

***Caratterizzazione spettroscopica di rivelatori di CZT
per il progetto ASI
“Rivelatori Spettroscopici X e Gamma in CZT”***

Rapporto Interno INAF/IASFBO n. 496/2007
(Agosto 2007)

Authors:

N. Auricchio ^{(1), (2)}
E. Caroli ⁽¹⁾
A. Donati ⁽¹⁾
F. Schiavone ⁽¹⁾
G. Ventura ⁽¹⁾

Affiliations:

⁽¹⁾ INAF/IASF-Bologna
⁽²⁾ Dipartimento di Fisica-Università di Ferrara

INAF/IASF Bologna		<i>Issue: 1</i> <i>Date: 23/08/2007</i> <i>page: 2/15</i>
------------------------------------	--	---

Indice

- 1. Scopo del rapporto**
- 2. Abbreviazioni**
- 3. Sommario**
- 4. Campioni testati**
- 5. Stabilità del lotto CZT:In 06/05**
- 6. Stabilità del lotto CZT:In 08/06**
- 7. Caratterizzazione del lotto CZT:11**
- 8. Caratterizzazione del lotto CZT:15**
 - 8.1 Scansione in tensione**
- 9. Misure di correnti di fuga**
- 10. Caratterizzazione del lotto CZT:In 06/05**
- 11. Caratterizzazione del lotto CZT:In 05/05**
- 12. Valutazione delle prestazioni dei rivelatori IMARAD**
- 13. Conclusioni**

INAF/IASF Bologna		<i>Issue: 1 Date: 23/08/2007 page: 3/15</i>
------------------------------	--	---

1. Scopo del rapporto

Lo scopo del presente documento è di riportare i risultati della caratterizzazione dei campioni forniti dall'Istituto Maspec di Parma nel periodo Aprile-Luglio 2007.

2. Abbreviazioni

PPF	Planar Parallel Field
PTF	Planar transverse Field
CCE	Charge Collection Efficiency
S.T.	Shaping Time

3. Sommario

La caratterizzazione effettuata nel periodo Aprile - Luglio 2007 presso il laboratorio Stato Solido dell'IASF-Bologna dei campioni forniti dall'Istituto IMEM di Parma ha riguardato:

1) lo studio della stabilità dei rivelatori forniti in precedenza al fine di verificarne il comportamento non solo come contatori ma anche spettroscopico. La risposta dei rivelatori è stata registrata al variare della tensione e dell'energia dei fotoni incidenti con sorgenti di ^{241}Am (13.9 keV, 17.8 keV, 21 keV e 59.5 keV), ^{109}Cd (22 keV, 88 keV) e ^{57}Co (13.9 keV, 122 keV, 136 keV). I rivelatori sono stati irraggiati sia in configurazione planare standard (PPF) sia attraverso gli elettrodi (PTF). È stato valutato il prodotto $\mu\tau$ degli elettroni del campione che presentava la migliore risposta spettroscopica del secondo lotto testato ed è stata misurata la caratteristica IV dei campioni con un comportamento instabile;

2) lo studio della risposta di campioni appartenenti a 5 lotti differenti di cui uno in particolare era costituito da cristalli IMARAD con contatti depositati da IMEM per disaccoppiare la problematica della contattazione da quella della qualità spettroscopica del cristallo.

In particolare i rivelatori dei primi due lotti sono stati irraggiati sia nella configurazione tradizionale (in cui viene illuminato il catodo) sia attraverso gli elettrodi, a diverse tensioni di polarizzazione con le sorgenti radioattive citate in precedenza, ed è stata misurata la caratteristica IV dei campioni che presentavano un comportamento anomalo.

I campioni dei restanti lotti sono stati caratterizzati a parità di campo elettrico applicato utilizzando differenti *shaping time* dell'amplificatore formatore ed irraggiandoli nella geometria PPF con sorgenti di ^{241}Am , ^{109}Cd e ^{57}Co .

4. Campioni testati

Le seguenti tabelle riportano le caratteristiche geometriche e di costruzione dei dispositivi preparati presso IMEM/CNR di Parma.

Tabella I Caratteristiche del lotto CZT:In 06/05.

Campione di CZT	Area (mm ²)	Spessore (mm)	Guardia	Contatto
A	6.6x6.3	1.24		Evaporato Au-Au
B	6.7x6.8	1.68		Evaporato Au-Au
C	7.2x6.9	1.92		Evaporato Au-Au
D	6.8x6.8	1.22		Evaporato Au-Au
F	2.0x2.0	1.4	X	Evaporato Au-Au (ossidazione dopo evaporazione)
G	2.0x2.0	1.4	X	Evaporato Au-Au (ossidazione prima evaporazione)
H	2.5x2.5	1.4	X	Evaporato Au-Au (ossidazione dopo evaporazione)
I	3.5x3.5	1.4	X	Evaporato Au-Au (ossidazione prima evaporazione)

INAF/IASF Bologna		<i>Issue: 1 Date: 23/08/2007 page: 4/15</i>
------------------------------	--	---

Tabella II Caratteristiche del lotto CZT:In 08/05.

Campione di CZT	Area (mm ²)	Spessore (mm)	Guardia	Contatto
1 rumoroso	5.9x7.1	1.82	X	Evaporato Au-Au
2	6.6x5.9	1.12	X	Evaporato Au-Au
3 (connessione rotta)	7.9x5.9	1.14	X	Evaporato Au-Au
1	5.9x6.4	1.26		Electroless Au-Au
2 (rumoroso)	6.6x6.6	1.4		Electroless Au-Au
3 (non disponibile)	4.0x4.0	1.04		Electroless Au-Au

Tabella III Caratteristiche del lotto CZT:11.

Campione di CZT	Spessore (mm)	Griglia
1	1.06	X
2	1.06	X

Tabella IV Caratteristiche del lotto CZT:15.

Campione di CZT	Area (mm ²)	Spessore (mm)	Guardia	Contatto
A	5.8x8.6	1.06		Evaporato Au-Au
B	9.6x5.58	1.06		Evaporato Au-Au
D (non disponibile)	5.78x10.19	1.06		Electroless Au-Au

Tabella V Caratteristiche del lotto CZT:In 05.

Campione di CZT	Area (mm ²)	Spessore (mm)	Guardia	Contatto
C	2.5x2.5	1.4	X	Evaporato Au-Au (ossidazione prima dell'evaporazione)
D	2.5x2.5	1.4	X	Evaporato Au-Au (ossidazione dopo l'evaporazione)
E	2.5x2.5	1.4	X	Evaporato Au-Au (ossidazione prima dell'evaporazione)

Tabella VI Caratteristiche del lotto IMARAD.

Campione di CZT	Area (mm ²)	Spessore (mm)	Guardia	Contatto
A	2x2	1.0	X	Evaporato Au-Au (ossidazione dopo l'evaporazione)
B	2x2	1.0	X	Evaporato Au-Au (ossidazione prima dell'evaporazione)

Nelle sezioni che seguono sono riportati i risultati delle caratterizzazioni e delle misure effettuate su tali lotti allo scopo di valutare le prestazioni del materiale utilizzato come rivelatore di raggi X.

