



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

# **Ανίχνευση και αναγνώριση ραδιοϊσοτόπων μέσω ανιχνευτή σπινθηρισμού**

**ΠΟΤΗΡΙΑΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ**

**Αριθμός Μητρώου: 13086**

**Επιβλέπων Καθηγητής**

**ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΔΑΥΙΔ**

**Αθήνα 22/02/202**

<b>Εξεταστική επιτροπή</b>		
Δαβίδ Ευστράτιος	Σκουρολιάκου Αικατερίνη	Λιαπαρίνος Παναγιώτης

## Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή Ευστράτιο Δαβίδ, για την βοήθεια του στην προσπάθεια μου, τόσο με τη μετάδοση των γνώσεων του όσο και για την χειρωνακτική βοήθεια του στην κατασκευή του συστήματος ανίχνευσης που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά το ίδρυμα του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την παραχώρηση των χώρων και των υλικών του εργαστηρίου του τμήματος.

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο υπογράφων Ποτηριάδης Νικόλαος του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 13086 φοιτητής του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής της Σχολής ΣΤΕΦ του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Ημερομηνία

Ο Δηλών

22/02/2022



Ποτηριάδης Νικόλαος

## Περίληψη

*Λέξεις κλειδιά:* Ανόργανοι σπινθηριστές; φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου; φασματοσκοπία ακτίνων  $\gamma$ ; ανιχνευτής ακτίνων  $\gamma$ ; GAGG:CE;

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάστηκε και μελετήθηκε ανιχνευτική διάταξη με σκοπό την ανίχνευση και την αναγνώριση ραδιοϊσοτόπων. Για την εξαγωγή και τη μελέτη των αποτελεσμάτων αρχικά χρησιμοποιήθηκαν τρεις ραδιενεργές πηγές, Καίσιο-137 ( $^{137}\text{Cs}$ , Ενεργότητας  $R=0.811 \mu\text{Ci}$ ), Κοβάλτιο-60 ( $^{60}\text{Co}$ , Ενεργότητας  $R=0.31 \mu\text{Ci}$ ) και Βάριο-133 ( $^{133}\text{Ba}$ , Ενεργότητας  $R=0.55 \mu\text{Ci}$ ). Έπειτα οι πηγές αυτές τοποθετήθηκαν σε ένα φωτοστεγανό κουτί, δίπλα από τον ανιχνευτή που αποτελείται από κρυσταλλικούς σπινθηριστές τύπου  $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$  (GAGG:Ce) τριών διαστάσεων ( $3\times 3\times 5 \text{ mm}^3$ ,  $3\times 3\times 6 \text{ mm}^3$ ,  $3\times 3\times 8 \text{ mm}^3$ ), οπτικά συζευγμένοι με την ενεργό περιοχή ενός φωτοπολλαπλασιαστή Πυριτίου (SiPM, μοντέλο PM3350 της εταιρίας KETEK). Ακολουθεί ένα κύκλωμα τροφοδοσίας του ανιχνευτή και προ ενίσχυσης του σήματος που αυτός εξάγει, με σκοπό την μετέπειτα ψηφιοποίηση του από τον ψηφιοποιητή DT5720 της εταιρίας CAEN, καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας παλμών.

Η εξαγωγή των φασμάτων της ακτινοβολίας  $\gamma$  των πηγών από το σύστημα ανίχνευσης, οδήγησε στην μελέτη παραμέτρων όπως η ενεργειακή διακριτική ικανότητα, το φωτοποσοστό και η ευαισθησία του ανιχνευτή, έτσι ώστε να γίνει η βέλτιστη επιλογή του κατάλληλου κρυσταλλικού σπινθηριστή.

Η βέλτιστη τιμή ενεργειακής διακριτικής ικανότητας επιτεύχθηκε στο συνδυασμό του κρυστάλλου  $3\times 3\times 8 \text{ mm}^3$  ίση με 2,6 % στα 1.332 MeV. Ο συνδυασμός όλων των παραπάνω κατασκευαστικών στοιχείων και των γενικότερων χαρακτηριστικών του συστήματος, όπως το μικρό μέγεθος και κόστος, φαίνεται να το καθιστά άξιο αντικαταστάτη των παλαιότερων ανιχνευτικών διατάξεων όπως των κλασικών φωτοπολλαπλασιαστών (Photomultiplier Tubes-PMTs) στην πυρηνική ιατρική και να επεκτείνει τη χρήση του σε εφαρμογές φορητών ανιχνευτών για χρήση στο ευρύ κοινό, μέσω πχ φορητών συσκευών (wearables).

## Abstract

*Keywords:* Organic scintillators; silicon photomultiplier; gamma spectroscopy; gamma ray detector; GAGG:Ce;

The purpose of this thesis is to manufacture and test a device capable of detecting and identifying radioisotopes. To this scope, three radioactive sources were utilized: Cesium-137 ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $R=0.811 \mu\text{Ci}$ ), Cobalt-60 ( $^{60}\text{Co}$ ,  $R=0.31 \mu\text{Ci}$ ) and Barium-133 ( $^{133}\text{Ba}$ ,  $R=0.55 \mu\text{Ci}$ ). These sources were placed inside a blackbox next to the detector, which consists of crystal scintillators ( $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ , GAGG:Ce) of three different dimensions ( $3\times 3\times 5 \text{ mm}^3$ ,  $3\times 3\times 6 \text{ mm}^3$ ,  $3\times 3\times 8 \text{ mm}^3$ ). The scintillators are connected through optical coupling to the active area of a Silicon Photomultiplier (SiPM, model: PM3350 by KETEK). The device also consists of a circuit which supplies power to the photomultiplier, amplifies the exit signal and then digitalizes it with an Analog to Digital Converter (model: DT5720 by CAEN). The ADC (Analog to Digital Converter) includes digital pulse processing software.

The energy resolution, photofraction and detector sensitivity parameters were studied after examining the gamma radiation spectra of the radioactive sources, in order to choose the scintillator with the most suitable dimensions.

The best energy resolution was achieved while using the  $3\times 3\times 8 \text{ mm}^3$  scintillator and was equal to 2,6 % at 1.332 MeV. This performance along with the low cost of the device components and its small size, sets this specific device as a possible replacement for existing detection devices (Photomultiplier Tubes-PMTs). The introduction of this device to market may have implications not only in the field of Nuclear Medicine, but also in commercial portable detector applications and even in wearables technology.

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	5
Abstract .....	6
Εισαγωγή:.....	10
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....</b>	<b>11</b>
<b>Γενικά στοιχεία θεωρίας .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Ραδιενέργεια .....</b>	<b>11</b>
1.1.1 Διάσπαση α.....	12
1.1.2 Διάσπαση β.....	12
1.1.3 Ακτινοβολία γ.....	12
<b>1.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη .....</b>	<b>13</b>
1.2.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο .....	13
1.2.2 Φαινόμενο Compton .....	13
1.2.3 Δίδυμη Γένεση.....	14
1.2.4 Εξαύλωση.....	14
<b>1.3 Σπινθηριστές.....</b>	<b>14</b>
1.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά σπινθηριστών .....	15
1.3.2 Είδη σπινθηριστών.....	15
<b>1.4 Φωτοπολλαπλασιαστές.....</b>	<b>17</b>
1.4.1 Παράμετροι αξιολόγησης φωτοπολλαπλασιαστών .....	17
1.4.2 Παράμετροι λειτουργίας των φωτοπολλαπλασιαστών .....	18
<b>1.5 Φάσματα ακτινών γ .....</b>	<b>20</b>
1.5.1 Δομή φασμάτων ακτινών γ.....	21
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....</b>	<b>23</b>
<b>ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (SILICON PHOTOMULTIPLIERS –</b>	
<b>SiPMs) .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1 Ανιχνευτές ημιαγωγών.....</b>	<b>24</b>

2.1.1 Προσμίξεις ημιαγωγών .....	25
2.1.2 Δίοδος επαφής p-n .....	27
2.1.3 Τρόποι εφαρμογής εξωτερικής τάσης πόλωσης .....	28
2.1.4 Φαινόμενο διάτρησης της διόδου επαφής pn .....	30
<b>2.2 Φωτοдиодοι Χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiodes – APDs) .....</b>	<b>33</b>
2.2.1 Χωρητικότητα επαφής p-n .....	34
2.2.2 Διαδικασία απόκρισης SiPM σε εισερχόμενα φωτόνια .....	35
2.2.3 Μηχανισμός επαναφοράς της τάσης λειτουργίας (Quenching Mechanism- Resistor) .....	35
<b>2.3 Παράμετροι απόδοσης .....</b>	<b>36</b>
2.3.1 Κέρδος.....	36
2.3.2 Απόδοση Ανίχνευσης Φωτονίων (Photon Detection Efficiency- PDE).....	37
2.3.3 Δυναμικό Εύρος (Dynamic Range) .....	38
<b>2.4 Πηγές θορύβου.....</b>	<b>39</b>
2.4.1 Ρυθμός Σκότους (Dark Count Rate- DCR) .....	39
2.4.2 Φαινόμενο Optical Crosstalk.....	39
2.4.3 Afterpulsing.....	40
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....</b>	<b>41</b>
<b>ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....</b>	<b>41</b>
3.1 Καίσιιο-137 .....	41
3.2 Κοβάλτιο – 60 .....	42
3.3 Βάριο – 133 .....	43
3.4 ΚΕΤΕΚ PM3350.....	43
3.4.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά .....	44
3.4.2 Κύκλωμα προενισχυτή και παροχή τροφοδοσίας.....	48
3.5 Ψηφιοποιητής CAEN DT5720.....	49
3.5.1 Λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας των παλμών (DPP Firmware) .....	50
3.5.2 Αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου DPP-CI .....	51
3.5.3 Παράμετροι λήψης δεδομένων (Data acquisition parameters) .....	52
3.6 Κρυσταλλικοί σπινθηριστές $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ (GAGG:Ce).....	55
3.7 Ορισμός παραμέτρων απόδοσης .....	56
3.8 Καταγραφή ενεργειακών φασμάτων.....	57
3.9 Πειραματική διάταξη και μέθοδος.....	59
3.9.1 Σχηματικό διάγραμμα .....	59
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....</b>	<b>61</b>
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....</b>	<b>61</b>



4.1 Ενεργειακό φάσμα $^{137}\text{Cs}$ .....	61
4.3 Ενεργειακό φάσμα $^{60}\text{Co}$ .....	64
4.4 Ενεργειακό φάσμα $^{133}\text{Ba}$ .....	68
4.5 Γραμμικότητα (Linearity) και αλλαγές στην διαδικασία της σύζευξης (Coupling) του κρυστάλλου με τον φωτοπολλαπλασιαστή .....	72
4.6 Συμπεράσματα .....	74
Βιβλιογραφία .....	76

## Εισαγωγή:

Η χρήση της πυρηνικής ενέργειας, στη εποχή μας, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, την ανάπτυξη στρατιωτικού εξοπλισμού και ιατρικών συστημάτων διάγνωσης και θεραπείας, είναι εξαιρετικά δημοφιλής. Ανεπτυγμένες χώρες, εδώ και χρόνια επενδύουν μεγάλο μέρος της οικονομίας της στην ανάπτυξη πυρηνικών εργοστασίων, ώστε αυτά να καλύπτουν τις παραπάνω ανάγκες - παροχές τους αυτόνομα, μέσα στα χωρικά τους σύνορα. Μοιραία λοιπόν, τα ατυχήματα σε αυτά τα εργοστάσια, έμοιαζαν αναπόφευκτα καθώς η γνώση διαχείρισης των κινδύνων τους ήταν ελλιπής. Αυτό δημιούργησε την ανησυχία των πολιτών, τόσο στις χώρες που το εκάστοτε ατύχημα λάμβανε χώρα, όσο και στις γειτονικές αυτών λόγω του ότι η μόλυνση από ραδιενέργεια επηρεάζει τους υδροφόρους ορίζοντες, τα βρώσιμα προϊόντα, που παράγονται σε κοντινές καλλιέργειες και μπορεί να εξάγονται στον υπόλοιπο κόσμο και στη μεταφορά της μέσω του αέρα. Η διάρκεια που η μόλυνση μπορεί να επηρεάσει τους παραπάνω τομείς, είναι επίσης ανησυχητική λόγω του μεγάλου χρόνου ημιζωής των στοιχείων που χρησιμοποιούνται στα πυρηνικά εργοστάσια. Η ανάγκη σχεδιασμού και ανάπτυξης συστημάτων που θα προστατεύουν τους πολίτες και να καθησυχάζουν τις ανησυχίες τους, μοιάζει να είναι απαραίτητη από τη στιγμή ειδικά που η πυρηνική ενέργεια φαίνεται πως θα καταλάβει το κύριο κομμάτι της παροχής ενέργειας στον πλανήτη. Έτσι φορητές συσκευές που θα ανιχνεύουν την ύπαρξη ραδιενέργειας στο περιβάλλον αλλά και σε προϊόντα προς κατανάλωση, φαίνεται να είναι μία ικανοποιητική λύση για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας αυτό είναι εξαιρετικά υλοποιήσιμο και μάλιστα με τέτοιο τρόπο ώστε η συσκευή να είναι εργονομική προς το μέγεθος και τη λειτουργία της. Αυτός ακριβώς είναι και ο σκοπός της εν λόγω εργασίας. Η δημιουργία μίας συσκευής με το συνδυασμό των κατάλληλων κατασκευαστικών στοιχείων και η μελέτη ως προς τη λειτουργία και την απόδοση της.

Η ανάπτυξη λοιπόν αυτής της συσκευής χρειάστηκε αρκετή μελέτη, κυρίως από τον τομέα της πυρηνικής ιατρικής που ειδικεύεται στην ανίχνευση ακτινοβολίας μέσω κατάλληλων διατάξεων. Παλαιότερα η ανίχνευση αυτή γινόταν από τους συμβατικούς Φωτοπολλαπλασιαστές (PhotoMultiplierTubes-PMT), οι οποίοι ως προς την ενίσχυση που προκαλούσαν στο λαμβανόμενο σήμα ήταν αρκετά ικανοποιητικοί. Ωστόσο απαιτούσαν υψηλή τάση τροφοδοσίας (χιλιάδες Volts), ήταν εξαιρετικά ευαίσθητοι στα εξωτερικά μαγνητικά πεδία και είχαν μεγάλο μέγεθος. Για αυτούς τους λόγους, οι έρευνες στράφηκαν σε άλλους ανιχνευτές στερεής κατάστασης, όπως οι Φωτοπολλαπλασιαστές Πυριτίου (Silicon PhotoMultipliers-SiPMs).

Οι SiPMs είναι ανιχνευτές με εξαιρετικά υψηλή ευαισθησία, μεγάλη αποδοτικότητα και μικρό χρόνο απόκρισης. Βασίζονται σε ανάστροφα πολωμένες διόδους τύπου p/n και μπορούν να ανιχνεύσουν απευθείας φως από υπεριώδες μέχρι υπέρυθρο και χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές όπου απαιτείται η μέτρηση και η ποσοτικοποίηση ακτινοβολίας χαμηλής ροής, με μεγάλη ακρίβεια. Ένας SiPM αποτελείται από έναν πίνακα μικρών στοιχείων, τα οποία ονομάζονται μικροκυψελίδες (microcells) ή pixels και είναι παράλληλα συνδεδεμένα μεταξύ τους. Κάθε ένα microcell είναι μία φωτοδίοδος που λειτουργεί σε Geiger-Mode.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Γενικά στοιχεία θεωρίας

### 1.1 Ραδιενέργεια

Η ραδιενέργεια (Radioactivity), είναι το φαινόμενο όπου αυθόρμητα ένας ασταθής πυρήνας μετασχηματίζεται σε σταθερό, εκπέμποντας ακτινοβολία (σωματίδια, φωτόνια). Ο αρχικός πυρήνας ονομάζεται μητρικός και αυτός που προκύπτει θυγατρικός. Ο θυγατρικός πυρήνας συνήθως ανήκει σε διαφορετικό χημικό στοιχείο και ο μετασχηματισμός του συνεχίζεται μέχρι να γίνει σταθερός. Για το φαινόμενο αυτό χρησιμοποιούνται όροι όπως ραδιενεργός απομείωση, ραδιενεργός διάσπαση κ.α. Οι ασταθείς πυρήνες ονομάζονται ραδιενεργά ισότοπα ή ραδιενεργοί πυρήνες. Υπάρχει φυσική και τεχνητή ραδιενέργεια. Η πρώτη παρατηρείται σε ασταθή ισότοπα που υπάρχουν στη φύση, ενώ η δεύτερη σε ισότοπα που παράγονται τεχνητά σε εργαστηριακούς χώρους.

Η ενεργότητα (Σχέση 1.1) ενός ραδιοϊσοτόπου ελαττώνεται σε συνάρτηση με το χρόνο σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$R = R_0 \times e^{-\lambda t}$$

Σχέση 1.1

R : Τρέχουσα ενεργότητα μετά από χρόνο t

R<sub>0</sub> : Αρχική ενεργότητα, για t=0

λ : Σταθερά διάσπασης

Μονάδες μέτρησης της ενεργότητας είναι το Curie (1 Ci = 3.7 × 10<sup>10</sup> s<sup>-1</sup>) και το Becquerel (1 Bq = 1 s<sup>-1</sup>).

Τέλος, ο χρόνος ημιζωής T ενός ραδιοϊσοτόπου εκφράζει το χρονικό διάστημα μετά το πέρας του οποίου η αρχική ενεργότητα R<sub>0</sub> θα έχει μειωθεί στο μισό. [1], [2]

Η ραδιενεργός διάσπαση, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι η διαδικασία κατά την οποία παράγεται ένας νέος πυρήνας και λαμβάνει χώρα με τους εξής τρεις τρόπους:

### 1.1.1 Διάσπαση α

Είναι η αυθόρμητη εκπομπή ενός σωματίου α από έναν πυρήνα. Τα σωματίδια α είναι πυρήνες Ηλίου  $< {}^4_2\text{He}^{++}>$ . Το φαινόμενο αυτό, γίνεται σε βαρείς πυρήνες ( $A > 200$ ) και οφείλεται στις απωστικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων. Ο θυγατρικός πυρήνας είναι πλέον πιο ευσταθής και έχει περίσσεια ενέργεια, η οποία εκπέμπεται υπό μορφή ακτινοβολίας γ. Τα σωματίδια α προκαλούν έντονο ιονισμό κατά τη διάδοσή τους στην ύλη, δηλαδή έχουν μεγάλη εναποθέτηση ενέργειας ανά μονάδα μήκους στη διαδρομή τους. Για αυτό το λόγο δεν χρησιμοποιούνται τέτοιου είδους ισότοπα σε διαγνωστικά συστήματα. [1]

### 1.1.2 Διάσπαση β

Η διάσπαση αυτή χωρίζεται σε τρεις επιμέρους σε τρεις επιμέρους πυρηνικούς μετασχηματισμούς:

Α) Εκπομπή σωματίου  $\beta^-$  (ηλεκτρονίου), όπου στο εσωτερικό του πυρήνα ένα νετρόνιο γίνεται πρωτόνιο. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των νετρονίων είναι μεγαλύτερος από το κανονικό. Σε αυτή την περίπτωση ο πυρήνας βρίσκεται πάνω από τη ζώνη ευστάθειας.

Β) Εκπομπή σωματίου  $\beta^+$  (ποζιτρονίου), όπου στο εσωτερικό του πυρήνα ένα πρωτόνιο γίνεται νετρόνιο. Αυτό συμβαίνει γιατί ο αριθμός των πρωτονίων είναι μεγαλύτερος από το κανονικό. Σε αυτή την περίπτωση ο πυρήνας βρίσκεται κάτω από τη ζώνη ευστάθειας.

Γ) Ηλεκτρονική σύλληψη (Η.Σ.), όπου ο πυρήνας συλλαμβάνει ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο του ατόμου (συνήθως από την Κ στιβάδα).

Σε όλες τις περιπτώσεις ο μαζικός αριθμός διατηρείται σταθερός και τα νέα στοιχεία που προκύπτουν είναι ισοβαρή με τα μητρικά τους. [1]

### 1.1.3 Ακτινοβολία γ

Πρόκειται για ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία προέρχεται από το εσωτερικό του πυρήνα. Ο θυγατρικός πυρήνας, έχοντας υποστεί ήδη τις διασπάσεις α και β είναι πλέον διεγερμένος και αποβάλλει την περίσσεια ενέργεια υπό μορφή ενός ή περισσότερων φωτονίων. Τα φωτόνια αυτά ονομάζονται ακτινοβολία γ και οι συχνότητες (ενέργειες) τους έχουν τιμές χαρακτηριστικές για τον εκάστοτε πυρήνα. [1]

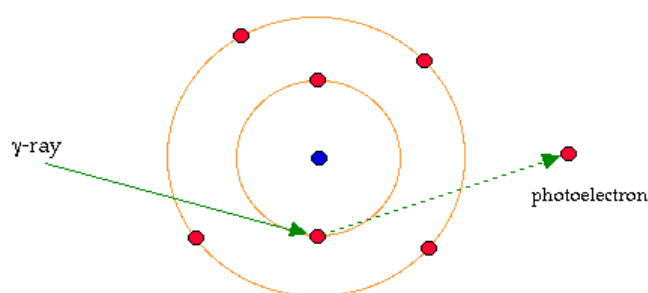
## 1.2 Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη

Υπάρχουν τέσσερα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά τη διέλευση της ακτινοβολίας μέσα από την ύλη και την αναγκάζουν να εξασθενίσει. Το μέγεθος της εξασθένισης εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της ύλης (ατομικός αριθμός  $Z$ , πυκνότητα κ.α.) και από την ενέργεια της ακτινοβολίας.

### 1.2.1 Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Κατά το φαινόμενο αυτό, ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο του ατόμου. Το ηλεκτρόνιο αποδεσμεύεται από την τροχιά του, εφόσον έχει απορροφήσει ενέργεια και το φωτόνιο εξαφανίζεται. Το υπόλοιπο της ενέργειας του ηλεκτρονίου είναι υπό μορφή κινητικής ενέργειας. Η κενή θέση που αφήνει το εκτρεπόμενο ηλεκτρόνιο πίσω του, καλύπτεται από ένα άλλο, που βρίσκεται σε υψηλότερη ενεργειακή στάθμη (Σχήμα 1.1).

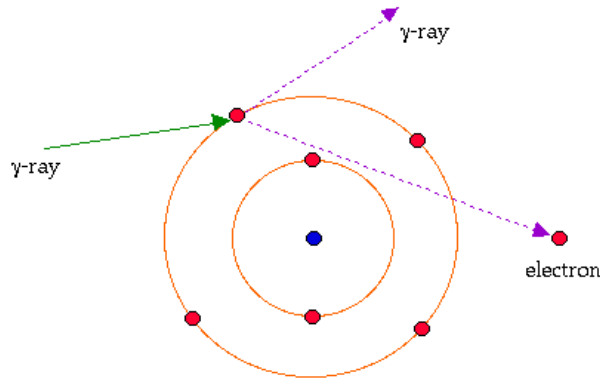
Η περισσευούμενη ενέργεια του εν λόγω ηλεκτρονίου, μεταφράζεται σε ένα φωτόνιο  $X$  και εκπέμπει την χαρακτηριστική ακτινοβολία, η οποία απορροφάτε από το υλικό ή διαφεύγει από αυτό, ανάλογα με το ποσό της ενέργειας που έχει. [1], [2]



**Σχήμα 1. 1:** Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. [3]

### 1.2.2 Φαινόμενο Compton

Όταν ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο, ελεύθερο ή της εξωτερικής στιβάδας του ατόμου, εναποθέτει ένα μέρος της ενέργειας του σε αυτό με τη μορφή κινητικής ενέργειας και έπειτα σκεδάζεται (ανελαστικά) αλλάζοντας διεύθυνση διάδοσης (Σχήμα 1.2). [1], [2]



**Σχήμα 1. 2:** Φαινόμενο Compton. [3]

### 1.2.3 Δίδυμη Γένεση

Κατά τη σύγκρουση ενός φωτονίου με τον πυρήνα του ατόμου, γίνεται εναποθέτηση όλης της ενέργειας του στον πυρήνα, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου, σύμφωνα πάντα με τη γνωστή εξίσωση  $E = mc^2$ , όπου ενέργεια μετατρέπεται σε ύλη. Το φαινόμενο αυτό έχει ενεργειακό περιορισμό που προσδιορίζει το πότε θα συμβεί και απαιτεί ενέργειες της τάξεως των 1.022 MeV και πάνω. Τα νέα σωματίδια έχουν και κινητική ενέργεια από το αρχικό φωτόνιο. [1], [2]

### 1.2.4 Εξαϋλωση

Πρόκειται για το αντίστροφο φαινόμενο από τη δίδυμη γένεση. Ένα ποζιτρόνιο αλληλοεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο και εξαιτίας της φύσης των δύο σωματιδίων εξαϋλώνονται. Στη θέση τους δημιουργούνται δύο φωτόνια που κινούνται αντιδιαμετρικά. Το φαινόμενο της εξαϋλωσης έπεται του φαινομένου της δίδυμης γένεσης προφανώς, ώστε να ακολουθήσει η ακολουθία συμβάντων που αναφέρθηκε παραπάνω. [1],[2]

## 1.3 Σπινθηριστές

Ένα βασικό κομμάτι στη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τον ανιχνευτή, ήταν αυτό του σπινθηριστή. Οι σπινθηριστές, λοιπόν, είναι υλικά που εκπέμπουν φως στο ορατό μέρος του φάσματος όταν αυτά αλληλοεπιδράσουν με ιοντίζουσα ακτινοβολία. Όταν αυτά τα υλικά έρθουν σε σωστή ζεύξη με έναν φωτοπολλαπλασιαστή, στην προκειμένη περίπτωση με έναν SiPM και την ενισχυτική του διάταξη, μετατρέπουν

το ασθενές ορατό φως σε μετρήσιμο ηλεκτρικό παλμό και μέσω αυτού να αντληθούν χρήσιμες πληροφορίες για την εν λόγω προσπίπτουσα ακτινοβολία. [4], [5]

### 1.3.1 Γενικά χαρακτηριστικά σπινθηριστών

Η φωταύγεια (luminescence) είναι η κύρια ιδιότητα των σπινθηριστών. Η ιδιότητα αυτή καθιστά τους σπινθηριστές να εκπέμπουν ενέργεια με μορφή ορατών φωτονίων, αφού πρώτα απορροφήσουν κάποια συγκεκριμένη μορφή ενέργειας όπως ακτινοβολία, θερμότητα κ.α. Η εκπομπή αυτή χωρίζεται σε δύο φαινόμενα, το φθορισμό (fluorescence) και τον φωσφορισμό (afterglow). Στον φθορισμό, η εκπομπή ενέργειας γίνεται αμέσως μετά την απορρόφηση ενέργειας από το υλικό, συγκεκριμένα σε χρόνο της τάξεως των  $10^{-8}$  seconds, ενώ κατά το φωσφορισμό η εκπομπή αργεί περισσότερο και διαρκεί μερικά msec έως και ώρες ανάλογα με το υλικό. [4], [5]

Η εκπομπή της ορατής ακτινοβολίας των σπινθηριστών ως προς το χρόνο, περιγράφεται από μία εκθετική αποδιέγερση ως εξής (σχέση 1.2):

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left(\frac{-t}{\tau_d}\right)$$

Σχέση 1.2 [4]

Όπου  $N$  είναι ο αριθμός των ορατών φωτονίων που εκπέμπονται σε χρόνο  $t$ ,  $N_0$  ο συνολικός αριθμός εκπεμπόμενων φωτονίων και  $\tau_d$  η σταθερά αποδιέγερσης.

