

Ricerca e sviluppo di un nuovo sensore a pixel di Silicio ultra-resistente alla radiazione per la fase ad alta luminosità dell'esperimento CMS ad LHC

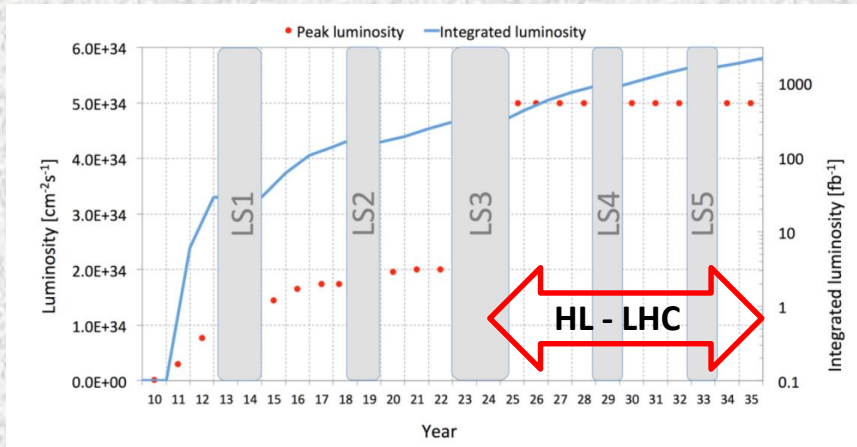
Davide Zuolo

A nome della collaborazione CMS – Pixel R&D INFN

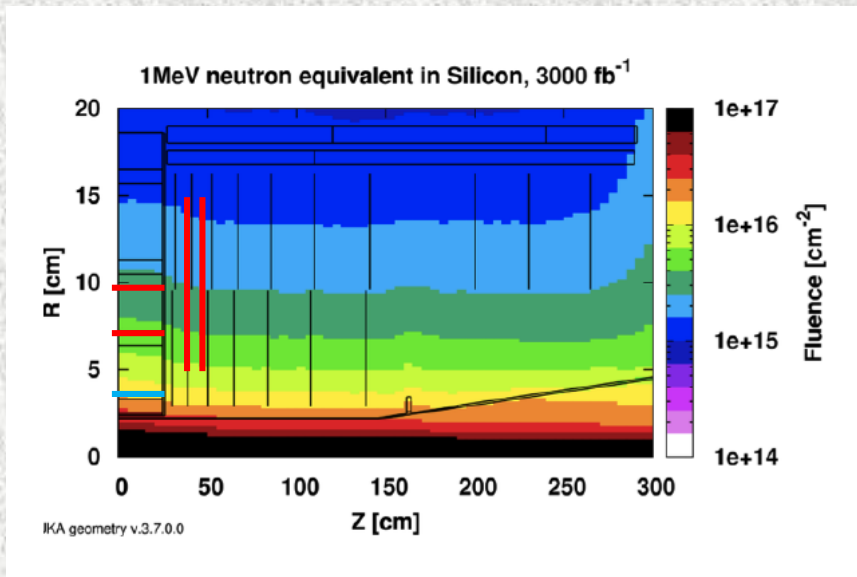
XVII Incontri di Fisica delle Alte Energie

Milano, 4-6 Aprile 2018

CMS@High Luminosity LHC

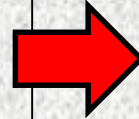


- A partire dal 2024 la luminosità passerà da $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ a $5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (High Luminosity LHC)
- Le fluenze di radiazione previste in CMS ad una luminosità integrata di 3000 fb^{-1} sono così elevate ($\sim 2 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ alla distanza dove è posto il primo layer del rivelatore a pixel) da richiedere lo sviluppo di nuovi sensori a pixel in grado di tollerare questi livelli di irraggiamento



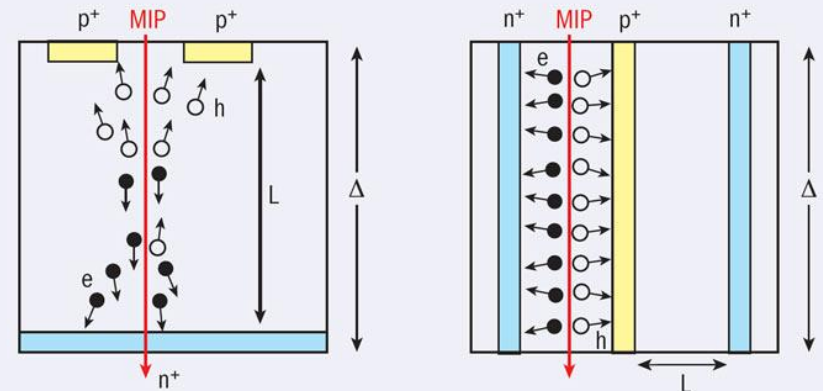
Tipologie di sensori

- In seguito all'irraggiamento la vita media dei portatori di carica diminuisce a causa della maggiore probabilità di trapping.
- A $2 \times 10^{16} n_{eq}/cm^2$ la vita media degli elettroni è di circa 0.3 ns che, a velocità satura, corrisponde ad un libero cammino medio di circa 30 μm . Per le lacune il libero cammino medio è di circa un fattore due più piccolo

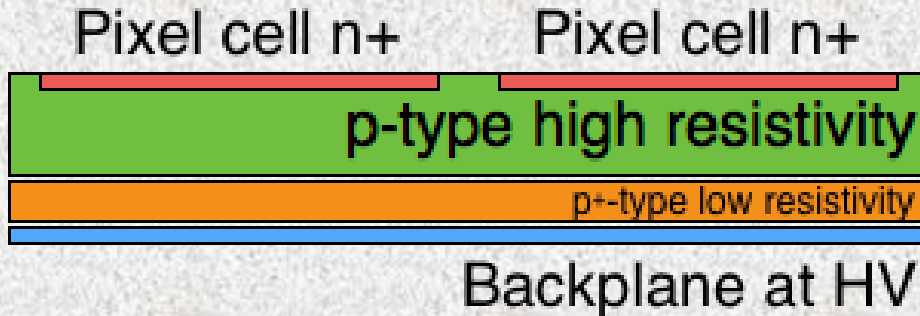


Per massimizzare la raccolta di carica è quindi necessaria una minore distanza tra gli elettrodi che generano il campo elettrico di raccolta

Due possibili tipologie di sensori: **planari sottili o 3D**



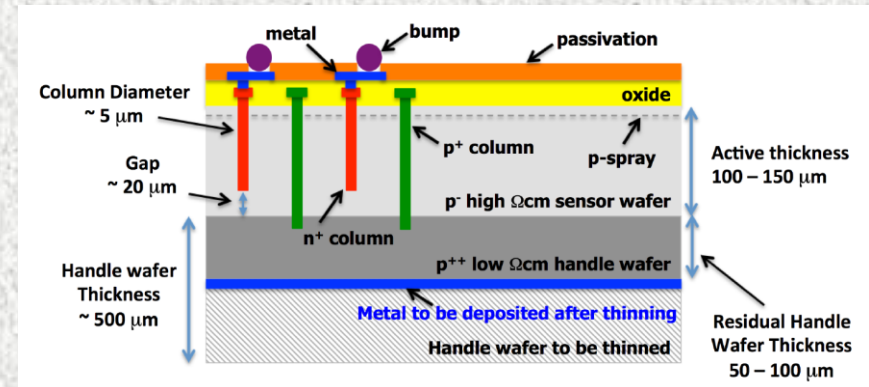
I nuovi sensori INFN - FBK



Sensori planari:

- Spessore attivo: 100 o 130 μm
- Dimensioni della cella: 100 x 150 μm^2

I sensori sono di tipo n+ su p realizzati con l'impiego della recente tecnologia del Direct Wafer Bonding che permette di produrre wafer di Silicio costituiti da un sottile strato di tipo p ad alta resistività saldato sfruttando solamente i legami molecolari ad un substrato di tipo p a bassa resistività

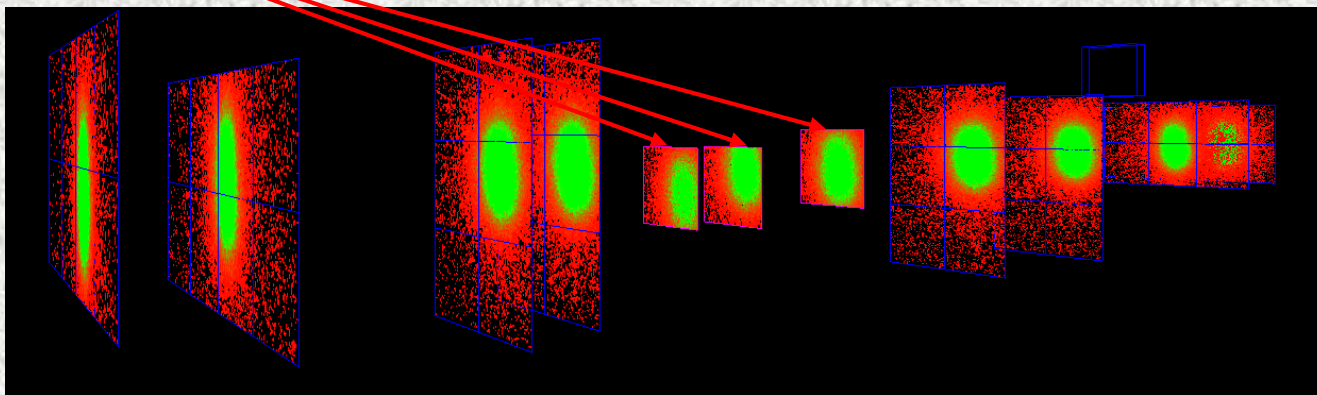


Sensori 3D:

- Elettrodi perpendicolari alla superficie del sensore
- Elettrodi non rettificanti, detti di campo, di tipo p+
- Elettrodi rettificanti, detti di segnale, di tipo n+
- Spessore attivo 130 μm
- Differenti dimensioni di cella: 100 x 150 μm^2 , 25 x 100 μm^2 e 50 x 50 μm^2

Sistema di test su fascio

- I sensori sono stati collegati al Read-Out Chip (ROC) PSI46dig (attualmente in uso a CMS) e sono stati provati su fascio presso la Test Beam Facility del Fermilab utilizzando protoni da 120 GeV.
- La ricostruzione delle tracce dei protoni è basata su un telescopio di 8 piani di pixel, che permette di ottenere, sui rivelatori sotto test, una risoluzione di $9\ \mu\text{m}$ in entrambe le coordinate trasverse.

