



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA BIOMEDICA

TITOLO TESI

**ULTRA FAST SILICON DETECTORS (UFSD);
APPLICAZIONI BIOMEDICHE**

Relatore: Prof. Meneghesso Gaudenzio

Laureanda: Roncato Gioia

ANNO ACCADEMICO 2023 – 2024

Data di laurea 26 Settembre 2024

SOMMARIO

Capitolo 1	3
1 Rivelatori a semiconduttori	3
1.1 Semiconduttori	3
1.1.1 Bond model dei semiconduttori	4
1.1.2 Struttura a bande	5
1.2 Drogaggio	6
1.2.1 Semiconduttori intrinseci	6
1.2.2 Semiconduttori estrinseci	7
1.2.3 Giunzione pn.....	10
1.3 Rivelatori a stato solido	11
1.3.1 Rivelatori al silicio.....	11
1.3.2 Guadagno	14
1.4 SPAD; diodo fotorivelatore a singolo fotone	15
1.4.1 Parametri principali degli SPAD	16
1.5 LGAD; rivelatori a valanga a basso guadagno	17
Capitolo 2	21
2 Ultra Fast Silicon Detectors (UFSD)	21
2.1 Principi di funzionamento degli UFSD	22
2.1.1 Guadagno interno	22
2.1.2 Requisiti di guadagno per il timing ultra-veloce	23
2.2 Resistenza alle radiazioni	25
2.3 Rumore	27
2.4 Apparato sperimentale	29

Capitolo 3.....	33
3 Applicazioni Biomediche; radioterapia	33
3.1 Adroterapia	33
3.2 UFSD in adroterapia	34
3.2.1 Test del fascio terapeutico	35
3.2.2 Sincrotrone.....	37
3.3 Brachiterapia	39
3.3.1 Esempio applicazione di brachiterapia	41
3.4 Differenze e problematiche	41
Conclusioni	43
Bibliografia	45

Abstract

Il presente elaborato esplora lo sviluppo e l'analisi di rivelatori progettati per contare con grande precisione il numero di particelle di un fascio terapeutico in intervalli di tempo molto brevi. La struttura degli Ultra Fast Silicon Detectors (UFSD) sfrutta l'effetto di moltiplicazione delle cariche presente nei diodi a valanga a basso guadagno (LGAD), per realizzare un rivelatore al silicio capace di misurare simultaneamente con alta precisione sia le coordinate temporali che spaziali. Gli UFSD trovano applicazione in diversi ambiti biomedici, con un impiego particolare nell'adroterapia, una forma avanzata di trattamento radioterapico che utilizza particelle cariche pesanti, come protoni o ioni di carbonio, per il trattamento dei tumori, consentendo una distribuzione della dose più precisa e mirata rispetto ai raggi X impiegati nella radioterapia convenzionale.

Introduzione

Il seguente elaborato si concentra sullo studio e sullo sviluppo di rivelatori innovativi, progettati per misurare direttamente e con alta precisione il numero di particelle in un fascio terapeutico entro un determinato intervallo di tempo. Questi rivelatori, grazie alle loro avanzate caratteristiche, eliminano la necessità di calibrazioni, fattori di correzione e controlli di qualità tipicamente richiesti per l'uso delle camere di ionizzazione, e offrono la capacità di misurare anche fluenze molto basse, migliorando così la precisione nel controllo delle dosi ridotte.

Il lavoro di tesi si focalizza in particolare sui sensori al silicio innovativi noti come *Ultra Fast Silicon Detector* (UFSD), caratterizzati da uno strato di guadagno interno che permette la generazione di segnali ampi nonostante spessori sottili. Grazie al loro elevato rapporto segnale-rumore, gli UFSD sono ideali per misure di alta precisione, combinando un'elevata risoluzione temporale, dell'ordine di poche decine di picosecondi, con le risoluzioni spaziali tipiche dei rivelatori al silicio segmentati. In questo contesto, la tesi esplora l'applicazione degli UFSD come potenziali contatori di particelle per il monitoraggio dei fasci nella adroterapia, una forma di radioterapia avanzata che utilizza particelle cariche pesanti, come protoni o ioni carbonio, per il trattamento dei tumori in modo da ottenere una migliore distribuzione della dose rispetto ai raggi X utilizzati nella radioterapia convenzionale. L'elaborato inoltre introduce anche la brachiterapia, un'altra applicazione biomedica dei rivelatori di particelle avanzati, utilizzati per misurare con precisione la distribuzione della dose di radiazione che, in questo caso, proviene da sorgenti impiantate temporaneamente o permanentemente all'interno del corpo del paziente.

Gli UFSD sono sensori al silicio basati sulla tecnologia del diodo a valanga a basso guadagno (LGAD). Presentano un moderato guadagno interno grazie a uno strato p^+ sottile aggiuntivo, situato sotto l'elettrodo n^{++} di una giunzione fortemente drogata. Questo profilo di drogaggio, caratterizzato da un aumento significativo della concentrazione vicino alla giunzione, incrementa localmente il campo elettrico. Gli elettroni prodotti dalla radiazione ionizzante vengono accelerati nella regione ad alto campo elettrico, generando ulteriori coppie lacuna-elettrone e portando a un guadagno controllato che amplifica il segnale di un fattore compreso tra 10 e 20. Ciò consente di mantenere la linearità del segnale e di ridurre al minimo il tempo morto, con un rapporto segnale-rumore che può essere ottimizzato variando la tensione di polarizzazione, anche in presenza di danni da radiazione.

Il principale vantaggio degli UFSD risiede nella capacità di fornire un segnale potenziato con un rapido fronte di salita, in rivelatori sottili; questa caratteristica consente misurazioni estremamente precise sia del tempo che dello spazio in sensori segmentati, garantendo al contempo una ridotta perturbazione del fascio.

Capitolo 1

1 Rivelatori a semiconduttori

I materiali impiegati nei dispositivi elettronici si classificano in tre categorie in base alle loro caratteristiche di conduzione elettrica: conduttori, isolanti e semiconduttori. La proprietà fisica che distingue questi materiali è la resistività elettrica, definita come il rapporto tra il campo elettrico E e la densità di corrente elettrica J :

$$\rho = \frac{E}{J}$$

La resistività indica quindi la capacità di un materiale di opporsi al flusso di corrente elettrica, e si misura in Ωm . Nei conduttori, la resistività è molto bassa (ad esempio, nel rame è circa $10^{-8} \Omega\text{m}$); negli isolanti, al contrario, è molto alta (nell'aria, la resistività è dell'ordine di $10^{16} \Omega\text{m}$); nei semiconduttori, infine, la resistività assume valori intermedi e può essere modificata agendo direttamente sulla struttura del materiale, oltre a essere fortemente influenzata dalla temperatura.

1.1 Semiconduttori

I semiconduttori presentano una struttura cristallina, dove gli atomi si legano tra loro formando un reticolo tridimensionale con una disposizione regolare in ogni direzione. La componente più piccola di questo reticolo, che quando replicata nello spazio genera l'intero cristallo, è chiamata cella unitaria. Il tipo di legame chimico tra gli atomi all'interno del reticolo dipende dalla loro struttura elettronica, influenzando così le proprietà fisiche del materiale.

Nei semiconduttori, i legami chimici sono di tipo covalente, caratterizzati dalla condivisione di una coppia di elettroni di valenza tra due atomi. Questo legame mantiene uniti gli atomi, poiché la coppia di elettroni condivisi genera una nube di carica che circonda entrambi gli atomi.

I semiconduttori più comuni, come il silicio (Si), il germanio (Ge) e il diamante, appartengono al gruppo IV della tavola periodica e condividono una struttura cristallina simile a quella del diamante. Questa struttura è composta da due sottoreticoli sovrapposti e sfalsati lungo la diagonale di un cubo, con ogni atomo circondato da quattro atomi vicini equidistanti, creando

una configurazione stabile. Nel caso del silicio, la distanza tra gli atomi, nota come parametro di reticolo, è di 0,357 nm.

Questa configurazione permette al silicio e agli altri semiconduttori con struttura a reticolo di diamante di possedere proprietà elettroniche e fisiche uniche, rendendoli indispensabili per l'industria elettronica.

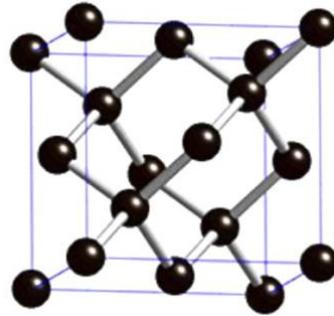


Figura 1.1: Il reticolo diamantato: due reticoli cubici a facce centrate. [1]

1.1.1 Bond model dei semiconduttori

Ogni atomo nel reticolo cristallino è circondato da 4 atomi vicini, con i quali condivide i 4 elettroni del suo guscio esterno per formare legami covalenti. A basse temperature, tutti questi elettroni restano legati e agiscono come elettroni di valenza. Tuttavia, quando la temperatura sale sopra lo zero assoluto (0 K), le vibrazioni termiche possono rompere alcuni legami, liberando elettroni che contribuiscono alla conduzione elettrica. Questo processo è noto come conduzione elettronica. (Vedi Figura 1.2)

T = 0 K

T > 0 K

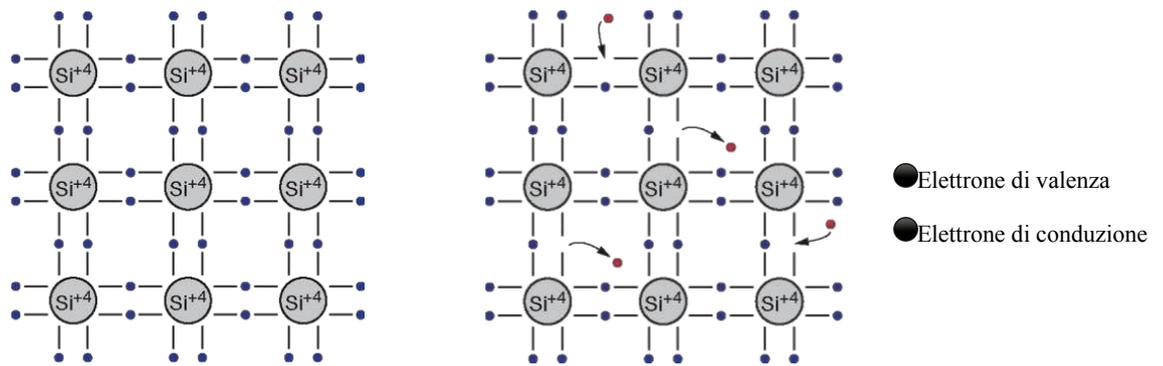


Figura 1.2 [1]

Nel frattempo, i legami aperti, o "buchi" (lacune), che si formano quando gli elettroni vengono liberati, attraggono altri elettroni. Questo movimento di lacune, o conduzione di lacune, è un altro modo in cui il materiale può condurre elettricità. La dinamica degli elettroni e delle lacune differisce a causa delle diverse interazioni che ciascuno ha con gli atomi circostanti, portando a comportamenti distinti nel contesto della conduzione elettrica. [1]

1.1.2 Struttura a bande

Gli elettroni all'interno di un atomo possiedono livelli energetici specifici, il che implica che il loro stato energetico può essere descritto da valori distinti.

In un solido, a una temperatura di 0 K, gli elettroni seguono il principio di esclusione di Pauli, occupando gli stati energetici disponibili partendo dal livello di energia più basso. A temperature superiori a 0 K, la distribuzione degli elettroni è regolata dalla distribuzione di Fermi-Dirac [13]:

$$f(E) = \left(1 + e^{\frac{E-E_F}{kT}}\right)^{-1}$$

dove $f(E)$ è la densità di elettroni con energia E a una temperatura T , ed E_F è l'energia di Fermi. L'energia di Fermi è il livello energetico al quale la probabilità di trovare un elettrone è del 50%. In condizioni di equilibrio termodinamico, l'energia di Fermi rimane costante, indicando una distribuzione stabile degli elettroni tra i vari livelli energetici del materiale [1].

Nei solidi cristallini, gli elettroni possono occupare due bande energetiche principali: la banda di valenza e la banda di conduzione (Figura 1.3). Nei metalli, la banda di conduzione e la banda

di valenza si sovrappongono. Tuttavia, negli isolanti e nei semiconduttori, queste bande sono separate da un intervallo energetico noto come band gap. Negli isolanti, questo intervallo è generalmente molto ampio.

