Università degli Studi di Napoli "Federico II"

Scuola Politecnica e delle Scienze di Base Area Didattica di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Dipartimento di Fisica "Ettore Pancini"



Laurea triennale in Fisica

Misura di TTS di un innovativo rivelatore di fotoni ad alto guadagno: il VSiPMT

Relatori: Prof. Fausto Guarino Dott. ssa F.C.T. Barbato **Candidato:** Aurora Langella Matricola N85000751

A.A. 2016/2017

Indice

In	trodu	izione	ii
1	Pre	messa e stato dell'arte	1
	1.1	Rivelatori a vuoto: tubo fotomoltiplicatore	2
		1.1.1 PMT: caratteristiche generali	2
	1.2	Rivelatori a semiconduttore	5
		1.2.1 I semiconduttori	5
		1.2.2 Fotodiodi a valanga	8
		1.2.3 SiPM	10
	1.3	Rivelatori ibridi	11
		1.3.1 HPD	11
2	τιv	SiPMT: l'idea dietro il rivelatore	13
4	21 21	Fotocatodo	1/
	2.1 2.2	Finestra d'ingresso	16
	2.2	SiFM	16
	2.0	2.3.1 Vantaggi del SiEM	$10 \\ 17$
	2.4	Proprietà del VSiPMT	19
3	Mis	ura del Transit Time Spread	23
U	3 1	Caratteristiche del dispositivo	23
	3.2	Apparato sperimentale	$\frac{20}{24}$
	3.2 3.3	Caratterizzazione del dispositivo	$\frac{24}{26}$
	0.0	3 3 1 Qualità del segnale	$\frac{20}{26}$
		3.3.2 PDE	$\frac{20}{26}$
		3.3.3 Guadagno	$\frac{20}{28}$
	34	Transit Time Spread	$\frac{20}{29}$
	J.1		20
Co	onclu	sioni	32
Bi	bliog	rafia	33

Introduzione

I fotorivelatori rappresentano uno strumento fondamentale in molti campi della fisica applicata. Essi, oltre ad essere uno degli strumenti di rivelazione principali in fisica nucleare e subnucleare, vengono utilizzati in diversi ambiti, come ad esempio in ambito medico (PET, immunotest e altro) o in ambito industriale e ambientale (misura di inquinamento ambientale, fibre ottiche, sensori di sicurezza). In particolare, questo lavoro di tesi è incentrato sull'utilizzo di questi ultimi nell'ambito della fisica astroparticellare, branca della fisica che si occupa dello studio delle radiazioni e delle particelle che dal cosmo arrivano fino a noi e per la quale i rivelatori di luce rivestono un ruolo chiave.

Il primo fotorivelatore fu progettato circa 100 anni fa, ad opera di Iams e Salzberg dell'RCA (Radio Corporation of America), i quali realizzarono il primo prototipo nel 1935 dopo anni di studi sull'emissione secondaria. Tale dispositivo era formato da un fotocatodo semicilindrico, un emettitore secondario montato in asse ed una griglia di collezione attorno all'emettitore secondario. Il tubo aveva un guadagno pari a 8 e veniva impiegato come pickup sonoro per il cinema. La struttura multistadio nasce nel 1936 sempre presso la RCA ad opera di Zworkin, Morton e Malter. La principale applicazione era ancora quella di pickup ma veniva usata una combinazione di campi statici elettrici e magnetici per guidare i flussi di elettroni attraverso gli stadi.

Pur essendo uno degli strumenti maggiormente utilizzati negli esperimenti, esso presenta diverse problematiche che hanno richiesto negli anni lo sviluppo di nuove tecnologie per la fotorivelazione. Proprio in quest'ottica di miglioramento tecnologico si colloca il progetto del VSiPMT (Vacuum Silicon Photon-Multiplier Tube), un innovativo rivelatore che unisce il classico PMT con la capacità di moltiplicazione del SiPM.

Il presente lavoro di tesi è suddiviso in tre capitoli:

- Premessa e stato dell'arte: in cui viene mostrato qual è stato il progresso nel campo della fotorivelazione a partire dal PMT, con particolare attenzione ai rivelatori a stato solido e a quelli ibridi (categoria a cui appartiene il VSiPMT).
- Il VSiPMT: in questo capitolo si parlerà dettagliatamente del VSiPMT e delle sue caratteristiche.

• Misura del Transit Time Spread: in questa parte si discute la misura effettuata sull'ultimo prototipo del rivelatore (EB-MPPC100 (XE2597) prodotto dall'Hamamtsu Photonics), che consiste in una stima del Transit Time Spread (TTS).

Capitolo 1

Premessa e stato dell'arte

I rivelatori di luce sono strumenti che raccolgono la luce e la trasformano in un segnale elettrico. Al fine di avere un rivelatore efficiente è di fondamentale importanza conservare al meglio le informazioni contenute nel fascio di fotoni incidente. Diversi sono i parametri di cui tenere conto:[1]

- Risposta spettrale la gamma di lunghezze d'onda rivelabili;
- Linearità la condizione per la quale il segnale in uscita è proporzionale al numero di fotoni incidenti;
- Range dinamico la variazione massima del segnale affinché l'uscita rappresenti il flusso di fotoni senza perdere le informazioni contenute;
- Efficienza di rivelazione la frazione di fotoni entranti che sono convertiti in segnale;
- **Rumore** corrente rivelata dal dispositivo quando non viene esposto alla luce;
- **Risposta temporale** l'intervallo minimo di tempo che impiega il rivelatore a formare il segnale dopo l'arrivo del fotone.

Di seguito sono riportati i principali rivelatori utilizzati negli esperimenti per rivelare la luce, divisi in tre gruppi:

- Rivelatori a vuoto
- Rivelatori a semiconduttore (o a stato solido)
- Rivelatori ibridi

1.1 Rivelatori a vuoto: tubo fotomoltiplicatore

1.1.1 PMT: caratteristiche generali



Figura 1.1: Schema di funzionamento di un tubo fotomoltiplicatore. In figura le sezioni principali del rivelatore: il fotocatodo, il sistema di focalizzazione e la catena di dinodi.

I tubi fotomoltplicatori rappresentano lo strumento di rivelazione di luce maggiormente utilizzato negli esperimenti di fisica, in quanto sono capaci di rivelare intensità di radiazione estremamente basse, fino al singolo fotone. Pur godendo di tale caratteristica sono però affetti da diverse problematiche, in particolare per quanto riguarda la sezione moltiplicatrice, motivo per il quale negli anni sono state sviluppate tecnologie alternative, tra cui il VSiPMT. Essi sono costituiti da tre sezioni principali: il fotocatodo, dove vengono convertiti i fotoni in elettroni per effetto fotoelettrico, la griglia di focalizzazione che accelera e focalizza gli elettroni e la catena di dinodi che moltiplica il numero di elettroni tramite emissione secondaria. La tensione ai dinodi è mantenuta costante tramite un partitore di tensione costituito da una serie di resistenze poste tra gli elettrodi. Per evitare eventuali cadute di tensione negli ultimi stadi della moltiplicazione dovute ai picchi di rivelazione, in parallelo alle resistenze vengono poste delle capacità. Uno schema del tubo fotomoltiplicatore è riportato nella figura 1.1. Di seguito vengono approfondite le sezioni fondamentali del tubo:[2]

- Fotocatodo: rappresenta l'elemento sensibile del rivelatore. Esso infatti raccoglie i fotoni ed emette elettroni per effetto fotoelettrico. É costituito da una sostanza fotoemittente depositata su un sottilissimo strato sulla parete interna della finestra di ingresso del fotomoltiplicatore.
- Griglia di focalizzazione: tale griglia occupa la regione di spazio fra il fotocatodo ed il primo dinodo e rappresenta un accoppiamento critico per il sistema fotomoltiplicatore. In tale regione infatti il segnale non ha ricevuto ancora nessuna amplificazione (anzi semmai è stato indebolito dal fotocatodo) ed è importantissimo evitare che sia disturbato

o si disperda. Qui gli elettroni vengono raccolti e focalizzati sul primo dinodo, tramite l'applicazione di un campo elettrico in una particolare configurazione. Un aspetto particolarmente importante nel progetto del sistema di focalizzazione è l'attenzione all'uniformità dei percorsi imposti agli elettroni generati da qualsiasi punto del fotocatodo. Una differenza di cammino, a parità di tensione accelerante, provoca infatti un aumento di spread della risposta temporale (TTS), in altre parole, fotelettroni generati nello stesso istante possono giungere sul primo dinodo in tempi diversi se le traiettorie non sono equalizzate a dovere e questo degrada pesantemente la precisione temporale del dispositivo.

