

Facoltà di Ingegneria Corso di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni

Progetto, realizzazione e caratterizzazione di un filtro formatore per rivelatori di radiazioni

Relatore Prof. Gian-Franco Dalla Betta Laureando Lecini Besnik

Correlatore Ing. Marco Povoli

Anno Accademico 2009/2010

Ringraziamenti

Il primo sentito ringraziamento è dedicato al mio padre, anche se è rimasto poco con noi mi ha insegnato tanto.

Un ringraziamento particolare va al prof. Gian-Franco Dalla Betta per avermi dato la possibilità di svolgere il lavoro descritto in questa tesi, per l'infinita disponibilità dimostrata e per l'attenta lettura di tesi.

Un altro ringraziamento va all'ing. Marco Povoli per le spiegazioni e l'aiuto fornito durante l'attività pratica e per aver risolto la maggior parte dei miei dubbi.

Desidero inoltre ringraziare Ilda e la mia famiglia, in particolare Njazi, Ilirjana, Agim e Mereme per avermi incoraggiato nel raggiungere questa meta.

Infine ringrazio tutti i miei amici e i compagni per la disponibilità offerta in questi anni di studio.

Indice

Introdu	ızione	V
INTER	RAZIONE LUCE-SEMICONDUTTORE	1
1.1	Fascio di un onda luminosa	1
1.2	I semiconduttori	2
1.3	Assorbimento della luce dai semiconduttori a silicio	6
RIVEL	LATORI DI RADIAZIONE	9
2.1	Introduzione	9
2.2	Struttura dei rivelatori 3D	10
2.2	2.1 Architettura a singola colonna (STC)	12
2.2	2.2 Architettura a doppia colonna (DTC)	14
2.3	Prestazioni dei rivelatori 3D	15
CATE	NA DI LETTURA	17
3.1	Diagramma a blocchi della catena di lettura	17
3.2	Rivelazione della carica	18
3.3	Preamplificatore di carica (CSA)	20
3.4	Filtro formatore (Shaper)	23
3.4	4.1 Tempo di formatura (Shaping Time)	27
3.5	MCA (MultiChannel Analyzer)	29
PROG	ETTO SOTTO ESAME	31
4.1	Analisi teorica	31
4.2	Gli obiettivi del progetto	32
4.3	CR-200: Caratteristiche principali	34
4.4	Introduzione alle simulazioni	38
4.5	Simulazioni SPICE del CR-200	38

REAL	IZZAZIONE DEL LAYOUT	43
5.1	Introduzione alla realizzazione dello Shaper	43
5.2	Creazione layout dello Shaper	44
5.3	Montaggio della Scheda	48
CARA	TTERIZZAZIONE DEL CIRCUITO	51
6.1	Analisi teorica	51
6.2	Setup di misura	52
6.3	Misure e caratterizzazione del preamplificatore di carica	53
6.4	Misure e la caratterizzazione del filtro formatore	55
Conclu	sioni	59
Bibliog	rafia	61

Introduzione

Negli ultimi decenni l'utilizzo dei dispositivi al silicio come rivelatori di vertice e di traccia negli esperimenti di fisica delle alte energie è andato sempre più espandendosi. Ciò è stato reso possibile soprattutto dagli sviluppi della tecnologia planare che ha permesso di costruire strutture con ottima risoluzione spaziale e resistenza al danno da radiazione.

Intorno alla metà degli anni '90 si è pervenuti allo sviluppo di una nuova famiglia di rivelatori al silicio, che si candidano a sostituire i rivelatori planari per i futuri esperimenti ad altissima luminosità. Lo sviluppo di questa nuova tecnologia di rivelatori ad architetture tridimensionali, o 3D, garantisce una maggiore resistenza al danno di radiazione e una più efficiente raccolta di carica per determinare più accuratamente la posizione della particella.

L'obiettivo di questa tesi è il progetto e la realizzazione di un filtro formatore d'onda, che viene impiegato nel setup di misura della carica raccolta in rivelatori 3D sviluppati a Trento. In particolare, lo Shaper ha il compito di migliorare il rapporto segnale-rumore e permettere la rivelazione della carica anche a rate di conteggio elevate. Inoltre, il filtro formatore realizzato ha uno shaping time molto breve, intorno ai 10 *nS*, per renderlo efficace nella valutazione delle prestazioni dei dispositivi in condizioni operative simili a quelle previste negli esperimenti effettuati presso l'acceleratore LHC al CERN di Ginevra.

La tesi è suddivisa in sei capitoli:

Nel **primo capitolo** sono esposti i principi di assorbimento della luce, ponendo particolare attenzione al caso del Silicio.

Al **secondo capitolo**, sono trattati i vari rivelatori di radiazione, menzionandone vantaggi e svantaggi.

Il **terzo capitolo** tratta la teoria del setup di misura specificando i vari dispositivi che sono associati alla catena di lettura.

Nel **quarto capitolo** vengono discussi gli aspetti inerenti la progettazione del filtro amplificatore e le simulazione circuitali eseguite per il raggiungimento degli obiettivi.

Il **quinto capitolo** è dedicato alla realizzazione dello Shaper, evidenziando alcune tecniche per la creazione e il montaggio della scheda PCB.

Nel **sesto capitolo** sono analizzate le caratterizzazioni e la verifica funzionale del filtro formatore tramite metodologie standard di misura.

Capitolo 1

INTERAZIONE LUCE-SEMICONDUTTORE

1.1 Fascio di un onda luminosa

Il fascio luminoso viene rappresentato come un insieme di fotoni, particelle elementari neutre con carica nulla che permettono l'interazione del campo elettromagnetico. I fotoni hanno massa a riposo¹ nulla e viaggiano alla velocità della luce. La loro energia elettromagnetica nel vuoto è data dall'equazione:

$$E_{ph} = h * v = h \frac{c}{\lambda}$$

dove h è la costante di Plank, v è la frequenza, 2c è la velocità della luce ($c=299.792.458_{m/s}$) e λ è la lunghezza d'onda.

¹ Massa a riposo: Rappresenta la misura della massa di un corpo che risulta costante per qualsiasi sistema di riferimento.

 $^{^2}$ $c=\sqrt{rac{1}{arepsilon_0\mu_0}}$: è la velocità della luce dove $arepsilon_0$ è la permettività elettrica nel vuoto e μ_0 è la permeabilità magnetica nel vuoto.

Nella *figura 1.1* vengono mostrate tutte le radiazioni dello spettro elettromagnetico. Lo spettro di luce visibile all'occhio umano è compreso nella lunghezza d'onda tra 390÷770 nanometri.

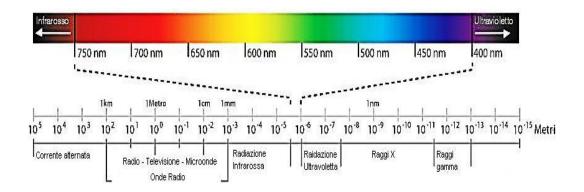


Figura 1.1: Spettro elettromagnetico

Essendo il fotone una particella, può subire urti, può essere assorbito interagendo con atomi e molecole come vedremo nei paragrafi successivi.

1.2 I semiconduttori

I semiconduttori, e tra essi in particolare il silicio, sono i materiali che hanno permesso lo sviluppo delle tecnologie microelettroniche.

La resistività degli materiali in stato solido è relazionata alla temperatura secondo questa equazione:

$$R = \rho * \frac{l}{S}$$

dove:

R è la resistenza, l è la lunghezza del filo misurata in *metri*, S è la l'area della sezione misurata in m^2 e ρ è la resistività del materiale misurata in Ω^*m .

I semiconduttori 3

La resistività nei metalli è data dalla seguente formula:

$$\rho = \rho_0 * \left(1 + \alpha (T - T_0)\right)$$

Dove:

 ρ_0 è la resistività del metallo alla temperatura T_0 di riferimento, solitamente presa pari a 0° o 20°C e α è il coefficiente termico dipendente dal materiale.

La conducibilità dei materiali solidi dipende dall'intervallo (gap) di energia tra la banda di conduzione (BC) e la banda di valenza (BV), secondo il quale possiamo classificare un solido in 3 modi:

- ➤ I conduttori, hanno gli elettroni degli orbitali più esterni nella banda di conduzione e la banda di conduzione si sovrappone a quella di valenza. Gli elettroni di valenza possono acquisire energia cinetica e quindi sono liberi di muoversi.
- ➤ I semiconduttori, nei quali la banda di conduzione e la banda di valenza sono separate da un ridotto Energy Gap (E_G ~ 1 eV). Per T=300°K la BC è quasi vuota (presenza di elettroni di conduzione) e la BV è quasi piena (presenza di poche "carenze di elettroni" o lacune).
- ➤ Negli isolanti, la BC e la BV sono separate da un elevato Energy Gap (E_G ~ 6÷8 eV). Per T=300°K la BC è completamente vuota di elettroni di conduzione e la BV è completamente piena di elettroni di valenza vincolati a formare legami covalenti.

Tale classificazione è rappresentata nella figura seguente.

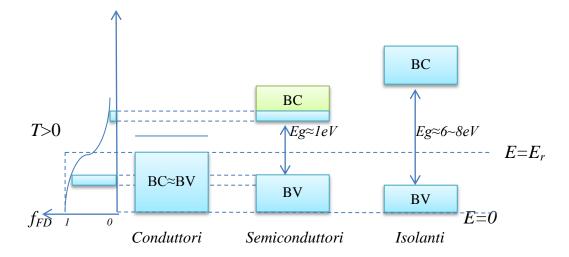


Figura 1.2: Distribuzione delle bande di energia

Per modificare le proprietà elettriche dei semiconduttori si ricorre alla tecnica del drogaggio, mediante la quale vengono inseriti nel cristallo intrinseco delle impurità. Abbiamo due meccanismi di drogaggio:

- Drogaggio di tipo p
- Drogaggio di tipo n

Con riferimento al silicio, elemento del IV gruppo, se vengono introdotti atomi accettori (elementi del III gruppo es. Boro) si avrà un aumento del numero delle lacune (drogaggio di tipo p), se gli atomi introdotti sono donatori (elementi del V gruppo es. Fosforo) si avrà un aumento del numero degli elettroni (drogaggio di tipo n).

🖶 La giunzione p-n

Quando in un singolo cristallo di semiconduttore si introducono da un lato impurità di tipo donatore e dall'altra di tipo accettore, si forma una giunzione p-n. In prossimità della giunzione si crea la regione di svuotamento composta da un doppio strato di ioni non neutralizzati, che origina un campo elettrico ($figura\ 1.3$).