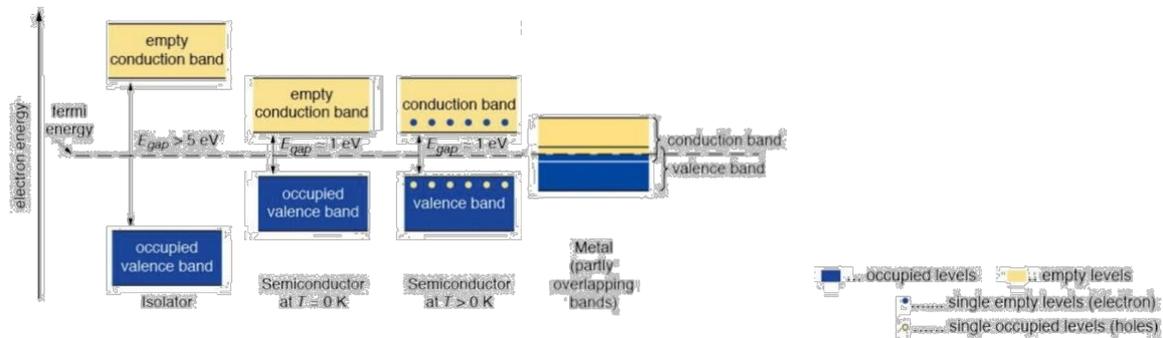


Figura 1.3 [1]

1.2 Drogaggio

Un semiconduttore può essere intrinseco oppure estrinseco, e ciò dipende dalla presenza o meno nella struttura di impurità, cioè atomi differenti da quelli del cristallo. Il drogaggio implica appunto la sostituzione di un piccolo numero di atomi nel reticolo con atomi di colonne vicine della tavola periodica. Questi atomi creano livelli energetici all'interno del band gap, modificando così la conducibilità del semiconduttore.

1.2.1 Semiconduttori intrinsechi

Un semiconduttore intrinseco è un semiconduttore non drogato; in questa tipologia di semiconduttore per ogni elettrone di conduzione esiste una corrispondente lacuna. Inoltre, le cariche che partecipano alla conduzione elettrica sono esclusivamente quelle generate dall'eccitazione termica. La densità degli elettroni di conduzione è data dalla seguente equazione:

$$n_i = T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

dove E_g rappresenta il gap energetico tra la banda di valenza e la banda di conduzione, k è la costante di Boltzmann, e T è la temperatura. Alla temperatura ambiente di 300 K, la densità degli elettroni di conduzione nel silicio puro è pari a $10^{16} m^{-3}$. Sebbene questa densità sia

relativamente bassa, è comunque sufficiente a generare una corrente continua rilevabile in presenza di un campo elettrico (Figura 1.4). Tuttavia, tale densità non è abbastanza elevata da consentire l'uso del silicio intrinseco come rivelatore.

Nei semiconduttori intrinseci, la densità degli elettroni n è pari a quella delle lacune p :

$$n = p = n_i$$

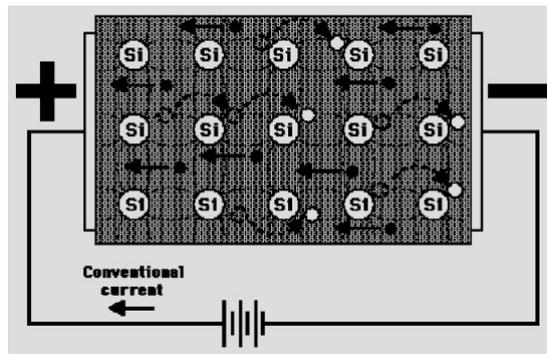


Figura 1.4: In presenza di una tensione applicata, sia elettroni liberi che lacune contribuiscono ad una piccola corrente.

Inoltre, la legge dell'azione di massa stabilisce che, in condizioni di equilibrio termico, il prodotto delle densità di elettroni e lacune rimane costante:

$$pn = n_i^2$$

1.2.2 Semiconduttori estrinseci

I semiconduttori che presentano il drogaggio sono invece quelli estrinseci; l'aggiunta di una piccola percentuale di atomi di altri elementi nel cristallo comporta forti cambiamenti nelle proprietà elettriche del cristallo, che viene appunto detto drogato.

È possibile drogare un semiconduttore al silicio con atomi pentavalenti o trivalenti; l'aggiunta di impurità pentavalenti (Sb, As, P) introduce elettroni liberi che non partecipano ai legami covalenti (Figura 1.5) e aumentano la conduttività del semiconduttore senza la creazione di lacune. Gli atomi del V gruppo donano un elettrone e per questo vengono detti “donatori” e il loro utilizzo genera un drogaggio di tipo “n”.

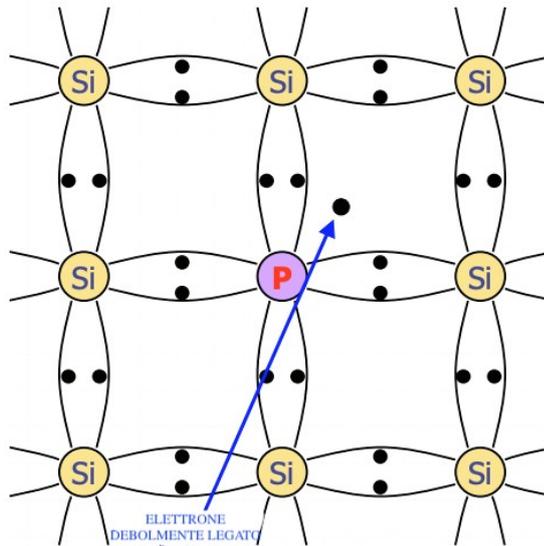


Figura 1.5

L'aggiunta invece di impurità trivalenti (B, Al, Ga) crea delle assenze di elettroni di valenza (lacune) che aumentano la conduttività del semiconduttore (Figura 1.6). Gli atomi del III gruppo accettano un elettrone e per questo vengono detti "accettori". In questo caso il drogaggio è di tipo "p".

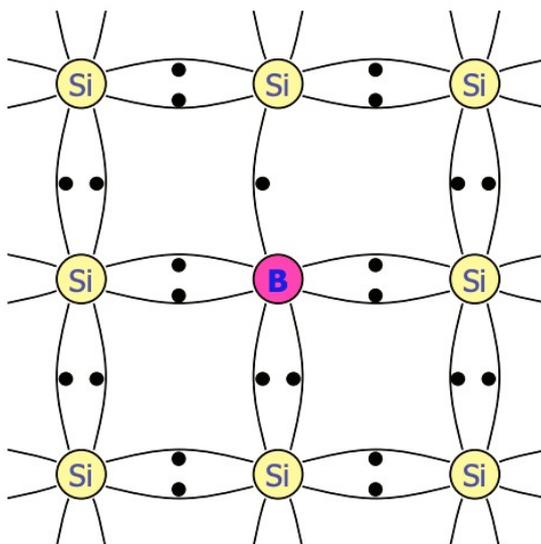


Figura 1.6

La densità degli atomi accettori e donatori è rappresentata rispettivamente dai simboli N_A e N_D . Il portatore di carica che ha la concentrazione maggiore nel materiale viene definito portatore maggioritario, gli altri si dicono portatori minoritari. Tuttavia, la densità complessiva di carica nei semiconduttori deve rimanere neutra, e questo può essere espresso matematicamente dalla seguente equazione:

$$N_D + p - N_A - n = 0$$

I livelli di drogaggio tipici per i rivelatori al silicio variano tra 10^{12} e 10^{18} atomi/cm³.

Quando il silicio viene drogato con impurità di tipo n, si introduce un surplus di elettroni liberi nella struttura, che possono contribuire alla conduzione elettrica anche a temperature relativamente basse. Invece, con un drogaggio di tipo p, si genera un eccesso di lacune, che si comportano come cariche positive mobili all'interno del reticolo cristallino. Quando il silicio è fortemente drogato, si utilizzano le notazioni n+ o n++ per indicare un drogaggio n elevato, e p+ o p++ per un drogaggio p altrettanto significativo.

Nella Figura 1.7 sono riportate le configurazioni elettroniche per il silicio puro (a sinistra), silicio drogato p (al centro) e silicio drogato n (a destra);

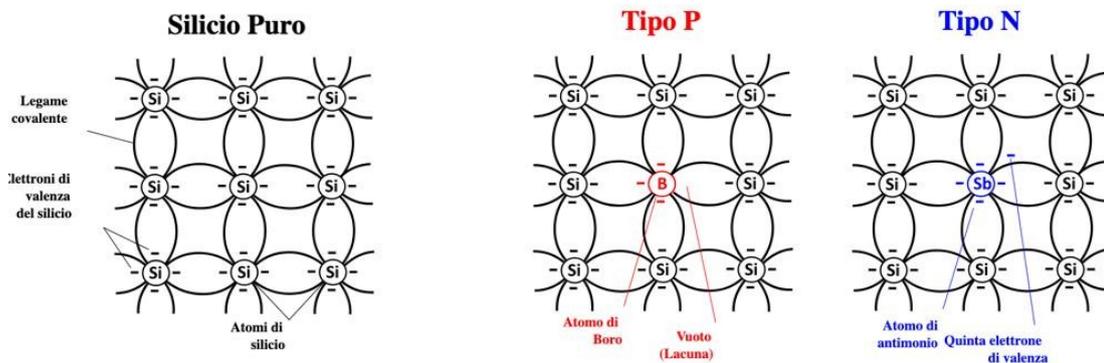


Figura 1.7

1.2.3 Giunzione pn

Una giunzione p-n è formata dall'unione di due aree di un semiconduttore: una con drogaggio di tipo p, dove le lacune (o "buchi") agiscono come portatori di carica principali, e l'altra dopata di tipo n, dove invece prevalgono gli elettroni.

Quando queste due regioni sono messe in contatto, la differenza nei livelli di Fermi causa una diffusione dei portatori di carica in eccesso da una regione all'altra, fino a raggiungere un equilibrio termico. In questo stato di equilibrio, i livelli di Fermi si allineano, e gli ioni residui formano una regione di carica spaziale, creando un campo elettrico che ostacola ulteriori diffusioni. Questa zona, che è priva di portatori di carica, viene chiamata zona di svuotamento e agisce come un'area isolante (Figura 1.8).

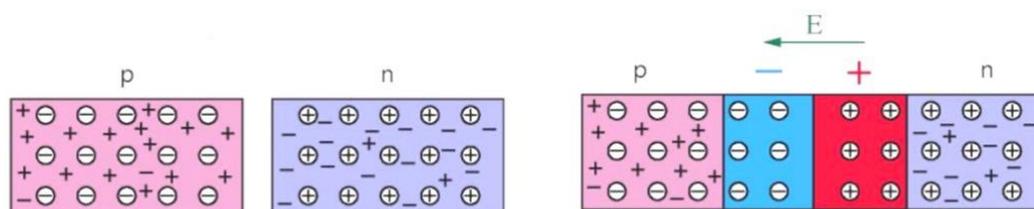


Figura 1.8: A sinistra le due regioni p e n non sono a contatto, mentre a destra è mostrato come, quando le due regioni vengono a contatto, gli elettroni dalla regione n diffondono verso la regione p, e le lacune dalla regione p diffondono verso la regione n. Questo movimento di portatori di carica crea una zona di deplezione (azzurra e rossa) vicino alla giunzione, dove gli elettroni e le lacune si ricombinano e annullano ciascuno.

Una caratteristica fondamentale di questa giunzione è la sua capacità di consentire il passaggio della corrente elettrica in una sola direzione (polarizzazione diretta), bloccandola nella direzione opposta (polarizzazione inversa). Dal punto di vista elettrico, la giunzione p-n si comporta come un diodo. Quando viene applicata una tensione esterna in polarizzazione diretta, i portatori di carica vengono spinti verso la zona di svuotamento, riducendone la larghezza. Tuttavia, nei rivelatori a semiconduttore, si opera in polarizzazione inversa: in questo caso, la tensione esterna fa aumentare la larghezza della zona di svuotamento [1].

