

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA
DIPARTIMENTO DI FISICA E GEOLOGIA



Corso Di Laurea Triennale in Fisica
Tesi Triennale

**Caratterizzazione di dispositivi LGAD e sviluppo
di strategie innovative per la lettura per
applicazioni spaziali**

Candidato:
Martina Savinelli

Relatore:
Matteo Duranti

Anno Accademico 2023-2024

Alla mia famiglia, che mi ha insegnato che non ci sono strade facili, solo destinazioni che valgono la fatica del cammino.

A Giacomo, che in questo cammino mi ha accompagnata, a volte trascinata, insegnandomi che i sogni vanno rincorsi senza mai fermarsi di fronte ai primi ostacoli.

Ai miei amici, che a ogni mia fermata negli attimi più tenebrosi mi hanno ricordato di accendere la luce.

Indice

Introduzione	5
1 I Raggi cosmici	6
Introduzione storica	6
Composizione e Spettro	7
Rivelazione	8
2 Esperimenti nello spazio	10
L'esperimento AMS-02	10
L'esperimento DAMPE	13
L'esperimento HELIX	15
L'esperimento HERD	17
3 I Rivelatori	20
Rivelatori al Silicio	21
Semiconduttori	21
Drogaggio	21
Giunzione p-n	22
Rivelatori a semiconduttore	24
Tracker AMS	26
Calorimetri	27
4 LGAD: Low Gain Avalanche Diode	29
Introduzione e Caratteristiche	29
Evoluzione Temporale	30
Giunzione Moltiplicativa	31
Regione Periferica	32
UFSD: Ultra Fast Silicon Diode	35
Formazione del Segnale e Rumore	35
Risoluzione temporale	37
5 Risultati Sperimentali	39
5.1 Misure I-V	42
5.2 Misure C-V	43
5.3 Dispositivo Finale	46
6 Conclusioni	50

Introduzione

Questa dissertazione si basa su un lavoro sperimentale incentrato su un Progetto di Rilevante Interesse Nazionale, PRIN, a guida dell’Istituto Nazionale Fisica Nucleare, INFN (Sezione di Perugia capofila, Sezione di Bologna e Sezione di Roma Tor Vergata) e in collaborazione con l’Agenzia Spaziale Italiana. L’obiettivo principale del PRIN, Pentadi-dimensional Tracking Space Detector (PTSD), è quello di adattare una tecnologia innovativa, quella degli LGAD, che sta per essere utilizzata in molti esperimenti di fisica delle particelle agli acceleratori, in particolare negli upgrade di Phase 2 degli esperimenti al Large Hadron Collider, all’ambiente spaziale. La caratteristica di questi rivelatori è quella di combinare risoluzioni spaziali di pochi micrometri con risoluzioni temporali di pochi picosecondi. Se questi rivelatori sono oramai da considerare come stato dell’arte per quanto riguarda gli esperimenti di fisica delle particelle agli acceleratori, per esperimenti spaziali necessitano di potenze elettriche superiori alle limitazioni poste dall’ambiente spaziale stesso. Una misura temporale con risoluzioni “spinte”, di per sé, già richiede potenze elettriche notevolmente maggiori della sola misura spaziale. Se a questo uniamo il fatto che, per tenere sotto controllo le capacità elettriche dei dispositivi e quindi il rumore elettronico, è necessario limitare le dimensioni dei rivelatori e quindi aumentare il numero degli stessi (e di conseguenza il numero totale di canali di lettura) per coprire grandi aree di rivelazione, si vede immediatamente come l’utilizzo in ambienti spaziali sia particolarmente sfidante. Il progetto PRIN si pone come obiettivo la realizzazione di particolari geometrie, accoppiando rivelatori “tradizionali” (nel seguito spesso identificati come PIN) con rivelatori di tipo LGAD per mantenere sotto controllo la capacità elettrica dei secondi, mantenendo però invariate le prestazioni temporali.

Lo studio della radiazione cosmica rappresenta un campo di ricerca di fondamentale importanza per la comprensione dei fenomeni astrofisici ad alta energia e delle interazioni della materia con le particelle di origine extraterrestre. I raggi cosmici hanno da sempre costituito un laboratorio naturale per l’indagine di diversi processi fisici, fornendo informazioni essenziali sulla composizione e sull’evoluzione dell’Universo.

In questa dissertazione, viene introdotto il contesto storico e scientifico dei raggi cosmici, delineandone la composizione, lo spettro energetico e le tecniche di rivelazione diretta e indiretta. In particolare, vengono esaminati alcuni esperimenti spaziali che hanno contribuito e contribuiranno in futuro allo studio della radiazione cosmica, tra cui AMS-02, DAMPE, HELIX e HERD, evidenziandone gli obiettivi, le caratteristiche tecniche e i risultati più rilevanti.

Un aspetto cruciale per un avanzamento sostanziale delle conoscenze, nel campo dei raggi cosmici, è lo sviluppo di rivelatori sempre più avanzati e sensibili. In questo con-

testo, la tesi si concentra sulla descrizione dei rivelatori al silicio, approfondendo i principi fisici dei semiconduttori, i meccanismi di drogaggio, la formazione della giunzione p-n e il funzionamento dei calorimetri. Particolare attenzione è riservata proprio ai rivelatori a guadagno interno, gli LGAD (Low-Gain Avalanche Detectors). La trattazione include una dettagliata analisi della giunzione moltiplicativa, della regione periferica e degli UFSD (Ultra-Fast Silicon Detectors), componenti chiave per l'ottimizzazione delle prestazioni temporali dei rivelatori.

Infine, il lavoro si conclude con la presentazione e la discussione dei risultati sperimentali ottenuti nel corso dello studio, condotto nella camera pulita degli INFN Sezione di Perugia, con particolare riferimento alla caratterizzazione delle prestazioni degli LGAD, proprio in vista della loro possibile applicazione in esperimenti spaziali futuri. Nello specifico sono state effettuate misure di caratterizzazione di 7 dispositivi con coppie PIN-LGAD; due di questi sono successivamente stati fissati insieme e sono state ripetute le misure di I-V e C-V.

Capitolo 1

I Raggi cosmici

In questo capitolo vengono introdotti i concetti generali relativi ai raggi cosmici. Si descrive la loro composizione, ovvero le diverse particelle che li costituiscono e le relative abbondanze, e si analizza lo spettro energetico che è possibile misurare dalla Terra. Vengono inoltre presentati alcuni dei principali modelli teorici proposti per spiegare la loro origine e propagazione nell'universo, insieme a una panoramica delle problematiche ancora irrisolte nel campo dello studio dei raggi cosmici. Infine, vengono brevemente illustrate le tecniche utilizzate per la loro rivelazione.

Introduzione storica

Con il termine "Raggi Cosmici" ci si riferisce a tutte quelle particelle e nuclei atomici di alta energia che, muovendosi quasi alla velocità della luce, investono la Terra dopo essere state espulse da varie sorgenti cosmiche quali stelle, supernovae, nuclei galattici attivi (Active Galactic Nuclei, AGN) e quasar. La loro origine è sia galattica che extragalattica e furono scoperti indipendentemente dal fisico italiano Domenico Pacini e dall'austriaco Victor Hess nei primi anni del '900 per rispondere a un quesito scientifico in quel momento irrisolto: Charles Coulomb aveva infatti notato che l'aria tra le foglioline del suo elettroscopio, un dispositivo in grado di rivelare le particelle cariche, non poteva essere del tutto isolante dato che questo si scaricava spontaneamente. In seguito alla scoperta della radioattività, dovuta nel 1896 a Marie Curie, Pierre Curie ed Antoine Henri Becquerel, si notò che la velocità di scarica dell'elettroscopio aumentava notevolmente nel momento in cui gli veniva avvicinata una fonte radioattiva e questo succedeva anche quando gli elettroscopi erano schermati; si dedusse così che la radiazione responsabile doveva essere altamente penetrante. Hess decise quindi di provare a vedere se questa radiazione aumentasse all'aumentare dell'altitudine grazie all'utilizzo di un pallone aerostatico su cui caricò un elettroscopio a foglie (Fig 1.1). Questa sua ipotesi si rivelò corretta: concluse quindi che l'aumentare della ionizzazione in corrispondenza di maggiori altezze dovesse essere la prova del fatto che questa radiazione avesse origine extraterrestre, scoperta che lo portò, insieme ai suoi studi precedentemente condotti, a vincere il premio Nobel nel 1936.



Figure 1.1: Agosto 1912, Hess torna dal suo viaggio in mongolfiera

Composizione e Spettro energetico

I raggi cosmici sono stati oggetto di numerosi studi approfonditi, che hanno permesso di ottenere una comprensione molto più dettagliata delle loro proprietà e caratteristiche. Ad oggi si sa che circa il 90% di questi è costituito da protoni, vi sono poi nuclei atomici di diversi elementi dai più leggeri come l'elio (~9%) ai più pesanti come il Ferro e l'Uranio (meno dell'1%); compaiono poi anche elettroni, neutrini, fotoni e in bassissima percentuale anche antimateria (positroni e antiprotoni).

Come si può vedere nella figura 1.2, i raggi cosmici coprono un ampio spettro di energie, che varia da circa 10^8 eV fino a oltre 10^{20} eV, rendendoli tra le particelle più energetiche osservate nell'universo. Le energie più basse, come quelle intorno a 10^9 eV (e.g. 1 GeV), corrispondono a particelle prodotte da sorgenti relativamente comuni, come il Sole o i resti di supernovae. Man mano che l'energia aumenta, i raggi cosmici diventano più rari, e quelli con energie superiori a 10^{15} eV si ritiene provengano da sorgenti galattiche ed extragalattiche estreme, come gli AGN ed esplosioni di supernovae. Le particelle con energie ultra-elevate, superiori a 10^{19} eV, rappresentano un enigma poiché richiedono meccanismi di accelerazione estremamente potenti; alcune di queste hanno energie tali da sfidare persino i limiti teorici previsti dalla fisica delle alte energie, stimolando ricerche per comprenderne l'origine e i processi di *accelerazione*.

Quando un raggio primario, solitamente un protone o un nucleo atomico provenienti dallo spazio, entra nell'atmosfera, collide con i nuclei dei gas atmosferici (ossigeno, azoto), generando una cascata di particelle secondarie che possiamo osservare direttamente sulla superficie terrestre nota come "shower" atmosferica. Questa cascata può estendersi su ampie aree e include diverse particelle:

- muoni e neutrini, che sono altamente penetranti;
- elettroni e fotoni, che subiscono più facilmente interazioni con l'atmosfera;
- altre particelle instabili, che a loro volta proseguono lo sciame.

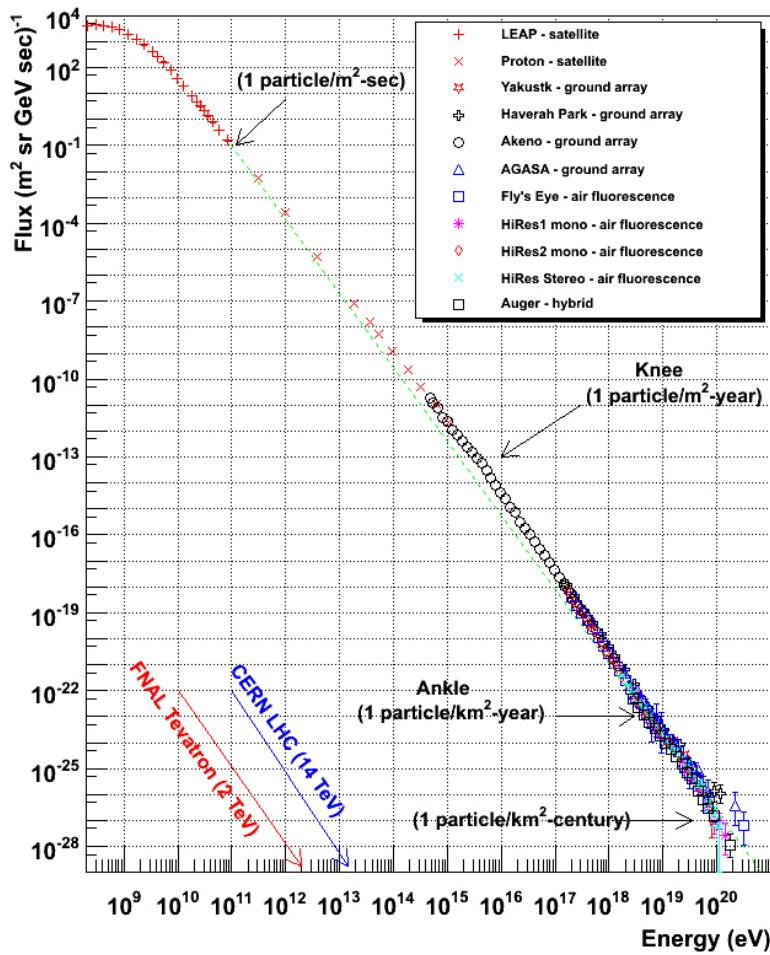


Figure 1.2: Spettro delle energie dei Raggi Cosmici misurate da vari esperimenti [2]

Rivelazione

La tecnica scelta per la rilevazione di queste particelle dipenderà dall'energia, dal flusso previsto e dalle caratteristiche da rivelare. In particolare si può utilizzare:

- **rivelazione diretta dei raggi cosmici primari:** questa tecnica è utilizzata per particelle con energie relativamente basse (fino a circa 10¹⁵eV): i raggi cosmici vengono osservati direttamente prima che interagiscano con l'atmosfera terrestre, utilizzando strumenti montati su satelliti (come AMS-02 e DAMPE) o palloni stratosferici (es. HELIX). Questi esperimenti sono progettati per identificare il tipo di particella, la sua energia e la carica; gli strumenti solitamente utilizzati sono rivelatori al silicio, detector che verranno approfonditi nei prossimi capitoli, così come gli esperimenti spaziali nominati;
- **rivelazione indiretta dei raggi cosmici attraverso sciami atmosferici:** per raggi cosmici di energia più alta, il flusso di particelle è estremamente ridotto, rendendo impraticabile l'osservazione diretta. Si utilizzano allora rivelatori terrestri che analizzano le particelle secondarie prodotte nella cascata atmosferica. Una tecnica molto utilizzata è quella dei rivelatori di luce Cherenkov: questi vengono utilizzati

per osservare la radiazione Cherenkov emessa dalle particelle cariche che si muovono nell’atmosfera a velocità superiori a quella della luce nel mezzo. Vi sono infatti rivelatori di superficie, cioè sistemi distribuiti su grandi aree che rilevano particelle secondarie come i muoni o i fotoni, che sfruttano la radiazione Cherenkov in diversi mezzi; ne è un esempio l’Osservatorio Pierre Auger, dove vengono impiegati rivelatori a base d’acqua. In questo caso, le particelle cariche dello sciame atmosferico, prodotte durante l’interazione del primario con l’atmosfera, attraversano l’acqua dei rivelatori, emettendo radiazione Cherenkov e la luce emessa durante la cascata viene catturata da telescopi a fluorescenza. I rivelatori possono anche essere sotterranei; vengono posizionati sotto terra o sotto montagne poichè gli esperimenti che li utilizzano studiano particelle penetranti come i muoni e i neutrini secondari. Un esempio significativo è il rivelatore Super-Kamiokande situato in Giappone, nella miniera di Kamioka (vicino alla città di Hida) che sfrutta grandi volumi d’acqua come l’osservatorio Pierre Auger. Questi rivelatori possono essere montati anche su telescopi ottici ma l’intensa luce dell’ambiente può rappresentare un problema; infatti questi rivelatori sono operativi solo per una frazione limitata del tempo, in condizioni di cielo scuro e limpido. Un esempio di applicazione è fornito dagli array H.E.S.S. e Cherenkov Telescope Array (CTA), che utilizzano la radiazione Cherenkov per rivelare i fotoni di alta energia, gamma, provenienti dall’universo. Questi telescopi sono in grado di rilevare la radiazione Cherenkov emessa nell’aria stessa dalle particelle dello sciame atmosferico, generato quando un fotone o una particella carica primaria interagisce con l’atmosfera terrestre;

- **rilevazione dei neutrini cosmici:** i neutrini sono particelle elusive, che interagiscono molto debolmente con la materia. Per rivelarli, si utilizzano grandi volumi di materiale trasparente (come acqua o ghiaccio), dotati di fotomoltiplicatori per osservare la radiazione Cherenkov prodotta quando un neutrino interagisce con il mezzo. Un esempio è il telescopio per neutrini KM3NeT, a un centinaio di chilometri al largo delle coste meridionali della Sicilia.

In conclusione, lo studio dei raggi cosmici ha permesso di aprire una finestra unica sull’universo, rivelando informazioni fondamentali sulla composizione, l’origine e i meccanismi di accelerazione delle particelle più energetiche conosciute. Tuttavia, per comprendere appieno queste particelle, è necessario disporre di tecnologie di rivelazione altamente avanzate, in grado di fornire misure precise di traiettoria, carica ed energia. Tra queste, i rivelatori al silicio si sono affermati come strumenti indispensabili, grazie alla loro alta risoluzione spaziale e alla capacità di operare in ambienti estremi come lo spazio. Nei prossimi capitoli, ci si concentrerà su questi rivelatori, analizzandone i principi di funzionamento e il loro ruolo negli esperimenti più avanzati, come AMS-02, DAMPE, PAMELA e simili.

Capitolo 2

Esperimenti nello spazio

In questo capitolo verranno riportati diversi esempi di esperimenti che conducono rivelazione diretta di CR nello spazio. Il primo esempio, AMS-02, è uno spettrometro magnetico, mentre il secondo, DAMPE, si basa un calorimetro elettromagnetico. Vi è poi HELIX, che si concentra sulla misurazione precisa della massa per distinguere gli isotopi e infine HERD, un esperimento simile a DAMPE ma con una geometria innovativa che gli permetterà di spingersi ad energie significativamente maggiori dell'attuale generazione di esperimenti (AMS-02, DAMPE e CALET), in modo da porre nuovi limiti alle teorie conosciute.

Verranno descritte le caratteristiche principali e le soluzioni sperimentalistiche utilizzate da ciascuno per la rivelazione.

La robustezza dei rivelatori al silicio, che verranno poi approfonditi, e la loro capacità di operare in ambienti ostili, li rendono essenziali per missioni scientifiche avanzate; dagli inizi degli anni '90 si è infatti iniziato a effettuare esperimenti anche nello spazio. I rivelatori tradizionalmente utilizzati negli acceleratori terrestri sono stati adattati per essere portati su palloni aerostatici e satelliti in orbita terrestre, permettendo così l'indagine di fenomeni come i raggi cosmici e la ricerca di tracce di materia oscura e antimateria. Oggi, grazie all'evoluzione tecnologica, i rivelatori spaziali combinano diverse tecniche in un unico apparato, con particolare attenzione al peso e al consumo energetico.

L'esperimento AMS-02

Una delle applicazioni più significative di questa tecnologia è l'esperimento **AMS-02** (**A**lpha **M**agnetic **S**pectrometer), presente nell'immagine 2.1. Installato a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (ISS) dal maggio 2011, AMS-02 utilizza tecnologie derivate dagli esperimenti di fisica delle particelle ad alta energia, adattate per l'ambiente spaziale, per tracciare con estrema precisione le radiazioni cosmiche, permettendo lo studio di fenomeni come la composizione dei raggi cosmici, la materia oscura e l'antimateria.

