Towards a higher radiation hardness of semiconductor detectors: identification of nuclear fragments in heavy ion collisions exploiting silicon carbide detectors

> Caterina Ciampi, INFN and University of Florence

> > for the SiCILIA collaboration

106 Congresso Nazionale SiF 14-18 settembre 2020

- Carburo di silicio: caratteristiche di interesse
- Tecniche di identificazione
 - Metodo ∆E − E
 - Tecniche di PSA (Pulse Shape Analysis)
- Beam test sui prototipi di rivelatori SiC
- Identificazione di ioni con telescopi $\Delta E E$ basati sui nuovi prototipi SiC.

- Alcuni futuri esperimenti in Fisica Nucleare presentano nuove sfide ai sistemi di rivelazione:
 - fenomeni rari con bassa sezione d'urto \rightarrow fascio ad alta luminosità
 - reazioni in plasma \rightarrow alta temperatura e alta intensità di luce visibile
- Il silicio presenta forti limitazioni in termini di resistenza al danno da radiazione

- Alcuni futuri esperimenti in Fisica Nucleare presentano nuove sfide ai sistemi di rivelazione:
 - fenomeni rari con bassa sezione d'urto \rightarrow fascio ad alta luminosità
 - reazioni in plasma → alta temperatura e alta intensità di luce visibile
- Il silicio presenta forti limitazioni in termini di resistenza al danno da radiazione
- Possiamo trovare un materiale alternativo?

- Alcuni futuri esperimenti in Fisica Nucleare presentano nuove sfide ai sistemi di rivelazione:
 - fenomeni rari con bassa sezione d'urto \rightarrow fascio ad alta luminosità
 - reazioni in plasma \rightarrow alta temperatura e alta intensità di luce visibile
- Il silicio presenta forti limitazioni in termini di resistenza al danno da radiazione
- Possiamo trovare un materiale alternativo?
- Il carburo di silicio (SiC) è un semiconduttore ad ampio band gap
- Il SiC è un interessante sostituto del silicio, in quanto è caratterizzato da:
 - le eccellenti proprietà dei rivelatori a Si (risoluzione, efficienza, linearità, compattezza)
 - maggiore radiation hardness, (*Raciti et al., Nucl. Phys. A 834 (1) (2010)* 784c-787c)
 - maggiore stabilità termica
 - insensibilità alla luce visibile
 - ottime caratteristiche per le applicazioni di timing

- Alcuni futuri esperimenti in Fisica Nucleare presentano nuove sfide ai sistemi di rivelazione:
 - fenomeni rari con bassa sezione d'urto \rightarrow fascio ad alta luminosità
 - reazioni in plasma → alta temperatura e alta intensità di luce visibile
- Il silicio presenta forti limitazioni in termini di resistenza al danno da radiazione
- Possiamo trovare un materiale alternativo?
- Il carburo di silicio (SiC) è un semiconduttore ad ampio band gap
- Il SiC è un interessante sostituto del silicio, in quanto è caratterizzato da:
 - le eccellenti proprietà dei rivelatori a Si (risoluzione, efficienza, linearità, compattezza)
 - maggiore radiation hardness, (*Raciti et al., Nucl. Phys. A 834 (1) (2010)* 784c-787c)
 - maggiore stabilità termica
 - insensibilità alla luce visibile
 - ottime caratteristiche per le applicazioni di timing

- Alcuni futuri esperimenti in Fisica Nucleare presentano nuove sfide ai sistemi di rivelazione:
 - fenomeni rari con bassa sezione d'urto \rightarrow fascio ad alta luminosità
 - reazioni in plasma → alta temperatura e alta intensità di luce visibile
- Il silicio presenta forti limitazioni in termini di resistenza al danno da radiazione
- Possiamo trovare un materiale alternativo?
- Il carburo di silicio (SiC) è un semiconduttore ad ampio band gap
- Il SiC è un interessante sostituto del silicio, in quanto è caratterizzato da:
 - le eccellenti proprietà dei rivelatori a Si (risoluzione, efficienza, linearità, compattezza)
 - maggiore radiation hardness, (*Raciti et al., Nucl. Phys. A 834 (1) (2010)* 784c-787c)
 - maggiore stabilità termica
 - insensibilità alla luce visibile
 - ottime caratteristiche per le applicazioni di timing

