



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ

**“Ανάπτυξη και αξιολόγηση δομικών στοιχείων ανιχνευτών
Πυρηνικής Ιατρικής Απεικόνιση”**

Κάσδαγλη Ευαγγελία

Αριθμός Μητρώου:

48016039

Επιβλέπων Καθηγητής

ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ ΔΑΥΙΔ

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή		
<p>Ο Επιβλέπων Καθηγητής</p>		
<p>Ευστράτιος Δαβίδ Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.</p>	<p>Αικατερίνη Σκουρολιάκου Καθηγήτρια ΠΑ.Δ.Α.</p>	<p>Παναγιώτης Λιαπαρίνος Αναπληρωτής Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.</p>

Ευχαριστίες

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή Ευστράτιο Δαβίδη, για την βοήθεια του στην προσπάθειά 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 τον υποψήφιο διδάκτορα Νικόλαο Ποτηριάδη για την πολύτιμη βοήθειά του στο πειραματικό κομμάτι της εργασίας μου. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους τους καθηγητές του τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής και το ίδρυμα του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, για την παραχώρηση των χώρων και των υλικών που χρησιμοποίησα.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Κάσδαγλη Ευαγγελία του Διονυσίου, με αριθμό μητρώου 48016039 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι 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 πτυχίου μου».

Ημερομηνία

07/03/2023

Η Δηλούσα



Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την κατασκευή, μελέτη και αξιολόγηση μίας ανιχνευτικής διάταξης ακτινοβολίας γ με φασματοσκοπικές ικανότητες (καταγράφει και την ενέργεια των φωτονίων- γ που ανιχνεύει εκτός από τον αριθμό). Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν και συγκρίθηκαν δύο εμπορικοί φωτοπολλαπλασιαστές πυριτίου διαστάσεων $3 \times 3 \text{ mm}^2$ με στόχο την επιλογή εκείνου με την βέλτιστη απόδοση ως προς την παράμετρο της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας. Οι δύο φωτοπολλαπλασιαστές πυριτίου (S10362-33-series) της εταιρίας Hamamatsu Photonics τοποθετήθηκαν σε κατάλληλο κύκλωμα ενισχυτή μέσα σε φωτοστεγανό κουτί. Στο εσωτερικό του κουτιού τοποθετήθηκαν επίσης ένας σπινθηριστής τύπου $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG:Ce) διαστάσεων $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ οπτικά συζευγμένος με τον κάθε φωτοπολλαπλασιαστή ξεχωριστά ο οποίος εκτέθηκε σε ακτινοβολία γ κάνοντας χρήση μίας εκπαιδευτικής ραδιενεργής πηγής καισίου-137 (^{137}Cs , ενεργότητας $R=0.811 \text{ } \mu\text{Ci}$). Για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μία σειρά από μετρήσεις διάρκειας 30 λεπτών έκαστη. Η διάταξη αυτή έχει μικρές διαστάσεις και μπορεί να χαρακτηριστεί ως φορητή. Χρησιμοποιήθηκαν εργαστηριακά τροφοδοτικά για την τάση λειτουργίας των φωτοπολλαπλασιαστών καθώς και για την τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών. Το ενισχυμένο σήμα από τον ανιχνευτή μας ψηφιοποιήθηκε με έναν εμπορικό επιτραπέζιο τετρακάναλο ψηφιοποιητή DT5720 της εταιρίας CAEN. Η διασύνδεση του ψηφιοποίηση με τον υπολογιστή έγινε με το αντίστοιχο λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας παλμών της ίδιας εταιρίας. Από τα ενεργειακά φάσματα της ακτινοβολίας γ που καταγράφηκαν εξάγαμε τα αποτελέσματα των παραμέτρων της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, του φωτοποσοστού και της ευαισθησίας. Παρατηρήθηκε πως ο πιο αποδοτικός φωτοπολλαπλασιαστής από τους δύο, ως προς την παράμετρο της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, είναι ο **S10362-33-100C**. Τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με άλλες δημοσιευμένες μελέτες που είχαν χρησιμοποιήσει το ίδιο υλικό σπινθηρισμού και βρέθηκαν συγκρίσιμα. Με τον φορητό ανιχνευτή αυτό μπορούμε όχι μόνο να εντοπίσουμε την ύπαρξη της ραδιενέργειας, αλλά και να προσδιορίσουμε την πηγή αυτής (μέχρι ενέργειες ισοτόπων που εκπέμπουν στα 662 keV), ώστε να καταλάβουμε την αιτία και την σοβαρότητα κάποιας πιθανής ραδιενεργής μόλυνσης.

Λέξεις κλειδιά: Ανόργανοι σπινθηριστές; φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου; φασματοσκοπία ακτίνων γ ; ανιχνευτής ακτίνων γ ; GAGG:CE;

Abstract

This thesis presents the construction, study and evaluation of a gamma-radiation detection device with spectroscopic capabilities (it also records the energy of the gamma-photons it detects in addition to the number). For this purpose, two silicon photomultipliers with dimensions of $3 \times 3 \text{ mm}^2$ were used and compared with the aim of choosing the one with the best performance in terms of the energy resolution parameter. The two silicon photomultipliers (S10362-33-series) of Hamamatsu Photonics were placed in a suitable amplifier circuit inside a light-proof box. A $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG:Ce) type scintillator with dimensions of $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ was also placed inside the box, optically coupled to each photomultiplier separately and was exposed to gamma-radiation using a radioactive source of cesium-137 (^{137}Cs , activity $R=0.811 \mu\text{Ci}$). A series of measurements lasting 30 minutes each were carried out. This device has small dimensions and can be characterized as portable. For the operating voltage of the photomultipliers and for the operational amplifiers were used power supplies. The amplified signal from our detector was digitized with a four-channel DT5720 desktop digitizer from CAEN. The digitalization interface with the computer was made with the corresponding digital pulse processing software of the same company. From the recorded gamma-ray energy spectra we extracted the results of the energy resolution, photofraction and sensitivity parameters. It was observed that the most efficient photomultiplier of the two, in terms of the energy resolution parameter, is S10362-33-100C. The results were compared with other published studies that had used the same scintillation material and found to be comparable. With this portable detector we can not only detect the existence of radioactivity, but also determine its source (up to the energies of isotopes emitting at 662 keV), in order to understand the cause and severity of any possible radioactive contamination.

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

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Abstract	6
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	10
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ.....	10
1.1 Ραδιενέργεια (Radioactivity).....	10
1.1.1 Διάσπαση α	11
1.1.2 Διάσπαση β	12
1.1.3 Ακτινοβολία γ	13
1.2 Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας με την ύλη.....	14
1.2.1 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (Photoelectric Effect)	15
1.2.2 Ανελαστική Σκέδαση (Φαινόμενο Compton).....	16
1.2.3 Δίδυμη Γένεση (Pair Production).....	16
1.2.4 Εξάλωση (Annihilation)	17
1.3 Σπινθηριστές (Scintillators)	17
1.3.1 Λειτουργία & χαρακτηριστικά σπινθηριστών	18
1.3.2 Είδη σπινθηριστών	18
1.3.2.1 Σπινθηριστές αερίου	18
1.3.2.2 Οργανικοί σπινθηριστές.....	19
1.3.2.3 Ανόργανοι σπινθηριστές	19
1.3.2.3.1 Μηχανισμός Σπινθηρισμού	20
1.4 Φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier tubes -PMTs)	21
1.4.1 Λειτουργία φωτοπολλαπλασιαστών	23
1.4.2 Παράμετροι λειτουργίας των φωτοπολλαπλασιαστών	24
1.4.3 Παράμετροι αξιολόγησης φωτοπολλαπλασιαστών.....	25
1.5 Φασματοσκοπία ακτίνων-γ	27
1.5.1 Μορφή ενεργειακών φασμάτων ακτίνων- γ	27
1.5.2 Δομή ενεργειακών φασμάτων ακτίνων- γ	29
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	30
ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (Silicon Photomultipliers - SiPMs).....	30
2.1 Ανιχνευτές ημιαγωγών	31
2.1.1 Προσμίξεις ημιαγωγών.....	32
2.1.2 Δίοδος επαφής pn.....	33

2.1.3	Τρόποι εφαρμογής εξωτερικής τάσης πόλωσης.....	35
2.1.4	Φαινόμενο κατάρρευσης της διόδου επαφής pn.....	36
2.1.4.1	Φαινόμενο Zener ή φαινόμενο σήραγγας	37
2.1.4.2	Φαινόμενο χιονοστιβάδας (Geiger Mode)	38
2.1.4.3	Γραμμική λειτουργία (Linear Mode)	40
2.2	Φωτοδίοδος Χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiodes – APDs)	40
2.2.1	Χωρητικότητα επαφής pn	42
2.2.2	Διαδικασία απόκρισης ενός SiPM σε εισερχόμενα φωτόνια.....	43
2.2.3	Μηχανισμός επαναφοράς της τάσης λειτουργίας (Quenching Mechanism- Resistor) 44	
2.3	Παράμετροι απόδοσης.....	46
2.3.1	Απόδοση Ανίχνευσης Φωτονίων (Photon Detection Efficiency- PDE).....	46
2.3.2	Κέρδος (Gain)	48
2.3.3	Δυναμικό Εύρος (Dynamic Range).....	50
2.4	Πηγές θορύβου	51
2.4.1	Ρυθμός Σκότους (Dark Count Rate –DCR)	51
2.4.2	Φαινόμενο Optical Crosstalk.....	52
2.4.3	Φαινόμενο Afterpulsing.....	52
3.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	53
	ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΣ.....	53
3.1	Φωτοπολλαπλασιαστές Πυριτίου S10362-33-series	53
3.1.1	Λειτουργία	54
3.2	Καίσιο-137 (Cesium-137/ ¹³⁷ Cs).....	56
3.3	Κρυσταλλικοί σπινθηριστές Gd ₃ Al ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Ce (GAGG:Ce)	57
3.4	Παράμετροι απόδοσης.....	59
3.5	Ψηφιοποιητής CAEN DT5720B.....	60
3.5.1	Λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας των παλμών (DPP Firmware).....	61
3.5.2	Αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου DPP-CI.....	62
3.5.3	Παράμετροι λήψης δεδομένων (Data acquisition parameters)	63
3.6	Καταγραφή ενεργειακών φασμάτων.....	66
3.7	Πειραματικό μέρος & μέθοδοι.....	68
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	70
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ.....	70

4.1 Φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου S10362-33-100C	71
4.2 Φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου S10362-33-050C	72
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	74
ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ	75
ΑΝΑΓΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ	76
Βιβλιογραφία	78

1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΘΕΩΡΙΑΣ

1.1 Ραδιενέργεια (Radioactivity)

Με τον όρο ραδιενέργεια (Radioactivity) αναφερόμαστε στο φαινόμενο όπου ένας ασταθής πυρήνας (μητρικός) μετασχηματίζεται αυθόρμητα ή λόγω εξωτερικής διέγερσης σε σταθερό (θυγατρικός), με ταυτόχρονη έκλυση ηλεκτρομαγνητικής ή σωματιδιακής ακτινοβολίας. Η μετάπτωση αυτή καλείται **μεταστοιχείωση**. Ο πυρήνας που προκύπτει (θυγατρικός) ανήκει σε διαφορετικό χημικό στοιχείο και συνήθως δεν είναι ούτε αυτός σταθερός. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επανάληψη του μετασχηματισμού και την εκπομπή ακτινοβολίας, έως ότου αυτός σταθεροποιηθεί. Το φαινόμενο της ραδιενέργειας, αναφέρεται επίσης στην βιβλιογραφία ως «ραδιενεργός διάσπαση» και οι ασταθείς πυρήνες ως «ραδιενεργά ισότοπα».