• Moltiplicatore di elettroni: esso è costituito da una serie di elettrodi in cascata progettati in maniera tale che ciascun elettrone emesso da un elettrodo venga fortemente accelerato verso l'elettrodo successivo provocando così l'emissione di più elettroni. Questo fenomeno va sotto il nome di emissione secondaria e dipende principalmente dal tipo di materiale utilizzato e dall'energia di impatto degli elettroni. Il guadagno di ogni elettrodo è noto come fattore di emissione secondaria δ , il quale è una funzione dell'energia dell'elettrone primario; essendo questa dipendente dalla tensione applicata tra i dinodi V_d , possiamo scrivere:

$$\delta = KV_d \tag{1.1}$$

dove K è una costante di proporzionalità. Di conseguenza il guadagno totale, assumendo che il numero di dinodi sia pari a n, sarà:

$$G = \delta^n = (KV_d)^n \tag{1.2}$$

In questo modo si genera una valanga, ossia un singolo fotone che colpisce il fotocatodo libera moltissimi elettroni dando luogo ad un processo di amplificazione a partire dal debole segnale di luce (l'ordine di amplificazione è tra 10^5 e 10^7). Al termine della sequenza di elettrodi gli elettroni vengono raccolti dall'anodo, generando un rapido impulso elettrico. Dalla 1.2, inoltre, possiamo ricavare la relazione che intercorre tra guadagno e tensione di alimentazione. Infatti quest'ultima sarà pari a:

$$V_b = nV_d \tag{1.3}$$

e dunque, differenziando la 1.2, otteniamo:

$$\frac{dG}{G} = n\frac{dV_d}{V_d} = n\frac{dV_b}{V_b} \tag{1.4}$$

Possiamo così notare come la stabilità del guadagno sia strettamente collegata alla stabilità della tensione di alimentazione. Supponendo n=10, ad esempio, per mantenere la stabilità del guadagno all'1% bisogna regolare la V_b entro lo 0.1%.

Limiti del PMT

Pur essendo ampliamente utilizzato, il PMT presenta diversi incovenienti, sia per quanto riguarda la risposta del rivelatore sia per caratteristiche strutturali:[3]

• le oscillazioni del guadagno del primo dinodo rendono difficile il conteggio di singoli fotoni. Infatti abbiamo visto che quando il fotoelettrone colpisce il primo dinodo, esso può estrarre un numero medio di elettroni secondari pari a una quantità δ . Per ogni dinodo vi è una fluttuazione statistica del coefficiente di emissione secondaria attorno al valor medio di δ . La statistica ha però un peso maggiore sul primo dinodo poiché il numero di elettroni secondari N è relativamente piccolo ed è soggetto ad una fluttuazione proporzionale a $\sqrt{\frac{1}{N}}$. Il segnale finale sarà quindi la convoluzione di diverse gaussiane, come possiamo osservare nella figura 1.2;



Figura 1.2: Segnale d'uscita tipico di un PMT.

- la linearità è fortemente correlata al guadagno e diminuisce all'aumentare di quest'ultimo. Difatti all'aumentare della tensione applicata, e dunque del guadagno, negli ultimi dinodi il numero elevato di elettroni emessi è tale da non poter trascurare la mutua interazione tra loro. Di conseguenza si viene a generare un campo elettrico che si oppone a quello degli elettrodi. La corrente sull'anodo raggiunge un massimo, oltre il quale perde la proporzionalità con il numero di fotoni incidenti. Inoltre la linearità dei segnali è influenzata da diversi fattori legati alla struttura del dispositivo come la stabilità dell'alimentatore, la corrente del partitore e la resistività del catodo;
- la risposta temporale è soggetta a grandi fluttuazioni; essa infatti dipende dalle traiettorie degli elettroni all'interno del tubo. Ogni fotoelettrone segue un proprio percorso dal fotocatodo al primo dinodo (in relazione alle linee del campo applicato), il quale dipende dal punto di origine e dalla velocità di emissione. Di conseguenza, anche gli elettroni secondari faranno percorsi diversi tra i dinodi, causando ulteriore dispersione temporale. Il tempo tra l'arrivo di un impulso luminoso e l'arrivo del segnale elettrico è detto tempo di transito (**TT**). Esso può essere influenzato in particolare dal numero di dinodi, dal diametro del fotocatodo e dall'alta tensione applicata, ossia dal campo elettrico che focalizza il fascio.

- la struttura meccanica è complessa e costosa;
- è sensibile ai campi magnetici;
- la necessità del partitore di tensione aumenta i rischi di insuccesso nella rivelazione e di rottura, nonché un consumo eccessivo di energia. In particolare quest'ultimo rende difficile l'utilizzo del rivelatore in ambienti ostili (come nello spazio o in fondo all'oceano ad esempio) dove la disponibilità di energia è limitata.

Possiamo dunque osservare come i problemi principali siano dovuti alla catena di dinodi che limita sia le prestazioni del rivelatore che le esigenze tecniche e strutturali e risulta opportuno trovare un'alternativa per la moltiplicazione.

1.2 Rivelatori a semiconduttore

Un'altra tipologia di rivelatori costantemente in evoluzione è quella dei rivelatori a semiconduttore. Il loro principio di funzionamento è basato sull'effetto fotoconduttivo intrinseco. Un fotone incidente che possiede un'energia h ν maggiore del gap energetico E_g , caratteristico del materiale, è in grado di produrre una coppia elettrone-lacuna.

Sia l'elettrone nella banda di conduzione, sia la lacuna nella banda di valenza partecipano al meccanismo di conduzione elettrica. Ecco quindi che dalla misura della corrente elettrica prodotta dall'interazione della radiazione luminosa con il materiale semiconduttore è possibile determinare l'intensità della radiazione incidente. Le caratteristiche principali di un rivelatore a semiconduttore sono:[4]

- bassa energia necessaria per creare una coppia elettrone-lacuna ($\sim 3 \text{ eV}$);
- linearità di risposta;
- presenza di una corrente di fondo dovuta a portatori minoritari di tipo termico e a contributi superficiali;
- i segnali vanno preamplificati con amplificatori di carica a basso fondo; i segnali in uscita debbono subire un'opportuna formazione.

1.2.1 I semiconduttori

Proprietà generali

I semiconduttori sono una classe particolare di materiali che, a temperatura ambiente (300 K), hanno una resistività¹ intermedia fra i conduttori e gli isolanti.

 $^{^1 {\}rm La}$ resistività è definita come l'attitudine intrinseca di ogni materiale ad opporre resistenza al passaggio di carica: minore risulta la resistività, maggiore sarà la capacità di condurre

Una fondamentale proprietà dei semiconduttori che li distingue ulteriormente dai conduttori e dagli isolanti, sta nel fatto che la loro resistività varia diversamente in funzione della temperatura. Tale proprietà si può spiegare tenendo presente il tipo di legame che formano gli elettroni all'interno del materiale. In un conduttore vi sono circa 10^{28} elettroni di conduzione (liberi) per m^3 e questo pressoché indipendentemente dalla temperatura. Questi elettroni sono in un continuo stato di agitazione termica e possono muoversi anche sotto l'effetto di campi elettrici, dando origine alla conduzione. Al crescere della temperatura aumenta anche l'agitazione termica, che ostacola il loro moto, riducendo la conduttività, che è l'inverso della resistività.