AMS-02 è costituito da un insieme di rivelatori complementari le cui misure combinate permettono di ricostruire il tipo di particella che attraversa lo strumento. Più nello specifico, come si vede nella figura 2.2, è composto da:

- magnete: genera un campo uniforme all'interno dello spettrometro, con una configurazione che minimizza le interferenze esterne. È costituito da blocchi di Neodimio, Ferro e Boro (Nd-Fe-B), in configurazione Hallbach, in modo da generale un campo



Figure 2.1: AMS montato sul traliccio S3 della ISS

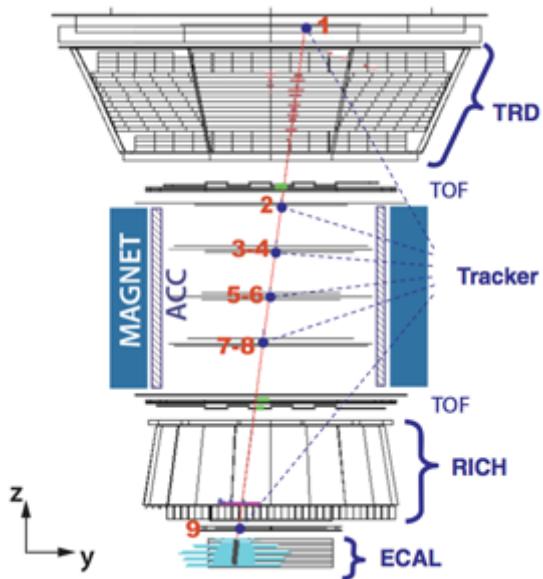


Figure 2.2: Schema AMS-02. [20]

magnetico uniforme di 0.14T parallelo alle “strip”¹ del tracciatore al silicio (i.e. ortogonale alla coordinata misurata) per misurare la curvatura delle particelle nel piano ortogonale al campo stesso;

- tracker: composto da 9 piani di rivelatori al silicio che a loro volta sono organizzati in più ladders, come verrà in seguito approfondito;
- rivelatore a radiazione di transizione (TRD): posizionato nella parte superiore, distingue particelle leggere (come elettroni e positroni) da quelle più pesanti (protioni, nuclei) sfruttando la probabilità di emissione di radiazione di transizione, che dipende dal fattore di Lorentz della particella. È composto da moduli con radiatori e camere proporzionali riempite con una miscela di gas;

¹con la risoluzione spaziale migliore, circa 10 μm . Ogni piano ha anche strip nell'altra direzione, seppur con risoluzione peggiore, circa 30 μm .

- calorimetro elettromagnetico (ECAL): formato da piani alternati di piombo e fibre scintillanti, misura con precisione l'energia delle particelle elettromagnetiche e permette di discriminare sciami elettromagnetici (elettroni, positroni) da quelli adronici (protoni, nuclei);
- rivelatore ad anelli Cherenkov (RICH): misura la velocità delle particelle con alta precisione tramite effetto Cherenkov e il rilascio energetico tramite il numero di fotoni emessi;
- scintillatori a tempo di volo (TOF): 4 scintillatori posizionati agli estremi del magnete, determinano velocità e verso di arrivo delle particelle, fornendo il trigger principale.

Con questa configurazione l'esperimento è in grado di identificare e analizzare le componenti rare della radiazione cosmica, come elettroni e positroni, contribuendo allo studio di fenomeni come la materia oscura e l'antimateria nell'universo.

AMS-02 ad oggi ha identificato più di 245 miliardi di raggi cosmici e si possono riportare diversi risultati scientifici di grande importanza sia per quanto riguarda l'antimateria che per i raggi cosmici. Tra i più significativi si può riportare l'aver dimostrato che il rapporto fra flusso di positroni e il flusso combinato di elettroni e positroni aumenta con l'aumentare dell'energia, per raggiungere un massimo e poi diminuire di nuovo. Questo comportamento non è previsto dai modelli teorici tradizionali basati su sorgenti astrofisiche standard che invece prevedono un rapporto decrescente con l'energia. Questo andamento dà luogo a due possibili spiegazioni: la prima è l'annichilazione o decadimento di particelle di materia oscura di alta massa che produrrebbe coppie di elettroni e positroni, mentre la seconda è quella di avere le pulsar come sorgenti significative di positroni ad alta energia dato che queste e le loro regioni circostanti sono note per accelerare le particelle. AMS-02 ha anche fornito misure senza precedenti di antiprotoni nei raggi cosmici, rafforzando l'ipotesi dell'esistenza di materia oscura. Per quanto riguarda i raggi cosmici, l'esperimento si è occupato di analizzare nuclei primari come protoni, elio, carbonio e ossigeno, oltre a nuclei secondari come litio e boro. Questi ultimi si formano dalle interazioni tra nuclei primari e il mezzo interstellare, un processo noto come spallazione nucleare. Lo studio del rapporto tra nuclei secondari e primari, come il Boro/Carbonio (B/C), offre indizi cruciali sulla distanza percorsa dai raggi cosmici e sulla densità del mezzo interstellare che attraversano. Inoltre, le variazioni nei flussi di protoni e nuclei più pesanti suggeriscono nuove prospettive sui meccanismi di accelerazione nelle sorgenti astrofisiche, come le supernove, e sulle proprietà del mezzo galattico.

In totale il rivelatore ha dimensioni di circa $3 \times 4 \times 5 \text{ m}^3$ e un peso di circa 7 tonnellate. È progettato per resistere alle sollecitazioni del lancio e per operare nello spazio in condizioni di vuoto e variazioni estreme e continue di temperatura, nonché alle radiazioni tipiche dell'ambiente spaziale.

L'esperimento DAMPE

L'esperimento DAMPE (DArk Matter Particle Explorer), Fig 2.3, noto anche come "Wukong" in Cina, è un satellite scientifico progettato per lo studio delle particelle cosmiche ad alta energia e per la ricerca indiretta di materia oscura. Lanciato a metà dicembre 2015 dalla Cina, DAMPE rappresenta uno dei progetti scientifici più ambiziosi nel campo dell'astrofisica delle alte energie. La missione si pone tre obiettivi principali:

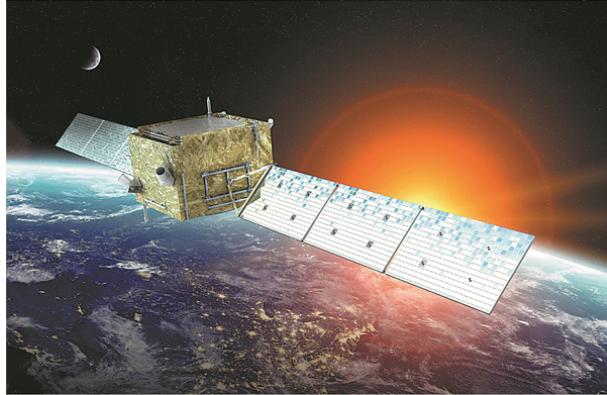


Figure 2.3: Illustrazione di DAMPE nello spazio (crediti foto: China Daily)

- **ricerca di materia oscura:** DAMPE cerca segnali indiretti della materia oscura attraverso l'osservazione di elettroni, positroni e raggi gamma, che potrebbero derivare dall'annichilazione o dal decadimento di particelle di materia oscura;
- **studio dei raggi cosmici:** esamina con grande precisione la composizione e lo spettro energetico dei raggi cosmici, con energie che raggiungono i 100 TeV;
- **osservazione di raggi gamma:** contribuisce alla mappatura delle sorgenti astrofisiche di raggi gamma, fornendo dati fondamentali per comprendere fenomeni come i buchi neri supermassicci e le esplosioni di supernova.

Il cuore di DAMPE è un apparato sperimentale composto da 4 sotto-rivelatori, in Fig 2.4; nello specifico vi è, partendo dal basso verso l'alto, un rivelatore di neutroni (NUD, Neutron Detector), il calorimetro in germanato di bismuto ($Bi_4Ge_3O_{12}$, BGO), il tracciatore in silicio (STK, Silicon-Tungsten trackKer-converter) e un rivelatore basato su scintillatori plastici (PSD, Plastic Scintillator Detector).

La combinazione di queste tecnologie consente a DAMPE di distinguere tra protoni, elettroni, nuclei pesanti e fotoni, migliorando significativamente la capacità di rilevare anomalie nei dati dei raggi cosmici e di identificare potenziali segnali di materia oscura. Infatti ogni componente ha un ruolo ben specifico: il PSD si occupa di escludere le particelle cariche, così da poter vedere solo fotoni γ restituendo comunque un'ottima misura della carica per le misure delle specie nucleari. L'STK permette sia di ricostruire la traccia dei fotoni, aumentando la probabilità di convertirli in coppie e^-e^+ mediante l'inserimento di sottili strati di tungsteno, materiale scelto per il suo alto numero atomico e la sua densità, che massimizza l'interazione dei fotoni con i nuclei atomici, favorendo il processo di produzione di coppie, sia di misurare la carica e la traiettoria delle particelle cariche grazie ai layer di rivelatori a microstrip di silicio. Il calorimetro è il vero rivelatore centrale: è composto da 14 barre alternate nella direzione di x e y così che questa matrice

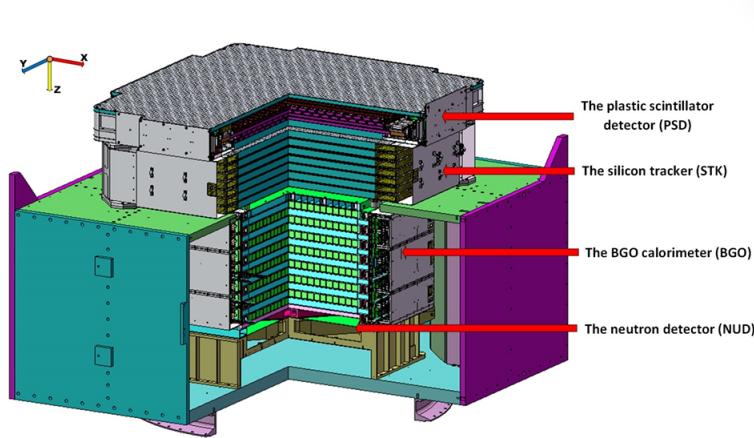


Figure 2.4: Schema DAMPE [14]

possa campionare sia lo sviluppo laterale che longitudinale dello sciame. In più la sua grande profondità, circa 32 lunghezze di radiazione, gli permette di contenere quasi interamente le shower elettromagnetiche e misurare l'energia delle particelle fino a decine di TeV. La luce scintillante prodotta all'interno dei cristalli viene poi raccolta da fotomoltiplicatori che convertono la luce in segnali elettrici proporzionali all'energia depositata. Il calorimetro ricopre un ruolo fondamentale nell'osservazione indiretta della materia oscura; rilevando con alta precisione lo spettro energetico degli elettroni e dei positroni cosmici, può identificare anomalie che potrebbero essere attribuite a processi di annichilazione o decadimento di particelle di materia oscura. Questa capacità è stata cruciale per le scoperte iniziali di DAMPE, come l'osservazione di eventi rari e ad alta energia. Vi è infine il NUD che si occupa di rilevare i neutroni prodotti dal passaggio di adroni nel BGO, permettendo così di avere due discriminanti indipendenti di elettroni e adroni. Sin dal suo lancio, DAMPE ha prodotto risultati molto rilevanti, tra cui la rilevazione di un'anomalia nello spettro energetico dei positroni ed elettroni cosmici, che potrebbe fornire nuovi indizi sulla natura della materia oscura.

L'esperimento HELIX

L'esperimento HELIX (High Energy Light Isotope eXperiment), Fig. 2.5, è una missione scientifica progettata per lo studio degli isotopi leggeri di origine cosmica, come il deuterio, il trizio e l'elio-3. HELIX mira a fornire misure precise della composizione isotopica dei raggi cosmici per comprendere meglio i processi di propagazione e interazione delle particelle nel mezzo interstellare. Questo esperimento, condotto utilizzando palloni stratosferici, sfrutta tecnologie avanzate di tracciamento e calorimetria per garantire una ricostruzione dettagliata delle traiettorie e delle energie delle particelle. La composizione

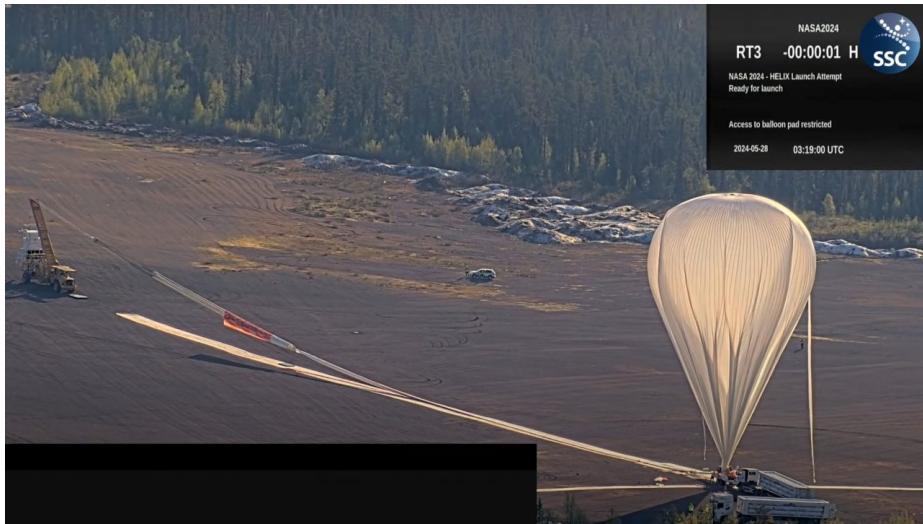


Figure 2.5: Lancio di HELIX, maggio 2024

isotopica dei raggi cosmici è strettamente correlata ai processi di nucleosintesi stellare e alla propagazione dei nuclei attraverso il mezzo interstellare (ISM); gli isotopi leggeri si formano principalmente durante fasi specifiche della vita delle stelle, tra cui la sintesi nucleare primordiale del Big Bang e la fusione stellare. Successivamente, i nuclei prodotti vengono accelerati e diffusi attraverso l'ISM, dove possono interagire con gas e polveri, modificando ulteriormente la loro composizione. L'abbondanza relativa di isotopi, ad esempio il rapporto tra elio-3 ed elio-4, può fornire importanti indicazioni sulla densità e sulla composizione del materiale interstellare attraversato dai raggi cosmici, nonché sui tempi scala della loro propagazione. Questi dati sono fondamentali per testare i modelli di diffusione galattica, che descrivono come i raggi cosmici si muovono e si mescolano nel campo magnetico galattico. HELIX è infatti progettato per misurare isotopi con una precisione mai raggiunta prima, con una sensibilità stimata nell'ordine di una parte su mille nella determinazione delle abbondanze isotopiche relative; questa accuratezza consente di rilevare variazioni minime nei rapporti isotopici, che sono appunto cruciali per vincolare modelli astrofisici e di propagazione dei raggi cosmici. Per far ciò, l'esperimento sfrutta palloni stratosferici, che portano il rivelatore ad altitudini superiori ai 30 km. Questa configurazione riduce significativamente l'assorbimento atmosferico, consentendo la raccolta di un flusso più puro e rappresentativo di particelle cosmiche primarie. L'esperimento è dotato di un apparato sperimentale avanzato costituito da diversi sottosistemi, ciascuno dei quali progettato per svolgere una funzione specifica:

- spettrometro magnetico: permette la ricostruzione della traiettoria delle particelle

cariche e la determinazione del momento attraverso la misura della curvatura in un campo magnetico noto;

- calorimetro: misura l'energia depositata dalle particelle e contribuisce alla discriminazione tra diverse specie di particelle;
- detector Cherenkov: fornisce informazioni sulla velocità delle particelle, complementando le misure del tracker.

Il rivelatore si basa sulla combinazione della misura del momento nello spettrometro, con la misura della velocità nel Cherenkov, per la misura delle massa delle particelle e quindi per la distinzione isotopica.

Lo spettrometro magnetico è progettato per ricostruire con precisione le traiettorie delle particelle cariche in transito attraverso il rivelatore, questo sistema, come verrà descritto nel paragrafo sul tracker di AMS, capitolo 3, si basa sul principio secondo cui una particella carica in movimento all'interno di un campo magnetico subisce una forza di Lorentz, che provoca una deviazione della sua traiettoria. La curvatura della traiettoria è inversamente proporzionale al momento della particella, permettendo la determinazione del rapporto p/q , cioè della sua rigidità R .

Seppur il tracciatore (una “wire chamber”) non presenti risoluzioni spaziali di particolare rilievo (ad esempio se confrontate con quelle di un tracciatore al silicio) e quindi non consenta di spingere ad alte energie la misura di momento, il così basso “material budget” permette di tenere sotto controllo lo scattering coulombiano multiplo delle particelle con i materiali del rivelatore e quindi di ottimizzare la risoluzione in momento a basse energie. In particolare, combinando questo sistema tracciante a basso material budget, con un magnete superconduttore che genera un campo magnetico uniforme ad alta intensità, consente di ottenere una risoluzione un momento dell'ordine dell'1-2% per particelle con energia cinetica fino a qualche GeV, precisione essenziale per distinguere isotopi con differenze minime nella massa. Il magnete, calibrato a terra prima del volo per ottimizzare la sensibilità alle particelle cosmiche di interesse, è progettato per rimanere costante per tutta la durata della missione, grazie alla stabilità intrinseca del superconduttore. Questo è possibile perché il magnete è mantenuto a temperature criogeniche, garantendo un campo uniforme senza necessità di ricalibrazioni. Eventuali variazioni minime del campo durante il volo vengono monitorate tramite sensori magnetici e compensate durante l'analisi dei dati.

E' utile sottolineare come l'altra misura cruciale per la determinazione della massa sia quella di velocità. In HELIX questa è fatta da un rivelatore Cherenkov ma la possibilità di avere sistemi a tempo di volo con prestazioni di pochi ps potrebbe fornire una valida alternativa o una possibilità di misura ridondante e quindi di cross-calibrazione

L'esperimento HELIX rappresenta un'importante frontiera nella ricerca sui raggi cosmici, grazie alla sua capacità di fornire misure di precisione senza precedenti nella composizione isotopica di nuclei leggeri. Questi risultati sono fondamentali per testare e migliorare i modelli di diffusione galattica e per comprendere i processi di interazione tra i raggi cosmici e il mezzo interstellare. Il contributo scientifico di HELIX è reso possibile dalla sinergia tra tecnologie all'avanguardia e un approccio sperimentale innovativo. Le misure ottenute forniranno nuove informazioni sulla storia e sulla propagazione dei raggi cosmici, contribuendo a risolvere domande aperte sull'origine e sull'evoluzione del materiale nell'universo. In sintesi, HELIX non solo amplia le nostre conoscenze sui raggi cosmici, ma pone anche le basi per future indagini sperimentali nel campo della fisica astroparticellare.

L'esperimento HERD

L'esperimento HERD (High Energy cosmic Rays Detector) è una missione spaziale internazionale progettata per lo studio dei raggi cosmici ad alta energia. HERD è stato progettato per operare a bordo della stazione spaziale cinese Tiangong, con l'obiettivo principale di misurare con elevata precisione i flussi di particelle cosmiche, come protoni, nuclei di elio e nuclei pesanti. Al momento non è ancora operativo; la missione è ancora in fase di sviluppo e i componenti del rivelatore sono attualmente sottoposti a test al CERN (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) a Ginevra e al CNAO (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica) a Pavia, per garantire il corretto funzionamento del sistema in ambiente spaziale e quando sottoposto a forti radiazioni. Il suo lancio è comunque previsto nei prossimi anni.