I semiconduttori 5

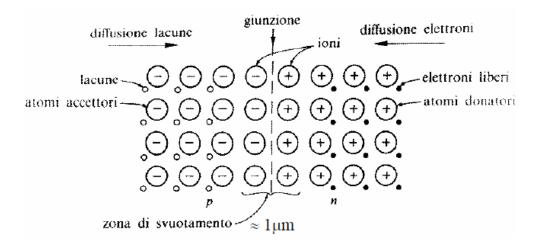


Figura 1.3: Rappresentazione schematica giunzione p-n nei semiconduttori

La giunzione p-n è parte costituente di qualunque dispositivo microelettronico anche complesso, e, anche da sola permette di formare semplici componenti come per esempio il diodo che permette il flusso di corrente in una direzione ma non in quella opposta.

Questo risultato viene ottenuto incrementando o riducendo il campo elettrico e con esso la larghezza della zona di svuotamento. Per cambiare l'estensione della zona di svuotamento si agisce tramite la *Polarizzazione della giunzione*.

- ✓ Polarizzazione diretta: corrisponde al caso in cui la regione di tipo p è
 collegata al terminale positivo del generatore di tensione e la regione di tipo n
 è collegata al terminale negativo. In tal modo il campo elettrico viene ridotto,
 e può scorrere una corrente elevata.
- ✓ Polarizzazione inversa: corrisponde al caso in cui la regione di tipo n è
 collegata al terminale positivo del generatore di tensione e la regione di tipo p
 è collegata al terminale negativo. In tal modo il campo elettrico viene
 aumentato, e la corrente è trascurabile.

1.3 Assorbimento della luce dai semiconduttori a silicio

La maggior parte dei rivelatori a semiconduttore è realizzata su cristalli di silicio ultrapuro. Nella sua forma cristallina il silicio a T=300K ha un gap energetico di 1.1242 eV e gli elettroni che passano in banda di conduzione sono un numero trascurabile.

Quando un fascio di fotoni attraversa la superficie del cristallo di silicio viene assorbita se l'energia del fotone è maggiore del gap energetico. L'energia rilasciata dai fotoni porta elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione, generando nel cristallo coppie elettrone – lacuna.

Nei rivelatori a silicio abbiamo un volume debolmente drogato al quale sono affiancati due impianti fortemente drogati in modo diverso (p+ e n+).

Per svuotare completamente la parte di volume drogato in modo debole si applica una differenza di potenziale con polarizzazione inversa. Gli elettroni generati dalla luce vengono attirati verso il terminale positivo dell'alimentazione, rappresentato dal impianto drogato fortemente n (n+); le lacune si spostano verso l'impianto drogato fortemente p (p+). Il corrispondente segnale di corrente viene poi letto ed elaborato dai circuiti elettronici collegati al rivelatore.

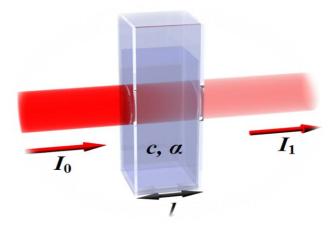


Figura 1.4: Il fascio luce incidente su un materiale di spessore l

Quando un fascio di luce di intensità I_0 attraversa uno strato di spessore l di un mezzo (figura 1.4), una parte di esso viene assorbita e una parte viene trasmessa con intensità residua I_1 .

Il rapporto tra l'intensità della luce trasmessa e incidente sul mezzo attraversato è legato alla legge di *Lambert-Beer*.

$$I_1 = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot l}$$

Dove:

 I_0 è l'intensità del flusso incidente, I_l è l'intensità del flusso uscente, α è il coefficiente di assorbimento (che dipende dalla lunghezza d'onda) e l è lo spessore del materiale.

Capitolo 2

RIVELATORI DI RADIAZIONE

2.1 Introduzione

Intorno agli anni '80 inizia a svilupparsi una nuova tecnologia legata ai sensori in silicio tramite il processo planare. Ciò ha permesso la costruzione di rivelatori con un'elevata risoluzione spaziale, rivelatisi ottimi per esperimenti di fisica delle alte energie. Nell'architettura planare, la distanza media percorsa dalle cariche ionizzate nel silicio prima di raggiungere gli elettrodi è tipicamente comparabile allo spessore del substrato: questo aspetto influisce sulle caratteristiche dinamiche dei segnali ricavabili dal sensore e pone dei limiti alla massima frequenza con la quale gli eventi possono essere rilevati.

Alla metà degli anni '90 si è cominciato a pensare ad una geometria diversa per i rivelatori. Questa nuova architettura, chiamata 3D, prevede che gli elettrodi, anziché essere paralleli alla superficie, vengano realizzati perpendicolarmente ad essa in modo da attraversare (tutto o in parte) il substrato. La nuova tecnologia, proposta per la prima volta da Sherwood Parker, consente di ottenere tensioni di svuotamento inferiori a quelle ottenibili con una architettura planare standard, e tempi di risposta fino ad un ordine di grandezza inferiori. Inoltre si hanno prestazioni migliori in termini di tolleranza alla radiazione assorbita.

Tuttavia ci sono degli svantaggi legati alla complessità di realizzazione del dispositivo, che richiede vari passi di processo non standard tipici delle tecnologie micromeccaniche, che rendono ancora oggi problematica una produzione industriale. Per questo, lo sviluppo dei rivelatori 3D ha contemplato da parte di alcuni gruppi di ricerca anche approcci diversi da quello originale, come riportato nel seguito.

2.2 Struttura dei rivelatori 3D

La struttura 3D prevede che gli elettrodi siano perpendicolari alla superficie in modo da attraversare quasi tutto il substrato. Essi hanno forma cilindrica e sono formati da semiconduttori di tipo p^+ e di tipo n^+ , organizzati in matrici come evidenziato in *figura 2.1*.

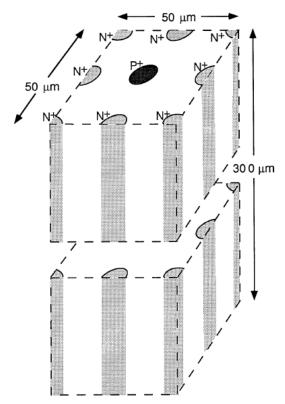


Figura 2.1: Cella elementare realizzata con l'architettura 3D. Al centro è posizionato un elettrodo di tipo p^+ , circondato da 8 elettrodi di tipo n^+ . La distanza tra due colonne adiacenti di tipo opposto è pari a 25 μ m, mentre il wafer ha spessore pari a 300 μ m.

Solitamente viene scelto di usare un substrato debolmente drogato p, perché sperimentalmente si è verificato essere più resistente ai danni da radiazione. Questi rivelatori sono capaci di fornire informazioni riguardo due dimensioni spaziali, quando opportunamente collegati ad un accurato dispositivo elettronico di lettura. La disposizione delle colonne varia a seconda del tipo di rivelatore desiderato e dei compiti che gli si vuole assegnare.

Il campo elettrico che si viene a formare è tale per cui le linee di campo partono da un elettrodo di un tipo e finiscono all'elettrodo di tipo opposto più vicino correndo parallelamente alle superfici del sensore. Come nei rivelatori planari l'intensità del campo può essere modificata agendo sulla tensione di polarizzazione inversa in modo da variare la dimensione della regione di svuotamento.

Il vantaggio di questa soluzione consiste nel:

- ✓ Poter controllare il meccanismo di svuotamento semplicemente definendo la disposizione degli elettrodi. Infatti è possibile ottenere tensioni di svuotamento anche di due ordini di grandezza inferiori a quelle ottenibili con una architettura planare standard, e tempi di cattura delle cariche fino ad un ordine di grandezza inferiori, in quanto la distanza tra gli elettrodi e la posizione in cui è generata la coppia è mediamente ridotta;
- ✓ Eliminazione del problema dell'inversione di drogaggio: la scelta di un substrato *p* previene da un cambio del tipo del substrato dovuto a danni da irraggiamento riguardanti il substrato;
- ✓ Eliminazione del problema dell'inversione di tipo del drogaggio efficace: la scelta di un substrato *p* previene da un cambio del tipo del substrato dovuto a danni da irraggiamento riguardanti il substrato;
- ✓ Arrivare a prestazioni migliori in termini di tolleranza alla radiazione assorbita: l'elettrone deve effettuare un percorso minore per essere raccolto dall'elettrodo, questo diminuisce i tempi di raccolta e la probabilità che l'elettrone si ricombini nei centri di ricombinazione o che venga catturato da trappole dovute all'impurità del cristallo;

Oltre alla complicazione tecnologica, la struttura 3D presenta anche alcuni inconvenienti:

- ✓ Tra gli elettrodi dello stesso tipo si vengono a creare delle regioni a basso
 campo elettrico (circa nullo). Le cariche generate in questi punti possono
 muoversi inizialmente solo per diffusione, cosa che avviene più lentamente
 rispetto al meccanismo di deriva;
- ✓ Gli elettrodi dei rivelatori 3D hanno capacità maggiore rispetto a quelli planari e questo incide negativamente sul rumore.

	3D	Planare
Depletion voltage	< 10 V	70 V
Edge sensitivity	< 5 μm	500 μ
Charge 1 MIIP (300 mm)	24 ke-	24 ke-
Capacities	30 - 50 fF	20 fF
Collection distance	50μm	300 μm
Speed	1-2 ns	10 – 20 ns

Tabella 2.1: Caratteristiche delle tecnologie 3D e planare

Nel seguito vengono presentate alcune strutture 3D alternative.

2.2.1 Architettura a singola colonna (STC)

La prima architettura sviluppata prende il nome di "Single Type Column" proposta nel 2005 dal FBK-irst di Povo. Si tratta di una architettura in cui le colonne sono drogate con un unico tipo di impurezza. Gli elettrodi sono solo del tipo n^+ e sono creati in un substrato drogato p. Inoltre l'architettura viene semplificata con il

conseguente snellimento del processo costruttivo con possibilità di produzione su larga scala.

In *figura* 2.2 è mostrata una cella elementare del rivelatore 3D-STC: il substrato utilizzato è di tipo p mentre le colonne sono tutte di tipo n⁺ e non attraversano tutto lo spessore del wafer.

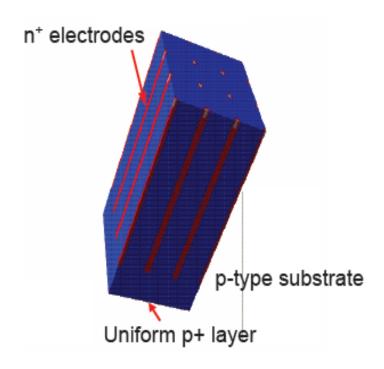


Figura 2.2: Schema del rivelatore 3D a singola colonna

Il vantaggio principale del 3D-STC è la sua facilità di costruzione rispetto ai rivelatori proposti da Parker.

