

**Criteri di selezione e test per la scelta del
preamplificatore di carica (CSP) in una catena
spettroscopica basata su rivelatori a CdTe
operativi a temperatura ambiente.**

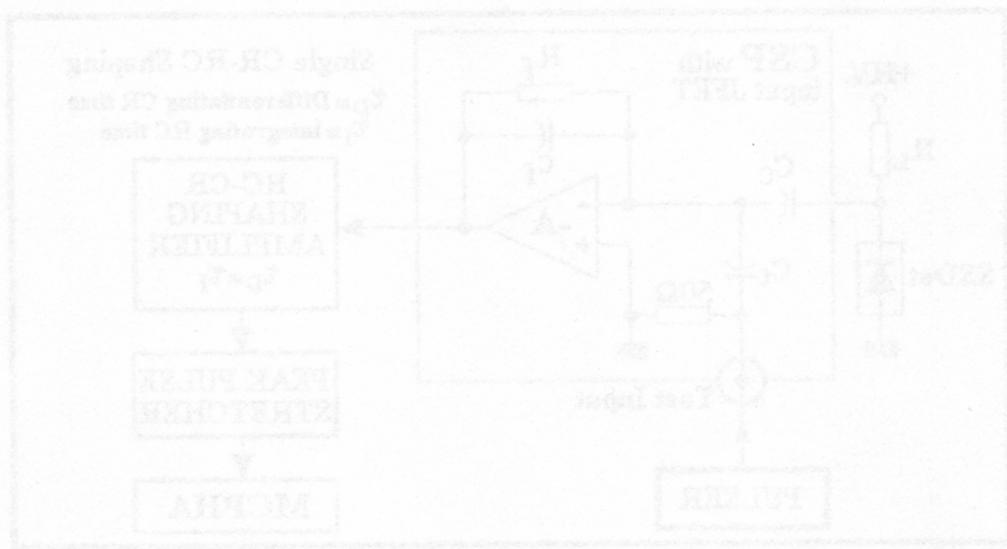
N. Auricchio, A. Donati, G. Ventura

**Rapporto Interno N. 343
IASF-Te.S.R.E. Giugno 2002**

*Istituto IASF-Te.S.R.E./CNR
Via Gobetti, 101-40121 Bologna*

Sommario

| | | |
|----|---|----|
| 1. | Introduzione e scopi | 2 |
| 2. | Generalità e preamplificatori di carica sottoposti a test | 3 |
| 3. | Catena spettroscopica di misura adottata | 5 |
| 4. | Risultati e conclusioni | 7 |
| 5. | Riferimenti | 10 |



Non è facile ipotizzare il contributo prevalente al rumore totale del sistema di rivelazione è imputabile alle "spreads" dovute al meccanismo di interazione della radiazione col rivelatore ed al sistema combinato esistente nel rivelatore e dal primo stadio di amplificazione di front-end (Charge Sensitive Preamplifier CSP, Rn. 1 ed annessa bibliografia).

La scelta del rivelatore più adeguato all'applicazione e le condizioni operative del rivelatore stesso (temperatura di funzionamento, bias, resistenza di polarizzazione, capacità, corrente di bias "leakage", etc.) stabiliscono un livello di rumore intrinseco ed ineliminabile dell'apparato di rivelazione. L'ottimizzazione delle prestazioni dello stadio di amplificazione di front-end (CSP) rappresenta l'unico modo per contenere il contributo di rumore totale.

1. Introduzione e scopi.

Nell'attività di test-qualifica in laboratorio di rivelatori nucleari per radiazione X operativi a temperatura ambiente nell'intervallo di energia 10-200 keV (e, in particolare, di rivelatori a stato solido a CdTe, HgI₂, CdZnTe, etc.) la catena di condizionamento del segnale analogico (Fig. 1) deve garantire prestazioni ad elevata stabilità e linearità in tutto l'intervallo di energia applicativo. Inoltre l'amplificatore principale (Shaping Amplifier, Rif. 2, 3, 5, 6, 7) non deve contribuire per più del 3-5% al rumore totale in nessuna condizione operativa.

