

Progetto ASI-VSiPMT (Vacuum Silicon PhotoMultiplier)

**Sviluppo di innovativi fotorivelatori
di singoli fotoni ad alto guadagno**

Relazione finale contratto

Codice Unico di Progetto (CUP)F62115000310005

G.C.Barbarino

F.Barbato

L.Camapjola

G.Derosa

R.Deasmundis

F.Di Capua

C.Mollo

D.Vivolo

Parte 1°

**Primo prototipo per validazione
dell'idea**

TRL 1-2-3-4

Progetto ASI-VSiPMT (Vacuum Silicon PhotoMultiplier)

Premessa e stato dell'arte

I rivelatori di fotoni sono strumenti indispensabili in molti campi della fisica fondamentale, in particolare nel campo della fisica delle astroparticelle, nella fisica nucleare e delle particelle elementari, nella diagnostica medica (vedi ad esempio la PET), nell'analisi in-vitro per il controllo medico e la diagnostica (per esempio in analisi immunologiche basate sull'utilizzo di isotopi radioattivi, RIA, o di enzimi, EIA, basate sulla luminescenza, fluorescenza o chemiluminescenza), nella biomedicina, nelle applicazioni industriali, in apparecchiature per rilievi ambientali (come ad esempio misuratori di polveri utilizzati per il controllo della qualità dell'aria), e misuratori di radiazione utilizzati in impianti nucleari.

Nella fisica astroparticellare i fotomoltiplicatori costituiscono uno degli elementi centrali della rivelazione di processi fisici fondamentali. Gli esperimenti attuali e futuri, sia a terra che nello spazio, studieranno fenomeni astrofisici spesso altamente energetici come i gamma ray burst, l'emissione di radiazione da nuclei galattici attivi e da resti supernova (Agile, Fermi per esempio), nonché anomalie ed eccessi di particelle cariche nei raggi cosmici e fenomeni estremamente rari come la ricerca di materia oscura (AMS, Pamela, EUSO). In tutti questi fenomeni, o direttamente o indirettamente l'elemento attivo di rivelazione è il fotosensore, che converte i fotoni in segnali elettrici. Questo tipo di rivelatore gioca un ruolo importante anche nella astronomia X nello spazio.

Ne consegue che spingere la ricerca tecnologica sui rivelatori di luce verso maggiori prestazioni significa migliorare significativamente le sensibilità di una vasta gamma di esperimenti. Il primo fotomoltiplicatore, rivelatore di luce con amplificazione interna, è stato realizzato dal gruppo RCA nel 1934 seguendo un brevetto di Joseph Slepian. In quella fabbrica di New York, Harley Iams e Bernard Salzberg per primi integrarono in un involucro sotto vuoto un fotocatodo che trasforma, per effetto fotoelettrico, i fotoni della luce in corrente di elettroni amplificata fino a 10^6 per emissione secondaria in una successione di elettrodi metallici (dinodi).

La possibilità di realizzare fotocatodi sensibili dall'ultravioletto all'infrarosso rendono questo fotorivelatore particolarmente versatile in un'ampia gamma di applicazioni. Nel corso di questi decenni il dispositivo ha subito molteplici miglioramenti tecnologici senza però riuscire ad innovare il principio base di funzionamento che ha sempre manifestato chiari limiti di funzionamento come:

- le fluttuazioni statistiche nel primo dinodo della moltiplicazione "serie" dei fotoelettroni rendono difficile il conteggio dei singoli fotoni;
- linearità e guadagno sono parametri non indipendenti: la linearità diminuisce all'aumentare del guadagno;
- il partitore di tensione comporta rischi di rotture e dissipazione di potenza. Abbattere il consumo di potenza è una figura di merito in applicazioni in ambienti ostili come lo spazio.

- la struttura meccanica dei dinodi è complessa, costosa e può essere soggetta a rotture per vibrazioni e shock;
- i classici fotomoltiplicatori sono sensibili ai campi magnetici.

L'origine delle maggiori limitazioni vanno ricercate nel processo di amplificazione seriale basato sull'emissione secondaria da parte della catena di dinodi. Come si vede dalla fig.1,a,b la criticità è concentrata nel primo stadio della catena di dinodi: la bassa statistica dei fotoelettroni generati sul primo dinodo (poche unità, 4-6 che dipendono dalla tensione che sul primo dinodo non supera i 200 V. fig.1a) impediscono il conteggio dei fotoni e peggiorano la risposta temporale. La fig.1b mostra uno spettro di carica raccolta in uscita da fotomoltiplicatore. La scarsa risoluzione nella rivelazione dei singoli fotoni impedisce il loro conteggio nello spettro somma finale. Inoltre l'amplificazione "serie" comporta la presenza di un partitore resistivo che dissipa potenza.

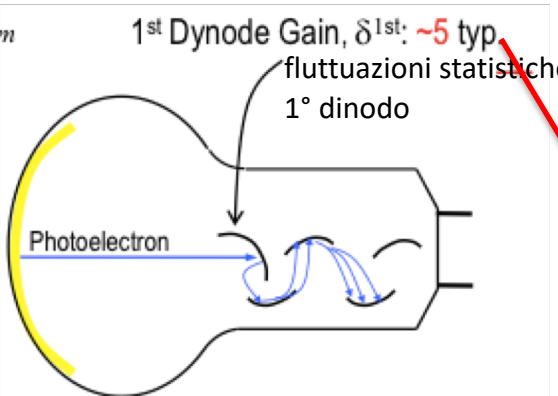


fig.1a

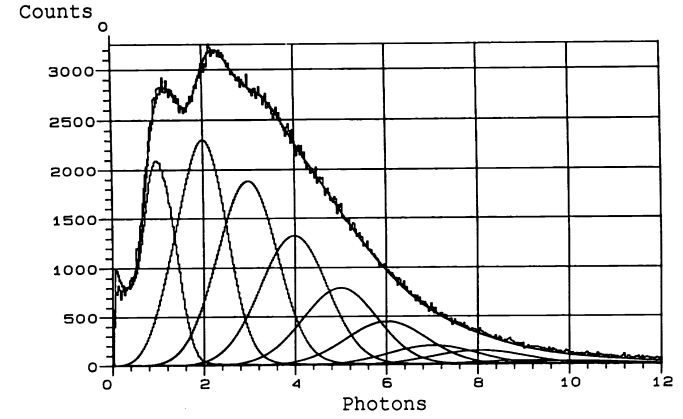
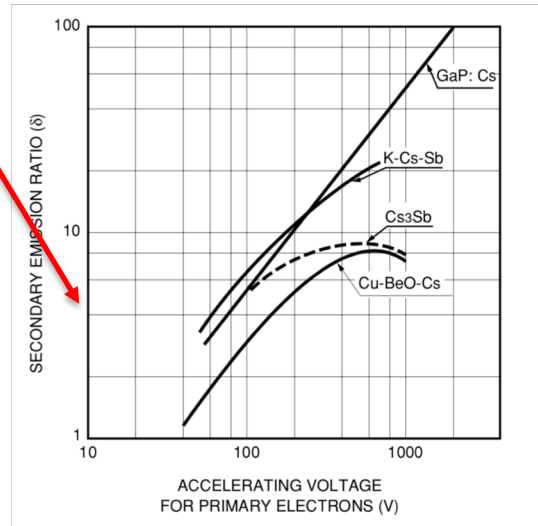


fig.1b

Moltiplicazione serie dei fotoelettroni:

δ =guadagno di singolo stadio

$$G = \delta^n = (kV_d)^n$$

$$\text{Energy resolution} \propto 1/\sqrt{\delta^{1st}}$$

Per superare queste limitazioni, alla fine degli anni '90, diversi gruppi nel mondo iniziarono a proporre nuove idee di fotomoltiplicatori basati su principi di funzionamento alternativi. Tentativi interessanti ma che risultarono inefficaci. Fu nel 2008 che, chi scrive, propose una nuova idea di fotomoltiplicatore che sembra avere tutti i presupposti innovativi necessari per superare le limitazioni dei dispositivi fino allora proposti. L'idea fu pubblicata sulla rivista: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 594 (2008) 326–331 e brevettata (G.Barbarino-VSiPMT photodetector, patent: PCT/IT2014/000174).

Questa idea rivoluziona tutta la parte amplificatrice del fotorivelatore: non più basata sulla emissione secondaria di successivi elettrodi metallici in serie (dinodi), ma sostituita con un unico stadio di una matrice di molte giunzioni in parallelo p-n in regime geiger (G-APD/SiPM), quindi senza fluttuazioni statistiche, opportunamente progettata per moltiplicare la corrente di fotoelettroni fino ad un fattore 10^6 . Questa nuova configurazione migliora in modo significativo la sensibilità del dispositivo consentendo il conteggio di singoli fotoni con una risoluzione senza precedenti. Inoltre, con un tale stadio di amplificazione il consumo di potenza e' pressochè nullo.

Studio di fattibilità del nuovo fotorivelatore

L'ultimo decennio ha visto uno sviluppo significativo delle giunzioni p-n in regime geiger (G-APD/SiPM) nel cui unico stadio si sviluppa un alto campo elettrico capace di generare una moltiplicazione di elettroni dell'ordine di 10^6 . Una matrice di giunzioni è composta da un grande numero di micro-giunzioni geiger (celle) ($1000/\text{mm}^2$), ciascuno di 20-30 μm^2 , sommate elettricamente su una comune resistenza di uscita (fig.2). La risposta è proporzionale al numero delle micro-giunzioni accese e quindi al numero dei fotoni della radiazione incidente.

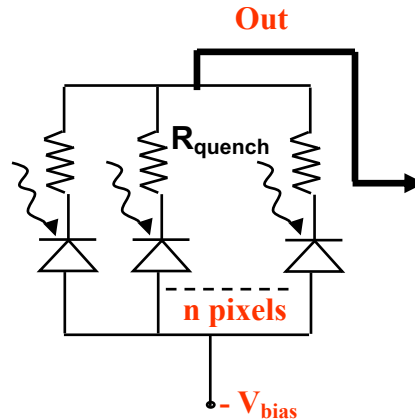
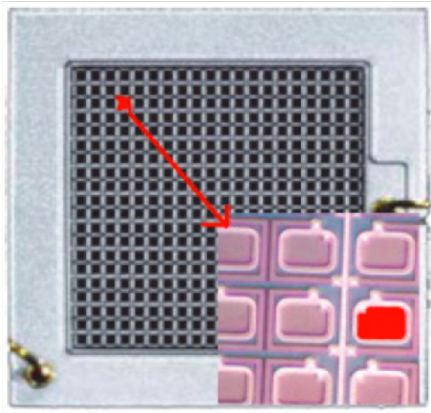


fig.2: Una matrice di micro-giunzioni p-n geiger (celle) (vista frontale). Il fill factor è definito come il rapporto della superficie totale delle microgiunzioni (area attiva del rivelatore) rispetto all'area totale

Tuttavia, il costo del silicio e la corrente termica limitano fortemente le dimensioni, come rivelatori di fotoni, a qualche mm^2 . Questa piccola superficie sensibile è in molte applicazioni, specialmente nella Fisica Astroparticellare, fortemente limitante.

Va ideato quindi un nuovo fotorivelatore che accoppi le brillanti prestazioni delle giunzioni a valanga con una più ampia superficie sensibile.

Dunque, l'idea innovativa è quella di realizzare un fotomoltiplicatore in cui i fotoni sono convertiti da un fotocatodo in fotoelettroni e focalizzati su una giunzione p-n valanga geiger (G-APD/SiPM). La giunzione funziona come un moltiplicatore di elettroni (SiEM: Silicon Electron Multiplier) a singolo stadio geiger "digitale" con guadagni dell'ordine di 10^6 , equivalenti a quelli ottenibili con la catena di dinodi nel classico fotomoltiplicatore. Tale singolo stadio geiger digitale non ha fluttuazioni statistiche e quindi i singoli fotoni vengono rivelati e conteggiati separatamente.

Nel dispositivo in questione (fig.3), i fotoelettroni uscenti dal fotocatodo con energie dell'ordine dell'eV (Fig.5) sono accelerati da un campo elettrico fra fotocatodo e SiEM da una tensione tipica di 2-3 KV. L'energia di 2-3 keV dei fotoelettroni deve consentire il trasporto e la loro penetrazione all'interno della giunzione per generare la moltiplicazione geiger. Il dispositivo ideato, il VSIPMT (Vacuum Silicon PhotoMultiplier) permette di superare i limiti intrinseci del classico fotomoltiplicatore a dinodi che sono elencati a pag.3,4.

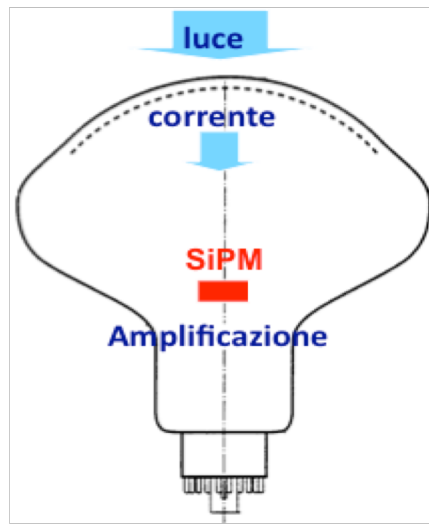


fig.3: Struttura di un VSIPMT
(Vacuum Silicon PhotoMultiplier)

SiPM → SiEM (giunzione per elettroni)

IL moltiplicatore di fotoelettroni SiEM

Un amplificatore di fotoelettroni a singolo stadio basato su una giunzione p-n geiger per essere efficiente deve essere opportunamente progettato. In particolare sono tre le condizioni essenziali affinché la matrice Geiger possa operare come moltiplicatore di fotoelettroni (fig.4a):

- lo strato di passivazione superficiale SiO_2 (fig.4a) deve essere il più sottile possibile: i fotoelettroni accelerati dal campo elettrico devono avere l'energia sufficiente per penetrare nella parte attiva della giunzione.
- la stratigrafia della giunzione deve essere p su n: saranno così gli elettroni nel percorso verso il polo positivo a innescare la valanga geiger attraversando la regione di svuotamento ad alto campo elettrico. Se la giunzione fosse invece n su p sarebbero le lacune ad innescare la valanghe. Questa soluzione ha una efficienza più bassa rispetto alla precedente.
- i fotoelettroni prodotti dal fotocatodo devono essere focalizzati su uno spot circolare iscritto nella superficie del SiEM. Nelle condizioni di fig.4b l'efficienza di focalizzazione è massima, cioè $\epsilon_{\text{focusing}} = 1$ e garantisce anche una dinamica ottima del dispositivo.

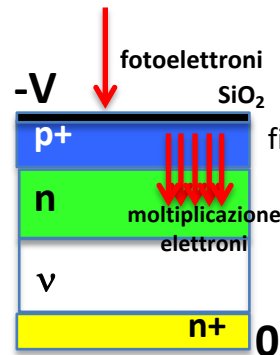


fig.4a : struttura della micro-giunzione all'interno della matrice p-n del SiEM

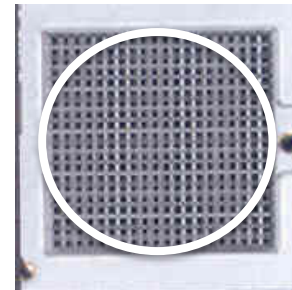
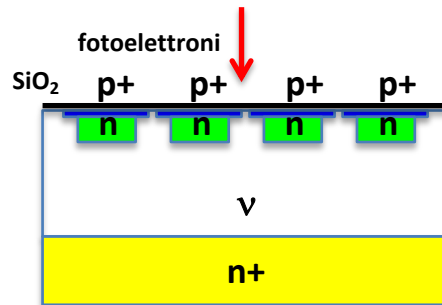


fig.4b: spot circolare iscritto nel SiEM dei fotoelettroni focalizzati dal campo elettrico. Caso di focalizzazione ottimale.

Simulazione del moltiplicatore di fotoelettroni (SiEM)

Per stabilire la corretta relazione fra lo spessore di passivazione di SiO₂ e la tensione di alimentazione per il trasporto dei fotoelettroni sul SiEM sono state fatte le simulazioni utilizzando il software Geant4 a basse energie. La fig.5 mostra che l'energia media dei fotoelettroni in uscita dal fotocatodo che è ≈ 1eV. L'energia acquistata dai fotoelettroni quando è applicata una tensione di qualche KV fra fotocatodo e SiEM è di conseguenza qualche KeV.

In fig.6a,b è mostrato rispettivamente il range e l'energia rilasciata nel silicio per uno spessore dello strato di passivazione di 100 nm. Per una tensione di 2-3 KV e quindi una energia di 2-3 KeV dei fotoelettroni il numero delle coppie prodotte sono ≈ 500 (fig.6b). Anche tenendo conto degli effetti di ricombinazione sono sufficienti per innescare con efficienza 1 la valanga geiger.

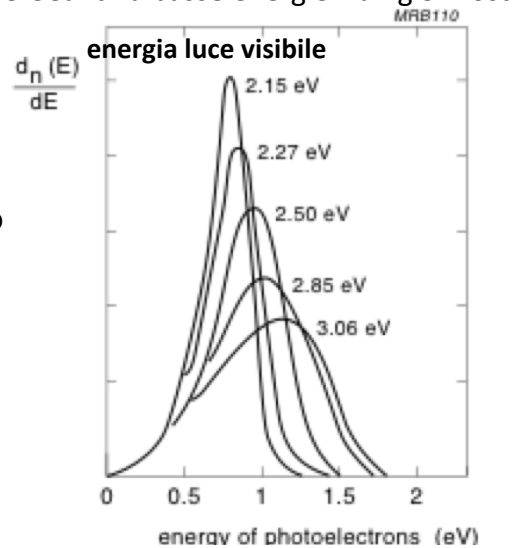
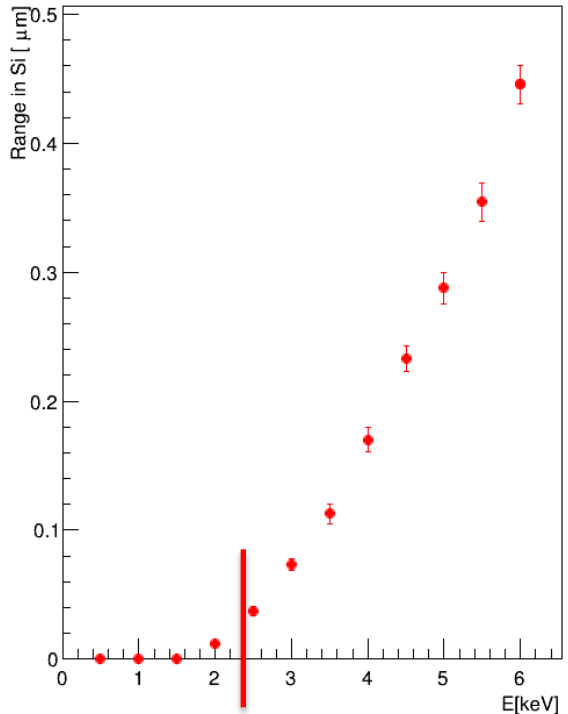
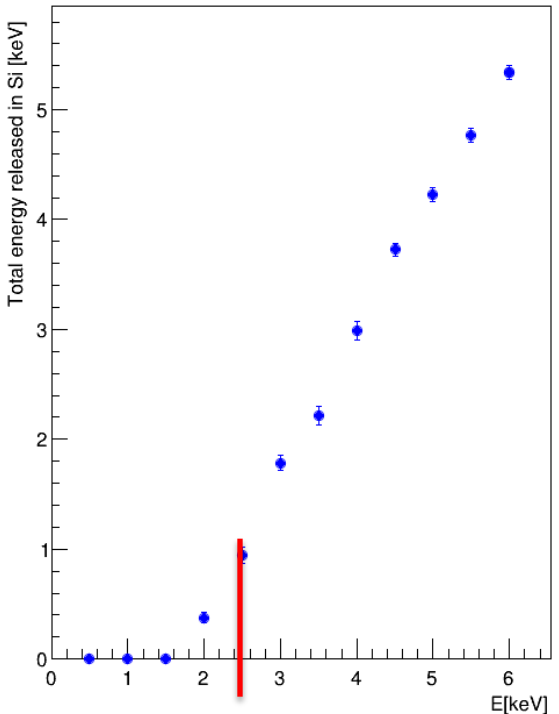


fig.5: energia dei fotoelettroni in uscita dal fotocatodo (ascisse) in funzione dello spettro dell'energia incidente della luce visibile (da 2,15 eV a 3,06 eV)



a



b

fig.6 a,b: range e energia rilasciata nel silicio dai fotoelettroni in funzione della loro energia ottenuta dalla tensione applicata tra fotocatodo e SiEM per uno spessore di silicio di 100nm.

Ovviamente più lo strato di passivazione si riduce e più è possibile ridurre la tensione fra fotocatodo e SiEM, con ovvi vantaggi tecnologici dal punto di vista degli isolamenti. Nella fig.7 lo strato di passivazione è 50nm. A parità di tensione applicata fra fotocatodo e SiEM, risulta evidente la maggior penetrazione dei fotoelettroni all'interno del silicio rispetto al caso precedente e quindi il maggior numero di coppie elettrone lacuna prodotte.

Infatti con una tensione di 2-3 KV si possono ottenere circa 1000 coppie elettrone-lacuna largamente sufficienti ad assicurare la piena efficienza di innesco della valanga geiger. Oppure, da un differente punto di vista, le 500 coppie dell'esempio precedente possono essere prodotte con una tensione più bassa intorno a 2KV.

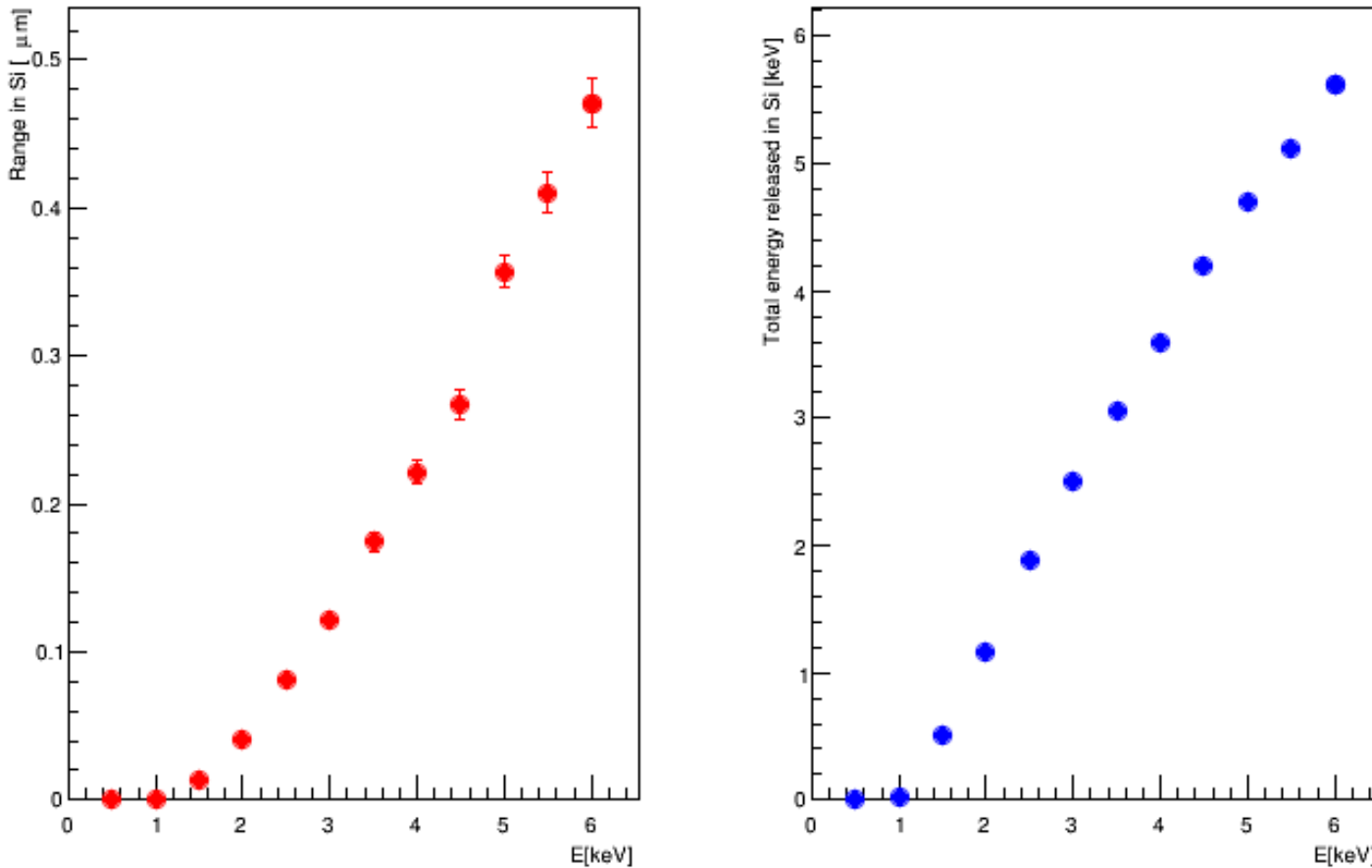
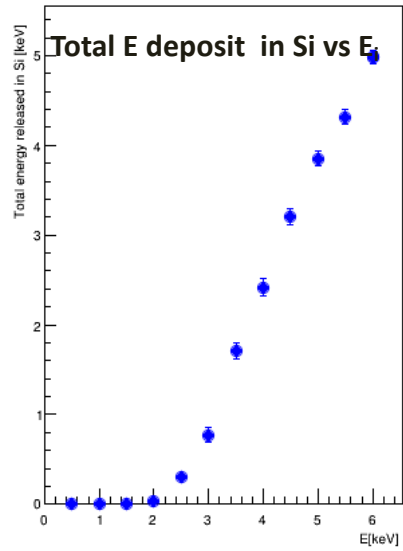
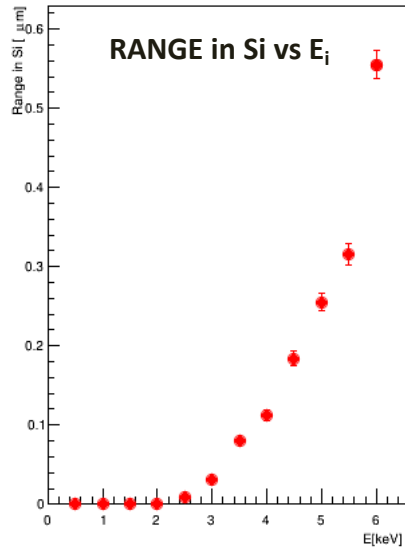


fig.7: range e energia rilasciata nel silicio dai fotoelettroni in funzione dell'energia ottenuta dalla tensione applicata tra fotocatodo e SiEM per uno spessore di silicio di 50 nm.

Nella fig.8 sono mostrati altri grafici che mostrano il range e la perdita di energia dei fotoelettroni per altri vari spessori di passivazione SiO₂. Come già visto la riduzione dello spessore di passivazione comporta una riduzione dell'alta tensione fra fotocatodo e SiEM. Una eccessiva riduzione dell'alta tensione comporta però un peggioramento delle caratteristiche temporali del dispositivo dovuto ad un maggiore spread temporale fra le traiettorie dei fotoelettroni (fig.9). L'alta tensione ottimale è un compromesso fra queste due esigenze.

150 nm passivation layer



100 nm passivation layer

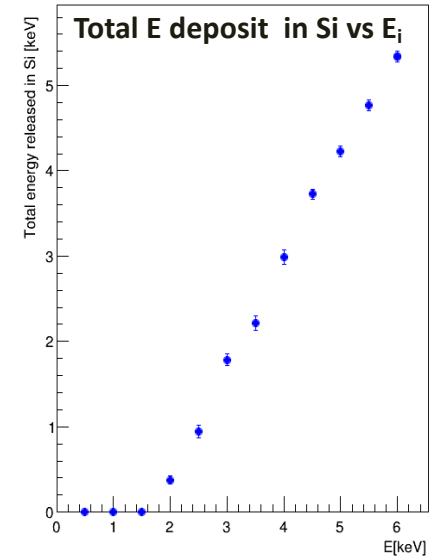
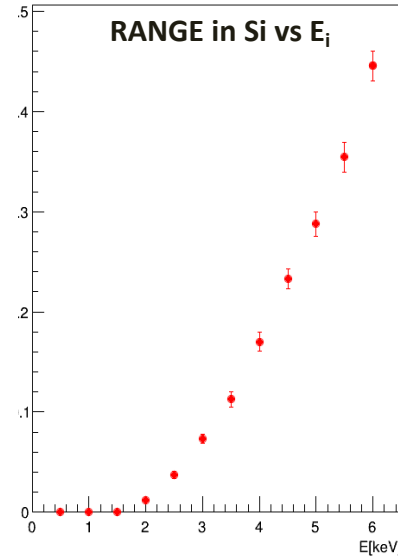
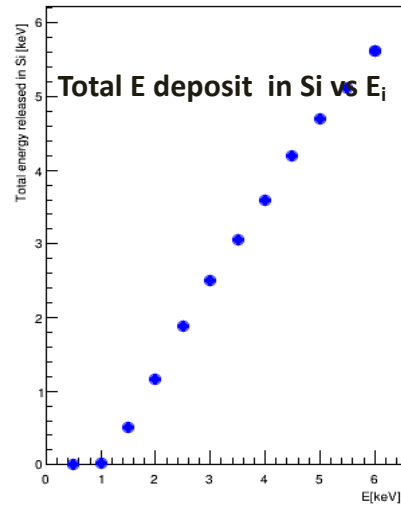
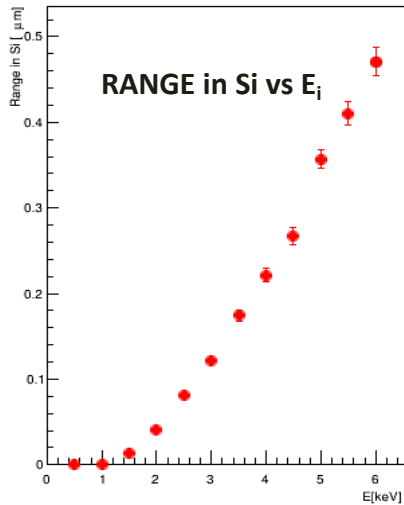


fig.8

50 nm passivation layer



15 nm passivation layer

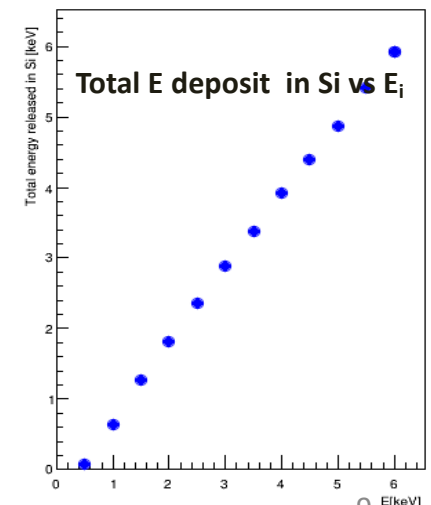
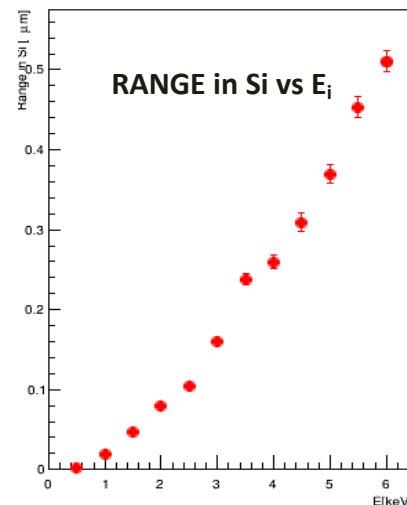
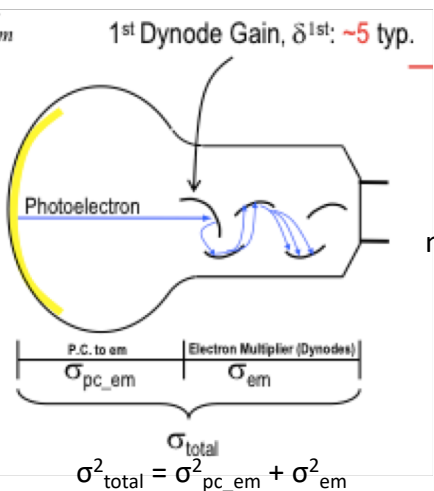


fig.8: range ed energia depositata nel SiEM in funzione dell'alta tensione fotocatodo e SiEM e dello spessore di passivazione SiO₂

La risposta temporale

Per quanto riguarda la risposta temporale la fig.9 mostra il funzionamento e del nuovo dispositivo VSIPMT rispetto al classico fotomoltiplicatore. In quest'ultimo alla risoluzione temporale contribuiscono due fattori:

-il primo dovuto alla componente cromatica dovuta alle variazioni di velocità ed angolo di emissione dei fotoelettroni generati nel fotocatodo,



nel classico fotomoltiplicatore:

$$\sigma_{pc_em} \propto 1/\sqrt{V_{pc_em}}$$

$$\sigma_{em} \propto 1/\sqrt{\delta^{1st}}$$

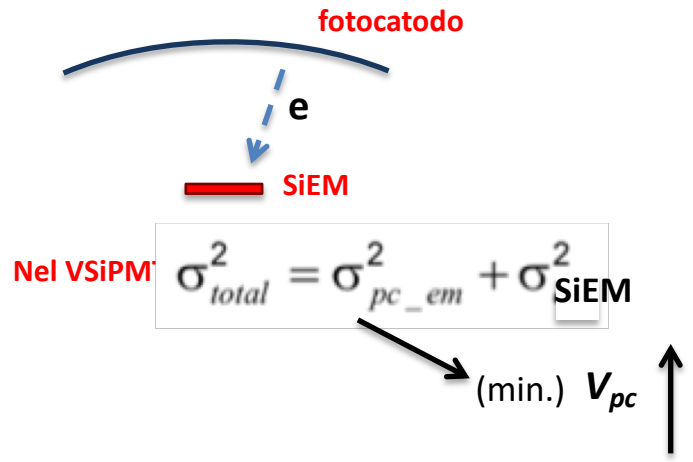


fig.9: risoluzione temporale per un classico fotomoltiplicatore PMT e per il nuovo dispositivo VSIPMT

nonchè alla componente geometrica dovuta alla differenza di tempo di transito delle varie traiettorie percorse dai fotoelettroni dal fotocatodo al SiEM $\sigma^2_{pc_em}$;

-il secondo dovuto allo spread temporale introdotto dal percorso dei fotoelettroni lungo la catena di dinodi σ^2_{em} . Nel nuovo dispositivo questa ultima componente, come si vedra' piu avanti dalle misure sui prototipi, da' un contributo minimo vista la sottilissima struttura dell'unico stadio di amplificazione della giunzione p-n del SiEM. InfattiLa Fig.10 mostra Il transit time spread (TTS) relativo allo stadio di amplificazione

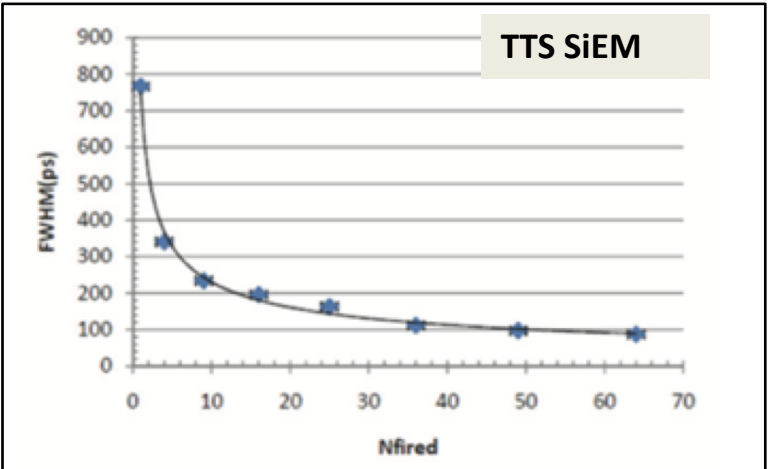


fig.10

del SiPM/SiEM. Si nota che per un ampio range di fotoelettroni amplificati il TTS rimane sotto i 200 ps ed ha un andamento pari a $1/\sqrt{N_{\text{fotoelettroni}}}$.