Ο γενικός νόμος της ραδιενεργούς διάσπασης ορίζεται ως:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t} \quad (1.1)$$

όπου N : μη μετασχηματισμένοι πυρήνες έπειτα από χρόνο t

N_0 : αρχική ποσότητα πυρήνων, για χρόνο $t=0$

λ : σταθερά διάσπασης (η πιθανότητα να συμβεί μετασχηματισμός ανά μονάδα χρόνου) και μετράται σε s^{-1} .

Η ενεργότητα ή ρυθμός ραδιενεργού φθοράς (ή απλούστερα **ραδιενέργεια-A**) ορίζεται ως ο αριθμός των ραδιενεργών διασπάσεων (dN) σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (dt).

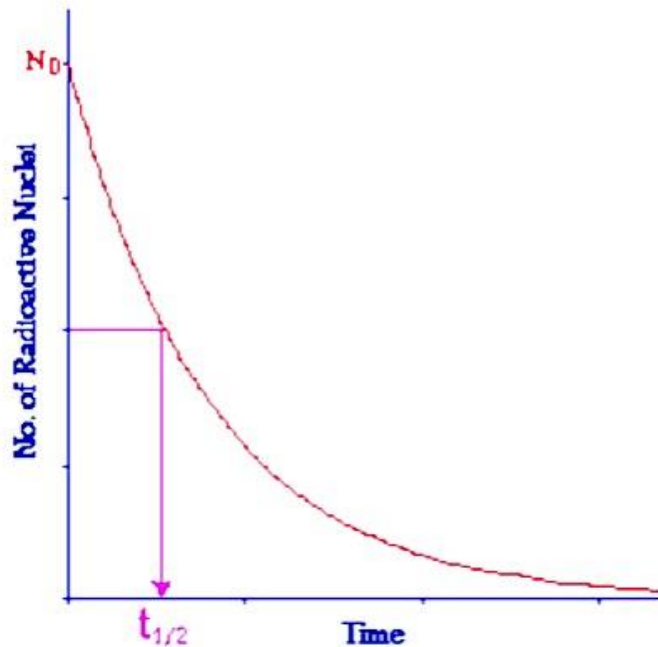
Η ελάττωση της ενεργότητας ενός ραδιοϊσοτόπου συναρτηθεί του χρόνου και εκφράζεται με την σχέση:

$$A = A_0 \times e^{-\lambda t} \quad (1.2)$$

όπου A : ενεργότητα έπειτα από χρόνο t

A_0 : αρχική ενεργότητα, για χρόνο $t=0$

λ : σταθερά διάσπασης



Σχήμα 1.1: Γραφική παράσταση του νόμου της ραδιενέργειας.[2]

Μονάδες μέτρησης για την ενεργότητα είναι το Curie ($1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ διασπάσεις/s) και το Becquerel ($1 \text{ Bq} = 1$ διάσπαση/s).

Τέλος, ο χρόνος ημιζωής (half life) ή χρόνος υποδιπλασιασμού $t_{1/2}$ ενός ραδιοϊσοτόπου ονομάζεται ο χρόνος μετά το πέρας του οποίου η αρχική ποσότητα των ραδιενεργών πυρήνων θα έχει γίνει η μισή.

Μπορούμε λοιπόν να πούμε ότι ισχύει :

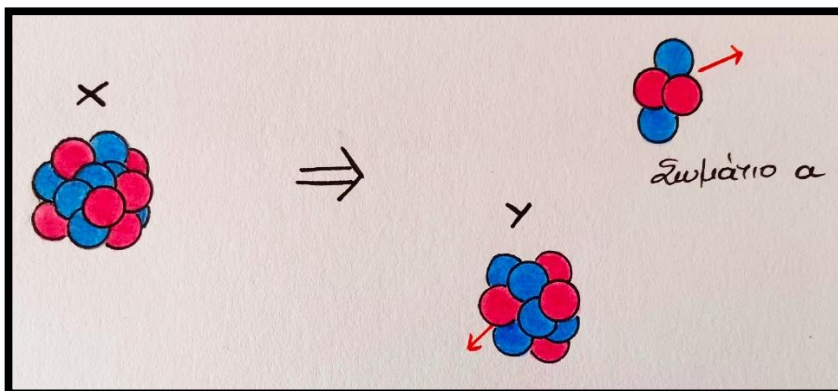
$$N_t = \frac{N_0}{2} \quad (1.3)$$

[1][2].

1.1.1 Διάσπαση α

Τα σωματίδια άλφα (α) είναι σύνθετα σωματίδια τα οποία αποτελούνται από δύο νετρόνια και δύο πρωτόνια στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Ένα σωματίδιο άλφα είναι πανομοιότυπο με τον πυρήνα ενός κανονικού ατόμου ηλίου (${}^4_2\text{He}^{++}$), δηλαδή ενός διπλά ιονισμένου ατόμου ηλίου. Εκπέμπονται αυθόρμητα από τον πυρήνα κατά τη διάρκεια μιας μορφής ραδιενεργούς διάσπασης, που ονομάζεται διάσπαση άλφα. Αυτού του είδους η εκπομπή παρατηρείται σε βαρείς πυρήνες

με $A > 200$. Οι πυρήνες αυτοί είναι ασταθείς λόγω της αύξησης των απωστικών δυνάμεων που αναπτύσσονται μεταξύ των πρωτονίων. Μετά την εκπομπή οι πυρήνες γίνονται σταθεροί και ο μαζικός και ατομικός τους αριθμός μειώνεται. Τα σωματίδια άλφα (ονομάζονται επίσης ακτινοβολία άλφα ή ακτίνες άλφα) έχουν ενέργεια που κυμαίνεται από 4 έως 9 MeV και συνεπώς διαθέτουν γραμμικό ενεργειακό φάσμα. Ο θυγατρικός πυρήνας που προκύπτει έχει περίσσεια ενέργειας την οποία εκπέμπει υπό μορφή ακτινοβολίας γ . [1][3]



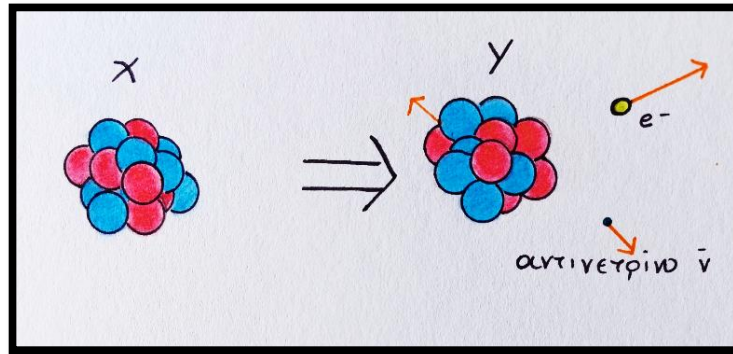
Σχήμα 1.2: Διάσπαση α

1.1.2 Διάσπαση β

Στην διάσπαση β ανήκουν τρία είδη διασπάσεων, τα οποία έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό την διατήρηση του μαζικού αριθμού (A) του ατόμου και την μεταβολή κατά ένα πρωτόνιο ή νετρόνιο του πυρήνα που διασπάται. Δηλαδή στη β -διάσπαση τα προϊόντα που προκύπτουν είναι **ισοβαρή** προϊόντα διασπάσεως.[4]

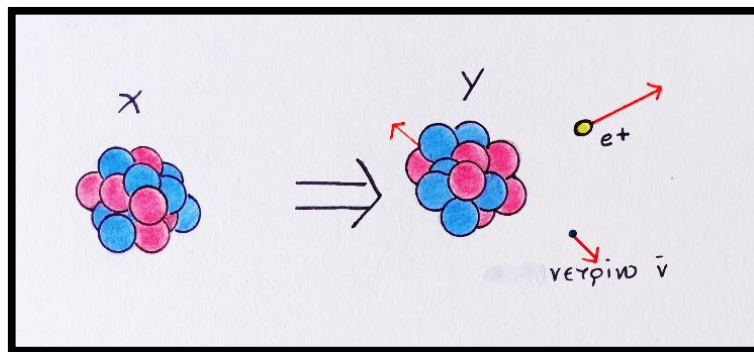
Τα τρία είδη μετασχηματισμών παρουσιάζονται παρακάτω:

- a. **Η εκπομπή σωματιδίου β^- (ηλεκτρόνιο)**, όπου ένα νετρόνιο του πυρήνα μετασχηματίζεται σε πρωτόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου και του αντινετρίνου του.



Σχήμα 1.3: Διάσπαση β^-

- b. Η εκπομπή σωματιδίου β^+ (ποζιτρόνιο), όπου ένα πρωτόνιο του πυρήνα μετατρέπεται σε νετρόνιο με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ποζιτρονίου και του νετρίνου του ηλεκτρονίου.