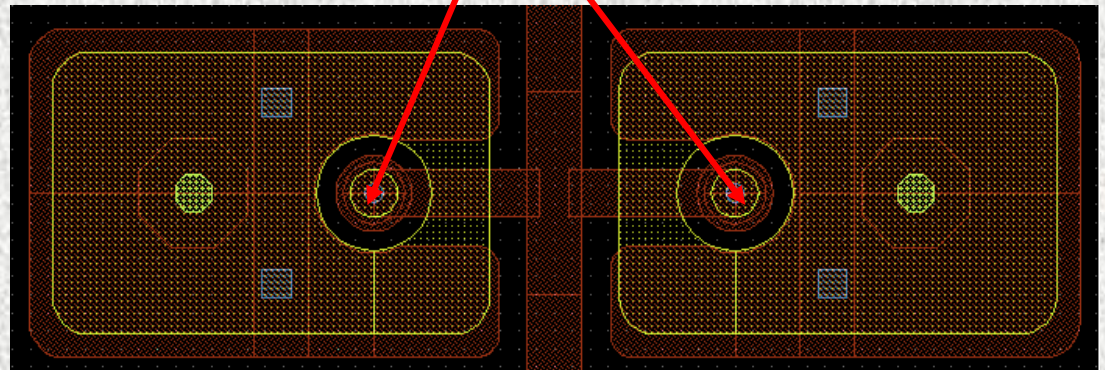


Sensori Planari

In questa presentazione...

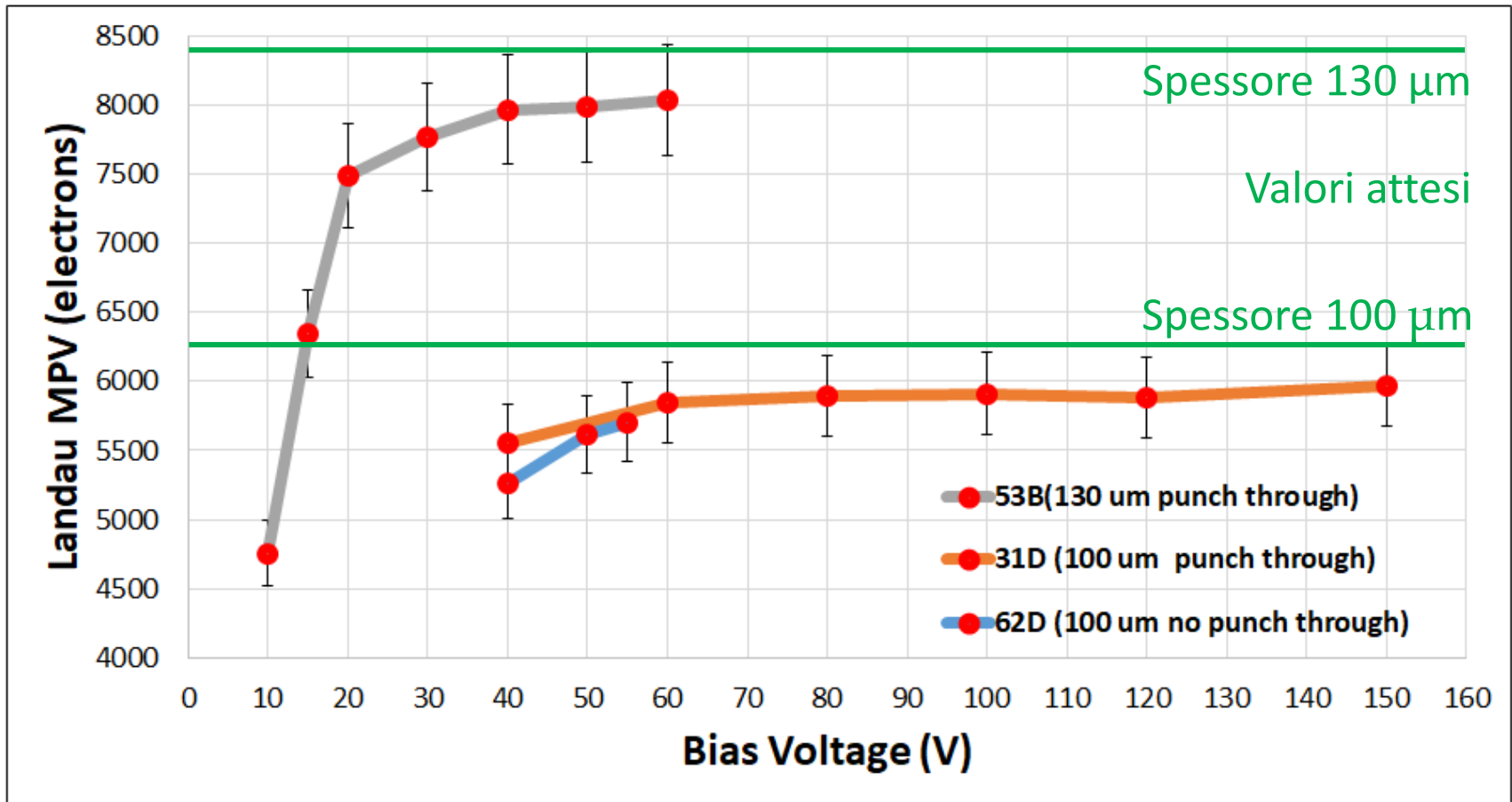
ID Chip	Active Thickness (μm)	P-stop (around cell)	n.GR/P-stop between GR	Punch-Through	Irradiation Fluence (neq/cm ²)
62D	100	yes	1/no	no	3.10E+15
31D	100	no	1/no	yes	5.02E+15
11C	130	yes	10/yes	yes	3.10E+15
53B	130	yes	10/yes	yes	1.19E+15
43A	100	no	1/yes	yes	5.02E+15

Utilizzeremo questo ID per riferirci ai rivelatori



Sensori Planari

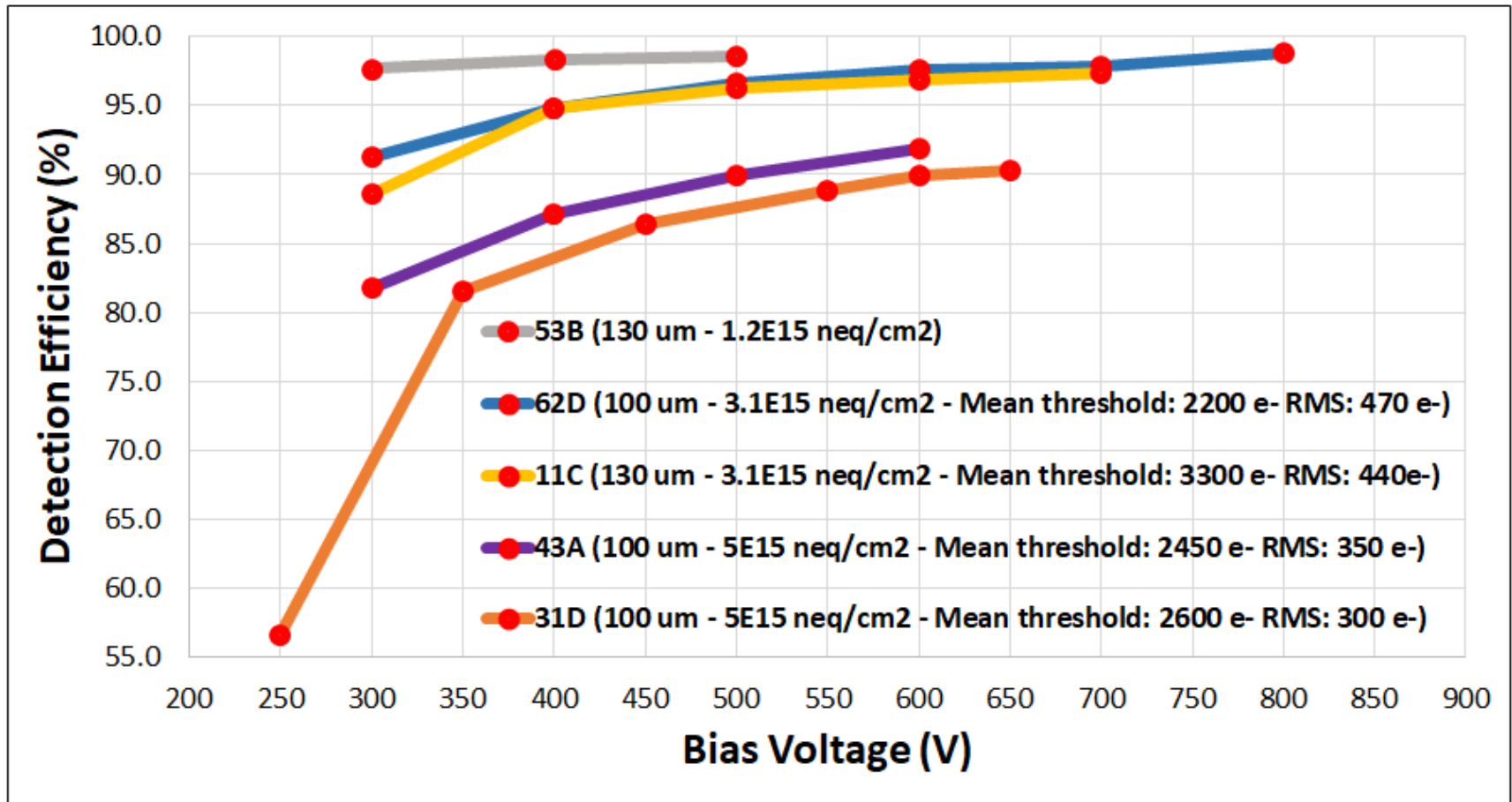
MPV vs. Vbias pre - irraggiamento



N.B. L'efficienza di rivelazione è vicina al 100% (> 99.8%)