Le misure acquisite irradiando i rivelatori con sorgenti radioattive sono state eseguite per la maggior parte a parità di campo elettrico applicato di 100 V/mm.

Le misure di correnti di fuga sono state acquisite con un elettrometro modello Keithley 617.

5. Stabilità del lotto CZT:In 06/05

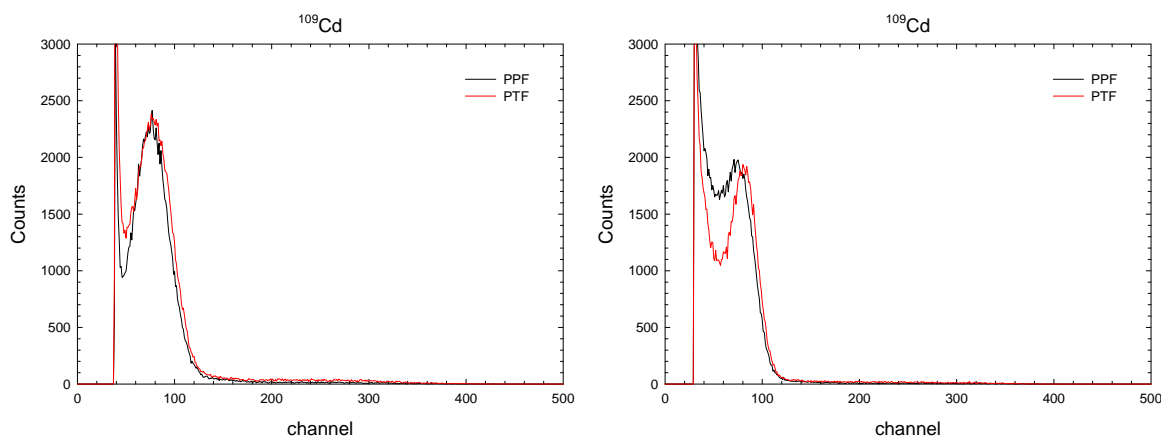
I campioni C e D del lotto **CZT:In 06/05** avevano fornito i risultati migliori come rivelatori spettroscopici, di conseguenza ne è stato studiato il comportamento in funzione del tempo. Tali campioni sono stati testati di nuovo dopo 14 mesi con l'obiettivo di determinarne la stabilità e di valutare il prodotto mobilità- tempo di vita non solo degli elettroni ma anche delle lacune.

I test non hanno fornito i risultati sperati in quanto i rivelatori si comportano come contatori indipendentemente da fatto che siano stati mantenuti polarizzati nel tempo o no.

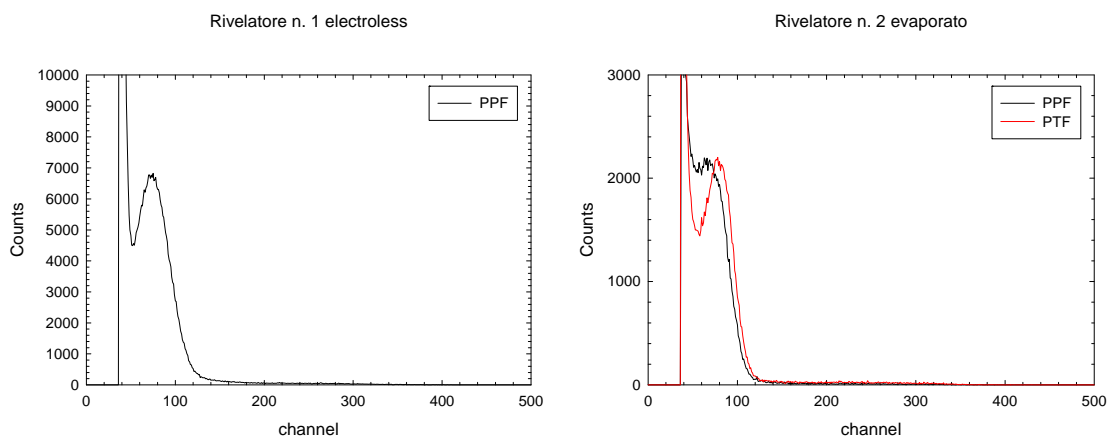
6. Stabilità del lotto CZT:In 08/06

I campioni 1 con contatto **electroless** e 2 con contatto **evaporato** sono stati testati per la seconda volta dopo 10 mesi, fornendo risultati positivi, in quanto si comportano come rivelatori spettroscopici.

Nella figure seguenti sono riportati i risultati dei primi test: rivelatore n. 1 avente i contatti depositati tramite electroless a sinistra e rivelatore n. 2 con contatti evaporati a destra. Tali rivelatori sono irradiati con una sorgente di ^{109}Cd , di cui è distinta dal rumore la linea a 22 keV.



Di seguito sono riportati gli spettri acquisiti durante la seconda fase di test alle stesse tensioni di polarizzazione di 200 V e 150 V dei primi test, con la stessa sorgente e con il medesimo *live time*: gli spettri acquisiti sono lievemente degradati rispetto ai precedenti.



Nella tabella VII è riportato il confronto dei rapporti Picco-valle ottenuti dall'analisi delle misure precedenti:

Tabella VII. Rapporti Picco-valle relativi ai rivelatori del secondo lotto.

Rivelatore	I fase di test		II fase di test	
	Conf. PPF	Conf. PTF	Conf. PPF	Conf. PTF
1 (contatto electroless)	2.36	1.82	1.52	-
2 (contatto evaporato)	1.21	1.80	-	1.53

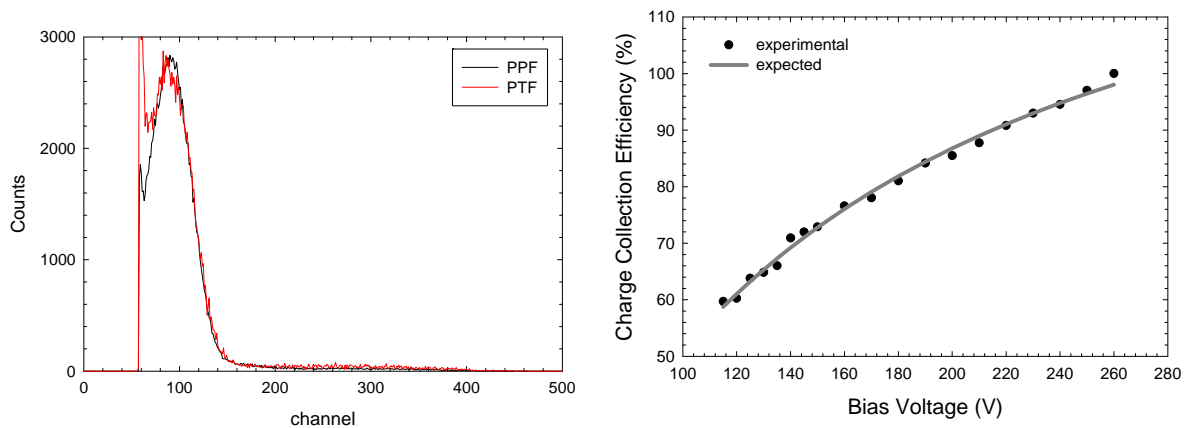
Nella tabella VIII sono riportati i valori di risoluzione energetica.

