

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**Caratterizzazione di sensori Low Gain Avalanche
Detector (LGAD) per il sistema di tempo di volo
dell'esperimento ALICE 3 a LHC**

Relatore: Prof. Andrea Alici Presentata da: Edoardo Rovati
Correlatore: Dott.ssa Sofia Strazzi

Anno Accademico 2021/2022

Abstract

Il lavoro presentato in questa tesi analizza il comportamento elettrico di prototipi di sensori Low-Gain Avalanche Detector (LGAD) ultrasottili. L'analisi consiste in una verifica sperimentale delle caratteristiche attese di questi sensori, che sono stati selezionati come possibili candidati per la realizzazione del sistema di Time-Of-Flight (TOF) nell'esperimento ALICE 3. Concepito come evoluzione dell'esperimento ALICE attualmente in funzione al CERN, ALICE 3 rappresenta l'archetipo di una nuova generazione di esperimenti nella fisica delle collisioni di ioni pesanti, ed è previsto iniziare la propria attività di presa dati per LHC Run 5 nel 2032.

Sono stati presi in considerazione 22 campioni di LGAD, di cui 11 provenienti dal wafer di produzione 5 (spessore $25\ \mu\text{m}$) e gli altri 11 dal wafer 6 (spessore $35\ \mu\text{m}$). In entrambi i casi, di questi 11 sensori, 6 sono campioni in configurazione LGAD-PIN e 5 sono matrici. Tutti e 22 i campioni sono stati sottoposti a misure di corrente in funzione del voltaggio, mentre solo quelli appartenenti al wafer 5 anche a misure di capacità. L'obiettivo è quello di misurare la caratteristica IV e CV per ognuno dei campioni e da queste estrarre, rispettivamente, tensione di breakdown e profilo di doping.

Introduzione

ALICE 3 è il rivelatore che sostituirà ALICE a LHC nel 2032 e rappresenta la nuova generazione nella fisica delle collisioni tra ioni pesanti. L'obiettivo consiste nella realizzazione di un detector meno massivo costituito da strati in silicio cilindrici disposti su wafer ricurvi ultrasottili. L'utilizzo della tecnologia MAPS (Monolithic Active Pixel Sensors) garantirebbe low material budget ($0.05\% X_0$ per strato) e la possibilità di collocare i sensori ultrasottili, adibiti alla detezione di particelle cariche, all'interno della beampipe. I vantaggi sono una maggior capacità di tracciamento, la capacità di rivelazione di vertici secondari e detezione di particelle cariche a basso impulso trasverso; a tutto ciò si deve aggiungere la possibilità di gestire le luminosità attese in collisioni Ar-Ar o Kr-Kr, oltre a quelle Pb-Pb. L'identificazione di elettroni e fotoni viene attuata in punti differenti del detector e le nuove tecnologie consentono di sostenere luminosità maggiori rispetto a quelle attuali. Tutto ciò permette misure di particelle a bassissimo momento trasverso, anche nel caso di particelle pesanti contenenti quark charm e bottom.

La capacità di identificare particelle cariche fino a bassi impulsi trasversi è un aspetto cruciale in ALICE 3. Gli obiettivi fisici dell'esperimento infatti richiedono una risoluzione temporale dell'ordine di 20 ps, finora mai raggiunta con rivelatori al silicio. Il sistema di Time-Of-Flight (TOF) di ALICE 3 potrebbe prevedere l'impiego degli LGAD, un nuovo tipo di sensori al silicio che sfruttano l'effetto a valanga e sono ottimizzati per misure temporali. In questa tesi sono riportati i risultati ottenuti da una attività sperimentale condotta sui nuovi sensori prodotti dalla Fondazione Bruno Kessler di spessore 25 e 35 μm , sia matrici che singoli pad di LGAD appaiati a PIN. L'attività è stata condotta nei laboratori INFN a Bologna, dove sono state effettuate misure di capacità e corrente al variare della tensione.

Ringraziamenti

In questa sezione vorrei dedicare un ringraziamento a tutti coloro che mi hanno permesso di vivere questa esperienza.

In primis, vorrei ringraziare il Professore Andrea Alici per avermi dato la possibilità di vivere un'esperienza di laboratorio introduttiva al mondo della ricerca. L'attività sperimentale svolta mi ha aperto gli occhi circa il mio futuro, mi ha permesso di apprendere tanti nuovi aspetti della fisica.

Un ringraziamento speciale va alla mia correlatrice Sofia Strazzi per la pazienza e disponibilità avuta durante il corso dell'esperienza; un modello di fisico sperimentale dal quale imparare e apprendere. Il tuo esempio è stato fondamentale per la mia crescita personale e formativa, e di ispirazione per la scelta del curriculum di laurea magistrale.

Infine, l'ultimo ringraziamento lo dedico a Daniele Cavazza per la pazienza e la disponibilità nell'insegnarmi durante l'intera durata del percorso, ma soprattutto all'aver reso il laboratorio un luogo piacevole nel quale crescere e imparare.

Indice

List of Figures	6
1 Introduzione alla fisica di ALICE	11
1.1 La fisica delle particelle elementari	11
1.2 Gli adroni	12
1.2.1 Cromodinamica quantistica	12
1.3 Il Plasma di Quark e Gluoni	12
1.3.1 Il potenziale bariochimico e la Temperatura Critica	14
1.3.2 Evidenze sperimentali del QGP	15
1.4 L'esperimento ALICE 3	20
1.4.1 L'acceleratore LHC	20
1.4.2 La nuova generazione di esperimenti: ALICE 3	20
1.4.3 Caratteristiche di ALICE 3	21
1.4.4 ALICE 3: possibili configurazioni del magnete superconduttore	30
List of Tables	11
2 I sensori a semiconduttore	32
2.1 Il diodo	32
2.2 Detector a semiconduttore	34
2.2.1 I detector al Silicio	34
2.3 Low Gain Avalanche Detector	36
3 Misure su LGAD	40
3.1 Caratteristiche degli LGAD analizzati	40
3.2 Apparato sperimentale	42
3.2.1 Caratteristica IV	42
3.2.2 CV	47
3.3 Analisi dei risultati	50
3.3.1 Caratteristiche IV	50
3.3.2 Curve CV	58
Conclusioni	65
4 Appendice	67
4.1 Campi di Forza	67
4.1.1 Interazione elettromagnetica	67
4.1.2 Interazione forte	67
4.1.3 Interazione debole	68
4.2 Simmetria chirale	68
4.3 La catena naturale dei decadimenti	69

4.4 I magneti superconduttore di LHC 70

Elenco delle figure

1.1	Classificazione schematica delle particelle elementari in base al modello standard.	12
1.2	Mappa concettuale delle interazioni tra particelle elementari.	12
1.3	Le condizioni per la formazione del QGP si formano in seguito ad urti tra ioni pesanti.	14
1.4	Diagramma di fase della QCD in funzione di potenziale bariochimico e temperatura.	15
1.5	Rateo di produzione tra mesoni Ω e π in funzione della molteplicità della collisione e per diversi sistemi collidenti. Da ciò è possibile osservare un aumento relativo di produzione di adroni costituiti di quark strange in collisioni Pb-Pb rispetto a collisioni p-p.	16
1.6	Rappresentazione schematica di un diagramma di flusso ellittico. Esso descrive l'anisotropia della distribuzione degli impulsi che si verifica in seguito alla non centralità degli urti.	17
1.7	Rappresentazione del Jet Quenching: rispetto alle collisioni p-p è evidente la perdita di energia per radiazione da frenamento.	18
1.8	In questa figura è possibile notare che in collisioni p-p si osservano tutti e due i jet a 180° , mentre in collisioni ione-ione uno dei due sparisce perché il quark ha perso gran parte della propria energia attraversando il QGP.	18
1.9	Plot del fattore di modificazione nucleare R_{AA} misurato per il mesone ϕ in funzione dell'impulso trasverso al variare della centralità.	19
1.10	Rappresentazione del complesso di acceleratori al CERN, e degli esperimenti dislocati sull'acceleratore principale LHC.	20
1.11	Rappresentazione del detector ALICE 3. Si tratta di schema concettuale, i sensori che verranno impiegati sono ancora in fase di valutazione. Si tratta di una fase iniziale di progettazione del detector.	21
1.12	Rappresentazione schematica realizzati in 3-D del iris tracker.	21
1.13	Rappresentazioni schematiche del vertex detector e dei vacuum realizzate in 3-D. Nella prima immagine (in alto) è rappresentato il vertex detector affiancato da una immagine raffigurante il principio di funzionamento del iris tracker. In analogia ad un diaframma ottico, è possibile agire sul diametro dell'apertura per regolare il passaggio del fascio. Nella seconda figura (in basso) invece sono rappresentati i due vacuum.	22
1.14	Tabella riassuntiva del material budget per il primo strato del vertex detector.	23
1.15	Rappresentazione schematica in 3-D del outer tracker.	23
1.16	Rappresentazione schematica del vertex detector assemblato assieme al outer tracker.	24

1.17	i magneti operano con un campo magnetico fino a 2 T per bassi valori di η , mentre per alti η il valore di campo integrale decresce fino a 1 T m.	24
1.18	rappresentazione schematica del MAPS sviluppato da ARCADIA .	26
1.19	In questa tabella sono riportate le caratteristiche richieste ai layer del rivelatore TOF.	26
1.20	In questa tabella sono riportati i parametri del ECal.	27
1.21	In questa figura sono riportate le specifiche del radiatore di Cherenkov.	28
1.22	In questa figura sono riportati, a titolo esemplificativo, 4 blocchetti di aerogel.	28
1.23	Grafico che rappresenta la variazione dell'angolo Cherenkov in funzione della variazione degli impulsi.	28
1.24	In questa figura sono riportate le specifiche dei dischi in silicio del FCT.	29
1.25	Rappresentazione schematica di ALICE 3 collocato all'interno del magnete rosso L3. Le due figure rappresentano due possibili rappresentazioni circa il detector, tuttavia si deve ancora decidere quale delle due verrà impiegata. A sinistra il detector presenta un solenoide e un dipolo apposito per FTC, mentre a destra sempre un solenoide in aggiunta a due dipoli.	30
1.26	i magneti operano con un campo magnetico fino a 2 T per bassi valori di η , mentre per alti η il valore di campo integrale decresce fino a 1 T m.	31
1.27	Rappresentazione della variazione di risoluzione in funzione dell'aumento di η . La curva blu è rappresentativa del solenoide, mentre quella arancione del sistema solenoide e dipoli.	31
2.1	Rappresentazione schematica di una giunzione p-n polarizzata inversamente (in alto) e direttamente (in basso).	32
2.2	andamento della densità di carica, del campo elettrico e del potenziale nella giunzione.	33
2.3	a sinistra, tipica caratteristica di un diodo: la corrente cresce esponenzialmente dopo un certo valore di tensione, detto di soglia, ed è negativa quando il diodo è polarizzato inversamente; a destra, confronto tra la tensione di attivazione di germanio e silicio.	33
2.4	rappresentazione dei due fenomeni che causano il breakdown: effetto Zener e effetto a Valanga; Il meccanismo a valanga comporta una certa dipendenza della corrente inversa di saturazione dal valore della tensione di polarizzazione che corrisponde all'aumento di energia cinetica con la tensione applicata. Il meccanismo alla Zener impone una rigorosa costanza della corrente inversa fino alla $V_z = V_{BR}$, punto in cui la corrente cresce rapidamente di diversi ordini di grandezza.	34
2.5	a sinistra, rappresentazione di un pixel; a destra la rappresentazione del sensore.	35
2.6	All'aumentare della lambda può succedere che la radiazione attraversi l'intero spessore (circa $100\mu\text{m}$) senza essere assorbita, contrariamente al diminuire di lambda, il fotone è immediatamente assorbito e i portatori di carica hanno una brevissima vita media.	36
2.7	Tipica struttura di un LGAD.	37
2.8	Rappresentazione schematica della struttura di un LGAD affiancata al grafico di campo elettrico.	38

2.9	Simulazioni sul jitter e sul rumore di Landau in funzione del Constant Fraction Discriminator (CFD): il contributo del jitter è maggiore agli estremi del segnale mentre la forma del segnale è meno piccata per bassi segnali. Le fluttuazioni di Landau sono minimizzate per sensori sottili ma sono indipendenti dal guadagno.	38
2.10	Schema del processo di ricostruzione della posizione temporale e spaziale	39
3.1	Nell'immagine è riportato un esempio di campione a configurazione LGAD-PIN. Il campione così disposto è da definirsi "dritto", cioè è possibile individuare univocamente LGAD e PIN.	41
3.2	Nell'immagine è riportata una matrice di 4 LGADs a titolo esemplificativo. L'orientamento del sensore è scelto convenzionalmente in modo da poter distinguere i 4 elementi di matrice in base alla loro posizione utilizzando le coordinate up, down, right, left.	41
3.3	Nell'immagine è riportato un esempio di tipologia 4, in cui l'interstizio tra i 4 pads è completamente assente. I campioni analizzati sono tutti di questo tipo, ma esistono anche altre tipologie in cui l'interstizio è visibile.	41
3.4	Setup sperimentale per la misura della caratteristica IV. Il sensore è collocato sul chuck e connesso elettricamente attraverso quattro spilli, ciascuno posizionato attraverso un marcatore.	42
3.5	Fotografia della postazione da un altro punto di vista. L'elemento numero 3 è la parte terminale dei marcatori, la cui forma è osservabile in figura 3.4. Il sensore poggia sul chuck, elemento numero 1, ed è "toccato" dagli spilli, elemento numero 2.	43
3.6	Fotografia al microscopio del posizionamento degli spilli su di un LGAD per l'acquisizione dei dati. In questo caso, anche se non è possibile vederlo, lo spillo connesso all'amperometro punta sul pad, mentre l'altro sul GR.	44
3.7	Fotografia al microscopio del posizionamento degli spilli su di una matrice per l'acquisizione dei dati. In questo caso, anche se non è possibile vederlo, lo spillo connesso all'amperometro punta sul pad UL, mentre non viene toccato il pad DR poiché il quarto spillo è impiegato nel contatto con il GR. Gli altri due spilli invece puntano i pad UR e DL. . . .	45
3.8	Per specifiche: CAEN.	46
3.9	Per specifiche: Keithley 6487.	46
3.10	Nell'immagine è stata riportata la configurazione open collector, dove nessuno spillo è a contatto con il chuck. Nella foto sono visibili i due spilli connessi al catodo e all'anodo sul sensore; due spilli additivi sulla destra, ininfluenti sulla misura, sono utilizzati per mantenere il sensore maggiormente a contatto con il chuck.	47
3.11	Nell'immagine è stata riportata la configurazione short collector, dove gli spilli toccano il chuck. Come spiegato nell'immagine 3.10 i due spilli a destra non sono collegati con il circuito perciò la loro presenza è irrilevante e non compromette le misure.	47
3.12	Fotografia del bias-tee, dove sui terminali è stato collocato un oggetto metallico a forma di ferro di cavallo che realizza un cortocircuito. Non sono stati inseriti i coccodrilli da mostrare, poiché da un punto di vista logistico risultava essere molto complicato.	48
3.13	Fotografia al microscopio del posizionamento degli spilli.	48
3.14	Per specifiche: Z100-8-TDK-LAMBDA.	49

3.15 Per specifiche: Impedance Analyzer.	49
3.16 Esempio di caratteristiche IV comprensive delle misure sul PIN(giallo) e sul LGAD(nero), sul Guard Ring(GR) del PIN(blu) e del LGAD(rosso) con un sensore di spessore 25 μm (W5) in alto e uno 35 μm (W6) in basso. Le misure sul sensore 5-2 sono state effettuate in condizioni di umidità 18% e a temperatura 24° C, mentre le misure sul 9-5 a 17% e 25° C.	50
3.17 Zoom della caratteristica IV del sensore nei punti di interesse menzionati: svuotamento dello strato di guadagno in alto e raggiungimento del breakdown in basso.	51
3.18 Caratteristiche IV degli LGAD nella configurazione LGAD-PIN a confronto. Sono presenti 3 grafici: il primo che raccoglie tutte le misure dei (7,8,9,10)-5 W5, il secondo dei (7, 8, 9, 10)-5 W6, il terzo invece dei (4, 5)-2 W5.	52
3.19 Caratteristiche IV di due matrici. I sample del W6 hanno manifestato i problemi di costruzione definiti precedentemente, a questi si deve aggiungere che in alcuni casi la differenza di breakdown è nettissima (curva nera nel grafico 7-5), questo condiziona notevolmente almeno uno degli altri 3 pad, difatti nel caso del secondo grafico la curva rossa non arriva al punto di breakdown.	53
3.20 In queste due immagini sono mostrati i grafici dei campioni 10-5 W5 e 7-5 W6. I parametri utilizzati sono due: il numero di punti su cui effettuare il fit (N^*) e il numero di punti su cui mediare (M). Per ciascun fit è stato deciso un range, indipendente per ogni sample, nell'intorno del voltaggio di breakdown e in alcuni plot è stata fatta anche una mediazione tra punti vicini, al fine di eliminare il rumore di alta frequenza e ottenere un fit migliore.	55
3.21 Caratteristiche CV con relativo zoom. Si tratta di un campione LGAD-PIN (5-2) e una matrice 2x2 (7-1). Si può notare nella legenda che le curve sono state denominate come C_p o C_s : il capacimetro possiede una resistenza interna di 25 Ω che può essere messa in serie (S) oppure in parallelo (P) con le altre resistenze del circuito. Essendo piccola la resistenza, non dovrebbe esserci scarto tra le due caratteristiche di uno stesso pad. Fatto ben visibile anche dallo zoom ulteriore riportato nella figura in basso a destra. Per uno dei sensori è stata misurata anche la curva relativa al PIN, in modo da avere un confronto diretto e osservare le differenze derivanti dalla presenza dello strato di guadagno sull'andamento della capacità. I grafici sono riportati nella parte in alto della figura.	58
3.22 Nello stesso grafico è stata riportata la curva CV e la IV del LGAD 5-2. .	59
3.23 In questo grafico sono state rappresentate le caratteristiche CV estratte dagli LGAD-PIN.	60
3.24 In questo grafico sono stati confrontati tutti i pad Down Left delle matrici 2x2.	61
3.25 In questa figura sono riportate le caratteristiche dei campioni 7-5 e 6-1. I 4 pad della matrice sembrano essere uniformi fra loro, e posseggono un valore di capacità iniziale che quasi raddoppia quello del LGAD 7-5.	61
3.26 Grafico che rappresenta il profilo di doping D come funzione della profondità W.	62

3.27	Grafico che rappresenta il profilo di doping D e la profondità W come funzione del potenziale. Si riscontra anche in questo caso il picco, come atteso, che segnala la presenza dello strato di guadagno. Si noti anche che nel range fra 0 V e 20 V la curva della profondità è cresce lentamente, questo è associato alla presenza dello strato di guadagno, in accordo con quanto atteso.	63
3.28	Grafico che rappresenta il profilo di doping D in funzione della profondità W per tutti i sample di configurazione LGAD-PIN. Si riscontra che il picco ha luogo all'incirca alla medesima profondità.	63
3.29	Grafico che rappresenta il profilo di doping D in funzione della profondità W per tutte le matrici. Si riscontra che il picco ha luogo all'incirca alla medesima profondità per tutti i campioni.	64
4.1	Matrice CKM: si noti come è possibile una trasmutazione da un quark bottom ad uno up attraverso una transizione diretta, meno probabile, oppure una serie di passaggi intermedi, più probabile.	69
4.2	Decadimento di un π^- in un elettrone e un anti neutrino elettronico . . .	69

Capitolo 1

Introduzione alla fisica di ALICE

1.1 La fisica delle particelle elementari

La fisica delle particelle elementari è completamente descritta dal **Modello Standard** [1], cioè un corpo di teorie, dette teorie di campo quantizzato, che spiega la struttura di tre delle quattro interazioni naturali: elettromagnetica, forte e debole. Tali teorie nascono dalla sintesi della relatività ristretta e della meccanica quantistica si basano sulla assunzione che particelle e campo non siano più due enti fisici distinti, ma che esista un unico ente fisico, il campo stesso. Esso è dotato di massa, carica intera e momento angolare di spin e varia la propria energia o quantità di moto attraverso unità discrete (dette quanti). Sulla base dei dati sperimentale ad oggi disponibili, si classificano 12 tipi di campi materiali fondamentali i cui quanti hanno natura fermionica e sono portatori di cariche interne che si accoppiano con i campi di forza 4.1. I dodici quanti fermionici, tutti soggetti ad interazione debole ed elettromagnetica, si dividono in:

- 6 quark, dotati di carica colore e quindi soggetti anche ad interazione forte;
- 6 leptoni, non soggetti ad interazione forte e di massa generalmente inferiore.

I nomi di queste particelle, così come le loro caratteristiche, sono riportate in figura 1.1, mentre un riassunto schematico delle interazioni fra particelle è riportato in figura 1.2. I quark si uniscono tra loro in due modi distinti e formano due diverse famiglie di adroni, cioè di stati legati con carica di colore nulla:

- **Mesoni**: stati legati di quark e antiquark;
- **Barioni**: stati legati di 3 quark o 3 antiquark.

Fermions	Name	Symbol	Spin	EM charge	Weak charge*	Color charge	Mass (MeV/c ²)
Lepton	Electron	e ⁻	+1/2	-1	-1/2	0	0,51
	Muon	μ ⁻	+1/2	-1	-1/2	0	105,00
	Tau	τ ⁻	+1/2	-1	-1/2	0	1.777,00
	Electron Neutrino	ν _e	+1/2	0	+1/2	0	< 3 E-6
	Muon Neutrino	ν _μ	+1/2	0	+1/2	0	< 0,18
	Tau Neutrino	ν _τ	+1/2	0	+1/2	0	< 18,00
Quark II	up	u	+1/2	+2/3	+1/2	RGB	~2
	charm	c	+1/2	+2/3	+1/2	RGB	~1.200
	top	t	+1/2	+2/3	+1/2	RGB	>170.000
	down	d	+1/2	-1/3	-1/2	RGB	~5
	strange	s	+1/2	-1/3	-1/2	RGB	~92
	bottom	b	+1/2	-1/3	-1/2	RGB	~4.200

Figura 1.1: Classificazione schematica delle particelle elementari in base al modello standard.

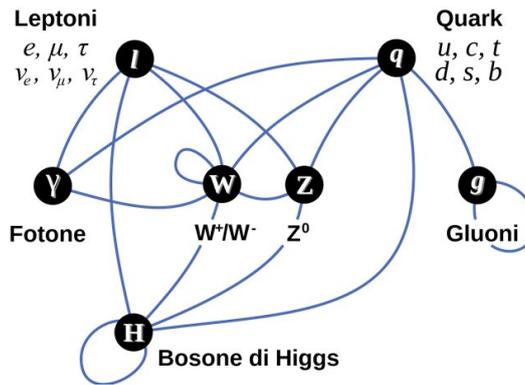


Figura 1.2: Mappa concettuale delle interazioni tra particelle elementari.

1.2 Gli adroni

Gli adroni sono particelle soggette ad interazione forte; per la maggior parte sono **instabili**, con una vita media brevissima (circa 10^{-22} s). I decadimenti terminano in adroni **stabili** (rispetto a tutte le interazioni) oppure **quasi stabili** (decadenti per interazione debole od elettronica) con una vita media compresa fra 10^{-8} e 10^{-12} s.

1.2.1 Cromodinamica quantistica

La **Cromodinamica Quantistica** (QCD) è una teoria di gauge che descrive l'interazione forte: essa agisce sulle 3 cariche interne di colore portate da ogni quark, che per convenzione sono denominate rosso, verde e blu; una delle caratteristiche principali è la **libertà asintotica**. Infatti, l'intensità della forza forte aumenta con la distanza per cui ci aspettiamo che sia molto intensa nel regime delle basse energie e che la sua intensità cali al diminuire del raggio di azione (regime delle alte energie). Il fenomeno del **Jet Adronico** può essere osservato durante una collisione fra adroni, dove un quark potrebbe acquisire sufficiente energia da rompere il legame con gli altri quark e fuoriuscire dall'adrone come particella isolata. Ciò è impedito proprio dalla forza forte attraverso un fenomeno chiamato **confinamento** 4.1.2 che fa sì che gli stati legati di quark abbiano **carica di colore nulla**¹; infatti, l'interazione forte trasforma tutta l'energia cinetica del quark in energia potenziale immagazzinata dal campo. Se l'energia potenziale è sufficientemente elevata sarà impiegata nella creazione di coppie di quark-antiquark, che andranno a legarsi al quark fuoriuscito dando vita ad un nuovo adrone.

1.3 Il Plasma di Quark e Gluoni

Il **quark-gluon plasma** (QGP) è uno stato della materia che si verifica in condizioni di alte densità di energia e temperatura, nel quale le particelle elementari costituenti degli adroni sono deconfinati [2]. In un arco temporale compreso fra 10^{-10} e 10^{-6} secondi dopo il Big Bang la materia è esistita sotto forma di plasma di quark e gluoni. Quindi, se vengono riprodotte negli acceleratori le condizioni di temperatura e densità di energia presenti in quegli istanti, è possibile studiare le fasi iniziali della formazione

¹Alternativamente colore bianco.

dell'universo. Inoltre, i modelli perturbativi della QCD assumono cambiamenti relativamente piccoli rispetto allo stato fondamentale, cosa che si verifica in condizioni di basse temperature e densità: ciò permette una semplificazione dei calcoli in questo regime. Al contrario, nel regime non perturbativo sono stati condotti pochi test quindi lo studio del QGP potrebbe consolidare le teorie sulle particelle elementari.

Le caratteristiche principali sono [3]:

- si tratta di un insieme di quark e gluoni all'**equilibrio termico** e vicino all'**equilibrio chimico**;
- la parola plasma evidenzia la presenza di cariche di colore libere, a differenza di quello che accade nella materia adronica a basse temperature.

Le collisioni tra ioni pesanti in regime ultra-relativistico costituiscono il metodo di studio principale di tale mezzo e grazie ad esse è possibile osservare il **deconfinamento**, poiché vengono prodotte particelle che hanno un elevato impulso trasverso. Nell'interazione tra particelle prodotte per interazioni primarie si forma il Plasma di Quark e Gluoni, cioè un mezzo molto denso in equilibrio termico, a temperatura e densità di energia elevata. Per effetto della libertà asintotica, si ottiene quindi un sistema con partoni e deconfinati e il ripristino della simmetria chirale 4.2.

Quando collidono tra loro degli ioni pesanti si creano le condizioni per la formazione del QGP: tali condizioni sono particolarmente favorevoli all'aumentare della centralità della collisione; nelle collisioni periferiche solo una parte degli ioni è coinvolta, mentre gli altri, chiamati spettatori, continuano il loro moto indisturbato. Le particelle coinvolte vengono descritte in termini di rapidità:

$$y = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{E+p_L}{E-p_L}$$

dove E è l'energia e p_L è la componente del momento lungo la direzione del fascio. Definiamo la pseudorapidità come

$$\eta = \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{p+p_L}{p-p_L} = -\ln \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Nei primi istanti di una collisione tra ioni pesanti a velocità ultrarelativistiche per energie fino a SPS² vengono create particelle con grande impulso (circa 1 GeV/c) o grande massa: tali particelle possono essere usate per verificare il deconfinamento. Ad energie superiori (LHC) la produzione avviene anche in istanti successivi. Le particelle prodotte da tali collisioni interagiscono fra loro e se la densità di energia è sufficientemente alta si forma il QGP, un mezzo denso di materia interagente che migra verso un equilibrio termico. Dopo la formazione del plasma il sistema inizia ad espandersi e raffreddarsi, esercitando una pressione verso l'esterno. Quando il sistema ritorna alla **densità critica** comincia l'adronizzazione di quark e gluoni: i partoni con lo stesso impulso vengono emessi nella stessa direzione e si legano tra loro; questo processo continua fino al **freeze-out chimico**, ossia l'energia è troppo bassa per permettere collisioni inelastiche e le abbondanze delle specie chimiche sono fisse (circa ad una temperatura di 150/170 MeV). L'espansione continua per urti elastici finché si fissano gli spettri in impulso [4], si parla allora di **freeze-out termico** (ad una temperatura circa 110/130 MeV). La durata temporale del QGP è considerevolmente breve, difatti cessa di esistere non appena la temperatura e/o la densità di energia scendono sotto il valore critico (fase di adronizzazione); a seguito di ciò è possibile ricostruirne l'evoluzione attraverso lo studio dei prodotti che lascia grazie all'interazione con l'apparato

²Super Proton Synchrotron, si tratta di un sincrotrone di raggio 1.1 km appartenente al CERN. Fa parte della parte di pre-accelerazione che fornisce i fasci di particelle ad LHC.

sperimentale. In particolare, in queste collisioni viene prodotto **un maggior numero di quark strani** rispetto agli urti p-p e si instaura equilibrio chimico fra up, down e strange. Un riassunto schematico delle varie fasi del QGP è riportato in figura 1.3

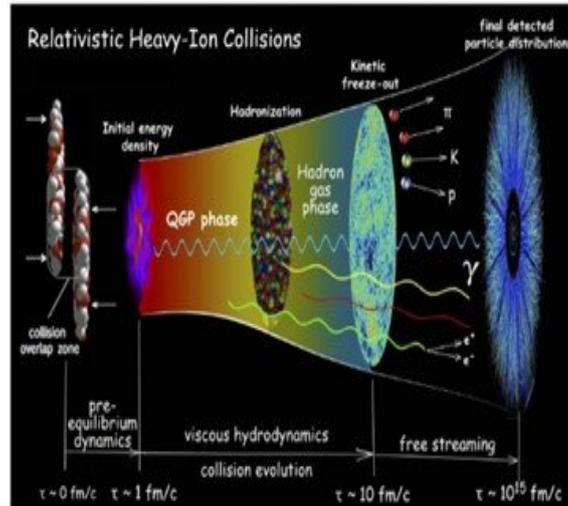


Figura 1.3: Le condizioni per la formazione del QGP si formano in seguito ad urti tra ioni pesanti.