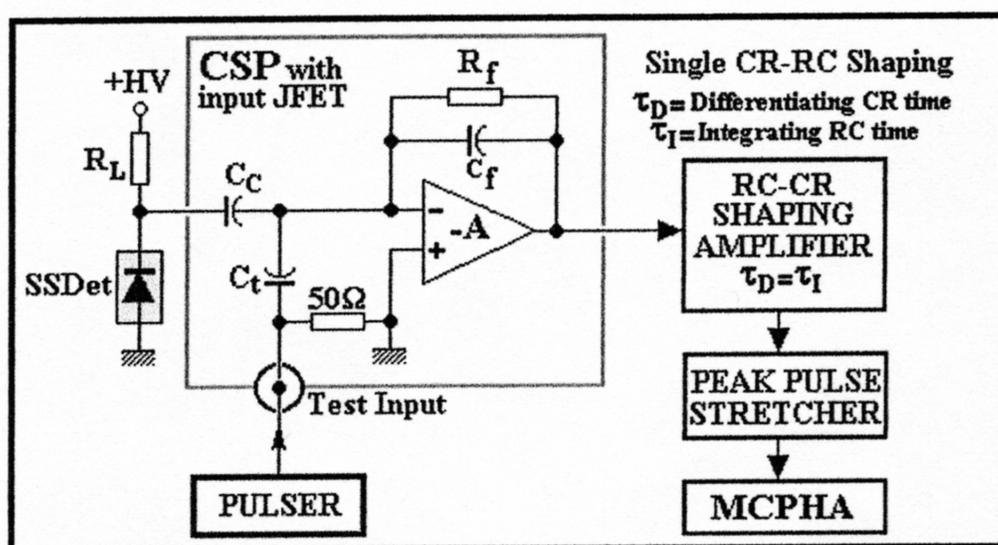


Fig. 1. Schema a blocchi di un sistema di analisi d'ampiezza per un rivelatore a stato solido (SSDet) accoppiato in ac con il CSP.

Sotto queste ipotesi il contributo prevalente al rumore totale del sistema di rivelazione è imputabile allo "spread" dovuto al meccanismo di interazione della radiazione col rivelatore ed al sistema combinato costituito dal rivelatore e dal primo stadio di amplificazione di front-end (Charge-Sensitive-Preamplifier: CSP, Rif. 1 ed annessa bibliografia).

La scelta del rivelatore più adeguato all'applicazione e le condizioni operative del rivelatore stesso (temperatura di funzionamento, bias, resistenza di polarizzazione, capacità, corrente di fuga, "trapping", etc.) stabiliscono un livello di rumore intrinseco ed ineliminabile dell'apparato di rivelazione. L'ottimizzazione delle prestazioni dello stadio di amplificazione di front-end (CSP) rappresenta l'unico modo per contenere il contributo di rumore totale.

In particolare, la selezione dello stadio attivo di ingresso del CSP (di solito un JFET, **Rif. 4, 8, 9, 10, 11**) consente l'individuazione del componente più adeguato per il contenimento del rumore di tipo elettrico nella configurazione adottata. In modo specifico la selezione del JFET deve essere basata sul criterio di ottenere il migliore accoppiamento ("matching") possibile tra parametri elettrici del rivelatore e del JFET.

L'entità del contributo di rumore elettrico di un CSP è descritta schematicamente e semiquantitativamente nel **Rif. 1**.

La presente Nota riporta i criteri, la procedura adottata per l'esecuzione delle misure per l'individuazione del CSP più adeguato all'applicazione ed i risultati dei test eseguiti sui CSP commerciali considerati potenzialmente adeguati allo scopo in base alle caratteristiche fornite dal costruttore.

In particolare, l'applicazione richiede analisi spettroscopica con buona risoluzione energetica nell'intervallo 20-180 keV combinata con capacità di sostenere elevate "count rates" ($\approx 20-40$ kcps) [**Rif. 13**].

2. Generalità e CSP sottoposti a test.

Nel caso già considerato in cui lo stadio di post-amplificazione (Shaping Amplifier di **Fig. 1**) contribuisca in modo trascurabile al rumore del sistema, una espressione generale per il rumore totale di una catena per rivelazione è del tipo:

$$(\Delta E)_{FWHM} = [(\Delta E_n)^2 + (\Delta E_{col})^2 + (\Delta E_F)^2]^{1/2} \quad [1]$$

dove:

$(\Delta E)_{FWHM}$ = rumore totale FWHM in eV

(ΔE_n) = contributo al rumore dovuto al sistema combinato pre-amplificatore/rivelatore (FWHM in eV)

(ΔE_{col}) = contributo al rumore dovuto alla incompleta raccolta di cariche all'elettrodo (FWHM in eV)

(ΔE_F) = contributo al rumore dovuto alla fluttuazione statistica della generazione di cariche nel rivelatore in seguito ad una interazione (FWHM in eV)

Vi è da notare che (ΔE_{col}) dipende dalla mobilità delle lacune nel rivelatore a stato solido e dalla purezza del cristallo, mentre (ΔE_F) dipende dalla energia del fotone incidente.