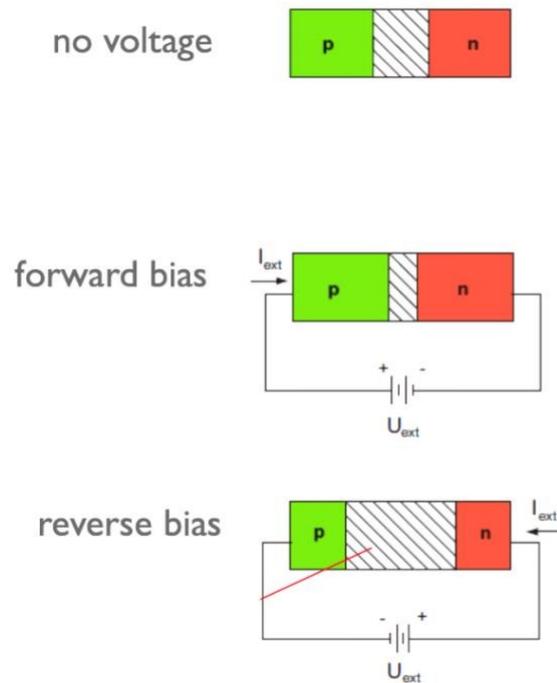


Figura 1.9: La zona sensibile della maggior parte dei rivelatori a semiconduttore è la regione di deplezione di una giunzione p-n, che viene utilizzata in modalità di polarizzazione inversa. [1]

1.3 Rivelatori a stato solido

I rivelatori a stato solido sfruttano le caratteristiche dei semiconduttori, come il silicio, per trasformare l'energia delle particelle in arrivo in segnali elettrici. Quando una particella attraversa il semiconduttore, provoca la formazione di coppie di elettroni e lacune (cioè, zone lasciate vuote dagli elettroni spostati). Questi portatori di carica vengono poi raccolti grazie a un campo elettrico applicato, generando un segnale che può essere rilevato e analizzato.

Per la realizzazione di rivelatori di particelle, è possibile unire due tipi di semiconduttori, di tipo p e n. La porzione n, che solitamente è più spessa, viene chiamata substrato e rappresenta la zona sensibile del dispositivo, poiché si svuota per facilitare la rilevazione delle particelle. Al contrario, la parte p è molto più sottile e ha un livello di drogaggio più elevato, fondamentale per creare la giunzione tra le due regioni.

1.3.1 Rivelatori al silicio

Il silicio è particolarmente utilizzato nei rivelatori essendo un semiconduttore con ottime proprietà elettriche; può essere drogato per ottenere una varietà di caratteristiche desiderate, come la sensibilità alla radiazione. Questo lo rende ideale per la creazione di rivelatori sensibili e precisi.

I rivelatori a silicio possono convertire l'energia dei fotoni o delle particelle cariche in segnali elettrici con alta efficienza e garantiscono una risoluzione spaziale molto elevata grazie alla loro capacità di essere fabbricati in strutture sottili e ben definite. Il silicio è inoltre noto per la sua stabilità chimica e fisica ma anche per essere economico e particolarmente disponibile.

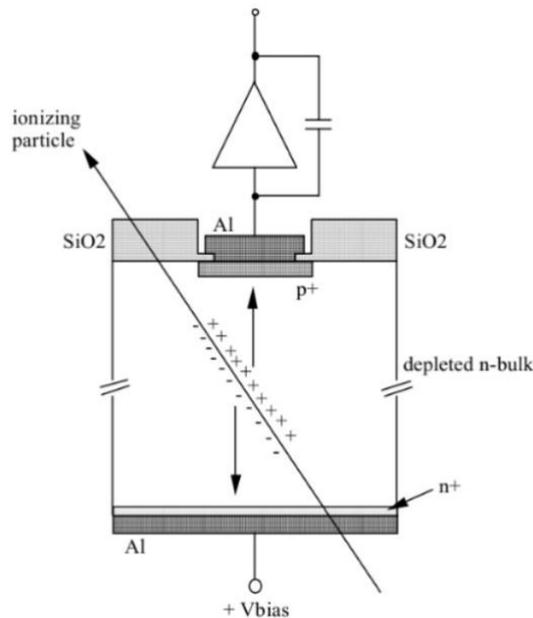


Figura 1.10: particella ionizzante che attraversa un rivelatore al silicio.

La Figura 1.10 rappresenta un rivelatore a stato solido basato sul silicio, che è comunemente utilizzato per la rilevazione di particelle ionizzanti. Questo tipo di rivelatore è costituito da una giunzione p-n, in cui la regione p+ ad alto drogaggio è messa a contatto con un substrato di silicio drogato di tipo n. Sul lato inferiore del rivelatore, è presente uno strato aggiuntivo drogato di tipo n+ che serve a migliorare il contatto elettrico, necessario per applicare la tensione di polarizzazione inversa.

Quando si applica una tensione inversa abbastanza elevata, la regione di svuotamento si espande fino a coprire l'intero substrato del silicio, che diventa così la zona attiva del rivelatore. In questa configurazione, quando una particella ionizzante attraversa il rivelatore, essa crea coppie di elettroni e lacune all'interno del silicio. Questi portatori di carica vengono quindi separati dal campo elettrico della giunzione: gli elettroni vengono attratti verso il contatto n+, mentre le lacune si muovono verso la regione p+. Questo movimento delle cariche genera un impulso di corrente che può essere rilevato dall'elettronica di lettura collegata al rivelatore.

L'ossido di silicio (SiO₂) presente nel dispositivo agisce come isolante elettrico, impedendo cortocircuiti e proteggendo le zone attive del rivelatore. Inoltre, lo strato di alluminio è utilizzato per realizzare i collegamenti necessari sia per l'applicazione della tensione di polarizzazione sia per il trasferimento del segnale elettrico verso i circuiti di lettura, garantendo una conduzione efficiente.

Questo tipo di rivelatore è particolarmente efficace grazie alla sua capacità di rilevare con precisione il passaggio di particelle ionizzanti, rendendolo uno strumento essenziale in svariati esperimenti di fisica delle particelle e in altre applicazioni scientifiche.

Esempio di una giunzione p-n tipica in silicio [1]:

Concentrazione di atomi accettori (N_a) = 10^{15} cm^{-3} nella regione p+

Concentrazione di atomi donatori (N_d) = 10^{12} cm^{-3} nel bulk n.

Senza tensione esterna:

- Larghezza della zona di svuotamento nella regione p (W_p) = $0,02 \mu\text{m}$

- Larghezza della zona di svuotamento nella regione n (W_n) = $23 \mu\text{m}$

Con una tensione inversa di 100 V:

- $W_p = 0,4 \mu\text{m}$

- $W_n = 363 \mu\text{m}$

1.3.2 Guadagno

Il guadagno in un dispositivo a stato solido viene ottenuto mediante la moltiplicazione delle cariche, un fenomeno chiamato ionizzazione per impatto [19]. Questo processo avviene in aree specifiche del sensore, dove campi elettrici estremamente intensi accelerano le particelle cariche prodotte. Le particelle, così accelerate, acquisiscono energia sufficiente a superare la banda proibita del semiconduttore, consentendo la formazione di nuove coppie elettrone-lacuna tramite collisioni con gli atomi del reticolo cristallino.

Quando il campo elettrico è sufficientemente forte, anche le cariche secondarie create possono generare ulteriori coppie di cariche, innescando un effetto di moltiplicazione a valanga. Questo fenomeno amplifica significativamente il numero di cariche libere nel materiale (moltiplicazione a valanga), aumentando di conseguenza il segnale elettrico complessivo, e rendendo il dispositivo più sensibile alla rilevazione di particelle o radiazioni.

Questo processo segue un andamento esponenziale, descritto dalla formula:

$$N(x) = N_0 \cdot e^{\alpha x}$$

Dove N_0 rappresenta il numero iniziale di cariche, x è lo spessore della regione di amplificazione del rivelatore e α è il coefficiente di ionizzazione, che indica la probabilità che un portatore di carica generi una coppia elettrone-lacuna attraverso il processo di ionizzazione per impatto percorrendo una distanza unitaria. In un campo elettrico di circa 300 kV/cm, i valori tipici di questi coefficienti per elettroni e lacune sono rispettivamente:

$$\alpha_e = 0,66 \text{ coppie}/\mu$$

$$\alpha_l = 0,17 \text{ coppie}/\mu$$

Il guadagno del dispositivo è definito come il rapporto tra il numero di portatori di carica dopo la ionizzazione e il numero di portatori iniziali. Questo rapporto è espresso dalla formula:

$$G = \frac{N(x)}{N_0} = e^{\alpha d}$$

con d larghezza della zona di moltiplicazione.

1.4 SPAD; diodo fotorivelatore a singolo fotone

I diodi fotorivelatori a singolo fotone (SPAD) sono dispositivi semiconduttori progettati per la rilevazione di singoli fotoni, sfruttando il fenomeno della moltiplicazione a valanga di cariche all'interno di un diodo polarizzato inversamente oltre la sua tensione di rottura. Questo meccanismo funziona grazie alla capacità di un singolo fotone di scatenare una cascata di elettroni, che produce un impulso elettrico misurabile.

Dal loro sviluppo negli anni '60, gli SPAD sono stati oggetto di numerosi studi e sono stati adottati in diversi ambiti che richiedono un'alta sensibilità nella rilevazione di singoli fotoni. Tali dispositivi sono in grado di rilevare segnali ottici molto deboli, sia in termini di intensità che di forma d'onda, attraverso il conteggio in tempo reale dei fotoni, un processo conosciuto come "conteggio dei fotoni". Questa operazione può essere effettuata su intervalli temporali che arrivano ai microsecondi. Inoltre, gli SPAD permettono di ricostruire forme d'onda di eventi estremamente rapidi, fino a scale temporali dell'ordine dei picosecondi, utilizzando tecniche di temporizzazione dei fotoni, che si basano sul conteggio temporale correlato dei singoli fotoni.

La struttura tipica di un SPAD si fonda su una giunzione p-n, che costituisce il nucleo del rivelatore (vedi Figura 1.11). Quando il diodo è polarizzato inversamente oltre la tensione di breakdown, si forma una vasta zona di deplezione, priva di portatori di carica liberi, che diventa altamente isolante e pronta a rilevare fotoni incidenti. Quando un fotone entra in questa zona di deplezione e possiede energia sufficiente, provoca la generazione di una coppia elettrone-lacuna. Queste cariche vengono rapidamente accelerate dal forte campo elettrico presente, avviando una valanga di ulteriori coppie elettrone-lacuna attraverso il processo di ionizzazione per impatto.

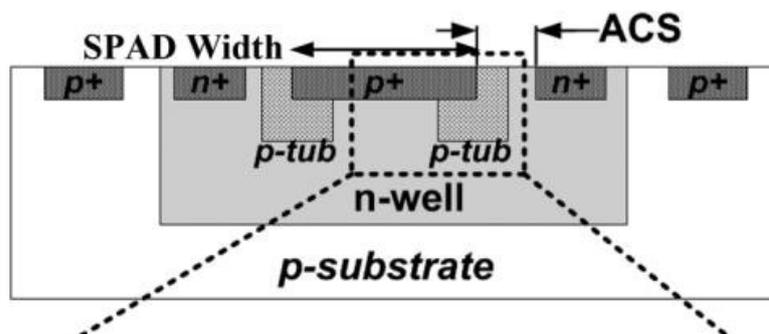


Figura 1.11: Vista in sezione di un tipico SPAD.

Gli SPAD sono piccoli, robusti, facili da integrare in array di grandi dimensioni e insensibili ai campi magnetici, rendendoli adatti per applicazioni mediche e spaziali [5].

1.4.1 Parametri principali degli SPAD

Gli SPADs (Single-Photon Avalanche Diodes) sono caratterizzati da diversi parametri fondamentali che ne determinano le prestazioni. Uno dei più importanti è l'efficienza di rilevamento dei fotoni (PDE), che misura l'efficacia del dispositivo nel convertire i fotoni incidenti in segnali rilevabili. La PDE è definita come il rapporto tra il numero di fotoni rilevati e il numero totale di fotoni che colpiscono l'area sensibile del dispositivo, ed è influenzata dalla probabilità che i fotoni vengano assorbiti e dall'efficacia del processo di innesco della valanga di cariche [20].

Un altro aspetto critico del funzionamento degli SPAD è il rumore, che può compromettere la precisione delle misurazioni. Il rumore principale, oltre alle fluttuazioni statistiche dovute alla natura stocastica della rivelazione dei fotoni (secondo la statistica di Poisson), proviene dai conteggi spurii. Questi conteggi possono essere non correlati o correlati ai fotoni del segnale. Il rumore correlato include fenomeni come il crosstalk (interferenza ottica o elettrica tra diversi pixel) e l'afterpulsing, che si verifica quando portatori di carica intrappolati durante un evento di valanga vengono rilasciati successivamente, generando impulsi indesiderati una volta che lo SPAD è ripolarizzato oltre la tensione di rottura (V_{BD}). La probabilità di afterpulsing (P_{AP}) è definita come il rapporto tra il numero di conteggi dovuti all'afterpulsing (N_{AP}) e il numero di fotoni effettivamente rilevati (N_{DET});

$$P_{AP} = N_{AP}/N_{DET}$$

Per mitigare l'afterpulsing e prevenire la saturazione dello SPAD, viene introdotto un tempo morto (T_{DEAD}) dopo ogni evento di innesco. Questo intervallo, che può variare da decine a centinaia di nanosecondi, permette il rilascio dei portatori intrappolati. Sebbene un tempo morto più lungo riduca la probabilità di afterpulsing, diminuisce anche la velocità massima di conteggio del dispositivo, che si abbassa a $1/T_{DEAD}$ in caso di reset attivo, o a $1/(e \cdot T_{DEAD})$ con reset passivo [21] (dove "e" è la costante di Eulero).