Σχήμα 1.4: Διάσπαση β^+

- c. Η ηλεκτρονιακή σύλληψη (Η.Σ.), ο πυρήνας δεσμεύει ένα περιφερειακό ηλεκτρόνιο, κυρίως από την στιβάδα K για να εξουδετερώσει το φορτίο ενός πρωτονίου του πυρήνα μετατρέποντας το σε νετρόνιο. [1][4]

1.1.3 Ακτινοβολία γ

Εκπέμπεται από το εσωτερικό του πυρήνα και είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσεως.

Οι δύο προηγούμενες διασπάσεις (α και β) αφήνουν τον θυγατρικό πυρήνα σε διεγερμένη κατάσταση, ο οποίος κατά την αποδιέγερσή του εκπέμπει ένα ή περισσότερα φωτόνια (ακτίνες- γ). Η ακτινοβολία- γ έχει χαρακτηριστική ενέργεια η οποία ισούται με τη διαφορά της ενέργειας της αρχικής και της τελικής καταστάσεως της μετάπτωσης και εκφράζεται από την σχέση:

$$E_1 - E_2 = h\nu \quad (1.4)$$

όπου E_1 : η ενέργεια διεγερμένης κατάστασης

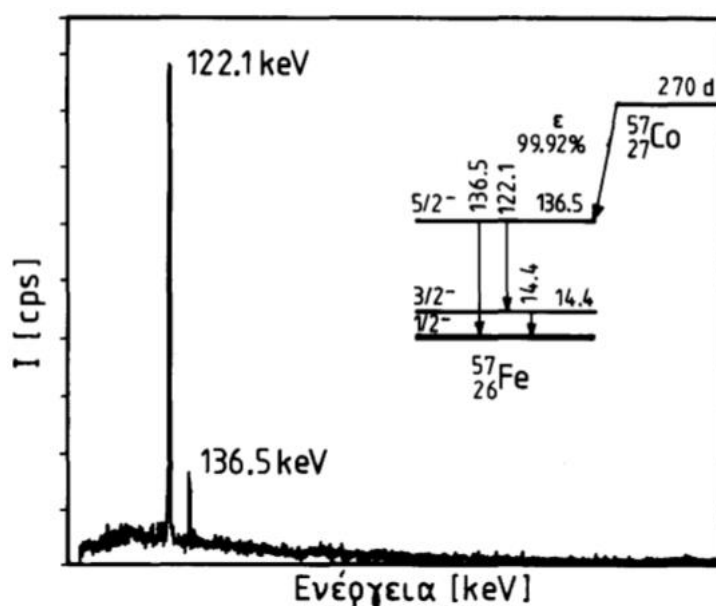
E_2 : η ενέργεια μετά την αποδιέγερση

h : σταθερά του Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34}$ J s)

ν : η συχνότητα του φωτονίου και είναι χαρακτηριστική για κάθε πυρήνα.

Η ενέργειες $h\nu$ έχουν συνήθως υψηλότερες τιμές από αυτές των ακτίνων-X που παράγονται στις λυχνίες και χαμηλότερες από αυτές των επιταχυντών.

Ο μαζικός (A) και ο ατομικός (Z) αριθμός των πυρήνων παραμένουν αμετάβλητοι.[1][4]



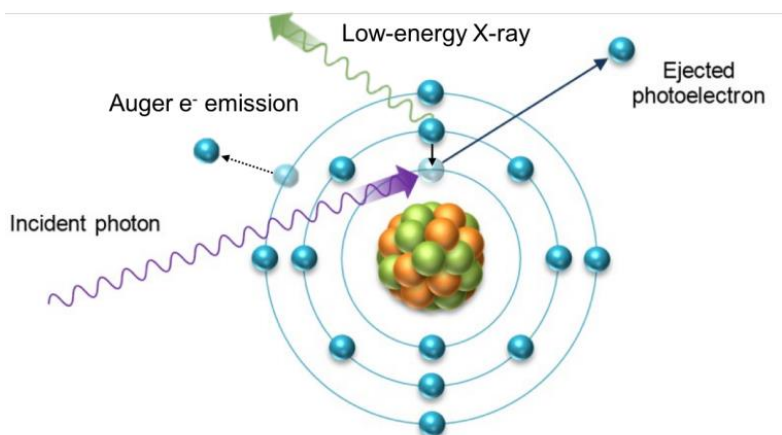
Σχήμα 1.5: Ενεργειακό φάσμα της ακτινοβολίας-γ του ^{57}Co . [4]

1.2 Αλληλεπιδράσεις ακτινοβολίας με την ύλη

Οι ακτίνες-γ, όπως και οι ακτίνες X, κατά την διαδρομή τους μέσα στην ύλη, εξασθενούν (μείωση της έντασης I της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) με τρόπο που εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό (Z), την πυκνότητα αλλά και από την ενέργεια των φωτονίων-γ. Υπάρχουν τέσσερα φαινόμενα τα οποία συμβαίνουν κατά τη διέλευση της ακτινοβολίας μέσα στην ύλη. [1]

1.2.1 Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (Photoelectric Effect)

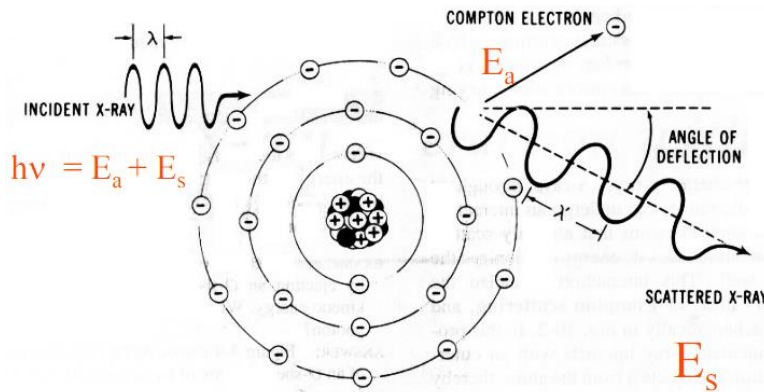
Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συμβαίνει κατά την αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με τα ηλεκτρόνια των ατόμων. Πιο συγκεκριμένα, ένα φωτόνιο συγκρούεται με ένα ισχυρά συνδεδεμένο ηλεκτρόνιο των εσωτερικών στιβάδων (K,L,...) του ατόμου και το εκτοπίζει. Το ηλεκτρόνιο αυτό μετονομάζεται σε φωτοηλεκτρόνιο. Μετά την σύγκρουση το φωτόνιο εξαφανίζεται. Μέρος της ενέργειας του αρχικού φωτονίου καταναλώνεται για την απόσπαση του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα και η υπολειπόμενη αποδίδεται στο ηλεκτρόνιο υπό μορφή κινητικής ενέργειας. Έτσι μένει μία θέση κενή στην στιβάδα από την οποία αποσπάστηκε το ηλεκτρόνιο (κυρίως την K). Στην συνέχεια, ένα ηλεκτρόνιο υψηλότερης ενεργειακής στιβάδας καλύπτει την κενή θέση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή της περισσευούμενης ενέργειας υπό μορφή ακτινοβολίας και την δημιουργία ενός νέου φωτόνιο-χ (χαρακτηριστική ακτινοβολία) ή ηλεκτρονίου Auger. Η πιθανότητα να συμβεί το φαινόμενο αυτό είναι ανάλογη της ενέργειας των αρχικών φωτονίων ($1/E^3$) και του ατομικού αριθμού του υλικού (Z^3). [1][5]



Σχήμα 1.6 : Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (Photoelectric Effect) [8]

1.2.2 Ανελαστική Σκέδαση (Φαινόμενο Compton)

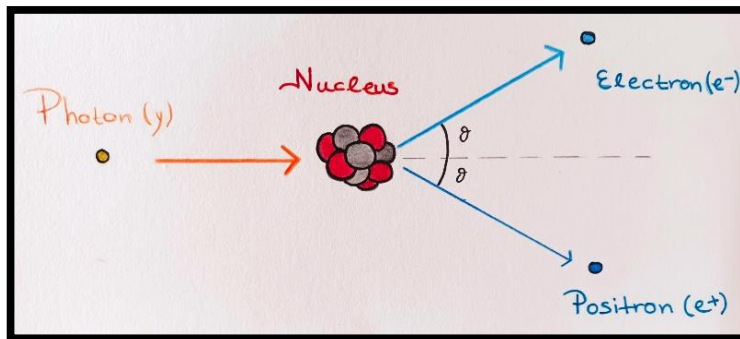
Το φαινόμενο Compton συμβαίνει κατά την αλληλεπίδραση ενός φωτονίου με τα ένα ελεύθερο ή χαλαρά συνδεδεμένο ηλεκτρόνιο των εξωτερικών στοιβάδων των ατόμων. Μετά την «σύγκρουση», μέρος της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου αποδίδεται στο ηλεκτρόνιο με την μορφή κινητικής ενέργειας και το υπόλοιπο παραμένει στο φωτόνιο το οποίο σκεδάζεται προς άλλη διεύθυνση. [1]



Σχήμα 1.7: Φαινόμενο Compton [9]

1.2.3 Δίδυμη Γένεση (Pair Production)

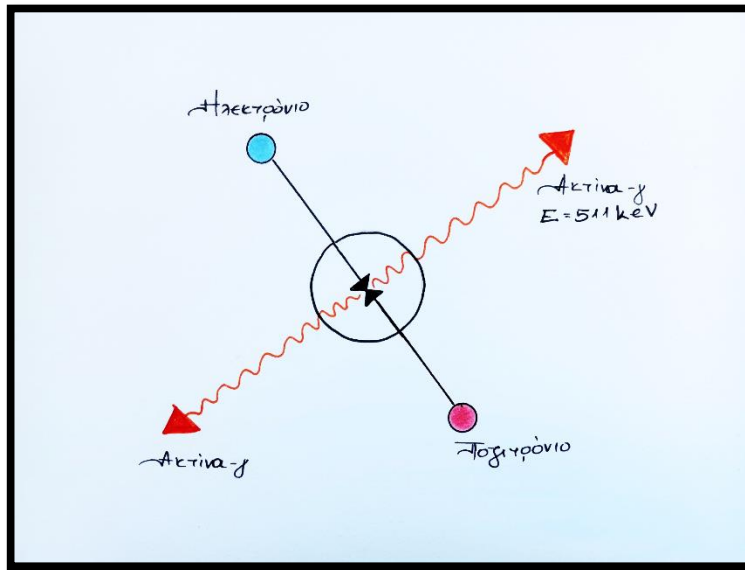
Κατά την δίδυμη γένεση έχουμε μετατροπή ενέργειας σε ύλη. Ένα φωτόνιο με επαρκή ενέργεια ($E_\phi \geq 1,022 \text{ keV}$) αλληλεπιδρά με τον πυρήνα ενός ατόμου και κατά αυτόν τον τρόπο το φωτόνιο εξαφανίζεται και παράγεται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου- ποζιτρονίου με ενέργειες, κατά απόλυτη τιμή, που αντιστοιχούν σε 511 keV το καθένα. Το φαινόμενο αυτό είναι επίσης γνωστό ως παραγωγή ζεύγους (pair production). [1]



