

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΕΞΑΡΤΗΣΗΣ ΦΑΣΜΑΤΟΓΡΑΦΟΥ CdTe ΑΚΤΙΝΩΝ-X

Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

¹ Τμήμα Μηχανικών Βιοϊατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

² Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³ Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

Email: gfoun@teiath.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ανάγκες της τεχνολογίας στην ιατρική απεικόνιση επιβάλλουν την γνώση του φάσματος της ακτινοβολίας που προσπίπτει στον εξεταζόμενο και τον ανιχνευτή. Η γνώση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της ανιχνευτικής διάταξης, σε ακριβέστερες συνθήκες διάγνωσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επίτευξη ελάχιστης δόσης στον εξεταζόμενο με το καλύτερο δυνατό διαγνωστικό αποτέλεσμα. Η παραπάνω γνώση είναι ιδιαίτερα σημαντική σε νέες τεχνικές ακτινοβόλησης όπως η απεικόνιση διπλής ενέργειας ή ο σχεδιασμός ανιχνευτικής διάταξης για την χρήση με νέα υλικά στόχου φίλτρου. Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να περιγράψει τη διαδικασία βαθμονόμησης ενός φασματογράφου ακτίνων-X καθώς και τη χρήση του στη μέτρηση φάσματος για εφαρμογή διπλής ενέργειας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ένας ανιχνευτής Τελλουριούχου Καδμίου (Cadmium Telluride-CdTe) AMPTEK XR-100T. Ο ανιχνευτής αποτελείται από 1024 κανάλια. Η αντιστοίχιση των καναλιών σε ενέργεια έγινε με ακτινοβόληση του CdTe με I-125, που εκπέμπει στα 27 keV και Tc-99m που εκπέμπει στα 140 keV. Βρέθηκε ότι κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε 5.89 keV. Το μετρούμενο φάσμα διορθώθηκε για την ενεργειακή ευαισθησία του CdTe χρησιμοποιώντας πολυώνυμο 5^{ου} βαθμού ($R^2=0.9969$). Ο βαθμονομημένος ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση φασμάτων από λυχνία οστικής πυκνομετρίας ακτίνων-X (Norland XR-46) με διάφορα φίλτρα, μέσης ενέργειας από 23 μέχρι 76 keV.

Λέξεις-Κλειδιά: βαθμονόμηση, διπλή ενέργεια, φασματογράφος ακτίνων-X, ενεργειακή ευαισθησία

ABSTRACT

The needs of technology in medical imaging implement to know the spectrum incident on the patient and the detector. This knowledge can lead to improved modeling of the detector, in more accurate diagnostic conditions. This results in better diagnosis with lower dose for the patient. This knowledge is important in new radiation techniques such

Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

¹Τμήμα Βιοϊατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

²Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

Βαθμονόμηση και διόρθωση ενεργειακής εξάρτησης φασματογράφου CdTe ακτίνων-X

as dual energy imaging or modeling the detector for use with new filter materials. The aim of this study is to describe the calibration procedure of an X-ray spectrometer and its use for the dual energy spectrum measurement. For this reason, a Cadmium Telluride (CdTe) AMPTeK XR-100T detector was used. The detector consists of 1024 channels. The corresponding energies were calculated after irradiation of CdTe with I-125 and Tc-99m, which emit at 27keV and 140keV, respectively. It was found that each channel corresponds to 5.89keV. The measured spectrum was corrected for the energy sensitivity of CdTe using a fifth order polynomial ($R^2=0.9969$). The calibrated detector was used for the measurement of spectra obtained from a bone densitometry X-ray (Norland XR-46) source. Several filters were applied with mean energies in the range of 23 to 76keV.

Keywords: calibration, dual energy, X-ray spectrometer, energy sensitivity

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γνώση του φάσματος μιας λυχνίας είναι πολύ σημαντική για τη σωστή διαχείριση του έτσι ώστε να ικανοποιεί ταυτόχρονα τόσο τον θεράποντα ιατρό στη διάγνωση όσο και τον ασθενή από πλευράς δόσης που λαμβάνει στην εξέταση. Για το λόγο αυτό, η χρήση ενός ανιχνευτή με καλή ενεργειακή διακριτική ικανότητα είναι σημαντική στις τεχνικές ακτινοβολήσης, όπως την τεχνική απεικόνισης διπλής ενέργειας.