È possibile descrivere tutto ciò tramite il modello a bande di energia nei solidi, che, in breve, risulta essere la soluzione dell'equazione di Schrödinger per gli elettroni inseriti nel potenziale periodico di un solido cristallino. Le bande di energia nei solidi sono un insieme di livelli energetici accessibili o meno dagli elettroni all'interno del reticolo e principalmente risultano essere due: la banda di valenza e la banda di conduzione; in particolare per i semiconduttori a T=0 la banda di valenza risulta essere l'ultima riempita e quella di conduzione la prima vuota. Ma se l'energia di gap è abbastanza piccola alcuni elettroni per $T\neq 0$ passano alla banda successiva e dunque entrambe le bande risulteranno parzialmente occupate, contribuendo alla conducibilità elettrica del materiale.



Figura 1.3: Modello a bande per gli isolanti (a), i semiconduttori (b) e i conduttori (c,d).

Nei semiconduttori la conduzione è un processo che non coinvolge solamente gli elettroni, ma anche le lacune, ovvero i "buchi" lasciati nel reticolo cristallino. La lacuna può essere riempita da un elettrone di un atomo adiacente, dando così luogo ad una lacuna traslata: questo processo può essere indirizzato da un campo elettrico, che determina lo spostamento delle lacune in un verso preferenziale, opposto a quello degli elettroni.

Un materiale con le caratteristiche sopra descritte si dice dunque *semiconduttore intrinseco*. In esso la densità di elettroni è uguale alla densità di lacune, e soddisfa la relazione:

$$n = p = n_i \propto e^{\frac{-E_g}{KT}} \tag{1.5}$$

Tuttavia è possibile alterare intenzionalmente le proprietà di un semiconduttore intrinseco, svolgendo una pratica di drogaggio del materiale: piccole frazioni di specifiche impurità vengono aggiunte al semiconduttore, a seconda di ciò che si vuole ottenere.

Gli elementi del III gruppo della tavola periodica, come il boro, il gallio o l'indio, hanno tre elettroni di valenza, che combinandosi con i quattro del silicio o del germanio (ossia i principali materiali utilizzati come semiconduttori) danno una configurazione di legame in cui manca un elettrone per completare l'ottetto di valenza: tale configurazione presenta un eccesso di lacune, le quali sono quindi dette trasportatori maggioritari ed il semiconduttore viene detto di tipo p o *accettore*. Gli elettroni in questo caso sono detti trasportatori minoritari (Figura 1.4 b).

Viceversa nel caso di drogaggio con impurità pentavalenti, come l'antimonio, l'arsenico o il fosforoo i trasportatori di carica maggioritari sono gli elettroni, il semiconduttore risulta essere di tipo n, altrimenti detto *donore*, ed i trasportatori minoritari sono le lacune (Figura 1.4 a).



Figura 1.4: rappresentazione del legame di valenza nei semiconduttori di tipo n (a) e in quelli di tipo p (b).

La giunzione P-N

Il passo decisivo nell'evoluzione tecnologica dei semiconduttori è stato compiuto con lo studio della giunzione P-N. Supponiamo infatti di prendere un semiconduttore di tipo n e di affiancarlo ad uno di tipo p (o, più precisamente, di drogare un cristallo da un lato p e dall'altro n): quello che osserviamo, una volta realizzata questa giunzione, è una corrente diffusiva che spinge le lacune dal lato p a quello n e viceversa sino a che non si ottiene un equilibrio dinamico grazie al potenziale che si instaura tra i due lati. Con il continuo movimento delle cariche in prossimità della giunzione si viene a formare quella che viene definita *regione di svuotamento*, dove rimangono fisse le cariche dovute agli ioni, positive sul lato n e negative su quello p. La barriera di potenziale che si instaura tra i due lati viene detta invece *potenziale built-in*.

A questo punto supponiamo di applicare dall'esterno una differenza di potenziale ai margini della giunzione. Le possibilità sono due: polarizzare direttamente la giunzione o, viceversa, polarizzarla inversamente, come possiamo osservare nella figura 1.5.



Figura 1.5: Giunzione P-N polarizzata inversamente (a) e direttamente (b).

La polarizzazione diretta avviene quando la tensione applicata ha valore positivo sul lato p: in questo caso la tensione esterna si oppone al potenziale built-in, quindi la barriera di potenziale in prossimità dell'interfaccia è ridotta e si favorisce il passaggio dei portatori maggioritari, ovvero le lacune passeranno dalla parte p alla n, e viceversa per gli elettroni. Si crea quindi una notevole corrente diretta.

La polarizzazione inversa determina l'effetto contrario: l'effetto del potenziale applicato sulla giunzione sta nel progressivo svuotamento ulteriore della stessa, esso infatti tenderà ad estrarre lacune dal lato p ed elettroni dal lato n, in un progressivo ampliamento della regione di svuotamento.

La zona di svuotamento risulta essere libera da portatori di carica maggioritari ma in condizioni di equilibrio si generano continuamente al suo interno coppie elettrone-lacuna che, in assenza di un campo elettrico, si ricombinano all'istante. Se tuttavia è presente un campo, come nel caso della polarizzazione inversa, le probabilità che ciascuna coppia creata si ricombini immediatamente diminuiscono. Gli elettroni e le lacune che non si ricombinano si spostano sotto l'influenza del campo elettrico, dando origine ad una piccola corrente inversa, chiamata *corrente di leakage*.

Aumentando la tensione inversa, si raggiunge il cosiddetto *breakdown effect*: gli elettroni e le lacune generati termicamente acquisiscono dal potenziale applicato energia sufficiente a produrre nuovi portatori, rimuovendo dai legami elettroni di valenza. Questi a loro volta contribuiscono a creare nuovi portatori, e così via, innescando il tipico effetto a valanga.

È importante sottolineare che la giunzione P-N risulta essere una struttura indicata alla rivelazione di particelle se si trova nella configurazione di polarizzazione inversa, nella zona precedente al breakdown. In questo modo infatti la zona di svuotamento è aumentata di ampiezza: è infatti questa che permette di raccogliere le cariche che le passano attraverso in modo abbastanza semplice.

1.2.2 Fotodiodi a valanga

Validi sostituti dei PMT sono i fotodiodi a valanga, abbreviati in APD, dall'inglese Avalanche Photodiodes. Essi sono costituiti da una giunzione P-N opportunamente drogata (vedi figura 1.6) alla quale viene applicata una tensione



Figura 1.6: Schema di un fotodiodo a valanga.

di polarizzazione inversa tale da generare un effetto a valanga che amplifica il segnale in uscita.

Quando i fotoni incidono sulla zona sensibile, producono una coppia elettronelacuna (a patto che l'energia depositata sia maggiore dell'energia di gap E_g). A causa della polarizzazione inversa gli elettroni sono attratti verso il lato N e le lacune verso quello P. La tensione applicata è tale che gli elettroni creati in questi eventi secondari liberino a loro volta altre coppie. In questo modo si produce una cascata, chiamata valanga Townsend.

Inoltre il potenziale viene scelto in maniera tale che ogni valanga avviene indipendentemente dalle altre valanghe che hanno origine dalla stessa particella primaria iniziale. Di conseguenza, anche se il numero totale di elettroni creati incrementa esponenzialmente con la distanza, la carica elettrica totale prodotta rimane proporzionale alla carica iniziale creata nell'evento originario.

Il fattore di amplificazione non risulta però particolarmente elevato (circa 100), per cui non è adatto alla rivelazione di luce di bassa intensità.

Limiti dell'APD

Pur essendo molto efficiente sotto certi versi, l'APD presenta alcuni limiti:

- **Guadagno limitato** Quando la tensione viene aumentata troppo la corrente inizia a fluire attraverso la resistenza interna del dispositivo causando una caduta di tensione. Questo porta ad una fotocorrente in uscita non proporzionale alla luce incidente.
- Guadagno dipendente dalla temperatura All'aumentare della temperatura aumentano anche le vibrazioni all'interno del reticolo cristallino e questo porta gli elettroni ad urtare contro di esso prima di aver raggiunto l'energia necessaria a ionizzare. Di conseguenza essi non riescono a creare coppie elettrone-lacuna ed il guadagno risulta dunque diminuito.
- **Rumore** L'APD produce rumore durante il processo di moltiplicazione. Il rate di ionizzazione per ogni portatore, infatti, non è uniforme e presenta delle fluttuazioni statistiche. Si parla in questo caso di *rumore d'eccesso*. Inoltre, a causa della sua natura di semiconduttore, per mezzo dell'eccitazione termica, genera un segnale anche in assenza di rivelazione, definito *dark noise*.