1.3.1 Il potenziale bariochimico e la Temperatura Critica

Come già detto nei paragrafi precedenti il fenomeno della formazione del QGP è accompagnato dal ripristino della simmetria chirale e dal deconfinamento; secondo calcoli svolti in LQCD³ queste due transizioni di fase avvengono alla stessa temperatura e, come in un sistema grancanonico⁴, sono descritte da due parametri:

- **il potenziale bariochimico;**
- **la temperatura.**

Il **potenziale bariochimico** è definito come

$$\mu_B = \frac{dE}{dN_B}$$

Quando tale potenziale è nullo, la temperatura critica T_C , definita come la temperatura alla quale avviene la transizione di fase, vale circa 170 MeV. Questo valore si calcola eguagliando la pressione del **vuoto non perturbativo** del mare di barioni e la pressione della bolla di QGP contenente il plasma **nel vuoto perturbativo**; la prima spinge il plasma verso l'interno mentre la seconda è dovuta all'espansione del QGP. La pressione del vuoto perturbativo è data dalla **legge di Stephan-Boltzman**

$$P_\pi = \frac{\pi^2}{30} \cdot T^4$$

mentre quella della QGP è

³L'interazione tra quark è molto intensa, di conseguenza si utilizza la tecnica Lattice QCD, basata su un reticolo di lato L e passo a (limite stretto alla distanza tra quark) con conseguente discretizzazione dello spazio. Così facendo operiamo in un regime non perturbativo dove gli integrali, descrittivi i vertici di interazione, non divergono più. Una volta garantita la non divergenza degli integrali (e ovviamente valutati) si ritorna al limite continuo $\lim_{L \rightarrow \infty} L$ e $\lim_{a \rightarrow 0} a$.

⁴Il reservoir è rappresentato dal vacuum, mentre invece il sistema è "fireball".

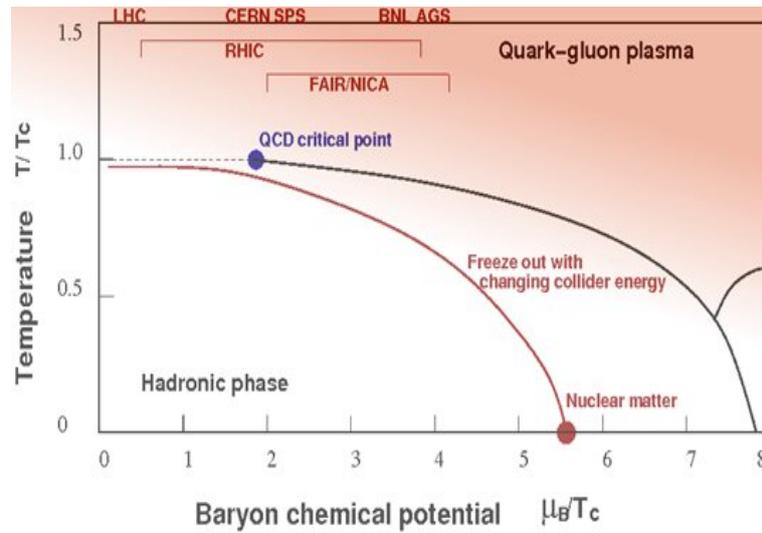


Figura 1.4: Diagramma di fase della QCD in funzione di potenziale bariochimico e temperatura.

$$P_{QGP} = \frac{37\pi^2}{90} \cdot T^4;$$

dall'uguaglianza delle due si trova la temperatura critica e si può ricavare la densità di energia critica considerando 2 sapori, attraverso la formula:

$$\epsilon = (2_f \cdot 2_s \cdot 2_q \cdot 3_c \cdot \frac{7}{8} + 2_p \cdot 8_c) \cdot \frac{\pi^2 4\sigma T^4}{30c}$$

I termini dentro la parentesi sono i gradi di libertà interni dei quark e dei gluoni⁵. Queste condizioni rispecchiano le fasi iniziali dell'universo, dove il numero di barioni e di antibarioni era lo stesso; inoltre la temperatura critica diminuisce all'aumentare di μ_B . La relazione che sussiste tra la temperatura e il potenziale bariochimico in unità di temperatura critica è mostrata nel grafico in figura 1.4.

1.3.2 Evidenze sperimentali del QGP

Le prove sperimentali circa l'esistenza del QGP derivano da **misure indirette** a causa della sua brevissima vita media (circa 10^{-23} s). Queste si suddividono in **soft probes** nel regime non perturbativo del QCD dove i quark si scambiano basso impulso e **hard probes** nel caso opposto.

Soft Probes

- **Aumento della stranezza** Tra i prodotti dei decadimenti in seguito alle collisioni di ioni Pb-Pb si osserva una maggiore produzione di **quark strange** rispetto a collisioni protone-protone (pp), in cui tale produzione viene sfavorita dalla massa dinamica del quark strange che è maggiore della massa dei quark up e down 4.3. Nel processo di formazione della QGP invece la massa del quark strange vale circa $150 \text{ MeV}/c^2$ (è massa nuda ossia priva di effetti dinamici): le alte energie in gioco sono sufficienti a coprire la piccola differenza di massa tra i quark up, down e strange ed è quindi favorita la formazione di coppie $s\bar{s}$; tali coppie si

⁵Partendo da quelli dei quark 2_f rappresentano per l'appunto i due sapori, 2_s è legato allo spin (up/down), 3_c alla carica di colore (Rosso, Verde, Blu) e 2_q alla carica elettrica (1/3 o -2/3). Per quanto riguarda i gradi di libertà gluonici invece 2_p rappresenta il fatto che i campi hanno due polarizzazioni a seconda che creino o distruggano quanti e 8_c è legato alla carica di colore dei gluoni.

formano in seguito all'interazione tra gluoni liberi nel QGP (**thermal production**) ed aumenta quindi la probabilità di formazione di adroni con stranezza non nulla, come $\Omega^-(sss)$, $\Lambda^0(uds)$, $\Xi^0(uss)$, $\Omega^+(\bar{s}\bar{s}\bar{s})$, $\Xi^-(dss)$. Tale probabilità aumenta all'aumentare del numero di ioni coinvolti negli urti e della centralità come mostrato in figura 1.5.

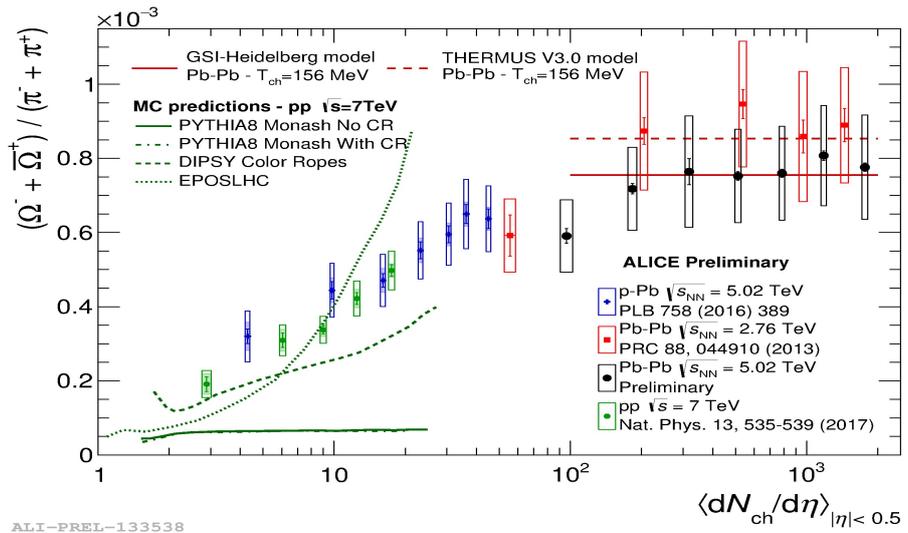


Figura 1.5: Rateo di produzione tra mesoni Ω e π in funzione della molteplicità della collisione e per diversi sistemi collidenti. Da ciò è possibile osservare un aumento relativo di produzione di adroni costituiti di quark strange in collisioni Pb-Pb rispetto a collisioni p-p.

- **Il flusso ellittico** Il flusso che si forma per espansione del plasma dopo la collisione tra ioni è detto **flusso ellittico**; esso:
 - descrive l'**anisotropia azimutale** dell'emissione di particelle per collisioni non centrali tra ioni pesanti
 - riflette l'**anisotropia spaziale** della regione di sovrapposizione nucleare nel piano trasverso

In seguito ad una collisione centrale infatti, gli impulsi degli ioni sono distribuiti in modo isotropico attorno al punto di impatto, come se fossero contenuti in una sfera. In una collisione periferica invece non tutti gli ioni prendono parte alla collisione: alcuni ioni, detti **spettatori**, continuano indisturbati il loro moto mentre altri detti **partecipanti** collidono effettivamente. La distribuzione degli impulsi diventa anisotropa, ed è descritta da un'ellisse come mostrato in figura 1.6; tanto più ci si discosta da una sfera, meno la collisione è centrale. Il flusso ellittico è infatti definito come il secondo coefficiente armonico della serie di Fourier azimutale⁶ della distribuzione degli impulsi ed è quindi un indice di anisotropia. Essa è maggiore nelle fasi iniziali della formazione del plasma, dove il flusso ellittico è più sensibile alle fluttuazioni. La distribuzione azimutale finale delle particelle emesse è descritta da una espansione in serie di Fourier

⁶Una serie di seni e coseni.

$$E \frac{d^3N}{d^3x} = \frac{d^2N}{2\pi \cdot p_T \cdot dp_T \cdot dy} \cdot (1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cdot \sin(n(\phi - \phi_R)))$$

Lo studio del flusso ellittico permette di acquisire informazioni sulle collisioni tra ioni pesanti, come la scala temporale di termalizzazione⁷.

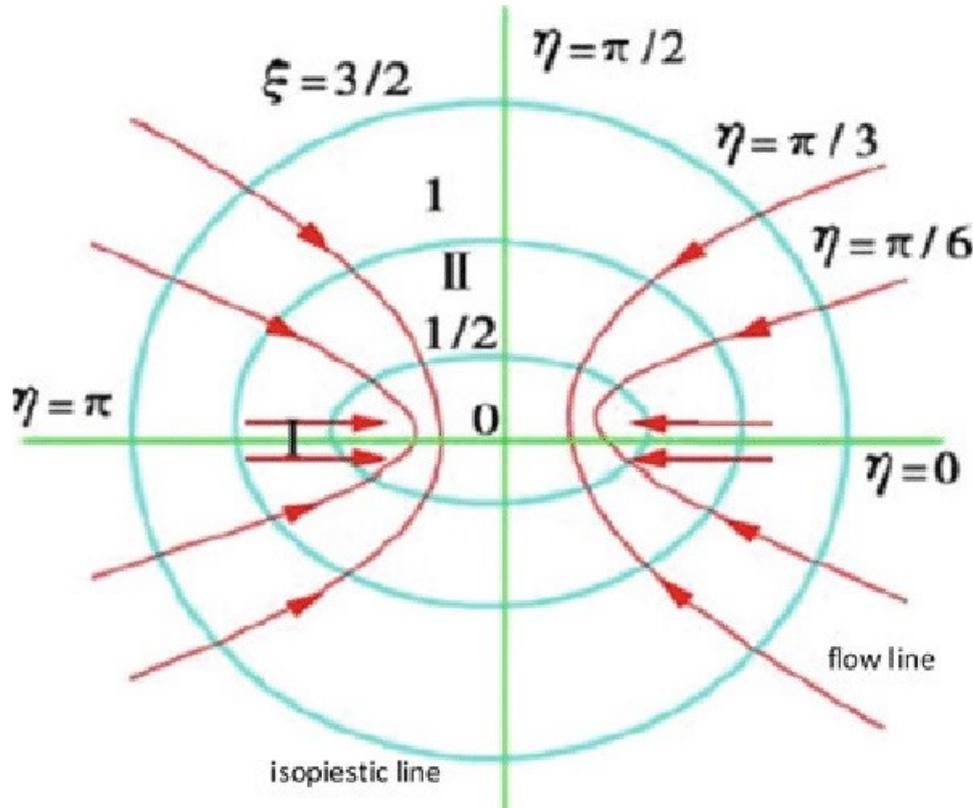


Figura 1.6: Rappresentazione schematica di un diagramma di flusso ellittico. Esso descrive l'anisotropia della distribuzione degli impulsi che si verifica in seguito alla non centralità degli urti.

Le Hard Probes

- **Jet Quenching:** In seguito alle collisioni tra ioni pesanti vengono prodotti dei jet di particelle: ciò che si misura è la perdita di energia di questi jet nella loro interazione con il plasma, fenomeno che viene detto **jet quenching** [5], la cui rappresentazione schematica è riportata in figura 1.7. Lo studio della QGP avviene osservando come questa interazione modifica i jet formati da gluoni e quark che adronizzano. Al momento dell'urto si formano coppie di jet, lungo la stessa direzione ma in versi opposti. Nel momento in cui la collisione tra i due quark non avviene al centro del mezzo creato allora accadrà che i due jet effettueranno una lunghezza di cammino differente, prima di uscire dal QGP. Dunque, quello che ha effettuato un **percorso maggiore** a causa di una interazione prolungata è **rallentato maggiormente** rispetto all'altro [6], come mostrato in figura 1.8.

⁷Cioè il processo mediante il quale due corpi raggiungono l'equilibrio scambiandosi energia e raggiungendo così la massima entropia del sistema.

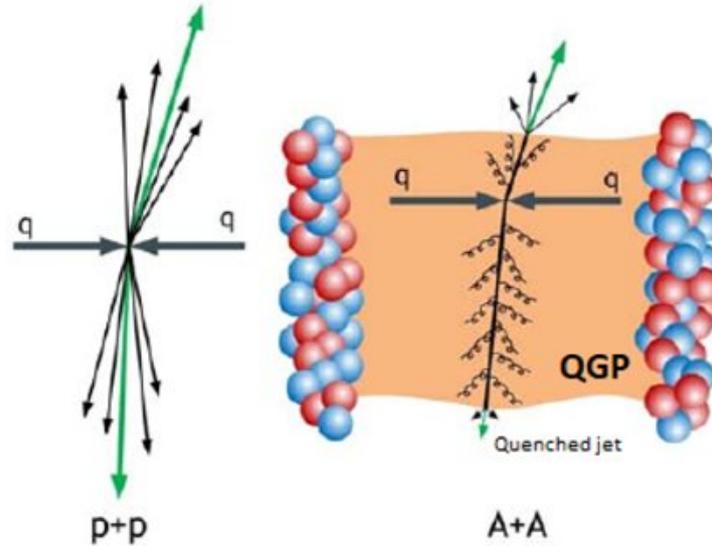


Figura 1.7: Rappresentazione del Jet Quenching: rispetto alle collisioni p-p è evidente la perdita di energia per radiazione da frenamento.

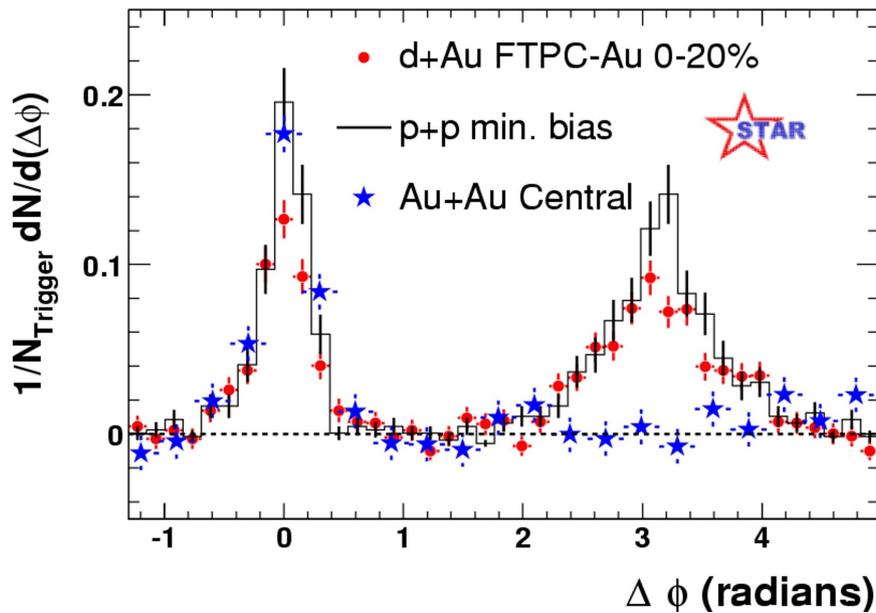


Figura 1.8: In questa figura è possibile notare che in collisioni p-p si osservano tutti e due i jet a 180° , mentre in collisioni ione-ione uno dei due sparisce perché il quark ha perso gran parte della propria energia attraversando il QGP.

La diversa soppressione dell'impulso è una prova dell'esistenza della QGP ed è meglio osservabile nelle collisioni centrali, dove l'interazione con il mezzo avviene per tempi più lunghi. Definiamo allora la **centralità**:

$$c = \frac{1}{\sigma_{AA}} \int_0^b \frac{d\sigma}{db'} db'$$

in termini di **sezione durto** σ e parametro di impatto b , cioè la distanza tra i centri dei due nuclei sul piano perpendicolare al fascio.

La soppressione è quantificata dal fattore di modificazione nucleare R_{AA} , dove

$$R_{AA} = \frac{d^2 N^{AA}/dp_T d\eta}{\langle T_{AA} \rangle d^2 \sigma_{inel}^{pp}/dp_T d\eta}.$$

Possiamo avere:

- $R_{AA} = 1$, significa che il numero di particelle prodotte negli urti A-A scala con il numero di collisioni binarie nucleone-nucleone
- $R_{AA} \neq 1$ indica la presenza di effetti dovuti alla formazione di un mezzo deconfinato (QGP). In particolare:
 - * se $R_{AA} > 1$ indica **amplificazione**
 - * se $R_{AA} < 1$ indica **soppressione**

Un plot del fattore di modificazione nucleare acquisito durante gli esperimenti di collisione Pb-Pb è riportato in figura 1.9.

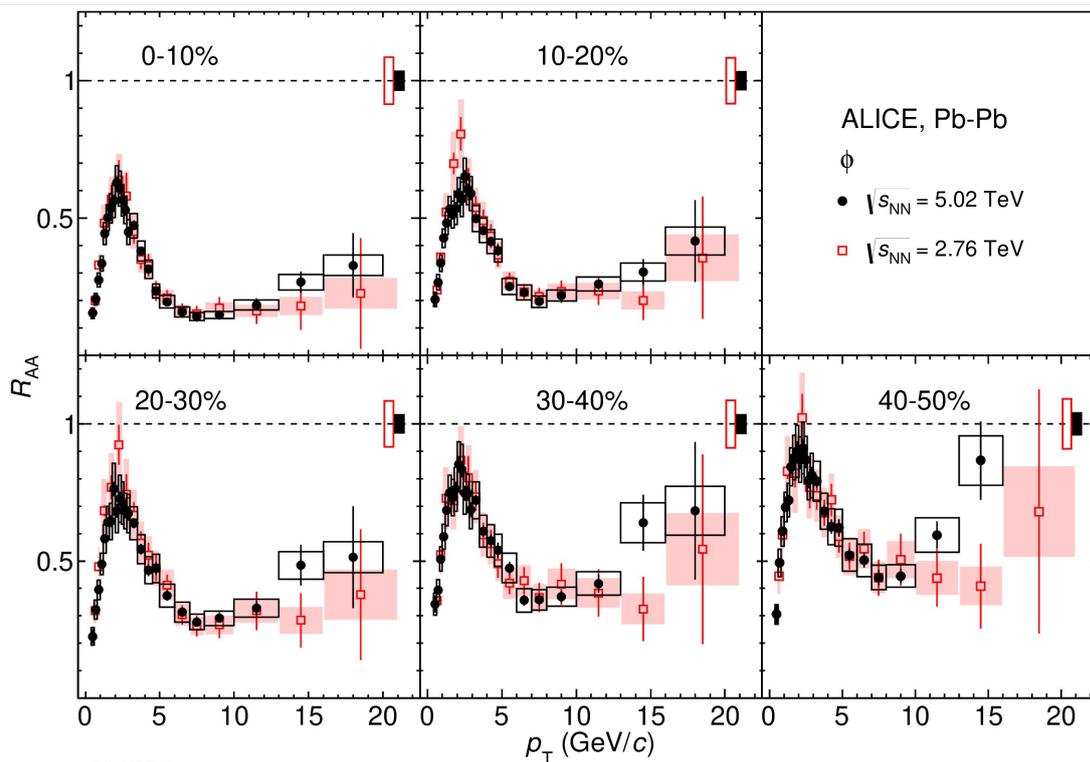


Figura 1.9: Plot del fattore di modificazione nucleare R_{AA} misurato per il mesone ϕ in funzione dell'impulso trasverso al variare della centralità.

- **Stati quarkonia:** Gli stati quarkonia sono gli **stati legati** di quark **charm** e **bottom**. Tendenzialmente, in collisioni Pb-Pb ad alta energia, gli stati legati di quark pesanti non dovrebbero essere prodotti a causa della schermatura di colore della forza forte causata dalla presenza del QGP. La J/ψ e il Υ sono esempi di stati fortemente legati che si dissolvono a densità e temperature maggiori: vengono divisi nei loro quark costituenti perchè la distanza tra c e \bar{c} e tra b e \bar{b} supera il raggio di azione della forza forte. Questi quark si ricombinano con quark più leggeri a formare i mesoni D e B.

1.4 L'esperimento ALICE 3

1.4.1 L'acceleratore LHC

ALICE (A Large Ion Collider Experiment) è un rivelatore costruito per LHC (Large Hadron Collider) il più grande acceleratore al mondo, collocato al CERN a Ginevra. Si tratta di un acceleratore circolare con una circonferenza di 27 km nel quale vengono fatti circolare due fasci di particelle in direzioni opposte all'interno di tubi a vuoto con velocità ultra-relativistica. I due fasci collidono in punti posti in corrispondenza dei quattro esperimenti: **ALICE**, **ATLAS**, **CMS**, **LHCb**, schematicamente mostrati in figura 1.10. I fasci sono guidati da un sistema di magnetici superconduttori che lavorano ad una temperatura di 1.9 K. 4.4.

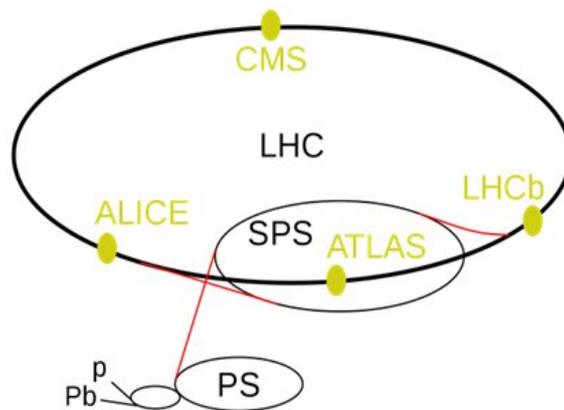


Figura 1.10: Rappresentazione del complesso di acceleratori al CERN, e degli esperimenti dislocati sull'acceleratore principale LHC.

1.4.2 La nuova generazione di esperimenti: ALICE 3

ALICE 3 rappresenta la nuova generazione di rivelatori per lo studio delle collisioni i ioni pesanti, che sostituirà l'esperimento ALICE al CERN⁸. Esso prevede di **sensori ultrasottili al silicio** utilizzati sia per il tracciamento delle particelle cariche fino a bassissimi impulsi trasversi e con una eccellente risoluzione spaziale sulla ricostruzione del vertice primario e di quelli secondari di decadimento, che per l'identificazione di tali particelle attraverso la tecnica del tempo di volo. I miglioramenti all'apparato sperimentale permettono in particolare di studiare **adroni con quark pesanti** per trovare ulteriori conferme alla QCD. Già ALICE aveva permesso di scoprire nuovi fenomeni come l'evoluzione dell'aumento nella produzione di stranezza da collisioni p-p a bassa molteplicità fino a collisioni Pb-Pb ad elevata molteplicità. Lo studio dei quark a sapori pesanti consente di ricavare informazioni sull'adronizzazione e sulla perdita di energia causata dall'interazione di tali quark con il mezzo. I nuovi materiali utilizzati in ALICE 3 permetteranno di:

- gestire la maggiore luminosità degli eventi delle collisioni Pb-Pb;
- misurare barioni multi-charmed, fotoni con basso impulso e un flusso ellittico di coppie elettrone-positrone;

⁸ALICE è un esperimento del CERN in cui si sfruttano collisioni tra ioni pesanti in regime ultrarelativistico per creare uno stato della materia di quark deconfinati, chiamato Quark-Gluon Plasma

- gestire collisioni di nuclei come Ar-Ar e Kr-Kr previsti dal programma di LHC durante la run 5.

ALICE 3 comprenderà un detector tutto in silicio che permetterà una migliore misura di leptoni, fotoni e adroni con basso impulso trasverso. Una possibile struttura generale del detector è descritta in figura 1.11.

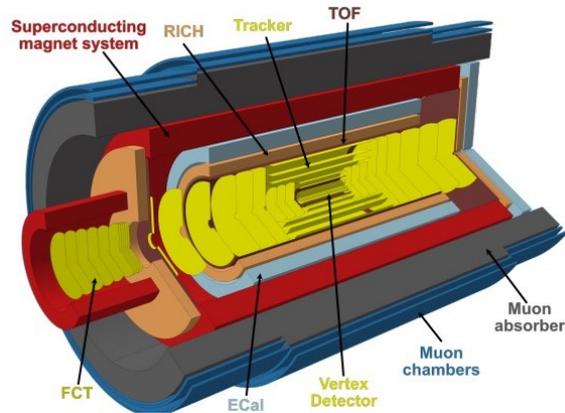


Figura 1.11: Rappresentazione del detector ALICE 3. Si tratta di schema concettuale, i sensori che verranno impiegati sono ancora in fase di valutazione. Si tratta di una fase iniziale di progettazione del detector.

1.4.3 Caratteristiche di ALICE 3

Il cuore dell'esperimento ALICE 3 è costituito dal tracker, formato da 11 strati cilindrici e 2 x 12 dischi suddivisi in due aree principali:

Vertex detector: è costituito dai primi 3 strati e da 2x3 dischi. Il tracker è stato costruito all'interno della beampipe in modo tale da poter essere allontanato e avvicinato al punto di interazione. Si compone di un insieme di 4 "petali" che possono ruotare simultaneamente e avvicinarsi sino a garantire una apertura circolare di raggio 5 mm per consentire il passaggio del fascio come mostrato in figura. Si osservi una rappresentazione schematica dei 4 petali realizzata in 3-D in figura 1.12. Tale sistema è denominato **iris tracker** e rappresenta il principio mediante cui è possibile posizionare il detector all'interno della beampipe. Difatti, ogni petalo ospita un quarto di detector dove il primo strato di detezione sarà posizionato a 5 mm dall'asse del fascio.

