



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE

Facoltà di Fisica

Corso di Laurea Triennale in Fisica

Tesi di Laurea

APPLICAZIONE DI FOTOMOLTIPLICATORI AL SILICIO
A RIVELATORI DI PARTICELLE

Relatore:
Prof. Valter Bonvicini

Laureanda:
Anna Driutti

Correlatore:
Prof. Giovanni Pauletta

Anno Accademico 2006-2007

Indice

Indice	iii
Elenco delle figure	v
1 Introduzione	1
2 Un nuovo tipo di rivelatore: i fotomoltiplicatori al silicio	3
2.1 Rivelatori di radiazione	3
2.1.1 Caratteristiche dei fotorivelatori	3
2.2 Fotomoltiplicatori al silicio	7
3 I SiPM prodotti all’ITC-irst	9
3.1 Descrizione e caratteristiche dei dispositivi	9
3.2 Caratterizzazione dei SiPM	10
3.2.1 Misure statiche	10
3.2.2 Misure dinamiche	13
3.2.3 Effetti della temperatura	15
3.2.4 After pulsing e cross talk	18
4 Studio preliminare delle applicazioni dei SiPM alla fisica delle particelle	21
4.1 Applicazione dei dispositivi come rivelatori di particelle	21
4.2 Preparazione del set-up di misurazione	21
4.2.1 Ispezione ottica	21
4.2.2 Preparazione del circuito di readout	22
4.2.3 Preliminari misurazioni dinamiche	22
4.3 Misure su fascio	26
5 Conclusioni	31
Bibliografia	35

Elenco delle figure

2.1	Sezione di un PMT a 8 stadi amplificanti. Il fotoelettrone viene prodotto per effetto fotoelettrico al catodo e successivamente accelerato dal campo elettrico al primo di una serie di dinodi. Incidendo su un dinodo, l'elettrone produce N elettroni secondari. L'amplificazione è dunque $N \times M$, dove M è il numero di dinodi.	4
2.2	Schema di funzionamento di un APD. In questa figura, i fotoni provengono dall'estremità di un fibra ottica.	6
2.3	Schema semplificato di funzionamento di un SiPM, dove si mette in evidenza che la carica in uscita è proporzionale al numero di elementi della matrice attivati da fotoni incidenti.	7
2.4	SiPMs della Photonique e ingrandimento della zona sensibile.	8
3.1	Fotografia dell'ingrandimento della zona sensibile di un prototipo di SiPM dell'ITC-irst. È anche visibile, nell'angolo superiore a destra, il terminale al quale tutti i micro-pixel sono collegati in parallelo. . .	10
3.2	Disegno della giunzione superficiale e simulazione del profilo di drogaggio con corrispondente campo elettrico alla tensione di breakdown. . .	11
3.3	Caratteristica I-V in polarizzazione inversa di 5 IRST-SiPM di seconda generazione, ciascuno con 625 micro-celle e un'area sensibile di $1 \times 1 \text{ mm}^2$	12
3.4	Caratteristica I-V in polarizzazione diretta di 5 IRST-SiPM di seconda generazione, ciascuno con 625 micro-celle e un'area sensibile di $1 \times 1 \text{ mm}^2$	13
3.5	Impulsi al buio di un MRS SipM prodotto dalla Forimtech.	14
3.6	Misura del dark count in funzione della tensione soprasoglia per diversi SiPM dell'IRST a temperatura ambiente.	15
3.7	Misura dell'ampiezza di segnale in funzione della tensione inversa di bias per uno dei SiPM dell'IRST a diverse temperature.	16
3.8	Misura della tensione di breakdown a diverse temperature per uno dei SiPM dell'IRST.	17

3.9	Misura del dark count in funzione della tensione soprasoglia per uno dei SiPM dell'IRST a diverse temperature.	18
3.10	A sinistra é mostrato l'impulso primario seguito da after-pulses, a destra la probabilità di afterpulsing in funzione della tensione di bias V	19
4.1	Ingrandimento del bonding wire di un SiPM dell'IRST.	22
4.2	Schema del circuito di readout utilizzato per leggere il segnale dei SiPM.	23
4.3	Schema del setup del PMT test facility.	24
4.4	Distribuzione di carica di un dispositivo IRST con $V_{bias} = -35V$ e 5500 conteggi.	25
4.5	Specifiche dell'IRST riguardo l'andamento del guadagno in funzione della tensione di bias a temperatura ambiente ($22^{\circ}C$).	26
4.6	Schema e sezione del contatore a scintillazione costruito per testare i dispositivi su fascio di test.	27
4.7	Schema del setup per rivelazione dei raggi cosmici utilizzato per verificare l'allineamento del SiPM con la fibra ottica.	27
4.8	Distribuzioni del segnale proveniente dal SiPM est (a destra con $V_{bias} = -35V$ e a sinistra con $V_{bias} = -36V$) in cui sono indicati il picco del piedistallo e i picchi dovuti ad uno e due fotoelettroni.	28
4.9	Distribuzione del segnale del piedistallo.	28
4.10	Spettro del contatore di muoni.	29
5.1	Nuove geometrie dei IRST-SiPM di quarta generazione e percentuale di incremento del fill factor.	32

Capitolo 1

Introduzione

In questo elaborato viene riportata un'indagine preliminare sull'applicazione di esemplari di un nuovo tipo di fotorivelatore al silicio prodotto localmente dal Centro di ricerca Scientifica e Tecnologica della Fondazione Bruno Kessler (FBK-irst) di Trento. Tale rivelatore si distingue per il suo alto guadagno intrinseco che s'avvicina a quello dei fotomoltiplicatori tradizionali e che gli ha valso, tra le altre, la denominazione di Silicon Photomultiplier (SiPM). L'applicazione riguarda l'uso di questi rivelatori per la costruzione di rivelatori a muoni, al fine di confronto con fotomoltiplicatori convenzionali, ma lo scopo dell'indagine si integra a quello, più generale, della collaborazione FACTOR, un progetto triennale, finanziato dall'INFN, per la caratterizzazione e l'adattamento dei SiPM a rivelatori di particelle utili alla fisica delle particelle ed all'astrofisica.

Nel secondo capitolo sono riassunte le principali novità ed i punti deboli di questi rivelatori rispetto quelli convenzionali. Nel terzo capitolo sono state illustrate le principali caratteristiche analizzate ed i risultati ottenuti dalle misure, in particolar modo quelle statiche (caratteristiche tensione-corrente) e dinamiche effettuate al buio. Nel quarto capitolo sono riportati i risultati delle applicazioni su fasci di protoni ad alta energia a Fermilab con attenzione ad altri particolari dell'apparato sperimentale utilizzato. Infine, nelle conclusioni, vengono discusse le applicazioni previste per il futuro.

Capitolo 2

Un nuovo tipo di rivelatore: i fotomoltiplicatori al silicio

2.1 Rivelatori di radiazione

La rivelazione della radiazione è legata al fenomeno fisico dell'interazione radiazione - materia, che dipende dal tipo e dall'energia della radiazione che investe la materia. Lo scopo dei rivelatori è rendere misurabili gli effetti e le proprietà delle radiazioni, siano esse particelle cariche o quanti di luce, e le loro applicazioni interessano tutti i settori della fisica sperimentale. Ad esempio rivelatori di radiazioni vengono usati in alcune apparecchiature per la medicina nucleare, in astrofisica e in fisica delle alte energie.

Storicamente, i primi rivelatori per radiazioni erano molto semplici e nel corso degli anni essi si sono evoluti e diversificati molto. Attualmente nella fisica delle alte energie gli apparati sperimentali sono costituiti da sistemi estremamente complessi formati da un gran numero di sottomoltiplicatori ciascuno con caratteristiche specifiche. La ricostruzione e l'analisi dei dati prodotti nei grandi esperimenti di fisica delle alte energie richiedono metodologie e strumenti software estremamente sofisticati, nonché grande potenza di calcolo.

Vista la grande complessità del problema della rivelazione e l'importanza delle applicazioni, sia i rivelatori che i metodi di rivelazione sono campi in continuo sviluppo.

2.1.1 Caratteristiche dei fotorivelatori

La radiazione luminosa viene analizzata attraverso particolari rivelatori detti fotorivelatori, alcuni dei quali basano il proprio funzionamento sull'effetto fo-

toelettrico e sul fatto che, quando una particella carica di alta energia passa attraverso la materia eccita e ionizza gli atomi lungo il suo percorso. Nel corso della loro eccitazione e diseccitazione vengono emessi fotoni che producono fotoelettroni quando incidono sulla superficie sensibile dei rivelatori per effetto fotoelettrico.

In generale i fotorivelatori danno, come risposta al segnale luminoso, un segnale elettrico che nei casi migliori può essere proporzionale alla radiazione incidente. I segnali dati dalle radiazioni solitamente sono poco intensi. È necessaria quindi un'amplificazione interna o esterna al dispositivo utilizzato per l'acquisizione affinché le informazioni raccolte possano essere discriminate dal rumore di fondo e registrate. Tra i primi dispositivi realizzati con amplificazione interna ci sono i fotomoltiplicatori (PMT figura 2.1). Essi sono in grado di moltiplicare la carica fondamentale iniziale di $10^6 - 10^8$ volte. Questa ampli-

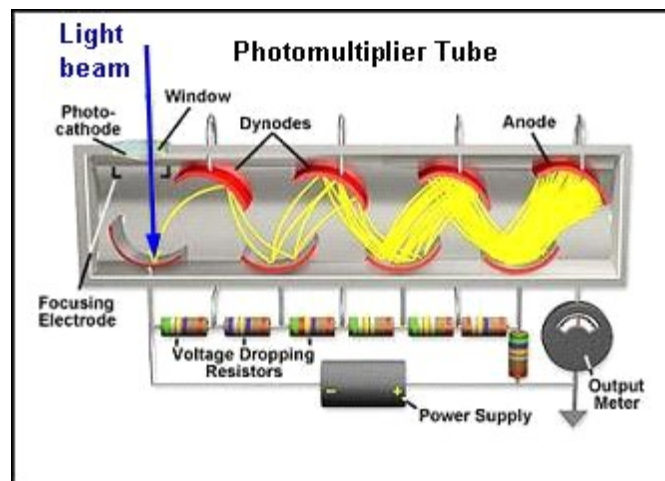


Figura 2.1: Sezione di un PMT a 8 stadi amplificanti. Il fotoelettrone viene prodotto per effetto fotoelettrico al catodo e successivamente accelerato dal campo elettrico al primo di una serie di dinodi. Incidendo su un dinodo, l'elettrone produce N elettroni secondari. L'amplificazione è dunque $N \times M$, dove M è il numero di dinodi.

cazione interna, detta guadagno, è tale da ridurre la necessità di amplificazione esterna al dispositivo. Poiché essa è costante, la risposta è lineare e l'analisi dei segnali rivelati e moltiplicati dai PMT può servire per fornire un'informazione sull'energia emessa dalla sorgente. Inoltre, la risposta è particolarmente rapida (dell'ordine di ns) e, di conseguenza, i dispositivi sono particolarmente indicati per fornire un'informazione precisa sul tempo di arrivo dell'impulso luminoso. Nonostante i PMT utilizzino una tecnologia affidabile ed ottimizzata nel corso

di vari decenni, essi hanno alcune limitazioni, tra le quali un notevole ingombro fisico, con il conseguente spazio morto tra i tubi, la sensibilità alla presenza di campi magnetici e le alte tensioni di alimentazione.