Questa struttura semplificata ha però degli svantaggi, in quanto non si riesce a controllare l'intensità del campo elettrico tramite la tensione applicata nel caso in cui il dispositivo è completamente svuotato. Per risolvere questo problema è conveniente agire sulla concentrazione del drogaggio del substrato. Una conseguenza di questo aspetto è che le regioni a basso campo possono essere più estese di quanto avviene in un rivelatore 3D standard, rallentando la raccolta della carica.

2.2.2 Architettura a doppia colonna (DTC)

Per superare i limiti dei sensori a singola colonna (3D-STC), i laboratori FBK-irst di Povo in collaborazione con INFN hanno sviluppato i rivelatori 3D-Double Side Double Type Column (DDTC). La nuova struttura possiede vaste novità rispetto alla struttura 3D-STC però non possiamo parlare ancora di rivelatori 3D completi perché le colonne non attraversano del tutto lo spessore del wafer, ma si fermano ad una distanza d dalla faccia opposta, che nel caso ideale non dovrebbe superare dieci μm , come mostrato nella figura 2.3.

La struttura di questo sensore utilizza due colonne che perforano entrambi i lati del wafer, drogate rispettivamente n^+ e p^+ tramite la tecnologia *Deep Reactive Ion Etching* (DRIE), penetrando nel dispositivo fino alla distanza d.

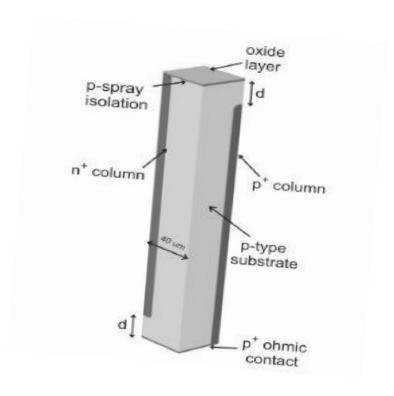


Figura 2.3: Schema tridimensionale della cella fondamentale di un rivelatore 3D-DDTC su un substrato di tipo p.

Oltre a superare i limiti posti dal sensore 3D-STC, la nuova struttura 3D-DDTC permette alle colonne non scavate su tutto il substrato di evitare l'utilizzo di un wafer di supporto evitando alcuni processi di fabbricazione, come ad esempio il wafer bonding all'inizio del processo ed il lapping meccanico del wafer sacrificale al termine del processo.

Come le 3D-STC anche le 3D-DDTC dispongono di colonne non riempite con polysilicio quindi sono regioni che non riescono a rilevare la particella. Questo problema è risolvibile tramite una adeguata inclinazione del dispositivo. Rispetto al 3D-STC le correnti di perdita sono inferiori, ma possono esserci problemi di breakdown.

2.3 Prestazioni dei rivelatori 3D

Per quanto riguarda le prestazioni delle diverse configurazioni dei rivelatori 3D possiamo osservare nella *figura 2.4* alcuni risultati delle varie simulazioni ottenute nel laboratorio.

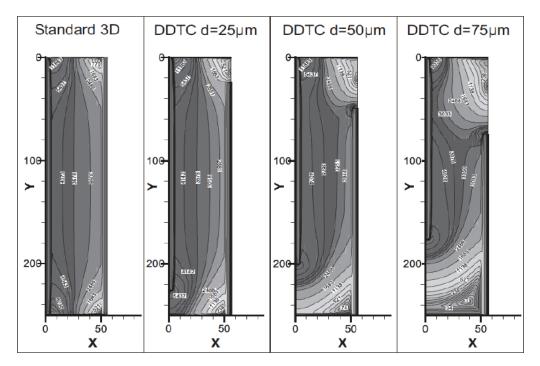


Figura 2.4: Simulazioni dalle distribuzione del campo elettrico in una sezione presa lungo la diagonale di un quarto di cella. La colonna **giunzione** è posta ad x=0 e la colonna **ohmica** è posta a x=40 μ m.

E' stato indotta una corrente da una particella al minimo di ionizzazione (MIP) raccolta dall'elettrodo giunzione ad una tensione di polarizzazione pari a 16 V. Come previsto nelle simulazioni si nota che più d è mantenuto piccolo, maggiore è il picco di corrente e più breve è il tempo di raccolta di carica. Il segnale di transitorio dei rivelatori 3D con differenti geometrie è rappresentato nella *figura 2.5*.

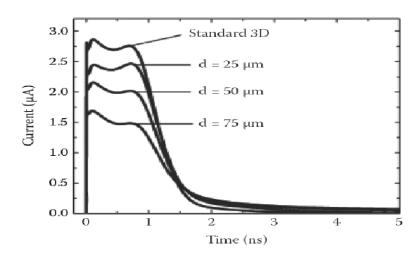


Figura 2.5: Segnale di transitorio in rivelatori 3D con differenti geometrie realizzate in una simulazione ad una tensione di bias di 16 V in risposta ad una particella MIP.

Si può notare come i segnali in corrente siano estremamente veloci, con tempi di risposta dell'ordine di alcuni ns. Da un punto di vista dei circuiti di lettura, quindi, emerge l'esigenza di essere altrettanto veloci.

Capitolo 3

CATENA DI LETTURA

3.1 Diagramma a blocchi della catena di lettura

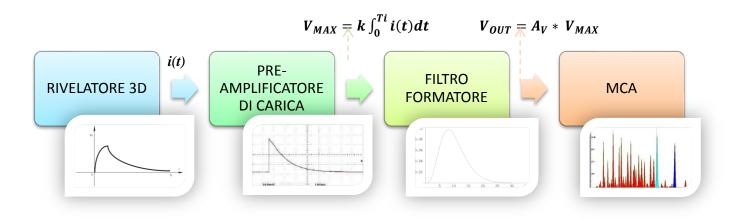


Figura 2.1: Schema a blocchi della catena di lettura

Nella *figura 3.1* è rappresentato uno schema a blocchi della catena di lettura per la misura della carica. Il rivelatore di radiazione genera una certa quantità di carica.

Il segnale in uscita dal rivelatore ha una potenza molto bassa che non permette la lettura di circuiterie esterne.

Per questo si ha bisogno di amplificare il segnale d'uscita dal rivelatore. Inizialmente il segnale proveniente dal rivelatore entra all'ingresso di un preamplificatore, un semplice circuito integratore ideale che trasforma l'impulso di corrente in un segnale di tensione con ampiezza proporzionale alla carica d'ingresso. All'uscita si ha un guadagno molto elevato per fare si che il rumore che si aggiunge negli stadi successivi di amplificazione sia trascurabile. Successivamente il segnale entra nel terzo stadio che è quello del filtro formatore definito anche come *Shaper*. Si tratta di un filtro per fornire un segnale in uscita predefinito e per rigettare le componenti di rumore che sono fuori dall'intervallo di frequenze del segnale e di conseguenza garantisce un buon rapporto segnale-rumore (S/N) migliorando le prestazioni nel caso di rate di conteggio elevato. All'ultimo stadio abbiamo l'analizzatore multicanale (*Multichannel Analyzer*) che ha il compito di analizzare una serie di impulsi di tensione e ordinarli in un istogramma per poi memorizzarli. Gli spettri memorizzati possono essere visualizzati e analizzati.

3.2 Rivelazione della carica

Nei capitoli precedenti abbiamo visto che quando un fotone interagisce con il rivelatore si genera una carica elettrica all'interno del suo volume. La carica generata è proporzionale all'energia della radiazione incidente e viene interpretato dalla seguente formula:

$$O = k \cdot E$$

Dove:

Q è la carica generata, k è una costante di proporzionalità ed E è l'energia della radiazione incidente.

Dopo di che, la carica viene raccolta tramite alcune modifiche nel campo elettrico facendo sì che il rivelatore fornisca in uscita un segnale di corrente i(t). Nella *figura* 3.2 è rappresentato un esempio di una forma d'onda all'uscita di un rivelatore.

 T_c rappresenta il tempo della durata del segnale di corrente che varia a secondo del tipo di rivelatore.

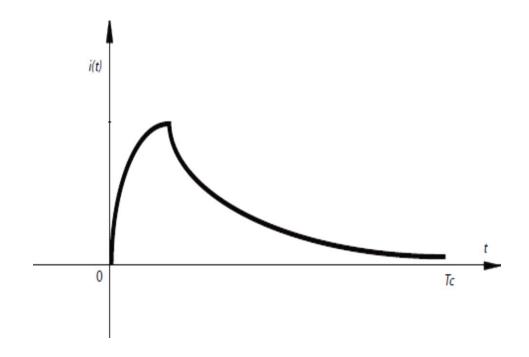


Figura 3.2: Segnale di corrente in uscita dal rivelatore

Si tratta di un segnale caratterizzato dalla presenza di una salita molto rapida e da una discesa più lenta. Nel rivelatore si genera anche del rumore che deve essere minimizzato per non pregiudicare le prestazioni dell'intero dispositivo.

Possiamo dire che all'uscita del rivelatore abbiamo una differenza di potenziale con una potenza molto bassa, quindi per riconoscere questo segnale si richiede un'amplificazione tramite circuiterie esterne.

3.3 Preamplificatore di carica (CSA)

Come abbiamo visto il preamplificatore di carica (*Charge sensitive preamplifier*) è un elemento estremamente importante in un sistema di elaborazione dell'informazione perché è il primo componente che agisce direttamente con il segnale fornito dal rivelatore di radiazione. Il preamplificatore è dotato di un amplificatore invertente che, nel caso ideale, come mostrato nella *figura 3.3* fornisce in uscita una tensione proporzionale alla carica al suo ingresso.

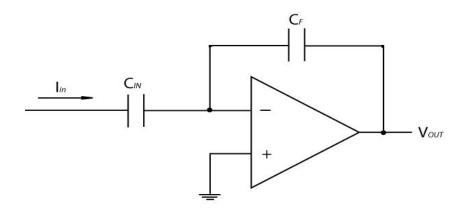


Figura 3.3: Il preamplificatore invertente nel caso ideale

Dove:

 C_{in} è la capacità di ingresso che ha la funzione di DC block, cioè evita che i segnali affetti da offset vengano integrati.

 C_f è la *capacità di feedback* che realizza l'integrazione del segnale in corrente.