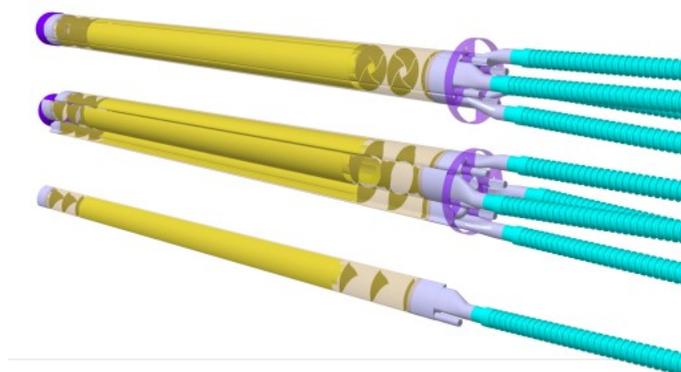


Figura 1.12: Rappresentazione schematica realizzati in 3-D del iris tracker.

Tuttavia, a causa di una eventuale fuoriuscita di gas, dovuta alle componenti del detector, si potrebbe incorrere in una contaminazione del vacuum LHC. La soluzione a questo problema consiste nel collocare il tracker all'interno di un vuoto secondario che coesiste con il primo ed è creato mediante i petali del iris tracker. Questi ultimi agiscono quindi sia come RF foil, cioè come schermo al campo elettromagnetico dovuto al fascio⁹, ma anche da separatori fra i due vacuum come mostrato in figura 1.13.

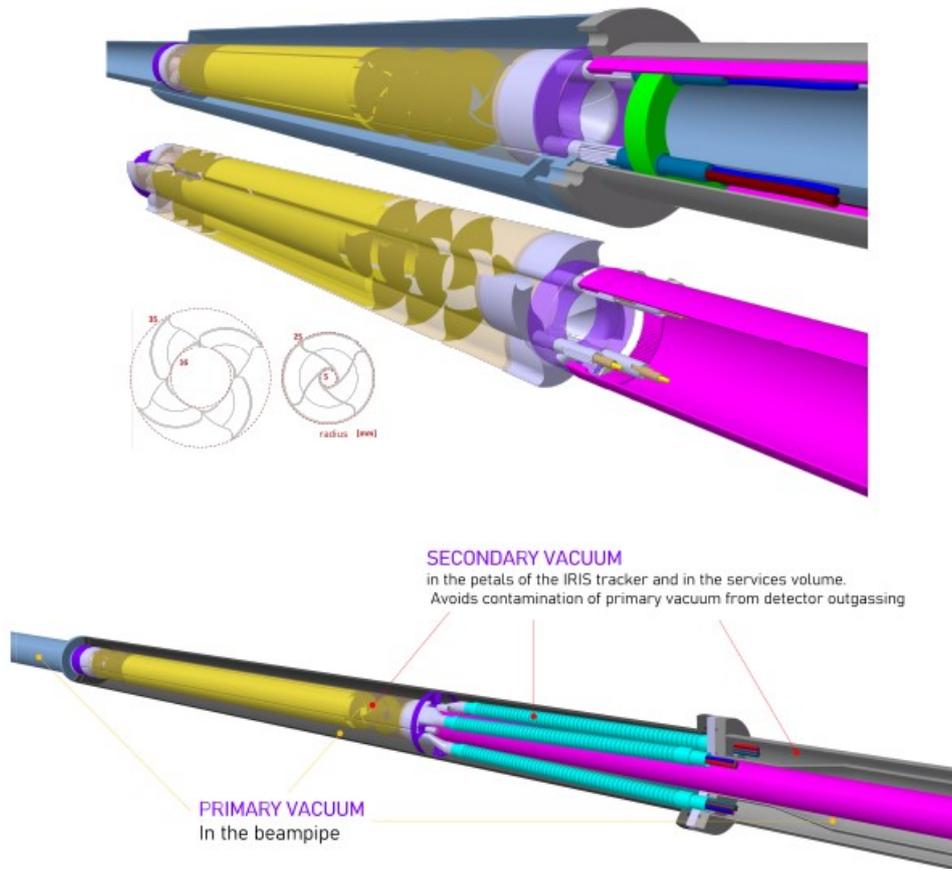


Figura 1.13: Rappresentazioni schematiche del vertex detector e dei vacuum realizzate in 3-D. Nella prima immagine (in alto) è rappresentato il vertex detector affiancato da una immagine raffigurante il principio di funzionamento del iris tracker. In analogia ad un diaframma ottico, è possibile agire sul diametro dell'apertura per regolare il passaggio del fascio. Nella seconda figura (in basso) invece sono rappresentati i due vacuum.

Le pareti dei petali devono essere costruite in modo da minimizzare il loro spessore e con le caratteristiche riportate in figura 1.14. Infine, l'interno della beampipe è ricoperto da un sottile strato di titanio-zinco-vanadio detto **NEG coating** che si attiva mediante il calore del fascio e assorbe le particelle. Si tratta di una componente strettamente necessaria, in quanto la sua assenza comporterebbe il seguente problema: una eventuale riduzione del diametro di apertura centrale al punto di interazione causa una maggiore incidenza delle particelle sulle superfici della camera e conseguentemente una destabilizzazione della pressione.

⁹Quando un fascio di particelle attraversa una camera a vuoto che non è un conduttore perfetto il risultato ottenuto sarà un campo elettromagnetico indotto perturbante il fascio. Questo causerà perdite di energia e densità di corrente. Per questo motivo è necessario che i petali del iris tracker svolgano il compito di schermo.

Component	Material	Thickness (μm)	Radiation length	
			(cm)	($\%X_0$)
Sensor	Si	30	9.37	0.032
Support	Be	250	35.28	0.071
Glue		50	35	0.014
Total				0.117

Figura 1.14: Tabella riassuntiva del material budget per il primo strato del vertex detector.

Outer tracker: Come mostrato in figura 1.15, il tracker è suddiviso in 9 cilindri, ognuno dei quali si compone in moduli assemblati su staves, a loro volta sono costituite da svariati sensori connessi fra loro e vincolati ad un sottostrato termico altamente conduttivo. Ogni modulo è connesso ad un supporto funzionale che garantisce allineamento e il raffreddamento. Inoltre, gli staves e i dischi sono tenuti in posizione da un supporto meccanico di forma cilindrica e lunghezza complessiva 8 m ed ogni disco è montato sul lato interno di un Support Shell Cilindrico.

Il tracker è costituito da due tipi di supporti ai moduli:

- staves longitudinali nei cilindri interni;
- dischi piatti per le estremità.

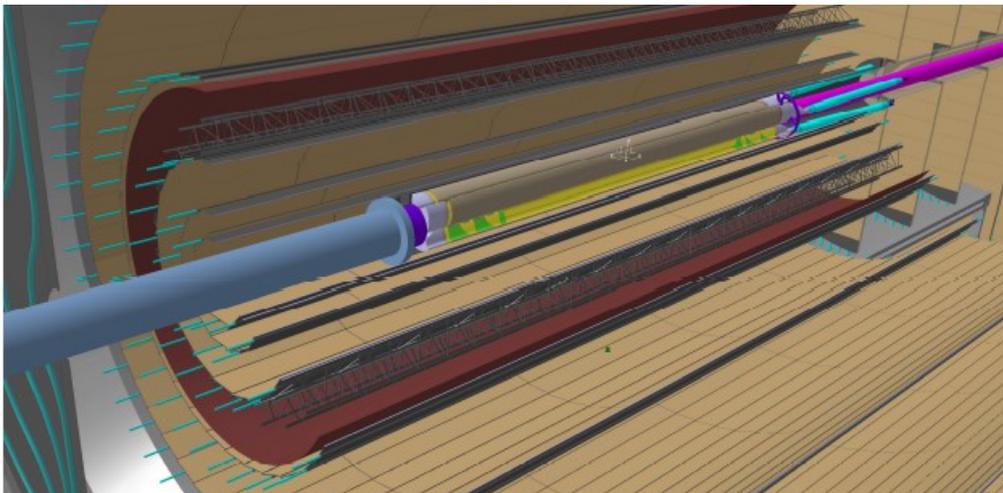


Figura 1.15: Rappresentazione schematica in 3-D del outer tracker.

È interessante evidenziare il fatto che le diverse parti del detector sono alimentate in gruppi mediante svariati alimentatori in serie e convertitori DC-DC assieme ad interruttori. Quest'ultimi collocati sullo strato in modo da mantenere la corrente costante. Infine, la regolazione di potenza si implementa nei chip dei pixel oppure mediante un regolatore di potenza collocato in punti precisi.

Assemblando le due parti descritte nei due sotto paragrafi precedenti, quello che si ottiene è mostrato in figura 1.16

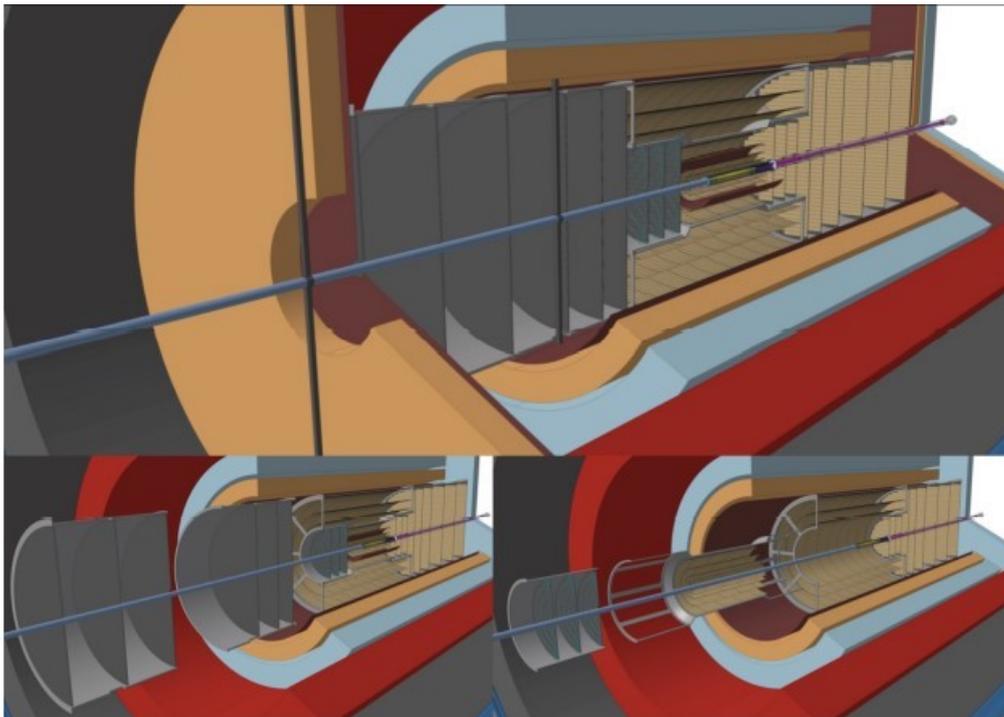


Figura 1.16: Rappresentazione schematica del vertex detector assemblato assieme al outer tracker.

Qui di seguito, in figura 1.17 sono riportate le specifiche del sensore ALICE 3

Layer	Material	Intrinsic thickness ($\%X_0$)	Intrinsic resolution (μm)	Barrel layers		Forward discs		
				Length ($\pm z$) (cm)	Radius (r) (cm)	Position ($ z $) (cm)	R_{in} (cm)	R_{out} (cm)
0		0.1	2.5	50	0.50	26	0.005	3
1		0.1	2.5	50	1.20	30	0.005	3
2		0.1	2.5	50	2.50	34	0.005	3
3		1	10	124	3.75	77	0.05	35
4		1	10	124	7	100	0.05	35
5		1	10	124	12	122	0.05	35
6		1	10	124	20	150	0.05	80
7		1	10	124	30	180	0.05	80
8		1	10	264	45	220	0.05	80
9		1	10	264	60	279	0.05	80
10		1	10	264	80	340	0.05	80
11		1				400	0.05	80

Figura 1.17: i magneti operano con un campo magnetico fino a 2 T per bassi valori di η , mentre per alti η il valore di campo integrale decresce fino a 1 T m.

Ulteriori componenti del detector sono quelle mostrate in figura 1.11.

Time-Of-Flight: l'identificazione delle particelle avviene grazie alla tecnica del tempo di volo (Time-Of-Flight, TOF) e strati di rivelatori al silicio posti all'interno del rivelatore centrale alla distanza di 19 cm e di 85 cm dall'asse del fascio e su ambo i lati dei dischi. Il sistema del detector si compone di:

- un sensore;

- un front-end;
- un Time-to-Digital-Converter (TDC);
- un sistema di controllo del clock;
- un sistema di redout.

Per quanto concerne il sensore, attualmente è ipotizzato l'impiego di una delle seguenti tecnologie: **Low-Gain Avalanche Diodes (LGAD)**, **Single Photon Avalanche Diodes (SPAD)** e sensori **CMOS** totalmente svuotati.

Sensori CMOS: si tratta di sensori totalmente svuotati con ottima risoluzione temporale, alta efficienza e basso material budget. Inoltre, l'impiego di questi sensori comporta una riduzione dei costi di fabbricazione e un assemblaggio relativamente economico in quanto sensore ed elettronica di front-end sono impiantati nello stesso wafer. Il problema principale è che non sono ancora stati prodotti sensori CMOS con risoluzioni temporali prossime a 20 ps, che è quanto richiesto al TOF per soddisfare le richieste di fisica di ALICE 3. Uno dei problemi riguarda l'ampiezza dei segnali e la necessità di utilizzare elettronica con un basso consumo di energia; per questo motivo sono attualmente sotto studio sensori CMOS con uno strato di guadagno interno.

LGADs: comportano costi di produzione maggiori ¹⁰ e soprattutto sono più complicati da assemblare rispetto ai sensori monolitici ¹¹. Questi sensori garantiscono una eccellente risoluzione temporale [7] e impiegano una apposita elettronica per la lettura dati. Infine, a differenza degli SPADs, operano in un range che precede la tensione di breakdown.

SPADs: sono prodotti con tecnologia CMOS e offrono una soluzione monolitica. Si impiega un unico strato poiché questi sensori sono affetti da incertezze dovute al dark count rate e alla frazione di area sensibile. Il vantaggio di impiegarli consiste nel fatto che potrebbero essere impiegati sia come TOF che nella lettura dei fotoni per il rivelatore RICH [8]. Infine, a differenza degli LGADs, operano in modalità geiger.

Infine, occorre fare una menzione anche alla tecnologia **MAPS** [9], il cui interesse riguarda la costruzione di pixel impiegati nel tracciamento delle particelle con caratteristiche come le dimensioni ridotte, il basso rumore abbinato ad un basso consumo di potenza. Tuttavia, si sono riscontrate problematiche circa l'ottimizzazione della risoluzione temporale, che rappresenta un punto cruciale per l'analisi delle particelle; difatti, una buona performance temporale si può ottenere, ad ora, con sensori totalmente svuotati; questo perché tale proprietà è correlata ad un rapido di accumulo dei portatori di carica. Altre problematiche riguardano l'ottimizzazione geometrica e la configurazione del relativo campo ¹². Un possibile soluzione è stata individuata nel guadagno a valanga che consentirebbe di migliorare il SNR (Signal-Noise-Rateo) e soprattutto ottimizzare la risoluzione temporale. Il progetto FASTPIX impiega piccoli pixel con speciali accorgimenti per modellare e uniformare le linee del campo elettrico ai bordi del pixel

¹⁰Produzione in wafer di silicio.

¹¹Con la parola monolitico si fa riferimento ad un tipo di tecnologia dove l'elettronica è implementata all'interno dei pixel.

¹²Ad esempio sensori con piccoli elettrodi offrono una bassa capacità, ma un campo elettrico non uniforme, cioè limitante alla risoluzione temporale. Invece, sensori con gradi elettrodi mostrano un campo elettrico più uniforme abbinati ad una grande capacità.

stesso per garantire un rapido accumulo delle cariche. Al contrario, i progetti SEED e ARCADIA hanno sviluppato dei sensori CMOS completamente svuotati¹³ costituiti da:

- Substrato drogato n molto resistivo;
- Superficie drogata n (epitaxial) in cui sono presenti pozzetti di tipo p per velocizzare localmente l'accumulo di cariche.

Quanto appena descritto è riportato in figura 1.18

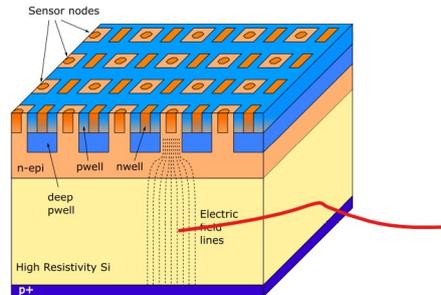


Figura 1.18: rappresentazione schematica del MAPS sviluppato da **ARCADIA**.

Le specifiche richieste ai layer del rivelatore TOF sono riportate in figura 1.19

	Inner TOF	Outer TOF	Forward TOF
Radius (m)	0.19	0.85	0.15–1.5
z range (m)	-0.62–0.62	-2.79–2.79	4.05
Surface (m ²)	1.5	30	14
Granularity (mm ²)	1 × 1	5 × 5	1 × 1 to 5 × 5
Hit rate (kHz/cm ²)	74	4	122
NIEL (1 MeV n _{eq} /cm ²) / month	1.3 · 10 ¹¹	6.2 · 10 ⁹	2.1 · 10 ¹¹
TID (rad) / month	4 · 10 ³	2 · 10 ²	6.6 · 10 ³
Material budget (%X ₀)	1–3	1–3	1–3
Power density (mW/cm ²)	50	50	50
Time resolution (ps)	20	20	20

Figura 1.19: In questa tabella sono riportate le caratteristiche richieste ai layer del rivelatore TOF.

Identificazione di particelle con i TOF: La misura del tempo di volo serve ad identificare le particelle, dove la lunghezza della traiettoria e l'impulso della particella sono già noti grazie ai tracking detectors. Possiamo dunque calcolare la massa della particella mediante le equazioni relativistiche (dove γ è il fattore di Lorentz):

$$E = \gamma \cdot m \cdot c^2$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

La massa è data da:

$$m = \frac{p}{c} \cdot \sqrt{\left(\frac{t \cdot c}{L}\right)^2 + 1}$$

¹³forniti da LFoundry

a cui dobbiamo associare un'incertezza

$$\frac{\delta m}{m} = \sqrt{\left(\frac{\delta p}{p}\right)^2 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{\delta t}{t}\right)^2}$$

conoscendo il tempo di volo ed espandendolo in serie di Taylor, possiamo calcolare la differenza dei tempi di volo tra due particelle che hanno lo stesso impulso p:

$$t = \frac{L}{c} \cdot \left(\frac{m^2 \cdot c^2}{2 \cdot p^2}\right)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{L \cdot c}{2} \cdot \left(\frac{m_2^2 - m_1^2}{p^2}\right)$$

Dalla risoluzione temporale δt è possibile calcolare il numero di deviazioni standard, che corrisponde alla capacità del TOF di separare due particelle che hanno la stessa lunghezza d'onda e lo stesso impulso

$$\eta_q = \frac{\Delta t}{\delta t}$$

ECal: Il calorimetro elettromagnetico è costruito in modo da coprire interamente la regione cilindrica centrale assieme al disco all'estremità anteriore, perciò ricopre un range di rapidità $-1.6 < \eta < 4$. Si colloca tra il RICH detector e il magnete di criostatico e ha la forma di un cilindro cavo (raggio interno 1.15 m, raggio esterno 1.45 m) di lunghezza pari a 7 m, mentre l'estremità è un disco di raggio interno pari a 0.16 m e raggio esterno pari a 1.8 m; le ulteriori caratteristiche tecniche sono riportate in figura 1.20. Parte del corpo centrale sarà ricoperta da cristalli di $PbWO_4$ (tungsteno) per detezione di χ_c e di fotoni diretti (soft). L'elevata risoluzione in questa area del detector è data proprio dai cristalli conduttori di tungsteno $PbWO_4$ di area di $22 \times 22 \text{ mm}^2$ ed lunghezza di $l = 180 \text{ mm}$, che corrisponde a 20 lunghezze di radiazione X_0 . Il rivelatore è composto da una pila di strati alternati di scintillatori in materiale conduttivo e plastica di spessore, rispettivamente 1.44 mm e 1.76 mm. Le 30000 celle richieste sono costruite in modo da avere una sezione di $30 \times 30 \text{ mm}^2$. Alle estremità le celle sono costruite con 95 strati di scintillatori spessi 1.44 mm e 1.76 mm così da ottenere $25X_0$ con uno spessore di 304 mm ed un termine statistico $b = 0.11 \text{ GeV}^{1/2}$. Una ipotesi al vaglio è la possibilità di celle con sezione trasversale $40 \times 40 \text{ mm}^2$ che porta al numero complessivo di 6000 celle. Invece, il numero di celle nell'area realizzata in tungsteno è circa 20000: esse costituiscono una matrice cilindrica di 320 celle nella direzione azimutale e di 62 celle in quella longitudinale.

Letter of intent for ALICE 3 (CERN-LHCC-2022-009)

ECal module	Barrel sampling	Endcap sampling	Barrel high-precision
acceptance	$\Delta\phi = 2\pi,$ $ \eta < 1.5$	$\Delta\phi = 2\pi,$ $1.5 < \eta < 4$	$\Delta\phi = 2\pi,$ $ \eta < 0.33$
geometry	$R_{in} = 1.15 \text{ m},$ $ z < 2.7 \text{ m}$	$0.16 < R < 1.8 \text{ m},$ $z = 4.35 \text{ m}$	$R_{in} = 1.15 \text{ m},$ $ z < 0.64 \text{ m}$
technology	sampling Pb + scint.	sampling Pb + scint.	$PbWO_4$ crystals
cell size	$30 \times 30 \text{ mm}^2$	$40 \times 40 \text{ mm}^2$	$22 \times 22 \text{ mm}^2$
no. of channels	30 000	6 000	20 000
energy range	$0.1 < E < 100 \text{ GeV}$	$0.1 < E < 250 \text{ GeV}$	$0.01 < E < 100 \text{ GeV}$

Figura 1.20: In questa tabella sono riportati i parametri del ECal.

RICH detector: Per poter identificare particelle cariche con impulsi trasversi p_T superiori al limite di applicabilità della tecnica di tempo di volo, è stato proposto un rivelatore Ring Imaging Cherenkov (RICH) con specifiche riportate in figura 1.21. Tale rivelatore sarà composto da:

- un materiale radiatore: l'**areogel** di spessore 2 cm e sagomato a mattonella, mostrato in figura 1.22;
- uno strato di **fotorivelatori** collocato a 20 cm dal radiatore e in prossimità del punto di focusing. In questo caso si opta per un sensore SiPM (Hamamatsu 13360 3050CS) con picco di PDE di 40%.

Material	Refractive index	Pthreshold (GeV/c)				λ_{cutoff} (nm)
		e	π	K	p	
Ar	1.000283	0.021	5.87	20.75	39.44	124
CO ₂	1.000449	0.017	4.66	16.47	21.48	175
C ₄ F ₁₀	1.0015	0.009	2.5	9.0	17	136
Aerogel	1.01	0.004	0.98	3.48	6.62	300
	1.03	0.002	0.57	2.0	3.8	
	1.26	0.001	0.18	0.64	1.22	
C ₆ F ₁₄	1.3	0.0006	0.168	0.594	1.13	165
NaF	1.41	0.00051	0.140	0.497	0.944	125
Fused silica	1.47	0.00047	0.129	0.458	0.87	158

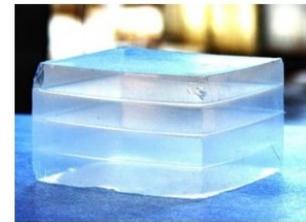


Figura 1.22: In questa figura sono riportati, a titolo esemplificativo, 4 blocchetti di aerogel.

Figura 1.21: In questa figura sono riportate le specifiche del radiatore di Cherenkov.

Una identificazione delle particelle e delle loro traiettorie è possibile mediante la conoscenza del tempo che impiega ogni singolo fotone a colpire il corrispondente SiPM. Quest'ultimo dato, se noto con precisione, garantisce una riduzione del rumore di background e un valore dell'angolo di Cherenkov più preciso, il grafico corrispondente si può osservare in figura 1.23.

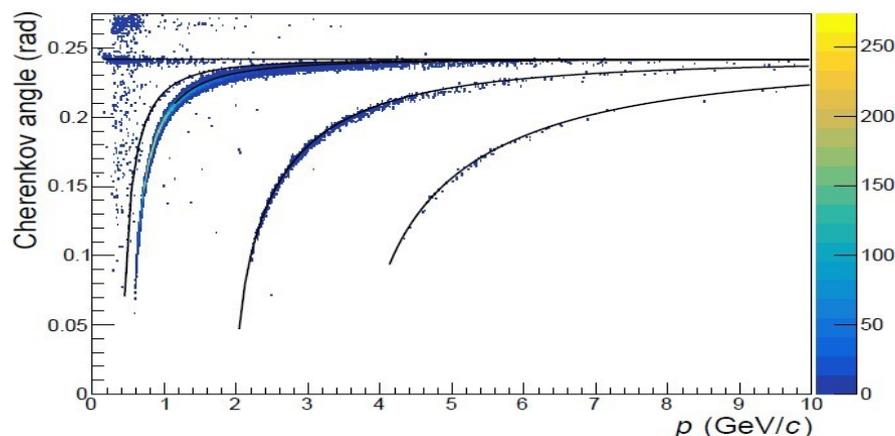


Figura 1.23: Grafico che rappresenta la variazione dell'angolo Cherenkov in funzione della variazione degli impulsi.

Muon Identifier: Si colloca fuori dal sistema dei magneti ed è composto da camere in ferro o acciaio non magnetico ¹⁴ per il tracciamento delle particelle cariche attraversanti l'hadrons absorber. Il Muon Identifier serve a ricostruire gli stati quarkonia, cioè quegli stati costituiti da charm e bottom, fino ad impulsi trasversi $p_T = 0$ all'interno del muon channel, (cioè che decadono in una coppia $\mu^+\mu^-$). Garantisce una buona efficienza su un ampio intervallo di rapidità nella ricostruzione di muoni aventi impulsi trasversi fino $p_T = 1.5$ GeV/c e per $\eta = 0$; difatti, in simulazioni di collisioni centrali Pb-Pb a 5.5 TeV condotte con uno spessore di assorbimento di 70 cm per $\eta = 0$ e camera muonica a granularità $\Delta\phi\Delta\eta = 0.02 \times 0.02$ è stato possibile riscontrare una buona identificazione di muoni. Infine, dato che il tasso delle particelle cariche è di 3 Hz/cm² e che la granularità dei pads è 50-60 mm, è possibile utilizzare la **Reistive Plate Chambers** (RPCs) che rappresenta una soluzione efficace visto l'impiego dei 4000 canali.

Forward Conversion Tracker: Si tratta di 9 dischi di tracking in silicio, le cui specifiche sono riportate in figura 1.24, installati attorno alla beampipe lungo la direzione del fascio incidente, nel range di rapidità $3 < \eta < 5$; ha come duplice scopo:

- quello di rivelare fotoni con impulso trasverso fino a 2 MeV/c;
- misurare i fotoni attraverso le coppie di elettroni/positroni, risultanti dalle loro annichilazioni.

La realizzazione del secondo punto ha luogo grazie ad un campo magnetico ortogonale alla direzione di volo, per la ricostruzione delle coppie $e^{+/-}$. La misura si effettua mediante l'array di dischi in silicio disposti a strati e distanziati l'uno dall'altro di 2 cm. Si inseriscono ulteriori dischi (fino ad arrivare ad un totale di 9) a spaziatura maggiore per ottenere una buona risoluzione spaziale quando gli elettroni posseggono impulsi più grandi di qualche unità di MeV/c. Il disco in silicio di ALICE 3 in fronte al FCT può essere usato anche come un **convertitore** attivo di fotoni, dal momento che la misura di fotoni a basso p_T non è limitata dalla statistica; non è previsto un convertitore poiché la sua presenza comporterebbe un aumento dello scattering e una perdita di energia.

Layer	z (m)	r_{\min} (m)	r_{\max} (m)
0	-3.42	0.05	0.34
1	-3.44	0.05	0.34
2	-3.46	0.05	0.35
3	-3.48	0.05	0.35
4	-3.50	0.05	0.35
5	-3.60	0.05	0.36
6	-3.70	0.05	0.37
7	-3.80	0.05	0.38
8	-3.90	0.05	0.39

Figura 1.24: In questa figura sono riportate le specifiche dei dischi in silicio del FCT.