Rimane quindi la componente $\sigma_{\text{pc_em}}$, che, come nel caso dei classici fotomoltiplicatori rappresenta la parte più critica della risoluzione temporale. Questa componente diminuisce all'aumentare della tensione fra fotocatodo e SiEM. D'altra parte tenere questa tensione relativamente alta favorisce anche la penetrazione dei fotoelettroni nel SiEM (fig.4a,8).

Vanno inoltre sottolineati due ulteriori vantaggi nel nuovo dispositivo VSiPMT da non trascurare:

-La stabilizzazione del guadagno è un punto a vantaggio del VSiPMT: qui infatti il guadagno è ottenuto in un singolo stadio nella giunzione p-n alimentata a poche decine di volt. Stabilizzare una bassa tensione è una operazione piuttosto agevole e non presenta problemi. L'alta tensione nel VSiPMT è unicamente rivolta al trasporto dei fotoelettroni sul SiEM. Come si vede già dalla fig.8, e come sarà chiaro più avanti, per una sufficiente alta tensione tutti i fotoelettroni entrano nella regione di moltiplicazione della giunzione p-n. Quindi nel VSiPMT non è più necessario stabilizzare l'alta tensione.

Diversa e più critica, invece, la stabilizzazione nel classico fotomoltiplicatore. Qui il guadagno è direttamente legato all'alta tensione di alimentazione della catena di dinodi secondo la relazione di fig.1. La variazione di guadagno e quindi la stabilizzazione dipende dalla seguente relazione:

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

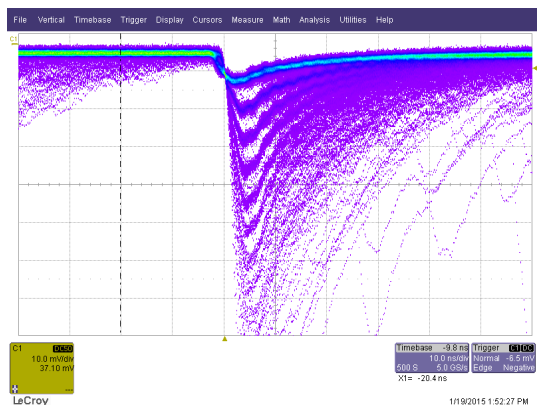
dove dG è la variazione di guadagno, n il numero dei dinodi, V_d e V_b rispettivamente la tensione sul dinodo e la tensione di alimentazione. Qui la stabilizzazione deve essere in alta tensione, dipende in modo peggiorativo dal numero dei dinodi e di conseguenza è più critica;

-nel nuovo VSiPMT il guadagno e dinamica sono grandezze indipendenti: il guadagno è dato dalla tensione applicata alla giunzione p-n, la dinamica invece è legata al numero delle micro-giunzioni geiger accese dai fotoelettroni. Nel classico fotomoltiplicatore invece, il guadagno seriale genera negli ultimi dinodi una intensa carica spaziale che limita la proporzionalità col numero dei fotoni incidenti. È un'altra criticità della moltiplicazione serie. Qui guadagno e dinamica sono fra loro dipendenti, maggiore è il guadagno, minore è la dinamica e viceversa.

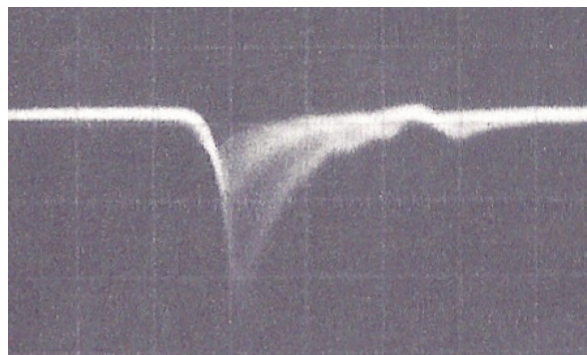
In conclusione le figure di merito del nuovo dispositivo VSIPMT rispetto ai classici fotomoltiplicatori sono:

- eccellente conteggio di fotoni;
- alto guadagno ottenuto in bassa tensione 10^6 ;
- ridotto spread temporale; confrontabile con quello ottenuto da un classico fotomoltiplicatore;
- linearità indipendente dal guadagno;
- alta dinamica di ingresso. La dinamica dipende esclusivamente dal numero delle micro-giunzioni della matrice p-n geiger;
- nessun consumo di potenza: assenza di un divisore di tensione;
- semplicità e compattezza costruttiva: solo tre connessioni, alta tensione, bassa tensione e uscita del segnale.

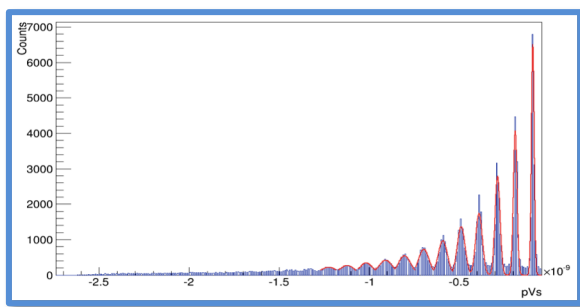
Nella fig.11 a),b) sono mostrati la forma degli impulsi e il relativo spettro di carica aspettati per il nuovo dispositivo. A confronto le stesse grandezze per il classico fotomoltiplicatore c) e d).



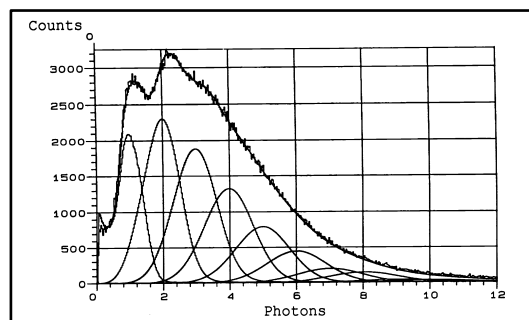
a)



c)



b)

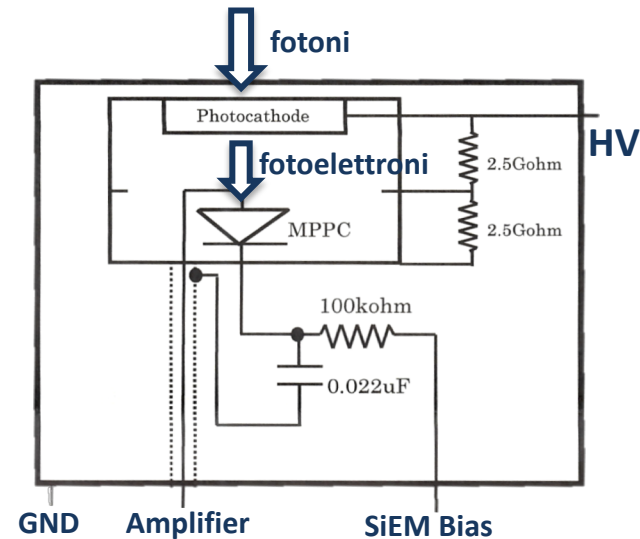


d)

fig.11: a sinistra a) la forma del segnale nel nuovo dispositivo VSIPMT. Risulta evidente la risoluzione dei singoli fotoni. In b) lo spettro di carica dei singoli fotoni. Anche qui e' netta la possibilita' di contare i fotoni della radiazione incidente. A destra le stesse figure per un classico fotomoltiplicatore. La forma del segnale, c) e lo spettro di carica d) mostrano la impossibilita' di risolvere i singoli fotoni.

Il primo dimostratore di fattibilità del VSIPMT.

Lo schema del primo VSIPMT prodotto per noi da Hamamatsu è mostrato in fig.12. Il prototipo e' minimale, con un fotocatodo di soli pochi mm². Lo scopo e' esclusivamente quello di validare il principio di funzionamento. I fotoni, incidendo sul fotocatodo, generano i fotoelettroni che accelerati dal campo elettrico indotto dalla alta tensione HV penetrano nella giunzione SiEM (mppc) alimentata a sua volta da una bassa tensione. Nella tabella 1 sono elencati i parametri del dispositivo: area del SiEM, dimensioni della micro-giunzione (celle), tensione sul fotocatodo, tensione al SiEM e caratteristiche del fotocatodo. L'efficienza di questo dispositivo e' definita come:



$$\epsilon_{total} = \epsilon_{photocathode} \times \epsilon_{fill-factor-SiEM} \times \epsilon_{focusing} \times \epsilon_{trigger}$$

dove:

- $\epsilon_{photocathode}$ = efficienza di fotocatodo (conversione fotoni-fotoelettroni) fig.13.
- $\epsilon_{fill-factor-SiEM}$ = efficienza geometrica SiEM: area totale/ Σ area micro-giunzioni p-n. Fill Factor (tab.1)
- $\epsilon_{focusing}$ = efficienza di foceggiamento degli elettroni sul SiEM. Nelle condizioni di fig.4b l'efficienza e' 1.
- $\epsilon_{trigger}$ = efficienza di penetrazione dei fotoelettroni nel SiEM: tende a 1 in funzione di HV fra fotocatodo e SiEM, fig.4a.

fig.12: disegno schematico del dimostratore VSIPMT

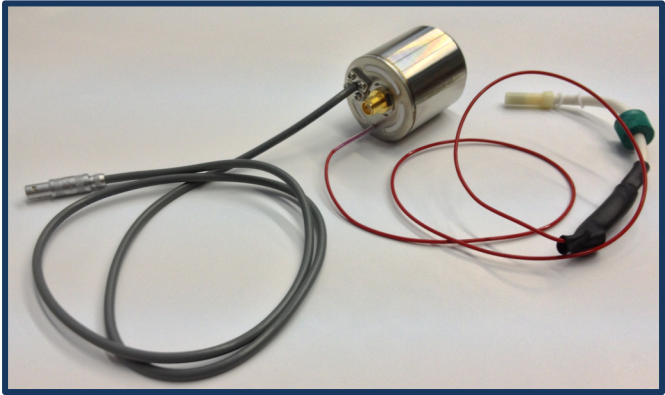


Table 1: Table of the VSIPMT characteristics.

	PROTOTYPE	ZJ5025	ZJ4991
MPPC AREA (mm ²)	1 x 1	1 x 1	1 x 1
CELL SIZE (μm)	50	100	100
TOTAL NUMBER OF CELLS	400	100	100
FILL FACTOR	61	78	78
OPTIMIZED CONFIGURATION	p ⁺ nn ⁺	p ⁺ nn ⁺	p ⁺ nn ⁺
MPPC OPERATION VOLTAGE (V)	72.5	72.4	72.4
PHOTOCATHODE POWER SUPPLY (kV)	-3.2	-3.2	-3.2
-entrance window	7x7 mm ² Borosilicate glass		
-photocathode	3 mm Ø GaAsP		
-special non-windowed MPPC series			

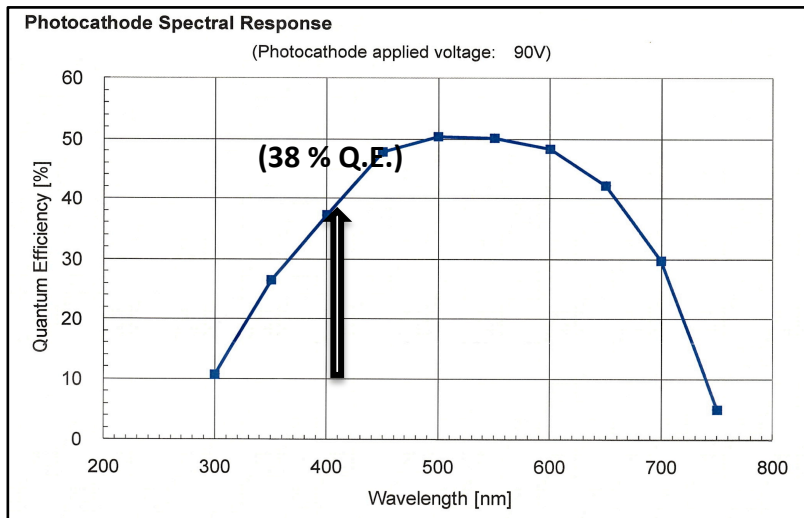


fig. 13: efficienza di fotocatodo

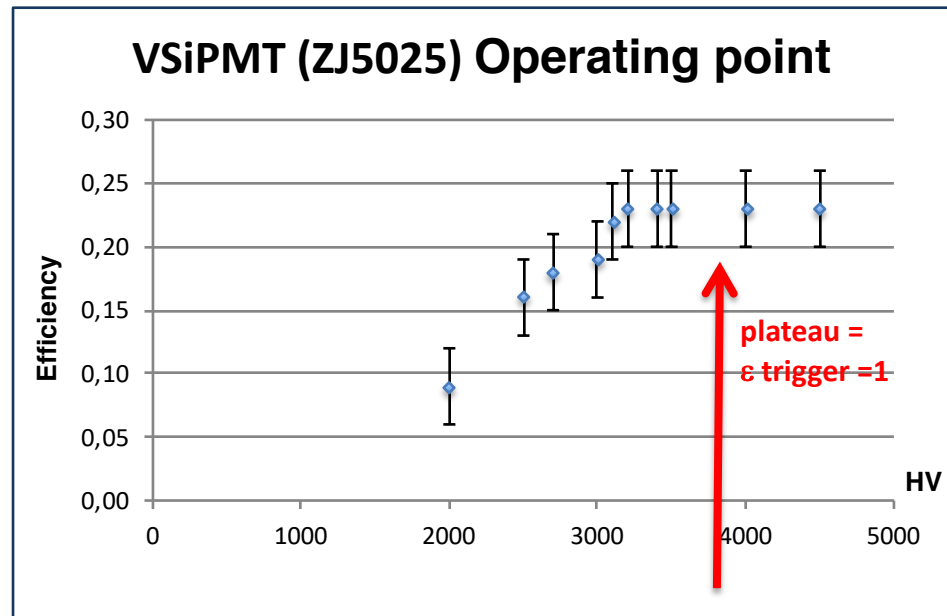


fig. 14: efficienza del VSIPMT

In fig.14 è mostrata l'efficienza totale del VSIPM. Come è stato detto nella pagina precedente l'efficienza ϵ_{total} è il prodotto di 4 fattori, tre sono numeri (efficienza quantica fig.13 , fill factor tab.1, $\epsilon_{focusing}$ fig.4b) e il quarto invece è una funzione della tensione di alimentazione sul fotocatodo. Infatti, come si deduce dalla fig.8, a parità di spessore di passivazione SiO_2 , all'aumentare della tensione fotocatodo-SiEM la penetrazione dei fotoelettroni nel silicio (range) è sempre maggiore e di conseguenza anche il numero di coppie elettrone-lacuna generate. Ad una certa tensione, detta tensione di plateau, il numero delle coppie sarà tale, tenendo anche conto delle ricombinazioni elettrone-lacuna, da fare sempre innescare la valanga geiger. Alla tensione di plateau l'efficienza di trigger è 1. Anche l'efficienza totale, fig.14 sarà quindi una funzione della tensione di alimentazione. L'efficienza di questo prototipo a 3200 Volt, fig.14 è allora data da:

$$\epsilon_{total} = \epsilon_{photocathode} \times \epsilon_{fill-factor-SiEM} \times \epsilon_{focusing} \times \epsilon_{trigger}$$

$$0,23 \approx 0,38 \times 0,61 \times 1 \times 1$$

Se invece l'alta tensione HV fosse posta a 2KV dalla fig. 14 l'efficienza totale risulterebbe essere 0,09. Dalla formola precedente l'efficienza di trigger scenderebbe a 0,39. Il altri termini solo il 39% dei fotoelettroni innescerebbero una valanga geiger.

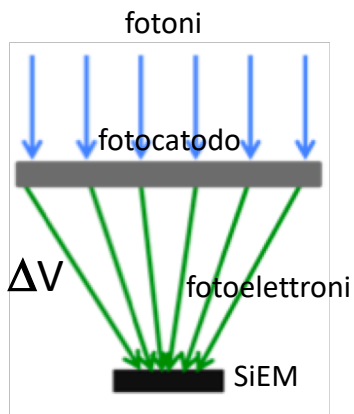


fig. 15: vista trasversale della focalizzazione sul SiEM

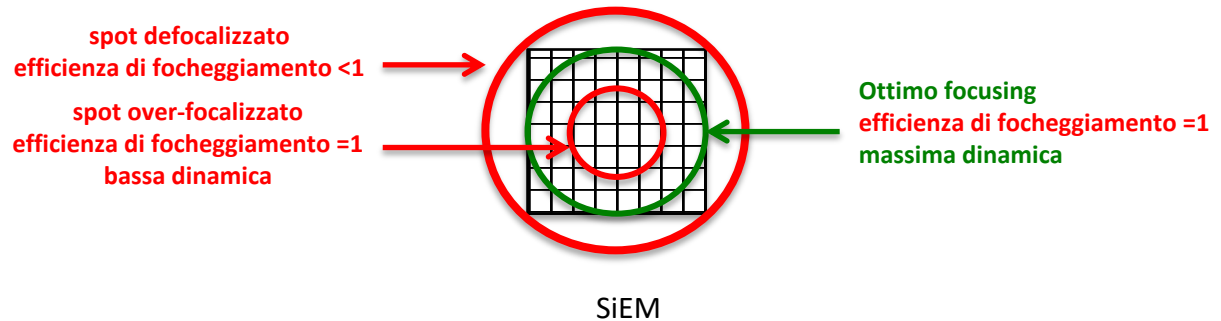


fig. 16: vista frontale della focalizzazione sul SiEM

Focusing e range dinamico

La differenza di potenziale ΔV fra fotocatodo e SiEM trasporta i fotoelettroni generati nel fotocatodo sul SiEM. Per massimizzare efficienza e dinamica lo spot dei fotoelettroni sul SiEM deve essere inscritto nel SiEM (cerchio verde), efficienza di focusing $\epsilon=1$ (formola pag.13). Nel caso del cerchio rosso esterno il sistema è debolmente focalizzato con relativa perdita di fotoelettroni. Il rivelatore risulta inefficiente. Nel caso del cerchio rosso interno, l'efficienza è nuovamente a 1 ma la dinamica e la proporzionalità rispetto ai fotoni di ingresso è limitata. Infatti più fotoelettroni possono colpire la stessa cella geiger.

Per capire sperimentalmente se il focusing è ottimale occorre illuminare ad alta intensità il fotocatodo con un numero di fotoni molto superiore alle celle del SiEM. In queste condizioni la risposta è saturata e se la condizione di ottimo focusing è soddisfatta la massima carica complessiva misurabile sarà quella corrispondente a tutte le celle accese iscritte nel cerchio verde.

In uno dei due prototipi dimostratori prodotto da Hamamatsu il SiEM a cui questi dati si riferiscono, il SiEM ha 100 celle a giunzione p-n Geiger (tab 1). Il numero delle celle all'interno dello cerchio verde è circa 80. Ciò significa, per quanto detto, che la massima carica in uscita da questo rivelatore, quando è illuminato con un numero di fotoni molto maggiore del numero delle celle deve essere quella corrispondente a circa 80 celle (fig.17). La calibrazione della carica di singola cella può facilmente essere fatta dalla distribuzione di carica dei dark counts che impegnano tipicamente 1-2 celle distinte nello spettro di carica, fig.19.

Va notato che la dinamica di questo rivelatore è modulabile ed incrementabile col numero delle celle ed è totalmente svincolata dal guadagno contrariamente a quanto accade in un classico fotomoltiplicatore.

Uniformità di risposta

Una scansione del fotocatodo in x-y è mostrata in fig.18. L'omogeneità (>95%) dei fotoelettroni generati e che colpiscono il SiEM è dunque dimostrata in questa misura.

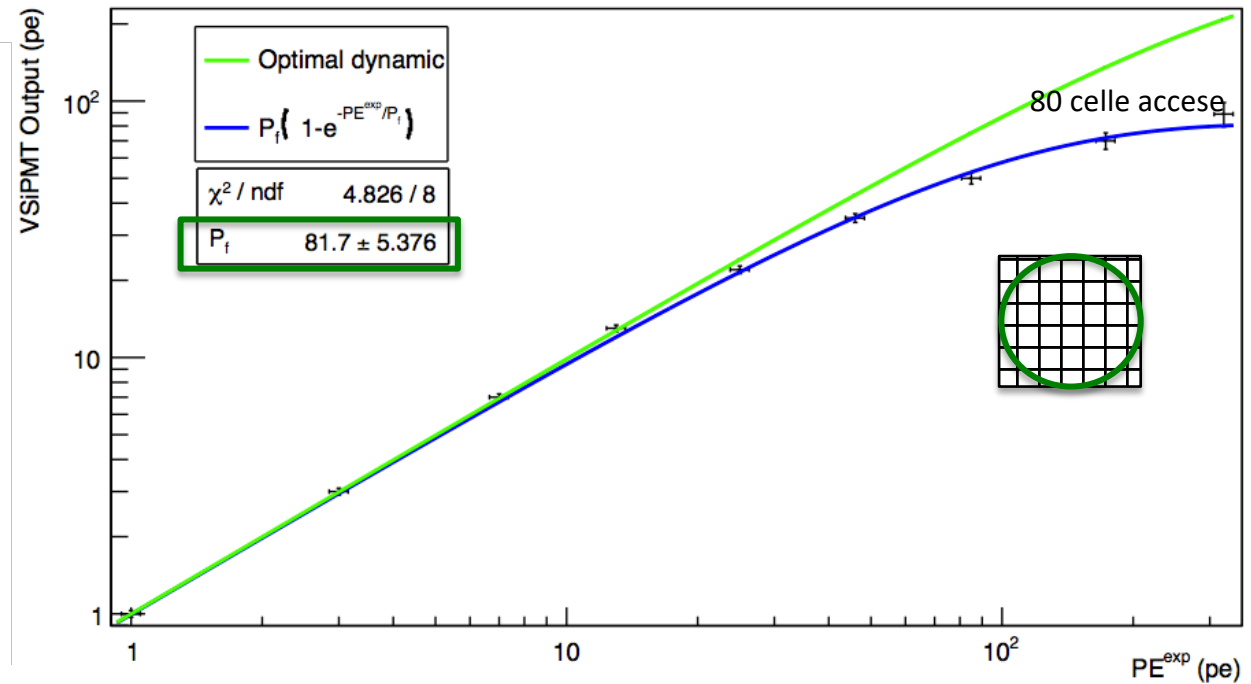
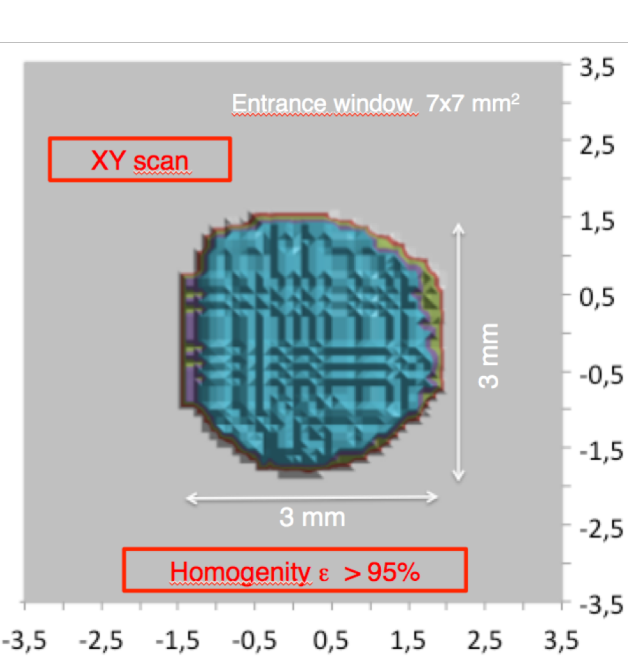


fig.18: misura di uniformità di risposta del fotocatodo.

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left[1 - \exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}\right) \right] \dots (4)$$

N_{fired} : Number of excited pixels
 N_{total} : Total number of pixels
 N_{photon} : Number of incident photons

fig.17: risposta dinamica del VSIPMT in funzione dell'illuminazione del fotocatodo. È visibile la regione di saturazione che corrisponde per questo prototipo ad una carica corrispondente a 80 celle accese. La curva sperimentale segue l'andamento descritto nella formola che è l'espressione della risposta dinamica ai numero dei fotoelettroni incidenti sul SiEM. Da essa si evince che per un numero di fotoelettroni incidenti sul SiEM, corrispondenti attraverso l'efficienza quantica al numero di fotoni in ingresso, maggiore del numero totale di celle l'esponenziale tende alla saturazione e il numero delle celle accese è uguale al numero delle celle del SiEM. Poichè nel nostro caso lo spot dei fotoelettroni è circolare (fig.16) il numero delle celle accese è quello iscritto nel cerchio verde, . Ne consegue che il VSIPMT opera in condizioni di ottimo focusing.

Guadagno

Il funzionamento del VSiPMT è evidenziato nelle figure 19 e 20. In fig.19 è visibile la forma del segnale. Risulta chiara la risposta ai singoli fotoni contenuti in un segnale di luce incidente sul fotocatodo. Sono mostrati nella stessa figura anche gli spettri di carica dei rispettivi impulsi. E' molto netta la separazione fra gli spettri di carica. Ciò è dovuto all'assenza di fluttuazioni statistiche nel processo "quasi digitale" geiger delle singole microcelle del SiEM. In fig. 20 è mostrato il guadagno del VSiPMT in funzione della tensione di alimentazione del SiEM.

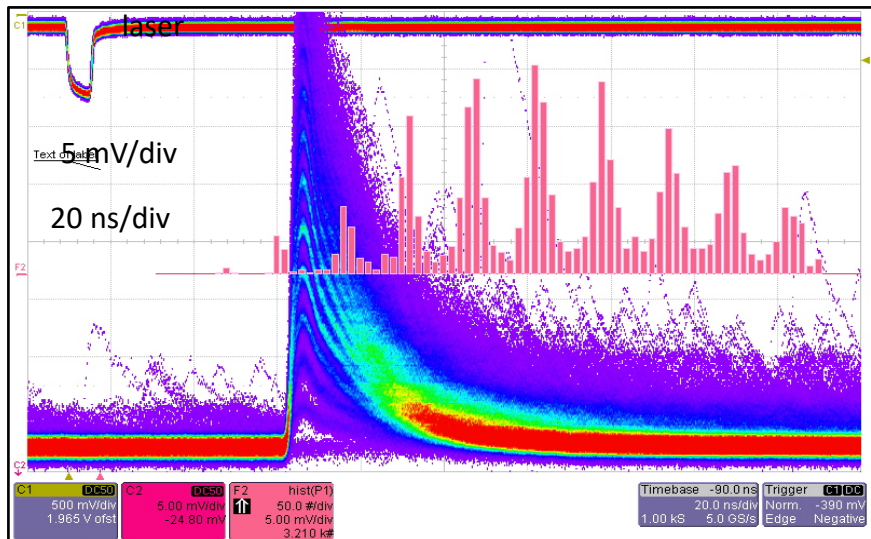


fig.19: forma degli impulsi e spettro di carica degli impulsi stessi. E' possibile notare sia nella forma dei segnali che negli spettri di carica la netta risoluzione dei singoli fotoni

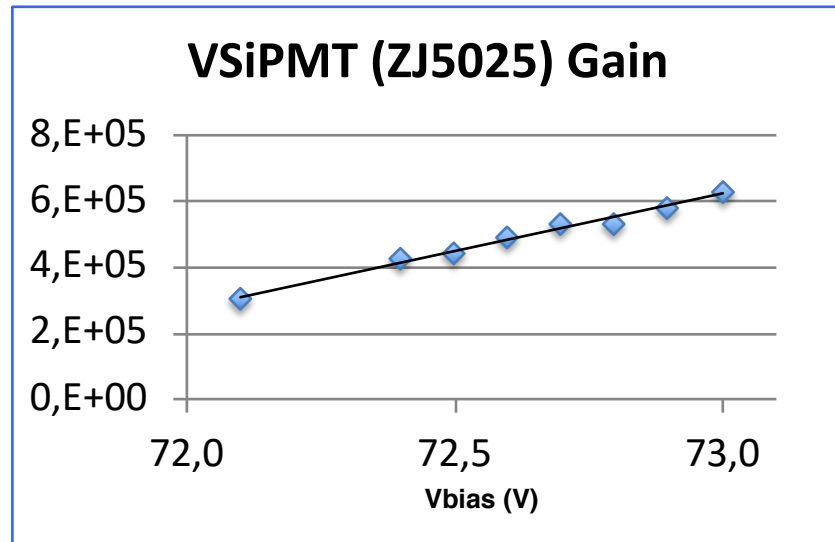


fig.20: Guadagno del VSiPMT in funzione della tensione di alimentazione del SiEM.