Σχήμα 1.8: Δίδυμη γένεση

1.2.4 Εξαύλωση (Annihilation)

Το αντίστροφο φαινόμενο της δίδυμης γένεσης καλείται εξαύλωση. Δηλαδή, ένα ποζιτρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο όταν βρίσκονται σε κατάσταση ηρεμίας, συγκρούονται, εξαφανίζονται και την θέση τους παίρνουν δύο φωτόνια τα οποία κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις (180°) και έχουν ενέργειες 511 keV κατά απόλυτη τιμή το καθένα. [1]



Σχήμα 1.9: Εξαύλωση

1.3 Σπινθηριστές (Scintillators)

Ως σπινθηριστές ορίζουμε τα υλικά με υψηλή πυκνότητα τα οποία όταν απορροφήσουν ιοντίζουσα ακτινοβολία, μετατρέπουν μέρος της ενέργειάς τους σε ορατό φως εκπέμποντας «σπινθηρισμούς». Η μορφή των σπινθηριστών εξαρτάται από την εφαρμογή και μπορεί να είναι κρύσταλλοι, κεραμικοί ή πολυκρυσταλλικοί ή τέλος, σε μορφή πούδρας. Όταν αυτοί έρθουν σε κατάλληλη ζεύξη με κάποια ενισχυτική βαθμίδα (κλασικοί φωτοπολλαπλασιαστές PMTs, SiPMs ή CCDs) , μετατρέπουν το ασθενές ορατό φως σε μετρήσιμα ηλεκτρικά σήματα παρέχοντας χρήσιμες πληροφορίες για την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. [6] [7]

1.3.1 Λειτουργία & χαρακτηριστικά σπινθηριστών

Η βασική ιδιότητα των σπινθηριστών ονομάζεται **φωταύγεια** (*luminescence*). Κατά το φαινόμενο αυτό, όταν ο σπινθηριστής απορροφήσει ορισμένη ενέργεια (θερμότητα, ακτινοβολία κ.α.), επανεκπέμπει την ενέργεια αυτή υπό μορφή ορατών φωτονίων. Το φαινόμενο αυτό διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους ανάλογα με την ταχύτητα που γίνεται η εκπομπή του φωτός. Αν η επανεκπομπή πραγματοποιηθεί μέσα σε χρόνο 10^{-8} s από την απορρόφηση, τότε το φαινόμενο λέγεται **φθορισμός** (*fluorescence*). Αν όμως καθυστερεί (μερικά μsec έως και κάποιες ώρες), τότε λέγεται **φωσφορισμός** (*phosphorescence* ή *afterglow*).

Η εκπομπή του ορατού φωτός στην διάρκεια του χρόνου περιγράφεται από τον παρακάτω εκθετικό τύπο:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \exp\left[-\frac{t}{\tau_d}\right] \quad (1.5)$$

όπου N : αριθμός των ορατών φωτονίων που εκπέμπονται σε χρόνο t

N_0 : συνολικός αριθμός εκπεμπόμενων φωτονίων

τ_d : σταθερά αποδιέγερσης.

Για να χαρακτηριστεί ένας σπινθηριστής καλός, θα πρέπει αρχικά η σταθερά αποδιέγερσης τ_d να είναι μικρή. Επίσης, θα πρέπει να είναι συμβατός (μήκος κύματος) με τον αντίστοιχο φωτοπολλαπλασιαστή με τον οποίον έρχεται σε επαφή και το φως που παράγει να μπορεί να μεταδίδεται εύκολα (διαπερατότητα). Τέλος, ένα στοιχείο ενός καλού σπινθηριστή είναι η υψηλή απόδοση μετατροπής της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε ορατό φως. [1][6]

1.3.2 Είδη σπινθηριστών

1.3.2.1 Σπινθηριστές αερίου

Είναι φτιαγμένοι από ευγενή αέρια, όπως Κρυπτό (Kr), Άζωτο (N), Αργό (Ar) και Ξένο (Xe) μαζί με Ήλιο (He). Η διέγερση των ατόμων γίνεται ξεχωριστά και έχουν πολύ μικρό χρόνο απόκρισης (1 nsec). Παρόλα αυτά δεν είναι συμβατοί με τους φωτοπολλαπλασιαστές καθώς το φως που εκπέμπουν είναι στο εύρος του υπεριώδους όπου οι PMTs όσο και οι SiPMs οι δεν είναι ευαίσθητοι.[6]

1.3.2.2 Οργανικοί σπινθηριστές

Οι οργανικοί σπινθηριστές είναι μείγματα αρωματικών κυκλικών υδρογονανθράκων και μπορεί να έχουν κρυσταλλική, υγρή ή πλαστική μορφή. Όπως και οι σπινθηριστές αερίου, έχουν μικρό χρόνο απόκρισης (μερικά nsec). Σε αυτήν την κατηγορία σπινθηριστών η διέγερση γίνεται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια σθένους του μορίου και όχι του ατόμου χάνοντας ένα μέρος της ενέργειάς τους. Κατά αυτόν τον τρόπο, τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από την ζώνη διέγερσης στην θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας φωτόνια μικρότερης ενέργειας στο φάσμα του ορατού. Τα φωτόνια αυτά δεν είναι ικανά να επαναδιεγείρουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια σθένους του μορίου. Λέμε τότε ότι ο σπινθηριστής είναι διαφανής στο φως που γεννά. [6]

1.3.2.3 Ανόργανοι σπινθηριστές

Οι ανόργανοι σπινθηριστές είναι κρυσταλλικές ενώσεις αλογονούχων αλκαλίων (CsI, NaI κλπ) με κάποια προσθήκη ενεργοποιητή (Na, Tl κλπ). Σε αυτή την μορφή παρουσιάζουν το φαινόμενο του φθορισμού και οι προσμίξεις διαφόρων υλικών ευνοούν πολύ την εκπομπή σπινθηρισμών. Αυτοί οι τύποι κρυστάλλων συναντώνται κυρίως σε συστήματα SPECT και σε εφαρμογές φασματοσκοπίας-γ. Μερικοί μη αλκαλικοί κρύσταλλοι που χρησιμοποιούνται ως σπινθηριστές σε συστήματα τομογραφίας εκπομπής ποζιτρονίων (PET) είναι το $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO), το $\text{Lu}_2(\text{SiO}_4)\text{O}:\text{Ce}$ (LSO) κ.α.



Σχήμα 1.10: Σπινθηριστές τύπου $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO) διαφόρων σχημάτων. [11]

Οι κρύσταλλοι αυτοί που μελετώνται έχουν πιο γρήγορη απόκριση (decay time) από τους προηγούμενους, όπου ο χρόνος απόκρισης είναι το πηλίκο του αριθμού των εκπεμπόμενων οπτικών φωτονίων ανά μονάδα χρόνου (nsec). Παρουσιάζουν όμως ένα βασικό μειονέκτημα. Είναι υγροσκοπικοί και χρειάζεται να κατασκευαστεί περίβλημα (π.χ. γυάλινο περίβλημα ή

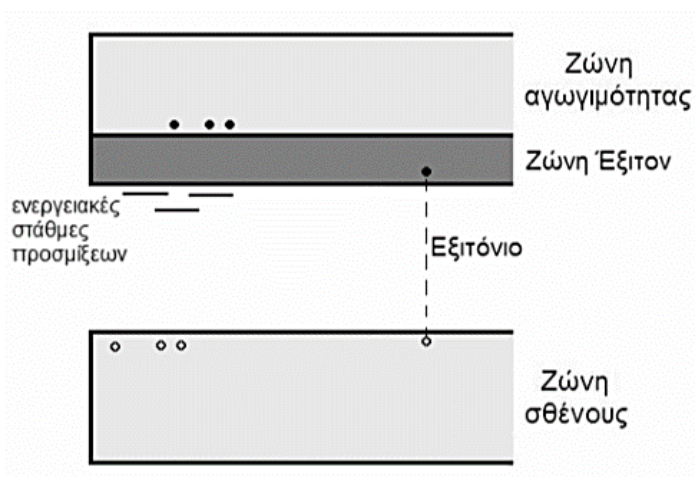
περίβλημα αλουμινίου) που να τους περικλείει. Επίσης αυτό το περίβλημα (housing) προστατεύει τους σπινθηριστές από την υγρασία του περιβάλλοντος.

Ο υψηλός ατομικός αριθμός και η μεγάλη τους πυκνότητα αυξάνουν την ικανότητα τους στην ανίχνευση της ακτινοβολίας. Επιπλέον, έχουν πολύ καλή διακριτική ικανότητα λόγω της υψηλής απόδοσης φωτός (light yield) σε ορατή ακτινοβολία.[6]

1.3.2.3.1 Μηχανισμός Σπινθηρισμού

Η διαδικασία του σπινθηρισμού στους ανόργανους σπινθηριστές έχει δύο παραδοχές. Αρχικά, διακρίνονται δύο ενεργειακές ζώνες. Η **ζώνη σθένους** (valence band) και η ενεργειακά υψηλότερη, **ζώνη αγωγιμότητας** (conduction band). Μεταξύ των δύο αυτών ζωνών υπάρχει η **ζώνη ενεργειακού χάσματος** (energy band-gap) Όταν ένα σωματίδιο εισέρθει στον κρύσταλλο είτε θα αλληλεπιδράσει με τον κρυσταλλικό πλέγμα διεγείροντας από την ζώνης σθένους ένα δέσμιο ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο αυτό μεταπηδά στην ζώνη αγωγιμότητας (ιονισμός) δημιουργώντας έτσι ένα ζεύγος **ηλεκτρονίου –οπής** (electron-hole).