Una discussione dettagliata della [1] è fornita, ad esempio, nel **Rif. 1** e nella annessa bibliografia. Dato che sul secondo e sul terzo termine della

[1] non è possibile intervenire, per contenere il contributo di rumore occorre operare su primo termine, (ΔE_n), cercando di ottenere la migliore combinazione o accoppiamento dei parametri del rivelatore impiegato e del primo stadio attivo connesso all'elettrodo di raccolta del rivelatore.

In genere lo stadio attivo connesso al rivelatore è un pre-amplificatore di carica (CSP) con stadio di ingresso a JFET (Junction Field Effect Transistor, di solito a canale n). Diversi fattori contribuiscono al rumore (ΔE_n) ma, in ultima analisi, le possibilità dell'ottimizzazione del sistema si riducono-una volta che sia fissato il rivelatore-alla scelta del JFET più adeguato all'applicazione.

Nel caso di impiego di CSP commerciali basati su tecnologie di tipo "ibrido" è possibile operare una scelta iniziale fondata sulle prestazioni dichiarate dal costruttore.

Le caratteristiche dei principali CSP adeguati all'applicazione con rivelatori a stato solido a CdTe sono schematicamente elencate nella **Tabella I**.

Tabella I

| CSP | J F E T | Charge Sensitivity (V/pC) | Input Noise (keV CdTe @ 0pF)(°) | Noise Slope (eV/pF) | Voltage Sensitivity (μ V/keV CdTe) |
|---------|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|------------------------|--|
| CR-101D | I | 1.2 | 1.8÷2.0 | 15÷20 | 44 |
| CR-102B | E | 1.2 (*) | 1.8÷2.0(*) | 15÷20(*) | 44 |
| CS507 | I | 2.0 | 1.8÷2.0 | 20 | 72 |
| eV-5093 | I | 3.6 | 1.4÷1.7 | 20 | 130 |
| A250F | I | 4.0 | 2.4÷3.6 | 45÷50 | 143 |
| A250F/N | E | 4.0(*) | 1.2÷1.8(*) | 15÷50(*) | 143 |

I=Internal JFET, E=External JFET

(*) Valori dipendenti dal JFET esterno

(°) Valori che dipendono dalla shaping time usata nel post-amp

CR: Cremat CSP

CS: Clear Pulse CSP

eV: eV products CSP

A: Amptek CSP

I preamplificatori di carica della Amptek non sono stati considerati a causa sia del loro costo elevato che delle prestazioni di rumore inferiori rispetto agli altri CSP. I CSP della Clear Pulse sono normalmente impiegati in laboratorio e la conoscenza delle loro prestazioni è consolidata, tant'è che i CSP sottoposti a test (Cremat ed eV) sono

direttamente confrontati con i risultati ottenuti con i CSP della Clear Pulse.

Il criterio principale per la selezione del CSP che meglio si accoppia al rivelatore impiegato è basato sul confronto diretto delle prestazioni dei vari CSP cablati nello stesso ambiente di misura spettroscopico (Fig. 1).

È ovvio che il CSP "migliore" sarà quello che fornisce la risoluzione migliore (FWHM) nell'intervallo di energia operativo, ovvero il contributo di rumore minimo consentito dalla configurazione di front-end adottata.

Usando lo stesso rivelatore a CdTe (dimensioni ed HV bias) sono stati confrontati i seguenti CSP con JFET interno:

- Clear Pulse CS507
- Cremat CR101D (quattro unità)
- eV 5093 (due unità)

Ogni unità è stata sottoposta alla stessa serie di misure impiegando la catena spettroscopica di Fig. 1; in particolare sono stati accumulati spettri con sorgente di Co^{57} a diverse costanti tempo (Shaping Time) e sono stati confrontati i risultati.

Da un confronto diretto tra i dati relativi alle prestazioni dichiarate dai costruttori (Tabella I), risulta immediatamente che il CSP più promettente per l'applicazione (analisi spettroscopica con buona risoluzione energetica nell'intervallo 10-200 keV) è il CSP eV 5093, caratterizzato da un "Input Noise" di $\cong 1.5 \text{ keV @ } 0 \text{ pF}$ ed una sensibilità di $\cong 130 \mu\text{V/keV}$ per il CdTe.