Come descritto a pag.4 il guadagno è ottenuto in un singolo stadio in bassa tensione. Va notato che se fosse usato al posto del SiEM una giunzione p-n APD, non solo si avrebbe un guadagno molto più basso ma il suo regime proporzionale, con le relative fluttuazioni statistiche, non consentirebbero una buona separazione nel conteggio dei fotoni. Il guadagno viene ottenuto calcolando la carica contenuta nel segnale, oppure valutando la differenza di carica fra due picchi consecutivi

Risposta temporale

In fig.21 è mostrata la risoluzione temporale di questo VSiPMT. Viste le piccole dimensioni del fotocatodo (diametro 3 mm.) dalla relazione di fig.9 si evince che questa incertezza temporale è piccola ed è confrontabile con quella relativa al transito nella giunzione p-n del SiEM, fig.10. Questo dato indica che il TTS (Transit Time Spread), relativo al SiEM è trascurabile e non incide sulla risoluzione temporale dell'intero dispositivo. Come si vedrà più avanti dai test sperimentali sui prototipi industriali essa dipenderà essenzialmente dal trasporto dei fotoelettroni dal fotocatodo al SiEM e ci si aspetta una risoluzione compresa tra 1 e 2 ns confrontabile con quella tipica di un classico fotomoltiplicatore.

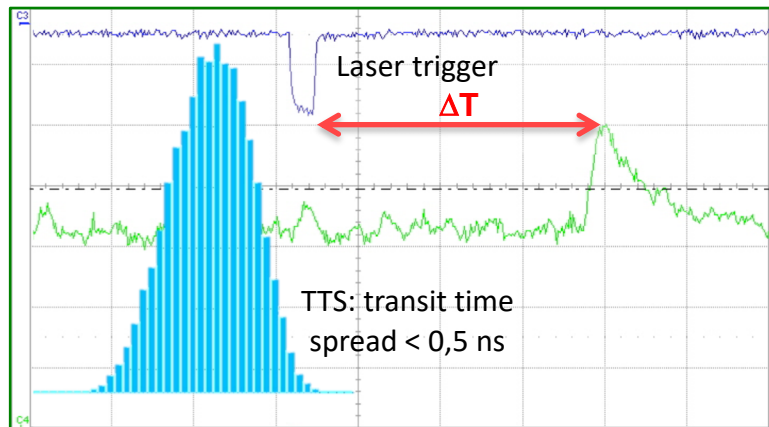


fig.21: risposta temporale ad un impulso laser.

Parte 2°

**Prototipo "home made"
e "LEGO" per validare i parametri di
progetto in vista di un primo
prototipo industriale
TRL 4**

Elementi di progetto di un innovativo VSIPMT (Vacuum Silicon PhotoMultiplier) con fotocatodo di dimensioni equivalenti a quelli dei classici fotomoltiplicatori

Costruzione del primo prototipo semplificato "home made"

Dopo aver evidenziato, su piccola scala, con il dimostratore appena descritto, la fattibilita' del rivelatore innovativo VSIPMT il progetto a questo punto si propone di affrontare una seconda fase che ha lo scopo di realizzare dei prototipi "fruibili", ossia prototipi che hanno un fotocatodo da 1 a qualche pollice come è la produzione attuale dei classici fotomoltiplicatori.

Il lavoro si e' svolto su tre linee:

- simulazioni elettrostatiche per definire il corretto posizionamento del SiEM nel VSIPMT per prototipi di ampio fotocatodo, 1-2 pollici
- Sostituzione del sistema di amplificazione a dinodi in un fotomoltiplicatore classico con una matrice di giunzioni p-n geiger, fig. 22 (A).
- Realizzazione in casa di un prototipo "LEGO" con una configurazione variabile custom-made per mettere a punto le corrette specifiche per la costruzione di un prototipo industriale (B) mettendo a punto le deposizioni di fotocatodo e lo studio di efficienza quantica sia in trasmissione che in riflessione, fig.22 (B).

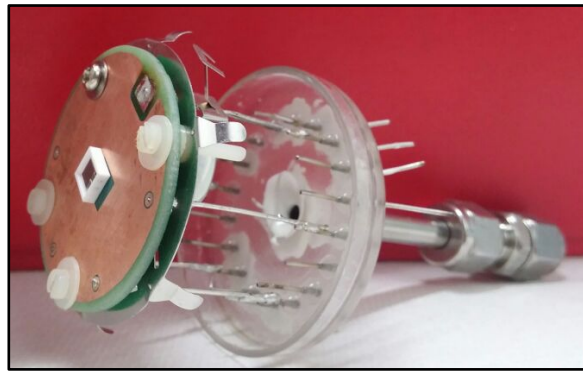
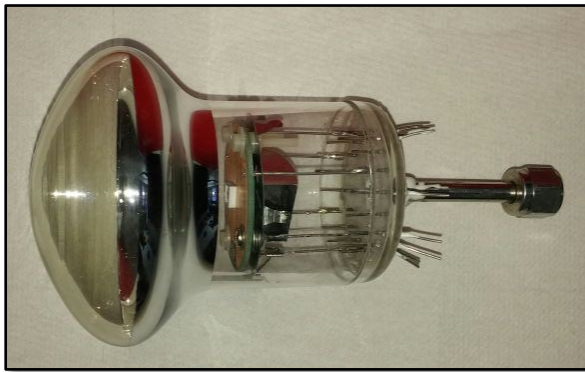


fig.22 (A) Prototipo "home made" da 3 pollici

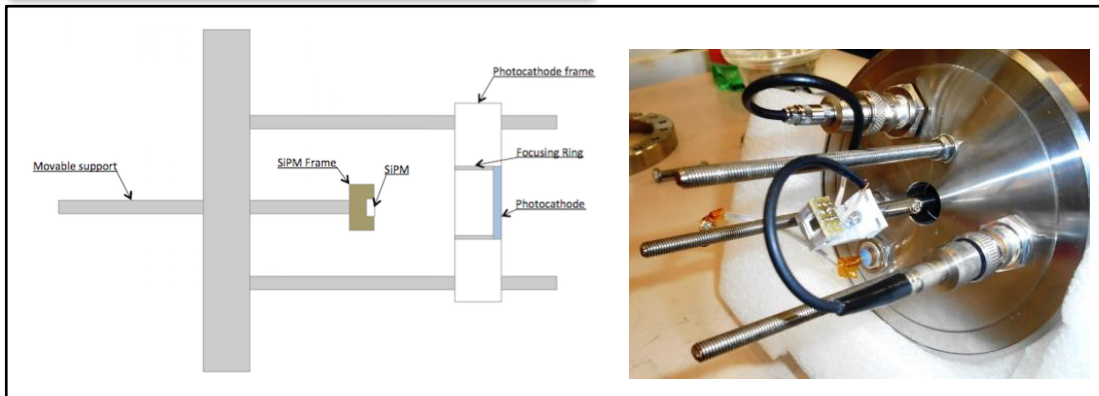


fig.22 (B) Prototipo "LEGO" 1 pollice

Il processo di fig. 22 (A) consiste nel riassemblare un classico fotomoltiplicatore secondo l'idea del VSIPMT presentata fin qui. Da un fotomoltiplicatore classico da 3 pollici Hamamatsu viene estratta la catena di dinodi e sostituita con un SiEM, giunzioni p-n geiger le cui caratteristiche devono rispondere alle prescrizioni descritte a pag.6. Tutte le operazioni di sostituzione della catena di dinodi con un SiEM,

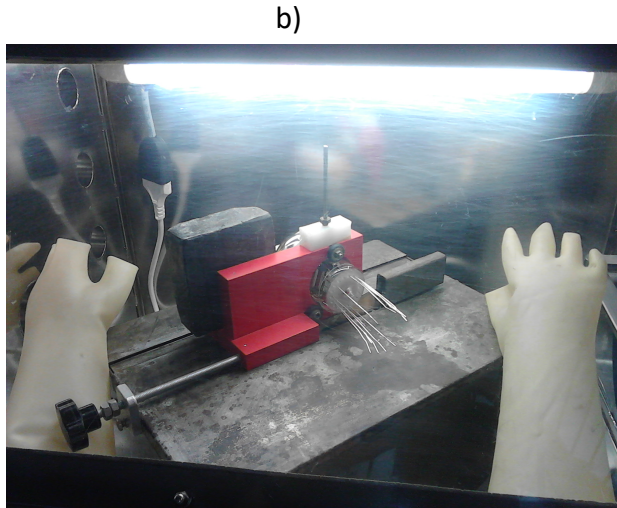
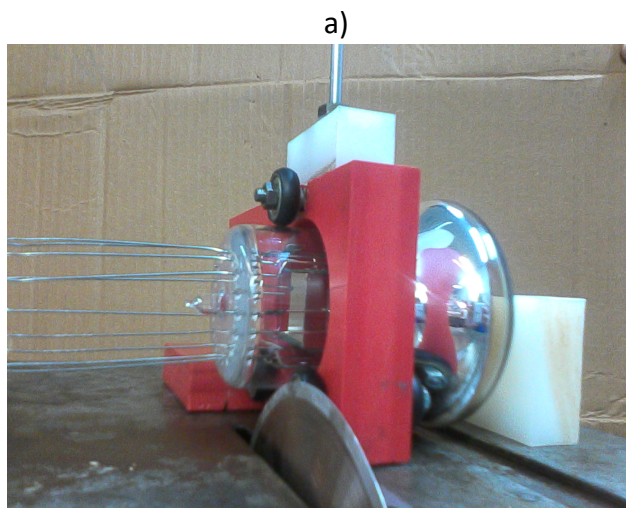


fig. 23: operazioni di taglio a) di un classico fotomoltiplicatore e sostituzione catena di dinodi con una matrice di giunzioni p-n Geiger SiEM. Tutte le operazioni sono condotte in atmosfera inerte b).

sono state effettuate in atmosfera inerte (Argon), fig.23. Si è resa necessaria questa procedura perchè il fotomoltiplicatore in questione ha un fotocatodo bialkali che si ossida ed evapora a contatto con l'aria. Il SiEM rispecchia le caratteristiche esposte a pag.6 per ciò che riguarda la stratigrafia della giunzione (p-n) e lo spessore dello strato di passivazione SiO_2 sulla finestra. La fig.24 mostra il SiEM montato sul supporto solidale con la parte posteriore del fotomoltiplicatore che viene riassembleata con la parte anteriore contenente il fotocatodo

SiEM	Hamamatsu S10943-3360 (X) n.1
Gain	1.25×10^6
Dark Count Rate	~ 400 kcps @ 0.5pe
Size	$3 \times 3 \text{ mm}^2$
Pixel Size	$50 \mu\text{m}$
Number of pixels	3600

tab.2

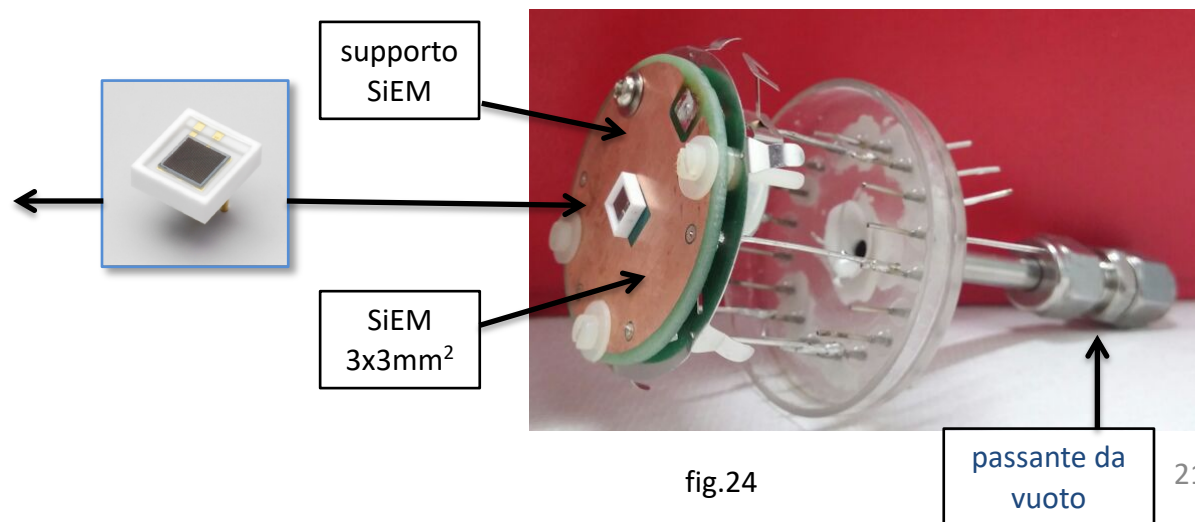
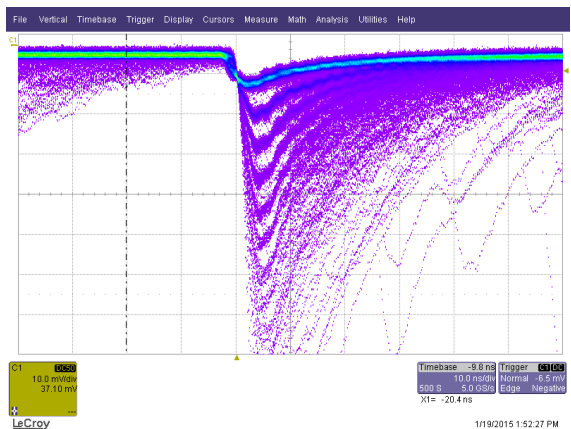


fig.24

Nella figura 31 è mostrato il fotomoltiplicatore riassembleato in atmosfera inerte nella configurazione VSIPMT. Questo lavoro di costruzione è stato svolto nell'ambito dei WP:

Il SiEM

Il SiEM è stato appositamente realizzato per questi sviluppi da Hamamatsu e le sue specifiche sono indicate nella tabella 2. E' stato comunque estensivamente caratterizzato in laboratorio con fotoni. In fig. 25 e 26 sono mostrati la forma degli impulsi di uscita dal SiEM e gli spettri di carica relativi. Come si vede i fotoni sono ben distinguibili sia negli impulsi che negli spettri di



V_{bias} 67.2V
 τ_{rise} 4ns
 τ_{fall} 15ns
 Picco 10mV

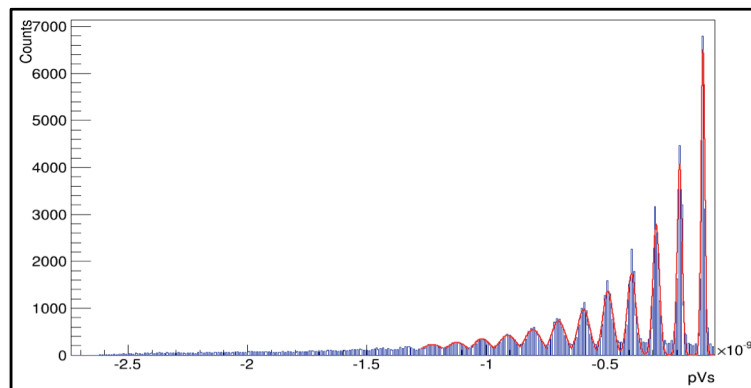


fig.25: forma degli impulsi in uscita dal SiEM e spettro di carica relativo sfruttando gli impulsi di dark counts, fig.26..

carica. In fig.27 sono mostrati i conteggi di dark counts con soglie a 1,2,3 pixel accesi. Si vedrà più avanti che nelle più recenti produzioni di matrici geiger i dark counts sono notevolmente ridotti. In fig. 28 e 29 sono rispettivamente mostrati il guadagno in funzione della tensione e la

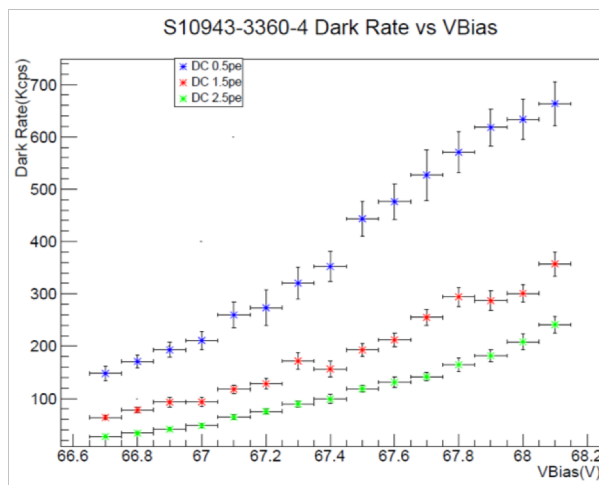


fig.27: conteggi di dark count in funzione della tensione di alimentazione del SiEM e per varie soglie di pixel accesi. 0,5 indica almeno un pixel acceso, 1,5 indica 2 pixel accesi e così via.

dinamica in funzione del numero di fotoni che incidono sul SiEM.

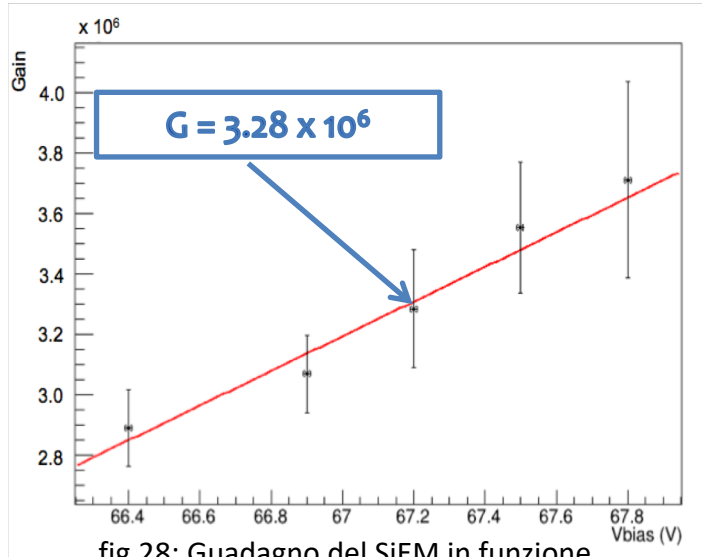


fig.28: Guadagno del SiEM in funzione della tensione di alimentazione

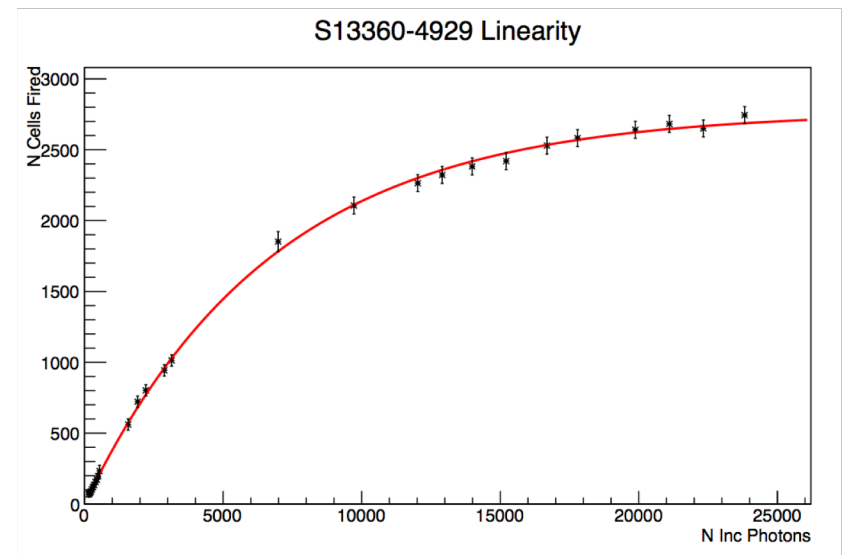


fig.29: Dinamica del SiEM in funzione del numero di fotoni in ingresso.

$$y = a \cdot \left(1 - e^{-\frac{b \cdot x}{a}}\right)$$

Facendo il fit sulla curva della dinamica e usando la formola di figura 17 semplificata come $y = a \cdot \left(1 - e^{-\frac{b \cdot x}{a}}\right)$ si ricavano i parametri a e b che sono rispettivamente il numero di celle totali, 2900 e l'efficienza, 41%. Il numero di celle totali è inferiore a quello nominale ma questo è dovuto allo spot circolare che genera il laser e che lascia non utilizzati i quattro spigoli del SiEM. (fig.30). L'efficienza del 41% è compatibile con lo spazio morto fra le celle attive (fill factor) e con l'efficienza quantica. Nella fig.31 è visibile il VSiPMT completamente assemblato. In entrambe le viste laterale e frontale è visibile il SiEM.

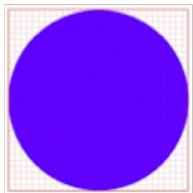
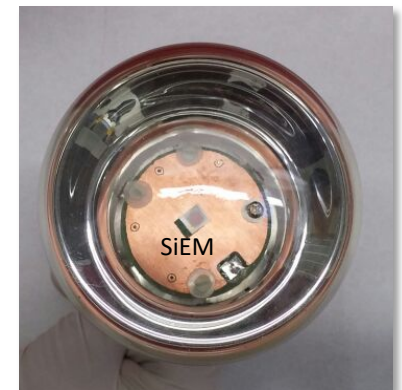


fig.30



fig.31: vista laterale e frontale del VSiPMT. Si vede chiaramente il posizionamento del SiEM



Simulazioni elettrostatiche

Il corretto posizionamento del SiEM è stato ottenuto attraverso simulazioni con il pacchetto COMSOL Multiphysics che presenta un ambiente di sviluppo per la simulazione di sistemi elettrostatici. Come già descritto a pag 15 i fotoelettroni prodotti dal fotocatodo sotto l'azione del campo elettrico generato dalla differenza di potenziale applicata tra fotocatodo e SiEM devono essere raccolti efficientemente dal SiEM. Nella figura 32 sono mostrate le simulazioni delle linee di forza del campo elettrico e con il colore l'energia acquistata dai fotoelettroni secondo il modello schematizzato nella pagina successiva (fig.36). Il SiEM, che ha una superficie di 3mm x 3mm deve essere collocato lungo l'asse di simmetria del VSIPMT in una posizione tale che lo spot dei fotoelettroni in quel punto sia dell'ordine di 3mm. Le ipotesi di partenza

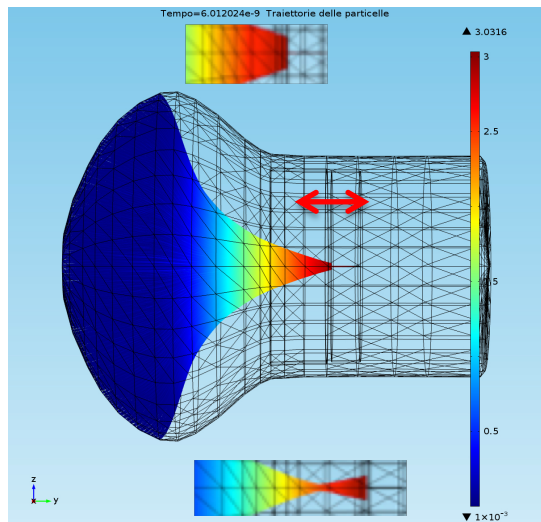


fig.32

Energia fotoelettroni: $E=1\text{eV}$ $\alpha = 0^\circ - 40^\circ$
 Photocathode: $V=-3\text{kV}$
 Anello di focalizzazione:
 diametro=44mm
 altezza=14mm
 Spot: $\phi=3\text{mm}$
 Timing: $TT=7.01\text{ns}$ $TTS=0.60\text{ns}$

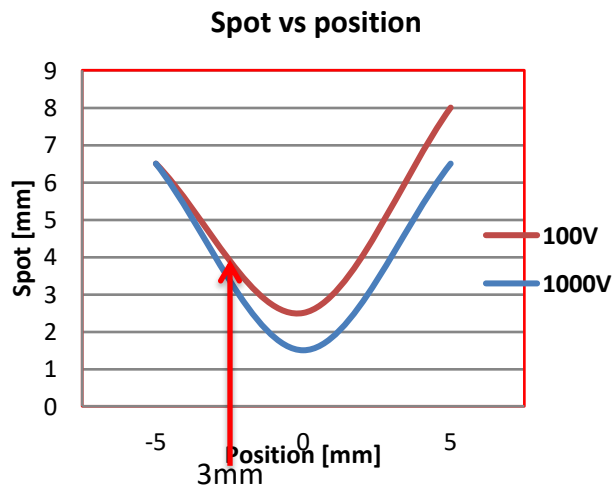


fig.33

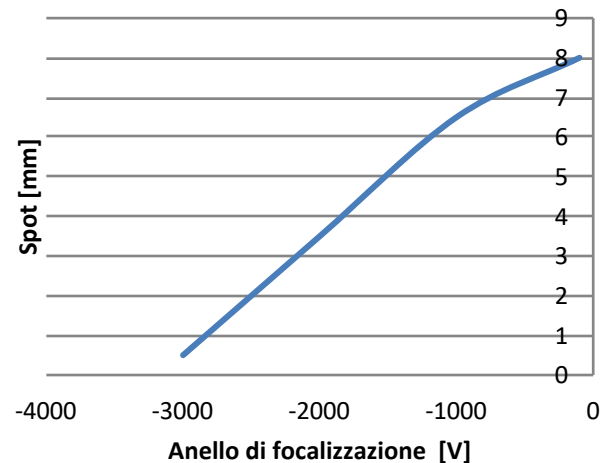


fig.34

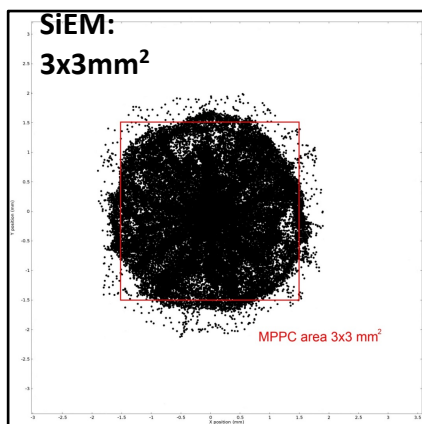


fig.35: spot dei fotoelettroni sul SiEM

sono elencate in fig.32. L'energia dei fotoelettroni in uscita dal fotocatodo è circa 1eV, fig.5, l'angolo di uscita è compreso tra 0° e 40° e la tensione fra fotocatodo e SiEM è 3kV.

Una tensione di alimentazione è anche applicata ad un anello di focalizzazione attorno al fotocatodo.

In fig. 33, 34 è mostrato lo sviluppo dello spot di foceggiamento che passa per un minimo e inverte le linee di forza lungo l'asse longitudinale del VSIPMT (anche fig.32). Dalle simulazioni è possibile anche ricavare il tempo di transito TT e il transit time spread TTS. La fig.35 mostra la simulazione dello spot con cui i fotoelettroni colpiscono il SiEM.

Studio focalizzazione su SiEM

Simulazioni fatte a Napoli con COMSOL Multiphysics.

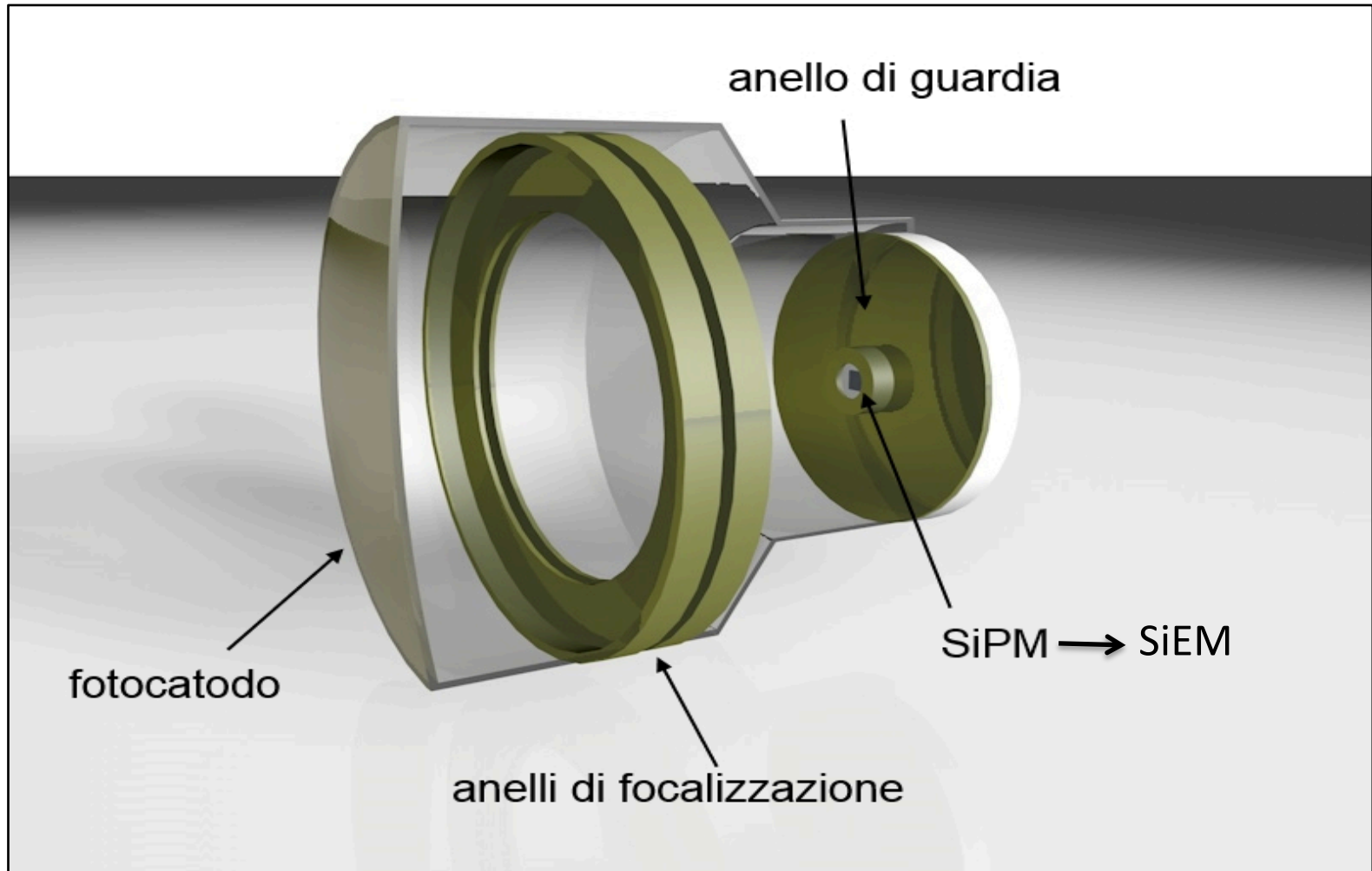


fig.36

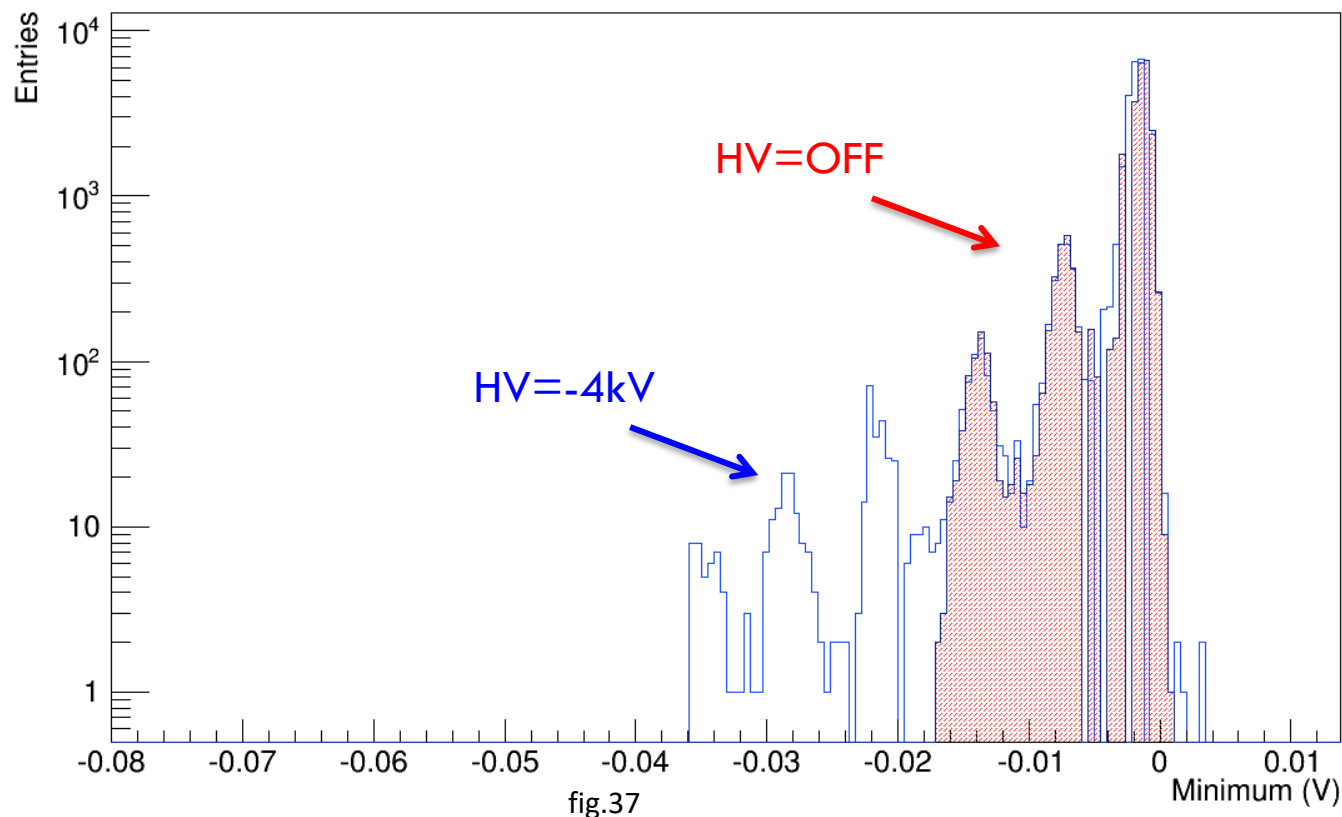
Vista in sezione tridimensionale del modello usato nelle simulazioni del VSIPMT discusse e concordate con Hamamatsu per il prototipo VSIPMT 1 pollice

Il prototipo “home made” così’ realizzato è stato esposto ad un flusso di fotoni nel visibile e la figura 37 mostra i risultati ottenuti. Lo spettro dei fotoni rivelati mostra con evidenza il funzionamento del VSIPMT. Infatti quando la tensione di alimentazione fotocatodo-SiEM è nulla i fotoni rivelati (in rosa) sono quelli corrispondenti al rumore di fondo del SiEM, 1-2 celle accese.