1.2.3 SiPM



Figura 1.7: Esempio di SiPM: struttura delle microcelle (a), visione frontale del dispositivo (b), schema circuitale (c).

Un SiPM (dall'inglese Silicon PhotoMultiplier) è un dispositivo a pixel in cui ogni microcella (ossia ogni pixel) è formata da un fotodiodo a valanga (APD) in serie con un resistore di spegnimento (*Quenching Resistor* R_Q); le microcelle sono invece in parallelo tra di loro (vedi figura 1.7 c).

A seconda del dispositivo, la dimensione di una microcella varia da 10 μm a 100 μm e il numero di microcelle per dispositivo varia da diverse centinaia a diverse decine di migliaia. I SiPM hanno aree attive che vanno da 1 mm^2 a 6 mm^2 e una risposta spettrale che va dai raggi UV a quelli IR, con un picco nel visibile (400 nm - 500 nm).

Essi lavorano nel cosiddetto regime Geiger: alle microcelle viene applicata una tensione tale che esse lavorano appena oltre la tensione di breakdown. In tal modo il campo elettrico nella giunzione è tale da generare un effetto a valanga particolarmente elevato (un singolo fotone è capace di liberare circa 10^6 coppie).

La scelta di utilizzare una matrice di microcelle è dovuta al fatto che questa valanga risulta indipendente dal numero di fotoni incidenti quindi utilizzando una matrice il segnale d'uscita risulterà proporzionale al numero di microcelle accese. Partendo dunque dall'ipotesi che ogni microcella sia accesa da un solo fotone si ottiene la proporzionalità desiderata.

Il ruolo della resistenza di quenching è quello di bloccare la scarica e riportare il rivelatore in regime Geiger. Quello che si ottiene è un rivelatore che offre la capacità di rivelare luce di bassa intensità e guadagno al pari del PMT ma con i benefici di un rivelatore a semiconduttore, come la bassa tensione di attivazione, il non essere influenzati dai campi magnetici, robustezza meccanica e una risposta uniforme.[5]

Limiti del SiPM

In ogni caso, come per ogni dispositivo, anche il SiPM presenta dei limiti:

• Rumore di fondo - Esso, essendo un semiconduttore, genera un rumore dovuto all'eccitazione termica (*dark noise*). Questo rumore viene poi amplificato come succede per il segnale risultando in lettura come un

picco dovuto all'accensione di una microcella, ossia al passaggio di un fotone.

- **Dipendenza dalla temperatura** Analogamente all'APD vi è una dipendenza del rivelatore dalla temperatura in quanto all'aumentare di questa vi è una maggiore vibrazione del reticolo che porta ad una valanga prematura e dunque ad una variazione della tensione di breakdown in funzione della temperatura, oltre che un aumento del *dark noise* in quanto aumentano le agitazioni termiche.
- Area A causa del dark noise, il quale dipende dalla superficie del rivelatore, questo è forzato ad avere dimensioni comprese tra 1 mm^2 e 36 mm^2 .

1.3 Rivelatori ibridi

Per rivelatore ibrido s'intende un rivelatore che unisce due tipologie di rivelatori differenti: i rivelatori a vuoto e quelli a semiconduttore. Questo al fine di unire i vantaggi dei due dispositivi ed ottenere determinanti caratteristiche, in risposta a quelle che sono le necessità per l'esperimento. Un esempio è proprio il VSiPMT ma, prima di addentrarci nella descrizione di questo, vediamo un'altra tipologia di ibrido: l'HPD.

1.3.1 HPD



Figura 1.8: Schema dell'HPD.

L'HPD (dall'inglese Hybrid PhotoDetector) combina la tecnologia del PMT con quella dell'APD.

Esso ha una struttura simile ad un PMT convenzionale, pur mantenendo delle differenze sostanziali. Come il PMT, l'HPD è un tubo a vuoto con un fotocatodo che rileva la luce, un moltiplicatore di elettroni e un terminale di uscita che emette un segnale elettrico. Ma a differenza del PMT, che utilizza una catena di dinodi come moltiplicatore di elettroni, l'HPD utilizza invece un diodo a valanga (APD) al silicio.

Quando vi incide un fascio di luce, i fotoelettroni vengono accelerati dal fotocatodo verso l'APD tramite un'alta tensione. Questi fotoelettroni sono quindi moltiplicati nell'APD in due fasi: prima tramite un bombardamento di elettroni e poi tramite un effetto a valanga (vedi figura 1.8).

Nella prima fase, ogni fotoelettrone deposita la sua energia cinetica nell'APD e produce un numero di coppie elettrone-lacuna proporzionale all'energia depositata nel substrato di silicio. Questo è un fenomeno necessario in quanto il guadagno interno dell'APD oscilla tra 50 e 100, dunque non abbastanza alto da permettere un buon segnale in uscita. Ovviamente maggiore è la tensione, maggiore sarà il numero di coppie create.

Gli elettroni si spostano quindi verso la giunzione P-N e danno vita ad una moltiplicazione a valanga urtando il reticolo cristallino del silicio.

Il guadagno totale dell'HPD è il prodotto dei due guadagni e può essere superiore a 10^5 . Pur avendo un guadagno inferiore a quello del PMT, l'HPD offre diversi vantaggi. Infatti mentre nel PMT si ha a che fare con n stadi di moltiplicazione, nell'HPD vi è un unico stadio e inoltre la maggiore energia del fotoelettrone riduce notevolmente il TT e rende possibile una migliore risoluzione del singolo fotone. [6]

Limiti dell'HPD

Questo rivelatore ibrido ha mostrato dei limiti sotto diversi aspetti:

- **Guadagno** Il guadagno risulta limitato dal rumore, in quanto questo aumenta all'aumentare del guadagno.
- Alta tensione Sempre a causa del basso guadagno nella fase di moltiplicazione a valanga, l'HPD richiede un alta tensione (circa 10 kV) tra fotocatodo e APD al fine di ottenere una moltiplicazione per bombardamento. Di conseguenza risulta particolarmente difficile stabilizzare il guadagno in quanto dipendente dall'alta tensione.
- **Bassa risoluzione** La risoluzione dell'HPD non risulta particolarmente migliorata se confrontata con quella del PMT. Infatti, poiché il dispositivo lavora sempre in regime proporzionale, le fluttuazioni sul numero di fotoni sono inevitabili. Il rivelatore si dimostra dunque inefficiente nel caso venga richiesta una buona risoluzione di singolo fotone.

Capitolo 2

Il VSiPMT: l'idea dietro il rivelatore



Figura 2.1: Sezione tridimensionale del VSiPMT: in ingresso vi è il fotocatodo, seguito dall'anello di focalizzazione e dal SiEM. L'anello di guardia svolge un ruolo di controllo; esso viene infatti messo ad un potenziale minore del SiEM in modo tale che nell'eventualità di scariche elettriche, queste colpiscano l'anello invece di danneggiare il SiEM.

Uno dei campi in cui i rivelatori di luce svolgono un ruolo chiave è, come già accennato in precedenza, la fisica astroparticellare. In particolare questo vale per i PMT, i quali costituiscono il mezzo di rivelazione principale da oltre un secolo.

Le diverse limitazioni del PMT hanno richiesto negli anni lo sviluppo di nuovi fotomoltiplicatori basati su principi di funzionamento alternativi, come ad esempio i SiPM. Questi però, in ambito astroparticellare, presentano diverse limitazioni, ad esempio affinché il dark noise non sia troppo elevato devono essere progettati con una superficie molto piccola (al massimo 36 mm^2).