Le caratteristiche per il circuito del preamplificatore variano in maniera considerevole e dipendono dalle misure che si vogliano eseguire. Nel nostro caso abbiamo bisogno di un circuito integratore che, di fatto, viene realizzata dalla capacità di feedback.

Per riportare il circuito nelle condizioni di effettuare una successiva rivelazione di carica si ha la necessità di avere un circuito di reset che riporta il preamplificatore nelle condizioni iniziali. Quest'ultimo può essere realizzato facilmente come mostrato in *figura 3.4* tramite una resistenza in parallelo alla *capacità di feedback*.

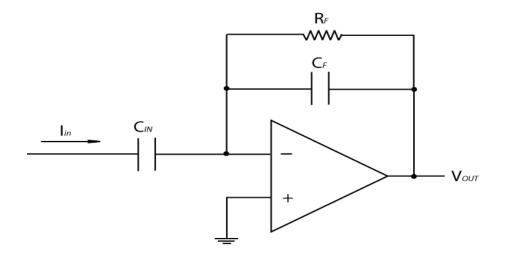


Figura 3.4: Il preamplificatore invertente con il circuito di reset

Dove:

 R_f è la *resistenza di feedback* che realizza la funzione di riportare il circuito nelle condizioni operative.

 V_{out} è la tensione d'uscita che dipende dalla carica all'ingresso e dalla *capacità di* feedback.

La *resistenza di feedback* deve avere un valore molto alto per garantire il comportamento da integratore al circuito come spiegato dalle equazioni delle correnti:

$$I_{IN} + I_{CF} + I_{RF} = 0$$

Si ha che:

$$I_{IN} = -I_{CF} - I_{RF}$$

Sapendo che:

$$I_{CF} = C_F \frac{dV_{OUT}}{dt}$$
 e $I_{RF} = \frac{V_{out}}{R_F}$

Di cui si ottengono se seguenti equazioni:

$$I_{IN} = -C_F \frac{dV_{OUT}}{dt} - \frac{V_{out}}{R_F}$$

Tramite alcuni passaggi matematici ricaviamo la tensione di uscita:

$$V_{out(t)} = -\frac{Q}{C_F} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Con τ che è la costante di tempo dato da:

$$\tau = R_F \cdot C_F$$

La costante di tempo τ sarà molto alta, dato che dipende dalla resistenza di feedback anche essa alta, evitando una discesa rapida come mostrato in *figura 3.5*.

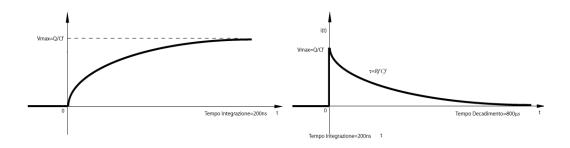


Figura 3.5: La tensione di uscita dal preamplificatore di carica

Il preamplificatore di carica nel suo circuito introduce una certa quantità di rumore, questo rumore aggiunto viene espresso come *equivalent noise charge* (ENC). L'effetto del rumore è quello di modificare l'ampiezza del segnale uscita fissata una carica in ingresso.

All'aumentare del rumore introdotto, aumenta anche la variazione dell'ampiezza in uscita, di conseguenza si ha difficolta di conoscere il segnale.

Il vantaggio che si ha con la definizione del rumore in termini di carica equivalente in ingresso sta nel fatto che è possibile confrontare direttamente il segnale della carica in ingresso con il rumore e calcolare il rapporto segnale-rumore (S/N).

3.4 Filtro formatore (Shaper)

Il filtro formatore (*Shaper*) consiste in un circuito dotato di filtri e di amplificatori selettivi. Il segnale che arriva all'ingresso del filtro formatore contiene tutti i contributi di rumore provenienti dal rivelatore e introdotti dal preamplificatore di carica come può essere visto nella *figura 3.6*. Inoltre ha un'ampiezza molto piccola per essere letto dalle circuiterie esterne, per questo si necessità di amplificatori selettivi che ci garantiscano un'ampiezza in uscita abbastanza alta e migliorino adeguatamente il rapporto segnale-rumore (*S/N*).

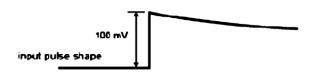


Figura 3.6: Il segnale all'ingresso del filtro formatore

Lo shaping del segnale in ingresso si fa anche per l'esistenza del problema di pile-up come mostrato nella *figura 3.7*.

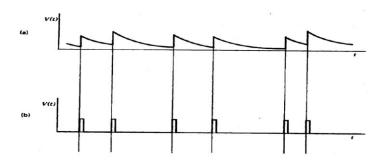


Figura 3.7: Dettagli sul problema di pile-up

Questo problema deriva dal tempo di risposta del preamplificatore di carica. Se abbiamo molti eventi consecutivi di forma d'onda si crea una sovrapposizione dei segnali e l'informazione relativa alla carica generata dall'evento è portata nell'ampiezza del segnale in uscita.

In presenza del problema di pile-up, l'ampiezza non viene misurata correttamente, questo avviene dagli spostamenti degli eventi in modo casuale.

Il segnale in uscita dal filtro formatore ha la forma gaussiana come si vede nella *figura 3.8*. Questo output deriva dal fatto che lo Shaper si compone di un circuito che oltre a filtrare il segnale al suo ingresso, lo associa ad una forma gaussiana.

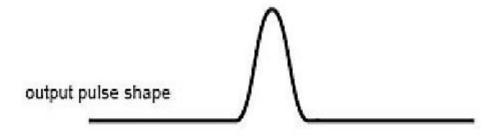


Figura 3.8: Il segnale in uscita dallo Shaper

In complesso, il circuito dello Shaper ha un comportamento che si avvicina all'amplificatore di carica, con la differenza che lo Shaper presenta due tipologie di filtraggio come evidenziato più avanti, con bande molto più selettive. Questo serve per tagliare gran parte del rumore introdotto dai circuiti precedenti senza alterare l'informazione d'ingresso.

Le tipologie di filtraggio sono:

- 👃 Filtraggio BPF (Band Pass Filter) senza modificare la forma
- 🖊 Filtraggio BPF (Band Pass Filter) modificando la forma

Il primo modello di filtraggio lascia invariata tutta la forma d'onda senza modificare le sue caratteristiche come mostrato nella *figura 3.9*, mentre il rumore viene tagliato adeguatamente consentendo un grande miglioramento del rapporto segnale-rumore (*S/N*).

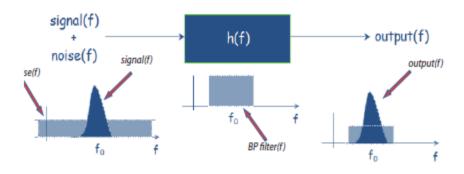


Figura 3.9: Filtraggio BPF senza modificare la forma d'onda del segnale

Si può notare la semplicità di questo filtro con la funzione di rimuovere il rumore presente fuori banda, in questo caso si tratta di rumore di tipo AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

Il secondo modello di filtraggio si nota nella *figura 3.10*, anche per il complesso lavoro che svolge.

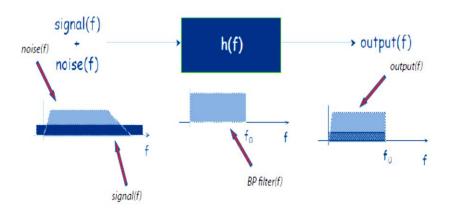


Figura 3.10: Filtraggio BPF con modifica alla forma d'onda del segnale

In questo caso il filtro oltre a togliere il rumore presente fuori dalla banda del segnale ne taglia anche una porzione della forma d'onda del segnale presente al di fuori dalle frequenze di taglio. Il segnale all'uscita dallo Shaper risulterà modificato.

Il modello di filtraggio *BPF* con modifica alla forma d'onda del segnale viene adottato dal filtro formatore.

Un'altra caratteristica molto importante dello Shaper è il tempo di formatura (*Shaping Time*) del segnale, che verrà illustrato in seguito.

Il filtro formatore usa diverse tecniche di formatura con diverse caratteristiche applicate al circuito.

I principali circuiti adottati per la formatura della forma d'onda del segnale in ingresso allo Shaper sono i seguenti:

- ♣ Formatura CR-RC
- ♣ Formatura gaussiana

Il circuito che utilizza la formatura CR-RC è costituito in gran parte da componenti elettronici passivi, come resistenze e capacità realizzando vari tipi di filtri. Il CR si comporta come differenziatore realizzato da un filtro passa alto (HPF) mentre RC ne crea in cascata un filtro passa basso (LPF) che ha lo scopo di integrare il segnale. All'uscita di questi due filtri si realizza la funzione del filtro passa banda (BPF) non ideale consentendo comunque di togliere una parte del rumore.

La formatura gaussiana utilizza un simile circuito di *CR-RC*. La differenza e che lo stadio differenziatore è seguito da più stadi integratori, consentendo al circuito di creare una forma d'onda di tipo gaussiana. In questo caso abbiamo un filtraggio migliore e con un ottimo rapporto segnale-rumore.

Per ottenere una forma d'onda gaussiana all'uscita le costanti di tempo che derivano dai circuiti integratori devono presentare lo stesso valore.

3.4.1 Tempo di formatura (Shaping Time)

Un altro valido motivo da considerare del dispositivo è lo *shaping time* della forma d'onda in uscita dal circuito.

Il tempo di formatura è determinato dalla "deviazione standard" dell'impulso. Per la scelta ottimale dello *shaping time* è opportuno fare alcune considerazioni:

- Lo *shaping time* deve avere un tempo di larghezza abbastanza lungo da raccogliere tutta la carica del rivelatore.
- ♣ Inoltre il tempo di formatura del segnale deve avere un tempo di discesa abbastanza veloce, così da essere pronto ad aspettare un'altra carica in ingresso.
- ♣ Scegliendo con cura lo *shaping time* viene eliminato gran parte del rumore introdotto nel circuito.

Si può dimostrare che scegliendo il tempo di formatura abbastanza breve, aumenta la banda passante del dispositivo.

Questa scelta influenza l'uscita del segnale che viene sovrapposto dal rumore non permettendo la lettura adeguatamente alle circuiterie esterne.

La relazione che lega la banda passante e lo *shaping time* è data dalla seguente formula:

$$B_{Shaper} \approx \frac{1}{\tau_{Shaper}}$$

Dove:

 B_{Shaper} è la banda passante in uscita dal filtro formatore.

 τ_{Shaper} è il tempo di formatura della forma d'onda in uscita dallo Shaper.