Η βελτίωση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας είναι στο επίκεντρο της έρευνας για το Τελλουριούχο Κάδμιο (Cadmium Telluride, CdTe) για πολλά χρόνια. Βασικό μέλημα των ερευνητών είναι η ύπαρξη συμβιβασμού μεταξύ του θορύβου των ηλεκτρονικών και της καλής απόδοσης στη συλλογή ρεύματος (James et al. 1995). Αποτελέσματα των διαφόρων μελετών (Redus et al. 2002) οδήγησαν σε έναν ανιχνευτή CdTe με ενέργεια και ευαισθησία βελτιστοποιημένες για τις ενέργειες των χαρακτηριστικών των ακτίνων-X, από 10 μέχρι 100keV. Επιπλέον, η βελτίωση στη διαδικασία παραγωγής οδήγησε στη βελτίωση της επαναληψιμότητας των φασμάτων (Redus et al. 2009).

Η τάση του παλμού που παράγεται σε έναν ανιχνευτή διαμορφώνεται από τον αναλυτή πολλαπλών καναλιών (Multi-Channel Analyzer, MCA). Ο MCA λαμβάνει το πολύ μικρό σήμα τάσης που παράγει ο ανιχνευτής, το διαμορφώνει και μετατρέπει το σήμα αυτό σε ψηφιακό. Ο μετατροπέας αναλογικού σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter, ADC) επίσης ταξινομεί τους παλμούς ανάλογα με το ύψος τους. Οι ADC έχουν συγκεκριμένο αριθμό από «τμήματα» στα οποία μπορούν να ταξινομηθούν αυτοί οι παλμοί. Αυτά τα τμήματα αντιπροσωπεύουν τα κανάλια του φάσματος. Ο αριθμός των καναλιών μπορεί να αλλάξει στα περισσότερα σύγχρονα συστήματα με την τροποποίηση του λογισμικού ή του hardware. Η επιλογή του πλήθους των καναλιών εξαρτάται από την ανάλυση του συστήματος και την ενέργεια που μελετάται. Η έξοδος του MCA οδηγείται σε υπολογιστή, ο οποίος αποθηκεύει, εμφανίζει και αναλύει τα δεδομένα (Gilmore and Hemingway 1995, Knoll 2000).

Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

¹Τμήμα Βιοιατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

²Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

Βαθμονόμηση και διόρθωση ενεργειακής εξάρτησης φασματογράφου CdTe ακτίνων-X

Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η διαδικασία βαθμονόμησης του φασματογράφου ακτίνων-Χ. Χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής Τελλουριούχου Καδμίου (Cadmium Telluride-CdTe) AMPTEK XR-100T. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν πηγές Ιωδίου (I-125), η οποία εκπέμπει στα 27keV, καθώς και Tc-99m η οποία εκπέμπει στα 140keV. Τα φάσματα που μετρήθηκαν διορθώθηκαν για την ενεργειακή ευαισθησία του CdTe και για το νεκρό χρόνο (dead time) του συστήματος.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

2.1 ΔΙΑΤΑΞΗ

Τα μετρούμενα φάσματα αποκτήθηκαν με τη χρήση του ανιχνευτή Τελλουριούχου Καδμίου (Cadmium Telluride-CdTe) XR-100T της εταιρίας Amptek Inc. Ο κρύσταλλος έχει επιφάνεια 3x3 mm και πάχος 2mm και στη σειρά παραμένει συνδεδεμένος με σύστημα ψύξης (Peltier cooler). Το παράθυρο του ανιχνευτή είναι κατασκευασμένο από 4 mil (100 μm) Βηρυλλίου. Η διάταξη επίσης αποτελείται από έναν ενισχυτή και τροφοδοτικό (μοντέλο PX4-CZT, Amptek Inc.). Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με το κύκλωμα RTD (Rise Time Discrimination) ενεργοποιημένο. Το ανιχνευτικό σύστημα περιέχει, επίσης, αναλυτή πολλαπλών καναλιών (Multi-Channel Analyzer, MCA) και λογισμικό απόκτησης (PMCA v1.2, Amptec Inc.).