Tabella VIII. Risoluzione Energetica a 22 keV relativa ai rivelatori del secondo lotto.

Rivelatore	$\Delta E/E$ (%) I fase di test		$\Delta E/E$ (%) II fase di test	
	Conf. PPF	Conf. PTF	Conf. PPF	Conf. PTF
1 (contatto electroless)	~ 39	~41	~35	
2 (contatto evaporato)	-	~ 33	-	~ 34

La tensione del rivelatore 1, che presenta uno spettro in configurazione PPF migliore, è stata aumentata a 260 V e sono stati acquisiti gli spettri del ^{109}Cd nelle due configurazioni, riportati di seguito. I rapporti picco-valle sono 1.85 in PPF e 1.3 in PTF. Di questo campione è stato valutato il prodotto mobilità – tempo di vita medio degli elettroni con il metodo discusso nel documento “*Report per la prima riunione d’avanzamento*” il cui valore è $\mu\tau_e = 1.50 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}$.

Rivelatore n. 1 electroless; Bias = 260 V



7. Caratterizzazione del lotto CZT:11

I campioni dotati di griglia dorata sono stati testati a 120 e 200 V con un shaping time di 1 μs , in configurazione PPF e PTF ma non appare lo spettro (anche irraggiando l’elettrodo anodico) della sorgente di Cobalto e Cadmio.

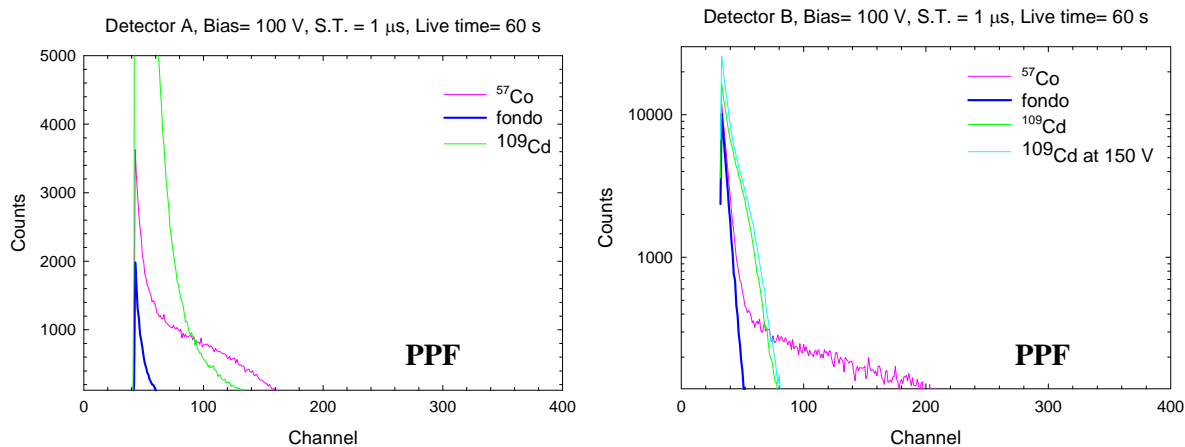
8. Caratterizzazione del lotto CZT:15

I campioni dotati di elettrodo d’oro uniforme sono stati testati impostando uno shaping time di 1 μs e 100 V di tensione di polarizzazione dato lo spessore di circa 1 mm:

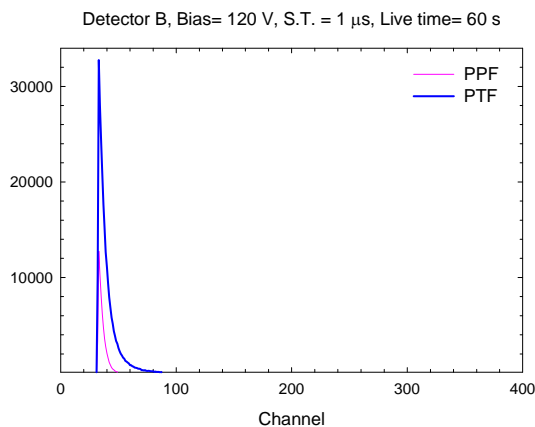
- **rivelatore A:** dopo 15 ore di polarizzazione a 50 V, la tensione è stata aumentata a 100 V. Le sorgenti di Cobalto e Cadmio sono rivelate in conteggi ma non viene prodotto lo spettro sia in PPF sia in PTF. Sono presenti degli spike, aumenti improvvisi di conteggi che si distinguono bene

all'oscilloscopio. Si è notato che il fotopicco a 22 keV della sorgente di ^{109}Cd è presente nei primi istanti di misura ma in seguito viene inglobato nel rumore. Questo dispositivo presenta un comportamento variabile;

- **rivelatore B:** acquisizione a 100, 120 e 150 V con shaping time di 1 μs in configurazione PPF e PTF, più rumorosa. In tale configurazione la tensione è stata aumentata da 150 V a 180 V, fino a 200 V ma lo spettro delle sorgenti di Cobalto e Cadmio non si accumulano ugualmente.

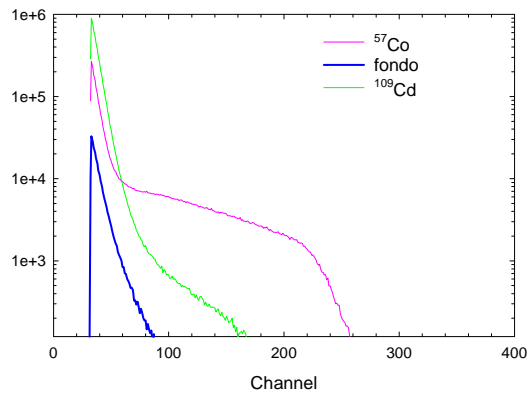


Nella figura seguente è riportato un confronto tra le misure di rumore (senza illuminare i rivelatori con sorgenti) nelle due configurazioni, in cui possiamo notare il maggior contributo di rumore nello spettro nella geometria PTF.