Una volta ottenuta la forma gaussiana e la durata del segnale in uscita dal circuito del filtro formatore, si può facilmente calcolare lo *shaping time* conoscendo il parametro FWHM (*Full Width at Half Maximum*). FWHM si determina nella forma d'onda del segnale, ponendosi a metà della sua ampiezza massima.

Nella *figura 3.11* è rappresentato il segnale in uscita dal filtro formatore:

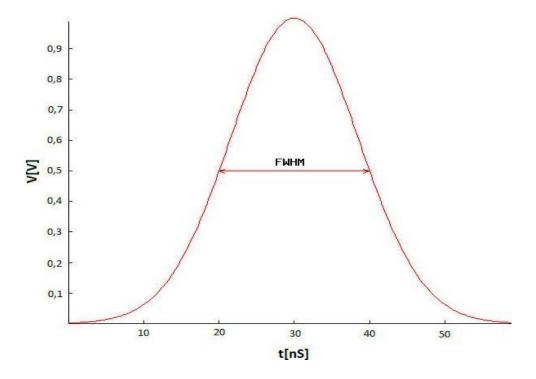


Figura 3.11: Tempo di Shaping

Per ricavare lo shaping time per mezzo di FWHM.

$$\tau_{Shaper} = \frac{FWHM}{2.35}$$

Dove:

2.35 è una costante standard.

Nel prossimo capitolo si vedrà l'importanza dello *shaping time* e la sua velocità.

3.5 MCA (MultiChannel Analyzer)

Per riconoscere il segnale all'uscita dello shaper abbiamo bisogno di un dispositivo che ci permette di misurarlo. L'analizzatore multicanale (*MCA*) è il cuore di molte misure sperimentali. Esegue le funzioni essenziali di raccolta dei dati, in modo che il segnale venga riconosciuto e misurato. La forma d'onda all'ingresso del multichannel analyzer è tipico agli impulsi di tensione come abbiamo visto nella *figura 3.1*, con la forma del segnale che dipende dallo Shaper. All'uscita del *MCA* tutti gli impulsi vengono ordinati in uno spettro come vediamo nella *figura 3.12*.

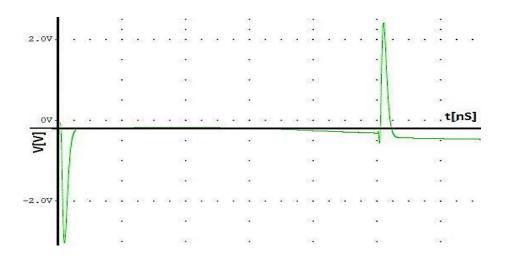


Figura 3.12: Il segnale all'uscita del MCA

Con il multichannel analyzer è possibile riportare ogni tipo di segnale, inoltre si può facilmente ricavare l'energia di tale ingresso. Nel prossimo capitolo vedremo le simulazioni del circuito con lo shaper CR-200.

Capitolo 4

PROGETTO SOTTO ESAME

4.1 Analisi teorica

Il segnale in uscita dal rivelatore 3D ha una potenza molto bassa ed è abbastanza rumoroso, di conseguenza si ha difficolta a riconoscerlo nei circuiti di lettura. Per questo è stato necessario realizzare alcuni dispositivi che permettono di filtrare e amplificare l'output del rivelatore, così da facilitare la lettura dei circuiti esterni. La carica in uscita dal sensore di silicio entra nel preamplificatore di carica che, a sua volta, fornisce un segnale integrato ed una forma d'onda con una discesa molto lenta. Dopo di che il segnale prosegue all'ingresso del filtro formatore, che ha il compito di filtrare il segnale dal rumore introdotto dai dispositivi precedenti e di assegnare al segnale una forma d'onda di tipo gaussiana con tempi di formatura molto veloci. In questo modo si può controllare al meglio il segnale in uscita dal preamplificatore di carica.

Migliorando la velocità dello Shaper come si vedrà nel seguito del progetto, si rischia che il segnale diventi molto rumoroso a causa di vari elementi che compongono i dispositivi. Inoltre è molto presente il problema di *pile-up* e di *baseline*.

Per questo bisogna studiare il comportamento e la scelta dei componenti in modo da garantire l'uscita del segnale adeguatamente riconoscibile dalle circuiterie esterne.

4.2 Gli obiettivi del progetto

Nel progetto sotto esame si cercherà di migliorare il tempo di shaping, intorno ai 10 nS. Ottenendo un tempo di formatura di questa larghezza, ci toglie tutte le componenti del rumore presenti fuori banda del segnale in uscita dal preamplificatore di carica. Inoltre ci consente di usufruire di una vasta banda passante.

Attualmente nel commercio troviamo Shaper con tempi di formatura molto alti, i quali raggiungono la velocità di 100 *nS* quindi con banda passante minore rispetto a quella desiderata.

La scelta di minimizzare lo shaping time del filtro formatore è legata a tre effetti:

- **♣** Il deficit ballistico
- ♣ Il pile-up
- ♣ Il rapporto segnale-rumore

Altri fattori importanti da considerare sono:

- ♣ Il pole-zero
- Pulse shape
- 🖊 Il gudagno

Tutti questi effetti introducono degli errori nel tempo di formatura della forma d'onda. Il *deficit ballistico* è una quantità di carica persa a causa di un tempo di formazione troppo corto che non introduce un errore significativo nella forma del segnale.

Invece per minimizzare il *pile-up* e il *rapporto segnale-rumore* può essere conveniente optare per un corto tempo di formazione, più corto di quello "ideale". L'effetto del rumore come si nota nella *figura 4.1* è l'introduzione di una fluttuazione nel valore dell'ampiezza.

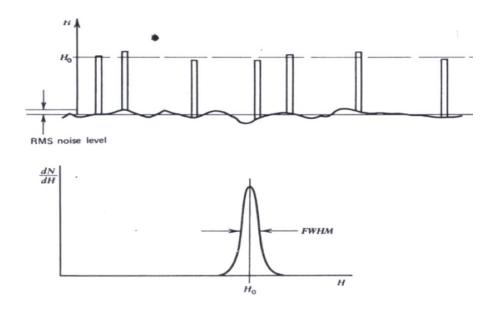


Figura 4.1: Il rumore che interagisce col segnale

Ogni tecnica che viene usata per ridurre gli effetti del rumore porta ad un miglioramento della risoluzione energetica. Osserviamo che lo spettro in frequenza del rumore è estremamente ampio così da essere considerato uniformemente distribuito. Un altro controllo che incide nel tempo di formatura è il *Pole-zero*. In particolare, dal lento decadimento esponenziale ($\tau = R_f \cdot C_f$) del preamplificatore, si crea un effetto di "undershoots" nella risposta del filtro formatore. Nella *figura 4.1* vediamo l'errore che si viene a creare nel segnale.

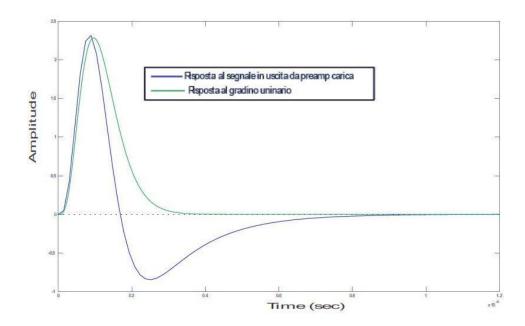


Figura 4.2: L'effetto degli undershoots

La lunga coda, infatti, può causare problemi di pile-up. La correzione di *pole-zero* si può semplicemente fare attraverso l'aggiunta di un piccolo potenziometro variabile, che riallinea manualmente nella posizione corretta il segnale.

Nel prossimo paragrafo incontreremo una tipologia del filtro formatore con varie caratteristiche adeguate per il nostro progetto.

4.3 CR-200: Caratteristiche principali

Il CR-200 della Cremat è un filtro formatore di tipo gaussiano a singolo canale, è utilizzato per leggere segnali in uscita da preamplificatori di carica. Come abbiamo visto in precedenza lo Shaper ha le funzioni di filtrare gran parte del rumore introdotto nel segnale dai circuiti precedenti, permette inoltre un veloce ripristino della baseline in modo da garantire un elevato rate di conteggio.

Il CR-200 è disponibile con sette Shaping time differenti: 100, 250, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 nS. Il guadagno che offrono questi dispositivi è fisso e pari a 10 V/V. Se si desidera un guadagno maggiore, è possibile utilizzare un amplificatore tra il preamplificatore di carica e il filtro formatore CR-200.

In genere esistono evaluation board con uno stadio amplificatore a guadagno variabile con un'adeguata larghezza di banda.

Le specifiche del dispositivo sono date nella *figura 4.3*, dove vengono rappresentati i pin di assegnamento.

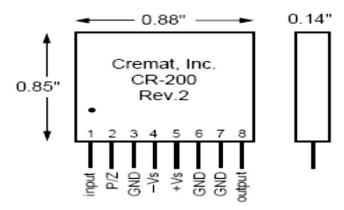


Figura 4.3: Package del dispositivo CR-200

Invece le specifiche principali fornite dal costruttore sono riportate nella figura 4.4.

Specifications Ass	Assume temp =20°C, $V_8 = \pm 9V$, unloaded output			
100	CR-200	units		
amplification channels	1			
gain	10			
polarity	non-inverting			
operating temperature range	-40°C to 85°C			
input noise voltage CR-200-100ns CR-200-250ns CR-200-1μs CR-200-4μs	90 90 45 30	μV RMS μV RMS μV RMS μV RMS		
output impedance	<5	Ω		
output offset	-30 to +30	mV		
output temperature coefficient	-60 to +60	μV / °C		
power supply voltage (V _s) maximum minimum power supply current maximum output current (with loaded output maximum output swing	$V_s = \pm 12$ $V_s = \pm 6$ 7 10 ± 8.5	volts volts mA mA volts		

Figura 4.4: Le specifiche fornite dalle case costruttrice Cremat

La conoscenza delle specifiche del costruttore è molto importanti per l'assegnamento adeguato dei pin e l'alimentazione del dispositivo, in modo da garantire un corretto funzionamento.

Il diagramma del circuito equivalente del CR-200 è mostrato nella figura 4.5.

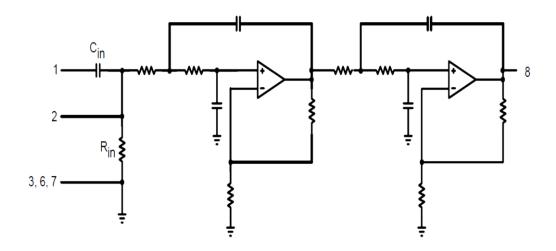


Figura 4.5: Il digramma del circuito equivalente del CR-200

Dove:

 C_{in} è il condensatore d'ingresso del CR-200 e R_{in} è la resistenza d'ingresso del CR-200. Come possiamo notare C_{in} e R_{in} formano un filtro passa alto in modo da costruire uno stadio di differenziazione del segnale d'ingresso.