Sensori Planari

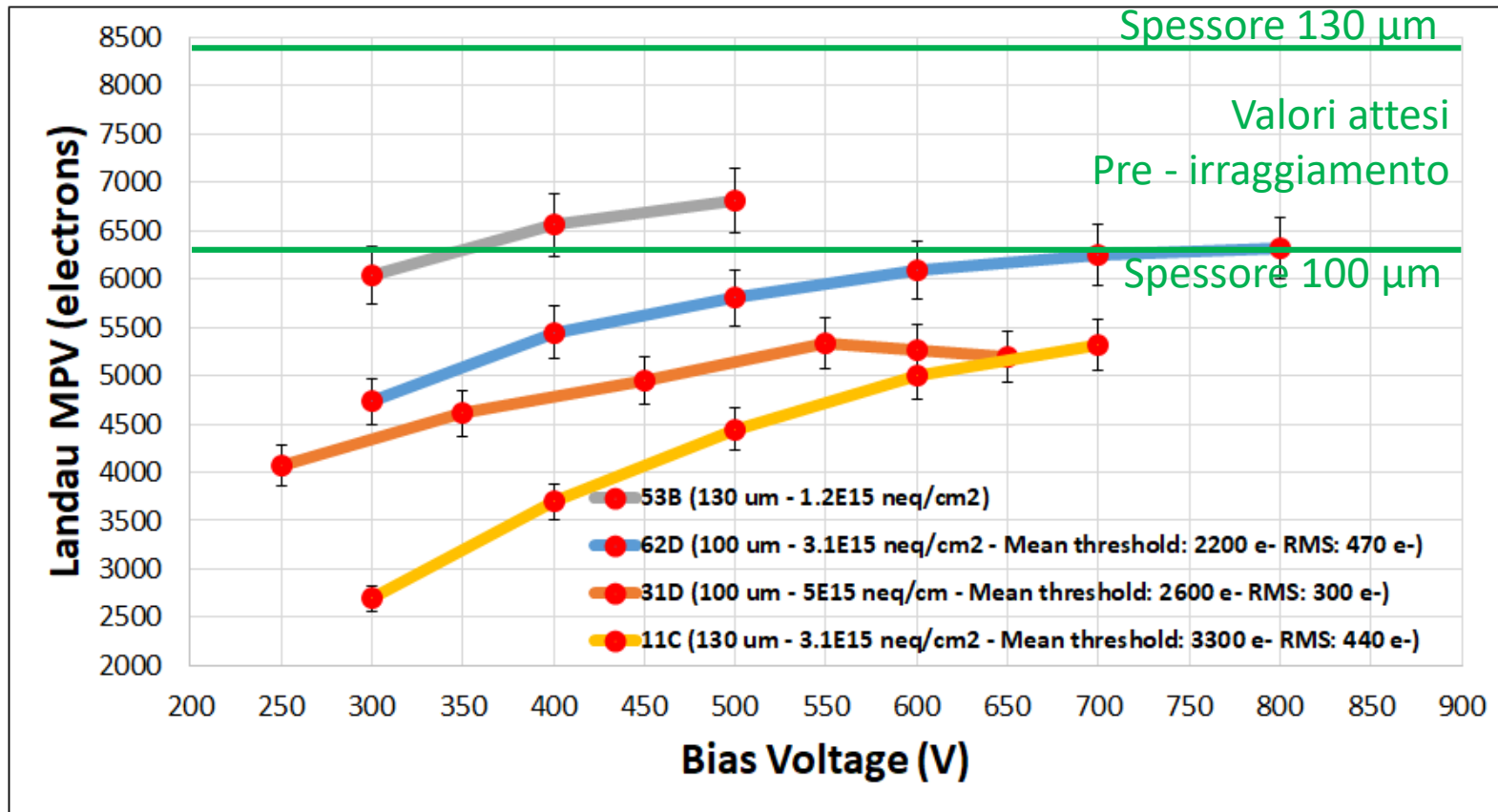
Efficienza vs. Vbias post - irraggiamento



Le soglie sono state scelte in modo da minimizzare il rumore sui rivelatori sotto test

Sensori Planari

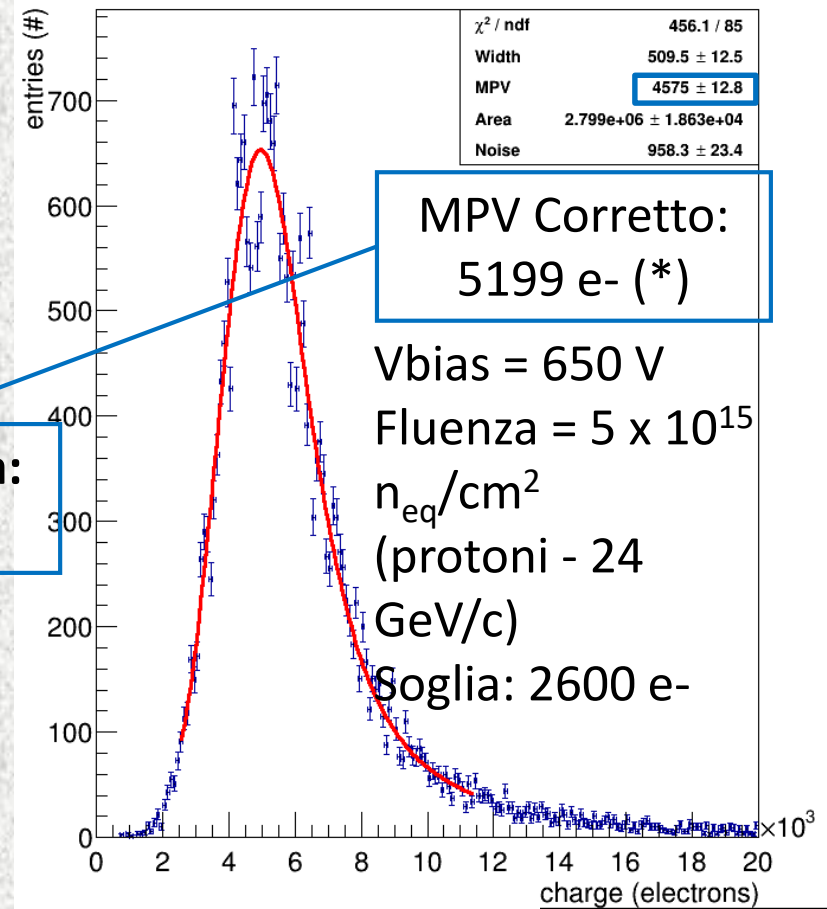
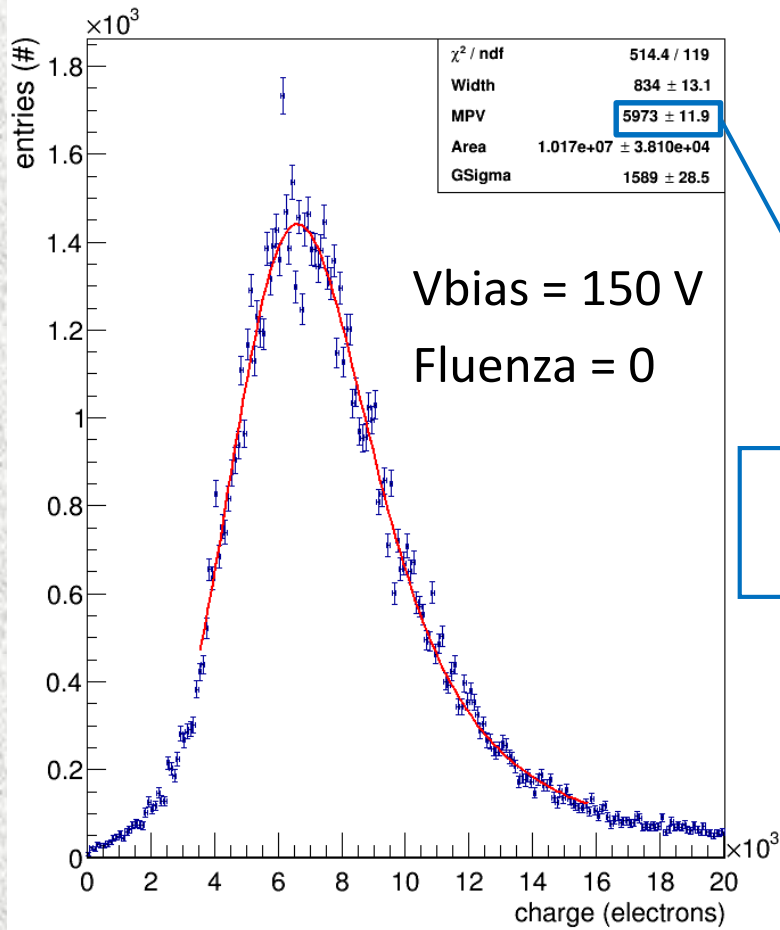
MPV vs. Vbias post - irraggiamento



I MPV delle Landau sono stati corretti per tenere conto della variazione del potenziale del riferimento di tensione bandgap del chip in funzione della dose di irraggiamento

Sensore spessore attivo 100 $\mu\text{m}/5\text{E}15/31\text{D}$

Carica raccolta



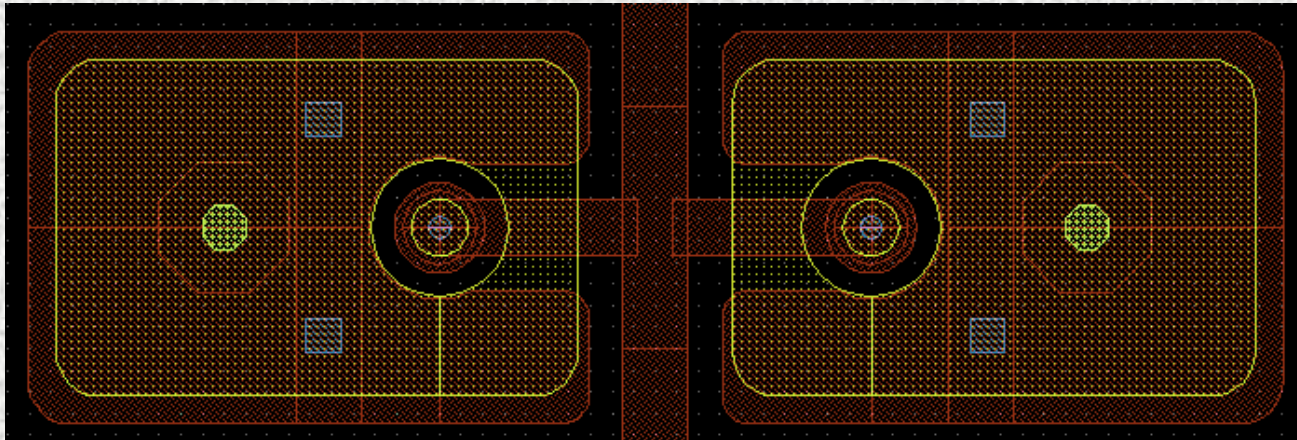
Differenza:
13%

(*) vedi slide 9

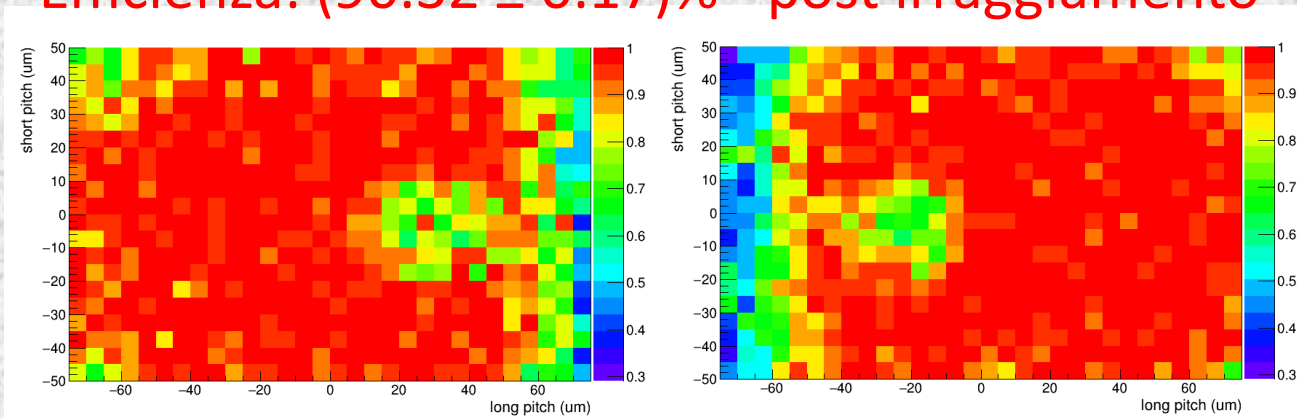
Sensore spessore attivo 100 $\mu\text{m}/5\text{E}15/31\text{D}$