Successivamente al PMT, sono stati sviluppati dei fotorivelatori a semiconduttore che sono essenzialmente dei diodi a giunzione *pn* polarizzati inversamente. La zona sensibile di questi dispositivi consiste in un sottile strato di materiale semiconduttore. Quando la luce incidente raggiunge il volume sensibile del semiconduttore per effetto fotoelettrico nella sua struttura microscopica avvengono transizioni tra banda di valenza e banda di conduzione. Tali transizioni corrispondono ad una generazione di corrente e si ottiene quindi come risposta un segnale elettrico. La qualità complessiva del rivelatore dipende da alcune caratteristiche quali linearità, tempo di risposta ed efficienza. In particolare l'efficienza di rivelazione dipende dalle caratteristiche della zona dove la luce viene assorbita e convertita in segnale elettrico. Le caratteristiche intrinseche del dispositivo sono il guadagno (amplificazione interna) e l'efficienza quantica QE (quantum efficiency). L'efficienza quantica è definita come il rapporto tra il numero di segnali rivelati (quelli corrispondenti all'interazione di fotoni esterni e non segnali di fondo) e il numero di fotoni incidenti sulla superficie attiva e dipende solo dal materiale del rivelatore e dalla lunghezza d'onda incidente. Però il processo di rivelazione è condizionato anche da molti altri parametri propri del dispositivo stesso come ad esempio la riflessione da eventuali strati protettivi della superficie attiva e l'amplificazione interna (guadagno). In generale si usa definire l'efficienza di rivelazione DE (detection efficiency) per una valutazione globale del dispositivo integrato ad uno specifico apparato di rivelazione. L'efficienza di rivelazione viene calcolata come prodotto fra efficienza quantica, efficienza geometrica (rapporto tra area sensibile e area totale del dispositivo) ed eventuali efficienze dovute a soglie elettroniche esterne. L'efficienza complessiva tiene dunque conto di tutte le caratteristiche intrinseche del dispositivo e di tutte quelle dell'elettronica di supporto. Il guadagno (amplificazione interna), nel caso di fotodiodi che operano a tensioni di bias inferiori a quelle in cui inizia l'effetto a valanga, è uno perché un fotone che converte genera una sola coppia elettrone - lacuna. D'altra parte, il numero di transizioni (e dunque il segnale) è proporzionale al numero di fotoni incidenti. Segue che la risposta di questi dispositivi è lineare.

Uno dei fattori che incidono di più sulla sensibilità di rivelazione è il rumore. Esso è dovuto principalmente alla presenza di segnali elettrici emessi in assenza di luce. Le fonti di rumore dipendono generalmente dalla natura del rivelatore ma una casuale e comune a tutti deriva dalla cosiddetta corrente di buio dovuta a portatori generati termicamente nella zona sensibile del dispositivo. Questi segnali costituiscono un disturbo che si sovrappone al segnale prodotto dalla

luce incidente e pone un limite al segnale minimo che può essere rivelato dal sensore. Tale limite può contribuire a ridurre l'efficienza complessiva del rivelatore.

Al fine di aumentare la quantità di segnale generato da un singolo evento, si sono sviluppati dei particolari rivelatori a semiconduttore chiamati fotodiodi a valanga (avalanche photodiode o APD). La caratteristica principale di questi dispositivi è che accrescono il guadagno attraverso la generazione, a partire dall'elettrone eccitato dal fotone incidente, di ulteriori portatori di carica tramite una moltiplicazione a valanga. In figura 2.2 è riportato uno schema del funzionamento di questi dispositivi.

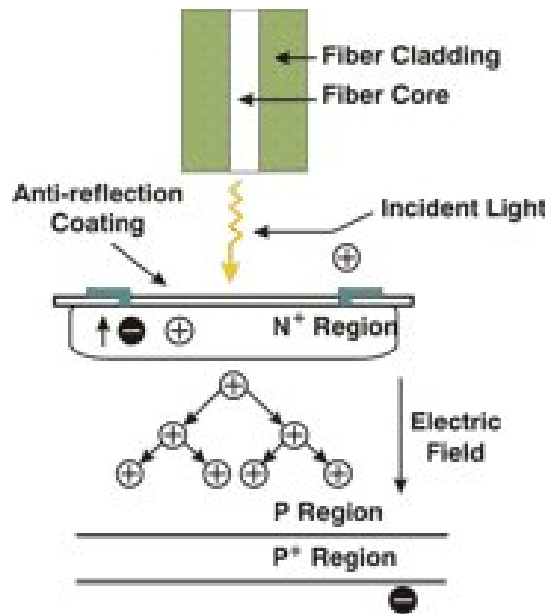


Figura 2.2: Schema di funzionamento di un APD. In questa figura, i fotoni provengono dall'estremità di una fibra ottica.

Un APD funzionante in modalità Geiger presenta una risposta non lineare ed in particolare non è in grado di distinguere tra uno o più fotoni poiché la risposta non varia nel caso in cui interagiscano uno o più fotoni. Dalla necessità di superare questa limitazione nasce l'idea di combinare su un substrato di silicio comune una matrice di celle Geiger-APD connesse in parallelo e ciascuna di esse in serie ad una resistenza di quenching (figura 2.3).

Questa matrice, composta da piccoli fotodiodi a valanga, ognuno in grado di sostenere una scarica Geiger che va a contribuire in parallelo attraverso

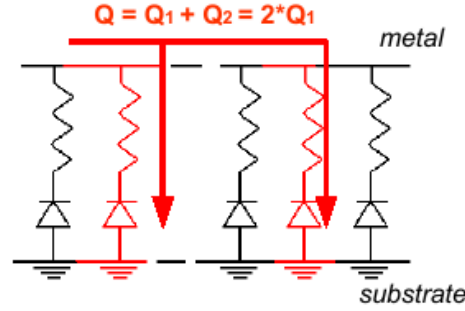


Figura 2.3: Schema semplificato di funzionamento di un SiPM, dove si mette in evidenza che la carica in uscita è proporzionale al numero di elementi della matrice attivati da fotoni incidenti.

una resistenza di quenching, è chiamata fotomoltiplicatore al Silicio (SiPM) o fotomoltiplicatore allo stato solido (SSPM) (figura 2.4).

2.2 Fotomoltiplicatori al silicio

I primi prototipi di SiPMs, sono stati proposti negli anni novanta da Golovin e Sadygov [1]. Questi dispositivi sono fotorivelatori a semiconduttore che hanno proprietà comparabili con i tradizionali PMT, ma godono di alcuni vantaggi come compattezza, bassa tensione di alimentazione e bassa sensibilità a campi magnetici esterni. Il guadagno s'avvicina a quello dei PMT (circa 10^6) e pertanto, non necessitano di sofisticati amplificatori esterni. Inoltre, i tempi di salita del segnale sono molto brevi (~ 100 ps). Tuttavia essi hanno delle limitazioni intrinseche per quanto riguarda l'area di rivelazione (che è dell'ordine dei mm^2 rispetto ai cm^2 dei PMT), un rumore termico non trascurabile ($0.1 - 1$ MHz) ed una notevole sensibilità alla temperatura. Nonostante questi svantaggi, è verosimile che questi dispositivi in futuro possano avere applicazioni in diverse aree: nella fisica delle alte energie, nell'astrofisica, in medicina nucleare (specie nella PET, Positron Emission Tomography), nella misura del tempo di volo delle particelle cariche (TOF, Time of Flight) e in tutti i campi dove è richiesta la rivelazione di fotoni. [2]

Nel dettaglio, questi rivelatori sono costituiti da molti micro-pixel in silicio, collegati in parallelo fra loro che lavorano indipendentemente uno dall'altro. Ciascuna di queste unità è un fotodiodo a valanga (APD) che lavora nella zona Geiger-mode limitato. In questa zona il diodo è polarizzato inversamente con una tensione di bias superiore a quella di breakdown ed è percorso, a tempe-

ratura ambiente, da una corrente stazionaria dell'ordine dei microampère .

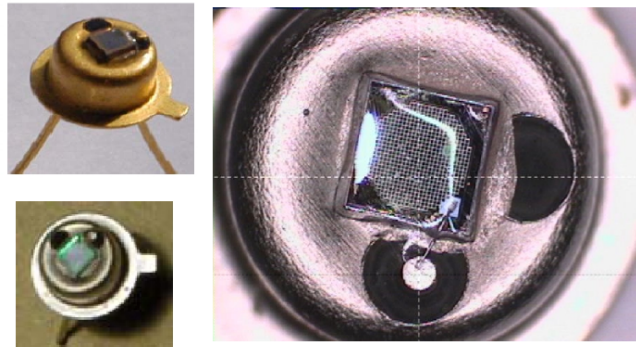


Figura 2.4: SiPMs della Photonique e ingrandimento della zona sensibile.

Quando un fotone attraversa la superficie sensibile del singolo pixel viene prodotta per effetto fotoelettrico, nella regione svuotata del diodo, una coppia elettrone-lacuna che viene successivamente moltiplicata a valanga per effetto del forte campo elettrico applicato. Ogni singolo pixel inoltre è accoppiato in serie ad una resistenza di quenching (dell'ordine di centinaia di $k\Omega$) che ha il compito di spegnere la scarica per effetto di riduzione della tensione ai capi del diodo con l'aumento di corrente. Questo processo è chiamato limitazione passiva. Per ciascun pixel eccitato da un fotone incidente si ha quindi un segnale elettrico uguale. Il segnale di risposta del SiPM corrisponde alla somma di tutti i segnali uscenti dai pixel eccitati dalla radiazione ed è dunque funzione del numero di fotoni incidenti. In questo modo, nelle applicazioni dove il numero dei fotoelettroni incidenti è piccolo rispetto al numero delle celle, si ha che il segnale di uscita è proporzionale al numero di fotoni incidenti (linearità).