Quando si accende l’alta tensione, 4 kV fra fotocatodo e il SiEM, l’effetto dei fotoelettroni generati dal fotocatodo è nettamente osservabile. Il risultato conferma, anche con un prototipo “home made”, dopo il dimostratore Hamamtsu, la fattibilità di questo innovativo fotorivelatore.

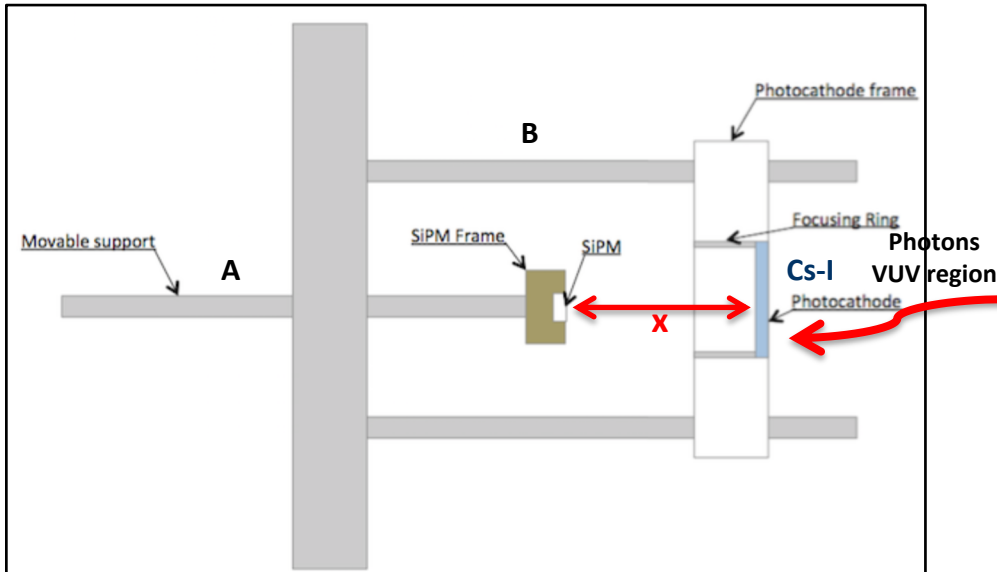
In particolare il risultato è particolarmente importante in quanto questo prototipo ha per la prima volta un fotocatodo relativamente grande e tipico dei classici fotomoltiplicatori commerciali. Purtroppo il risultato è solo qualitativo, l’efficienza è troppo bassa. La ragione sta nel fatto che pur avendo fatto tutte le operazioni in atmosfera inerte una buona parte del fotocatodo è evaporato o si e’ ossidato, anche in presenza di lievissime tracce, che non si possono escludere, a contatto con l’ossigeno. L’assemblaggio andrebbe quindi fatto in una camera a vuoto. Lavoro effettuato nell’ambito del WP:

WP 3100 Test sui prototipo prodotti



Costruzione del secondo prototipo "LEGO"

Dopo gli incoraggianti risultati ottenuti con i due prototipi fin qui descritti, si è deciso di iniziare una operazione sistematica per l'ottimizzazione dei parametri del rivelatore da un lato, e dall'altro di operare con fotocatodi maggiormente resistenti all'atmosfera e quindi più maneggevoli. Inoltre l'ottimizzazione dei parametri rimane un passaggio fondamentale per mettere a punto tutte le procedure costruttive da trasferire ad Hamamatsu per procedere nella realizzazione di un prototipo industriale utilizzabile. Nella figura 38 è mostrato il



prototipo "LEGO".

Sotto questo nome viene così chiamato questo dispositivo VSIPMT in cui il fotocatodo è realizzato con ioduro di cesio e la posizione del SiEM è variabile (quota x della figura 38) in modo da poter verificare sperimentalmente la corretta posizione del SiEM nei punti di focalizzazione confrontando i risultati con le simulazioni.

La movimentazione del SiEM è ottenuta attraverso un passante esterno A. La parte principale del dispositivo è la B dove è possibile vedere il SiEM e a destra l'anello di focalizzazione del campo elettrico e il fotocatodo CS-I. Le foto mostrano un dettaglio del SiEM montato sul supporto mobile.



fig.38: viste del Prototipo "LEGO"

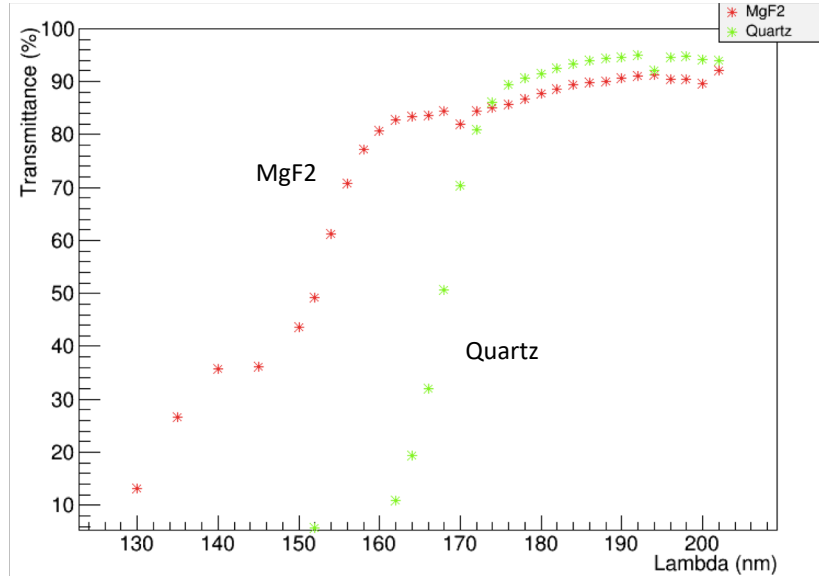


Fotocatodo

Come si è visto il prototipo "LEGO" per essere facilmente manipolabile è dotato di un fotocatodo a CS-I che ha un cut-off a circa 200nm e quindi lavora nella regione VUV dell'ultravioletto. Ciò significa che la finestra di ingresso che racchiude il dispositivo sotto vuoto deve trasmettere i fotoni in questa finestra di interesse.

Due materiali sono possibili: il quarzo e il fluoruro di magnesio MgF_2 . Sono stati misurate le trasparenze di entrambi i materiali utilizzando un monocromatore nella regione dell'ultravioletto (fig.39).

materiale: MgF_2
diametro: 25 mm
spessore: 2 mm



materiale: Quarzo
diametro: 25.4 mm
spessore: 3 mm

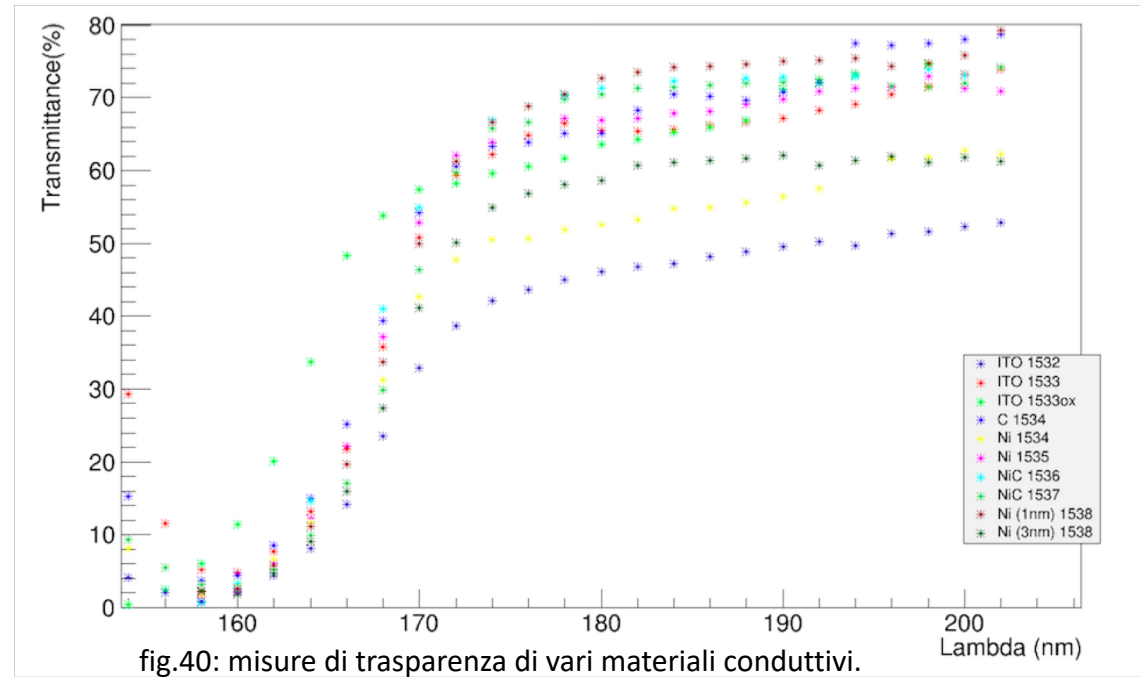
fig.39: trasparenza, misurata con un monocromatore delle due finestre per VUV quarzo e MgF_2 .

Poichè il fotocatodo a CS-I è un isolante è necessario utilizzare un deposito di uno strato di buona conduttività e allo stesso tempo di alta trasparenza a queste lunghezze d'onda. La struttura di insieme del fotocatodo è quindi costituita da:



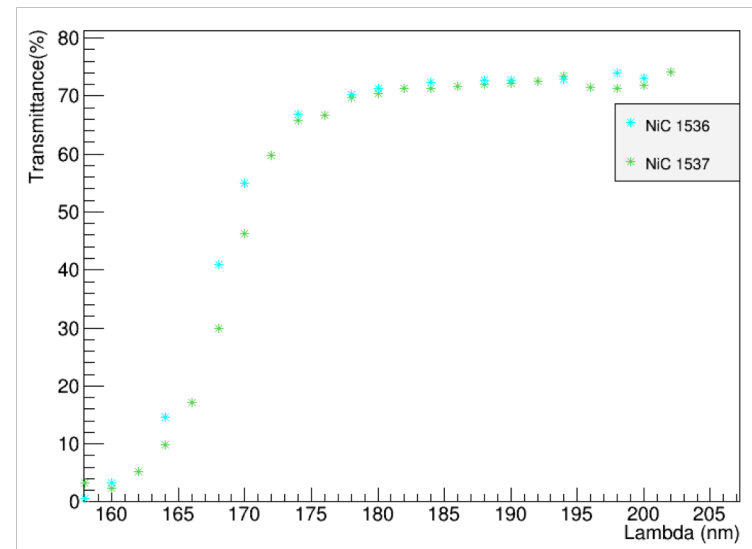
La trasparenza di differenti strati conduttivi sono stati misurati alle lunghezze d'onda di utilizzo di questo fotocatodo. Indium Tin Oxide è indicato con ITO. NiC è un composto di Nichel e Carbonio. ITOox rappresenta un composto che viene lasciato in ambiente ossigenato a 400°. I composti 1536 e 1537 sono composti con gli spessori indicati a destra della tab.3. In fig.40 sono mostrati i risultati dei depositi su quarzo. In fig.41 e' mostrato il composto selezionato.

campioni	materiali	spessori (nm)
1532	ITO	10
1533	ITO	5
1533ox	ITOox	5
1534	Ni	5
1534	C	5
1535	Ni	3
1536	NiC+ Ni	3+0.5
1537	C+Ni	2.5+0.5
1538	Ni	1
1538	Ni	3



Tab.3: materiali conduttivi sperimentati
Per rendere il fotocatodo Cs-I conduttivo.

fig.41: campione con i composti
selezionati su quarzo
n.1537 (C 2.5nm+Ni 0.5nm)



L'efficienza quantica QE di film di fotocatodo depositato per evaporazione con spessore di 20-30 nm di CSI (99,999% pure powder) su diversi strati di materiali conduttivi su quarzo sono mostrati in fig.42. Tipicamente lo spessore di deposizione di fotocatodo per bilanciare assorbimento dei fotoelettroni prodotti all'interno del fotocatodo e produzione di fotoelettroni all'esterno è compreso tra 10 e 30 nm. La condizione ottimale dei parametri di fotocatodo rivata dai test e': strato conduttivo: C→ 2.5nm, Ni→0.5nm, spessore film CS-I: 20nm, finestra: MgF2.

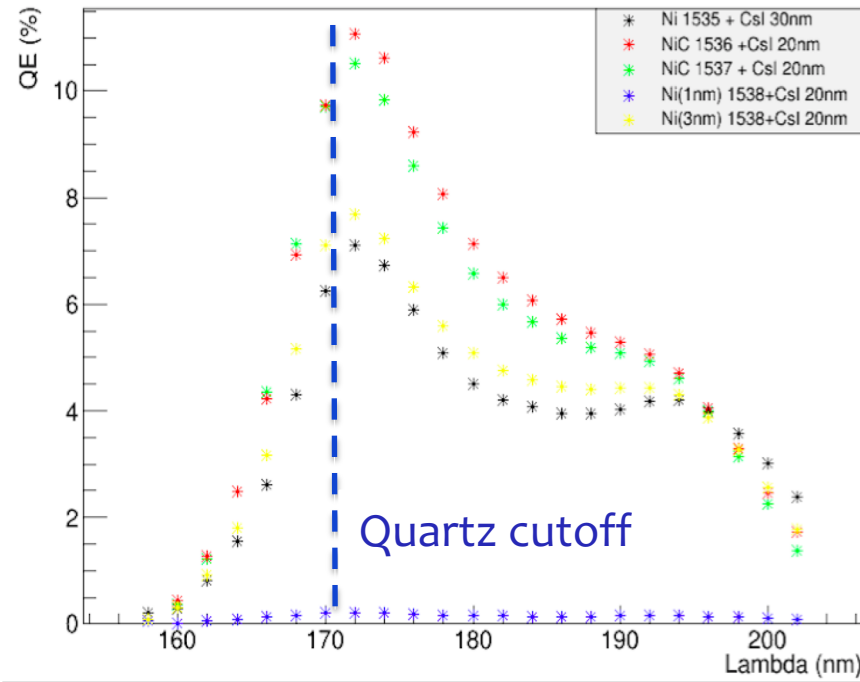


fig.42: efficienza quantica di un film di CS-I su diversi strati di materiali conduttivi depositati su quarzo

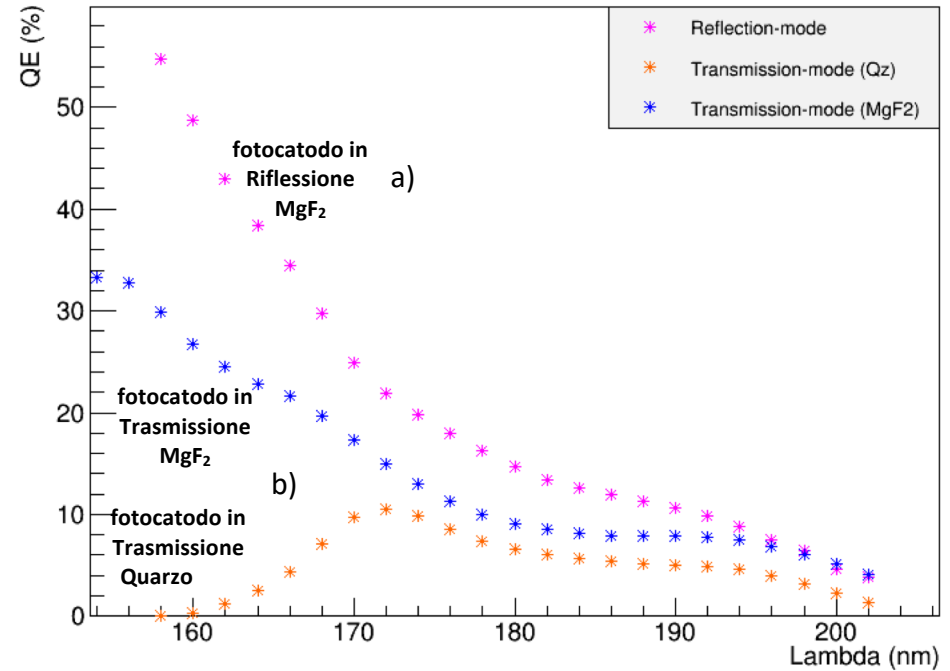
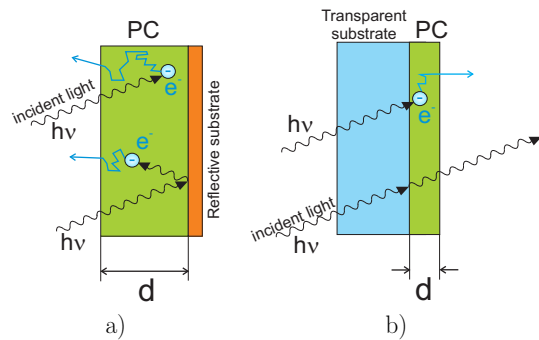


fig.43: efficienza quantica di un film di CS-I in trasmissione e riflessione modo su MgF2 e trasmissione su quarzo.

La fig.43 mostra l'efficienza quantica del sistema fotocatodo: finestra, strato conduttivo e fotocatodo. Le curve si prestano ad una interessante considerazione: un fotocatodo a riflessione a) fig.43 e 44 ha una efficienza nettamente maggiore di un fotocatodo a trasmissione.

Infatti dalle figure a fianco appare chiaro il vantaggio di un fotocatodo a riflessione rispetto ad uno in trasmissione. Rimane difficile però utilizzare un fotocatodo a riflessione in un fotomoltiplicatore classico a causa dell'oscuramento creato della catena di dinodi, a meno di un possibile ingresso laterale al fotomoltiplicatore.

fig.44



E' invece possibile invece possibile strutturarli in un VSIPMT.

Simulazioni elettrostatiche del prototipo "LEGO"

Come nel caso del prototipo "home made" va simulata la geometria di focalizzazione dei fotoelettroni sul SiEM. Anche qui, oltre alla tensione sul fotocatodo, vi è una tensione sull'anello di focalizzazione. Il SiEM ha le caratteristiche geometriche già presentate nella tabella 2 di pag.21. La tecnologia è evoluta molto rapidamente e in appendice A saranno mostrati SiPM/SiEM, che sebbene abbiano le stesse caratteristiche geometriche, migliorano notevolmente le loro caratteristiche fisiche: dark counts, guadagno etc. Queste simulazioni sono state verificate anche con un altro pacchetto software SimION 8.0 oltre che Comsol come già fatto per il prototipo "home made". Il fotocatodo ha un diametro di 25 mm (circa 1 pollice) di diametro e l'anello di focalizzazione ha lo stesso diametro con una altezza di 10mm.

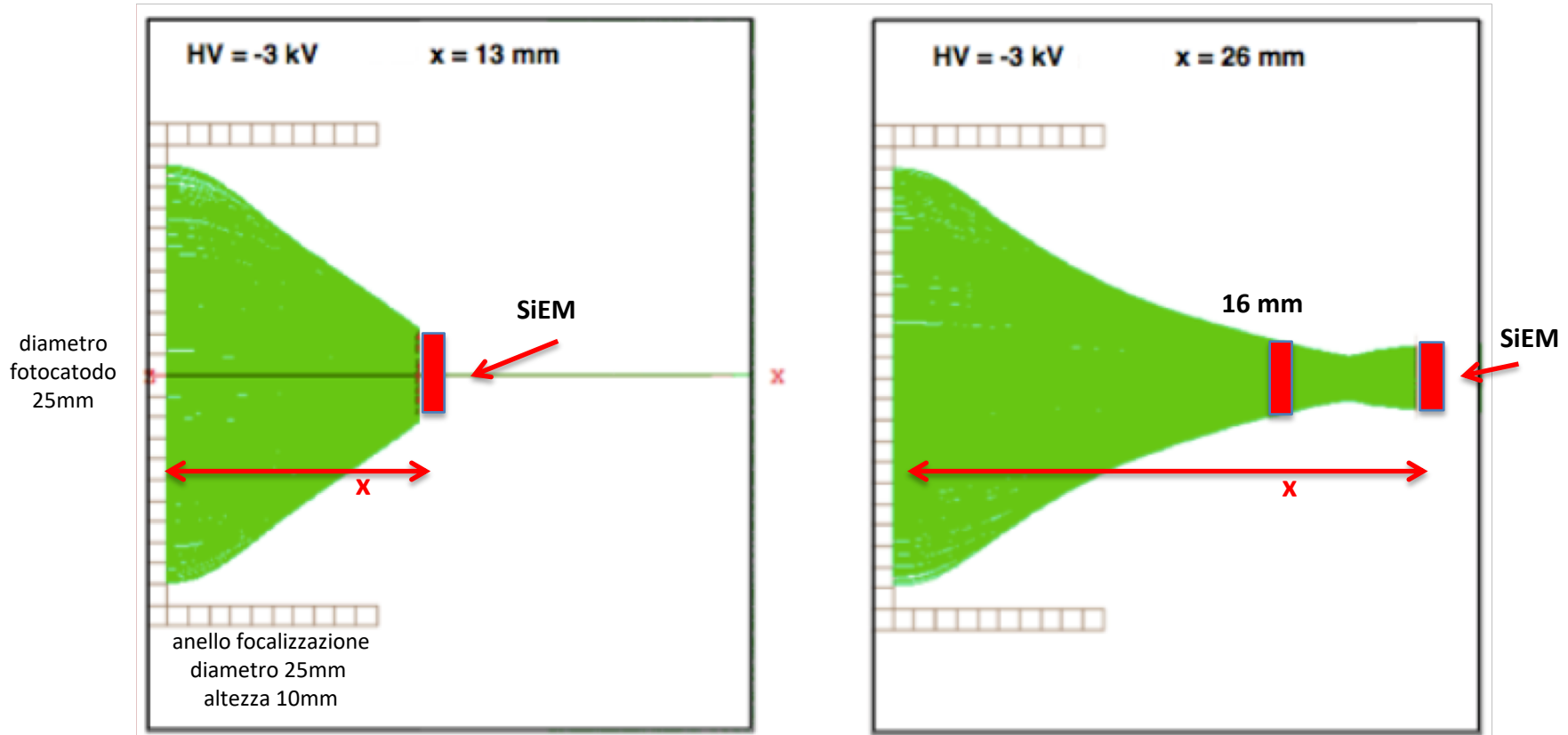


fig.45:simulazione campo elettrico fra fotocatodo e SiEM

Come nel caso delle simulazioni del prototipo "home made" i fotoelettroni hanno una energia in uscita dal fotocatodo di 1 eV con angolo variabile. Nella fig. 45 sono mostrate le linee di forza del campo elettrico fra fotocatodo e SiEM. Si notano l'inversione delle linee di forza nelle due figure. Il posizionamento ottimale in cui lo spot copre la superficie del SiEM è ben individuabile.

Nella fig.46 sono mostrate le simulazioni dello spot dei fotoelettroni sul SiEM in funzione della distanza fra fotocatodo e SiEM. Questa simulazione aggiunge una informazione topologica e indica, non solo le dimensioni dello spot dei fotoelettroni ad una certa distanza dal fotocatodo, ma anche la densità dei fotoelettroni all'interno dello spot. Sotto le stesse ipotesi di lavoro, 3kV sul fotocatodo e sull'anello di

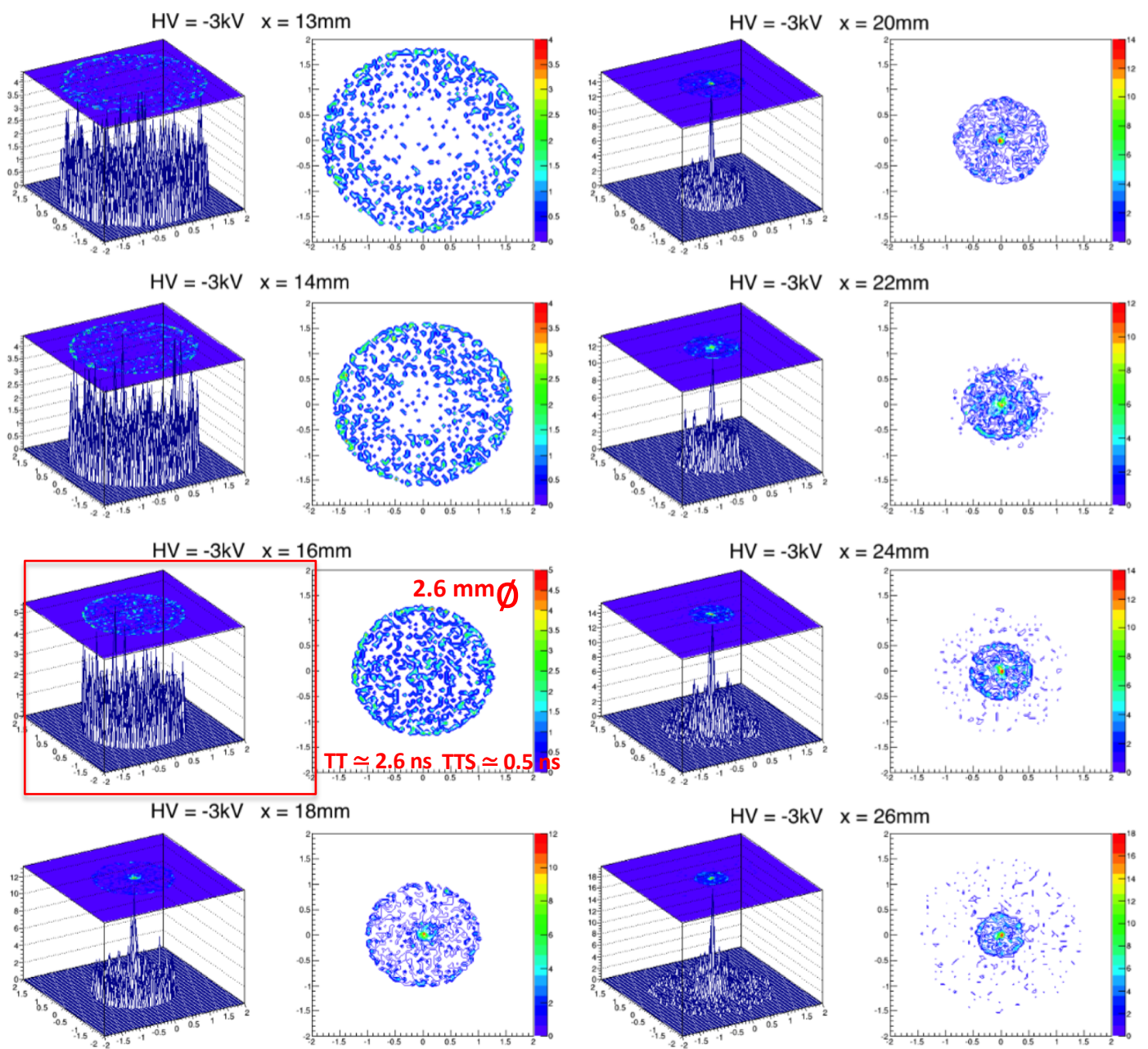


fig.46: densità dei fotoelettroni nello spot

focalizzazione con dimensioni 25 mm (circa 1 pollice) di diametro e altezza anello 10 mm, la condizione di focheggiamento migliore avviene ad una distanza dal fotocatodo pari a 16mm fig.47. Lo spot è uniforme, il tempo di transito dei fotoelettroni e lo spread temporale dovuto alle traiettorie è rispettivamente 2,6ns e 0,5ns. Con queste specifiche viene assemblato il prototipo “LEGO”. Due test vengono fatti preliminarmente prima di illuminare il fotocatodo:

-il primo deve assicurare che, in assenza di segnale su fotocatodo, i dark counts dell'intero VSiPMT siano uguali a quelli del SiEM con e senza alimentazione al fotocatodo.

-il secondo deve assicurare che il SiEM non rilevi i fotoni VUV che non interagiscono, quindi non generano fotoelettroni, sul fotocatodo. Questi fotoni passanti creerebbero dei impulsi pre-pulse. Nessuno dei due fenomeni è stato registrato.

A questo punto il primo passo è verificare sperimentalmente la corretta posizione del SiEM validando così le simulazioni che sono state descritte precedentemente. Il SiEM è montato su un supporto mobile lungo l'asse di simmetria del “LEGO”, fig.38, 45. Illuminando con luce a $\lambda=164\text{nm}$ il fotocatodo e spostando, avvicinandolo o allontanandolo dal fotocatodo, il SiEM si ottengono le curve mostrate in fig.47.

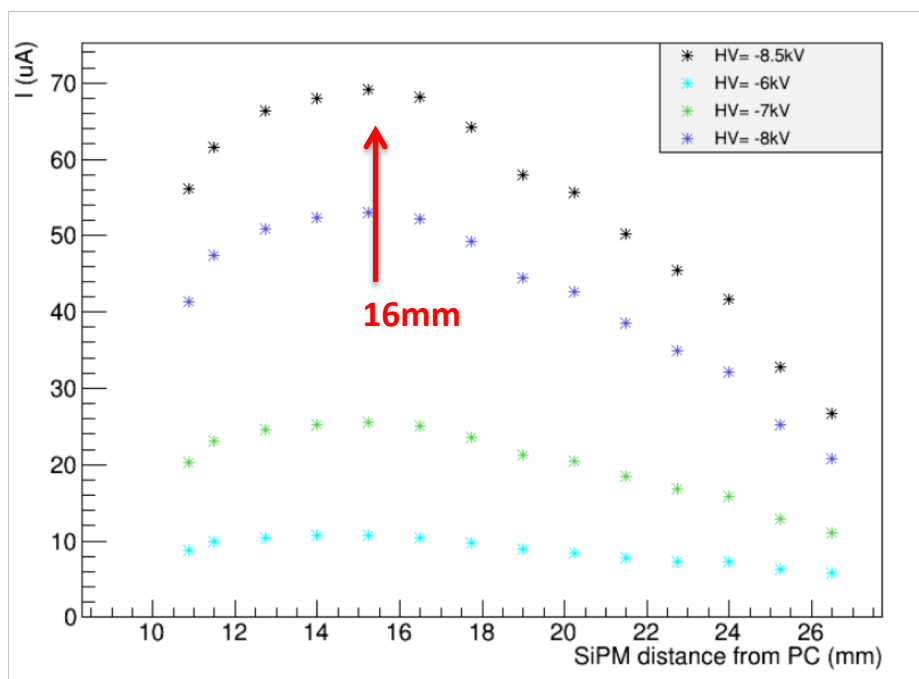


fig.47: curva di risposta del prototipo “LEGO” di VSiPMT a $\lambda=164\text{nm}$ in funzione della sua posizione: plateau dello spot fra 15 e 17 mm.

Dalla figura si ricavano due informazioni importanti.

-la prima è che la posizione ottimale del SiEM è ovviamente quella corrispondente alla massima risposta del SiEM cioè alla maggiore efficienza. Infatti se il SiEM è ad una distanza tale dal fotocatodo da avere uno spot più grande delle dimensioni del SiEM una parte dei fotoelettroni non sarebbe rivelata con relativa perdita di efficienza. Se invece il SiEM è ad una distanza tale da avere uno spot più piccolo delle dimensioni del SiEM, pur essendo conservata l'efficienza, alcuni fotoelettroni potrebbero finire nella stessa cella con conseguente perdita di segnale di uscita e di dinamica. Quindi il punto massimo delle curve di fig.47 indicano la corretta posizione del SiEM.