Οι σπινθηριστές, γενικά, θα πρέπει να πληρούν κάποιες συγκεκριμένες απαιτήσεις ώστε να μπορούν να λειτουργούν ικανοποιητικά για τις διατάξεις ανίχνευσης ακτινοβολίας. Αυτές είναι οι εξής :

A. Να έχουν μικρό  $\tau_d$ , δηλαδή μικρή σταθερά αποδιέγερσης.

B) Υψηλή απόδοση μετατροπής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ορατά φωτόνια.

Γ) Να παρουσιάζεται μεγάλη διαπερατότητα στο φως που παράγει ώστε η μετάδοση του να είναι εύκολη.

Δ) Να υπάρχει συμβατότητα του φωτός, ως προς το μήκος κύματος, με τις ενισχυτικές διατάξεις των φωτοπολλαπλασιαστών, ώστε να μετατρέπεται σωστά το ορατό φως σε παλμούς ρεύματος. [4]

### 1.3.2 Είδη σπινθηριστών

Τα είδη των σπινθηριστών χωρίζονται σύμφωνα με το υλικό που κατασκευάζονται. Υπάρχουν τρία είδη:

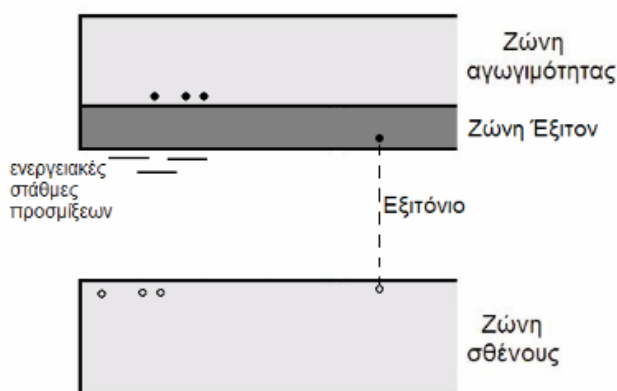
A) Σπινθηριστές αερίου, συνήθως από ευγενή αέρια, δηλαδή Ξένο(Xe), Κρυπτό(Kr), Αργό (Ar) και Άζωτο (N) μαζί με Ήλιο (He). Κάθε άτομο διεγείρεται ξεχωριστά και έχουν πολύ μικρό χρόνο απόκρισης καθώς τα άτομα επιστρέφουν στη θεμελιώδη στάθμη τους, προσεγγιστικά, σε 1 nsec. Ωστόσο δεν μπορούν να έρθουν σε ζεύξη με τους SiPMs, γιατί το φως που εκπέμπουν είναι σε τίμες εκτός εύρους από αυτές που ανιχνεύουν αυτοί.

B) Οργανικοί σπινθηριστές, είναι μίγματα αρωματικών υδρογονανθράκων και χωρίζονται σε κρυσταλλικούς, υγρούς και πλαστικούς. Παρομοίως με τους σπινθηριστές αερίου, έχουν μικρό χρόνο απόκρισης, αλλά η διέγερσή τους γίνεται από τα ηλεκτρόνια σθένους του μορίου και όχι του ατόμου. Τα ηλεκτρόνια αυτά χάνουν ένα μέρος της ενέργειάς τους, από κατάσταση διέγερσης μεταπίπτουν στη θεμελιώδη στάθμη τους και εκπέμπουν φωτόνια στο ορατό φως. Οι σπινθηριστές αυτοί χαρακτηρίζονται διαφανής ως προς το φως που γεννούν.

Γ) Ανόργανοι σπινθηριστές, είναι κυρίως κρυσταλλικές ενώσεις αλογονούχων αλκαλίων (NaI, CsI κλπ) με κάποιον ενεργοποιητή (Tl, Na κλπ). Σε αντίθεση με τους προηγούμενους, οι ανόργανοι σπινθηριστές είναι πιο αργοί ως προς την απόκριση τους. Οι σύγχρονοι κρύσταλλοι παρουσιάζουν μία βελτίωση στο θέμα της απόκρισης, αλλά για τη σωστή λειτουργία τους απαιτούν αεροστεγή κάλυψη με μονοτικό υλικό (πχ τεφλόν), καθώς είναι υγροσκοπικοί και χρειάζονται προστασία από την υγρασία της ατμόσφαιρας.

Εξαιτίας της υψηλότερης πυκνότητας και του μεγαλύτερου ατομικού αριθμού τους, ως προς την ανίχνευση της ακτινοβολίας, είναι αισθητά καλύτεροι από τα άλλα είδη σπινθηριστών. Επίσης, παρουσιάζουν υψηλότερα ποσοστά απόδοσης σε ορατή ακτινοβολία και κατά συνέπεια έχουν καλύτερη ενεργειακή διακριτικότητα.

Η διέγερση αυτή τη φορά οφείλεται στη δομή των ενεργειακών ζωνών που παρουσιάζουν οι κρύσταλλοι. Κατά την είσοδο ενός σωματιδίου στον κρύσταλλο, δύο είναι τα τινά, είτε λόγω ιονισμού του κρυστάλλου ένα ηλεκτρόνιο μεταπηδά από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και έχουμε δημιουργία οπής και ελεύθερου ηλεκτρονίου, είτε δημιουργείται ένα εξιτόνιο όταν η διέγερση του ηλεκτρονίου γίνεται ακριβώς κάτω από τη ζώνη σθένους. Το ηλεκτρόνιο και η οπή εξακολουθούν να είναι ζεύγος, απλά κινούνται ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο. Πιθανόν προσμίξεις στον κρύσταλλο, δημιουργούν τοπικά δυνατές καταστάσεις μέσα στο ενεργειακό κενό. Τότε δεσμεύονται οπές και τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση τους, εκπέμποντας ακτινοβολία (Σχήμα 1.3). [4], [5]



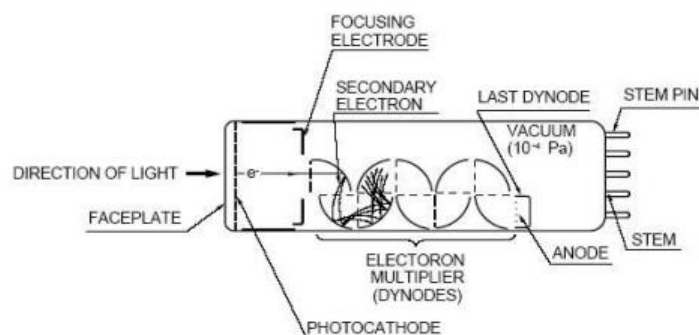
Σχήμα 1.3: Ενεργειακές ζώνες ενός ανόργανου κρυστάλλου. [4]



## 1.4 Φωτοπολλαπλασιαστές

Οι φωτοπολλαπλασιαστές (PMs) είναι εξαιρετικά ευαίσθητα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης του φωτός. Μετατρέπουν το προσπίπτον φως σε ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με την ένταση του. Σε σχέση με άλλα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης φωτός παρουσιάζουν διάφορα πλεονεκτήματα, όπως η ανίχνευση φωτός χαμηλής έντασης, φτάνοντας μέχρι τη ανίχνευση μεμονωμένου φωτονίου και το γεγονός πως ενισχύει σημαντικά το ρεύμα που θα παραχθεί από το εν λόγω φως. Ανάλογα με τα είδη τους, οι φωτοπολλαπλασιαστές μπορούν να φθάσουν εξαιρετικά μικρά μεγέθη και να γίνουν εύχρηστοι για ποικίλες εφαρμογές.

Συνήθως πρόκειται για γυάλινο σωλήνα μέσα στον οποίο υπάρχει κενό. Στο εσωτερικό του βρίσκεται η φωτοκάθοδος, αποτελούμενη από φωτοευαίσθητο υλικό και μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου το προσπίπτον φως εκδιώκει ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά εστιάζονται και κινούνται προς μία μεταλλική πλάκα, που βρίσκεται σε θετικό δυναμικό σε σχέση με τη φωτοκάθοδο, η οποία ονομάζεται άνοδος. Εκεί, εξαιτίας του υλικού της άνοδου, έχουμε δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων, άρα πολλαπλασιασμό και ενίσχυση του αρχικού ηλεκτρικού παλμού. Το αυξημένο πλήθος ηλεκτρονίων, φθάνει τελικά στην άνοδο και εκεί γίνεται η λήψη του σήματος (Σχήμα 1.4). [1], [6]



Σχήμα 1.4: Σχηματικό διάγραμμα φωτοπολλαπλασιαστή [7]

### 1.4.1 Παράμετροι αξιολόγησης φωτοπολλαπλασιαστών

- A. Απόδοση (efficiency): Η απόδοση ενός ανιχνευτή χαρακτηρίζεται από τη σχέση του αριθμού των φωτονίων ή των σωματιδίων που ανιχνεύονται προς

τον αριθμό που εκπέμπονται από την εκάστοτε πηγή (Σχέση 1.3). [1] [6]  
Χωρίζεται σε:

1. Απόλυτη Απόδοση (absolute efficiency):

$$\epsilon_{\text{absolute}} = \frac{\text{αριθμός καταγραφόμενων παλμών}}{\text{αριθμός ακτίνων που εκπέμπονται από την πηγή}}$$

Σχέση 1.3 [1]

2. Εσωτερική απόδοση (intrinsic efficiency):

$$\epsilon_{\text{intrinsic}} = \frac{\text{αριθμός καταγραφόμενων παλμών}}{\text{αριθμός ακτίνων που προσβάλλουν τον ανιχνευτή}}$$

Σχέση 1.4 [1]

Οι τιμές της απόδοσης είναι καθαροί αριθμοί και εκφράζονται με ποσοστά. Για μη διεισδυτικές ακτίνες η τιμή μπορεί να φθάσει το 100%, ενώ για τις διεισδυτικές είναι αρκετά χαμηλότερη.

B. Ενεργειακή διακριτική ικανότητα (energy resolution): Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα ενός ανιχνευτή, είναι η ικανότητα του να διακρίνει δύο ακτίνες με παραπλήσια τιμή ενέργειας και αφορά ανιχνευτές που μετρούν ενέργειες και όχι απλά παλμούς. Χαρακτηρίζεται από τη σχέση:

$$R = \frac{H \text{ ενέργεια στο κέντρο της κορυφής του ενεργειακού φάσματος (E0)}}{\text{Το εύρος της καμπύλης στο μέσο του ύψους της } \Delta E}$$

Σχέση 1.5 [1]

Ένας άλλος τρόπος έκφρασης της διακριτικής ικανότητας είναι με το πλήρες εύρος της κορυφής στο μισό του ύψους της, Full Width at Half Maximum (FWHM). Όσο πιο μικρός σε τιμή είναι αυτός ο όρος, τόσο καλύτερη διακριτική ικανότητα έχει ο ανιχνευτής. Συνήθως οι τιμές, παρομοίως με την απόδοση, εκφράζονται σε ποσοστά. Η διακριτική ικανότητα οριοθετεί και την ακρίβεια του ανιχνευτή.

3. Νεκρός χρόνος ή χρόνος απόκρισης (dead time,  $\tau$ ): Ο ανιχνευτής μετά την πρόσπτωση ενός σωματιδίου, χρειάζεται χρόνο για επεξεργασία μέχρι να μπορεί να χειριστεί την επόμενη πρόσπτωση. Οι σύγχρονοι ανιχνευτές έχουν πολύ μικρό νεκρό χρόνο, που φθάνει τιμές της τάξεως των msec.[1], [6]

#### 1.4.2 Παράμετροι λειτουργίας των φωτοπολλαπλασιαστών

Η απόδοση ενός φωτοπολλαπλασιαστή μπορεί να κριθεί ως προς διάφορους παράγοντες και υπάρχουν πολλά στοιχεία που μπορούν να την επηρεάσουν. Μερικοί από αυτούς είναι :

Η τάση λειτουργίας του δεν πρέπει να είναι πολύ υψηλή, πέρα από κάποιο ασφαλές όριο, καθώς σε μεγάλες τάσεις παρατηρούνται ασταθείς συμπεριφορές. Επίσης επηρεάζει την ευαισθησία του φωτοπολλαπλασιαστή και εξαρτάται από τη δομή του, κυρίως από την απόσταση των διαδοχικών δυνόδων και τη διαφορά δυναμικού που αυτές παρουσιάζουν. Η τιμή αυτή κυμαίνεται μεταξύ 100V και 150V και έτσι η μέγιστη τάση λειτουργίας του φωτοπολλαπλασιαστή φτάνει τα 1500V. [1]

Η απόκριση του σε έναν παλμό φωτός, εξαρτάται από τα φωτοηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν από την φωτοκάθοδο, τα οποία έχουν διαφορετικές κινητικές ενέργειες και φθάνουν στην πρώτη δύνοδο μέσω διαφορετικών τροχών και κατά συνέπεια σε διαφορετικούς χρόνους. [1]

Οι πηγές θορύβου επηρεάζουν το σήμα εξόδου του PM. Το ρεύμα σκότους είναι μία πηγή θορύβου και όπως υποδηλώνει το όνομα του, πρόκειται για ρεύμα που παρουσιάζεται ακόμα και όταν δεν υπάρχει προσπίπτον φως στην είσοδο του φωτοπολλαπλασιαστή. Επιπρόσθετα, όπως σε όλα τα μετρητικά συστήματα έτσι και σε αυτή την περίπτωση το σήμα εξόδου συνοδεύεται από θόρυβο. Ο θόρυβος αυτός μπορεί να αναλυθεί σε επιμέρους θόρυβο από την φωτοκάθοδο, όπου οφείλεται στη διακύμανση που παρουσιάζεται στη παραγωγή φωτοηλεκτρονίων από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η δεύτερη συνιστώσα είναι ο θόρυβος κατά τον πολλαπλασιασμό των ηλεκτρονίων, ο οποίος δεν γίνεται με ιδανικό τρόπο. [1], [6]

Οι συνθήκες του περιβάλλοντος σαφώς και έχουν επίδραση στη λειτουργία του φωτοπολλαπλασιαστή. Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει το ρεύμα σκότους, κατά προσέγγιση διπλασιάζεται για κάθε 5 °C πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου. Η ύπαρξη εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί απόκλιση των φωτοηλεκτρονίων από τις τροχιές τους, με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ενίσχυσης του τελικού σήματος. Η θωράκιση σε αυτήν την περίπτωση θεωρείται απαραίτητη. Παρόμοιες επιπτώσεις παρατηρούνται και με την ύπαρξη εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. [1], [6]

Εκτός από τις συνθήκες του περιβάλλοντος η ίδια η χρήση του φωτοπολλαπλασιαστή προκαλεί ζητήματα στην απόδοση του. Για παράδειγμα οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες που προσπίπτουν στο φωτοπολλαπλασιαστή προκαλούν παραμόρφωση στο γυαλί του σωλήνα και το χρωματίζουν, συνήθως με ένα καφέ χρώμα και έτσι επέρχεται μείωση του φωτός που φθάνει στην κάθοδο. Η έκθεση της συσκευής σε έντονο φως, όταν αυτή βρίσκεται σε λειτουργία ή ακόμα και όχι, μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες στα ηλεκτρονικά του μέρη. [1], [6]

## 1.5 Φάσματα ακτινών $\gamma$

Η φασματοσκοπία της ακτινοβολίας  $\gamma$ , δηλαδή η καταμέτρηση των φωτονίων που προσπίπτουν στην είσοδο του ανιχνευτή, είναι τελικά η έξοδος τόσο σε αμιγώς μετρητικά, όσο και σε απεικονιστικά συστήματα.

Ουσιαστικά πρόκειται για μία ταξινόμηση φωτονίων που καταγράφονται, ανάλογα με την ενέργεια που αυτά έχουν. Το φάσμα είναι μια γραφική παράσταση, της οποίας ο κατακόρυφος άξονας υποδηλώνει τον αριθμό των φωτονίων ανά μονάδα ενέργειας ( $dn/dE$ ) και ο οριζόντιος άξονας διαθέτει μία βαθμονόμηση ενεργειών. Το φάσμα, σε αντίθεση με αυτό των ακτινών X, είναι γραμμικό θεωρητικά. [1]

Το ιδανικό φάσμα εμφανίζει γραμμικότητα. Εμφανίζονται γραμμές οι οποίες υποδηλώνουν τιμές ενέργειας για τα καταμετρούμενα φωτόνια και διαφέρουν μεταξύ τους ως προς το ύψος τους (αριθμός φωτονίων N). Στην περίπτωση μετρήσεων με ανιχνευτική διάταξη σπινθηριστή, οι γραμμές αυτές αποκλίνουν από την ιδανική κατάσταση εμφανίζοντας κορυφές πεπερασμένου εύρους και ονομάζονται φωτοκορυφές (photopeaks). [1]

Οι φωτοκορυφές είναι συνάθροιση παλμών του συστήματος, που προκαλούνται από φωτόνια ίδιας ενέργειας και έχουν απορροφηθεί ολοκληρωτικά μέσα στον κρύσταλλο. Η πλήρης απορρόφηση εννοείται σε χαμηλές ενέργειες, καθώς εκεί επικρατεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. [1]

Το εύρος τιμών που παρουσιάζουν οι φωτοκορυφές του φάσματος, προκύπτει από μία πληθώρα διεγερσιών οι οποίες έπονται μετά την απορρόφηση ενός φωτονίου  $\gamma$ . Οι διεργασίες αυτές αφορούν φαινόμενα όπως:

1. Η διασπορά του ορατού φωτός μέσα σε κάθε κρύσταλλο εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του, δηλαδή τις διαστάσεις και το σχήμα του. Οπότε αν δύο φωτόνια  $\gamma$ , ίδιας ενέργειας, απορροφηθούν σε διαφορετικό σημείο του κρυστάλλου μπορεί να παρέχουν ελαφρώς διαφοροποιημένο παλμό ορατού φωτός στη κάθοδο του φωτοπολλαπλασιαστή.
2. Η στατιστική διαφορά που παρουσιάζεται στο πόσα ηλεκτρόνια θα παραχθούν στη φωτοκάθοδο από ένα φωτόνιο (ο αριθμός αυτός διαφέρει κατά μικρό ποσοστό κάθε φορά).
3. Η συμβολή ρεύματος σκότους του φωτοπολλαπλασιαστή συμβάλει επίσης στην εμφάνιση του εύρους τιμών στη φωτοκορυφή.
4. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία του συστήματος μπορεί να παρουσιάσουν αστάθειες και να συμβάλουν στην αύξηση του εύρους της φασματικής γραμμής της φωτοκορυφής.
5. Κάθε φασματική γραμμή έχει ένα φυσικό εύρος που βασίζεται στην αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg.
6. Η ακτινοβολία υποστρώματος (background radiation), προέρχεται από άλλες πηγές και όχι από τη ζητούμενη, ωστόσο είναι μετρήσιμη και επηρεάζει το εύρος της φασματικής γραμμής. [1]

Το μέγεθος του εύρους της φασματικής γραμμής στο μέσο της μέγιστης κεντρικής τιμής της ( Full Width Half Max -FWHM), είναι ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος καθώς από αυτό προκύπτει η ενεργειακή διακριτική ικανότητα (Σχέση 1.6). Αυτή υπολογίζεται με τον εξής τύπο:

$$R_E = \frac{\Delta E}{E}$$

Σχέση 1.6 [1]

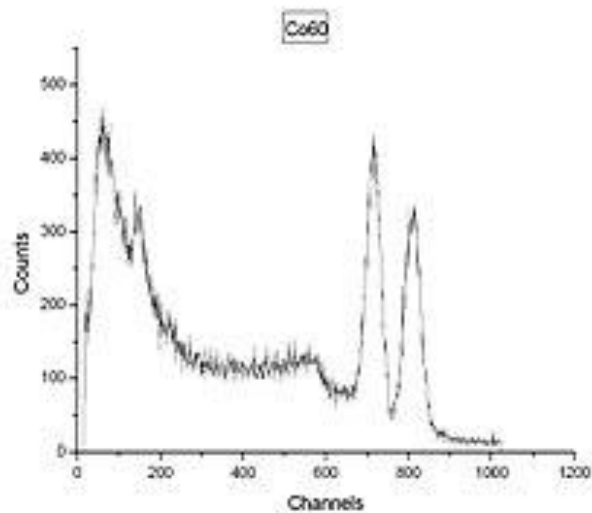
Όπου  $\Delta E$ , είναι το εύρος FWHM και  $E$  η μέγιστη τιμή των μονοενεργειακών φωτονίων.

### 1.5.1 Δομή φασμάτων ακτινών $\gamma$

Το φάσμα των ακτινών  $\gamma$  αποτελείται από διάφορες κορυφές, όπου κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε ένα φαινόμενο. Αναλυτικότερα προκύπτουν(Σχήμα 1.5): [1]

- Η Φωτοκορυφή (Photopeak) : Σε αυτή την περίπτωση ένα φωτόνιο προσπίπτει στον κρύσταλλο και όλη η ενέργεια του απορροφάται και καταγράφεται στο φάσμα με τη μορφή της Φωτοκορυφής.
- Διαφεύγουσα κορυφή (Escape peak) : Κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο γίνεται απόσπαση ενός ηλεκτρονίου από το εκάστοτε άτομο, η κενή θέση του οποίου καλύπτεται από ηλεκτρόνιο χαμηλότερης στιβάδας, με συνέπεια την εμφάνιση φωτονίου X. Αυτό το φωτόνιο μπορεί να μην απορροφηθεί στον κρύσταλλο και κατά αυτόν τον τρόπο η ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας  $\gamma$  να μην είναι ανάλογη με τα ορατά φωτόνια που θα παραχθούν. Στο φάσμα, το φαινόμενο αυτό, προκαλεί την εμφάνιση μίας νέας κορυφής ελαφρώς μετατοπισμένη από την κορυφή η οποία ονομάζεται Διαφεύγουσα φωτοκορυφή.
- Αιχμή Compton (Compton peak) : Εάν τα φωτόνια της προσπίπτουσας δέσμης αλληλεπιδράσουν με τα άτομα του κρυστάλλου μέσω του φαινομένου Compton, τότε ένα φωτόνιο  $\gamma$  προσπίπτει σε ένα ηλεκτρόνιο και του αποδίδει μέρος της ενέργειας του υπό τη μορφή κινητικής ενέργειας. Το κάθε ηλεκτρόνιο αποκτά ενέργεια, το μέγεθος της οποίας έχει εύρος από μηδέν έως μία μέγιστη τιμή. Η κατανομή αυτής της ενέργειας αποτυπώνεται στο φάσμα με μία κορυφή που ονομάζεται Αιχμή Compton.
- Κορυφή οπισθοσκέδασης (Backscatter peak) : Η κορυφή αυτή προκύπτει, όταν φωτόνια που προέρχονται από την πηγή ακολουθήσουν πορεία αντίθετη από αυτή που καταλήγει στον σπινθηριστή, έπειτα σκεδαστούν κατά  $180^\circ$  και προσανατολιστούν εκ νέου σε πορεία που καταλήγει στον σπινθηριστή. Τα φωτόνια αυτά θα απορροφηθούν τελικά και θα καταμετρηθούν από το σύστημα.

- Χαρακτηριστική ακτινοβολία X ή εσωτερικής μετατροπής: Χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα την ραδιενεργή διάσπαση του  $^{137}\text{Cs}$ , από την οποία προκύπτει το θυγατρικό  $^{137\text{m}}\text{Ba}$ , παρατηρείται η πιθανότητα για εκπομπή ηλεκτρονίου εσωτερικής μετατροπής από την οποία προκύπτει εκπομπή ακτινοβολίας X. Η ακτινοβολία X προέρχεται από τη μετάπτωση του ηλεκτρονίου από τη στιβάδα L στην κενή θέση της στιβάδας K και καταμετράται σε κορυφή περίπου στα 32 Kv. [1]



**Σχήμα 1.5:** Φάσμα  $^{60}\text{Co}$ , ξεκινώντας από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται: α. Η φωτοκορυφή 1,33 MeV, β. Η φωτοκορυφή 1,17 MeV, γ. Η αιχμή Compton, δ. Κορυφή οπισθοσκέδασης και ε. Η χαρακτηριστική ακτινοβολία X. [1]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (SILICON PHOTOMULTIPLIERS – SiPMs)

Πρόκειται για ανιχνευτές οπτικών φωτονίων που χαρακτηρίζονται από υψηλό κέρδος και απόδοση. Όσο για τη δομή τους, αποτελούνται από κελιά (micropixels ή cells) σε συστοιχία δύο διαστάσεων. Κάθε κελί περιλαμβάνει μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiode- APD), σε σειρά με μία αντίσταση (quenching resistor), η οποία συνδέει τα κελιά και ρυθμίζει την τάση της κάθε διόδου. Οι APDs λειτουργούν σε Geiger Mode και παρουσιάζουν κέρδη περίπου της τάξεως των  $10^6$  και δίνουν παλμό ρεύματος κάθε φορά που προσπίπτουν πάνω τους οπτικά φωτόνια. Το σήμα στην έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή είναι η συνισταμένη των επιμέρους εξόδων κάθε διόδου και είναι ανάλογο του αριθμού των κελιών στα οποία προσέπεσε οπτικό φωτόνιο. [4], [9]-[11]

Τα χαρακτηριστικά που θέτουν τους SiPMs δημοφιλής αντικαταστάτες των PMTs, σε συστήματα ανίχνευσης ακτινοβολίας  $\gamma$ , είναι τα εξής:

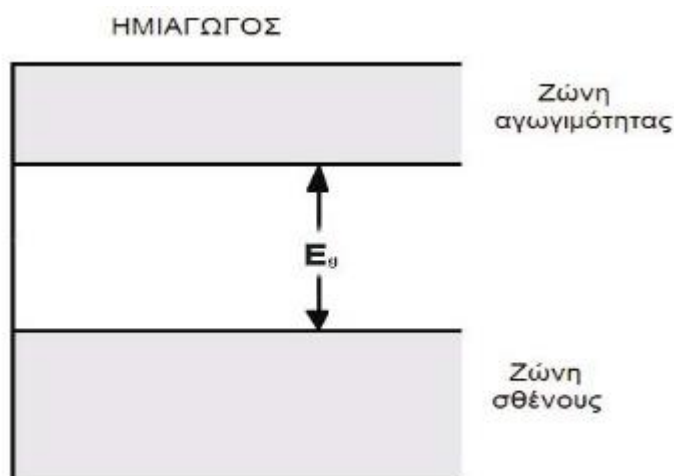
1. Το μικρό τους μέγεθος, το οποίο τους καθιστά εύχρηστους σε εφαρμογές που απαιτούν ανιχνευτές μικρών διαστάσεων.
2. Το υψηλό τους κέρδος, που αναφέρθηκε και παραπάνω, το οποίο είναι συγκρίσιμο με αυτό των PMTs (της τάξεως του  $10^6$ ).
3. Η γρήγορη απόδοση τους, σε συνδυασμό με την χαμηλή τάση πόλωσης που απαιτούν για τη λειτουργία τους.
4. Τελευταίο και ίσως το σημαντικότερο των βασικών χαρακτηριστικών, είναι η ανοχή τους σε επιδράσεις εξωτερικών μαγνητικών και ηλεκτρικών πεδίων.