In molte applicazione il rivelatore ideale dovrebbe quindi godere delle proprietà dei SiPM (alta risoluzione nel conteggio del singolo fotone e basso consumo di energia) e allo stesso tempo possedere una superficie sensibile di dimensioni vicine a quelle dei PMT.

Il VSiPMT (Vacuum Silicon PhotoMultiplier Tube) si inserisce proprio in questo contesto. L'idea dietro questo rivelatore nasce nel 2007 ad opera del professore Giancarlo Barbarino (Università degli studi di Napoli "Federico II"). Lo scopo è quello di ottenere un rivelatore ibrido dato da un PMT a cui viene sostituita la sezione amplificatrice (ossia la catena di dinodi) con un SiPM, opportunamente modificato in modo tale da moltiplicare la corrente di fotoelettroni con un fattore di ~ 10^6 (da qui il nome SiEM, Silicon Electron Multiplier). Questa nuova configurazione permette di migliorare significativamente la sensibilità consentendo un migliore conteggio di singolo fotone e minimizzare lo spread temporale grazie all'unico stadio di amplificazione. Nel seguito verrà approfondita la struttura del dispositivo. Dalla figura 2.1 è possibile esservarne la componenti principalii il fotogatodo di focaliz

possibile osservarne le componenti principali: il fotocatodo, l'anello di focalizzazione e il SiEM.

2.1 Fotocatodo

Come visto in precedenza, il fotocatodo si occupa di raccogliere i fotoni e trasformarli in elettroni per effetto fotoelettrico.

I fotocatodi sono composti principalmente da semiconduttori e metalli alcalini e possono essere utilizzati sia in trasmissione (semitrasparenti) che in riflessione (opachi). Nel primo caso, quando la luce entra ed incide sul fotocatodo, un fotoelettrone viene estratto nello stesso verso della luce in ingresso e viene guidato verso l'amplificatore (Figura 2.2 (b)); nel secondo caso il fotocatodo è posto dietro il moltiplicatore e, quando la luce colpisce il fotocatodo, viene estratto un fotoelettrone in verso opposto alla luce in ingresso (Figura 2.2 (a)).[7]



Figura 2.2: Modalità di funzionamento in riflessione (a) e in trasmissione (b).

In entrambe le configurazioni, è possibile utilizzare materiali diversi. Essi in particolare vengono scelti in base alla sensibilità spettrale necessaria e all'efficienza quantica ottenibile.



Figura 2.3: Risposta spettrale dei materiali fotoemissivi maggiormente utilizzati per realizzare il fotocatodo.

Nella figura 2.3 è mostrata la risposta spettrale di alcuni materiali utilizzati. I principali sono:

- **CsI** Lo ioduro di cesio non è sensibile alle radiazioni solari, è caratterizzato da una sensibilità che diminuisce bruscamente a lunghezze d'onda maggiori di 200 nm ed è quindi utilizzato esclusivamente per il rilevamento dell'ultravioletto.
- Bialkali (Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs) Vengono chiamati in questo modo in quanto sono formati da due metalli alcalini. I fotocatodi utilizzati in trasmissione hanno una risposta spettrale compresa tra la regione dell'UV e la regione del visibile. I bialkali utilizzati in riflessione sono fabbricati usando gli stessi materiali, ma in maniera differente. Di conseguenza, offrono una maggiore sensibilità con una risposta spettrale che va dall'ultravioletto al visibile.
- Multialkali (Sb-Na-K-Cs) Questo tipo di fotocatodo utilizza tre o più tipi di metalli alcalini. A causa dell'elevata sensibilità hanno un'ampia gamma spettrale che va dall'ultravioletto alla regione del vicino infrarosso.
- Ag-O-Cs I fotocatodi in modalità trasmissione che utilizzano questo materiale hanno una risposta spettrale che va dalla regione del visibile al vicino infrarosso mentre quelli in modalità riflessione presentano una regione spettrale leggermente più piccola. I fotocatodi Ag-O-C sono principalmente utilizzati per il rilevamento del vicino infrarosso.

2.2 Finestra d'ingresso

Ogni materiale che costituisce la finestra d'ingresso trasmette la luce incidente in maniera diversa, a seconda della lunghezza d'onda. In particolare, i materiali utilizzati tendono ad assorbire la luce ultravioletta e, di conseguenza, la scelta del materiale della finestra determina la sensibilità del dispositivo.[8] Quelli più utilizzati sono:

- MgF_2 Il fluoruro di magnesio permette la trasmissione della radiazione ultravioletta nel vuoto al di sotto dei 115 nm.
- Silice sintetico Trasmette radiazione ultravioletta al di sotto dei 160 nm.
- Vetro borosilicato È il materiale maggiormente utilizzato. Esso non trasmette radiazione ultravioletta al di sotto dei 300 nm.

2.3 SiEM

Poiché la catena di dinodi viene sostituita da un SiPM, questo deve essere modificato in maniera tale che moltiplichi non più i fotoni bensì gli elettroni, da qui il nome SiEM. Il primo passo per renderlo efficace nella moltiplicazione di elettroni consiste nell'eliminare lo strato di resina epossilica che protegge il SiPM. Infatti questo strato, a causa del minore potere di penetrazione degli elettroni, non permette a questi ultimi di penetrare il SiPM.

Il secondo passaggio consiste invece nel ridurre lo strato di passivazione superficiale SiO_2 così da abbassare l'energia di soglia necessaria per creare una coppia elettrone-lacuna, in maniera tale da aumentare l'efficienza di rivelazione, nota anche come PDE (dall'inglese Photon Detection Efficiency):

$$PDE_{VSiPMT} = \epsilon_{PC} \cdot \epsilon_{GEOM} \cdot \epsilon_{trigger} \tag{2.1}$$

dove ϵ_{PC} è l'efficienza quantica del fotocatodo, ϵ_{GEOM} tiene conto sia della focalizzazione che del fill-factor del SiPM e $\epsilon_{trigger}$ è riferita alla probabilità che un elettrone inneschi la valanga geiger.

In merito a quest'ultima è possibile che si presentino tre diversi casi quando l'elettrone va ad incidere sul SiEM, osservabili nella figura 2.4 (a sinistra).

Nel primo caso gli elettroni hanno un'energia inferiore a quella di soglia per cui si fermeranno all'interno dello strato di SiO_2 ($\epsilon_{trigger} = 0$); nel secondo caso gli elettroni hanno un'energia molto vicina a quella di soglia per cui statisticamente solo una frazione di questi penetrerà lo strato p^+ e innescherà la valanga ($0 < \epsilon_{trigger} < 1$); infine nell'ultimo caso l'energia degli elettroni è maggiore dell'energia di soglia dunque tutti gli elettroni che entrano nel silicio riusciranno ad innescare la valanga ($\epsilon_{trigger} = 1$).

Risulta quindi necessario ridurre al minimo lo strato di SiO_2 affinché il dispositivo lavori nella regione di plateau osservabile nella figura 2.4 (a destra). In particolare la condizione ottimale la si ottiene con uno strato di spessore inferiore a ~ 100nm (nei SiPM normalmente risulta essere ~ 1 μ m).



Figura 2.4: I tre possibili casi di trigger che si presentano quando l'elettrone incide sul SiEM (sinistra) e la relativa efficienza del VSiPMT (destra), ottenuta tramite un test sul prototipo ZJ025.

Un altro fattore da tenere in conto per la realizzazione del SiEM è la stratigrafia scelta: si preferisce infatti utilizzare una stratigrafia del tipo p su n in quanto la probabilità di innescare la valanga risulta maggiore per gli elettroni che per le lacune.

Queste modifiche rendono possibile l'utilizzo del VSiPMT con l'applicazione di una tensione relativamente bassa d'alimentazione per fotocatodo e anello focalizzante ($\sim 3kV$). Inoltre poiché la valanga geiger può essere innescata da un piccolo numero di elettroni, è possibile ridurre lo strato p^+ del diodo diminuendo il *dark noise*, dovuto alle caratteristiche intrinseche del semiconduttore.