Nel diagramma sottostante sono indicati alcuni valori che possono assumere R_{in} e C_{in} in modo da adattarsi allo shaping time prescelto.

part#	shaping time	output pulse width (FWHM)	R _{in}	C _{in}
CR-200-100ns	100 ns	240 ns	220 Ω	470 pF
CR-200-250ns	250 ns	590 ns	240 Ω	1000 pF
CR-200-500ns	500 ns	1.2 μs	510 Ω	1000 pF
CR-200-1μs	1 μs	2.4 μs	1.0 kΩ	1000 pF
CR-200-2µs	2 μs	4.7 μs	2.0 kΩ	1000 pF
CR-200-4μs	4 μs	9.4 μs	1.2 kΩ	3300 pF
CR-200-8μs	8 µs	19 μs	2.4 kΩ	3300 pF

Inoltre nel circuito equivalente sono presenti quattro stadi di RC che hanno la funzione di integrare il segnale in ingresso. Tra gli stadi di integrazione sono posti due amplificatori operazionali non invertenti che realizzano il guadagno fisso del filtro formatore. Si può notare che le due resistenze, i due condensatori e l'amplificatore realizzano il filtro denominato *Voltage Controlled Voltage Source Filter (VCVS)* che fu introdotto da *R.P Sallen and E.L Key*.

Il CR-200 ha una bassa impedenza in uscita minore di 5 Ω , e la corrente può arrivare al massimo di 10 mA. Questo sarà sufficiente per garantire un regolare pilotaggio del cavo coassiale. Nella *figura 4.6* vengono mostrati alcuni impulsi d'uscita tipici dal CR-200.

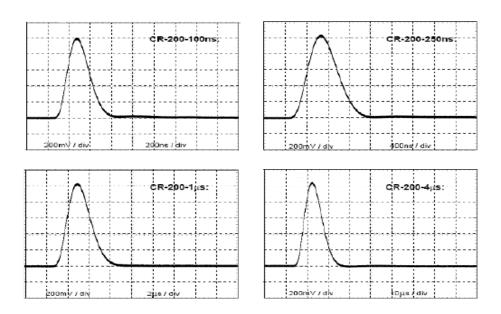


Figura 4.6: Tipici impulsi in uscita dallo Shaper CR-200

In particolare la casa costruttrice CREMAT offre uno Shaper CR-200 su un evaluation board del CR-160 che possiede un amplificatore a banda larga ed a basso rumore con un guadagno variabile tramite un potenziometro, inoltre facilita il suo utilizzo sfruttando i connettori BNC per l'ingresso e l'uscita, appositi morsetti per l'alimentazione ed un alloggiamento per il CR-200. Nonostante i vantaggi delle migliorative tecniche, rimane ancora da studiare e minimizzare il tempo di formatura della forma d'onda del segnale in uscita dal dispositivo.

4.4 Introduzione alle simulazioni

Per la progettazione del circuito è stato necessario effettuare delle simulazioni in base agli obiettivi prefissati. In particolare si sono dovute fare delle prove sul filtro formatore CR-200 in modo da trovare alcuni risultati che combaciassero con le nostre aspettative. Per le verifiche della corrispondenza tra le caratteristiche del dispositivo e quelle riportate nei datasheets, è stata effettuata una serie di simulazioni ed è stata valutata l'opzione di apportare alcune modifiche nel circuito del dispositivo originale per poter minimizzare il tempo di formatura della forma d'onda. Il programma SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Enphasis) della casa MicroSim corporation (adesso incorporata nell'Orcad) si occupa nella progettazione e della simulazione dei circuiti elettronici e microelettronici.

Tramite questo programma si è simulato il progetto originale con varie modifiche riportate. Inoltre sono stati cambiati alcuni parametri nelle resistenze e nei condensatori che formano filtri passo basso e passo alto. Questo ci consente di conoscere il comportamento della forma d'onda in uscita dal filtro formatore.

4.5 Simulazioni SPICE del CR-200

Nel seguito incontreremmo le modifiche apportate al circuito originale del CR-200 come mostrato nella *figura 4.7*. E' stato aggiunto un amplificatore a monte del filtro formatore per avere un guadagno abbastanza elevato in modo che l'ampiezza del segnale all'uscita dello Shaper fosse abbastanza alta. E' stato rimosso il condensatore e la resistenza che formano il filtro passivo passo alto iniziale, per garantire che il segnale in uscita dal preamplificatore fosse privo di distorsioni all'ingresso dello Shaper. All'uscita dell'ultimo amplificatore è stato aggiunto un filtro passa alto, il quale toglie la componente continua dal segnale in modo da eliminare l'offset.

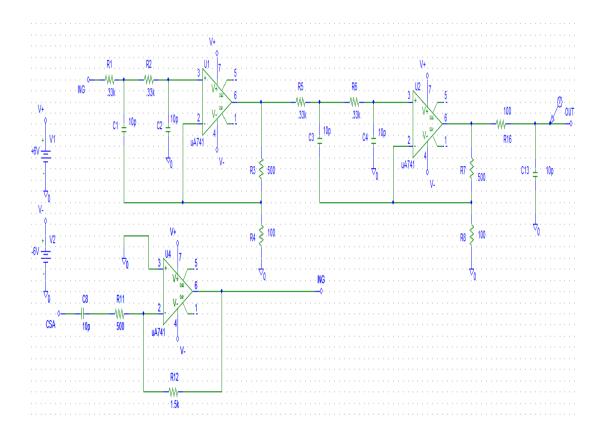


Figura 4.7: Diagramma in SPICE del filtro formatore

Inoltre sono stati fissati i parametri dei filtri passa basso sul filtro formatore.

Il filtro formatore è formato dai seguenti componenti:

Quattro resistenze del valore di 330 Ω che insieme a quattro condensatori del valore di 10 pF formano i filtri passa basso nel circuito. All'uscita di ogni amplificatore sono poste due resistenze, una del valore di 560 Ω e l'altra del valore di 100 Ω ; quest'ultima è collegata in serie alla prima. All'uscita dell'ultimo amplificatore è connesso un condensatore del valore di 2,2 μF e una resistenza del valore di 50 Ω che formano il filtro passa alto. I due amplificatori sono di tipo MAX4113, riconosciuti per la loro alta velocità.

Invece l'amplificatore a monte dello Shaper è composto dai seguenti componenti:

Un condensatore del valore di 10pF e due resistenze: una del valore di 500Ω e l'altra del valore di $1,5~k\Omega$.

In uscita dal circuito si ha una forma d'onda gaussiana con un tempo di formatura intorno ai 10 nS come si può notare nella figura 4.8.

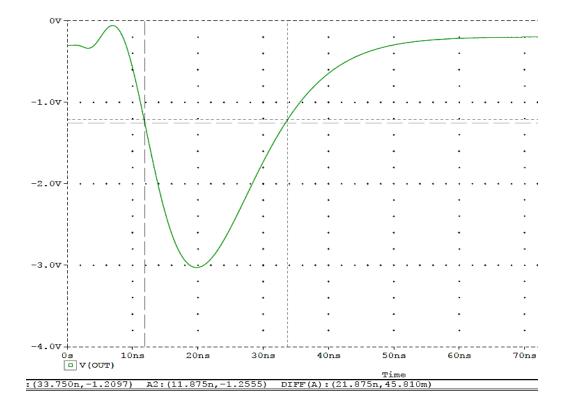


Figura 4.8: Simulazione dell'uscita dello Shaper

La forma d'onda ottenuta in uscita dal circuito del filtro formatore fa parte delle nostre aspettative. Il glitch presente all'inizio della forma d'onda è causato dagli errori di non compatibilità dei componenti con i datasheets originali.

Per il calcolo della banda passante ci siamo serviti della formula teorica annunciata nel Capitolo 3; si ha una relazione inversa tra la banda passante e il suo tempo di shaping, in particolare:

$$B_{Shaper} \propto \frac{1}{\tau_{Shaper}}$$

Possiamo notare nella *figura 4.9* che la banda passante è più grande rispetto allo Shaper con un shaping time di $100 \, nS$.

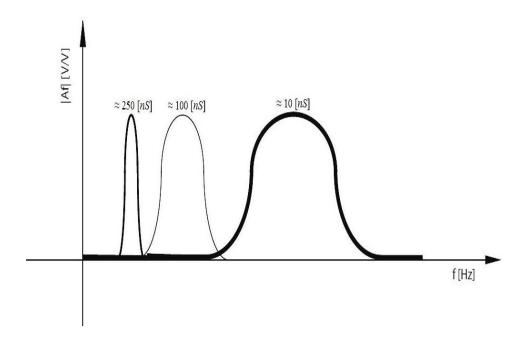


Figura 4.9: Risposta in frequenza del filtro formatore

In conclusione, dopo alcune prove si è provveduto alla realizzazione della scheda. Come vedremo, nel prossimo capitolo verranno introdotti i principali dettagli per la realizzazione del circuito.

Capitolo 5

REALIZZAZIONE DEL LAYOUT

5.1 Introduzione alla realizzazione dello Shaper

Nel capitolo precedente abbiamo realizzato la progettazione del filtro formatore. Le prime problematiche avvenute nelle simulazioni del progetto per ridurre il tempo di formatura dello Shaper sono state risolte mediante alcune correzioni nel circuito originale.

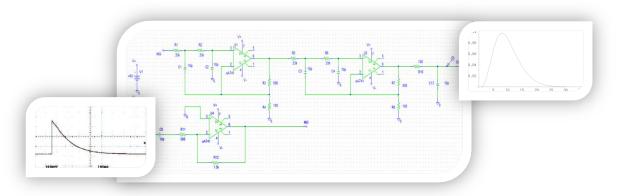


Figura 5.1 Lo schematico del filtro formatore

Le simulazioni successive del filtro formatore tramite il programma SPICE sono state sufficienti per il raggiungimento degli obiettivi richiesti e per procedere nella creazione del dispositivo. Il segnale in uscita dal circuito del filtro formatore presenta una forma gaussiana, che si nota nella figura 5.1 nel quale lo Shaping time è intorno ai $10\div15$ nS.