Τα φάσματα ακτίνων Χ ελήφθησαν από λυχνία Βολφραμίου (W) οστικής πυκνομετρίας ακτίνων-Χ (Norland XR-46) με μέσες ενέργειες από 23 μέχρι 76 keV. Τα φάσματα μετρήθηκαν με χαμηλής έντασης ρεύματα (από 0.1 έως 1mA) και υψηλή τάση λυχνίας από 70 έως 100kVp. Επιπρόσθετα φίλτρα τοποθετήθηκαν στην έξοδο της λυχνίας για να τροποποιηθεί το φάσμα ακτίνων Χ. Οι μετρήσεις των φασμάτων ακτίνων Χ έγιναν σε απόσταση 60 cm από την πηγή.

2.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

Η διαδικασία βαθμονόμησης περιλαμβάνει την αντιστοίχιση καναλιών σε τιμές ενέργειας (keV). Για να πραγματοποιηθεί αυτό απαιτείται να είναι γνωστές οι ενέργειες δυο κορυφών του φάσματος. Λόγω του ότι ο αριθμός του καναλιού προσεγγιστικά μπορεί να θεωρηθεί ανάλογος της ενέργειας, η κλίμακα καναλιού μπορεί να μετατραπεί σε κλίμακα ενέργειας. Στην παρούσα εργασία οι δύο κορυφές, που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαθμονόμηση, αποκτήθηκαν με ακτινοβόληση του ανιχνευτή με I-125, που εκπέμπει στα 27 keV και Tc-99m που εκπέμπει στα 140 keV (Michail et al. 2011). Κατά την αντιστοίχιση του εύρους καναλιών με το αντίστοιχο εύρος ενεργειών, που εμπίπτουν στην περιοχή βαθμονόμησης, βρέθηκε ότι κάθε κανάλι αντιστοιχεί σε 5.89 keV. Η ενέργεια (E) συναρτίζεται του κάθε καναλιού (K) προσδιορίστηκε από τη σχέση:

$$E = \alpha \cdot K + \beta \quad (1)$$

Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

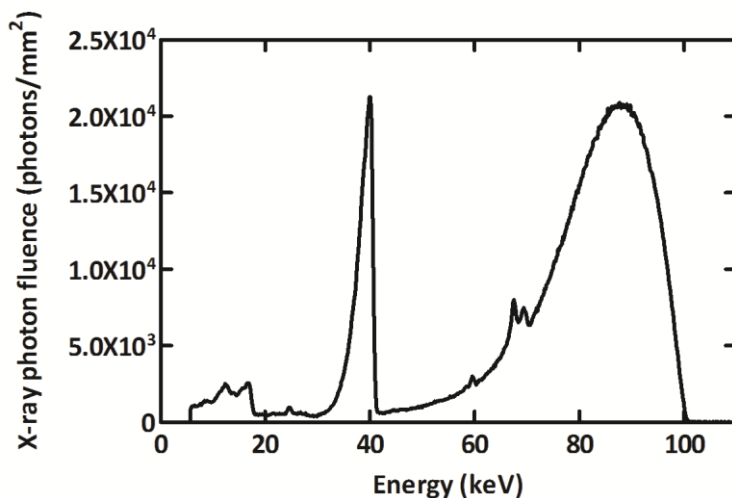
¹Τμήμα Βιοιατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

²Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

Βαθμονόμηση και διόρθωση ενεργειακής εξάρτησης φασματογράφου CdTe ακτίνων-Χ

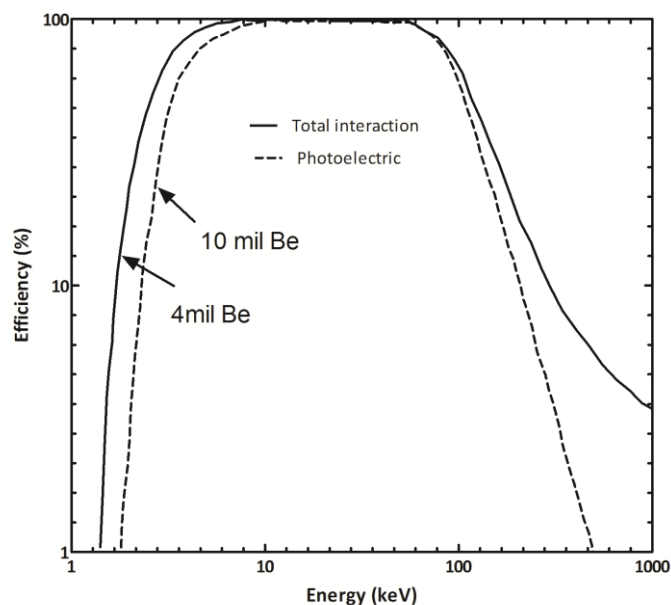
όπου E είναι η ενέργεια σε keV και a, β είναι σταθερές που προκύπτουν αυτόματα κατά τη βαθμονόμηση σε ένδειξη του ψηφιακού επεξεργαστή παλμών.



Εικόνα 1: Φάσμα ακτίνων-X από λυχνία Βολφραμίου (W) στα 100kVp με φίλτρο εξόδου 1300 μm Ce.

2.3 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ (Efficiency)

Η πιθανότητα ενός εκπεμπόμενου φωτονίου X να αλληλεπιδράσει με τον ανιχνευτή και να καταχωρηθεί ως γεγονός εκφράζεται από την απόδοση του ανιχνευτή. Η ενεργειακή ευαισθησία (απόδοση) του XR-100T-CdTe προκύπτει ως το γινόμενο της πιθανότητας διέλευσης της δέσμης ακτινοβολίας μέσω του Βηρυλλίου (Beryllium, Be) και της πιθανότητας αλληλεπίδρασης στο υλικό του CdTe. Η Εικόνα 2 δείχνει την απόδοση του XR-100T-CdTe συναρτήσει της ενέργειας (Amptec Inc).



Εικόνα 2: Η απόδοση του XR-100T-CdTe συναρτήσει της ενέργειας.

Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

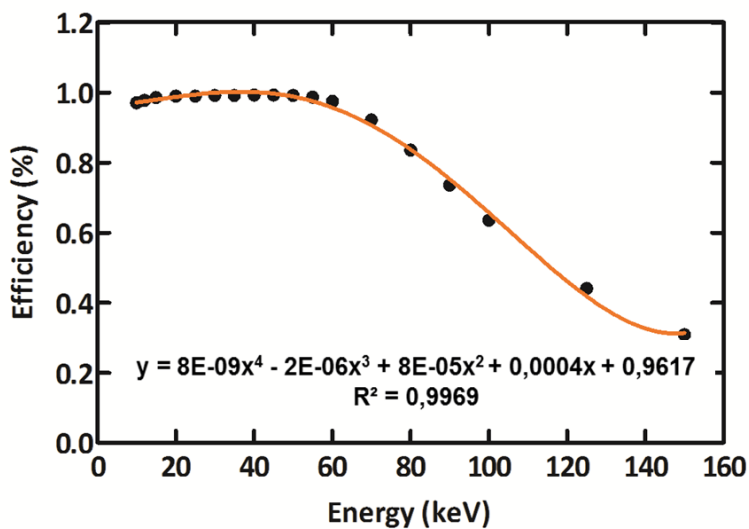
¹Τμήμα Βιοϊατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

²Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

Βαθμονόμηση και διόρθωση ενεργειακής εξάρτησης φασματογράφου CdTe ακτίνων-X

Η απόδοση του ανιχνευτή είναι μέγιστη (98%) έως τα 45 keV ενώ σε υψηλότερες ενέργειες μειώνεται αισθητά. Έως τα 100 keV, που είναι το εύρος των ενεργειών που χρησιμοποιούνται στην οστική πυκνομετρία ακτίνων-X, με λυχνία Βολφραμίου (W) (Norland XR-46), η απόδοση μειώνεται περίπου στο 60%. Στις ενέργειες, όπου η απόδοση του ανιχνευτή είναι χαμηλή, είναι απαραίτητο να γίνει διόρθωση των καταμετρούμενων κρούσεων βάση της απόδοσης του. Τα μετρούμενα φάσματα διορθώθηκαν για την ενεργειακή ευαισθησία του CdTe χρησιμοποιώντας πολυώνυμο 5ου βαθμού ($R^2=0.9969$). Η εξίσωση που δίνει τον αριθμό των κρούσεων, διορθωμένα ως προς την απόδοση του ανιχνευτή, προέκυψε ύστερα από προσαρμογή πολυωνυμικής συνάρτησης 5ου βαθμού σε τιμές που δίνει ο κατασκευαστής (Amptec Inc.).



Εικόνα 3: Προσαρμογή πολυωνυμικής συνάρτησης 5^{ου} βαθμού σε τιμές απόδοσης συναρτήσει της ενέργειας.

Η Εικόνα 4 δείχνει το φάσμα ακτίνων-X της Εικόνας 1 πριν και μετά τη διόρθωση ως προς την απόδοση του ανιχνευτή. Παρατηρείται σημαντική αύξηση του αριθμού των φωτονίων στις υψηλές ενέργειες μετά τη διόρθωση, καθώς σε υψηλότερες ενέργειες η απόδοση του ανιχνευτή είναι χαμηλή.

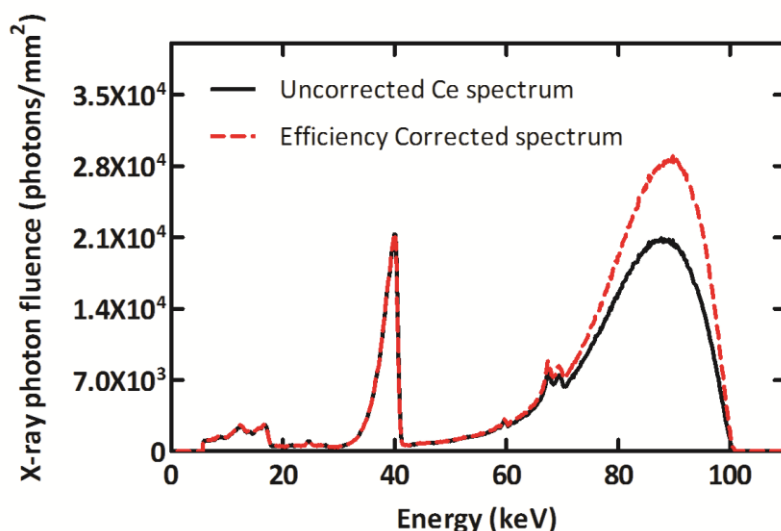
Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

¹Τμήμα Βιοϊατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

²Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

Βαθμονόμηση και διόρθωση ενεργειακής εξάρτησης φασματογράφου CdTe ακτίνων-X



Εικόνα 4: Φάσμα ακτίνων-X στα 100kVp με φίλτρο εξόδου 1300 μm Ce πριν και μετά τη διόρθωση ως προς την απόδοση του ανιχνευτή.

2.4 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΝΕΚΡΟΥ ΧΡΟΝΟΥ (Dead Time)

Ο PX4 χρησιμοποιεί δύο κανάλια για την παραγωγή του μετρούμενου φάσματος. Το Slow Channel είναι υπεύθυνο για τη μορφή του φάσματος, ενώ το Fast Channel είναι υπεύθυνο για την καταμέτρηση των προσπιπτόντων φωτονίων. Λόγω της ύπαρξης του νεκρού χρόνου, ο οποίος είναι ο χρόνος που ακολουθεί μετά από ένα συμβάν (παλμός) και κατά τη διάρκεια του οποίου δεν γίνεται καταγραφή, οι κρούσεις που εμφανίζονται ότι έχουν καταγραφεί πρέπει να διορθωθούν για το διάστημα αυτό. Για το Fast Channel του PX4, ο νεκρός χρόνος είναι 400nsec.