3. Catena spettroscopica di misura adottata.

In accordo con la rappresentazione di Fig. 1, la catena spettroscopica adottata è costituita dai seguenti elementi:

1. Detector CdTe di dimensioni $5 \times 2 \times 1 \text{ mm}^3$ alimentato a $\text{HV} = +50\text{V}$ ($C_{\text{det}} \cong 1 \div 1.5 \text{ pF}$);
2. CR-RC Amplifier SILENA 7611/L (oppure Ortec Mod. 673) a guadagno regolabile e shaping time $\tau_D = \tau_I = \tau$ selezionabile nell'intervallo $0.25 \div 2 \mu\text{sec}$ ($0.25 \mu\text{sec}$, $0.5 \mu\text{sec}$, $1 \mu\text{sec}$, $2 \mu\text{sec}$);
3. Peak Pulse Stretcher TENNELEC Mod. TC 309 a guadagno unitario;
4. MCPHA Aptek Mod. 3000;
5. Pulser ORTEC Mod. 480.

Lo schema elettrico della circuiteria assemblata per i test è riportato in Fig. 2; in particolare i CSP della Cremat sono alimentati a $\pm 8.5\text{V}$ mentre quelli dell'eV sono alimentati a $\pm 12\text{V}$. In entrambi i casi la polarizzazione del rivelatore a CdTe è ottenuta mediante modulo lineare

di HV programmabile a basso rumore ($\approx 1\text{mV RMS}$) CA10P della EMCO cablato nello stesso contenitore insieme con CSP e rivelatore.

I CSP ibridi della Cremat e quelli della eV hanno configurazioni di I/O compatibili pin-to-pin e possono quindi essere cablati sullo stesso PCB di test (PCB2 di Fig. 2).