5.2 Creazione layout dello Shaper

Una volta ottenuti i risultati positivi delle simulazioni sul progetto del filtro formatore, si può procedere per creare il layout del circuito. Per fare questo lavoro abbiamo usufruito del programma Kicad, una suite open source di software EDA (*Electronic Design Automation*) per il disegno di schemi elettronici e circuiti stampati PCB (*Printed Circuit Board*). Il programma ha un ambiente di sviluppo integrato con editor di schematici, generazione della distinta base, sbroglio circuitale PCB e visualizzazione dei file Gerber.

Il primo passo è quello di rifare lo schema del filtro formatore tramite lo schematico del nuovo software come è mostrato nella *figura 5.2*.

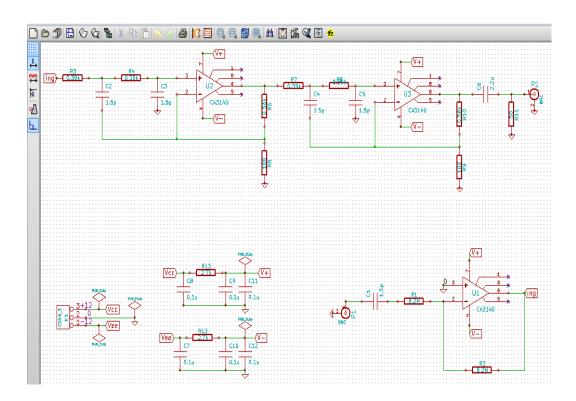
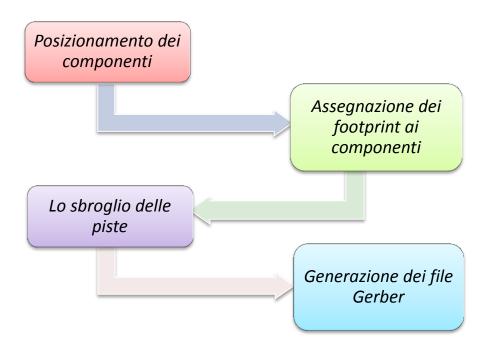


Figura 5.2: Lo schematico dello Shaper tramite Kicad

Come abbiamo notato nella *figura 5.2* sono stati aggiunti due filtri passa basso sulle alimentazioni. Servono a tagliare tutte le componenti spurie (quindi anche il residuo del ripple a 50 *Hz* che viene dalla rete) lasciando solo la componente continua in modo da avere le alimentazioni degli amplificatori più pulite.

Una volta che lo schematico del circuito è stato realizzato e sono stati associati i valori dei componenti, si può avanzare in un'importante passaggio. Dopo di che lo schematico verrà convertito in un altro formato chiamato PCB Design Editor, il quale ci permette di completare i quattro processi per realizzare l'intero layout del circuito:



I componenti devono essere posizionati nella maniera più idonea possibile così da utilizzare meno spazio nella scheda, riducendo i costi e la lunghezza delle connessioni (importanti nel caso di segnali ad alta velocità o nel caso per la trascurabilità delle correnti e delle induttanze parassite). Nel posizionare i componenti, si è tenuto conto dello spazio occupato dai connettori BNC (come si può notare dalla *figura 5.3*) mantenendo distanze considerevoli tra i componenti elettronici.

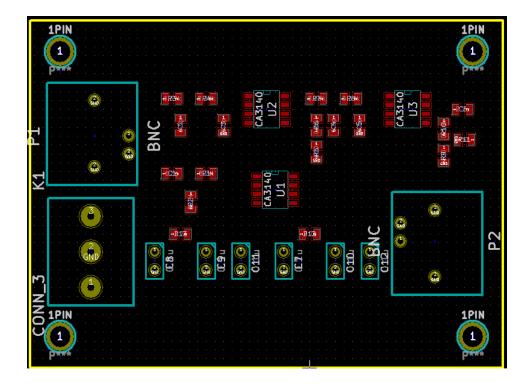


Figura 5.3: Il posizionamento dei componenti dello Shaper

Nel PCB Design Editor bisogna considerare l'assegnazione dei footprint ai componenti. Il footprint è semplicemente la riproduzione virtuale e le caratteristiche del componente per esempio misura e forma. Alcuni dei componenti hanno il footprint associato in automatico dal software, ma ci sono librerie apposite dalle quali si possono creare footprint tramite l'editor. Una volta visualizzati tutti i componenti con il loro relativo footprint vanno collocati nella maniera più opportuna in quanto è molto importante scegliere con accuratezza la posizione per le problematiche espresse prima.

Il terzo passaggio è lo sbroglio delle piste, si intende di interconnettere tutti i pin dei componenti tramite apposite piste elettriche. Tale procedura può essere eseguita sia manualmente che in maniera automatica, offerta dal software che però non conoscendo le nostre preferenze non potrà attuare un buono sbroglio, ma comunque potrà essere utile per semplificare il lavoro nel caso di molte connessioni.

Nello sbroglio si è tenuto conto delle correnti che attraversano i vari circuiti e delle tensioni in gioco ingrossando le varie piste per poter supportare tali correnti e distanziate tra di loro in modo che sia garantito un determinato isolamento. Nella *figura 5.4* è mostrata la realizzazione dello sbroglio.

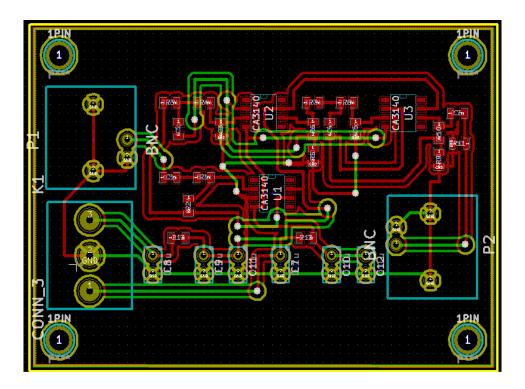


Figura 5.4: Realizzazione dello sbroglio dello Shaper

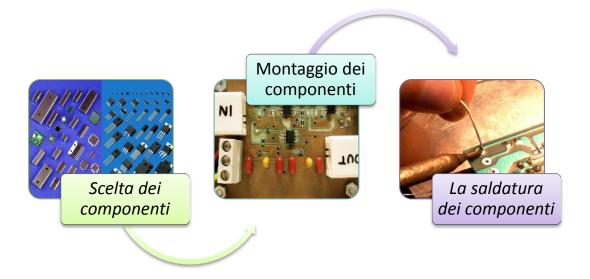
L'ultimo passo è la generazione dei file Gerber, i quali sono un insieme standard di comandi che servono alle machine di produzione, utilizzate da tutti i produttori delle schede PCB. Esistono diversi formati di file Gerber, il formato usato di recente è RS-274X conosciuto come X-Gerber o Gerber esteso. Prima della generazione dei file Gerber tramite il programma di progettazione circuitale, si è verificata l'esistenza di eventuali errori nel circuito per poi procedere alla generazione.

Una volta ottenuti, i file Gerber si inviano alla casa costruttrice per la realizzazione della scheda PCB. Nel prossimo paragrafo si vedranno le tecniche usate per il montaggio della scheda PCB.

5.3 Montaggio della Scheda

Nell'ultimo paragrafo è stato studiato come creare nei minimi dettagli il layout del progetto per il filtro formatore. Migliorando il posizionamento dei componenti e lo sbroglio delle piste, per ridurre lo spazio occupato in una scheda compatta.

Per la realizzazione del montaggio della scheda sono stati usati tre criteri fondamentali:



I componenti elettronici del progetto sono stati scelti in base ai loro datasheets. Sono stati utilizzati due tipi di componenti; uno SMD (*Surface Mounting Device*), che sono i componenti progettati per avere il minimo ingombro e peso ed i cui contatti sono costituiti dalla metallizzazione nell'estremità del componente.

Un altro tipo è THT (*Through Hole Technology*) che sono i componenti dotati di lunghi terminali metallici da infilare in appositi fori del circuito stampato.

Il montaggio dei componenti è avvenuto manualmente. Un altro metodo per il montaggio è quello automatico che si effettua tramite machine apposite.

Per concludere il progetto è necessario compiere l'ultimo processo, quello della saldatura, anche questo passo può essere effettuato a mano o in maniera automatica da macchinari robotizzati.

Nel caso nostro l'operazione della saldatura è avvenuta manualmente con un classico saldatore a stagno nella *figura 5.5* è rappresentata la scheda terminata.

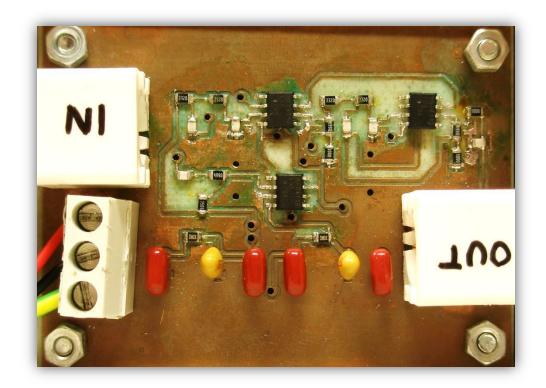


Figura 5.5: Il filtro formatore completato

Alla fine del completo lavoro svolto nella scheda del progetto, si è pensato di sistemare la scheda in un contenitore metallico come mostrato nella *figura 5.6*, in modo da garantire un adeguato isolamento da interferenze elettromagnetiche.



Figura 5.6: Il circuito dello Shaper sistemato nel contenitore metallico

Nel prossimo capitolo si vedrà la caratterizzazione e la verifica dell'adeguato funzionamento del progetto.

Capitolo 6

CARATTERIZZAZIONE DEL CIRCUITO

6.1 Analisi teorica

Dopo la progettazione del filtro formatore con varie modifiche al CR-200 originale e la sua realizzazione mediante la tecnologia delle schede a circuito stampato PCB si verificherà il corretto funzionamento del circuito progettato, inoltre si analizzerà il segnale e la sua forma d'onda in uscita dal filtro formatore.

6.2 Setup di misura

Per la fase della caratterizzazione ed elaborazione del filtro formatore abbiamo usufruito di alcuni strumenti in laboratorio. Gli strumenti utilizzati per il setup sono i seguenti:

♣ Picoammetter Voltage Source

Generatore di tensione continua, consente di realizzare misurazioni come un normale multimetro digitale.

♣ Power Supply

Generatore di tensione continua da 80 W con tre uscite indipendenti con valori da 0 a $\pm 6V/5A$ e da 0 a $\pm 25V/1A$.

↓ Function/Arbitrary Waveform Generator

Generatore di forme d'onda arbitrarie a scelta dell'operatore tra le varie selezionabili mediante gli appositi pulsanti: seno, onda quadra, rampa, impulso, rumore, e forme d'onda DC.