Αξίζει να σημειωθεί πως τα οφέλη όλων των παραπάνω χαρακτηριστικών, μπορούν να αξιοποιηθούν με την προϋπόθεση της ύπαρξης μίας αποδοτικής σύζευξης με κατάλληλο σπινθηριστή, μίας εξίσου καλής ενισχυτικής μονάδας και τέλος ενός

συστήματος μετατροπής σήματος για την εξαγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων. [4],[9]-[11]

## 2.1 Ανιχνευτές ημιαγωγών

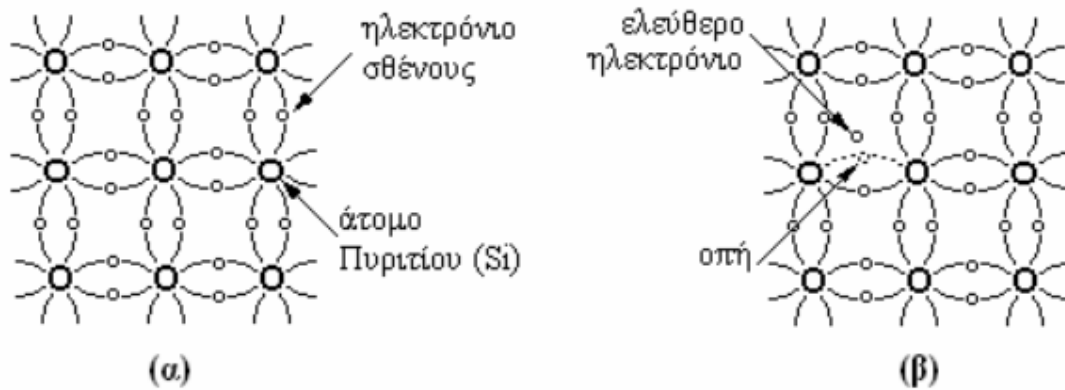
Αναφέρθηκε νωρίτερα η δομή ενός SiPM και κάπου εδώ θα ήταν αναγκαίο να αναλυθούν παραπάνω τα επιμέρους στοιχεία του. Ξεκινώντας λοιπόν από τις βασικές θεωρητικές αρχές, Οι ανιχνευτές ημιαγωγών κατασκευάζονται από κρυσταλλικά υλικά, όπως το Πυρίτιο που θα μελετηθεί περαιτέρω στη συνέχεια και κατατάσσονται στους ανιχνευτές στερεής κατάστασης. Χρησιμοποιούνται κυρίως, λόγω της μεγάλης ενεργειακής διακριτικότητας που παρουσιάζουν. Στην εξωτερική τους στιβάδα, παρουσιάζουν δύο ενεργειακές ζώνες. Η ζώνη σθένους και η ζώνη αγωγιμότητας χωρίζονται από ένα ενεργειακό χάσμα, εκεί όπου δεν υπάρχουν ενεργειακές στάθμες (Σχήμα 2.1). Η θερμοκρασία που θα εκτεθούν οι ημιαγωγοί καθορίζει το πως αυτοί θα λειτουργήσουν. Κοντά στο απόλυτο μηδέν θα λειτουργήσουν ως μονωτές και όσο αυξάνεται η θερμοκρασία η μετάβαση των ηλεκτρονίων, από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, γίνεται ευκολότερα καθώς το ενεργειακό φάσμα μειώνεται. [4]



Σχήμα 2.1: Ενεργειακές ζώνες ενός καθαρού ημιαγωγού. [4]

Ένα ηλεκτρόνιο χρειάζεται μεγαλύτερη ενέργεια, από αυτή του ενεργειακού φάσματος, για να μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από το προσπίπτον φωτόνιο που αλληλεπιδρά με τα ηλεκτρόνια του ατόμου. Τα ηλεκτρόνια με τη μετάβαση τους στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει πίσω του οπές (Σχήμα 2.2). Στη συνέχεια, η οπή αυτή μπορεί να καλυφθεί από ένα γειτονικό ηλεκτρόνιο και έτσι να υπάρχει μία “μετακίνηση” της. [4]



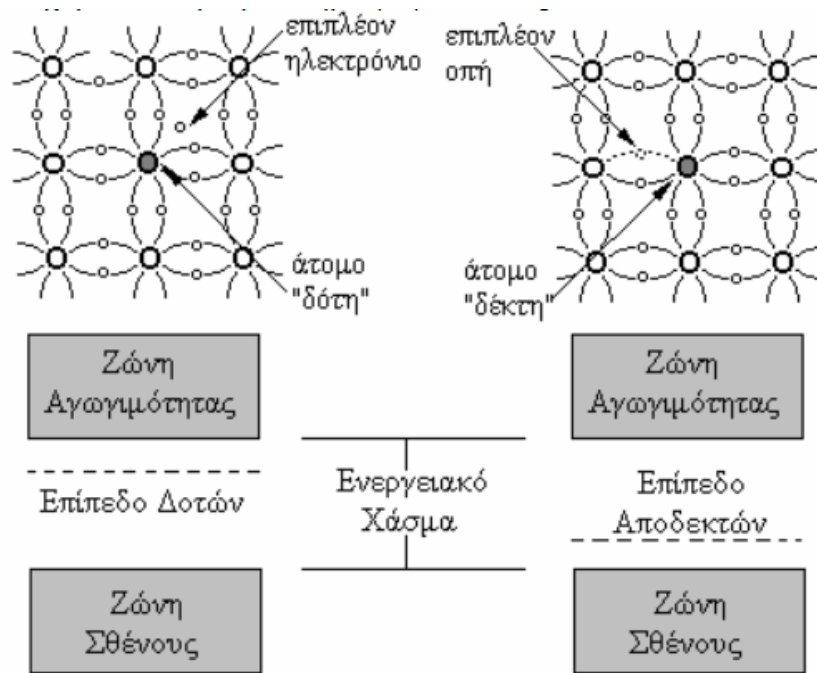


**Σχήμα 2.2:** Ομοιοπολικοί δεσμοί Πυριτίου, (α) Όλα τα ηλεκτρόνια σθένους συμμετέχουν στους δεσμούς στους 0 K. (β) Σπάσιμο δεσμών και εμφάνιση οπής, σε υψηλότερες θερμοκρασίες. [4]

Ένας άλλος τρόπος για τη διέγερση των ηλεκτρονίων είναι μέσω θερμικής ενέργειας, που υπάρχει όταν ο κρύσταλλος βρεθεί σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

### 2.1.1 Προσμίξεις ημιαγωγών

Η ιδανική κατάσταση όπου στο ενεργειακό χάσμα δεν εμφανίζονται ενεργειακές στάθμες, προφανώς και είναι ιδεατή. Τα ημιαγωγικά υλικά, στην πραγματικότητα, έχουν προσμίξεις και λόγω αυτών συνδέονται οι ζώνες σθένους και αγωγιμότητας. Μάλιστα η κατασκευή τους βασίζεται σε αυτές τις προσμίξεις, ώστε να αυξηθεί η αγωγιμότητα τους. Ουσιαστικά ανάλογα με το είδος της πρόσμιξης δημιουργείται είτε περίσσεια ηλεκτρονίων και οι ημιαγωγοί είναι τύπου n, χαρακτηρίζοντας και τις προσμίξεις ως δότες, είτε δημιουργείται περίσσεια οπών και οι ημιαγωγοί είναι τύπου p, χαρακτηρίζοντας αυτή τη φορά τις προσμίξεις ως αποδέκτες (Σχήμα 2.3). Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η συγκέντρωση των προσμίξεων είναι μικρή, της τάξεως του  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  και άλλες όπου η συγκέντρωση είναι μεγάλη και φθάνει μέχρι και τα  $10^{20} \text{ atoms/cm}^3$ . Στην πρώτη περίπτωση οι ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρικές επαφές ημιαγωγών και στη δεύτερη παρατηρείται υψηλή αγωγιμότητα. [4]



**Σχήμα 2.3:** Αριστερά απεικονίζεται ημιαγωγός τύπου- n με επίπεδα δοτών που δίνουν ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας. Δεξιά απεικονίζεται ημιαγωγός τύπου -p που δίνουν οπές στη ζώνη σθένους. [4]

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3, στην περίπτωση πρόσμιξης δότη, υπάρχει ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο του οποίου η ενεργειακή στάθμη είναι πολύ κοντά στη ζώνη αγωγιμότητας και έτσι με κάποιου είδους διέγερση θα δοθεί ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας. Το ηλεκτρόνιο αυτό αφήνει πίσω του το άτομο της πρόσμιξης με θετικό ηλεκτρικό φορτίο, το οποίο είναι μη μετακινήσιμο καθώς οι δεσμοί των ηλεκτρονίων μεταξύ του ατόμου πρόσμιξης και των γειτονικών ατόμων του κρυστάλλου είναι πλήρεις και δεν χωράει εκεί και άλλο ηλεκτρόνιο. Δεν δημιουργούνται οπές και έτσι δεν υπάρχει διακίνηση φορτίου. Ο κρύσταλλος παραμένει ηλεκτρικά ουδέτερος, αφού κάθε μετάβαση ελεύθερου ηλεκτρονίου στη ζώνη αγωγιμότητας αφήνει ένα άτομο με ίσο και αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο. Γενικά ισχύει ότι τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας προσφέρονται επί το πλείστον από την πρόσμιξη και όχι από το ενδογενές υλικό, γεγονός που σημαίνει ότι:

A. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας καθορίζεται πλήρως από τη συμβολή των δοτών

B. Η πυκνότητα των ηλεκτρονίων αγωγιμότητας είναι πολύ μεγαλύτερη από την πυκνότητα των οπών, δεδομένου ότι οι οπές αφήνουν μόνο τα ηλεκτρόνια αγωγιμότητας του ενδογενούς υλικού και αυτά των δοτών.

Έτσι η αγωγιμότητα αυτών των ημιαγωγών βασίζεται στα ηλεκτρόνια και όχι στις οπές, για αυτό και ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου n. [4]

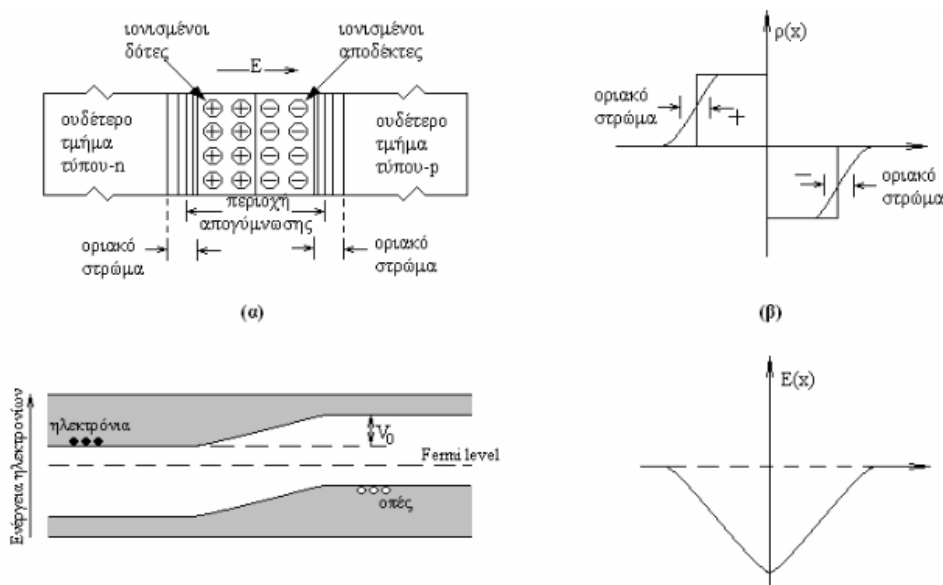
Αντίθετα, στην περίπτωση πρόσμιξης δέκτη, υπάρχει ένα λιγότερο ηλεκτρόνιο και έτσι δημιουργείται μία οπή. Η πιθανότητα να πληρωθεί η οπή από ένα διεγερμένο ηλεκτρόνιο είναι μεγάλη, αυτά τα ηλεκτρόνια προέρχονται από άλλες θέσεις οπών στον κρύσταλλο, αφήνοντας και άλλες οπές πίσω τους. Έτσι για κάθε δέκτη δημιουργείται μία οπή, αυτή η ροή οπών καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Οι πληρωμένες με ηλεκτρόνια θέσεις των δεκτών συνιστούν ακίνητα

ηλεκτρικά φορτία τα οποία ισοσταθμίζουν τα ηλεκτρικά φορτία των αντίστοιχων οπών. Αυτοί οι ημιαγωγοί ονομάζονται τύπου p. [4]

### 2.1.2 Δίοδος επαφής p-n

Η ένωση ενός ημιαγωγού τύπου n και ενός τύπου p, ονομάζεται ζεύξη p-n. Δεν πρόκειται για μία απλά σύνδεση των δύο τύπων ημιαγωγών, αλλά απαιτούνται ειδικές κατασκευαστικές τεχνικές. Η διάταξη έχει συγκεκριμένη μορφή. Αριστερά βρίσκεται ο κρύσταλλος τύπου n, όπου υπάρχει μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων και δεξιά ο κρύσταλλος τύπου p, όπου πρακτικά δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια αγωγιμότητας. Η κίνηση των ηλεκτρονίων λοιπόν, γίνεται από αριστερά προς τα δεξιά. Όταν αυτά εξέλθουν από τον κρύσταλλο τύπου n, αφήνουν πίσω τους θετικά ηλεκτρικά φορτία που δεν μπορούν να κινηθούν από τη θέση που βρίσκεται ο δότης. Αυτό το θετικό φορτίο ονομάζεται στατικό. Έπειτα, τα ηλεκτρόνια εισέρχονται στον κρύσταλλο τύπου p και πληρώνουν γρήγορα τις οπές του. Αυτό οδηγεί στη διάχυση των οπών από τα δεξιά προς τα αριστερά και δημιουργεί ένα δεσμευμένο ακίνητο αρνητικό φορτίο στο δέκτη, που έχει συλλάβει πλέον ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο. Τελικά έχουμε θετικό φορτίο στην πλευρά του κρυστάλλου τύπου n και αρνητικό φορτίο στην πλευρά του κρυστάλλου τύπου p, τα οποία φορτία έρχονται τελικά σε ισορροπία.

Ο χώρος που λαμβάνουν χώρα αυτά τα φαινόμενα, ονομάζεται περιοχή απεμπλουτισμού (depletion region) και οι πυκνότητες ηλεκτρονίων και οπών είναι πολύ μικρές. Τα παραπάνω φορτία δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο σε αυτό το χώρο, το οποίο ωθεί τα ηλεκτρόνια προς τον κρύσταλλο τύπου n και τις οπές προς τον κρύσταλλο τύπου p. Έτσι η περιοχή απεμπλουτισμού δεν παρουσιάζει φορείς ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό που παρουσιάζεται είναι μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο περιοχών, γνωστή και ως δυναμικό επαφής και έχει τιμή της τάξεως του 1 Volt (Σχήμα 2.4). [4], [12]



**Σχήμα 2.4:** Στην (α) πλευρά απεικονίζεται μία συμμετρική επαφή τύπου pn και η πυκνότητα των φορτίων, στη (β) πλευρά απεικονίζεται το ενεργειακό διάγραμμα της επαφής και το δυναμικό  $V_0$  και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. [4]

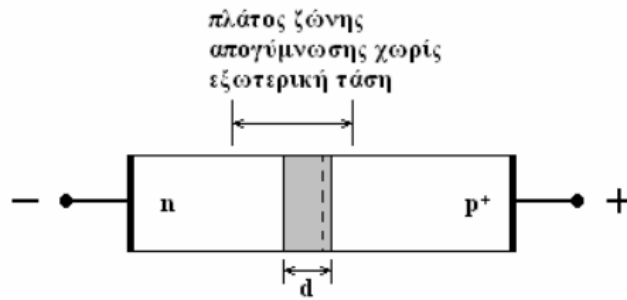
Η έλλειψη φορέων στην περιοχή απεμπλουτισμού καθιστά τις διόδους επαφής p-n ιδανικές για ανίχνευση ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία που θα εισέλθει στην περιοχή αυτή θα δημιουργήσει φορείς φορτίου και αυτοί με τη σειρά τους θα απομακρυνθούν από το ηλεκτρικό πεδίο. Αυτή η κίνηση, με τη χρήση ηλεκτροδίων στα άκρα της διόδου, θα καταγραφεί ως ρεύμα με ένταση ανάλογη της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Για την εν λόγω χρήση των ηλεκτροδίων, αυτό που επιτυγχάνεται είναι η εφαρμογή εξωτερικής τάσης πόλωσης στα άκρα της διόδου p-n. Αυτός είναι ο τρόπος ώστε να συλλεχθούν τα φορτία που παράγονται στην περιοχή απεμπλουτισμού. Η διαδικασία της σύνδεσης των ηλεκτροδίων δεν πραγματοποιείται με απλή επαφή του μετάλλου πάνω στον ημιαγωγό, γιατί αυτό θα δημιουργούσε ανορθωτική επαφή (rectifying junction) και θα επέκτεινε την ζώνη απεμπλουτισμού. Το φαινόμενο αυτό αντιμετωπίζεται με τη χρήση στρωμάτων ημιαγωγών μεταξύ μετάλλου και ημιαγωγού, τα οποία έχουν υψηλές συγκεντρώσεις προσμίξεων. Επίσης χρησιμοποιείται μία αντίσταση σε σειρά με την τάση στη δίοδο για λόγους απομόνωσης. [4], [11]

### 2.1.3 Τρόποι εφαρμογής εξωτερικής τάσης πόλωσης

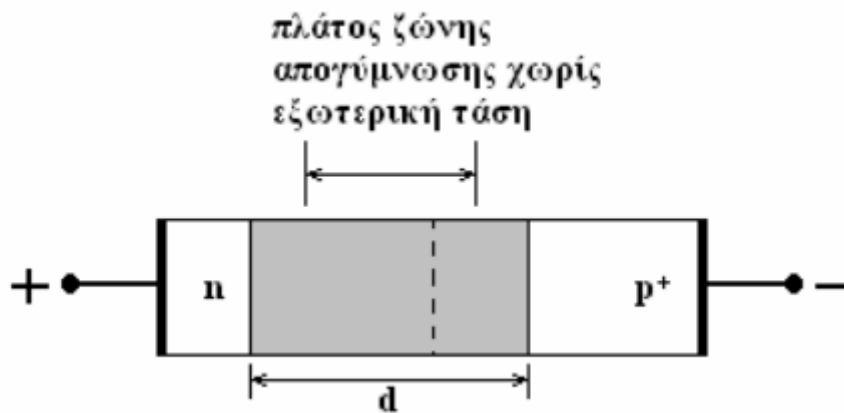
Ορθή τάση πόλωσης: Σε αυτή την περίπτωση η εξωτερική τάση πόλωσης  $V_b$ , εφαρμόζεται με τέτοιο τρόπο ώστε η περιοχή τύπου p να είναι θετική σε σχέση με την περιοχή τύπου n. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται το εύρος της περιοχής άντλησης και αυξάνεται η χωρητικότητα της επαφής pn (Σχήμα 2.5). Η ολική μεταβολή του ηλεκτροστατικού δυναμικού κατά μήκος της επαφής είναι μικρότερη από εκείνη που αντιστοιχεί στην κατάσταση της θερμικής ισορροπίας ( $V_0$ ) και ισχύει η σχέση  $V = V_0 - V_b$ .

Το ηλεκτροστατικό πεδίο  $E$  μειώνεται και κατά συνέπεια μειώνεται και η συνιστώσα του ρεύματος που οφείλεται στο πεδίο αυτό. Η κατάσταση ισορροπίας, μεταξύ ηλεκτροστατικού ρεύματος και ρεύματος διάχυσης, διαταράσσεται εξαιτίας της διαφορετικής συγκέντρωσης φορέων στις p και n περιοχές και έτσι κατά μήκος της διόδου ρέει ηλεκτρικό ρεύμα συμβατικής φοράς, το οποίο έρχεται σε συμφωνία με το εξωτερικό κύκλωμα πόλωσης. [4], [11]



**Σχήμα 2.5:** Δίοδος pn και το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης με την εφαρμογή ορθής εξωτερικής τάσης. [4]

Ανάστροφη τάση πόλωσης: Σε αυτήν την περίπτωση το p άκρο της ζεύξης είναι αρνητικό σε σχέση με το n άκρο. Οποιαδήποτε αλληλεπίδραση σωματιδίου έξω από την περιοχή απεμπλουτισμού, που θα δημιουργήσει ζεύγη ηλεκτρονίων- οπών δε θα ληφθεί ως σήμα, γιατί το ηλεκτρικό πεδίο δε δρα εκεί και θα υπάρξει επανασύνδεση ηλεκτρονίων και οπών. Η ανάστροφη πόλωση μεγαλώνει το πλάτος της ζώνης απογύμνωσης, με τρόπο ανάλογο μάλιστα (Σχήμα 2.6). Όσο μεγαλύτερη τιμή τάσης  $V$ , τόσο μεγαλύτερο γίνεται το πλάτος  $d$ , ισχύει ότι  $d \approx \sqrt{V/\sqrt{N}}$ . Όπου  $N$  η πυκνότητα προσμίξεων στον ημιαγωγό. Η αύξηση του πλάτους είναι επιθυμητό φαινόμενο, απλά πρέπει η τάση να προσαρμοστεί έτσι ώστε να μην υπάρχει διέλευση μεγάλων ρευμάτων και κατάρρευση της διόδου. [4], [11]

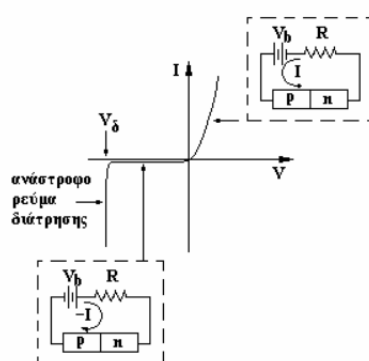


**Σχήμα 2.6:** Δίοδος pn και το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης με την εφαρμογή ανάστροφης εξωτερικής τάσης. [4]

Τόσο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, όσο και οι ελεύθερες οπές απομακρύνονται λόγω της πόλωσης προς αντίθετες κατευθύνσεις. Σε αντίθεση με την κατάσταση ισορροπίας, δεν υπάρχει μεγάλη πιθανότητα επανασύνδεσής τους και εμφανίζεται ανάστροφο ρεύμα μέσα στην pn ζεύξη. Για διόδους που κατασκευάζονται από Πυρίτιο (Si), ισχύει πως έχουν μεγάλη συνεισφορά από ανάστροφα ρεύματα διαρροής, καθώς στην περιοχή άντλησης δημιουργούνται φορείς. [4], [11]

## 2.1.4 Φαινόμενο διάτρησης της διόδου επαφής pn

Μία pn διάδος για να λειτουργήσει ικανοποιητικά ως ανιχνευτής, απαιτεί ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο και μεγάλο εύρος περιοχής απογύμνωσης, για να συλλέξει τους φορείς φορτίου που δημιουργεί η ακτινοβολία. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, αυτό επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ανάστροφης τάσης στα άκρα της διόδου. Η μέγιστη τιμή αυτής της τάσης περιορίζεται από την εσωτερική αντίσταση του ημιαγωγού. Μετά από κάποια τιμή η επαφή pn θα υποστεί διάτρηση (breakdown) και θα αρχίσει να άγει και το ρεύμα που θα τη διαπερνά θα είναι ισχυρό (Σχήμα 2.7). [4]

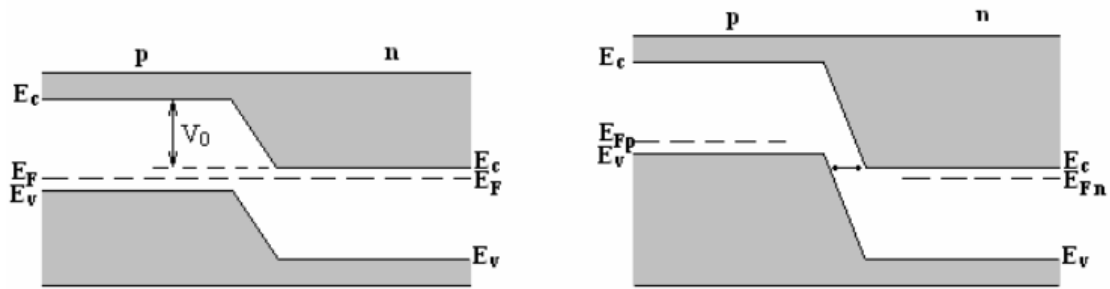


**Σχήμα 2.7:** Χαρακτηριστική I-V μίας pn διόδου κάτω από συνθήκες διάτρησης. [4]

Η διάτρηση ως φαινόμενο δεν αποτελεί απειλή για τη διάοδο, με την προϋπόθεση να περιοριστεί το μέγιστο ρεύμα που θα τη διαρρέει μέσω της εξωτερικής αντίστασης (R). Το μέγιστο ανάστροφο ρεύμα είναι ίσο με  $(V_b - V_{\delta})/R$ . Αν δεν υπήρχε η αντίσταση εξωτερικά της διόδου ώστε να περιορίζει το ρεύμα, η διάοδος θα υπερθερμαινόταν, λόγω της υπέρμετρης ισχύς και θα επερχόταν καταστροφή της. [4]

### 2.1.4.1 Φαινόμενο σήραγγας ή φαινόμενο Zener

Το φαινόμενο αυτό είναι ένας από τους τρόπους που εκφράζεται η διάτρηση στη διάοδο. Προφανώς αναφέρεται σε περιπτώσεις ανάστροφης πόλωσης διόδων που έχουν μεγάλη συγκέντρωση προσμίξεων. Η ταινία αγωγιμότητας της πλευράς τύπου n εμφανίζεται απέναντι από την ταινία σθένους της πλευράς τύπου p. [4]

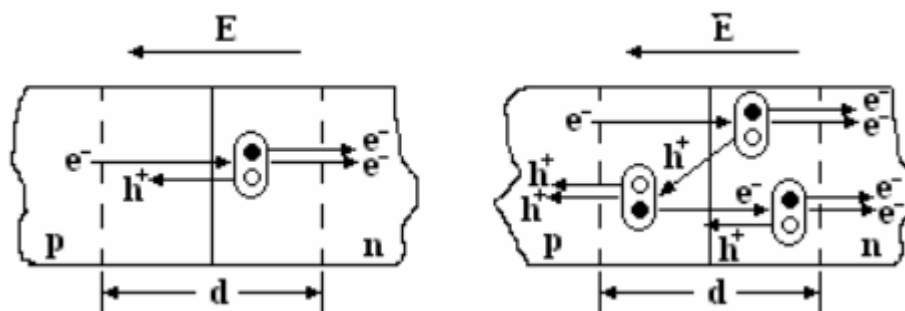


**Σχήμα 2.8:** Αριστερά απεικονίζεται μία επαφή pn με πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις προσμίξεων σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, δεξιά απεικονίζεται η μετάβαση ηλεκτρονίου από την περιοχή p στην n μετά από εφαρμογή ανάστροφης τάσης και φαινομένου της σήραγγας. [4]

Αν η περιοχή (περιοχή άντλησης) που χωρίζει αυτές τις δύο ταινίες είναι μικρή, τότε τα ηλεκτρόνια από την ταινία σθένους καταλαμβάνουν κβαντικές καταστάσεις της ταινίας αγωγιμότητας, λόγω του φαινομένου της σήραγγας περνώντας το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού. Αυτό οδηγεί στη ροή ανάστροφου ρεύματος από την περιοχή τύπου n προς την περιοχή τύπου p της διόδου. Η ροή αυτή οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί η τάση πόλωσης, το οποίο όταν πάρει συγκεκριμένη τιμή ως προς την ένταση του, επιταχύνει τα ηλεκτρόνια που βρίσκονταν στους ομοιοπολικούς δεσμούς προς την πλευρά τύπου n (Σχήμα 2.8). [4]

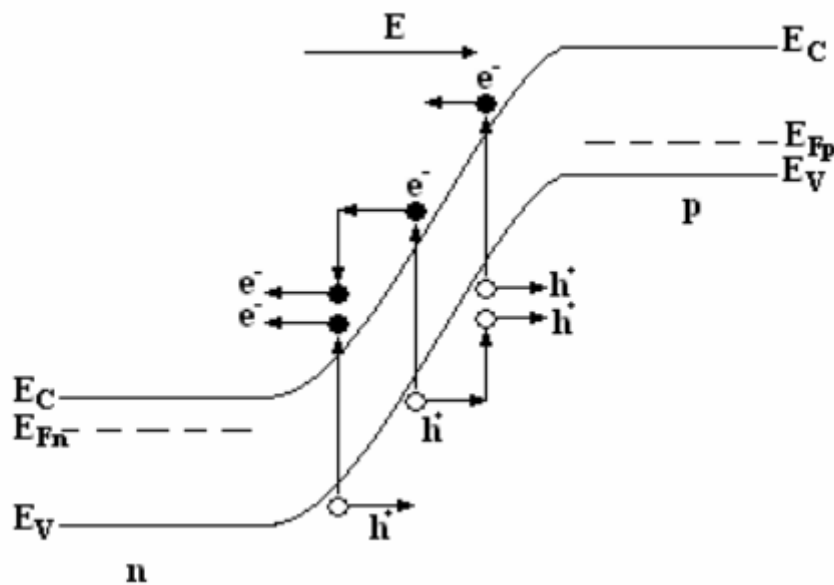
#### 2.1.4.2 Φαινόμενο χιονοστιβάδας (Geiger mode)

Το δεύτερο φαινόμενο με το οποίο εκφράζεται η διάτρηση είναι αυτό της χιονοστιβάδας. Στις περιπτώσεις που οι προσμίξεις στη διόδο έχουν χαμηλή συγκέντρωση και κατά συνέπεια το φαινόμενο της σήραγγας είναι αμελητέο, η διάτρηση λαμβάνει χώρα μέσω του ιονισμού των μητρικών ατόμων του κρυστάλλου, ο οποίος συμβαίνει εξαιτίας της κρούσης αυτών με φορείς που έχουν υψηλές τιμές κινητικής ενέργειας. Η αλληλεπίδραση αυτή συντελεί στο φαινόμενο του πολλαπλασιασμού των φορέων, κατά το οποίο τόσο το αρχικό ηλεκτρόνιο όσο και το δευτερεύον που δημιουργήθηκε από ιονισμό κρούσης, κατευθύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο προς την πλευρά n και η αντίστοιχη οπή προς την πλευρά p (Σχήμα 2.9). [4]



**Σχήμα 2.9:** Αριστερά απεικονίζεται ιονισμός κρούσης από ηλεκτρόνιο που μπαίνει στην περιοχή άντλησης της επαφής pn. Δεξιά απεικονίζονται πρωτογενείς, δευτερογενείς και τριτογενείς κρούσεις ιονισμού. [4]

Πέρα από τον πρωτεύοντα ιονισμό, οι νέοι φορείς που δημιουργήθηκαν, μπορεί να προκαλέσουν εκ νέου ιονισμό στην περιοχή άντλησης και έτσι ο βαθμός πολλαπλασιασμού των φορέων να αυξηθεί. Αυτή η αλυσιδωτή αλληλεπίδραση ονομάζεται, φαινόμενο της χιονοστιβάδας (Σχήμα 2.10). [4]



**Σχήμα 2.10:** Πολλαπλασιασμός φορέων εξαιτίας του φαινομένου της χιονοστιβάδας. [4]

Η ένταση του ανάστροφου ρεύματος κατά το φαινόμενο της χιονοστιβάδας δίνεται από τη σχέση 2.1:

$$I_{\text{real}} = M \times I_{\text{RO}}$$

Σχέση 2.1 [4]

Όπου  $M$ , ο παράγοντας πολλαπλασιασμού των φορέων και  $I_{\text{RO}}$  η ένταση του ανάστροφου ρεύματος χωρίς την επίδραση του φαινομένου της χιονοστιβάδας.

