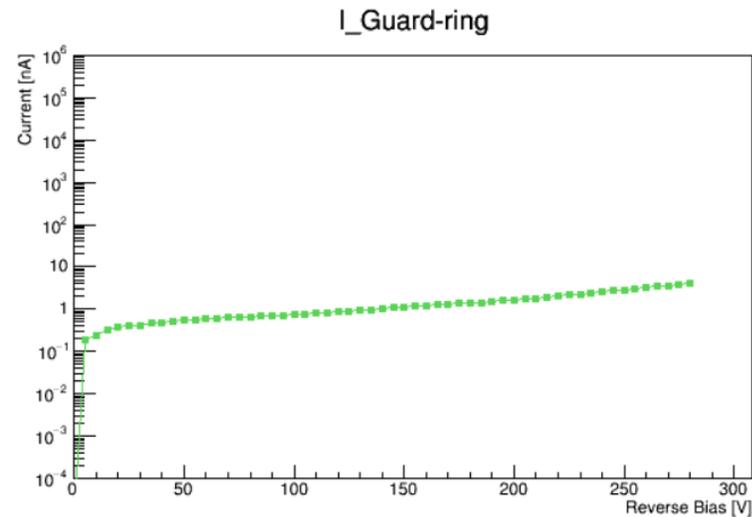
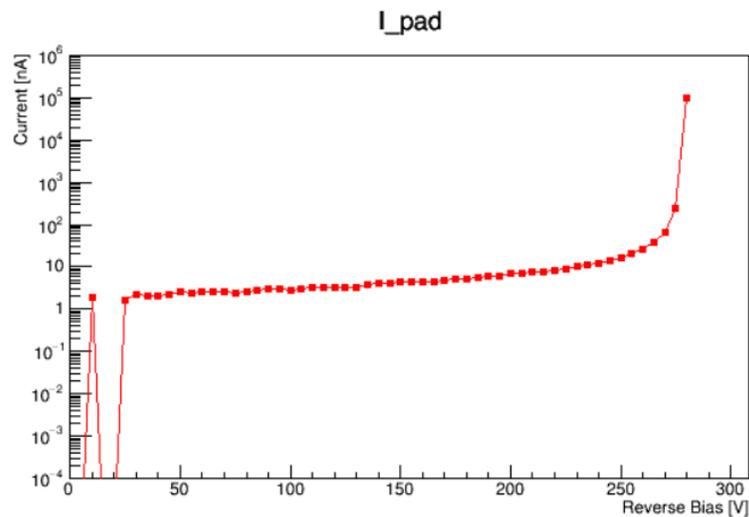
Alta tensione: range da 0 a -280 V con passo di 5 V

Misurazione del passaggio di corrente nel sensore, in particolare si analizzano:

- **La corrente dei pad ( $I_{\text{pad}}$ )** che viene rivelata dagli elettrodi di lettura collegati;
- **La corrente di guard-ring ( $I_{\text{GR}}$ )** è la parte di corrente che non passa attraverso i pad si propaga nel guard-ring;
- **La corrente di buio ( $I_{\text{back}}$ )** è la corrente totale passante nel sensore;



Rivelatore dei grafici è LGAD pad angoli



# Analisi delle RESISTENZE inter-pad

L'analisi della resistenza superficiale tra i pad è fondamentale per una corretta rilevazione delle particelle incidenti. È necessario verificare che ci sia isolamento tra i gli elettrodi di lettura.

Per ogni rivelatore sono state fatte le analisi delle resistenze relativi a tutti i pad associati come segue:

- Coppia di pad vicini
- Coppia di pad opposti
- Tripletta di pad adiacenti

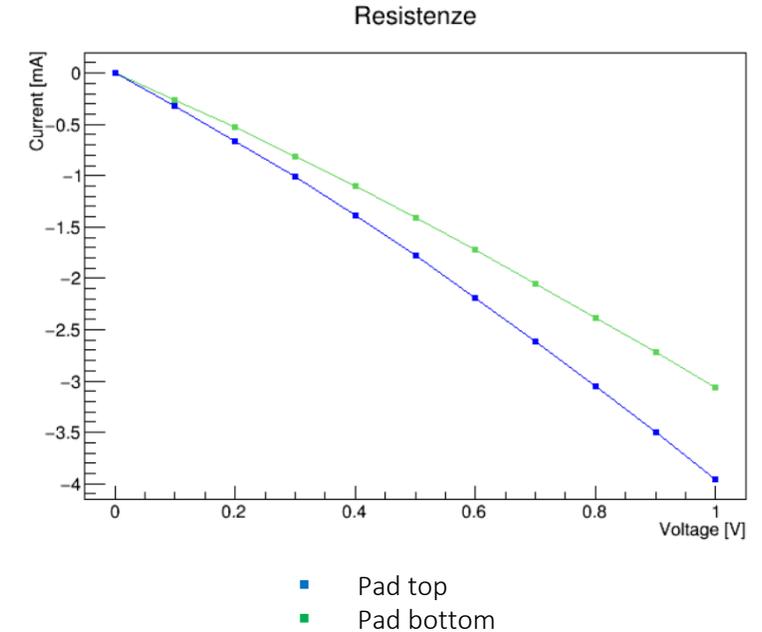
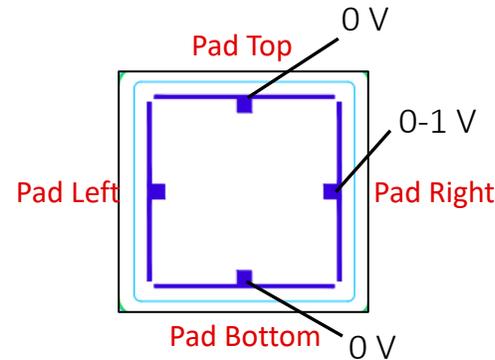
## SetUp e procedura

HV con polarizzazione: -70 V (diode svuotato)

Collego due o tre pad con gli aghi metallici: fissi a 0 V

Variazione del voltaggio di un pad: range 0-1 V con passo di 50mV

*Parametro della produzione: 300  $\Omega$ /sq*



Resistenza a 3 pad attaccati, rivelatore PIN con sbarrette, sbilanciamento pad Right

Resistenza Right-Bottom	353,612±0,005	$\Omega$ /sq
Resistenza Right-Top	279,297±0,005	$\Omega$ /sq