Questi dispositivi sono prodotti da diverse industrie con diverse tecnologie. In Italia sono stati prodotti per la prima volta nel 2005 dall'ITC-irst di Trento (ora Centro di Ricerca Scientifica e Tecnologica della Fondazione Bruno Kessler FBK-irst [4]) nell'ambito di un programma di ricerca tecnologica svolto all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN-gruppo V). Scopo del progetto è migliorare la tecnologia dei dispositivi e avvantaggiarne la commercializzazione.

Capitolo 3

I SiPM prodotti all'ITC-irst

3.1 Descrizione e caratteristiche dei dispositivi

I SiPM prodotti all'ITC-irst sono composti da una matrice di GM-APD connessi in parallelo attraverso resistenze di quenching, sulla parte fotosensibile anteriore, e da uno strato conduttivo sul retro. I dispositivi hanno un'area totale di $1 \times 1 \text{ mm}^2$, suddivisa in 625 GM-APD, detti micro-pixel (figura 3.1), di area di $40 \times 40 \text{ }\mu\text{m}^2$ su ognuno dei quali è stato depositato un resistore di polisilicio che ha la funzione di resistenza di quenching (R_{quench}), a differenza di quelli prodotti da altre aziende che realizzano tale resistenza con tecnologia MRS, (Metal-Resistive-Semiconductor).

L'area attiva della giunzione è inoltre coperta da uno strato di resina antiriflettente ottimizzata per la trasmissione della luce con piccola lunghezza d'onda [3]. L'ottimizzazione viene fatta attraverso la modellazione del profilo di drogaggio (figura 3.2) ovvero riducendo lo spessore dello strato n il più possibile, in modo che anche i fotoni con piccola lunghezza d'onda (400 – 450 nm) possano raggiungere la regione svuotata e quindi essere rilevati.

Siccome la progettazione di questi dispositivi di prima produzione non era stata ottimizzata per l'efficienza di fotorivelazione (photodetection efficiency o PDE), l'efficienza geometrica, chiamata anche fattore di riempimento (fill factor), è relativamente piccola (è circa del 20%).

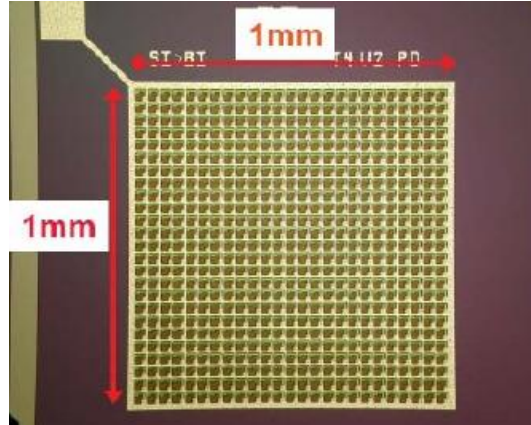


Figura 3.1: Fotografia dell'ingrandimento della zona sensibile di un prototipo di SiPM dell'ITC-irst. È anche visibile, nell'angolo superiore a destra, il terminale al quale tutti i micro-pixel sono collegati in parallelo.

3.2 Caratterizzazione dei SiPM

Le principali caratteristiche, che influiscono sulle applicazioni dei dispositivi in questione, sono il guadagno, il rumore, l'efficienza di fotorivelazione (PDE), il range dinamico, le caratteristiche temporali (il tempo di salita, di recupero e la risoluzione temporale), la resistenza alla radiazione e la sensibilità al campo magnetico. Sono state effettuate misure statiche per valutare la funzionalità, l'uniformità e la stabilità dei dispositivi e misure dinamiche per misurare i tempi di salita e discesa del segnale (signal rise time and fall time), il guadagno, la corrente di buio (dark current I_{dc}), il cross talk ottico, e l'afterpulsing.

3.2.1 Misure statiche

Le misure statiche sono il punto di partenza per caratterizzare questi dispositivi elettronici. In particolare, da esse è possibile ottenere una verifica della loro funzionalità ed estrarre importanti parametri quali la tensione di breakdown (V_{BD}) ed il valore medio della resistenza di quenching. Inoltre per i dispositivi di cui si conosce il guadagno è possibile ricavare il tasso dei conteggi di buio o viceversa.

Come nel caso di un diodo pn, in un SiPM sono rilevanti sia la misura in polarizzazione inversa che in quella diretta ed è proprio dalle caratteristiche corrente-tensione (I-V) in tali regioni di funzionamento che si valutano rispettivamente i valori della tensione di breakdown V_{BD} e della resistenza di quenching R_{quench} .

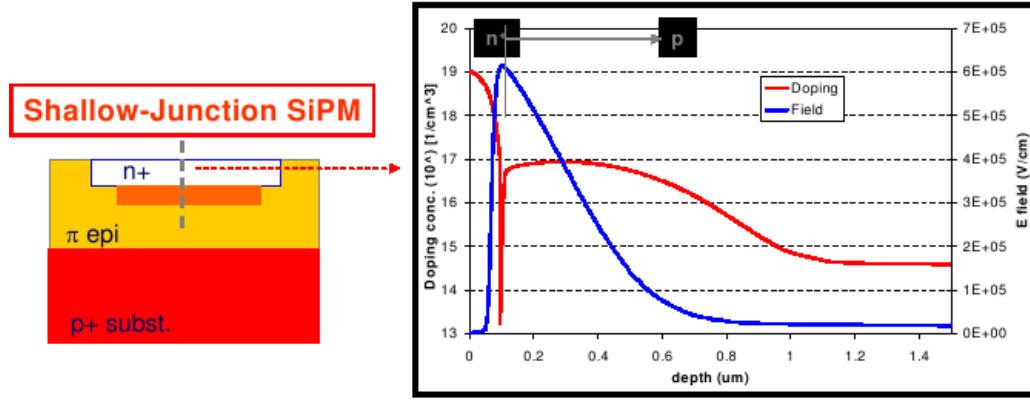


Figura 3.2: Disegno della giunzione superficiale e simulazione del profilo di drogaggio con corrispondente campo elettrico alla tensione di breakdown.

In figura 3.3 sono riportate le caratteristiche I-V in polarizzazione inversa di cinque dispositivi e i rispettivi valori di tensione di breakdown.

Si nota subito che i dispositivi in generale hanno tutti V_{BD} attorno a -33V e una corrente di breakdown (I_{BD}) di circa 3.6 nA.

Da questa caratteristica possiamo ottenere accurate informazioni riguardo i conteggi di buio (dark counts), il guadagno e la corrente di buio (I_{dc}). Infatti, [3] quest'ultima, si può calcolare come $I_{dc} = I_{tot} - I_{leak}$, assumendo che la corrente di perdita (I_{leak}) abbia un aumento lineare per tensioni maggiori di quella di breakdown. Inoltre $I_{dc} \propto G \cdot DC$ dove G è il guadagno e DC il tasso di conteggio di buio. Poiché sono entrambi proporzionali alla sovratensione ΔV (definita come $\Delta V = V - V_{BD}$), la corrente ha un aumento proporzionale al quadrato della sovratensione ($I_{dc} \propto \Delta V^2$).

Come detto in precedenza analizzando la caratteristica I-V in polarizzazione diretta, si ottiene il valore della resistenza di quenching. Osservando la curva della corrente al crescere della tensione diretta (figura 3.4) possiamo notare due diversi andamenti: fino a poche centinaia di mV è esponenziale, successivamente cresce linearmente con la tensione. Nella prima regione la corrente è essenzialmente determinata dalla resistenza equivalente del diodo dovuta alle singole micro-celle poste in parallelo perciò la corrente è descritta dall'equazione del diodo ideale [11]. Nella seconda regione la corrente è linearmente dipendente dalla tensione di bias perché essa è principalmente governata dalla resistenza di quenching delle micro-celle, le quali dominano sulla resistenza equivalente del diodo. Approssimando dunque la seconda regione ad

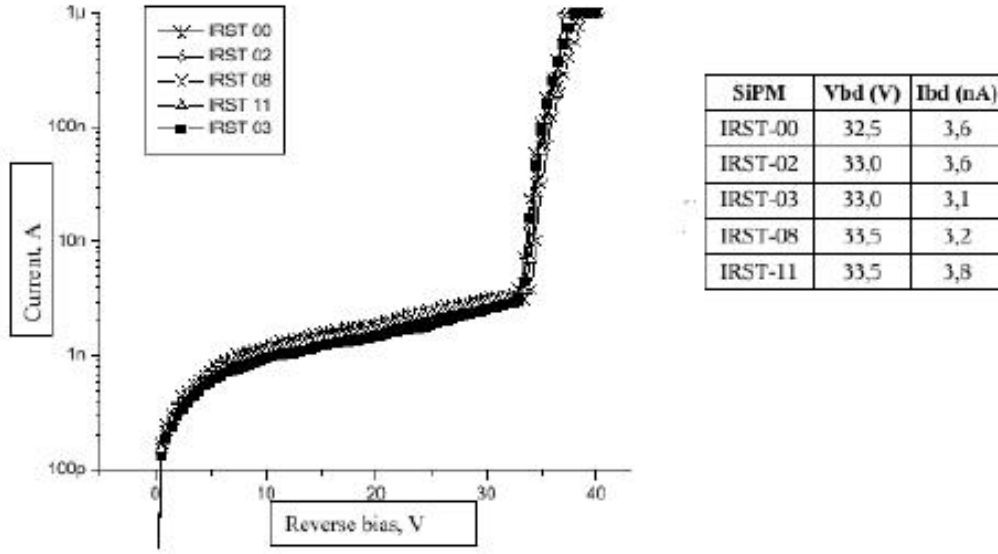


Figura 3.3: Caratteristica I-V in polarizzazione inversa di 5 IRST-SiPM di seconda generazione, ciascuno con 625 micro-celle e un'area sensibile di $1 \times 1 \text{ mm}^2$.

una funzione lineare è possibile estrarre il valore della resistenza di quenching (R_{quench}) complessiva e quindi calcolare la resistenza di ciascuna micro-cella [6]: $R_{micro-cell} = R_{quench} \cdot N_{micro-cell} = 600 \cdot 625 = 360k\Omega$. Questo valore è minore (2,5 – 50 volte) rispetto a quello delle resistenze di quenching dei dispositivi prodotti con la tecnologia Metal Resistive Semiconductor (MRS). Ciò comporta un più rapido tempo di recupero (fall time) per il segnale del SiPM. Questo tempo di recupero (detto recovery time) ha un andamento esponenziale governato dalla costante $\tau = R_q C_D$ (dove C_D rappresenta la capacità del diodo ovvero la somma delle capacità delle micro-celle essendo quest'ultime in parallelo) e quindi limita il tasso di conteggio al quale il dispositivo può operare. Un vantaggio dei dispositivi con la tecnologia MRS rispetto ai SiPM con resistore in polisilicio è che l'area occupata dai primi è minore quindi il fill factor è elevato.