Efficienza

Vbias = 650 V - Fluenza = 5×10^{15} $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ (protoni - 24 GeV/c) – Soglia: 2600 e-



Efficienza: $(90.32 \pm 0.17)\%$ - post irraggiamento

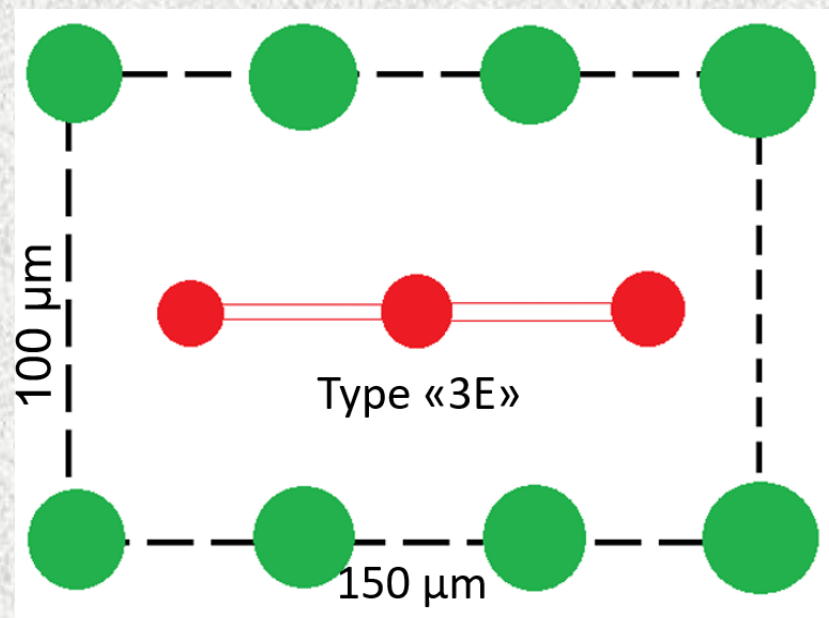
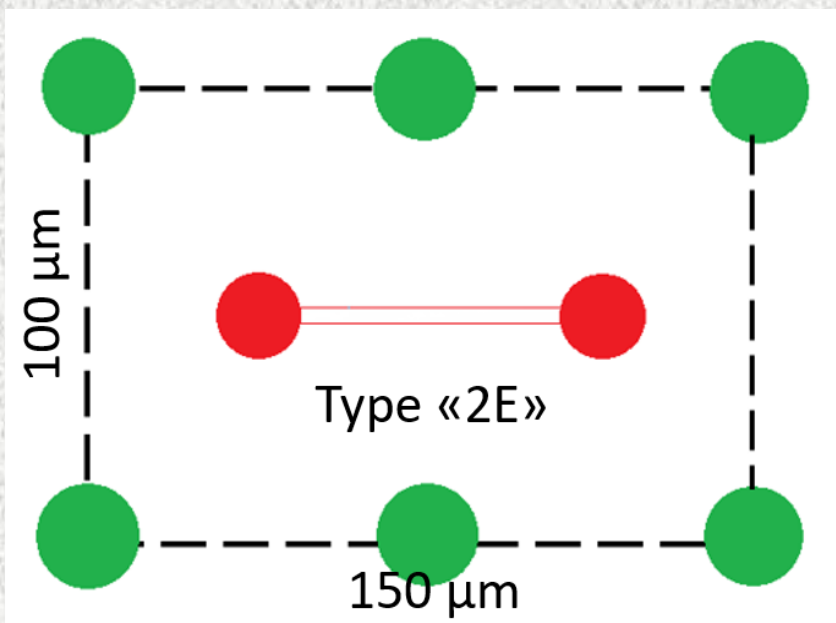


Colonne Pari

Colonne Dispari

Sensori 3D «Standard Pitch»

Chiameremo sensori «standard pitch» quelli con celle di dimensioni $100 \times 150 \mu\text{m}^2$. Queste dimensioni sono compatibili con il passo del ROC che è stato utilizzato.



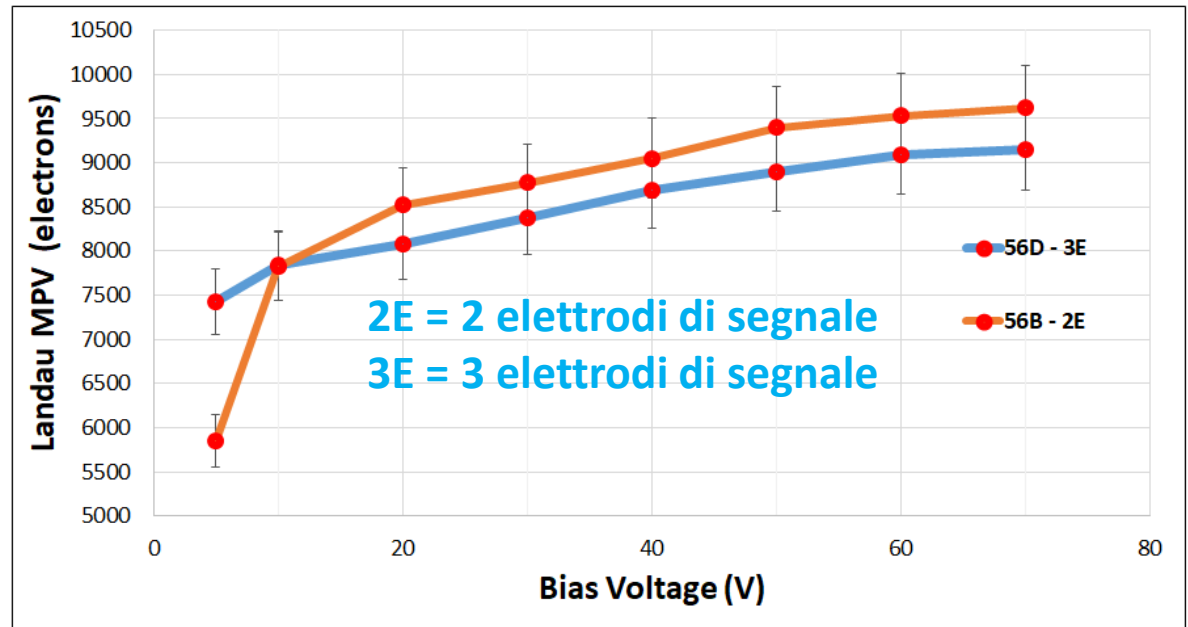
Sensori 3D «Standard Pitch»

MPV vs Vbias

A tensioni superiori a 20 V i valori di picco della carica raccolta dai due tipi di rivelatore sono compatibili

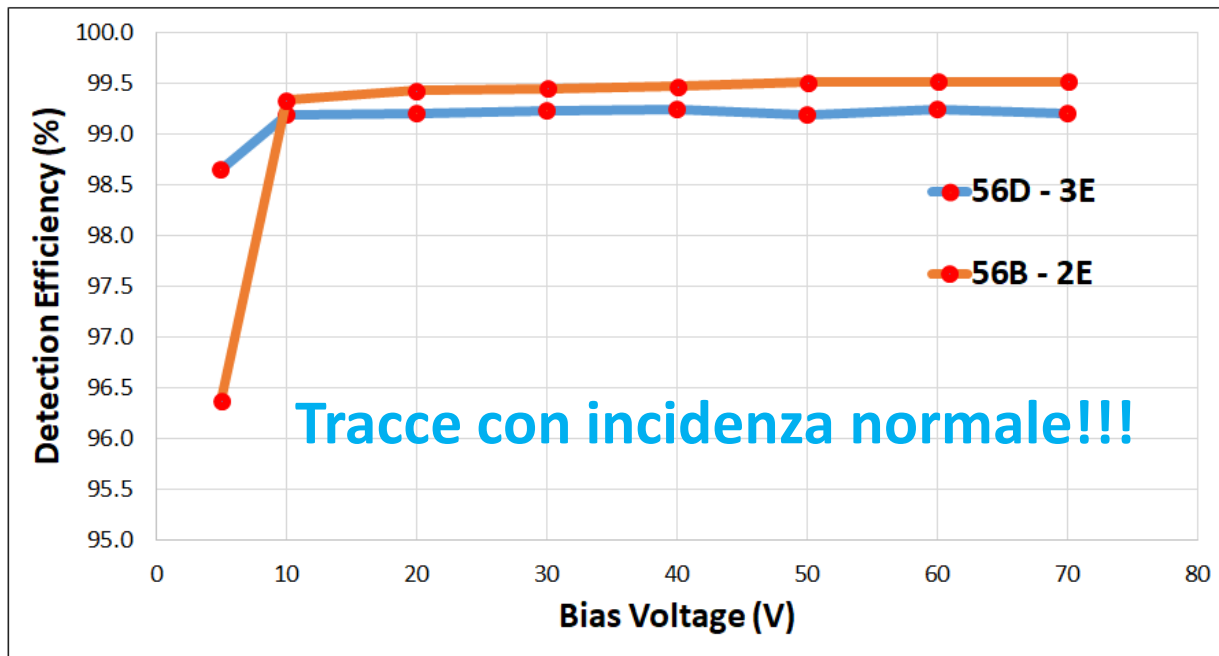
Alla saturazione la carica raccolta dai due rivelatori è compatibile con quella raccolta da rivelatori planari dello stesso spessore attivo

A basse tensioni il rivelatore 3E mostra un'efficienza di raccolta della carica migliore



Sensori 3D «Standard Pitch»