Sebbene HERD non abbia ancora raccolto dati, l'esperimento è considerato una delle missioni più promettenti per lo studio dei raggi cosmici e della materia oscura, e si prevede che apporterà contributi fondamentali alla fisica delle astroparticelle non appena sarà operativo; tra i suoi obiettivi scientifici troviamo:

- **studio delle Sorgenti Cosmiche:** l'esperimento è progettato per osservare la composizione e l'intensità dei raggi cosmici provenienti da diverse sorgenti cosmiche, come supernove, buchi neri e oggetti di alta energia. La missione fornirà una visione unica sull'origine e sul processo di accelerazione dei raggi cosmici ad alta energia; infatti anche se esistono altri esperimenti come AMS-02 o DAMPE che studiano i raggi cosmici e la materia oscura, HERD si distingue per la sua capacità di esplorare un ampio intervallo di energie, che va dai 10 GeV fino a centinaia di TeV, permettendo di osservare fenomeni ad altissima energia e di raccogliere informazioni più complete sulle particelle cosmiche. Inoltre, la strumentazione avanzata e la sua collocazione sulla Stazione Spaziale Cinese Tiangong consentono a HERD di ottenere misurazioni precise, complementari agli altri esperimenti, con un focus particolare sulla materia oscura e sulle particelle rare;
- **indagini sulla Materia Oscura:** HERD cercherà segnali indiretti di materia oscura, un aspetto fondamentale della fisica moderna. La materia oscura, che non emette radiazioni elettromagnetiche e quindi è invisibile, potrebbe interagire con la materia ordinaria, producendo particelle rilevabili dai sensori di HERD. Questi segnali potrebbero manifestarsi in vari modi, ad esempio attraverso l'annichilazione della Materia Oscura: una delle ipotesi più comuni è che le particelle di materia oscura possano annichilarsi tra loro, creando altre particelle. In alcuni modelli, queste particelle potrebbero includere fotoni, positroni o neutrini, che sono particelle difficili da rilevare ma che potrebbero essere catturate dai sensori di HERD. Un altro scenario ipotizzato è che le particelle di materia oscura possano decadere spontaneamente in altre particelle. Questi decadimenti potrebbero produrre un eccesso di particelle che non si spiega con le fonti conosciute di radiazione cosmica, indicando così una possibile origine di materia oscura;
- **misurazione della composizione e dei flussi di Raggi Cosmici:** HERD è in grado di identificare e misurare nuclei pesanti, protoni, elio e altre particelle, permettendo di comprendere meglio la composizione dei raggi cosmici e l'evoluzione della loro energia nel tempo. Permetterà inoltre di misurare con estrema precisione

il flusso di raggi cosmici in un ampio intervallo di energia, in grado di migliorare le attuali stime sul flusso globale e sulla sua distribuzione spaziale.

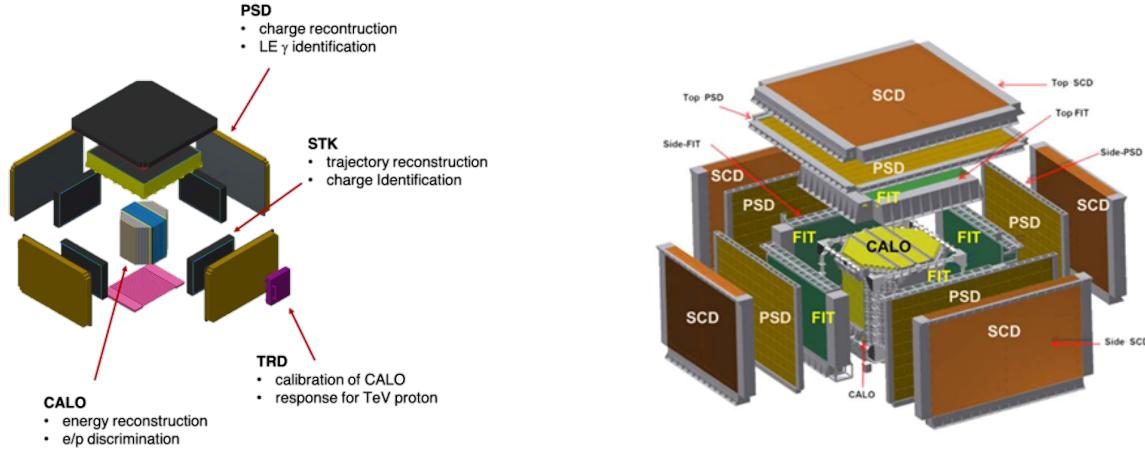


Figure 2.6: Schema composizione HERD [15], [16]

I sotto-rivelatori attualmente in fase di sviluppo per l'esperimento HERD sono:

- Silicon Charge Detector (SCD): misura della carica;
- Plastic Scintillator Detector (PSD): anticoincidenza con i raggi gamma e misurazione della carica;
- Fiber Tracker (FIT): ricostruzione delle traiettorie;
- Calorimeter (CALO): misurazione dell'energia e discriminazione tra elettroni e protoni tramite l'imaging delle shower, facilitandone la distinzione tra elettromagnetiche e adroniche;
- Transition Radiation Detector (TRD): calibrazione della risposta dei sotto-rivelatori a nuclei di TeV.

Il SCD fornirà una misurazione della carica molto precisa su ciascuna faccia sensibile. Il design attuale prevede 6 piani coperti con micro-strip di silicio da $300 \mu\text{m}$, con l'obiettivo di ottenere una risoluzione della carica $\Delta Z < 0.1 @ Z = 1$ e $\Delta Z < 0.2 @ Z = 6$, per distinguere correttamente la particella incidente tra le varie specie nucleari. Per ottenere la massima accuratezza nelle misurazioni della carica, il SCD sarà collocato nella shell più esterna, in modo da ridurre la probabilità che la misurazione della carica venga influenzata dalle interazioni delle particelle con i materiali di altri sotto-rivelatori.

Il PSD sarà composto da 2 strati di barre di scintillatore plastico, letti da SiPMs (Silicon Photon Multipliers), e posizionati su ciascuna faccia sensibile. Le barre sono disposte nei piani in modo che la direzione delle barre del primo strato sia ortogonale a quella delle barre del secondo strato, consentendo così la ricostruzione del punto di impatto della particella incidente. Questo sotto-rivelatore, che ha come scopo principale l'anticoincidenza con i raggi gamma, dovrà essere in grado di rilevare velocemente ($< 150 \text{ ns}$) ed efficientemente ($> 99.5\%$) le particelle cariche. Inoltre, misurerà la carica delle particelle, aumentando la precisione e la ridondanza delle misurazioni del SCD, con una risoluzione della carica

attesa di $\Delta Z < 0.2 - 0.3$.

Il FIT ha come obiettivo quello di tracciare la direzione della particella incidente con una risoluzione angolare $<0.6^\circ$ per un angolo di incidenza di 0° . È composto da fibre scintillanti organizzate in tappetini, che fungono da elementi di base per il sotto-rivelatore. Ogni tappetino sarà rilevato da SiPMs. Più tappetini sono combinati per formare un piano, che ricostruirà il punto di impatto della particella incidente su di esso, nelle due coordinate del piano (X-Y, Y-Z o X-Z). Su ciascuna faccia sensibile, saranno installati 7 piani per eseguire la ricostruzione della traiettoria. Il FIT fornirà anche una misurazione della carica con una risoluzione di $\Delta Z < 0.3$ per $Z = 2$.

Il CALO sarà composto da 7600 cristalli cubici di LYSO assemblati per formare un prisma ottagonale. Ogni cristallo è letto da fotodiodi e da una fotocamera IsCMOS (Image-Enhanced Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) con un doppio schema di lettura, rendendo possibile una calibrazione incrociata e quindi una riduzione degli errori sistematici. Questa fine segmentazione permetterà di ottenere un'immagine risolta della shower di particelle, utile per distinguere le cascate elettromagnetiche da quelle adroniche con una potenza discriminante di 10^6 , necessaria per misurare il flusso di elettroni fino a decine di TeV. La profondità totale del calorimetro è di $55 X_0$ (lunghezze di radiazione): questo rappresenta un miglioramento significativo rispetto agli esperimenti attualmente in orbita, con DAMPE che ha la profondità più grande tra questi con $32 X_0$. Questo enorme miglioramento nella profondità consentirà al calorimetro di HERD di effettuare misurazioni nell'intervallo di energie da 10 GeV a 100 TeV per elettroni e fotoni, e da 30 GeV a pochi PeV per protoni e nuclei, mantenendo una risoluzione energetica inferiore a $< 1\%$ per i primi e $< 20\%$ per i secondi.

Il TRD aiuterà con la calibrazione degli altri sotto-rivelatori studiando la radiazione di transizione emessa dai nuclei di TeV nel mezzo di radiatore scelto e raccolta tramite un rivelatore THGEM (Totally Hermetic GEM), un dispositivo che utilizza una struttura microporosa che consente la moltiplicazione degli elettroni generati da un'interazione di particelle con un gas di rilevamento. Funziona come un moltiplicatore di carica per amplificare il segnale elettrico generato dalle particelle cariche che passano attraverso il gas, permettendo una migliore rilevazione. Questo sotto-rivelatore sarà montato su una singola faccia laterale.

HERD rappresenta una missione pionieristica nella ricerca dei raggi cosmici ad alta energia; grazie alla sua strumentazione avanzata e alla sua capacità di operare in un ambiente spaziale, fornirà nuove conoscenze fondamentali non solo sui raggi cosmici, ma anche sulla materia oscura e sugli oggetti astrofisici estremi, contribuendo in modo sostanziale al progresso della fisica delle particelle e della cosmologia.

Capitolo 3

I Rivelatori

Il capitolo introduce i principi fondamentali dei rivelatori di particelle, tracciandone l'evoluzione tecnologica fino ai più avanzati rivelatori al silicio. Si approfondiscono i semiconduttori, evidenziandone le proprietà chiave per la rivelazione di particelle e il ruolo cruciale del processo di drogaggio, che consente la formazione di giunzioni p-n, elementi essenziali nei moderni dispositivi elettronici. Successivamente, viene posta l'attenzione sui tracciatori a semiconduttore e sui calorimetri, con una sintesi dei rispettivi principi di funzionamento e della loro rilevanza nella fisica delle particelle

I Rivelatori

I rivelatori sono strumenti essenziali per lo studio delle particelle subatomiche. Grazie alle interazioni tra queste e i materiali del rivelatore, è possibile generare segnali che permettono di determinarne caratteristiche come posizione, energia, momento e carica elettrica; tra le diverse tipologie verranno in seguito approfonditi i rivelatori al silicio, che si distinguono per la loro elevata risoluzione spaziale, rapidità di risposta e compattezza.

L'evoluzione dei rivelatori di particelle ha seguito il progresso delle tecnologie scientifiche e industriali, passando da dispositivi semplici e meccanici a strumenti complessi ed elettronici. Inizialmente, i rivelatori erano basati su tecniche visive, come le camere a nebbia e le camere a bolle, che sfruttavano la capacità delle particelle cariche di ionizzare la materia e creare tracce visibili. Questi approcci, sebbene rivoluzionari per l'epoca, richiedevano un lungo processo di acquisizione e analisi manuale delle immagini. Con l'avvento dell'elettronica, negli anni '60 si è assistito a una svolta con la camera proporzionale multifilo, inventata da Georges Charpak, che ha permesso un'acquisizione più rapida e precisa dei dati. Questa innovazione ha aperto la strada all'era dei rivelatori completamente elettronici, che combinano velocità di acquisizione con capacità di processamento dei dati tramite computer. Tra i componenti fondamentali dei rivelatori si trovano:

- **tracciatori**, che rilevano con precisione la traiettoria delle particelle;
- **calorimetri**, per misurare l'energia delle particelle in modo distruttivo, ovvero tramite l'assorbimento completo della particella da parte del rivelatore;
- **scintillatori**, utilizzati come cronometri per il tempo di volo (ToF) e per fornire segnali di trigger;

-
- **magneti**, per curvare le traiettorie delle particelle e determinare la loro massa e carica.

A seconda degli obiettivi scientifici, possono essere utilizzati tutti o parte di questi componenti, ma tracciatori e calorimetri sono quasi sempre presenti.

Rivelatori al Silicio

I rivelatori al silicio rappresentano una classe di dispositivi fondamentali nella fisica delle particelle, nella ricerca scientifica e nelle applicazioni tecnologiche avanzate. Questi infatti, grazie alla loro versatilità e precisione, trovano impiego in una vasta gamma di applicazioni, che spaziano dalla fisica sperimentale ad alte energie alla medicina, dall'astrofisica all'industria. Il principio di funzionamento si basa sulle proprietà uniche dei materiali semiconduttori, in grado di generare portatori di carica (elettroni e lacune) in risposta all'interazione con particelle ionizzanti, fornendo informazioni preziose sulla loro posizione, energia e tempo di interazione. Il silicio, in particolare, è il materiale semiconduttore di riferimento grazie alla sua abbondanza, stabilità chimica, maturità tecnologica e alla possibilità di realizzare dispositivi con geometrie estremamente compatte e strutture complesse.

Semiconduttori

La scoperta e lo sviluppo dei semiconduttori hanno origine nella seconda metà del XIX secolo, quando furono osservati i primi fenomeni di conduzione elettrica anomala in materiali come il selenio e il solfuro di piombo. Tuttavia, è solo nel XX secolo, con l'avvento della meccanica quantistica, che vennero comprese le proprietà fondamentali dei semiconduttori, come la struttura a bande elettroniche e il ruolo del drogaggio che verrà successivamente approfondito. Il vero punto di svolta arrivò nel 1947, con l'invenzione del transistor da parte di John Bardeen, Walter Brattain e William Shockley presso i Bell Labs. Questo dispositivo segnò l'inizio dell'era dell'elettronica moderna, aprendo la strada allo sviluppo di circuiti integrati e dispositivi avanzati. Da allora, i semiconduttori sono diventati il fulcro di progressi tecnologici senza precedenti, guidando innovazioni in ambiti che spaziano dall'informatica alla fisica sperimentale. I semiconduttori infatti hanno come particolarità quella di avere a temperatura ambiente, ovvero intorno ai 300K, una banda di conduzione vuota, simile a quella dei materiali isolanti, con una sostanziale differenza nell'ampiezza dell'intervallo di energia, detto bandgap, tra la banda di valenza (l'ultima banda riempita) e la prima banda di conduzione libera. Nel caso dei semiconduttori questa energia è dell'ordine di grandezza dell'energia termica a temperatura ambiente, pari a circa 25 meV; questo consente a una frazione di elettroni nella banda di valenza di essere promossi alla banda di conduzione tramite agitazione termica, aumentando la conducibilità del materiale e di conseguenza la corrente.

Drogaggio

Il processo fondamentale che permette di migliorare e controllare la conduzione nei semiconduttori è il drogaggio; questo permette di creare cariche o lacune introducendo impurità

nel reticolo cristallino, sostituendo così alcuni atomi con elementi che possiedono un diverso numero di elettroni di valenza. Inserendo un'impurità con un elettrone di valenza in più rispetto all'elemento principale (ad esempio il fosforo nel silicio), vi sarà un portatore di carica negativo aggiuntivo, ovvero un elettrone in eccesso nella banda di conduzione, ottenendo un semiconduttore di tipo **n**. Al contrario, per ogni impurità con un elettrone di valenza in meno (ad esempio il boro nel silicio), si ottiene una lacuna, ovvero l'analogo di un portatore di carica positivo, che caratterizza un semiconduttore di tipo **p**. Il poter controllare le cariche libere e la loro concentrazione rende i semiconduttori molto versatili per esperimenti di particelle: i più utilizzati, opportunamente drogati, sono il Silicio (Si) e il Germanio (Ge). Il primo, essendo estremamente abbondante e stabile, è solitamente preferito, pur avendo una bandgap più elevata del germanio ($\sim 1.12\text{eV}$ contro $\sim 0.66\text{eV}$ del Ge) che però è favorito nel caso di esperimenti in cui si ricercano eventi rari data la sua efficienza.

Giunzione p-n

I semiconduttori drogati possono essere combinati in giunzioni p-n, Fig 3.1, che sono alla base di dispositivi come i diodi, i transistori e i pannelli fotovoltaici, i quali sfruttano le proprietà elettroniche uniche dei semiconduttori per controllare, amplificare o convertire l'energia elettrica e luminosa.

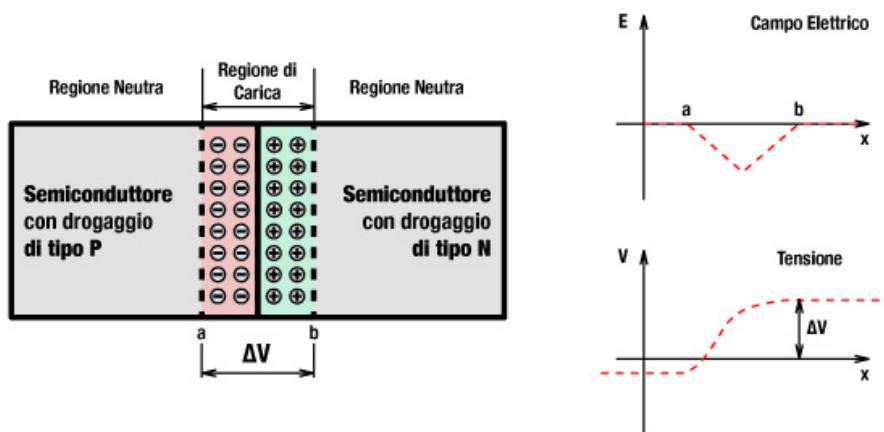


Figure 3.1: A sinistra abbiamo la giunzione p-n con la regione di carica al centro. Si può vedere nella sinistra della giunzione il semiconduttore di tipo p, drogato con atomi che creano lacune (portatori di carica positiva), mentre a destra vi è il semiconduttore di tipo n, drogato con atomi che forniscono elettroni in eccesso (portatori di carica negativa). A destra si evidenzia anche l'andamento del campo elettrico che si sviluppa nella regione di svuotamento, opposto alla corrente di diffusione, e il profilo della tensione attraverso la giunzione [10].

La giunzione p-n si basa sulla differenza nel tipo di droggaggio nelle due regioni a contatto che crea una distribuzione non uniforme delle densità di elettroni e lacune. Questa disomogeneità genera una **corrente di diffusione**: gli elettroni si spostano verso la regione p, mentre le lacune migrano verso la regione n. Durante il movimento, alcune coppie elettrone-lacuna si ricombinano, dando origine a una regione centrale priva di portatori di

carica liberi, chiamata **regione di svuotamento**. Le densità di carica residue ai bordi che non si annullano generano un campo elettrico interno che si oppone alla corrente appena generata.

La giunzione p-n è di particolare interesse per la rivelazione del passaggio di particelle cariche; infatti queste, tramite ionizzazione, rilasciano nel materiale energia, il cui valore medio può essere calcolato tramite la funzione di Bethe-Bloch:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_e r_e^2 m_e c^2 \frac{z^2}{\beta^2} \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right) \quad (3.1)$$

con:

- N_e densità elettronica per unità di volume;
- r_e e m_e rispettivamente raggio classico e massa dell'elettrone;
- z carica della particella incidente;
- β rapporto tra velocità della particella e quella della luce nel vuoto;
- γ fattore di Lorentz ($= 1/\sqrt{1 - \beta^2}$);
- I potenziale di ionizzazione della struttura atomica del bersaglio, in questo caso del silicio;
- $\delta(\gamma)$ correzione di densità che limita la crescita logaritmica delle perdite di energia nel limite di velocità prossime a quella della luce.