# Transient Current Technique (TCT)

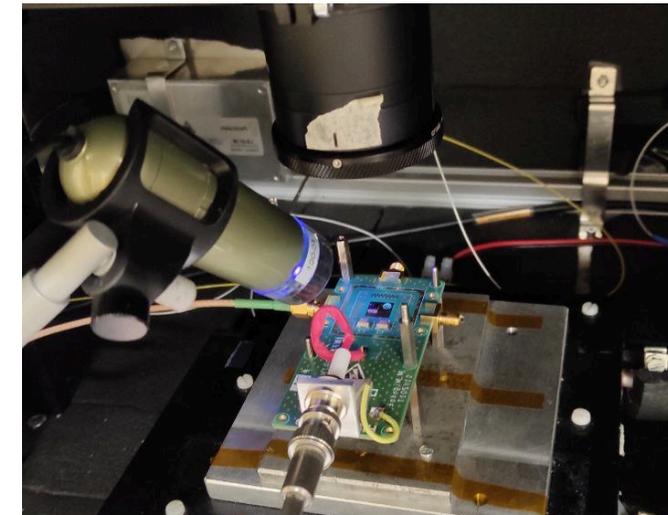
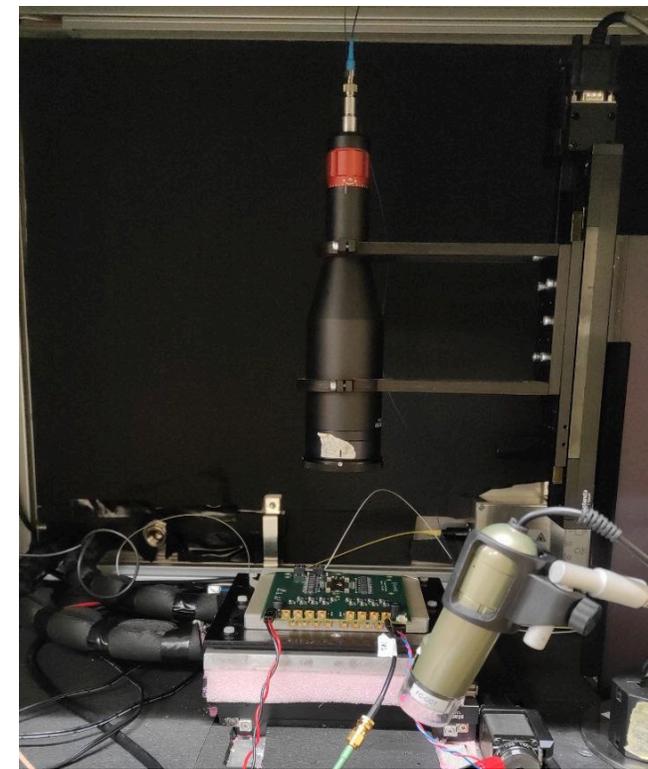
La seconda postazione di rilevazione che ho utilizzato è detta TCT, Transient Current Technique. **Il laser infrarosso** proprio della postazione **simula una particella** incidente sul sensore in modo da **studiare il segnale emesso dal dispositivo**.

Il sistema di lenti permette di avere un laser molto focalizzato (10  $\mu\text{m}$ ).

L'apparato sperimentale ha un sistema di movimentazione che permette di muovere il sensore rispetto al laser con precisione micrometrica.

## Procedura di Set-Up

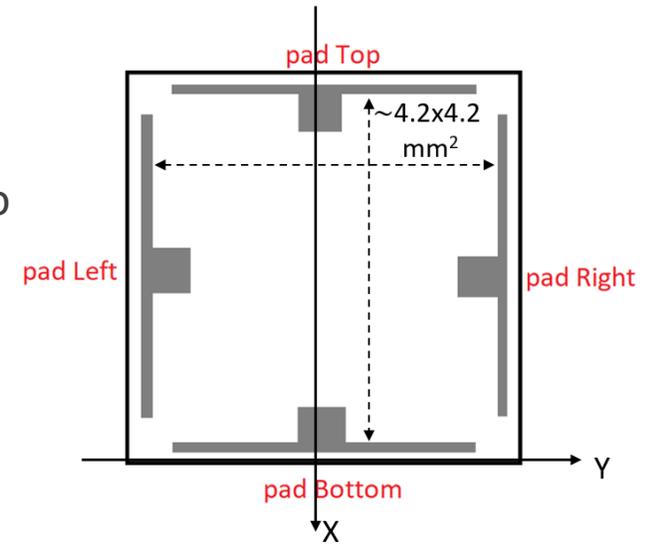
1. **Messa a fuoco dell'ottica** del laser
2. **Calibrazione**: impostare l'intensità del laser in modo che il segnale generato sia pari a quello che si otterrebbe al passaggio di una particella al minimo di ionizzazione, MIP.



# Mappatura del sensore

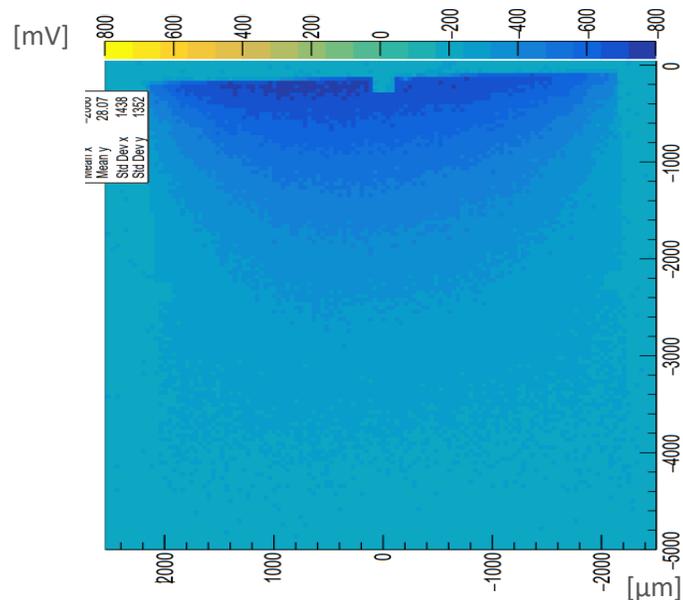
Mappature totali o locali del sensore utilizzando il laser per lo studio del segnale misurato

Si studia l'ampiezza e l'area del segnale generato, sia letto da ogni singolo pad sia come somma della lettura di tutti i pad.