- Alcuni futuri esperimenti in Fisica Nucleare presentano nuove sfide ai sistemi di rivelazione:
 - fenomeni rari con bassa sezione d'urto \rightarrow fascio ad alta luminosità
 - reazioni in plasma → alta temperatura e alta intensità di luce visibile
- Il silicio presenta forti limitazioni in termini di resistenza al danno da radiazione
- Possiamo trovare un materiale alternativo?
- Il carburo di silicio (SiC) è un semiconduttore ad ampio band gap
- Il SiC è un interessante sostituto del silicio, in quanto è caratterizzato da:
 - le eccellenti proprietà dei rivelatori a Si (risoluzione, efficienza, linearità, compattezza)
 - maggiore radiation hardness, (*Raciti et al., Nucl. Phys. A 834 (1) (2010)* 784c-787c)
 - maggiore stabilità termica
 - insensibilità alla luce visibile
 - ottime caratteristiche per le applicazioni di timing
- Non sono disponibili in commercio dei rivelatori SiC con le caratteristiche richieste (spessore, area attiva, omogeneità e purezza) da alcuni esperimenti (e.g. NUMEN, NRLP)

Il progetto SiCILIA

SiCILIA

Silicon Carbide Detectors for Intense Luminosity Investigations and Applications

Progetto finanziato dalla CSN5 dell'INFN Partecipazione di più Sezioni INFN, IMM-CNR (Institute for Microelectronics and Microsensors), STMicroelectronics, FBK



- R&D di processi per la produzione di sistemi di rivelazione in SiC
- Obiettivo: produzione di rivelatori SiC spessi, di area ~cm², e con basso livello di impurità

Il progetto SiCILIA

SiCILIA

Silicon Carbide Detectors for Intense Luminosity Investigations and Applications

Progetto finanziato dalla CSN5 dell'INFN Partecipazione di più Sezioni INFN, IMM-CNR (Institute for Microelectronics and Microsensors), STMicroelectronics, FBK



- R&D di processi per la produzione di sistemi di rivelazione in SiC
- Obiettivo: produzione di rivelatori SiC spessi, di area ~cm², e con basso livello di impurità
- Gruppo Ioni Pesanti INFN-Sez. di Firenze (cfr. FAZIA) → studio delle performance dei prototipi di rivelatori SiC in termini di identificazione di frammenti nucleari applicando due tecniche:
 - Metodo $\Delta E E$
 - Tecniche di PSA (Pulse Shape Analysis)

Metodo $\Delta E - E$



 La tecnica ∆E – E è basata sul meccanismo di dissipazione dell'energia cinetica di particelle cariche nella materia → Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_e v^2} N z \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

Metodo $\Delta E - E$



 La tecnica ∆E – E è basata sul meccanismo di dissipazione dell'energia cinetica di particelle cariche nella materia → Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_e v^2} Nz \left[\ln \frac{2m_e v^2}{l} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$



 Grafico di correlazione ∆E – E: istogramma 2D ∆E (primo stadio) vs. E (secondo stadio)



[Carboni et al., NIM A 664(2012) 251-263]

Metodo $\Delta E - E$



Metodo $\Delta E - E$



 La tecnica ∆E – E è basata sul meccanismo di dissipazione dell'energia cinetica di particelle cariche nella materia → Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_e v^2} Nz \left[\ln \frac{2m_e v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

• Se non relativistico (
$$E_0 = \Delta E + E_{res}$$
):
 $\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2} \cdot \Delta x \propto \frac{Z^2 A}{E_0} \cdot \Delta x \Rightarrow \Delta E \cdot E_0 = kZ^2 A$



- Grafico di correlazione ∆E E: istogramma 2D ∆E (primo stadio) vs. E (secondo stadio)
- Identificazione possibile per particelle che si fermano nel secondo stadio

[Carboni et al., NIM A 664(2012) 251-263]

Metodo $\Delta E - E$



 La tecnica ∆E – E è basata sul meccanismo di dissipazione dell'energia cinetica di particelle cariche nella materia → Bethe-Bloch

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_e v^2} Nz \left[\ln \frac{2m_e v^2}{l} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right]$$

• Se non relativistico (
$$E_0 = \Delta E + E_{res}$$
):
 $\Delta E \propto \frac{Z^2}{v^2} \cdot \Delta x \propto \frac{Z^2 A}{E_0} \cdot \Delta x \Rightarrow \Delta E \cdot E_0 = kZ^2 A$



[Carboni et al., NIM A 664(2012) 251-263]

- Grafico di correlazione ΔE E: istogramma 2D ΔE (primo stadio) vs. E (secondo stadio)
- Identificazione possibile per particelle che si fermano nel secondo stadio
- ...ma non per quelle fermate nel primo stadio!