Sostituendo i parametri noti del semiconduttore, l'equazione 3.1 può essere ridotta a una forma che dipende direttamente dalla massa, dalla carica e dalla velocità della particella incidente. L'energia ceduta dalla particella al semiconduttore genera coppie elettrone-lacuna. Il processo avviene in quanto l'energia depositata dalla particella eccita gli elettroni dalla banda di valenza alla banda di conduzione, creando una lacuna nella banda di valenza e un elettrone libero nella banda di conduzione. Nel silicio, ad esempio, è necessaria un'energia di circa 3.6 eV per generare una coppia. Il numero di coppie generate è quindi direttamente proporzionale all'energia persa dalla particella incidente nel semiconduttore.

Una volta generate, le coppie elettrone-lacuna vengono separate dal campo elettrico, applicato mediante un potenziale esterno, essenziale per il funzionamento del rivelatore, presente nella regione di svuotamento della giunzione p-n. Gli elettroni vengono accelerati verso la regione di tipo n, mentre le lacune si spostano verso la regione di tipo p. Questo movimento dei portatori di carica genera una corrente elettrica, descritta utilizzando la legge di Shockley-Ramo, che può essere rilevata e analizzata per ottenere informazioni sulla particella incidente. Secondo questa legge, la corrente indotta i_m è data da

$$i_m = -qvE_w \quad (3.2)$$

dove q è la carica del portatore, v è la sua velocità nel campo elettrico, ed E_w è il peso del campo elettrico, una funzione definita dalla geometria del dispositivo e dalla distribuzione del campo elettrico nella regione di svuotamento. Va sottolineato che, benché la corrente indotta istantanea i_m dipenda da v ed E_w , la carica totale raccolta, ossia l'integrale

della corrente, è proporzionale unicamente all'energia depositata dalla particella incidente. Questo aspetto implica che la risposta del rivelatore è indipendente dalle specifiche traiettorie o velocità dei portatori, a condizione che tutta l'energia depositata venga convertita in coppie elettrone-lacuna e che i portatori raggiungano gli elettrodi di raccolta. La corrente di Shockley-Ramo è particolarmente utile per descrivere la risposta di un rivelatore a semiconduttore poiché considera il contributo di ogni portatore in movimento nel dispositivo, indipendentemente dal fatto che raggiunga effettivamente l'elettrodo di raccolta. Questo è cruciale nella progettazione e nell'interpretazione del segnale dei rivelatori, specialmente quando si lavora con particelle che rilasciano energia in profondità o con geometrie complesse. Questo processo rende le giunzioni p-n strumenti altamente sensibili per la rivelazione e l'analisi di particelle cariche poiché in grado di sfruttare sia le proprietà fisiche del semiconduttore sia i principi della fisica delle interazioni tra particelle e materia.

Tracciatori a semiconduttore

All'interno del rivelatore vi sono solitamente più piani progettati per tracciare la traiettoria delle particelle. Ogni piano è composto da uno o più layer di sensori, ognuno dei quali è responsabile della misura di una specifica coordinata (x o y). Per ottenere una misura completa delle due coordinate, è comune impiegare una coppia di layer per piano, uno dedicato a x e l'altro a y. In alcuni casi, i sensori sui layer vengono collegati tramite un'architettura nota come "daisy-chain" (in italiano, spesso tradotto come "in cascata"). In questa configurazione, le strip corrispondenti di sensori adiacenti sono interconnesse tramite wire-bonding, creando un'unica struttura denominata "ladder", Fig 3.4. Un ladder rappresenta l'insieme di più sensori concatenati in modo da formare un dispositivo equivalente a un sensore di maggiori dimensioni. Ad esempio, sensori di 7 cm x 4 cm possono essere collegati in serie per formare un ladder lungo 40 cm. Questo approccio consente di superare le limitazioni tecnologiche nella produzione di wafer di grandi dimensioni, mantenendo al tempo stesso un'elevata precisione e affidabilità. Un ladder è quindi connesso a un'elettronica di lettura unica, che raccoglie i segnali generati dai vari sensori. Tale organizzazione permette di ridurre la complessità e migliorare l'efficienza del sistema di lettura, mantenendo una risoluzione spaziale elevata. Inoltre, in alcuni rivelatori come AMS-02, si adottano soluzioni avanzate come i sensori a doppia faccia, in cui entrambe le coordinate possono essere misurate da un singolo layer grazie alla giunzione p-n per y e alle strip segmentate sul retro per x. Questa configurazione permette una progettazione modulare del rivelatore, adattabile a diverse esigenze sperimentali.

Ad esempio nei rivelatori a semiconduttore come quello in figura 3.2, si possono trovare un *bulk* drogato n, alcune *strip* di tipo p su una faccia del bulk e un backplane n⁺. Se al posto del backplane vi fossero altre strip di tipo n, ortogonali alle prime, si parlerebbe di sensore double-side, in grado di misurare la coordinata di passaggio, con pochi micrometri di risoluzione spaziale, a due dimensioni. In genere le strip, tramite un processo di droggaggio pesante, raggiungono una concentrazione di atomi droganti significativamente maggiore rispetto al resto del sensore, da qui l'appellativo di p⁺/p⁺⁺ o n⁺/n⁺⁺. Questo rende le strip molto conduttrive, in modo che possano effettivamente comportarsi come veri e propri elettrodi in grado di raccogliere cariche generate nel substrato. Un'elevata densità di atomi droganti infatti riduce la resistività delle strip, aumentando l'efficienza di raccolta delle cariche e consente inoltre di minimizzare le perdite di segnale dovute alla resistenza

intrinseca del materiale. Al bulk, drogato con concentrazioni molto più basse, viene applicato un campo elettrico in polarizzazione inversa in modo da svuotarlo completamente per evitare che le nuove cariche generate si ricombinino con quelle già presenti. Gli elettroni si muoveranno verso l'anodo (regione di tipo n), mentre le lacune si spostano verso il catodo (regione di tipo p).

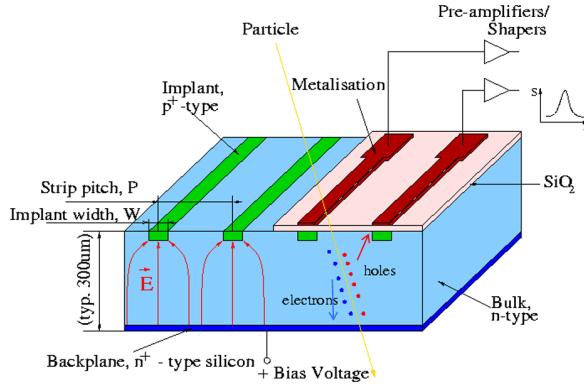


Figure 3.2: Struttura rivelatore a semiconduttore con passaggio di particella carica[6]

La distanza tra le strip è chiamata *implant pitch* ed è fissa a contrario del *readout pitch*, una misura che definisce la distanza tra i canali elettronici di lettura, ossia i punti in cui il segnale generato dalle cariche nel sensore viene rilevato e processato, che può essere anche aumentato. Questo è possibile perché non tutte le strip devono necessariamente essere collegate direttamente a un canale elettronico di lettura; alcune strip infatti possono rimanere scollegate, sfruttando fenomeni come il charge sharing e il capacitive coupling. Il fenomeno del *charge sharing* si verifica quando una particella ionizzante attraversa il sensore con un angolo sufficientemente elevato tale da generare cariche per una strip per parte dell'attraversamento e per una strip adiacente per il resto del percorso all'interno del sensore. Questo fenomeno è parzialmente aumentato dalla diffusione delle cariche e della geometria del campo elettrico. Il capacitance coupling invece, sempre presente fra strip adiacenti, permette di utilizzare strip intermedie scollegate dai canali elettronici di lettura che comunque raccolgono il segnale di ionizzazione e lo trasferiscono, capacitivamente, alle adiacenti e quindi all'elettronica di lettura.

La risoluzione spaziale è, conseguentemente, migliorata calcolando il baricentro del segnale totale, poiché la distribuzione di carica tra le strip adiacenti consente di interpolare con maggiore precisione la posizione di attraversamento della particella. Il baricentro, *cog*, può essere descritto come :

$$cog = \frac{Q_l x_l + Q_r (x_l + 1)}{Q}$$

dove Q_l e Q_r sono rispettivamente le cariche raccolte dai canali di lettura sinistro e destro, mentre x_l è la posizione del canale sinistro. Quando la carica è condivisa tra due strip adiacenti, m e $m + 1$, la frazione di carica α raccolta dalla strip $m + 1$ può essere espressa come:

$$\alpha(x) = \frac{Q_{m+1}}{Q_m + Q_{m+1}}.$$

Questo consente di ottenere un *cog* espresso come:

$$cog = x_m + p \cdot \alpha(x),$$

con p pitch e x_m posizione della strip m .

In una configurazione come quella del rivelatore AMS, l'implant pitch è di $27,5 \mu\text{m}$, mentre il readout pitch è di $110 \mu\text{m}$; questo significa che tre strip intermedie separano due strip lette. La carica Q è rilasciata su una strip intermedia e, tramite la capacità interstrip C_i , viene distribuita alle strip vicine come $Q/2$ e così iterativamente ad ogni successiva strip floating. Una volta arrivati ad una strip di readout, dato che la capacità C_c dell'elettronica è molto più grande della C_i , quasi nessuna carica viene trasmessa all'ulteriore strip vicina; il segnale totale ricevuto dall'elettronica corrisponderà quindi a Q . E' importante notare che anche le strip intermedie sono polarizzate, altrimenti la ripartizione della carica capacitiva sarebbe inefficiente. Nel caso di AMS ad esempio si hanno 3 strip intermedie, Fig 3.3, quindi il capacitance coupling della centrale con la strip di lettura più vicina è $C_l = C_r \sim C_i/2$, mentre le strip 2 e 4 hanno $C_l \sim C_i$ e $C_r \sim C_i/3$. Quindi in condizioni analoghe di lettura si può, tramite interpolazione, localizzare con precisione il passaggio della particella carica.

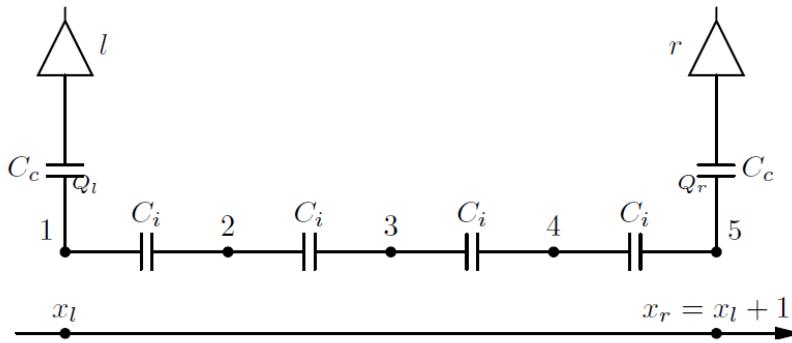


Figure 3.3: Configurazione con 3 strip intermedie

Anche in questo caso è possibile calcolare il *cog* come:

$$cog = \frac{Q_l x_l + Q_r x_r}{Q_l + Q_r} = \frac{Q_l x_l + Q_r (x_l + 1)}{Q}.$$

Questi fenomeni permettono di ridurre il numero di canali elettronici richiesti, mantenendo una buona risoluzione spaziale del sensore e una raccolta efficiente delle cariche. Il processo di ionizzazione descritto sopra avviene quando la particella attraversa il bulk e il segnale generato dalle cariche è raccolto dall'elettronica di lettura che lo amplifica e digitalizza.

Tracker di AMS-02

Dopo aver analizzato i principi dei semiconduttori e dei rivelatori al silicio, verrà ora esaminato il tracciatore di AMS-02, un apparato che sfrutta proprio queste tecnologie per la rivelazione di particelle nello spazio. Questo esperimento, già discusso nel relativo capitolo 2, riveste una notevole importanza scientifica per la sua capacità di misurare con precisione la composizione dei raggi cosmici, grazie alla sua sofisticata struttura basata su strati di silicio. Il tracciatore di AMS-02 si pone l'obiettivo di ricostruire la traiettoria della particella deflessa dal campo magnetico per ricavarne la rigidità magnetica ($R = \frac{p}{q} = B\rho$,

dove p è la quantità di moto, q è la carica della particella, B è il campo magnetico e $\rho = \frac{m\beta\gamma}{qB}$ è il raggio di curvatura). Il tracciatore è costituito da nove strati ortogonali all'asse del volume cilindrico che contiene il campo magnetico sopra cui sono distribuiti 192 moduli, detti "ladders", Fig 3.4, che coprono una superficie attiva di $6 m^2$ e sono costruiti con materiali leggeri e resistenti, come il film di Upilex e la schiuma Airex così da minimizzarne il peso complessivo e riducendo al minimo l'impatto dei materiali sul rilevamento delle particelle. Ogni ladder include rivelatori al silicio (per un totale di 2264 rivelatori), un router per trasportare i segnali delle strip all'elettronica di lettura, e un rinforzo meccanico. L'elettronica di lettura è posizionata su due circuiti stampati alle estremità del ladder, per minimizzare il materiale presente all'interno del volume del rivelatore.

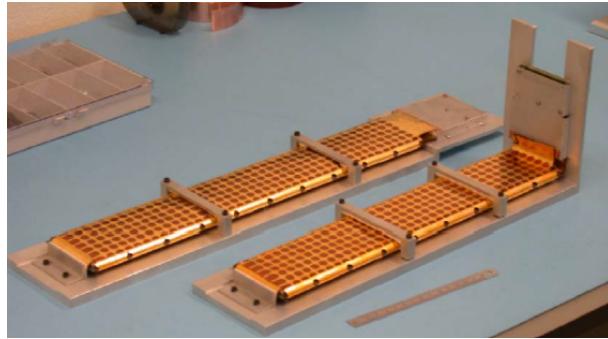


Figure 3.4: Due ladder di AMS-02 prima di essere montati sul piano di supporto [12]

Ogni rivelatore al silicio ha dimensioni di $7 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 300 \mu\text{m}$ e presenta impianti su entrambe le facce, disposti ortogonalmente tra loro. Come già descritto, il passaggio di una particella carica attraverso il silicio genera coppie elettrone-lacuna. Sotto l'influenza del campo elettrico, queste cariche si muovono verso le strip, dove il segnale viene raccolto e amplificato dall'elettronica di lettura. Grazie alla griglia formata dalle strip, è possibile ricostruire il punto di attraversamento della particella mediante una media pesata delle cariche raccolte. Inoltre, la quantità di carica raccolta permette di determinare la Z della particella incidente, permettendo così di ricavarne il raggio di curvatura e la rigidità. Il sistema è inoltre dotato di un sistema di raffreddamento a CO_2 per garantire la stabilità termica e di un sistema laser che monitora eventuali deformazioni meccaniche per preservare la precisione delle misurazioni rilevando spostamenti con una precisione inferiore ai $5 \mu\text{m}$.

Calorimetri

L'altro dispositivo fondamentale per la rivelazione di particelle è il calorimetro, progettato principalmente per misurare l'energia di una particella incidente. Quando una particella penetra nel calorimetro, interagisce con il materiale in esso contenuto, producendo uno sciame di particelle secondarie. Questo sciame viene assorbito dal dispositivo, generando un segnale proporzionale all'energia depositata. Oltre alla misura dell'energia, i calorimetri offrono un ulteriore metodo per identificare le particelle: la forma e la struttura dello sciame prodotto, un cui esempio si può vedere nella figura 3.5, dipendono dalla natura della particella incidente, fornendo informazioni distintive sulla sua identità. I calorimetri

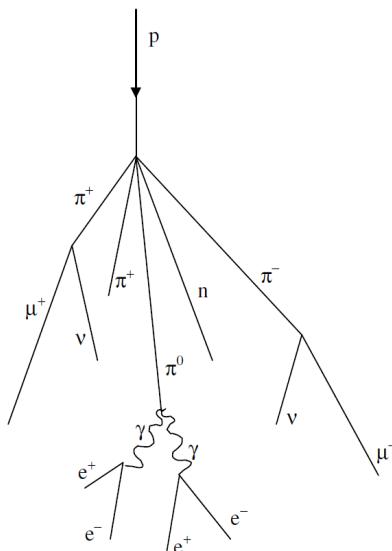


Figure 3.5: Sciame di particelle

possono essere classificati in base alla loro struttura:

- **calorimetri a sampling**: composti da uno o più strati alternati di materiali attivi, capaci di trasformare l'energia depositata in segnali elettrici, e materiali densi, progettati per indurre la produzione di sciami. Questo tipo di calorimetro è ampiamente utilizzato in esperimenti come AMS-02;
- **calorimetri omogenei**: realizzati interamente in materiali scintillatori, densi e trasparenti, che assorbono completamente l'energia depositata. Esempi includono i calorimetri utilizzati in esperimenti come Fermi LAT e DAMPE.

I calorimetri possono essere distinti anche in base al tipo di particelle che sono ottimizzati per misurare:

- **calorimetri elettromagnetici**: specializzati nella misura dell'energia di particelle come fotoni ed elettroni, che interagiscono principalmente attraverso processi elettromagnetici, come la produzione di coppie e la Bremsstrahlung;
- **calorimetri adronici**: progettati per rilevare l'energia di adroni (come protoni, neutroni e pioni) che interagiscono tramite l'interazione forte, producendo sciami più complessi ed estesi rispetto a quelli elettromagnetici.

In molti esperimenti, i calorimetri sono posizionati subito dopo il tracciatore a semiconduttore; questa configurazione consente infatti una precisa ricostruzione della traiettoria e dell'energia delle particelle, ma può anche generare effetti indesiderati come il backsplash, un fenomeno in cui particelle secondarie prodotte nel calorimetro rimbalzano indietro verso il tracciatore, interferendo con le misure dando luogo a hit ritardate. Non conoscendo gli istanti di arrivo delle particelle primarie è praticamente impossibile riconoscere questa dai suoi prodotti; inoltre, se sono le stesse strip a leggere il segnale della hit primaria e della carica rilasciata dai secondi, la risoluzione viene peggiorata poiché il baricentro di carica viene modificato.

Capitolo 4

LGAD: Low Gain Avalanche Diode

Introduzione e Caratteristiche

I Low Gain Avalanche Diode (LGAD) rappresentano un concetto avanzato di rivelatore al silicio, caratterizzato dall'integrazione di una geometria innovativa e dalla capacità di produrre una moltiplicazione interna della carica. Tali dispositivi sono stati sviluppati principalmente per applicazioni nel campo della fisica delle particelle e della rivelazione di fotoni, con l'obiettivo di offrire prestazioni superiori rispetto ai rivelatori al silicio tradizionali. Le caratteristiche distintive degli LGAD risiedono nel loro design strutturale e nella gestione ottimizzata del fenomeno di valanga, un processo fisico che avviene in dispositivi semiconduttori, quando una particella carica, attraversando una regione con un campo elettrico elevato, ionizza il materiale semiconduttore, generando una coppia di elettrone e lacuna. Gli elettroni liberati vengono accelerati dal campo elettrico e, a loro volta, ionizzano altri atomi, creando una cascata di portatori di carica. Questo processo di moltiplicazione della carica porta a un segnale amplificato, che può essere rilevato dal dispositivo. Negli LGAD, il fenomeno di valanga è controllato per garantire un guadagno relativamente basso, evitando la saturazione del segnale e permettendo una misura più precisa delle particelle incidenti. Il principio di funzionamento degli LGAD si ispira agli Avalanche Photodiodes (APD), che sono comunemente impiegati per la rivelazione di fotoni, sfruttando il fenomeno della moltiplicazione della carica. Tuttavia, mentre gli APD operano tipicamente a un guadagno elevato, gli LGAD sono progettati per funzionare in condizioni di basso guadagno. In questo contesto, il guadagno ridotto e la gestione controllata della valanga permettono a questi dispositivi di operare con un alto grado di linearità nelle misurazioni, mantenendo la risposta del dispositivo coerente con le proprietà fisiche delle particelle rivelate.