2.3.1 Vantaggi del SiEM

L'utilizzo del SiEM offre molti vantaggi rispetto alla catena di dinodi:

- Eccellente conteggio dei fotoni Il SiEM dà un segnale in uscita quasi proporzionale al numero di elettroni incidenti, grazie alla matrice di microcelle e soprattutto all'assenza di fluttuazioni nel numero di fotoni dovuta all'utilizzo del dispositivo in regime Geiger. Questo permette un'alta risoluzione nel conteggio dei fotoni.
- Guadagno indipendente dall'alta tensione A differenza dell'HPD il guadagno nella sola fase di moltiplicazione risulta molto elevato (~ 10^6 mentre nel caso dell'HPD è ~ 100). Non risulta di conseguenza necessaria la fase di bombardamento che richiede l'applicazione di un'alta tensione. È stato osservato in precedenza che è sufficiente fornire una tensione di circa 3 kV per far avere agli elettroni l'energia di soglia necessaria alla ionizzazione.

- Consumo di potenza trascurabile Questo era uno dei problemi principali nel PMT, dovuto alla presenza del partitore di tensione per mantenere costante la tensione tra i dinodi. In questo caso l'unica tensione richiesta è quella per la focalizzazione e per l'accensione del SiEM, dunque il consumo risulta nettamente migliore. Ciò, in particolare, rende questo dispositivo particolarmente utile per esperimenti in ambienti ostili, in cui risulta complicato fornire costantemente alta potenza.
- Rumore limitato L'alto guadagno del dispositivo lo rende soggetto ad un minore *dark noise*. Infatti è stato osservato che uno dei problemi dell'APD era che il basso guadagno rendeva necessario utilizzare una tensione di alimentazione particolarmente elevata. Ma la conseguenza è un aumento del *dark noise*, essendo questo legato alle caratteristiche intrinseche del semiconduttore. In questo caso invece l'alto guadagno permette l'utilizzo del rivelatore con una bassa tensione d'alimentazione per il SiEM, dunque il rumore risulta notevolmente diminuito.
- Risposta temporale veloce Il TT risulta minore grazie all'assenza della catena di dinodi in quanto in questo caso lo stadio di amplificazione è solo uno. Inoltre la tensione applicata tra fotocatodo e SiEM è maggiore di quella tra fotocatodo e primo dinodo ($kV \rightarrow 100 V$) dunque il tempo di percorrenza di questo tratto risulta minore nel VSiPMT. Anche il TTS (Transit Time Spread, ossia la fluttuazione del TT) risulta minore in questo caso poiché dipende solo dal percorso compiuto fino al SiEM e non anche dalla traiettoria percorsa lungo la catena di dinodi.
- Compattezza e semplicità La struttura meccanica del dispositivo è molto semplice, poiché necessita di pochi collegamenti per la tensione rispetto al PMT: due collegamenti sono utilizzati per fornire la tensione d'alimentazione per il fotocatodo e per il SiEM mentre un terzo rappresenta l'uscita del segnale.

2.4 Proprietà del VSiPMT

La prima dimostrazione di fattibilità del VSiPMT è stata ottenuta con una simulazione effettuata tramite Geant-4 e testando la risposta di un particolare SiPM senza protezione ad un fascio di elettroni. Questo ha spinto Hamamatsu a sviluppare due prototipi (EB-MPPC050 (ZJ5025) e EB-MPPC100 (ZJ4991)). Questi prototipi hanno una finestra d'entrata di vetro borosilicato con un'area di $7 \times 7mm^2$ e un fotocatodo di 3 mm di diamentro in GaAsP. Il SiEM utilizzato ha dimensioni pari a $1 \times 1mm^2$. La risposta spettrale è tra i 300 e i 750 nm. I due prototipi differiscono solo nel SiEM utilizzato. È possibile osservare uno dei due prototipi nella figura 2.5. [9]



Figura 2.5: Prototipo del VSiPMT prodotto dall'Hamamtsu.

Sono state effettuati diversi test su questi prototipi con cui sono state messe in evidenza le seguenti proprietà:

Qualità del segnale: nella figura 2.6 è possibile osservare lo spettro del segnale d'uscita del VSiPMT: è evidente l'elevata risoluzione di questo rivelatore nel conteggio dei fotoni. È possibile dunque constatare il miglioramento nella risoluzione grazie alla migliore proporzionalità tra il numero di fotoni e di microcelle del SiEM rispetto a quella legata all'emissione secondaria del PMT.



Figura 2.6: Spettro tipico del VSiPMT.

Efficienza di rivelazione: abbiamo già visto che la PDE è espressa dalla seguente formula:

$$PDE_{VSiPMT} = \epsilon_{PC} \cdot \epsilon_{GEOM} \cdot \epsilon_{trigger} \tag{2.2}$$

Essa è stata misurata al variare dell'alta tensione HV (figura 2.7); da questo andamento è stato osservato che nella zona di plateau, cioè quando viene fornita l'energia necessaria a innescare la moltiplicazione (~ 3 kV), la PDE risulta essere attorno al 23%.



Figura 2.7: Andamento della PDE in funzione dell'HV.

Guadagno: fissata la tensione d'alimentazione, l'andamento del guadagno è risultato lineare rispetto alla tensione applicata al SiEM per un piccolo intervallo di valori. Variando in particolare la tensione nella zona di funzionamento ottimale del moltiplicatore il guadagno è risultato oscillare tra 3×10^5 e 9×10^5 (figura 2.8).



Figura 2.8: Guadagno del VSiPMT.

Dark counts: essi dipendono dal tipo di SiEM utilizzato (infatti sono il risultato delle eccitazioni termiche del semiconduttore). In particolare migliore è la lavorazione del silicio (ossia la purezza del semiconduttore) e minore sarà la presenza di questi dark counts. Questi risultano essere fortemente legati alla tensione di alimentazione del SiEM e alla soglia di elettroni incidenti. A tal dimostrazione è stato misurato il rate dei dark counts al variare di questi parametri (figura 2.9).



Figura 2.9: Dark count del prototipo per diversi valori dell'energia di soglia di PE (dall'inglese Photon Equivalent).

Focalizzazione: una corretta messa a fuoco rappresenta un punto chiave per il funzionamento ottimale del VSiPMT. In particolare la condizione ottimale è quella per cui il fascio incidente sia focalizzato su una circonferenza iscritta nel SiEM (vedi figura 2.10 in verde).



Figura 2.10: Vista frontale della focalizzazione sul SiEM.

Infatti in questo caso sia l'efficienza di focalizzazione che la probabilità di proporzionalità rispetto al numero di fotoni incidenti sono massime. Nel caso del cerchio esterno invece l'efficienza è bassa in quanto c'è un alto rischio di perdere dei fotoelettroni mentre nel caso del cerchio interno pur essendo l'efficienza massima la proporzionalità risulta limitata in quanto più fotoelettroni possono colpire la stessa cella geiger. In condizioni ottimali questo prototipo ha non più dell'85% del numero totale di celle accese. **Range dinamico e linearità:** il range dinamico di un VSiPMT dipende dal numero totale di celle del SiEM e dalla capacità di focalizzazione del rivelatore. Assegnato il numero di celle totali, è possibile esprimere il numero di celle accese in funzione del numero di fotoni incidenti (N_{ph}) e della PDE con la seguente formula:

$$N_{pe}(N_{celle}, \lambda, V) = N_{celle} \times \left[1 - exp\left(\frac{-N_{ph} \times PDE(\lambda, V)}{N_{celle}}\right)\right]$$
(2.3)

Questo andamento esponenziale fissa una restrizione sul range dinamico del VSiPMT. Inoltre la focalizzazione pone un limite in quanto dalla forma del fascio focalizzato dipende il numero di celle accese. In questo caso il fotocatodo ha forma circolare e la configurazione del campo generato dall'anello focalizzante è tale da supporre che il fascio incida su uno spot circolare che al massimo dell'efficienza risulta inscritto nel SiEM. La linearità risulta quindi strettamente collegata al numero di celle accese. Infatti per un numero basso di celle accese la linearità è mantenuta mentre all'aumentare essa diminuisce fino ad arrivare ad una zona di plateau, ovvero quando il numero di celle accese è pari al numero di fotoni incidenti.

