

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

Caratterizzazione di un prototipo da 2 pollici di VSiPMT

Relatori:

Dott.ssa Gianfranca De Rosa
Dott.ssa Felicia Carla
Tiziana Barbato

Candidato:

Mauro Esattore
Matricola N85000390

A.A. 2017/2018

Indice

Indice	i
Introduzione	1
1 Strumenti di Fotorivelazione	3
1.1 Tubi a Vuoto: PMT	4
1.1.1 Limiti dei PMT	5
1.2 Rivelatori a stato solido: i SiPM	7
1.2.1 Limiti dei SiPM	10
2 Il VSiPMT: La nuova frontiera dei fotorivelatori	11
2.1 Finestra d'ingresso	13
2.2 Fotocatodo	13
2.3 Il SiEM	14
2.4 Caratteristiche del VSiPMT	17
2.4.1 Photon Detection Efficiency	17
2.4.2 Guadagno di un VSiPMT	18
2.4.3 Risposta temporale	19
2.4.4 Linearità e range dinamico	21
2.4.5 Dark Noise	22
3 I prototipi da 2 pollici	24
3.1 Apparato strumentale	26
3.2 PDE	27
3.3 Dark Rate	27
3.4 Range dinamico	30
Conclusioni	34
Bibliografia	36

Introduzione

La maggior parte degli esperimenti riguardanti la fisica fondamentale è connessa, in maniera più o meno diretta, alla rivelazione di fotoni; i suddetti sono infatti punto di partenza o di arrivo di numerose tipologie di misura. Le tecnologie di rivelazione della luce rivestono un ruolo di fondamentale importanza nel panorama della ricerca scientifica di svariati campi: alcuni di essi sono strettamente collegati alla ricerca (fisica astroparticellare e biomedica), altri sono di ambito industriale ed altri ancora riguardano campi che in prima analisi si direbbero avulsi dal loro utilizzo. Conseguenza diretta di quest'interesse sta nel fatto che, nel corso degli anni, si sia nutrito un sempre maggiore interesse nei confronti dello sviluppo di strumenti di fotorivelazione sempre più all'avanguardia. Il primo dispositivo di questo tipo è il PMT (*PhotoMultiplier Tube*) che, sebbene progettato e realizzato nel 1934, costituisce tutt'oggi lo standard degli strumenti di fotorivelazione e gode di ampia possibilità d'impiego; tuttavia, per quanto tale strumento sia dotato di un ampio fotocatodo che gli conferisce una notevole superficie sensibile, esso non risulta esente da difetti insiti nella sua progettazione che ne limitano inevitabilmente le performance. Una valida alternativa al PMT è costituita dal SiPM (*Silicon PhotoMultiplier*). Quest'ultimo, caratterizzato da una piccola superficie sensibile, risulta essere un'ottima scelta per esperimenti che coinvolgano piccole e medie dimensioni sensibili, ma risulta inefficiente per esperimenti su grandezze che richiedano superfici sensibili a partire dal m^2 . Una possibile alternativa all'utilizzo di questo tipo di rivelatori è data dai cosiddetti "rivelatori ibridi" che coniugano caratteristiche dei PMT e dei SiPM. A quest'ultima famiglia di fotorivelatori appartiene il VSiPMT (*Vacuum Silicon PhotoMultiplier Tube*): tale dispositivo, progettato dal Prof. Giancarlo Barbarino¹, rivoluziona il panorama dei fotorivelatori ibridi mediante la sostituzione della catena di dinodi del PMT con un SiPM, che in questo caso agirà come rivelatore di fotoelettroni (si parlerà in questo caso di SiEM). Nel primo capitolo di questo lavoro di tesi si analizzeranno nel dettaglio i principi di funzionamento dei PMT e dei SiPM; nello specifico, si provvederà alla discussione dei vantaggi derivanti dall'uso dell'uno o dell'altro e delle limitazioni che il loro utilizzo pone negli esperimenti di fisica fondamentale. Il secondo capitolo sarà

¹Università degli Studi di Napoli Federico II.

imperniato su una descrizione dettagliata del VSiPMT. Nella prima parte di tale capitolo verranno discusse con dovizia di particolari le caratteristiche di costruzione di questo dispositivo all'avanguardia; nella seconda sezione del capitolo si tratteranno invece le proprietà fisiche proprie dello strumento. Infine, l'ultimo capitolo di questo lavoro di tesi riguarderà la caratterizzazione del prototipo da 2 pollici di VSiPMT, che costituisce lo stadio più avanzato della progettazione attuale per questa famiglia di fotorivelatori; nel corso del suddetto verranno inoltre prodotti i risultati dell'analisi di misure di linearità e dark rate effettuate nei laboratori del Dipartimento di Fisica dell'Università Federico II di Napoli.

Capitolo 1

Strumenti di Fotorivelazione

Un fotorivelatore, come suggerisce il nome, è uno strumento che permette la rivelazione di segnali luminosi: tale processo passa per uno stage intermedio di traduzione del segnale luminoso in segnale elettrico analizzabile dagli strumenti. Contrariamente a quanto si possa pensare, l'utilizzo dei rivelatori non è ristretto unicamente all'ambito di ricerca, ma trova ampie applicazioni anche nel quotidiano ed in svariati campi industriali. Al fine di essere usati per una così grande varietà di scopi, è indispensabile che i fotorivelatori siano opportunamente progettati per l'ambito e l'utilizzo che se ne vuole fare; i parametri da tenere in considerazione per la realizzazione di un fotorivelatore sono i seguenti:

- **Risposta Spettrale:** dal momento che lo strumento non può essere performante contemporaneamente ad ogni frequenza, è di fondamentale importanza definire lo spettro energetico all'interno del quale esso debba funzionare. Il range di frequenze per le quali lo strumento sarà sensibile dipenderà ovviamente dal tipo di utilizzo previsto per esso;
- **Range dinamico:** lo strumento dovrà poter lavorare in condizioni di potenza ottica variabile, che tenga conto del fatto che l'intensità luminosa della radiazione in arrivo possa variare in intensità. Uscire dal suddetto range comporterà una perdita della risposta lineare dello strumento;
- **Dissipazione di potenza:** è necessario che i fotorivelatori siano caratterizzati da una bassa dissipazione di potenza;
- **Superficie sensibile:** la grandezza di quest'ultima dipenderà dal fenomeno in esame;
- **Struttura meccanica:** le caratteristiche tecniche (quali robustezza, forma e caratteristiche costruttive) richieste da una determinata situazione di impiego sono alla base della scelta di un fotorivelatore;

- **Risoluzione temporale:** tale proprietà, cruciale nel processo di rivelazione, è comune a diversi tipi di rivelatori.

I vari tipi di fotorivelatori si distinguono quindi sulla base di queste caratteristiche. I loro nomi, inoltre, forniscono una breve descrizione sulla tecnologia alla base del loro funzionamento. Attualmente, sono tre le macrocategorie nelle quali è possibile racchiudere i fotorivelatori: tubi a vuoto, rivelatori a stato solido e modelli ibridi. I tubi a vuoto, in particolare, sono i "primi" fotorivelatori, sia in senso cronologico che in termini di utilizzo: tra questi, il tipo di fotorivelatore più utilizzato è il PMT. Il progresso nella ricerca sui semiconduttori ha portato alla realizzazione, alla fine del secolo scorso, di rivelatori a stato solido. Esponenti di spicco di questa categoria sono gli APD ed i SiPM. In questa cornice, gli ibridi si inseriscono come la nuova frontiera nel campo dei fotomoltiplicatori del nuovo millennio, combinando elementi delle due categorie precedenti. Di seguito, si analizzeranno in maniera dettagliata fotomoltiplicatori a vuoto ed a stato solido, evidenziandone pregi e difetti.

1.1 Tubi a Vuoto: PMT

Sin dalla loro progettazione nel 1934, i PMT (acronimo per *PhotoMultiplier Tube*) costituiscono la tipologia più diffusa di fotorivelatori. Tali strumenti sono caratterizzati (come si vede in Figura 1.1) da un tubo di vetro dentro il quale viene praticato il vuoto: all'interno del suddetto sono posti un fotocatodo e una catena di dinodi facente funzione di stadio amplificatore.

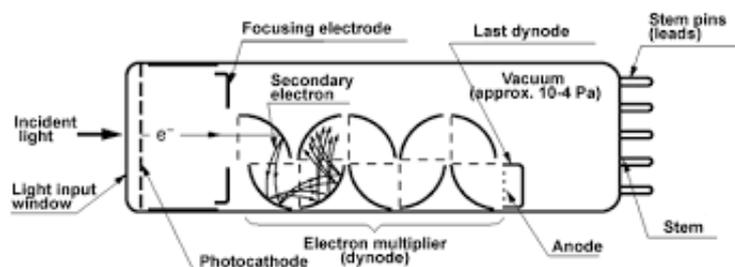


Figura 1.1: *Schema di funzionamento di un PMT.*

I processi fisici su cui si basa il funzionamento di questo fotorivelatore sono l'effetto fotoelettrico e l'emissione secondaria. Applicando una differenza di potenziale al rivelatore, dal fotocatodo vengono estratti fotoelettroni per effetto fotoelettrico: questi ultimi sono poi focalizzati da un campo elettrico (fornito da un apposito

elettrodo di focalizzazione) e portati verso il primo dinodo della catena. Qui si avrà la "moltiplicazione" dei fotoelettroni mediante processo di emissione secondaria. I dinodi successivi al primo sono posti ad un potenziale crescente in modo che la differenza di potenziale tra un dinodo ed il successivo si mantenga costante: tutti i fotoelettroni creati per emissione secondaria sono convogliati su di un anodo posto alla fine della catena dinodica.

Il principale punto di forza di questo tipo di fotorivelatore è dato dal suo guadagno: un fotoelettrone incidente sul primo dinodo estrae una quantità di elettroni per emissione secondaria indicata dalla quantità $\delta = kV$; gli elettroni estratti in siffatta maniera sono poi accelerati verso il dinodo successivo della catena. Come si evince dalla relazione, il parametro δ è direttamente proporzionale alla differenza di potenziale ai capi del dinodo, responsabile dell'accelerazione dell'elettrone. Supponendo che lo stadio amplificatore del PMT sia composto da una catena di n dinodi, gli elettroni che vengono raccolti dall'anodo posto a fine catena saranno in media δ^n ; dal momento che tale valore rientra generalmente nell'ordine di $10^6 \div 10^7$, risulta evidente che ai capi dell'anodo sarà possibile osservare un segnale elettrico piuttosto intenso. Il PMT si presenta quindi come un fotorivelatore caratterizzato da ottime capacità di amplificazione: queste lo rendono la scelta perfetta in esperimenti caratterizzati da un numero esiguo di fotoni. Inoltre, le ampie dimensioni del fotocatodo fanno sì che questo strumento sia ampiamente impiegabile anche in tipologie di esperimenti che richiedano una elevata superficie sensibile [1].