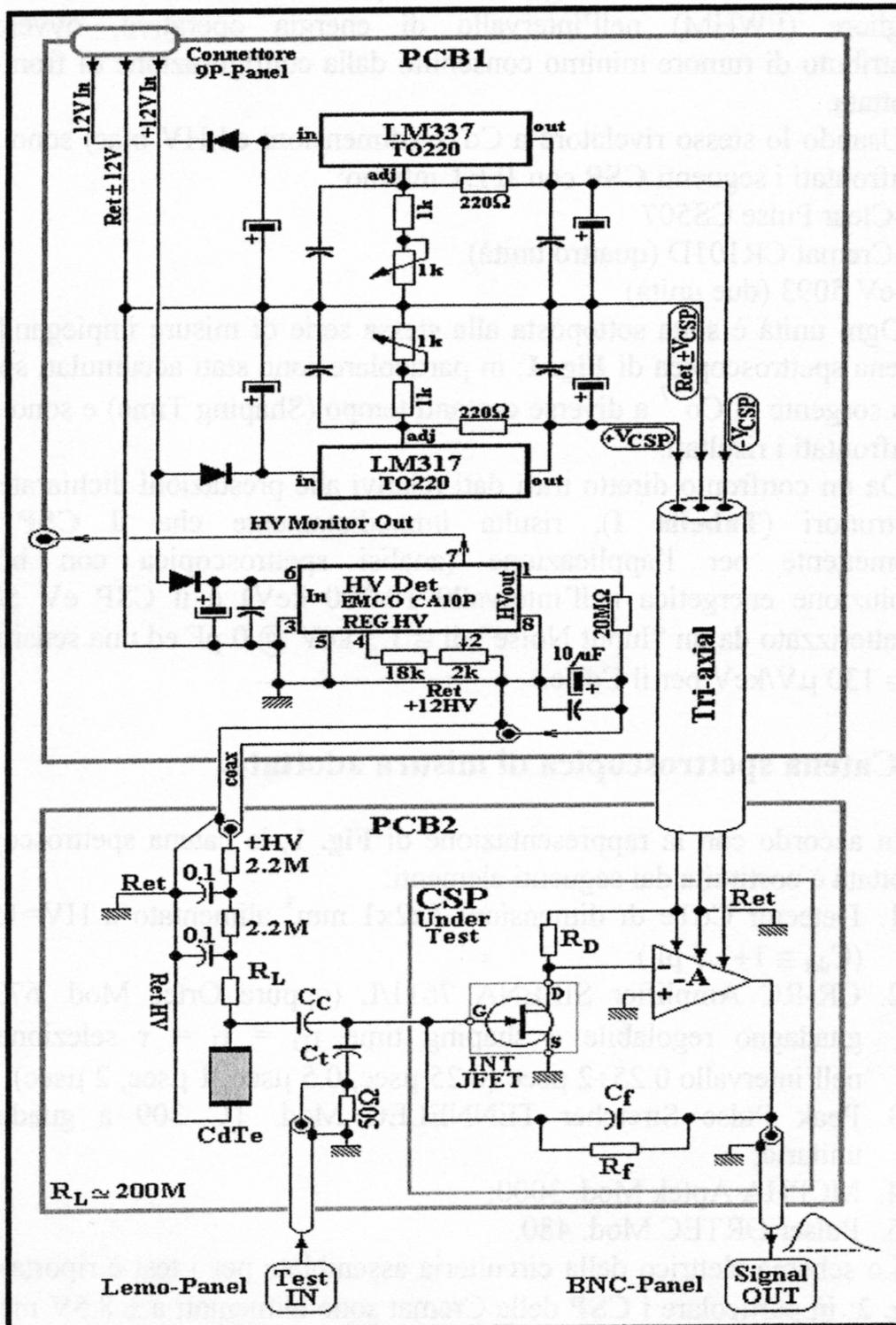


Fig. 2. Schema elettrico per i test dei CSP. La circuiteria di test è racchiusa in un contenitore metallico.

4. Risultati e conclusioni.

Per poter operare una selezione dei CSP testati è stato calcolato il FWHM a 122 keV di tutti gli spettri acquisiti con la sorgente di ^{57}Co variando lo shaping time. In questa fase preliminare gli spettri sono stati analizzati con il software del multicanale Aptek dopo aver eseguito la calibrazione in energia. L'andamento del FWHM in funzione dello shaping time è riportato nella Fig. 3. Il primo campione di CSP testato della Cremat (CR-101D_1) presenta una buona risoluzione energetica ma un rapporto picco-valle peggiore rispetto a quello degli altri campioni sottoposti a test. I preamplificatori Cs507, Cr-101D_4 ed eV-5093_2, che presentano le migliori prestazioni in termini di rumore e rapporto picco-valle, sono stati accoppiati ad un secondo rivelatore di CdTe allo scopo di confermare i risultati osservati.