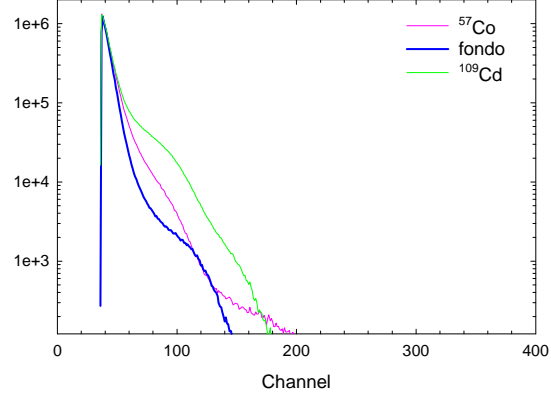


Vengono anche riportati gli spettri acquisiti in PTF a differenti tensioni in cui possiamo notare un andamento anomalo dello spettro di rumore e delle sorgenti radioattive, motivo per cui si è preferito continuare ad investigare il comportamento del rivelatore in PPF. A 200 V dopo la sottrazione del fondo si può notare un accenno del fotopicco a 60 keV della sorgente di ^{241}Am .

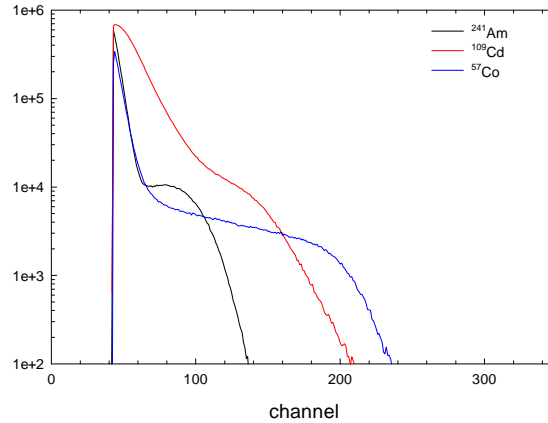
Detector B, Bias= 120 V, S.T. = 1 μ s, Live time Cd= 1800 s, Co= 600 s



Detector B, Bias= 200 V, S.T. = 1 μ s, Live time=1800 s



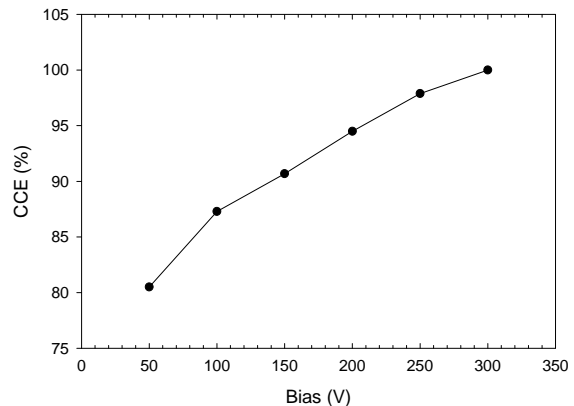
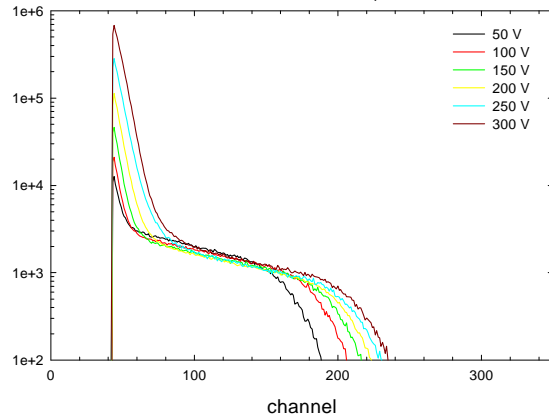
Detector B, S.T.=1 μ s, Bias = 200 V



8.1 Scansione in tensione

Per poter verificare che all'aumentare della tensione di polarizzazione l'efficienza di raccolta di carica cresca, la tensione è stata aumentata da 50 a 300 V con step di 50 V e possiamo notare dagli spettri che l'involuppo di carica ad alta energia aumenta con la tensione, come mostrato nel grafico a fianco in cui la Charge Collection Efficiency è riportata in funzione della tensione di polarizzazione. Poiché non è presente il fotopicco a 122 keV, è stato fissato come canale di riferimento quello all'estremo dello spettro (ad alta energia) con un conteggio ≥ 100 counts.

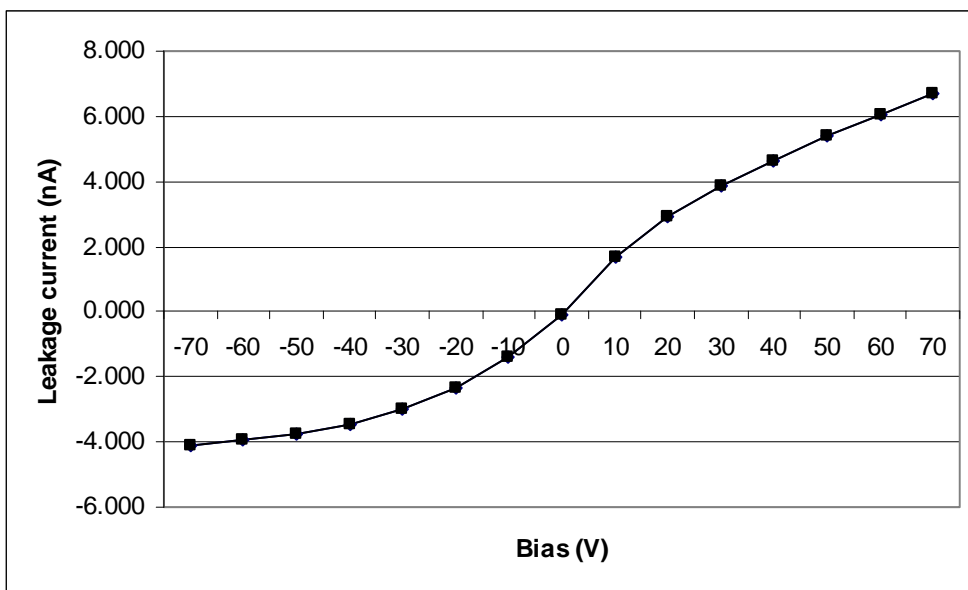
Detector B, S.T.=1 μ s



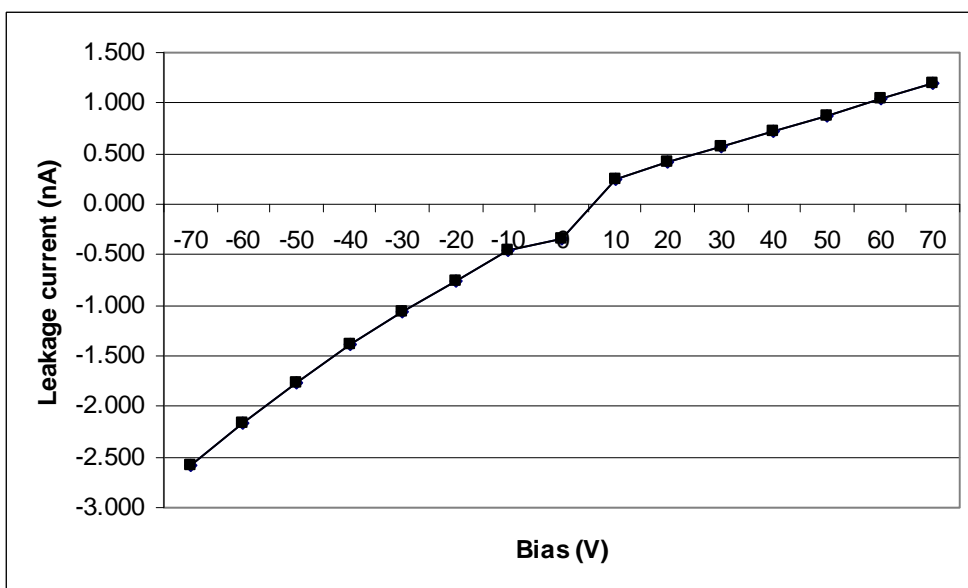
9. Misure di correnti di fuga

Di seguito sono riportati gli andamenti delle correnti di fuga misurate all'IASF Bologna di alcuni campioni