Test prototipo "LEGO"

Il punto massimo della curva in fig.47 corrisponde ad una posizione del SiEM a 16mm dal fotocatodo esattamente come previsto dalle simulazioni. In piu' si puo' osservare dalle curve che la posizione non è particolarmente critica entro il mm. Dal punto di vista costruttivo è ampiamente sostenibile.

-la seconda informazione mostra che la curva di efficienza del SiEM cresce all'aumentare della tensione di alimentazione fra fotocatodo e SiEM. Per quanto già detto nella descrizione del SiEM a pag.6, all'aumentare della tensione aumenta l'energia impressa ai fotoelettroni e di conseguenza aumenta il range all'interno del SiEM. Cresce,quindi, la probabilità di trigger nella giunzione Geiger.

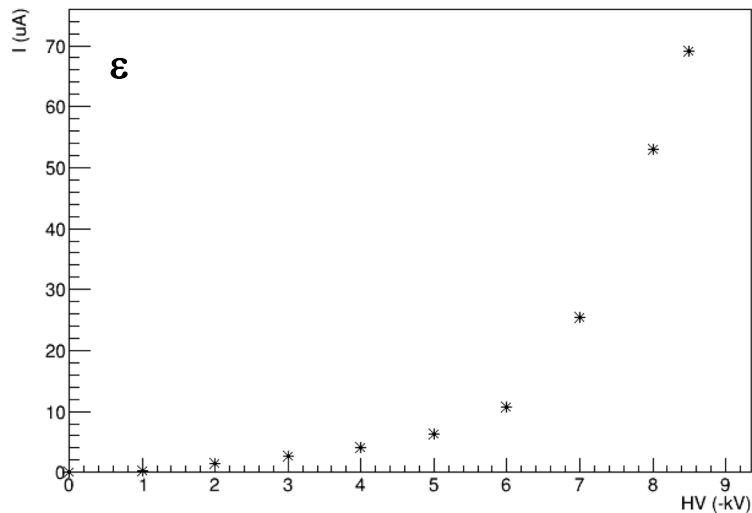


fig.48: efficienza totale del VSIPMT "LEGO"

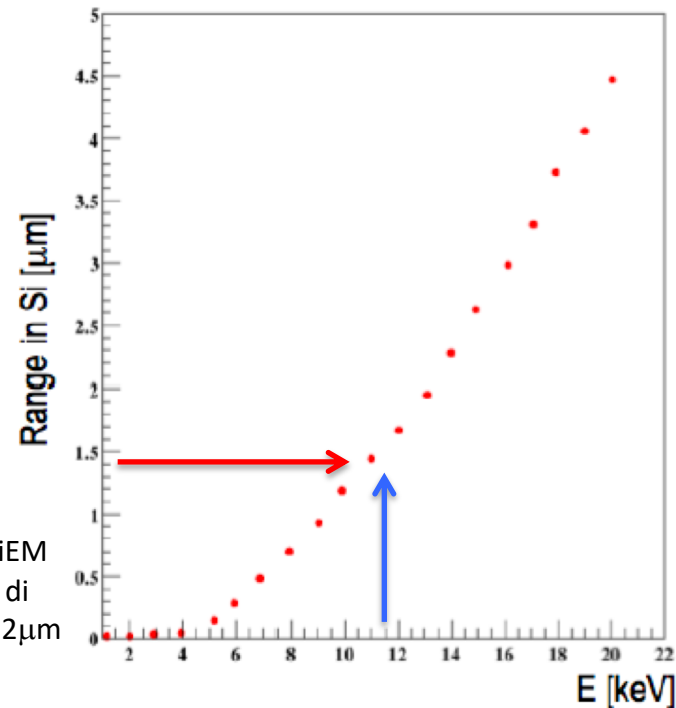


fig.49 range nel SiEM per uno spessore di passivazione di 1,2 μm

La fig.48 mostra l'efficienza totale del VSIPM "LEGO". Ci si aspetta una curva analoga alla figura fig.14. Con uno spessore di passivazione SiO_2 compreso fra 50-100 nm come prescritto dalle simulazioni a pag.9 il plateau di efficienza di trigger si sarebbe dovuto raggiungere intorno ai 3-4kV (fig.14).

Nella fig. 48 non e' visibile un plateau. E' possibile quindi che lo spessore dello strato di passivazione utilizzato dall'industria non sia 50-100 nm ma superiore. Infatti da una misura fatta nel nostro dipartimento con uno spettrofotometro ad interferenza questo spessore risulta di 1,2 μm . Con questo spessore la tensione fra fotocatodo e SiEM per avere un plateau dovrebbe essere dell'ordine di 12kV (fig. 49).

Si deve procedere con ulteriori campioni dello spessore corretto. FBK (Fondazione Bruno Kessler Trento) ha prodotto campioni da 10 nm di spessore di passivazione attualmente sotto test.

Anche se il prototipo non raggiunge la piena efficienza a causa di una realizzazione non idonea dello strato di passivazione del SiEM, è possibile comunque dimostrare la buona funzionalità del VSIPM "LEGO".

Posto il SiEM ad una quota di 16 mm di distanza dal fotocatodo al centro del plateau (fig. 47 e 50), tenuto conto dell'eccessivo spessore dello strato di passivazione del SiEM, si pone la tensione fotocatodo SiEM al più alto valore possibile, 8.5kV (fig.47,50).

Su questa base si illumina il fotocatodo con con fotoni di lunghezza d'onda $\lambda=164$ nm con intensità crescente. La curva di fig.51 mostra una notevole linearità rispetto ai fotoni (fotoelettroni) in ingresso.

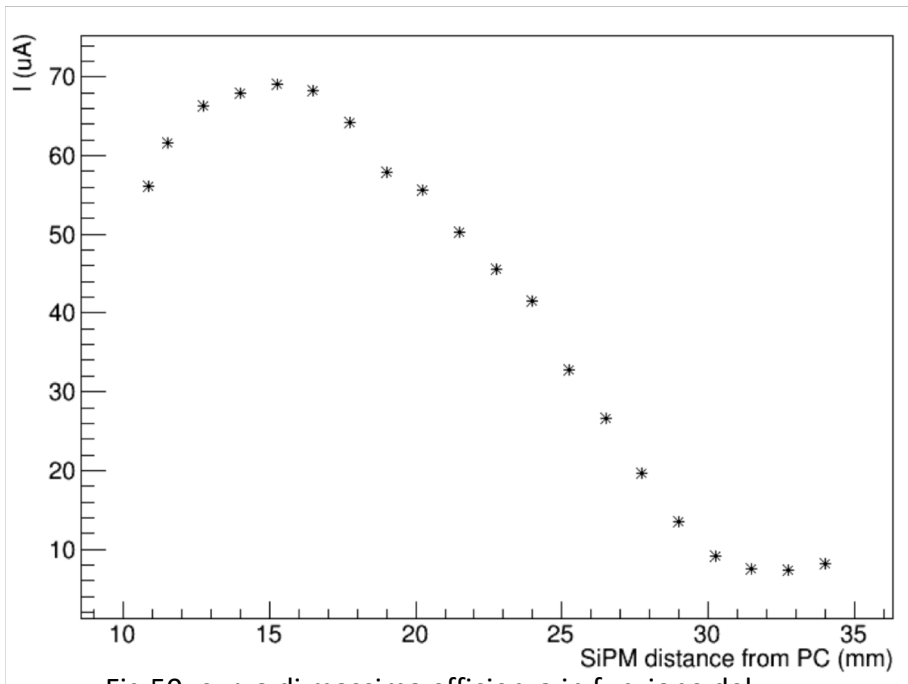


Fig.50: curva di massima efficienza in funzione del Posizionamento del SiPM alla tensione fotocatodo SiEM di 8,5kV.

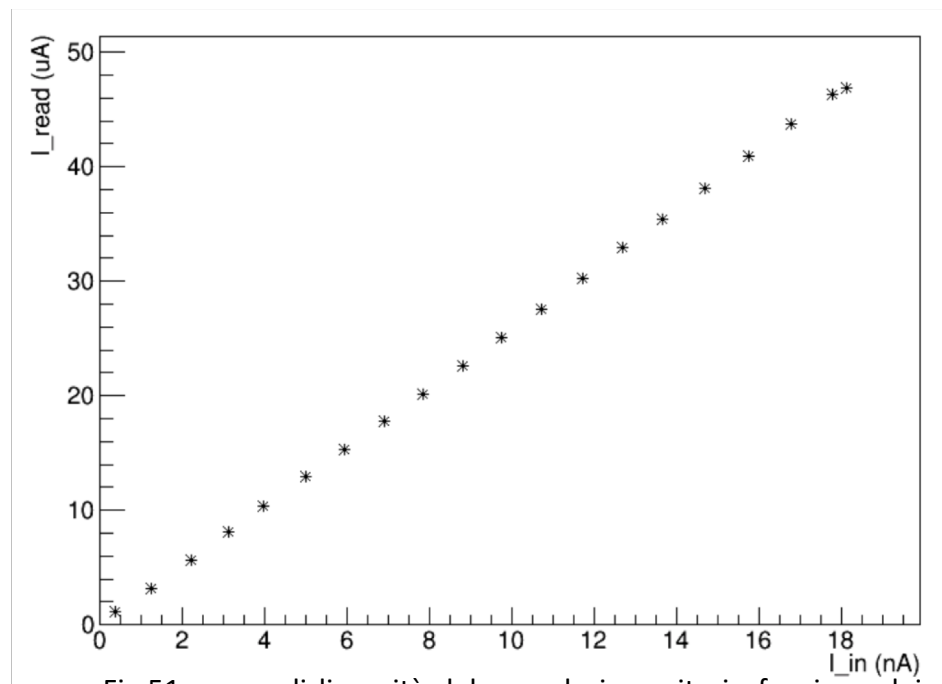


Fig.51: curva di linearità del segnale in uscita in funzione dei fotoni (fotoelettroni) in ingresso nelle condizioni di fig. 46

Parte 2°

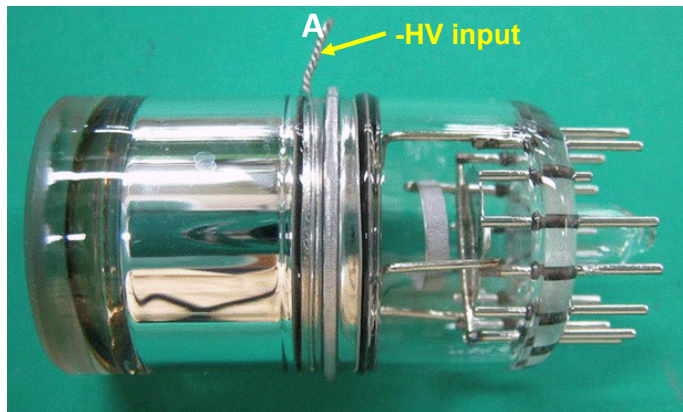
**Primo prototipo industriale
del fotomoltiplicatore VSiPMT
da 1 pollice.**

2017

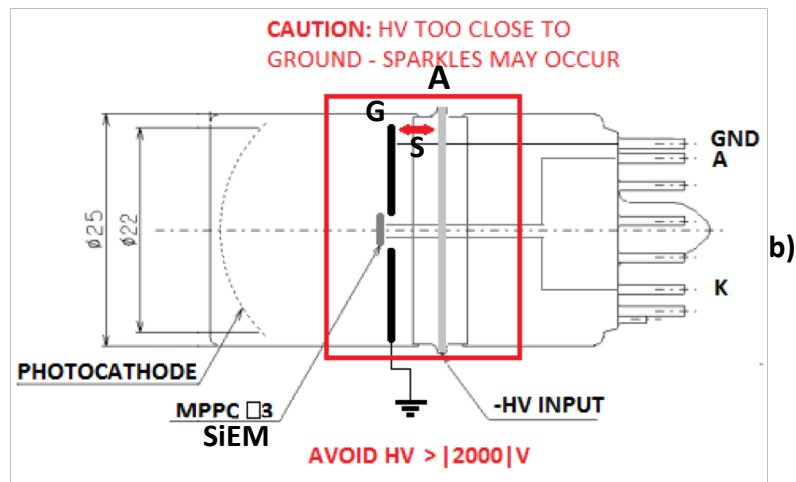
TRL 5-6

Il primo prototipo industriale Hamamatsu da 1 pollice

Il prototipo "LEGO" ha avuto una importanza determinante per definire i parametri costruttivi per realizzare il primo prototipo industriale. Sulla base degli accordi collaborazione e di riservatezza intercorsi fra il nostro gruppo di ricerca e Hamamatsu, quest'ultima ha prodotto a livello industriale il primo VSIPMT da 1 pollice di fotocatodo che è mostrato nella figura 52. Le caratteristiche del dispositivo sono mostrate nella tabella 4 nella pagina seguente.



a)



b)

Fig.52: primo VSIPMT industriale prodotto esclusivamente per questa ricerca da Hamamatsu.

In questa figura è possibile notare la posizione del fotocatodo e la posizione del SiEM. Va subito segnalato un **difetto costruttivo** che sarà risolto nei prossimi prototipi già segnalato alla ditta con un report. Come si nota dalla figura 52 b la massima tensione consigliata fra fotocatodo e SiEM è 2 kV. Ciò è dovuto alla troppa piccola distanza **S** fra un riferimento di massa **G** e il punto di alta tensione **A**. Come si vedrà questo incide l'efficienza del dispositivo ma non altera le eccellenti proprietà del VSIPMT.

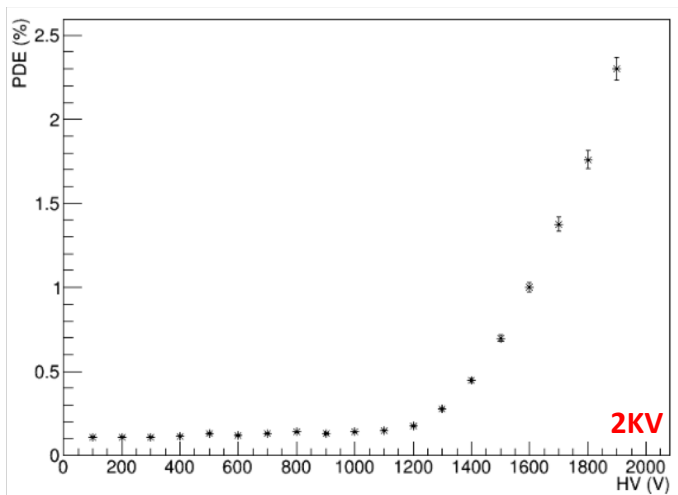


fig.53 efficienza del VSIPMT in funzione di H.V.

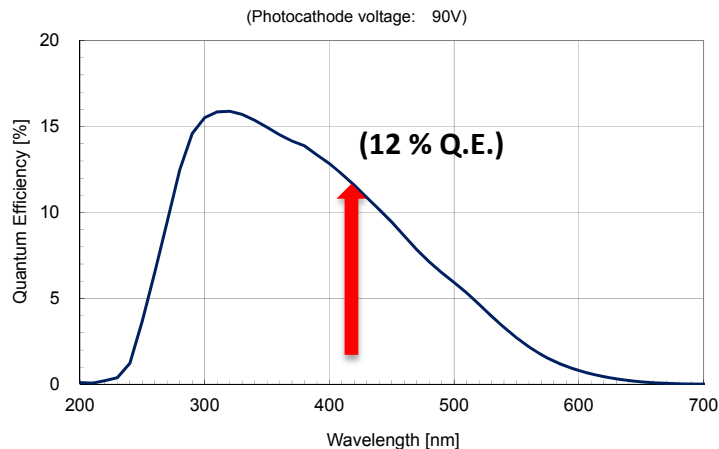


fig.54: efficienza quantica del fotocatodo del VSIPMT

Specifications and Maximum Ratings

Specifications

Parameter		Value	Unit
Spectral Response		200 to 650	nm
Photocathode	Material	Bialkali	-
	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 ^{*1}	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

Efficienza

Come si è visto già nel primo prototipo, fig.14, la presenza di un plateau nell'efficienza significa che, a parte fattori costanti nella formola a pag.13, l'energia acquistata dai fotoelettroni è tale da farli penetrare nella giunzione SiEM Geiger, $\epsilon_{\text{trigger}}=1$. L'efficienza e' allora:

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{photocathode}} \times \epsilon_{\text{fill-factor-SiEM}} \times \epsilon_{\text{focusing}} \times \epsilon_{\text{trigger}}$$

Invece la curva di figura 53 mostra l'assenza di un plateau. La limitazione a 2kV del dispositivo limita l'efficienza totale. Alla tensione massima di 2kV l'efficienza si puo' scrivere come:

$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{photocathode}} \times \epsilon_{\text{fill-factor-MPPC}} \times \epsilon_{\text{trigger}} \times \epsilon_{\text{focusing}}$$

$$0,023 \approx 0,12 \times 0,78 \times 0,21 \times 1$$

Dalla curva di fig. 53 a 2kV si ricava una efficienza totale di 0,023. Come si vede dalla formola si ricava l'efficienza di trigger che risulta essere 0,21. Gli altri tre termini dell'efficienza sono delle costanti:

- il primo è l'efficienza di fotocatodo e si ricava dalla fig.54 usando un laser nella regione del visibile (freccia),
- il secondo è l'efficienza geometrica (superficie attiva pixel/superficie totale SiEM) (0,78) (3mmx3mm con pixel da 100 μ m x 100 μ m)
- il quarto è l'efficienza di focheggiamento sul SiEM che, come si è visto, dalle simulazioni è facilmente assimilabile a 1, se il SiEM è correttamente posizionato rispetto al fotocatodo.
- solo il terzo termine è funzione della tensione di alimentazione fotocatodo-SiEM. Se non è sufficiente in relazione allo spessore del SiEM l'efficienza non è piena. In queste ipotesi Se l'efficienza di trigger fosse 1, arrivando cioè alle tensioni del precedente prototipo dimostratore Hamamatsu pag.14, 3-4kV, l'efficienza sarebbe:

$$0,093 \approx 0,12 \times 0,78 \times 1 \times 1$$

Ovviamente l'efficienza piena scritta sopra potrebbe essere raggiunta anche ad una tensione di 2kV. Però sulla base delle simulazioni,fig.8, lo spessore del SiEM sarebbe dovuto essere non superiore a 50nm (fig.8).

In ogni caso, anche con efficienza non piena il funzionamento del nuovo VSIPMT è eccellente: la fig.55 mostra gli impulsi in uscita e gli spettri di carica quando il fotocatodo del VSIPMT è illuminato da un impulso laser contenente in media 5-6 fotoni. Nel riquadro il confronto con impulsi e spettri di carica di un classico fotomoltiplicatore. In quest' ultimo non è possibile individuare la struttura dei fotoni.

Su questo prototipo da 1 pollice è stato montato, in accordo con le simulazioni già descritte un SiEM da 3mmx3mm con pixel da 100 μ m x 100 μ m per un totale di 900 pixel. Come già è stato detto, questo rivelatore ha una dinamica molto flessibile poiché dipende geometricamente solo dal numero di pixel.

Più avanti (appendice A) si vedrà che di recente sono state implementate giunzioni Geiger sempre più sofisticate, non solo nel numero di pixel sempre più elevato, ma anche nelle prestazioni in termini di guadagno e dark counts. Questo nuovo dispositivo VSIPMT si potrà nel futuro avvalere, diversamente dal classico fotomoltiplicatore, di una tecnologia a semiconduttore destinata ad avere continui miglioramenti.

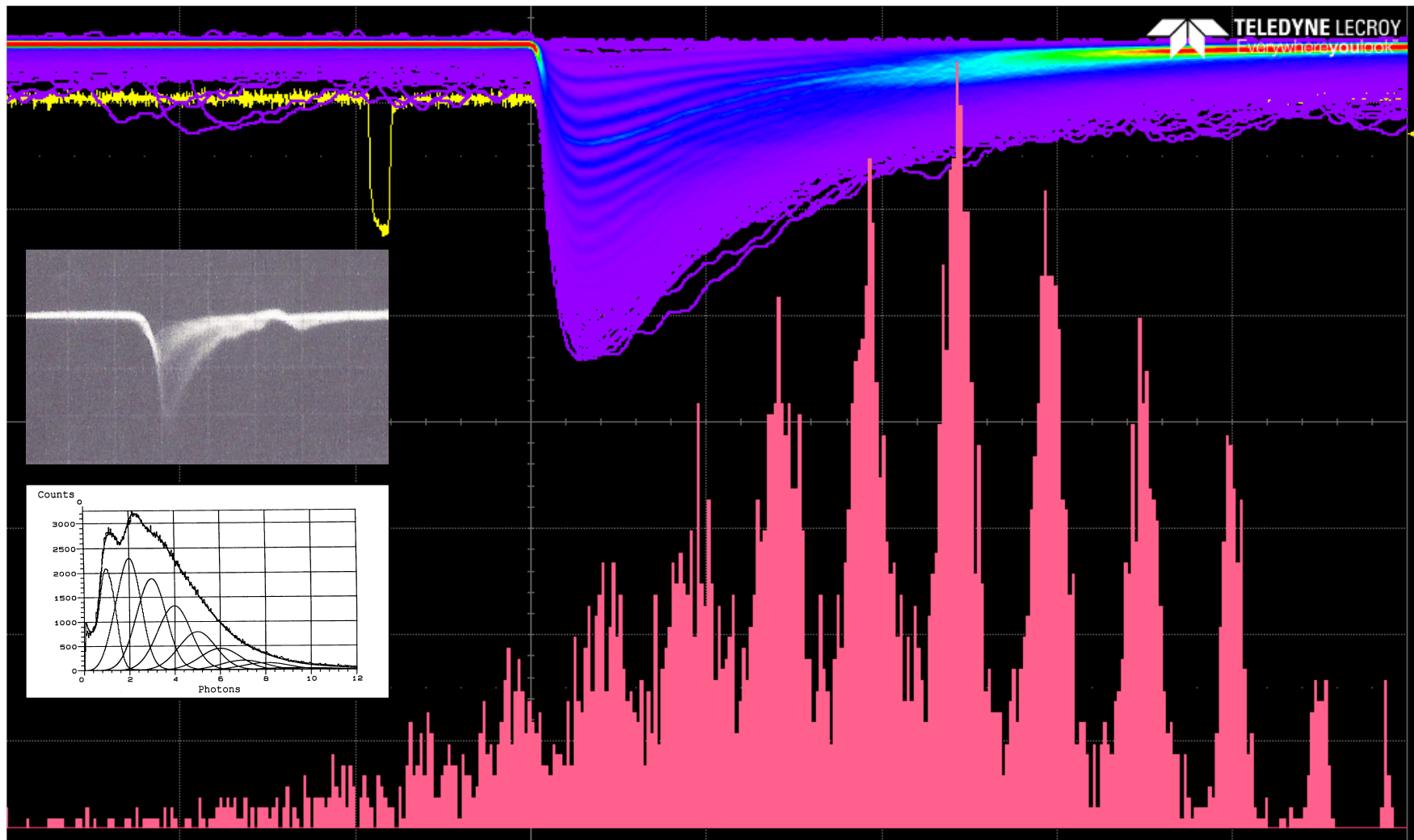


fig.55: impulsi in uscita del VSIPMT da 1 pollice e spettri di carica quando è illuminato da un laser contenente in media 5-6 fotoni. Netamente visibili le strutture dei singoli fotoni. Nel riquadro il confronto con impulsi e spettri di un classico fotomoltiplicatore.

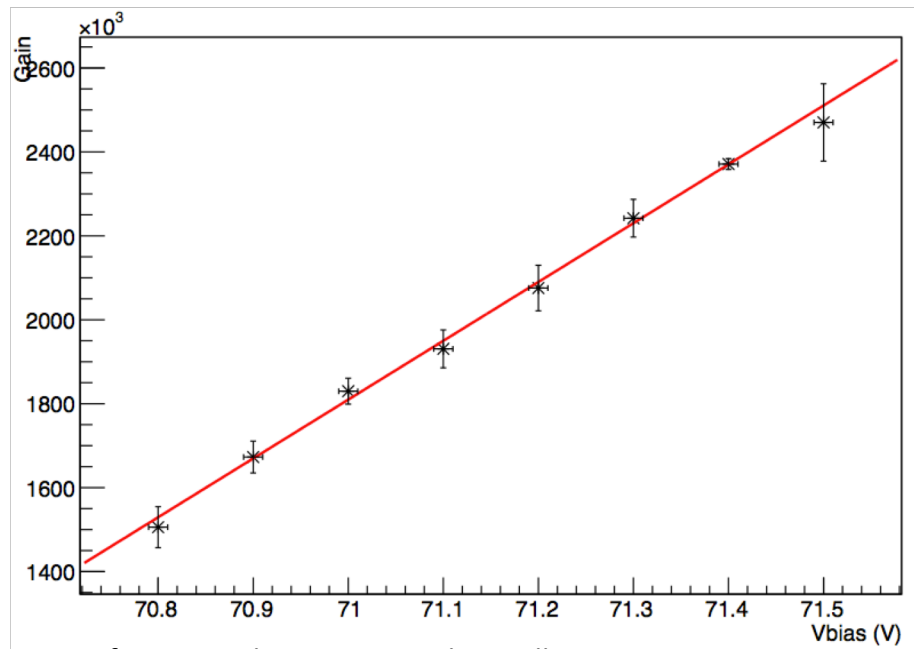


fig.56: guadagno VSiPMT da 1 pollice

Guadagno

In fig.56 è mostrato il guadagno del rivelatore in funzione della tensione di alimentazione del SiEM. Questo guadagno è già confrontabile con quello tipico di un classico fotomoltiplicatore. Come si vedrà più avanti questo guadagno con ulteriori evoluzioni dei SiPM/SiEM può aumentare.

Dinamica

Come è illustrato nella fig.16, la dinamica ottimale si ottiene quando lo spot dei fotoelettroni sul SiEM è un cerchio perfettamente iscritto nel quadrato del SiEM, fig.58.

Per misurare la corretta focalizzazione dei fotoelettroni, come già fatto nei precedenti prototipi, è sufficiente illuminare tutto il fotocatodo con un numero di fotoni molto maggiore del numero delle celle del SiEM. L'impulso in uscita, fig 58, deve essere di ampiezza corrispondente a 700 celle accese se si vuole essere nella condizione di dinamica ottimale (cerchio blu, fig.59). Come si vede dalla fig.58 il massimo numero di celle accese è circa 900. Ciò significa che la condizione di lavoro è quella corrispondente al cerchio rosso, cioè tutto il SiEM acceso, quindi una condizione sotto-focalizzata.

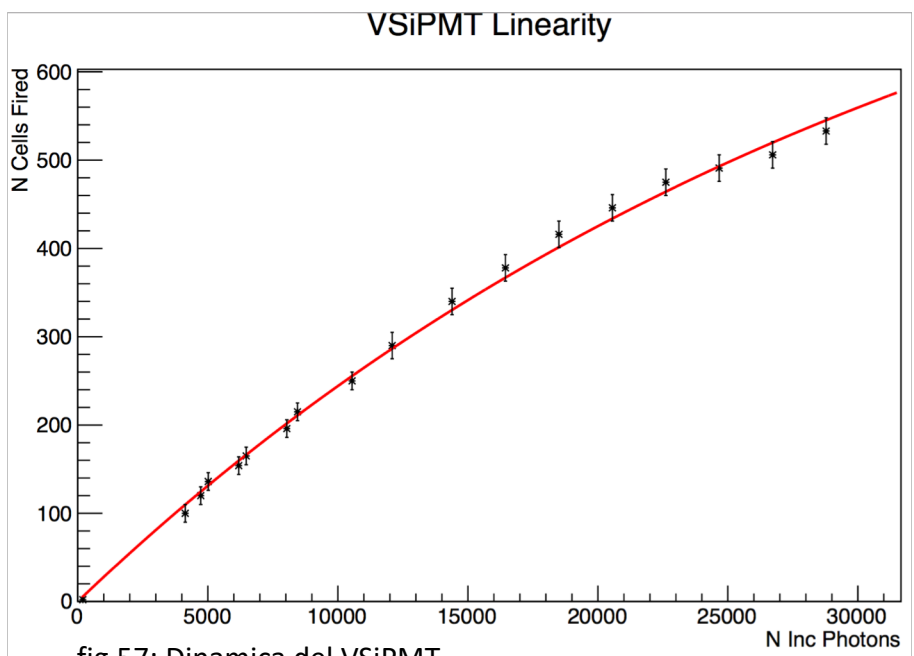


fig.57: Dinamica del VSiPMT

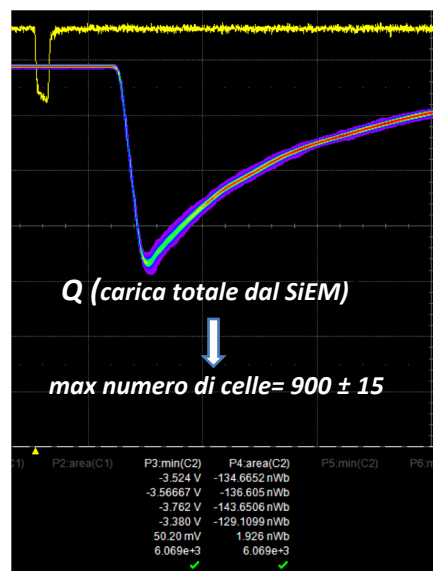


fig.58: massimo impulso dal VSiPMT

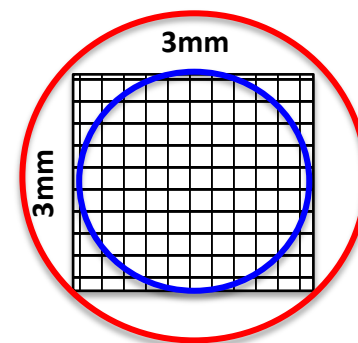


fig.59: dinamica ottimale:
Cerchio blu

E' probabile che ciò possa dipendere anche dalla limitata possibilità di salire oltre i 2kV di tensione fra fotocatodo e SiEM. E' possibile ottenere la stessa informazione dalla curva della dinamica di figura 57. Come si è già visto, fig.17, la curva può essere interpolata con la formula:

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left[1 - \exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}\right) \right]$$

N_{fired} : Number of excited pixels
 N_{total} : Total number of pixels
 N_{photon} : Number of incident photons

Ricavando così la PDE = $(2.77 \pm 0.12) \%$ e il numero totale di celle = 945 ± 100 . Questi valori sono compatibili con quelle ottenute da misure dirette di efficienza e dinamica, fig.53 e fig.58. Cio significa che $\epsilon_{\text{focusing}}$ vale 0,64 (rapporto quadrato SiEM/cerchio esterno rosso) per cui la formula dell'efficienza di pag. 39 va così rielaborata:

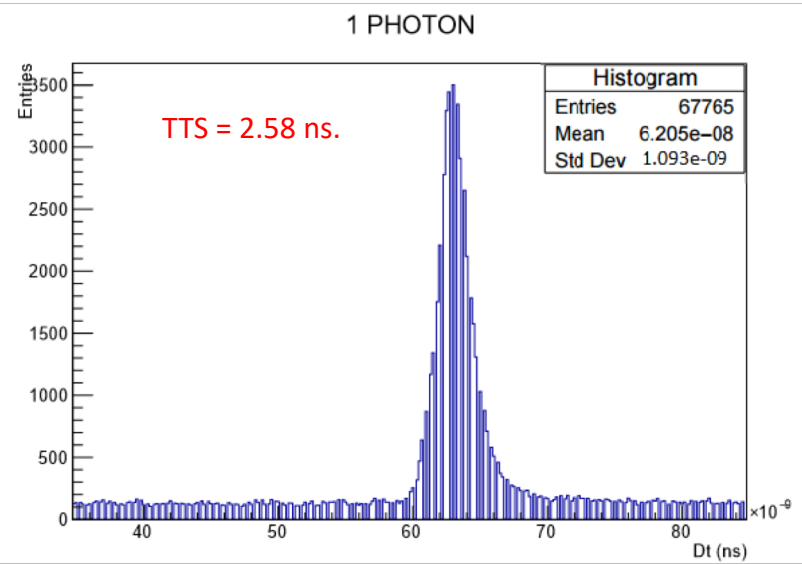


fig.60: risoluzione temporale di singolo fotone

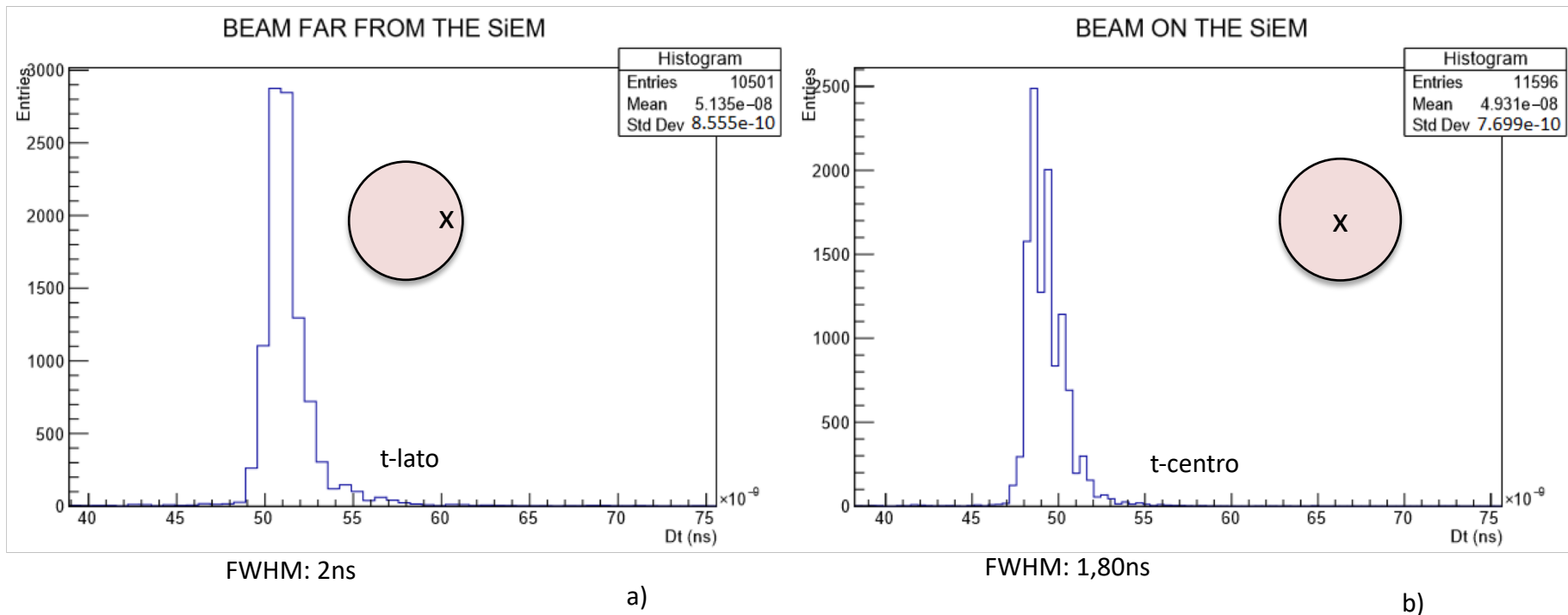
$$\epsilon_{\text{total}} = \epsilon_{\text{photocathode}} \times \epsilon_{\text{fill-factor-MPPC}} \times \epsilon_{\text{trigger}} \times \epsilon_{\text{focusing}}$$

$$0,023 \approx 0,12 \times 0,78 \times 0,38 \times 0,64$$

solo il 38% dei fotoelettroni sono in grado di formare la valanga geiger.