Διαφορετικά, αν η ενέργεια που μεταφέρεται στο δέσμιο ηλεκτρόνιο δεν επαρκεί για να μεταφερθεί στην ζώνη αγωγιμότητας, τότε το ηλεκτρόνιο μεταπηδά σε μια ενεργειακή ζώνη κάτω από τη ζώνη σθένους (exciton band) και έτσι δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου –οπής το οποίο ονομάζεται **εξιτόνιο** (exciton).



Σχήμα 1.11: Διάγραμμα των ενεργειακών ζωνών σε έναν ανόργανο σπινθηριστή.

Σε αυτή την φάση το ζεύγος ηλεκτρονίου- οπής εξακολουθεί να είναι ζεύγος, και μπορεί να κινείται ελεύθερα μέσα στον κρύσταλλο. Σε αυτές τις καταστάσεις δεσμεύονται οπές (ελεύθερες

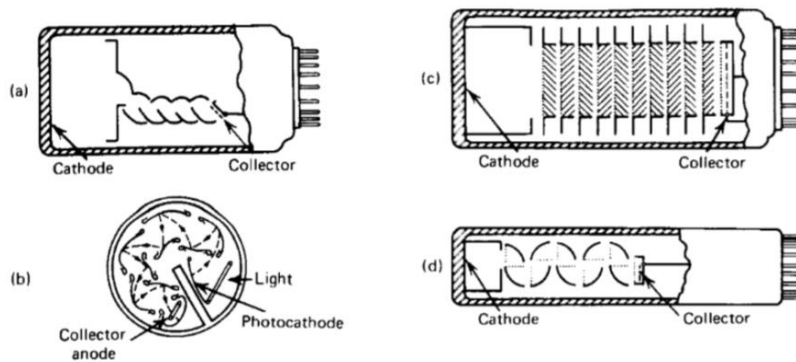
οπές ή οπές από τα εξιτόνια) και τα ηλεκτρόνια που φθάνουν στις στάθμες αυτές μεταβαίνουν στην θεμελιώδη ενεργειακή τους κατάσταση με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας.

Όταν στον κρύσταλλο δεν υπάρχουν προσμίξεις η ενέργεια των φωτονίων που εκπέμπονται ισούται με την διαφορά της ενέργειας της ζώνης σθένους- ζώνης αγωγιμότητας η οποία είναι επαρκής ώστε να απορροφηθεί και να προκαλέσει μεταπήδηση του ηλεκτρονίου στην ζώνη αγωγιμότητας. Αντίθετα με την παρουσία προσμίξεων τα φωτόνια διαθέτουν χαμηλότερη ενέργεια η οποία δεν είναι δυνατόν να απορροφηθεί. [1][6]

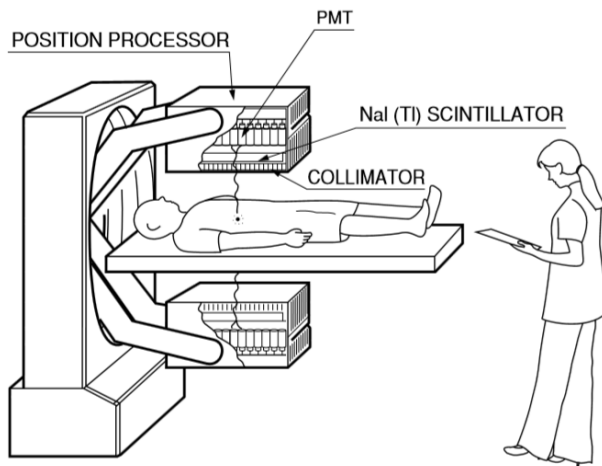
1.4 Φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier tubes -PMTs)

Οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι ευαίσθητες ηλεκτρονικές διατάξεις που μετατρέπουν το ορατό φως που προσπίπτει στην επιφάνειά τους από τον σπινθηριστή σε μετρήσιμο ενισχυμένο ηλεκτρικό παλμό ανάλογο της έντασης του. Μετατρέπουν το ορατό φως, που μπορεί να αποτελείται από μερικές εκατοντάδες φωτόνια, σε παλμό ρεύματος χωρίς μεγάλο ποσοστό θορύβου. Δομούνται από ένα υάλινο, συνήθως περίβλημα που δημιουργεί κατάλληλες συνθήκες κενού ώστε τα ηλεκτρόνια χαμηλής ενέργειας να επιταχυνθούν μέσα στο ηλεκτρικό πεδίο. Επιπλέον, τα δύο βασικά τμήματά του είναι η φωτοκάθοδος συζευγμένη με μία δομή για τον πολλαπλασιασμό των ηλεκτρονίων και στην έξοδό του η άνοδος. [13]

Υπάρχουν διάφοροι τύποι φωτοπολλαπλασιαστών, όπως π.χ. φωτοπολλαπλασιαστές με δυνόδους, διαύλου ή υβριδικό κλπ και αποτελούν βασικά στοιχεία ενός συστήματος SPECT ή PET. Ακόμη μερικοί τύποι φωτοπολλαπλασιαστών είναι : α. εστιασμένη γραμμική δομή, β. κυκλικό πλέγμα, γ. με βενετσιάνικη αρχιτεκτονική, δ. διασταυρωμένων δυνόδων -πλέγμα κτλ. (Σχήμα1.12). [1][13]



Σχήμα 1.12: Διαμορφώσεις ορισμένων κοινών τύπων φωτοπολλαπλασιαστών PMTs α. εστιασμένη γραμμική δομή, β. κυκλικό πλέγμα, γ. βενετσιάνικης αρχιτεκτονικής, δ πλέγματος. [13]



Σχήμα 1.13: Γ-κάμερα [12]

1.4.1 Λειτουργία φωτοπολλαπλασιαστών

Τα φωτόνια προσπίπτουν σε φωτοευαίσθητο υλικό που ονομάζεται **φωτοκάθοδος** και αποτελεί το πρώτο κομμάτι του φωτοπολλαπλασιαστή. Χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτής της

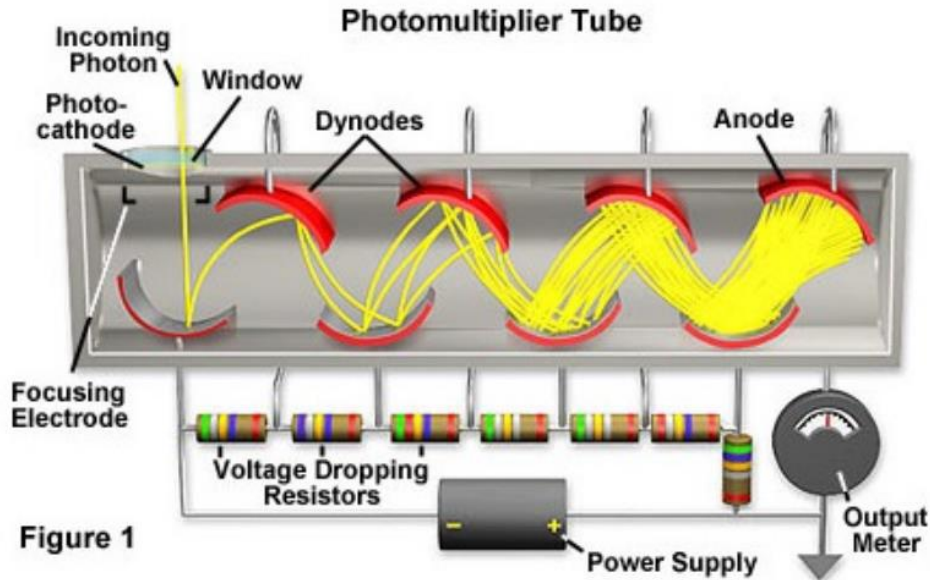


Figure 1

Σχήμα 1.14: Διάγραμμα φωτοπολλαπλασιαστή PMT [5].

φωτοευαίσθητης περιοχής είναι η εκπομπή ηλεκτρονίων (**φωτοηλεκτρόνια**) μετά την πρόσπτωση των φωτονίων πάνω της. Καθώς τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από την φωτοκάθοδο, εστιάζονται προς στο πρώτο πολωμένο ηλεκτρόδιο (**δύνοδος**). Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι δύνοδοι με κατάλληλο σχήμα που βρίσκονται σε διαδοχικά αυξανόμενο θετικό δυναμικό, με χρήση ενός διαιρέτη τάσης, ώστε να έλκουν τα ηλεκτρόνια και ο αριθμός τους κυμαίνεται από 6 έως και 20. Ο εξερχόμενος αριθμός φωτοηλεκτρονίων από κάθε δύνοδο διαδοχικά είναι πολλαπλάσιος λόγω της ενδιάμεσης επιτάχυνσης. Κάθε ηλεκτρόνιο αποκτά μία ποσότητα κινητικής ενέργειας η οποία είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού μεταξύ των δυνόδων. Το υλικό που υπάρχει στην επιφάνεια της φωτοκαθόδου (Cs-Sb ή Mg-Ag) ευνοεί την **δευτερογενή εκπομπή ηλεκτρονίων** και κατά συνέπεια την ενίσχυση του ηλεκτρικού παλμού που φτάνει τελικά στην άνοδο.

Ο συνολικός **συντελεστής πολλαπλασιασμού** (δ) για μια μεμονωμένη δύνοδο δίνεται από την σχέση:

$$\delta = \frac{\text{αριθμός δευτερογενούς εκπομπής } e^-}{\text{προτεύον προσπίπτον } e^-} \quad (1.6)$$

και θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη τιμή για μέγιστη ενίσχυση στον σωλήνα του φωτοπολλαπλασιαστή.