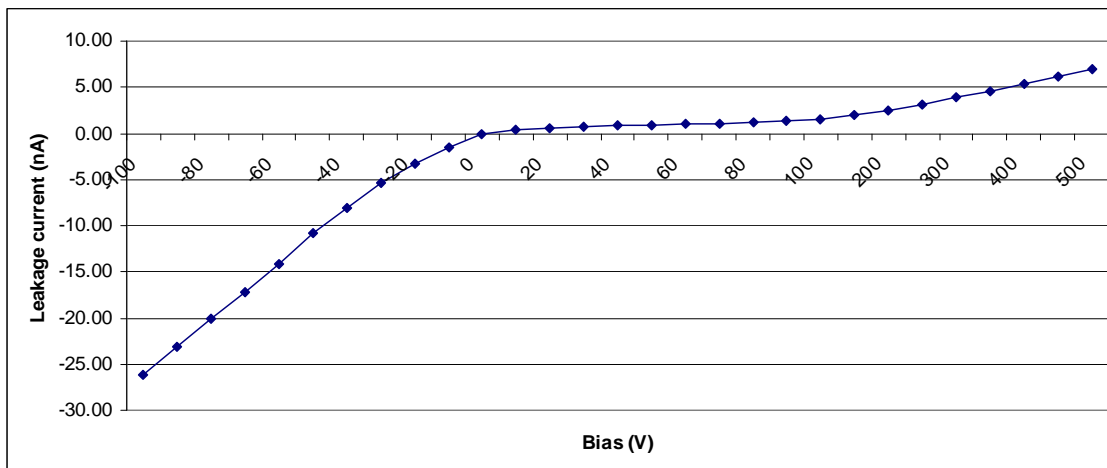
Rivelatore D del lotto **CZT:In 06/05**. Durante la seconda fase di test è stata acquisita la caratteristica IV di tale rivelatore per verificare se alla perdita del comportamento spettroscopico corrisponda una degradazione delle prestazioni del cristallo. Le correnti di fuga risultano solo lievemente aumentate, questo lascia presupporre che il cristallo non sia degradato.



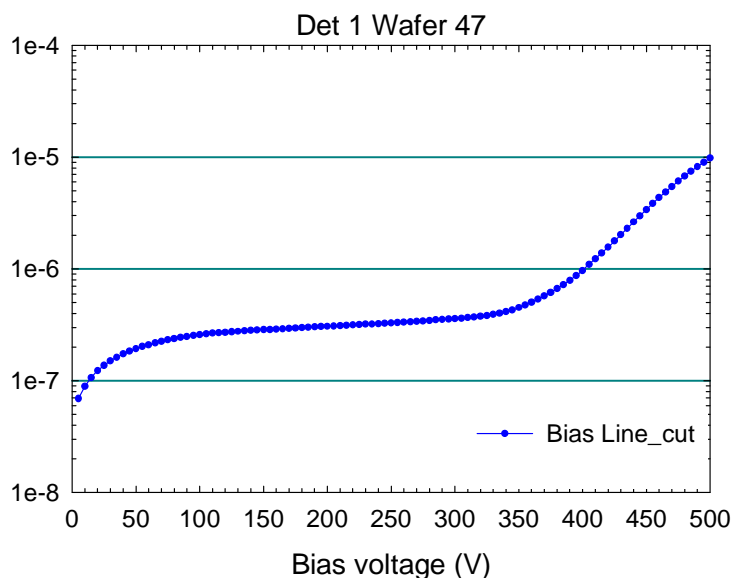
Rivelatore A del lotto **CZT:15**.



Rivelatore B del lotto **CZT:15**.

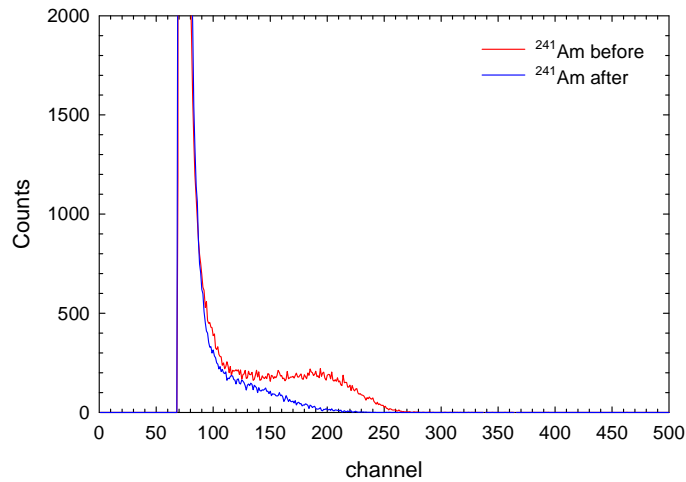


L'andamento di questa caratteristica IV è simile a quello dei diodi al Silicio (come dimostra un grafico tipico riportato di seguito), in cui se non si raggiunge la tensione di svuotamento non è presente il fotopicco della sorgente che illumina il rivelatore. Per verificare questa ipotesi la tensione è stata aumentata fino a 500 V senza però produzione dello spettro.