¹⁴La motivazione è legata allo stress meccanico cui sono sottoposte, oltre a questioni tecniche di supporto.

1.4.4 ALICE 3: possibili configurazioni del magnete superconduttore

Il detector ALICE si trova attualmente nella caverna che ospitò l'esperimento L3¹⁵. Il magnete di L3, rappresentato in figura 1.25 fornisce un campo magnetico di 0.5 T; l'introduzione di ALICE comportò l'impiego di un ulteriore magnete di dipolo¹ che produce un campo di 4 T. Entro il 2032 si effettuerà:

- la sostituzione del rivelatore ALICE con ALICE 3 ;
- il magnete di dipolo sarà rimosso lasciando posto ad un magnete superconduttivo che sarà inserito all'interno di quello rosso ottagonale di L3. Quest'ultimo agirà come schermo al campo magnetico attraversante la caverna.

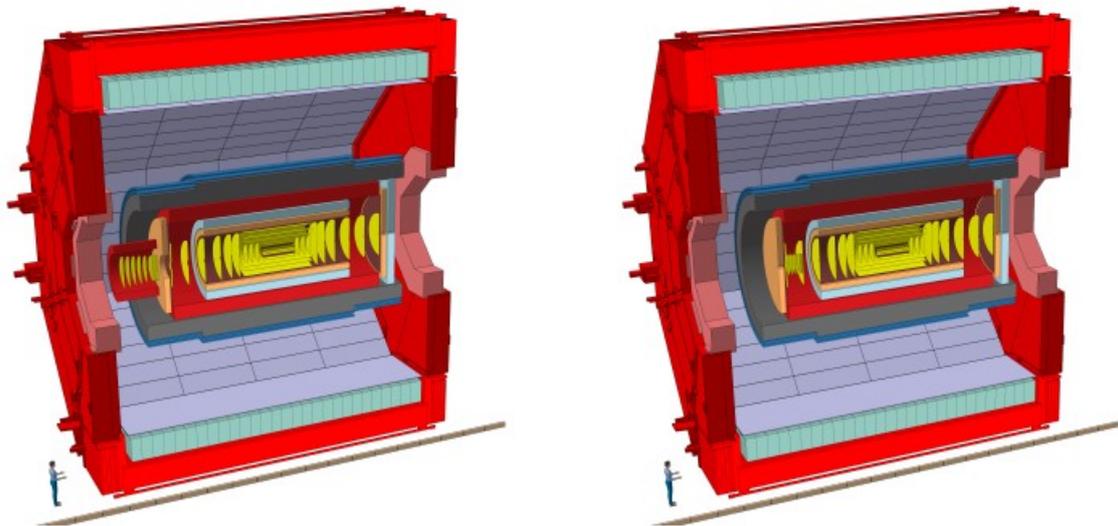


Figura 1.25: Rappresentazione schematica di ALICE 3 collocato all'interno del magnete rosso L3. Le due figure rappresentano due possibili rappresentazioni circa il detector, tuttavia si deve ancora decidere quale delle due verrà impiegata. A sinistra il detector presenta un solenoide e un dipolo apposito per FTCT, mentre a destra sempre un solenoide in aggiunta a due dipoli.

In figura 1.26 sono rappresentate le possibili scelte circa magnete superconduttivo. La prima configurazione (sinistra) consiste di un solenoide a spirale di lunghezza 7.5 metri con spire additive nella parte finale, le quali consentono un aumento del 50% della densità di corrente. Il secondo (destra) presenta un solenoide centrale lungo 2 metri con un magnete di dipolo per ogni estremità. Questa ultima configurazione garantirebbe, grazie ai dipoli, un miglioramento nel range di rapidità $2 < \eta < 4$ nella spettroscopia degli impulsi, oltre ad una installazione e manutenzione dei detectors meno difficoltosa.

¹⁵era uno dei quattro grandi rivelatori sul **LEP** (large collider electron proton) il quale fu sostituito nel 2000 da LHC. Tuttavia il magnete L3 è rimasto nella caverna.

¹nota a piè pagina: fu introdotto nel 2006 e ALICE operò in questa configurazione anche per la run 3 e 4

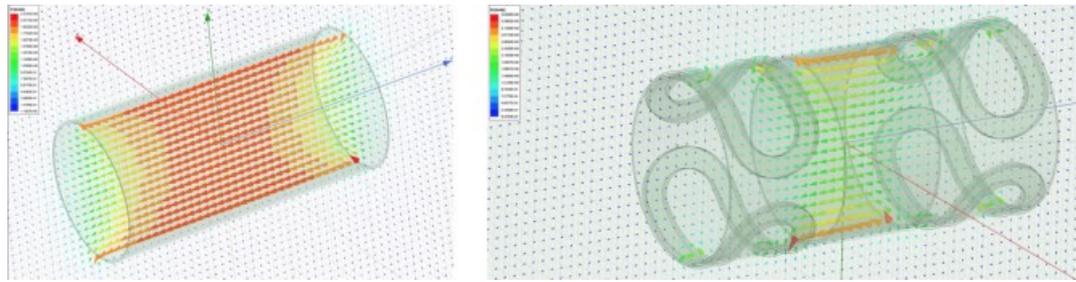


Figura 1.26: i magneti operano con un campo magnetico fino a 2 T per bassi valori di η , mentre per alti η il valore di campo integrale decresce fino a 1 T m.

La scelta circa quale delle due configurazioni impiegare comporterà eventuali differenze in merito alla risoluzione dell'impulso, come mostrato in figura 1.27 nel caso di un muone con $p_T = 1$ GeV/c. Si noti come, nel caso in cui si abbia un sistema costituito unicamente dal solenoide, la risoluzione tenda a diminuire al crescere della rapidità; contrariamente, nel caso in cui venga realizzata una configurazione solenoide e dipoli, si osserva una bassa risoluzione per $\eta = 4$ con un deterioramento nel range $1.2 < \eta < 2.2$

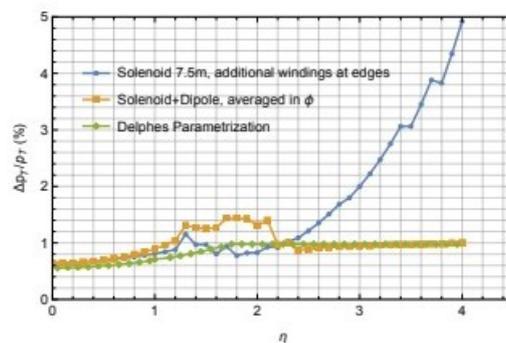


Figura 1.27: Rappresentazione della variazione di risoluzione in funzione dell'aumento di η . La curva blu è rappresentativa del solenoide, mentre quella arancione del sistema solenoide e dipoli.

Capitolo 2

I sensori a semiconduttore

2.1 Il diodo

Il diodo è una giunzione p-n polarizzata direttamente o inversamente, come mostrato in figura 2.1. Come si osserva, la diversa polarizzazione restringe o allarga la depletion region. L'andamento della densità di carica, del campo elettrico e del potenziale vicino alla giunzioni sono riportati in figura 2.2.

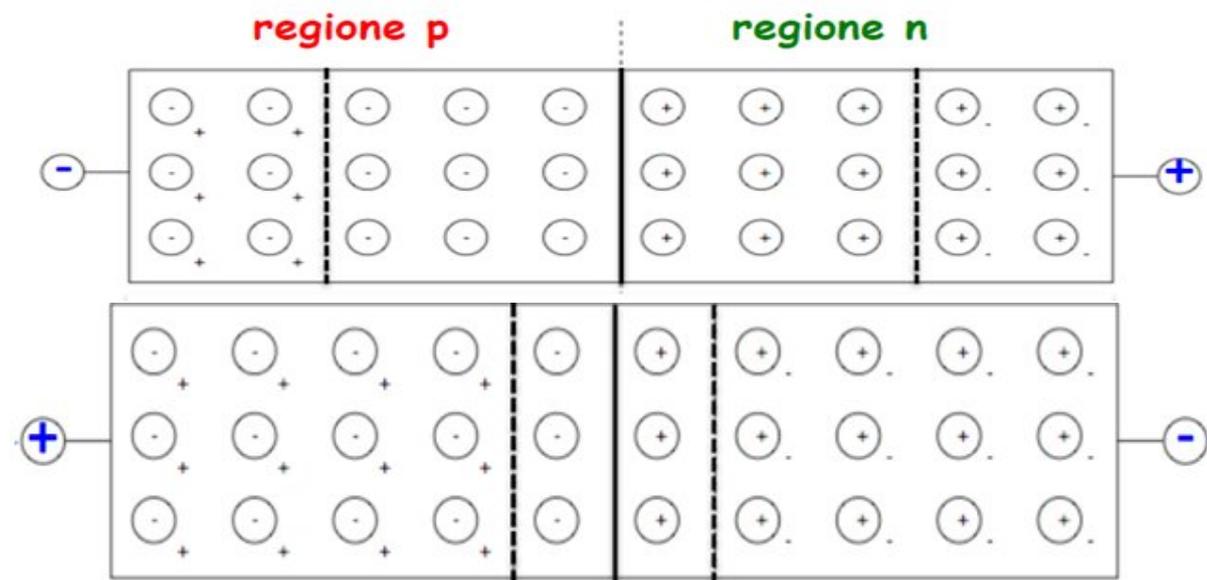


Figura 2.1: Rappresentazione schematica di una giunzione p-n polarizzata inversamente (in alto) e direttamente (in basso).

La relazione tra tensione e corrente tipica del diodo è data dalla legge della giunzione o **legge di Shockley** $I = I_0(e^{V_D/\eta V_T} - 1)$ e la sua caratteristica IV tipica è riportata in 2.3:

- La corrente è positiva quando il diodo è **polarizzato direttamente**, in quanto la tensione applicata V_D è positiva (corrente diretta da p a n);
- Viceversa, I e V_D sono negativi quando il diodo è **polarizzato inversamente** (la corrente è diretta da n a p).

Inoltre, la tensione cresce esponenzialmente dopo un certo valore positivo di tensione V_γ , denominato **tensione di soglia**, che nel caso del Silicio vale $V_\gamma=0.6$ V, mentre nel

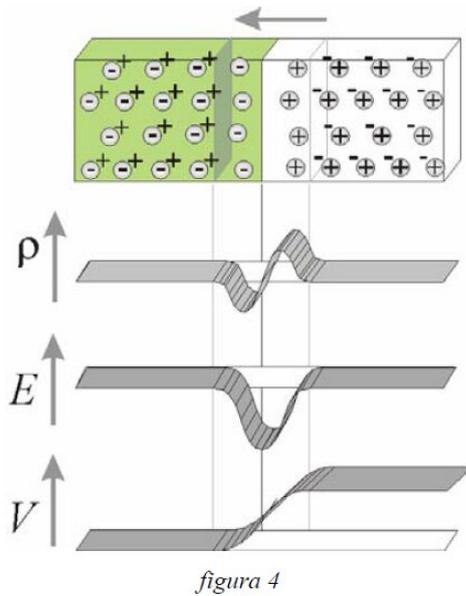


Figura 2.2: andamento della densità di carica, del campo elettrico e del potenziale nella giunzione.

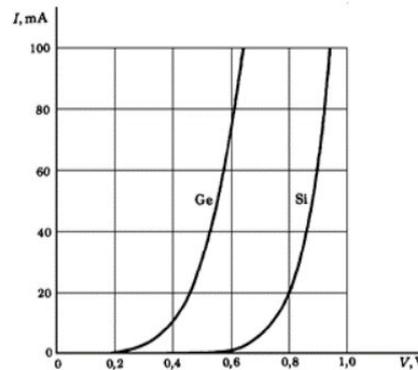
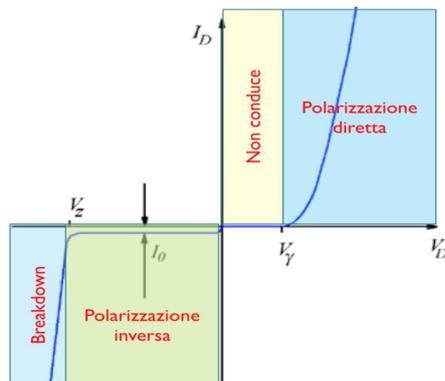


Figura 2.3: a sinistra, tipica caratteristica di un diodo: la corrente cresce esponenzialmente dopo un certo valore di tensione, detto di soglia, ed è negativa quando il diodo è polarizzato inversamente; a destra, confronto tra la tensione di attivazione di germanio e silicio.

caso del Germanio $V_\gamma = 0.2$ V. Viceversa, quando la tensione diventa sempre più negativa si raggiunge un punto in cui la corrente inversa comincia ad aumentare in modo estremamente rapido. Si raggiunge in questo modo il **breakdown** o **rottura del dielettrico** che avviene ad una tensione caratteristica V_{BD} . Ci sono due diversi fenomeni alla base del breakdown, graficamente mostrati in figura 2.4:

- **Moltiplicazione a valanga:** i portatori minoritari sono accelerati dal campo elettrico, che è sufficientemente forte da fornire ai portatori, tra due urti consecutivi, abbastanza energia cinetica da rompere un legame covalente. Ogni nuovo portatore prodotto partecipa conseguentemente al processo, dando vita ad un fenomeno di moltiplicazione. La V_{BD} cresce con la temperatura perché aumenta la frequenza degli urti con gli ioni del reticolo, mentre il libero cammino medio e l'energia cinetica acquistata tra due urti diminuiscono. Il fenomeno è tipico di semiconduttori a basso drogaggio, inferiore a 10^{16} atomi/cm³ e la V_{BD} è solitamente superiore ai 10 V.
- **Effetto Zener:** in questo caso si ha la rottura spontanea di legami covalenti per effetto del campo elettrico presente nella depletion region e conseguente creazione di una grande quantità di coppie elettrone-lacuna. La V_{BD} diminuisce con

l'aumentare della temperatura perché diminuisce l'energia necessaria per rompere i legami covalenti. È un fenomeno tipico di materiali fortemente drogati (10^{18} atomi/cm³) e la V_{BD} è solitamente inferiore a 10 V.

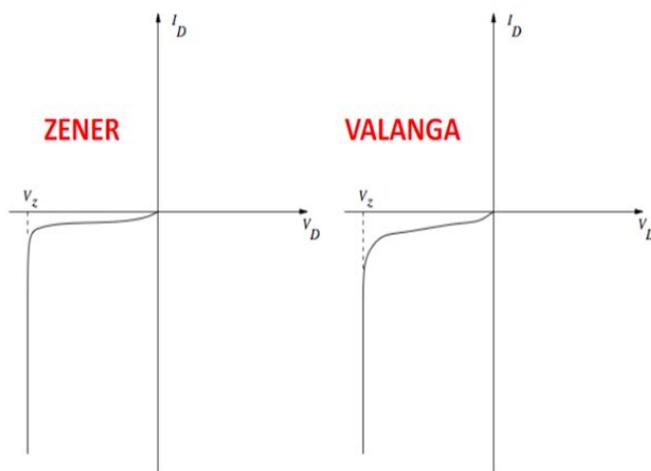


Figura 2.4: rappresentazione dei due fenomeni che causano il breakdown: effetto Zener e effetto a Valanga; Il meccanismo a valanga comporta una certa dipendenza della corrente inversa di saturazione dal valore della tensione di polarizzazione che corrisponde all'aumento di energia cinetica con la tensione applicata. Il meccanismo alla Zener impone una rigorosa costanza della corrente inversa fino alla $V_z = V_{BR}$, punto in cui la corrente cresce rapidamente di diversi ordini di grandezza.

2.2 Detector a semiconduttore

È un rivelatore a semiconduttore (Germanio o Silicio) di fotoni o particelle cariche utilizzato soprattutto per la radioprotezione, per la spettrometria a raggi γ o a raggi X e per il tracciamento di particelle cariche.

2.2.1 I detector al Silicio

I detectors al silicio sono un insieme di diodi **polarizzati inversamente** che segnalano il passaggio di una particella carica attraverso una piccola **corrente inversa** che può essere misurata; lo strato dopato solitamente è di $100 \mu\text{m}$. Rispetto ai vecchi rivelatori (la Wilson Cloud Chamber e Multi - Wire Proportional Chamber)¹ permettono di ottenere risoluzioni spaziali migliori tali da averli sostituiti in tutti gli esperimenti in cui la densità di particelle cariche è estremamente elevata. Tuttavia, hanno costi elevati e sono sensibili ad invecchiamento causato dalle radiazioni, caratteristiche su cui si concentrano le attività di ricerca.

Un aspetto importante di un rivelatore al silicio è la cosiddetta passivazione, realizzata utilizzando l'**ossido di silicio** (SiO_2), un materiale puro e stabile che isola il silicio. Per evitare che il silicio ossidi a contatto con l'ossigeno, si utilizza tale ossido per ricoprire la superficie; inoltre, questo processo evita la formazione di difetti superficiali e impedisce all'ossidazione di propagarsi oltre il primo strato atomico. Questo materiale

¹WCC è un rivelatore di particelle sub-atomiche, si compone di una scatola ermetica riempita di aria satura di vapore acqueo collegata da un condotto ad un cilindro con pistone e annessi alla struttura due contatori Geiger. Quando la particella attraversa la camera, ionizza gli atomi del gas. Per rivelare il percorso della particella, si fanno condensare gli ioni lasciati dalla particella formando una scia di bolle di liquido. Invece, MWPC è una camera proporzionale (camera a ionizzazione modificata) utilizzato per la detezione di particelle cariche ad energie elevate. Questo rivelatore è costituito da tantissimi fili(alimentati in tensione positiva/anodo) allineati tra due piani metallici (messa a terra/catodo), tra di loro equidistanti e paralleli. Ogni filo è un contatore proporzionale.

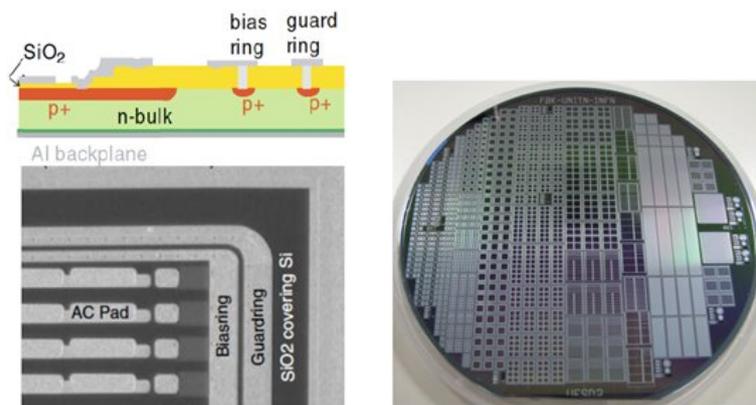


Figura 2.5: a sinistra, rappresentazione di un pixel; a destra la rappresentazione del sensore.

è inserito tra il silicio e gli elettrodi in alluminio anche per eliminare eventuali correnti parassite. Ogni detector è diviso in strutture chiamate **pixel** per ottimizzare la risoluzione spaziale del segnale, come mostrato in figura 2.5. Altre componenti fondamentali sono:

- **Bias ring:** I diodi sono polarizzati mediante una tensione applicata su un anello detto bias ring che circonda l'area attiva e assicura una tensione uniforme per diversi pixel.
- **Guard Ring:** Un ulteriore anello, detto guard ring è disposto esternamente al primo per stabilizzare il campo elettrico nei pixel e proteggerli da effetti di interferenza.

Se utilizzati come fotorivelatori, i sensori al silicio sono sensibili a lunghezze d'onda comprese tra 150nm e 1100nm. Considerando una radiazione incidente di fotoni possiamo distinguere i seguenti casi:

- Il fotone ha energia **inferiore all'energia di gap** (circa 1.12 eV) dunque può essere assorbito solo da elettroni liberi;
- Il fotone ha energia **superiore all'energy gap ma inferiore al valore di soglia (3.6 eV) per la creazione di una coppia elettrone lacuna:** tale creazione richiede l'utilizzo di un fonone ad alto impulso, per cui la probabilità di assorbimento è bassa. La probabilità aumenta al crescere dell'energia del fotone incidente;
- L'energia della radiazione incidente è **superiore a 3.6 eV** la transizione avviene direttamente e la lunghezza d'onda corrispondente è superiore 344 nanometri.

Quanto descritto sino ad ora circa l'assorbimento è riportato in figura 2.6.

Funzionamento di un rivelatore

La radiazione incidente ionizzante è misurata attraverso il numero di portatori liberi di carica nel materiale che è collocato tra due elettrodi: la radiazione rilascia energia per la produzione di elettroni e lacune liberi. Il numero di coppie prodotte dipende dalla radiazione incidente: essa eccita il materiale, cioè fa sì che alcuni elettroni passino alla banda di conduzione lasciando nella banda di valenza delle lacune. Si forma quindi

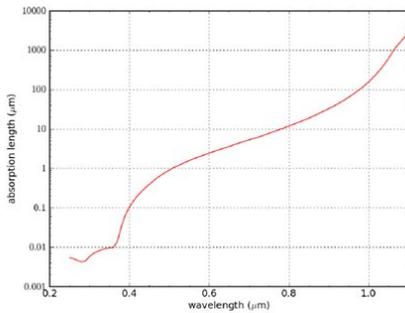


Figura 2.6: All'aumentare della λ può succedere che la radiazione attraversi l'intero spessore (circa $100\mu\text{m}$) senza essere assorbita, contrariamente al diminuire di λ , il fotone è immediatamente assorbito e i portatori di carica hanno una brevissima vita media.

una corrente tra i due elettrodi, misurabile mediante un circuito esterno² e descritta dal teorema di **Shockley-Ramo**³; anche il moto delle lacune, che avviene in direzione opposta, è misurabile. Essendo nota l'energia per creare una coppia elettrone-lacuna, misurando il numero di coppie create è possibile ricavare l'energia della radiazione incidente.

L'Avalanche Process

Si tratta di un processo caratteristico dei detector al silicio che possiedono un **gain layer** (come ad esempio LGAD o SiPM) drogato p^+ , ulteriori spiegazioni sono fornite nel sottocapitolo 2.3. Quando un fotone o una particella carica colpisce il detector, rilascia energia che viene assorbita da un elettrone del materiale: esso si libera e crea una lacuna; il campo elettrico mette in moto la coppia, con i due portatori di carica che prendono direzioni opposte. Esse vengono accelerate dal campo elettrico producendo fotoni che vengono a loro volta assorbiti da altri elettroni, alimentando quindi il processo. Per campi elettrici non troppo elevati, il fenomeno è controllabile e non induce danneggiamenti al sensore. Tale processo è descrivibile mediante il primo coefficiente Townsend α [11], ed è inversamente proporzionale al libero cammino medio degli elettroni primari:

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_{path}} = N\sigma$$

dove N è il numero di coppie create, λ_{path} è il libero cammino medio e σ la sezione d'urto. Il coefficiente fornisce anche la probabilità di creazione di una coppia $e^- - h$ per unità di libero cammino medio. Tale fenomeno è alla base del funzionamento degli **SPAD**, fotodiodi che vengono messi in parallelo per costituire il detector. Il guadagno di uno SPAD è definito come il numero di cariche generate per evento dall'effetto a valanga e si calcola come il rapporto tra la carica totale coinvolta nel processo e la carica elementare, e tipicamente è dell'ordine di $10^5/10^7$ (non necessitano di amplificazione).

2.3 Low Gain Avalanche Detector

Sono una nuova generazione di sensori al silicio studiati per ottenere una **buona risoluzione spaziale** insieme ad una elevata **risoluzione temporale**; ciò è garantito da uno strato altamente drogato sotto alla giunzione p-n che assicura un segnale veloce e ampio con una bassa soglia di rumore. Essi sono pensati per lavorare in ambienti

²La banda di conduzione è una banda di anti-legame per cui gli elettroni sono liberi di muoversi all'interno di essa.

³ $i_i = q \cdot v(t) \cdot E_{pi}$ dove i_i è la corrente indotta su un elettrodo, q è la carica, v è la velocità della particella ed E il campo elettrico.

altamente radioattivi e la nuova sfida consiste nel renderli in grado di sopportare dosi di radiazione sempre maggiori.

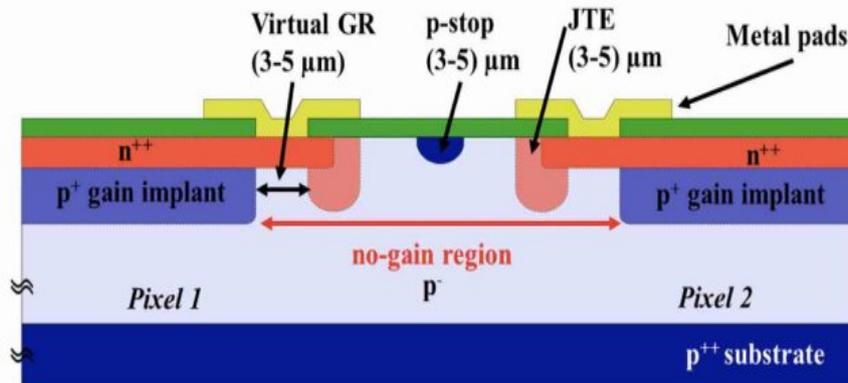


Figura 2.7: Tipica struttura di un LGAD.

La tipica struttura di un LGAD è riportata in 2.7: lo strato p^+ è detto **strato di guadagno**, è solitamente drogato con atomi di boro ed è il punto in cui avviene la moltiplicazione a valanga, mentre l'assorbimento dei fotoni incidenti ha luogo nello strato p^- ; nello strato superiore del sensore troviamo un **virtual Guard Ring (VGR)** e una **Junction Termination Extension (JTE)** [12] per impedire che si verifichino breakdown precoci e per garantire una distribuzione uniforme del campo elettrico. Queste due regioni coprono un'area del sensore in cui il guadagno è inesistente, detta appunto **no-gain region**. I pad sono elettricamente isolati da un anello drogato p^+ chiamato p-stop, che separa gli stati n^{++} evitando la diffusione dei portatori di carica nei pads confinanti. Per evitare le ossidazioni e riflessioni inopportune, il tutto è ricoperto da uno strato di **diossido di silicio** SiO_2 e di **nitruro di silicio** Si_3N_4 . La presenza dello strato drogato p^+ vicino alla giunzione p-n garantisce un'amplificazione del campo elettrico tale che le cariche accelerate creino un effetto a valanga. In un normale detector al silicio, per ottenere l'effetto a valanga bisogna applicare altissime tensioni che danneggerebbero inevitabilmente il sensore; lo strato p^+ invece permette di avere tale fenomeno a tensioni minori, perché crea un campo elettrico locale che induce la foto-produzione a valanga nella regione tra lo strato drogato n^{++} e la regione di guadagno. Distinguiamo quindi due zone con campi elettrici diversi, come mostrato in figura 2.8:

- vicino alla giunzione il campo elettrico è molto intenso (300 kV/cm);
- nella regione attiva, invece è più basso e uniforme, dell'ordine 30 kV/cm.

Gli LGADs sono utilizzati soprattutto per **rivelare particelle cariche**, utilizzando il minor guadagno possibile per permettere misure temporali sufficientemente accurate per una singola particella; in questo modo si riescono a ridurre il rumore, che è proporzionale al guadagno, le difficoltà di segmentazione, l'interazione tra pads e i tempi morti, poiché le lacune non si moltiplicano essendo più lente [13]. Il valore di corrente associato al guadagno è dato dalla legge di Ramo:

$$di_G = dN_G \cdot q \cdot v \cdot \frac{1}{d} \propto \frac{G}{d} \cdot dt$$

che porta all'espressione:

$$\frac{di_G}{dt} \propto \frac{G}{d}$$

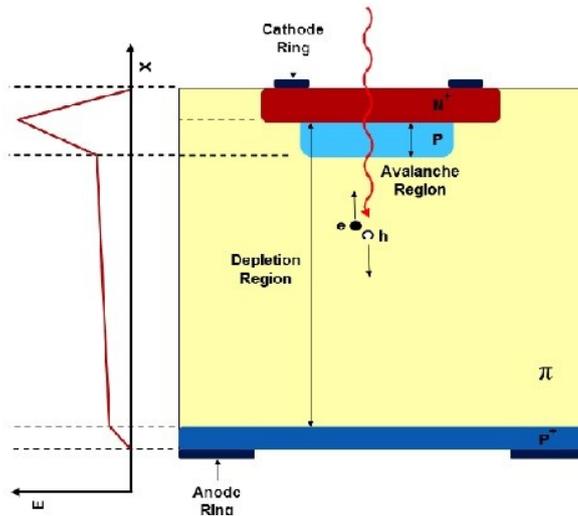


Figura 2.8: Rappresentazione schematica della struttura di un LGAD affiancata al grafico di campo elettrico.