Εάν θεωρήσουμε ότι ο πραγματικός ρυθμός προσπιπτόντων φωτονίων είναι R_{IN} και ο νεκρός χρόνος του Fast Channel είναι $\tau_{FAST}=400\text{nsec}$, τότε ο ρυθμός φωτονίων εξόδου από το Fast Channel (R_{FAST}) υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$R_{FAST} = R_{IN} e^{-R_{IN}\tau_{FAST}} \quad (2)$$

Ο PX4 δεν σταματά να καταμετρά κατά τα νεκρά αυτά διαστήματα. Για τον προσδιορισμό των πραγματικά προσπιπτόντων φωτονίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί η παρακάτω σχέση, αν θεωρήσουμε ότι έχουμε ένα μη παραλυτικό σύστημα.

$$R_{IN} \cong R_{approx} = \frac{R_{FAST}}{1 - R_{FAST}\tau_{FAST}} \quad (3)$$

Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

¹Τμήμα Βιοιατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

²Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

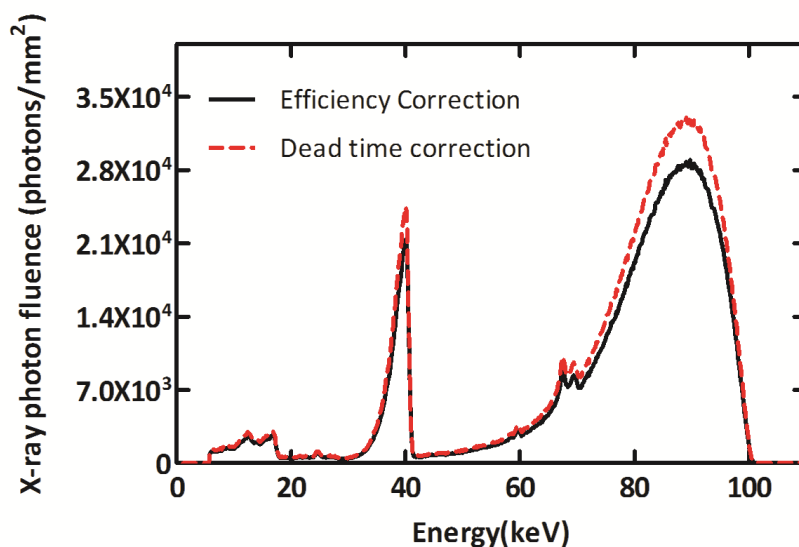
Βαθμονόμηση και διόρθωση ενεργειακής εξάρτησης φασματογράφου CdTe ακτίνων-X

Τα δεδομένα που εμφανίζονται στο φάσμα εξόδου επεξεργάζονται από το Slow Channel, το οποίο έχει χρόνο κορυφής (peaking time, τ_{peak}) και χρόνο διαπλατυσμένης κορυφής (flat top duration, τ_{flat}). Ο ρυθμός φωτονίων στο Slow Channel δηλώνεται ως R_{OUT} . Το R_{OUT} προκύπτει, για παραλυτικό χρόνο (paralyzable dead time), ως εξής:

$$R_{\text{OUT}} = R_{\text{IN}} e^{-(2.375)(R_{\text{IN}})(\tau_{\text{PEAK}} + \tau_{\text{FLAT}})} \quad (4)$$

Για να προσδιοριστούν οι πραγματικές κρούσεις σε κάθε κανάλι γίνεται, επίσης, διόρθωση σε κάθε κανάλι ως προς το λόγο $R_{\text{IN}}/R_{\text{OUT}}$. Συγκεκριμένα, εάν το σύστημα καταγράφει κρούσεις Meas_i σε κάθε κανάλι, τότε η πραγματική τιμή των κρούσεων στο κανάλι i , True_i , θα δίνεται από τη σχέση:

$$\text{True}_i = \text{Meas}_i \left(\frac{R_{\text{IN}}}{R_{\text{OUT}}} \right) \quad (5)$$



Εικόνα 5: Φάσμα ακτίνων-X στα 100kVp με φίλτρο εξόδου 1300 μm Ce με διόρθωση στην απόδοση του ανιχνευτή και πρόσθετη διόρθωση για το νεκρό χρόνο.