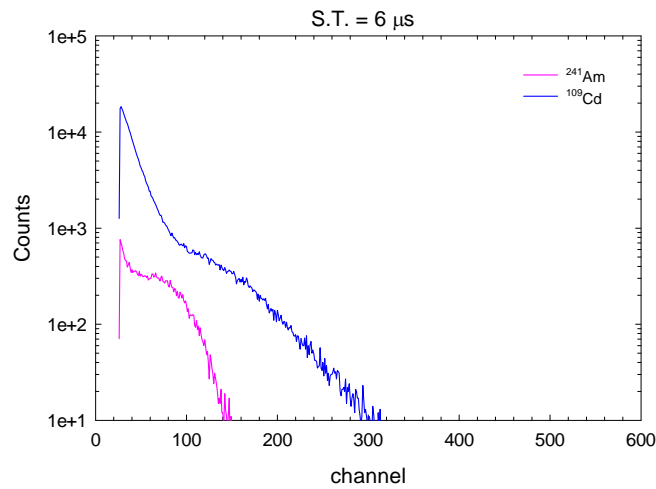


10. Caratterizzazione del lotto CZT:In 06/05

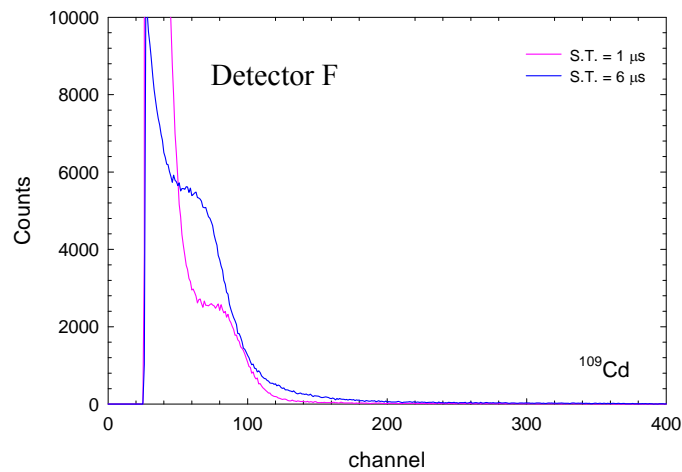
Il rivelatore H appartenente alla stessa fetta del rivelatore D (lingotto **CZT:In 06/05**) è stato caratterizzato per indagare sulla preparazione e stabilità dei contatti. Alla prima accensione il rivelatore ha mostrato il picco a 22 keV del ^{109}Cd ben distinto dal rumore e i 60 keV del ^{241}Am , confermando il comportamento spettroscopico del dispositivo. Dopo due giorni di polarizzazione il rivelatore non presenta più i fotopicchi delle sorgenti di ^{109}Cd e di ^{241}Am , come si può notare dal grafico seguente in cui sono riportati gli spettri della sorgente di Americio all'accensione e dopo due giorni di polarizzazione, acquisiti nelle medesime condizioni sperimentali

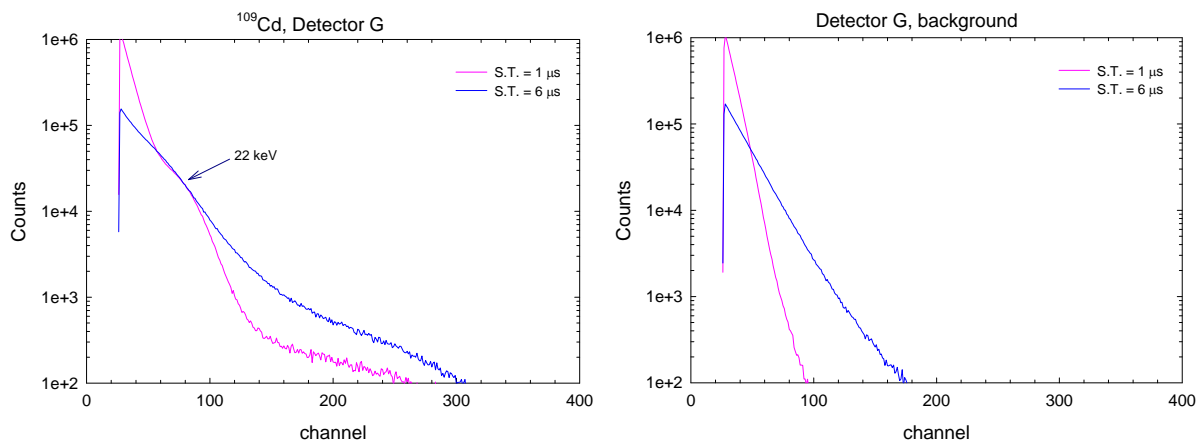


Il rivelatore H è stato irraggiato anche dal lato dell'anodo ma non sono evidenti strutture imputabili a fotopicchi formati con un sufficiente rapporto picco-valle (vedi grafico riportato di seguito).

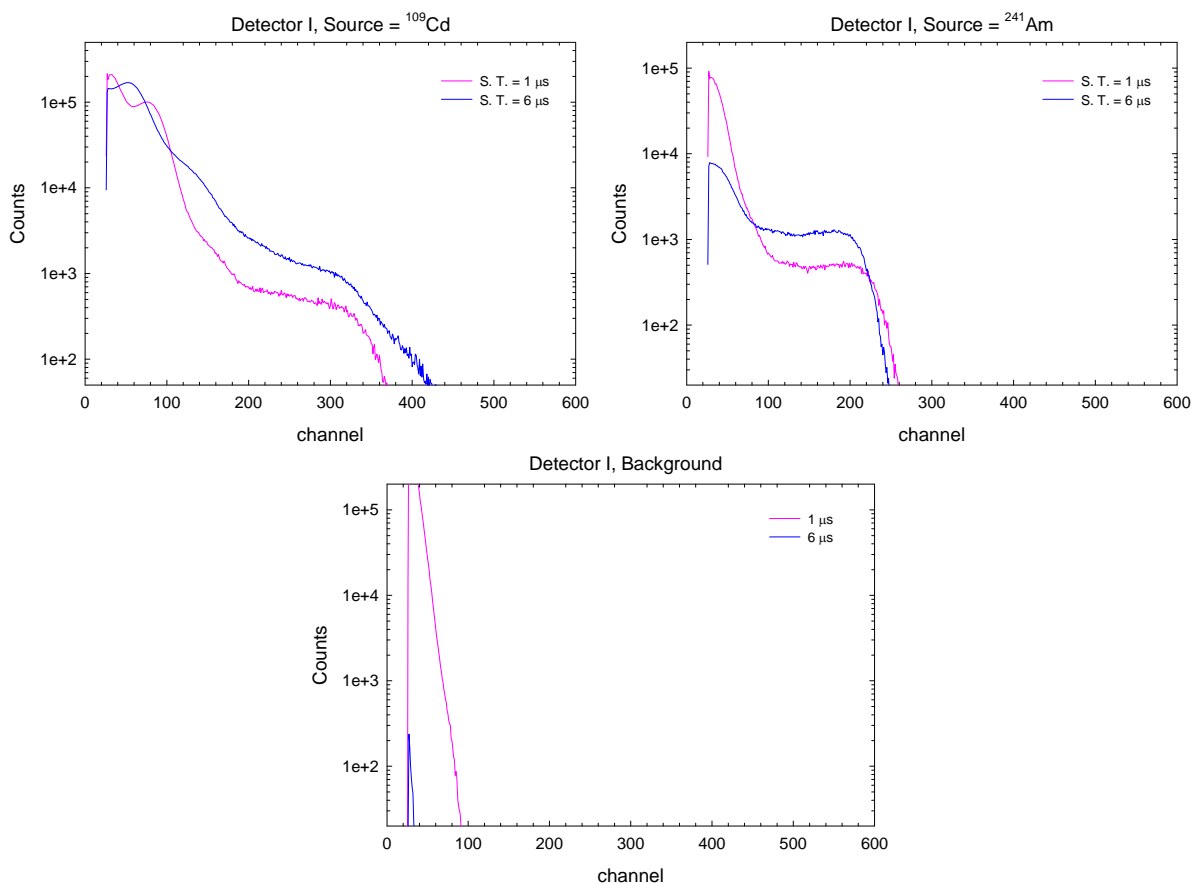


Di tale lotto sono stati testati i rivelatori F e G, le cui prestazioni non sono soddisfacenti per cui non vengono presentati gli spettri acquisiti tranne quelli relativi al ^{109}Cd e al fondo.