Η συνήθης τάση λειτουργίας ενός φωτοπολλαπλασιαστή είναι της τάξης των 1000 V με συνολικό παράγοντα πολλαπλασιασμού συνήθως 10^6 . [1][13]

1.4.2 Παράμετροι λειτουργίας των φωτοπολλαπλασιαστών

Η απόδοση σε έναν ανιχνευτή ακτινοβολίας επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, οι οποίοι παρατίθενται παρακάτω:

- i. **Από την τάση λειτουργίας του:** δεν πρέπει να ξεπερνάει ένα συγκεκριμένο όριο, καθώς πέρα από αυτό παρατηρούνται ασταθείς συμπεριφορές. Μία ακόμη παράμετρος που επηρεάζεται από την τάση λειτουργίας είναι η *ευαισθησία* του φωτοπολλαπλασιαστή και εξαρτάται από την απόσταση που έχουν μεταξύ τους οι διαδοχικές δύνοδοι καθώς και οι διαφορά δυναμικού τους.
- ii. **Από τα φωτοηλεκτρόνια της φωτοκαθόδου:** τα φωτοηλεκτρόνια που δημιουργήθηκαν στην φωτοκάθοδο έχουν διαφορετικές κινητικές ενέργειες και συνεπώς φτάνουν στην πρώτη δύνοδο σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.
- iii. **Το σήμα εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή επηρεάζεται από τις πηγές θορύβου.** Μπορούμε να κατηγοριοποιήσουμε τις πηγές θορύβου στις παρακάτω:
 - Στο ρεύμα σκότους, το οποίο παρουσιάζεται στην δίοδο του φωτοπολλαπλασιαστή ακόμα και με την απουσία της προσπίπτουσας σε αυτήν ακτινοβολίας.
 - Ο θόρυβος που προκύπτει από τον μη ιδανικό πολλαπλασιασμό των φωτοηλεκτρονίων.
 - Ο θόρυβος από την φωτοκάθοδο, ο οποίος προκύπτει από την διακύμανση στην παραγωγή φωτοηλεκτρονίων μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου.
- iv. **Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος:** η αύξησή της συνεπάγεται την αύξηση του ρεύματος σκότους.
- v. **Τα εξωτερικά μαγνητικά και ηλεκτρικά πεδία.** Η ύπαρξή τους προκαλεί την εκτόπιση των φωτοηλεκτρονίων από τις τροχιές τους υποβαθμίζοντας έτσι την ενίσχυση στο τελικό σήμα.
- vi. **Η συνεχής χρήση του φωτοπολλαπλασιαστή.** Οι ιοντίζουσες ακτινοβολίες που προσπίπτουν επάνω του καθώς και η έκθεσή του στο έντονο φως, μπορεί να προκαλέσουν σημαντικές βλάβες στα ηλεκτρονικά του μέρη. [1]

1.4.3 Παράμετροι αξιολόγησης φωτοπολλαπλασιαστών

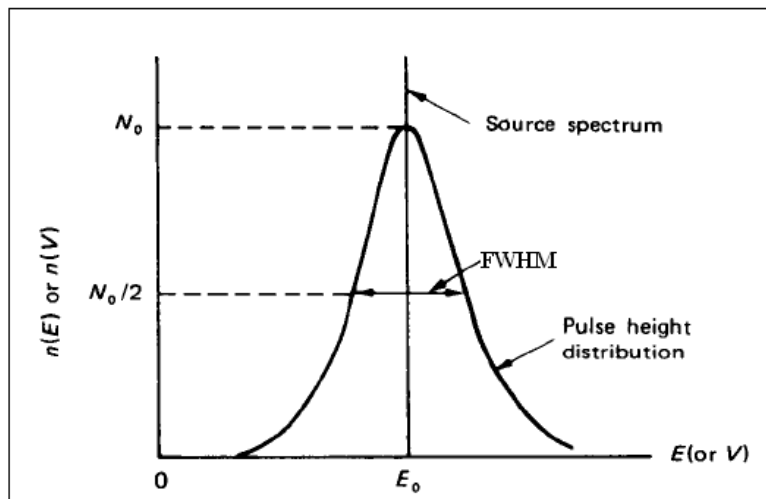
➤ Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα (Energy Resolution):

Ενεργειακή διακριτική ικανότητα ορίζεται η ικανότητα του συστήματος να ξεχωρίζει φωτόνια τα οποία έχουν πολύ μικρή διαφορά στις ενέργειές τους. Ακόμη μπορεί να οριστεί ως η ικανότητα του να διακρίνει τα πρωτογενή από τα δευτερογενή φωτόνια αλλά και την φωτοκορυφή στο φάσμα του. Ορίζεται ως:

$$R_E = \frac{\Delta E}{E} \quad (1.7)$$

όπου ΔE είναι το πλήρες πλάτος στο μισό του μεγίστου (FWHM-Full width and half maximum) και E η ενέργεια των μονοενεργειακών φωτονίων. Η θέση του E στο φάσμα λέγεται κεντροειδές. Η ενεργειακή διακριτική ικανότητα εκφράζεται σε ποσοστό και οι συνήθεις τιμές που χρησιμοποιούνται στη φασματοσκοπία ακτίνων γ είναι στην περιοχή 5-10%. Όσο μικρότερη η τιμή της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας τόσο καλύτερος είναι και ο ανιχνευτής.

[1][13]



Σχήμα 1.15: Ενεργειακή Ανάλυση στη Φασματομετρία- γ . [10]

➤ Απόδοση (Detection Efficiency)

Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας δημιουργούν έναν παλμό στην έξοδό τους για κάθε κβάντο ακτινοβολίας που αλληλεπιδρά με την ενεργό περιοχή τους. Αλληλεπιδράσεις, με μορφή ιονισμού και διεγέρσεων, για τα σωματία α ή β (πρωτογενής ακτινοβολία) λαμβάνουν χώρα με την είσοδο

του σωματιδίου στην ενεργό περιοχή του ανιχνευτή και κατά την διαδρομή του σχηματίζει πολλαπλά ζεύγη ιόντων. Εξασφαλίζεται με αυτόν τον τρόπο ότι ο παλμός που θα προκύψει είναι αρκετά μεγάλος για να καταγραφεί. Τότε ο ανιχνευτής λέγεται πως έχει απόδοση μέτρησης 100%. Αντίθετα για τις ακτίνες-γ και τα νετρόνια, που είναι περισσότερο διεισδυτικές, η απόδοση είναι μικρότερη καθώς οι ακτινοβολίες αυτές μπορεί να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις μεταξύ των αλληλεπιδράσεων. Είναι, λοιπόν, σημαντικό να ορίσουμε επακριβώς την απόδοση ενός ανιχνευτή, ώστε να γίνει η συσχέτιση των μετρούμενων παλμών με τον αριθμό των σωματιδίων που προσπίπτουν σε αυτόν.

Μπορούμε να χωρίσουμε την απόδοση ενός ανιχνευτικού συστήματος σε δύο κατηγορίες.

i. Απόλυτη Απόδοση (absolute efficiency):

$$E_{abs} = \frac{\text{αριθμός καταγραφόμενων παλμών}}{\text{αριθμός ακτίνων που εκπέμπονται από την πηγή}} \quad (1.8)$$

και έχουν άμεση εξάρτηση από τις ιδιότητες του ανιχνευτή αλλά και από τις λεπτομέρειες της γεωμετρίας μέτρησης (κυρίως την απόσταση από την πηγή στον ανιχνευτή).

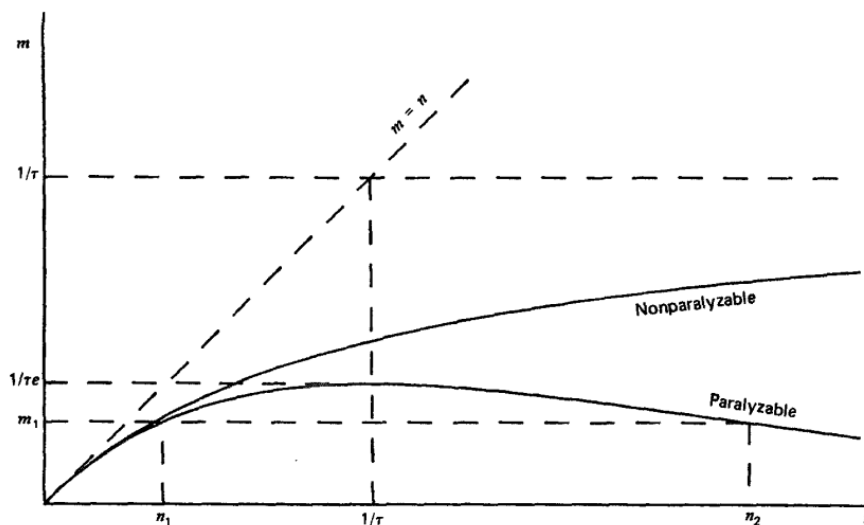
ii. Εσωτερική Απόδοση (intrinsic efficiency):

$$E_{int} = \frac{\text{αριθμός καταγραφόμενων παλμών}}{\text{αριθμός ακτίνων που προσπίπτουν στον ανιχνευτή}} \quad (1.9)$$

Και εξαρτάται από το υλικό και το πάχος του ανιχνευτή και την ενέργεια της ακτινοβολίας. [13]

➤ **Νεκρός χρόνος (dead time, τ):**

Σε ένα ανιχνευτικό σύστημα, ο νεκρός χρόνος, αναφέρεται στο ελάχιστο χρονικό διάστημα, μεταξύ δύο μετρήσεων, προκειμένου να καταγραφούν ως ξεχωριστοί παλμοί. Ο χρόνος αυτός έχει ιδιαίτερη βαρύτητα στις περιπτώσεις που απαιτούνται υψηλοί ρυθμοί μετρήσεων και είναι της τάξης των μsec (1,5-8 μsec). [1][13]



Σχήμα 1.16: Διακύμανση του παρατηρούμενου ρυθμού m ως συνάρτηση του πραγματικού ρυθμού n για δύο μοντέλα απωλειών νεκρού χρόνου. [13]

1.5 Φασματοσκοπία ακτίνων- γ

1.5.1 Μορφή ενεργειακών φασμάτων ακτίνων- γ

Με τον όρο φασματοσκοπία ακτίνων- γ ή φασματομετρία ύψους παλμών (pulse height spectrometry), αναφερόμαστε στην καταγραφή του φάσματος των φωτονίων γ . Πρόκειται για μία γραφική παράσταση στην οποία ο κατακόρυφος άξονας αντιστοιχεί στην ποσότητα (αριθμός) των φωτονίων γ που προσπίπτουν στην είσοδο του συστήματος ανά μονάδα ενέργειας (dn/dE) και ο οριζόντιος άξονας έχει βαθμονομηθεί σε τιμές ενέργειας. Σε αντίθεση με τα φάσματα των ακτίνων- X , για την ακτινοβολία- γ τα φάσματα είναι γραμμικά.