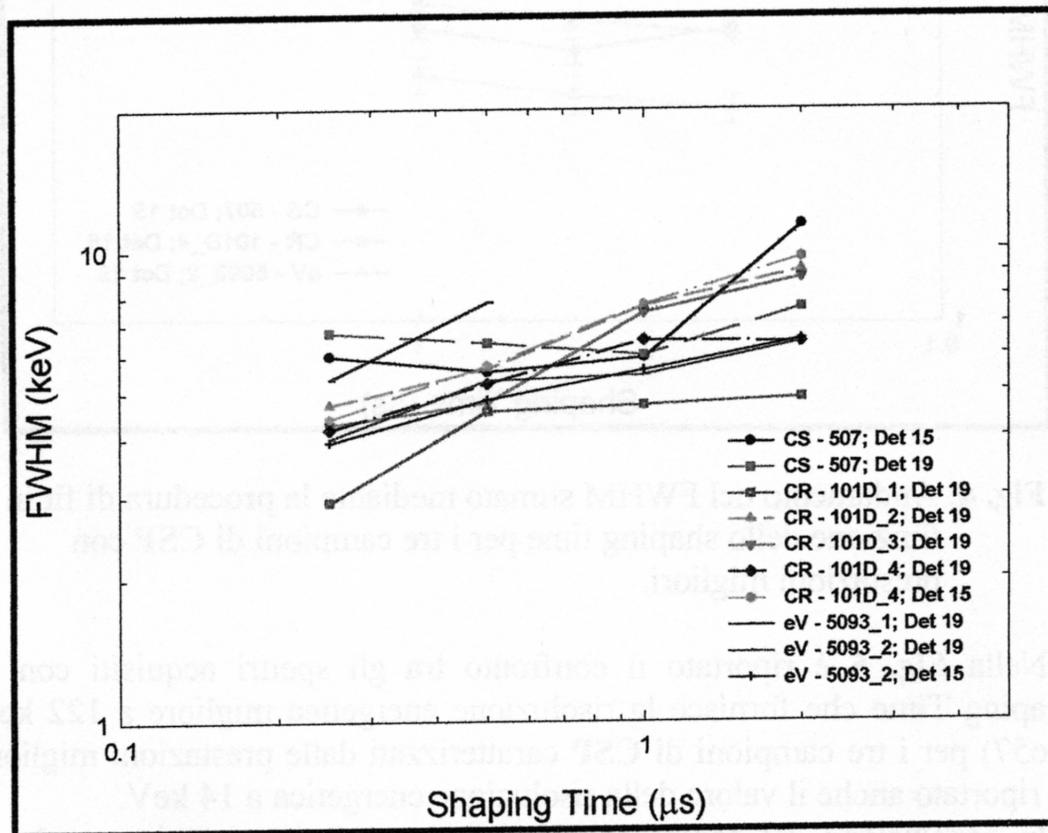


Fig. 3. Andamento del FWHM in funzione dello shaping time.

In una seconda fase di analisi dei dati, gli spettri acquisiti a 0.25, 0.5 ed 1 microsecondo sono stati analizzati mediante un pacchetto software dedicato (Peakfit). Le principali caratteristiche dello spettro sono: un fotopicco di forma gaussiana, che corrisponde all'energia del fotone

incidente, ed una componente asimmetrica dovuta agli effetti di trapping. La prima componente è stata "fittata" con una distribuzione gaussiana e la seconda con una distribuzione asimmetrica GMG. Nella **Fig. 4** è riportato il FWHM stimato con questa procedura di fitting in funzione dello shaping time per i CSP con caratteristiche di rumore migliore accoppiati al rivelatore CdTe #15.

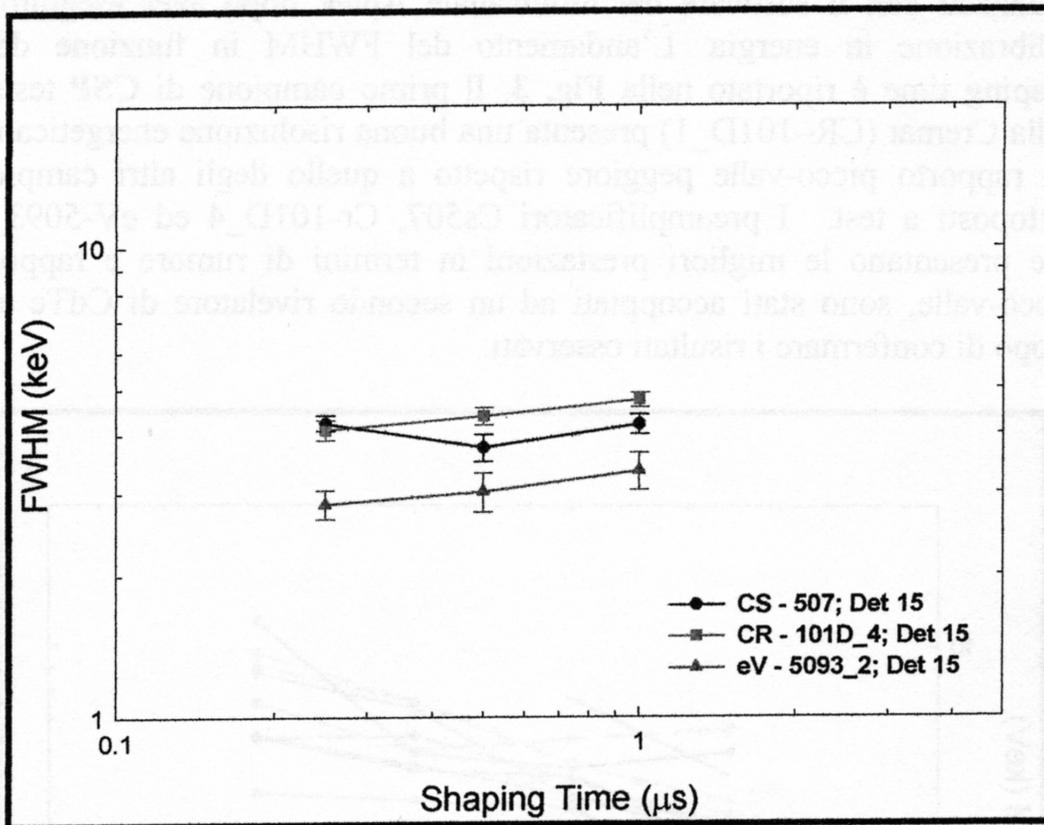


Fig. 4. Andamento del FWHM stimato mediante la procedura di fit in funzione dello shaping time per i tre campioni di CSP con prestazioni migliori.