1.1.1 Limiti dei PMT

Nonostante gli innegabili vantaggi di utilizzo, il PMT non è esente da significative limitazioni che ne minano le possibilità d'impiego.

Tra i principali problemi d'impiego figura la difficoltà di conteggio di singolo fotone; si è prima accennato al fatto che un fotone, all'atto dell'assorbimento da parte del primo dinodo della catena dello stato di amplificazione, possa estrarre mediamente δ elettroni per emissione secondaria. Tale numero è affetto da un'incertezza tanto più grande quanto minore è il numero di elettroni estratti: più di preciso, detto N il numero medio di elettroni secondari estratti, l'errore su questo dato sarà $\frac{1}{\sqrt{N}}$; conseguenza di ciò è che tale incertezza possa raggiungere valori significativi in corrispondenza del primo dinodo della catena, per il quale il numero di elettroni N è piccolo. Questo fenomeno si nota non tanto per lo spettro del singolo fotone, che risulta essere comunque risolto, quanto per la risoluzione di eventi relativi a rivelazioni di più fotoni; in tale situazione il segnale restituito dallo strumento sarà sovrapposizione delle gaussiane corrispondenti ai segnali di più rivelazioni, con conseguente impossibilità di risoluzione (e quindi di conteggio) del singolo evento rivelato. Tale problematica è ben visibile in Figura 1.2.

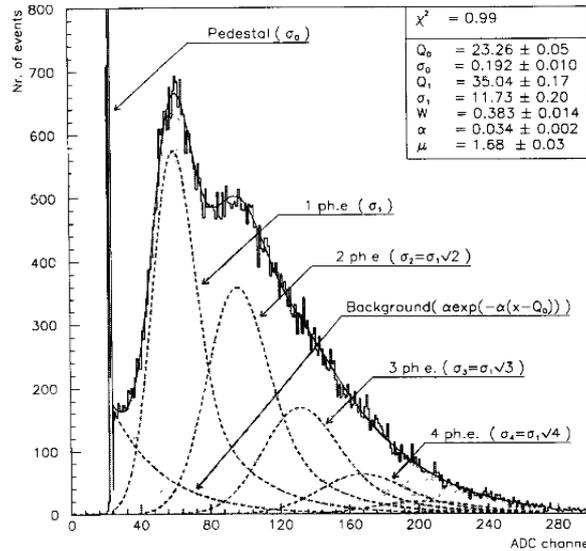


Figura 1.2: Risoluzione di fotoni per un PMT: dal momento che le gaussiane sono molto vicine tra loro, risulta complicata la risoluzione della singola gaussiana.

Ulteriori criticità derivanti dall'utilizzo di questo tipo di rivelatori sono da ricercare nella linearità della risposta: tale proprietà, infatti, risulta strettamente legata alla stabilità del guadagno. Il guadagno del PMT è legato alla tensione che viene applicata a tutto il rivelatore mediante il partitore ed alla tensione ai capi di un generico dinodo, ed osserva un comportamento dato dalla relazione

$$\frac{dG}{G} = n \frac{dV_d}{V_d} = n \frac{dV_b}{V_b} \quad (1.1)$$

dove appunto V_d è la tensione ai capi di due dinodi e V_b è la tensione del partitore che interessa l'intero corpo del rivelatore.

Si possono inoltre evidenziare le seguenti problematiche:

- L'accumulo di fotoelettroni sull'anodo genera effetti di carica spaziale che possono causare effetti non lineari, andando ad alterare così il segnale rivelato;
- Un'elevata corrente di anodo può ridurre la differenza di potenziale che intercorre tra l'anodo e l'ultimo dinodo della catena di amplificazione, andando così a perturbare i valori di tensione di tutti gli stadi precedenti ad esso: ciò si traduce in una diminuzione del valore effettivo di guadagno;
- La presenza stessa del partitore di corrente comporta rischi di rottura dei resistori che ne fanno parte e, più in generale, introduce un'inevitabile dissipazione di potenza.

Si possono inoltre osservare delle criticità legate anche alla risposta temporale dello strumento: in particolare, per un PMT essa è legata al tempo impiegato dai fotoni estratti dal fotocatodo a raggiungere il primo dinodo della catena di amplificazione ed il tempo di percorrenza della catena stessa. A tal proposito, una misura dalla quale è possibile dedurre la bontà della risposta temporale di un fotorivelatore è il *transit time*, definito come intervallo di tempo che intercorre tra l'arrivo di un segnale luminoso al fotocatodo e la sua effettiva rivelazione sotto forma di segnale elettrico da parte del PMT. Vi sono diversi fattori che incidono su misure di questo tipo: alcuni sono legati alla geometria dello strumento (*transit time difference*), altri invece dipendono dall'energia e dalla direzione del fotoelettrone estratto dai dinodi (*transit time spread*); ad essi si aggiungono altre problematiche legate alla natura intrinsecamente statistica dei principi fisici alla base del funzionamento dello strumento.[4]

Infine, non bisogna dimenticare che il PMT è uno strumento che risente fortemente degli effetti di *dark current*: tale fenomeno è causato da fotoelettroni estratti per effetto termoionico dal fotocatodo che vengono poi amplificati dalla catena dinodica. Questo contributo al segnale in uscita allo strumento non è trascurabile se si tiene conto della grande superficie sensibile del fotocatodo. Tuttavia, il contributo di dark è significativo solo se i fotoelettroni sono estratti termicamente dal fotocatodo stesso o da uno dei primi dinodi della catena: in caso contrario, il segnale ad essi corrispondente sarà trascurabile.

1.2 Rivelatori a stato solido: i SiPM

Le numerose limitazioni risultanti dall'utilizzo dei PMT han portato, negli scorsi anni, alla ricerca di soluzioni più performanti nel campo della fotorivelazione. Tra le varie alternative, un ottimo risultato è stato raggiunto dai dispositivi a stato solido i quali, come vedremo, raggiungono risultati paragonabili a quelli dei tubi a vuoto pur eliminandone alcuni difetti sostanziali.

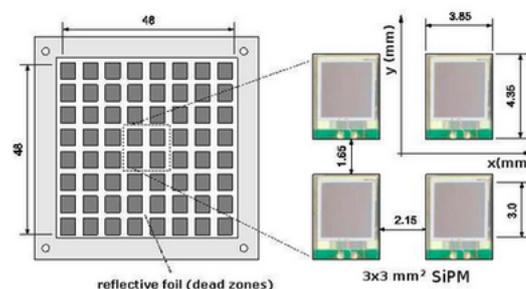


Figura 1.3: Schema di un SiPM con particolare sui pixel.

Tra i rivelatori più diffusi di questa nuova famiglia figurano i SiPM; tale tipologia di rivelatori è caratterizzata da una forma di matrice bidimensionale, costituita da giunzioni di silicio drogate p-n e polarizzate inversamente. Dal momento che tali giunzioni costituiscono il singolo elemento di matrice del SiPM, risulta necessario spiegare il funzionamento della singola giunzione per meglio comprendere quello dello strumento nella sua interezza. La Figura 1.4 mostra schematicamente il funzionamento di una giunzione di questo tipo.

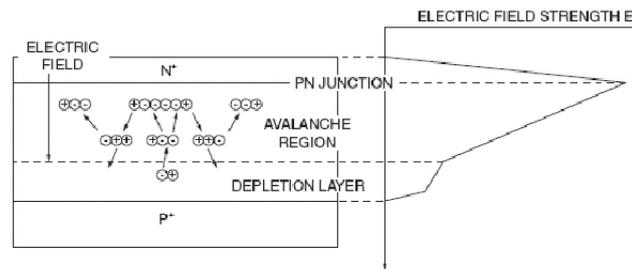


Figura 1.4: *Schema del funzionamento di una giunzione in regime Geiger; ogni giunzione corrisponde al singolo pixel del SiPM.*

Una giunzione come quella in figura lavora in polarizzazione inversa: allo strato drogato p è alimentata da tensione negativa della giunzione, mentre lo strato drogato n sarà messo a tensione positiva. La giunzione in questione opera in regime Geiger: un singolo fotone, in possesso di un'energia maggiore dell'energia di gap tra banda di valenza e di conduzione (per il Si, $E_{gap} \sim 1.12$ eV), ha una probabilità di essere assorbito da un elettrone nella banda di valenza. Tale elettrone avrà quindi l'energia necessaria a passare dalla banda di valenza a quella di conduzione: questo processo lascia uno "spazio vuoto" in corrispondenza della posizione precedentemente occupata dall'elettrone, e si parlerà pertanto di creazione di una *coppia elettrone-lacuna*. In presenza di un campo elettrico intenso ($> 5 \times 10^5$ V/cm), la coppia così creata sarà caratterizzata da un'energia cinetica tale da generare ulteriori coppie secondarie.

Da un singolo fotone assorbito, quindi, è possibile innescare un meccanismo di produzione di coppie elettrone-lacuna *a valanga*; conseguenza di tale meccanismo è la produzione di una corrente macroscopica in output. Per questo motivo, in un SiPM ad ogni giunzione è associata una resistenza di *quenching* il cui compito è quello di estinguere la valanga e riportare la situazione della giunzione allo stato iniziale. Tale fotomoltiplicatore si differenzia dal PMT per diverse proprietà, tra le quali:

- Il guadagno della singola giunzione si attesta sui $10^5 \div 10^6$ ed è quindi più basso di quello di un PMT (che è $\sim 10^6 \div 10^7$). Tuttavia, esso risulta essere

più stabile al variare della tensione;

- La carica Q raccolta in output al singolo pixel del SiPM è indipendente dal numero di fotoni incidenti contemporaneamente sulla giunzione Geiger, quindi non è possibile ottenere alcuna informazione sul numero di fotoni che incidono sul singolo pixel.