Στην ιδανική περίπτωση το φάσμα εμφανίζεται απόλυτα γραμμικό, και κάθε γραμμή με διαφορετικό ύψος αντιστοιχεί στην καταγραφή ενός αριθμού φωτονίων με διαφορετική τιμή ενέργειας. Στην περίπτωση όμως ενός συστήματος σπινθηριστή οι προαναφερθείσες φασματικές

γραμμές αποκτούν διαφορετική μορφή και εμφανίζουν πεπερασμένο εύρος. Ονομάζονται φωτοκορυφές (**photopeaks**) και είναι η συνάθροιση παλμών που προκύπτουν από μονοενεργειακά φωτόνια των οποίων η ενέργεια έχει απορροφηθεί πλήρως μέσα στον κρύσταλλο. Πρόκειται συνήθως για φωτόνια χαμηλών ενεργειών που αλληλεπιδρούν με τον σπινθηριστή μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου.[1]

Η διεύρυνση των φασματικών γραμμών στην φωτοκορυφή οφείλεται στα παρακάτω φαινόμενα:

1. **Το σημείο απορρόφησης του ορατού φωτός μέσα στον κρύσταλλο.** Δηλαδή, δύο φωτόνια ίδιων ενεργειών που απορροφήθηκαν σε διαφορετικό σημείο του κρυστάλλου, παράγουν διαφορετικούς παλμούς φωτός. Με άλλα λόγια, η διεύρυνση των φασματικών γραμμών της φωτοκορυφής οφείλεται σε φαινόμενα διασποράς του φωτός στον κρύσταλλο και είναι ανάλογα του σχήματος και των διαστάσεων του.
2. Τον αριθμό των **δευτερογενών ηλεκτρονίων** που παράγονται από ένα φωτόνιο.
3. Στην **διασπορά** του φωτός **μέσα στην φωτοκάθοδο.**
4. Στον **αριθμό των φωτοηλεκτρονίων** που παράγονται στην φωτοκάθοδο.
5. Στην συλλογή των φωτοηλεκτρονίων από την πρώτη δύνοδο στον φωτοπολλαπλασιαστή.
6. Στο ρεύμα σκότους.
7. Σε «αστάθειες» των ηλεκτρονικών διατάξεων που ακολουθούν τον φωτοπολλαπλασιαστή.
8. Σε φυσικά αίτια που οφείλονται στην αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg.
9. Στην μέτρηση της ακτινοβολίας που δεν προέρχεται από την πηγή (ακτινοβολία υποστρώματος/background radiation).[1]

Μία πολύ σημαντική παράμετρος που προσδιορίζει τον βαθμό διεύρυνσης της φασματικής γραμμής είναι η ενεργειακή διακριτική ικανότητα (**energy resolution**) η οποία εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος να διακρίνει και να καταγράφει δύο φωτόνια με παραπλήσια ενέργεια ως ξεχωριστά. Το εύρος κάθε φωτοκορυφής μετρείται στο πλήρες εύρος στο μισό του μεγίστου (**FWHM-Full Width and Half Maximum**) μία ποσότητα που συνδέεται άμεσα με την ενεργειακή διακριτική ικανότητα ενός συστήματος μέτρησης.

$$R_E = \frac{\Delta E}{E} \quad (1.10)$$

Όπου ΔE : το εύρος FWHM.

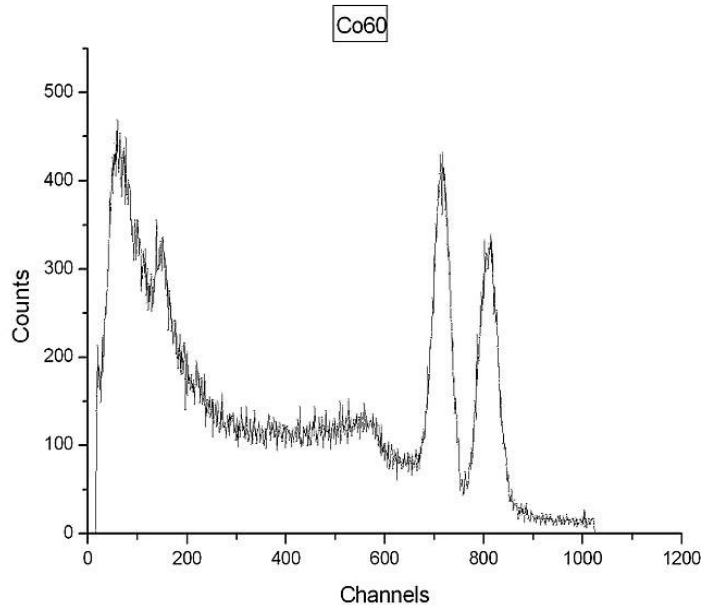
E: η ενέργεια που αντιστοιχεί στα μονοενεργειακά φωτόνια (κεντροειδές).[1]

1.5.2 Δομή ενεργειακών φασμάτων ακτίνων-γ

Τα βασικά χαρακτηριστικά που διακρίνονται σε ένα φάσμα ακτίνων-γ είναι τα εξής:

1. **Η φωτοκορυφή (photopeak).** Η φωτοκορυφή προκύπτει όταν μία δέσμη μονοενεργειακών φωτονίων αλληλεπιδράσει με τον κρύσταλλο του σπινθηριστή. Σε αυτή την περίπτωση θα συμβεί **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** και ολόκληρη η ενέργεια του αρχικού φωτονίου-γ θα απορροφηθεί.
2. **Διαφεύγουσα κορυφή (escape peak).** Μετά την αλληλεπίδραση του φωτονίου-γ με την ύλη, ένα ηλεκτρόνιο των εσωτερικών στιβάδων του ατόμου εκτοπίζεται, μένει μία θέση κενή η οποία καλύπτεται από ένα ηλεκτρόνιο των στιβάδων με χαμηλότερη ενέργεια με ταυτόχρονη εκπομπή ενός **φωτονίου-X**. Υπάρχει μικρή πιθανότητα αυτό το φωτόνιο-X να μην απορροφηθεί μέσα στο υλικό και επομένως να μην υπάρξει το αντίστοιχο δευτερογενές ηλεκτρόνιο. Κατά αυτόν τον τρόπο, η ενέργεια του παραγόμενου φωτός δεν θα αντιστοιχεί στην ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αλλά σε χαμηλότερη τιμή. Έτσι, προκύπτει μία νέα κορυφή στο φάσμα, αριστερά της φωτοκορυφής, που ονομάζεται διαφεύγουσα κορυφή.
3. **Αιχμή ή μέτωπο Compton (Compton peak/Compton edge).** Στην περίπτωση που η ακτινοβολία-γ αλληλεπιδράσει με τον κρύσταλλο μέσω φαινομένου Compton (ανελαστική σκέδαση), προκύπτει αντίστοιχα ένα ηλεκτρόνιο. Τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν μέσω αυτού του φαινομένου έχουν διαφορετικές τιμές κινητικής ενέργειας οι οποίες αντικατοπτρίζουν το αντίστοιχο συνεχές φάσμα.
4. **Κορυφή οπισθοσκέδασης (backscatter peak).** Η κορυφή αυτή οφείλεται σε φαινόμενα Compton που μπορεί να συμβούν όταν τα φωτόνια-γ αλληλεπιδράσουν τόσο με το υλικό της πηγής ακτινοβολίας όσο και με υλικά που την περιβάλλουν. Τα σκεδαζόμενα φωτόνια που προκύπτουν φτάσουν στον κρύσταλλο και εκεί υπάρχει πιθανότητα να απορροφηθούν, λόγω της χαμηλής τους ενέργειας, μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου και ύστερα να καταγραφούν.
5. **Κορυφή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας.** Είναι οι κορυφές που προέρχονται από ακτίνες-X λόγω φαινομένου εσωτερικής μετατροπής. Δηλαδή από την μεταπήδηση από την στιβάδα L στην στιβάδα K.

Η διαφεύγουσα κορυφή, η κορυφή οπισθοσκέδασης καθώς και η κορυφή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας αποτελούν τις δευτερεύουσες κορυφές του φάσματος. [1]



Σχήμα 1.17: Φάσμα ακτίνων γ κοβαλτίου-60 με ανιχνευτή NaI:Tl. Από τα αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται: α. Η φωτοκορυφή στα 1,33 MeV, β. Η φωτοκορυφή στα 1,17 MeV, γ. Η αιχμή Compton, δ. Κορυφή οπισθοσκέδασης και ε. Η χαρακτηριστική ακτινοβολία X της μολύβδινης θωράκισης. [14]

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΕΣ ΠΥΡΙΤΙΟΥ (Silicon Photomultipliers - SiPMs)

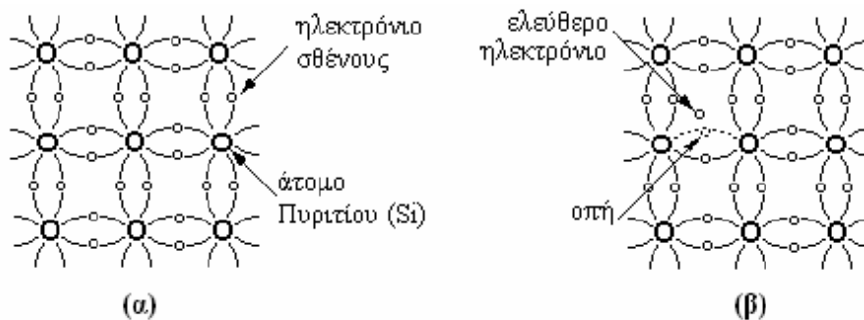
Οι φωτοπολλαπλασιαστές πυριτίου είναι ανιχνευτές φωτονίων χαμηλής έντασης οι οποίοι χαρακτηρίζονται από το υψηλό τους κέρδος και την υψηλή τους απόδοση στην ανίχνευση της ακτινοβολίας. Πρόκειται για μία ημιαγώγιμη φωτοδίοδο αποτελούμενη από πολλές μικροκυψελίδες (SPADs) οι οποίες είναι τοποθετημένες πάνω σε ένα κοινό υπόστρωμα πυριτίου και συνδέονται παράλληλα. Κάθε ένα από τα pixels αποτελείται από μία φωτοδίοδο που ονομάζεται φωτοδίοδος χιονοστιβάδας (Avalanche PhotoDiode-APD) και λειτουργεί σε Geiger Mode καθώς και μία αντίσταση που συνδέει τα pixels και ρυθμίζει την τάση (quenching resistor) της φωτοδίοδου. Καθώς όλα τα pixels λειτουργούν ταυτόχρονα, το σήμα εξόδου που λαμβάνουμε