Un aspetto cruciale che definisce le prestazioni degli LGAD è il profilo di drogaggio, che è progettato in modo da controllare efficacemente la formazione della valanga. In un LGAD, la regione di moltiplicazione della carica è realizzata grazie al drogaggio graduale che consente di innescare la valanga solo a livelli di campo elettrico elevato ma controllato. L'applicazione principale degli LGAD è nel campo della fisica delle particelle, dove vengono utilizzati per la rivelazione di particelle cariche.

L'uso di questi dispositivi ha portato a miglioramenti significativi nelle performance dei rivelatori in contesti come i rivelatori di traccia, che sono progettati per tener conto della posizione e della traiettoria di particelle cariche. Il guadagno intrinseco del rivelatore, in-

oltre, permette la realizzazione di rivelatori molto più sottili, rispetto ai rivelatori al silicio standard, senza compromettere la qualità del segnale, e lo spessore ridotto è condizione necessaria per avere risoluzioni temporali di pochi picosecondi. Questo li rende ideali per applicazioni in rivelatori a tempo di volo (TOF) e rivelatori a tempo di propagazione (TOF-PET), dove è fondamentale la misurazione precisa del tempo di attraversamento delle particelle. Inoltre, l'uso di LGAD consente di ottenere spessori inferiori rispetto ai rivelatori standard pur mantenendo la stessa efficienza di rilevazione. Questo è un vantaggio importante per esperimenti ad alta risoluzione, dove è necessario un controllo maniacale del material budget.

Evoluzione Temporale

I primi Low Gain Avalanche Detectors si devono al CNM (Centro Nacional de Micro-electrónica) di Barcellona ed erano giunzioni, come quelle descritte nel capitolo 3, di tipo n-in-p con un guadagno mirato di ~ 10 .

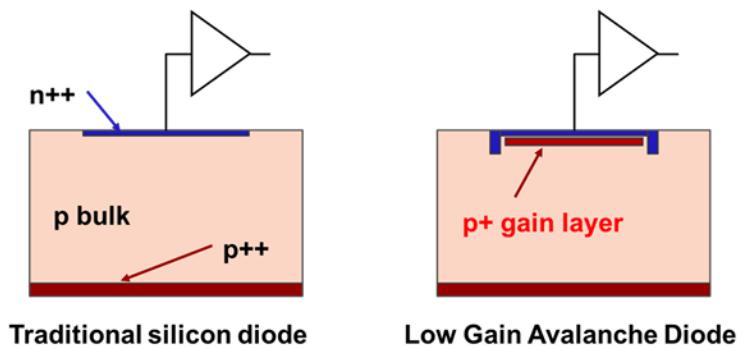


Figure 4.1: Schema di un diodo al silicio tradizionale (sinistra) e di un LGAD (destra). L'LGAD presenta un p⁺ gain layer sotto l'elettrodo n⁺⁺, che crea un campo elettrico elevato nella regione di guadagno, consentendo la moltiplicazione controllata delle cariche tramite ionizzazione a valanga. Questo migliora la sensibilità e la risoluzione temporale rispetto ai diodi tradizionali.

Come si può vedere dalla figura 4.1, inizialmente gli LGAD erano semplicemente costituiti da:

- un catodo n⁺⁺;
- un layer di guadagno p⁺;
- un bulk di tipo p;
- un anodo p⁺⁺.

La diffusione dello strato p⁺ al di sotto dello strato n⁺⁺ crea una giunzione al centro degli elettrodi. In condizioni di polarizzazione inversa, questa giunzione genera una regione localizzata caratterizzata da un elevato campo elettrico, che può causare la moltiplicazione degli elettroni che raggiungono l'elettrodo n⁺⁺. Lo scopo dello strato p⁺ è quindi quello di aumentare il valore del campo elettrico in questa regione. Il profilo di droggaggio dello strato rappresenta un parametro tecnologico cruciale per regolare il guadagno. Per garantire una moltiplicazione uniforme del segnale indipendentemente dal punto in cui

la carica viene raccolta, è necessario assicurare un guadagno omogeneo su tutta l'area utile alla rivelazione; di conseguenza, la distribuzione del campo elettrico deve essere progettata in modo da avvicinarsi il più possibile a quella tipica di una giunzione planare. Per questo motivo sono di particolare interesse la giunzione di moltiplicazione che garantisce un'equa distribuzione del campo elettrico, evitando picchi di campo che potrebbero causare breakdown prematuri e la regione periferica degli LGAD poiché, benché meno efficiente in termini di rilevamento, è cruciale per garantire stabilità, uniformità del campo elettrico e riduzione delle correnti di leakage indesiderate.

Giunzione Moltiplicativa

La giunzione moltiplicativa è formata tramite un impianto iniziale di Boro seguito da un trattamento termico ad alta temperatura e un impianto successivo di Fosforo o Arsenico ad alta dose con un trattamento termico a bassa temperatura. Questo processo porta alla formazione di una diffusione p-well profonda con una concentrazione di picco intorno a 10^{16} cm^{-3} e una diffusione superficiale n⁺ poco profonda, creando una struttura p⁺/π/p/n⁺. Il profilo di drogaggio risultante consente, sotto condizioni di polarizzazione inversa, che il campo elettrico alla giunzione n⁺-p aumenti fino a un valore sufficientemente alto da attivare il meccanismo di ionizzazione per impatto, causando la moltiplicazione della carica. Tuttavia, lo stesso meccanismo può portare all'innescio di valanghe che eventualmente causano il breakdown della giunzione. L'aumento del campo elettrico è particolarmente critico ai bordi della giunzione n⁺-p, dove la curvatura cilindrica della giunzione, conseguenza del processo di fabbricazione planare, amplifica il campo elettrico locale. Questo comportamento è mostrato in simulazioni che evidenziano il profilo del campo elettrico e il potenziale elettrostatico ai bordi della giunzione per una tensione inversa tipica di 400 V, come si può vedere nella figura 4.2. La concentrazione del potenziale elettrostatico alla curvatura della giunzione porta a un aumento locale del campo elettrico.

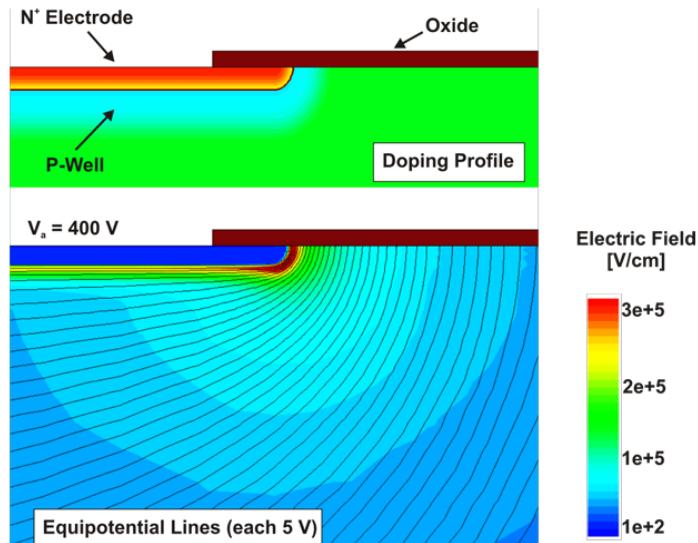


Figure 4.2: Profilo di una simulazione di dopaggio (sopra) e relativo campo elettrico con linee equipotenziali (sotto) nei bordi di una giunzione moltiplicativa di un LGAD ad una tensione di -400V [18]

Per mitigare questi effetti e ottimizzare la terminazione del bordo della giunzione, sono

state analizzate tre strategie principali:

- guard ring flottante (Fig 4.3): Questa soluzione prevede un anello n⁺ posizionato a una certa distanza dal bordo della giunzione, con una larghezza tipica di 30 μm . L'anello distribuisce il campo elettrico su un'area più ampia, riducendo il sovraccarico alla curvatura della giunzione principale. Tuttavia, il campo elettrico al bordo dell'anello risulta inferiore rispetto a quello della giunzione principale, rendendo questa soluzione non ottimale per design segmentati.
- Estensione dell'elettrodo n⁺ (Fig 4.4): La diffusione n⁺ viene estesa oltre i limiti della maschera p-well, sovrapponendosi alla curvatura originale della giunzione. Questa configurazione riduce la curvatura della giunzione e migliora la distribuzione del campo elettrico. Tuttavia, il picco del campo elettrico al bordo dell'estensione N+ può ancora portare a breakdown prematuri.
- Diffusione n profonda (Fig 4.5): Una diffusione n profonda è aggiunta al bordo della regione di moltiplicazione, collegata all'elettrodo n⁺. Questa tecnica richiede una maschera addizionale e un dosaggio accurato per permettere una distribuzione uniforme del campo elettrico.

Nell'ultima configurazione descritta, la terminazione del bordo è ottenuta estendendo l'elettrodo n⁺ più dello strato di moltiplicazione. Questa conformazione, però, presenta un picco nell'intensità del campo elettrico ai bordi, visibile alla figura 4.2, probabilmente causato da una disomogeneità nella distribuzione del guadagno. Questo effetto può essere minimizzato tramite un'estensione dei margini della giunzione (JTE, Junction Termination Extension, Fig 4.5) aggiungendo due zone come protezioni laterali con una concentrazione più bassa di tipo n, più spesse dell'elettrodo n⁺⁺. Questa configurazione garantisce che il massimo valore di ionizzazione per impatto rimanga confinato nella regione planare della giunzione, migliorando così l'affidabilità del dispositivo.

Regione Periferica

Per quanto riguarda la regione periferica, oltre a prevenire il contatto del bordo del chip con la regione di deplezione, riduce significativamente i rischi di correnti di leakage sia superficiali che nel bulk che potrebbero compromettere il rapporto segnale-rumore. L'ottimizzazione di questa regione deve quindi tener conto di diversi aspetti, tra cui la gestione della deplezione laterale: la regione periferica deve essere sufficientemente ampia per evitare che la regione di deplezione raggiunga i bordi del chip, che sono spesso danneggiati dal processo di taglio e contengono un'elevata densità di difetti strutturali. Una regola pratica è dimensionare la periferia in modo che sia almeno due volte lo spessore del substrato (ad esempio >600 μm per substrati LGAD di 300 μm). Un altro aspetto importante è la mitigazione delle cariche ossidiche positive: lo strato di ossido di campo (SiO_2) utilizzato per la passivazione contiene spesso cariche fisse positive che inducono un'inversione superficiale nei substrati p a basso drogaggio. Questa inversione crea un canale n che collega elettricamente gli elettrodi n⁺ e può generare correnti parassite. Per contrastare questo fenomeno, si possono utilizzare:

- diffusione p-spray: un'implantazione superficiale leggera di Boro crea uno strato p poco drogato che impedisce la formazione del canale n;

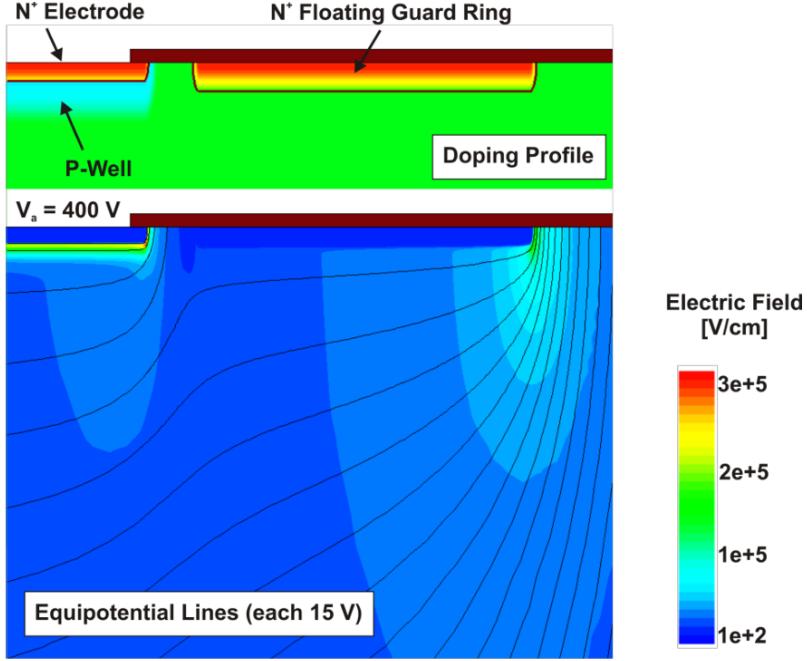


Figure 4.3: Profilo di una simulazione di dopaggio (sopra) e relativo campo elettrico con linee equipotenziali (sotto) nei bordi di una giunzione moltiplicativa di un LGAD ad una tensione di -400V quando è implementato un guard ring flottante di tipo n [18].

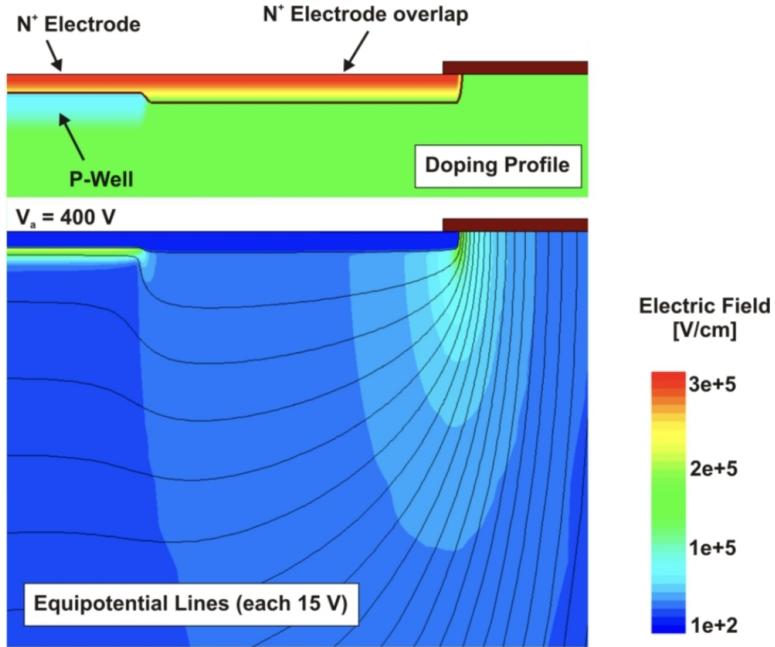


Figure 4.4: Profilo di una simulazione di dopaggio (sopra) e relativo campo elettrico con linee equipotenziali (sotto) nei bordi di una giunzione moltiplicativa di un LGAD ad una tensione di -400V quando è implementata un'estensione dell'elettrodo n⁺ [18].

- diffusion p-stop: una diffusione più profonda e localizzata di Boro è implementata per isolare elettricamente le strutture n⁺;
- anello di raccolta: l'introduzione di un elettrodo n⁺ nella periferia, denominato

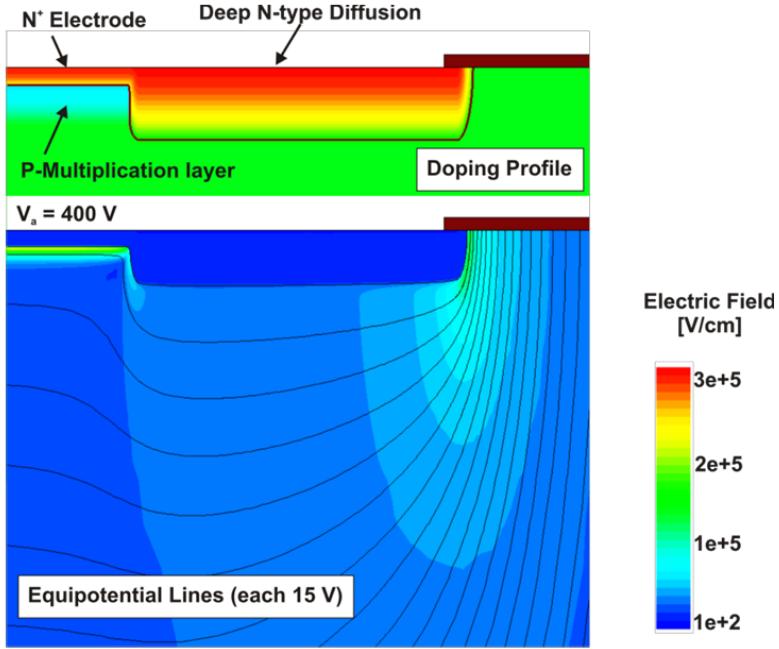


Figure 4.5: Profilo di una simulazione di dopaggio (sopra) e relativo campo elettrico con linee equipotenziali (sotto) nei bordi di una giunzione moltiplicativa di un LGAD a una tensione di -400V quando implementata una diffusione n profonda [18].

anello di raccolta, consente di raccogliere separatamente le correnti di leakage superficiali e bulk generate nella periferia. Questo elettrodo è collegato a un potenziale definito ma non al circuito di lettura, preservando così l'efficienza della regione attiva centrale;

- protezione contro i fenomeni di inversione: soluzioni combinate, come l'uso di materiali dielettrici con cariche ridotte o negative sopra la periferia, possono ulteriormente ridurre gli effetti negativi delle cariche ossidiche senza richiedere processi aggiuntivi di drogaggio.

Uno schema completo può essere visto nella figura 4.6.

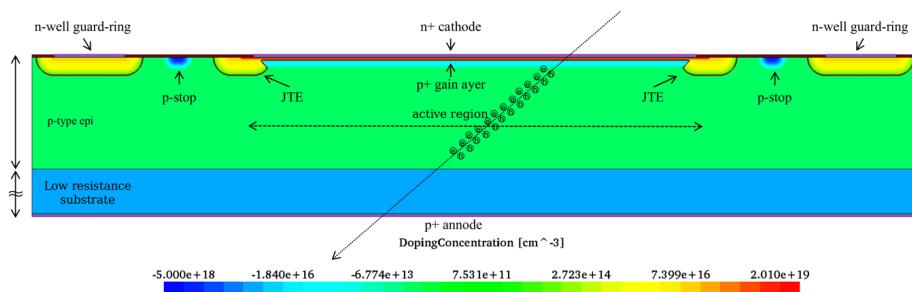


Figure 4.6: Schema con visione laterale e concentrazione di un LGAD completo di JTE, p-stop e guard-ring.

UFSD: Ultra Fast Silicon Diode

Il design degli LGAD è estremamente utile per migliorare il segnale nei sensori al silicio poiché può essere utilizzato in qualsiasi geometria, migliorando il rapporto segnale-rumore del sistema. Nonostante quanto descritto sopra, questo non basta a raggiungere le performance temporali richieste; oltre alla stabilità del campo elettrico, ci sono altre caratteristiche fondamentali che devono essere integrate negli LGAD per migliorare le prestazioni. Tra queste, una risposta al segnale estremamente rapida, ottenibile rendendo il sensore molto sottile, e un campo elettrico sufficientemente elevato da garantire che gli elettroni raggiungano la loro velocità di drift massima. Inoltre, il dispositivo deve essere in grado di sopportare alti valori di tensione e avere un buon rapporto tra l'area attiva e quella totale del sensore. Per soddisfare queste esigenze, sono stati introdotti gli UFSD (Ultra-Fast Silicon Detectors), una versione ottimizzata degli LGAD progettata specificamente per applicazioni temporali.