Nella **Fig. 5** è riportato il confronto tra gli spettri acquisiti con lo Shaping Time che fornisce la risoluzione energetica migliore a 122 keV (Co57) per i tre campioni di CSP caratterizzati dalle prestazioni migliori. E' riportato anche il valore della risoluzione energetica a 14 keV.

In conclusione dal confronto dei dati ottenuti si può evincere che il preamplificatore con le migliori prestazioni in termini di rumore (FWHM) è il campione della eV con uno shaping time di 0.25 microsecondi.

Dall'esame degli spettri di **Fig. 5** relativi ai campioni CS507, CR-101D_4 ed eV 5093_2 si possono dedurre i dati riassuntivi di **Tabella II**.

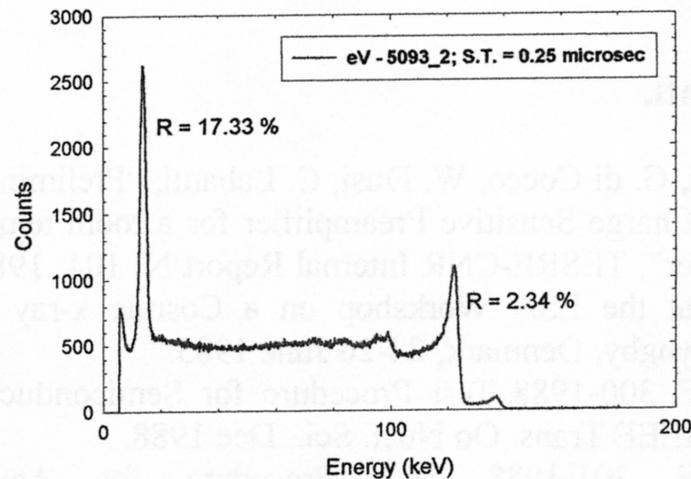
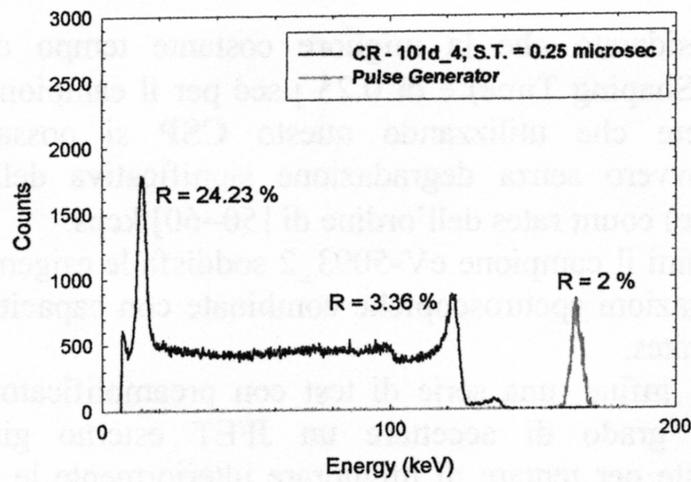
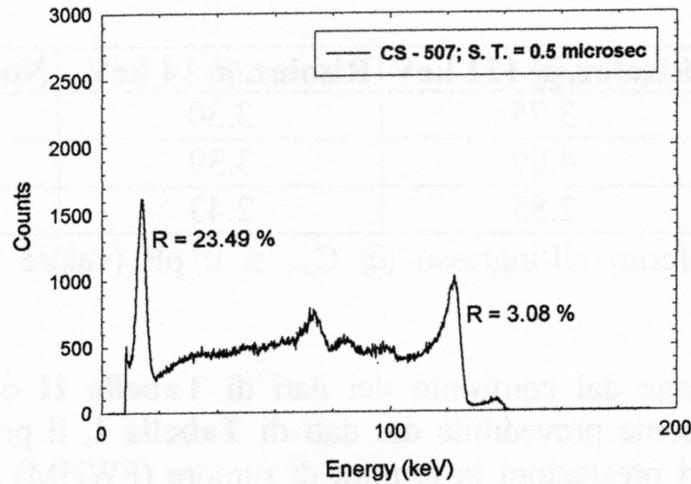


Fig. 5. Spettri acquisiti con i campioni di CSP a prestazioni di rumore migliori accoppiati con il rivelatore CdTe # 15. Gli spettri sono normalizzati per consentire un confronto diretto. Il CSP # 2 della eV ha guadagno circa doppio degli altri due.