Come si vede in Figura 1.3, i SiPM hanno la caratteristica forma di matrice 2-D: ognuno dei pixel è costituito da una giunzione che lavora in regime Geiger, e ad ogni pixel acceso viene associato il conteggio di un singolo fotone (dal momento che, come detto, è impossibile discernere il numero esatto di fotoni incidenti sul singolo pixel); poichè i pixel vengono letti in parallelo, ciò che si ottiene è un'eccellente capacità di fotoconteggio anche per esperimenti che coinvolgano un basso numero di fotoni (Figura 1.5). Di conseguenza, il SiPM si pone come un'alternativa più che valida al PMT come rivelatore di luce poco intensa. Esso presenta capacità di amplificazione simili, sebbene ottenute attraverso un procedimento diverso, pur presentando svariati pregi esclusivi dei rivelatori a stato solido, tra i quali figurano:

- Una maggiore robustezza e compattezza;
- Una più bassa tensione di funzionamento;
- La non necessità di un partitore di tensione, con conseguente assenza di effetti parassiti dovuti ai resistori; ciò si traduce in una minore dissipazione di potenza e un minor rischio di rottura da parte dello strumento. [4]

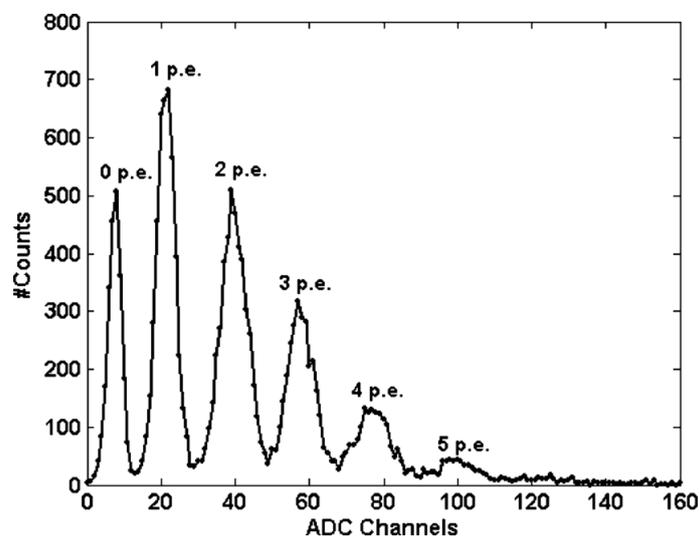


Figura 1.5: *Risoluzione dello spettro energetico di un SiPM: si nota chiaramente una migliore risoluzione dei picchi corrispondenti ai singoli fotoni rispetto al PMT.*

1.2.1 Limiti dei SiPM

Indubbiamente, i SiPM costituiscono una valida alternativa ai PMT: tuttavia, ciò non li rende esenti da limitazioni che ne riducono significativamente il potenziale di utilizzo. Trattandosi di dispositivi a stato solido, essi sono particolarmente sensibili al *dark noise*: tale fenomeno è causato da elettroni liberati per agitazione termica. Gli elettroni così prodotti possono innescare reazioni di creazione di valanghe elettroniche che, a causa del campo elettrico cui è sottoposto il singolo pixel/giunzione in regime Geiger, vengono amplificate allo stesso modo di quelle prodotte mediante assorbimento di fotoni; parleremo in questo caso di *dark counts*. La dipendenza dalla temperatura di lavoro interessa anche la tensione di breakdown cui è soggetta la giunzione in regime Geiger. Dal momento che tale tensione è strettamente collegata al guadagno del SiPM, è di cruciale importanza conoscere l'andamento di V_{bd} in funzione della temperatura: nota tale relazione, sarà possibile regolare l'uno in funzione dell'altro e mantenere costante il guadagno. Va infine specificato che gli effetti di *dark noise* presentano anche una proporzionalità rispetto alla superficie del SiPM in aggiunta alla sopracitata dipendenza dalla temperatura: ciò comporta una sostanziale limitazione nelle dimensioni tipiche di questo tipo di fotorivelatori. Le dimensioni tipiche di un SiPM, infatti, non superano i 36mm^2 di superficie, rendendone di fatto impossibile l'utilizzo in alcuni campi di ricerca che richiedono ampie superfici sensibili di rivelazione, come ad esempio la fisica astroparticellare [4].

Capitolo 2

Il VSiPMT: La nuova frontiera dei fotorivelatori

Nel corso degli ultimi anni, il panorama dei fotorivelatori si è arricchito mediante l'introduzione di una terza famiglia di strumenti: i fotorivelatori ibridi. Tale tipologia di rivelatori punta ad unire tecnologie presenti nei fotomoltiplicatori appartenenti alle famiglie precedentemente descritte al fine di ottenere un oggetto che goda dei pro derivanti da ambedue i modelli di partenza, eliminando al contempo le problematiche derivanti dall'uso degli stessi presi singolarmente. Il VSiPMT si propone come futuro esponente di spicco di questa terza tipologia di fotorivelatori. Brevettato nel 2008 sulla base di un'idea del Prof. Giancarlo Barbarino ², questo fotorivelatore ibrido rivoluziona il campo dei fotorivelatori ibridi, coniugando le capacità di fotoconteggio di un SiPM con la superficie sensibile di un PMT. Esso si presenta come un PMT nel quale lo stadio di amplificazione non è costituito da una catena di dinodi con partitore resistivo annesso, bensì da un SiPM, che fungerà da amplificatore e contatore di elettroni: parleremo in questo caso di SiEM (*Silicon ElectroMultiplier*). Tale oggetto è raffigurato in Figura 2.1.

²Università degli Studi di Napoli Federico II.

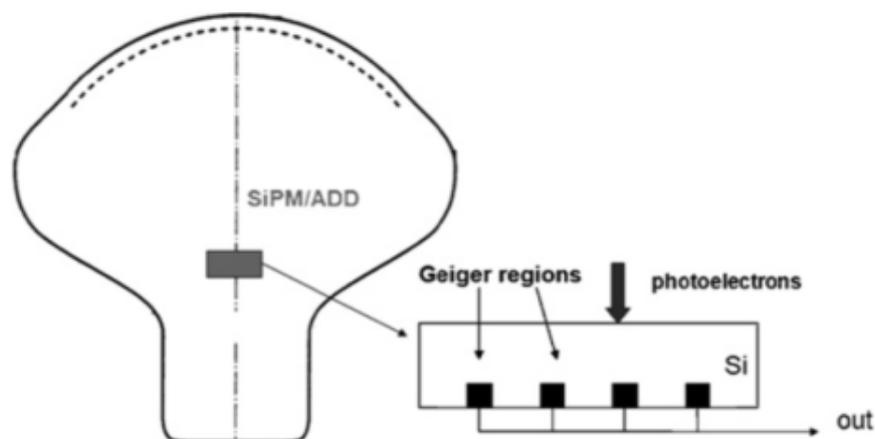


Figura 2.1: *Schema di un VSiPMT*

Gli elettroni estratti dal fotocatodo sono accelerati e guidati sul SiEM per mezzo di un anello di focalizzazione posto tra il fotocatodo ed il SiEM stesso, come si può notare dalla Figura 2.2. Per poter adempiere al proprio ruolo, il suddetto anello di focalizzazione è sottoposto ad una tensione elevata ($\sim 1-2$ kV).

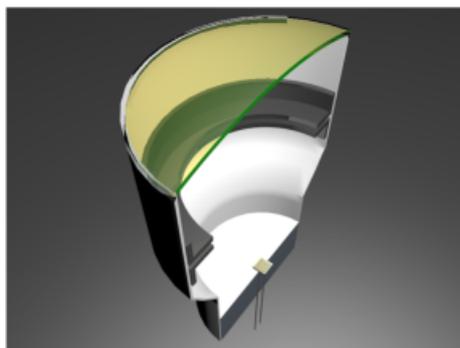


Figura 2.2: *Sezione interna di un VSiPMT. Si possono notare, nell'ordine: la finestra d'ingresso della luce, il fotocatodo da cui vengono estratti gli elettroni, l'anello di focalizzazione per mezzo del quale questi ultimi vengono accelerati ed, in fondo, il SiEM dove ne avverrà il conteggio. All'interno dell'intero tubo è praticato il vuoto.*

Si andranno adesso ad analizzare singolarmente gli elementi costituenti il VSiPMT.

2.1 Finestra d'ingresso

Prima ancora di analizzare i componenti interni del VSiPMT ed il modo in cui i fotoni vengono focalizzati sul SiEM, è necessario analizzare brevemente la finestra d'ingresso dello strumento. Il tipo di materiale in ingresso influenzerà chiaramente la lunghezza d'onda minima che lo strumento potrà rivelare. Tra i materiali più utilizzati figurano:

- Silice sintetica: permette trasmissione di luce ultravioletta fino a 160 nm;
- Vetro borosilicato: trasmette luce ultravioletta fino a 300 nm;
- Fluoruro di Magnesio (MgF_2): trasmette luce ultravioletta fino a 120 nm.

2.2 Fotocatodo

Il fotocatodo del VSiPMT è l'elemento nel quale avviene la conversione dei fotoni entranti nel rivelatore in elettroni da accelerare sul SiEM. In base alla modalità di assorbimento ed emissione, si distinguono fotocatodi che lavorano in modalità *riflessione* ed altri che lavorano in modalità *trasmissione*; i primi sono opachi, i secondi semitrasparenti. Inoltre, nonostante tale componente possa essere costituito da un qualsiasi catodo metallico, al fine di aumentarne sensibilmente le performance, esso viene spesso rivestito di altri elementi che ne migliorino le proprietà di estrazione elettronica. Tra i possibili rivestimenti i più importanti sono :

- Ag-O-Cs: il primo rivestimento per fotocatodi, storicamente parlando. È caratterizzato da un range di sensibilità che va dai 300 nm ai 1200 nm ma, a causa della sua elevata sensibilità al dark noise, al giorno d'oggi viene utilizzato unicamente in sistemi dotati di raffreddamento e che lavorino nell'ultravioletto;
- Bialcalini (Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs): come il nome suggerisce, si tratta di rivestimenti formati dall'unione di due metalli alcalini. Sono caratterizzati da una risposta spettrale in un range che va dall'ultravioletto al visibile (in trasmissione) o dall'ultravioletto a circa 700 nm (in riflessione);
- Multialcalini (Na-K-Sb-Cs): ottenuti dall'unione di tre o più metalli alcalini. I fotocatodi con questo rivestimento possono vantare un'ampia risposta spettrale, che va dall'ultravioletto all'infrarosso (~ 850 nm);
- Tellurio ed Ioduro di Cesio (Cs-Te, Cs-I): tali materiali risultano sensibili alla radiazione ultravioletta (anche nel vuoto) ma risultano insensibili a radiazioni aventi lunghezze d'onda nel visibile; in particolare, Cs-Te risulta

essere insensibile per lunghezze d'onda maggiore di 320 nm, mentre Cs-I lo è per lunghezze d'onda maggiore di 200 nm.

I fotocatodi più comuni sono quelli composti da metalli bialcalini, dal momento che sono quelli che richiedono la minor spesa di energia per estrarre un elettrone. In generale, però, il materiale di rivestimento viene determinato dalla regione spettrale nella quale dovrà lavorare il fotocatodo dal momento che, come si è spiegato, ognuno di essi è caratterizzato da un proprio range di sensibilità alla radiazione. La risposta spettrale dei vari materiali è mostrata graficamente in Figura 2.3.