Dalle misure statiche inoltre è stata misurata la capacità del diodo (C_D) ottenendo un valore ($\simeq 90fF$) compatibile con quello ($50fF$) basato sulle considerazioni strutturali [3].

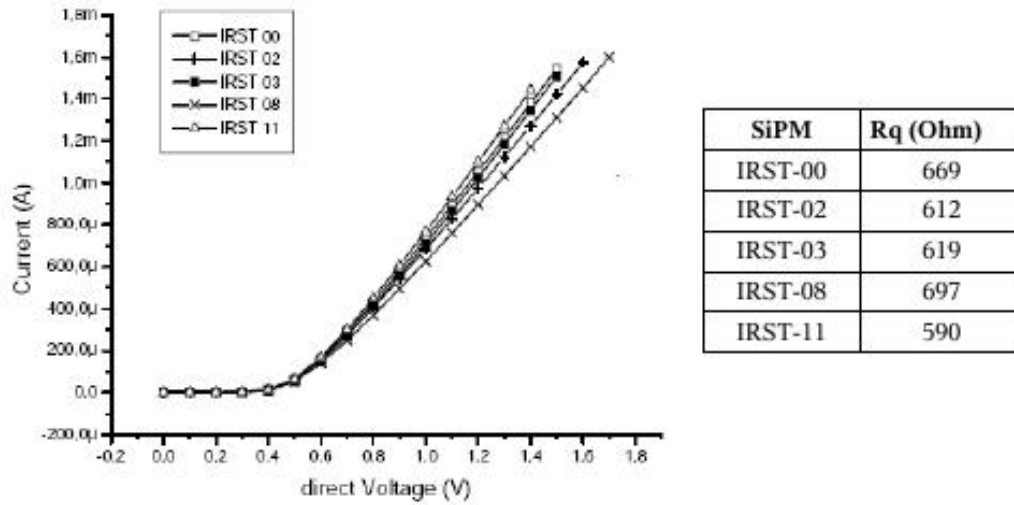


Figura 3.4: Caratteristica I-V in polarizzazione diretta di 5 IRST-SiPM di seconda generazione, ciascuno con 625 micro-celle e un'area sensibile di $1 \times 1 \text{ mm}^2$.

3.2.2 Misure dinamiche

Molto si può apprendere dai segnali di fondo dovuti a portatori di carica generati termicamente in assenza di stimoli luminosi esterni, in quanto corrispondono, per la grande parte, a scariche di singole micro-celle. Uno studio sistematico di questi segnali, accompagnato dallo sviluppo di apposita apparecchiatura, è stato intrapreso dalla collaborazione FACTOR successivamente alle misure iniziali che sono al cuore di questa tesi. Un riassunto sintetico di queste misure è incluso qui per completezza.

Tutte le misure riportate qui di seguito sono state effettuate al buio e a temperatura ambiente. La disposizione dell'attrezzatura di supporto utilizzata è molto semplice: il SiPM è montato su un circuito stampato nel quale è presente un amplificatore a banda larga (Agilent ABA-52563 Avago Technologies [8]). Quest'ultimo dispositivo ha dimensioni $1.8 \times 1.8 \text{ mm}^2$ e provvede a un guadagno di 20 dB con una larghezza di banda da 10 MHz a 3.5 GHz. Queste caratteristiche sono adeguate per uno studio di molte caratteristiche dei segnali estremamente veloci dei SiPM, il cui tempo di salita è dell'ordine di centinaia di picosecondi. L'impedenza d'ingresso dell'amplificatore è di 50 Ohm ed esso è stato testato e caratterizzato prima di iniziare le misure dinamiche dei SiPM.

Al buio, i segnali dei dispositivi in questione corrispondono a cariche gene-

rate dall'agitazione termica, le quali innescano una scarica quando attraversano la regione ad alto campo elettrico del dispositivo. In figura 3.5 sono mostrati due successivi impulsi di buio di un dispositivo della Forimtech con tensione di bias superiore di 4V alla tensione di breakdown. La forma dell'impulso presenta, come atteso, un tempo di salita veloce (circa 280 ps in questo caso), il quale è determinato dall'estendersi dell'effetto valanga.

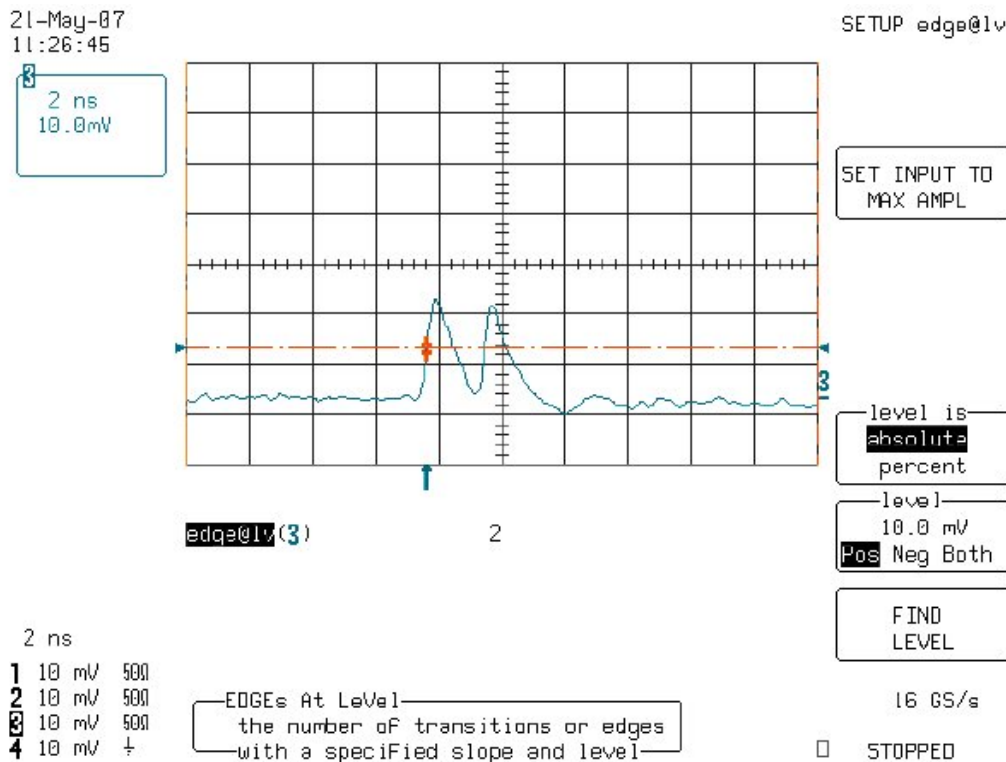


Figura 3.5: Impulsi al buio di un MRS SipM prodotto dalla Forimtech.

È da notare, inoltre, che il segnale presenta un tempo di discesa molto veloce (circa 2.2 ns per passare dal 90% al 10%) rispetto al lento andamento esponenziale del tempo di recupero. Ciò è dovuto alla larghezza di banda caratteristica dell'amplificatore usato in questo caso, il quale taglia le componenti del segnale a bassa frequenza.

Il tasso di conteggio dei DC o dark count (conteggio del numero di impulsi al secondo) è stato misurato al variare della tensione di bias attraverso il conteggio del numero di impulsi al secondo. Ovviamente, il DC è uno dei problemi più critici per alcune applicazioni dei SiPM, soprattutto per i dispositivi con un'area grande visto che essa pone dei limiti alla rivelazione dei segnali

con piccola intensità luminosa (di uno o pochi fotoelettroni). La misura di DC e dell'ampiezza di segnale in funzione della tensione di bias e della temperatura sono state fatte entrambe a temperatura ambiente in una camera con temperatura e umidità controllate. L'amplificatore è stato posizionato all'esterno di tale camera ed il segnale è stato trasportato attraverso dei cavi con impedenza di 50Ω e con una frequenza di lavoro di 18 GHz. In figura 3.6 è riportata la misura del dark count in funzione della tensione soprasoglia, per alcuni dispositivi dell'IRST.

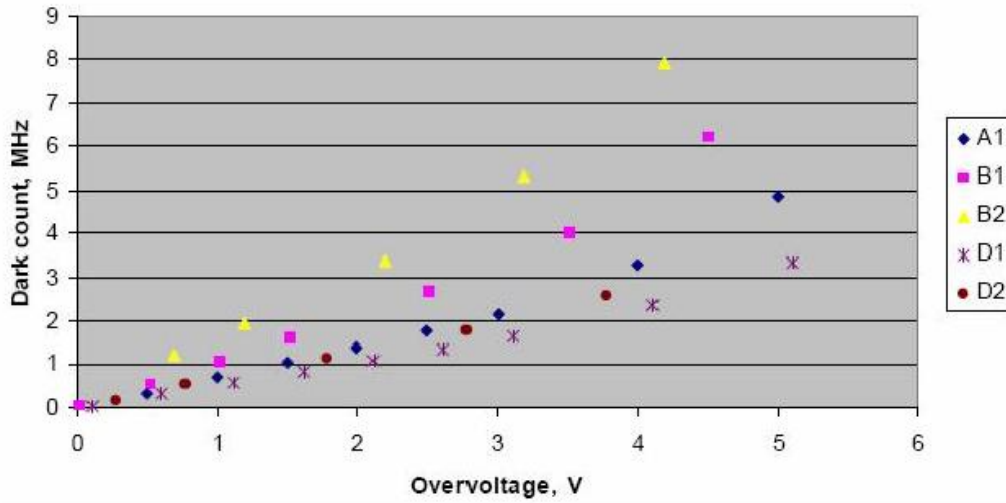


Figura 3.6: Misura del dark count in funzione della tensione soprasoglia per diversi SiPM dell'IRST a temperatura ambiente.

Queste curve sono state ottenute misurando il DC come funzione della tensione di bias V_{bias} (a cui in seguito è stata sottratta la tensione di breakdown V_{BD}). In generale, il rate dei conteggi di buio dei dispositivi dell'IRST sono, in media, bassi (per una certa tensione sopra il breakdown) rispetto a quelli ottenuti per gli altri tipi di dispositivi.

3.2.3 Effetti della temperatura

La valutazione degli effetti della variazione di temperatura nelle caratteristiche e nelle performance dei SiPM è un'importante caratteristica da valutare per le applicazioni sperimentali. Alcune applicazioni infatti richiedono che i dispositivi operino in un intervallo di temperature esteso. D'altra parte, operando il dispositivo a basse temperature altre applicazioni, che richiedono bassi livelli di conteggi di buio, possono beneficiare della sua riduzione. Infine, anche la

tensione di breakdown e il guadagno dipendono dalla temperatura e quindi è importante studiare, capire e possibilmente modellizzare la loro dipendenza da essa.