♣ Digital Phosphor Oscilloscope

Oscilloscopio con due canali d'ingresso con campionamento a 5 *Gs/s* per canale e larghezza di banda pari a 500*MHz*, la quale permette di visualizzare segnali pari e/o maggiori di 2*nS*.

♣ *CR-111: Charge Sensitive Preamplifier*

Preamplificatore di carica offerto dalla CREMAT è a singolo canale destinato ad assorbire tutte le iniezioni da vari tipi di rivelatori di radiazione.

6.3 Misure e caratterizzazione del preamplificatore di carica

In questa fase saranno verificate le funzionalità del filtro formatore realizzato nell'ambito del progetto di tesi. Lo Shaper è stato sottoposto a diversi d'impulsi di tensione all'ingresso, in modo da controllare la linearità del dispositivo. La carica è stata iniettata al preamplificatore di carica che all'uscita genera un impulso di tensione con decadimento esponenziale per poi, proseguire all'ingresso del filtro formatore.

La linearità verificata sulla carica iniettata al preamplificatore di carica è data da:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V [fC]$$

Dove: C è il valore del condensatore e ΔV è l'impulso di tensione generato da Waveform Generator.

Nel nostro caso applicheremo diversi impulsi di tensione che variano da 0,52 a 130 mV. Per ricavare la carica in uscita dal preamplificatore si può utilizzare la formula sopra indicata:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta V = 1.5 \cdot 10^{-12} \cdot 0.52 \cdot 10^{-3} = 1.5 \cdot 10^{-14} [C]$$

Per le tensioni di piccola grandezza è stato necessario utilizzare un attenuatore d'impedenza, così da ridurre le tensioni all'ingresso del CSA. Nel *grafico* 6.1 è mostrato l'andamento lineare della carica all'uscita dal preamplificatore di carica.

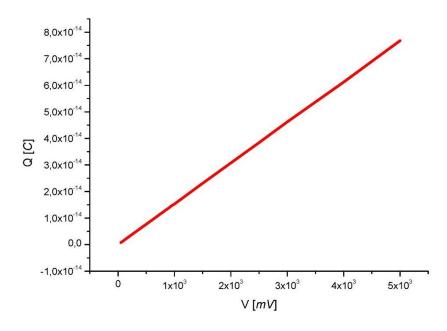


Grafico 6.1: L'andamento della carica rispetto la tensione generata

Inoltre sono state verificate le funzionalità lineari del preamplificatore di carica (*figura 6.1*) in modo da visualizzare la corrispondenza con i datasheets della casa costruttrice. Per la caratterizzazione del CR-111 abbiamo utilizzato deversi valori d'impulsi di tensione tramite Wave Form Generation.

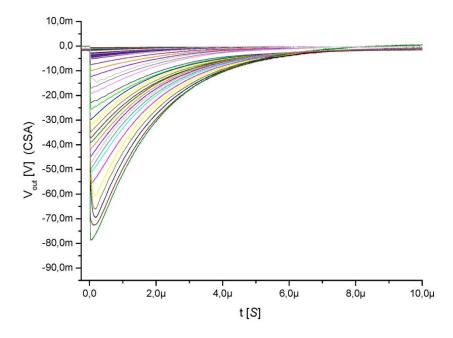


Figura 6.1: Caratterizzazione del preamplificatore di carica

Come possiamo notare dalla figura 6.1 all'abbassare dell'impulso di tensione all'ingresso diminuiscono anche le prestazioni del CSA in uscita.

6.4 Misure e la caratterizzazione del filtro formatore

Nel paragrafo seguente vedremo alcune prove, per conoscere il comportamento del filtro formatore realizzato nel laboratorio.

♣ Prima prova

- ✓ FORMA: PULSE
- ✓ PERIODO: 5 [mS]
- ✓ AMPIEZZA 60 [mV]
- ✓ OFFSET: 0
- ✓ *WIDTH: 1 [mS]*
- ✓ EDGE: 5 [nS]

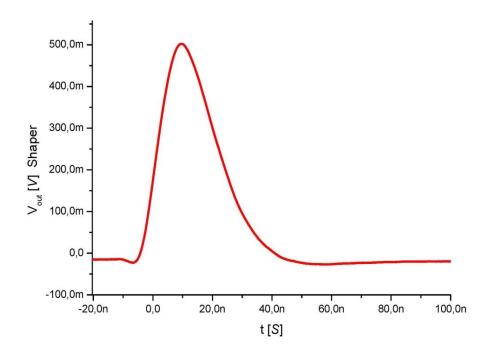


Figura 6.2: La forma d'onda in uscita dallo Shaper

56

Si nota che nella forma d'onda in uscita dal filtro formatore si ha un guadagno in ampiezza abbastanza elevato dato che si è aggiunto un amplificatore iniziale nel circuito dello Shaper. In questo caso, con valori di alimentazione sopra indicati si ha un guadagno intorno al valore di 0,5*V/V*, inoltre, abbiamo un FHWM di 30 *nS*.

Possiamo ricavare lo Shaping time dello Shaper tramite la proprietà introdotta al Capitolo quattro.

Verifica dello Shaping time

FHWM $\approx 30 [nS]$, da cui:

$$\tau_{Shaping} = \frac{FHWM}{2.35} = \frac{30}{2.35} \approx 13 [nS]$$

Verifica del guadagno

$$Gain_{Shaper} = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{550 \ [mV]}{60 \ [mV]} \approx 10 \ [V/V]$$

Le specifiche riferite al tempo di shaping e al guadagno del filtro formatore risultano verificate, con prestazioni ottime.

♣ Prove successive

✓ FORMA: PULSE

✓ *PERIODO: 5 [mS]*

✓ *AMPIEZZA: da 0,55 a 130 [mV]*

✓ OFFSET: 0

✓ WIDTH: 1 [mS]

✓ EDGE: 5 [nS]

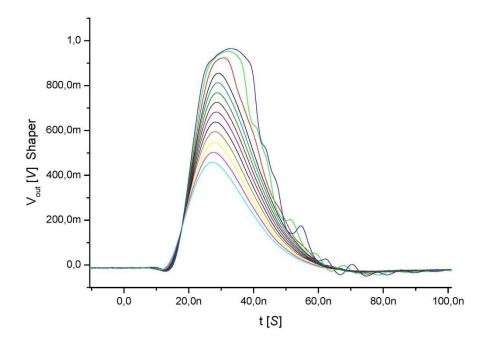


Figura 6.3: Le forma d'onda in uscita dallo Shaper

Nella figura 6.3 notiamo che al crescere al valore dell'impulso in ingresso dello Shaper, l'uscita inizia a saturare, distorcendo la forma d'onda del segnale.

Conclusioni

Il lavoro di tesi, svolto a conclusione dello stage presso il Laboratorio di Elettronica NMS del DISI, ha riguardato la progettazione, realizzazione e caratterizzazione pratica di un setup di misura per un circuito di lettura da impiegare abbinato a rivelatori di radiazioni in silicio.

Il lavoro è iniziato attraverso lo studio teorico delle diverse problematiche esistenti in alcuni tipi di filtri amplificatori di carica disponibili in laboratorio. In particolare, sono stati studiati CR-200, CR-RC e (CR-RC)ⁿ.

L'informazione fornita dai rivelatori di silicio (3D) risiede nella carica generata all'interno di questi dispositivi dalle radiazioni che li attraversano. È quindi di fondamentale importanza riuscire a progettare circuiti che ci permettano di misurare correttamente questa informazione. I dispositivi in grado di svolgere questo compito sono il preamplificatore di carica e il filtro formatore, quest'ultimo tipicamente è posto in cascata al preamplificatore di carica, così da avere in uscita dello Shaper un migliore rapporto segnale-rumore e un ottima rate di conteggi rilevabili.

L'obiettivo iniziale di questo lavoro è stato quello di progettare un filtro formatore con uno shaping time intorno ai 10 nS, conoscendo le caratteristiche del segnale in uscita dal rivelatore 3D. Dopo alcune modifiche al circuito originale CR-200 abbiamo verificato con simulazioni tramite il programma SPICE la bontà del circuito progettato.

La seconda parte del lavoro ha riguardato la realizzazione della scheda PCB del filtro formatore ed è stata effettuata manualmente presso il laboratorio di elettronica. Una volta realizzato il filtro formatore, sono stati eseguiti dei test elettrici al fine di verificare il suo corretto funzionamento. Inoltre si è eseguita una caratterizzazione del dispositivo, realizzata fornendo in ingresso al sistema vari impulsi di diverse ampiezze.

60 CONLUSIONE

È emerso che, come ci si aspettava dai calcoli progettuali, il setup realizzato funziona correttamente per esperimenti con frequenze a 40 *MHz*. Gli obiettivi della tesi possono quindi ritenersi pienamente raggiunti.

Bibliografia

- [1] G.-F. Dalla Betta and G. Soncini, "Dispense per il corso di microelettronica."
- [2] [2] G.-F. Dalla Betta and G. Soncini, "Dispense per il corso dell'elettronica."
- [3] C. Piemonte, M. Boscardin, G.-F. Dalla Betta, S. Ronchin, and N. Zorzi, "Development of 3d detectors featuring columnar electrodes of the same doping type," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol.541, no. 1-2, pp.441–448, April 2005.
- [4] S. Parker and C. J. Kenney, "3d a proposed new architecture for solid-state radiation detectors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, vol. 395, no. 3, pp. 328–343, August 1997.
- [5] L. Rossi, P.Fischer, T. Rohe and N.Wermes, "Pixel Detectors," *From Fundamentals to Applications*, May 2006.
- [6] G.Lutz, "Semiconductor Radiation Detectors," *Device Physics*, pp. 129-207, 2007
- [7] A. Zoboli, M. Boscardin, L. Bosisio, G.-F. Dalla Betta, C. Piemonte, S. Ronchin, and N. Zorzi, "Double-sided, double-type-column 3d detectors: Design, fabrication and technology evaluation," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 55, no. 5, pp.2775–2784, October 2008.
- [8] M. Lorengo, M. Ravanelli, "Progetto e realizzazione di un setup di misura per rivelatori in silicio SiPM", Tesi di Laurea in Ingegneria delle Telecomunicazioni, Anno Accademico 2007/2008, Relatore Prof. G.F. Dalla Betta, Correlatore Ing. C. Piemonte.
- [9] ORTEC, "Modular Pulse-Processing Electrines," *Preamplifiers, Multi-Channel Analyzer*, http://ortec.com.
- [10] CREMAT, "CR-200," Gaussian shaping amplifier, April 2008, http://cremat.com.