Infine, un parametro fondamentale degli SPADs è il jitter di temporizzazione, che rappresenta la variabilità temporale dell'inizio dell'impulso di uscita rispetto al momento effettivo in cui il fotone arriva [22]. Questo parametro è solitamente espresso come la larghezza a metà altezza (FWHM) dell'istogramma di distribuzione del tempo di arrivo del fotone, e riflette la precisione temporale del dispositivo.

1.5 LGAD; rivelatori a valanga a basso guadagno

Il design dei rivelatori a valanga a basso guadagno (LGAD) rappresenta un'evoluzione rispetto ai sensori al silicio convenzionali, introducendo un guadagno controllato e ridotto nel processo di formazione del segnale [3]. L'obiettivo principale è creare rivelatori al silicio che generino segnali abbastanza forti da garantire elevate prestazioni temporali, senza però aumentare significativamente i livelli di rumore.

La moltiplicazione delle cariche nei sensori al silicio avviene quando i portatori di carica, ossia elettroni e lacune, si trovano immersi in campi elettrici dell'ordine di centinaia di kV/cm [4]. In queste condizioni, gli elettroni (e, in misura minore, le lacune) accumulano energia cinetica sufficiente per creare ulteriori coppie di elettroni e lacune attraverso il fenomeno dell'ionizzazione per impatto. Campi elettrici di circa 300 kV/cm possono essere raggiunti grazie all'implementazione di una densità adeguata di cariche accettrici (o donatori). Questi campi intensi si generano localmente dopo che la zona di drogaggio è stata svuotata. Per ottimizzare questo effetto, il design degli LGAD prevede l'aggiunta di uno strato di drogaggio supplementare alla giunzione pn, migliorando così l'efficacia del sensore.

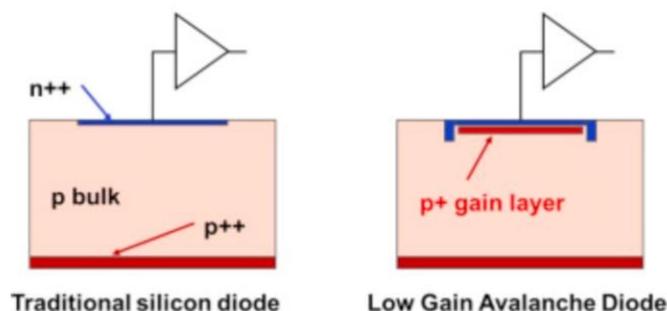


Figura 1.12: Schema di un diodo al silicio tradizionale (a sinistra) e di un diodo a valanga a basso guadagno (LGAD) (a destra). Lo strato aggiuntivo sotto l'elettrodo, quando svuotato, crea un campo elettrico intenso che genera la moltiplicazione delle cariche.

I sensori LGAD funzionano inducendo la moltiplicazione delle cariche per gli elettroni, mentre la moltiplicazione delle lacune, data l'entità del campo e la profondità coinvolta, è meno rilevante.

Questi sensori non presentano un ampio ciclo di retroazione positiva formato dalla moltiplicazione simultanea di elettroni e lacune. A una tensione di polarizzazione sufficientemente alta, il campo di deriva nel restante spessore di 300 μm del bulk può essere quasi altrettanto elevato con l'impianto p+. In questo modo, si può stabilire il grande campo di deriva di 420 kV/cm necessario per una rapida raccolta delle cariche [18].

La Figura 1.13 mostra la sezione trasversale di un sensore con i seguenti strati, partendo dall'alto:

- Doppio strato isolante di ossido (SiO_2) e nitruro di silicio (Si_3N_4); questo strato, spesso circa 400 nm, fornisce isolamento elettrico tra le diverse sezioni del sensore e protegge le strutture sottostanti da contaminazioni e cortocircuiti.
- Metallo collegato a terra; uno strato di metallizzazione grigia di circa 1,5 μm di spessore è utilizzato per la connessione a terra. Questo aiuta a stabilizzare il potenziale elettrico e ridurre il rumore.
- Strato di SiO_2 (in marrone); funziona come elettrodo di lettura. Si tratta di uno strato isolante che può anche essere parte della struttura di contatto per la lettura del segnale.
- Elettrodo fortemente drogato (concentrazione di 10^{18} cm^{-3} e spessore di 1 μm); questo elettrodo, altamente drogato con un tipo di drogaggio n, è presente per facilitare la lettura e l'ampia raccolta di segnali elettrici generati dalle particelle.
- Strato drogato p con boro (5 μm); questo strato, rappresentato in azzurro, ha un drogaggio p (con boro) che crea un campo elettrico ad alta intensità per la moltiplicazione di cariche, migliorando così la sensibilità del sensore.
- Spessore di 300 μm (in giallo); questo strato è il bulk del sensore, leggermente drogato p, che costituisce la base del dispositivo e ospita la struttura di rilevamento.
- Spessore di 1 μm ; questo strato, fortemente drogato p++, è essenziale per ottimizzare il funzionamento del sensore e migliorare la raccolta del segnale.
- Spessore di 1 μm ; l'ultimo strato metallico serve probabilmente come contatto elettrico finale per la raccolta e l'uscita del segnale amplificato.

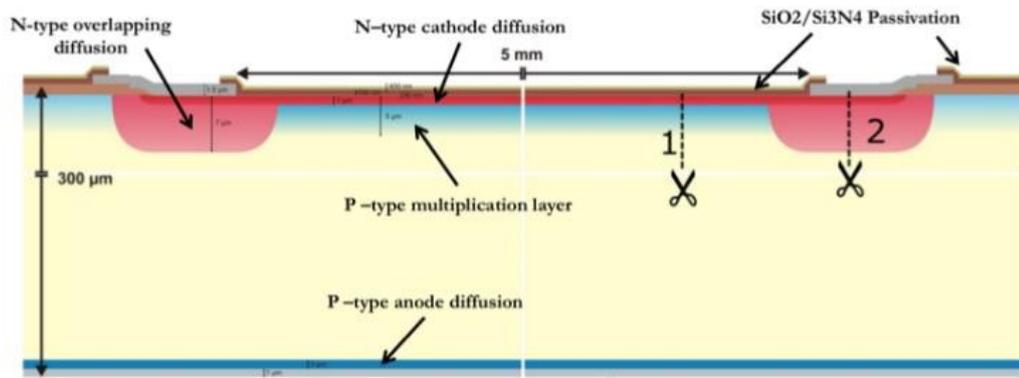


Figura 1.13: Struttura interna di un sensore LGAD.

Capitolo 2

2 Ultra Fast Silicon Detectors (UFSD)

Attualmente, i dispositivi di tracciamento preciso determinano il tempo in modo poco accurato, mentre i dispositivi con una buona risoluzione temporale sono troppo grandi per misurare accuratamente la posizione. Questa situazione impone gravi limitazioni in molte applicazioni, come la tomografia a emissione di positroni (PET) medica, la spettrometria di massa o il tracciamento di particelle.

È noto che i rivelatori a pixel di silicio offrono una sufficiente risoluzione spaziale; è però anche possibile migliorare le loro caratteristiche temporali per poter sviluppare un unico dispositivo capace di misurare simultaneamente con alta precisione le coordinate spaziali ($\sim 10 \mu\text{m}$) e temporali ($\sim 10 \text{ps}$) di una particella. Per ottenere l'alto rapporto segnale/rumore (S/N) necessario per gli UFSD, si utilizza il meccanismo di moltiplicazione interna delle cariche nei sensori al silicio. Questo campo di indagine, molto attivo, è stato recentemente esplorato dalla collaborazione RD50 del CERN [9].

La possibilità di utilizzare e controllare la moltiplicazione di carica in rivelatori di silicio non irradiati è stata oggetto di intensi studi. Il meccanismo di base per ottenere la moltiplicazione di carica consiste nel creare, all'interno del volume di un sensore di silicio, un'ampia area dove il campo elettrico è sufficientemente elevato affinché gli elettroni in deriva generino una valanga controllata e a basso guadagno.

Il design dei rivelatori di silicio ultra-veloci (UFSD) [6, 7, 8] sfrutta l'effetto di moltiplicazione di carica negli LGAD (Figura 2.1) per ottenere un rivelatore di silicio in grado di misurare contemporaneamente con elevata precisione tempo e spazio. Lo sviluppo degli UFSD aprirà una gamma di nuove opportunità per applicazioni che beneficiano della combinazione di informazioni di posizione e temporali.

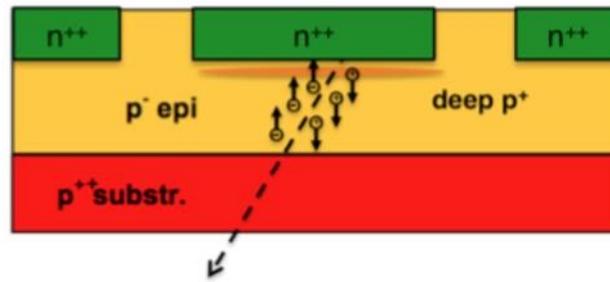


Figura 2.1: Schema di un diodo a valanga a basso guadagno (LGAD). Lo strato p+ profondo aggiuntivo crea un forte campo elettrico che genera la moltiplicazione delle cariche. [N. Cartiglia; “Performance of Ultra-Fast Silicon Detectors”]

2.1 Principi di funzionamento degli UFSD

Il funzionamento ad alta velocità dei sensori al silicio affronta l'ostacolo del fatto che la velocità di deriva nel silicio si satura intorno a 10^7 cm/s , limitando così il tempo di raccolta degli elettroni all'interno di uno strato di silicio di $300 \mu\text{m}$ di spessore a circa 3 ns . I sensori al silicio veloci devono quindi essere molto sottili e in grado di funzionare anche se la carica raccolta è ridotta rispetto a quella di sensori più spessi. Tuttavia, poiché la risoluzione temporale di un sensore dipende dal rapporto segnale/rumore (S/N), la carica raccolta da uno strato attivo sottile potrebbe non essere sufficiente per ottenere una buona risoluzione temporale. Per superare questa limitazione, gli UFSD sfruttano la moltiplicazione di carica per aumentare la resa di carica dei sensori di silicio molto sottili per consentirne l'utilizzo in applicazioni a temporizzazione ultra-rapida [6,7].

2.1.1 Guadagno interno

È stato dimostrato che nei sensori al silicio il fattore di moltiplicazione della carica, responsabile del guadagno, ha una dipendenza esponenziale dal campo elettrico [10,11]. Vicino al punto di rottura, con un campo elettrico di circa 300 kV/cm , si può ottenere una moltiplicazione di circa $0,66/\mu\text{m}$ per gli elettroni e $0,17/\mu\text{m}$ per le lacune.

I sensori planari con una bassa densità di drogaggio uniforme non sono in grado di ottenere una regione di campo elettrico estesa a sufficienza per la moltiplicazione a valanga delle cariche. Tuttavia è stato osservato da parte di diversi gruppi di ricerca, un guadagno interno moderato

in sensori al silicio dopo l'irradiazione grazie alla non uniformità del campo elettrico [14,15]. Pertanto, per ottenere sensori al silicio con guadagno interno, è necessario un profilo di drogaggio non uniforme simile a quello utilizzato nei fotomoltiplicatori a silicio (SiPM) [16,17].

2.1.2 Requisiti di guadagno per il timing ultra-veloce

La moltiplicazione di carica nei sensori al silicio consente di aumentare il rapporto segnale-rumore (S/N), a condizione che il rumore aggiuntivo causato dal processo di moltiplicazione rimanga basso. Questo è possibile per sensori veloci con un tempo di shaping¹ inferiore a 1 ns, un guadagno di circa 10 e una corrente di perdita dell'ordine di 1 nA per pixel o meno.