Le misure sono state eseguite mettendo il SiPM in una scatola schermata e riponendo il tutto in un ambiente climatizzato ad umidità controllata. Per evitare l'accoppiamento degli effetti della variazione della temperatura, sull'amplificatore con gli effetti di tale variazione sul SiPM stesso l'amplificatore è stato collocato fuori dalla camera climatica. Il SiPM è stato connesso all'amplificatore attraverso uno speciale cavo per microonde (operante alla frequenza di 18 GHz, e in grado di lavorare bene in un intervallo di temperatura compreso fra -55°C e $+105^{\circ}\text{C}$). La presenza di una termocoppia inserita all'interno del box che contiene il SiPM consente di misurare l'effettiva temperatura dell'aria nelle vicinanze del SiPM.

In figura 3.7 è mostrato il risultato ottenuto misurando l'ampiezza di segnale in funzione della tensione di bias applicata e a diverse temperature: 0°C , $+10^{\circ}\text{C}$, $+20^{\circ}\text{C}$, $+30^{\circ}\text{C}$, $+40^{\circ}\text{C}$ e $+50^{\circ}\text{C}$.

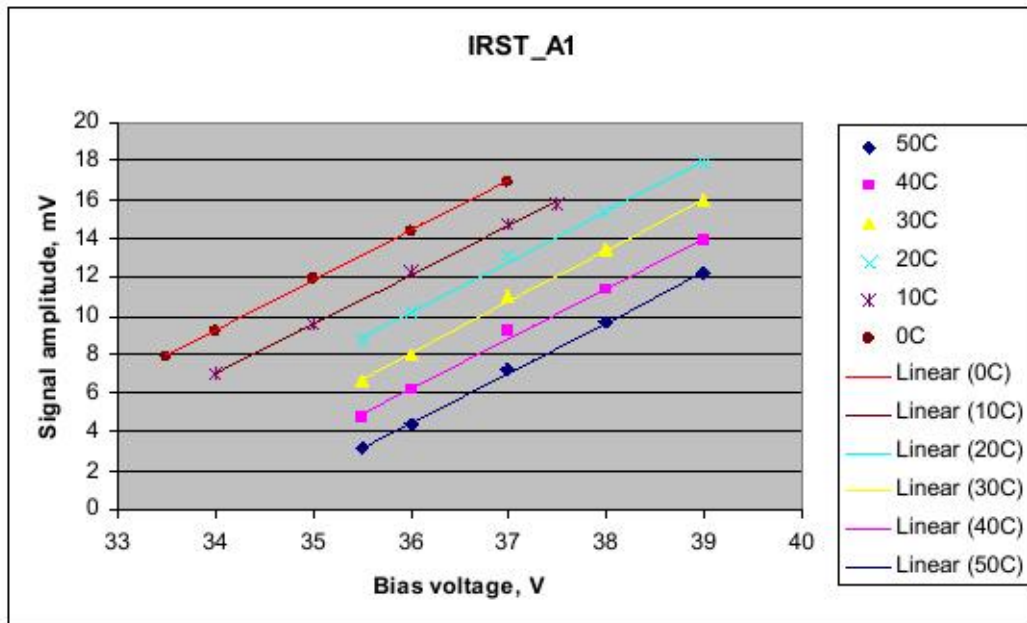


Figura 3.7: Misura dell'ampiezza di segnale in funzione della tensione inversa di bias per uno dei SiPM dell'IRST a diverse temperature.

L'ampiezza del segnale è inversamente proporzionale alla temperatura per una data tensione di bias. Questo andamento è dovuto al fatto che la tensione di breakdown cresce con la temperatura quindi le effettive sovratensioni

($\Delta V = V_{bias} - V_{BD}$) decrescono. Tracciando per ciascun set di dati del grafico precedente un fit lineare si ricava il valore della tensione di breakdown come intercetta dell'ascissa. In figura 3.8, sono riportati i valori ricavati per la tensione di breakdown a diverse temperature con il metodo precedentemente illustrato.

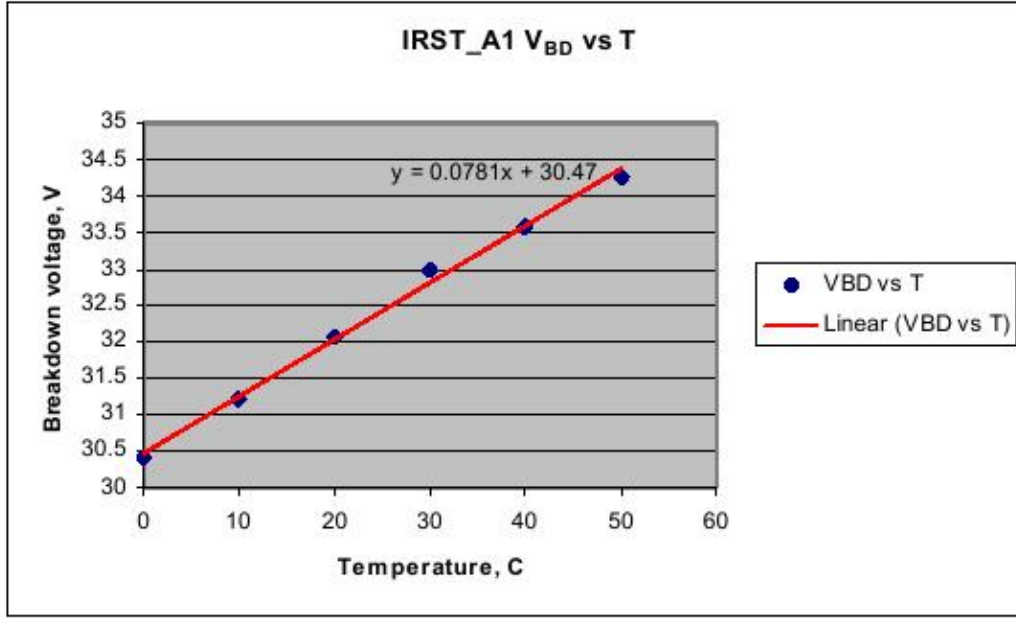


Figura 3.8: Misura della tensione di breakdown a diverse temperature per uno dei SiPM dell'IRST.

Tracciando la retta di regressione lineare si ottiene il coefficiente specifico di variazione con la temperatura che è circa $78 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, valore in accordo con quello fornito nelle specifiche dell'IRST. Inoltre la dipendenza dalla temperatura della tensione di breakdown è compatibile con una dipendenza negativa dalla temperatura del guadagno; quest'ultima è $G = (-0.40T + 2) \cdot 10^6$ [9]. Dalle misure effettuate si sono ottenuti risultati molto omogenei per i vari SiPM dell'ITC-irst.

Il tasso dei conteggi di buio (DC), come detto in precedenza, è dovuto principalmente alle cariche generate termicamente che innescano una valanga di portatori quando passano attraverso la regione con campo intenso del diodo dunque, come ci si aspetta, aumenta con la temperatura. Quest'andamento è mostrato in figura 3.9.

Da questo grafico si vede che a 0°C il rate dei conteggi di buio è circa 200kHz a due volt sopra V_{BD} e circa 0.75 MHz a sovratensione pari a 5.5V.

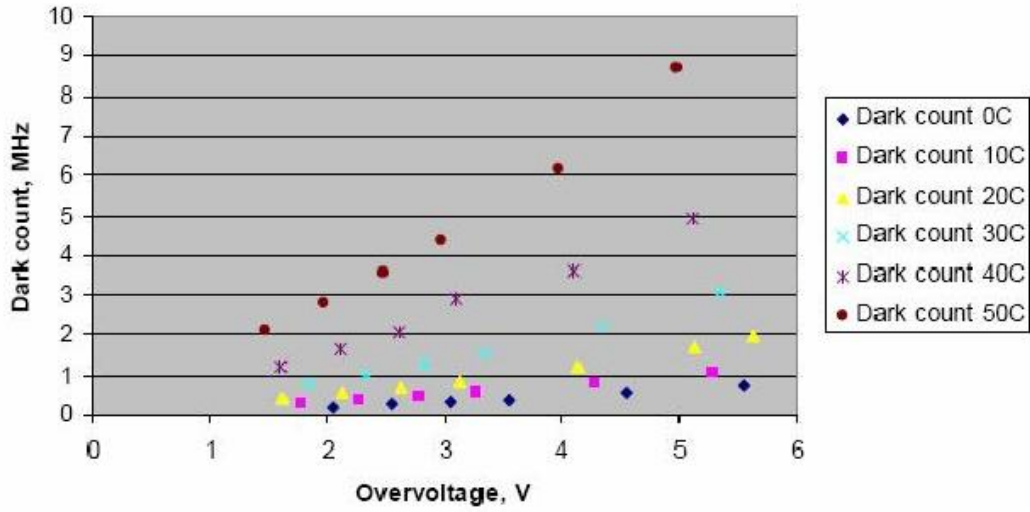


Figura 3.9: Misura del dark count in funzione della tensione soprasoglia per uno dei SiPM dell'IRST a diverse temperature.

3.2.4 After pulsing e cross talk

L'integrazione della carica del segnale produce uno spettro con dei picchi ben definiti [3], ma questi a volte presentano degli andamenti particolari dovuti all'afterpulsing e al cross-talk ottico. In particolare, l'afterpulse è il rumore dovuto ai portatori di carica che rimangono intrappolati nelle impurezze del silicio durante la valanga e vengono rilasciati successivamente scatenando una seconda valanga. Il cross talk ottico, invece, è un effetto indesiderato che si verifica quando, durante la scarica successiva alla rivelazione di un fotone da parte dell'area attiva, i portatori che formano la corrente inversa emettono fotoni che possono propagarsi nel silicio, raggiungere l'area attiva di una microcella adiacente, venire assorbiti ed innescare, così, la moltiplicazione a valanga in un altro pixel del SiPM. Entrambi i fenomeni generano un impulso non dovuto all'assorbimento di un fotone che va a sommarsi al rumore termico. Una soluzione a questi fenomeni è restringere l'integrazione di carica degli impulsi a un breve tempo, inferiore ai 10 ns dopo l'inizio della prima scarica. In questo modo l'after pulsing contribuisce poco perché soppresso dalla resistenza di quenching mentre il contributo del cross-talk è chiaramente distinguibile perché contribuisce il doppio dell'impulso originale. In figura 3.10 si vedono chiaramente (a sinistra) gli impulsi che seguono il segnale originale per effetto di afterpulsing. A destra è riportata la probabilità di afterpulsing in funzione della tensione di bias.