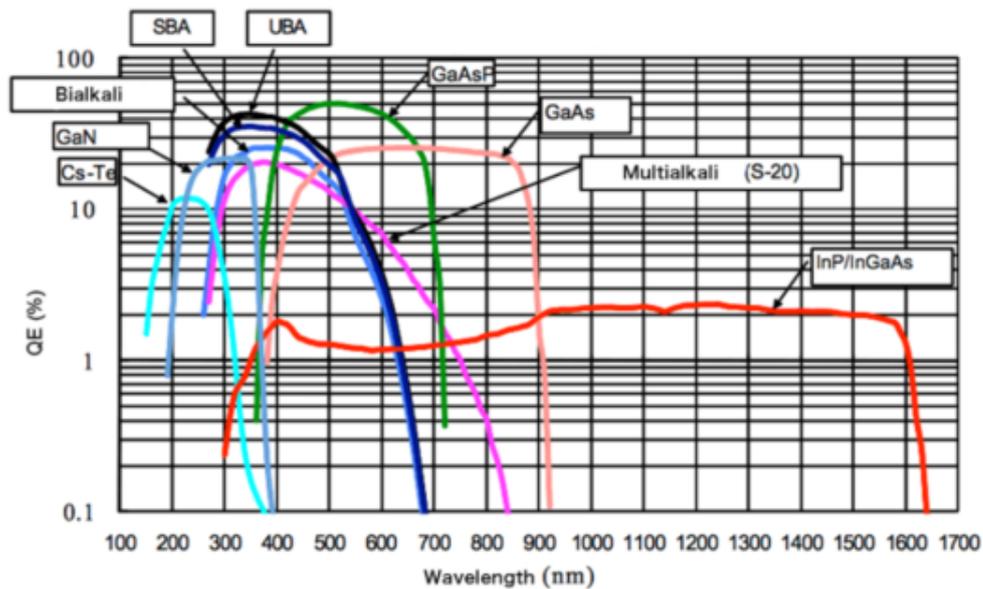


Figura 2.3: Grafico di risposta spettrale di alcuni dei possibili rivestimenti di fotocatodo.

2.3 Il SiEM

Il SiEM (sigla per *Silicon ElectroMultiplier*) costituisce lo stadio di amplificazione per il VSIPMT: si tratta di un SiPM al quale sono state apportate delle opportune modifiche per consentirne la rivelazione di elettroni piuttosto che di fotoni. La principale tra queste è stata la rimozione dello strato di resina epossidica tipica del SiPM, al fine di facilitare la penetrazione degli elettroni. Questi, infatti, sono caratterizzati da un potere penetrante molto minore rispetto ai fotoni, e quindi resterebbero intrappolati nello strato di resina, qualora presente. Occorre inoltre

modificare un'altra caratteristica del SiPM, il cosiddetto *strato di passivazione*, composto da ossido di silicio (SiO_2). Dal momento che tale strato adempie a svariati ruoli, tra cui quello di isolare semiconduttore e contatti metallici del dispositivo, non sarà possibile eliminarlo del tutto così come si è fatto con lo strato di resina; d'altro canto, uno strato troppo spesso di materiale richiederebbe elettroni caratterizzati da alti valori in energia per innescare valanghe all'interno del SiEM. L'obiettivo è quindi quello di ridurre al minimo possibile lo strato di passivazione con l'intento di massimizzare l'efficienza del componente, pur mantenendo inalterate le proprietà di isolamento che esso fornisce. Caratteristica fondamentale del SiEM è la cosiddetta EDE (*Electron Detection Efficiency*), definita dalle relazioni

$$EDE = \epsilon_{geom} \cdot \epsilon_{trigger} \cdot (\eta - 1) \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{trigger} = P_e + P_h - P_e \cdot P_h \quad (2.2)$$

In particolare, ϵ_{geom} è uguale al cosiddetto Fill Factor, dato come rapporto tra superficie *efficace*³ del rivelatore e superficie totale del SiEM; dall'ingrandimento in Figura 2.4 è possibile infatti notare la presenza di zone di non sensibilità dello strumento corrispondenti alla superficie di separazione tra un pixel e quelli limitrofi.

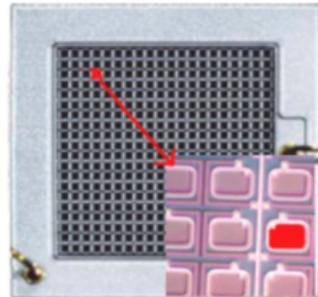


Figura 2.4: *Rappresentazione della matrice SiEM.*

Il parametro η presente nella relazione riguarda invece la probabilità di riflessione di un elettrone incidente sul fotocatodo; di conseguenza, il termine $(\eta - 1)$ esprimerà la probabilità di penetrazione dell'elettrone in una delle giunzioni costituenti il SiEM. Il parametro $\epsilon_{trigger}$ è invece relativo all'innescò di valanghe in una giunzione che lavora in zona Geiger: in particolare, P_e è la probabilità che la valanga sia innescata da un elettrone, mentre P_h è la probabilità che essa venga innescata da una lacuna. Dal momento che nel silicio la probabilità che la valanga sia innescata da un elettrone è doppia rispetto a quella di innescò da parte di una lacuna [2], le

³Superficie complessiva di rivelazione, corrispondente cioè alla superficie totale dei pixel

giunzioni Geiger del SiEM sono caratterizzate dallo strato p al di sopra dello strato n. In questo modo, la lacuna creata nello strato p viene raccolta immediatamente. Per questo motivo, risulterà $\epsilon_{trigger} = P_e$.

Una volta innescata la valanga, i possibili scenari sono tre (Figura 2.5):

- $\epsilon_{trigger} = 0$: i fotoelettroni estratti dal fotocatodo non hanno energia sufficiente a superare lo strato di SiO_2 e quindi non si innescano valanghe;
- $0 < \epsilon_{trigger} < 1$: i fotoelettroni hanno energia maggiore rispetto al caso a). Tuttavia, alcuni di essi riescono ad innescare valanghe Geiger, mentre altri si ricombinano in fotoni all'interno della giunzione;
- $\epsilon_{trigger} = 1$: tutti i fotoelettroni hanno energia sufficiente ad innescare valanghe nelle giunzioni costituenti il SiEM.[5]

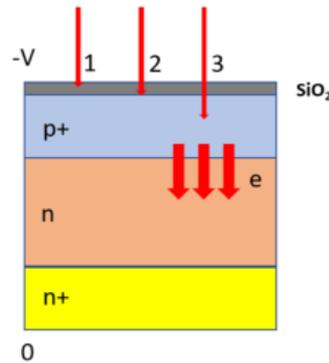


Figura 2.5: Possibili casi di penetrazione di fotoelettroni in una giunzione del SiEM.

Il parametro $\epsilon_{trigger}$ compare anche, come si vedrà nel paragrafo seguente, nella relazione che definisce la PDE del VSIPMT. In particolare, facendo riferimento alla Figura 2.6 (pag. 18), si distinguono tre regioni diverse:

- La regione caratterizzata da $\epsilon_{trigger} = 0$, composta di elettroni troppo poco energetici e che non riescono a penetrare lo strato di passivazione del SiEM; per tale zona risulta un valore nullo di PDE;
- La regione intermedia, corrispondente a valori $0 < \epsilon_{trigger} < 1$, dove all'aumentare dell'energia degli elettroni si riscontra una risposta lineare della PDE, che si mantiene tale fintanto che $\epsilon_{trigger} < 1$;
- Infine, si ha la cosiddetta *regione di plateau*, caratterizzata da una saturazione degli elettroni in ingresso al SiEM ($\epsilon_{trigger} = 1$).

2.4 Caratteristiche del VSiPMT

Andremo ora ad analizzare le caratteristiche dello strumento:

- Photon Detection Efficiency;
- Guadagno;
- Risposta temporale;
- Linearità e range dinamico;
- Dark Noise.

2.4.1 Photon Detection Efficiency

Spesso abbreviata in PDE, tale caratteristica è la probabilità che un elettrone estratto dal fotocatodo possa innescare valanghe nel SiEM, producendo un segnale in uscita al dispositivo.

Tale proprietà è esprimibile come

$$PDE_{VSiPMT} = QE \cdot EDE_{SiEM} \quad (2.3)$$

e vede la PDE come prodotto dell'efficienza quantica del fotocatodo e dell'efficienza di rivelazione del singolo elettrone incidente sul SiEM. Per efficienza quantica si intende la probabilità che un fotone assorbito dal fotocatodo causi l'emissione di un fotoelettrone. Come detto nel paragrafo 2.3, ϵ_{geom} è uguale al cosiddetto Fill Factor, $\epsilon_{trigger}$ è funzione della tensione V_{bias} ed è relativo all'innescamento di valanghe in una giunzione che lavora in zona Geiger, mentre $\epsilon_{focusing}$ è la probabilità che un fotoelettrone prodotto dal fotocatodo giunga sul SiEM. Per la restante parte del paragrafo, si supponerà che tutti i fotoelettroni siano ben focalizzati e arrivino sul SiEM, di modo che risulti $\epsilon_{focusing} = 1$. Per ottenere questa condizione, è necessario che il campo elettrico di focalizzazione sia opportunamente modulato.

Con riferimento alla figura 2.6, è possibile notare che in corrispondenza dei diversi valori di $\epsilon_{trigger}$ si possono riscontrare zone di efficienza di fotoconteggio differenti.

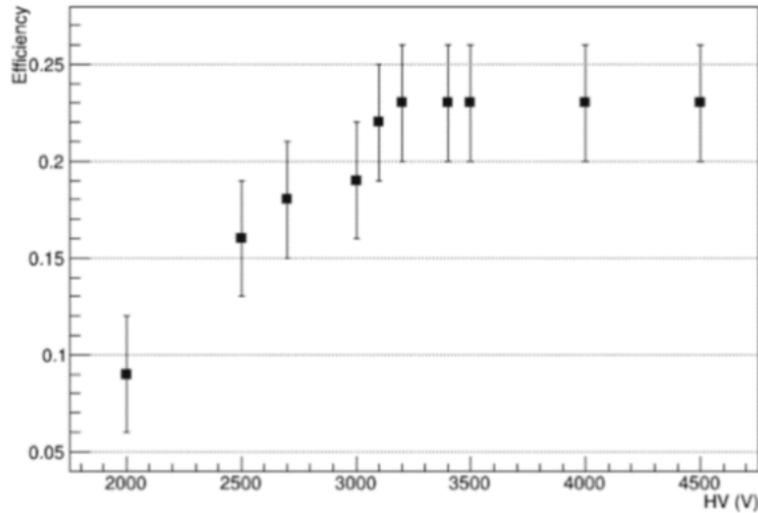


Figura 2.6: *Misure di PDE al variare dell'HV (Prototipo ZJ5025).*

Nella regione di plateau, la PDE del VSiPMT raggiunge il massimo valore possibile, dato da:

$$PDE_{VSiPMT} = QE \cdot FF. \quad (2.4)$$

Il grande vantaggio ottenuto dal VSiPMT rispetto ad altri fotorivelatori sta nel fatto che, fintanto che il punto di lavoro del rivelatore viene fissato nella regione di plateau, sarà sufficiente stabilizzare unicamente la tensione che alimenta il SiEM (~ 50 V) anzichè ricorrere ad una stabilizzazione in alta tensione (come accade invece per i PMT)[3].