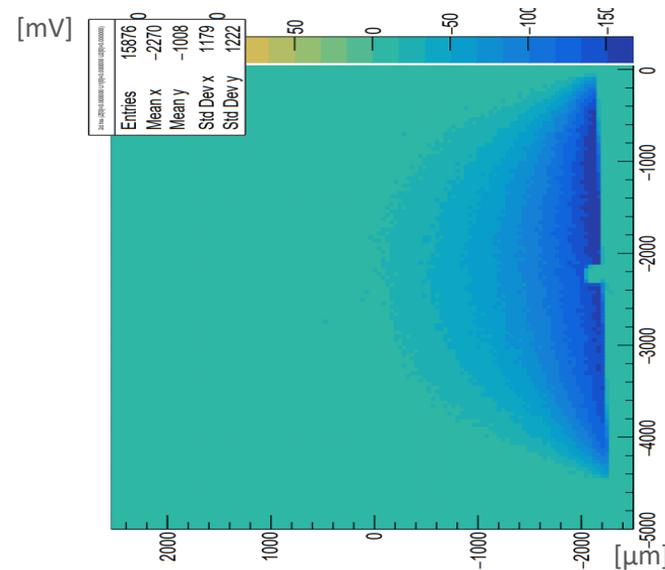


## Mappatura totale del sensore: area del segnale da singolo pad

Lettura del segnale dal singolo pad Alto

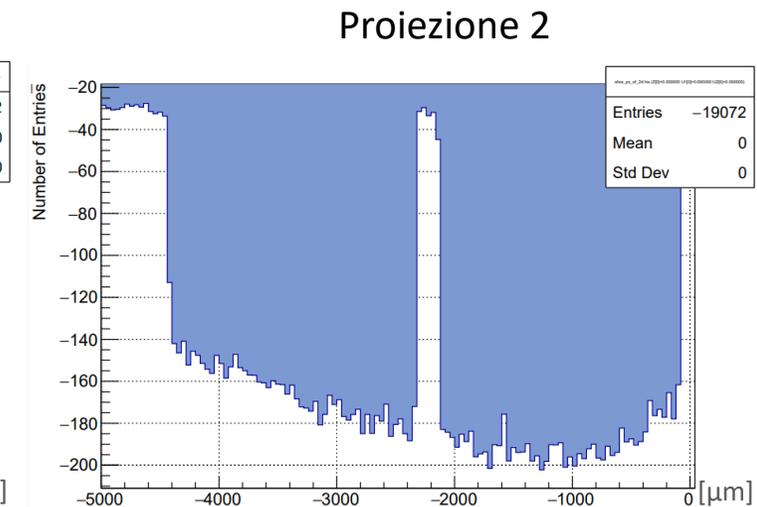
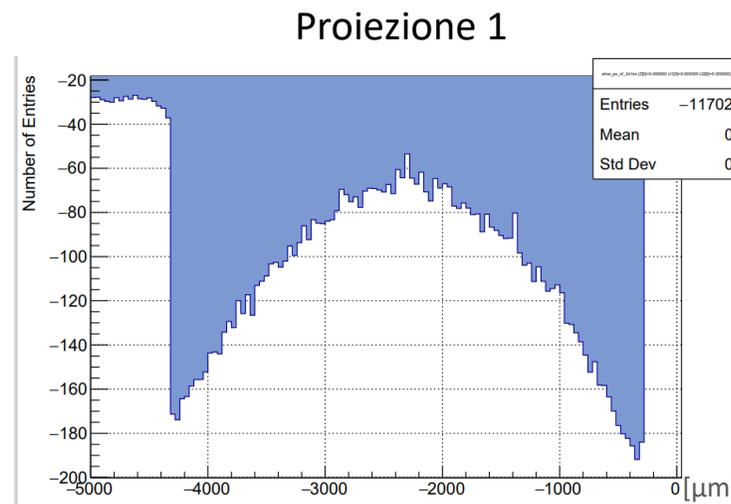
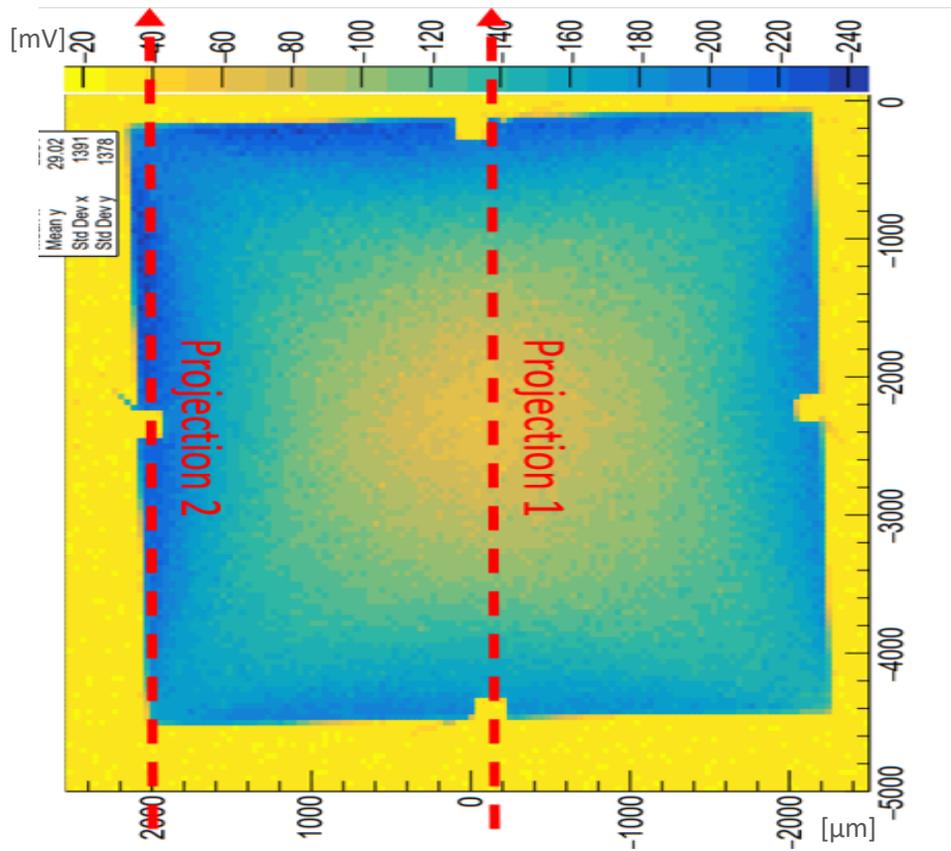


Lettura del segnale dal singolo pad Destra



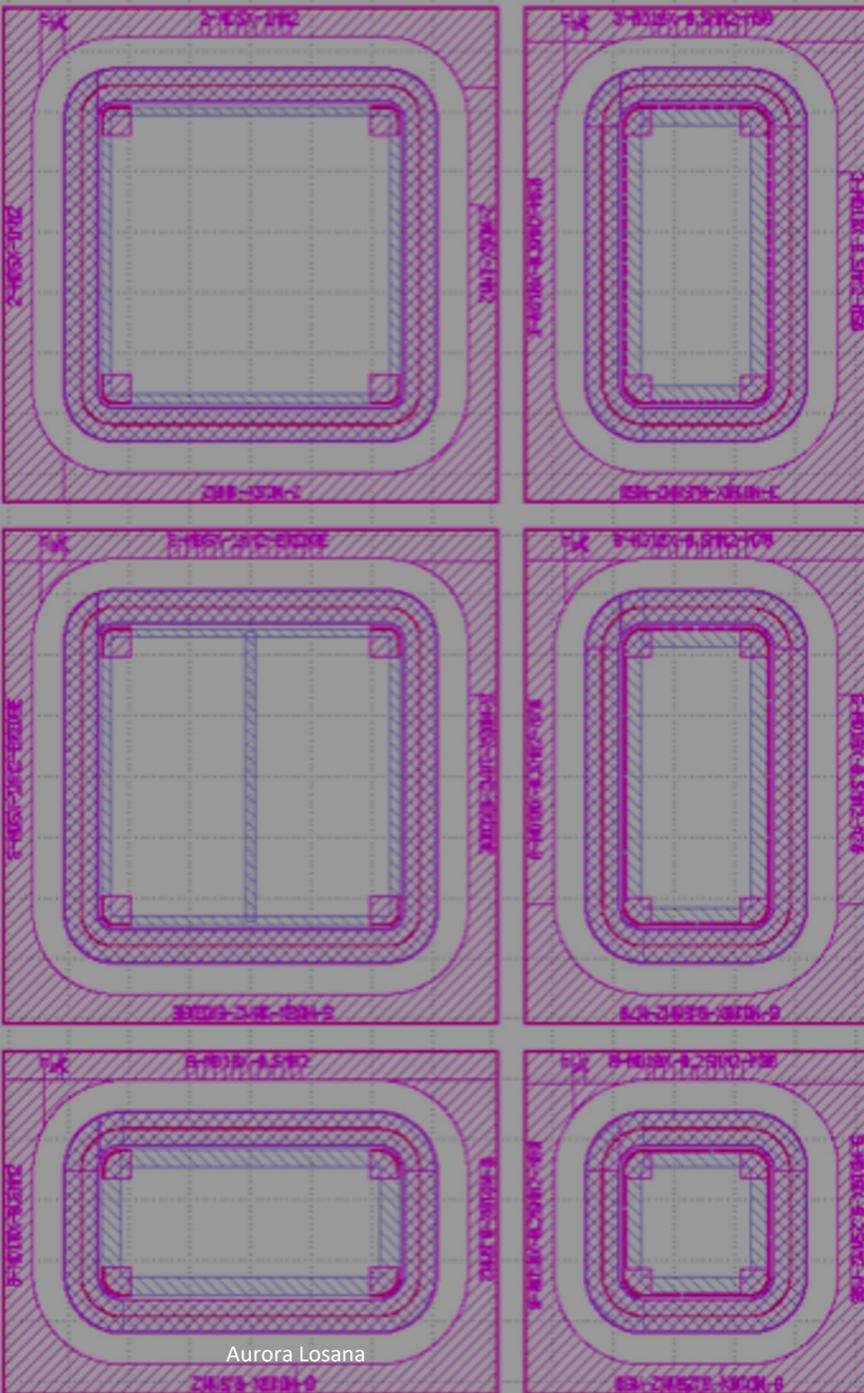
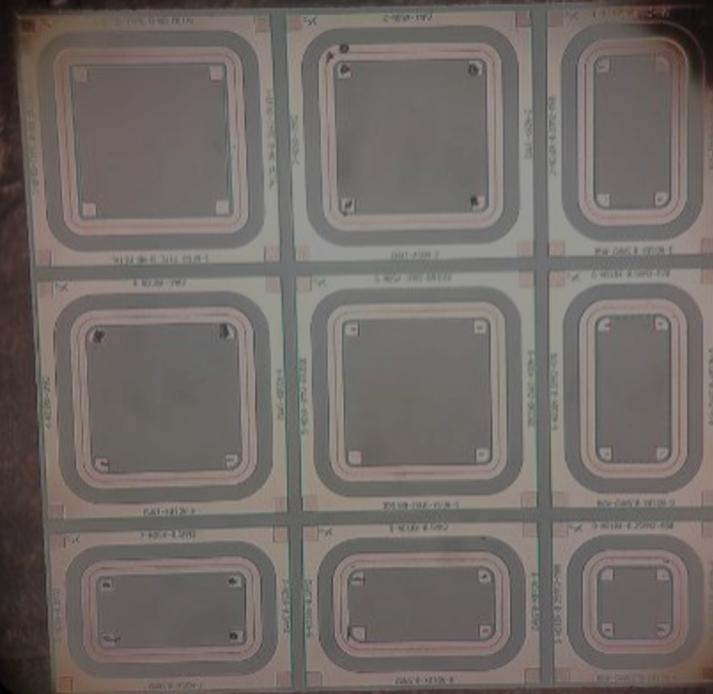
Si può osservare che a ridosso del pad collegato il segnale sia intenso (blu) mentre allontanandosi da questo il **segnale decresca fortemente** non permettendo di studiare efficacemente il segnale.