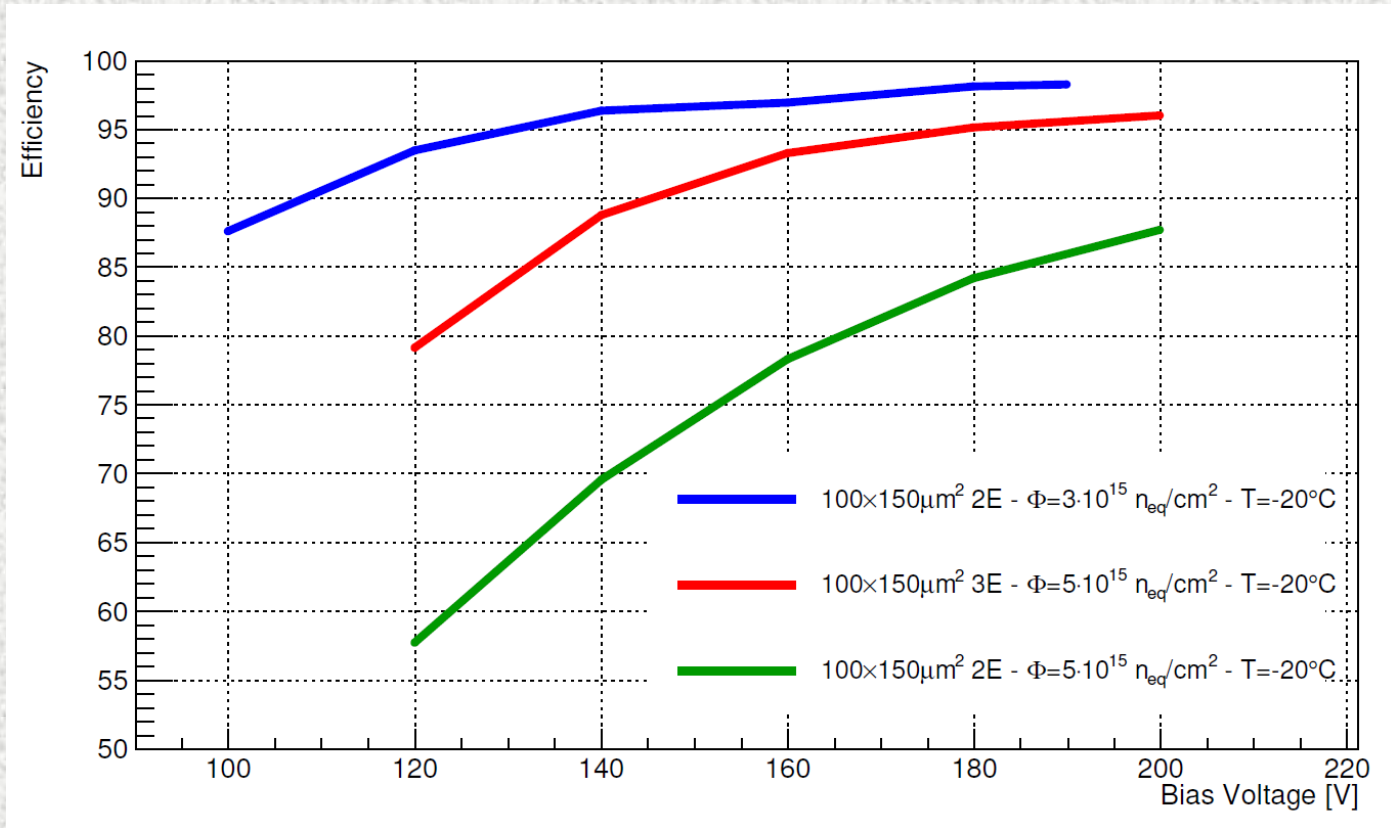
Efficienza vs Vbias



L'efficienza di rivelazione è intrinsecamente limitata dalla totale inefficienza degli impianti colonnari. Di conseguenza i sensori di tipo 3E hanno un'efficienza inferiore a quelli di tipo 2E. La piena efficienza viene recuperata già inclinando il sensore di 5°.

Sensori 3D «Standard Pitch»

Efficienza vs V_{bias} post - irraggiamento

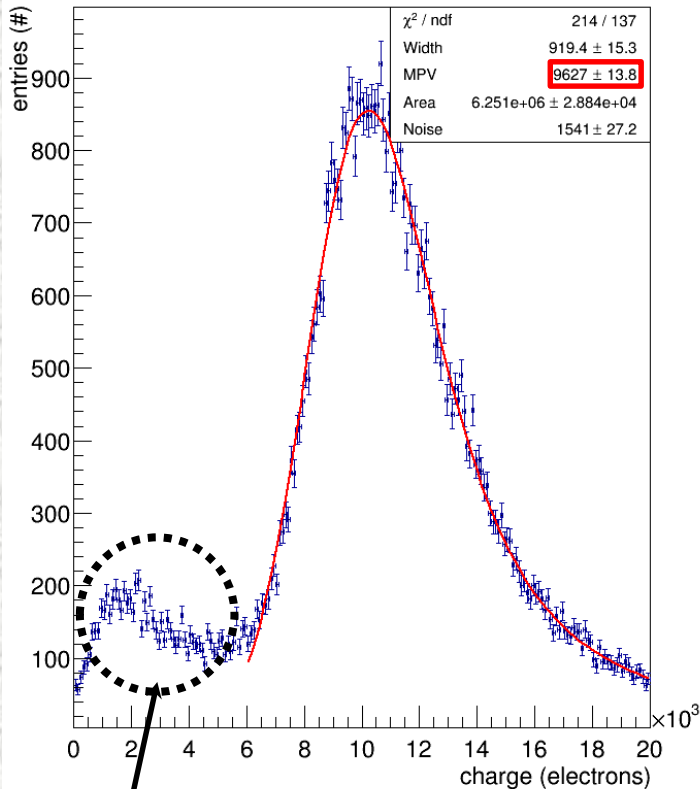


La distanza tra gli elettrodi che generano il campo elettrico è minore nei sensori 3E rispetto ai sensori 2E → a parità di fluensa di irraggiamento i sensori 3E hanno efficienza più alta

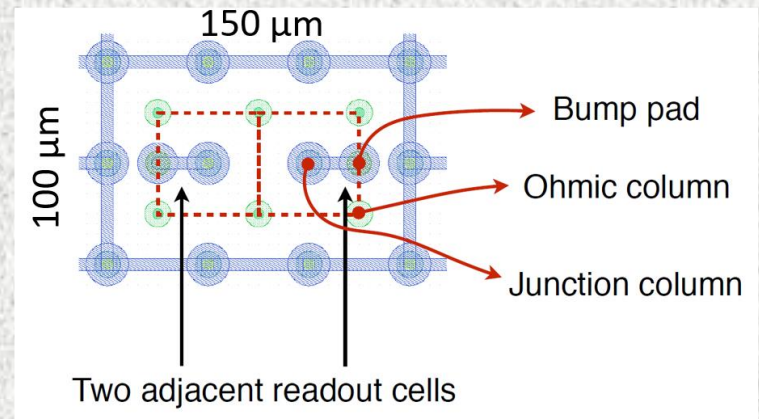
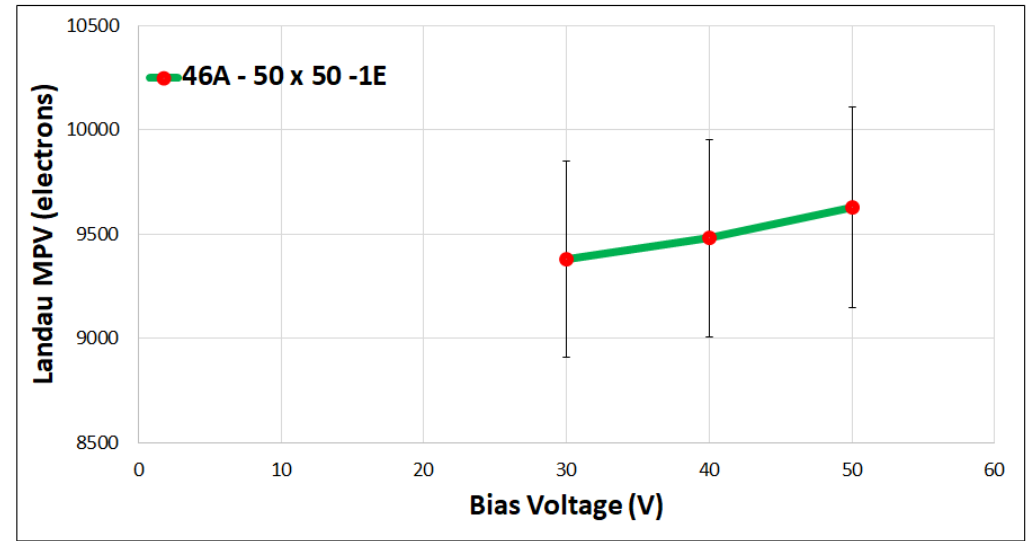
Sensore 3D 50 x 50 μm^2

Carica Raccolta

Vbias = 50 V



*Divisione di carica con pixel
adiacenti non letti (5 su 6)*

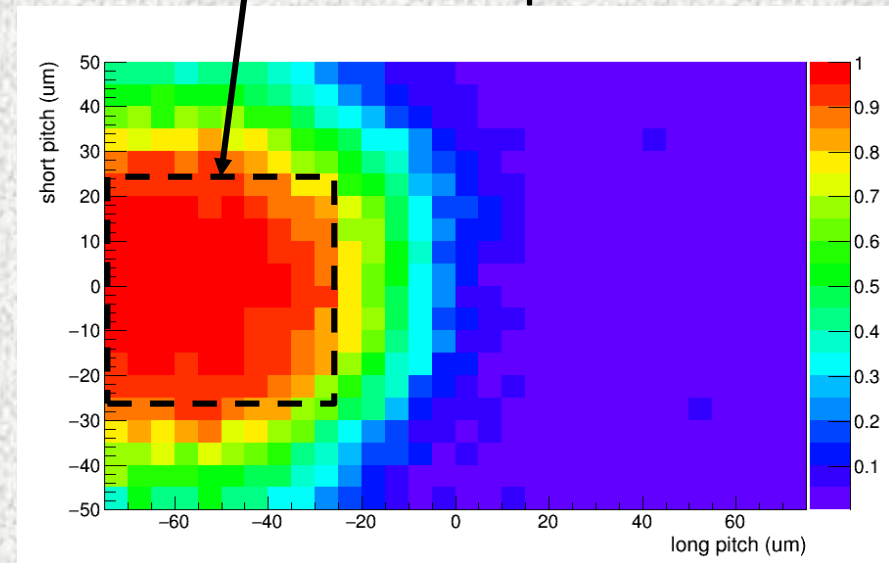
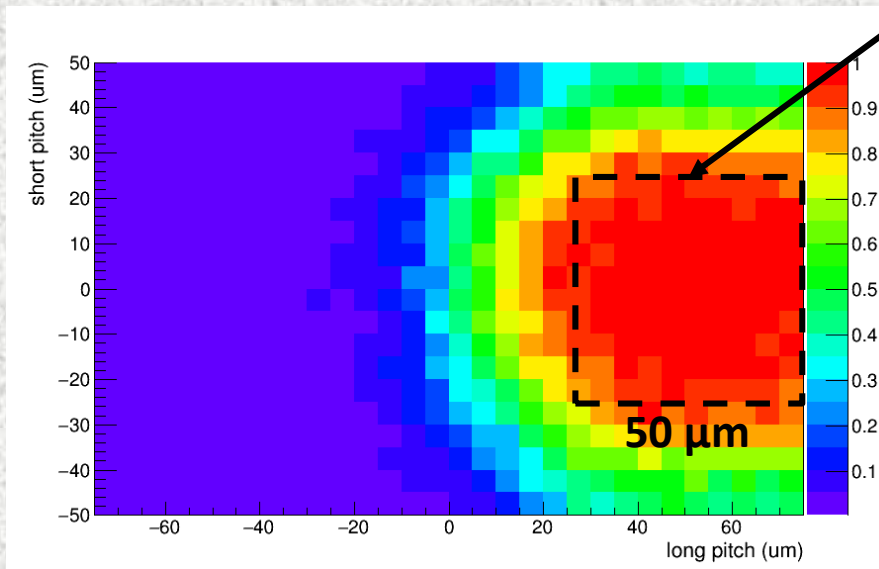