2.4.2 Guadagno di un VSiPMT

Il guadagno di un fotomoltiplicatore è espresso dal rapporto tra le cariche generate in output e quelle in ingresso: esso risulta quindi fortemente legato allo stadio di amplificazione del dispositivo in uso. Nel caso del VSiPMT, il guadagno è dipendente puramente dalle caratteristiche costruttive del SiEM, dal momento che esso costituisce lo stadio d'amplificazione del rivelatore: in particolare, il guadagno è legato al numero di fotoelettroni incidenti nelle giunzioni p-n in regime Geiger costituenti i pixel di rivelazione del SiEM [3]. Dal momento che, come spiegato in precedenza, si tratta di un SiPM opportunamente modificato, per il SiEM sarà valida la relazione con la quale viene determinato il guadagno del singolo pixel di un SiPM:

$$G = \frac{Q}{e}. \quad (2.5)$$

Il guadagno risulta essere linearmente dipendente dalla tensione di bias applicata, dal momento che la carica complessiva generata dalle valanghe è espressa dalle relazioni:

$$Q = \Delta V \cdot C_j \quad (2.6)$$

$$\Delta V = V_{bias} - V_{bd} \quad (2.7)$$

laddove C_j indica la capacità della giunzione, mentre V_{bd} è la tensione di breakdown per la giunzione, raggiunta la quale si ha che il numero di coppie elettrone-lacuna create supera quello di eventuali ricombinazioni elettroniche che può avvenire all'interno della giunzione.

Come si evince dalla figura 2.7, l'andamento risulta essere lineare come si era anticipato.

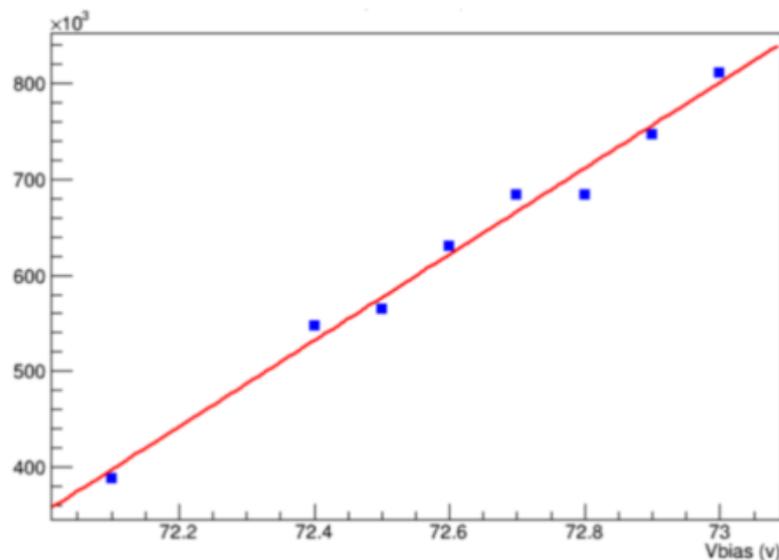


Figura 2.7: Guadagno di un VSiPMT (prototipo ZJ5020) in funzione della V_{bias} .

2.4.3 Risposta temporale

La risposta temporale di un VSiPMT è legata ad un parametro detto *transit time* (TT): esso è definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra l'arrivo di un fotone sul fotocatodo e la rivelazione del suo segnale sul SiEM (Figura 2.8). La differenza dei transit time legati alle diverse traiettorie di percorrenza dei fotoelettroni introdurrà quindi delle fluttuazioni nella misurazione del TT (Figura

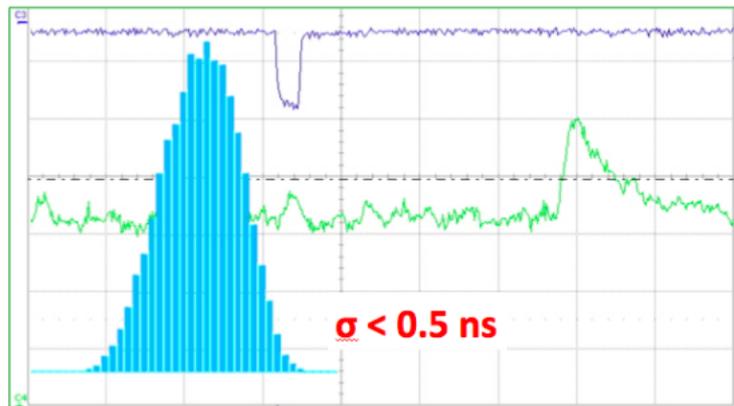


Figura 2.8: Esempio di misura di transit time; il TTS è dato dalla larghezza a metà altezza della curva che definisce la distribuzione.

2.9). Inoltre, è possibile definire anche un'altra grandezza legata alla risposta temporale del VSiPMT: il *transit time spread*, definito come larghezza a mezza altezza della distribuzione dei transit times.

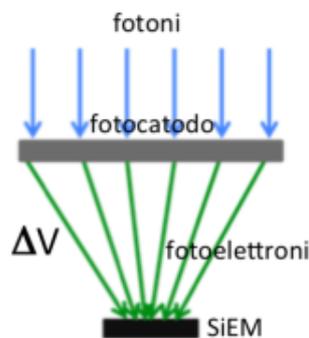


Figura 2.9: Differenti traiettorie di percorrenza degli elettroni estratti dal fotocatodo.

La risposta temporale riveste un ruolo di fondamentale importanza in esperimenti nei quali è richiesta una notevole precisione di ricostruzione del percorso della particella: di conseguenza è necessario un TTS basso.

Il principale contributo di TTS nel VSiPMT è dato dalle diverse traiettorie degli elettroni convergenti sul SiEM e risulta essere di gran lunga minore rispetto ad un classico PMT. A supporto di questo risultato intervengono i seguenti fattori:

- Assenza della catena di dinodi all'interno del VSiPMT: tale modalità di amplificazione risulta essere caratterizzata da un elevato spread temporale, con conseguente aumento di TTS;
- Meccanismo di valanga Geiger alla base del funzionamento del SiEM: tale processo di funzionamento è caratterizzato da un tempo caratteristico breve e presenta un basso spread temporale.

2.4.4 Linearità e range dinamico

Per linearità si intende la proprietà di un fotorivelatore di fornire in output una risposta che sia linearmente proporzionale al segnale luminoso in ingresso, per tutto il suo range dinamico⁴. Per quanto riguarda il VSiPMT, il range dinamico è funzione del numero di pixel che compongono il SiEM e della focalizzazione degli elettroni accelerati sul SiEM. In particolare, si nota che il numero di fotoelettroni incidenti sul SiEM è ben descritto dalla relazione

$$N_{pe} = N_{tot} \left(1 - e^{-\frac{N_{ph} \cdot PDE}{N_{tot}}} \right) \quad (2.8)$$

laddove, per un SiPM, a causa di limitazioni dovute al fatto che ogni pixel non rivela più di un fotone, si registra una risposta lineare nel caso in cui i fotoni coinvolti siano pochi, ma si tende ad una situazione di saturazione laddove il numero di fotoni incidenti sia uguale al numero di pixel a disposizione del SiPM [2]. La relazione (2.8) descrive bene la risposta anche in un VSiPMT se i fotoelettroni sono correttamente focalizzati sul SiEM. Dal momento che il fotocatodo è di forma circolare e il campo elettrico di focalizzazione ha simmetria assiale, sarà possibile riprodurre una forma presumibilmente circolare sulla superficie del SiEM.

Andando a studiare il focusing dei fotoelettroni incidenti sul VSiPMT, si distinguono tre possibili scenari, mostrati in Figura 2.10:

- 1) Il focusing è eccessivo: il potere di rivelazione del dispositivo è inferiore rispetto a quello del caso ideale. Ciò comporta una diminuzione di dinamica del dispositivo (dal momento che non vengono utilizzate tutti i pixel del SiEM), oltre ad una perdita di informazioni circa il numero di eventi rivelati;
- 2) Caso ottimale di focusing: il cerchio descritto dai pixel interessati coincide con quello inscritto nel SiEM;

⁴Laddove per range dinamico si intende l'intervallo tra il valore massimo ed il valore minimo di una grandezza misurabile.

- 3) Il focusing è scarso: si ha una perdita di efficienza di fotorivelazione, poichè il cerchio descritto dai fotoelettroni risulta maggiore della superficie di rivelazione disponibile dal SiEM e quindi si perderà una parte degli elettroni estratti dal fotocatodo.

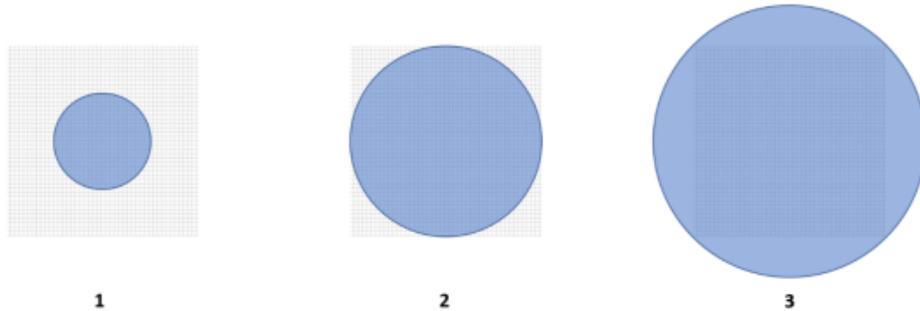


Figura 2.10: *Possibili casi di focusing di fotoelettroni sul SiEM*

In condizioni ottimali, i pixel che contribuiranno effettivamente al processo di rivelazione saranno quelli del cerchio inscritto nella matrice di pixel del SiEM: ciò escluderà ovviamente i pixel agli angoli della suddetta matrice, limitando i pixel capaci di rivelazione all'80% della sua superficie totale. Dal momento che tale problematica è connessa alla forma quadrata del componente in questione, i possibili modi di risoluzione individuati sono due:

- Progettazione di un SiEM di forma circolare;
- Ideazione di un metodo di alimentazione che escluda gli angoli morti, mantenendo così inalterata la forma quadrata del SiEM.