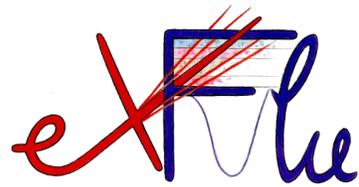
# Scan totale del sensore: somma dell'ampiezza del segnale di tutti i pad



Le mappature ottenute hanno fatto emergere come **il sensore ha dimensione troppo grande** il segnale generato in centro al sensore non raggiunge gli elettrodi di lettura.

# DC eXFlu





## Silicon Sensor for Extreme Fluences

Il secondo lotto di rivelatori DC-RSD sono stati prodotti all'interno di un'altra produzione chiamata eXFlu

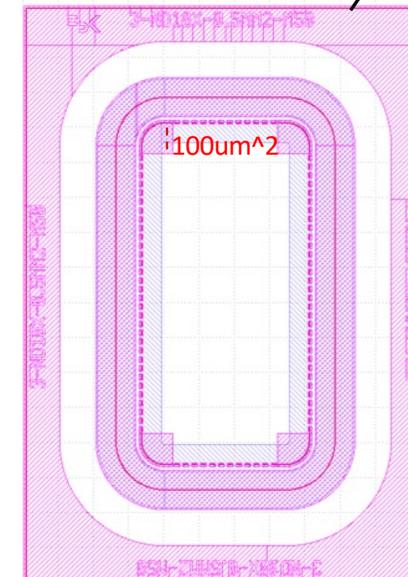
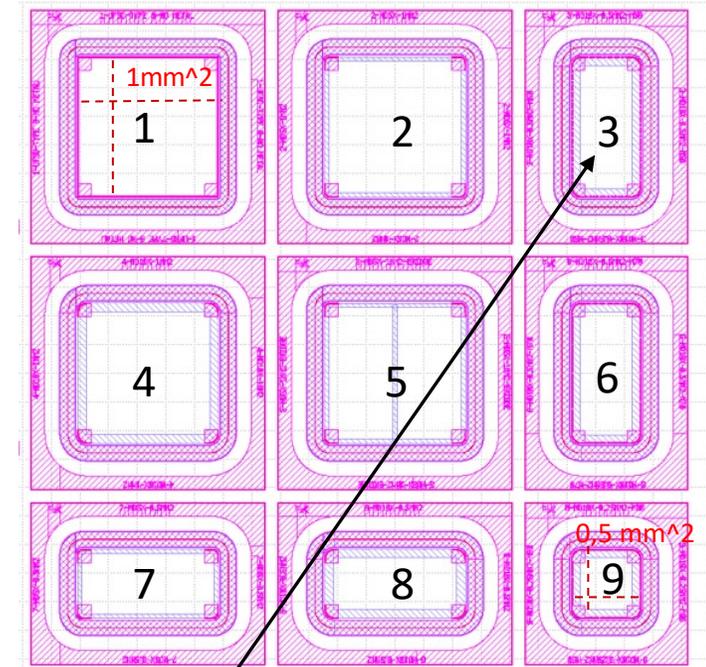
**Sensori di dimensioni inferiori rispetto alla produzione precedente.**

**1 mm<sup>2</sup> – 0.5 mm x 1 mm – 0.5 mm<sup>2</sup>**

All'interno dello studio della separazione del segnale ho studiato rivelatori con geometrie e layout differenti.

Layout elettrodi di lettura negli angoli.

Analisi su due sensori per ogni tipologia: **18 sensori** totali.



# I(V) e Analisi Resistenze inter-pad

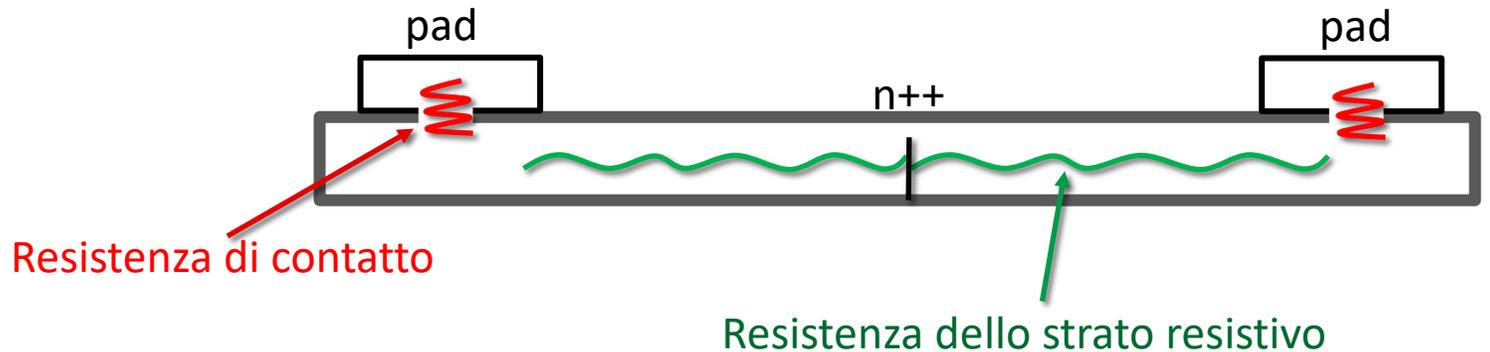
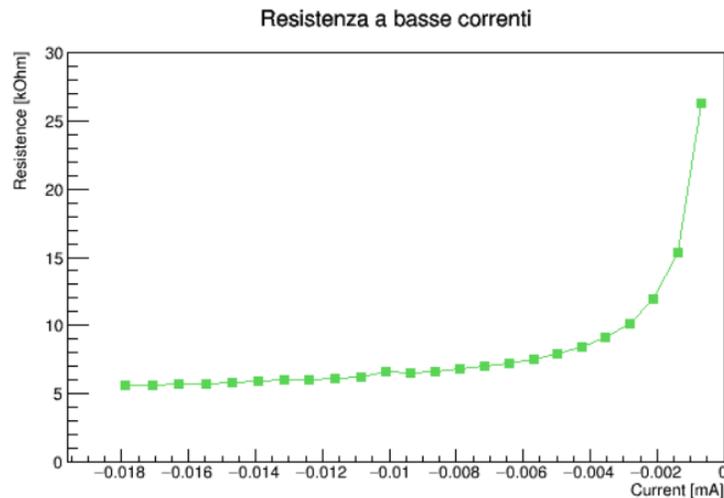
L'analisi della resistenza inter pad era finalizzata a studiare la dipendenza della resistenza dalla geometria degli elementi che caratterizzano il sensore.