### 2.1.4.3 Γραμμική λειτουργία (Linear Mode)

Στην γραμμική λειτουργία οι APDs συμπεριφέρονται ως ανιχνευτές φωτονίων με κέρδη που δεν ξεπερνούν τις μερικές εκατοντάδες ( $10^1 - 10^3$ ). Εφαρμόζεται ανάστροφη τάση λειτουργίας  $V_{\text{BIAS}}$  λίγο μικρότερη από την τάση κατάρρευσης της διόδου  $V_{\text{BD}}$  ( $V_{\text{BIAS}} < V_{\text{BD}}$ ). Το εσωτερικό κέρδος των APDs βελτιώνει τον λόγο



σήματος προς θόρυβο αλλά παρ' όλα αυτά χρειάζονται τουλάχιστον 20 φωτόνια για να προκύψει μετρήσιμος παλμός ρεύματος.

Στη γραμμική λειτουργία υπάρχει υψηλό ποσοστό θορύβου που δεν επιτρέπει τη λεπτομερή μελέτη φασμάτων. Επιπλέον παρατηρείται σημαντική εξάρτηση του κέρδους από τη θερμοκρασία και την τάση λειτουργίας  $V_{BIAS}$ , γεγονός που επιβάλλει το διαρκή έλεγχο αυτών των παραμέτρων και τη ρύθμισή τους ώστε να έχουν όσο το δυνατόν πιο σταθερές τιμές. Ένα ακόμη μειονέκτημα της γραμμικής λειτουργίας είναι το περιορισμένο εσωτερικό κέρδος των APDs ( $< 1000$ ), λόγω του οποίου απαιτούνται ενισχυτές χαμηλού θορύβου για την ανάγνωση του σήματος εξόδου, καθώς και λειτουργία σε αυστηρά περιορισμένο εύρος. [4]

## 2.2 Φωτοдиодοι Χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiodes – APDs)

Οι APDs είναι φωτοдиодοι επαφής p-n, που παράγουν παλμό ρεύματος κάθε φορά που προσπίπτει σε αυτές ένα οπτικό φωτόνιο. Λειτουργούν σε Geiger Mode και για αυτό συχνά αναφέρονται και ως GM- APDs. Η τάση λειτουργίας ( $V_{bias}$ ) τους είναι περίπου 10% - 30% πάνω από την τάση κατάρρευσης ( $V_{breakdown}$ ) της διόδου και έτσι η τάση λειτουργίας  $V_{overvoltage}$  είναι θετική,  $V_{overvoltage} = V_{bias} - V_{breakdown}$ .

Κάθε φωτοдиодος έχει ανεξάρτητη αντίδραση, με τις γειτονικές της, όταν ένα φωτόνιο πέσει πάνω της. Το φωτόνιο αυτό που θα προσκρούσει στην διόδο, δηλαδή στην ενεργό περιοχή της, δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου- οπής και μέσω του φαινομένου της χιονοστιβάδας παράγει ένα αυξημένο ρεύμα στην έξοδο της. Αναφορικά, η ενεργή περιοχή κυμαίνεται από  $1,3 \times 1,3$  έως  $6 \times 6$  mm<sup>2</sup>, το μέγεθος ενός microcell από  $10 \times 10$  έως  $75 \times 75$  μm<sup>2</sup> και γενικά ισχύει το εξής: [4], [12]

$$\text{Αριθμος microcells} = \frac{\text{Ενεργός περιοχή}}{\text{μέγεθος microcell}}$$

Σχέση 2.2 [12]

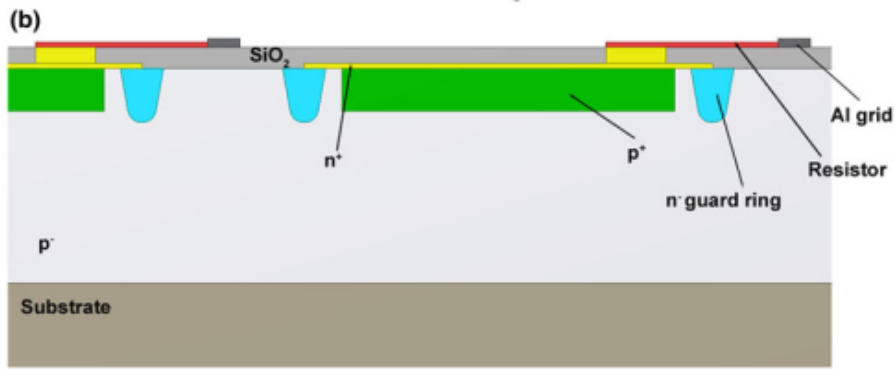
Όσο για το φορτίο Q (Σχέση 2.3) που εμφανίζεται σε κάθε microcell (Σχήμα 2.11) μετά την πρόσπτωση ενός φωτονίου σε αυτό ισχύει ότι:

$$Q_{cell} = C_{cell} \times V_{overvoltage}$$

Σχέση 2.3 [12]

$C_{cell}$ : Η χωρητικότητα του κελιού

$V_{overvoltage}$ : Η τάση λειτουργίας της φωτοдиодου, που ισούται με τη διαφορά της τάσης  $V_{bias}$  και της τάσης κατάρρευσης  $V_{breakdown}$ .



**Σχήμα 2.11:** Δομή ενός κελιού (cell). Κάθε APD είναι στην ουσία μία φωτοδίοδος επαφής p-n που λειτουργεί πέρα από την τάση κατάρρευσης (Geiger Mode). [12]

### 2.2.1 Χωρητικότητα επαφής p-n

Η χωρητικότητα  $C$  (Σχέση 2.4) που υπάρχει στην περιοχή απογύμνωσης μίας επαφής p-n είναι συγκεκριμένη και επηρεάζει το θόρυβο που παράγει αυτή όταν χρησιμοποιείται ως ανιχνευτής. Για μία επίπεδη γεωμετρία η χωρητικότητα υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση: [4]

$$C_j = \frac{dQ}{dV} = \epsilon \frac{S}{L}$$

Σχέση 2.4 [4]

Όπου :

$dQ$ : Η μεταβολή του φορτίου στην περιοχή απογύμνωσης.

$dV$ : Η διαφορά δυναμικού μεταξύ εξωτερικής τάσης και του δυναμικού φραγμού.

$\epsilon$ : Η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού.

$S$ : Η επιφάνεια της περιοχής απογύμνωση.

$L$ : Το μήκος της περιοχής απογύμνωσης.

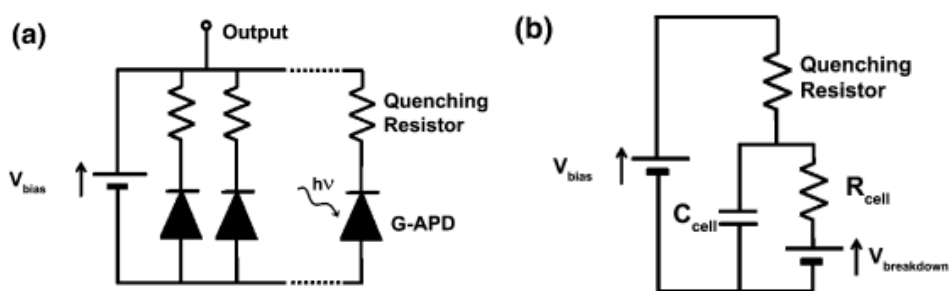
## 2.2.2 Διαδικασία απόκρισης SiPM σε εισερχόμενα φωτόνια

Οι GM-APDs εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο της χιονοστιβάδας παράγουν μεγάλους και ευδιάκριτους παλμούς στην έξοδο τους. Η διαδικασία που ακολουθείται για να ληφθούν οι εν λόγω παλμοί προκύπτει από :

A. Το φωτόνιο που προσπίπτει σε κάποιο κελί του SiPM παράγει παλμό, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από το συνολικό αριθμό φωτονίων που θα προσκρούσουν πάνω στο κελί τελικά. Ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης και η συνολική έξοδος του SiPM είναι ανάλογη του αριθμού των κελιών που εκφορτίστηκαν. Το στάδιο αυτό ονομάζεται εκφόρτιση.

B. Το κάθε κελί επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση καθώς το φαινόμενο της χιονοστιβάδας που το διέπει σταματά μέσω της μείωσης της τάσης λειτουργίας  $V_{bias}$  μέχρι την τιμή της τάσης κατάρρευσης  $V_{breakdown}$ . Το στάδιο αυτό ονομάζεται επαναφορά.

Γ. Σε τελικό στάδιο η τάση λειτουργίας επιστρέφει στην αρχική της τιμή και ο SiPM είναι έτοιμος να ανιχνεύσει το επόμενο φωτόνιο. Το στάδιο αυτό ονομάζεται αποκατάσταση. [4], [12]



Σχήμα 2.12: (a) Απλοποιημένο διάγραμμα SiPM. (b) Ισοδύναμο κύκλωμα κελιού σε λειτουργία. Ο πυκνωτής  $C_{CELL}$  είναι αρχικά φορτισμένος με τάση  $V_{BIAS}$  και εκφορτίζεται μέσω της  $R_{CELL}$  ρίχνοντας την τάση μέχρι την τιμή  $V_{BD}$ . Η χιονοστιβάδα σταματά λόγω της αντίστασης (quenching resistor) και το κελί επαναφορτίζεται. [12]

## 2.2.3 Μηχανισμός επαναφοράς της τάσης λειτουργίας (Quenching Mechanism- Resistor)

Η ηλεκτρική σύζευξη μεταξύ των κελιών ενός SiPM επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση μίας αντίστασης. Η χρησιμότητα της αντίστασης είναι να παρέχει την αρνητική ανάδραση, δηλαδή την εναντίωση, στο φαινόμενο της χιονοστιβάδας. Η χιονοστιβάδα αυξάνει το ρεύμα στη δίοδο, εξαιτίας της αύξησης των φορτίων και αυτά συσσωρεύονται μεταξύ του αντιστάτη και του στρώματος Πυριτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση ενός νέου ηλεκτρικού πεδίου που εναντιώνεται στο παλιό και τελικά τερματίζει τη χιονοστιβάδα. [4]

## Κύκλωμα Παθητικού Quenching (PQC)

Το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι αρκετά διαδεδομένο, επειδή είναι απλό και οικονομικό στην υλοποίηση του. Μία αντίσταση, της τάξεως των 100 kΩ τοποθετείται σε σειρά με τη φωτοδίοδο και προκαλεί την πτώση τάσης  $V_{bias}$  μέχρι το σημείο όπου αυτή θα φτάσει την τάση  $V_{breakdown}$ , δηλαδή το  $V_{overvoltage}$  να φτάσει μηδενική ή και αρνητική τιμή. Έτσι το φαινόμενο της χιονοστιβάδας θα εξασθενήσει. Το μειονέκτημα του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι η αποκατάσταση της τάσης λειτουργίας, δηλαδή το μεγάλο recovery time. [4]

## Κύκλωμα Ενεργού Quenching (AQC)

Σε αντίθεση με τον Οπαθητικό κύκλωμα Quenching, η πτώση της τάσης λειτουργίας ώστε το  $V_{overvoltage}$  να φτάσει το μηδέν ή να πέσει και σε αρνητικές τιμές, πραγματοποιείται μέσω ενός συγκριτή. Ο συγκριτής αυτός, στην έξοδο του παρουσιάζει ένα παλμό που έρχεται σε συγχρονισμό με τον παλμό της χιονοστιβάδας. Σε αυτή την περίπτωση το recovery time, είναι πολύ μικρό και οι παλμοί είναι καλά ορισμένοι και ευδιάκριτοι. Πλεονεκτήματα που έρχονται με υψηλότερο κόστος και πολυπλοκότερα συστήματα. [4]

## 2.3 Παράμετροι απόδοσης

### 2.3.1 Κέρδος

Ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία των SiPMs, όπως έχει αναφερθεί πολλές φορές ήδη, είναι το κέρδος που παρέχουν στο σήμα που προέρχεται από τα φωτόνια που προσπίπτουν πάνω τους. Το κέρδος ( $G$ ) (Σχέση 2.5) εξαρτάται από την τάση λειτουργίας  $V_{overvoltage}$ , μάλιστα παρουσιάζουν γραμμική εξάρτηση και από τη θερμοκρασία. Όσο το  $V_{overvoltage}$  αυξάνεται, τόσο αυξάνεται και το κέρδος (Σχήμα 2.14), με άλλες επιπτώσεις που θα αναφερθούν παρακάτω. Αντιστρόφως, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται το κέρδος (Σχήμα 2.13). Γενικά ισχύει ο τύπος :[8],[11],[12]

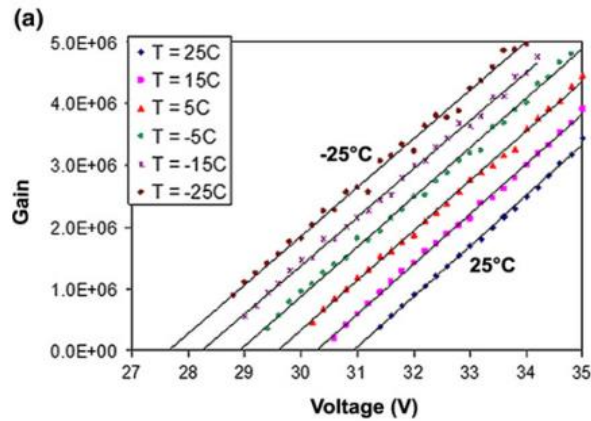
$$G = \frac{C_{CELL} \times \Delta V}{e^-}$$

Σχέση 2.5

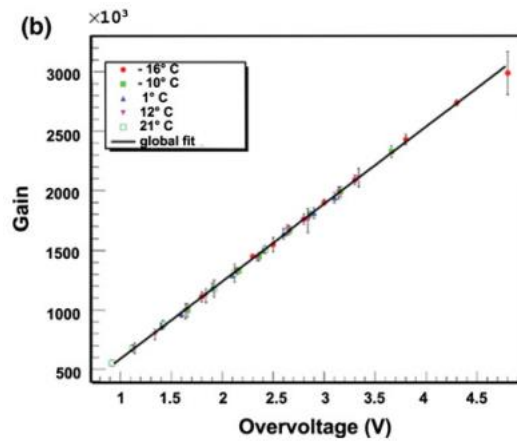
$C_{CELL}$  : Η χωρητικότητα του κελιού

$e^-$  : Το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου, που είναι ίσο με  $1,602 \times 10^{-19}$  C

$\Delta V$ : Τάση  $V_{overvoltage}$



**Σχήμα 2. 13:** Κέρδος σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας για διάφορες θερμοκρασίες. [12]



**Σχήμα 2. 14:** Κέρδος σε συνάρτηση με την τάση overvoltage για διάφορες θερμοκρασίες. [12]

### 2.3.2 Απόδοση Ανίχνευσης Φωτονίων (Photon Detection Efficiency-PDE)

Η PDE (Σχέση 2.6) σε έναν SiPM παρουσιάζει την στατιστική πιθανότητα ένα κελί του να παράξει παλμό μετά την πρόπτωση ενός φωτονίου πάνω του. Αυτή η παράμετρος επηρεάζεται από την τάση τροφοδοσίας ( $V_{bias}$ ) και το μήκος κύματος του φωτονίου ( $\lambda$ ) (Σχήμα 2.15-2.16). Η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο : [8], [11], [12]

$$PDE(\lambda, V_{BIAS}) = QE(\lambda) \times \varepsilon(V_{BIAS}) \times GE$$

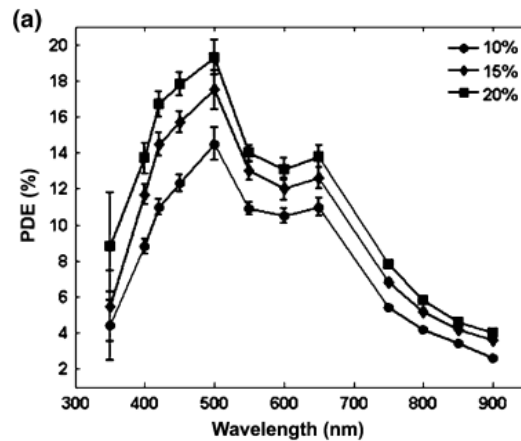
Σχέση 2.6

$QE(\lambda)$ : Η κβαντική απόδοση (quantum efficiency) του Πυριτίου, η οποία εξαρτάται από το μήκος κύματος  $\lambda$  και ουσιαστικά είναι η πιθανότητα να παραχθεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου- οπής από την απορρόφηση ενός ηλεκτρονίου.

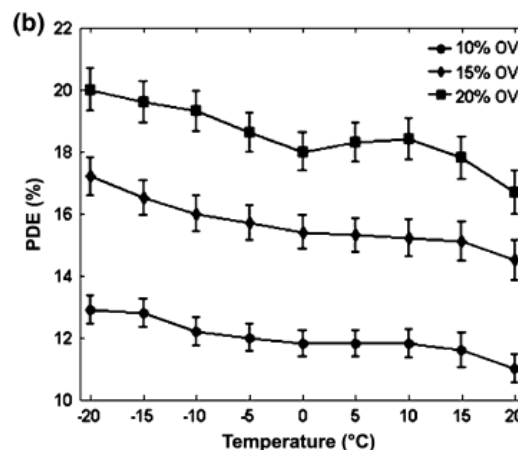
$\varepsilon(V_{bias})$ : Η πιθανότητα (Avalanche Initiation Probability) να ξεκινήσει το φαινόμενο της χιονοστιβάδας, η οποία εξαρτάται από την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης.

GE: Ο γεωμετρικός παράγοντας (fill factor) της διόδου, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της ενεργούς περιοχής όλων των κελιών προς το συνολικό εμβαδόν του SiPM.

Τυπικές τιμές της PDE, στο ορατό μέρος του φάσματος, είναι 80-90% και ποτέ δεν μπορεί να είναι 100%, γιατί δεν προκύπτει ανιχνεύσιμος παλμός από όλα τα φωτόνια.[8], [11], [12]



**Σχήμα 2.15:** Απόδοση ανίχνευσης φωτονίων PDE σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της εισερχόμενης ακτινοβολίας για διαφορετικές τάσεις overvoltage.[12]



**Σχήμα 2.16:** Απόδοση ανίχνευσης φωτονίων PDE σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για διαφορετικές τάσεις overvoltage . [12]

### 2.3.3 Δυναμικό Εύρος (Dynamic Range)

Το δυναμικό εύρος είναι ο μέγιστος ρυθμός φωτονίων που μπορούν να ανιχνευθούν από τον SiPM πριν αυτός έρθει σε κορεσμό. Ο ρυθμός αυτός εξαρτάται από τον αριθμό των κελιών που υπάρχουν στο εσωτερικό του. Το δυναμικό εύρος πρέπει να είναι μεγάλο όταν η ροή φωτονίων είναι υψηλή, ενώ για χαμηλή ροή μπορεί να είναι μικρότερο. Η αύξηση των κελιών για η διεύρυνση του δυναμικού εύρους μπορεί να οδηγήσει σε διαφοροποίηση της γεωμετρικής απόδοσης του ανιχνευτή αι κατά συνέπεια σε μείωση της απόδοσης ανίχνευσης φωτονίων (Σχέση 2.7). Γενικά ισχύει η σχέση:[8], [11], [12]

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} (1 - \exp(\frac{-N_{\text{photons}} \times PDE}{N_{\text{total}}}))$$

Σχέση 2.7

$N_{\text{fired}}$ : Τα κελιά που θα ενεργοποιηθούν από τα φωτόνια.

$N_{\text{total}}$ : Ο συνολικός αριθμός των κελιών του SiPM.

$N_{\text{photon}}$ : Ο συνολικός αριθμός των φωτονίων που θα προσπέσουν στον ανιχνευτή.

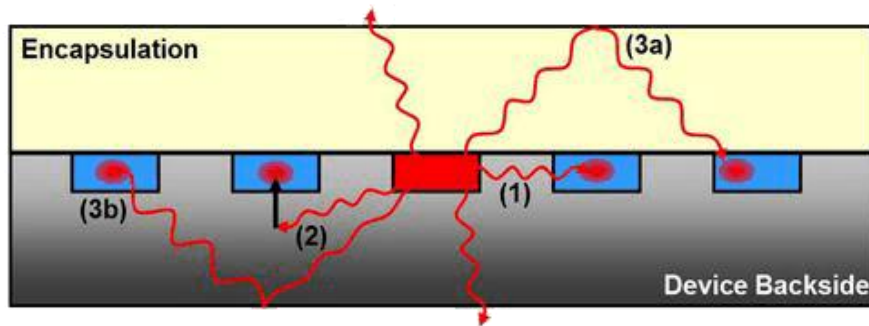
## 2.4 Πηγές θορύβου

### 2.4.1 Ρυθμός Σκότους (Dark Count Rate- DCR)

Κατά το φαινόμενο αυτό φορείς φορτίων στη φωτοδίοδο μπορεί να δημιουργηθούν και από θερμικές μεταβάσεις. Αυτοί οι φορείς δεν μπορούν να διαφοροποιηθούν από τους φορείς που παράγονται από οπτικά φωτόνια, αλλά μπορούν να καθοριστούν εάν τεθεί σε λειτουργία ο SiPM σε συνθήκες σκότους, δίχως δηλαδή να ακτινοβολείται. Οι παλμοί που θα καταμετρηθούν καθορίζουν το DCR του ανιχνευτή. Εξαρτάται από την τάση τροφοδοσίας, προφανώς τη θερμοκρασία και από το μέγεθος της ενεργούς περιοχής. [8], [11], [12]

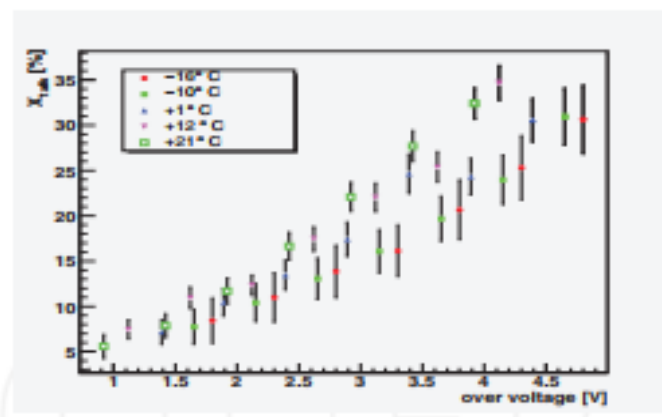
### 2.4.2 Φαινόμενο Optical Crosstalk

Καθώς τα φωτόνια προσπίπτουν στον ανιχνευτή, υπάρχει πιθανότητα να δημιουργηθεί δευτερογενής ακτινοβολία, δηλαδή φωτόνια τα οποία διαδίδονται ιστροπικά προς όλες τις κατευθύνσεις (Σχήμα 2.17). Αυτά μπορεί να πέσουν σε γειτονικά κελιά του ανιχνευτή και να δημιουργήσουν εκ νέου εκφόρτιση, που θα δώσει λανθασμένο παλμό στην έξοδο. Πιθανότατα αυτό οφείλεται στην τάση τροφοδοσίας (Σχήμα 2.18) και για τη μείωση του φαινομένου, το μόνο που μπορεί να γίνει είναι η μόνωση των επιμέρους κελιών του ανιχνευτή, μειώνοντας βέβαια πάλι την γεωμετρική απόδοση του και την PDE. [8], [11], [12]



**Σχήμα 2. 17:** Μηχανισμός optical crosstalk

(1) Direct optical crosstalk (2) Delayed optical crosstalk (3a, 3b) Indirect optical crosstalk [ketek.net].



**Σχήμα 2. 18:** Optical Crosstalk σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας overvoltage για διάφορες θερμοκρασίες [8].