Risoluzione temporale

La risoluzione temporale, legata al transit time spread TTS di singolo fotone, che colpisce in un punto qualsiasi il fotocatodo è mostrata in fig.60. Il valore di 2.58 ns è riferito al TTS di singolo fotone. La fig.61 mostra il TTS ottenuto con lo spot del laser al centro e a lato che sono rispettivamente 2ns e 1,80 ns.



Come evidenziato nella fig.9, questo spread temporale dipende solo dalla differenza di traiettorie dei fotoelettroni (centro e lato del fotocatodo) e molto poco dal processo di moltiplicazione che in questo dispositivo, giunzione p-n geiger per 100 fotoelettroni e' di circa 70 picosecondi (fig.10). Da notare che i due effetti si sommano in quadratura. Infine nella figura 62 è mostrata la risoluzione temporale quando 100 fotoni incidono random sul fotocatodo. Si evince da queste misure che le prestazioni temporali di questo nuovo dipositivo sono eccellenti molto allineate con quelle ottenute da un classico fotomoltiplicatore. La scelta, quindi, di questo sistema di moltiplicazione non costituisce problema per le prestazioni temporali.

fig.61: differenza dei tempi di arrivo dei fotoelettroni quando il fotone incide al lato a) o al centro b) del fotocatodo.

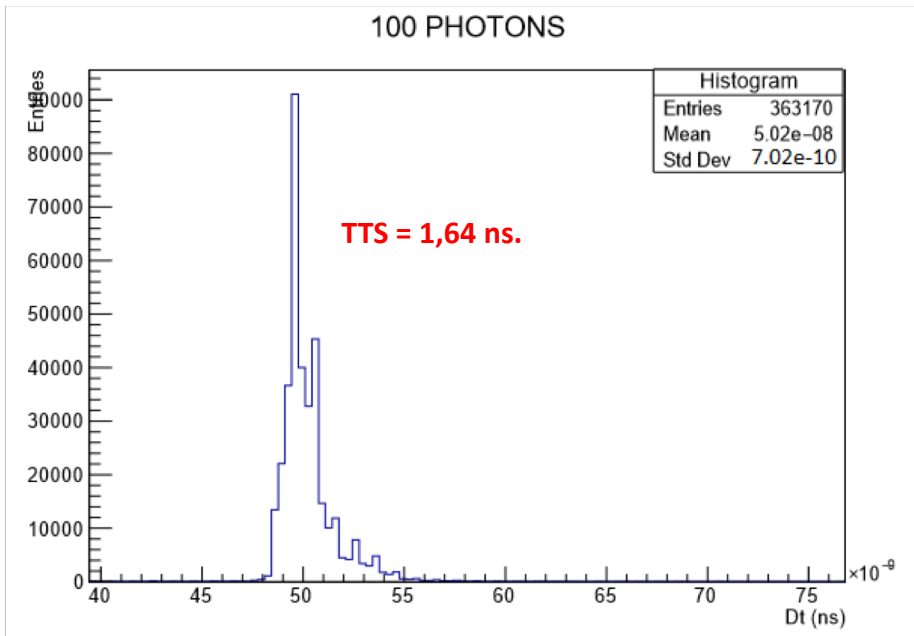


fig.62: Distribuzione dello spread temporale quando 100 fotoni in cidono random sul fotocatodo.

Uniformità del fotocatodo

Un ultima misura che dimostra l'omogeneità del fotocatodo è quella mostrata in fig.63. E' ottenuta utilizzando un laser e facendo lo scan x-y lungo la superficie del fotocatodo e riportano per ogni punto la carica raccolta.

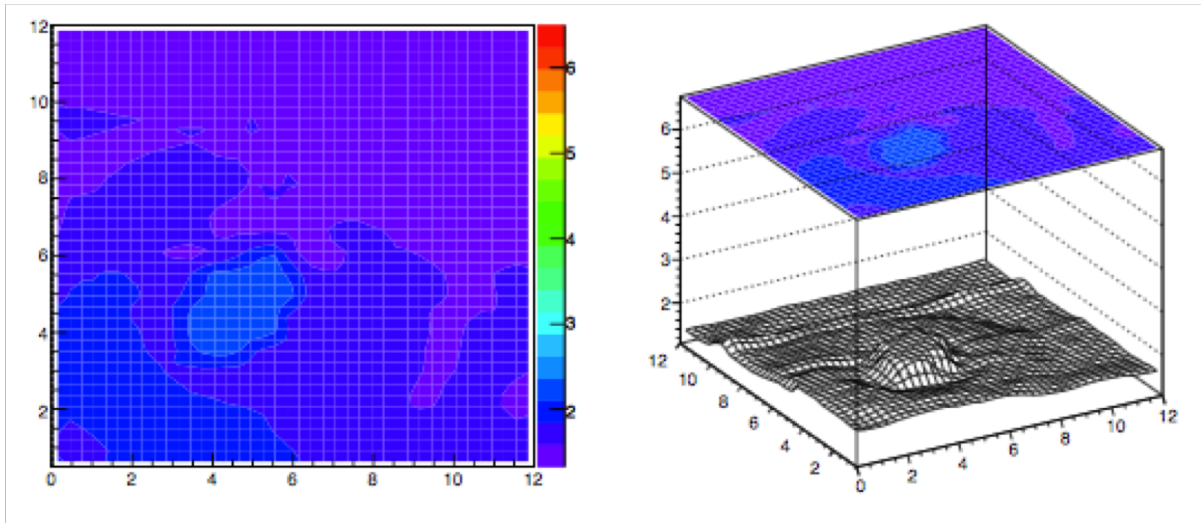


fig.63: Distribuzione della carica in uscita in corrispondenza di una scansione laser x-y del fotocatodo. Qui e' mostrata la uniformità del fotocatodo.

Parte 3°

**Prima produzione industriale
del fotomoltiplicatore VSiPMT.**

maggio 2018

**Pieno raggiungimento degli obiettivi
di progetto.**

TRL 7-8

I prototipi industriali da due pollici

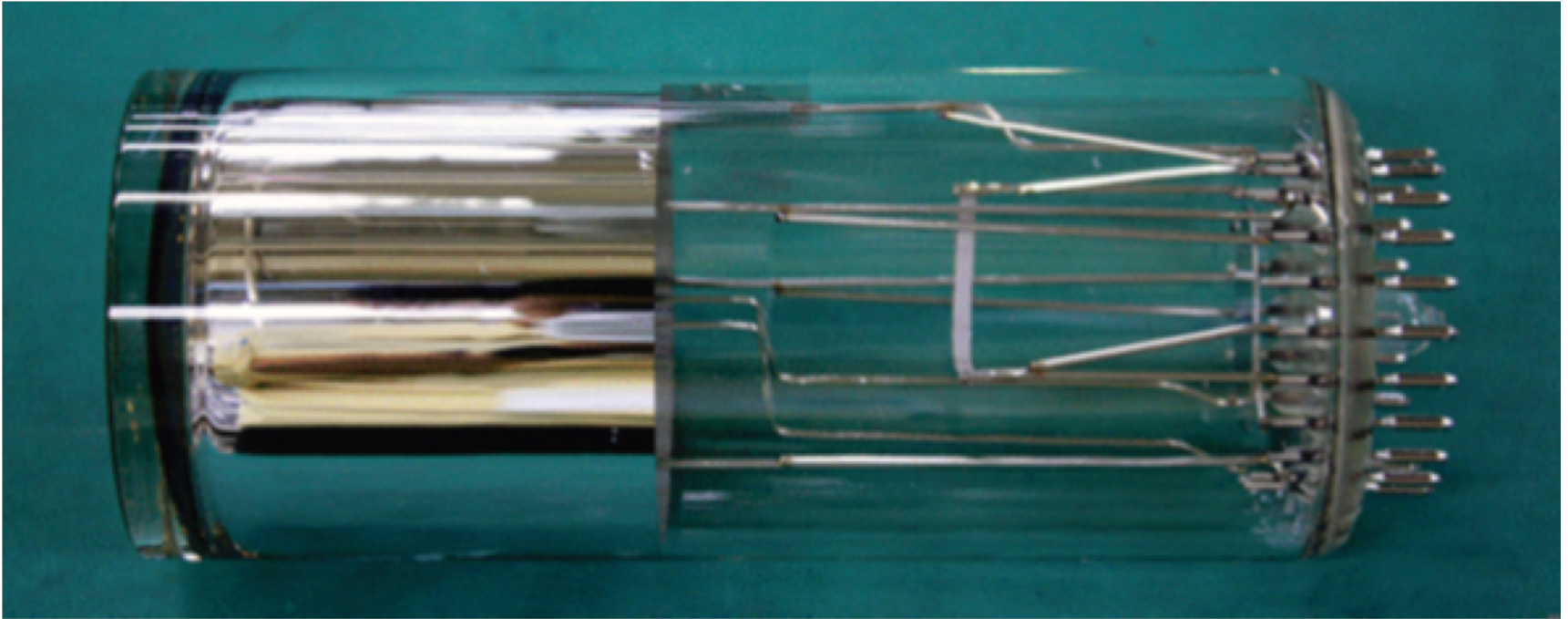


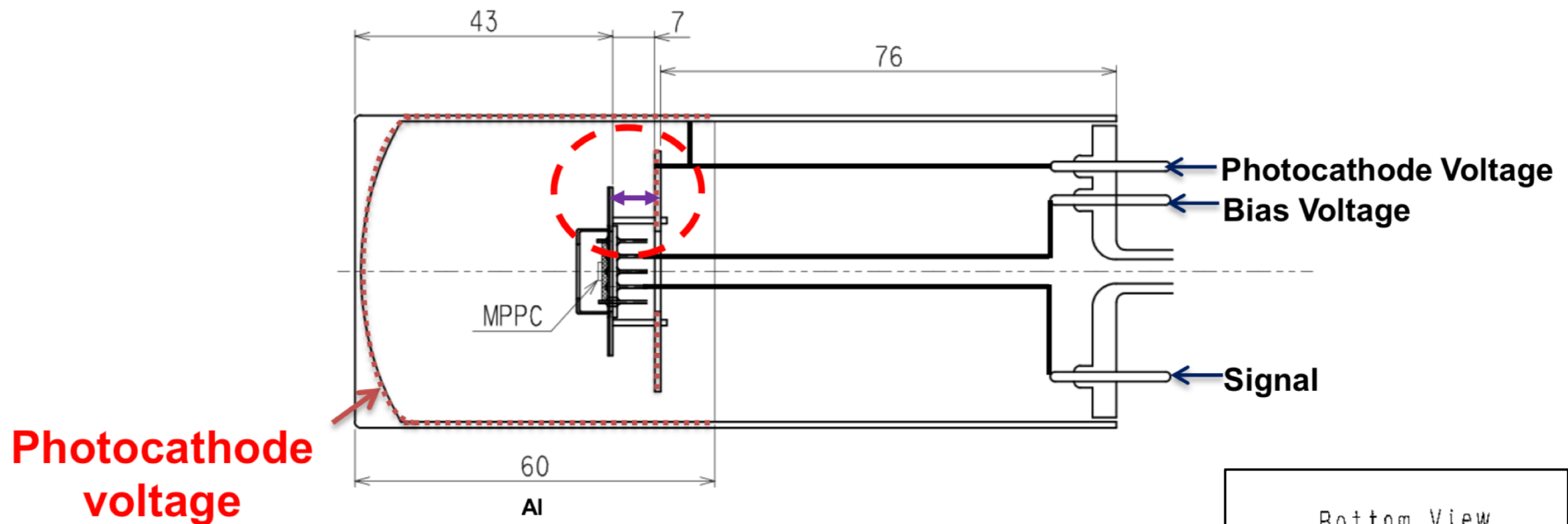
Fig.64

Nel 2018 Hamamatsu ha prodotto i primi prototipi di VSIPMT con fotocadoto da due pollici, lo ZJ9496 e lo ZJ9498. Il fotocadoto è un fotocadoto bialcalino da 46mm di diametro ed entrambi i prototipi presentano un anello di focalizzazione alto 60mm. I prototipi sono esteriormente identici (fig. 64), differiscono tra loro soltanto per il SiEM installato all'interno, contengono un SiEM di $3 \times 3 \text{mm}^2$, con pixel di $25 \times 25 \mu\text{m}^2$ (ZJ9496) e $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ (ZJ9498), e per l'efficienza quantica dei fotocatodi. Le caratteristiche costruttive e le proprietà dei due tubi VSIPMT sono mostrate nelle fig. 65,66,67.

La caratterizzazione del prototipo è stata eseguita all'interno di una dark box. È stato utilizzato un laser Hamamatsu con lunghezza d'onda $\lambda = 406 \text{nm}$ e durata dell'impulso 47ps. La luce è stata canalizzata sul VSIPMT tramite un beam splitter a due uscite, in modo tale da poter controllare in ogni istante la potenza emessa dal laser con un power meter. Il segnale prodotto dal VSIPMT è stato prima amplificato tramite un circuito di amplificazione realizzato ad hoc, basato su un amplificatore operazionale in configurazione invertente.

Construction of 2 inch HPD with MPPC

May 28, 2018



**Photocathode
voltage**

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

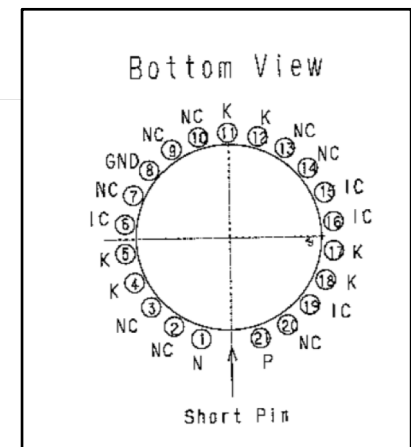


fig.65

Characteristics (at room temperature)

	Pixel Type (μm)	Photocathode Quantum Efficiency* ¹	MPPC Max. Reverse Bias Voltage	Max. Photocathode Voltage	Recommended Voltage
ZJ9496	25 x 25	33.0 %	+62.0 V	-2.0 kV	-1.5 kV, +61.0 V

*¹ At 350 nm

Photocathode Spectral Response

(Photocathode voltage: 90V)

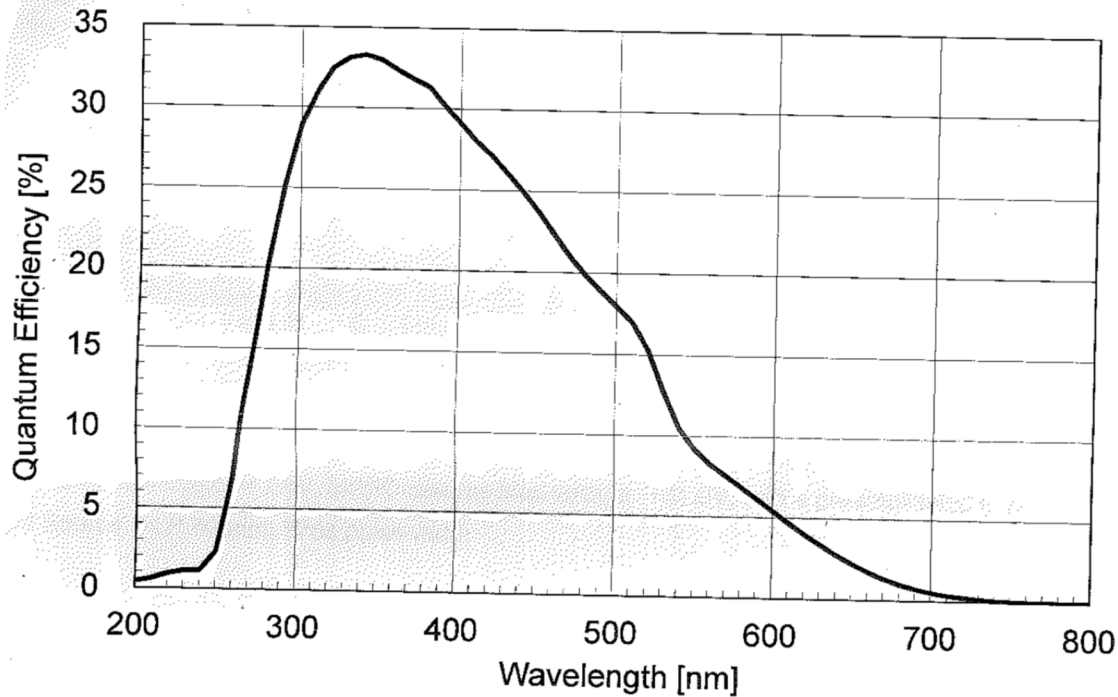


fig.66

Characteristics (at room temperature)

	Pixel Type (μm)	Photocathode Quantum Efficiency**1	MPPC Max. Reverse Bias Voltage	Max. Photocathode Voltage	Recommended Voltage
ZJ9498	50 x 50	33.3 %	+56.0 V	-1.8 kV	-1.0 kV, +55.0 V

**1 At 350 nm

Photocathode Spectral Response

(Photocathode voltage: 90V)

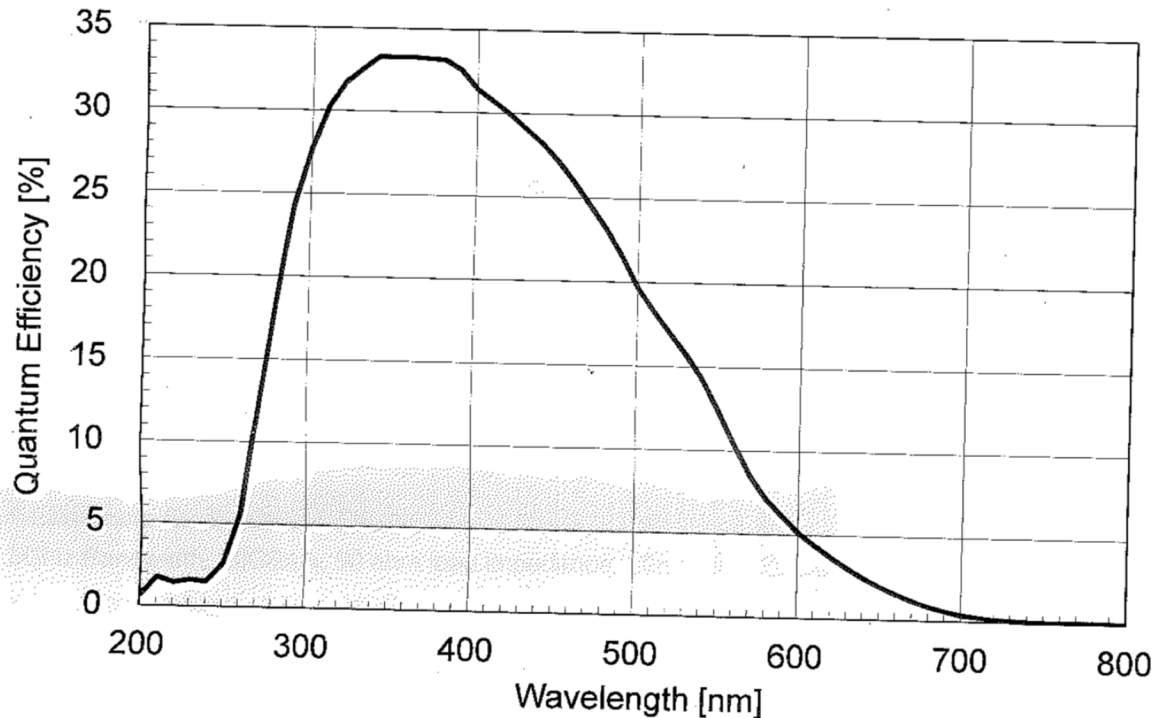


fig.67

I segnali in uscita e gli spettri di ampiezza e di carica sono mostrati nella fig. 68.

Nella fig.69 e' mostrato invece gli impulsi e gli spettri di carica quando un certo numero di fotoni vengono inviati con il laser sul VSIPMT. Si puo' notare la spettacolare risoluzione di singolo fotone e la notevole capacita del rivelatore al "photon counting".

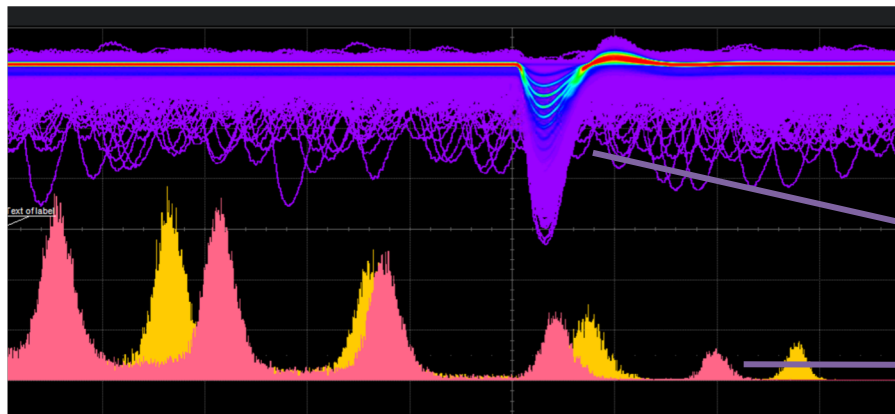


fig.68

Struttura dei fotoni nell'impulso.

Spettri di carica (giallo) e spettri altezza (rosa) degli impulsi.

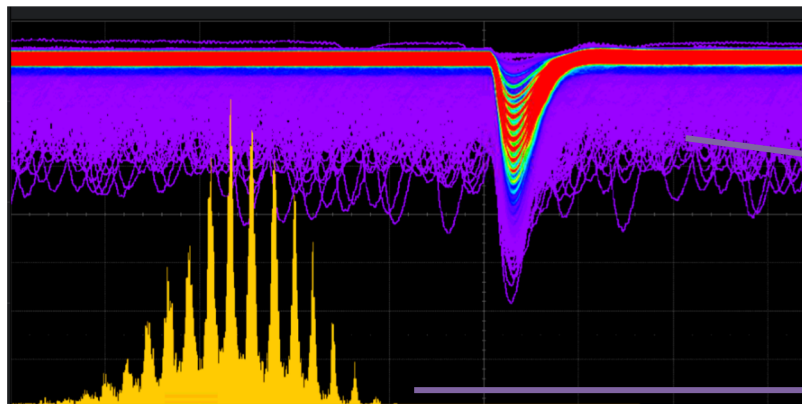
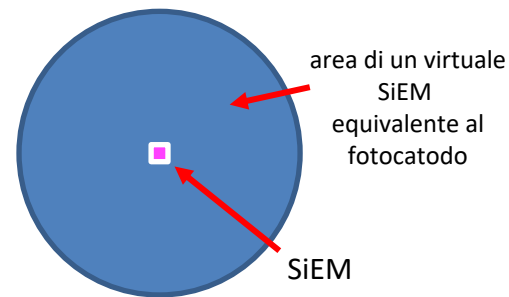


fig.69

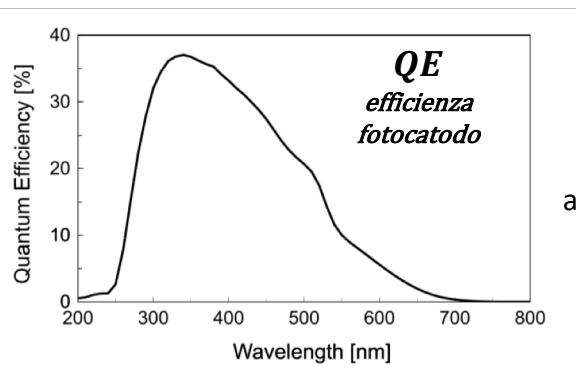
Struttura dei fotoni nell'impulso.

Spettro di 7 fotoni medi iniettati con il laser.

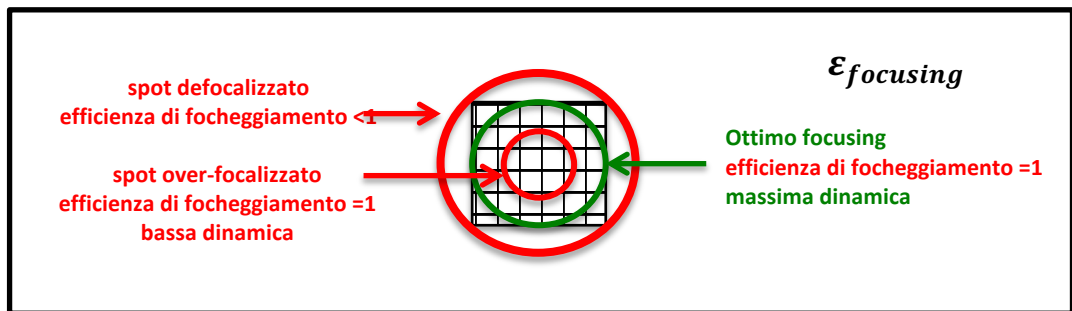
Efficienza di fotorivelazione

Come e' stato descritto a pag. 13 e 39 l'efficienza e' il prodotto di 4 fattori : $\epsilon_{total} = \epsilon_{photocathode} \times \epsilon_{fill-factor-SiEM} \times \epsilon_{focusing} \times \epsilon_{trigger}$
 Qui i termini li vogliamo esplicitare e riassumere anche figurativamente attraverso questa espressione di efficienza di fotorivelazione:

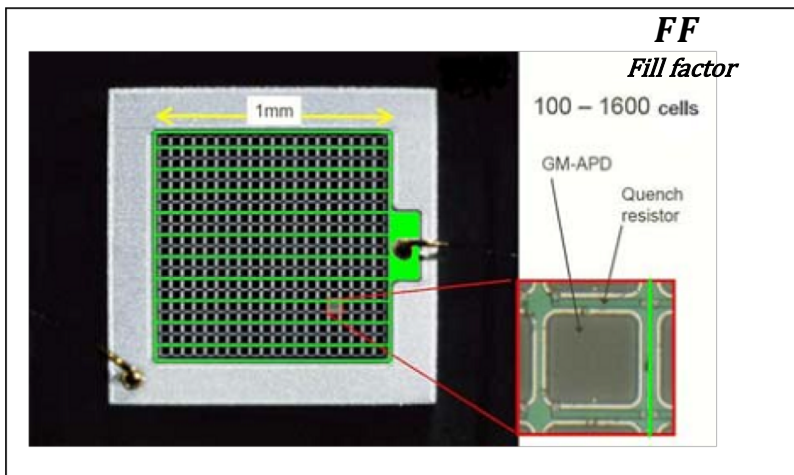
$$PDE = QE \cdot \epsilon_{focusing} \cdot FF \cdot \epsilon_{trigger}$$



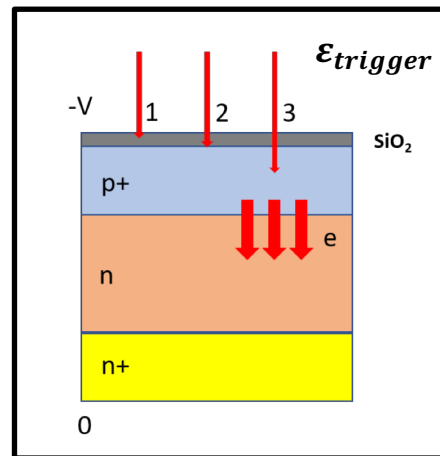
a



b



c



d

fig.70

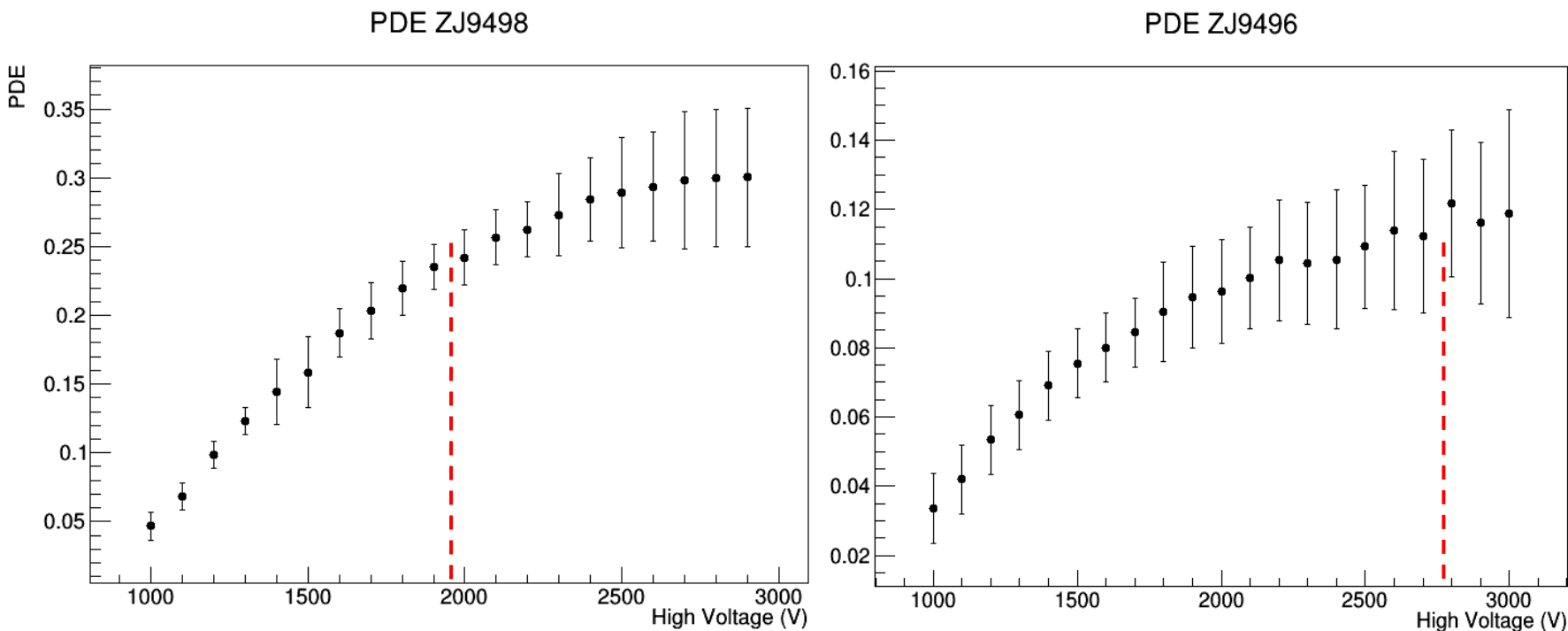
Come e' gia' stato illustrato nei prototipi precedenti, l'efficienza di fotorivelazione, PDE, e' una funzione fortemente dipendente dall'alta tensione di trasporto dei fotoelettroni dal fotocatodo al SiEM. Come gia' visto dovra' esistere a partire da una certa tensione un plateau dove $\epsilon_{trigger}$ vale 1 (fig.70 d), ossia i fotoelettroni entranti raggiungono la regione di moltiplicazione e innescano la moltiplicazione Geiger. Nell'ipotesi di un corretto "focusing" cioe' $\epsilon_{focusing} = 1$ (fig.70 b)

$$PDE = QE \cdot \epsilon_{focusing} \cdot FF \cdot \epsilon_{trigger} = 1$$

Sotto queste due condizioni la PDE nominale puo' essere ottenuta come:

$$PDE = QE \cdot FF$$

e vale per il prototipo ZJ9498 il **25%** mentre per lo ZJ9496 e' il **13%**.



$$PDE = QE \cdot FF = 25\%$$

$$PDE = QE \cdot FF = 13\%$$

Fig.71

- Le misure delle efficienze relative ai due prototipi portano alle seguenti considerazioni:
- le efficienze misurate coincidono ragionevolmente con il prodotto $QE \cdot FF$ ovvero efficienza quantica x fill factor il significa che l'efficienza di trigger oltre una certa tensione e l'efficienza di focusing sono uguali a 1.
 - e' possibile che, a tensioni relativamente alte, si noti una piccola over-efficienza compatibilmente con gli errori. Cio' e dovuto al fatto che l'alta tensione fra fotocatodo e SiEM produce oltre ai fotoelettroni generati attraverso la conversione dei fotoni, altri possibili fotoelettroni di fondo dovuti ad effetto termoionico ed effetto di campo elettrico. Effetti, peraltro identici e presenti anche in un classico fotomoltiplicatore.
 - l'alta tensione di efficienza piena e' 2000, 2500 volt. Cio' corrisponde ad uno spessore di passivazione del SiEM compreso fra 50 e 100 nm (fig. 8).