La Figura 2.2 mostra un diagramma semplificato dell'elettronica di lettura per un rivelatore di particelle, in particolare per un circuito di time-tagging. La sezione di sinistra rappresenta il pixel in un rivelatore che genera un segnale analogico (mostrato dall'onda rossa). Il pixel rileva il passaggio di una particella carica, producendo un segnale. Il pre-amplificatore della sezione centrale invece, amplifica il segnale iniziale (onda viola) a un livello che può essere elaborato dagli stadi successivi. A questo stadio viene applicata una tensione di soglia V_{TH} . Il comparatore in questa sezione confronta il segnale amplificato con questa soglia; se il segnale supera la soglia, viene inviato allo stadio successivo. La sezione di destra converte il segnale analogico in un segnale digitale che può essere elaborato dal Convertitore Tempo-Digitale (TDC). Gli impulsi digitali rappresentano l'informazione temporale relativa al rilevamento della particella, consentendo una misurazione precisa del tempo.

¹ Costante di tempo di formazione degli impulsi; deve essere scelta per ogni rivelatore tenendo conto della frequenza di conteggio attesa.

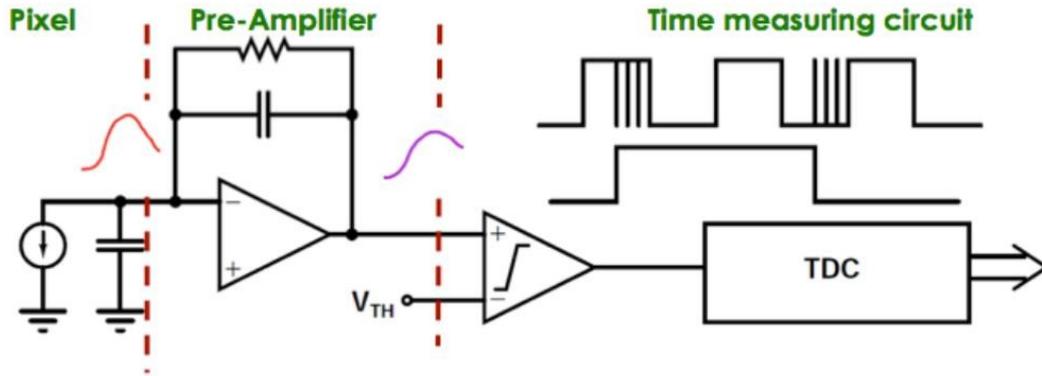


Figura 2.2: Principali componenti di un rivelatore di temporizzazione. Il tempo viene misurato quando il segnale supera la soglia.

La risoluzione temporale σ_t , escludendo piccoli effetti dovuti alla quantizzazione del TDC (si assume TDC=20 ps e pertanto questo effetto non sarà significativo), può essere parametrizzata come segue:

$$\sigma_t = \left[\left(\frac{N}{S} \tau_R \right)^2 + \left(\frac{\Delta S S_{thr}}{S} \tau_R \right)^2 \right]^{1/2}$$

dove S è l'ampiezza dell'impulso, τ_R è il tempo di salita, N è la fluttuazione dovuta al rumore elettronico e $\Delta S/S$ è lo scostamento temporale dovuto alla dispersione di ampiezza dalla distribuzione di Landau rispetto a una soglia fissa S_{thr} .

Per ottenere prestazioni temporali ottimali, il tempo di salita sarà uguale al tempo di raccolta della carica, e questo correla il tempo di salita con lo spessore del sensore. Si assume che il rumore sia di circa 1000 elettroni a un tempo di shaping di 500 ps e il rumore diminuisca come $1/\sqrt{\tau_R}$ con il tempo di shaping.

Assumendo inoltre che la soglia sia impostata a 10 volte il rumore per sopprimere conteggi falsi, e una riduzione dello scostamento temporale tramite un discriminatore a frazione costante (CFD), la risoluzione temporale può essere espressa come:

$$\sigma_t(\text{CFD}) = \tau_R \frac{1}{(S/N)} \left[1 + \left(\text{CFD} \times 10 \frac{\Delta S}{S} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Per i sensori ad alta velocità, si ricerca il tempo di salita più rapido con un rapporto S/N realistico di almeno 30. La risoluzione temporale dipende dal guadagno, come mostrato nella Figura 2.3, e migliora notevolmente con l'uso di un discriminatore a frazione costante (CFD), anche con un CFD modesto pari a 1/3. Per un guadagno $G=10$, un tempo di salita $\tau_R \approx 800\text{ps}$ e uno spessore del sensore di 36 mm, la risoluzione temporale raggiungerà un valore compreso tra 30 e 40 ps.

Gain G	τ_R [ps]	Thickness [μm]	Time resolution [ps]			
			No CDF	CFD=1/10	CFD=1/5	CFD=1/3
1	3000	130	282	132	139	154
10	800	36	85	30	33	40
100	200	9	29	7.5	9.0	11.6

Figura 2.3: Risoluzione temporale per il tempo di salita più veloce consentito da $S/N \geq 30$ in funzione del guadagno.

2.2 Resistenza alle radiazioni

Molte applicazioni degli UFSD sono condotte in un ambiente caratterizzato da radiazioni; poiché gli UFSD sono sensori al silicio, ci si aspettano effetti di danneggiamento da radiazioni, a seconda del tipo e del livello di radiazione. Questi effetti vengono studiati approfonditamente per i sensori senza guadagno dalle collaborazioni del CERN ². La collaborazione RD50 ³ sta

² Organizzazione europea per la ricerca nucleare.

³ L'obiettivo della collaborazione CERN RD50 è lo sviluppo di rivelatori a semiconduttore resistenti alle radiazioni per collisori ad altissima luminosità.

ricercando i danni da radiazioni negli UFSD e riscontra nel bulk gli stessi effetti presenti nei sensori senza guadagno, leggermente modificati per tenere conto dell'effetto del guadagno.

Ci sono due principali effetti che influenzano il comportamento dei sensori UFSD dopo l'esposizione a radiazioni: il danneggiamento superficiale e il danneggiamento del substrato.

Il primo è dovuto al fatto che l'assorbimento di radiazioni ionizzanti può causare un accumulo di cariche intrappolate negli strati di ossido superficiale del sensore. Le coppie elettrone-lacuna create in questo strato possono ricombinarsi o essere separate dal campo elettrico dell'ossido: gli elettroni si spostano verso l'interfaccia SiO₂-Si, mentre le lacune migrano verso il contatto metallico. Gli elettroni, grazie alla loro maggiore mobilità, penetrano nel substrato di silicio, mentre le lacune possono restare intrappolate all'interfaccia SiO₂-Si, aumentando la carica positiva nell'ossido e compromettendone la qualità. Inoltre, la radiazione ionizzante può introdurre nuovi livelli energetici nella banda proibita dell'interfaccia, i quali possono ospitare elettroni o lacune, modificando ulteriormente la carica dell'ossido. Gli effetti specifici dipendono dal design del sensore.

Il danneggiamento del substrato invece è causato dall'energia persa dalla radiazione non ionizzante quando collide con un atomo del reticolo di silicio. Se l'energia trasferita è sufficiente, l'atomo di silicio viene espulso dal reticolo, creando un atomo primario (PKA, primary knock-on atom) e una coppia di Frankel, costituita dall'atomo espulso e dalla vacanza risultante. La soglia minima di energia per dislocare un atomo è circa 15 eV, ma i PKA possono avere energie di rinculo nell'ordine delle decine di keV, producendo ulteriori espulsioni atomiche a cascata. Questi difetti possono formare strutture stabili nel substrato che fungono da centri di cattura per elettroni e lacune, riducendo l'efficienza di raccolta della carica e alterando le prestazioni del sensore [23].

Il danneggiamento degli UFSD a causa delle radiazioni è stato dimostrato sottoponendo diversi sensori ad un flusso di protoni fino a 10^{16} cm⁻², con uno spettro energetico centrato intorno a 800 MeV. È stata infatti osservata una riduzione del guadagno di circa il 20%, con un ulteriore incremento della diminuzione per flussi superiori.

Nella Figura 2.4 è rappresentata la carica generata dall'UFSD in seguito al passaggio di una particella al minimo di ionizzazione dopo l'irraggiamento a diverse fluenze di protoni. Essa mostra una diminuzione progressiva; a basse fluenze, il sensore mantiene un livello significativo di carica raccolta, ma con l'aumento della fluenza di protoni, la carica generata si

riduce gradualmente, indicando un degrado delle prestazioni del sensore dovuto ai danni da radiazione [24].

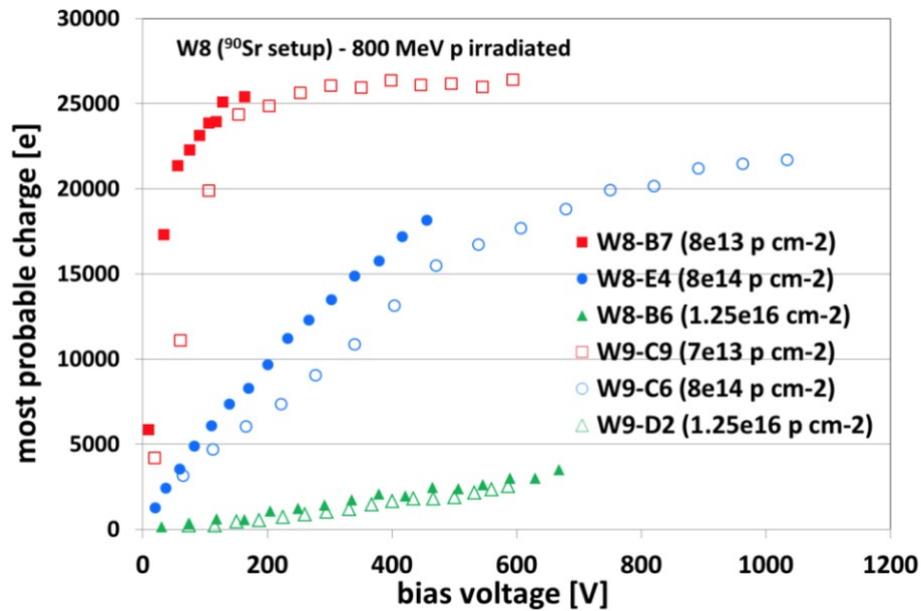


Figura 2.4 [24]

2.3 Rumore

Il rumore è un segnale elettrico indesiderato che può manifestarsi come disturbo o interferenza, sia di origine interna che esterna al sistema. Esso si sovrappone al segnale principale, provocando perdite e/o distorsioni dell'informazione.

La Figura 2.5 illustra i componenti principali di un sensore al silicio con lettura tramite un amplificatore generico.

Il circuito è soggetto a diverse fonti di rumore, come la corrente di perdita del sensore, il rumore termico dei resistori e il rumore bianco e flicker dell'amplificatore. Ogni fonte di rumore può essere descritta da una funzione che rappresenta la potenza generata in funzione della frequenza, nota come densità spettrale di potenza riferita all'ingresso.

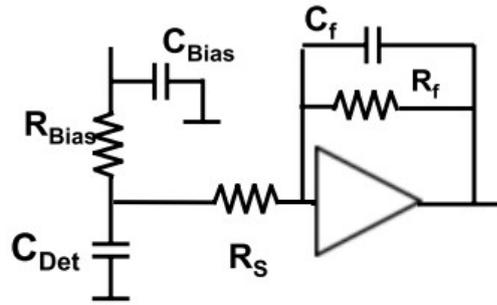


Figura 2.5

I condensatori, i resistori e la corrente di perdita del sensore hanno funzioni di densità spettrale che sono indipendenti dal circuito specifico, mentre l'amplificatore ha caratteristiche di rumore proprie.

Come da convenzione standard, le fonti di rumore sono classificate in:

- Rumori paralleli, come la corrente di perdita del sensore e il rumore termico dei resistori di feedback e polarizzazione, modellati come sorgenti di corrente parallele all'ingresso dell'amplificatore.
- Rumori di serie, come il rumore termico dei resistori in serie, rappresentati come sorgenti di tensione in serie con l'ingresso dell'amplificatore.
- Rumori dell'amplificatore, inclusi il rumore bianco e quello di flicker, modellati come sorgenti di tensione.