2.4.5 Dark Noise

Trattandosi di uno strumento che basa il suo funzionamento su quelli di un PMT e di un SiPM, è inevitabile che anche il VSiPMT sia caratterizzato da *dark noise*. Sebbene una piccola parte di noise sia dovuta ad elettroni generati termicamente dal fotocatodo, i principali contributi di dark sono dovuti al noise intrinseco del SiEM. Per spiegare questa causa di dark noise, è necessaria l'introduzione del concetto di *cross-talk*. Tale fenomeno è legato alla struttura stessa della matrice di pixel che costituiscono il SiEM: quando un fotoelettrone viene estratto dal fotocatodo ed è assorbito da una delle giunzioni costituenti i pixel del SiEM, esso genererà un breakdown a valanga con creazione di coppie elettrone-lacuna. Alcuni elettroni così generati possono tuttavia ricombinarsi generando un fotone: quest'ultimo può innescare valanghe in un pixel limitrofo, che resterebbe altrimenti spento, ottenendo

così un falso positivo e quindi dark count.

In generale, la possibilità che si abbia cross-talk è limitata ad eventi casualmente generati che coinvolgono più di un fotoelettrone, in condizioni di assenza di luce. La causa principale del cross-talk è quindi da attribuire a valanghe innescate in un pixel che causano a loro volta valanghe nei pixel limitrofi: essa può essere grandemente ridotta adottando uno schema di progettazione del SiEM che preveda delle scanalature tra le giunzioni. Tali scanalature, fungendo da isolante ottico, possono ridurre tale fenomeno di circa due ordini di grandezza.[2]

Capitolo 3

I prototipi da 2 pollici

Nel 2018 la Hamamatsu Photonics, azienda leader nel campo della produzione di fotorivelatori, ha realizzato due prototipi da 2 pollici per il gruppo di ricerca di Napoli: i prototipi ZJ9498 e ZJ9496 (osservabile in Figura 3.1).

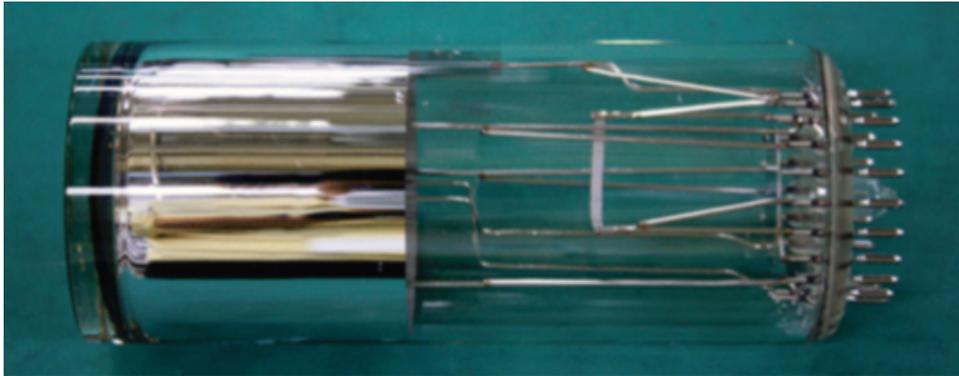


Figura 3.1: Foto del prototipo ZJ9496.

I due prototipi, identici meccanicamente, sono caratterizzati da un fotocatodo bialcalino avente diametro di 46mm e da un anello di focalizzazione in alluminio di altezza 60mm ; l'unica caratteristica che li distingue è il SiEM installato all'interno. Il prototipo ZJ9496 monta infatti un SiEM di superficie $3 \times 3\text{mm}^2$ composto da pixel grandi $25 \times 25\mu\text{m}^2$, mentre all'interno del prototipo ZJ9498 è installato un SiEM di uguale superficie ma composto da pixel di dimensione $50 \times 50\mu\text{m}^2$; conseguenza diretta di ciò sarà un diverso valore di PDE per i due prototipi.

Prototipo	ZJ9496	ZJ9498
Risposta Spettrale (nm)	200-650	200-650
Diametro Fotocatodo (mm)	46	46
Materiale Finestra	Vetro Borosilicato	Vetro Borosilicato
Dimensioni SiEM (mm^2)	3x3	3x3
Dimensioni Pixel (μm^2)	25x25	50x50
Fill Factor	47	74

Tabella 3.1: *Caratteristiche costruttive dei prototipi da 2 pollici.*

Le caratteristiche costruttive dei due prototipi sono descritte in Tabella 3.1, ed in Figura 3.2 è raffigurato uno schema della loro struttura interna. Nel corso di questo lavoro di tesi ci si è concentrati sulla caratterizzazione del prototipo ZJ9496: nello specifico, sono state trattate misure di

- Linearità;
- Dark Rate.

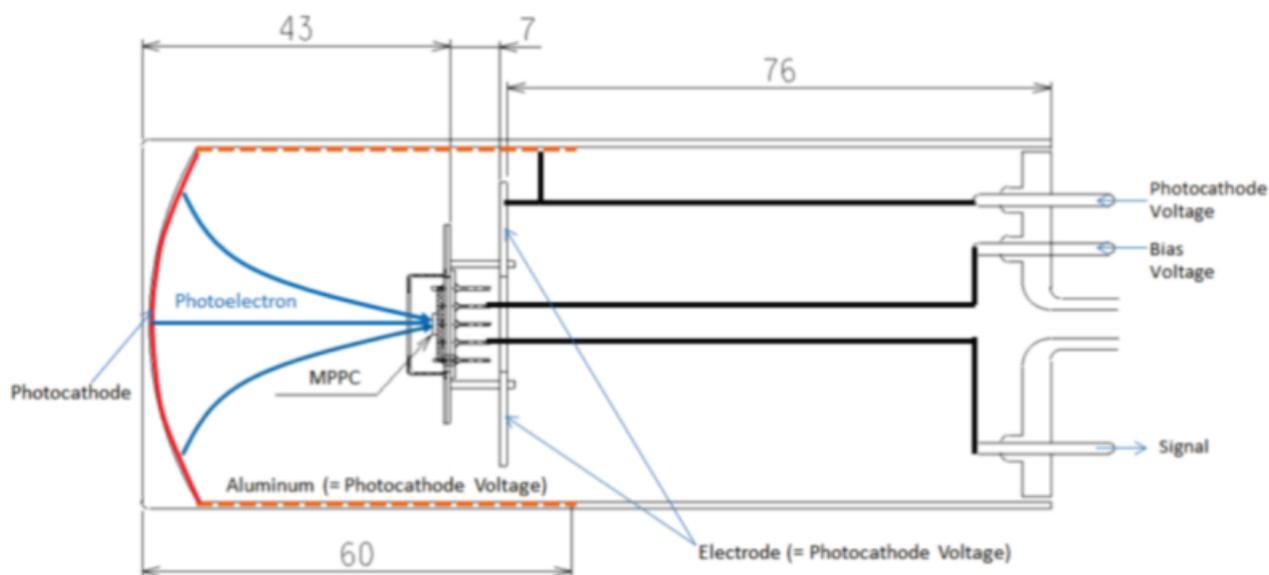


Figura 3.2: *Schema interno dei prototipi ZJ9496 e ZJ9498.*

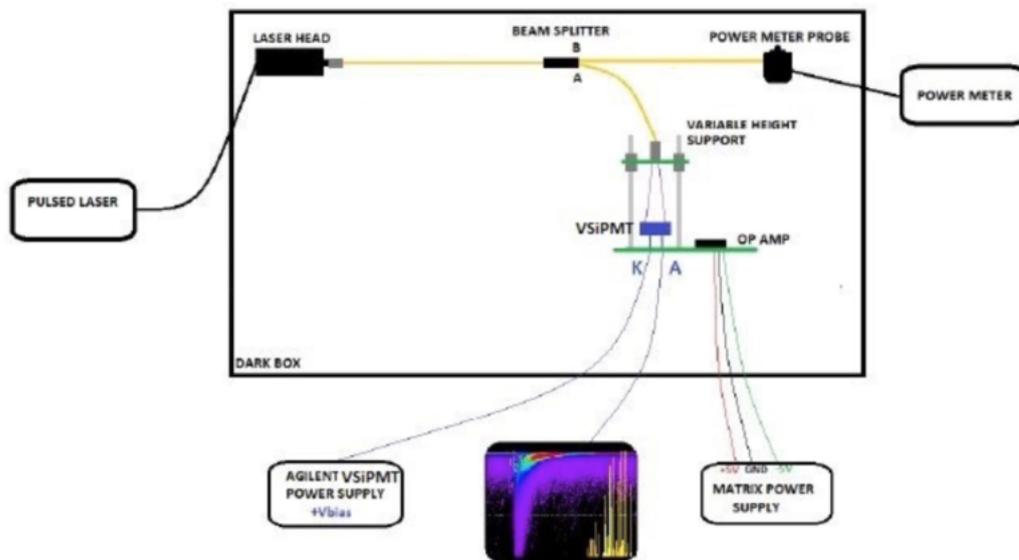


Figura 3.3: Schema dell'apparato strumentale utilizzato per caratterizzare i prototipi.

3.1 Apparato strumentale

L'apparato strumentale utilizzato dal gruppo di Napoli per la caratterizzazione di entrambi i prototipi è descritto schematicamente dalla Figura 3.3. È stato utilizzato un laser impulsato con lunghezza d'onda $\lambda = 406\text{nm}$ e durata d'impulso 47ps . La luce in output al laser viene poi mandata sul VSIPMT per mezzo di due beam splitter a due uscite: una delle uscite dello splitter è collegato ad un power meter in modo tale da rendere sempre possibile la misurazione della potenza ottica del laser mandata sul VSIPMT. Il segnale in output del VSIPMT viene, inoltre, amplificato da un circuito contenente un amplificatore operazionale che lavora in regime invertente, prima di essere mandato in input all'oscilloscopio e venire così misurato. Prima di eseguire le misure oggetto di questa tesi, è stato quindi necessario realizzare il cosiddetto *tuning dell'elettronica di readout*; in particolare, l'obiettivo era di trovare la configurazione più adatta a ottenere misure col minor rumore di fondo possibile. La configurazione migliore ottenuta dal nostro gruppo prevede l'utilizzo di un circuito composto dai seguenti componenti:

- Amplificatore operazionale THS4031, caratterizzato da una banda passante a 100MHz ed utilizzato in configurazione invertente;
- Resistenza in ingresso R_i di 75Ω ;
- Resistenza di feedback R_f di $4.5\text{k}\Omega$;

Il circuito così ottenuto può vantare un fattore di amplificazione $A \sim 60$: in tale configurazione è stato possibile effettuare delle misure di guadagno in un ambiente piuttosto stabile, sebbene fosse comunque presente una componente di rumore di fondo dovuta ad oscillazioni dell'amplificatore operazionale. Abbiamo risolto tale problema introducendo una capacità di feedback C_f di $4.7pF$: quest'aggiunta ha permesso di ottenere un segnale più pulito. Tuttavia, l'utilizzo della capacità in questione ha introdotto un tempo caratteristico RC sul circuito causando un aumento dei tempi di discesa del segnale: ciò si traduce in un leggero rallentamento dell'amplificatore.