Sensore 3D 50 x 50 μm^2 Efficienza @50V

L'efficienza in corrispondenza della cella di 50 x 50 μm^2 è costante in funzione della tensione di polarizzazione (per $V_{\text{bias}} > 30$ V) e vicina al 100%.

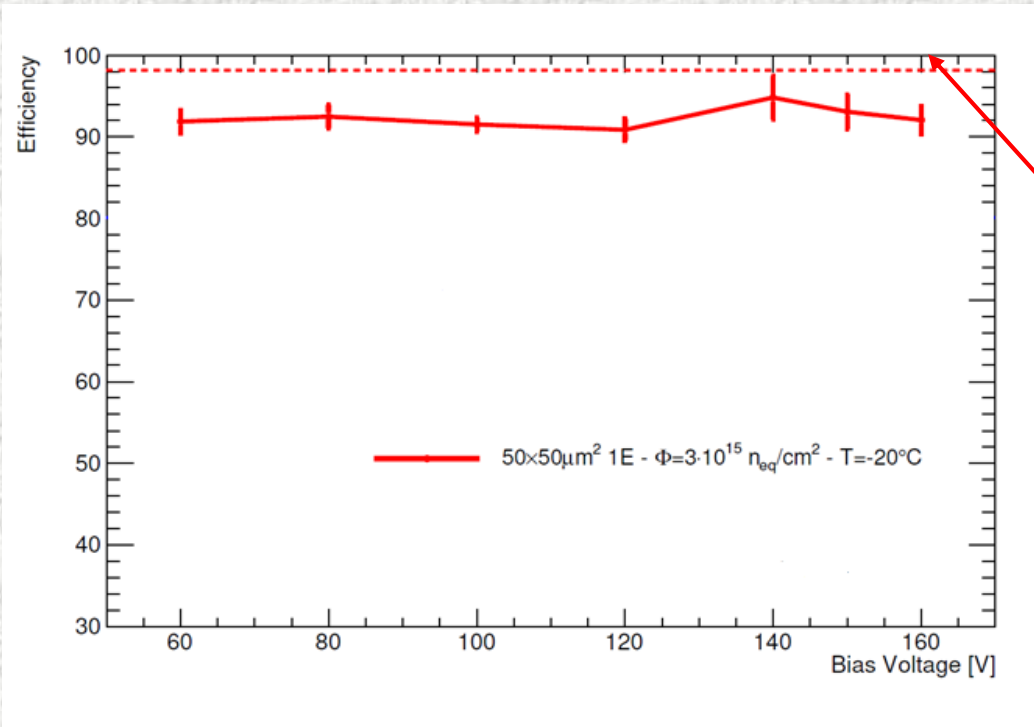
Colonne dispari

Colonne pari



Sensore 3D 50 x 50 μm^2

Efficienza vs V_{bias} post - irraggiamento



Valore misurato prima dell'irraggiamento

Per i sensori «small pitch» l'efficienza è stata misurata nella zona centrale della cella in modo da escludere il contributo di celle adiacenti non lette i cui elettrodi non sono stati messi a massa → è in programma il test di un nuovo wafer in cui gli elettrodi delle celle non lette sono a massa

Conclusioni

- Questi risultati dimostrano che possiamo già realizzare sensori a pixel 3D con celle da $2500 \mu\text{m}^2$ con tecnologia «single side» utilizzando wafer di silicio prodotti con la tecnologia del Direct Wafer Bonding
- I risultati ottenuti a seguito dell'irraggiamento sono promettenti per la produzione di sensori sottili a pixel ultra-resistenti alla radiazione
- Per poter raggiungere fluenze di $2 \times 10^{16} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ è necessario un nuovo chip di lettura, anch'esso resistente alla radiazione, con soglie più basse. Un chip con queste caratteristiche è stato realizzato dalla collaborazione RD53 del CERN, e sarà disponibile a breve
- Il nuovo ROC permetterà anche di leggere tutte le celle di sensori «small pitch»

Molte grazie a...

M. Dinardo, D. Menasce, L. Moroni (Univ. & INFN Milano Bicocca)

R. Ceccarelli, A. Fiaschi, M. Meschini, L. Viliani (Univ. & INFN Firenze)

G. Darbo (INFN Genova)

A. Messineo (Univ. & INFN Pisa)

G. Giacomini, S. Ronchin (FBK)

G.F. Dalla Betta (Univ. & TIFPA-INFN Trento)

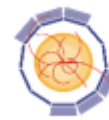
M. Boscardin (FBK & TIFPA-INFN Trento)

I. Zoi (Univ. Hamburg)

R. Rivera, L. Uplegger (FNAL)



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation programme under Grant Agreement no. 654168.



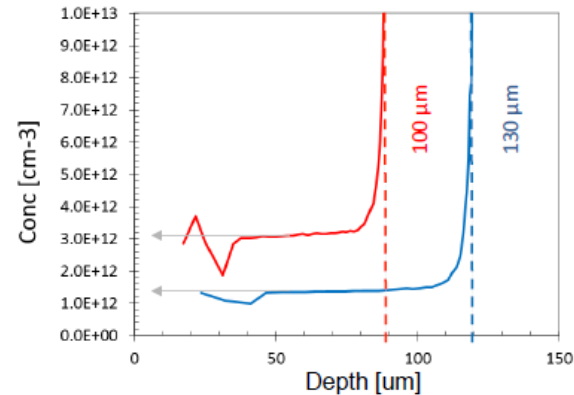
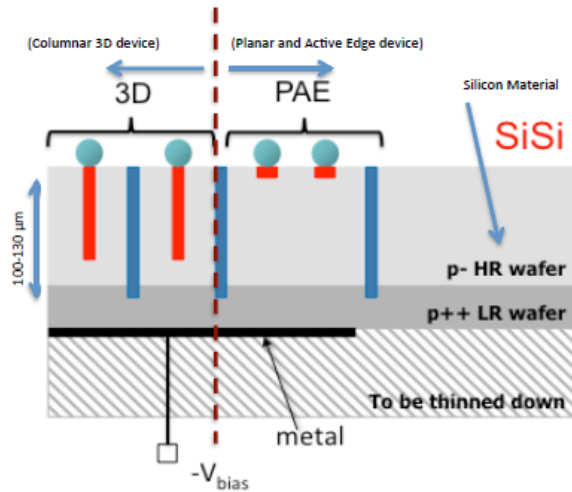
AIDA 2020

“Scienza > tutto”

Backup

Charge Collection Features

Material features: active thickness



- dE/dx reduced for “thin silicon”
 - Down to $\sim 60\%$ of most probable energy loss ($388 \text{ eV}/\mu\text{m}$)
- Charge collection reduced by Boron diffusion
 - At Beam test 6000-8000 electrons expected
 - Measure by ROC PSI45dig: threshold 1500 e + dispersion 120 e

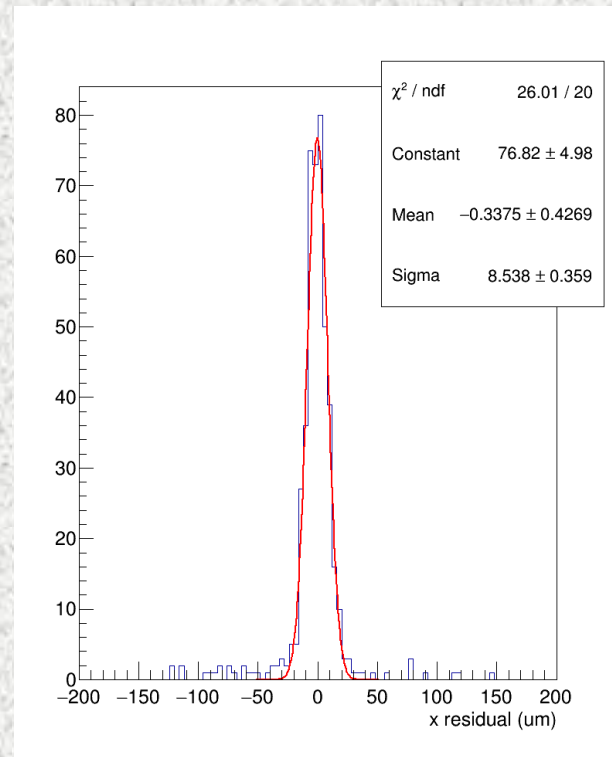
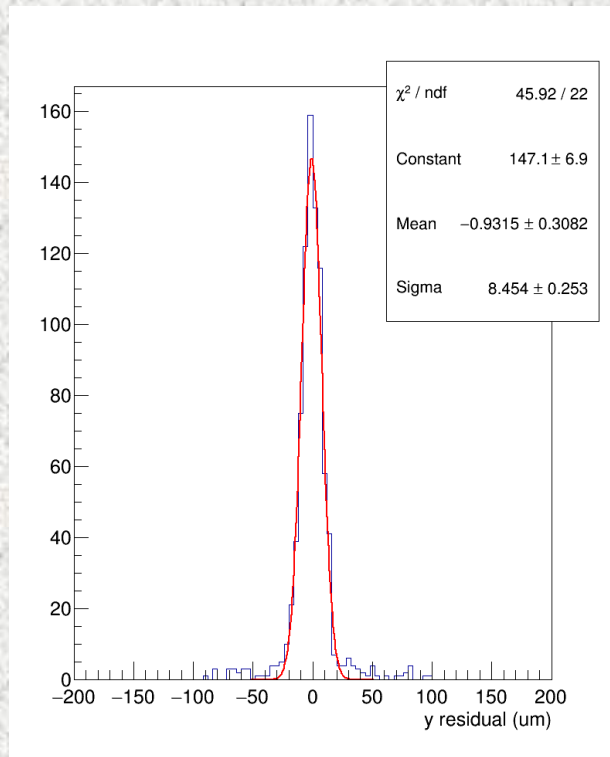
- Doping concentration profile measurement
 - effective thickness reduced by the Boron diffusion (for SiSi) from wafer carrier deep about $10 \mu\text{m}$.