Per determinare il contributo complessivo di ciascuna fonte di rumore al rumore totale, si esegue la convoluzione della funzione di densità spettrale con la funzione di trasferimento dell'amplificatore, che è specifica per ciascuna sorgente di rumore. Questo porta alla misura del rumore in termini di carica equivalente di rumore (ENC), che rappresenta il numero di elettroni necessari all'ingresso per produrre un segnale di tensione equivalente a quello generato dal rumore. Questo concetto è particolarmente rilevante per gli amplificatori a carica sensibile (CSA), i quali misurano la carica raccolta dal sensore e determinano anche la costante di tempo del circuito, indicata come tempo di picco dell'amplificatore τ_p

È possibile esprimere il rumore totale come la somma di tre contributi: rumore di serie, rumore parallelo e rumore 1/f. L'equazione sarà:

$$ENC = \sqrt{ENC_s^2 + ENC_p^2 + ENC_f^2}$$

Nel funzionamento degli UFSD, con un tempo di shaping molto rapido, il rumore di serie è predominante a basse correnti di dispersione, mentre a valori elevati di fluence⁴ il rumore parallelo può diventare il principale contributo.

2.4 Apparato sperimentale

Negli ultimi sette anni, FBK⁵ ha condotto attività di ricerca e sviluppo su diverse produzioni di UFSD; le principali motivazioni dietro ogni produzione di UFSD sono il miglioramento delle prestazioni temporali, l'aumento dell'efficienza di raccolta della carica, l'incremento della resistenza alle radiazioni e l'ottimizzazione del fill factor⁶. Di seguito, sono riportate le principali caratteristiche e motivazioni di ogni produzione di UFSD realizzata da FBK:

- La prima produzione, avvenuta nel 2016 (UFSD1), ha utilizzato LGAD con uno spessore di 300 μm .
- Nel 2017, la produzione di UFSD2 si è concentrata sull'ottimizzazione del design dello strato di guadagno di LGAD con spessore di 50 μm . Sono stati utilizzati Borio e Gallio come dopanti per lo strato di guadagno, co-impiantati con Carbonio per migliorare la resistenza alle radiazioni.
- La produzione di UFSD3 del 2018 è stata la prima realizzata da FBK con LGAD di 50 μm di spessore. Quattro dosi di Borio sono state combinate con quattro dosi di Carbonio per lo strato di guadagno e sono state progettate tre diverse strategie per le strutture di terminazione dello strato di guadagno [25].

Si noti come, nell'avanzare degli anni, gli UFSD siano stati ridotti di spessore per consentire l'utilizzo in applicazioni a temporizzazione ultra-rapida.

⁴ Misura l'intensità e la durata dell'esposizione del rivelatore a radiazioni o particelle nel tempo.

⁵ La Fondazione Bruno Kessler (FBK) è l'ente di ricerca della Provincia autonoma di Trento che opera nel campo scientifico tecnologico e delle scienze umane.

⁶ Percentuale della superficie attiva del rivelatore che è effettivamente sensibile alla radiazione incidente, rispetto all'area totale del sensore.

I rivelatori successivi sono stati ideati e fabbricati tenendo in considerazione cruciali miglioramenti: l'investigazione di un dosaggio inferiore di carbonio da co-implementare con il boro nello strato di guadagno per migliorare la resistenza alle radiazioni; oltre allo strato di guadagno superficiale, sono stati esplorati strati di guadagno più profondi con l'obiettivo di migliorare i parametri operativi dei dispositivi molto irradiati; una migliore comprensione del design aggressivo (limiti e svantaggi) al fine di ridurre la regione senza guadagno e, di conseguenza, aumentare il "fill factor" degli LGAD segmentati, necessario per ottenere una buona risoluzione spaziale e, quindi, per il tracciamento 4D.

L'apparato sperimentale per gli studi sulla raccolta di carica è caratterizzato da:

- Una scheda di lettura (10x10 cm²) sulla quale vengono montati gli UFSD;
- Un amplificatore invertente sulla scheda;
- Un amplificatore commerciale esterno generalmente da 20 dB utilizzato per ottenere una trans-impedenza totale di 4700 Ω. Questo valore di trans-impedenza, che mette in relazione la corrente del rivelatore con il segnale di tensione misurato, è stato simulato con SPICE ⁷ e verificato sperimentalmente con diverse sorgenti di segnale (particelle β, laser, particelle ionizzanti minime con amplificatori lenti) e diverse elettroniche (lettura veloce e integrata). Da questi studi è stato stimato un errore sistematico di scala del 20%, comune a tutte le misurazioni della raccolta di carica.
- Un oscilloscopio digitale; il rumore di digitalizzazione dell'oscilloscopio contribuisce in modo variabile al rumore complessivo, a seconda della scala verticale utilizzata. Questo effetto viene ridotto grazie all'uso di una scala verticale maggiore per i segnali con alto guadagno.
- Una sorgente di segnali;

⁷ È un programma di simulazione circuitale.

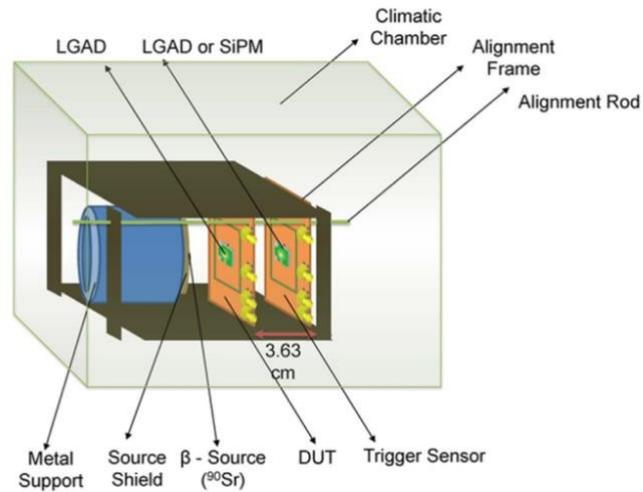


Figura 2.6 [26]

L'installazione di laboratorio con una sorgente di β proveniente da ^{90}Sr è mostrata nella Figura 2.6. Un telaio allinea la sorgente, il dispositivo sotto test (DUT) e il contatore di trigger LGAD, all'interno di una camera climatica. La scheda che ospita il DUT ha un foro in corrispondenza dell'area attiva del DUT, in modo che gli elettroni provenienti dalla sorgente β non vengano bloccati dal materiale della scheda e possano raggiungere la scheda di trigger. La dimensione di questo foro, dunque, definisce l'area del sensore utilizzata durante il test [26].

⁸ Isotopo radioattivo dello stronzio prodotto dalla fissione nucleare dell'uranio.

Capitolo 3

3 Applicazioni Biomediche; radioterapia

3.1 Adroterapia

L'adroterapia (spesso scritta come "hadron therapy" e conosciuta anche come "terapia con particelle" o "terapia con fasci di ioni") è un tipo specifico di radioterapia oncologica che utilizza protoni o ioni leggeri carichi, come particelle alfa e nuclei di carbonio ad alte energie, per ottenere una migliore distribuzione della dose rispetto ai raggi X utilizzati nella radioterapia convenzionale.

Sebbene la terapia con protoni sia stata proposta da Robert Wilson più di mezzo secolo fa, la sua implementazione è stata lenta poiché richiede strutture con ciclotroni o sincrotroni, che sono più complesse e costose rispetto agli acceleratori utilizzati nella RT convenzionale. Negli anni '50, il primo centro clinico di terapia con protoni fu installato al Lawrence Berkeley Laboratory (Università della California). Da allora, oltre 100.000 pazienti sono stati trattati con la PT in tutto il mondo (85% con protoni e 15% con ioni più pesanti, principalmente carbonio). Attualmente, ci sono 89 centri di terapia con ioni di protoni e 12 con ioni di carbonio operativi in tutto il mondo.

Le particelle cariche utilizzate in adroterapia possono penetrare nei tessuti umani con diffusione limitata e massima deposizione di dose vicino alla fine dei loro percorsi, caratterizzata da un picco (picco di Bragg) che può essere posizionato nel bersaglio (tumore) da trattare. Questo rappresenta un vantaggio significativo rispetto alla radioterapia convenzionale, che utilizza fotoni di corta lunghezza d'onda (raggi X o gamma).

Grazie al loro profilo di dose caratteristico, con un picco di Bragg che risparmia i tessuti sani oltre il tumore, i protoni somministrano una dose minore ai tessuti sani circostanti (Figura 3.1). Pertanto, il principale motivo per il loro utilizzo è la migliorata selettività fisica, ovvero una migliore conformazione della dose che consente una maggiore protezione degli organi a rischio e, quindi, la possibilità di ridurre gli effetti collaterali. Ciò è particolarmente rilevante per i tumori radioresistenti che richiedono alte dosi, per quelli localizzati vicino a organi o strutture

sensibili (come il midollo spinale), e per i tumori pediatrici, dove è necessaria una riduzione della morbilità acuta e a lungo termine.

Gli ioni di carbonio condividono le stesse proprietà fisiche favorevoli dei protoni, ma offrono anche un vantaggio biologico. La loro RBE ⁹ aumenta negli ultimi centimetri del percorso del fascio, mentre è bassa nel canale di ingresso; li ioni di carbonio offrono quindi una deposizione della dose ancora più precisa nel tumore, con un'ulteriore riduzione dell'irradiazione dei tessuti sani (Figura 3.1). [27]

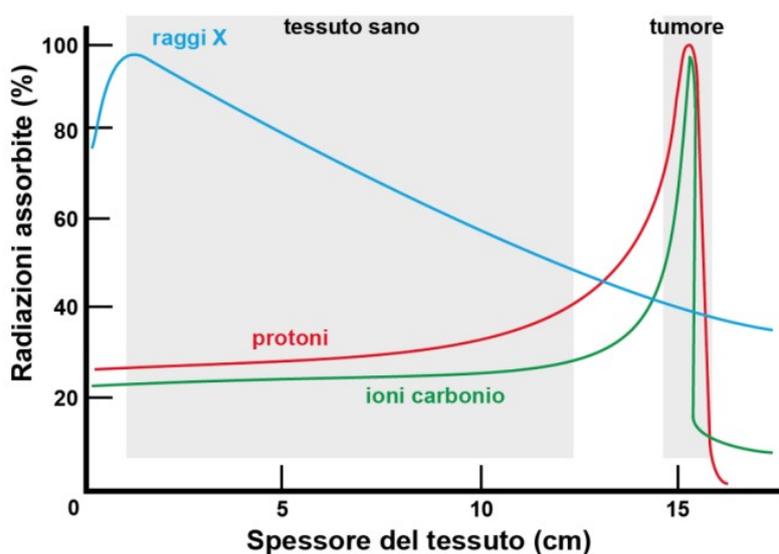


Figura 3.1: Il grafico illustra come i protoni e gli ioni di carbonio permettano una migliore concentrazione della dose di radiazione nel tumore, minimizzando l'esposizione del tessuto sano rispetto ai raggi X. [27]

3.2 UFSD in adroterapia

Come spiegato nel Capitolo 2 gli Ultra Fast Silicon Detectors (UFSD) sono sensori al silicio di nuova generazione, caratterizzati dalla presenza di uno strato di guadagno interno, capace di generare segnali di ampia intensità anche in dispositivi di spessore ridotto. Grazie al loro elevato rapporto segnale-rumore, gli UFSD rappresentano strumenti ideali per misurazioni di altissima precisione. In particolare, questi sensori sono ottimizzati per combinare un'eccellente

⁹ Esprime l'entità dell'effetto biologico di un tipo di radiazione a parità di dose fisica.

risoluzione temporale, dell'ordine di poche decine di picosecondi, con le risoluzioni spaziali tipiche dei rivelatori al silicio segmentati; ciò consente appunto di produrre rivelatori sottili fino a 50 μm , in grado di generare segnali di breve durata e con un'eccellente risoluzione temporale.

All'interno del progetto MoVeIT, sono in fase di sviluppo due dispositivi UFSD. Il primo è progettato per contare direttamente singoli protoni ad alte frequenze, sfruttando l'elevato rapporto segnale-rumore e il rapido tempo di raccolta in piccoli spessori (1 ns in 50 μm) degli LGAD (Low Gain Avalanche Detectors). Questo dispositivo, che richiede UFSD segmentati in strisce ed elettronica front-end¹⁰, sarà anche in grado di misurare i profili del fascio in due direzioni ortogonali.

Il secondo dispositivo ha l'obiettivo di misurare l'energia del fascio utilizzando tecniche di time-of-flight¹¹, sfruttando l'eccezionale risoluzione temporale dei UFSD. Sarà utilizzato un telescopio costituito da due sensori UFSD segmentati in un numero minimo di pad (in base alla capacità accettabile), e verrà sviluppata un'elettronica VLSI¹² personalizzata con la giusta densità di canali. [28]

Questi sensori possono essere applicati come potenziali contatori di particelle nel contesto del monitoraggio dei fasci in adroterapia e nel prossimo paragrafo saranno presentati dei test preliminari dei sensori UFSD con un fascio terapeutico.