3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η περιγραφή της διαδικασίας βαθμονόμησης φασματογράφου ακτίνων-X. Χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής Τελλουριούχου Καδμίου AMPTEK XR-100T. Για τη βαθμονόμηση χρησιμοποιήθηκαν πηγές Ιωδίου (I-125), η οποία εκπέμπει στα 27keV, καθώς και Tc-99m η οποία εκπέμπει στα 140keV.

Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

¹Τμήμα Βιοϊατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

²Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

Βαθμονόμηση και διόρθωση ενεργειακής εξάρτησης φασματογράφου CdTe ακτίνων-X

Λόγω του ότι η απόδοση του CdTe σε ενέργειες μεγαλύτερες από 45keV είναι χαμηλή είναι απαραίτητη η διόρθωση των μετρούμενων φασμάτων ως προς αυτή. Παράλληλα, το γεγονός ότι το σύστημα έχει ένα διάστημα κατά το οποίο δεν καταμετρά (dead time), καθίσταται απαραίτητη η περαιτέρω διόρθωση των φασμάτων και για το νεκρό αυτό χρόνο για να αποκτηθεί ο πραγματικός αριθμός προσπιπτόντων φωτονίων. Οι διορθώσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με τις εξισώσεις που δίνονται από τον κατασκευαστή, όπως αυτές παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Παρατηρώντας τις Εικόνες 4 και 5 είναι εμφανές πως οι διορθώσεις αυτές είναι επιτακτικές για την απόκτηση του «πραγματικού» φάσματος έτσι ώστε η περαιτέρω χρήση του, όπως χρήση αυτού σε μελέτη προσομοίωσης, να παρέχει τις σωστές πληροφορίες για ακριβέστερα αποτελέσματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Το παρόν συγχρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και εθνικούς πόρους στο πλαίσιο της πράξης "ΑΡΧΙΜΗΔΗΣ ΙΙΙ - ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΩΝ ΟΜΑΔΩΝ ΣΤΟ ΤΕΙ ΑΘΗΝΑΣ" του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση»

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Gilmore G and Hemingway J., *“Practical Gamma-Ray Spectrometry”*, 1995, Wiley.

James R. B., Schlesinger T. E., Lund J. and Schieber M., *“Cd_{1-x}Zn_xTe spectrometers for gamma and X-ray applications”*, 1995, Eds. New York : Academic.

Knoll G., *“Radiation Detection and Measurement”*, 2000, Wiley.

Michail C.M., Spyropoulou V.A., Fountos G.P., Kalyvas N.I., Valais I.G., Kandarakis I.S. and Panayiotakis G.S., *“Experimental and theoretical evaluation of a high resolution CMOS based detector under X-ray imaging conditions”*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 58 (1), pp. 314-322, 2011.

Redus R. H., Pantazis J., Huber A. and Pantazis T., *“Improved sensitivity X-ray detectors for field applications”*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 49 (6), pp. 3247–3253, 2002.

Redus R.H., Pantazis J.A., Pantazis T.J., Huber A.C., and Cross B. J., *“Characterization of CdTe Detectors for Quantitative X-ray Spectroscopy”*, IEEE Trans. Nucl. Sci., 56 (4), pp. 2524-2532, 2009.

X-ray & Gamma Ray Detector, XR-100T-CdTe, Amptek, Bedford, MA [Online]. Available: <http://www.amptek.com/xr100cdt.html>.

Γ. Φούντος¹, Χ. Μιχαήλ¹, Ν. Μαρτίνη², Β. Κούκου², Π. Σωτηροπούλου², Ν. Καλύβας¹, Ι. Κανδαράκης¹ και Ε. Κουνάδη³

¹Τμήμα Βιοιατρικής Τεχνολογίας ΤΕ, Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Αθήνας

²Τμήμα Ιατρικής Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

³Νοσοκομείο «Αλεξάνδρα» Αθήνα

Βαθμονόμηση και διόρθωση ενεργειακής εξάρτησης φασματογράφου CdTe ακτίνων-Χ