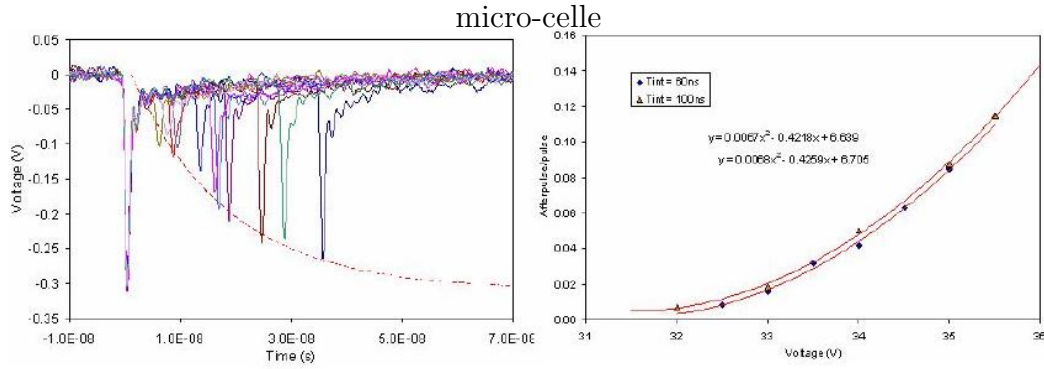


Figura 3.10: A sinistra é mostrato l'impulso primario seguito da afterpulses, a destra la probabilità di afterpulsing in funzione della tensione di bias V

In questo modo è stato stimato [10] che il cross-talk ottico contribuisce per meno del 5% a 4V sopra la tensione di breakdown. In figura 3.10, a destra, è inoltre mostrata la probabilità di afterpulsing in un intervallo di tempo inferiore ai 50 ns dopo il primo impulso. Infatti, dall'integrazione della carica in un grande intervallo di tempo si può valutare la probabilità di afterpulsing che è riportata nel grafico a destra come funzione della tensione di bias. La dipendenza parabolica di questa probabilità rispetto alla tensione di bias può essere spiegata in termini di incremento lineare sia della corrente di buio che della probabilità di innesco della valanga all'aumentare di ΔV e queste conclusioni sono supportate da studi [3] sulle singole micro-celle, dove il cross talk non contribuisce.

Per quanto riguarda l'efficienza di fotorivelazione [10] essa è stata stimata essere al massimo il 14% nell'intervallo di lunghezza d'onda tra 500 e 600 nm a 4V sopra la tensione di breakdown. Questa è relativamente piccola rispetto l'efficienza geometrica che è del 20%.

Capitolo 4

Studio preliminare delle applicazioni dei SiPM alla fisica delle particelle

4.1 Applicazione dei dispositivi come rivelatori di particelle

La prima applicazione, utilizzando i dispositivi dell'IRST, è stata fatta nell'esperimento T956 [12] su fascio di test al Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) [13]. Lo scopo dell'esperimento è stato quello di esaminare le prestazioni dei SiPM come rivelatori di particelle, in particolare muoni.

4.2 Preparazione del set-up di misurazione

Prima di accedere al fascio di test, i dispositivi sono stati ispezionati otticamente per verificare la loro integrità e per valutarne alcune caratteristiche. È stato inoltre costruito un circuito di read-out per amplificare il segnale da leggere e sono state effettuate delle misurazioni dinamiche per valutare la tensione di breakdown e la funzionalità dei dispositivi.

4.2.1 Ispezione ottica

L'ispezione ottica dei dispositivi è stata fatta per mezzo di un microscopio ottico. Lo scopo principale di quest'ispezione era quello di controllare che i SiPM non avessero subito danni durante il trasporto, poiché la parte sensibile dei dispositivi utilizzati non era protetta (e a volte viene coperta da una fi-

nestrella di quarzo o da resina protettiva). In particolare sono stati osservati attentamente i cavi di bonding (bonding wire, figura 4.1) e le micro-celle per controllare che non fossero danneggiati.

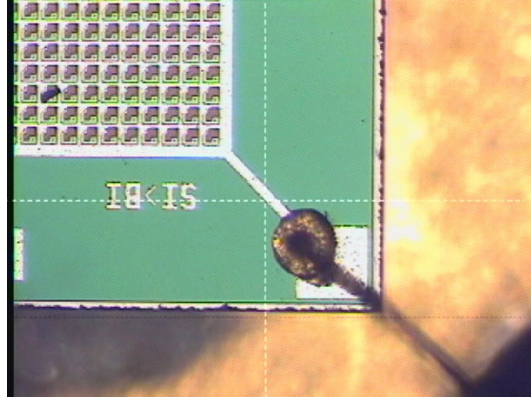


Figura 4.1: Ingrandimento del bonding wire di un SiPM dell'IRST.

Attraverso questa ispezione è stata valutata l'efficienza geometrica come rapporto fra area sensibile e area totale:

$$\epsilon = \frac{A_{active}}{A_{total}} = \frac{3,2 \cdot 10^5 \mu m^2}{9,9 \cdot 10^5 \mu m^2} = 0.3$$

Poiché le micro-celle sono parzialmente coperte dal resistore al polisilicio, non è stato possibile calcolare l'area attiva in modo accurato (è stato stimato che questa è all'incirca il 40% dell'area totale della della microcella), quindi il valore ottenuto è una sovrastima.

4.2.2 Preparazione del circuito di readout

È stata assemblata un'elettronica di lettura comprensiva di un amplificatore che poteva essere incluso o escluso a piacimento. In figura 4.2 ne è riportato lo schema.

Il circuito è stato costruito in modo tale da facilitare la sostituzione dei SiPM senza danneggiarli. L'insieme è quindi stato collocato in un astuccio costruito ad hoc in modo di poterlo rendere impervio alla luce ed allineabile con la sorgente di luce.

4.2.3 Preliminari misurazioni dinamiche

Prima di accedere al fascio di test sono state fatte alcune misure dinamiche per valutare la tensione di breakdown (e, di conseguenza, la tensione di bias

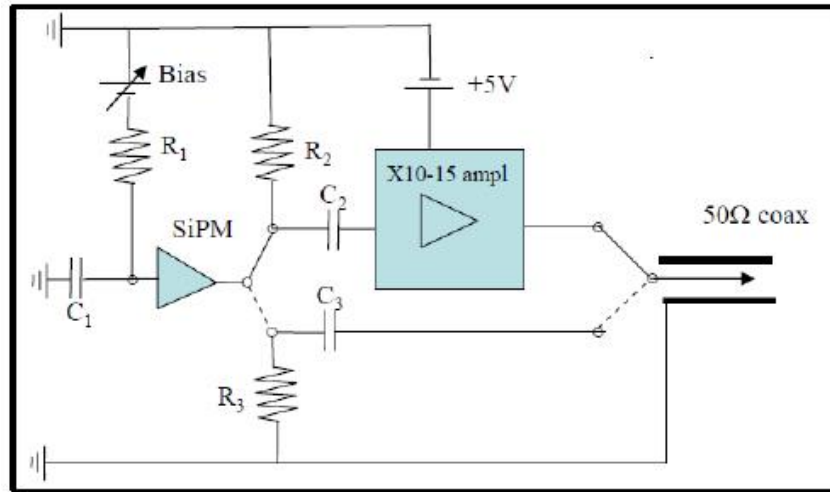


Figura 4.2: Schema del circuito di readout utilizzato per leggere il segnale dei SiPM.

ottimale per le applicazioni in fisica delle particelle) e l'allineamento con la sorgente di luce.

Misure con il LASER

I dispositivi sono stati testati con l'aiuto delle PMT test facility [14], la quale permette di illuminare con una luce laser a impulsi brevi (~ 5 ns) generata da un laser ad azoto e spostato su lunghezze d'onda di circa 450 nm da un colorante; tale liquido può, in linea di principio, essere sostituito da altri per ottenere lunghezze d'onda in un certo range. È presente inoltre un sistema di filtri calibrati attraverso il quale è possibile variare di alcuni ordini di grandezza l'intensità della luce incidente. La frequenza degli impulsi, i filtri di attenuazione (quindi l'intensità luminosa) e il sistema di acquisizione dati sono controllati dal pc. In realtà il setup del sistema in prova è diverso in quanto sono stati sostituiti, al posto di impulsi di luce generati da laser, segnali luminosi che hanno come sorgente un LED (Light Emitting Diode) dal momento che il rumore ad alta frequenza proveniente dal laser interferisce con il segnale proveniente dal SiPM. Eventualmente tale disturbo generato dal laser può essere facilmente fatto decadere sostituendo la fibra ottica che collega la scatola (box) dei laser alla scatola dei PMT con una più lunga. In seguito, figura 4.3, è riportato schema del setup.

Attraverso quest'apparecchiatura, sono stati svolti alcuni test preliminari da cui è stato ricavato che i SiPM utilizzati lavorano con tensioni tra i 34V e

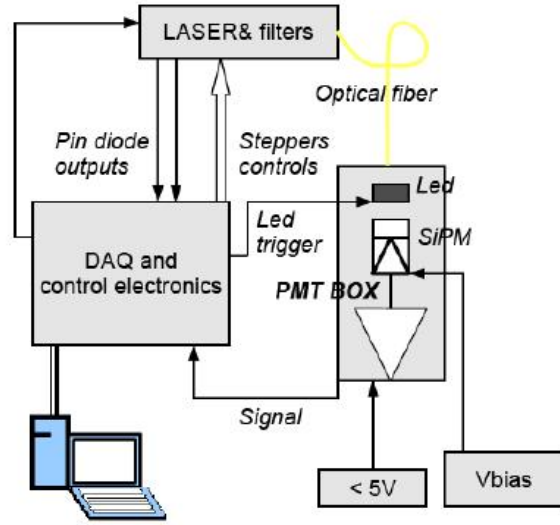


Figura 4.3: Schema del setup del PMT test facility.

37V. Assumendo una corrente inversa di $1 \mu A$ e usando nel circuito di read-out $R_1 = 100k\Omega$ e $R_2 = 10k\Omega$ (vedi figura 4.2), questo corrisponde al valore effettivo della tensione di bias solo di circa 0.1V più basso.

In questa gamma di tensioni, il singolo fotoelettrone (segnale di background) produce segnali di ampiezza fino a 10 e 15 mV in 50Ω . Anche se le più grandi di queste ampiezze sono sufficienti da essere distinguibili senza ulteriori amplificazioni addizionali esterne, esse sono talmente vicine ai livelli di rumore, dovuto all'elettronica, che è necessaria l'amplificazione per una buona risoluzione e separazione dei picchi corrispondenti a diversi numeri di micro-celle attivate (\sim numero di fotoni rilevati). Per questo motivo, tutte le distribuzioni di carica illustrate includono almeno un'amplificazione esterna di 10 volte.