3.2 PDE

La determinazione della PDE riveste un ruolo di fondamentale importanza per il funzionamento di un fotorivelatore. Come accennato nel corso di questo capitolo, i due prototipi sono caratterizzati da una PDE diversa dal momento che i loro Fill Factor sono differenti; in particolare, il prototipo ZJ9496 risulta essere in possesso di un Fill Factor del 47% ed una Quantum Efficiency del 28%, da cui si ricava un valore massimo per la PDE pari a $QE \cdot FF = 0.13$. La PDE del prototipo è stata ricavata misurando il numero di fotoelettroni letti in funzione della tensione di alimentazione fornita al fotocatodo. Sperimentalmente, la PDE di un VSiPMT è definita dalla relazione:

$$PDE_{VSiPMT} = \frac{N_{pe}}{N_{ph}}. \quad (3.1)$$

A partire da questa relazione, si sono ricavati i valori di PDE del prototipo al variare dell'HV. L'andamento ottenuto è mostrato in Figura 3.4: all'interno del suddetto grafico è possibile identificare una regione lineare che termina al raggiungimento della condizione $\epsilon_{trigger} = 1$, cui corrisponde la zona di plateau. In tale zona, la PDE è $\sim 13\%$, come previsto.

3.3 Dark Rate

Il primo tipo di misura effettuata in questo lavoro di tesi è quella di *dark rate*, definito come frequenza di rivelazione di segnali non riconducibili a segnali luminosi incidenti sul VSiPMT. Le principali cause del dark rate sono legate ai fenomeni di:

- emissione termica di fotoelettroni generati dal fotocatodo tramite effetto termoionico;
- innesco di valanghe Geiger generate da elettroni termici del SiEM;
- cross-talk ottico causato da inneschi di valanghe Geiger tra pixel limitrofi.

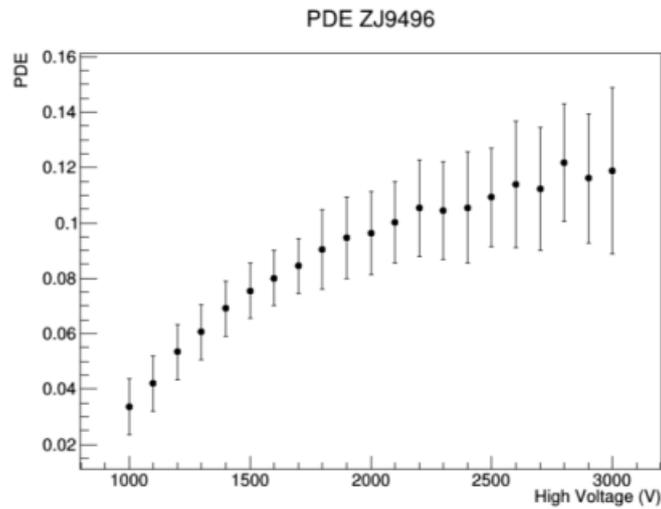


Figura 3.4: *Andamento della PDE in funzione della tensione applicata al fotocatodo per il prototipo ZJ9496: si nota chiaramente il plateau a partire dai 2000V.*

Al fine di caratterizzare questo fenomeno, si è proceduto alla determinazione dell'andamento del dark noise in funzione della tensione di bias delle giunzioni: inoltre, per meglio distinguere i contributi di dark dovuti unicamente al SiEM da quelli concernenti il fotocatodo, sono stati effettuati due tipi di misurazioni. La prima misura è stata effettuata a fotocatodo spento (0 V), in modo da poter osservare il dark prodotto dal solo SiEM, laddove per la seconda si è alimentato il fotocatodo con una tensione di 2200 V. Così facendo, è stato possibile valutare il dark rate dello strumento nella sua interezza. Le misure effettuate in ciascuna configurazione sono state reiterate per segnali corrispondenti ad una, due e tre celle accese rispettivamente; i risultati prodotti dall'analisi delle misure sono mostrati in Figura 3.5. Sono stati tuttavia omessi i risultati riguardanti il calcolo del dark con una sola cella a fotocatodo spento: in corrispondenza di tale condizione, infatti, il guadagno dello strumento non è ancora sufficientemente elevato da permettere una distinzione netta tra il segnale relativo ad una singola cella interessata ed il rumore elettronico ambientale.

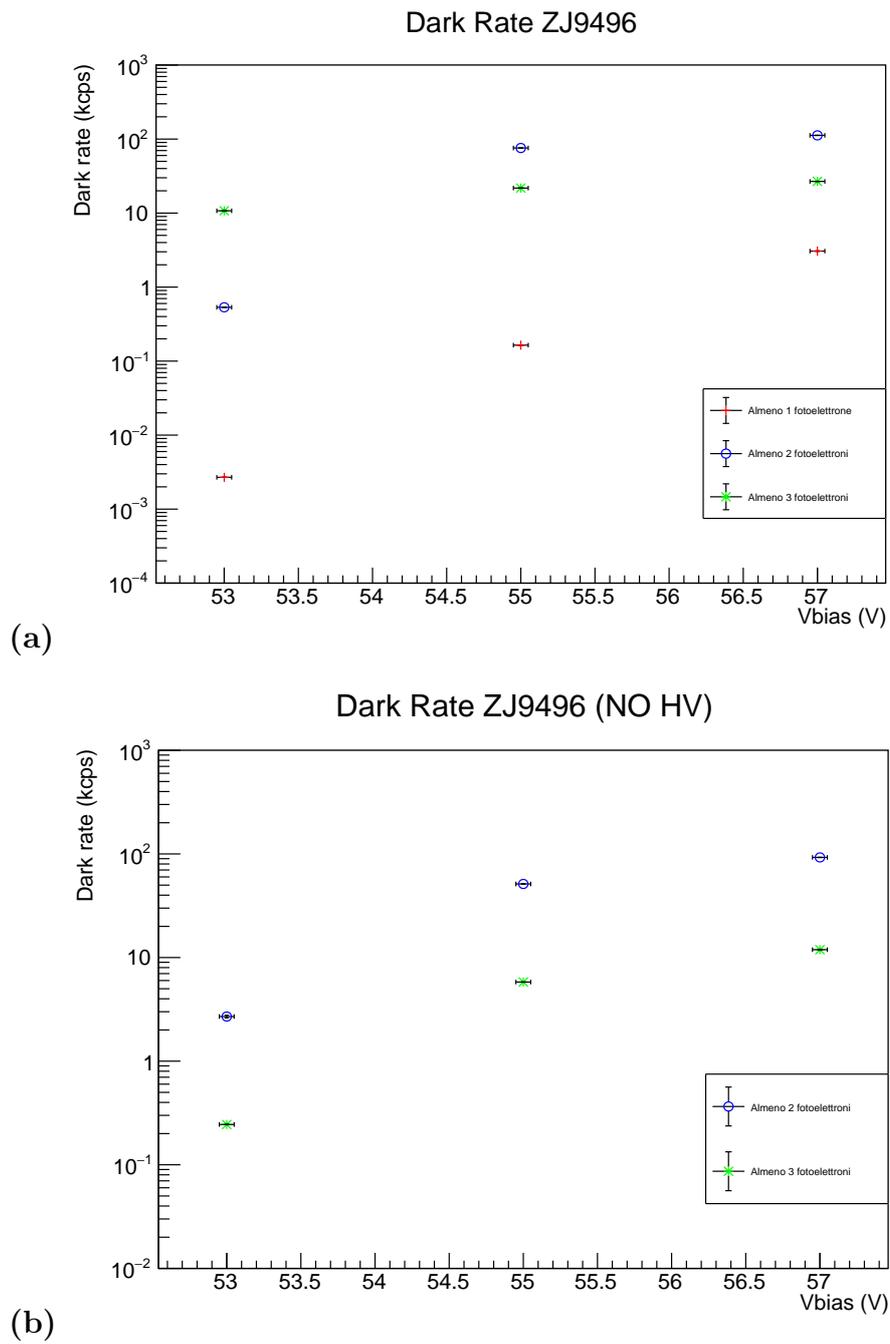


Figura 3.5: *Dark Rate* del prototipo ZJ9496 con fotocathodo acceso (a) e spento (b).

L'andamento teorizzato per il dark è di tipo monotono[4], e i dati analizzati in questo lavoro di tesi confermano questo comportamento per il dark rate del ZJ9496. Si può notare tuttavia che gli andamenti per bassi valori di V_{bias} con fotocatodo acceso sono sì monotoni, ma con pendenze diverse. Ciò può essere dovuto ai fattori luminosi ambientali, molto influenti per questo tipo di misure; queste, infatti, sono state prese nel corso di un'intera giornata e risentono quindi dell'escursione termica e della diversa luce ambientale. Va tenuto inoltre conto del fatto che, per bassi valori di V_{bias} , vi sia una difficoltà di distinzione da parte dell'oscilloscopio tra dark effettivo dello strumento e noise prodotto dall'elettronica di readout. La difficoltà riscontrata nel riconoscimento dei trigger dovuti ad effettivi dark count si traduce nel fatto che, anche nelle misure a fotocatodo acceso, vi siano alcuni conteggi mancati. La causa di ciò è da ricercarsi nei limiti dell'oscilloscopio: lo strumento non è stato in grado di distinguere tra trigger dovuti a dark e trigger dovuti a noise. Conseguenza di quanto detto è che le misure che tengono conto di almeno 1 fotoelettrone, effettuate a fotocatodo acceso, sono sì caratterizzate dall'andamento monotono teorizzato per il dark all'aumentare della V_{bias} , ma gli eventi di dark rate sono presenti in numero molto minore del previsto. Tuttavia, accertata la dipendenza dell'apparato di misura dalla temperatura, è possibile ipotizzare con ragionevole sicurezza che eventuali misure di dark, condotte in camera climatica sullo stesso prototipo, mostrerebbero un dark rate dello strumento svariati ordini di grandezza maggiore di quello ottenuto in sede di misura, per quanto concerne le misurazioni a singola cella con fotocatodo acceso.

3.4 Range dinamico

Il secondo tipo di misura effettuata in laboratorio riguarda la linearità del VSiPMT: come già accennato, tale proprietà permette di individuare una dipendenza di tipo lineare tra il numero di fotoelettroni in ingresso e in uscita al rivelatore. In generale, il range dinamico di quest'oggetto è descritto dalla relazione

$$N_{pe} = N_{tot} \left(1 - e^{-\frac{N_{ph} \cdot PDE}{N_{tot}}} \right). \quad (3.2)$$

Per un basso numero di fotoni in ingresso al VSiPMT, l'andamento può essere approssimato con uno lineare: al fine di verificare la bontà di tale approssimazione per il prototipo ZJ9496, è stato realizzato il circuito mostrato in Figura 3.6. Nel dettaglio, esso si compone dei seguenti elementi:

- Due laser impulsati Hamamatsu M10306-04 gemelli, ciascuno caratterizzato da una lunghezza d'onda $\lambda = 407\text{nm}$;

- Generatore di funzioni d'onda Agilent 81110A: mediante l'invio di un segnale NIM⁵ ad entrambi i laser, tale strumento agisce di fatto da impulsatore triggerandoli simultaneamente.
- Bundle di fibre ottiche identiche, ciascuna delle quali collegata parallelamente in output al singolo laser e convergente sul fotocatodo.