Tabella II

| | Risoluz. @ 122 keV | Risoluz. @ 14 keV | Noise @ 0pF (*) |
|------------------|---------------------------|--------------------------|------------------------|
| CS507 | 3.75 | 3.30 | 1.8-2.0 |
| CR-101D_4 | 4.09 | 3.39 | 1.8-2.0 |
| EV 5093_2 | 2.85 | 2.43 | 1.4-1.7 |

(*) rumore riferito all'ingresso @ $C_{det} \cong 0$ pF (valore dichiarato dal costruttore).

In conclusione dal confronto dei dati di **Tabella II** ottenuti si può dedurre che, come prevedibile dai dati di **Tabella I**, il preamplificatore con le migliori prestazioni in termini di rumore (FWHM) è il campione della eV # 2 accoppiato ad un post-amplificatore con uno shaping time di 0.25 μ sec.

Infine, considerato che la migliore costante tempo di formazione dell'impulso (Shaping Time) è di 0.25 μ sec per il campione eV-5093_2, si può ritenere che utilizzando questo CSP si possano "seguire" fedelmente (ovvero senza degradazione significativa delle prestazioni spettroscopiche) count rates dell'ordine di [50-60] kcps.

In altri termini il campione eV-5093_2 soddisfa le esigenze applicative di buone prestazioni spettroscopiche combinate con capacità di sostenere elevate count rates.

Si eseguirà, infine, una serie di test con preamplificatori (CREMAT CR-102B) in grado di accettare un JFET esterno già selezionato precedentemente per tentare di migliorare ulteriormente le prestazioni di rumore [**Rif. 12**].

5. Riferimenti.

1. G. Ventura, G. di Cocco, W. Dusi, C. Labanti, "Preliminary study of a low-noise Charge Sensitive Preamplifier for a room temperature HgI₂ spectrometer", TESRE-CNR Internal Report N. 104, 1985. Work also presented at the ESA Workshop on a Cosmic x-ray Spectroscopy Mission, Lyngby, Denmark, 24-26 June 1985.
2. ANSI-IEEE 300-1988 Test Procedure for Semiconductor Radiation Detectors, IEEE Trans. On Nucl. Sci., Dec 1988.
3. ANSI-IEEE 301-1988 Test Procedure for Amplifiers and Preamplifiers for Semiconductor Radiation Detectors, IEEE Trans. On Nucl. Sci., Dec 1988.

4. V. Radeka, "State of the Art of Low Noise Amplifiers for Semiconductor Radiation Detectors", Intern. Symp. On Nucl. Electronics, Versailles, France, Sept. 10-13, 1968.
5. F. S. Goulding, D. A. Landis, "Signal processing for semiconductor detectors", IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-29, N° 3, June 1982.
6. A. Kowalski, "Nuclear Electronics", Mc-Graw-Hill Book Co., 1970.
7. A. Donati, G. Ventura, "Amplificatore-Formatore per impieghi in spettroscopia a raggi-X con rivelatori a stato solido a CdTe operanti a temperatura ambiente", Rapporto Interno IASF-TeSRE/CNR N. 330, Gennaio 2002.
8. A. Van der Ziel, "Gate Noise in Field Effect Transistor at moderately High Frequencies", Proc. Of the IEEE, **51**, 461, 1963.
9. G. Ventura, "Analisi approssimata del comportamento dei parametri principali di un FET a giunzione in funzione della temperatura", Rapporto Interno TeSRE-CNR N. 262, Nov. 1999.
10. C. J. Todd, "Junction Field Effect Transistor", John Wiley & Sons, NY, 1968.
11. L. J. Sevin, "Field Effect Transistor", Mc-Graw-Hill Book Co., 1965.
12. A. Donati, G. Ventura, "Scelta per l'impiego di un JFET in preamplificatori di carica (CSP) di catene spettroscopiche basate su rivelatori a CdTe operanti a temperatura ambiente", Rapporto Interno IASF-TeSRE/CNR N. 331, Febbraio 2002.
13. N. Auricchio, L. Brigliadori, A. Donati, W. Dusi, P. Fougères, G. Landini, D. Mengoni, E. Perillo, P. Siffert, G. Ventura, "A study of the spectroscopic response of planar CdTe detectors when irradiated at various angles of incidence." *To be published to NIM.*