Per ogni rilevatore sono state fatte le analisi delle resistenze relativi a tutti i pad associati come segue:

- Coppia di pad vicini
- Coppia di pad opposti
- Tripletta di 3 pad adiacenti

Per bassi valori di corrente la resistenza di contatto non è trascurabile, supera quella dello strato resistivo.

La resistenza totale è interamente dominata dalla resistenza di contatto.

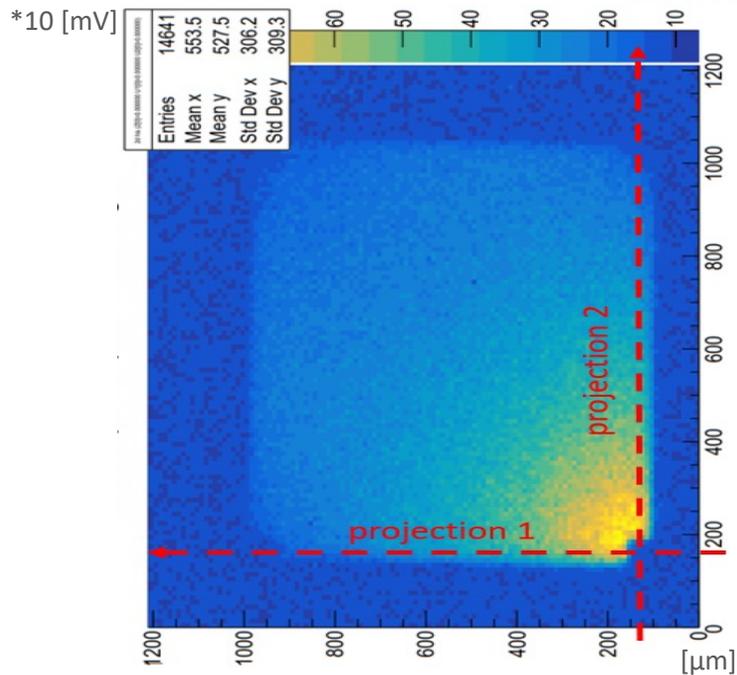


# Transient Current Technique (TCT)

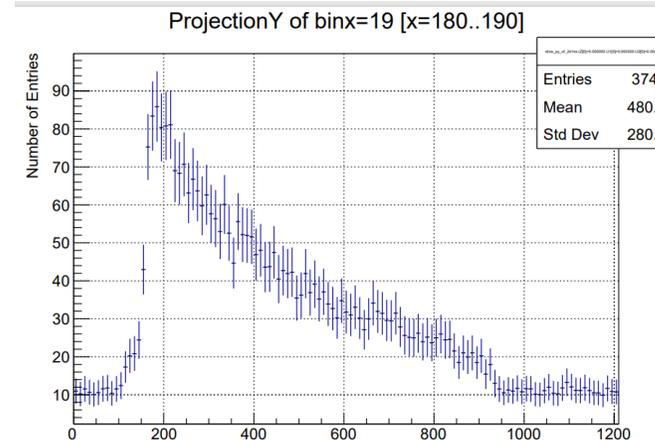
Mappature totali o locali utilizzando il laser per lo studio del segnale misurato.

Si studia il picco e l'area del segnale generato, sia letto da ogni singolo pad sia come somma della lettura di tutti i pad.

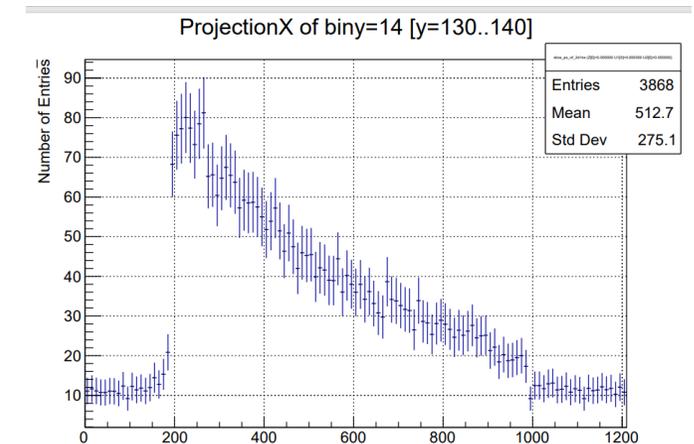
Lettura del segnale dal singolo pad Bottom Right



Proiezione 1



Proiezione 2



# Signal waveform

- C1 Top Right pad
- C2 Top left pad
- C3 Bottom Left pad
- C4 Bottom Right pad

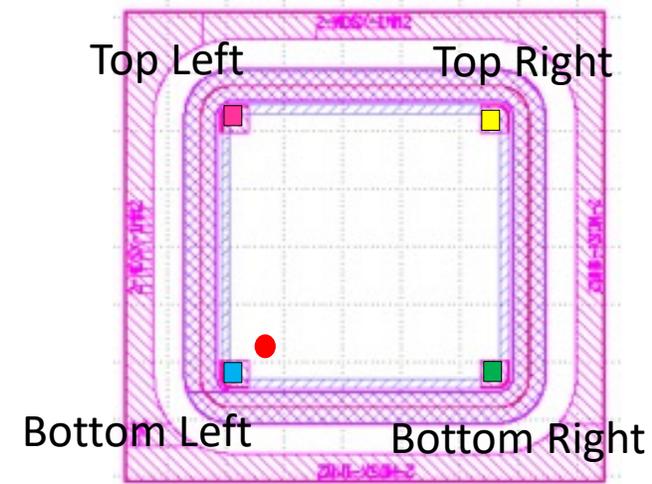
Sensor bias = 185V

Laser condition:

Attenuation = 48,4%

Ref Diode amplitude = 47 mV

MIP<sub>equivalent</sub> = 1



# Signal waveform Top Right pad

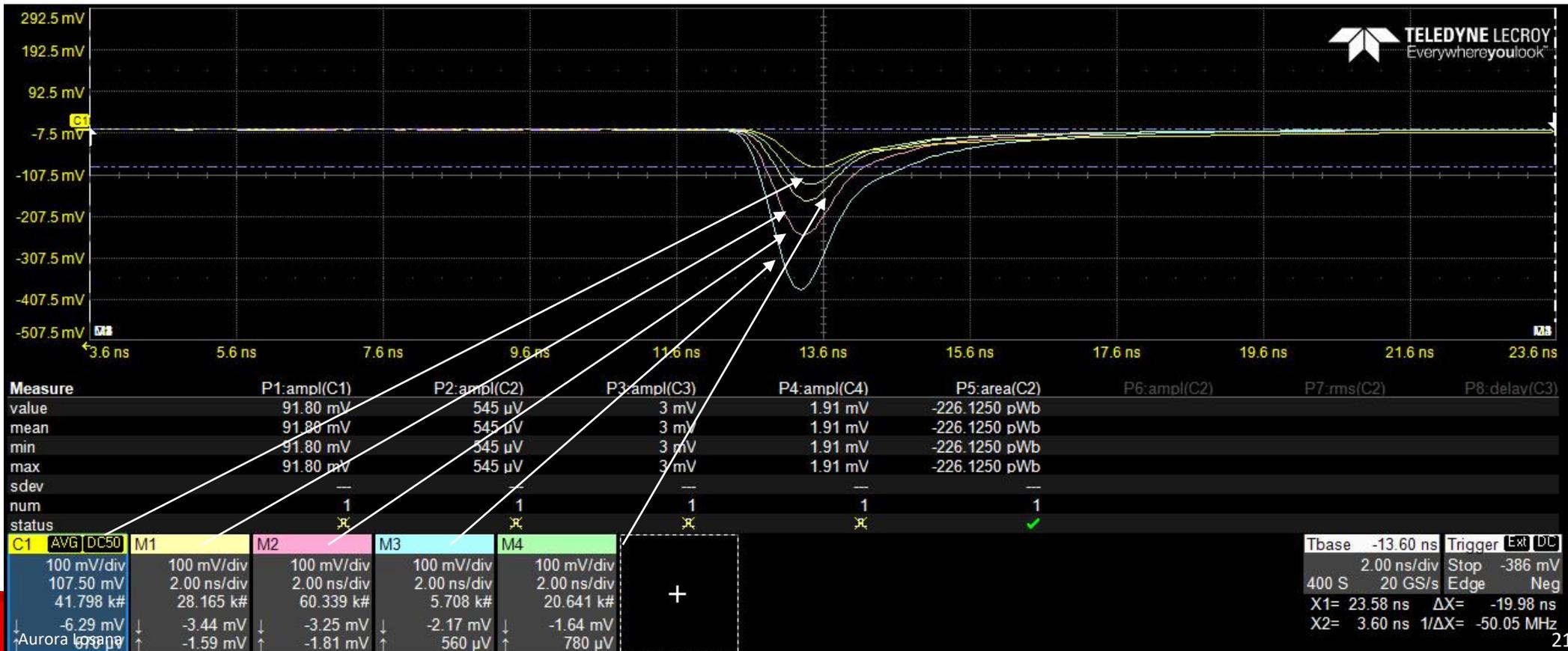
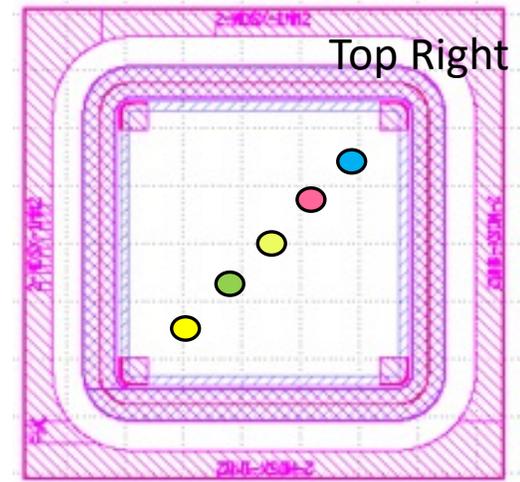
Sensor bias = 185V

Laser condition:

Attenuation = 48,4%

Ref Diode amplitude = 47 mV

$MIP_{equivalent} = 1$



# Conclusioni

Analisi fatta su **26 sensori**: 8 sensori DC RSD-0 e 18 sensori DC RSD-eXFlu.

## La prima produzione:

- ✓ Lo studio che ho condotto sulla resistenza tra gli elettrodi ha risultati **concordi con le aspettative della produzione**.
- ✓ Dall'analisi svolta con gli scan è emerso che i DC-RSD0 hanno **superficie troppo grande**, non fornendo quindi risultati consistenti.

## La seconda produzione:

- ✓ A bassi valori di corrente è emersa una **criticità tecnologica nella lettura resistiva del segnale** che dovrà essere migliorata nello sviluppo della tecnologia RSD.

Posso quindi concludere che i risultati ottenuti mettono in evidenza l'importanza dell'analisi da me condotta sottolineando come la tecnologia RSD abbia caratteristiche promettenti dal punto di vista del tracciamento nello spazio di particelle cariche.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

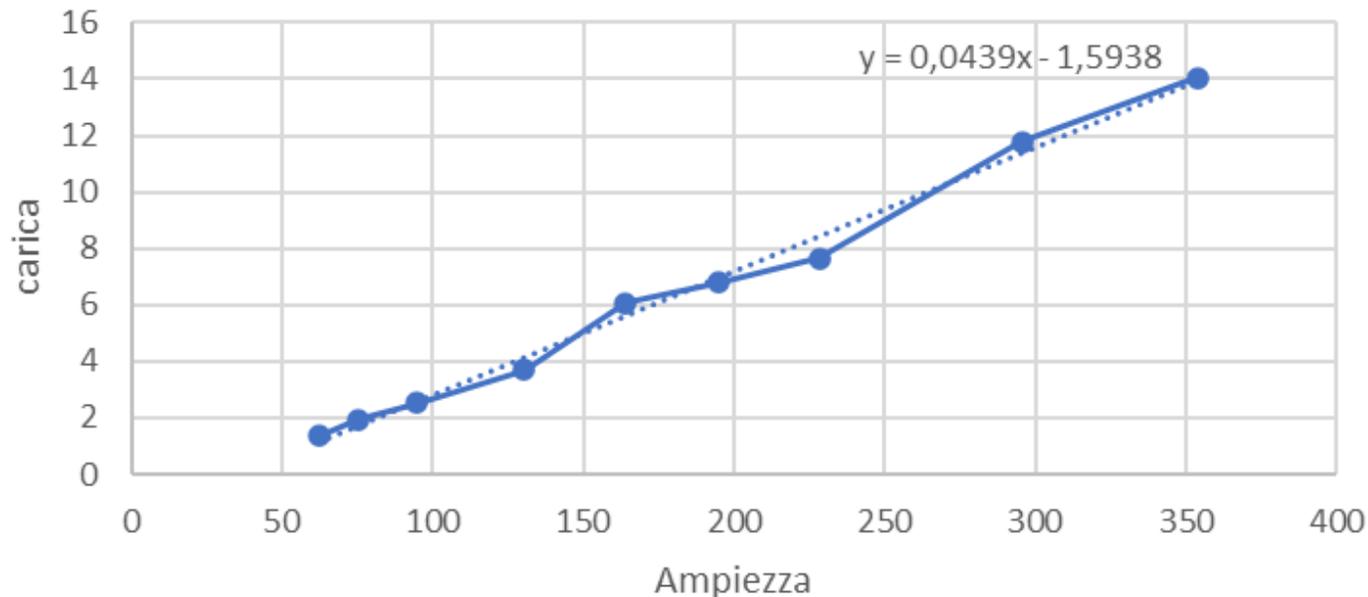
---

# CALIBRAZIONE

**Trovare l'ampiezza del diodo di riferimento al quale corrisponde una Mip.**

Dall'oscilloscopio prendo le misure dell'ampiezza del diodo di riferimento all'aumentare dell'attenuazione del laser (44%-49%).

ampiezza(carica)



Il segnale dato a schermo in Weber(coulomb\*Ohm) si divide per i 50 Ohm dell'impedenza e l'amplificazione (100).

il risultato è il valore in Coulomb della carica della particella che ha attraversato il rilevatore.