Un esempio di distribuzione di carica integrata, di un SiPM illuminato dal LED, accumulata usando un ADC (analog to digital converter) con $0.25 pC/channel$ è mostrata in figura 4.4.

Da questa distribuzione possiamo dedurre che il segnale amplificato corrispondente ad un fotoelettrone è circa 10 canali dell'ADC, da ciò si ottiene il guadagno:

$$G = \frac{10 \cdot 0.25 \cdot 10^{-12} C}{1.6 \cdot 10^{-19} C} = 1.6 \cdot 10^7$$

Data un'amplificazione di 10 si ottiene $G \sim 1.6 \cdot 10^6$ per una tensione di bias di

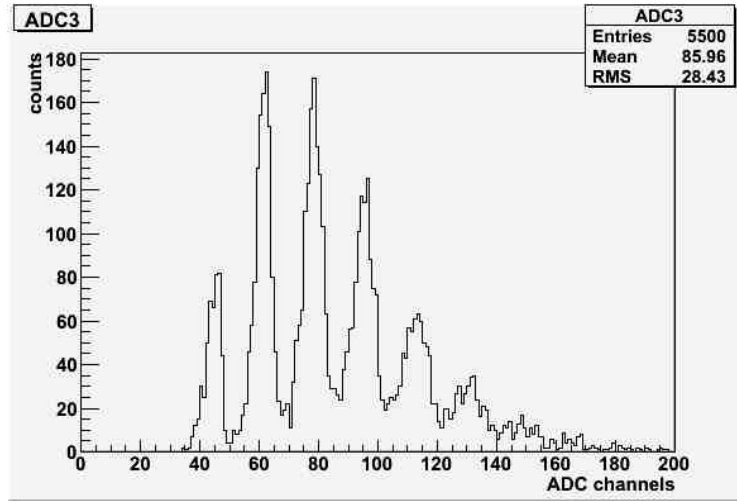


Figura 4.4: Distribuzione di carica di un dispositivo IRST con $V_{bias} = -35V$ e 5500 conteggi.

circa $-35V$. Questo valore è compatibile con quello che ci si aspetta osservando i valori delle specifiche dell'ITC-irst riportate in figura 4.5.

Misure con i raggi cosmici

Usando lo stesso circuito di readout e lo stesso supporto tecnico dei test preliminari, due SiPM sono stati montati alle estremità di uno scintillatore e infine allineati con la sezione di una fibra wavelength-shifting (wls) in grado di raccogliere e trasportare la luce che incide sullo scintillatore. Il contatore a scintillazione è schematizzato in seguito, figura 4.6.

La fibra wls è una fibra Y-11 con diametro di 1 mm e cementata, come in figura 4.6 (parte bassa), in una barra di scintillatore di polystyrene dello stesso tipo di quelle in uso per il contatore di muoni proposto per il futuro ILC (International Linear Collider) e in fase di prova al fascio di test MT6 del FNAL (esperimento T956 [12]). I SiPM sono stati allineati, attraverso un montaggio non ottimizzato, con le due estremità della fibra wls, precedentemente lucidata e successivamente cementata nella scanalatura dello scintillatore. La superficie sensibile del dispositivo è stata tenuta ad una distanza di circa mezzo millimetro dalla fibra. Poiché l'area di quest'ultima e quella attiva del SiPM hanno le stesse dimensioni (1 mm^2), la fase di allineamento è stata critica; essa è stata ottimizzata attraverso la rivelazione di muoni provenienti dai raggi cosmici. In particolare è stato usato il segnale corrispondente al passaggio dei raggi cosmici, innescato dalla contemporanea rivelazione di segnale da par-

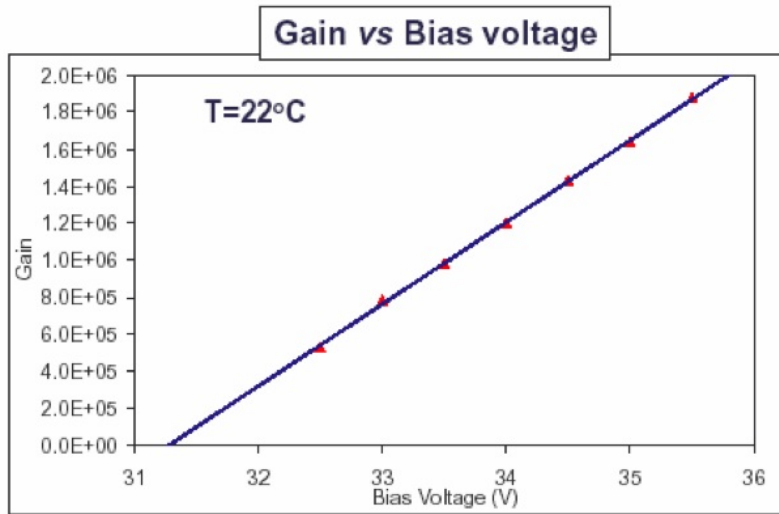


Figura 4.5: Specifiche dell'IRST riguardo l'andamento del guadagno in funzione della tensione di bias a temperatura ambiente (22°C).

te dei due contatori di trigger con larghezza equivalente a quella della barra scintillante e posti a sandwich con essa (figura 4.7).

4.3 Misure su fascio

Il contatore, una volta allineati nel miglior modo possibile i SiPM con la fibra ottica, è stato trasportato al fascio di test e installato di fronte al rivelatore di muoni dell'esperimento T956. Questo contatore è composto da barre scintillanti, simili a quella descritta prima, il cui segnale è letto da PMT convenzionali multianodo. Sono stati stabiliti contrassegni di riferimento sul contatore in corrispondenza con quelli già posti sul rivelatore di muoni in modo tale che i dati raccolti siano utili anche all'esperimento T956. I dati del rivelatore sono letti da un convenzionale PMT multianodo mentre quelli della barra scintillante dai SiPM; per questo motivo è estremamente interessante e utile prendere i dati in contemporanea e compararli. I dati presi dai SiPM sono letti in uno dei canali ADC usati nell'elettronica e nel software di acquisizione dati (DAQ) dell'esperimento T956. Il rivelatore di muoni è stato montato su una struttura di supporto in grado di spostarsi sia orizzontalmente che verticalmente controllabile da remoto e che permette di prendere dati corrispondenti all'incidenza del fascio in diverse posizioni lungo il contatore, riferendosi ai contrassegni

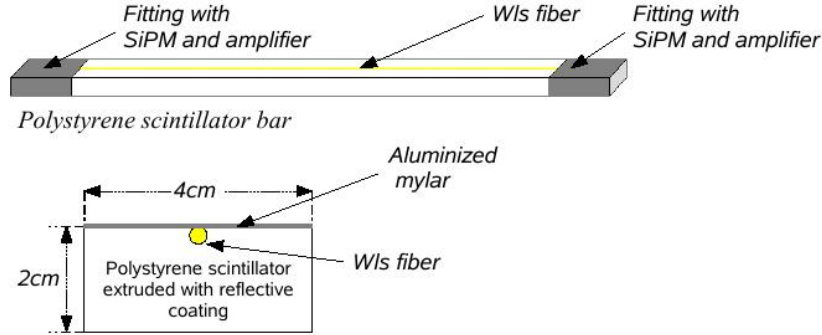


Figura 4.6: Schema e sezione del contatore a scintillazione costruito per testare i dispositivi su fascio di test.

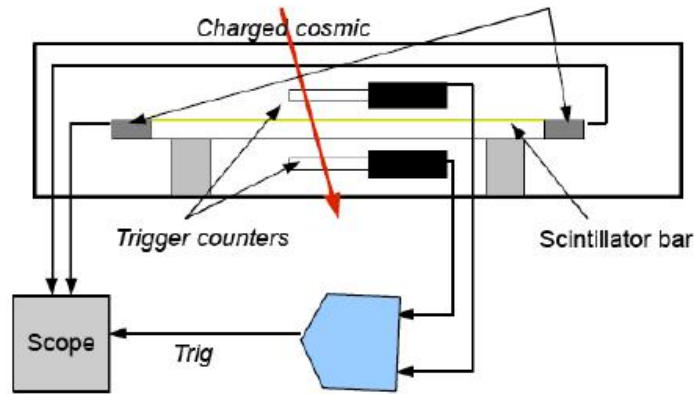


Figura 4.7: Schema del setup per rivelazione dei raggi cosmici utilizzato per verificare l'allineamento del SiPM con la fibra ottica.

posizionati su di esso. Il DAQ trigger include due contatori trigger a monte della barra scintillante, essi definiscono l'area del fascio incidente sul contatore (1 cm^2). Il fascio è monitorato a monte dalle camere multiwire proportional chamber (MWPC).

Sono stati raccolti dati con fasci di protoni con energia di 120 GeV e 60 GeV. Il segnale è stato integrato su un intervallo di gate di 160 ns negli ADC aventi una sensibilità di 0.25 pC/canale. In figura 4.8 sono riportati due esempi di distribuzioni del segnale proveniente dal SiPM posizionato sul lato est (Si-Est) del contatore.

Si noti come, quando la tensione di bias passa da -35V a -36V, l'inefficienza va dall'8% al 1% e la media del numero di fotoelettroni per MIP (Minimum

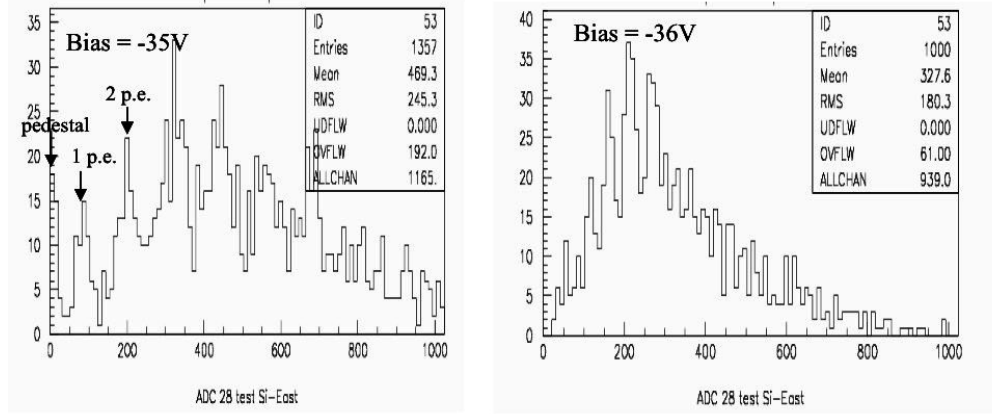


Figura 4.8: Distribuzioni del segnale proveniente dal SiPM est (a destra con $V_{bias} = -35V$ e a sinistra con $V_{bias} = -36V$) in cui sono indicati il picco del piedistallo e i picchi dovuti ad uno e due fotoelettroni.