3.2.1 Test del fascio terapeutico

Di recente, è stato avviato uno sforzo congiunto da parte di diversi gruppi sperimentali per condurre esperimenti biomedici mirati allo sviluppo futuro dell'adroterapia utilizzando fasci di carbonio e ossigeno, entrambi emettitori di positroni.

A questo proposito sono stati condotti tre test del fascio presso il centro di adroterapia CNAO di Pavia (unico centro in Italia in grado di erogare trattamenti di adroterapia mediante l'impiego

¹⁰ È l'insieme dei circuiti presenti subito dopo l'ingresso di un sistema di sensori.

¹¹ È una tecnica di misura in cui un elemento di rilevamento invia un raggio laser al bersaglio e una parte della luce riflessa ritorna al ricevitore. Il tempo misurato indica la distanza dall'oggetto.

¹² Indica una tecnica di integrazione a elevatissima densità (tipicamente più di 100.000 transistori per chip).

di protoni e ioni carbonio) utilizzando un fascio terapeutico di protoni per valutare le proprietà di conteggio e temporizzazione degli Ultra-Fast Silicon Detectors.

I risultati riportati in questo studio sono stati ottenuti mediante un'analisi offline delle forme d'onda raccolte durante 32 sessioni sperimentali, ciascuna delle quali ha coinvolto l'esposizione a un fascio di protoni contenente $2 \cdot 10^{10}$ particelle, con una larghezza a metà altezza (FWHM) del fascio pari a 1 cm. In ogni sessione, l'energia del fascio di protoni era mantenuta costante, variando tra 62 e 227 MeV, mentre il flusso è stato modulato tra il 20% e il 100% del valore massimo consentito.

Due sensori, ciascuno con pad di spessore attivo di 50 μm (di dimensioni $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ e 1 mm di diametro rispettivamente), sono stati montati a una distanza di 1 cm l'uno dall'altro all'interno di una scatola metallica, progettata per garantire l'allineamento preciso sia tra i sensori stessi, sia rispetto al fascio di protoni. I segnali di uscita dai sensori sono stati inviati a amplificatori a banda larga (CIVIDEC 40 dB¹³) per l'amplificazione, poi visualizzati su un oscilloscopio, con una frequenza di campionamento elevata di 40 GS/s. Successivamente, i dati sono stati acquisiti tramite un digitalizzatore, con una frequenza di campionamento di 5 GS/s, permettendo la cattura di istantanee di 200 ns.

L'apparato sperimentale era ulteriormente equipaggiato con una camera di ionizzazione PTW PinPoint¹⁴, posizionata in allineamento con il fascio subito dopo i sensori, utilizzata per fornire un tasso di riferimento preciso. L'intero sistema era alimentato da fonti di alimentazione HV e LV (batterie ad alta e bassa tensione), e le misurazioni sono state gestite e acquisite tramite due computer: uno situato nella sala di trattamento e l'altro nella sala di controllo, consentendo il controllo remoto di tutte le strumentazioni. [28]

¹³ È un amplificatore di corrente a basso rumore con una larghezza di banda analogica di 2 GHz e un guadagno di 40 dB. Il suo guadagno, velocità e resistenza alla radiazione sono ottimizzati per l'uso come amplificatore di front-end per i monitor di perdita di fasci.

¹⁴ Apparato che misura la perdita di energia per ionizzazione di una particella carica o la perdita di energia di un fotone, la PTW PinPoint, in particolare, è una camera ultra compatta con caratteristiche 3D per la dosimetria in fasci di fotoni ad alta energia.

Nella Figura 3.2 a sinistra (A) è presente un'immagine che mostra i due sensori posizionati all'interno di una scatola metallica, accuratamente allineati rispetto al fascio per garantire misurazioni precise. In alto a destra (B) invece si vede un dettaglio del sensore Hamamatsu, caratterizzato da un diametro di 1 mm e uno spessore di 50 μm . In basso a destra (C) si ha l'immagine del sensore CNM, che presenta dimensioni di $1,2 \times 1,2 \text{ mm}^2$ e uno spessore di 50 μm .

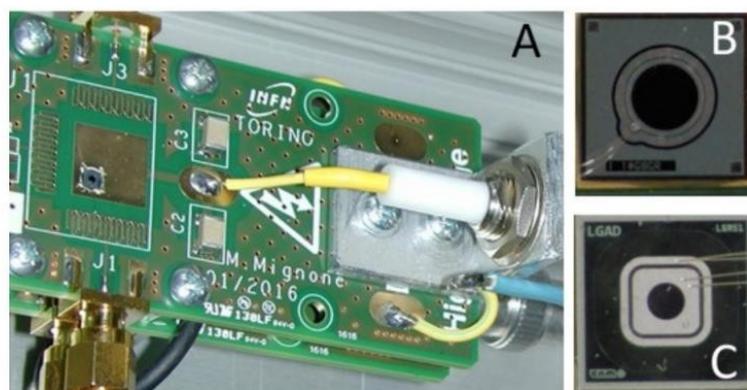


Figura 3.2

3.2.2 Sincrotrone

L'adroterapia si basa sull'utilizzo di fasci monoenergetici puri a profondità di penetrazione ben definite, in modo da ottenere distribuzioni di dose altamente conformi senza necessità di hardware specifici per i pazienti.

A questo proposito è necessario utilizzare un sincrotrone per accelerare gli ioni in un'ampia gamma di energie, permettendo dunque una somministrazione di dose completamente tridimensionale.

I sincrotroni (Figura 3.3) sono acceleratori di particelle circolari e ciclici con un raggio fisso: il campo magnetico aumenta durante il ciclo di accelerazione, permettendo al fascio di seguire la stessa traiettoria circolare. Anche la frequenza radio della cavità acceleratrice aumenta per adattarsi alla frequenza di rivoluzione del fascio. [29]

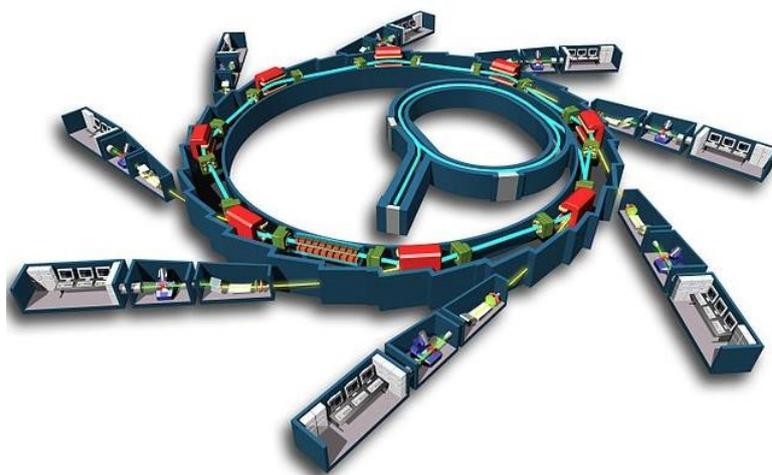


Figura 3.3: schema di un sincrotrone. Le particelle vengono accelerate nell'anello centrale e poi dirette verso diverse sale di trattamento (le ramificazioni esterne), dove vengono utilizzate per irradiare con precisione i tumori.

Nel caso di utilizzo del sincrotrone in adroterapia il volume bersaglio, segmentato in vari strati ortogonali alla direzione del fascio e corrispondenti a diverse energie del fascio, viene irradiato dalla sovrapposizione di una sequenza di microfasci, ciascuno dei quali fornisce un numero definito di particelle in una posizione specifica. Per eseguire tali operazioni con alta precisione, è necessario un sistema di somministrazione della dose (DDS) dedicato, veloce, accurato e ridondante. Monitorando il flusso di particelle per ciascun microfascio, richiedendo l'energia corretta del fascio all'inizio di ogni spill e controllando i magneti di sterzata per scansionare lateralmente il fascio, il DDS svolge un ruolo cruciale nell'architettura complessa di una struttura per la radioterapia con fasci ionici a scansione modulata.

Il sincrotrone del CNAO è stato progettato per accelerare protoni o ioni di carbonio. All'interno dell'anello del sincrotrone, che ha un diametro di 25 metri, sono posizionati due sorgenti ioniche, un quadrupolo a radiofrequenza e un acceleratore lineare. Le particelle vengono accelerate all'energia richiesta da una cavità a radiofrequenza, che si occupa anche della stabilizzazione del fascio prima dell'estrazione. Una volta raggiunta l'energia desiderata, inizia la fase di estrazione e le particelle vengono dirette attraverso la linea di trasporto del fascio ad alta energia verso la sala di trattamento selezionata. [30]

La Figura 3.4 mostra la configurazione della sala 2 in un centro di adroterapia, con ugelli per linee di fascio sia orizzontali (H beam) che verticali (V beam). Le particelle vengono guidate

verso l'isocentro, il punto di trattamento centrale (f), passando attraverso una serie di componenti.

Questi componenti (a, b, c, d, e, f) servono a regolare e monitorare il fascio prima che raggiunga il paziente posizionato sull'isocentro.

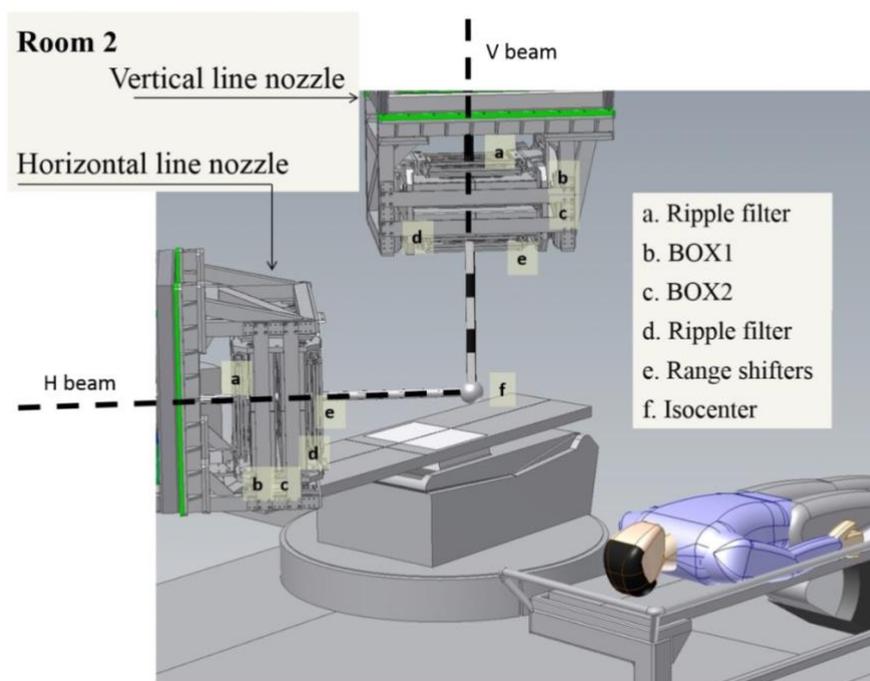


Figura 3.4 [30]

3.3 Brachiterapia

La brachiterapia, a differenza delle tecniche radioterapiche che impiegano fasci esterni di radiazione, utilizza sorgenti radioattive impiantate temporaneamente o permanentemente all'interno del corpo del paziente, direttamente nella zona tumorale. Questa tecnica permette una somministrazione mirata e localizzata della radiazione, minimizzando l'esposizione dei tessuti sani circostanti.

Le sorgenti radioattive possono essere inserite nel corpo tramite cateteri o applicatori specifici. Questi dispositivi sono progettati per posizionare le sorgenti con precisione millimetrica, garantendo che la radiazione venga diretta esattamente nella zona desiderata.

Durante la brachiterapia, è cruciale misurare con precisione la distribuzione della dose di radiazione. A questo scopo, si utilizzano rivelatori di particelle avanzati e sistemi di dosimetria. Il trattamento con sorgenti di brachiterapia comporta infatti gradienti di dose molto ripidi, per cui è fondamentale misurare le distribuzioni tridimensionali della dose con alta risoluzione spaziale.

La Figura 3.5 rappresenta lo strumento progettato per posizionare in modo preciso le sorgenti radioattive per il trattamento mirato di tumori in brachiterapia. È un dispositivo per la somministrazione di radiazioni che utilizza tubi o cateteri (i filamenti gialli visibili nella parte anteriore) per inserire le sorgenti radioattive nel corpo del paziente. Questo tipo di macchina può essere controllato a distanza per garantire la sicurezza del personale sanitario, riducendo l'esposizione alle radiazioni.