La derivata temporale della corrente quindi è proporzionale al guadagno sullo spessore dello strato. Per mantenere un **guadagno** di 10/20 il sensore non può essere troppo sottile, altrimenti cresce la capacità e il segnale diventa troppo basso per essere misurato. Gli LGADs sono ottimizzati per possedere una eccellente risoluzione temporale e spaziale. Infine, in figura 2.9 sono riportate due simulazioni sul jitter.

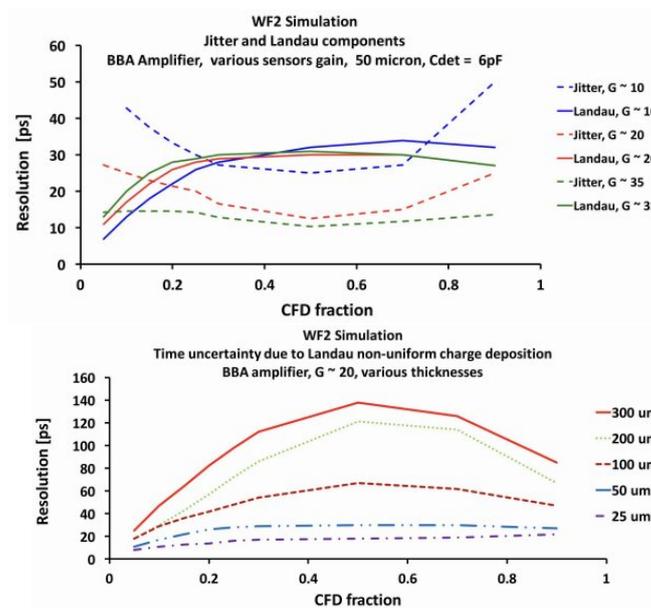


Figura 2.9: Simulazioni sul jitter e sul rumore di Landau in funzione del Constant Fraction Discriminator (CFD): il contributo del jitter è maggiore agli estremi del segnale mentre la forma del segnale è meno piccata per bassi segnali. Le fluttuazioni di Landau sono minimizzate per sensori sottili ma sono indipendenti dal guadagno.

Le applicazioni degli LGAD:

La precisione sia spaziale che temporale di questi sensori li rende adatti a molte applicazioni.

- **Particle identification:** la tecnica del TOF permette di distinguere particelle che hanno un impulso sotto pochi GeV e consiste nella misura del tempo di volo di una particella su un tragitto di lunghezza L nota così da ricavarne la velocità $v=L/t$. La velocità e l'impulso restituiscono la massa della particella attraverso la relazione:

$$m = \frac{p}{c} \cdot \sqrt{\left(\frac{t \cdot c}{L}\right)^2 + 1}$$

a cui dobbiamo associare un'incertezza

$$\frac{\delta m}{m} = \sqrt{\left(\frac{\delta p}{p}\right)^2 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \gamma^2 \cdot \left(\frac{\delta t}{t}\right)^2}$$

- **Tracciamento 4D:** è un tipo di tracciamento utilizzato nelle collisioni ad alta energia dove gli eventi sono di altissima luminosità; nel tracciamento di una traiettoria, infatti, conoscere la posizione sia spaziale che temporale di una particella è fondamentale per distinguerla dal fondo. Il tracciamento temporale è utile per separare eventi con vertici sovrapposti e sfruttare quindi a pieno le potenzialità dei nuovi sistemi di collisione a maggior luminosità. Il processo di ricostruzione è riportato in figura 2.10.

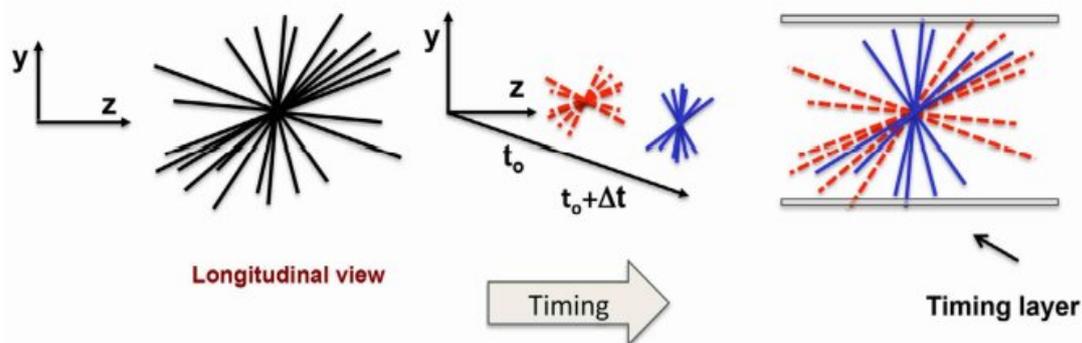


Figura 2.10: Schema del processo di ricostruzione della posizione temporale e spaziale

- **PET (Positron-Electron Tomography):** è un tipo di indagine radiografica basata sul decadimento β^+ di un radiofarmaco iniettato al paziente; il positrone emesso nel decadimento annichila con un elettrone presente nel tessuto dando vita a una coppia di fotoni che viaggiano in direzioni opposte. Essi sono raccolti da due rivelatori: maggiore è la risoluzione spaziale e temporale dei due maggiore sarà la precisione con cui viene ricostruito il vertice e quindi è possibile individuare il punto esatto in cui è avvenuto il decadimento.
- **Adroterapia:** questi sensori sono molto utilizzati per il conteggio di singola particella. Sono impiegati in adroterapia per monitorare l'intensità dei fasci terapeutici, in quanto il conteggio del numero di adroni coinvolti permette di stimare la dose energetica del fascio.
- **3D e Robotic Vision:** la ricostruzione della riflessione della luce da parte di oggetti a distanza ignota è alla base dell'imaging 3D fondamentale in molte applicazioni, come la visione robotica.

Capitolo 3

Misure su LGAD

In questo capitolo sono stati riportati i risultati ottenuti da una analisi sperimentale effettuata sui dei sensori al silicio (LGAD) al fine di valutarne il corretto funzionamento e le proprietà elettriche. Nel primo paragrafo sono stati analizzati i campioni considerati per l'attività sperimentale, descritta invece nel secondo paragrafo. Nel terzo sono stati presentati i risultati ottenuti e i metodi di approccio sperimentale impiegati per l'estrazione delle informazioni fisicamente rilevanti.

3.1 Caratteristiche degli LGAD analizzati

Nell'esecuzione della prova sono stati studiati LGADs. molto sottili appartenenti alla recente produzione UFSD3.2. Questi campioni sono stati realizzati da FBK (Fondazione Bruno Kessler) e si tratta dei modelli prototipo da $25 \mu\text{m}$ e $35 \mu\text{m}$ di spessore. Sono stati analizzati 22 campioni, suddivisi in due raggruppamenti in base al wafer di produzione: sono stati analizzati 11 campioni di W6 ($35 \mu\text{m}$) e 11 di W5 ($25 \mu\text{m}$). All'interno di questi due raggruppamenti è possibile fare un'ulteriore divisione sulla base della configurazione differente:

- 6 **LGAD-PIN** per entrambi i raggruppamenti;
- 5 **matrici 2x2** di LGADs per entrambi i raggruppamenti.

I campioni sottoposti all'esperienza in laboratorio sono raccolti in questa tabella, suddivisi per wafer di produzione e configurazione:

W5		W6	
LGAD-PIN	Matrici 2x2	LGAD-PIN	Matrici 2x2
4-2	6-1	5-5	6-5
5-2	7-1	6-5	7-5
7-5	8-1	7-5	8-5
8-5	9-1	8-5	9-5
9-5	10-1	9-5	10-5
10-5		10-5	

Tabella 3.1: I due numeri servono ad identificare il campione all'interno del wafer di produzione: si definiscono dapprima le colonne (primo numero) e successivamente le righe (secondo numero).

Configurazione LGAD-PIN

Partendo dalla figura 3.1 è possibile definire LGAD (pad a sinistra) e PIN (pad a destra) di area $1 \times 1 \text{ mm}^2$: entrambi sono circondati da un **Bias Ring** (BS), sui cui viene applicata una differenza di potenziale, e da 4 **Guard Rings** (GR) concentrici fra loro e rispetto al BS. Il PIN ha la stessa struttura e forma del LGAD, ma è privo di uno strato di guadagno.

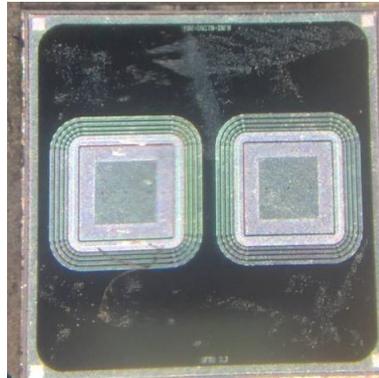


Figura 3.1: Nell'immagine è riportato un esempio di campione a configurazione LGAD-PIN. Il campione così disposto è da definirsi "dritto", cioè è possibile individuare univocamente LGAD e PIN.

Configurazione matrice 2x2 LGAD

Si tratta di una matrice di 4 LGADs, che vengono differenziati in base alla loro posizione. La struttura prevede che ci siano 4 pads, ognuno di area $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$, circondati da un unico bias ring comune a tutti i 4 pads e concentrico ad 4 guard rings, a loro volta, come nel caso precedente, concentrici fra loro, come mostrato in figura 3.2. Le matrici trattate nelle misure sono di **type 4**. Il type è un parametro legato alla presenza di un eventuale interstizio di bias ring fra ogni pad: nel type 4 è assolutamente assente, come si evince dalla foto 3.3.

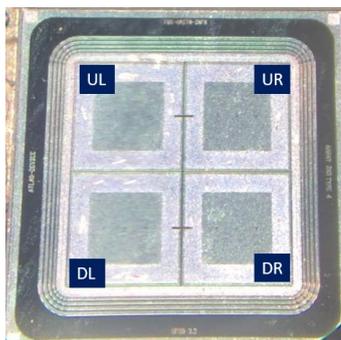


Figura 3.2: Nell'immagine è riportata una matrice di 4 LGADs a titolo esemplificativo. L'orientamento del sensore è scelto convenzionalmente in modo da poter distinguere i 4 elementi di matrice in base alla loro posizione utilizzando le coordinate up, down, right, left.

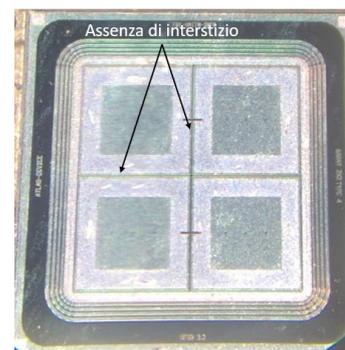


Figura 3.3: Nell'immagine è riportato un esempio di tipologia 4, in cui l'interstizio tra i 4 pads è completamente assente. I campioni analizzati sono tutti di questo tipo, ma esistono anche altre tipologie in cui l'interstizio è visibile.

3.2 Apparato sperimentale

L'esperienza di laboratorio consiste in una valutazione del corretto funzionamento dei sensori attraverso la realizzazione di una caratteristica **IV** e una **CV** e l'estrazione di parametri come ad esempio la tensione di breakdown.

3.2.1 Caratteristica IV

L'obiettivo di questa prima parte di prova consiste nella misura della corrente interna al sensore in funzione della differenza di potenziale applicata ai suoi elettrodi (caratteristica IV) con conseguente estrazione della **tensione di breakdown**. Si tratta quindi di fornire al sensore una polarizzazione inversa in modo da realizzare la porzione di grafico nel terzo quadrante del piano della caratteristica del diodo, ed essere in grado quindi di osservare il comportamento del sensore nell'intorno del punto critico. I sensori utilizzati sono molto piccoli, molto sottili, di conseguenza molto delicati, per tanto tutte le misure vengono effettuate attraverso una Probe Station, mostrata in figura 3.4: è dotata di un microscopio che consente il piazzamento del sensore e di un sistema di aspirazione che mantiene il device in posizione. La probe station è impiegata anche per effettuare il collegamento elettrico tra gli LGAD.

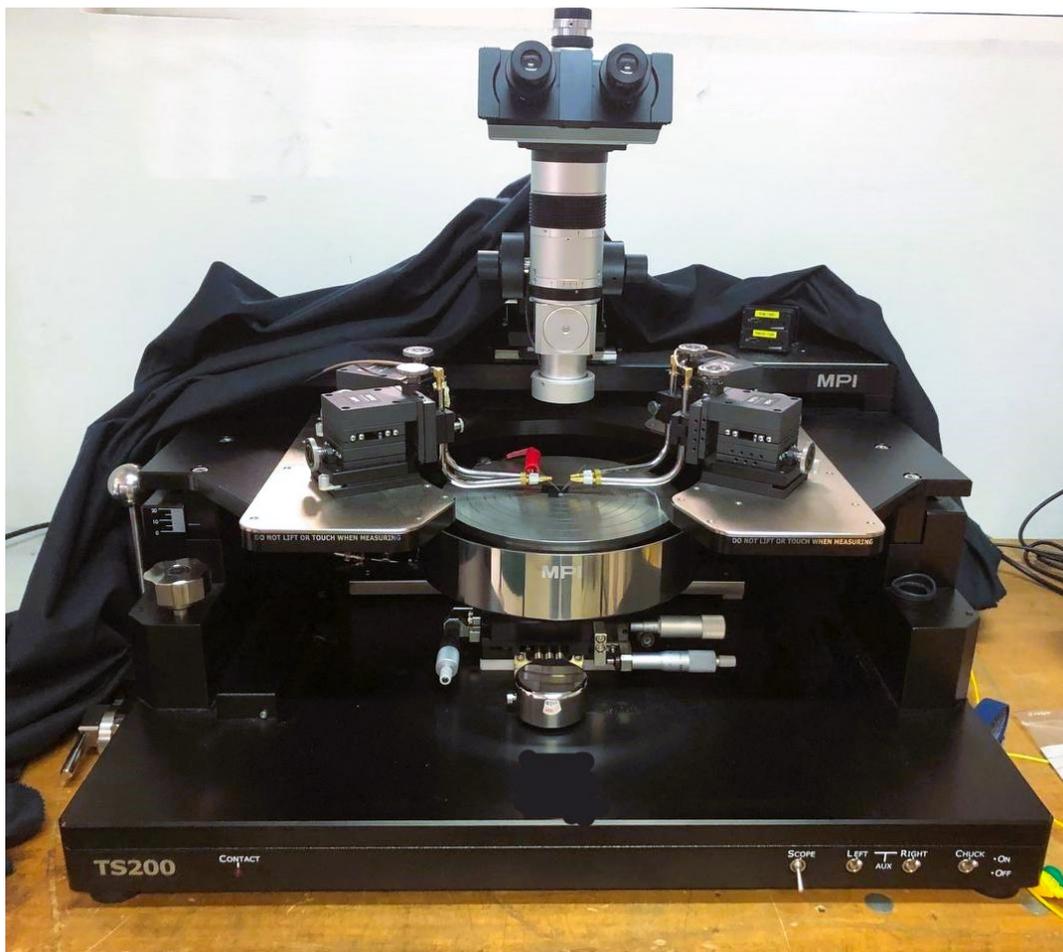


Figura 3.4: Setup sperimentale per la misura della caratteristica IV. Il sensore è collocato sul chuck e connesso elettricamente attraverso quattro spilli, ciascuno posizionato attraverso un marcatore.

Si colloca il sensore sul chuck, contrassegnato dal numero 1 in figura 3.5, in modo tale che il backplane drogato p sia appoggiato al piano, poi si usano degli spilli (2),

sorretti da altrettanti marcatori (3) (2 per la configurazione LGAD-PIN, 4 per le matrici 2x2) per puntare le zone di interesse a seconda della misura. Una tensione negativa viene applicata al chuck attraverso un alimentatore CAEN, mentre gli spilli sono posti a massa in modo tale che il sensore risulti polarizzato inversamente.

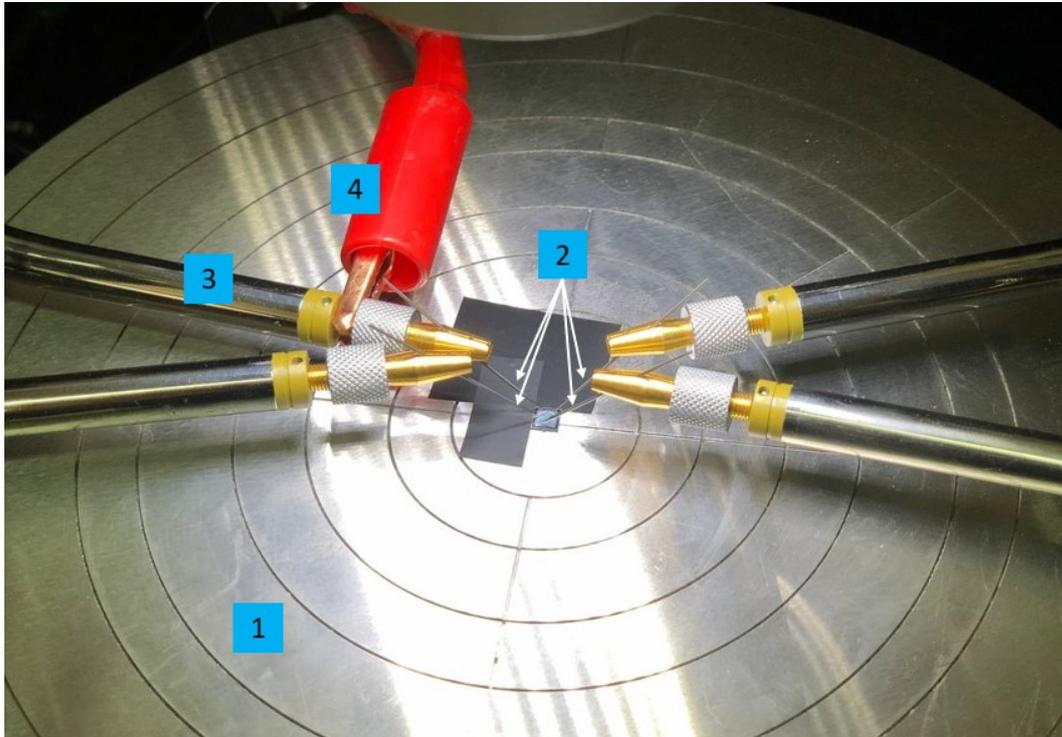


Figura 3.5: Fotografia della postazione da un altro punto di vista. L'elemento numero 3 è la parte terminale dei marcatori, la cui forma è osservabile in figura 3.4. Il sensore poggia sul chuck, elemento numero 1, ed è "toccato" dagli spilli, elemento numero 2.

Uno degli spilli, quello utilizzato per la misura, viene connesso attraverso il cocco-drillo rosso (4) all'ampmetro come si può osservare in figura 3.5, ed è utilizzato per registrare la corrente. Tutte le misure sono state effettuate in condizioni di buio, cioè ottenute coprendo l'intera probe station con un telo nero, visibile in figura 3.4. Contemporaneamente ai test si affiancano anche delle misure di umidità e temperatura dell'ambiente circostante in quanto fattori che influenzano le caratteristiche IV. Tutti gli strumenti sono controllati in modo remoto tramite un programma LabView, attraverso il quale, vengono impostati tutti i parametri necessari per la misura, inclusi il range in cui la misura deve essere fatta e gli step di voltaggio e di tempo tra i punti acquisiti. All'inizio di ciascuna misurazione il programma permette di impostare anche diversi parametri di protezione sul voltaggio e sulla corrente massima alla quale è possibile arrivare per evitare di danneggiare il sensore.

I passaggi per ottenere la caratteristica sono esplicitati di seguito nel testo, differenziati per tipo di sensore.

Configurazione LGAD-PIN

Come mostrato in figura 3.6 si usano solamente due spilli, quello con cui viene effettuata la misura posto a contatto con il pad e l'altro a contatto con il Guard Ring (GR) in modo da ottenere un campo elettrico uniforme anche sui bordi della zona in cui è presente lo strato di guadagno. Successivamente gli spilli vengono scambiati e la misura

viene ripetuta per poter osservare anche l'andamento della corrente relativa al GR. Questo vale anche per una eventuale misura sul PIN. Supponendo di voler acquisire anche una caratteristica per il PIN, le misure da fare sono esattamente 4: partendo da una acquisizione su LGAD si colloca lo spillo connesso all'amperometro sul pad (acquisisco la caratteristica del LGAD), mentre l'altro su GR, poi si inverte (acquisisco la caratteristica del GR). Re-itero il procedimento con il PIN ottenendo le curve IV del PIN e del suo GR.

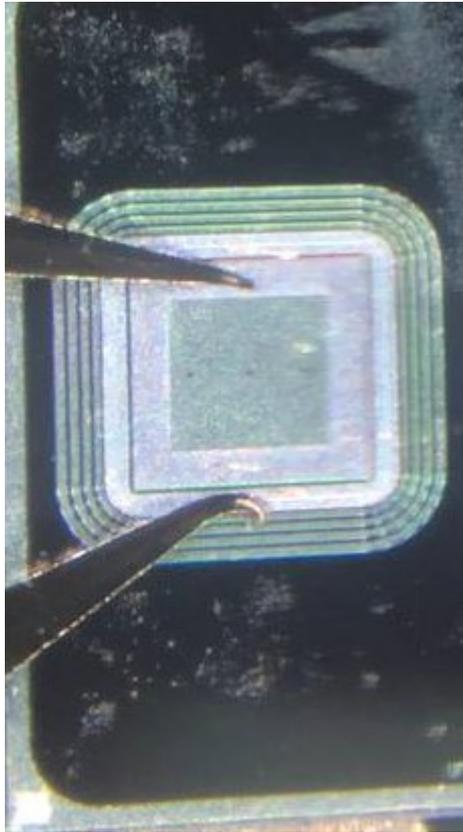


Figura 3.6: Fotografia al microscopio del posizionamento degli spilli su di un LGAD per l'acquisizione dei dati. In questo caso, anche se non è possibile vederlo, lo spillo connesso all'amperometro punta sul pad, mentre l'altro sul GR.

In questa configurazione descritta, per costruzione, ogni pad è in parallelo con il proprio GR, per cui la misura non né alterata né fermata da ulteriori pad, come accade per le matrici, inoltre sono rari i casi in cui il GR attivi le misure di protezione prima del pad stesso. Dalle misure effettuate sui PIN è stato osservato invece, che per questo particolare layout di sensore, in diversi prototipi, il GR ha raggiunto il breakdown ad un voltaggio minore rispetto al pad, attivando le misure di protezione e non permettendo così di osservare breakdown del pad.

Matrici 2x2

Il procedimento è simile, la differenza è che si usano 4 spilli e che esiste un GR unico per i 4 pad, come mostrato in figura 3.7. In questo caso vengono effettuate 5 misure: una per ogni pad più quella su GR. Si colloca lo spillo connesso all'amperometro su uno dei 4 pad (nominati per comodità Up Left UL, Up Right UR, Down Left DL, Down Right DR), mentre due dei tre rimanenti sono collocati sui pad adiacenti (lasciando scoperto il pad opposto a quello su cui viene fatta la misura) e l'ultimo sul GR. Si ruota

il sistema 3 volte in modo da acquisire tutte le caratteristiche. Successivamente si inverte lo spillo connesso all'amperometro con quello connesso al GR. Per realizzare i contatti, come quelli che si avrebbero attaccando il sensore ad una scheda elettrica, servirebbero 5 spilli. Lasciando floating il pad opposto a quello misurato, si arriva però in una condizione in cui il campo elettrico sul pad misurato può essere considerato totalmente uniforme.

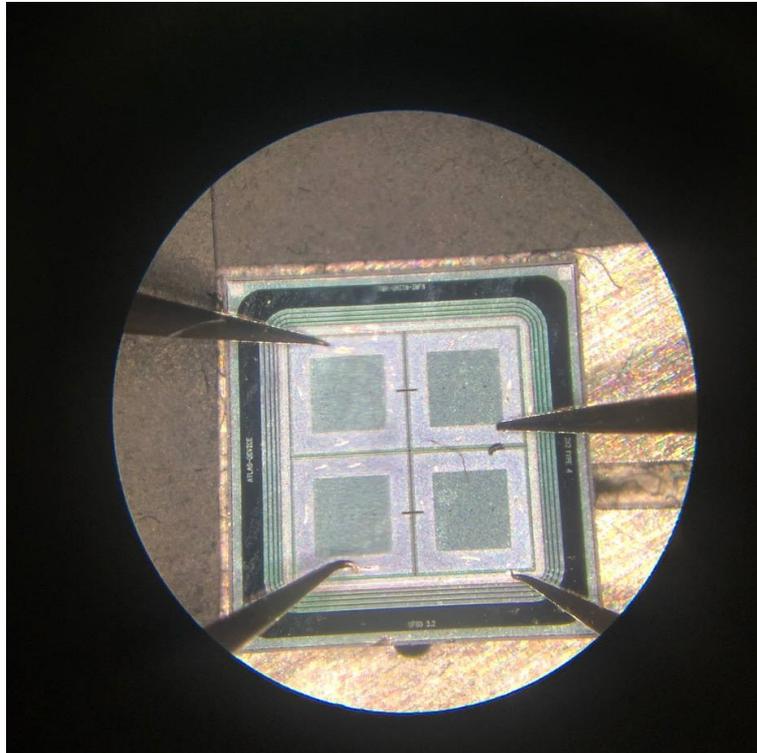


Figura 3.7: Fotografia al microscopio del posizionamento degli spilli su di una matrice per l'acquisizione dei dati. In questo caso, anche se non è possibile vederlo, lo spillo connesso all'amperometro punta sul pad UL, mentre non viene toccato il pad DR poiché il quarto spillo è impiegato nel contatto con il GR. Gli altri due spilli invece puntano i pad UR e DL.

Nel caso ideale tutti e 4 i pad, avendo le stesse caratteristiche, raggiungono il breakdown al medesimo valore di potenziale, al netto di incertezze. I 3 pad sono fra loro in parallelo e in parallelo con il GR¹. Ciò implica che il primo che arriva alla soglia di breakdown farà sì che si attivi il parametro protettivo sul limite di corrente massima (solitamente il GR ha una soglia di BD elevatissima, per cui sono i pad ad attivare le soglie di protezione). La misura quindi viene fermata, per evitare danneggiamenti del sensore; ciò permette di osservare il breakdown di tutti i pad solo quando essi sono perfettamente uniformi.

¹la corrente complessiva è la somma di tutte le correnti.

Strumentazione

In questo sottoparagrafo è stata riportata una rappresentazione schematica del generatore impiegato, figura 3.8, che serve a fornire tensione oltre i 100 V in modo costante ed uniforme mediante step in tensione fissi. Inoltre, è presente una immagine dell'amperometro, figura 3.9, impiegato per l'acquisizione dei dati e connesso in modo remoto al programma LabView, fornendo i risultati delle misure al variare della tensione.



Figura 3.8: Per specifiche: CAEN.



Figura 3.9: Per specifiche: Keithley 6487.

3.2.2 CV

L'obiettivo di questa seconda parte di prova consiste nella realizzazione della caratteristica capacità-tensione CV; questa curva contiene intrinsecamente delle informazioni utilissime come la tensione di **svuotamento dello strato di guadagno** e del sensore e il **profilo di doping**. Le misure sono state effettuate prevalentemente fino a 40 V, limite legato al setup utilizzato; alcune misure sono poi state ripetute arrivando a tensioni più alte modificando il setup in modo da applicare il voltaggio al sensore aggiungendo un alimentatore esterno. Difatti, per le misure di capacità viene utilizzato un impedenziometro ² capace di generare fino a 40V di tensione da solo; per raggiungere tensioni più alte, sono stati aggiunti 2 generatori Z100-8-TDK-LAMBDA. L'alimentazione del sistema circuitale è identica al caso descritto nelle IV 3.2.1, poiché il sensore è polarizzato inversamente. Si usano solamente due spilli questa volta, uno dei due connesso con l'Impedance Analyzer. Il programma anche in questo caso impone dei vincoli nel momento in cui operiamo sopra i 40V per la salvaguardia del sensore. Anche in questo caso, esattamente come per le IV si opera in regime di "buio", coprendo l'intera probe station con il telo nero.