### 2.4.3 Afterpulsing

Το afterpulsing συμβαίνει όταν ένας φορέας μειονότητας παγιδεύεται κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης του κελιού και ελευθερώνεται σε μεταγενέστερο χρόνο, πολλές φορές έπειτα από αρκετά μs, προκαλώντας εκ νέου χιονοστιβάδα. Τυπικές τιμές του afterpulsing είναι μεταξύ 0.3% – 10%, ανάλογα με την τάση λειτουργίας  $V_{BIAS}$ . Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι το afterpulsing αυξάνει με τη μείωση της θερμοκρασίας. Εξαρτάται από τον χρόνο αποκατάστασης (recovery time) του κελιού οπότε και από το κύκλωμα επαναφοράς της τάσης λειτουργίας (AQC, PQC). Το afterpulsing οδηγεί στη δημιουργία δύο ή περισσότερων παλμών από ένα μόνο φωτόνιο και οδηγεί σε λάθος συμπεράσματα για την απόδοση PDE του ανιχνευτή. [8], [11], [12]



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Για την υλοποίηση του ανιχνευτικού συστήματος που κατασκευάστηκε και μελετήθηκε στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν επιμέρους στοιχεία, τα οποία με την κατάλληλη σύζευξη, έθεσαν το σύστημα σε κατάσταση λειτουργίας. Ξεκινώντας από τη ραδιενεργή πηγή, στη συνέχεια τον SiPM, τους κρυσταλλικούς σπινθηριστές και τον ψηφιοποιητή, θα αναφερθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων αυτών, μαζί φυσικά με τη θέση τους στην διάταξη.

#### 3.1 Καίσιιο-137

Για τις ανάγκες της παρούσας πτυχιακής εργασίας, η πηγή που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις που καταγράφηκαν, ήταν το Καισίοιο-137 (Cs-137). Πρόκειται για ραδιενεργό ισότοπο του Καισίου και αποτελεί ένα από τα συνηθέστερα προϊόντα σχάσης του Ουρανίου-235, αλλά και άλλων σχάσιμων ισωτόπων. Είναι από τα προβληματικότερα προϊόντα σχάσης βραχείας- μέσης ημιζωής, επειδή μεταφέρεται εύκολα στη φύση λόγω της μεγάλης διαλυτότητας των αλάτων του στο νερό, τα οποία μάλιστα αποτελούν και τη συνηθέστερή του χημική ένωση.

Ο χρόνος ημιζωής του, είναι προσεγγιστικά τα 30,17 έτη και με διάσπαση Β μετασχηματίζεται σε Βάριο-137, το οποίο με τη σειρά του έχει χρόνο ημιζωής περίπου 153 δευτερόλεπτα. Αυτό είναι το στοιχείο που ευθύνεται για όλες τις εκπομπές ακτίνων γ. Ένα γραμμάριο Cs-137 έχει ενεργότητα 3,215 TBq ( $1\text{Bq}=1\text{s}^{-1}$ ). (Πίνακας 3.1)

Εξαιτίας της δραστηρότητας του ως χημικό στοιχείο και της δυσκολίας που παρουσιάζει στο χειρισμό του, το Cs-137 έχει μικρό εύρος εφαρμογών, χρησιμοποιείται κυρίως για τη βαθμονόμηση ανιχνευτών ραδιενέργειας, σαν εκπομπός ακτίνων γ για μετρήσεις πυκνότητας σε πετρελαιοπηγές, σπανίως σε θεραπείες καρκίνου και σε βιομηχανικούς μετρητές ροής υγρών και πάχους υλικών.

Ανά τα χρόνια έχουν συμβεί ατυχήματα σε πυρηνικά εργοστάσια, τα οποία είχαν ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση Καισίου στο περιβάλλον και κατά συνέπεια την μόλυνση περιοχών, σπέρνοντας τον πανικό στον πληθυσμό. Στο πυρηνικό σταθμό του Τσερνόμπιλ το Cs-137 είναι η κύρια πηγή εκπομπής ραδιενέργειας μετά το 2005. Το ίδιο ισχύει και για την Φουκουσίμα της Ιαπωνίας, όπου το 2011 κρέας αγελάδων που εξάχθηκε από την περιοχή βρέθηκε να περιέχει 1.530 με 3.200 Bq ανά κίλο κρέατος, ενώ το επιτρεπτό όριο στη συγκεκριμένη κατηγορία είναι τα 500 Bq/kg. Δύο χρόνια αργότερα σε έλεγχο που πραγματοποιήθηκε σε ψάρια που αλιεύθηκαν στην περιοχή του ατυχήματος, τα αποτελέσματα ήταν αποκαρδιωτικά, καθώς

ανιχνεύθηκε μόλυνση στο κρέας που υπερέβαινε το όριο κατά 7.400 φορές. Όλες οι παραπάνω μολύνσεις προέρχονται αποκλειστικά από Cs-137.

Αξίζει να σημειωθεί πως το Cs-137 είναι ανθρωπογενές, σε αντίθεση με τα περισσότερα ραδιοϊσότοπα, δηλαδή δεν παράγεται από το ίδιο μη ραδιενεργό ισότοπο του στοιχείου αλλά είναι υποπροϊόν σχάσης βαρύτερων στοιχείων. Πριν τη δημιουργία του πρώτου αντιδραστήρα, στα τέλη του 1942, δεν υπήρχε στη γη.

Αυτό που καθιστά το Cs-137 επικίνδυνο για την υγεία είναι πως αντιδρά με το νερό και παράγει υδροξείδιο του Καισίου, το οποίο αφού εισέλθει στο σώμα κατανέμεται στο σώμα ομοιόμορφα στους μύς κυρίως και δημιουργεί πληθώρα προβλημάτων.

**Πίνακας 3.1:** Χαρακτηριστικά των ραδιενεργών πηγών. Η τρέχουσα ενεργότητα  $R$  αναφέρεται στην (ελαττωμένη) ενεργότητα της πηγής κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Χαρακτηριστικά	$^{137}\text{Cs}$
Ατομικός αριθμός	55
Μαζικός αριθμός	137
Αρχική ενεργότητα $R_0$	1,02 $\mu\text{Ci}$
Τρέχουσα ενεργότητα $R$	0,811 $\mu\text{Ci}$
Χρόνος ημιζωής $T_{1/2}$	30,17 years
Σταθερά διάσπασης $\lambda$	0,023 $\text{years}^{-1}$
Ενέργεια φωτονίων- $\gamma$ (MeV)	0,662

## 3.2 Κοβάλτιο – 60

Το Κοβάλτιο-60 είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο του Κοβαλτίου, το οποίο παράγεται τεχνητά σε πυρηνικούς αντιδραστήρες με τη χρήση νετρονίων, προσδίδοντας δηλαδή ένα νετρόνιο στο ισότοπο Κοβάλτιο-59. Στη φύση ανιχνεύεται σε περίπτωση διαρροής από κάποιο πυρηνικό εργοστάσιο, καθώς δεν υπάρχει ελεύθερο στη φύση. Ο χρόνος ημιζωής του είναι περίπου 5,27 (Πίνακας 3.2) έτη και η ενεργότητά του σε ποσότητα ενός γραμμαρίου είναι 44 TBq. Τα φυσικά του χαρακτηριστικά, όπως η χαμηλή διαλυτότητα στο νερό, το καθιστά ασφαλέστερο για χρήση σε σύγκριση με άλλες πηγές όπως το Καισίο-137, σε περίπτωση απελευθέρωσης του στη φύση. Χρησιμοποιείται κυρίως σε συστήματα ακτινοθεραπείας και για αποστείρωση ιατρικού εξοπλισμού. Όταν ένας οργανισμός εκτεθεί σε ακτινοβολία που προέρχεται από Κοβάλτιο-60, όργανα όπως οι ιστοί, τα νεφρά και τα κόκκαλα διατρέχουν υψηλό κίνδυνο εμφάνισης καρκίνου. Σε περιπτώσεις ακτινοθεραπείας το Κοβάλτιο που απορροφήθηκε στον οργανισμό, θα εξέλθει από αυτόν μέσω του ουροποιητικού συστήματος. Ο παρακάτω πίνακας παραθέτει κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά του Κοβαλτίου-60 (Πίνακας 3.2).

**Πίνακας 3. 2:** Χαρακτηριστικά των ραδιενεργών πηγών. Η τρέχουσα ενεργότητα  $R$  αναφέρεται στην (ελαττωμένη) ενεργότητα της πηγής κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

Χαρακτηριστικά	$^{60}\text{Co}$
Ατομικός αριθμός	27
Μαζικός αριθμός	60
Αρχική ενεργότητα $R_0$	1 $\mu\text{Ci}$
Τρέχουσα ενεργότητα $R$	0,31 $\mu\text{Ci}$
Χρόνος ημιζωής $T_{1/2}$	5,7 years
Σταθερά διάσπασης $\lambda$	0,1315 years <sup>-1</sup>
Ενέργεια φωτονίων- $\gamma$ (MeV)	1,1732 1,3325

### 3.3 Βάριο – 133

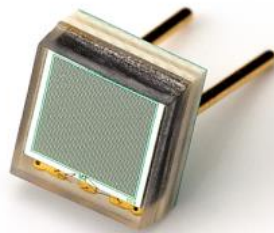
Το  $^{133}\text{Ba}$  είναι το τρίτο και το τελευταίο ραδιενεργό ισότοπο που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή για την αξιολόγηση του ανιχνευτή. Παρουσιάζει το δεύτερο μεγαλύτερο χρόνο ημιζωής, σε σχέση με τις άλλες δύο πηγές (Πίνακας 3.3). Οι φωτοκορυφές που παρουσιάζει είναι σε χαμηλές ενέργειες, σε σύγκριση με τις άλλες δύο πηγές πάντα, έτσι διασφαλίζεται κατά κάποιο τρόπο η ελάχιστη ενέργεια που ανιχνεύει το σύστημα που κατασκευάστηκε. Δηλαδή, το σύστημα θα μπορεί τόσο να ανιχνεύει ραδιενέργεια σε τιμές ενέργειας μεταξύ 0.088 MeV και 1.3325 MeV, όσο και να αναγνωρίζει την πηγή προέλευσης της ραδιενέργειας όταν αυτή θα είναι άγνωστη. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται κάποια από τα βασικά χαρακτηριστικά της πηγής που χρησιμοποιήθηκε στη διάταξη :

**Πίνακας 3. 3:** Χαρακτηριστικά των ραδιενεργών πηγών. Η τρέχουσα ενεργότητα  $R$  αναφέρεται στην (ελαττωμένη) ενεργότητα της πηγής κατά τη διάρκεια της μέτρησης.

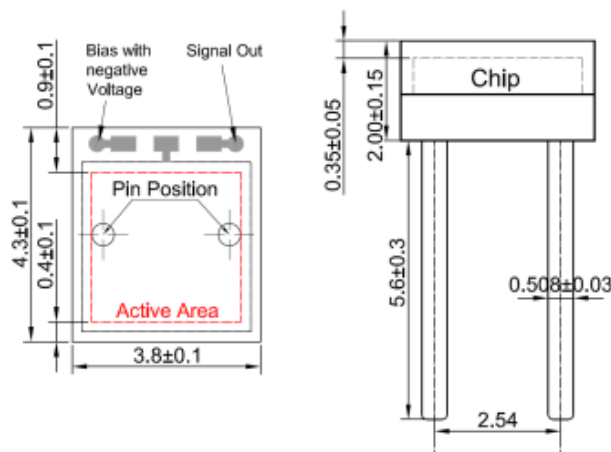
Χαρακτηριστικά	$^{133}\text{Ba}$
Ατομικός αριθμός	56
Μαζικός αριθμός	133
Αρχική ενεργότητα $R_0$	1 $\mu\text{Ci}$
Τρέχουσα ενεργότητα $R$	0,55 $\mu\text{Ci}$
Χρόνος ημιζωής $T_{1/2}$	10,5 years
Σταθερά διάσπασης $\lambda$	0,066 years <sup>-1</sup>
Ενέργεια φωτονίων- $\gamma$ (MeV)	0,088 0,356

### 3.4 ΚΕΤΕΚ PM3350

Η εταιρία KETEK, βλέποντας τις ανάγκες της αγοράς για ανιχνευτές φωτονίων χαμηλής έντασης με βάση το πυρίτιο, κατασκεύασε τον PM3350. Ο συγκεκριμένος ανιχνευτής αποτελείται από 3600 φωτοευαίσθητα μικροκελιά, που το καθένα έχει διαστάσεις  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ . Η ενεργός του περιοχή καλύπτει μία επιφάνεια διαστάσεων  $3 \times 3 \text{mm}^2$  και καλύπτεται από μία εποξειδική επίστρωση υψηλής διαπερατότητας. Πάχους μικρότερου από  $250 \mu\text{m}$ . Όλη η συσκευή έχει διαστάσεις  $3.8 \times 4.3 \times 2 \text{mm}^3$  και διαθέτει δύο ακροδέκτες, με διάμετρο  $0.51 \text{mm}$ , που απέχουν μεταξύ τους κατά  $2.54 \text{mm}$ . [16], [17]



**Σχήμα 3.1:** Ο PM3350 της εταιρίας KETEK.



**Σχήμα 3.2:** Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του PM3350.

### 3.4.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Για να μειωθεί ο θόρυβος που οφείλεται στα φαινόμενα των Dark Counts και του optical crosstalk, ο PM3350 διαθέτει αυλακώματα (trenches) μικρού πλάτους (περίπου  $1 \mu\text{m}$ ) μεταξύ των κελιών. Η τεχνοτροπία αυτή υφίσταται όταν υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη ενεργό περιοχή. Υπάρχει και έκδοση του ανιχνευτή που δεν περιέχει αυλακώματα, στην οποία μπορεί ο θόρυβος να είναι μεγαλύτερος αλλά η γεωμετρική απόδοση GE και η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων PDE είναι επίσης μεγαλύτερες.

Είχε αναφερθεί πως η θερμοκρασία είναι παράγοντας που επηρεάζει την λειτουργία των ανιχνευτών. Έτσι και σε αυτή την περίπτωση ο PM3350 παρουσιάζει τον δικό του συντελεστή εξάρτησης από τη θερμοκρασία (Temp. Coefficient), ο οποίος περιγράφεται ως εξής : [16]-[18]

$$\frac{dV_{BD}}{dT} \approx 22 \frac{mV}{^{\circ}C}$$

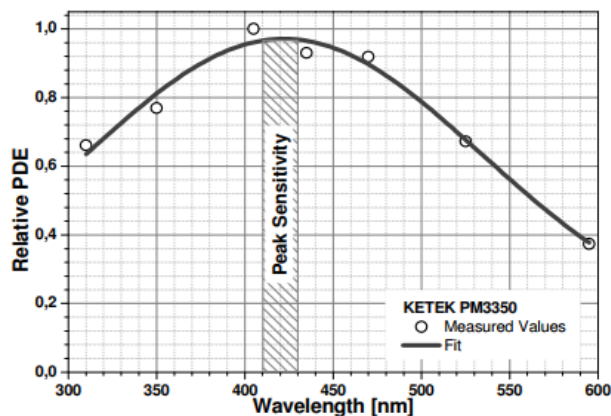
Σχέση 3.1

Η παραπάνω σχέση δείχνει πως η τάση  $V_{breakdown}$  αυξάνεται κατά 22 mV , όταν η θερμοκρασία T αυξάνεται κατά 1°C. Ιδανική για τη λειτουργία του ανιχνευτή θεωρείται η θερμοκρασία δωματίου.

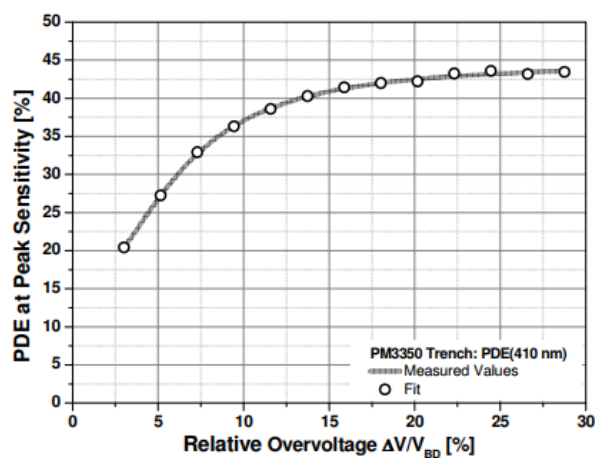
Αν και μικρός σε επίδραση (μικρότερος ή ίσος του 1%), ο θερμοκρασιακός συντελεστής μπορεί να εξαλειφθεί αυξάνοντας την τάση λειτουργίας  $V_{bias}$  του ανιχνευτή. [18]

**Πίνακας 3. 4:** Λειτουργικά χαρακτηριστικά του PM3350.

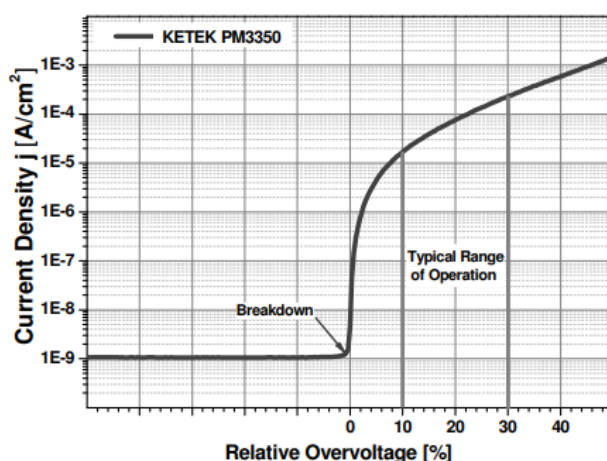
Χαρακτηριστικά	Standard-type	Trench-type
Γεωμετρική απόδοση GE	70%	63%
Φασματικό εύρος ανίχνευσης	300 nm – 800 nm	
Βέλτιστο μήκος κύματος λ	420 nm	
<i>PDE</i> στα 420 nm	≥ 50%	≥ 40%
	Ανεπηρέαστο από optical crosstalk και afterpulsing	
Κέρδος G	~2×10 <sup>6</sup>	
Temp. Coefficient	≤ 1%	
Dark Count Rate	≤ 500 kHz / mm <sup>2</sup>	≤ 300 kHz / mm <sup>2</sup>
Optical Crosstalk	~35%	~20%
Afterpulsing	≤ 10 %	
Τάση διάσπασης $V_{BD}$	27 V	23 V
Τάση λειτουργίας $V_{BIAS}$	29 V – 39 V	25 V – 35 V
Relative Overvoltage	10% – 30%	
Θερμοκρασία λειτουργίας T	[-30, +40] °C	



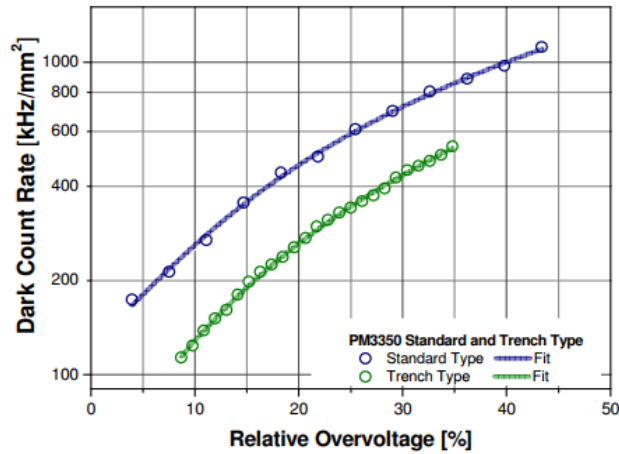
**Σχήμα 3. 3:** Απόδοση αντίληψης φωτονίων  $PDE$  σε συνάρτηση με το μήκος κύματος της εισερχόμενης ακτινοβολίας για τον PM3350 trench-type και standard-type. Η μέγιστη ευαισθησία εντοπίζεται μεταξύ 410 και 430 nm.



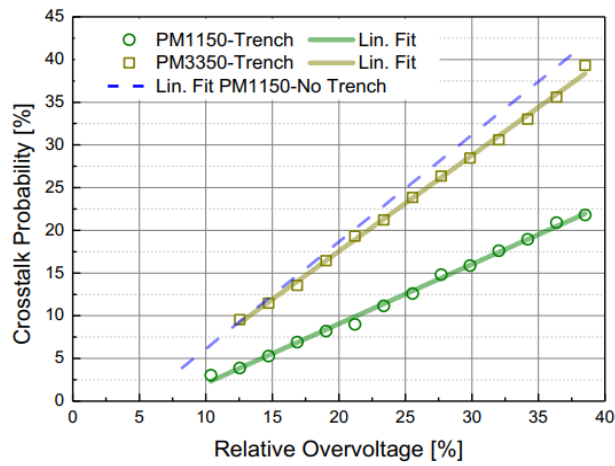
**Σχήμα 3. 4:** Απόδοση αντίληψης φωτονίων  $PDE$  σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας Relative Overvoltage στο βέλτιστο μήκος κύματος  $\lambda = 420$  nm για τον PM3350 trench-type.



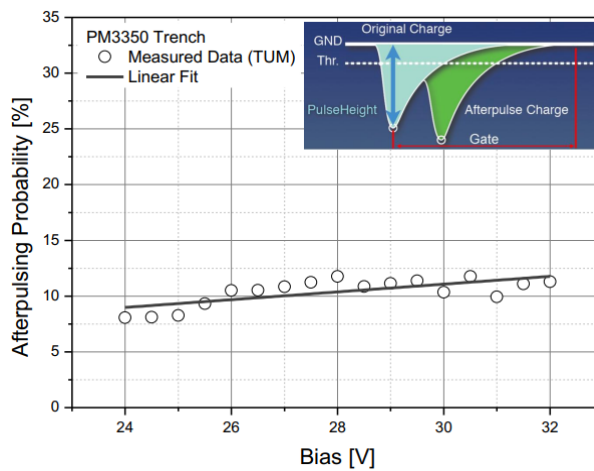
**Σχήμα 3. 5:** Πυκνότητα ρεύματος (Current Density) σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας Relative Overvoltage για τον PM3350 trench-type και standard-type.



**Σχήμα 3. 6:** Dark Count Rate σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας Relative Overvoltage για τον PM3350 trench-type και standard-type.



**Σχήμα 3. 7:** Πιθανότητα Crosstalk σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας Relative Overvoltage για τους PM3350 trench-type και PM1150 trench-type και standard-type.

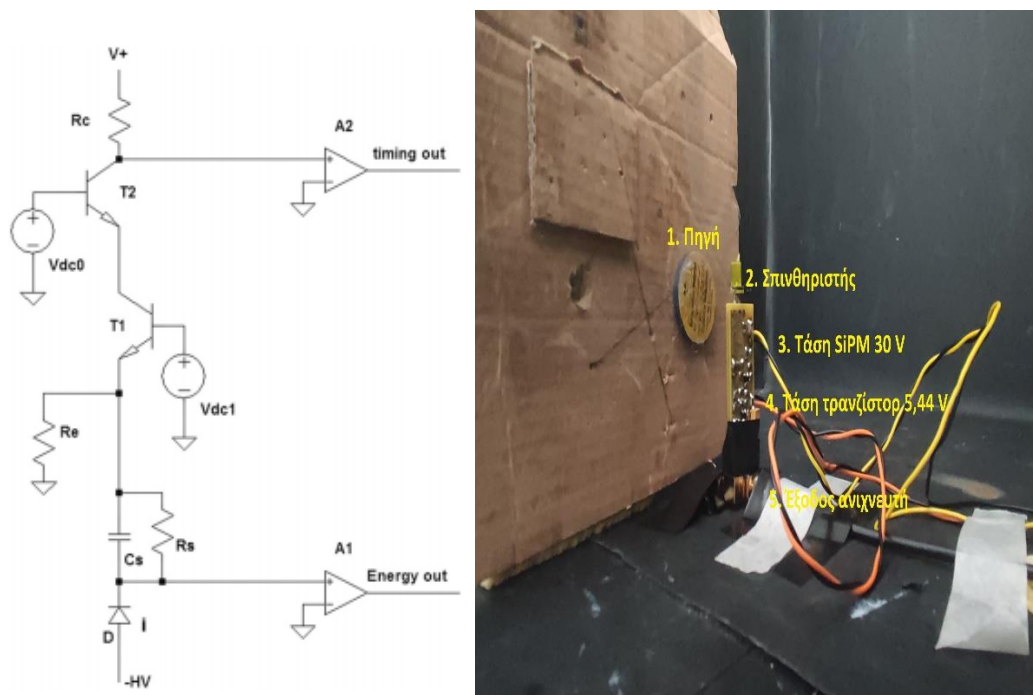


**Σχήμα 3. 8:** Πιθανότητα Afterpulsing σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας  $V_{BIAS}$  για τον PM3350 trench-type. Οι τιμές βασίστηκαν στην καταμέτρηση των γεγονότων που πραγματοποιήθηκαν κατά τη

διάρκεια του χρόνου αποκατάστασης (recovery time) των μεμονωμένων παλμών. Η πραγματική πιθανότητα Afterpulsing είναι μικρότερη από την εικονιζόμενη ( $\leq 10\%$ ).

### 3.4.2 Κύκλωμα προενισχυτή και παροχή τροφοδοσίας

Για τη λήψη του σήματος εξόδου του SiPM, χρειάζεται ένα κύκλωμα προενισχυτή. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από δύο τρανζίστορ σε συνδεσμολογία κοινής βάσης.



**Σχήμα 3.9:** Κύκλωμα προενισχυτή.

Το σήμα εξόδου του SiPM ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή (δίοδος D) και χωρίζεται σε δύο συνιστώσες μέσω του φίλτρου  $C_s / R_s$ . Η πρώτη συνιστώσα του σήματος τροφοδοτείται στα τρανζίστορ T1 και T2 και ενισχύεται, ενώ στη συνέχεια δέχεται επιπλέον ενίσχυση από τον ενισχυτή A2 (timing output). Η δεύτερη συνιστώσα του σήματος τροφοδοτείται και ενισχύεται από τον ενισχυτή A1 (energy output). Η αντίσταση εξόδου των A1, A2 είναι 50 Ω.

Οι παλμοί ρεύματος από την έξοδο του SiPM μεταφέρονται στον εκπομπό του τρανζίστορ T2 μέσω του συλλέκτη του τρανζίστορ T1, ενώ η μετατροπή από παλμό ρεύματος σε παλμό τάσης λαμβάνει χώρα στον συλλέκτη του τρανζίστορ T2.

Το ρεύμα πόλωσης των τρανζίστορ T1, T2 εφαρμόζεται μέσω της αντίστασης  $R_e$  και η τάση πόλωσης  $V_{dc}$  μέσω των πηγών τάσης  $V_{dc1}$ ,  $V_{dc2}$ . Στο πείραμά μας είναι  $V_{dc} = 5.44$  V και εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας κατάλληλη πηγή τάσης διαθέσιμη στο εργαστήριο.[19]



### 3.5 Ψηφιοποιητής CAEN DT5720

Το σήμα που προέρχεται από την έξοδο το SiPM είναι αναλογικό. Για την ανάλυση του χρειάζεται να ψηφιοποιηθεί, για αυτό χρησιμοποιήθηκε ο CAEN DT5720. Πρόκειται για ένα σύγχρονο ψηφιοποιητή (Analog to Digital Converter – ADC) τεσσάρων καναλιών, με δυναμικό εύρος εισόδου  $2 V_{pp}$ , δυνατότητα ανάλυσης 12 bit, εύρος ζώνης 125 MHz και ταχύτητα δειγματοληψίας 250 MS/s ταυτόχρονα σε κάθε κανάλι. Η συσκευή έχει βάρος 680 g, διαστάσεις 154x50x164 mm<sup>3</sup> και καταναλώνει ρεύμα 1.5 A (+12 V).