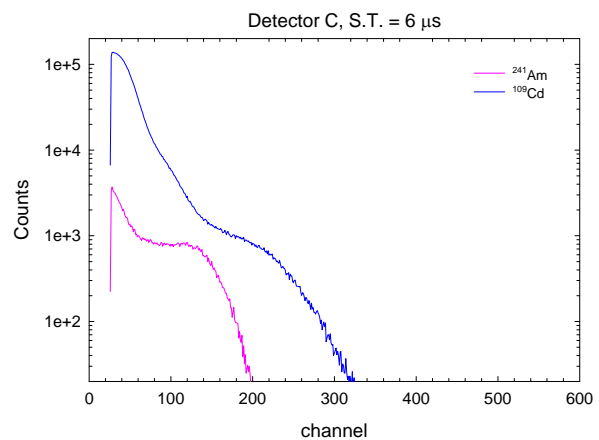
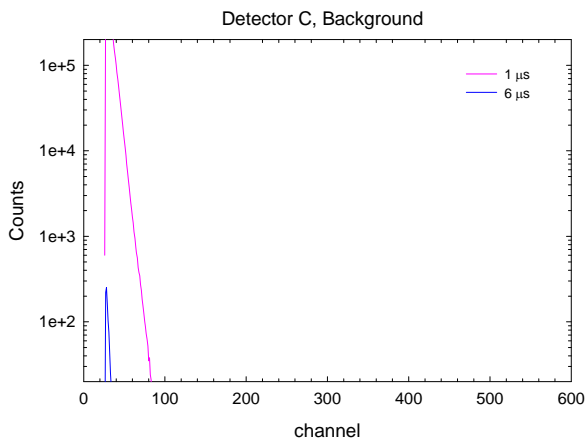
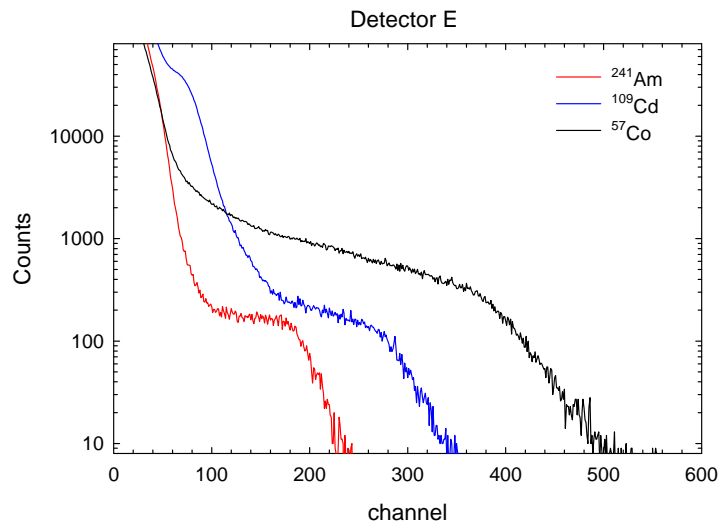
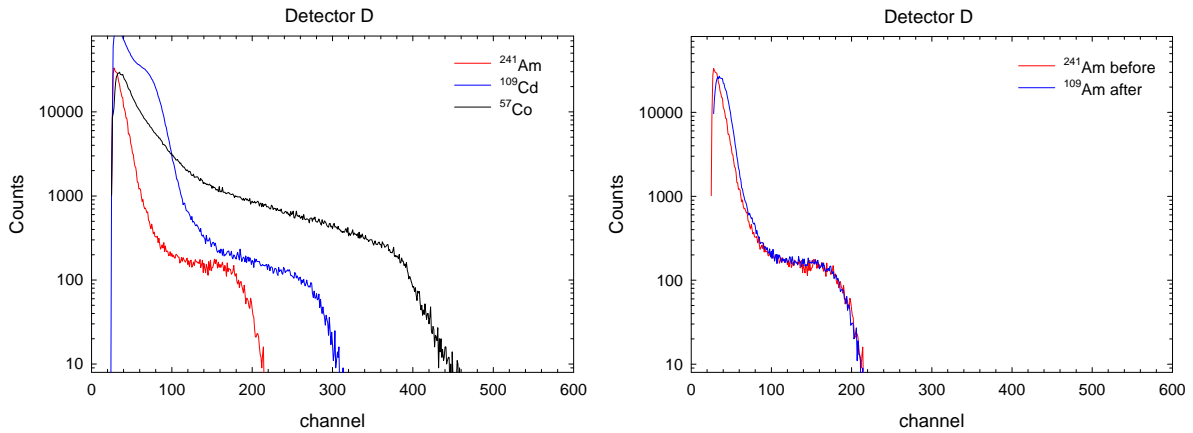
L'ultimo campione caratterizzato è stato il rivelatore I che ha rivelato buone capacità spettroscopiche a basse (22 keV) e medie energie (60 keV) come possiamo notare dagli spettri riportati di seguito.



11. Caratterizzazione del lotto CZT:In 05/05

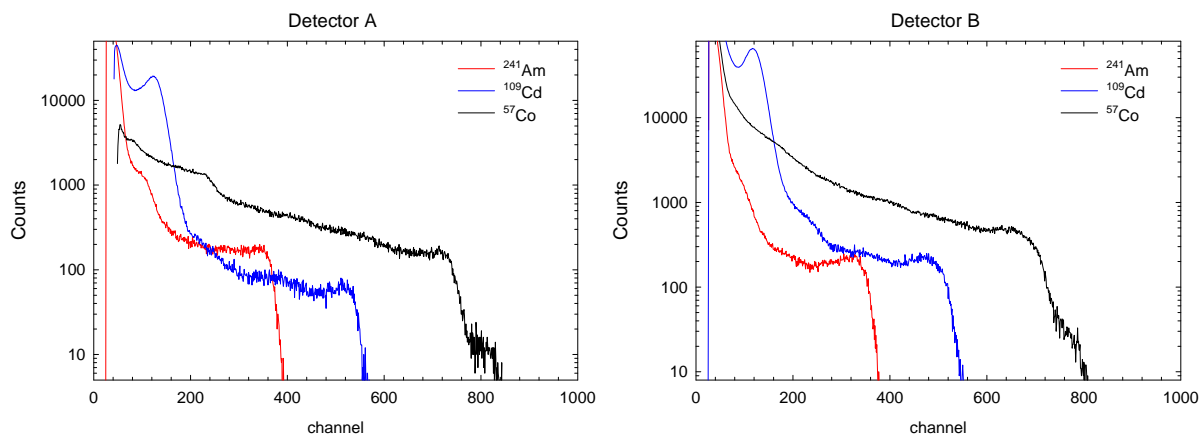
Sono stati testati i rivelatori C, D ed E del lotto CZT:In 05/05. Nello spettro dell' ^{241}Am relativo al rivelatore D possiamo notare il picco a 60 keV con un basso rapporto picco-valle e un accenno del fotopicco a 22 keV della sorgente di Cadmio. Possiamo fare le stesse considerazioni per il rivelatore C ed E. È stato acquisito lo spettro dell' ^{241}Am del rivelatore D dopo 2 giorni di alimentazione per

verificare la stabilità dei contatti in quanto sia tale rivelatore sia il campione H del lotto CZT:In 06/05 sono stati ossidati dopo l'evaporazione del contatto. Dal confronto dei due spettri (grafico a destra) possiamo notare che non vi sono sostanziali cambiamenti. Questo induce a concludere che l'ossidazione prima dell'evaporazione del contatto non incida sulla stabilità degli spettri.