L'acquisizione si scandisce in due parti: la prima consiste nella valutazione di effetti di disturbo o rumore che il programma registra e tiene conto per le misure successive. Le due parti sono così distinte:

- Configurazione Open Collector: si tengono tutti sollevati gli spilli dal chuck, come mostrato in figura 3.10;
- Configurazione Short Collector: si appoggiano gli spilli sul chuck realizzando un corto circuito, come mostrato in figura 3.11.

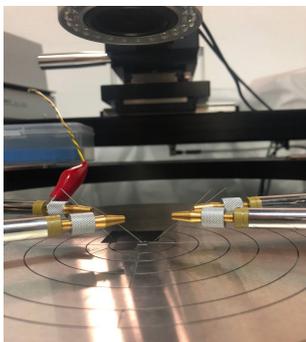


Figura 3.10: Nell'immagine è stata riportata la configurazione open collector, dove nessuno spillo è a contatto con il chuck. Nella foto sono visibili i due spilli connessi al catodo e all'anodo sul sensore; due spilli addizionali sulla destra, ininfluenti sulla misura, sono utilizzati per mantenere il sensore maggiormente a contatto con il chuck.

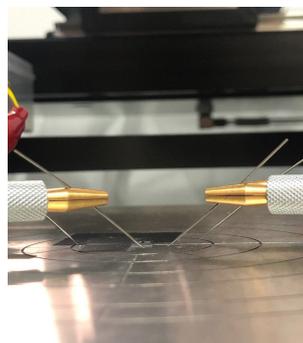


Figura 3.11: Nell'immagine è stata riportata la configurazione short collector, dove gli spilli toccano il chuck. Come spiegato nell'immagine 3.10 i due spilli a destra non sono collegati con il circuito perciò la loro presenza è irrilevante e non compromette le misure.

Il collegamento tra gli spilli e il capacimetro avviene attraverso il bias-tee, riportato in figura 3.12. Viene realizzato un collegamento tra bias-tee e capacimetro tramite i canali di comunicazione che permettono alla scatola di fornire un anodo e un catodo. Successivamente, si impiegano due coccodrilli che vengono inseriti dove si trova lo shunt in figura 3.12, rispettivamente sull'anodo e sul catodo, e si connettono ciascuno ad uno spillo.

²E4990A Impedance Analyzer

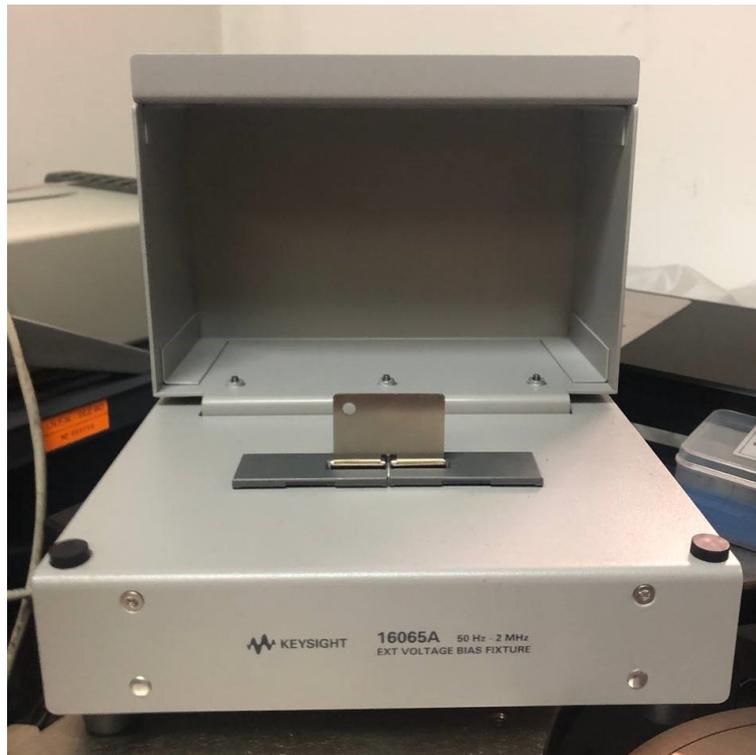


Figura 3.12: Fotografia del bias-tee, dove sui terminali è stato collocato un oggetto metallico a forma di ferro di cavallo che realizza un cortocircuito. Non sono stati inseriti i coccodrilli da mostrare, poiché da un punto di vista logistico risultava essere molto complicato.

La seconda parte consiste nell'acquisizione vera e propria: si colloca lo spillo-catodo sul chuck, mentre l'altro (anodo) sul pad: PIN o LGAD, come mostrato in figura 3.13.

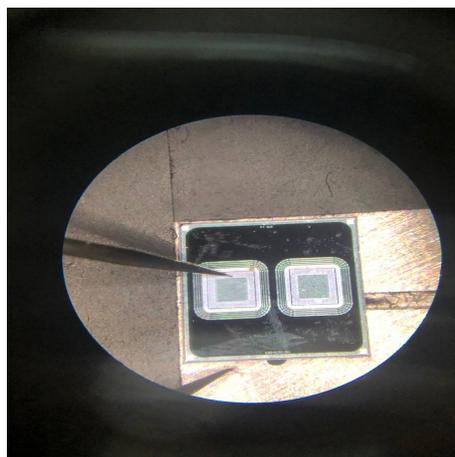


Figura 3.13: Fotografia al microscopio del posizionamento degli spilli.

Le scansioni oltre i 40V necessitano dei due generatori menzionati precedentemente a sostituzione dell'Impedance Analyzer come generatore, il quale si comporterà solo come capacimetro. In entrambi i casi le misure di capacità sono effettuate mediante uno sweep in frequenza da 2000 Hz a 200 kHz con 50 punti per decade e average 3

³. L'Impedance Analyzer acquisisce i dati e li trasmette al programma LabVIEW che li rielabora fornendo come output la caratteristica CV.

Strumentazione

In questo sotto paragrafo sono riportate alcune immagini, figura 3.14 e figura 3.15, degli strumenti utilizzati con dei link alle specifiche degli strumenti.



Figura 3.14: Per specifiche: Z100-8-TDK-LAMBDA.



Figura 3.15: Per specifiche: Impedance Analyzer.

³Lo spettro di averaging varia da 1 a 5. Per ogni punto, quindi, la misura è stata ripetuta 3 volte e quella che viene salvata è la media delle 3.

3.3 Analisi dei risultati

3.3.1 Caratteristiche IV

I dati sono stati raccolti in accordo con la procedura descritta 3.2.1. Sono stati sottoposti ad una scansione tutti i campioni riportati in tabella 3.1, la trattazione verrà divisa nelle due configurazioni principali: Matrici 2x2 e LGAD-PIN.

Configurazione LGAD-PIN In questo paragrafo sono riportati alcuni grafici di esempio ottenuti dalla prova su questi sensori. Si parte da un'analisi generale, al fine di evidenziare gli aspetti cruciali, attraverso i grafici in figura 3.16.

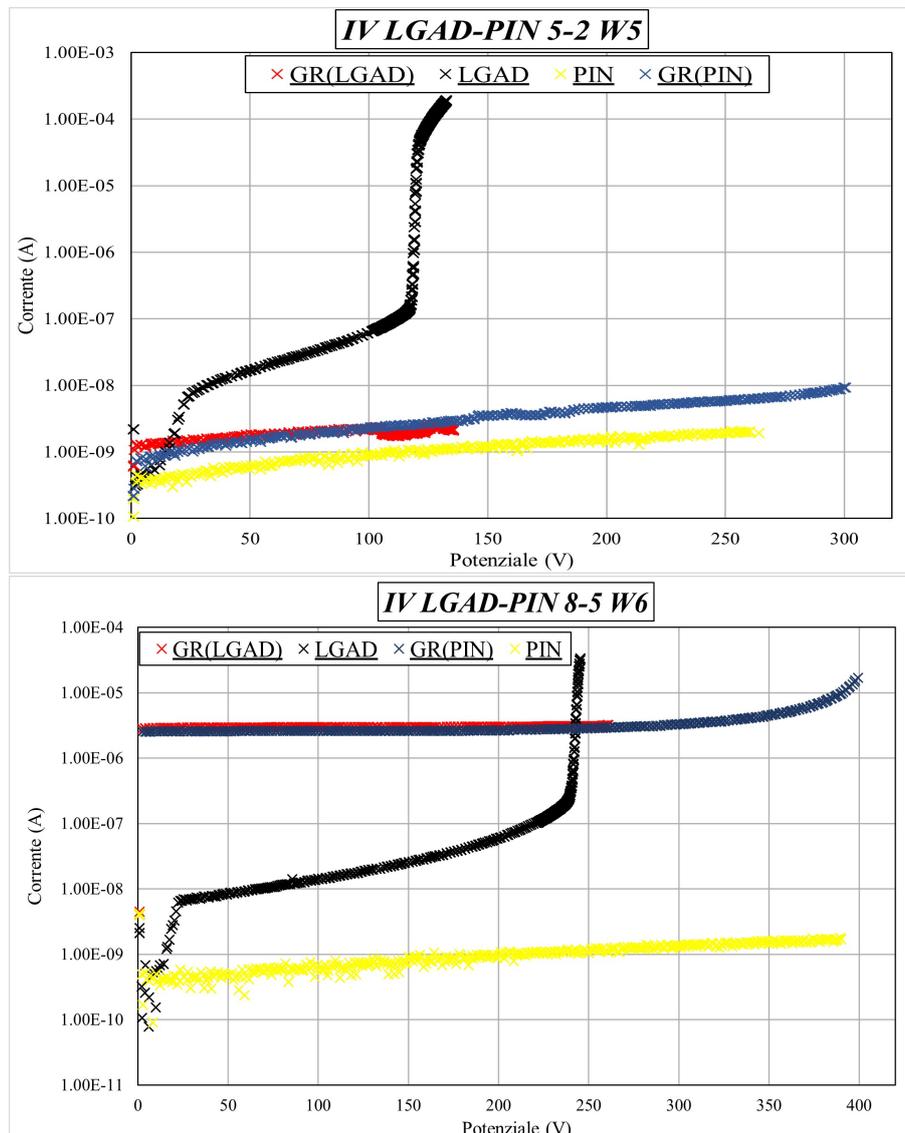


Figura 3.16: Esempio di caratteristiche IV comprensive delle misure sul PIN(giallo) e sul LGAD(nero), sul Guard Ring(GR) del PIN(blu) e del LGAD(rosso) con un sensore di spessore $25 \mu\text{m}$ (W5) in alto e uno $35 \mu\text{m}$ (W6) in basso. Le misure sul sensore 5-2 sono state effettuate in condizioni di umidità 18% e a temperatura 24°C , mentre le misure sul 9-5 a 17% e 25°C .

La curva del LGAD (nero) ha tendenzialmente un andamento simile a quelli riportati di seguito dove si notano due punti cruciali:

- Punto di svuotamento intorno a 20V;
- Punto di Breakdown intorno ai 120V (W5) e 230V (W6).

Si tratta di punti dove la curva cambia radicalmente l'andamento come mostrato in figura 3.17, dove è possibile osservare uno zoom di una caratteristica IV in un intorno dei punti in questione. Intorno ai 20 V il flesso segnala lo **svuotamento dello strato**

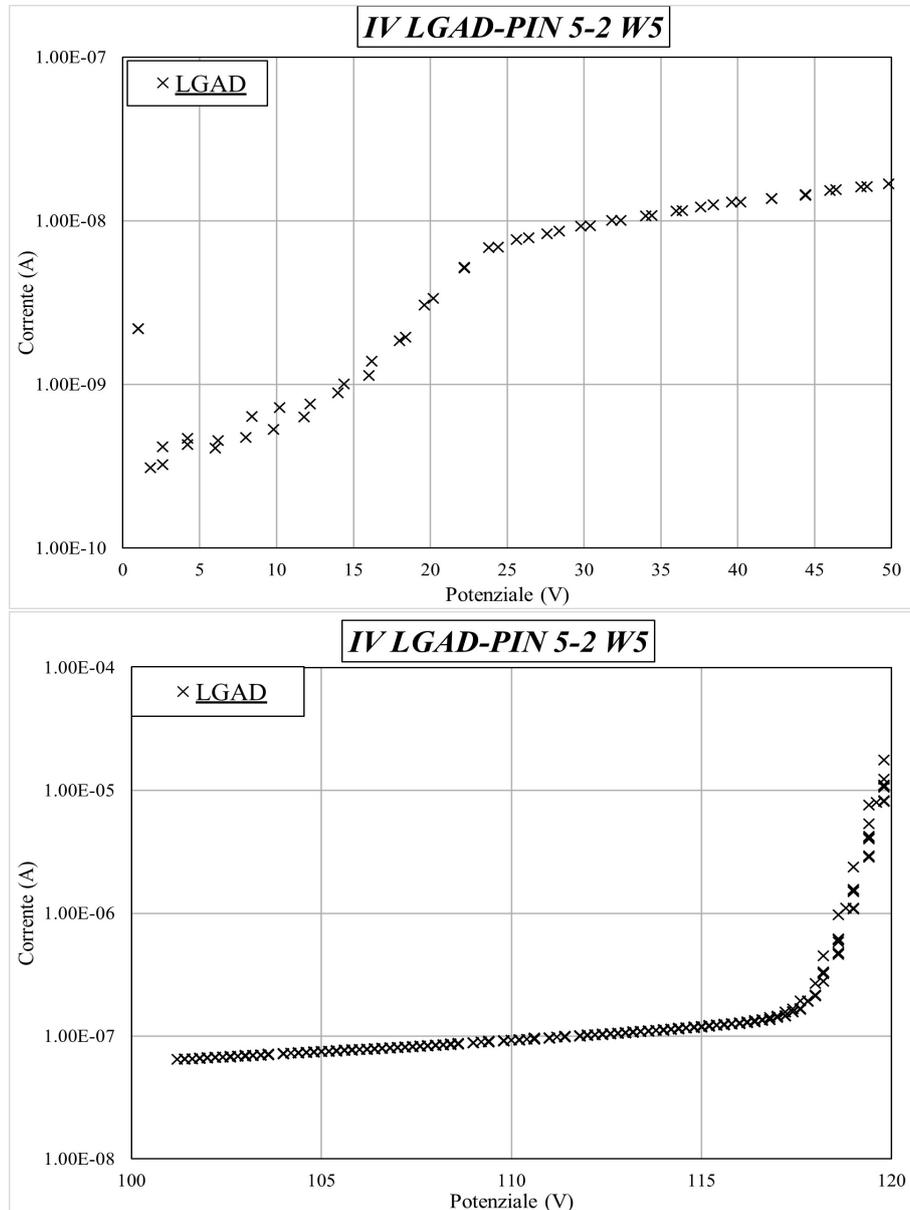


Figura 3.17: Zoom della caratteristica IV del sensore nei punti di interesse menzionati: svuotamento dello strato di guadagno in alto e raggiungimento del breakdown in basso.

di guadagno; dalla figura 3.16 si evince che per i due sensori la profondità dello strato di guadagno è circa la stessa, come atteso per questa produzione.

Il secondo punto interessante che è possibile estrarre dalla caratteristica IV è il **voltaggio di breakdown**. Per breakdown si intende un aumento incontrollato di corrente, e corrisponde al punto in cui si ha un veloce cambio della pendenza arrivando ad essere quasi verticale, come evidenziato nello zoom 3.17. Dalla figura, sembrerebbe che a seguito del breakdown la curva si stabilizzi, anche se ciò non accade realmente, è solo un artefatto delle protezioni impostate nel programma LabView.

La curva del PIN (gialla) ha perdite di correnti bassissime, per cui cresce in corrente molto lentamente, quindi non si riscontra un primo flesso (a differenza degli LGAD) per via dell'**assenza di uno strato di guadagno**, per costruzione del PIN. Sempre in linea teorica è presente il secondo flesso, dove avviene uno smisurato e istantaneo incremento di corrente in prossimità della tensione di breakdown caratteristica del PIN. Risulta difficilissimo da acquisire perché, contrariamente a quanto accade negli LGAD, l'aumento è radicale e spesso si attivano le misure protettive prima di poterlo registrare.

Le due curve del guard ring (rossa → LGAD e blu → PIN) presentano delle differenze sostanziali tra i due sensori. Infatti, essendo questi i primi sensori molto sottili prodotti, a causa di un errore nella produzione del W6, il substrato dei sensori 35 μm risulta essere dopato n invece che p. L'inversione di tipo non rappresenta un problema per il funzionamento del sensore poiché il campo elettrico interno rimane inalterato. Difatti, le curve blu e gialla, relative ai due pad, hanno il comportamento atteso. Tale informazione sarà verificata successivamente.

Qui di seguito, in figura 3.18, è riportato un confronto fra le caratteristiche degli LGAD dei vari sensori, suddivisi per wafer di produzione.

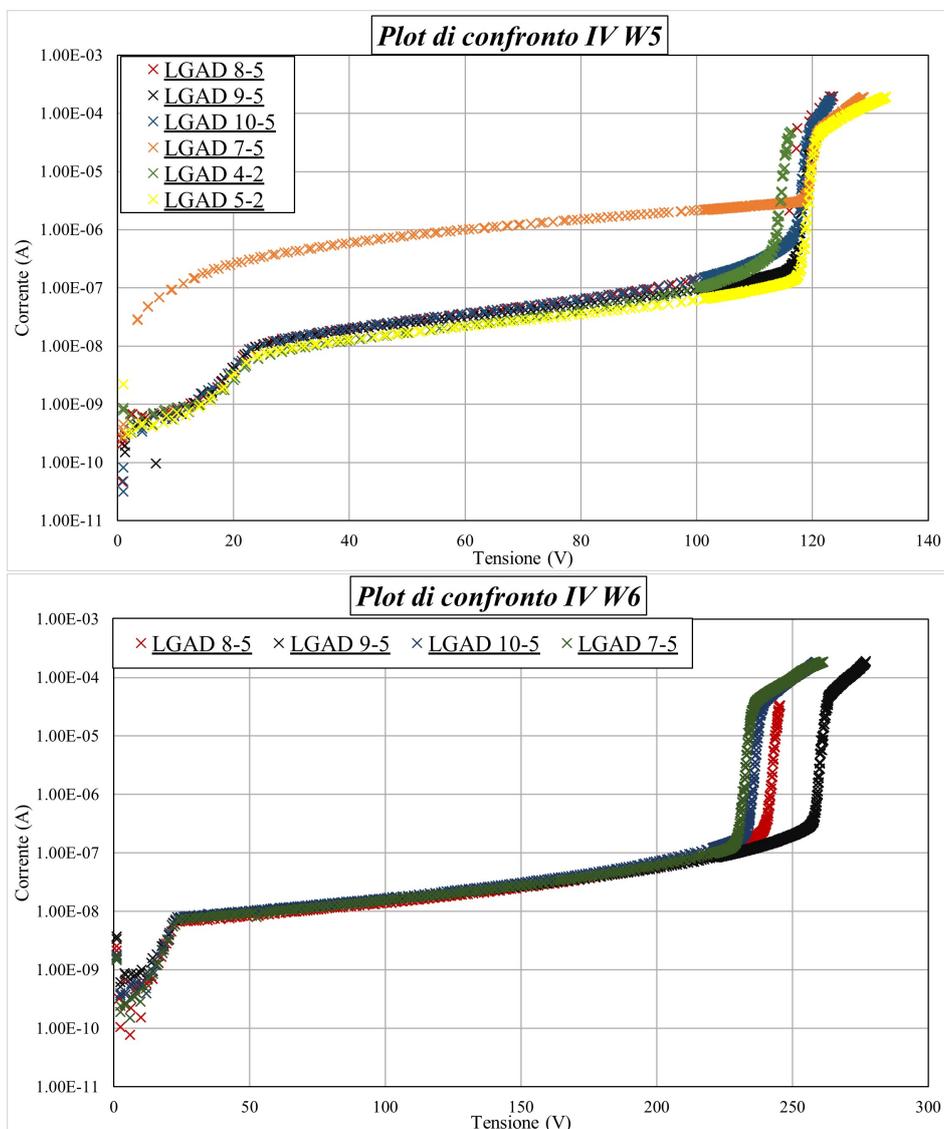


Figura 3.18: Caratteristiche IV degli LGAD nella configurazione LGAD-PIN a confronto. Sono presenti 3 grafici: il primo che raccoglie tutte le misure dei (7,8,9,10)-5 W5, il secondo dei (7, 8, 9, 10)-5 W6, il terzo invece dei (4, 5)-2 W5.

Ciò che si evince dalla figura 3.18 è che i campioni del primo grafico hanno un comportamento simile, fatta eccezione per la curva 7-5, il punto di breakdown è circa lo stesso. Quelli del secondo grafico hanno un comportamento radicalmente uguale fino al punto di breakdown, dopodiché due (9-5 e 8-5) si differenziano. In conclusione, è possibile notare che gli andamenti dei vari samples per ciascun wafer di produzione sono abbastanza uniformi, con una differenza tra i punti di breakdown nel range di una decina di volt, come è possibile osservare in tabella 3.2.

Matrici 2x2 Questi campioni sono costituiti da un guard ring, comune ai quattro pad, su cui è stata fatta la misura, e 4 LGAD. Le considerazioni sono le medesime fatte nel paragrafo precedente, in figura 3.19 sono presentati alcuni grafici esemplificativi dei risultati ottenuti.

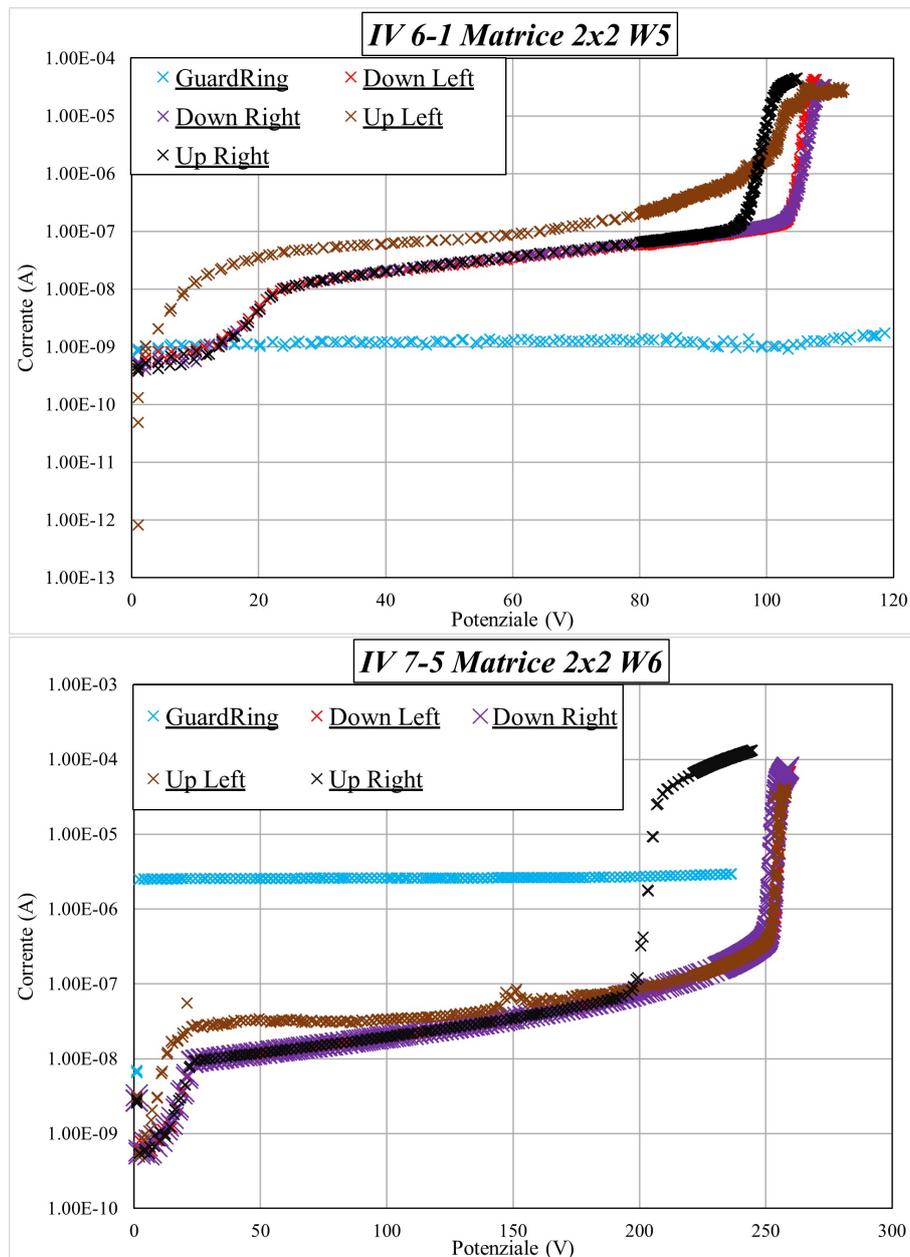


Figura 3.19: Caratteristiche IV di due matrici. I sample del W6 hanno manifestato i problemi di costruzione definiti precedentemente, a questi si deve aggiungere che in alcuni casi la differenza di breakdown è nettissima (curva nera nel grafico 7-5), questo condiziona notevolmente almeno uno degli altri 3 pad, difatti nel caso del secondo grafico la curva rossa non arriva al punto di breakdown.

Metodo sperimentale di estrazione del breakdown

Il valore di Breakdown è un parametro cruciale di cui è necessario avere informazione. Come menzionato, uno degli obiettivi della misura è proprio l'estrazione di questo valore a partire dalle caratteristiche IV dei campioni. In questo caso il breakdown per ciascun sensore è stato ottenuto graficamente attraverso tre metodi differenti, implementati con ROOT:

- **Derivata Logaritmica LD;**
- **Derivata Logaritmica inversa ILD;**
- **Metodo di intersezione delle rette.**

La derivata logaritmica consiste nel calcolo della derivata algebrica del logaritmo della corrente, ed è così definita:

$$LD = \frac{d \ln|I|}{dV}$$

La derivata logaritmica inversa ILD è semplicemente la funzione inversa della LD, per cui:

$$ILD = \frac{dV}{d \ln|I|}$$

Infine il metodo di intersezione delle rette consiste in una derivata calcolata punto per punto partendo dai dati sperimentali. In generale i tre metodi consistono in derivate puntuali, perciò ci aspettiamo che la LD abbia un comportamento crescente (lineare in V) fino alla tensione di breakdown, dove ci sarà uno stazionamento della curva poiché questo punto rappresenta un massimo della derivata; successivamente ci si aspetta una pendenza negativa. Realizzando l'inversione, quindi rappresentando ILD, il comportamento sarà precisamente speculare, cioè la pendenza sarà negativa fino al raggiungimento della tensione di breakdown, che rappresenta il punto di minimo, e poi diviene positiva successivamente. Infine, con l'intersezione delle rette ce ne aspettiamo una a pendenza positiva prima del breakdown e contrariamente una negativa dopo il punto critico. Le due rette, idealmente, si intersecano nel punto cercato. Si realizza un fit lineare e parabolico in un range intorno al punto di breakdown utilizzando come parametri il numero di punti mediati e l'intervallo intorno al punto ricercato. Successivamente, una volta ottenuti i risultati mediante i tre metodi, se ne effettua una media e si ottiene un valore sperimentale di breakdown, al quale deve essere associato un'incertezza ⁴ Un esempio di tale procedura è riportato in figura 3.20.

⁴Calcolata come $\epsilon = \frac{V_{max} - V_{min}}{2}$ dove V_{max} è il valore di BD più alto ottenuto tra i 3 metodi, mentre l'altro quello più basso.