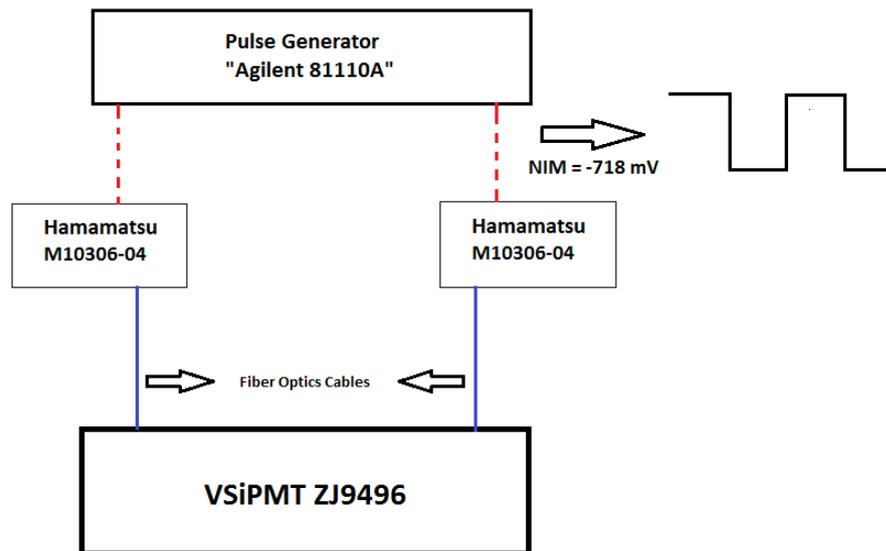


Figura 3.6: *Apparato strumentale utilizzato per misurare la risposta del prototipo ZJ9496.*

Una volta configurato il circuito, sarà possibile mandare i laser sul fotocatodo al fine di misurare il numero di pixel accesi sul SiEM in funzione del numero di fotoelettroni costituenti il fascio laser incidente sul VSIPMT. Tuttavia, prima di procedere, è indispensabile provvedere alla misurazione della potenza ottica del laser in output: per farlo, è stato utilizzato un power meter Ophir Nova II 1Z01550. Tale strumento è dotato di un'apposita sonda permette di determinare la potenza ottica del laser in input al VSIPMT. La sonda va poi rimossa per consentire le misure. Scopo dell'apparato sopra descritto è la determinazione della linearità della

⁵Segnale a gradino di ampiezza pari a -718mV.

risposta del prototipo ZJ9496 mediante misure ripetute degli andamenti dei picchi⁶ in funzione della potenza ottica in ingresso al dispositivo. Quest'ultima è necessaria alla definizione di un'altra grandezza in gioco: il numero di fotoni in ingresso al VSiPMT. Tale quantità è legata alla sopracitata potenza ottica dalla relazione

$$n = \frac{P_{tot} \cdot \lambda}{hc \cdot f} \quad (3.3)$$

dove

- P_{tot} è la potenza complessiva del laser in input al VSiPMT;
- λ è la lunghezza d'onda caratteristica dei laser utilizzati;
- hc è una costante pari a $\sim 197\text{MeVfm}$;
- f è la frequenza fornita dal generatore di funzione d'onda.

Le misure in questione sono state condotte a $V_{bias}=53\text{V}$ ed $HV=2.2\text{kV}$ mantenute costanti per tutta la durata dell'esperimento. Dal momento che il VSiPMT è caratterizzato da un alto guadagno, un valore basso di V_{bias} abbasserà il segnale corrispondente al singolo pixel, consentendo così di osservare il maggior numero possibile di pixel accesi per la configurazione esaminata. Una limitazione al processo di misura è tuttavia data dal range dinamico dell'elettronica di readout, ovvero dal segnale massimo accettato dall'amplificatore operativo del circuito di readout prima di raggiungere la saturazione. I risultati ottenuti a seguito dell'analisi dei dati sperimentali sono riportati in Figura 3.7.

⁶Corrispondente al numero di pixel accesi sul SiEM.

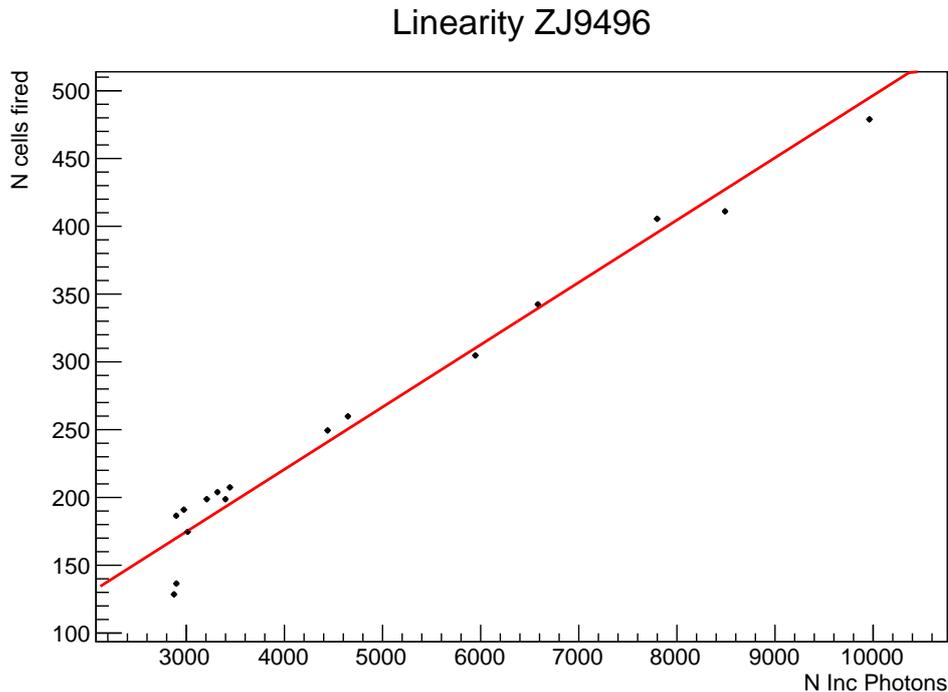


Figura 3.7: *Misura di linearità per il prototipo ZJ9496.*

Come è possibile notare dalla figura, il VSiPMT risulta caratterizzato da una soddisfacente risposta lineare, in accordo con le previsioni teoriche illustrate a inizio paragrafo. Durante la presa dati, tuttavia, si è notata la saturazione dell'amplificatore operazionale del circuito di readout, avvenuta per misure nelle quali il numero di fotoni incidenti sul VSiPMT era $> 2.4 \times 10^6$. Ciò ha di fatto posto un limite al numero di pixel accesi osservabili nel corso della presa dati: basti pensare che a fronte dei 14400 pixel costituenti il SiEM, il numero di pixel accesi osservati non superava il migliaio. La causa più probabile di quanto accaduto è da attribuirsi al fatto che vi sia un contributo di amplificazione non trascurabile da parte dell'operazionale (pari circa ad un fattore 60). Pertanto, il passo successivo alle misure qui riportate prevede la modifica del circuito di readout tramite l'utilizzo di un amplificatore operazionale che sia caratterizzato da un più ampio range dinamico onde evitare una prematura saturazione; contemporaneamente, andrà lievemente diminuito il guadagno del VSiPMT al fine di permettere l'accensione simultanea di un maggior numero di pixel.

Conclusioni

In questo lavoro di tesi è stata innanzitutto ribadita l'importanza degli strumenti di fotorivelazione: tali oggetti sono sempre più presenti nelle nostre vite, sia in ambito di ricerca che nell'uso quotidiano. Si è fatta quindi una panoramica sull'attuale stato dell'arte in materia di fotorivelatori, elencando le principali famiglie di strumenti (PMT, SiPM) e descrivendone brevemente pro e contro di utilizzo. Nell'ultimo decennio, la ricerca sui fotomoltiplicatori ha fatto passi da gigante verso la realizzazione di un dispositivo che coniugasse i benefici di ambedue le tipologie di fotorivelatori, smussandone al contempo le problematiche intrinseche. In questo panorama si inserisce il VSiPMT, brevetto ad opera del prof. Giancarlo Barbarino⁷. Le misure oggetto di questo lavoro di tesi forniscono un'ulteriore conferma della bontà di questo progetto, dando prova concreta delle potenzialità dei nuovi prototipi da 2 pollici. Il VSiPMT si propone quindi come capostipite di una nuova generazione di fotorivelatori per la ricerca scientifica, grazie alle sue caratteristiche:

- PDE quasi pari a quella di un PMT ma senza l'esigenza di una stabilizzazione in alta tensione nel caso in cui il dispositivo lavori in regione di plateau;
- guadagno elevato e indipendente dall'alta tensione: è richiesta unicamente una stabilizzazione per la tensione d'alimentazione del SiEM, pari a pochi volt;
- la bassa tensione di alimentazione del SiEM si traduce anche in una bassa potenza dissipata confrontata con il caso del PMT;
- capacità di risoluzione del segnale impensabile per qualsiasi altra tipologia di rivelatore che sfrutti il vuoto, cosa che permette un'ottima capacità di fotoconteggio;
- risposta temporale ottima, con TTS al singolo fotoelettrone di ~ 2.5 ns, dovuto unicamente allo spostamento dei fotoelettroni dal fotocatodo al SiEM ed indipendenti dal SiEM stesso [6] ;

⁷Università degli Studi di Napoli Federico II.

- struttura robusta e di facile costruzione.

Bibliografia

- [1] Leo W.R., *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1987
- [2] Barbarino G. et al., *Silicon Photo Multipliers Detectors Operating in Geiger Regime: an Unlimited Device for Future Applications*, Università degli studi di Napoli Federico II e Istituto di Fisica Nucleare, Sezione di Napoli, 2008ca;
- [3] Barbarino G. et al., *A new generation photodetector for astroparticle physics: the VSiPMT*, Astroparticle Physics, 2014;
- [4] 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;
- [5] Barbarino G. et al., *Another step towards photodetector innovation: the first 1-inch industrial VSiPMT*, Astroparticle Physics 101, 2018;
- [6] Lavitola L., *Misure di timing del nuovo prototipo di fotorivelatore VSiPMT*, Tesi di Laurea Triennale, Università degli Studi di Napoli Federico II, 2019.