Sapendo che  $1\text{pC} = 1000\text{fC}$  possiamo ottenere la carica in fentoCoulomb.

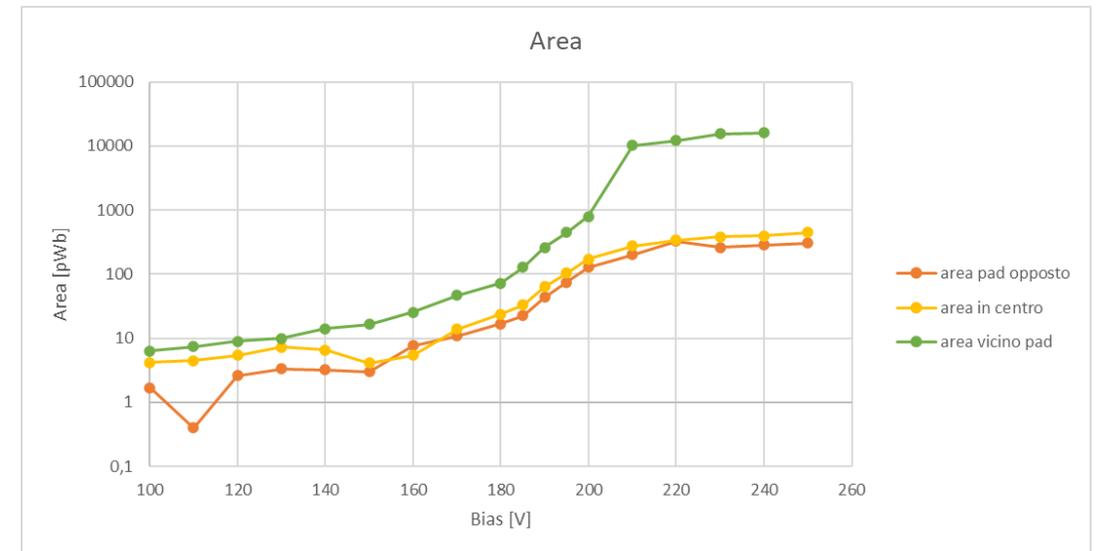
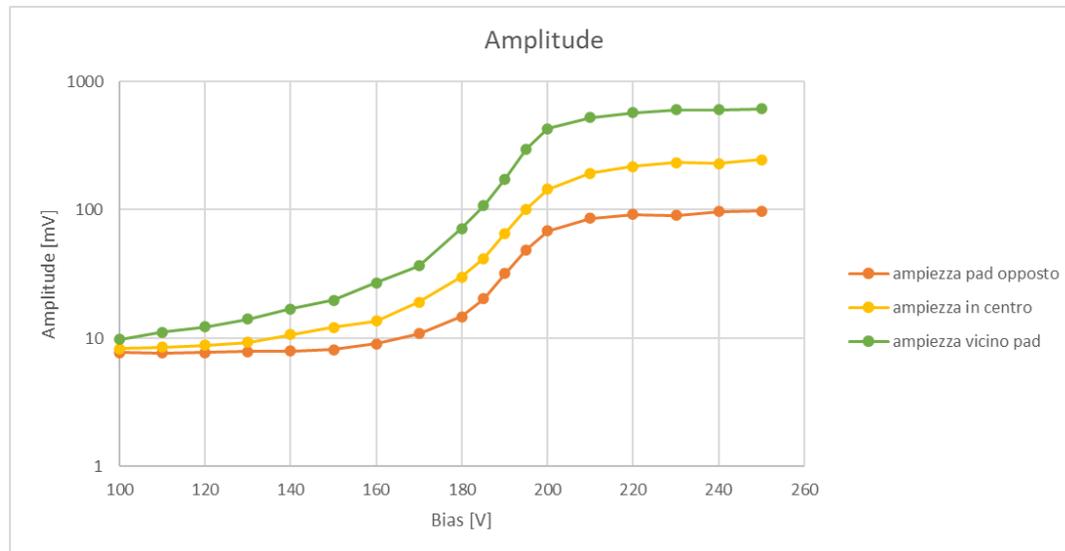
Dividiamo per 0,5 perché sappiamo che una particella elementare in  $50\mu\text{m}$  di silicio genera  $0.5\text{fC}$ .

Otteniamo così il # di Mips a cui corrisponde il nostro segnale.

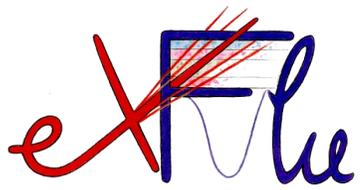
# CALIBRAZIONE

Variazione dell'ampiezza del segnale al variare del Voltaggio

Sensore eXFlu



Avvicinandosi al pad di lettura il segnale cresce velocemente (aumento della pendenza della curva) poiché il segnale è più veloce



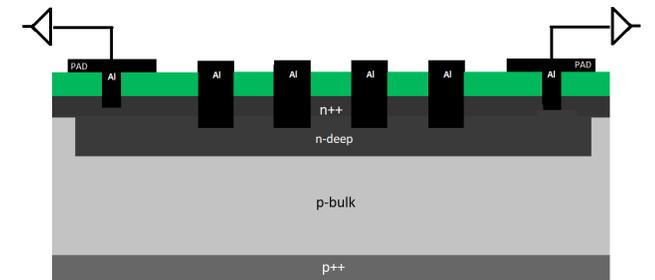
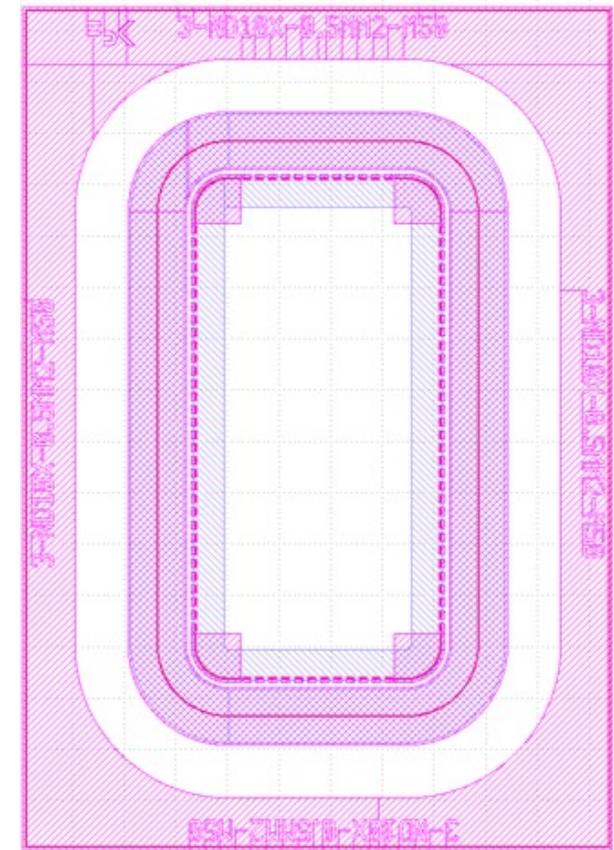
## Silicon Sensor for Extreme Fluences

Il secondo lotto di rivelatori analizzati sono della tipologia eXFlu

- **Più sottili** (20-30  $\mu\text{m}$ ) e quindi intrinsecamente meno influenzati dalle radiazioni rispetto ai sensori più spessi.
- E' presente uno **strato di carbonio** il quale disattiva parte del Boro (drogaggio silicio) e quindi aumenta i difetti all'interno del diodo e come effetto aumenta la corrente
- **Range di operatività** dei sensori al silicio fino a fluenze molto elevate ( $5 \times 10^{17} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ ).