Figura 3.5

3.3.1 Esempio applicazione di brachiterapia

A seguito di ricerche cliniche, un esempio di applicazione di brachiterapia è stato osservato dimostrando come l'irradiazione all'interno dell'arteria possa ridurre significativamente la restenosi.

Le malattie delle arterie coronarie sono la principale causa di malattia e morte nei paesi occidentali. L'angioplastica mira a ripristinare una sezione trasversale normale e stabile dell'arteria. Tuttavia, la ristrettezza dell'arteria dopo l'intervento, nota come restenosi, è una delle maggiori limitazioni dell'angioplastica.

Per restenosi, si intende appunto il processo di ri-occlusione del tratto di coronaria liberato mediante angioplastica, caratterizzato da intensa crescita cellulare e dovuto alla risposta anomala dell'organismo alla presenza di un corpo estraneo come lo stent.

Si stima che, in seguito all'applicazione di questa tecnica, il tasso di restenosi possa scendere dal 30-40% iniziale a meno del 10% se la radiazione viene applicata al sito di ostruzione durante o dopo l'angioplastica. Il trattamento di un'arteria con restenosi, chiamato brachiterapia intravascolare, viene eseguito su una piccola sezione del vaso e si effettua tipicamente usando sorgenti radioattive puntiformi, un filo radioattivo a spirale all'interno di un catetere, oppure avvolgendo il palloncino dell'angioplastica con una pellicola radioattiva. [31]

Come già detto, il trattamento con sorgenti di brachiterapia comporta gradienti di dose molto ripidi, per cui è fondamentale misurare le distribuzioni tridimensionali della dose con alta risoluzione spaziale.

3.4 Differenze e problematiche

Per l'applicazione in brachiterapia il rivelatore proposto si distingue per la sua capacità di ricostruire la distribuzione dell'energia rilasciata da un flusso continuo di particelle provenienti da una sorgente estesa. In sostanza l'immagine risultante della sorgente può essere interpretata come una mappa dell'energia depositata, in cui si evidenzia una regione densa di pixel attivati, ciascuno dei quali registra più particelle.

La gamma dinamica (rapporto tra il punto più chiaro e quello più scuro di un'immagine) e la velocità di lettura, tuttavia, sono vincolate dalle esigenze di monitoraggio del fascio: il flusso di elettroni secondari corrisponde alle variazioni previste nell'intensità del fascio durante la

terapia, e una frequenza di acquisizione di 10 kHz permetterebbe di rilevare queste fluttuazioni in tempo reale. Per ottenere un'elevata precisione, è cruciale che il sistema operi senza tempi morti. Queste caratteristiche risultano vantaggiose nella brachiterapia, dove la durata della lettura può incrementare la dose ricevuta dal sensore durante i controlli di qualità della sorgente.

In adroterapia invece, i contatori di ioni utilizzati per monitorare con precisione il fascio di particelle cariche pesanti, devono soddisfare requisiti rigorosi in termini di accuratezza e velocità di lettura; i problemi principali da affrontare, come già visto, sono l'elevata energia e densità delle particelle, gli effetti di scattering, il rumore di fondo ed, in particolare, la velocità di acquisizione dei dati.

Per quanto riguarda la tolleranza alle radiazioni, le limitazioni maggiori si riscontrano principalmente nell'imaging delle sorgenti di brachiterapia. Nell'adroterapia, invece, questo problema è meno rilevante: gli elettroni secondari generati nel monitor del fascio hanno un'energia cinetica massima di circa 20 keV, con una portata di circa 3 μm . Questi elettroni vengono completamente assorbiti nello strato sensibile senza influire né sui circuiti front-end né sul campo elettrico nelle vicinanze. D'altra parte, la sensibilità necessaria per rilevare particelle a bassa energia rappresenta una sfida tecnica importante, poiché è essenziale evitare la presenza di "strati morti" nei sensori. Inoltre, il rivelatore deve disporre di un otturatore globale¹⁵ e di un tempo di esposizione regolabile, per poter catturare con precisione immagini di sorgenti con attività diverse.

¹⁵ Tecnologia che espone tutti i pixels simultaneamente; la camera può infatti catturare un'immagine intera in una sola volta, eliminando l'effetto finale di immagine distorta.

Conclusioni

In questa tesi sono stati presentati, delineati e descritti gli Ultra Fast Silicon Detectors (UFSD), rivelatori di particelle innovativi al silicio progettati per misurare direttamente e con alta precisione il numero di particelle in un fascio terapeutico entro un determinato intervallo di tempo.

I risultati ottenuti evidenziano come gli UFSD offrano una risoluzione temporale eccezionale dell'ordine delle decine di picosecondi, combinata con una risoluzione spaziale altamente precisa. Queste caratteristiche rendono gli UFSD particolarmente adatti per migliorare la qualità della radioterapia a particelle, consentendo una distribuzione della dose più accurata e una maggiore sicurezza per i pazienti.

In seguito alla presentazione e descrizione di questi sensori si è vista l'integrazione di essi nella pratica clinica dell'adroterapia. Questa tecnica infatti potrebbe rivoluzionare il trattamento dei tumori, in quanto permette una dosimetria più precisa e un monitoraggio in tempo reale dei fasci terapeutici.

Per il futuro, sono necessari ulteriori sviluppi per ottimizzare la tecnologia UFSD e affrontare le sfide attuali. La ricerca potrebbe concentrarsi su miglioramenti nella sensibilità dei detector e sull'integrazione di queste tecnologie con sistemi di imaging avanzati. Inoltre, studi clinici più ampi sono necessari per valutare pienamente l'impatto degli UFSD nella pratica clinica quotidiana.

In conclusione dunque, le scoperte e i miglioramenti documentati in questa tesi offrono una base solida per ulteriori ricerche e innovazioni, con il potenziale di trasformare significativamente il campo della radioterapia e migliorare i risultati per i pazienti.

Bibliografia

[1]: Semiconductor detectors: references

Vorlesung M. Krammer “Teilchendetektoren” TU Wien, SS 2015

Doris Eckstein, “Semiconductor detectors” Lecture at DESY, 2012

Kolanoski, Wermes “Teilchendetektoren”, 2015

Kleinknecht, “Detektoren für Teilchenstrahlung”

file:///Users/gioiaroncato/Downloads/Semiconductor%20Detectors.pdf

[2]: Michael Moll/CERN and Daniela Bortoletto/Purdue and the book ‘Semiconductor Radiation Detectors’ by Gerhard Lutz. <https://riegler.web.cern.ch/lectures/lecture5.pdf>

[3]: Pellegrini G., et al. Technology developments and first measurements of Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for high energy physics applications Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 765 (2014), pp. 12-16

[4]: Maes W., De Meyerm K., Van Overstraeten R. Impact ionization in silicon: A review and update Solid-State Electron., 33 (1999), pp. 705-718

[5] I. Prochazka, K. Hamal, and B. Sopko, “Recent achievements in single photon detectors and their applications,” J. Modern Opt., vol. 51, nos. 9–10, pp. 1289–1313, Jul. 2004.

[6] H. F.-W. Sadrozinski, et al., Ultra-Fast Silicon Detectors, RESMDD12, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, in print.

[7] H. F.-W. Sadrozinski, Exploring charge multiplication for fast timing with silicon sensors, 20th RD50 Workshop, Bari, Italy, May 30-June 1, 2012, and references therein <https://indico.cern.ch/conferenceOtherViews.py?view=standard&confId=175330>.

[8] H. F.-W. Sadrozinski, et al., Sensors for Ultra-Fast Silicon Detectors, HSTD9, Hiroshima, Japan. Nucl. Instrum. Meth A, in print.

[9] RD50 Collaboration, <http://rd50.web.cern.ch/rd50/> .

- [10] A. Macchiolo, Impact ionization in silicon detectors, in: Sixteenth RD50 Workshop Barcelona, Spain, 2010, <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=1&sessionId=3&resId=0&materialId=slides&confId=86625> .
- [11] W. Maes, K. De Meyer, R. Van Overstraeten, Impact ionization in silicon, a review and update, *Solid-State Electronics* 33 (6) (1990) 705.
- [12]: P. Yu, M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors - Physics and Materials Properties*, Springer, 4th Edition, pp. 58-68
- [13] S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Edition, (1981)
- [14] I. Mandic, et al., Study of anomalous charge collection efficiency in heavily irradiated silicon strip detectors, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 636 (Suppl.) (2011) S50.
- [15] J. Lange, et al., Properties of a radiation-induced charge multiplication region in epitaxial silicon diodes, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 622 (2010) 49.
- [16] C. Piemonte, A new silicon photomultiplier structure for blue light detection, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* 568 (2006) 224.
- [17] G.-F. Dalla Betta, et al., High-performance PIN photodiodes on TMAH thinned silicon wafers, *Microelectronics Journal* 39 (2008) 1485.
- [18] G. Kramberger, et al., Electric field and space charge in neutron irradiated n p -p sensors, in: Nineteenth RD50 Workshop CERN, Switzerland, Nov. 21–23, 2011, <http://indico.cern.ch/getFile.py/access?contribId=7&sessionId=1&resId=0&materialId=slides&confId=148833> .
- [19] W. Maes, K. De Meyer, R. Van Overstraeten, *Solid State Electronics*, vol.33, (1990)
- [20] F. Zappa, S. Tisa, A. Tosi, and S. Cova, “Principles and features of single-photon avalanche diode arrays,” *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 140, no. 1, pp. 103–112, Oct. 2007.
- [21] A. Eisele et al., “185 MHz count rate, 139 dB dynamic range singlephoton avalanche diode with active quenching circuit in 130 nm CMOS technology,” in *Proc. Int. Image Sensor Workshop*, Jun. 2011, pp. 278–280

- [22] S. Cova, A. Lacaita, M. Ghioni, G. Ripamonti, and T. A. Louis, “20-ps timing resolution with single-photon avalanche diodes,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, no. 6, pp. 1104–1110, Jun. 1989.
- [23] Z. Li, Radiation damage effects in Si materials and detectors and rad-hard Si detectors for SLHC, JINST 4 P03011, (2009)
- [24] G. Kramberger, 24th RD50 workshop, 2014
- [25] Laštovička-Medin, G.; Rebarz, M.; Doknic, J.; Bozovic, I.; Kramberger, G.; Laštovička, T.; Andreasson, J. Exploring the Interpad Gap Region in Ultra-Fast Silicon Detectors: Insights into Isolation Structure and Electric Field Effects on Charge Multiplication. *Sensors* 2023, 23, 6746. <https://doi.org/10.3390/s23156746>
- [26] N. Cartiglia, et al., Beam test results of a 16 ps timing system based on ultra-fast silicon detectors, *Nucl. Instrum. Methods A* 850 (2017) 83–88.
- [27] Manjit Dosanjh; Ugo Amaldi b; Ramona Mayer c; Richard Poetter d.
European network for Light ion hadron therapy, Received 8 February 2018.
- [28] A. Vignati; Innovative thin silicon detectors for monitoring of therapeutic proton beams: preliminary beam tests. et al 2017 JINST 12 C12056
- [29] Alberto Degiovanni a, * , Ugo Amaldi b History of hadron therapy accelerators Accepted 5 March 2015 Available online 23 March 2015
- [30] S. Giordanengo et al., The CNAO Dose Delivery System for ion pencil beam scanning radiotherapy, *Medical Physics* 42 (1), 2015
- [31] M. Cacciaa, A. Airola, M. Alemi ‘at, M. Amatia, L. Badanob, V. BartschC, D. Berstd, C. Bianchie, H. BolC, A. Bulgheronia, F. Cannillod, C. Cappellinia, A. Czermak’, G. Clausd, C. Colledanid, L. Contee, G. Deptuch, W de BoerC, A. DierlammC, K. Domanski W. Dulinski, B. Dulnyf, Ferrandob, E. Grigoriev, P Grabiech, R. Lorussoe, B. Jaroszewicz, L. Jungermann, W. Kucewicz, K. Kucharski, S. Kutas, G. Leoi, W. Machowski, J. Marczewski, G. Mondryj, H. Niemi, R. Novarioe, L. Paoluccia, M. Pezzetta, Y. Popowski’, J-L. Riesterd, C. Sampietroe, M. Sapor, H. Schweickertk, B. Spanb”, D. Tomaszewski, A. Zalewska;

Silicon Ultra fast Cameras for electron and γ sources In Medical Applications, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 125 (2003) 133-138