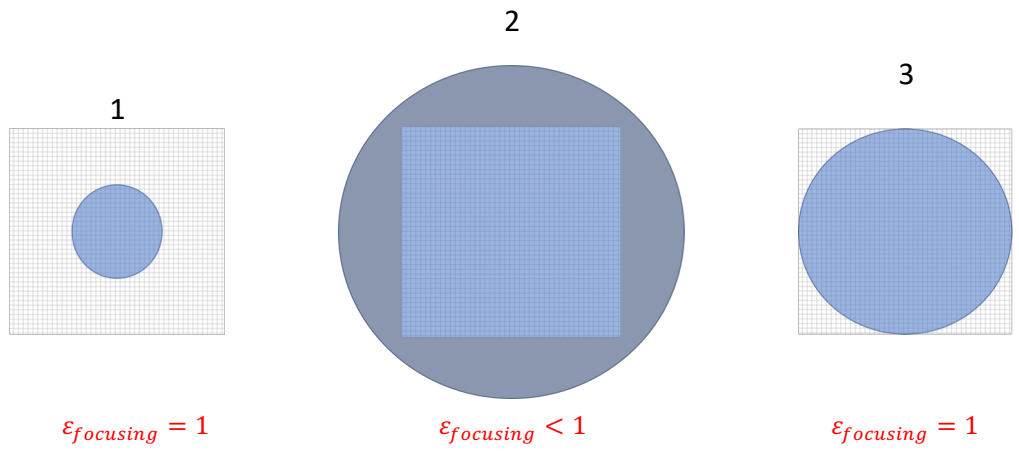


Fig.72

Come si e' visto l'efficienza di focusing risulta uguale ad 1. Come si e' visto anche per gli altri prototipi questa condizione ricade o nel caso 1, over focusing, o nel caso 3, perfect focusing, della fig.71.

Per avere informazioni maggiori in quale delle due condizioni di focusing opera il VSIPMT, come per gli altri prototipi, si possono seguire due strade:

- illuminare con molti fotoni (>> del n° dei pixel del SiEM) il fotocatodo, oppure misurare a numero di fotoni crescenti la risposta del rivelatore. Nel primo caso si accenderanno i pixels iscritti nel cerchio di focalizzazione (fig. 72-3). Nel secondo caso si misurera' la risposta proporzionale del SiEM fino alla saturazione dei pixels. Nel caso di molti pixels, alta dinamica, potrebbe risultare difficile vedere la saturazione del SIEM (fig.72-3) a causa della saturazione dell'amplificatore alla tensione di alimentazione (fig.73).

Dinamica

La fig. 73 mostra la dinamica del VSIPMT da 2 pollici. La proporzionalità del segnale in uscita rispetto al numero di fotoni in ingresso è notevole e certamente migliore di quella di un classico fotomoltiplicatore. Come già detto va sottolineato che in questo caso la dinamica in uscita dipende esclusivamente dal numero di pixel del SiEM ed è quindi un parametro geometrico indipendente da ogni altro. Diverso e più complesso è il caso del classico fotomoltiplicatore dove guadagno, linearità e alta tensione sono strettamente correlati.

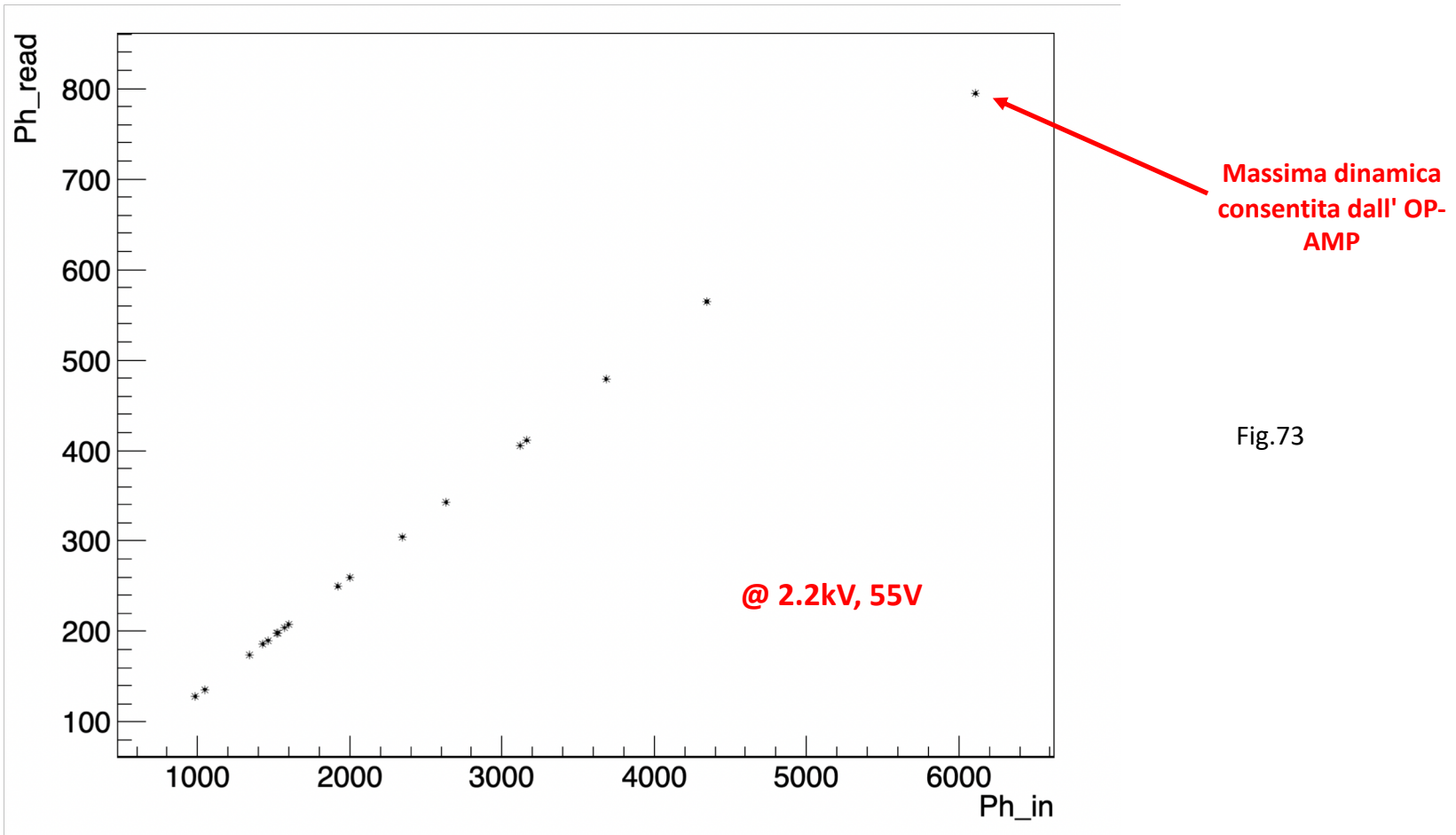


Fig.73

Guadagno

Il guadagno del VSiPMT e' mostrato nella fig.74. Va nuovamente sottolineato che:

- il guadagno e' dello stesso ordine di grandezza di quello ottenuto con un classico fotomoltiplicatore.
- il guadagno in bassa tensione rende l'operativita' del fotorivelatore estremamente piu' semplice rispetto al classico fotomoltiplicatore dove lo stesso guadagno e' ottenuto in alta tensione. Ne consegue che:
 - la stabilizzazione in bassa tensione per assicurare un guadagno costante e' certamente piu' semplice che una stabilizzazione in alta tensione.
 - il VSiPMT non consuma potenza. Il guadagno, infatti, e' ottenuto su un solo stadio Geiger, non necessita di un divisore di tensione come invece accade in un classico fotomoltiplicatore dove il guadagno e' ottenuto alimentando una serie di dinodi

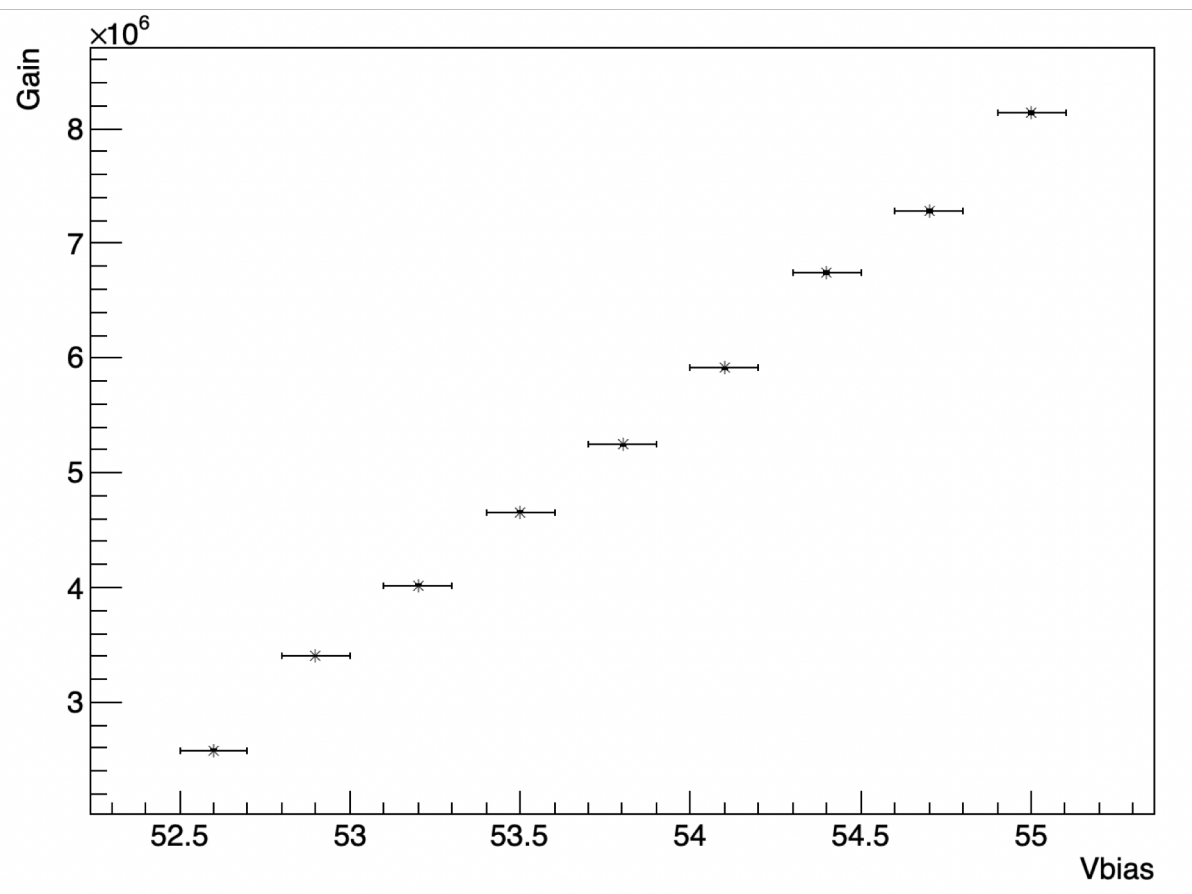


Fig.74

Dark noise

Nella fig.75 sono mostrati i conteggi di fondo del VSIPMT in funzione della tensione di alimentazione del SiEM. Questo rumore di fondo e' la somma di due contributi:

- il rumore termico dovuto al SiEM. Alla temperatura ambiente gli elettroni termici generano valanghe geiger in modo random nei pixel del SiEM. Alzando la soglia dei pixel contemporaneamente accesi (fig.75) il dark noise diminuisce.
- emissione di elettroni (non fotoelettroni cioe' non generati dalla conversione dei fotoni nel fotocatodo) per emissione termoionica e per emissione dovuta ad effetto di campo elettrico generato dall'alta tensione tra fotocatodo e SiEM. Questo contributo a 2000 V puo' arrivare a 100 khz.

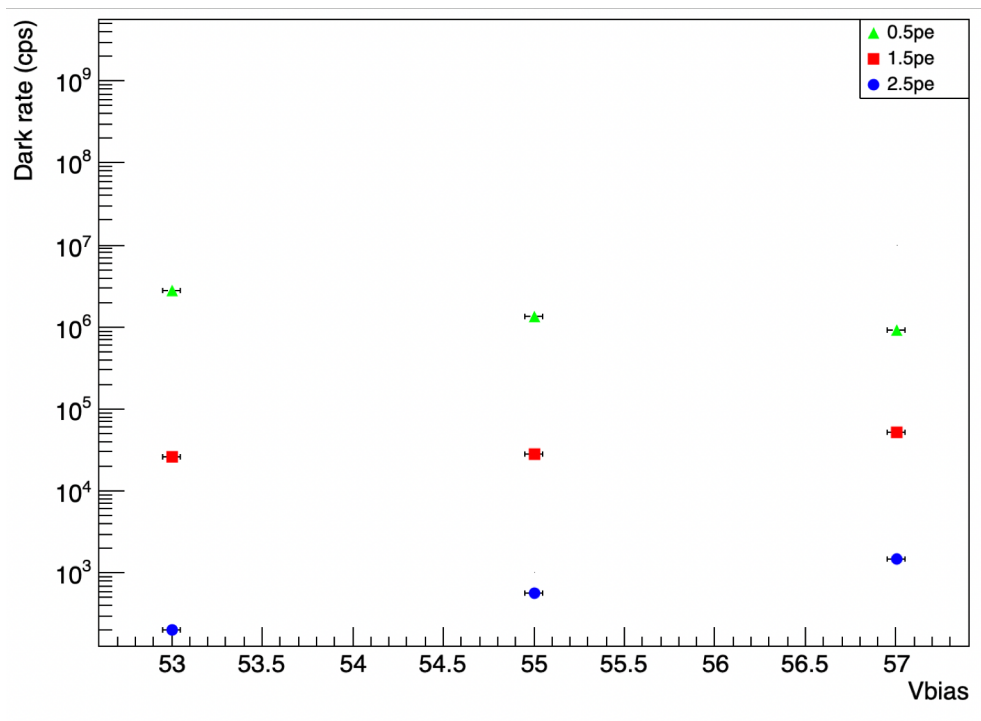


Fig.75

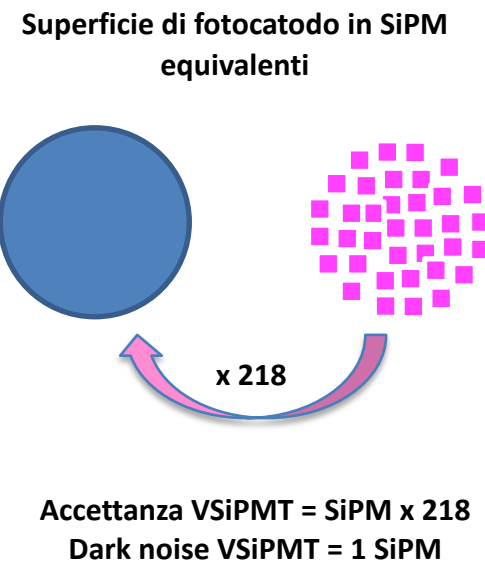


Fig.76

Dal punto di vista del rumore il VSIPMT puo' essere visto virtualmente come un grande SiPM per fotoni con superficie attiva virtuale sensibile della grandezza del fotocatodo ma con rumore di fondo del solo SiEM.

In altri termini, come si vede nella figura 76, il VSIPMT ha una accettazione equivalente, ovvero una copertura di fotocatodo in 2 pollici di 218 SiPM ma con rumore equivalente di un solo SiPM.

Risoluzione temporale

La risoluzione temporale del VSiPMT e' legata al Transit Time Spread (TTS) all'interno del VSiPMT. Il TTS e' legato, come descritto a pag.10, a due effetti:

- dispersione delle traiettorie dei fotoelettroni dal fotocatodo al SiEM sotto l'effetto del campo elettrico generato dall'alta tensione applicata.
- dispersione nel sistema di amplificazione nella giunzione geiger.

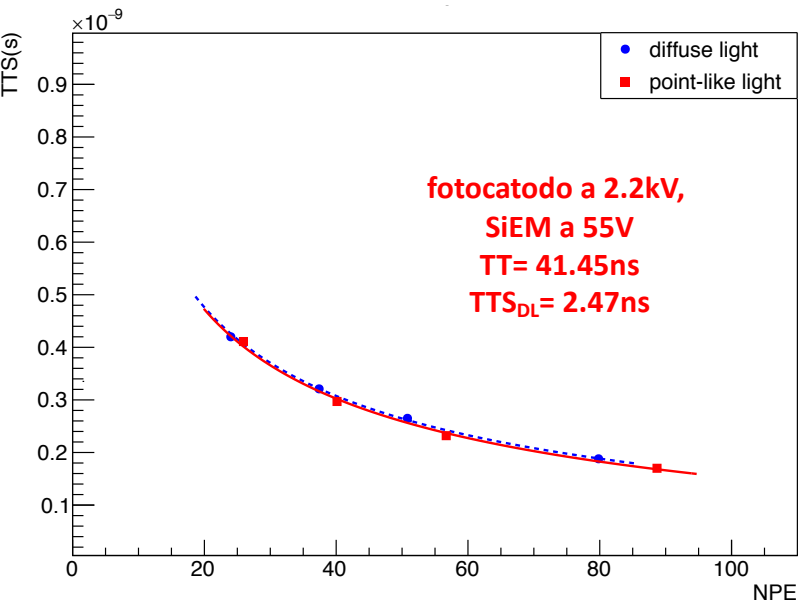


fig.77

HV	TTS@1PE
1500	2.52±0.03
2200	2.47±0.02
2500	2.46±0.02

Tab.5

Nella fig. 77 e' riportato il TTS in funzione del numero di fotoelettroni generati dal fotocatodo. L'andamento va come $1/\sqrt{N_{\text{fotoelettroni}}}$. Il valore del TTS (variazione del tempo di transito TT) estrapolato ad 1 fotoelettrone e' mostrato nella tab.5 in funzione dell'alta tensione applicata. La fig.78 mostra l'andamento del TTS In funzione dell'alta tensione e della tensione di alimentazione del SiEM. Si notano lievi dipendenze perfettamente coerenti con il meccanismo di funzionamento del VSiPMT. Le misure sono state effettuate sia con luce laser puntiforme che con luce laser diffusa su fotocatodo.

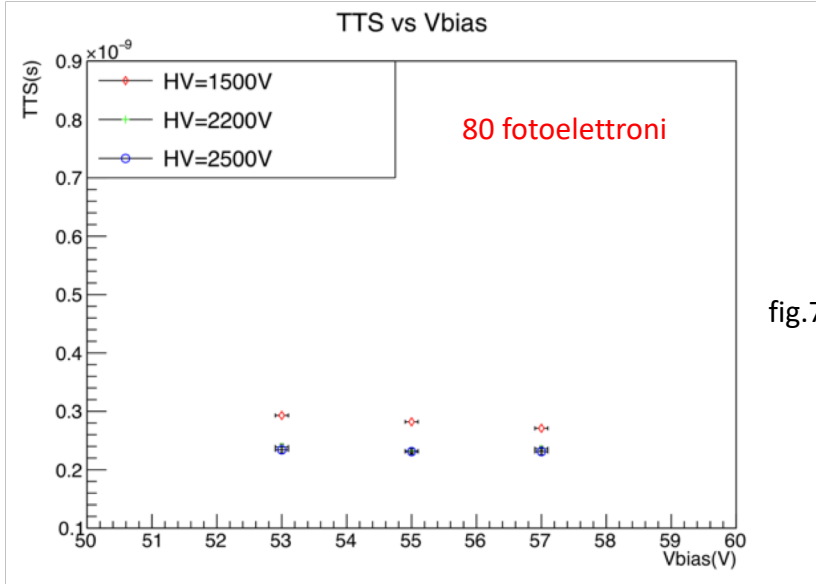


fig.78

Il tempo di transitto dell'intero processo di formazione del segnale e dell'amplificazione e' **TT= 41.45ns**

Nella fig.79 e' mostrato un esempio di risoluzione temporale del VSIPMT. La FWHM e' 1,48 nsec.

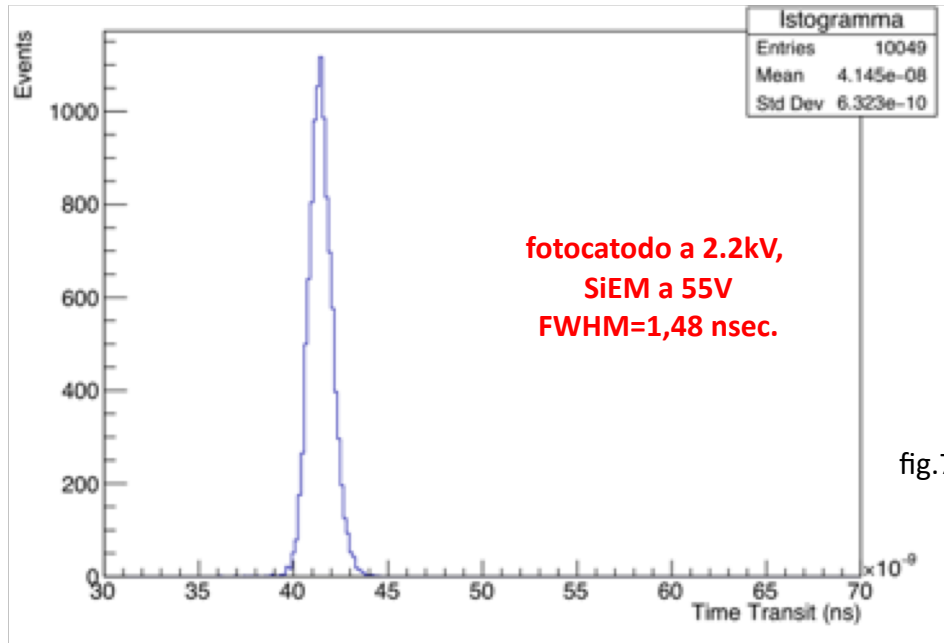


fig.79

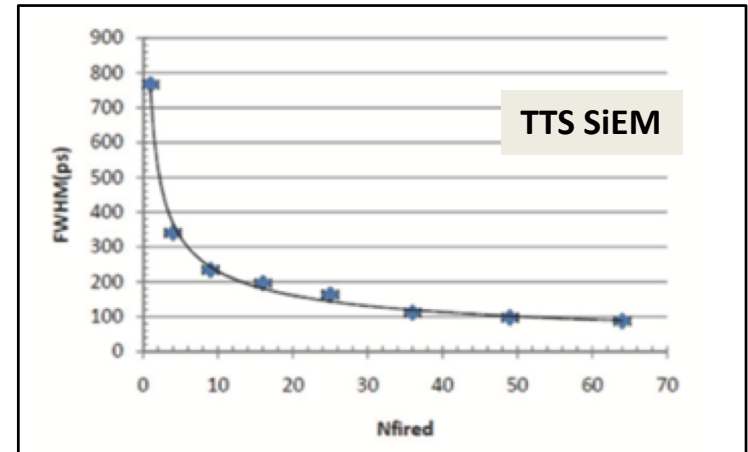


fig.80

$$TTS = \sqrt{TTS_{SiEM}^2 + TTS_{trasporto}^2}$$

E' possibile valutare il contributo del SiEM dovuto alle variazioni di percorso nella fase pre-trigger dello stadio di amplificazione e dal numero di pixel accesi. Dalla fig.10 riportata qui nella fig.80 si ricava che il TTS relativo al trasporto dei fotoelettroni dal fotocatodo al SiEM. In questo modo e' possibile valutare il peso dei due contributi $TTS_{trasporto}$ e TTS_{SiEM} che si combinano quadraticamente. Dalla tabella 6 si nota che il contributo al TTS del SiEM e' molto piccolo intorno al 5%. Questo risultato ha una conseguenza molto importante sulla validita' del progetto del VSIPMT: l'uso del SiEM come stadio di amplificazione del VSIPMT **NON** introduce fluttuazioni temporali.

La situazione e' molto analoga cio'che accade in un classico fotomoltiplicatore. I valori di risoluzione temporale sono sono confrontabili. Probabilmente nel caso del VSIPMT una maggiore cura nella geometria del trasporto dei fotoelettroni Sul SiEM potrebbe portare ad una risoluzione temporale migliorabile rispetto a quella ottenibile con un classico fotomoltiplicatore.

NPE	TTS (ns)	$TTS_{SiEM}(ns)$	$TTS_{trasporto}(ns)$
1	2.50	0.75	2.38
5	1.10	0.33	1.05
10	0.80	0.22	0.77
15	0.65	0.20	0.62
20	0.56	0.17	0.53
25	0.42	0.15	0.39
30	0.36	0.12	0.34
40	0.31	0.11	0.29
50	0.25	0.10	0.23
60	0.23	0.09	0.21
70	0.21	0.08	0.19
80	0.19	0.07	0.17
90	0.17	0.06	0.16
100	0.16	0.05	0.15

Tab.6

Comportamento del VSIPMT con la temperatura

L'utilizzo nel VSIPMT di un sistema di amplificazione a semiconduttore ovvero una giunzione pn in regime geiger comporta inevitabilmente una dipendenza del guadagno della giunzione dalla temperatura. Nella giunzione il guadagno è generato intorno alla tensione di breakdown dove avviene la scarica geiger. Questa tensione dipende dalla temperatura (appendice B fig.2) e fig.81. L'andamento è compreso fra 30 e 50 mV/°C. Nel VSIPMT (in vuoto) il comportamento con la temperatura è notevolmente più stabile (fig.82). In ogni caso, come dimostrato sempre in appendice B è sempre possibile e semplice una correzione in retroazione negativa (fig.83). Un'altra verifica della sostanziale stabilità del VSIPMT con la temperatura è mostrata nella fig. 84. Qui è mostrato la stabilità dello spettro di singolo fotone nel tempo e con una variazione di temperatura tra 0 e 65°.

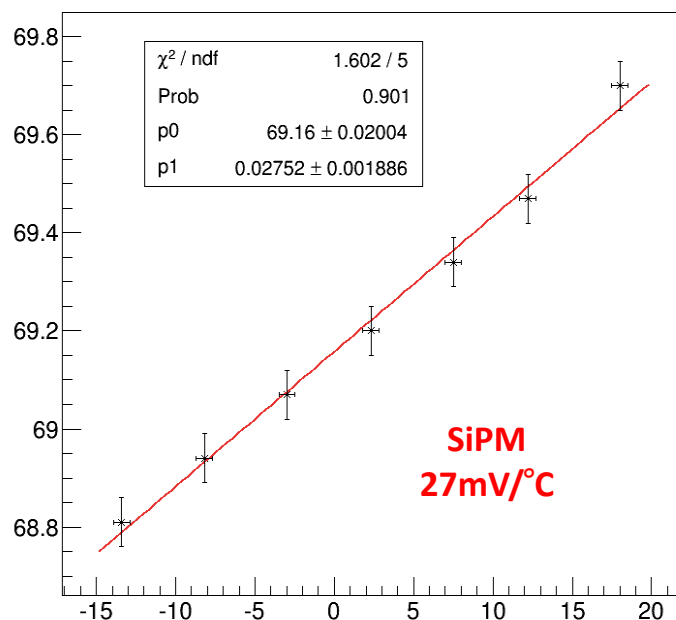


fig.81. andamento della tensione di breakdown con la temperatura in un SiPM/SiEM in aria

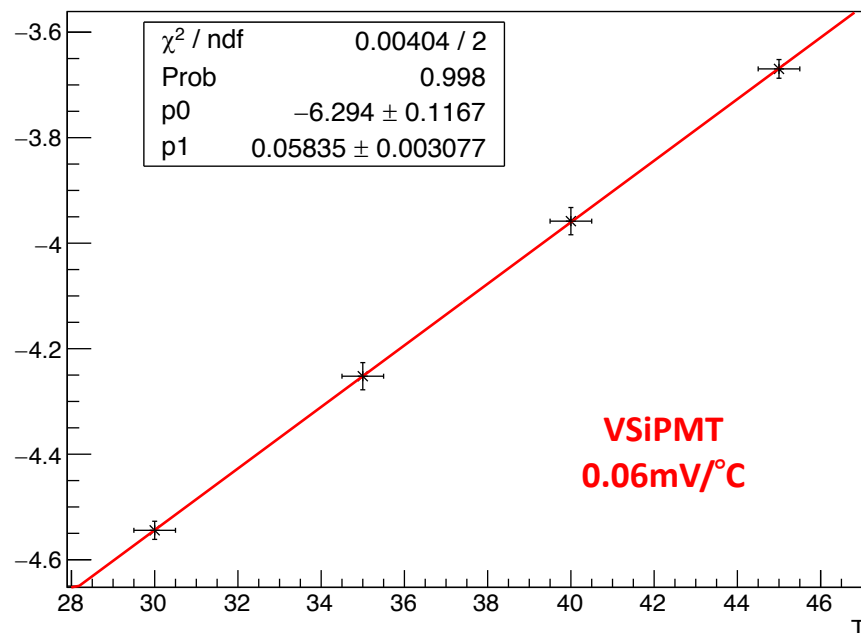


fig.82. andamento della tensione di breakdown con la temperatura in un VSIPMT in vuoto.