Pulse Shape Analysis (PSA)

• I metodi di PSA, usati per particelle che si fermano nel rivelatore, si basano sulla dipendenza della forma del segnale dalla densità di ionizzazione lungo la traccia della particella incidente

Pulse Shape Analysis (PSA)

- I metodi di PSA, usati per particelle che si fermano nel rivelatore, si basano sulla dipendenza della forma del segnale dalla densità di ionizzazione lungo la traccia della particella incidente
- Es. Energia vs. rise-time segnale di carica (charge preamp output) o...



Pulse Shape Analysis (PSA)

- I metodi di PSA, usati per particelle che si fermano nel rivelatore, si basano sulla dipendenza della forma del segnale dalla densità di ionizzazione lungo la traccia della particella incidente
- Es. Energia vs. rise-time segnale di carica (charge preamp output) o...
- Energia vs. massimo del segnale di corrente



Pulse Shape Analysis (PSA)

- I metodi di PSA, usati per particelle che si fermano nel rivelatore, si basano sulla dipendenza della forma del segnale dalla densità di ionizzazione lungo la traccia della particella incidente
- Es. Energia vs. rise-time segnale di carica (charge preamp output) o...
- Energia vs. massimo del segnale di corrente
- Soglia di energia per identificazione minore rispetto a tecnica ∆E – E
- Rivelatore in "reverse mounting" [Le Neindre et al., NIM A 701(2013) 145-152]
- La forma del segnale deve dipendere solo da (Z, A) ed energia del frammento e NON dalla posizione di impatto (es. campo elettrico non uniforme) → necessaria uniformità di drogaggio del rivelatore



Test sui rivelatori SiC

Design dei rivelatori





Rivelatore a giunzione p/n Epilayer n^- 10 μ m (nomin.) su substrato spesso 100 μ m $N_D = 5 \div 8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \rightarrow V_d$ pochi volt Area attiva: 10 × 10 mm²

Rivelatore a giunzione p/n Epilayer n^- 100 μ m (nomin.) su substrato spesso 300 μ m $N_D = 0.3 \div 8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \rightarrow V_d$ tra 25 e 500 V Area attiva: 10 × 10 mm² divisa in 4 pad

[Tudisco et al., Sensors 18 (7), 2018]

Rivelatore Schottky Epilayer n^- 10 μ m (nomin.) su substrato spesso 100 μ m $N_D = 5 \div 8 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3} \rightarrow V_d$ pochi volt Area attiva: $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (Non usato in questi beam test) Telescopi $\Delta E - E$ e beam test

- Tre telescopi con diverse configurazioni assemblati per i beam test sfruttando i prototipi SiC prodotti dalla collaborazione SiCILIA (due run, 02/18 - 05/18)
- Montaggio in camera di scattering CICLOPE presso i Laboratori Nazionali del Sud (LNS) di Catania, insieme all'apparato FAZIA
 - ^{40,48}Ca+¹²C at 25 MeV/n;
 - ⁴⁸Ca+¹²C at 40 MeV/n.
- Telescopi posizionati a circa 8° rispetto all'asse del fascio



- Segnali di output dal preamplificatore di carica digitalizzati e memorizzati
- I segnali digitalizzati sono processati offline (Digital Signal Processing)

Identificazione con $\Delta E - E$ I



- SiC (13 μm, misurato)+SiC (100 μm)+CsI(TI)
- Eventi di punch-through non eliminati a causa del secondo strato morto

Identificazione con $\Delta E - E$ I



- SiC (13 μm, misurato)+SiC (100 μm)+CsI(TI)
- Eventi di punch-through non eliminati a causa del secondo strato morto → taglio grafico

Identificazione con $\Delta E - E$ I



- SiC (13 μm, misurato)+SiC (100 μm)+CsI(TI)
- Eventi di punch-through non eliminati a causa del secondo strato morto → taglio grafico
- Procedura di linearizzazione → distribuzione dei valori PI (particle identification)



Caterina Ciampi

- Distribuzione dei valori di PI ottenuti con telescopio A
- Buona identificazione in Z fino a Z ~ 21 – 22



- Distribuzione dei valori di Pl ottenuti con telescopio A
- Buona identificazione in Z fino a Z ~ 21 – 22
- Nessuna separazione isotopica → rumore elettronico + energy straggling nel primo stadio (spessore 13 μm)