$\beta\gamma$	100 (~ 90)	130 (~ 120)
$\sim 3.$	5919	8068
$\sim 1000.$	6535	8885

Charge collected from theory

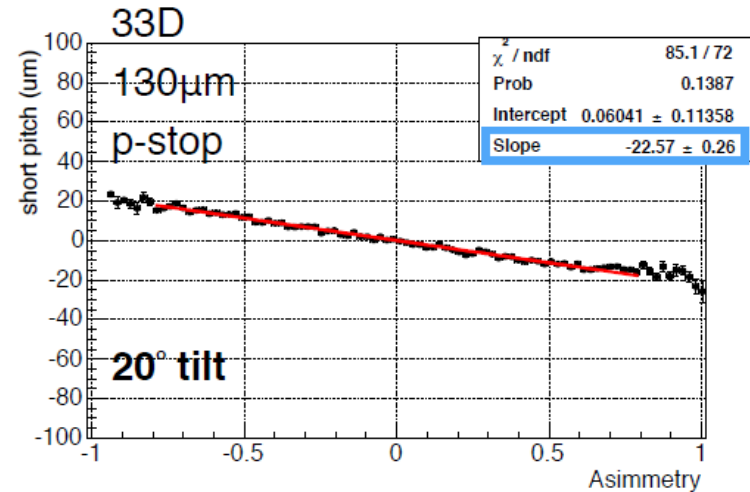
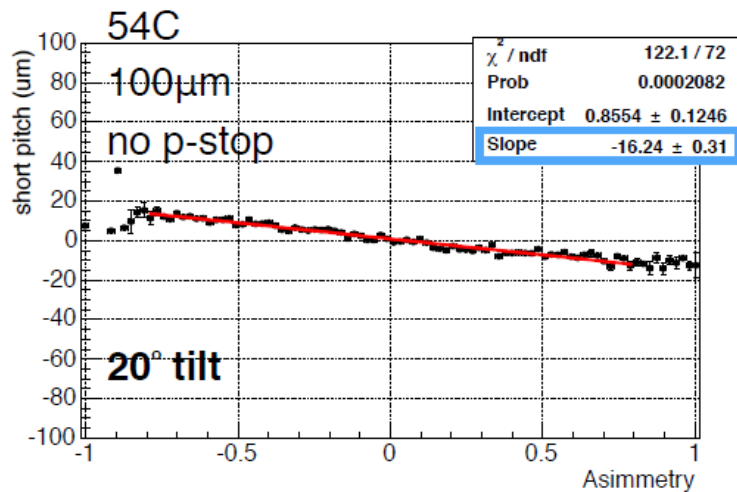
Resolution

Selecting tracks with double hits on all the telescope planes (best resolution), we measured the residuals with respect to the double hits coordinate on the DUT, reconstructed from the measured charge division characteristic.



Subtracting the expected telescope resolution of $7.3 \mu\text{m}$ we measured a resolution of $4.3 \mu\text{m}$ on both transverse coordinates for this DUT

Tilted Sensors Before Rad



Ratio Slope@130 μm / Slope@100 μm is ~ 1.4

Back of an envelope calculations for **Slope** at non-zero incidence angle:

$$w/2 \cdot \tan(\theta) + x \sim \text{charge}_L$$

$$w/2 \cdot \tan(\theta) - x \sim \text{charge}_R$$

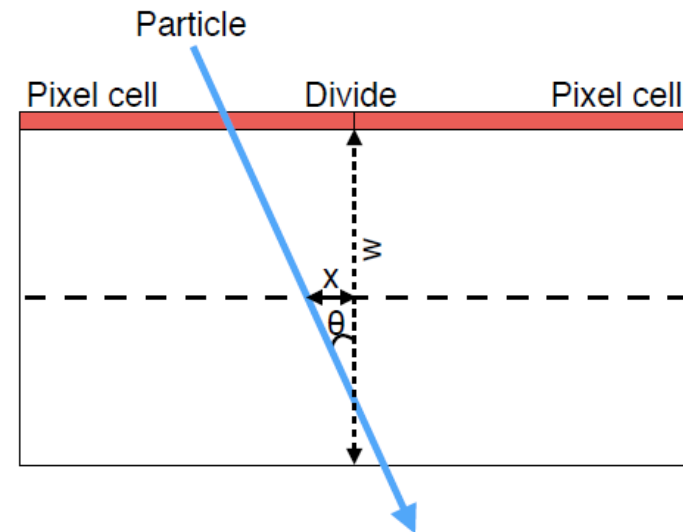
$$\text{Asymmetry} = 2x / (w \cdot \tan(\theta))$$

$$\text{Slope} = x / \text{Asymmetry} = w/2 \cdot \tan(\theta)$$

- $w = 100 \mu\text{m} \rightarrow \text{Slope} = 18.2 \mu\text{m}/\text{asymmetry}$

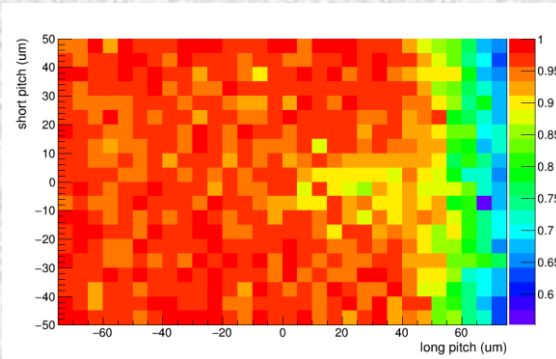
- $w = 130 \mu\text{m} \rightarrow \text{Slope} = 23.7 \mu\text{m}/\text{asymmetry}$

Amazingly close to our measurements

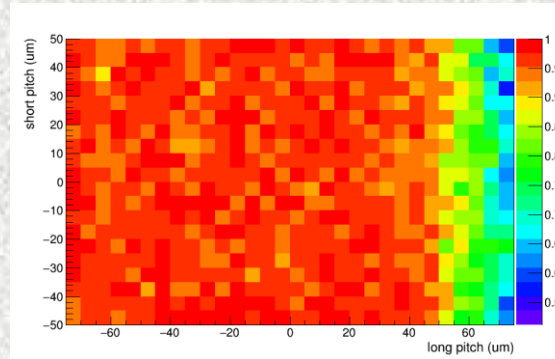


Tilted Sensors After Rad Efficiency Maps

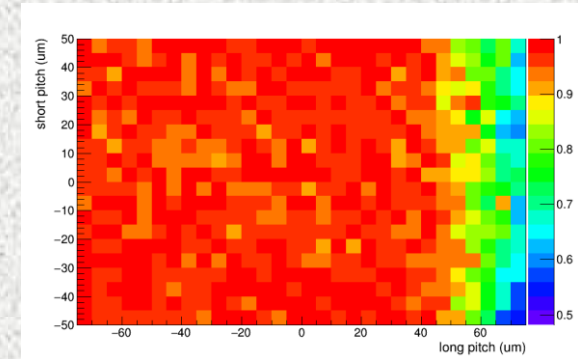
Even Columns



5°

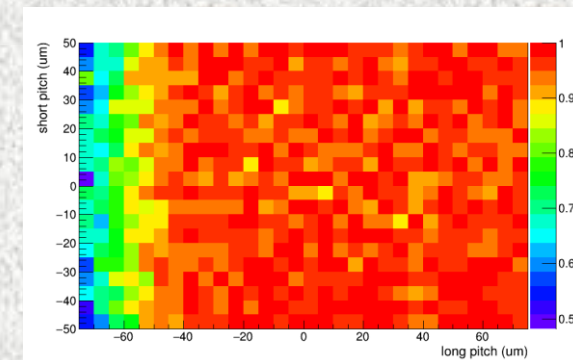
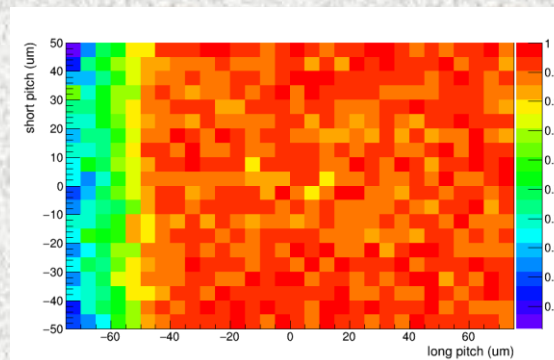
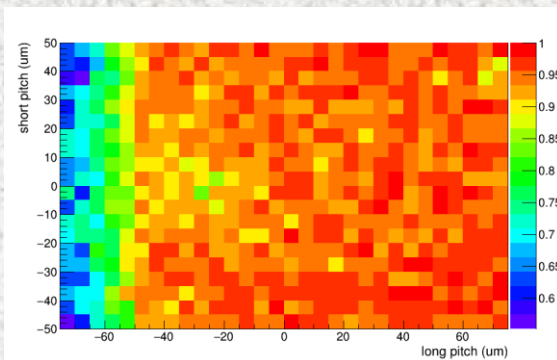