Capitolo 3

Misura del Transit Time Spread

Nel 2016 l'Hamamatsu Photonics ha prodotto il prototipo EB-MPPC100 (XE2597) caratterizzato dall'avere un fotocatodo da 1 pollice di diametro e un SiEM con 900 celle totali. Su questo prototipo sono stati svolti diversi test al fine di metterne in evidenza le caratteristiche [10].

Di queste, l'unica misura che non ha dimostrato di essere conforme alla previsione fatta è stata quella del TTS. Di conseguenza in questo lavoro di tesi è stato misurato nuovamente il TTS per verificare se il precedente valore ottenuto fosse dovuto ad un errore di misura o ad un difetto del prototipo stesso.

3.1 Caratteristiche del dispositivo

Il prototipo EB-MPPC100 (XE2597) è riportato nella figura 3.1, da questa è possibile osservare la compattezza del nuovo dispositivo in confronto alle dimensioni di un PMT.



Figura 3.1: Il prototipo EB-MPPC100 (XE2597) prodotto dall'Hamatsu.

Esso è costituito da:

- fotocatodo bialkali da 1 pollice di diametro;
- anello focalizzante mantenuto ad una tensione pari a quella del fotocatodo;

• SiEM con superficie pari a $3 \times 3 mm^2$, equivalente a 900 celle totali.

Ulteriori caratteristiche e raccomandazioni per il funzionamento sono riportate nelle tabelle sottostanti (figura 3.2):

Specifications

Parameter Spectral Response		Value	Unit
		200 to 650	
Dhalaasthada	Material	Bialkali	
Photocathode	Effective Area	Φ22	mm
Window Material		Borosilicate Glass	-
Target		MPPC 3x3 mm	-

Maximum Ratings (Absolute Maximum Values)

Parameter	Value	Unit	
Photocathode Voltage	-2000	V dc	
MPPC Reverse Bias Voltage at 25°C	+72.0	V dc	

To avoid trouble, please adjust incident light intensity as low as possible.

Characteristics (at room temperature)

	Pixel Type (µm)	Photocathode Quantum Efficiency ¹¹	MPPC Max. Reverse Bias Voltage	Max. Photocathode Voltage	Recommended Voltage
XE2597	100 x 100	15.0 %	+ 72.0 V	-2.0 kV	-1.5 kV, +71.5 V

^{*1} At 350 nm

Figura 3.2: Datasheet del prototipo EB-MPPC100 (XE2597).

3.2 Apparato sperimantale

Gli strumenti utilizzati per la misura sono:

- Dark box;
- Power meter digitale Newport mod. 815, con sensibilità 1nW;
- Laser impulsato Hamamatsu Photonics (durata dell'impulso = 47 ps) mod.M10306-04, con emissione monocromatica con lunghezza d'onda $\lambda = 407nm$;
- Elettronica di read-out realizzata ad hoc per amplificare il segnale del VSiPMT (vedi figura 3.3) ;
- Generatore di tensione Agilent (sensibilità 0.1 V) mod. E3612A per fornire la tensione di alimentazione al SiPM;



Figura 3.3: Elettronica di read-out.

- Generatore di tensione Matrix mod. MPS-3005-L-3 per fornire la tensione di alimentazione all'elettronica di read-out;
- - A, che trasmette l'1% della potenza del fascio d'ingresso;
 - B, che trasmette il 99% della potenza del fascio d'ingresso;
- Oscilloscopio digitale Teledine LeCroy mod. SDA 760Zi-A, 4 canali d'ingresso, larghezza di banda 6 GHz e con frequenza di campionamento di 40 GS/s.

Tutto l'apparato è stato montato come da figura 3.4:



Figura 3.4: Schema dell'apparato sperimentale.

3.3 Caratterizzazione del dispositivo

3.3.1 Qualità del segnale

Una misura sulla capacità di conteggio di singolo fotone del prototipo effettuata tramite oscilloscopio ha dato come risultato lo spettro osservabile nella figura 3.5. Anche in questo caso lo spettro è ben definito dimostrando l'alta risoluzione del VSiPMT.



Figura 3.5: Printscreen del segnale d'uscita del VSiPMT in risposta a 290 fotoni incidenti e il relativo istogramma di carica.

3.3.2 PDE

Una delle misure fondamentali effettuate su questo prototipo è quella della PDE. Essa è espressa dalla formula:

$$PDE_{VSiPMT} = \epsilon_{PC} \cdot \epsilon_{GEOM} \cdot \epsilon_{trigger} \tag{3.1}$$

Per questo prototipo risulta $\epsilon_{GEOM} = 78\%$ e $\epsilon_{PC} = 12\%$, dunque misurando sperimentalmente la PDE è possibile risalire all'efficienza di trigger. In particolare è stata misurata la PDE in funzione dell'alta tensione HV.

Il dispositivo è stato illuminato con un fascio laser a bassa intensità (in modo tale che il numero di fotoni è relativamente basso).

Sperimentalmente la PDE è data da:

$$PDE = \frac{N_{pe}}{N_{ph}} \tag{3.2}$$

dove N_{pe} è il numero di celle accese e N_{ph} è il numero di fotoni incidenti sul fotocatodo. Nel caso in cui la misura fosse stata effettuata in maniera tale da avere elettroni con un'energia superiore a quella di soglia, ciò che si otteneva era che $\epsilon_{trigger} = 1$. Di conseguenza il valore della PDE sarebbe stato:

$$PDE = 0.12 \cdot 0.78 \cdot 1 = 0.093 \tag{3.3}$$



Figura 3.6: Misura della PDE in funzione dell'alta tensione HV.

Ciò che è stato osservato è che il prototipo non riesce a raggiungere una tale PDE ma raggiunge un massimo per $PDE = (2.3 \pm 0.1)\%$ (vedi figura 3.6). Da questa misura è stato ricavato il valore massimo dell'efficienza di trigger, pari a $\epsilon_{trigger} = 0.24$.

Questo significa che applicare una tensione HV = -2kV (che è la tensione massima applicabile a questo prototipo, vedi figura 3.2) non è sufficiente a far lavorare il dispositivo nella regione di plateau (figura 2.4 a destra).

La soglia dovrebbe infatti essere attorno ai 3keV (equivalente a -3kV di alimentazione) ma a causa di un problema meccanico non è possibile aumentare la tensione oltre i -2kV per questo prototipo. Infatti l'anello dell'alimentazione per l'alta tensione è stato posto a una distanza troppo breve dalla massa del rivelatore e di conseguenza la tensione massima applicabile risulta essere HV = -2kV (figura 3.7).



Figura 3.7: Schema della struttura interna del VSiPMT.

3.3.3 Guadagno

Il guadagno può essere definito come:

$$G = \frac{Q_{tot}}{e} \tag{3.4}$$

dove Q_{tot} è la carica totale generata da ogni cella accesa ed e è la carica dell'elettrone. È stata effettuata una misura del guadagno del VSiPMT mantenendo l'alta tensione tra fotocatodo e SiEM a -1,9 kV e variando la V_{bias} del SiEM nell'intervallo [70.8,71.5]. L'andamento del guadagno ottenuto in funzione di questa V_{bias} è mostrato nella figura 3.8. Esso risulta lineare nell'intervallo [70.8, 71.5] V ed assume valori compresi tra 1.5×10^6 e 2.4×10^6 . La misura è stata effettuata anche direttamente sul SiEM e sono stati ottenuti gli stessi valori di guadagno.



Figura 3.8: Grafico del guadagno in funzione della V_{bias} per il VSiPMT.

3.4 Transit Time Spread

La risoluzione temporale svolge un ruolo chiave in tutti gli esperimenti in cui la traiettoria delle particelle deve essere ricostruita con alta precisione. Per questo motivo è necessario anche un TTS piccolo per distinguere eventi differenti e ricostruire la traiettoria con una buona risoluzione. Uno dei vantaggi principali della tecnologia del VSiPMT è proprio il TTS. Quest'ultimo è definito come la dispersione sul valore del tempo di transito, dove con tempo di transito si intende la differenza temporale tra l'arrivo dell'impulso sull'anodo e l'arrivo del fotone sul dispositivo. In pratica esso altro non è che il tempo impiegato dall'elettrone per effettuare il percorso all'interno del rivelatore.