Ionizing Particle) passa da 4.6 a 6.5.

In figura 4.9 si vedono le distribuzioni di carica in assenza di fascio. Queste sono dovute al dark count (DC) e le componenti di queste distribuzioni che superano il piedistallo coincidono con la corrispondenza casuale di un segnale di DC con l'intervallo d'integrazione dell'ADC (il gate). Da queste misure si possono valutare il DC e il suo contributo al fondo delle distribuzioni misurate dall'ADC.

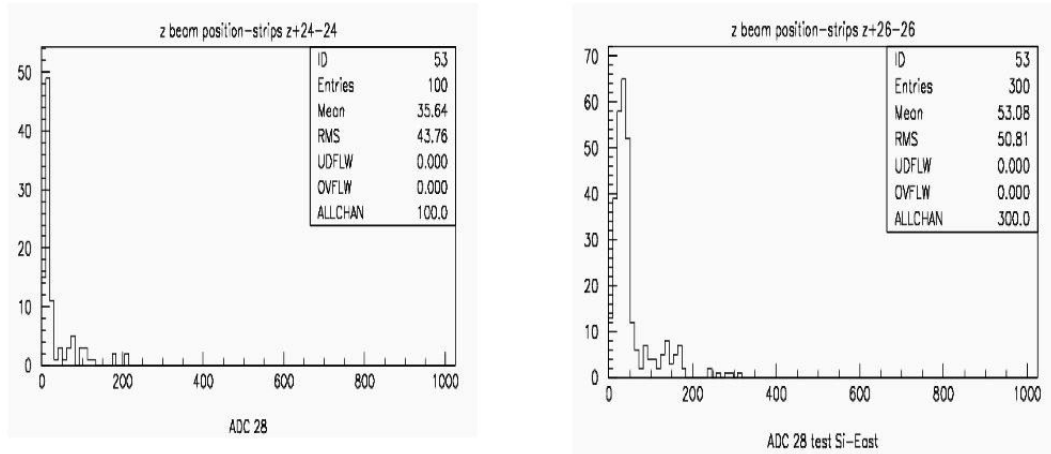


Figura 4.9: Distribuzione del segnale del piedistallo.

Data la larghezza del gate dell'ADC (160 ns), queste distribuzioni corri-

spondono a DC di circa $1 - 1.5$ MHz che è inferiore a quello che ci si aspetta dalle specifiche ($\sim 2.5 - 3.5$ MHz).

In figura 4.10 si possono vedere gli spettri dei rivelatori di muoni dell'esperimento T956 letti da PMT convenzionali.

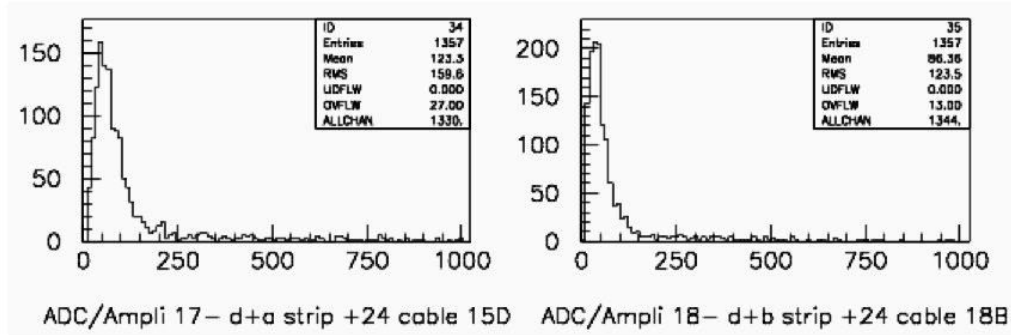


Figura 4.10: Spettro del contatore di muoni.

Da una valutazione preliminare sembra che i due rivelatori siano in accordo riguardo il numero di fotoni generati nelle barre di scintillatore dal passaggio di radiazioni ionizzanti. Tra i 6 ed i 9 fotoelettroni per passaggio raggiungono il fotocatodi dei rivelatori fotosensibili (SiPM e PMT). Va notato, però, che è molto più facile valutare questo numero con i SiPM perché la separazione dei picchi corrispondenti a diversi numeri di micro-celle attivate li rendono auto calibranti.

Capitolo 5

Conclusioni

I risultati precedentemente esposti evidenziano che l'applicazione dei fotomoltiplicatori al silicio a rivelatori di particelle potrebbe portare notevoli vantaggi. Con la loro applicazione a dei tipici rivelatori di muoni si è ottenuta un'efficienza vicina al 100% per la rilevazione di particelle a potere ionizzante minimo. Si è, inoltre, messa in evidenza l'utilità del potere di autocalibrazione intrinseco nei SiPM, con i quali si ottiene immediatamente il numero di fotoelettroni incidenti sui fotocatodi mentre un'analoga valutazione per i PMT convenzionali ha richiesto una calibrazione ulteriore dopo le misure su fascio. Si è anche visto che, malgrado il loro DC di ~ 1 MHz, il contributo di questo DC al fondo registrato dall'integrazione di carica può essere contenuto e facilmente misurato.

Questi risultati sono stati ottenuti nonostante il basso valore di efficienza geometrica ($\sim 20\%$) di questi primi esemplari. Nell'ultimo anno la tecnologia di questi dispositivi è significativamente migliorata e sono molti i progressi fatti per limitarne i punti deboli.

Dal confronto dei risultati sulle misure statiche e dinamiche svolte su numerosi dispositivi dell'IRST, con i dati forniti dai produttori (ottenuti facendo analoghi test) si nota anche un notevole progresso per quanto riguarda la riduzione dei conteggi di buio. Al fine di soddisfare diverse applicazioni, sono anche state realizzate diverse geometrie che sono illustrate in figura 5.1. L'efficienza geometrica (fill factor) aumenta con l'area, raggiunge il 76% per le aree più grandi e 44% per dispositivi da 1 mm^2 .

Questi nuovi dispositivi sono ancora in fase di test preliminari ed i primi dati a disposizione indicano che la tensione di breakdown ed il guadagno non si discostano molto da quelli ottenuti con i SiPM della versione base. Come si nota dalla figura 5.1 sono in fase di sviluppo dispositivi con un'area sensibile circolare, questo specifico design è stato pensato per l'applicazione dei SiPM a successivi test con rivelatori di muoni. Tenuto conto del successo dei test

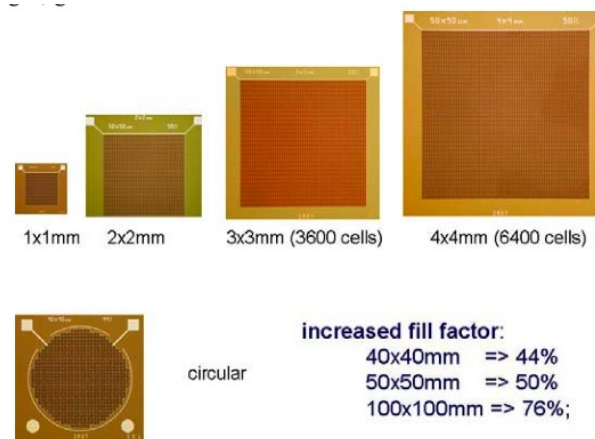


Figura 5.1: Nuove geometrie dei IRST-SiPM di quarta generazione e percentuale di incremento del fill factor.

preliminari con fascio di protoni al Fermilab si desidera incorporarli in un intero piano di nuovi rivelatori di muoni, e questa particolare geometria permette un miglior allineamento con la fibra ottica.

Oltre alla continuazione degli studi di applicazione come quelli del FNAL, i progetti futuri sono indirizzati allo studio degli effetti della radiazione sui SiPM e allo sforzo per ridurre ulteriormente i conteggi di buio. La conoscenza dei danni dovuti alla radiazione sui dispositivi è di estrema importanza per tutte le applicazioni sperimentali e, al momento sono presenti solo pochi dati in letteratura sull'argomento.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Giovanni Pauletta che mi ha fatto da mentore in questa esperienza e che mi ha dato l'opportunità di lavorare in un contesto internazionale ed altamente stimolante quale i laboratori FNAL negli Stati Uniti d'America. Voglio inoltre ringraziare il Prof. Valter Bonvicini per avermi fornito spiegazioni e supporto di ogni genere nella stesura del presente elaborato. Ad entrambi voglio esprimere la mia gratitudine per essere sempre stati disponibili e presenti nel caso di necessità.

Bibliografia

- [1] V.M.Golovin et al., Russian Patent nr. **1644708** (1999).
- [2] N.Otte, *The Silicon Photomultiplier - A new device for High Energy Physics, Astroparticle Physics, Industrial and Medical Applications*. PROCEEDINGS OF SNIC SIMPOSIUM, STANDARD , CALIFORNIA – 3-6 APRIL 2006.
- [3] C.Piemonte et al., *Characterization of the First Prototypes of Silicon Photomultiplier Fabricated at ITC-irst*. IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE, VOL.54, NO1 – February 2007.
- [4] Sito dell'istituto: <http://www.itc.it/irst>
- [5] C.Piemonte, *A new Silicon Photomultiplier structure for blu light detection*. NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH A 568 (2006) – 224-232.
- [6] N.Dinu et al., *Development of the first prototypes of Silicon PhotoMultiplier (SiPM) at ITC-irst*. NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS IN PHYSICS RESEARCH A 572 (2007) – 422-426.
- [7] G.Pauletta, *IRST SiPM characterizations and application studies*. PROCEEDINGS OF SCIENCE, <http://pos.sissa.it>
- [8] Agilent ABA-52563 GHz RFIC Amplifier.
www.agilent.com
- [9] V. Bonvicini *First workshop on photon detection* 13-14 June 2007, Perugia
(to be published in a special edition of Nuovo Cimento)
- [10] C. Piemonte, V. Bonvicini *First workshop on photon detection* 13-14 June 2007, Perugia
(to be published in a special edition of Nuovo Cimento)

- [11] R.S. Muller, T.I. Kamins *Device electronics for integrated circuits* - 3_a edizione -
Wiley, New York, 2003
- [12] G. Pauletta et al. *LC Scintillator-based Muon Detector/Tail-chatcher R&D*
<http://ilcagenda.linearcollider.org>
- [13] Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL, Fermilab)
Batavia, IL 60510, U.S.A.
Sito del laboratorio: <http://www.fnal.gov>
- [14] Descrizione della PMT test facility: http://www-ppd.fnal.gov/TCOffice-w/pmt_test_facility.html