Formazione del Segnale e Rumore

Per comprendere le caratteristiche del segnale negli UFSD è utile ricordare il teorema di Shockley-Ramo (Eq 3.2) che calcola la corrente generata in uno spessore d , che è proporzionale alla densità di carica e alla velocità di deriva dei portatori. Negli UFSD, il guadagno introdotto dalla regione LGAD amplifica il segnale iniziale, migliorando il rapporto segnale-rumore e facilitando la rilevazione precisa del tempo di arrivo delle particelle. Come succede nei PIN gli elettroni e le lacune migrano rispettivamente verso gli elettrodi n^{++} e p^{++} ; entrando nel layer moltiplicativo danno il via all'effetto valanga producendo altre coppie. La moltiplicazione avviene vicino al catodo, quindi gli elettroni secondari vengono subito raccolti, mentre le lacune riempiono tutto lo spessore del bulk prima di venir accumulate all'anodo, generando poi il segnale. Negli UFSD, il campo elettrico è costante nel bulk (ovvero nella parte principale del sensore); quando le lacune generate nella regione di guadagno (gain holes) attraversano il bulk verso l'anodo, esse inducono una corrente. Questa corrente è significativa perché il movimento delle lacune è relativamente lento e dura per tutto il tempo che impiegano a raggiungere l'anodo. Per questo motivo, il contributo delle lacune di guadagno costituisce la parte maggiore della corrente totale. Tramite l'equazione 3.2 si può ottenere la corrente indotta dalle cariche secondarie:

$$dI_{gain} = qv_{sat} \frac{1}{d} dN_{gain} \propto \frac{G}{d} dt \Rightarrow \frac{dI_{gain}}{dt} \sim \frac{dV}{dt} \propto \frac{G}{d} \quad (4.1)$$

Questo dimostra che lo slew-rate del segnale, dI/dt è proporzionale al rapporto tra guadagno e spessore e che quindi, a parità di guadagno, è preferibile avere un dispositivo più fino per avere una velocità di risposta migliore, vantaggioso per misure che richiedono grande precisione temporale.

Nonostante queste migliorie è impossibile isolare completamente le sorgenti di rumore che influenzano le prestazioni degli LGAD. Tra queste troviamo il rumore termico causato dalle fluttuazioni casuali del moto elettronico nei conduttori, il rumore di corrente di perdita che deriva dalla corrente di fuga nel sensore, accentuata da difetti materiali e radiazioni e il rumore di carico associato alla capacità del sensore e al circuito di lettura. Il primo, anche chiamato rumore di Johnson-Nyquist, è causato dal moto termico degli elettroni nei conduttori e si manifesta come una fluttuazione casuale nella corrente o nella tensione. È strettamente correlato alla temperatura e alla resistenza del sistema e, per

una data larghezza di banda, il valore efficace V_{rms} può essere calcolato come:

$$V_{rms} = \sqrt{4k_B T R \Delta f} \quad (4.2)$$

dove:

- k_B è la costante di Boltzmann;
- T è la temperatura assoluta;
- R è la resistenza del sistema;
- Δf è la banda di frequenza.

Da questa sorgente di rumore può anche essere modellizzata una corrente di rumore dividendo semplicemente per la resistenza, il cui valore quadratico medio sarà:

$$i_{rms} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R}} \quad (4.3)$$

Un altro rumore importante è quello di flicker ($1/f$), anche detto rumore rosa; dominante nel caso di basse frequenze, tipicamente nei dispositivi elettronici a semiconduttore è causato da un insieme di fenomeni di intrappolamento e rilascio dei portatori di carica dovuti a imperfezioni strutturali e interazioni lente tra cariche. Una modellizzazione possibile è fatta tramite distribuzioni lorentziane con una costante caratteristica τ che descrive il tempo di intrappolamento, restituendo una distribuzione spettrale del tipo:

$$S_{trap}(\omega) = \frac{A}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (4.4)$$

con A fattore di proporzionalità che definisce l'entità del rumore in relazione alla frequenza. Vi è poi il rumore di shot, anche detto di Schottky, dovuto alle fluttuazioni casuali della corrente che circola nel conduttore, alla natura discreta della carica delle particelle e associato alla generazione statistica di coppie elettrone-lacuna e alla loro raccolta. Questo può essere descritto come:

$$I_{rms} = \sqrt{2qI\Delta f} \quad (4.5)$$

dove q è la carica dell'elettrone e I è la corrente media. L'ottimizzazione del design degli UFSD si concentra sulla minimizzazione di questi contributi per migliorare la risoluzione temporale complessiva.

Oltre ai contributi di rumore precedentemente descritti, anche il preamplificatore introduce un'ulteriore componente di rumore. Questo contributo è espresso in termini di Equivalent Noise Charge (ENC) ed è dato dalla relazione:

$$ENC_{preamp} = \frac{1}{\sqrt{t_p}}(K_1 + K_2 \cdot C_t) \quad (4.6)$$

con t_p che è il tempo di shaping del preamplificatore, ovvero il tempo caratteristico con cui il segnale viene filtrato ed elaborato dal circuito di lettura, C_t è la capacità totale in ingresso del canale, mentre K_1 e K_2 sono due costanti caratteristiche del preamplificatore. Poiché il contributo di rumore dipende direttamente dalla capacità totale d'ingresso C_t risulta fondamentale mantenerlo sotto controllo; un aumento della capacità comporta infatti un incremento del rumore, influenzando negativamente le prestazioni complessive del rivelatore; viceversa, diminuendo la capacità diminuirà anche il rumore.

Risoluzione temporale

Una misura temporale accurata può avvenire solo se i sensori e l'elettronica di lettura hanno caratteristiche compatibili. Da una parte si trova il sensore che deve fornire un segnale che varia al variare dell'energia senza essere distorto, dall'altra vi è l'elettronica che deve identificare un punto del segnale con la minima incertezza possibile. Nella seguente figura 4.7 si trova uno schema tipico di un "time-tagging detector".

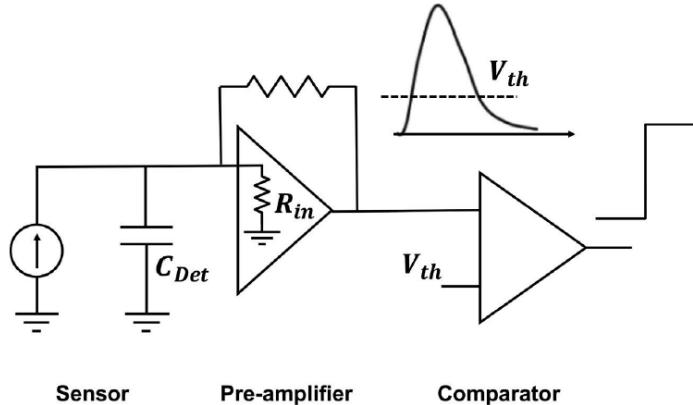


Figure 4.7: Schema di un rivelatore time-tagging. Il tempo di arrivo di una particella è misurato quando il segnale supera la soglia V_{th} del comparatore.

L'accuratezza temporale è determinata da diversi fattori principali:

$$\sigma_t^2 = \sigma_{jitter}^2 + \sigma_{ionizzazione}^2 + \sigma_{distorsione}^2 + \sigma_{TDC}^2 \quad (4.7)$$

Questi termini diventano influenti quando il segnale supera il V_{th} , voltaggio di threshold. Ogni rumore è causato da:

- jitter: fluttuazioni nella misura del tempo dovute al rumore elettronico;
- ionizzazione: variazioni statistiche nel processo di generazione di carica primaria;
- distorsione del segnale: alterazioni del segnale durante il trasporto e la lettura;
- TDC: incertezza derivante dal fatto che il TDC, avendo un numero finito di bin, discretizza il segnale.

L'influenza del primo, σ_{jitter} , dovuto al sensore, al pre-amplificatore o al threshold, anticipa o posticipa di poco il tempo misurato. Questo effetto è direttamente proporzionale al rumore N e può essere descritto come:

$$\sigma_{jitter} = \frac{N}{dV/dt} \sim \frac{t_r}{S/N} \quad (4.8)$$

Per minimizzare il jitter c'è bisogno di equilibrare due aspetti: il rumore deve essere più basso possibile, ma allo stesso tempo lo slew-rate deve comunque essere abbastanza alto. E' quindi necessario trovare un buon compromesso per la larghezza di banda dell'elettronica.

Per quanto riguarda la ionizzazione, questa è strettamente collegata con il processo di

creazione elettrone-lacuna, capitolo 3. La densità di coppia varia da evento a evento, producendo due effetti principali: rumore di Landau, dovuto alle irregolarità nella forma del segnale che rappresenta il limite fisico di quanto possa essere uniforme il segnale del sensore e il cambiamento nell'ampiezza del segnale, time walk, termine che nasce dal fatto che un segnale più largo raggiunge prima il V_{th} rispetto a un termine piccolo. Il $\sigma_{ionizzazione}$ non può essere del tutto rimosso in un sistema che usa un V_{th} fissato, ma può comunque essere corretto tramite circuiti appropriati. Anche la distorsione del segnale può essere minimizzata utilizzando una geometria più possibile vicina a quella di un sensore piano, così da avere un campo elettrico e una velocità di drift controllata, come descritto nel paragrafo 4.

Il σ_{TDC} registra il tempo di attivazione del discriminatore in un intervallo di tempo di larghezza finita, ΔT , dato dal LSB (Least Significant Byte); questo processo contribuisce aggiungendo un'incertezza sul tempo pari a $\Delta T/\sqrt{12}$. Dato il binnaggio stretto dei TDCs usati solitamente negli esperimenti delle alte energie, il σ_{TDC} può essere trascurato.

Anche l'elettronica di lettura associata a un UFSD deve garantire una risposta temporale estremamente rapida, coerente con le prestazioni del rivelatore stesso. La velocità di elaborazione dei segnali è fondamentale per misurare con precisione i tempi di volo delle particelle, soprattutto in ambienti in cui gli eventi sono estremamente vicini nel tempo. Questo si ottiene attraverso circuiti di pre-amplificazione a bassa latenza e componenti di elaborazione ottimizzati per ridurre il rumore elettronico, massimizzando il rapporto segnale-rumore. Una delle principali sfide nell'elettronica è gestire l'ampia gamma dinamica dei segnali generati; gli impulsi di carica, prodotti dall'interazione delle particelle con il rivelatore, devono essere rilevati con precisione anche quando variano significativamente in ampiezza. C'è bisogno quindi di convertitori analogico-digitali (ADC) ad alta risoluzione e un'elaborazione del segnale che possa estrarre informazioni temporali senza degradarne la qualità.

Un altro aspetto cruciale è la capacità di filtrare ed elaborare i segnali in tempo reale. Gli UFSD operano spesso in contesti sperimentali complessi, dove i segnali utili devono essere distinti dai rumori di fondo trattati prima. L'elettronica deve quindi integrare algoritmi avanzati per la ricostruzione e il filtraggio dei segnali, preservando la precisione temporale e spaziale del rivelatore. L'integrazione con sistemi esterni è altrettanto importante: i circuiti di lettura devono essere progettati per sincronizzarsi con altri dispositivi, come i clock, e per gestire grandi volumi di dati prodotti durante l'acquisizione. Questo richiede una connettività veloce e flessibile, oltre a memorie locali efficienti per gestire i dati temporaneamente prima della trasmissione. In sintesi, l'elettronica di lettura di un UFSD è essenziale per sfruttare le capacità di risoluzione temporale di questi rivelatori. Deve combinare velocità, sensibilità e capacità di elaborazione avanzata, il tutto garantendo affidabilità e sincronizzazione in contesti ad alte prestazioni. La sua progettazione è il risultato di un equilibrio delicato tra precisione, rapidità e robustezza operativa.

Capitolo 5

Risultati Sperimentali

In questo capitolo saranno descritti i risultati sperimentali ottenuti nella camera pulita degli INFN di Perugia, nell’ambito del progetto PRIN (Progetto di Rilevante Interesse Nazionale) Pentadimensional Tracking Space Detector, PTSD. L’obiettivo principale del PRIN, è quello di adattare una tecnologia innovativa, quella dei Low Gain Avalanche Detectors (LGAD), dispositivi semiconduttori ampiamente discussi nel capitolo 4, che sta per essere utilizzata in molti esperimenti di fisica delle particelle agli acceleratori, in particolare negli upgrade di Phase 2 degli esperimenti al Large Hadron Collider, all’ambiente spaziale. La caratteristica di questi rivelatori è quella di combinare risoluzioni spaziali di pochi micrometri con risoluzioni temporali di pochi picosecondi. Se questi rivelatori sono oramai da considerare come stato dell’arte per quanto riguarda gli esperimenti di fisica delle particelle agli acceleratori, per esperimenti spaziali necessitano di potenze elettriche superiori alle limitazioni poste dall’ambiente spaziale stesso. Una misura temporale con risoluzioni “spinte”, di per sé, già richiede potenze elettriche notevolmente maggiori della sola misura spaziale. Se a questo uniamo il fatto che, per tenere sotto controllo le capacità elettriche dei dispositivi e quindi il rumore elettronico, è necessario limitare le dimensioni dei rivelatori e quindi aumentare il numero degli stessi (e di conseguenza il numero totale di canali di lettura) per coprire grandi aree di rivelazione, si vede immediatamente come l’utilizzo in ambienti spaziali sia particolarmente sfidante.

Come detto in precedenza, la tecnologia degli LGAD, ed in particolare degli UFSD, consente misurazioni simultanee e precise di tempo e posizione grazie all’uso di sensori segmentati, abilitando per la prima volta il tracciamento in quattro dimensioni (4D) delle particelle cariche. Un aspetto distintivo degli LGAD è la possibilità di ridurre lo spessore del sensore mantenendo prestazioni comparabili in termini di resa del segnale.

Il progetto propone lo sviluppo di un prototipo di rivelatore basato su LGAD a microstrip per applicazioni spaziali. Per verificarne la qualificazione spaziale, si prevede la progettazione, lo sviluppo e l’assemblaggio di un prototipo, oltre a test funzionali e di qualificazione presso infrastrutture nazionali. Questi processi porteranno il livello di maturità tecnologica (TRL) da 2 (formulazione del concetto tecnologico) a un minimo di 5 (modello in scala ridotta verificato per applicazioni spaziali). Il progetto sfrutta l’esperienza consolidata di INFN e ASI nella progettazione elettronica, simulazione di rivelatori, assemblaggio, campagne di test e gestione di missioni spaziali.

Come descritto nei Capp. 2 e 3, nei tracciatori al silicio per applicazioni spaziali tipicamente vengono utilizzati sensori a microstrip di silicio. Rispetto, ad esempio, ad un rivelatore a pixel il numero di canali di lettura (e quindi la potenza elettrica) è notevol-

mente inferiore¹. Inoltre le microstrip, come detto, offrono la possibilità del daisy-chain, cioè di leggere più sensori con la stessa elettronica e quindi è relativamente facile ridurre ulteriormente di un ordine di grandezza (facendo ladder lunghi 10 sensori) il numero totale di canali di lettura.

Il progetto PRIN si pone come obiettivo la realizzazione di particolari geometrie, accoppiando rivelatori “tradizionali” (microstrip o PIN nelle misure sperimentali effettuate e discusse in questo capitolo) con rivelatori di tipo LGAD per mantenere sotto controllo la capacità elettrica dei secondi, mantenendo però invariate le prestazioni temporali. Entrambi i rivelatori (ma principalmente la geometria di quello tradizionale² fornirebbero la misura spaziale con le prestazioni desiderate, l’LGAD fornirebbe la misura temporale e la microstrip fornirebbe la misura dell’energia di deposito e quindi, come detto della Z della particella incidente³. Questo, di fatto, renderebbe il dispositivo in grado di fornire una misura “5D”. Un’altra possibilità è quella di creare “pile” di rivelatori sottili, che però condividono l’elettronica di lettura e che quindi non incrementano la potenza elettronica necessaria, per la rilevazione di raggi gamma sub-GeV, sempre nello spazio.

Nell’ambito del lavoro di tesi qui presentato sono state effettuate misure di corrente-voltaggio e capacità-voltaggio di 7 singoli dispositivi, presenti nella Fig. 5.1, considerando sia la parte di gain (LGAD) sia quella no gain (PIN). Verranno inoltre analizzate le risposte

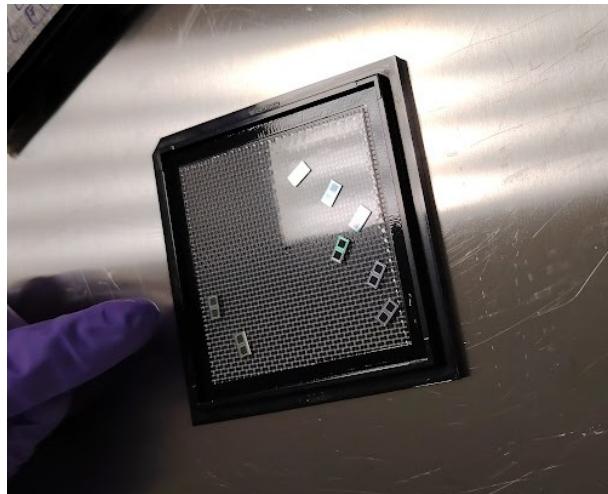


Figure 5.1: Dispositivi con coppie PIN-LGAD utilizzati durante il lavoro

di due dispositivi in serie, posizionati uno sopra l’altro, configurazione in cui la parte di gain del dispositivo inferiore è collegata al back completamente conduttivo dell’altro.

¹in un rivelatore a microstrip, il numero di canali di lettura scala (fattore 2 per avere una misura 2D) con la dimensione lineare (diviso il pitch), i.e. il lato, dei sensori, quindi \sim la radice quadrata dell’area totale: $N_{ch} \propto \sqrt{A}$. In un rivelatore a pixel, invece, con il quadrato della dimensione lineare, quindi proprio con l’area: $N_{ch} \propto A$. Nel caso di aree di diversi m^2 , sono necessari, per una microstrip, ordine di $10^5 - 10^6$ canali di lettura. Coprire la stessa area con dei pixel necessita di $10^{10} - 10^{12}$ canali di lettura.

²seppur gli LGAD a microstrip possono avere risoluzioni spaziali molto buone, l’ottimizzazione di quella temporale li rende leggermente meno performanti di una microstrip tradizionale nella misura spaziale

³seppure il segnale di un LGAD è equivalente o addirittura maggiore di quello di un dispositivo tradizionale, la risoluzione in carica scala con il numero di portatori di carica generati dalla ionizzazione e con le fluttuazioni statistiche di questi. Le fluttuazioni, relativamente maggiori per un dispositivo più sottile, vengono amplificate dalla stato di guadagno e quindi il rapporto fra segnale e “rumore” (dovuto alla fluttuazioni) rimane il medesimo.

La caratterizzazione eseguita per ogni dispositivo viene effettuata tramite misure di corrente-voltaggio e capacità-voltaggio in assenza di altre particelle esterne. Il setup consiste in una probe station semiautomatica, la MPI TS2000, un generatore di corrente e tensione, Keithley 237 e 238 Source-Measure Units (SMU), e un software sviluppato dagli INFN di Perugia per analizzare i dati.