**Σχήμα 3.10:** Ο ψηφιοποιητής DT5720 της εταιρίας CAEN S.p.A.

Κάθε κανάλι είναι εξοπλισμένο με μία μνήμη SRAM (Static RAM) αποτελούμενη από έναν προγραμματιζόμενο αριθμό ενταμιευτών μνήμης (memory buffers). Κατά την ψηφιοποίηση, η συσκευή αποθηκεύει έναν (προγραμματιζόμενο) αριθμό δειγμάτων σε κάθε ενταμιευτή και κατόπιν τον «παγώνει», επιτρέποντας έτσι την ανάγνωση των δεδομένων. Η λήψη (acquisition) των δεδομένων μπορεί να συνεχιστεί στον επόμενο ενταμιευτή χωρίς τη μεσολάβηση νεκρού χρόνου (dead time), δηλαδή η ανάγνωση του «παγωμένου» ενταμιευτή είναι ανεξάρτητη από τη διαδικασία εγγραφής των δεδομένων στη μνήμη. Με αυτόν τον τρόπο το αναλογικό σήμα στην

είσοδο του ψηφιοποιητή μετατρέπεται συνεχώς σε ροή ψηφιακών δεδομένων τα οποία και επεξεργάζεται ένα κανάλι FPGA (Field Programmable Gate Array).

Το σήμα ενεργοποίησης (trigger signal) παρέχεται είτε μέσω της εισόδου στη πρόσοψη της συσκευής (ένδειξη TRG IN) είτε μέσω του λογισμικού (SW triggers), αλλά μπορεί επίσης να παραχθεί και εσωτερικά σε κάθε κανάλι (auto-trigger). Το μοντέλο DT5720 δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να πραγματοποιήσει την ανάγνωση των δεδομένων μέσω USB 2.0 ή οπτικής ζεύξης. Η σύνδεση μέσω USB 2.0 υποστηρίζει ταχύτητες μέχρι 30 MB/s ενώ με οπτική ζεύξη επιτυγχάνονται ταχύτητες μέχρι και 80 MB/s [20].

### 3.5.1 Λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας των παλμών (DPP Firmware)

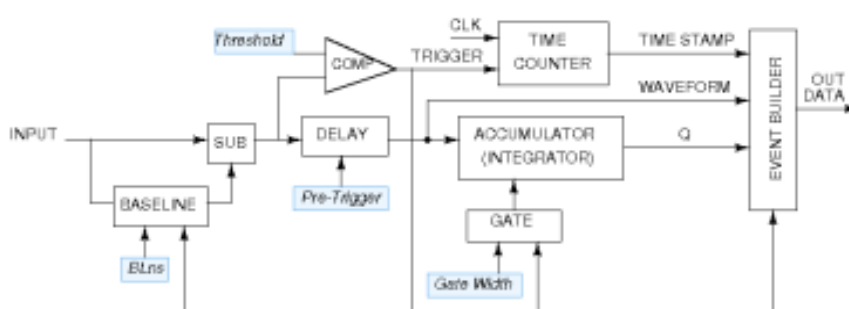
Το λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας των παλμών (Digital Pulse Processing Firmware – DPP Firmware) εγκαθίσταται στον ψηφιοποιητή και διαχειρίζεται, μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, τη λήψη, την επεξεργασία και την απεικόνιση των δεδομένων. Με αυτό τον τρόπο ο ψηφιοποιητής μετατρέπεται σε ένα όργανο πολλαπλών δυνατοτήτων, ικανό να αντικαταστήσει τις περισσότερες συσκευές που χρησιμοποιούνται στην Φασματοσκοπία, όπως τον πολυκαναλικό αναλυτή (Multichannel Analyzer – MCA). Η εταιρία CAEN S.p.A. παρέχει δύο αλγορίθμους για αυτό τον σκοπό:

1. **Digital Pulse Processing for Charge Integration (DPP-CI):** Αλγόριθμος μονής πύλης (single gate), συμβατός με το μοντέλο DT5720.
2. **Digital Pulse Processing for Pulse Shape Discrimination (DPP-PSD):** Αλγόριθμος διπλής πύλης (dual gate), για τον διαχωρισμό σύντομων και εκτενέστερων τμημάτων του σήματος εισόδου. Ο αλγόριθμος αυτός δεν εξετάζεται στην παρούσα εργασία.

Μέσω του λογισμικού DPP-CI Control Software ο ψηφιοποιητής, από απλός καταγραφέας κυματομορφών (oscilloscope mode), μετατρέπεται σε ένα σύστημα φασματοσκοπίας ικανό να παρέχει πληροφορίες που αφορούν στην ενέργεια καθώς και στα χρονικά χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου (histogram mode). Μέσω ενός γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (Graphic User Interface – GUI), υλοποιημένου σε Java, το λογισμικό επιτρέπει τον καθορισμό των παραμέτρων λήψης (acquisition parameters) για την καταγραφή των παλμών εισόδου, καθώς επίσης και τη δημιουργία και αποθήκευση των αρχείων εξόδου (κυματομορφές, ιστογράμματα) [21].

### 3.5.2 Αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου DPP-CI

Ο αλγόριθμος DPP-CI υπολογίζει συνεχώς την τιμή της γραμμής βάσης (baseline) του σήματος εισόδου και την αφαιρεί από το σήμα εισόδου ( $input - baseline = input\_sub$ ). Η τιμή  $input\_sub$  συγκρίνεται (μέσω ενός συγκριτή) με την τιμή ενός κατωφλιού (παράμετρος  $threshold$ ). Το έναυσμα (trigger) για την έναρξη της καταγραφής δίνεται όταν  $input\_sub > threshold$ . Μόλις λάβει χώρα το έναυσμα, το σήμα εισόδου καθυστερείται κατά έναν προγραμματιζόμενο αριθμό δειγμάτων (παράμετρος  $pre-trigger$ ) έτσι ώστε η καταγραφή να ξεκινήσει λίγο πριν πραγματοποιηθεί το έναυσμα (παράμετρος  $gate\ offset$ ) (σχήμα 3.12).



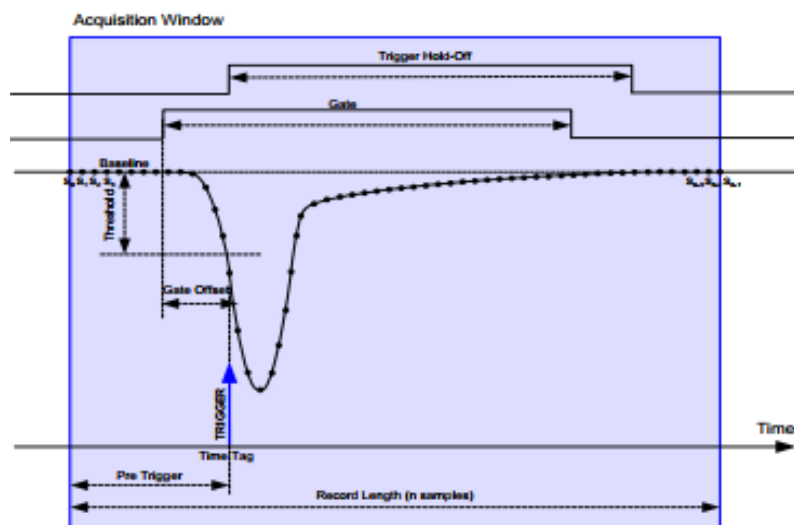
**Σχήμα 3.11:** Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου DPP-CI.

Το σύστημα ψηφιοποιεί το τμήμα εκείνο του σήματος εισόδου που εμπίπτει μέσα σε ένα καθορισμένο χρονικό παράθυρο (παράμετρος  $gate$ ). Η παράμετρος  $trigger\ hold-off$  εξασφαλίζει ότι καθ' όλη τη διάρκειά της δεν θα πραγματοποιηθούν άλλα έναυσματα, έτσι ώστε να ψηφιοποιηθεί σωστά το σήμα. Είναι γενικά επιθυμητό η τιμή της παραμέτρου  $trigger\ hold-off$  να είναι συγκρίσιμη με τη διάρκεια του σήματος που ψηφιοποιείται. Το σύστημα θα είναι έτοιμο να δώσει ένα νέο έναυσμα μετά το πέρας του χρονικού παραθύρου που ορίζουν οι παράμετροι  $gate$  και  $trigger\ hold-off$ . Η συσκευή αποθηκεύει τα δεδομένα σε έναν ενταμιευτή μνήμης και ρυθμίζει αυτόματα τόσο τον όγκο των δεδομένων που αποθηκεύονται σε κάθε ενταμιευτή όσο και τον αριθμό των ενταμιευτών στους οποίους διαιρείται η συνολική μνήμη SRAM [21].

### 3.5.3 Παράμετροι λήψης δεδομένων (Data acquisition parameters)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το λογισμικό DPP-CI Control Software επιτρέπει στον χρήστη τη ρύθμιση των παραμέτρων για την ορθή απεικόνιση του σήματος εισόδου και τη λήψη και αποθήκευση του ιστογράμματος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω του καθορισμού συγκεκριμένων τιμών για τις παρακάτω παραμέτρους (σχήμα 3.12):

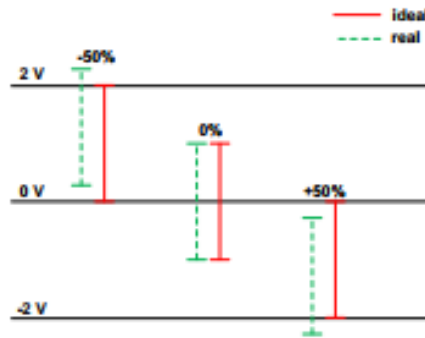
- Stop Time (s): καθορίζει το χρόνο για τον οποίο θα διαρκέσει η λήψη των δεδομένων. Με το πέρας αυτού του χρόνου η λήψη σταματά.
- SW Triggers: επιβάλλει το έναυσμα στο σήμα εισόδου, όταν οι παράμετροι λήψης δεν έχουν ρυθμιστεί σωστά. Μόλις οι παράμετροι ρυθμιστούν σωστά, η επιλογή αυτή μπορεί να απενεργοποιηθεί και να ενεργοποιηθεί το self-trigger για το κάθε κανάλι.



**Σχήμα 3.12:** Παράμετροι λήψης στο λογισμικό DPP-CI Control Software. Το έναυσμα (*trigger*) για την έναρξη της ψηφιοποίησης πραγματοποιείται όταν το σήμα εισόδου ξεπεράσει την τιμή ενός κατωφλιού (*threshold*). Διακρίνονται επίσης οι παράμετροι *gate*, *gate offset*, *pre-trigger*, *trigger hold-off* και *record length*.

- DC Offset (%): η τιμή αυτή προστίθεται στο σήμα εισόδου έτσι ώστε το εύρος του να προσαρμοστεί κατάλληλα στο δυναμικό εύρος εισόδου του ψηφιοποιητή. Η παράμετρος εκφράζεται ως το επί τις εκατό (%) δυναμικό εύρος εισόδου του ψηφιοποιητή και κυμαίνεται μεταξύ -50% και +50%.

Θεωρητικά η τιμή «0» (*DC Offset* = 0) σημαίνει ότι ο παλμός εισόδου βρίσκεται στο μέσον του δυναμικού εύρους του ψηφιοποιητή (2048 counts), η τιμή «+50%» σημαίνει ότι ο παλμός εισόδου βρίσκεται στο κατώτερο όριο (0 counts) ενώ η τιμή «-50%» θέτει τον παλμό εισόδου στο ανώτερο όριο (4096 counts) (σχήμα 3.13). Η παράμετρος *DC Offset* αποτρέπει τον κορεσμό για τα σήματα που βρίσκονται κοντά στα όρια του εύρους εισόδου του ψηφιοποιητή.



**Σχήμα 3.13:** Το σήμα εισόδου προσαρμόζεται κατάλληλα μέσω της παραμέτρου *DC Offset* έτσι ώστε να εμπίπτει μέσα στο δυναμικό εύρος εισόδου του ψηφιοποιητή.

- ***Pulse Polarity***: η παράμετρος αυτή παίρνει τιμές NEGATIVE/POSITIVE και ρυθμίζει την πολικότητα του παλμού εισόδου. Ο αλγόριθμος DPP-CI είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε να διαχειρίζεται αρνητικούς παλμούς. Όταν ο αναλογικός παλμός εισόδου είναι θετικός είναι απαραίτητη η αντιστροφή του πριν από την εφαρμογή του αλγορίθμου.
- ***Threshold* (LSB)**: ορίζει ένα κατώφλι δυναμικού για τους παλμούς εισόδου. Μόλις η τιμή του σήματος εισόδου ξεπεράσει την τιμή του κατωφλιού τότε πραγματοποιείται το έναυσμα και αρχίζει η ψηφιοποίηση του σήματος. Η τιμή της παραμέτρου *Threshold* εκφράζεται σε LSB. Η τιμή της σε mV μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψιν το εύρος εισόδου του ψηφιοποιητή. Για ψηφιοποιητή με δυνατότητα ανάλυσης 12 bit και εύρος εισόδου  $2 V_{pp}$  είναι:

$$1 \text{ LSB} = 2 / 2^{12} = 0.488 \text{ mV}$$

- ***Gate* (ns)**: καθορίζει το τμήμα του σήματος που θα ψηφιοποιηθεί. Είναι γενικά επιθυμητό η τιμή της παραμέτρου *Gate* να καλύπτει ολόκληρο το εύρος του σήματος εισόδου.

- Gate Offset (ns): καθορίζει τον χρόνο για τον οποίο θα καθυστερήσει το σήμα εισόδου, έτσι ώστε η καταγραφή να ξεκινήσει λίγο πριν πραγματοποιηθεί το έναυσμα. Πρέπει να ικανοποιείται η εξής σχέση:

$$Gate\ Offset \leq Pre-trigger + 28\ ns$$

- Self-trigger: ENABLE/DISABLE. Είναι απαραίτητο για την παραγωγή του εναύσματος στο κάθε κανάλι.
- Pre-trigger (ns): καθορίζει το τμήμα του σήματος εισόδου που θα απεικονιστεί πριν από το έναυσμα. Είναι δηλαδή η χρονική διάρκεια για την οποία αρχίζει η αποθήκευση του σήματος, πριν από τη παραγωγή του εναύσματος. Γενικά προτιμάται η τιμή του *pre-trigger* να είναι η μικρότερη δυνατή.
- Trigger Hold-off (ns): καθορίζει το εύρος ενός χρονικού παράθυρου από την παραγωγή του εναύσματος και έπειτα, μέσα στο οποίο δεν παράγονται νέα εναύσματα.
- Charge Sensitivity (fC/LSB): καθορίζει την χωρητικότητα (φορτίο) που καταλαμβάνει κάθε LSB. Όταν ο παλμός εισόδου ξεπερνά το δυναμικό εύρος του ψηφιοποιητή προτείνεται η μείωση της παραμέτρου αυτής για την αποφυγή κορεσμού. Η παράμετρος παίρνει τιμές 40, 160, 640 και 2560 fC/LSB.
- Baseline Mean: αντιπροσωπεύει τον αριθμό των δειγμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της γραμμής βάσης του σήματος εισόδου.
- Record Length (ns): καθορίζει το μήκος (χρονική διάρκεια) του παράθυρου λήψης και μετράται σε «points», όπου 1 point = 4 ns [21]

### 3.6 Κρυσταλλικοί σπινθηριστές $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ (GAGG:Ce)

Οι σπινθηριστές, ανάλογα το υλικό και τις ιδιότητες τους, προορίζονται για συγκεκριμένη χρήση. Οι κρυσταλλικοί τύπου  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$  (Cerium-doped Gadolinium Aluminium Gallium Garnet – GAGG:Ce), ανήκουν στην οικογένεια σπινθηριστών οξειδίου και είναι κατάλληλοι για εφαρμογές φασματοσκοπίας ακτινών γ. Είναι οι φωτεινότεροι στο είδος τους, καθώς αποδίδουν 46000 οπτικά φωτόνια ανά MeV ενέργειας. Το γεγονός πως αποδίδουν οπτικά φωτόνια, τους κάνει συμβατούς με ανιχνευτές SiPM και για αυτό επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη εργασία. [22]

Επίσης έχουν πολύ καλή απόκριση και αυτό οφείλεται στο γεγονός πως δεν είναι υδροσκοπικοί και δεν περιέχουν φυσική ραδιενέργεια, από κάποιο ισότοπο όπως το Λουτέσιο-176. Οι συγκεκριμένοι αγοράστηκαν από την ιαπωνική εταιρία Furukawa Co., LTD.



**Σχήμα 3.14:** Κρυσταλλικοί σπινθηριστές GAGG:Ce.

**Πίνακας 3.4:** Χαρακτηριστικά του κρυσταλλικού σπινθηριστή GAGG:Ce.

Χαρακτηριστικά	Τιμή
Φωτεινή απόδοση (light yield)	46000 photons/MeV
Χρόνος Απόσβεσης (decay time)	90 ns
Μέγιστη εκπομπή $\lambda$	530 nm
Πυκνότητα $\rho$	6.63 g/cm <sup>3</sup>
$\rho Z_{eff}^4$ (effective atomic number)	54.4
Υδροσκοπικότητα	Όχι
Φυσική ραδιενέργεια	Όχι
Σημείο τήξης	1850 °C

Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέσα σε φωτοστεγανό κουτί και σε θερμοκρασία δωματίου. Η ραδιενεργός πηγή τοποθετήθηκε πάνω στον κρύσταλλο ενώ ο κρύσταλλος ήταν οπτικά συζευγμένος με τον SiPM. Μεταξύ κρυστάλλου και SiPM παρεμβάλλεται ένα διαφανές οπτικό μέσο (BC-630 optical grease) που βελτιστοποιεί τη διέλευση του φωτός. Ο SiPM συνδέεται με το κύκλωμα του προενισχυτή του οποίου η έξοδος συνδέεται στο κανάλι Ch0 του ψηφιοποιητή. Η λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού DPP-CI Control Software.

### 3.7 Ορισμός παραμέτρων απόδοσης

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του ανιχνευτή υπολογίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι απόδοσης:

1. **Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα (Energy Resolution)  $R$  (%)** – αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να καθορίζει με ακρίβεια την ενέργεια των φωτονίων που προσπίπτουν στην ενεργό περιοχή του SiPM και να αντιλαμβάνεται ως ξεχωριστά δύο φωτόνια με πολύ μικρή διαφορά στις ενέργειές τους. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή μας υπολογίστηκε εφαρμόζοντας κατανομή Gauss στην φωτοκορυφή κάθε φάσματος και υπολογίζοντας το πλήρες εύρος στο μισό του μεγίστου (Full Width at Half Maximum – FWHM) (Σχέση 3.2), χρησιμοποιώντας ένα ενεργειακό παράθυρο  $\pm 10\%$ . [1]

$$R (\%) = \frac{FWHM}{\text{Photopeak Centroid}} \times 100\%$$

Σχέση 3.2

2. **Φωτοποσοστό (Photofraction)  $Pf$  (%)** – ορίζεται ως ο αριθμός των γεγονότων που καταγράφηκαν στην φωτοκορυφή του φάσματος προς τον αριθμό των γεγονότων που καταγράφηκαν συνολικά σε ολόκληρο το φάσμα (Σχέση 3.3).[1]

$$Pf (\%) = \frac{\text{Number of Events (Photopeak)}}{\text{Number of Events (Spectrum)}} \times 100\%$$

Σχέση 3.3



3. **Ευαισθησία (Sensitivity)  $S$  (%)** – αναφέρεται στην απόκριση του ανιχνευτή σε μια συγκεκριμένη ραδιενεργό πηγή και ορίζεται ως ο αριθμός των γεγονότων που καταγράφηκαν συνολικά σε ολόκληρο το φάσμα προς τον αριθμό των φωτονίων- $\gamma$  που εξέπεμψε η πηγή καθ' όλη τη χρονική διάρκεια της μέτρησης (Σχέση 3.4). [1]

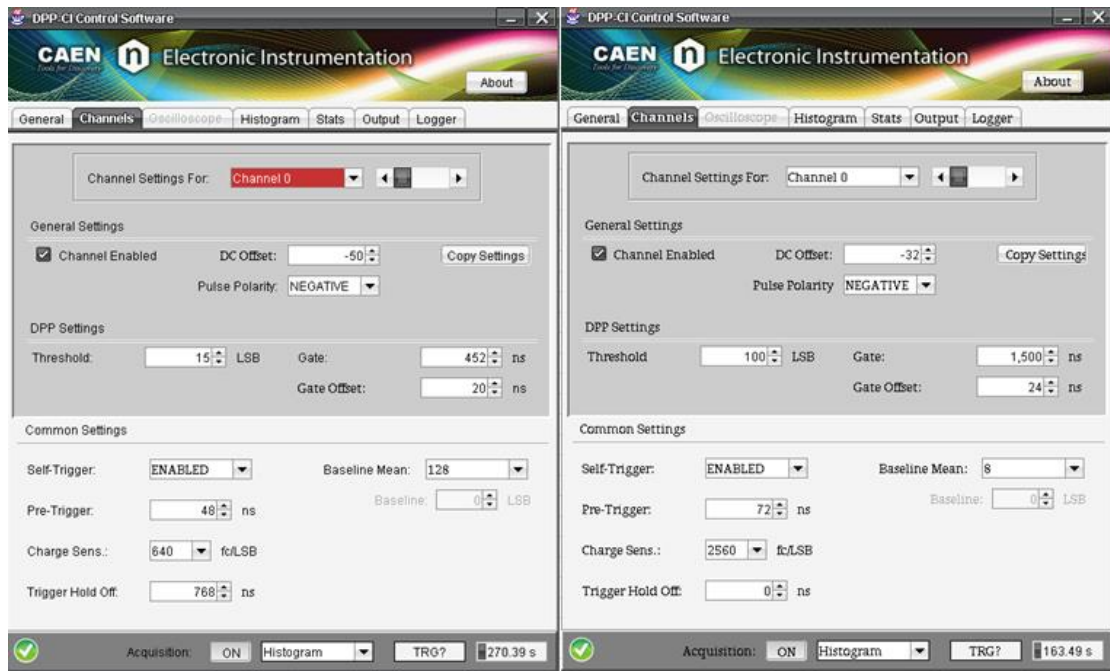
$$S (\%) = \frac{\text{Number of Events (Spectrum)}}{R_{Bq} \times 1800 \text{ sec}} \times 100\%$$

Σχέση 3.4

όπου  $R_{Bq}$  η τρέχουσα ενεργότητα της πηγής σε Becquerel.

### 3.8 Καταγραφή ενεργειακών φασμάτων

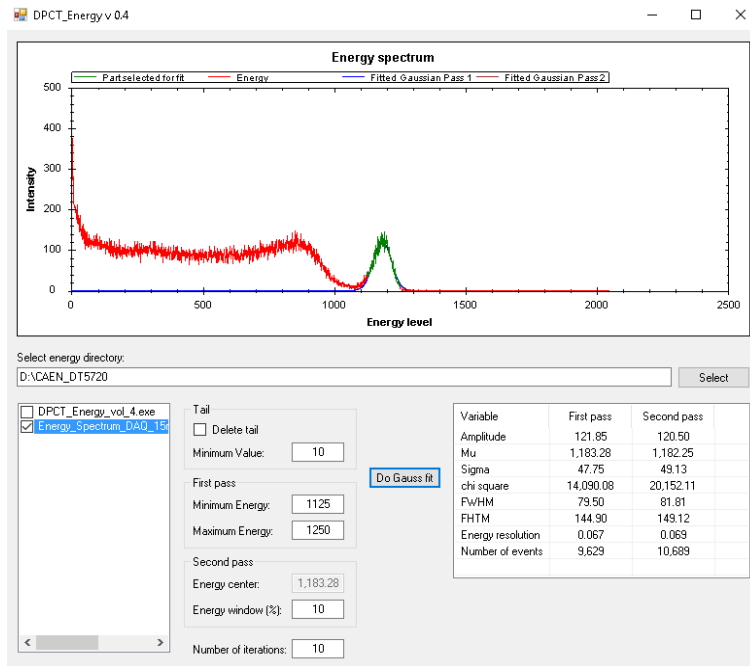
Κάθε μέτρηση είχε διάρκεια 30 λεπτά, ενώ όλοι οι κρύσταλλοι παρέμειναν στο σκοτάδι για τουλάχιστον 24 ώρες πριν από κάθε μέτρηση. Μέσω του προγράμματος του ψηφιοποιητή ορίστηκαν οι κατάλληλες παράμετροι λήψης δεδομένων (σχήμα 3.15). Οι παράμετροι ορίστηκαν σύμφωνα με το πλάτος και τη χρονική διάρκεια των παλμών ρεύματος κάθε ραδιενεργούς πηγής. Για τον λόγο αυτό ορίστηκαν διαφορετικές παράμετροι για το  $^{133}\text{Ba}$ , λόγω των εκτενέστερων και μεγαλύτερου πλάτους παλμών που μας παρείχε.



**Σχήμα 3. 15:** Παράμετροι λήψης δεδομένων στο πρόγραμμα DPP-CI Control Software για τα  $^{137}\text{Cs}$  και  $^{60}\text{Co}$  (αριστερά) και για το  $^{133}\text{Ba}$  (δεξιά).

Το λογισμικό του ψηφιοποιητή μας επιτρέπει να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα σε αρχείο μορφής DAT, το οποίο αποτελείται από δύο στήλες: η πρώτη περιέχει τον αριθμό του καναλιού του ψηφιοποιητή και η δεύτερη τον αριθμό των γεγονότων που καταγρ

άφηκαν στο κάθε κανάλι. Μέσω κατάλληλου κώδικα σε MATLAB μετατρέψαμε τα 36000 κανάλια του αρχείου σε 2048. Ο κώδικας μας επιστρέφει ένα αρχείο (txt) που αποτελείται από μία στήλη και 2048 τιμές, οι οποίες αναπαριστούν τον αριθμό των γεγονότων που καταγράφηκαν στο κάθε κανάλι. Το αρχείο αυτό στη συνέχεια φορτώθηκε σε κατάλληλο πρόγραμμα C++ (DPCT Energy v.04) το οποίο απεικονίζει το ενεργειακό φάσμα κάθε ραδιοϊσοτόπου, ενώ επίσης υπολογίζει το FWHM, την ενεργειακή διακριτική ικανότητα και τον αριθμό των γεγονότων σε ολόκληρο το φάσμα ή σε τμήμα του.

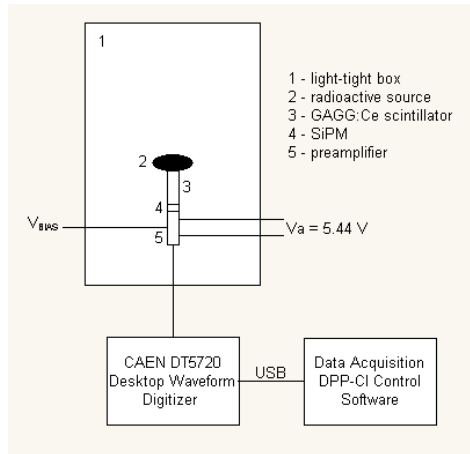


**Σχήμα 3.16:** Πρόγραμμα DPCT Energy v.04.

## 3.9 Πειραματική διάταξη και μέθοδος

### 3.9.1 Σχηματικό διάγραμμα

Στο σχήμα **3.17** φαίνεται το σχηματικό διάγραμμα του πειράματος, ενώ στο σχήμα **3.18** η πειραματική διάταξη. Όλες οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέσα σε φωτοστεγανό κουτί και σε θερμοκρασία δωματίου. Η ραδιενεργός πηγή τοποθετήθηκε αριστερά και σε επαφή με τον κρύσταλλο ενώ ο κρύσταλλος ήταν οπτικά συζευγμένος με τον SiPM. Μεταξύ κρυστάλλου και SiPM παρεμβάλλεται ένα διαφανές οπτικό μέσο (BC-630 optical grease) που βελτιστοποιεί τη διέλευση του φωτός. Ο SiPM συνδέεται με το κύκλωμα του προενισχυτή του οποίου η έξοδος συνδέεται στο κανάλι Ch0 του ψηφιοποιητή. Η λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού DPP-CI Control Software.