10°

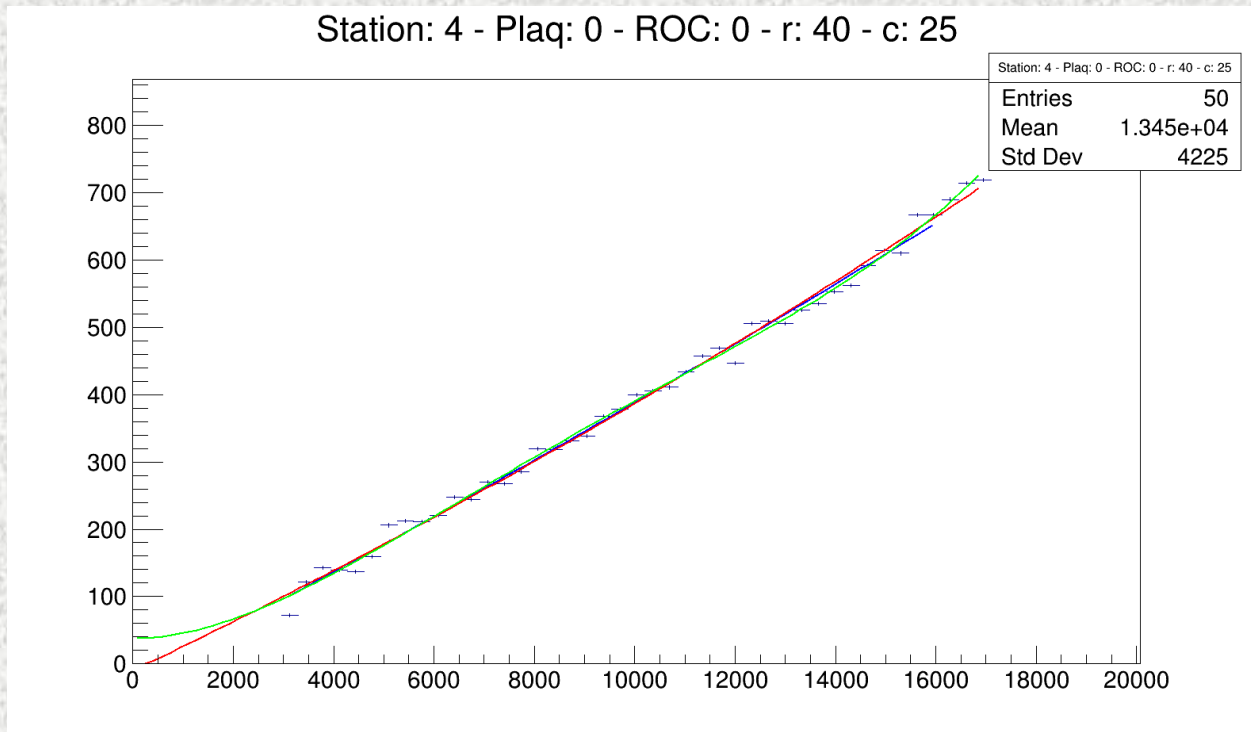


20°

Odd Columns



Calibration Issues

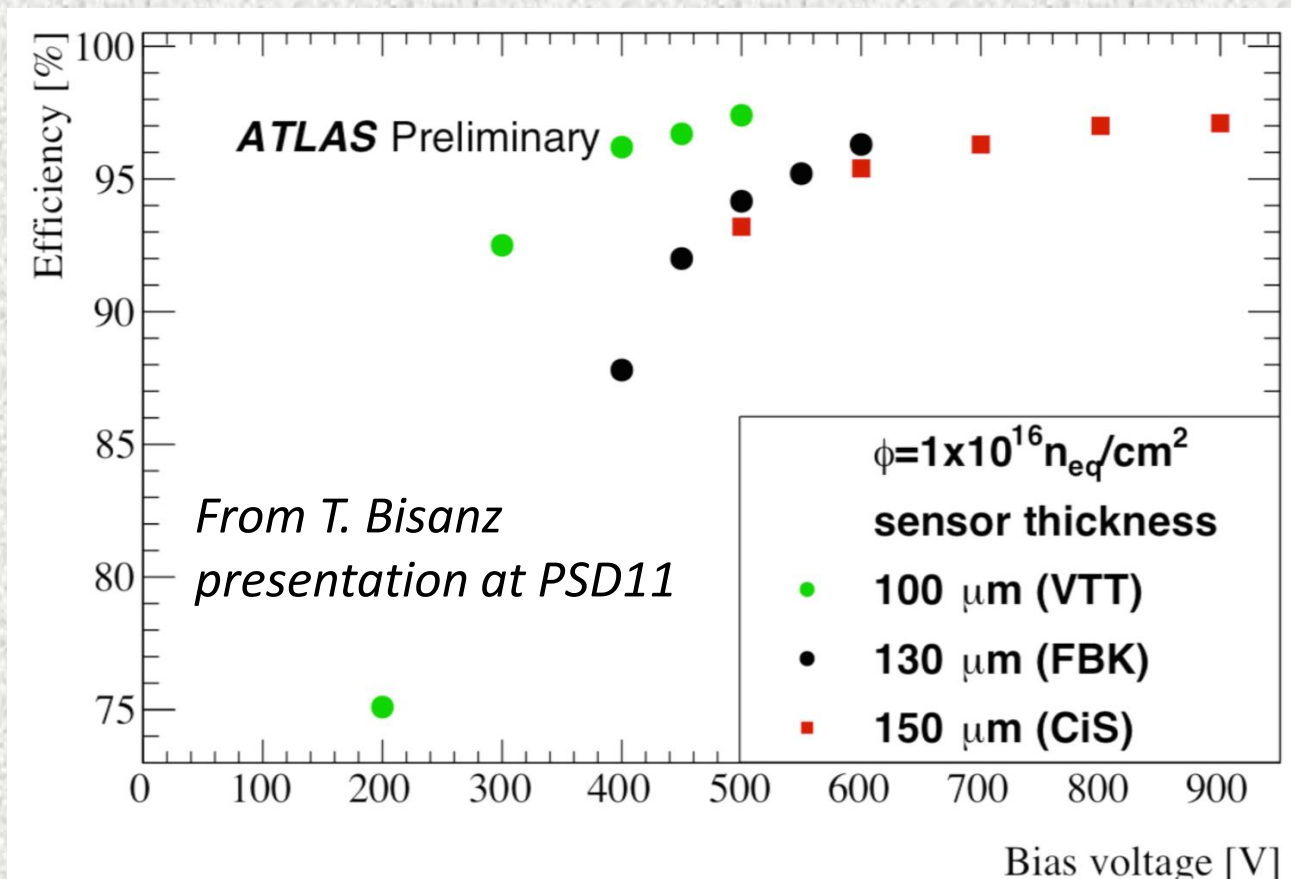


PSI46dig was designed for operations with 300 μm sensors, collecting approximately 22500 e^- . New sensors reach 100 μm thickness, hence lowest collected charge is 6000 e^- . Lower values are reached once detectors are irradiated.

Now we are operating with this ROC in a heavily non linear region of the gain curve. Determination of the collected charge is very hard!!

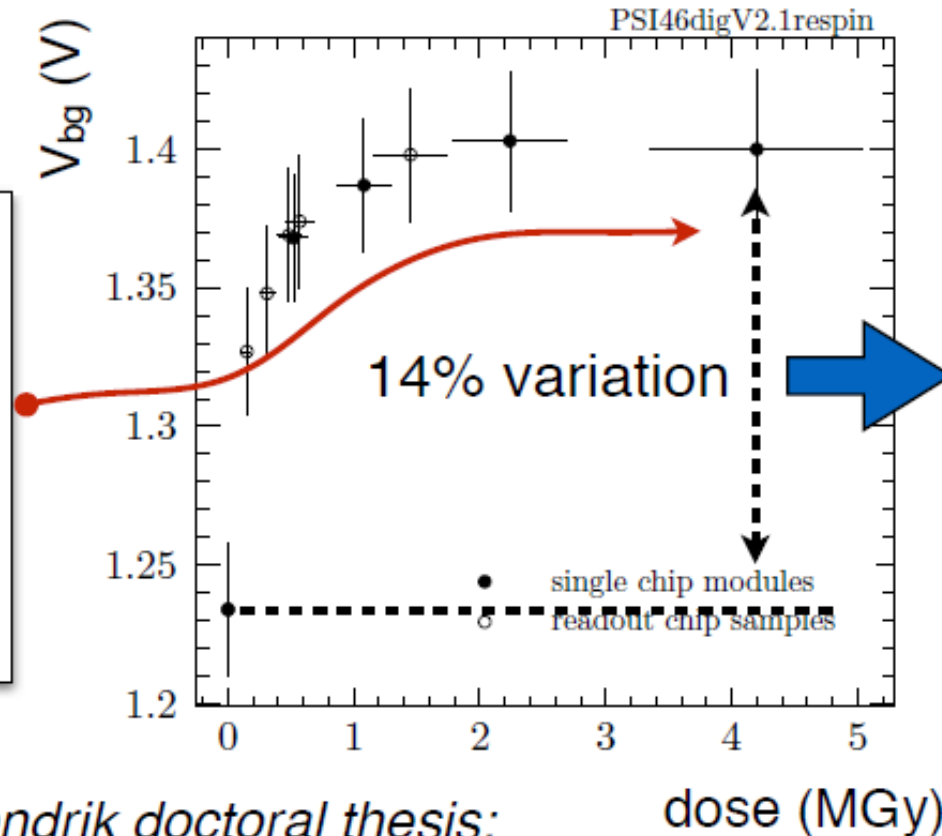
Comparison with other results

ATLAS results obtained at higher irradiation fluences are in agreement with our results in terms of efficiency.



Band-gap reference voltage variation

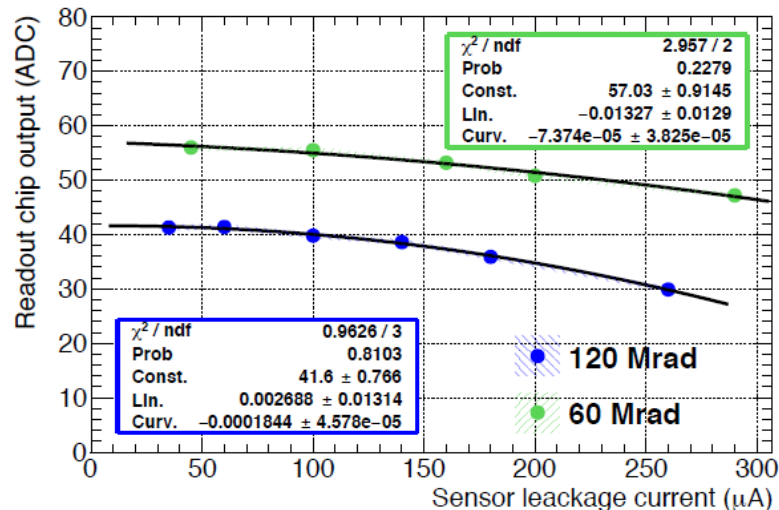
Variation of band gap reference voltage with irradiation → ADC to electron conversion must be corrected



[Hoß, Jan Hendrik doctoral thesis:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000182698>]

Chip gain variation



- PSI46 digital chip with same sensors as those installed right now in CMS (300 μm active thickness)
 - Irradiated with 23 MeV proton beam at Zyklotron AG Karlsruhe
 - 120 Mrad corresponds to $\sim 0.8 \times 10^{15}$ $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
 - 60 Mrad corresponds to $\sim 0.4 \times 10^{15}$ $n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$
- [many thanks to Malte B. and ETH team for providing the sample and the setup]

1. Fit all gain curves (i.e. ADC output vs injected charge) with a second degree polynomial
2. For every ROC and for every voltage (i.e. leakage current), histogram the ADCs for an injected charge of 6 000 electrons

The mean of such an histogram is what is shown in the plot versus leakage current

The gain of the PSI46 digital chip is affected by the leakage current of the sensor