I sensori analizzati hanno:

- geometrie diverse #1,2,4,5 quadrati #3,6,9,7,8 rettangolari
- impianti di guadagno n-deep di larghezze differenti.
- Segmentazioni delle applicazioni metalliche per variare la resistenza. #3,6 e 9



# Analisi delle resistenze

---

## **Dipendenza della geometria:**

scala linearmente con la distanza

## **Dipendenza dallo strato n-deep:**

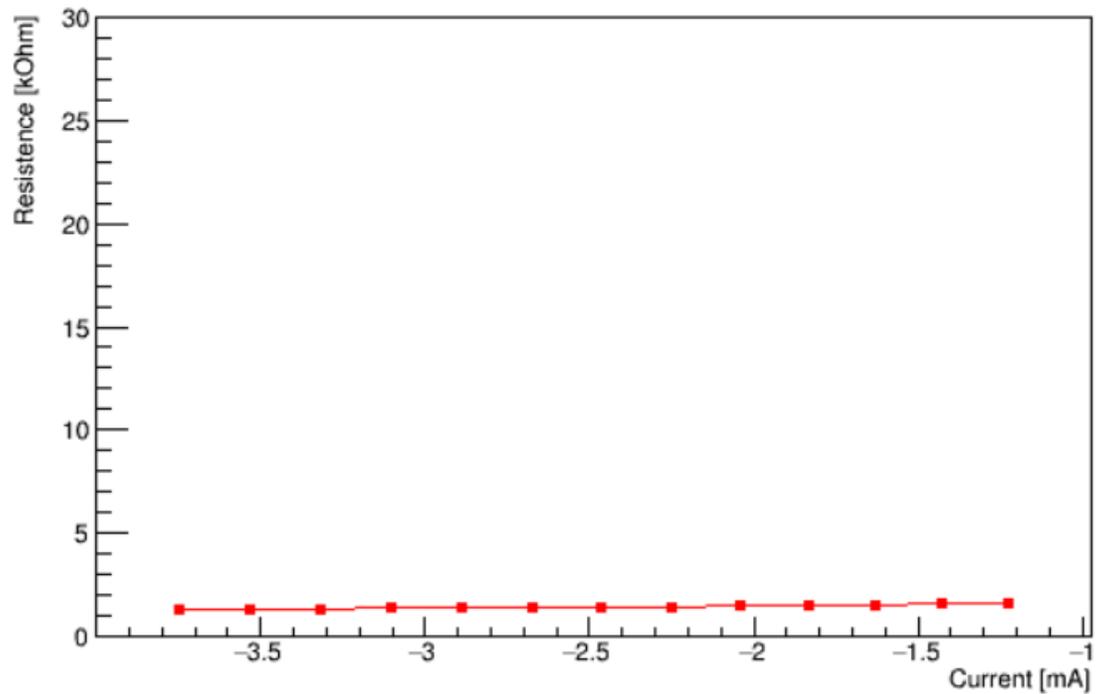
Non c'è differenza

## **Dipendenza dalle applicazioni metalliche:**

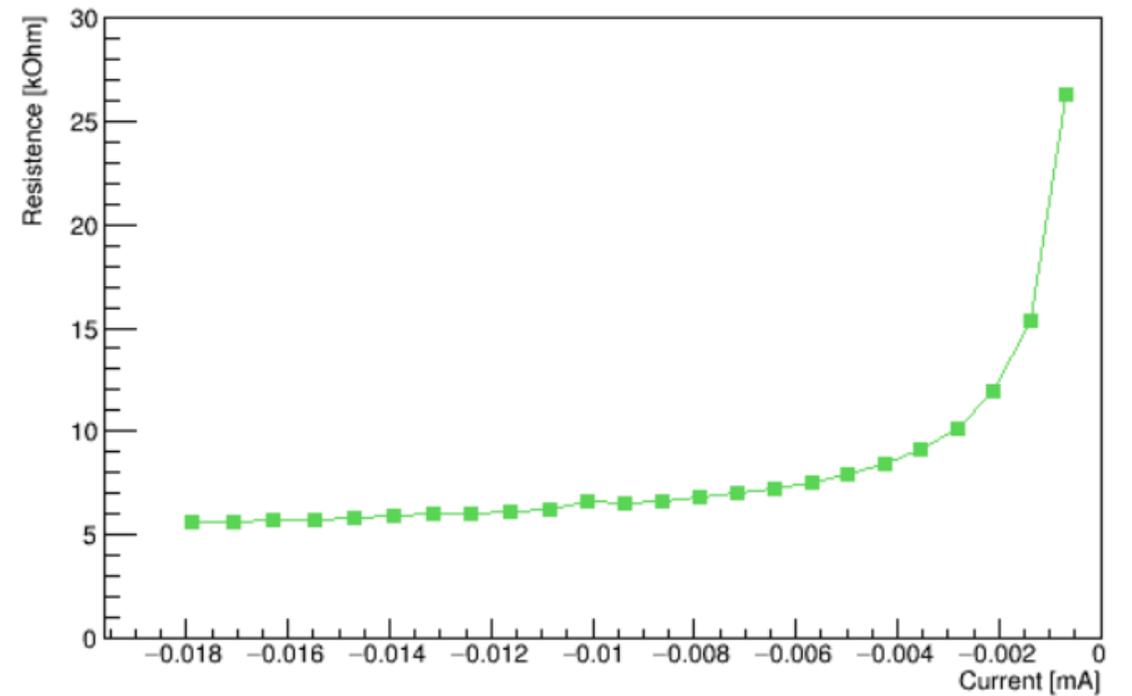
Resistenza silicio-metallo molto alta, non c'è differenza tra l'applicazione o meno del metallo poichè il segnale non ci passa sopra.

# Resistenza a basse correnti

Resistenze



Resistenza a basse correnti



# Resistenza di contatto

Nel diodo sono presenti due tipologie di resistenze:

- **Resistenza di barriera**, è la resistenza con andamento lineare che si ottiene quando si supera un certo valore di corrente e si entra in regime.
- **Resistenza dovuta all'effetto Schottky**, effetto si verifica quando si ha una giunzione metallo-semiconduttore che per bassi valori di corrente genera ai capi della giunzione una differenza di potenziale.

## Come si fa a diminuire la resistenza di contatto?

---

Aumentare drogaggio in concomitanza del pad (da  $10^{13}$  atomi/cm<sup>3</sup> a  $10^{20}$  atomi/cm<sup>3</sup>) oppure fare il contatto più grande.

Aumentare il drogaggio del silicio fa diminuire la resistenza del contatto perché all'aumentare della concentrazione dei droganti nel semiconduttore la larghezza della regione di svuotamento diminuisce.