Breakdown a confronto

In questo sottocapitolo sono stati riportati i valori di breakdown ottenuti mediante il procedimento illustrato in 3.3.1. Sono mostrate due immagini esemplificative del procedimento usato per il calcolo della tensione di breakdown di seguito:

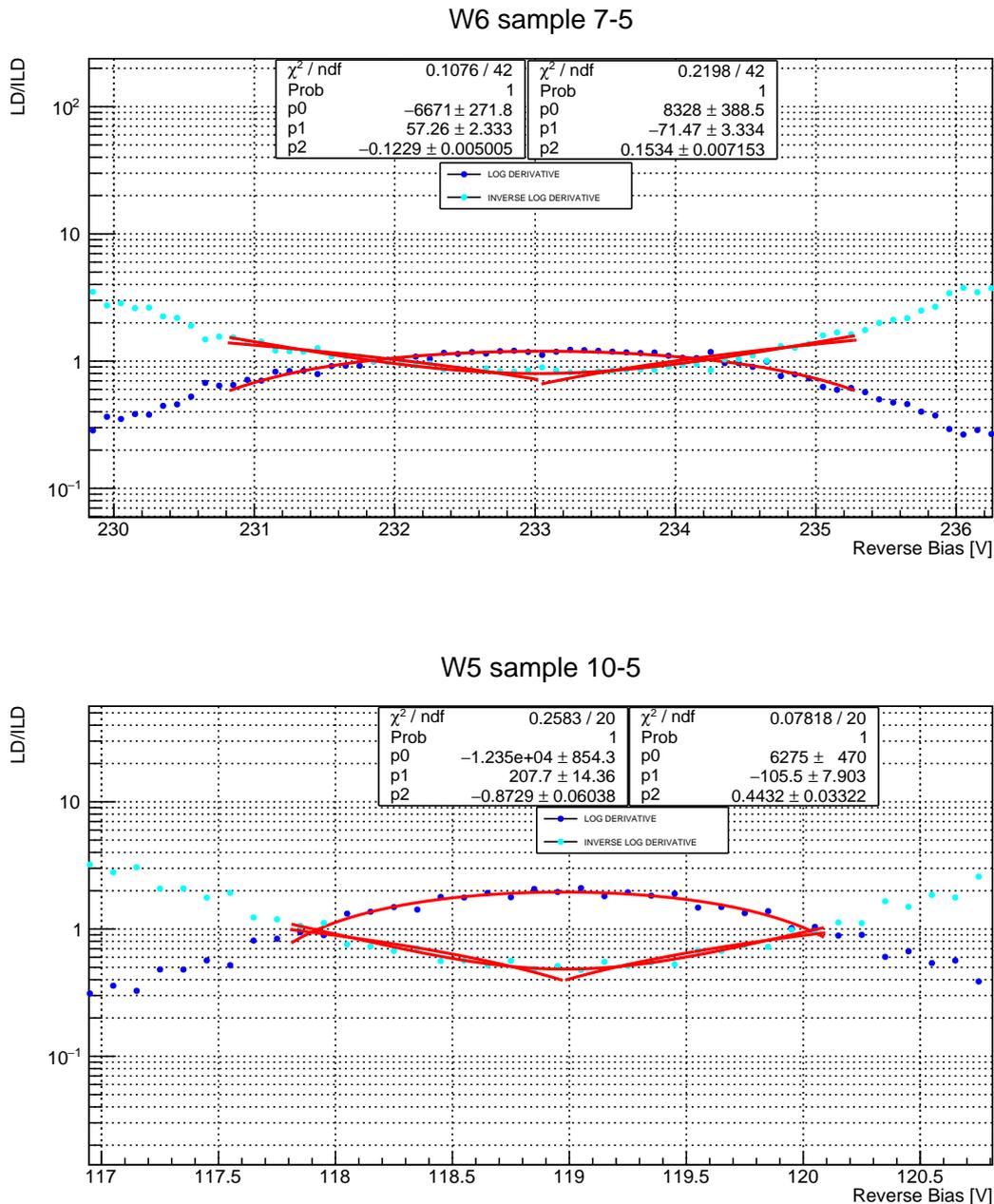


Figura 3.20: In queste due immagini sono mostrati i grafici dei campioni 10-5 W5 e 7-5 W6. I parametri utilizzati sono due: il numero di punti su cui effettuare il fit (N^*) e il numero di punti su cui mediare (M). Per ciascun fit è stato deciso un range, indipendente per ogni sample, nell'intorno del voltaggio di breakdown e in alcuni plot è stata fatta anche una mediazione tra punti vicini, al fine di eliminare il rumore di alta frequenza e ottenere un fit migliore.

Qui di seguito sono mostrati i dati estratti in tabelle. L'estrazione del dato del breakdown è stata fatta unicamente sugli LGAD.

LGAD-PIN In questo paragrafo sono stati raccolti, in tabella 3.2, i risultati forniti dai campioni di tipo LGAD-PIN partendo dai grafici elaborati nella prima parte dell'esperienza.

W5		W6	
LGAD-PIN	BD estratti [V]	LGAD-PIN	BD estratti [V]
4-2	(115.41 ±0.02)	5-5	*
5-2	(120.06 ±0.01)	6-5	*
7-5	(120.58 ±0.01)	7-5	(233.06 ±0.10)
8-5	(119.16 ±0.12)	8-5	(243.37 ±0.02)
9-5	(119.16 ±0.05)	9-5	(260.59 ±0.20)
10-5	(118.98 ±0.01)	10-5	(236.57 ±0.12)

Tabella 3.2: In questa tabella sono stati riportati i risultati estratti partendo da campioni di tipo LGAD-PIN. I valori ottenuti sono molto simili fra loro nel caso dei campioni di tipo W5. Per quanto concerne quelli appartenenti al gruppo W6 i risultati estratti sono lievemente diversi, tuttavia essendo il valore di breakdown maggiore rispetto al gruppo del W5 la differenza è assolutamente accettabile, fatta eccezione ovviamente per il campione 9-5 il cui valore si discosta eccessivamente. Invece, non sono stati segnati risultati per i campioni 5-5 e 6-5. Questo fatto è legato ad un discorso di caratteristica anomala, probabilmente dovuto ad fattori di rumore non conteggiati visto che la curva è drasticamente disturbata, pertanto è risultato impossibile estrarne un valore.

Matrici 2x2 I campioni appartenenti al Wafer di produzione 5 hanno fornito i risultati in tabella 3.3:

W5	Samples		BD		BD
6-1	6-1	DR	(106.47±0.03)	UR	(99.03±0.02)
		DL	(105.41±0.07)	UL	(102.05±0.10)
7-1	7-1	DR	(106.80±0.02)	UR	(104.92±0.05)
		DL	(110.01±0.03)	UL	(118.22±0.19)
8-1	8-1	DR	(116.86±0.09)	UR	(115.62±0.02)
		DL	*	UL	(116.87±0.04)
9-1	9-1	DR	*	UR	*
		DL	(109.31±0.10)	UL	*
10-1	10-1	DR	(76.75±0.04)	UR	(125.18±0.02)
		DL	(92.53±0.04)	UL	(95.66±0.03)

Tabella 3.3: Il campione 6-1 presenta valori di Breakdown sono all'incirca simili, chiaramente il pad Down Right ha una tensione di BD maggiore, conseguentemente Up Right ne avrà una lievemente minore. Discorso analogo per il caso 7-1. Invece, 8-1 i valori di BD sono simili per 3 su 4 pads e il quarto (Down Left) non ha mai raggiunto il BD: si è formato un agglomerato di punti dove la corrente non cresceva, nonostante l'aumentare del potenziale, successivamente ha effettuato un salto in corrente oltre le misure di protezione (venendo arrestato dal programma). Situazione analoga per il campione 9-1 dove è stato possibile estrarre un solo BD, gli altri non arrivavano al breakdown. Il campione 10-1 presenta tutti i valori di BD richiesti, si noti come 3 di questi 4 siano drasticamente bassi, mentre uno appena sopra la media attesa.

Invece in tabella 3.3.1 i campioni appartenenti al wafer di produzione 6:

W6	Samples		<i>BD</i>		<i>BD</i>
6-5	<i>DR</i>		(85.05±0.60)	<i>UR</i>	(182.02±0.74)
	<i>DL</i>		*	<i>UL</i>	*
7-5	<i>DR</i>		(253.08±0.03)	<i>UR</i>	(202.81±0.18)
	<i>DL</i>		(255.06±0.06)	<i>UL</i>	*
8-5	<i>DR</i>		*	<i>UR</i>	*
	<i>DL</i>		(216.26±0.04)	<i>UL</i>	(208.70±0.08)
9-5	<i>DR</i>		(220.58±0.03)	<i>UR</i>	(202.31±0.30)
	<i>DL</i>		(164.69±0.03)	<i>UL</i>	*
10-5	<i>DR</i>		*	<i>UR</i>	*
	<i>DL</i>		*	<i>UL</i>	*

Tabella 3.4: Il campione 7-5 W6 presenta 3 valori estratti su 4, il motivo è legato al fatto che sono stati acquisiti troppi pochi punti nell'intorno del BD per il pad Up Right. Campione 8-5 e 9-5 W6 sono soggetti ad una interpretazione analoga alle controparti discusse precedentemente 6-5 W6. Invece, il campione 10-5 W6 ha presentato svariati problemi. Un rumore molto accentuato avvenuto proprio nell'intorno del BD ne ha impedito una estrazione per il pad Up Left, mentre Up Right non sembra raggiungere il breakdown nemmeno oltre i 280 V facendo attivare prima le misure protezionistiche, discorso analogo per Down Right, il pad Down Left conseguentemente parrebbe muoversi verso un breakdown anche prima dei 100 V senza mai raggiungerlo concretamente per via della protezione in corrente.

3.3.2 Curve CV

I dati sono stati raccolti in accordo con la procedura descritta in 3.2.2. I campioni sottoposti a scansione sono stati soltanto quelli appartenenti al wafer di produzione 5, poiché come illustrato nel paragrafo precedente, il substrato nei sensori appartenenti al wafer 6 è risultato invertito in fase di produzione e questo non consente l'estrazione di informazioni utili dalla caratteristica CV, per ulteriori analisi (tabella 3.1).

Risultati delle acquisizioni

In questo sotto paragrafo sono riportati alcune curve CV di scansioni effettuate fino a 40V e alcune oltre; in figura 3.21 è riportato un esempio di curva estratta per un LGAD-PIN e una matrice 2x2 di LGADs con relativo zoom.

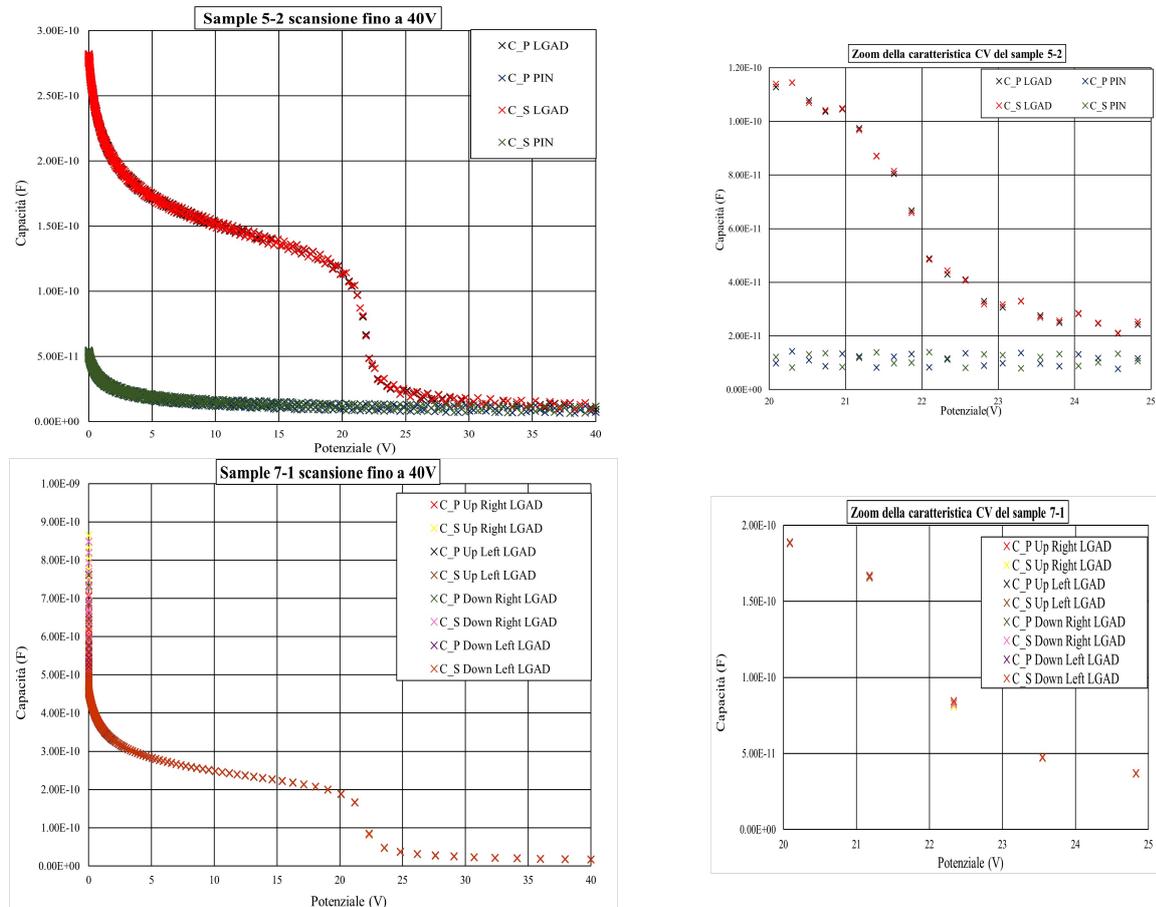


Figura 3.21: Caratteristiche CV con relativo zoom. Si tratta di un campione LGAD-PIN (5-2) e una matrice 2x2 (7-1). Si può notare nella legenda che le curve sono state denominate come C_p o C_s : il capacimetro possiede una resistenza interna di 25Ω che può essere messa in serie (S) oppure in parallelo (P) con le altre resistenze del circuito. Essendo piccola la resistenza, non dovrebbe esserci scarto tra le due caratteristiche di uno stesso pad. Fatto ben visibile anche dallo zoom ulteriore riportato nella figura in basso a destra. Per uno dei sensori è stata misurata anche la curva relativa al PIN, in modo da avere un confronto diretto e osservare le differenze derivanti dalla presenza dello strato di guadagno sull'andamento della capacità. I grafici sono riportati nella parte in alto della figura.

Osservando i grafici riportati, si osserva come all'inizio la curva degli LGADs tende, dopo una rapida discesa iniziale, a decrescere molto lentamente rispetto a quanto accade intorno ai 20V in cui si osserva che la funzione ha un flesso e decresce rapidamente. Il comportamento della funzione è dovuto al fatto che nel range $[0;20]V$ è presente lo **strato di guadagno** che viene progressivamente svuotato, ed è per questo

motivo che intorno ai 20 V c'è una caduta in capacità così repentina; difatti, in questo punto lo strato di guadagno è completamente svuotato e inizia lo **svuotamento della zona attiva**. Questi dati possono fornire le informazioni necessarie per valutare anche la profondità dello strato di guadagno. Si definisce V_{SG} valore di tensione in cui lo strato di guadagno risulta completamente svuotato, graficamente rappresentato dall'inizio del ginocchio. Dallo zoom riportato a fianco di ogni grafico si può individuare all'incirca il valore V_{SG} , indicativamente 28.0 V sia per il campione 5-2 che per il 7.1. Questo valore è associato al primo punto di flesso già evidenziato nelle analisi delle IV. Dunque è un punto di raccordo tra l'aumento della corrente e la decrescita della capacità del sensore. Si osservi il grafico 3.22 che evidenzia tale comportamento.

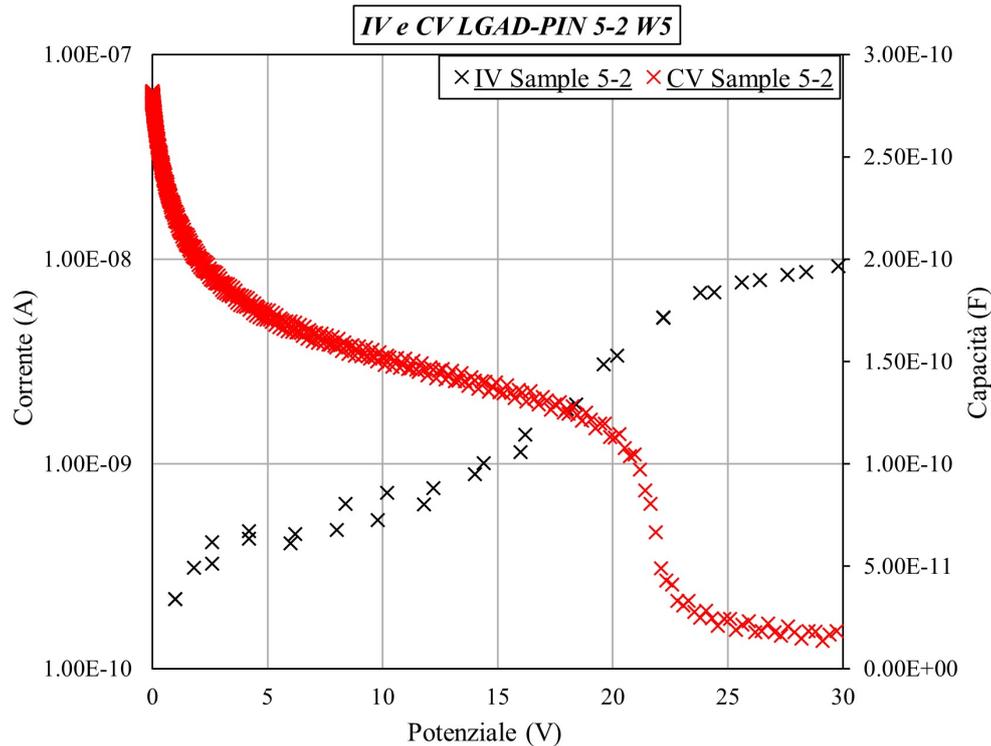


Figura 3.22: Nello stesso grafico è stata riportata la curva CV e la IV del LGAD 5-2.

A seguito dell'inizio del ginocchio la zona attiva di sensore al di sotto dello strato di guadagno viene progressivamente svuotato: una volta che accade ciò la curva tende asintoticamente verso un valore ben preciso di capacità definita C_L . Una volta raggiunto questo valore il sensore sarà totalmente svuotato; da un punto di vista meramente teorico è possibile calcolarlo mediante l'equazione:

$$C_L = \frac{\epsilon_{Si} \cdot A}{W}$$

dove ϵ_{Si} rappresenta la costante dielettrica comprensiva della costante dielettrica nel vuoto e quella relativa del silicio, A rappresenta l'area (a seconda che si tratti di un LGAD singolo o della matrice), mentre W lo spessore (posto essere 25 μm perché vogliamo ricavare la capacità quando è totalmente svuotato). Svolgendo i conti, in linea teorica si ottiene un valore di svuotamento atteso $C_L = 4.1\text{pF}$. Invece, il range $[0; V_{SG}]$ V fornisce informazioni circa l'uniformità dello strato di guadagno tra i vari LGADs. Osservando in particolar modo il grafico del campione 7-1, in figura 3.21 in basso a sinistra: si osserva come vi sia una uniformità consistente tra i vari LGADs costituenti la matrice. Questo fatto è stato riscontrato in tutte le matrici W5. In figura 3.22 è riportato

un grafico complessivo che raccoglie tutte le caratteristiche CV estratte dalle scansioni fino a 40 V dei campioni di tipo LGAD-PIN e Matrici 2x2 posti a confronto fra loro.

In figura 3.23 e 3.24 sono riportati alcuni dei plot ricavati dalle acquisizioni in capacità: per quanto riguarda la configurazione LGAD-PIN sono state riportate solo quelle degli LGADs, vista l'assenza di uno strato di guadagno nel PIN, mentre per la configurazione a matrice solo quelle relative al pad Down Left (DL).

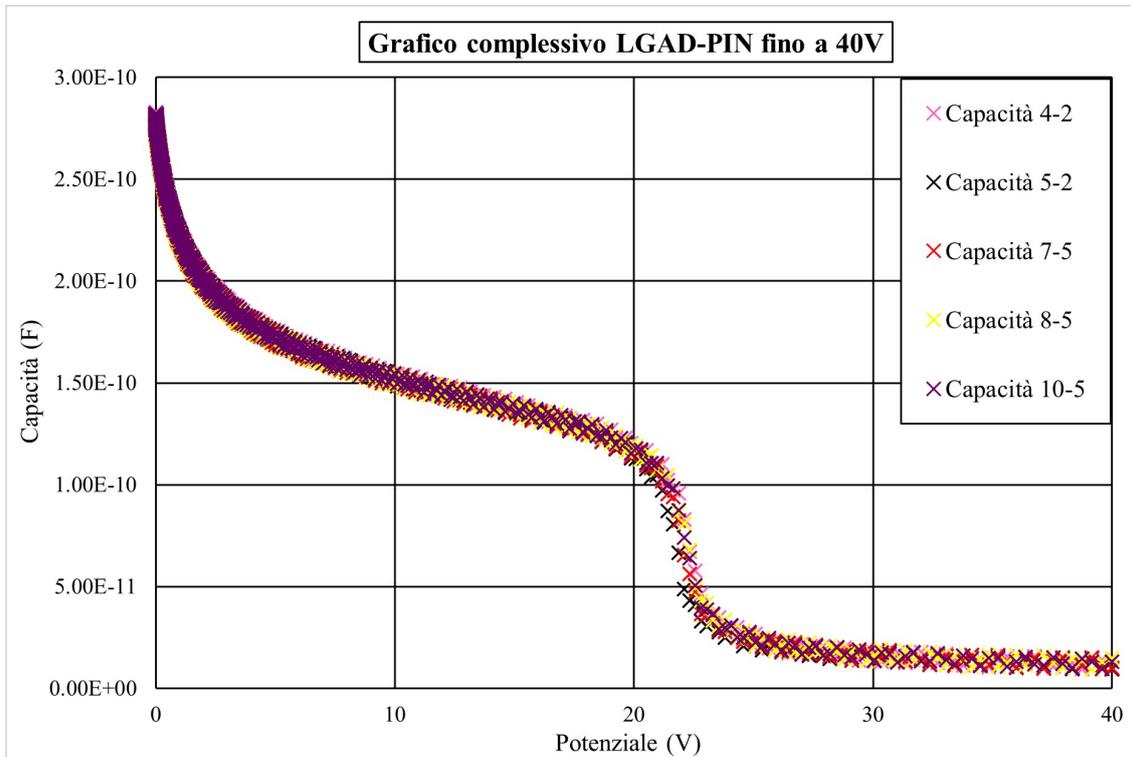


Figura 3.23: In questo grafico sono state rappresentate le caratteristiche CV estratte dagli LGAD-PIN.

Nel grafico riportato in figura 3.23 sono riportate tutte le caratteristiche CV estratte dei LGAD; partendo dai dati raccolti si è osservato che i samples 4-2 e 5-2 sembrano avvicinarsi maggiormente al punto di svuotamento completo teorico nonostante la scansione fino a 40 V: il valore raggiunto è nello stesso ordine di grandezza di quello atteso, ma non lo raggiunge a causa del limite in tensione, a differenza degli altri samples che si fermano ad un ordine di grandezza superiore. Il motivo potrebbe essere correlato al fatto che appartengano ad una riga differente nel wafer di produzione. È assente inoltre la curva 9-5 poiché la corrente, essendo molto elevata, rischiava di danneggiare il sensore, perciò non ne è stato acquisito un profilo completo. Le curve presentano un andamento uniforme nel range compreso fra 0V e V_{GS} . Il più basso valore raggiunto è $9.09 \cdot 10^{-12}$ F dal sensore 4-2, gli altri si fermano a valori di capacità nell'ordine 10^{-11} F (fatta eccezione per il sample 5-2 che arriva ad $9.62 \cdot 10^{-12}$).

In figura 3.24 sono stati riportati i plot delle caratteristiche CV dei pad down left: la caratteristica CV del sample 9-1 è assente, anche in questo caso a causa di misure protezionistiche. Le curve presentano un andamento uniforme nel range di interesse prima del ginocchio. Anche in questo caso non si raggiunge il valore teorico di svuotamento poiché il minimo in capacità raggiunto da tutti i campioni è nell'ordine 10^{-11} F.

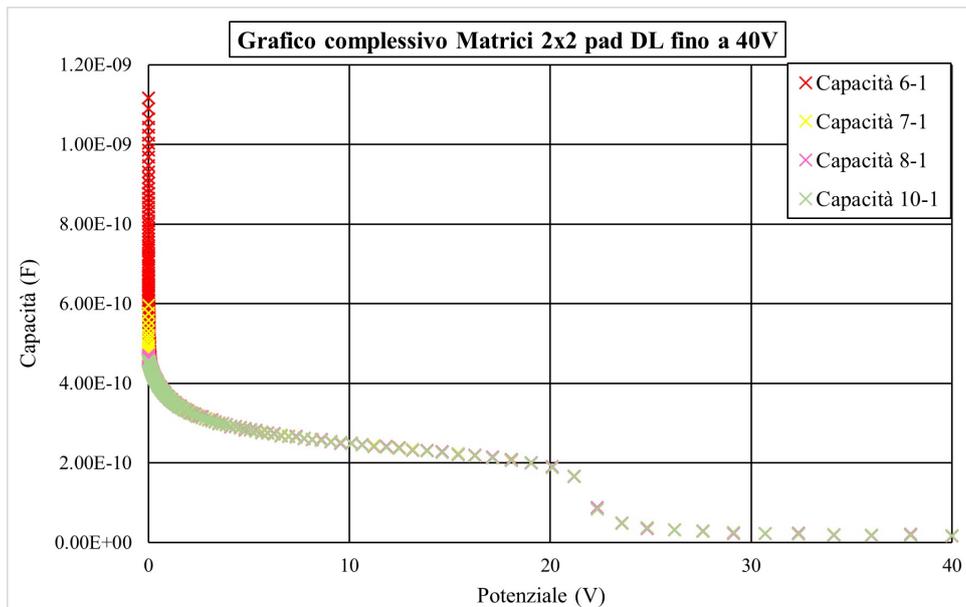


Figura 3.24: In questo grafico sono stati confrontati tutti i pad Down Left delle matrici 2x2.

Per quanto riguarda gli altri campioni si rende necessario procedere oltre i 40 V per osservarlo. Questo è il motivo per il quale sono state fatte misure utilizzando generatori in grado di fornire tensione complessiva superiore ai 40 V.

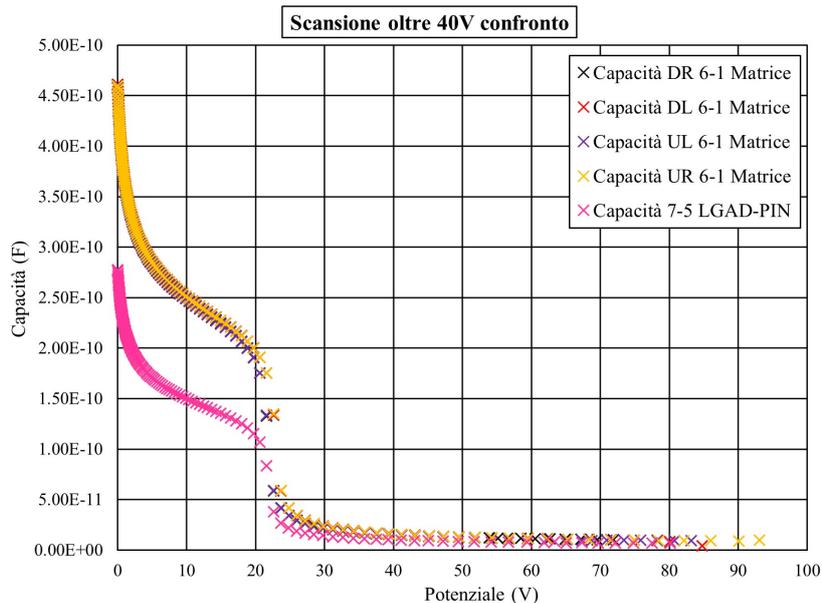


Figura 3.25: In questa figura sono riportate le caratteristiche dei campioni 7-5 e 6-1. I 4 pad della matrice sembrano essere uniformi fra loro, e posseggono un valore di capacità iniziale che quasi raddoppia quello del LGAD 7-5.

In figura 3.25 è stato riportato un grafico complessivo di 4 curve ricavate da una matrice e una caratteristica CV ottenuta dal LGAD 7-5: si osservi che a seguito del ginocchio, le 5 curve convergono nella medesima area. Il valore minimo raggiunto dall'LGAD 7-5 è 6.85 pF, mentre quelli della matrice hanno raggiunto 9.98 pF (UR), 9.51 pF (UL), 4.08 pF (DR) e 10.2 pF (DL); non è stato possibile procedere oltre in tensione per via delle misure di protezione imposte. I dati estrapolati da queste scansioni oltre i 40 V sono stati sottoposti ad ulteriori analisi al fine di estrarre un valore sperimentale della profondità di svuotamento raggiunta e il profilo del doping.