I PMT non godono di una buona risposta temporale, infatti il fotoelettrone deve compiere un percorso che va dal fotocatodo al primo dinodo e poi attraverso tutta la catena prima di dare un segnale in uscita. Diventa quindi fondamentale anche la traiettoria intrapresa, la quale dipende dal punto in cui incide il fotone sul fotocatodo e quello dove incide l'elettrone sul primo dinodo. Nel VSiPMT è possibile osservare un netto miglioramento. In primis con l'eliminazione della catena di dinodi, il percorso che deve intraprendere l'elettrone si accorcia, essendoci un unico stadio di amplificazione. Di conseguenza sia il TT che il TTS dipendono solo dal percorso tra fotocatodo e SiEM. Anche questo però, se confrontato con quello di un PMT, risulta migliorato in quanto nel VSiPMT la tensione di focalizzazione (ossia proprio quella tra fotocatodo e SiEM) è maggiore di quella applicata nel PMT.

Al fine di provare ciò è stata effettuata una misura del TTS di questo prototipo illuminandolo con un laser la cui intensità è stata regolata in modo tale da inviare in media un fotone per impulso e il laser è stato posto ad una distanza tale che il fotocatodo risultasse completamente illuminato. Il SiEM è stato alimentato con una tensione di $(70, 8 \pm 0.1)V$ e il fotocatodo con una tensione di $(1, 9 \pm 0.1)kV$. Usando una funzione specifica dell'oscilloscopio (**Dtime@level**) è stata stimata la differenza di tempo tra l'impulso del laser e il segnale in uscita del VSiPMT. Sono stati osservati circa 10^5 eventi e raggruppati in un istogramma. Quest'ultimo è risultato avere forma gaussiana, la cui FWHM (Full Width at Half Maximum) in particolare è proprio il TTS. Dunque effettuando un fit tramite lo strumento di analisi dati Root (osservabile nella figura 3.9) è stato possibile ricavare la deviazione standard e da questa il TTS, utilizzando la seguente formula:

$$TTS = FWHM = 2 \cdot \sqrt{2 \cdot ln2} \cdot \sigma = \sim 2.355 \cdot \sigma \tag{3.5}$$

Su questa misura, però, influisce anche il jitter del trigger, ossia l'incertezza sul tempo d'arrivo del trigger, caratteristica dell'oscilloscopio. Poiché questa incertezza non è eliminabile, la FWHM in realtà pone solo un limite superiore sul valore del TTS, dunque in conclusione otteniamo:

$$TTS < (3.083 \pm 0.005)ns \tag{3.6}$$



Figura 3.9: Distribuzione gaussiana degli intervalli di tempo tra il segnale del singolo elettrone e l'impulso laser ottenuta tramite Root.

È stata stimata poi la differenza di tempo di transito di un fascio incidente sul centro del fotocatodo e su un'estremità di esso (figura 3.10). Per effettuare tale misura è stato utilizzato un fascio collimato con una media di 100 fotoni per impulso.



Figura 3.10: Distribuzione gaussiana del tempo di transito nei due casi.

Da questa analisi è risultato che:

$$TT_{diff} = (1.7966 \pm 0.0003)ns$$
 (3.7)

La differenza di cammino di elettroni incidenti su punti diversi del fotocatodo condiziona fortemente il TTS. Infatti poiché essa è dell'ordine del nanosecondo,

anche il TTS non può scendere al di sotto di tale valore. Per il VSiPMT al contrario è stato previsto un TTS <ns.

In conclusione quindi il valore ottenuto dimostra che il difetto meccanico del prototipo incide fortemente sul TTS in quanto non solo gli elettroni si spostano dal fotocatodo al SiEM con una minore accelerazione ma percorrono anche una traiettoria più lunga dovuta al campo di focalizzazione che risulta in questo caso più debole.

Conclusioni

Lo scopo principale di questo lavoro di tesi è stato quello di fare un confronto tra il PMT e il VSiPMT al fine di mostrare le effettive qualità di cui gode quest'ultimo.

Il PMT, che per quasi un secolo è stato utilizzato come principale strumento di rivelazione di luce, negli ultimi decenni si è dimostrato sempre più inefficiente sotto certi aspetti: l'evoluzione della tecnologia non lo rende più lo strumento ideale per esperimenti che richiedono un buon conteggio dei fotoni o per esperimenti in ambienti ostili (come per l'esperimento KM3NeT nell'oceano o PAMELA nello spazio) ormai sempre più diffusi in ambito astroparticellare. Inoltre con lo sviluppo della tecnologia dei semiconduttori e i relativi rivelatori associati (APD,SiPM etc.) il PMT ha dimostrato di non reggere il passo anche per quanto riguarda altre proprietà come la risposta temporale o la linearità. D'altro canto anche i semiconduttori presentano diverse limitazioni nella fotorivelazione. In particolare il difetto principale è dato dal *dark noise* a cui sono soggetti in quanto da un lato li limita nelle dimensioni, dall'altro nella tensione applicabile. Inoltre non è da trascurare l'alto prezzo del silicio nella realizzazione di questi dispositivi.

Dunque il VSiPMT al momento rappresenta un'ottima soluzione per quelle applicazioni che richiedono un connubio tra le due tecnologie. Esso infatti è simile al PMT ma al contempo utilizza la tecnologia dei SiPM permettendo dunque di ottenere un dispositivo più veloce, più compatto, con una alta risoluzione, un consumo di potenza trascurabile e al contempo possiede una superficie sensibile al pari di quella del PMT.

Anche se la misura di TTS effettuata non ha restituito il risultato sperato, a causa del difetto di produzione che potrà essere superato nei prototipi a venire, il VSiPMT ha dimostrato di possedere le potenzialità adatte per soddisfare le richieste della prossima generazione di esperimenti di fisica astroparticellare. Esso infatti riesce a superare i limiti di entrambe le tipologie di rivelatori che non riescono a stare al passo con il progresso e la precisione richiesta in alcuni degli esperimenti.

E mentre la tecnologia dei PMT non può essere migliorata, la tecnologia dei semiconduttori è in continua evoluzione, lasciando la porta aperta dunque per ulteriori miglioramenti riguardanti i rivelatori che utilizzano questa tecnologia.

Bibliografia

- [1] Rieke G., Detection of Light From the Ultraviolet to the Submilliter, Cambridge University Press, 8-9 (2003).
- [2] Leo W.R., Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag (1987).
- [3] Barbato F.C.T., Research and development of a pioneering system for single photon detection: the VSiPMT, Tesi di dottorato, Università degli Studi di Napoli Federico II (2016).
- [4] Braibant S., Giacomelli G., Spurio M., Particelle e interazioni fondamentali, Springer Science & Business Media (2012).
- [5] Piatek S., Hamamatsu Corporation & New Jersey Institute of Technology, A technical guide to silicon photomultiplier (SiPM), (2017).
- [6] Suyama M., Hamamatsu Photonics K.K. and Maridel Lares, Hybrid photodetectors combine PMT and semiconductor diode technologies, (2008).
- Sommer A. H. Brief history of photoemissive materials. In SPIE's 1993 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation, pages 2-17. International Society for Optics and Photonics, 1993.
- [8] Sommer A. H. Photoemissive materials. Preperation, properties and uses. Huntington: Krieger, 1980, 1, 1980.
- [9] Barbarino G., Barbato F.C.T., Campajola L., Canfora F., de Asmundis R., De Rosa G., Di Capua F., Fiorillo G., Migliozzi P., Mollo C.M., Rossi B., Vivolo D., A new generation photodetector for astroparticle physics: the VSiPMT, Astroparticle Physics (2014).
- [10] Barbarino G., Barbato F.C.T., Mollo CM, Nocerino E., Vivolo D., Fukasawa A., Another step towards photodetector innovation: the first 1-inch industrial VSiPMT, Astroparticle Physics (2018).