Prima di effettuare le misure, gli 8 dispositivi inizialmente disponibili sono stati osservati tramite un microscopio per controllare eventuali difetti visibili (Fig 5.2), evidenziando immediatamente che il sample 2 risultava graffiato e inutilizzabile. Per effettuare le mis-

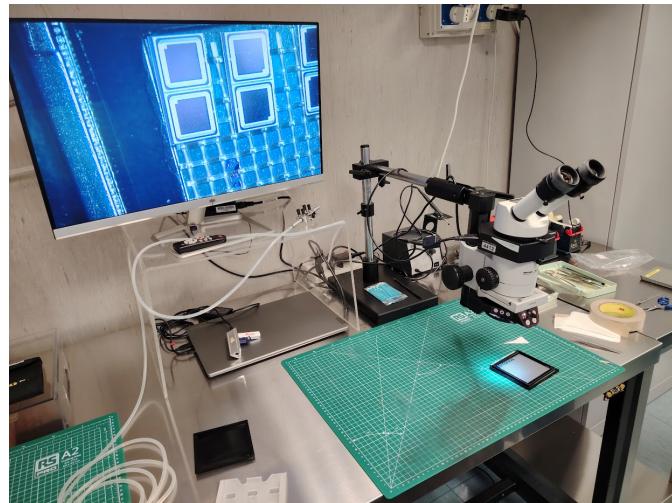


Figure 5.2: Osservazione dei dispositivi tramite microscopio



Figure 5.3: Strumenti utilizzati nella CR di Perugia



Figure 5.4: Probe Station utilizzata

ure, i dispositivi vengono inseriti uno ad uno nella probe station, posizionati sul chuck, un supporto fatto in acciaio nichelato dotato di 4 fori per l'aspirazione e visualizzati tramite

un microscopio ottico e una telecamera. Il chuck fornisce al back del dispositivo un dato voltaggio, mentre gli aghi in tungsteno possono essere posizionati sul front del dispositivo e avere un voltaggio controllato dato dal programma utilizzato dal computer del laboratorio. La parte di gain e quella di no gain risultano facilmente identificabili grazie alla scritta presente sul dispositivo (Fig. 5.6).

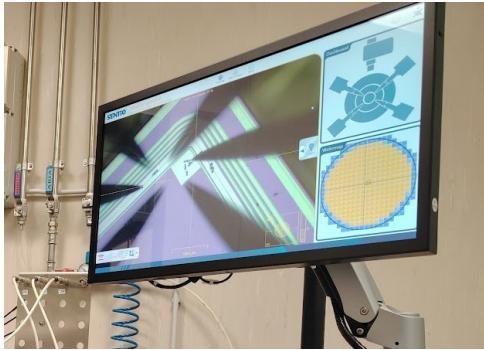


Figure 5.5: Posizionamento dei due aghi utilizzati durante la misurazione. L'ago a sinistra è posizionato sul guard-ring e collegato a terra, mentre l'altro è utilizzato per la misura.



Figure 5.6: Parte gain del dispositivo. In questa immagine vi è il sample 2, chiaramente rovinato, che non è stato usato per le misurazioni.

5.1 Misure I-V

Lo scopo della misura è analizzare la risposta di corrente del PIN e del LGAD quando questi vengono sottoposti a un bias negativo. Per l'esperimento, si utilizzano due aghi della stazione di probing: uno collegato al guard-ring e messo a terra, e l'altro a contatto con la pad di bonding sulla faccia superiore del dispositivo, mentre il chuck è mantenuto a un alto voltaggio (50/70 V). Le curve caratteristiche ottenute per il LGAD e il PIN sono riportate nelle figure 5.7 e 5.8. La corrente misurata è quella di leakage, ovvero la corrente che fluisce nel dispositivo in assenza di stimoli esterni.

Per quanto riguarda il PIN, la curva caratteristica segue l'andamento previsto dalla legge di Shockley-Ramo, Eq. 3.2. In particolare, la corrente di leakage raggiunge un valore di plateau ($\sim 1\text{nA}$) che ci si aspetta rimanere costante fino al valore di breakdown, il quale però non è stato raggiunto nei test condotti. La curva del LGAD, invece, mostra un comportamento completamente diverso e raggiunge, per voltaggi alti, valori molto più alti ($\sim 200\text{nA}$): questo è dovuto allo strato di guadagno che amplifica anche la corrente di leakage; anche a basse tensioni, le due curve differiscono e, per l'LGAD si può vedere facilmente il processo di svuotamento dello strato di gain, che determina la presenza di un ginocchio intorno ai $\sim 22\text{V}$. Nei PIN, invece, lo svuotamento, dati i parametri costruttivi di questa particolare “partita” di dispositivi e dato lo spessore limitato del bulk⁴, avviene già a $\sim 1\text{-}2\text{ V}$.

⁴i dispositivi testati sono formati da una coppia di sensori di tipo pad, di cui uno è con gain, quindi LGAD, e l'altro è senza gain, quindi PIN. Sostanzialmente il processo produttivo è il medesimo, eccetto l'impianto del gain layer, e medesimi sono i parametri geometrici e quindi lo spessore, e quindi il confronto fra i due è uno strumento molto potente per la caratterizzazione del processo di impianto del gain layer stesso.

Le curve $I(V)$ sono ampiamente utilizzate per la caratterizzazione e il collaudo dei sensori, in quanto forniscono informazioni fondamentali sul tipo di dispositivo testato e permettono di identificare eventuali problemi di fabbricazione. Ad esempio, un confronto tra le curve può evidenziare comportamenti anomali, come quelli osservabili in sensori difettosi (es. *curva piatta* o *valori fuori specifica*).

Inoltre, le curve caratteristiche degli LGAD offrono indicazioni significative sul comportamento dello strato di guadagno. La tensione di svuotamento del gain layer è direttamente correlata alla forma della curva e alla crescita esponenziale della corrente di leakage, rappresentando un parametro cruciale per la comprensione delle proprietà del dispositivo.

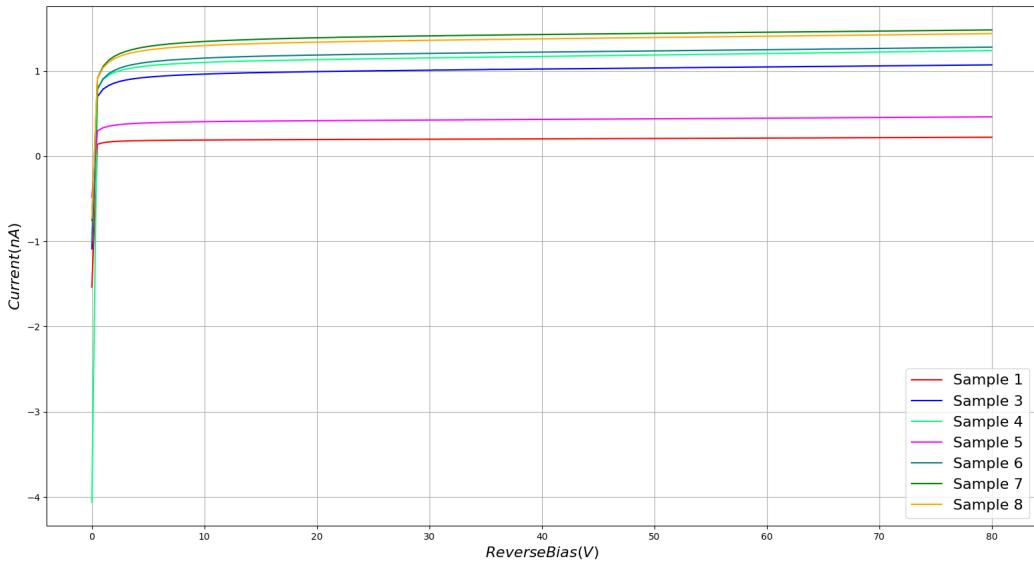


Figure 5.7: Grafico della caratterizzazione I-V di un PIN. L'asse X rappresenta la tensione inversa (Reverse Bias) in volt (V), mentre l'asse Y mostra la corrente in nanoampere (nA). L'errore su entrambi gli assi è nell'ordine dell'1%. Le curve corrispondono a diversi campioni (sample 1, 3, 4, 5, 6, 7, 8), evidenziando il comportamento tipico di un diodo in polarizzazione inversa: una corrente di leakage che inizialmente cresce rapidamente per poi stabilizzarsi a valori quasi costanti all'aumentare della tensione inversa. L'andamento risulta coerente con il comportamento atteso per un diodo PIN, con una corrente di saturazione ben definita.

5.2 Misure C-V

Anche lo studio della capacità dei dispositivi in funzione della tensione di polarizzazione viene utilizzato per la caratterizzazione dei dispositivi; queste misure forniscono informazioni importanti sulla struttura interna, come il doping, la larghezza della regione di svuotamento e le caratteristiche dello strato di guadagno (nel caso degli LGAD).

Durante le misurazioni, il dispositivo viene considerato come un condensatore a due terminali: un elettrodo superiore (che è il PIN o il LGAD) e un elettrodo inferiore (il chuck messo a terra). Per effettuare la misura, si utilizza un LCR meter o un analizzatore di impedenza, strumenti che applicano un segnale AC di bassa ampiezza, tipicamente dell'ordine di qualche decina o centinaia di millivolt, sovrapposto al bias DC, variabile. Il bias applicato è negativo per polarizzare il dispositivo in modo inverso, il che porta all'espansione della regione di svuotamento all'interno del semiconduttore. L'aumento del

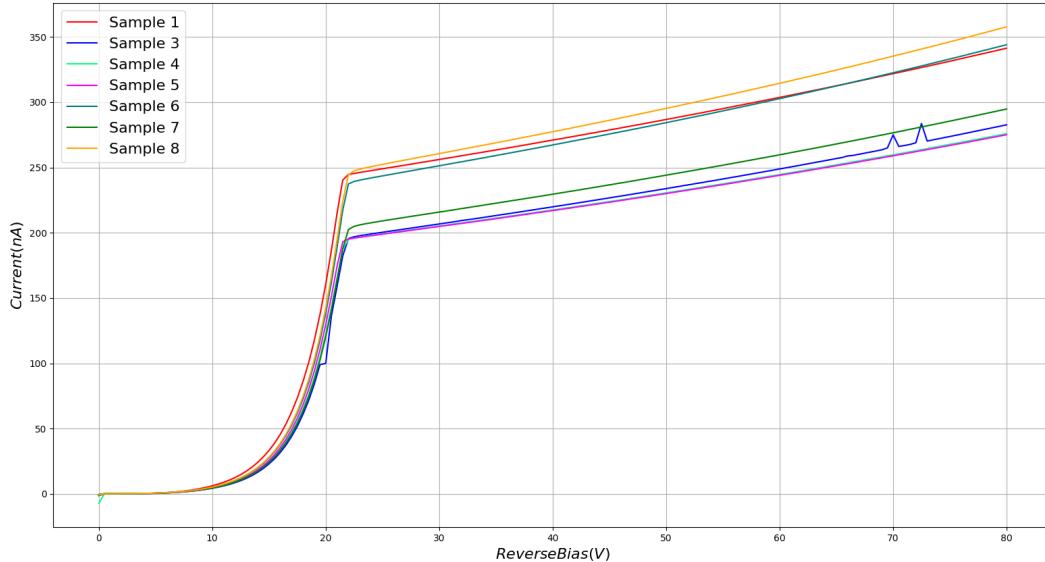


Figure 5.8: Grafico della caratterizzazione I-V di un LGAD (Low Gain Avalanche Diode), che mostra l'andamento della corrente di perdita (leakage current) in funzione della tensione inversa applicata. L'errore su entrambi gli assi è nell'ordine dell'1%. La curva evidenzia un aumento della corrente intorno ai 22V, corrispondente al completo svuotamento della regione moltiplicativa e all'inizio del guadagno a valanga. Dopo questa soglia, la corrente cresce linearmente con la tensione.

bias inverso modifica la capacità del dispositivo, che dipende inversamente dalla larghezza della regione di svuotamento. Nei diodi PIN, la curva $C - V$ presenta un andamento tipico: la capacità diminuisce con l'aumentare del bias, fino a raggiungere un valore minimo stabile. Questo valore corrisponde al completo svuotamento del dispositivo, definito dalla tensione di svuotamento. Negli LGAD, il comportamento è più complesso a causa della presenza dello strato di guadagno, caratterizzato da un profilo di droggaggio diverso (tendenzialmente con droggaggio maggiore, quindi più conduttivo e quindi con tensione necessaria per lo svuotamento significativamente più alta). A basse tensioni, la capacità è influenzata dallo svuotamento parziale dello strato di guadagno, il che si riflette in una curva $C - V$ non lineare. Superata una determinata soglia di tensione, la regione di svuotamento raggiunge lo strato di guadagno, generando un cambiamento nella pendenza della curva, che permette di identificare la tensione di svuotamento del gain layer. Oltre questa soglia, il comportamento del dispositivo si avvicina a quello di un PIN completamente svuotato. La misura della capacità è di fondamentale importanza per la caratterizzazione dei sensori. Essa permette di ottenere informazioni dettagliate sul profilo di droggaggio del dispositivo tramite l'analisi della derivata della curva $C^{-2} - V$, oltre a fornire indicazioni sulla qualità della fabbricazione. Eventuali anomalie, come variazioni impreviste nella capacità o comportamenti fuori specifica, possono rivelare difetti nel processo produttivo o problemi strutturali del dispositivo.

Grazie a questi dati è stato infatti possibile calcolare lo spessore della parte di gain del dispositivo. La capacità ci sia aspetta che sia, approssimando il dispositivo ad un condensatore a facce piane:

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

dove:

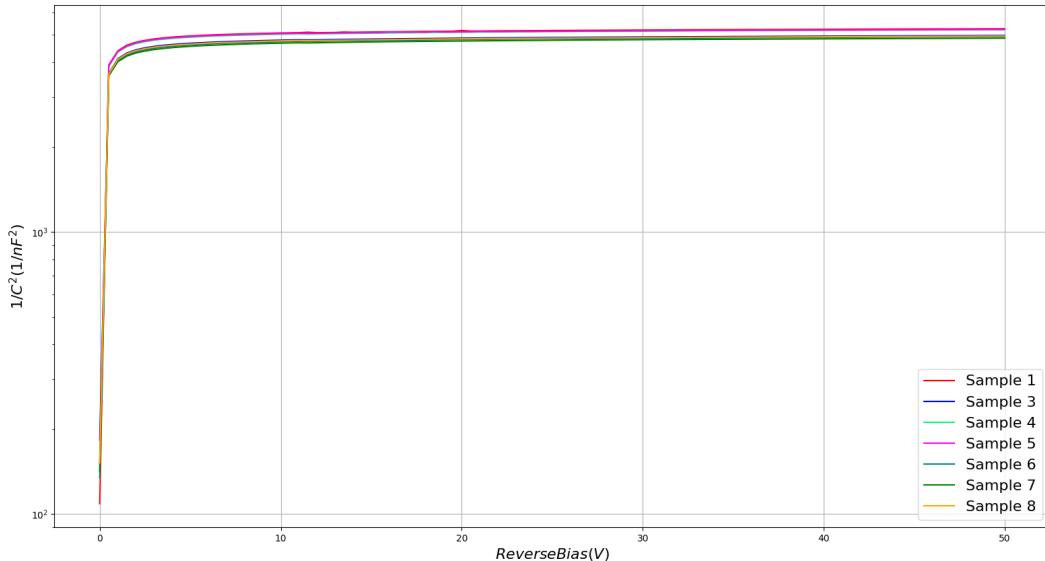


Figure 5.9: Grafico della caratterizzazione C-V di un PIN standard, che mostra l’andamento di $1/C^2$ in funzione della tensione inversa applicata. L’errore su entrambi gli assi è nell’ordine dell’1%. La curva evidenzia una progressiva diminuzione della capacità con l’aumento della tensione, fino a raggiungere una saturazione. Questo comportamento riflette l’espansione della regione di svuotamento all’interno del semiconduttore, con una transizione graduale, caratteristica di una normale giunzione p-n.

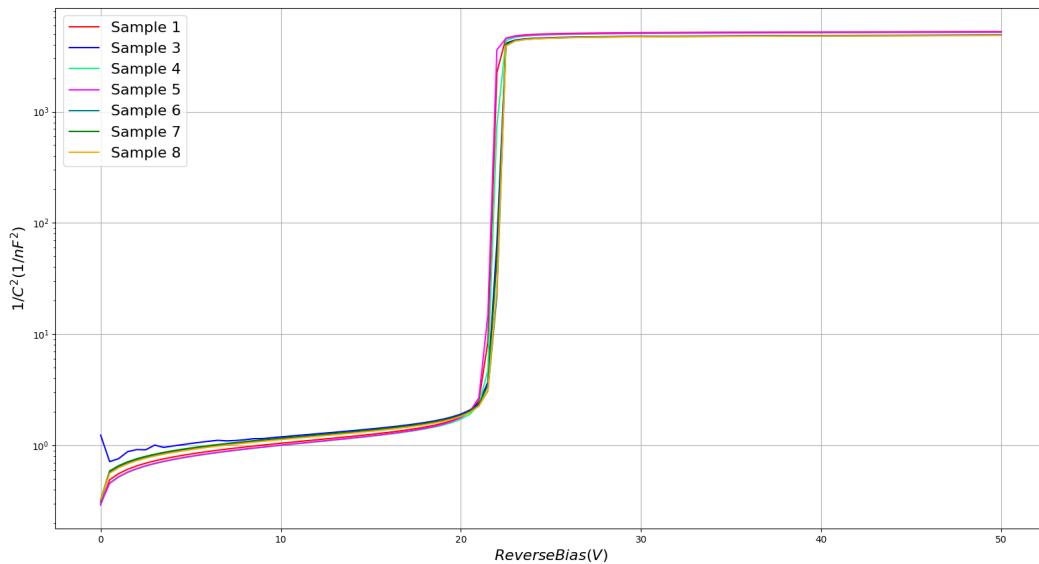


Figure 5.10: Grafico della caratterizzazione C-V di un LGAD (Low Gain Avalanche Diode), che mostra l’andamento di $1/C^2$ in funzione della tensione inversa. La curva evidenzia tre regioni distintive: una variazione graduale a bassa tensione, una transizione intorno ai 15-20V e un aumento oltre $\sim 22V$, corrispondente al completo svuotamento della regione moltiplicativa. Questo comportamento è caratteristico degli LGAD, dove il gain layer introduce un’elevata moltiplicazione di carica prima di essere interamente svuotato, determinando la soglia operativa del dispositivo. L’asse y utilizza una scala logaritmica per evidenziare variazioni nelle caratteristiche di capacità. L’errore su entrambi gli assi è nell’ordine dell’1%.

- ϵ_r per il Si è 11.7;
- $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$

- A è l'area del dispositivo, pari a $6,25 \text{ mm}^2$.

Da qui si ricava uno spessore d pari a $45 \mu\text{m}$, in accordo con quanto aspettato.

5.3 Dispositivo Finale

Dopo aver completato le misurazioni iniziali, sono stati selezionati due dispositivi, il sample 3 e il sample 5, entrambi di spessore pari a $637 \mu\text{m}$ ⁵, per condurre misure preliminari e analizzare la risposta della loro combinazione. Lo scopo di questo esperimento è quello di ridurre la capacità, che come già detto precedentemente è strettamente collegata al rumore, ponendo i due dispositivi in serie la capacità totale del dispositivo finale dovrebbe quindi essere:

$$C_{tot} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)^{-1} \quad (5.1)$$

ovvero la metà di quella di un singolo dispositivo.



Figure 5.11: Misura spessore sample 5

In particolare, il sample 5 è stato posizionato nella parte inferiore e stabilizzato su una superficie piana mediante l'uso di un nastro adesivo specifico che aveva anche lo scopo di prevenire la diffusione di colla sul guard-ring circostante che poteva cortocircuitare l'intero dispositivo. Successivamente gli è stato affiancato un layer spesso $600\mu\text{m}$ per avere un maggiore appoggio e sulla superficie dell'LGAD del sample 5 è stata applicata una colla conduttriva, che ha permesso di fissare il back del sample 3. Una volta asciugata la colla, sono state effettuate le misurazioni di I-V e C-V descritte precedentemente, che hanno effettivamente mostrato una diminuzione della capacità. Più nello specifico, la capacità misurata del LGAD del sample 3 era pari a 14.32pF mentre quella del 5 era 13.87pF , quindi tramite la 5.1 ci si aspettava una capacità totale pari a 7.05pF . Sperimentalmente si è ottenuta una capacità pari a 8.35pF , mentre quando viene misurata la capacità del PIN superiore la capacità sembra invariata e risulta essere pari a 13.94pF .