Regolatore in retroazione negativa
C11204-01 prodotto da Hamamatsu

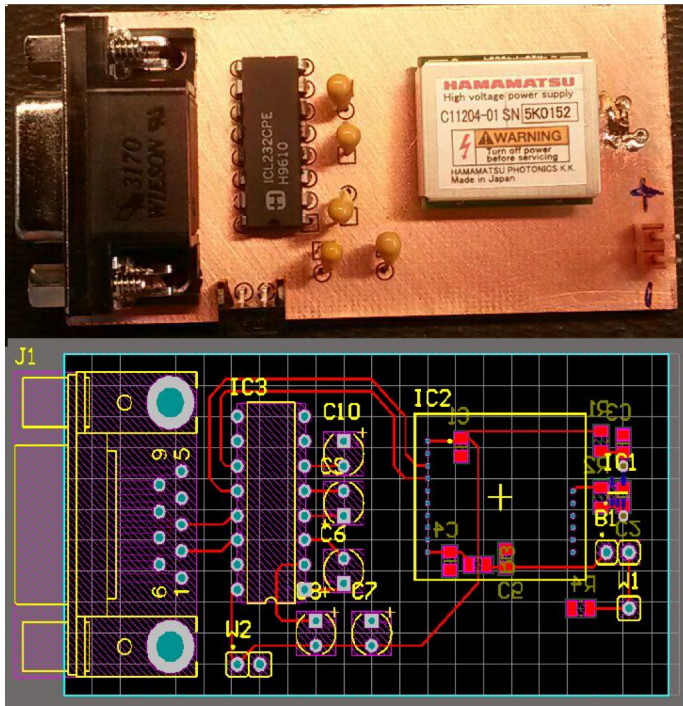


fig.83

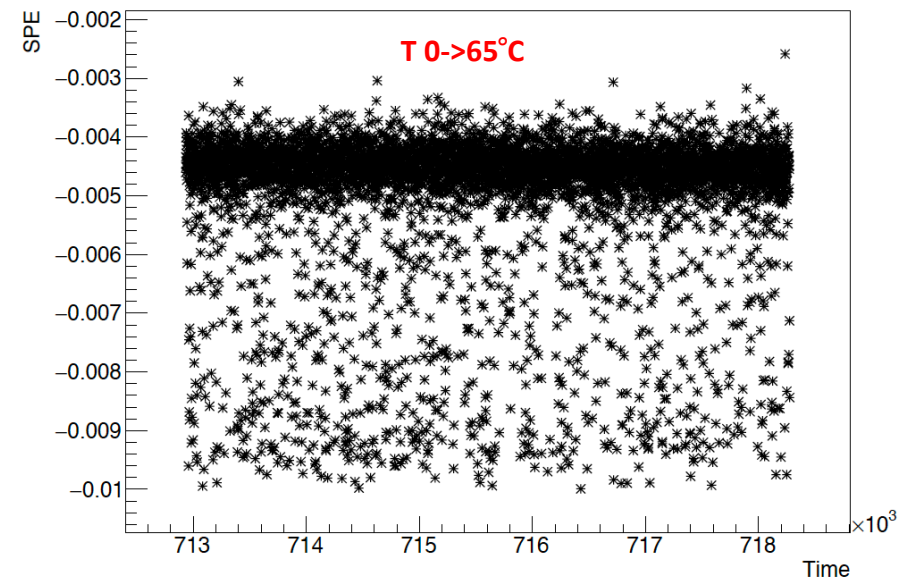
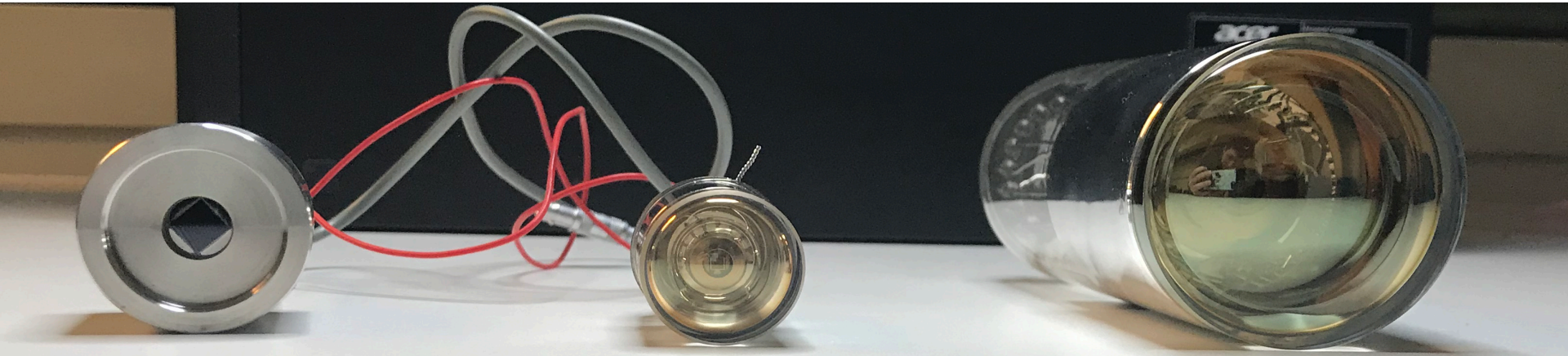


fig.84
Spettro di singolo fotone in un VSIPMT
stabile con la temperatura

Tutte queste considerazioni portano a considerare il VSIPMT particolarmente adatto nell'uso in ambienti ostili.



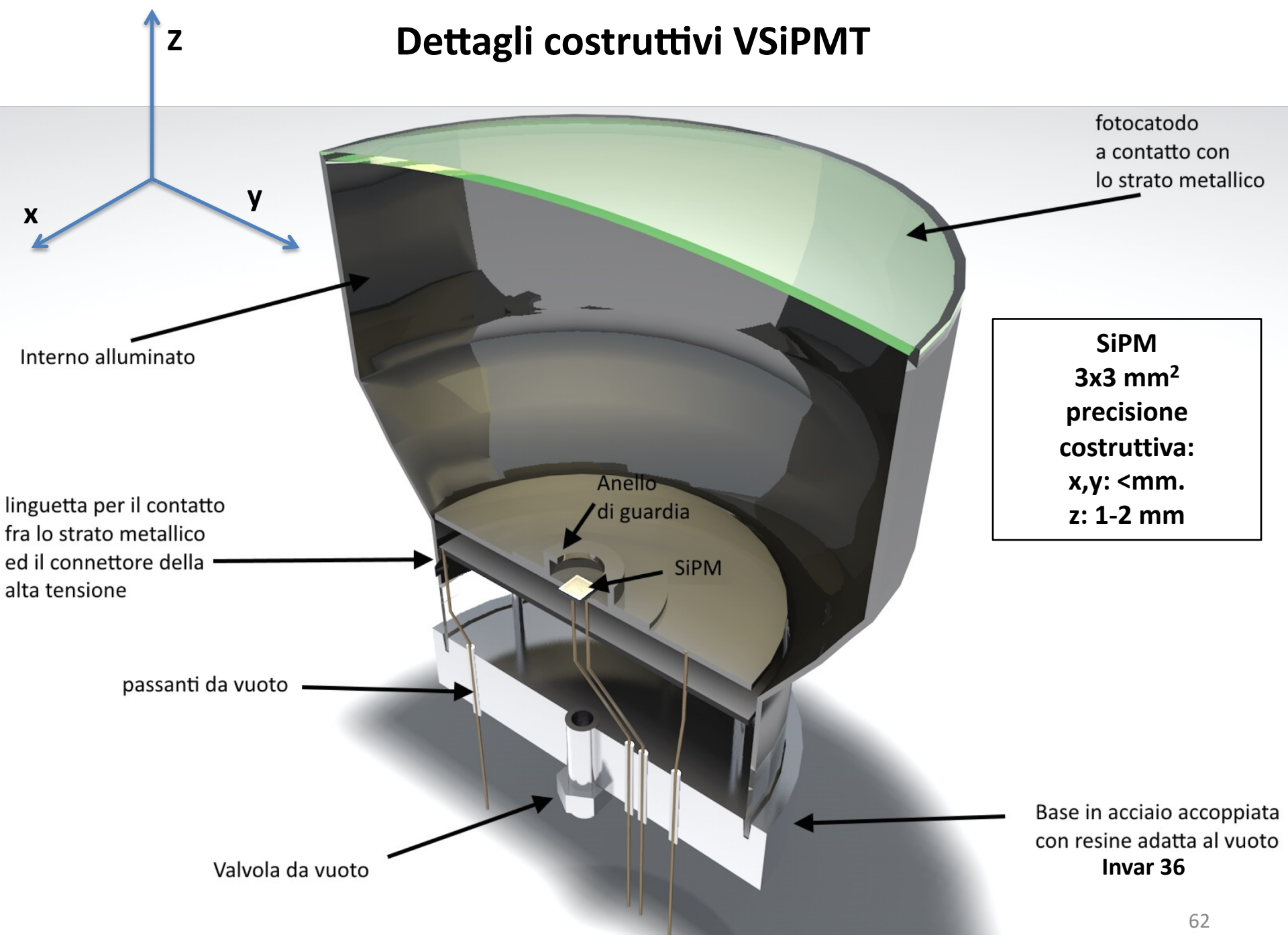
Conclusioni

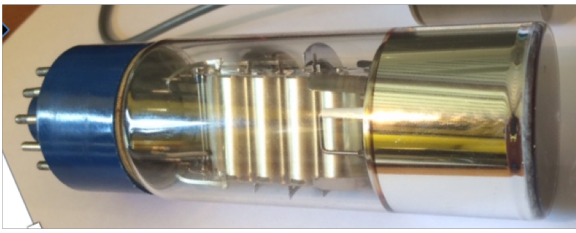
Il VSiPMT offre prestazioni e caratteristiche potenzialmente superiore ad ogni altro fotorivelatore della stessa superficie sensibile:

- altissima sensibilità
- eccellente conteggio di fotoni
- alto guadagno
- amplificazione in bassa tensione
- stabilizzazione guadagno in bassa tensione
- grande range dinamico
- alte prestazioni temporali
- consumo di potenza trascurabile
- compattezza e semplicità costruttiva

Il VSiPMT usa una tecnologia a semiconduttore i cui stadio di amplificazione
Viceversa il fotomoltiplicatore classico usa una tecnologia standard non più migliorabile.

Dettagli costruttivi VSiPMT





Intuitivo confronto fra la sensibilita' e photon counting di un classico fotomoltiplicatore ed un VSiPMT



Il mondo e la luce ieri
fotorivelatore classico

PMT

Il mondo e la luce oggi
fotorivelatore VSiPMT

VSiPMT

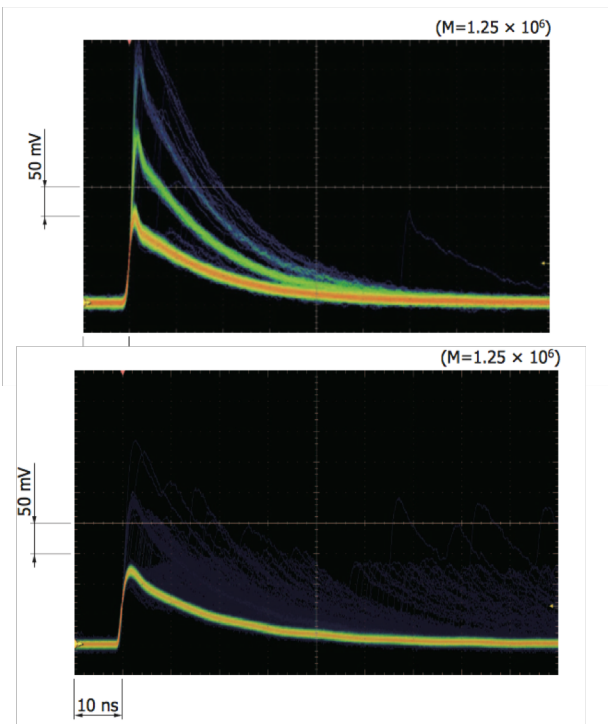


nessun conteggio
di fotoni singoli



conteggio di fotoni
singoli





b)-Serie S10943

fig.1

a)-Serie S13360

In tutti questi prototipi sono stati utilizzati SiPM/SiEM realizzati qualche anno fa da Hamamatsu e appartenenti alla serie 10000 (pag.16). La tecnologia delle giunzioni evolve rapidamente e la nuova serie 13000 ha prestazioni nettamente superiori. Basta l'osservazione degli impulsi in uscita per vedere le notevoli differenze nella nuova serie fig1. Si può notare chiaramente il ridotto numero di dark counts.

Gli afterpulses nella nuova versione, a), sono ridotti rispetto alla versione b) di due ordini di grandezza, il cross-talk fra i canali trascurabile. In piu' a causa della giunzione più sottile, il guadagno nella nuova versione si ottiene ad una tensione più bassa, come si può notare confrontando la fig. 63 (nuova serie) con la figura 25 (vecchia serie).

Ciò contribuisce a migliorare il rumore di fondo. Inoltre la nuova serie è dotata di profondi trench che isolano fisicamente i vari pixel.

Il conteggio dei singoli fotoni è mostrato per la nuova serie nella fig.2. Se confrontata con la fig. 51 ottenuta dai SiPM/SiEM di vecchia generazione, è visibile la netta separazione nella rivelazione dei fotoni.

La dinamica invece dipende solo dal numero della celle Geiger quindi anche nella nuova serie a parità celle la dinamica rimane quella di fig.26

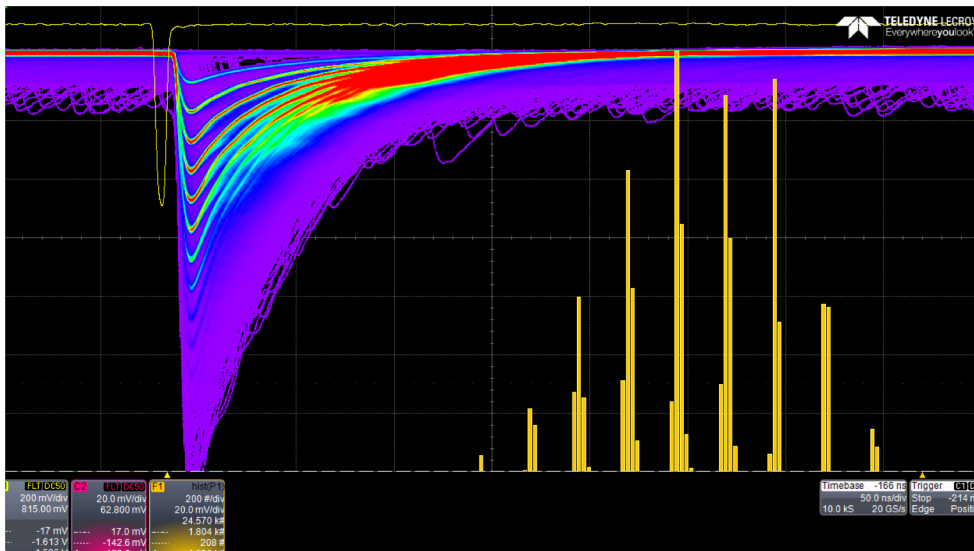


fig.1: impulsi in uscita dai SiPM/SiEM di nuova generazione. In giallo gli spettri di carica dei singoli fotoni nettamente separati.

S13360-4929-A17 Dark Rate vs VBias

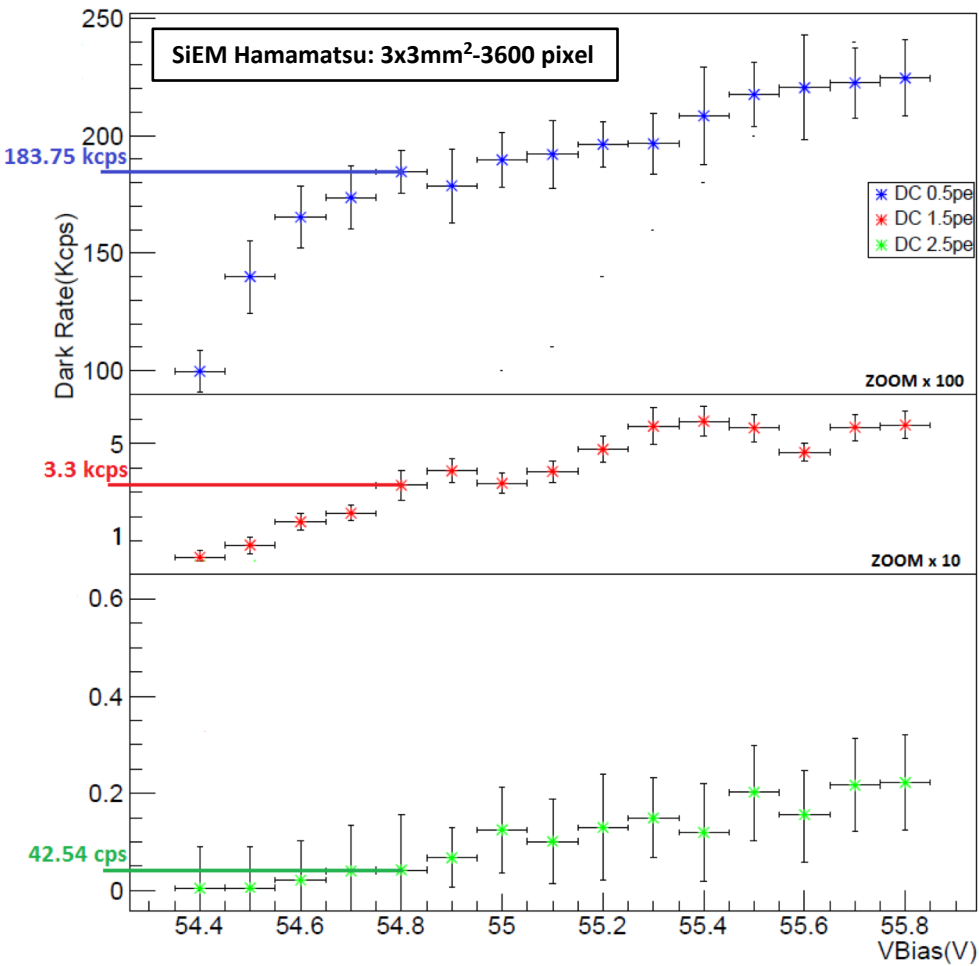


fig.2: misure di dark counts della nuova serie SiPM/SIEM da confrontare con quello della vecchia serie, fig.25. La riduzione dei conteggi nella nuova serie è notevole rispetto alla vecchia serie soprattutto con soglia a 2-3 pixel.

S13360-4929 Gain Vs Vbias

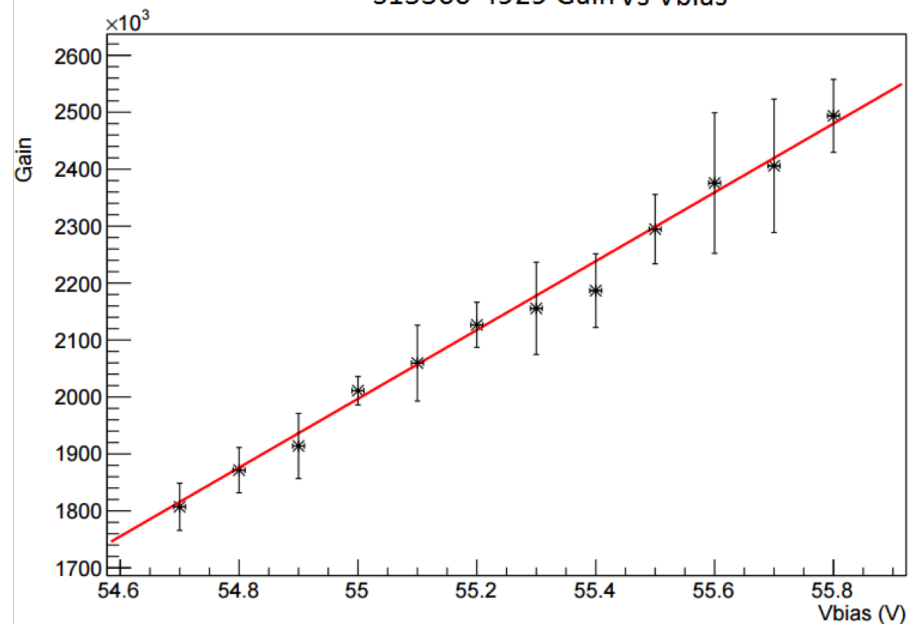


fig.3: Misura di guadagno dei SiPM/SIEM nuova serie. Si nota rispetto al vecchia serie, fig.25, una minore tensione per ottenere lo stesso guadagno.

Tuttavia va registrato che i miglioramenti tecnologici delle matrici Geiger di nuova generazione consentono una dinamica molto elevata potendo il numero delle celle arrivare in un SiPM/SIEM 3mmx3mm a circa 15000. Questo conferisce al nuovo fotorivelatore VSiPMT una dinamica maggiore di quella di un classico fotomoltiplicatore.

Per quanto detto va osservato che l'unico punto debole del VSiPMT, che sono i dark counts della giunzione SiEM, viene a cadere con la nuova serie. Infatti dalla fig. 62 risulta che i conteggi di fondo possono oscillare tra 100 Hz e qualche KHz, un numero molto vicino al rumore di fondo di un classico fotomoltiplicatore.

Il comportamento del VSiPMT in relazione al suo uso in ambienti ostili, come l'ambiente spaziale, può essere sintetizzato nel seguente modo:
 -shock e vibrazioni: ci si aspetta che il comportamento del nuovo dispositivo VSiPMT sia decisamente più stabile ed affidabile di quello di un classico fotomoltiplicatore. La semplicità costruttiva ottenuta con un tubo a vuoto con deposizione di fotocatodo sulla finestra di ingresso, la sola giunzione Geiger SiEM che può essere ancorata in modo molto solido al corpo del rivelatore ad una distanza non critica dal fotocatodo e la presenza di soli 3 contatti (alta tensione, bassa tensione e uscita) rendono sistema VSiPMT più compatto e meno esposto a sollecitazioni tali da portare il sistema alla rottura. Nel classico fotomoltiplicatore, invece, la complessità meccanica della lunga catena di dinodi con la criticità delle tolleranze meccaniche, le cui variazioni incidono direttamente sul guadagno, possono rendere vulnerabile alle sollecitazioni il fotomoltiplicatore.

-nel VSiPMT il consumo di potenza è azzerato: questo è un elemento non trascurabile in ambito spaziale dove le potenze disponibili sono limitate. Oltre al consumo di potenza, nel classico fotomoltiplicatore, il divisore di tensione costituisce con le saldature di tutti i dinodi un'appendice sensibile nuovamente a shock e vibrazioni.

-danneggiamento del SiEM da radiazione: va valutato con test di irraggiamento anche se nel caso del VSiPMT il SiEM si trova all'interno del tubo a vuoto che in ogni caso potrebbe avere, come nei fotomoltiplicatori classici uno schermo di μ -metal che avrebbe nel caso del VSiPMT una doppia funzione: schermare il percorso dei fotoelettroni dai campi magnetici e schermare una buona parte delle radiazioni.

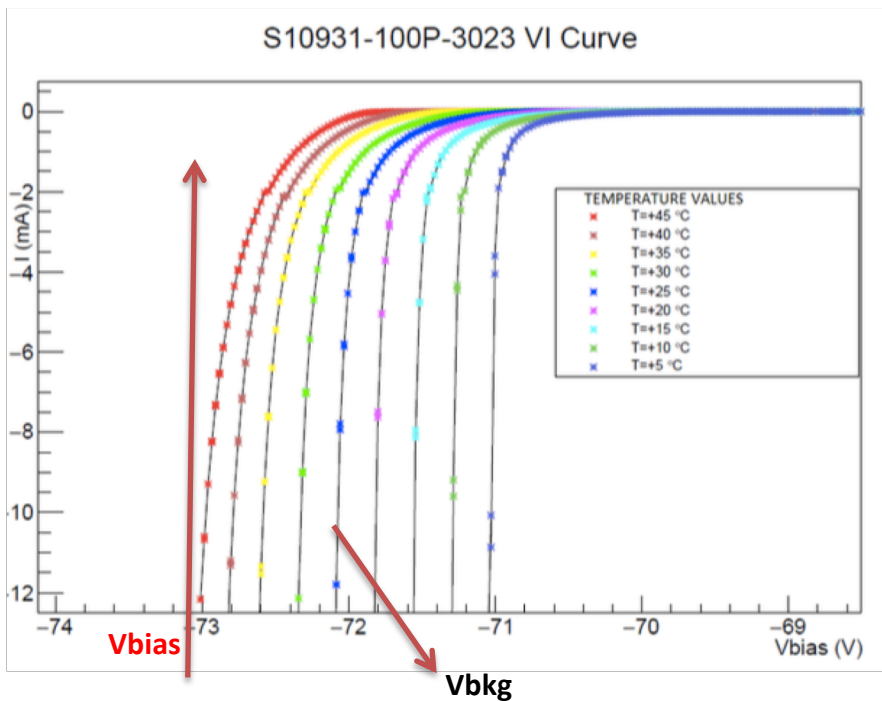


fig.1: variazione della tensione di background Vbkg con la temperatura nei rivelatori a giunzione inversa p-n Geiger.

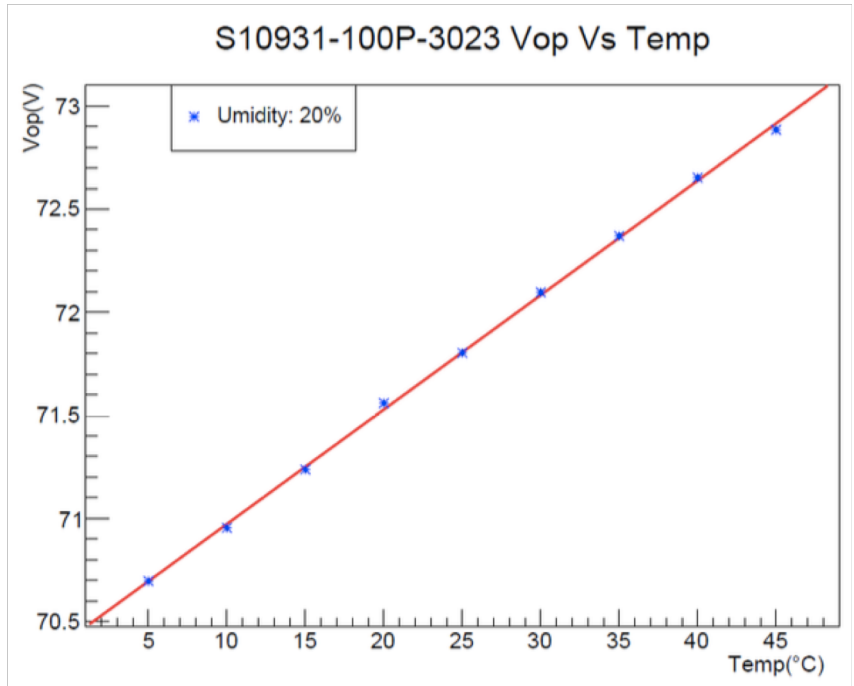


fig.2: andamento della tensione di background Vbkg con temperatura della fig.64

-dipendenza del SiEM dalla temperatura: è noto che le dimensioni della regione di svuotamento delle giunzioni p-n dipendono dalla temperatura. Come è visibile dalla figura 64 la tensione di background V_{bkg} nella regione di polarizzazione inversa della giunzione (dove operano come rivelatori) dipende dalla temperatura. In particolare la V_{bkg} sale con la temperatura, fig.65. Poichè le giunzioni Geiger SiPM/SiEM operano con una tensione di polarizzazione V_{bias} leggermente maggiore della V_{bkg} ed il guadagno dipende dalla differenza ($V_{bias}-V_{bkg}$), ne deriva che per avere un funzionamento stabile con la temperature è necessario mantenere costante questa differenza di tensione.

Questa condizione è piuttosto semplice da ottenere: un sensore di temperatura integrato nell'alimentazione del SiEM riaggiusta la tensione di polarizzazione V_{bias} con un feedback negativo in modo tale da mantenere ($V_{bias}-V_{bkg}$) costante e quindi anche il guadagno.

La fig. 66 mostra l'andamento del guadagno se non ci fosse il feedback sulla tensione di polarizzazione V_{bias} : ($V_{bias}-V_{bkg}$) diminuisce e di conseguenza diminuisce il guadagno.

Con la correzione di V_{bias} dovuto al feedback in temperatura e mostrato in fig. 67, V_{bias} segue il cambiamento di V_{bkg} mantenendo questa differenza di tensione ($V_{bias}-V_{bkg}$) costante e quindi garantendo il guadagno costante indipendentemente dalla temperatura, fig.68.

Lavoro svolto nell'ambito dei seguenti WPs:

WP 4100 Dipendenza della tensione di lavoro del VSIPMT dalla temperatura

WP 4500 Progetto e realizzazione circuito di compensazione in temperatura

WP 4300 Test del circuito di compensazione in temperatura del VSIPMT

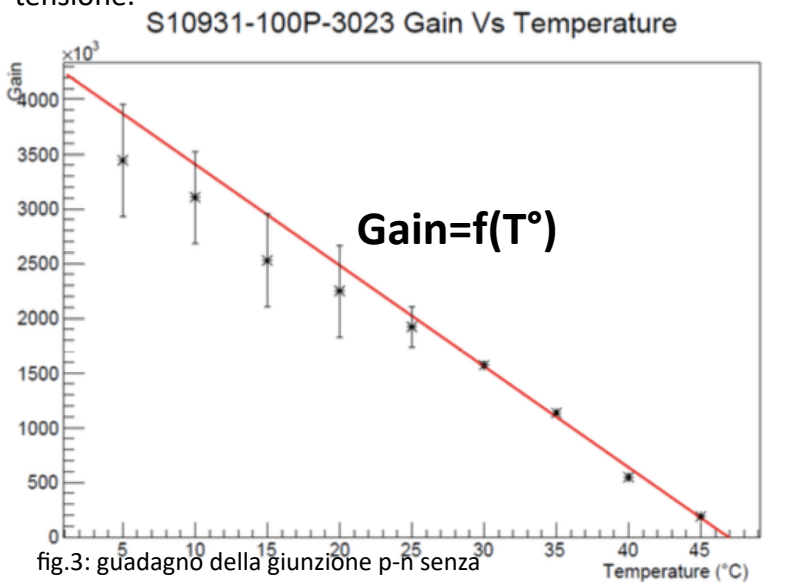


fig.3: guadagno della giunzione p-n senza correzione di temperatura

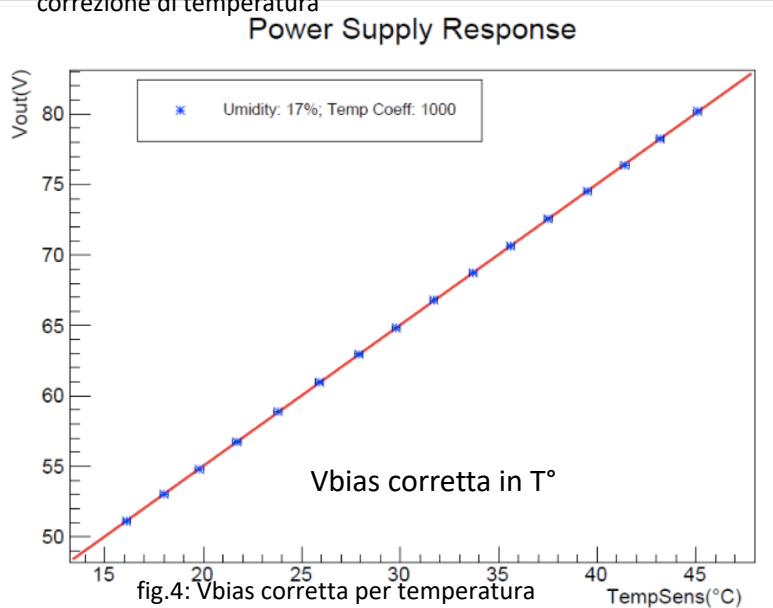


fig.4: Vbias corretta per temperatura

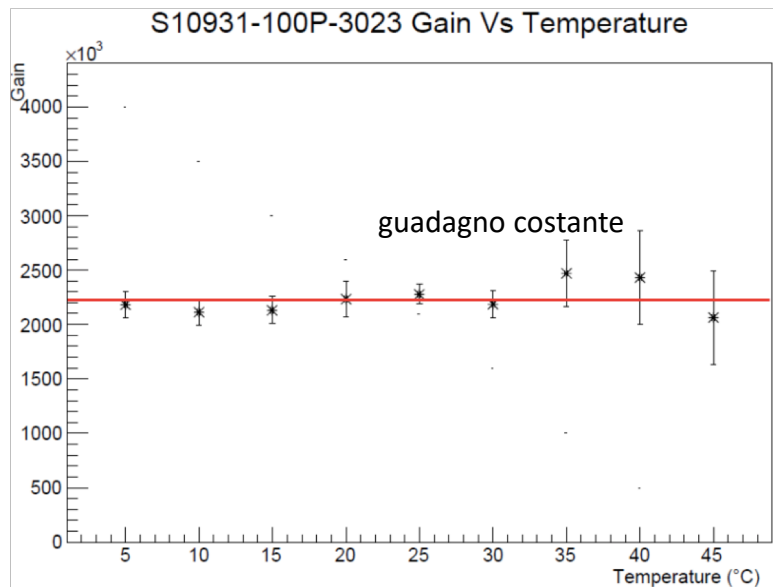


fig.5: guadagno delle giunzioni geiger SiPM/SiEM tenuto costante rispetto alle variazioni di temperatura.