Metodo sperimentale di analisi dati in capacità

Queste acquisizioni sono state effettuate con una finalità ben precisa, partendo da una caratteristica CV è possibile estrarre due dati importantissimi: la **profondità dello strato di guadagno W** [μm] e il **profilo di doping del sensore D** [cm^{-3}]. Noto il profilo di doping, è possibile verificare il corretto andamento, qualitativamente, del campo elettrico all'interno del sensore. Definendo ϵ_{Si} costante dielettrica del silicio, e carica dell'elettrone, allora possiamo calcolare:

$$W = \frac{\epsilon_{Si} \cdot A}{C_p}$$

dove A è l'area dell'area attiva che varia a seconda del tipo di sensore utilizzato (LGAD-PIN o Matrice 2x2) e W è la profondità di svuotamento.

$$D = \frac{dV}{2 \cdot d(\frac{1}{C^2})} \cdot \frac{1}{\epsilon_{Si} \cdot e \cdot A^2}$$

dove D rappresenta il profilo di doping.

Comportamento sperimentale del profilo di doping

Utilizzando le formule mostrate nel paragrafo precedente è stato possibile estrarre il profilo di doping D; in figura 3.26 è stato riportato un andamento caratteristico. In queste ulteriori analisi sono stati utilizzate le scansioni **oltre i 40 V**, poiché fornivano un profilo più completo del sensore.

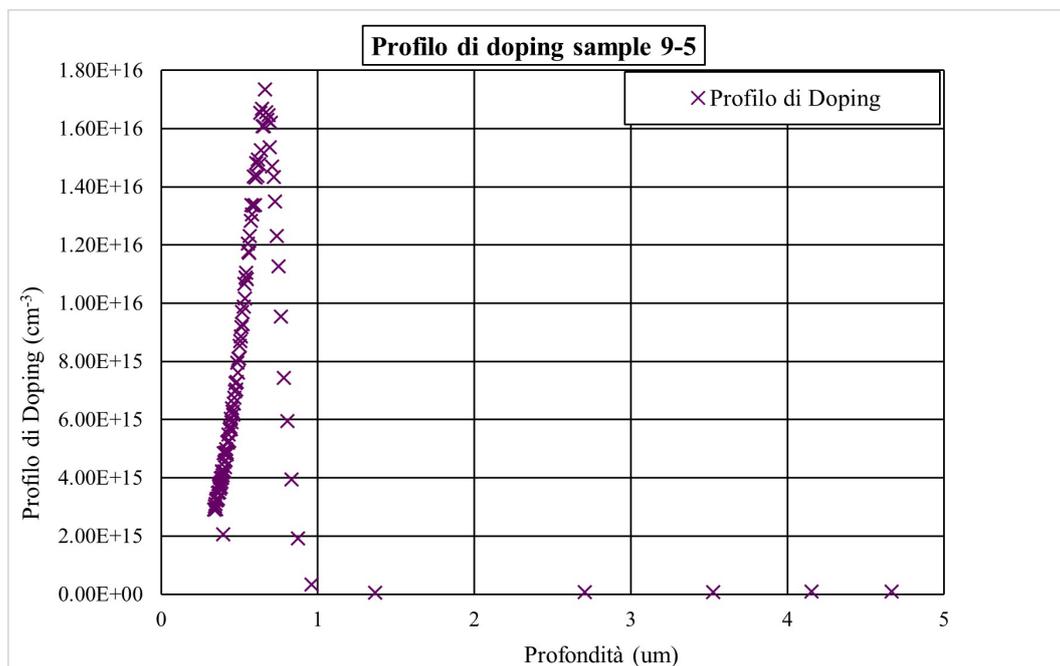


Figura 3.26: Grafico che rappresenta il profilo di doping D come funzione della profondità W.

Si osservi in figura 3.26 un picco per basse profondità, questo evidenzia la presenza dello strato di guadagno, che si trova tra 0.50 e 0.75 μm dalla superficie ed è molto più dopato degli altri strati sottostanti. Questo picco, collocato nell'intorno dello strato di guadagno, è associato ad un picco di campo elettrico che caratterizza proprio sensori come gli LGADs, per ulteriori informazioni 2.3. Inoltre, è possibile osservare in figura 3.27 che il potenziale da fornire per individuare il picco nello strato di guadagno è circa 10 V.

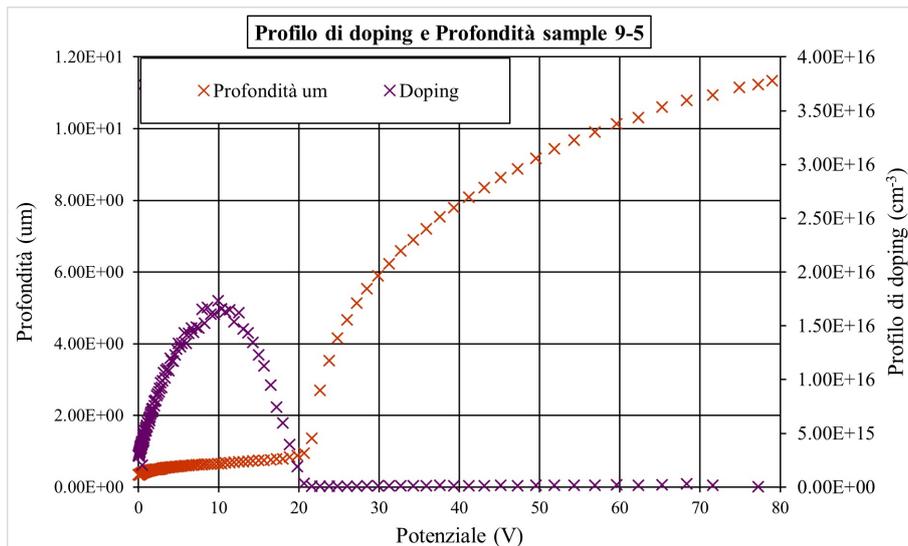


Figura 3.27: Grafico che rappresenta il profilo di doping D e la profondità W come funzione del potenziale. Si riscontra anche in questo caso il picco, come atteso, che segnala la presenza dello strato di guadagno. Si noti anche che nel range fra 0 V e 20 V la curva della profondità è cresce lentamente, questo è associato alla presenza dello strato di guadagno, in accordo con quanto atteso.

I sample sottoposti ad analisi sono 11, e sono quelli del raggruppamento W5 in tabella 3.1, tuttavia tra quelli in configurazione LGAD-PIN è stato riscontrato che il sample 8-5 è si è durante analisi successive a quelle in corrente descritte nella prima parte dell'esperienza, perciò non è stato possibile estrarne il profilo di doping. In figura 3.28 è stata riportata una sovrapposizione di tutti i profili di doping dei sensori (configurazione LGAD-PIN); si riscontra una affinità sia nella presenza di un picco ben definito, sia nella profondità alla quale è presente lo strato di guadagno; quest'ultima è nel range fra 0.50 e 0.75 μm .

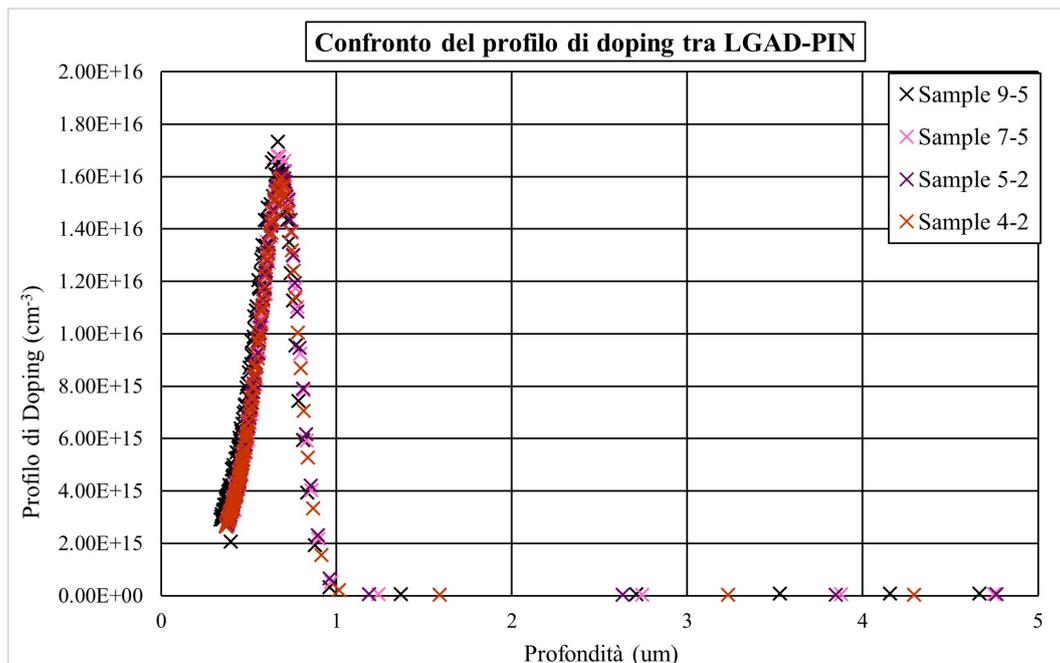


Figura 3.28: Grafico che rappresenta il profilo di doping D in funzione della profondità W per tutti i sample di configurazione LGAD-PIN. Si riscontra che il picco ha luogo all'incirca alla medesima profondità.

Per quanto concerne le matrici, anche in questo caso è stato riportato un confronto fra pad DL in figura 3.29 e si è evidenziato come in tutti la profondità dello strato di guadagno si aggiri in un range compreso fra 0.25 e 0.50 μm ; tale valore risulta leggermente inferiore a quello estrapolato dagli LGAD-PIN e probabilmente legato a fattori di costruzione. Ulteriori differenze sono legate ai valori del profilo di doping, nel caso dei pad DL delle matrici risultano essere superiori a quelli degli LGADs singoli, fatto legato alla differenza di capacità come mostrato in figura 3.25.

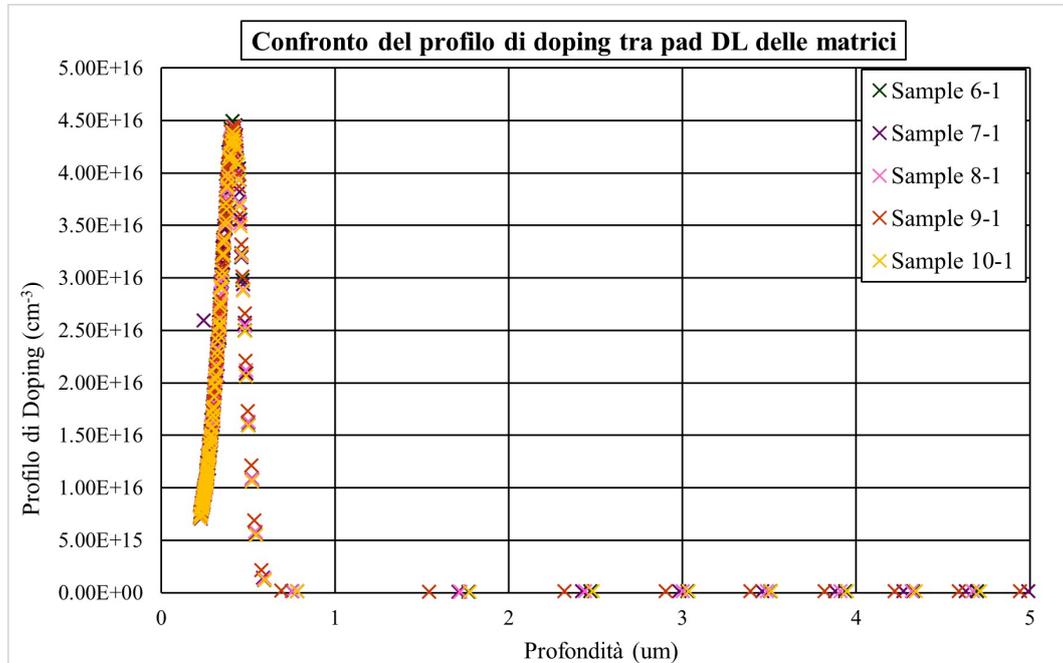


Figura 3.29: Grafico che rappresenta il profilo di doping D in funzione della profondità W per tutte le matrici. Si riscontra che il picco ha luogo all'incirca alla medesima profondità per tutti i campioni.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi ho valutato le caratteristiche e le proprietà dei primi sensori al silicio LGAD sottili (spessore inferiore a $50 \mu\text{m}$) prodotti da FBK. Tutti i sensori analizzati (22) sono stati sottoposti a misure di IV, mentre solamente 11 a misure di CV. I confronti sono stati effettuati sulla base dello spessore ($25 \mu\text{m}$ e $35 \mu\text{m}$), sulla base della configurazione (Matrice 2x2 e LGAD-PIN) e sulla base strutturale (LGAD e PIN). L'obiettivo di un confronto così schematizzato è quello di evidenziare affinità di comportamento elettrico fra i raggruppamenti di sensori, poiché solamente quelli con caratteristiche simili possono essere impiegati insieme nello stesso rivelatore. Le analisi in corrente hanno fornito due risultati cruciali: la tensione alla quale si svuota il gain layer e la tensione di breakdown, fattore rilevante al fine di definire il range di operatività del sensore. La prima risulta essere pressoché identica per tutti i sensori, intorno ai 20 V, in accordo con quanto atteso; si tratta dunque di una verifica. La tensione di breakdown calcolata per i sensori W5 (spessore $25 \mu\text{m}$) nella configurazione LGAD-PIN presentano un valore circa di 120 V, fatta eccezione per il sample 4-2, per cui è possibile affermare che hanno un comportamento affine. Contrariamente, per quanto riguarda i campioni W6 (spessore $35 \mu\text{m}$) sempre nella configurazione LGAD-PIN è difficile individuare un fattore comune, poiché:

- per i samples 5-5 e 6-5 l'estrazione del valore è stata impossibilitata da comportamenti non previsti;
- i sample 7-5, 8-5 e 10-5 presentano una tensione che si assesta intorno ai 230/240 V;
- il sample 9-5 fornisce un dato calcolato di 260 V.

Tutto ciò rende difficile l'estrazione di una tensione che è fattore comune fra tutti e 6, tuttavia è possibile affermare che i campioni 7-5, 8-5 e 10-5 abbiano il medesimo range operativo. Nel caso delle matrici occorre osservare che i 4 pad della matrice singola hanno la stessa tensione di breakdown all'incirca. Valutando, dapprima, l'affinità tra pad della medesima matrice è possibile evidenziare:

- nel gruppo W5 solamente nei campioni 6-1, 7-1 gli LGAD presentano una tensione di breakdown operativa circa nello stesso range;
- nel gruppo W6 non è stato possibile identificare 4 pad della medesima matrice che operassero nel medesimo range di breakdown.

Le misure in corrente effettuate sulle matrici hanno risentito necessariamente della configurazione non ideale a 4 spilli della probe station utilizzata (quella a 5 spilli avrebbe garantito un campo elettrico interno più uniforme). Il fatto potrebbe essere stato cruciale per le misure; ovviamente i risultati peggiori sono stati ottenuti dal gruppo W6. Nonostante tutto il comportamento dei sensori all'aumentare della tensione è uniforme, al netto di qualche eccezione. Le analisi in capacità sono state effettuate solo su

11 campioni, per tanto il confronto si è limitato a campioni dello stesso spessore, ma progettazione differente. Inoltre, è stato effettuato un confronto tra PIN e LGAD circa il comportamento in capacità e l'assenza di uno strato di guadagno è risultato essere un fattore determinante nella differenza fra le due curve. Le misure in capacità hanno fornito molte informazioni utili come ad esempio il profilo del doping e la profondità del sensore svuotato. Inoltre, le misure di capacità hanno confermato che presenza del flesso nelle caratteristiche IV fosse legata ad uno svuotamento dello strato di guadagno per i sensori W5. Chiaramente, non è stato possibile verificare la stessa cosa per i campioni W6 poiché per motivi strutturali erano inadatti alla prova. L'obiettivo della prova consisteva nel verificare che lo strato di guadagno si trovasse alla medesima profondità all'interno dei raggruppamenti, ciò è stato verificato, e si sono misurati valori compresi tra $0.50 \mu\text{m}$ e $0.75 \mu\text{m}$ per i singoli LGAD e tra $0.25 \mu\text{m}$ e $0.50 \mu\text{m}$ per le matrici. Infine, in tutti i campioni è stato verificato che lo strato di guadagno si svuotasse entro i 20 V; dunque, in questo caso è presente compatibilità strutturale tra i sensori all'interno dei raggruppamenti.

Capitolo 4

Appendice

4.1 Campi di Forza

Ogni interazione naturale, fatta eccezione per l'interazione gravitazionale, può essere descritta dalla teoria di gauge mediante l'algebra di $SU(N)$ (lineare, unitaria e unimodulare). Dato N la dimensione del gruppo, è possibile dimostrare che esistono $N^2 - 1$ potenziali vettori, potenziali scalari, campi elettrici, magnetici e mediatori dell'interazione. La trasformazione di gauge opera su di un vettore complesso di N componenti (particelle) aventi stessa massa e spin, ma differente carica interna. In una interazione quindi, le particelle modificano sia la quantità di moto che la carica interna. I campi sono portatori di carica e data la natura del gruppo è ammessa l'autointerazione dei quanti o mediatori dei diversi campi della teoria; eccezione fatta per i fotoni poiché sono descritti da una trasformazione di tipo $U(1)$ che non ammette una mutua interazione tra i mediatori.

4.1.1 Interazione elettromagnetica

L'interazione elettromagnetica è formulata dalla QED ed è descritta mediante una trasformazione di gauge $U(1)$. Questa costituisce una eccezione a quanto detto prima, poiché è un gruppo abeliano (a differenza di $SU(2)$, $SU(3)$ etc...) perciò una mutua interazione fra i mediatori non è concessa. In altre parole, non è ammesso un vertice fotone-fotone. Esiste un unico campo elettromagnetico di spin = 1 (i fotoni sono bosoni), massa nulla e privo di carica elettrica. Inoltre, studiando i vertici di interazione si dimostra che vi è una conservazione del sapore della carica elettrica.

4.1.2 Interazione forte

L'interazione forte è formulata dalla Cromodinamica Quantistica o QCD ed è descritta mediante una trasformazione di gauge $SU(3)$, con 3 cariche di colore o cariche interne forti, 8 mediatori gluonici e di spin unitario e non massivi. Il vertice di QCD prevede che il sapore di quark rimanga inalterato, mentre varia la carica interna o carica di colore.

Sapore dei quark

Il sapore dei quark è un numero quantico che descrive il tipo di particella, in altre parole sapere che $s = 1$, vuole dire che il sapore di quark sarà lo strange. Quindi nell'interazione forte ed elettromagnetica, richiedere la conservazione del sapore significa

	up	down	charm	strange	top	bottom
Isospin	(1/2;1/2)	0	0	0	0	0
Isospin	0	(1/2;-1/2)	0	0	0	0
Charmness	0	0	1	0	0	0
Strangness	0	0		-1		0
Topness	0	0	0	0	1	0
Bottomness	0	0	0	0	0	-1

richiedere che i numeri quantici di sapore si conservano. Qui di seguito è riportata una tabella riassuntiva con i numeri quantici di sapore per ogni quark.

Teoria del mare di partoni

Si denominano quark di valenza quelli che formano l'adrone e mare l'insieme di gluoni, quark e antiquark virtuali che sono generati dalle forze forti che tengono legati i quark di valenza. Il contributo del mare alla carica elettrica deve essere necessariamente nullo, così come anche il sapore (visto che le interazioni forti conservano il sapore), ci aspettiamo che non contribuiscano nemmeno alla carica di colore. Dunque la carica elettrica, di colore e il sapore di un adrone sono determinati dai quark di valenza (un'altra questione interessante riguarda il momento angolare complessivo: per un protone ad esempio il 23% dello spin proviene dai quark di valenza, mentre il 77% dai partoni del mare). Si rende necessario però trattare il problema della massa: i quark di valenza hanno masse a riposo molto più piccole di quelle degli adroni, per tanto la restante parte deve essere portata necessariamente dal mare di partoni (quantità elementare con cui si indica sia quark che gluoni):

- Un contributo positivo dovuto alle masse a riposo del mare, di cui però i gluoni contribuiscono con massa nulla;
- Un contributo positivo dovuto al termine cinetico del mare;
- Un contributo negativo dovuto all'energia potenziale del campo gluonico (ovviamente per forze attrattive);

Gli ultimi due punti costituiscono i contributi principali.

4.1.3 Interazione debole

Si tratta di una interazione descritta da una trasformazione di tipo SU(2) con 3 campi e 3 mediatori (W^+ , W^- , Z^0) massivi e spin unitario dotati di carica debole. Definendo le generazioni o coppie di cariche debole (u,d), (c,s), (t,b), (ν_e , e^-), (ν_μ , μ), (ν_τ , τ). Ci sono quindi due sole cariche interne accessibili, perciò la trasformazione avviene all'interno della generazione (si vedrà successivamente nell'appendice che è possibile anche una trasformazione all'esterno delle generazioni).

4.2 Simmetria chirale

La simmetria chirale è l'invarianza per trasformazioni di parità che consente ai fermioni di possedere massa nulla in accordo con il modello standard. In natura però i fermioni hanno una massa non nulla a causa di una rottura spontanea della simmetria chirale

dovuta al meccanismo di Higgs preservante, allo stesso tempo, la simmetria di gauge. L'esperimento di Madame S. Wu ha mostrato che nei decadimenti deboli la parità è violata, conseguentemente le particelle (antiparticelle) posseggono carica debole solo nella componente sinistrorsa (destrorsa) e che la violazione di parità non è massimale.

4.3 La catena naturale dei decadimenti

In natura i nuclei sono costituiti di due barioni, tra i più semplici: il protone stabile e il neutrone quasi stabile. Il nucleo è legato elettromagneticamente ad elettroni: questa struttura definisce tutta la materia conosciuta. Quindi questo vuol dire implicitamente, che qualunque barione e/o mesone decade attraverso una serie di passaggi in protoni, neutroni ed elettroni. Partendo dai mesoni, sappiamo che questi sono costituiti di un quark e un anti-quark e siamo a conoscenza del fatto che i quark più leggeri siano up e down. Supponiamo di considerare mesoni stabili per interazione forte, quindi nello stato fondamentale, questi possono decadere per interazione debole attraverso una serie di passaggi intermedi scanditi da una probabilità ben definita (matrice CKM Cabibbo-Kobayashi-Maskawa è una matrice 3x3 che schematizza i ratei di transizione tra un quark e l'altro). Quindi, attraverso una serie di processi come il miscelamento



$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.975 & 0.225 & 0.004 \\ 0.225 & 0.973 & 0.04 \\ 0.009 & 0.004 & 0.999 \end{pmatrix}$$

Figura 4.1: Matrice CKM: si noti come è possibile una trasmutazione da un quark bottom ad uno up attraverso una transizione diretta, meno probabile, oppure una serie di passaggi intermedi, più probabile.

del sapore, le trasmutazioni interne ed esterne alle generazioni nelle interazioni deboli, si arriva ad osservare mesoni costituiti di quark up, down, anti-up, anti-down, quindi $\pi^{+/-}$. I quali effettivamente sono gli adroni a due quark più leggeri in assoluto; tuttavia i pioni non sono stabili per interazione debole, e attraverso il processo schematizzato qua di seguito, decadono. Diverso è il discorso per il mesone π^0 , il quale è stabile

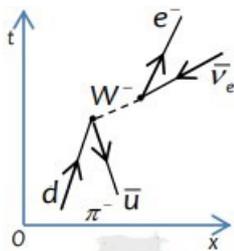


Figura 4.2: Decadimento di un π^- in un elettrone e un anti neutrino elettronico

per interazione debole, ma instabile per interazione elettromagnetica, per cui decade in una coppia di fotoni. A tale spiegazione bisogna precisare che in natura è difficile riscontrare muoni o tauoni, questo fatto è legato ad una trasmutazione di sapore tra le generazioni leptoniche (in analogia a quanto descritto per i quark), alla fine delle quali rimane unicamente l'elettrone, in quanto leptone meno massivo. Per quanto riguarda il discorso dei barioni, anche loro in analogia ai mesoni, tenderanno a decadere per interazione debole verso il barione più leggero: protone oppure il neutrone (è instabile

perché ha massa superiore al protone, però è stabilizzato dal principio di Pauli, visto che la differenza di massa è lieve). Il protone, differentemente dai pioni, non decade per spiegare ciò si è introdotto il numero barionico che l'interazione debole deve necessariamente conservare, dal momento in cui non si osservano decadimenti del protone allo stato naturale. Il numero barionico mi garantisce che un barione non possa non decadere in un barione, di conseguenza il protone, essendo il più leggero in assoluto, non decade.

4.4 I magneti superconduttore di LHC

Tali magneti costituiti da bobine, realizzate con superconduttori, attraversate da corrente elevatissima che generano un campo magnetico B molto intenso, di circa 8/10 tesla. Tale campo viene posto essere ortogonale al fascio di particelle. Il motivo per il quale si usano i superconduttori è legato proprio alla necessità di usare correnti elevatissime, difatti a bassissime temperature questi materiali posseggono una resistività nulla, equivalentemente una conducibilità praticamente infinita. Questi materiali vengono prima di tutto impregnati di azoto liquido a $T = 78$ K, poi successivamente di elio superfluido a $T = 1.9$ K. Questi magneti impiegati in LHC sono circa di 50 tipi differenti e grazie ad essi è possibile mantenere il fascio sulla sua traiettoria nominale. I fasci principali attraversano una serie di acceleratori di forma circolare o rettilinea prima di entrare nell'anello principale. I magneti servono a deflettere i fasci di particelle così che i due fasci collidano frontalmente esattamente nei punti di competenza dei quattro esperimenti. Inoltre il fascio è focalizzato da 132 quadrupoli magnetici che impediscono al fascio di essere disperso per interazione coulombiana: essi si dispongono in modo alternato sulla verticale del fascio (quadripoli D) e sull'orizzontale (quadripoli F). Tra i magneti di LHC sono inoltre presenti 1232 Main Dipoles, di 15 m di lunghezza che producono un campo magnetico di circa 8 T mantenendo le particelle dei fasci sull'orbita circolare di 27 km di circonferenza.

Bibliografia

- [1] S. Braibant, G. Giacomelli, M. Spurio, *Particelle e Interazioni Fondamentali*, Springer-Verlag Italia 2012
- [2] A. Andronic, An overview of the experimental study of quark-gluon matter in highenergy nucleus-nucleus collisions, [arXiv:nucl-ex/1407.5003], 2014
- [3] Phenomenological Review on Quark Gluon Plasma: Concepts vs. Observations Pasechnik, Roman et al. *Universe* 3 (2017) no.1, 7 arXiv:1611.01533 [hep-ph]
- [4] Barbara Guerzoni. Identified primary hadron spectra with the TOF detector of the ALICE experiment at LHC PhD thesis, Alma Mater Studiorum, Università di Bologna, 2012
- [5] Sarkar, Sourav, Satz, Helmut Sinha, Bikash (Ed.). (2010). *The physics of the quark gluon plasma Introductory lectures*. Germany: Springer
- [6] J. Adams, et al., Evidence from d+Au measurements for final-state suppression of high $p(T)$ hadrons in Au+Au collisions at RHIC, *Phys.Rev.Lett.*91:072304,2003
- [7] N. Cartiglia et al., *NIM A* 924 (2019) 350-354. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.09.157>
- [8] <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ab7b2d>
- [9] L. Pancheri et al., *IEEE Tran. Electron Dev.*, Vol. 67, No. 6, June 2020. doi: 10.1109/TED.2020.2985639
- [10] R. Abdul Khalek et al., *Science Requirements and Detector Concepts for the Electron-Ion Collider: EIC Yellow Report*, 2021. <https://arxiv.org/abs/2103.05419>.
- [11] F. Carnesecchi, "Experimental study of the time resolution for particle detectors based on MRPC, SiPM and UFSD technologies", 2018.
- [12] P. Fernandez-Martinez, D. Flores, S. Hidalgo, V. Greco, A. Merlos, G. Pellegrini, D. Quirion, Design and Fabrication of an Optimum Peripheral Region for Low Gain Avalanche Detectors, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 821, pp. 93100, 2016, DOI: 10.1016/j.nima.2016.03.049.
- [13] M. Noy, *The GigaTracker, RD50 workshop*, Torino, June 2016, <https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=11109>.