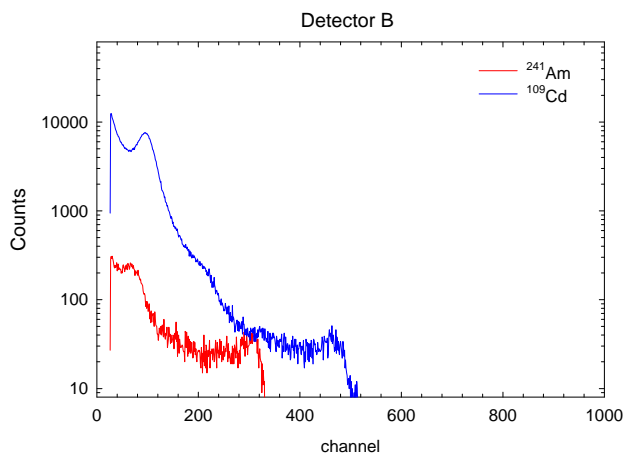


12. Valutazione delle prestazioni dei rivelatori IMARAD

Al fine di separare la problematica della contattazione da quella della qualità spettroscopica del cristallo sono stati testati dei cristalli IMARAD i cui contatti sono stati depositati da IMEM.



I campioni sono stati alimentati a parità di campo elettrico applicato di 100 V/mm. Come possiamo notare dagli spettri dei rivelatori A e B sono presenti i fotopicchi a 22 e 88 keV del ^{109}Cd , la linea a 122 keV del ^{57}Co (si intravedono i 136 keV mentre la linea a 14 keV è sotto soglia) e i 60 keV dell' ^{241}Am . Aumentando lo shaping time a 6 μs si riescono a distinguere dal rumore le linee a bassa energia dell' ^{241}Am , come mostrato di seguito. Dall'analisi degli spettri possiamo concludere che le risoluzioni energetiche alle diverse energie di tali rivelatori sono peggiori rispetto allo standard atteso per la qualità dei cristalli IMARAD; probabilmente la degradazione degli spettri potrebbe essere imputabile alla deposizione dei contatti.



Nella tabella 9 sono riportati i valori del rapporto Picco-valle e della risoluzione energetica a 22 keV dei due rivelatori IMARAD caratterizzati.

Tabella IX. Rapporti Picco-valle e risoluzione energetica a 22 keV relativi ai rivelatori IMARAD.

Rivelatore	Picco-valle	Risoluzione energetica (%)
A	1.5	25.60
B	1.7	25.75

13. Conclusioni

Dai risultati ottenuti dalla caratterizzazione dei campioni appartenenti ai diversi lingotti prodotti dall'IMEM possiamo concludere che il materiale presenta una buona resistività ($> 10^{10} \Omega\text{cm}$), bassi valori delle correnti di leakage e buone proprietà di trasporto della carica elettronica. I test effettuati hanno mostrato che la purezza del materiale di partenza è fondamentale per ottenere un comportamento spettroscopico dei dispositivi. Il materiale JAP 7N/7N/5N, infatti, presenta buone caratteristiche spettroscopiche a bassa e media energia, confrontabili con quelle dei rivelatori a scintillazione, mentre le prestazioni dei dispositivi degradano notevolmente con il materiale Canada 6N. Si attende un notevole miglioramento con i dispositivi che verranno realizzati con il lingotto preparato con il materiale JAP 7N/7N/7N. Nel corso delle misure è stata evidenziata l'importanza di una deposizione dei contatti affidabile e stabile. Questo aspetto necessita di ulteriori approfondimenti per poter migliorare la risposta spettroscopica dei rivelatori.

I rivelatori con capacità spettroscopiche provenienti da lingotti di elevata qualità (lotti CZT:In 05-06-08/05) presentano le caratteristiche tensione-corrente migliori e un basso trapping superficiale rispetto ai campioni dei lingotti di bassa qualità (CZT:11 e 15) caratterizzati da correnti di leakage più elevate anche dopo la passivazione e da un elevato contributo proveniente dalle trappole superficiali per cui si è riusciti ad acquisire uno spettro solo per un rivelatore del lotto 15.

Viene riportata in conclusione una tabella di riepilogo con alcuni risultati rilevanti:

Tabella X. Riepilogo dei risultati ottenuti dalla caratterizzazione dei dispositivi prodotti da IMEM.

Lotto CZT:In 06/05	Stabilità	Shaping time (μs)		^{57}Co (keV)			^{241}Am (keV)		^{109}Cd (keV)	
		1	6	14	122	136	Low energy	60	22	88
B in PPF		✓		No	No	No	✓	✓	✓	No
C in PPF	No	✓		✓	No	No	✓	✓	✓	No
C in PTF		✓		No	No	No	No	✓	✓	✓
D in PPF	No	✓		✓	No	No	✓	✓	✓	No
F in PPF fetta B (top)		✓	✓				No	No	✓	No
G in PPF fetta B (top)		✓	✓	No	No	No	No	Bad	No	No
H fetta C (bottom)	No	✓	✓				No	✓	✓	No
I fetta C (bottom)		✓	✓	No	No	No	No	✓	✓	No
lotto CZT:In 08/05										
1-Electroless in PPF	✓	✓		No	No	No	Bad	✓	✓	No
1-Electroless in PTF		✓		No	No	No	Bad	✓	✓	No
2-Evaporato in PPF	✓	✓		No	No	No			Bad	No
2-Evaporato in PTF		✓		No	No	No	✓	✓	✓	No
lotto CZT:15										
A	variabile	✓								
B		✓		No	No	No	No	✓	No	No
lotto CZT:In 05/05										
C fetta F (bottom)		✓	✓	No	No	No	No	✓	✓	No
D fetta E (top)	✓	✓	✓	No	No	No	No	✓	✓	No
E fetta E (top)		✓		No	No	No	No	✓	✓	No
lotto IMARAD										
A		✓		No	✓	✓	✓	✓	✓	✓
B	✓	✓	✓	No	✓	✓	✓	✓	✓	✓