**Σχήμα 3.17:** Σχηματικό διάγραμμα του πειράματος. 1-φωτοστεγανό κουτί, 2-ραδιενεργός πηγή, 3-κρυσταλλικός σπινθηριστής, 4-SiPM, 5-προενισχυτής.



**Σχήμα 3.18:** Πειραματική διάταξη. Διακρίνονται το φωτοστεγανό κουτί, ο ψηφιοποιητής καθώς και οι πηγές τάσης του προενισχυτή και του SiPM. Διακρίνονται επίσης ένας παλμογράφος και ένα πολύμετρο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

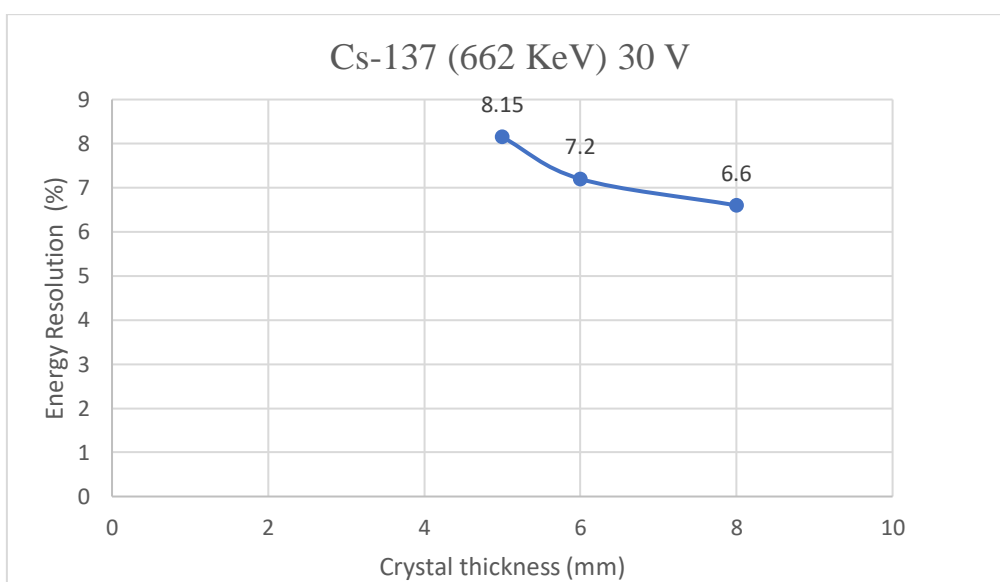
Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη και η μελέτη μίας ολοκληρωμένης διάταξης ανίχνευσης ακτινοβολίας  $\gamma$ , η οποία αποτελείται από των φωτοπολλαπλασιαστή Πυριτίου SiPM PM3350 σε σύζευξη με κρυσταλλικούς σπινθηριστές GAGG:Ce διαφόρων μεγεθών ( $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ ,  $3 \times 3 \times 6 \text{ mm}^3$ ,  $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ ), με σκοπό την αξιοποίηση της σε υβριδικά συστήματα διάγνωσης και θεραπείας και για περαιτέρω χρήση σε φορητά συστήματα ανίχνευσης ακτινοβολίας για το ευρύ κοινό. Χρησιμοποιώντας πηγές ισοτόπων όπως  $^{137}\text{Cs}$  (0.662 MeV),  $^{60}\text{Co}$  (1.173 MeV και 1.332 MeV) και  $^{133}\text{Ba}$  (0.356 MeV) αξιολογήθηκαν οι συζεύξεις του φωτοπολλαπλασιαστή με τα διαφορετικά μεγέθη των κρυστάλλων ως προς τις παραμέτρους της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, της ευαισθησίας και του φωτοποσοστού. Μετά από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε πως η βέλτιστη τάση λειτουργίας του ανιχνευτή είναι τα 30 V. Ξεκινώντας από τα 29 V, αυξάνοντας κάθε φορά κατά 0,5 V και με κριτήριο την ποιοτικότερη λήψη φάσματος κρίθηκαν τα 30 V η καταλληλότερη τάση λειτουργίας.

#### 4.1 Ενεργειακό φάσμα $^{137}\text{Cs}$

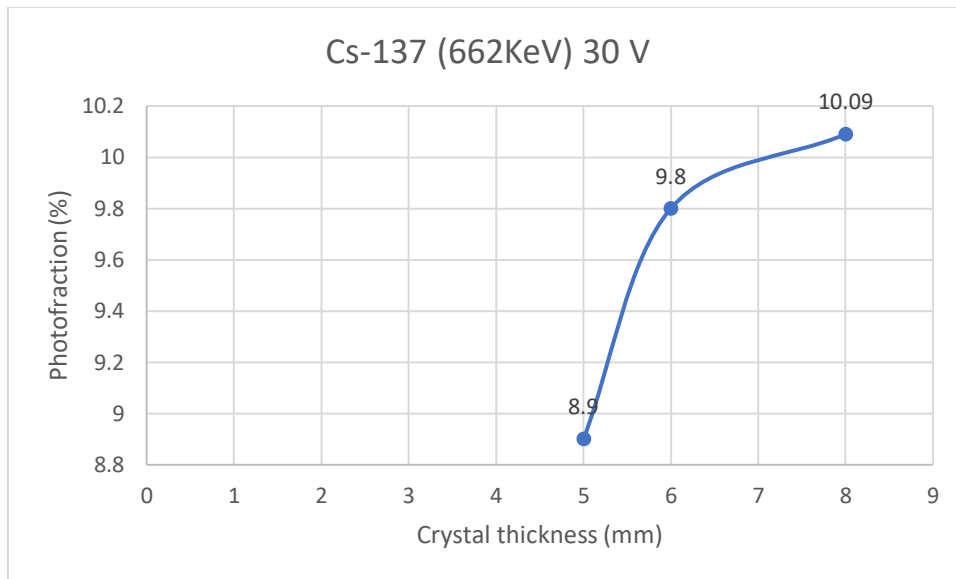
Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Καίσιο-137, ενώ στο σχήμα 4.1 φαίνεται η ενεργειακή διακριτική ικανότητα που επιτεύχθηκε σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου. Στο σχήμα 4.2 και 4.3 απεικονίζεται το φωτοποσοστό και η ευαισθησία σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου αντίστοιχα.

**Πίνακας 4. 1:** Τιμές ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, φωτοποσοστού και ευαισθησίας για όλα τα μεγέθη κρυστάλλων, χρησιμοποιώντας  $^{137}\text{Cs}$ .

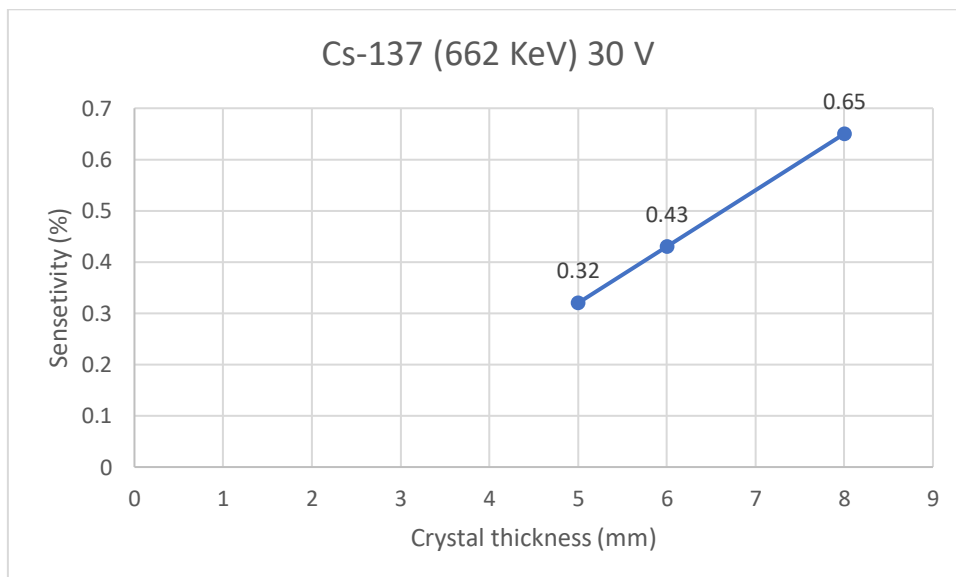
GAGG:Ce Crystal thickness [mm]	Energy Resolution (%)	Photofraction (%)	Sensitivity (%)
	5	8,15	8,9
6	7,87	9,8	0,43
8	6,63	10,09	0,65



**Σχήμα 4. 1:** Ενεργειακή διακριτική ικανότητα σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Καίσιο-137.

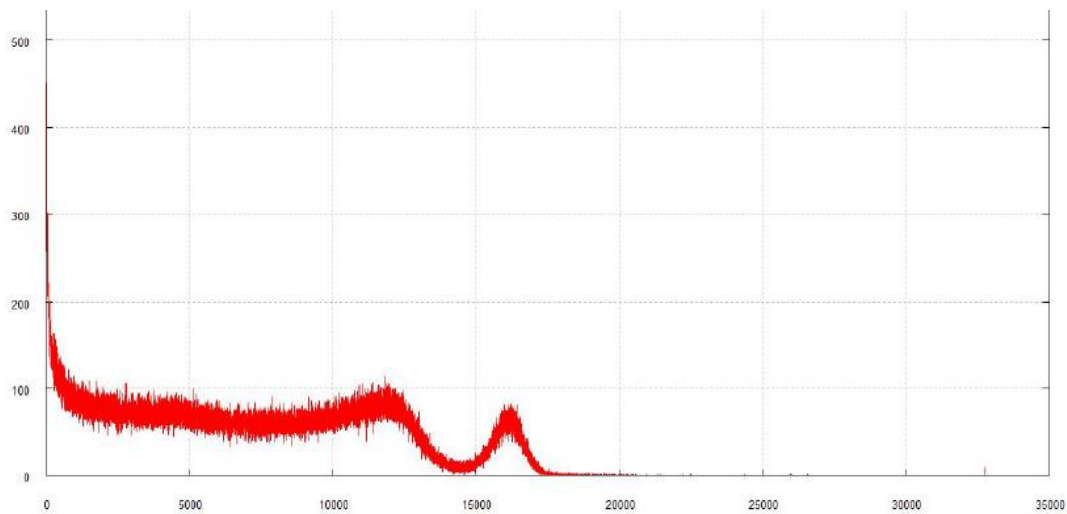


**Σχήμα 4. 2:** Φωτοποσοστό σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Καίσιιο-137.



**Σχήμα 4. 3:** Ευαισθησία σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Καίσιιο-137.

Από τα σχήματα 4.1, 4.2, 4.3 μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί πως και οι τρεις παράμετροι απόδοσης βελτιώνονται, καθώς ο κρύσταλλος αυξάνει το πάχος του. Συμπερασματικά λοιπόν ο κρύσταλλος με πάχος 8 mm θεωρείται ο καλύτερος για σύζευξη με τον φωτοπολλαπλασιαστή, παρουσιάζοντας ενεργειακή διακριτική ικανότητα ίση με 6,63 %.



**Σχήμα 4. 4:** Το φάσμα του Καισίου-137, όπως αυτό φαίνεται στον ψηφιοποιητή. Στον κατακόρυφο άξονα μετρούνται τα counts, ενώ στον οριζόντιο βρίσκονται τα κανάλια του ψηφιοποιητή.

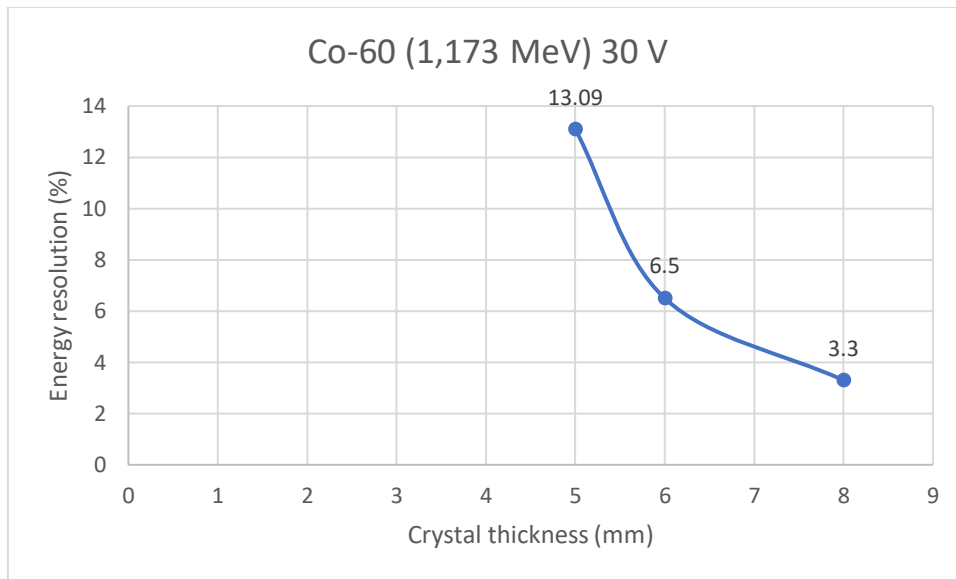
### 4.3 Ενεργειακό φάσμα $^{60}\text{Co}$

Στους Πίνακες 4.2 και 4.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Κοβάλτιο-60, ενώ στο σχήμα 4.5 φαίνεται η ενεργειακή διακριτική ικανότητα που επιτεύχθηκε σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου. Αντίστοιχα τα σχήματα 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 φαίνονται οι παράμετροι του φωτοποσοστού και της ευαισθησίας, σε σχέση με το πάχος του κρυστάλλου.

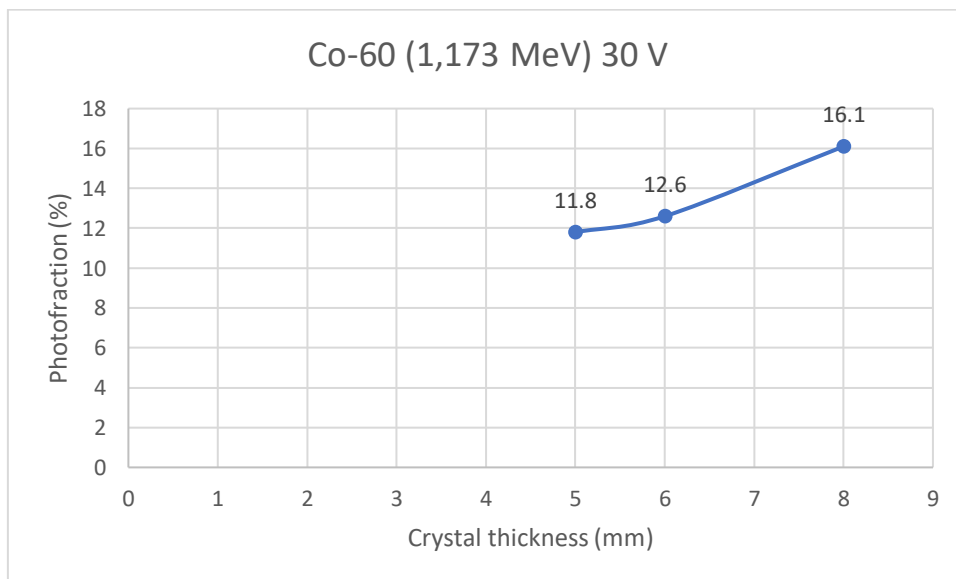
**Πίνακας 4. 2:** Τιμές ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, φωτοποσοστού και ευαισθησίας για όλα τα μεγέθη κρυστάλλων, χρησιμοποιώντας  $^{60}\text{Co}$  (φωτοκορυφή 1.173 MeV).

GAGG:Ce Crystal thickness [mm]	Energy Resolution (%)	Photofraction (%)	Sensitivity (%)
	5	6,7	11,8
6	6,5	12,6	0,45
8	3,3	16,1	0,46

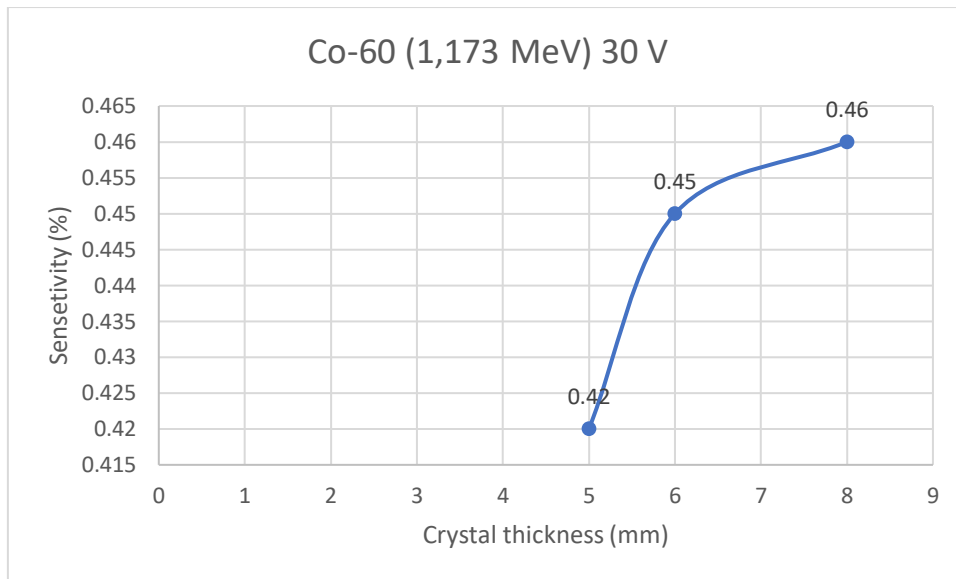




**Σχήμα 4. 5:** Ενεργειακή διακριτική ικανότητα σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Κοβάλτιο-60 στη φωτοκορυφή των 1,173 MeV.



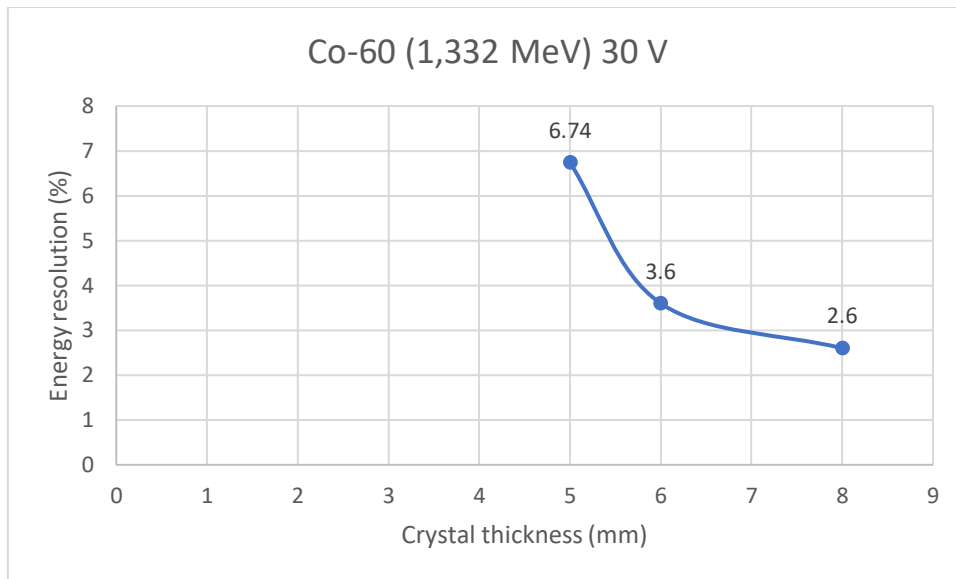
**Σχήμα 4. 6:** Φωτοποσοστό σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Κοβάλτιο-60 στη φωτοκορυφή των 1,173 MeV.



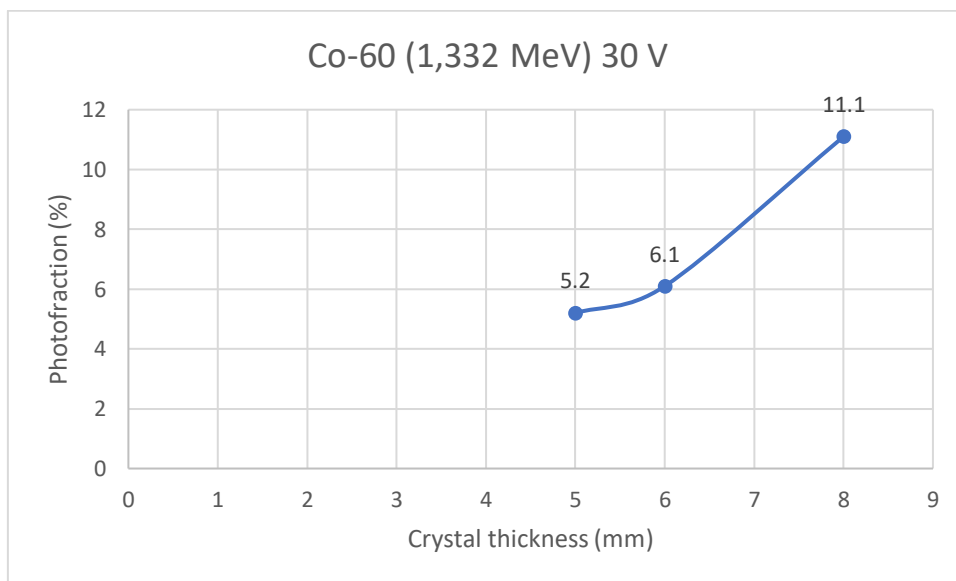
**Σχήμα 4. 7:** Ευαισθησία σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Κοβάλτιο-60 στη φωτοκορυφή των 1,173 MeV.

**Πίνακας 4. 3:** Τιμές ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, φωτοποσοστού και ευαισθησίας για όλα τα μεγέθη κρυστάλλων, χρησιμοποιώντας  $^{60}\text{Co}$  (φωτοκορυφή 1.332 MeV).

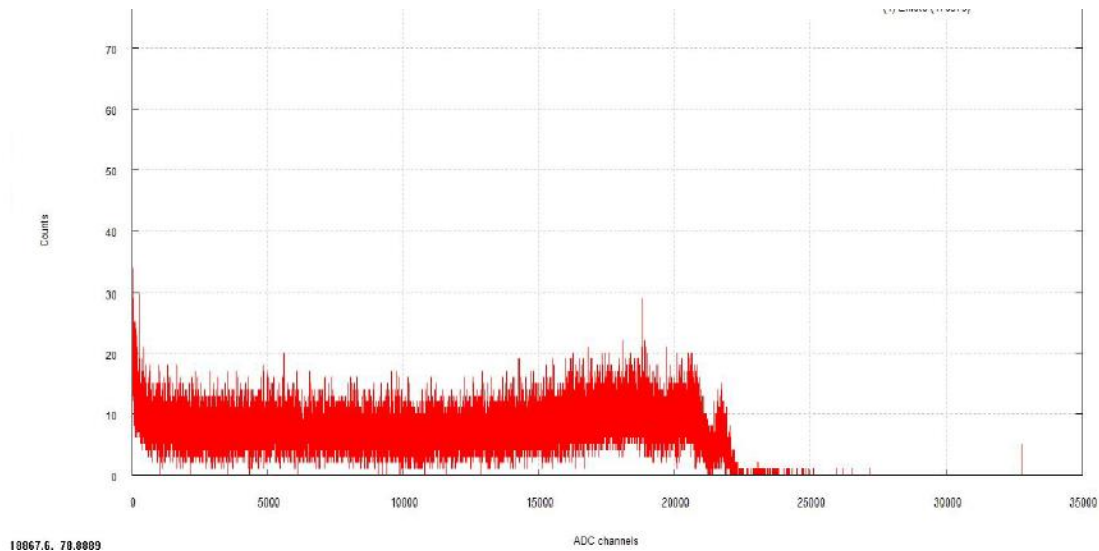
GAGG:Ce Crystal thickness [mm]	Energy Resolution (%)	Photofraction (%)	Sensitivity (%)
	5	6,74	5,2
6	3,6	6,1	0,45
8	2,6	11,1	0,46



**Σχήμα 4. 8:** Ενεργειακή διακριτική ικανότητα σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Κοβάλτιο-60 στη φωτοκορυφή των 1,332 MeV.



**Σχήμα 4. 9:** Φωτοποσοστό σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Κοβάλτιο-60 στη φωτοκορυφή των 1,332 MeV.



**Σχήμα 4. 10:** Το φάσμα του Κοβαλτίου-60, όπως αυτό φαίνεται στον ψηφιοποιητή. Στον κατακόρυφο άξονα μετρούνται τα counts, ενώ στον οριζόντιο βρίσκονται τα κανάλια του ψηφιοποιητή.

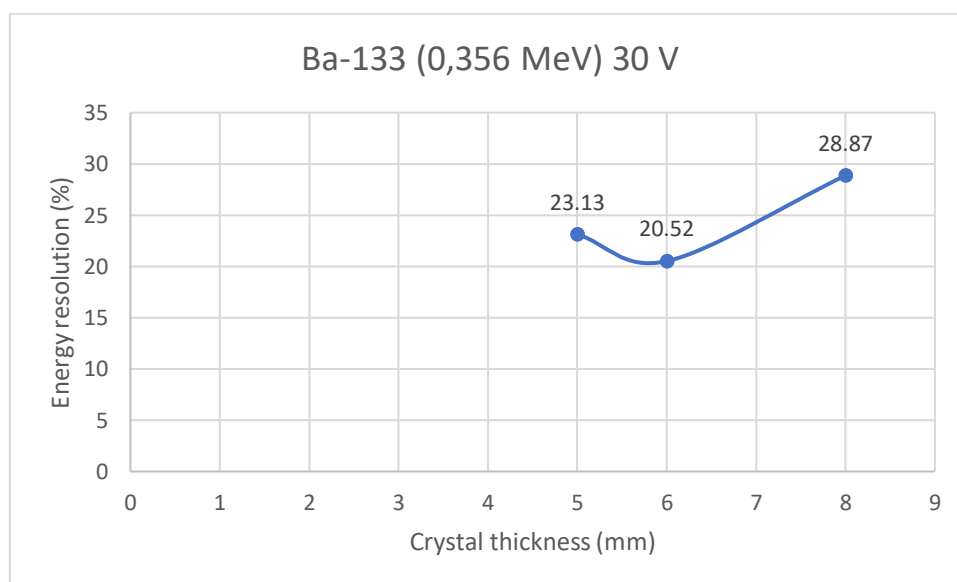
Από τα σχήματα 4.5, 4.6, 4.7, για την φωτοκορυφή χαμηλότερης ενέργειας (1,173 MeV), μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί πως και οι τρεις παράμετροι απόδοσης βελτιώνονται, καθώς ο κρύσταλλος αυξάνει το πάχος του. Συμπερασματικά λοιπόν ο κρύσταλλος με πάχος 8 mm θεωρείται ο καλύτερος για σύζευξη με τον φωτοπολλαπλασιαστή, παρουσιάζοντας ενεργειακή διακριτική ικανότητα ίση με 3,3 %. Το ίδιο προκύπτει και για την φωτοκορυφή μεγαλύτερης ενέργειας (1,332 MeV), από τα σχήματα 4.8, 4.9 και 4.10, με ενεργειακή ικανότητα ίση με 2,6 %.