- L'effetto dell' energy straggling è infatti tanto maggiore quanto più è sottile il rivelatore ΔE (regime di Bohr: $\delta(\Delta E)/\sigma_{Bohr} \propto \sqrt{\Delta x}$)
- Simulazione ∆E E, con solo straggling energetico → II limite intrinseco dovuto all'energy straggling non è stato raggiunto

- Distribuzione dei valori di Pl ottenuti con telescopio A
- Buona identificazione in Z fino a Z ~ 21 – 22
- Nessuna separazione isotopica → rumore elettronico + energy straggling nel primo stadio (spessore 13 μm)



- L'effetto dell' energy straggling è infatti tanto maggiore quanto più è sottile il rivelatore ΔE (regime di Bohr: $\delta(\Delta E)/\sigma_{Bohr} \propto \sqrt{\Delta x}$)
- Simulazione ∆E E, con solo straggling energetico → II limite intrinseco dovuto all'energy straggling non è stato raggiunto
- Soglia di identificazione ~ 1.5 MeV/n

Identificazione con $\Delta E - E$ I



- SiC (100 μm)+Si (500 μm)+CsI(Tl)
- Ottima identificazione in Z
- Separazione isotopica fino a Z = 14

1 ∃ →



Identificazione con $\Delta E - E$ I



Caterina Ciampi

Identificazione con $\Delta E - E$ I



- SiC (100 μm)+Si (500 μm)+CsI(Tl)
- Ottima identificazione in Z
- Separazione isotopica fino a Z = 14

1 3

• Si applica la procedura di linearizzazione...



Telescopio B Identificazione con $\Delta E - E$ II

 ...e si ottiene la distribuzione dei valori di PI.



100 Caterina Ciampi

Z=1

រុ រដ្ឋាភ្លូ ភូមិ500

3000

2500

1500

1000

500 F

SiC detectors for ion identification

Telescopio B Identificazione con $\Delta E - E$ II

- ...e si ottiene la distribuzione dei valori di PI.
- La qualità della separazione si esprime in termini di Figure of Merit

$$FoM = \frac{|PI_2 - PI_1|}{(FWHM_1 + FWHM_2)}$$

 FoM > 0.7 per tutti gli isotopi fino a Z ~ 14



He

1500

PI

1000

10

10²

10

PSA con segnale di carica I



- Grafico energia vs. rise time (10%-90%) del segnale di carica sul primo stadio (imponendo il veto sul secondo stadio)
- Rise time ottenuto applicando digital Constant Fraction Discriminators al segnale digitalizzato
- Si riconoscono delle linee di correlazione relative a diversi elementi: buona identificazione in *Z*
- Nei rivelatori in Si è stato osservato che si ottiene una migliore separazione diminuendo la tensione applicata (~ V_d) [Pasquali et al., EPJ A(2014) 50: 86]

PSA con segnale di carica II



- Un pad del rivelatore al primo stadio (B-SiC1bis) è contropolarizzato con una tensione minore
- Grafico energia vs. rise time (20%-70%) del segnale di carica di B-SiC1bis
- La performance è migliore: è anche possibile notare risoluzione isotopica sulle particelle più leggere!

- Abbiamo studiato le performance di alcuni prototipi di rivelatori SiC in termini di capacità di identificazione di frammenti nucleari: per la prima volta in questo lavoro, i rivelatori SiC sono stati adoperati in una configurazione a telescopio $\Delta E E$
- Abbiamo ottenuto una buona identificazione in Z, sia applicando la tecnica $\Delta E E$ che i metodi di PSA
- Sono in corso studi sulla charge collection efficiency e sulla radiation hardness dei dispositivi prodotti

- S. Tudisco, F. La Via et al., SiCILIA Silicon Carbide Detectors for Intense Luminosity Investigations and Applications, (2018) Sensors 18(7), 2289
- S. Tudisco, C. Altana et al., Silicon carbide for future intense luminosity nuclear physics investigations, (2019) Il Nuovo Cimento C, Vol.42, Iss.2-3, X
- C. Ciampi, G. Pasquali et al., Nuclear fragment identification with ∆E E telescopes exploiting silicon carbide detectors, (2019) NIM A 925, 60-69
- M. Rebai, D. Rigamonti et al., *New thick silicon carbide detectors: Response to 14 MeV neutrons and comparison with single-crystal diamonds*, (2019) NIM A 926, 162637
- F. La Via, S. Tudisco et al., *Silicon Carbide devices for radiation detection and measurements*, (2020) Journal of Physics: Conference Series Vol.1561, Iss.1, 012013