Il primo risultato è in linea con quanto ci si aspettava anche se, anche considerando le

⁵per motivi principalmente di robustezza meccanica, nonostante lo spessore del dispositivo vero e proprio possa essere, sia realmente e debba anche essere, per ottenere le prestazioni desiderate in termini di risoluzione temporale, molto sottile ($200 \mu\text{m}$, vedi Sez.5.2), il back viene fatto molto più spesso: essendo un impianto conduttore, questo non altera le proprietà elettroniche del dispositivo.



Figure 5.12: Colla utilizzata per incollare i dispositivi.

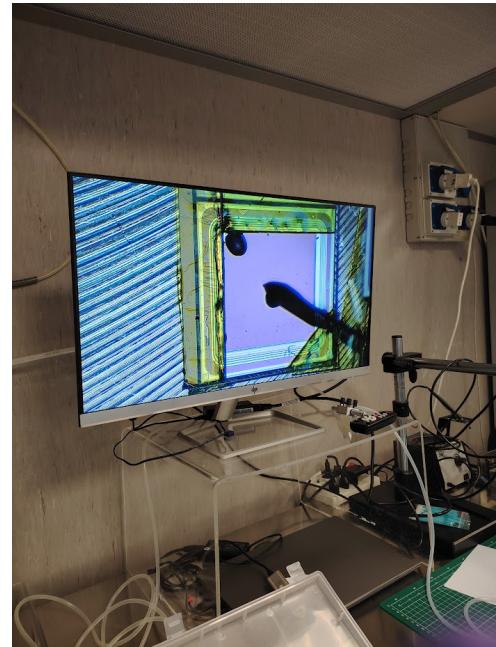


Figure 5.13: Posizionamento colla su sample 5.

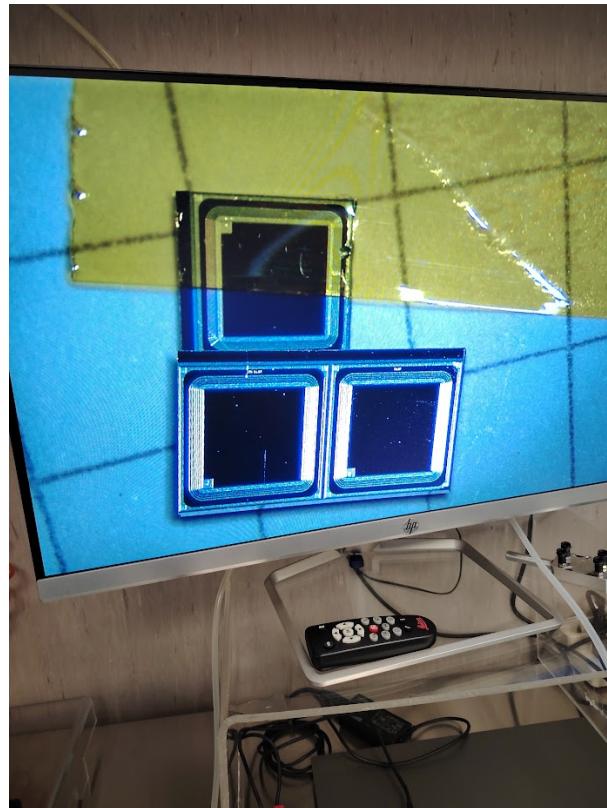


Figure 5.14: Dispositivo finale

incertezze sperimentali, il valore ottenuto mostra una capacità almeno il 10% più alta di quanto aspettato. L'effetto della sovrapposizione dei due dispositivi e quindi del rad-doppio dello spessore totale del dispositivo complessivo, è comunque evidente.

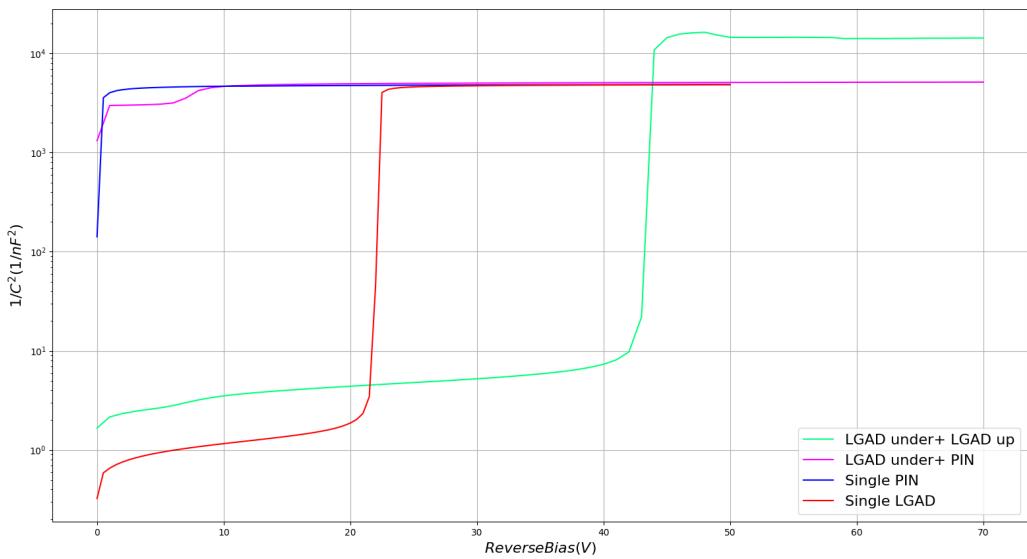


Figure 5.15: Il grafico mostra l'andamento dell'inverso del quadrato della capacità in tutte le configurazioni studiate.

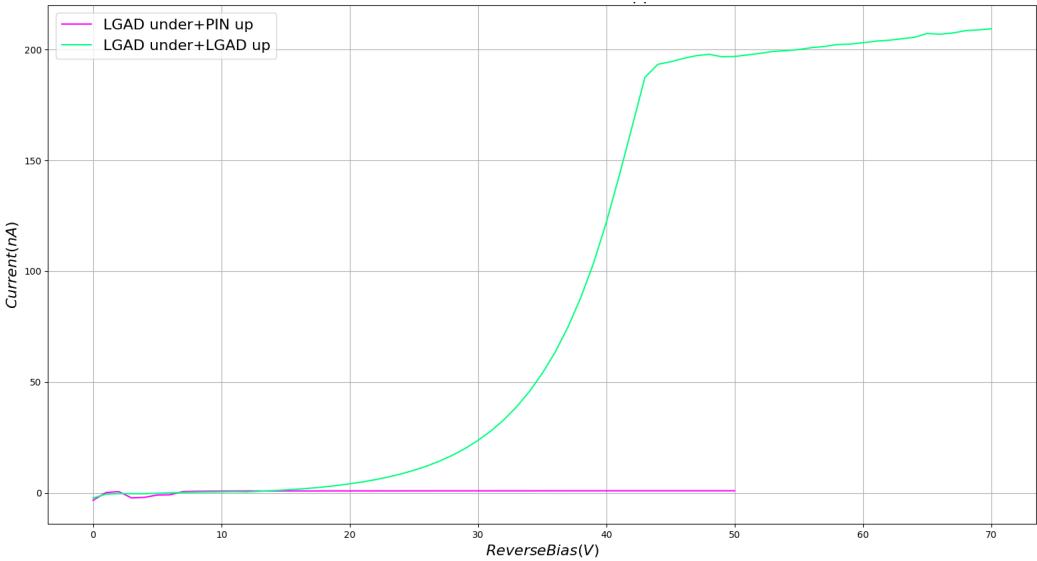


Figure 5.16: Il grafico mostra l'andamento della corrente di entrambe le parti del dispositivo posto sopra.

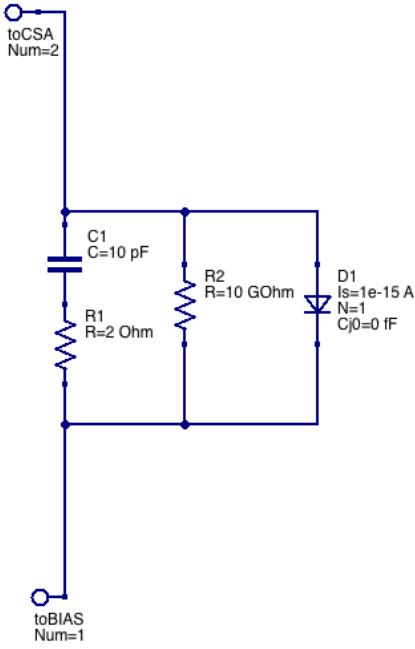


Figure 5.17: Schematizzazione di un dispositivo al silicio (la schematizzazione è sostanzialmente valida, tranne che per il guadagno del segnale in entrata, anche per un LGAD). Il dispositivo è idealizzato come un diodo (ideale, i.e. con corrente di leakage bassissima e capacità parassita nulla), in parallelo con una resistenza in grado di limitare la corrente, quando il diodo è contro-polarizzato e non conduce, al valore osservato di quella di leakage e un condensatore, del valore osservato per la capacità, una volta svuotato completamente.

Il secondo risultato invece è inaspettato: il dispositivo complessivo si comporta sostanzialmente come il solo PIN, sia in termini di corrente che di capacità e questo è strano. Se la corrente misurata avesse avuto un valore o completamente fuori dai valori tipici o addirittura nullo avremmo immediatamente dedotto come evidentemente deve esserci stato un problema nella misura. Invece, come discusso dopo, il valore di corrente sembra assolutamente quello aspettato.

Verranno eseguiti ulteriori test con lo scopo di approfondire questi risultati e soprattutto le discrepanze osservate fra quanto misurato e quanto osservato.

Per quanto riguarda, invece, le misure di corrente, Fig. 5.16, si hanno in entrambi i casi gli andamenti previsti.

La combinazione di due LGAD restituisce l'andamento della corrente di leakage di un singolo LGAD, mentre nel caso di PIN e LGAD, che hanno due correnti di leakage differenti, sarà la corrente nel PIN a determinare la corrente complessiva. Questo è completamente aspettato: infatti possiamo idealizzare i dispositivi, Fig. 5.17, come un diodo ideale in parallelo con una resistenza (per regolare il leakage) e un condensatore per simulare la capacità del dispositivo svuotato. Dati i voltaggi in gioco (ai capi del dispositivo) e la resistenza (ideale), la corrente (di leakage) che può circolare nel dispositivo è limitata: in una serie fra due dispositivi, la corrente sarà sempre determinata dal dispositivo che, preso singolarmente, mostra la corrente di leakage minore.

In conclusione le misure di corrente sono pienamente in linea con quanto aspettato e sembrerebbero dimostrare la bontà delle misure e quindi rendere il risultato osservato per la serie LGAD-PIN ancora più strano.

Capitolo 6

Conclusioni

Lo studio dei raggi cosmici continua a rappresentare un ambito di ricerca di grande rilevanza per la fisica delle astroparticelle, essendo strettamente legato alla comprensione dei processi ad alta energia che avvengono nell'universo. La radiazione cosmica, costituita principalmente da protoni, nuclei più pesanti e particelle secondarie generate dalle interazioni con l'atmosfera terrestre, offre una finestra privilegiata per esplorare fenomeni astrofisici estremi, come le esplosioni di supernovae, i buchi neri e le sorgenti di raggi gamma. In questo lavoro, è stato analizzato il contesto storico e scientifico della radiazione cosmica, ripercorrendo le tappe fondamentali della sua scoperta e le principali teorie sviluppate per spiegare la sua origine e propagazione. Sono stati descritti in dettaglio la composizione, lo spettro energetico e le principali tecniche di rivelazione, evidenziando i progressi tecnologici che hanno permesso di ottenere misurazioni sempre più precise e affidabili. Particolare attenzione è stata dedicata agli esperimenti spaziali più significativi, AMS-02, DAMPE, HELIX e HERD, i quali hanno fornito o forniranno nell'immediato futuro dati cruciali per la caratterizzazione della radiazione cosmica ad alta energia. L'analisi di questi esperimenti ha permesso di comprendere meglio le sfide connesse alla rilevazione in ambiente spaziale e di identificare le soluzioni tecnologiche adottate per migliorare le capacità osservative.

Un aspetto cruciale affrontato in questo lavoro è stato l'approfondimento delle tecnologie di rivelazione basate su semiconduttori, con un focus particolare sui rivelatori al silicio e i calorimetri. Questi dispositivi, fondamentali per la rivelazione e l'analisi delle particelle cosmiche, hanno visto un'evoluzione significativa grazie allo sviluppo di nuove architetture e materiali innovativi. In particolare, l'attenzione è stata rivolta agli LGAD (Low Gain Avalanche Detectors), dispositivi innovativi caratterizzati dalla presenza di una giunzione moltiplicativa che ne migliora le prestazioni in termini di risoluzione temporale. Gli LGAD rappresentano una soluzione promettente per applicazioni spaziali grazie alla loro capacità di aggiungere una misura temporale con ottima risoluzione (pochi picosecondi) alle già ottime prestazioni in termini di risoluzione spaziale (pochi micrometri).

Il focus sugli UFSD (Ultra-Fast Silicon Detectors) ha evidenziato le potenzialità di questi rivelatori per applicazioni in missioni spaziali, dove la precisione e l'efficienza della rivelazione risultano determinanti per il successo degli esperimenti. L'implementazione di questi dispositivi consente di migliorare la risoluzione temporale delle misurazioni e di ridurre significativamente gli effetti del rumore elettronico, due fattori chiave per

l’ottimizzazione delle osservazioni di eventi ad alta energia.

In particolare, in questo lavoro di tesi, si è effettuata una prima verifica sperimentale della possibilità di diminuire la capacità elettrica di dispositivi LGAD, potenzialmente senza alterarne le prestazioni temporali, accoppiando un rivelatore di tipo LGAD, in serie, con un rivelatore “tradizionale” (PIN per questo lavoro di tesi, ma un generico rivelatore al silicio in generale). In prospettiva, ulteriori studi saranno necessari per spiegare alcuni dei comportamenti non ancora chiari e per misurarne la risoluzione temporale andando a confermare l’ipotesi che queste non siano degradate dall’accoppiamento necessario per la riduzione della capacità.

Bisognerà inoltre ottimizzare le prestazioni di questi dispositivi in ambienti ostili, affrontando le sfide legate ai danni da radiazione e alle condizioni operative estreme presenti nello spazio. Il lavoro svolto in questa tesi rappresenta un contributo significativo nell’ambito della ricerca sui rivelatori, aprendo la strada a nuove possibilità di esplorazione scientifica. L’introduzione di tecnologie avanzate, come le misurazioni 5D complete di posizione, carica e tempo, potrebbe rivoluzionare il modo in cui vengono condotte le osservazioni astrofisiche, permettendo di ottenere dati sempre più dettagliati e accurati sulle sorgenti cosmiche e sui meccanismi di accelerazione delle particelle nell’universo.

Bibliografia

- [1] INFN, "Raggi Cosmici". Disponibile online: <https://www.lngs.infn.it/it/raggi-cosmici> consultato il 22/12/2024
- [2] N. Bucciantini. Raggi cosmici, particelle dallo spazio profondo. Disponibile online: <https://www.media.inaf.it/2017/07/25/raggi-cosmici/>.
- [3] J. Chang *et al.* [DAMPE], "The DArk Matter Particle Explorer mission," Astropart. Phys. **95** (2017), 6-24 doi:10.1016/j.astropartphys.2017.08.005 [arXiv:1706.08453 [astro-ph.IM]].
- [4] Knoll, G. E. (2000). Radiation Detection and Measurement.
- [5] L. Arruda, F. Barao, P. Goncalves and R. Pereira, "The Ring Imaging Cherenkov detector of the AMS experiment: test beam results with a prototype" Nucl. Phys. B Proc. Suppl. **172** (2007), 32-35 doi:10.1016/j.nuclphysbps.2007.07.025 [arXiv:0801.4484 [astro-ph]].
- [6] Cern Lezioni Settembre 2014 https://indico.cern.ch/event/405878/sessions/81061/attachments/1192946/1732019/lezioni_cern_settembre2014_2.pdf Consultato il 25/12/2024
- [7] Near-Space Muon Flux Detection and Analysis - Scientific Figure on ResearchGate. Disponibile online: https://www.researchgate.net/figure/An-illustration-of-the-Shower-of-Particles-Produced-by-Cosmic-Ray-Collisions-From-fig1_317318317 [Consultato 26/12/2024]
- [8] Sito AMS consultabile online <https://ams02.space/detector> Consultato il 26/12/2024
- [9] Sito ASI disponibile online: <https://www.asi.it/esplorazione/alte-energie/ams-02/> Consultato il 26/12/2024
- [10] Giunzione p-n <https://rosariociaglia.altervista.org/sempiconduttori-la-giunzione-p-n-caratteristiche-e-funzionamento>
- [11] M. Aguilar *et al.* [AMS], "The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II — Results from the first seven years," Phys. Rept. **894** (2021), 1-116 doi:10.1016/j.physrep.2020.09.003
- [12] CERN Project Channeling, *Tracker AMS*, 2024, <https://proj-channeling.web.cern.ch/TreackerAMS.pdf>. Ultimo accesso: 27 Dicembre 2024.

- [13] L. Arruda, F. Barao and R. Pereira, “Particle identification with the AMS-02 RICH detector: Search for dark matter with antideuterons,” [arXiv:0710.0993 [astro-ph]].
- [14] Sito DAMPE consultabile online: <https://dpnc.unige.ch/dampe/> Consultato il 09/01/2025
- [15] Sito HERD consultabile online: <https://herd.cloud.infn.it/it> Consultato il 12/01/2025
- [16] L. Silveri [HERD], “Current Status of the HERD Space Mission Design,” J. Phys. Conf. Ser. **2429** (2023) no.1, 012006 doi:10.1088/1742-6596/2429/1/012006
- [17] M. Ferrero, R. Arcidiacono, M. Barozzi, M. Boscardin, N. Cartiglia, G. F. Dalla Betta, Z. Galloway, M. Mandurrino, S. Mazza and G. Paternoster, *et al.* Nucl. Instrum. Meth. A **919** (2019), 16-26 doi:10.1016/j.nima.2018.11.121 [arXiv:1802.01745 [physics.ins-det]].
- [18] P. Fernandez-Martinez, D. Flores, S. Hidalgo, V. Greco, A. Merlos, G. Pellegrini and D. Quirion, Nucl. Instrum. Meth. A **821** (2016), 93-100 doi:10.1016/j.nima.2016.03.049 [arXiv:1510.08626 [physics.ins-det]].
- [19] T. Yang, K. Wu, M. Zhao, X. Jia, Y. Tan, S. Xiao, K. Liu, X. Zhang, C. Wang and M. Li, *et al.* Nucl. Instrum. Meth. A **1040** (2022), 167111 doi:10.1016/j.nima.2022.167111 [arXiv:2106.15421 [physics.ins-det]].
- [20] Sito INFN Roma2 consultabile online: <https://www.roma2.infn.it/fisica-delle-astroparticelle-csn2/ams-02-experiment/> Consultato il 21/01/2025
- [21] T. Yang, B. Sekely, Y. Satapathy, G. Allion, P. Barletta, C. Haber, S. Holland, J. F. Muth, S. Pavlidis and S. Stucci, “Characterization of 4H-SiC Low Gain Avalanche Detectors (LGADs),” [arXiv:2408.12744 [physics.ins-det]].