## 4.4 Ενεργειακό φάσμα $^{133}\text{Ba}$

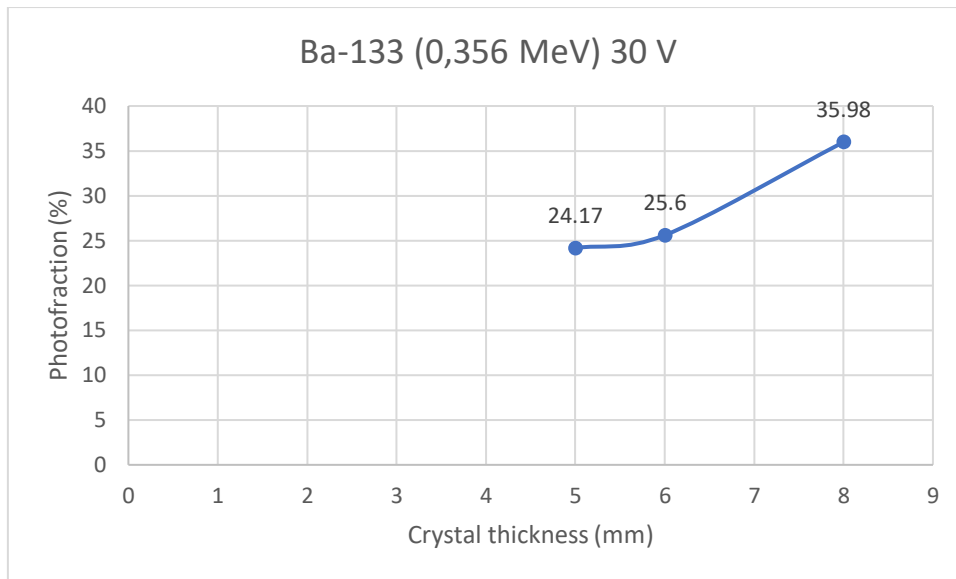
Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το Βάριο-133, ενώ στο σχήμα 4.11 φαίνεται η ενεργειακή διακριτική ικανότητα που επιτεύχθηκε σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου. Αντίστοιχα τα σχήματα 4.12, 4.13 φαίνονται οι παράμετροι του φωτοποσοστού και της ευαισθησίας, σε σχέση με το πάχος του κρυστάλλου.

**Πίνακας 4.4:** Τιμές ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, φωτοποσοστού και ευαισθησίας για όλα τα μεγέθη κρυστάλλων, χρησιμοποιώντας  $^{133}\text{Ba}$  (φωτοκορυφή 0,356 MeV).

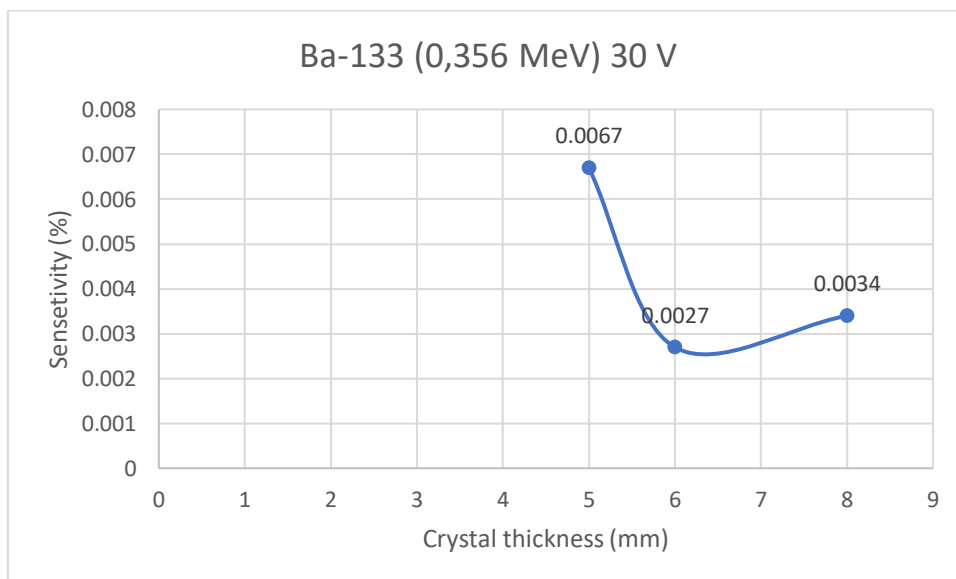
GAGG:Ce Crystal thickness [mm]	Energy Resolution (%)	Photofraction (%)	Sensitivity (%)
5	23,13	24,17	0,0067
6	20,52	25,6	0,0027
8	28,87	35,98	0,0034



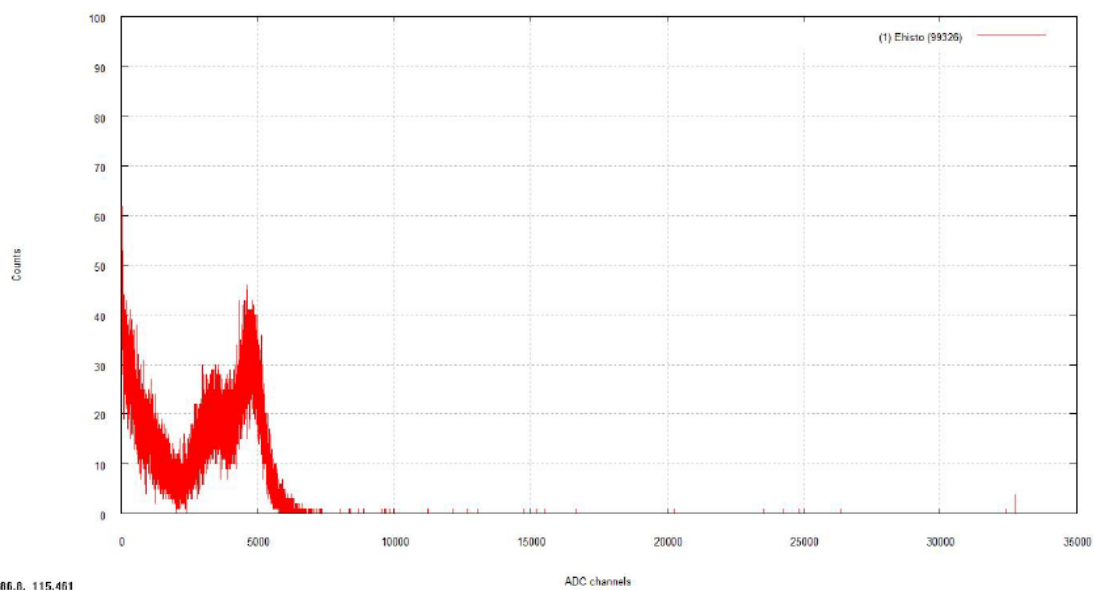
**Σχήμα 4. 11:** Ενεργειακή διακριτική ικανότητα σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Βάριο-133 στη φωτοκορυφή των 0,356 MeV.



**Σχήμα 4. 12:** Φωτοποσοστό σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Βάριο-133 στη φωτοκορυφή των 0,356 MeV.



**Σχήμα 4. 13:** Ευαισθησία σε συνάρτηση με το πάχος του κρυστάλλου για το Βάριο-133 στη φωτοκορυφή των 0,356 MeV.

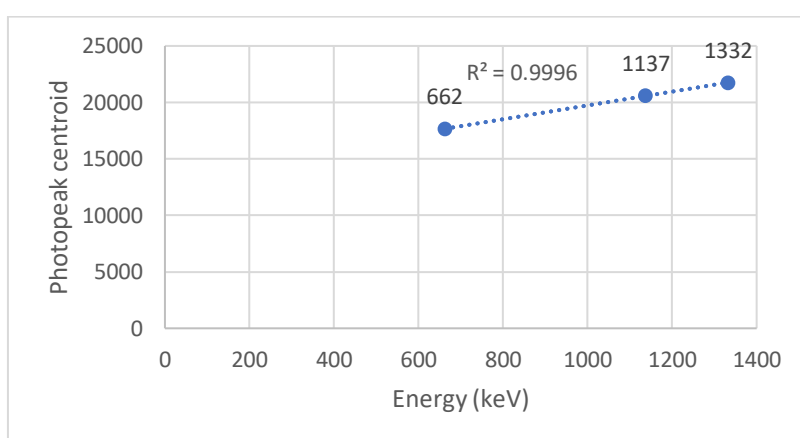


**Σχήμα 4. 14:** Το φάσμα του Βαρίου-133, όπως αυτό φαίνεται στον ψηφιοποιητή. Στον κατακόρυφο άξονα μετρούνται τα counts, ενώ στον οριζόντιο βρίσκονται τα κανάλια του ψηφιοποιητή.

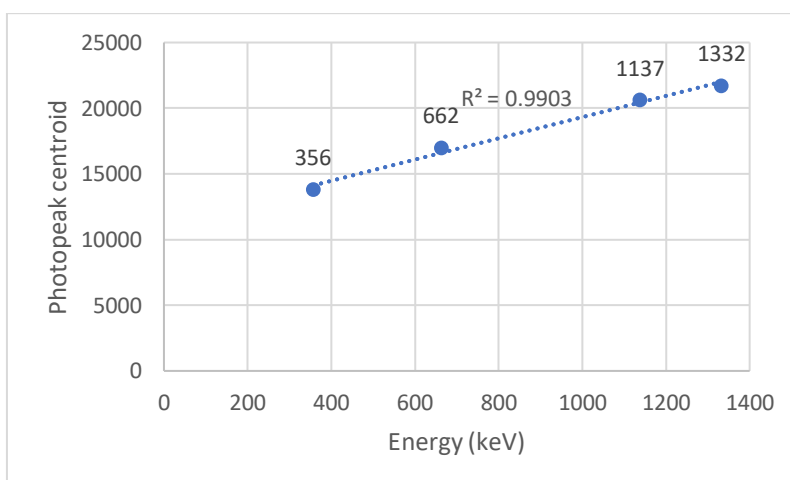
Η καλύτερη ενεργειακή διακριτικότητα εμφανίζεται στον κρύσταλλο  $3 \times 3 \times 6 \text{ mm}^3$ , ίση με 20,52 %. Το φωτοποσοστό παρουσιάζει τη μέγιστη τιμή του στον κρύσταλλο  $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$  και η ευαισθησία στον κρύσταλλο  $3 \times 3 \times 5 \text{ mm}^3$ . Ως προς τη διακριτική ικανότητα τα αποτελέσματα που δείχνουν ως καλύτερη επιλογή τον κρύσταλλο  $3 \times 3 \times 6 \text{ mm}^3$ , είναι λογικά καθώς η διάχυση του φωτός σε κρύσταλλο μεγαλύτερου πάχους επηρεάζει αυτή τη μεταβλητή. Σε γενικές γραμμές οι άλλες δύο παράμετροι παρουσιάζουν διακυμάνσεις όπως φαίνεται και από τα σχήματα 4.12 και 4.13.

## 4.5 Γραμμικότητα (Linearity) και αλλαγές στην διαδικασία της σύζευξης (Coupling) του κρυστάλλου με τον φωτοπολλαπλασιαστή

Σε κάθε φάσμα που πάρθηκε από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τον ανιχνευτή, παρατηρήθηκε πως για κάθε πηγή ακτινοβολίας το κέντρο της φωτοκορυφής καταλαμβάνει διαφορετικό κανάλι στον ψηφιοποιητή. Είναι γνωστό πως υπάρχει αναλογία καναλιού-ενέργειας, όσο μεγαλύτερο κανάλι τόσο μεγαλύτερη ενέργεια. Για να εξετασθεί η γραμμικότητα λοιπόν, αρκεί να συγκριθούν σε ένα διάγραμμα τα αποτελέσματα των μετρήσεων.



**Σχήμα 4. 15:** Γραμμικότητα ανιχνευτή για τις υψηλές ενέργειες. Ο κάθετος άξονας απεικονίζει τα κανάλια των φωτοκορυφών, ενώ ο οριζόντιος την ενέργεια σε keV της κάθε φωτοκορυφής.



**Σχήμα 4. 16:** Γραμμικότητα ανιχνευτή για όλες τις ενέργειες. Ο κάθετος άξονας απεικονίζει τα κανάλια των φωτοκορυφών, ενώ ο οριζόντιος την ενέργεια σε keV της κάθε φωτοκορυφής.

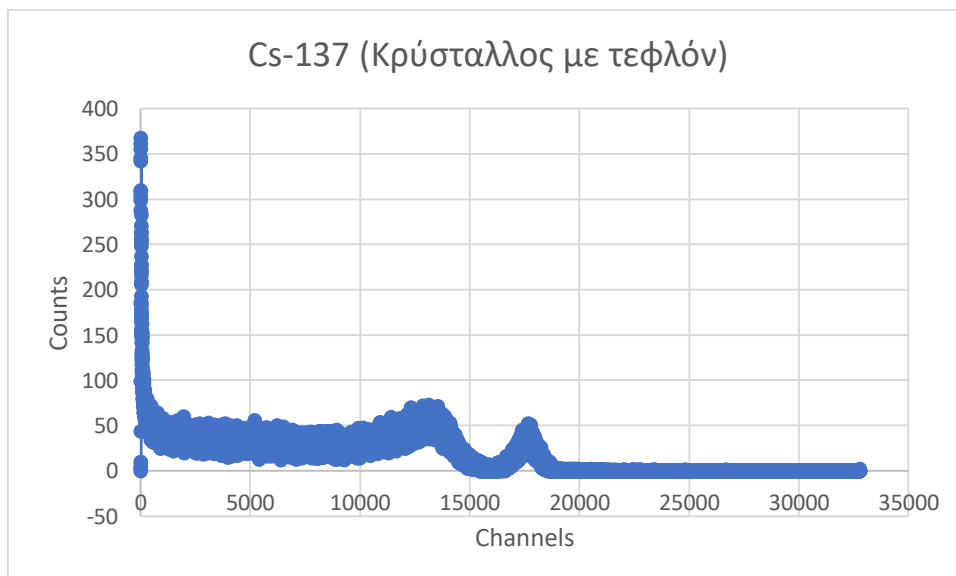


Το συμπέρασμα που προκύπτει για την γραμμικότητα του ανιχνευτή, είναι πως παρουσιάζει εξαιρετική γραμμικότητα, γεγονός που ευνοεί την τη χρήση του ανιχνευτή για αναγνώριση ραδιοϊσοτόπων.

Έπειτα δοκιμάστηκε η απόδοση του ανιχνευτή συζευγμένος με τον κρύσταλλο  $3 \times 3 \times 8$  mm<sup>3</sup> χωρίς αυτή τη φορά να χρησιμοποιηθεί τεφλόν για την κάλυψη του. Το τεφλόν εξασφάλιζε πως τα φωτόνια που θα δημιουργηθούν στο εσωτερικό του κρυστάλλου θα οδηγηθούν προς την πλευρά που έρχεται σε επαφή με τον φωτοπολλαπλασιαστή.



**Σχήμα 4. 17:** Φάσμα <sup>137</sup>Cs με κρύσταλλο διαστάσεων 3×3×8 mm<sup>3</sup> χωρίς τεφλόν.

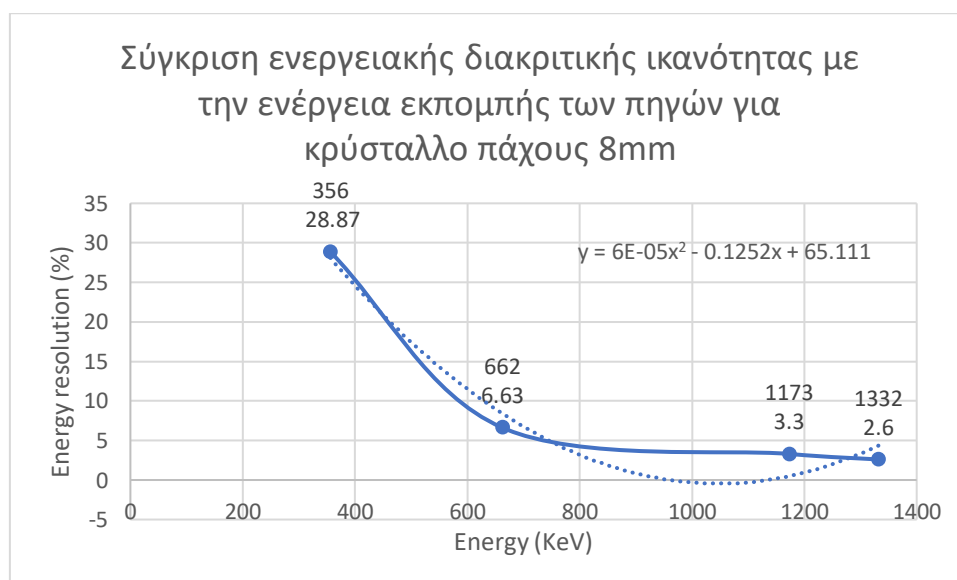


**Σχήμα 4. 18:** Φάσμα <sup>137</sup>Cs με κρύσταλλο διαστάσεων 3×3×8 mm<sup>3</sup> με τεφλόν.

Από τα διαγράμματα 4.17, 4.18 παρατηρείται η μετακίνηση του φάσματος προς τα αριστερά, γεγονός που μεταφράζεται ως μείωση των φωτονίων που έφτασαν στην ενεργό περιοχή του φωτοπολλαπλασιαστή. Το αποτέλεσμα αυτό μπορεί να θεωρηθεί αναμενόμενο, καθώς γνωρίζουμε πως ο ρόλος του τεφλόν ήταν να συγκρατεί τα οπτικά φωτόνια που δημιουργήσε ο κρύσταλλός στο εσωτερικό του και να τα οδηγεί στη μοναδική πλευρά χωρίς κάλυψη, που οδηγούσε στον φωτοπολλαπλασιαστή. Επίσης η ενεργειακή διακριτική ικανότητα υποβαθμίζεται σημαντικά στη μέτρηση χωρίς τεφλόν και είναι ίση με 16,23%.

## 4.6 Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τα αποτελέσματα των μετρήσεων, αρχικά είναι πως μεγαλύτερο πάχος κρυστάλλου αποδίδει καλύτερα ως προς την ενεργειακή διακριτική ικανότητα, το φωτοποσοστό και την ευαισθησία, σε μεγάλες ενέργειες (Καίσιο-137, Κοβάλτιο- 60). Έπειτα, στις χαμηλές ενέργειες (Βάριο-133) τα αποτελέσματα δεν ακολουθούν την ίδια συμπεριφορά. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα μοιάζει να είναι καλύτερη για μικρότερο πάχος κρυστάλλου και συγκριτικά με μεγαλύτερης ενέργειας πηγή κυμαίνεται σε πολύ υψηλές τιμές, γεγονός που την υποβαθμίζει. Αυτό παρατηρείται εύκολα στο παρακάτω σχήμα:



**Σχήμα 4.19:** Διακριτική ικανότητα για κρύσταλλο πάχους 8 mm για κάθε πηγή ραδιενέργειας.

Crystal thickness	<sup>137</sup> Cs(662KeV)			<sup>60</sup> Co(1173KeV)			<sup>60</sup> Co(1332KeV)			<sup>133</sup> Ba(356KeV)		
	E.R. (%)	Ph. (%)	Sens. (%)	E.R (%)	Ph. (%)	Sen. (%)	E.R. (%)	Ph. (%)	Sens. (%)	E.R. (%)	Ph. (%)	Sens. (%)
5	8,15	8,9	0,32	6,7	11,8	0,42	6,74	5,2	0,42	23,13	24,17	0,0067
6	7,87	9,8	0,43	6,5	12,6	0,45	3,6	6,1	0,45	20,52	25,6	0,0027
8	6,63	10,09	0,65	3,3	16,1	0,46	2,6	11,1	0,46	28,87	35,98	0,0034

**Πίνακας 4.5:** Συγκεντρωτικός πίνακας με τις τιμές όλων των παραμέτρων ( Energy Resolution, Photofraction, Sensitivity) για κάθε πηγή και μέγεθος σπινθηριστή ( Crystal Thickness).

Από το σχήμα 4.19 εξάγεται μία πολυωνυμική σχέση από την οποία, μπορούμε προσεγγιστικά να υπολογίσουμε την ενεργειακή διακριτική ικανότητα για οποιαδήποτε ενέργεια δοθεί μεταξύ των τιμών 356 KeV και 1332 KeV.

Το ανιχνευτικό σύστημα που κατασκευάστηκε για την παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την ανίχνευση και την αναγνώριση ραδιοϊσοτόπων. Το μικρό του μέγεθος το καθιστά ικανό να ενταχθεί σε φορητές συσκευές (wearables) και να χρησιμοποιηθεί για την πρόληψη του ευρύ κοινού απέναντι στην έκθεση σε επιβλαβή ακτινοβολία στο περιβάλλον που βρίσκεται. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανιχνευτής σε κρίσιμα σημεία ενός σπιτιού, ώστε να ελέγχονται βρώσιμα και πόσιμα αγαθά και να αποφεύγεται η κατανάλωση τους σε περίπτωση που αυτά έχουν μολυνθεί από ακτινοβολία. Το γεγονός πως δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία τα καθιστά καταλληλότερα για τέτοιου είδους χρήση.

Ως καταλληλότερος κρύσταλλος, μεταξύ των τριών μεγεθών που συγκρίθηκαν , θεωρείται ο  $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$  καθώς παρουσιάζει την καλύτερη ενεργειακή διακριτική ικανότητα και κατά κύριο λόγο τα αποτελέσματα ως προς όλες τις μεταβλητές είναι ικανοποιητικά. Το συμπέρασμα αυτό θεωρείται λογικό σε σύγκριση με αποτελέσματα που βρέθηκαν για μετρήσεις με ίδιο τύπο κρυστάλλου, ίδιων διαστάσεων, με διαφορετικό φωτοπολλαπλασιαστή πυριτίου και πηγή Καισίου-137.[23]

**Πίνακας 4.6:** Σύγκριση αποτελεσμάτων με παλαιότερη έρευνα. Το E.R 1 αναφέρεται στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, ενώ το E.R 2 σε παλαιότερη έρευνα.

Crystal thickness (mm)	E.R 1 (%)	E.R 2 (%)
5	8,15	13,1
6	7,87	14,1
8	6,63	14,4

## Βιβλιογραφία

- [1] Ιωάννης Κανδαράκης, Πυρηνική Ιατρική, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αράκυνθος
- [2] Σοφία Κόττου, Φυσική της Απεικόνισης στην Ιατρική, Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής, ΕΚΠΑ, Σεπτέμβριος 2007
- [3] Kieran Maher, Basic Physics of Nuclear Medicine, Wikibooks
- [4] Αργυρόπουλος Ιωάννης, Αξιολόγηση Φωτοπολλαπλασιαστών Πυριτίου (SiPMs) ως ανιχνευτές υβριδικών απεικονιστικών συστημάτων Πυρηνικής Ιατρικής, διπλωματική εργασία, Πάτρα Ιούλιος 2010
- [5] Steven J. Duclos, Scintillator Phosphors for Medical Imaging, The Electrochemical Society *Interface* – Summer 1998
- [6] Παϊπάης Αθανάσιος, Κεφαλίδης Ελευθέριος, Μελέτη και αξιολόγηση Φωτοπολλαπλασιαστή Πυριτίου (SiPM) για εφαρμογή σε συστήματα Πυρηνικής Ιατρικής, πτυχιακή εργασία, Αθήνα 2011
- [7] Δελημάνη Γεωργία, Θεωρητική και Πειραματική αξιολόγηση νέων ανιχνευτών σπινθηρισμού σε σύζευξη με Φωτοπολλαπλασιαστές Πυριτίου (SiPM), πτυχιακή εργασία, Αθήνα 2015
- [8] Marco Ramilli, Alessia Allevi, Luca Nardo, Maria Bondani and Massimo Caccia, Silicon Photomultipliers: Characterization and Applications, Photodetectors, Dr. Sanka Gateva (Ed.), ISBN: 978-953-51-0358-5, InTech, Available from:  
<http://www.intechopen.com/books/photodetectorssilicon-photomultipliers-characterization-andapplications>
- [9] P. Buzhan, B. Dolgoshein, L. Filatov, A. Ilyin, V. Kantzerov, V. Kaplin, A. Karakash, F. Kayumov, S. Klemin, E. Popova, S. Smirnov *et al.* / *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 504 (2003) 48–52 DOI:10.1016/S0168-9002(03)00749-6
- [10] Saurabh Sandilya, Experimental Project Report on Characterization of Silicon Photomultipliers, Tata Institute of Fundamental Research, Mumbai 400 005 17th January 2011
- [11] N. Otte, The Silicon Photomultiplier - A new device for High Energy Physics, Astroparticle Physics, Industrial and Medical Applications, *Max Planck Institut fur Physik, SNIC Symposium, Stanford, California -- 3-6 April 2006*
- [12] Emilie Roncali, Simon R. Cherry, Application of Silicon Photomultipliers to Positron Emission Tomography, *Annals of Biomedical Engineering, Vol. 39, No. 4, April 2011 ( 2011) pp. 1358–1377* DOI: 10.1007/s10439-011-0266-9

- [13] National Institute of Standards and Technology. available online at: <https://web.archive.org/web/20160812133216/http://nist.gov/pml/data/half-life-html.cfm>
- [14] <http://nucleardata.nuclear.lu.se/toi/nuclide.asp?iZA=270060>
- [15] "Standard Atomic Weights: Barium". CIAAW. 1985. available online at: <https://www.ciaaw.org/barium.htm>
- [16] KETEK GmbH, PM3350, 3x3 mm<sup>2</sup> - 50 µm microcell type, datasheet, available online at: [https://www.ge.infn.it/~sicca/MegaMeg/SiPM\\_PM3350\\_STD\\_Trench\\_Datasheet\\_rev02.07.2012.pdf](https://www.ge.infn.it/~sicca/MegaMeg/SiPM_PM3350_STD_Trench_Datasheet_rev02.07.2012.pdf)
- [17] First Sensor, KETEK PM3350 datasheet, available online at: <http://www.light-catcher.com.cn/ProductFiles/datenblatt-sipm3350-thd-order-nr-50150801.pdf>
- [18] C. Dietzinger, T. Ganka, W. Gebauer, N. Miyakawa, P. Iskra, F. Wiest, F.R. Schneider, D. Renker "Silicon Photomultipliers with enhanced Blue-Light Sensitivity", PhotoDet 2012, June 13-15, 2012, LAL Orsay, France, available online at: <https://indico.cern.ch/event/164917/contributions/1417113/attachments/198506/278655/PhotoDet2012-KETEK-14-June-2012.pdf>
- [19] J. Huizenga, S. Seifert, F. Schreuder, H.T. van Dam, P. Dendooven, H. Lohner, R. Vinke, D.R. Schaart, et al., Nuclear Instruments & Methods In Physics Research Section A (2011), doi:10.1016/j.nima.2011.11.012
- [20] Caen SpA, "MOD. DT5720, 4 channel 12 bit 250 MS/s Digitizer, Technical Information Manual", Revision no.8, p.6-14, 2013
- [21] Caen SpA, "UM2089, DPCI User Manual", Rev.0-08, May 2013
- [22] David S, Georgiou M, Fysikopoulos E, and Loudos G 2015 *Phys. Med.* **31** 763-6
- [23] Delimani G, Georgiou M, Papadimitroulas P, Papamichalis P, Mikropoulos K, David S and Loudos G 2014 *EJMP* 30 Supplement e110-e111 <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejmp.2014.07.314>