είναι το άθροισμα των επιμέρους σημάτων εξόδου κάθε APD. Είναι συστήματα ανίχνευσης πολύ χαμηλής έντασης φωτός και βασίζονται στους κλασσικούς φωτοπολλαπλασιαστές (PMTs). Κύρια χαρακτηριστικά τους είναι το υψηλό κέρδος (10^6), ο χαμηλός συντελεστής θορύβου, χαμηλή τάση πόλωσης ($<100V$) καθώς και υψηλή απόδοση ανίχνευσης φωτονίων (PDE). [6][15][16]

2.1 Ανιχνευτές ημιαγωγών

Πρόκειται για ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο (Si) που χαρακτηρίζονται από πολύ καλή **ενεργειακή διακριτική ικανότητα (Energy Resolution)**. Δηλαδή έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν φωτόνια των οποίων η ενέργεια είναι παραπλήσια. Ανήκουν στους ανιχνευτές στερεάς κατάστασης και έχουν την μορφή κρυστάλλου. Σε αυτά τα υλικά παρουσιάζονται δύο ενεργειακές περιοχές στην εξωτερική στιβάδα. Η **ζώνη σθένους** και η **ζώνη αγωγιμότητας** στις οποίες ενδιάμεσα παρεμβάλλεται ένα ενεργειακό χάσμα. Σε συνθήκες πολύ χαμηλής θερμοκρασίας (κοντά στο απόλυτο 0) οι ημιαγωγοί λειτουργούν ως μονωτές. Όταν αυτή αυξάνεται, το ενεργειακό χάσμα μειώνεται με αποτέλεσμα η μεταπήδηση των ηλεκτρονίων από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας να γίνεται ευκολότερη.

Κατά την πρόσπτωση, λοιπόν, ενός φωτονίου και την αλληλεπίδρασή του με τα ηλεκτρόνια των ατόμων, αποδίδεται στα δεσμευμένα ηλεκτρόνια ενέργεια μεγαλύτερη από αυτήν του ενεργειακού χάσματος. Αυτά διεγείρονται στην ζώνη αγωγιμότητας αφήνοντας πίσω στην ζώνη σθένους ελεύθερες οπές. Οι οπές αυτές με την σειρά τους μπορεί να καταληφθούν από ηλεκτρόνια των γειτονικών ατόμων. Επίσης, η διέγερση αυτή μπορεί να συμβεί σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος μέσω θερμικής ενέργειας.[6]

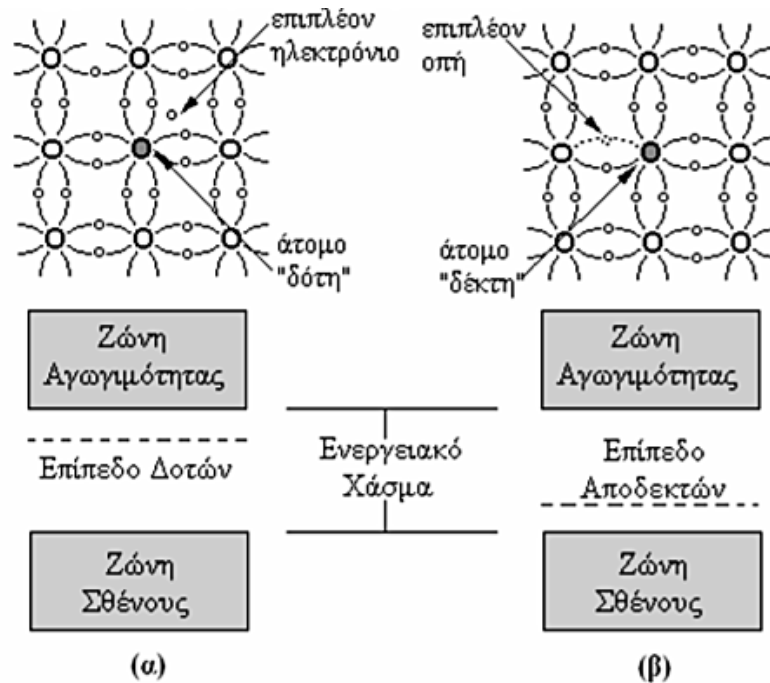


Σχήμα 2.1 : Ομοιοπολικοί δεσμοί στον κρύσταλλο του Πυριτίου (Si): (α) στους 0 βαθμούς Kelvin (όλα τα ηλεκτρόνια σθένους συμμετέχουν στους δεσμούς), (β) σε υψηλότερες θερμοκρασίες (μερικοί δεσμοί σπάνε αφήνοντας μια οπή στη ζώνη σθένους). [6]

2.1.1 Προσμίξεις ημιαγωγών

Στις περισσότερες περιπτώσεις στα ημιαγωγικά υλικά προκειμένου να αυξήσουμε την αγωγιμότητά τους, εφαρμόζουμε **προσμίξεις**. Ένας ημιαγωγός με την προσθήκη προσμίξεων ονομάζεται *εξωγενής* ημιαγωγός (ενώ ο καθαρός ημιαγωγός ονομάζεται ενδογενής). [18]

Η ύπαρξη προσμίξεων στον κρύσταλλο του ημιαγωγού προκαλεί την εμφάνιση ενεργειακών σταθμών μεταξύ των δύο ζωνών (ζώνη σθένους και ζώνη αγωγιμότητας). Για αυτό το λόγο οι κρύσταλλοι των ημιαγωγών «ντοπάρονται» με προσμίξεις. Για παράδειγμα σε έναν ενδογενή κρύσταλλο πυριτίου αυτό συμβαίνει με την τήξη του και την προσθήκη πεντασθενών ή τρισθενών ατόμων για την αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των οπών αντίστοιχα.



Σχήμα 2.2: Κρύσταλλοι ημιαγωγών με 4 ηλεκτρόνια σθένους (πχ. Si) με προσμίξεις. (α) πεντασθενών ατόμων: ημιαγωγός τύπου n. (β) τρισθενών ατόμων: ημιαγωγός τύπου p. [6]

Επειδή τα πεντασθενή άτομα «προσφέρουν» ένα επιπλέον ηλεκτρόνιο στον κρύσταλλο πυριτίου, αναφέρονται και ως δότες. Αντίστοιχα, τα τρισθενή άτομα «προσφέρουν» οπές οι οποίες μπορούν να δεχτούν ελεύθερα ηλεκτρόνια και για αυτό τον λόγο αναφέρονται και ως αποδέκτες. [18]

Το «ντοπάρισμα» ή εμπλουτισμός (doping) δημιουργεί μία περίσσεια ηλεκτρονίων σθένους (**ημιαγωγός τύπου-n**) σε περίπτωση που οι προσμίξεις είναι δότες ή περίσσεια οπών (**ημιαγωγός τύπου-p**) στη περίπτωση που οι προσμίξεις είναι αποδέκτες.

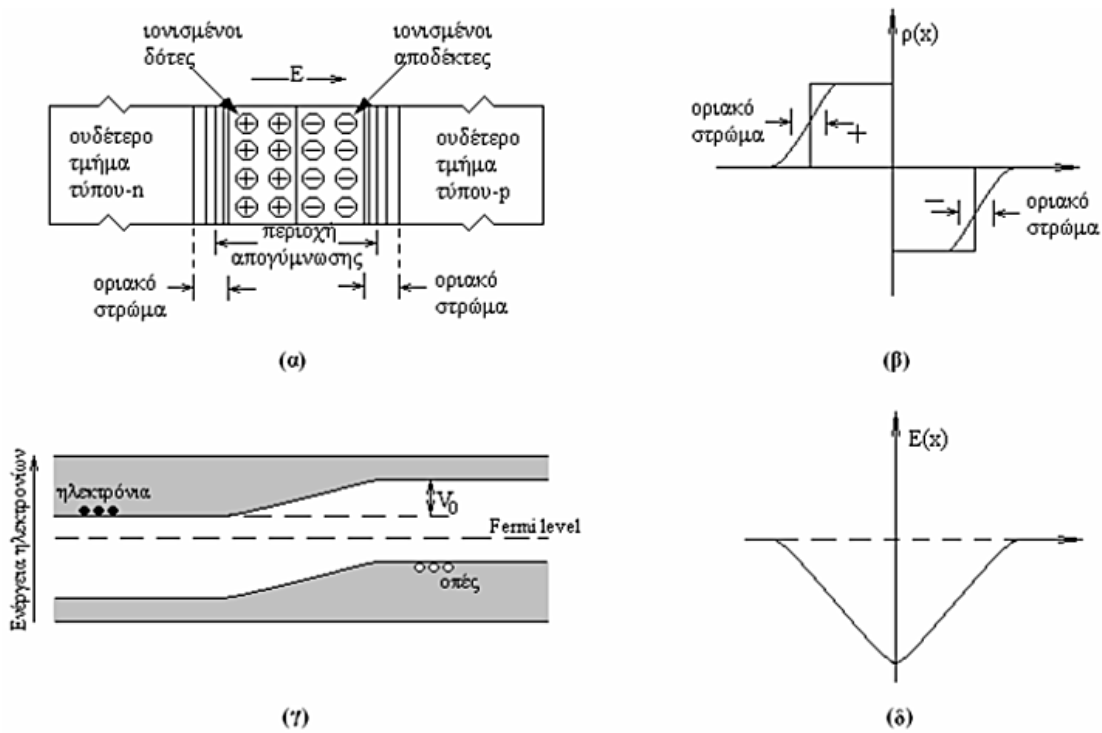
Οι συγκεντρώσεις των προσμίξεων στις περισσότερες εφαρμογές είναι της τάξεως του 10^{13} atoms/cm³. Στις περιπτώσεις όμως που χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρικές επαφές ημιαγωγών απαιτούνται μεγαλύτερες συγκεντρώσεις 10^{20} atoms/cm³, ώστε να εμφανίζουν και πιο υψηλή αγωγιμότητα.

Η διαφοροποίηση των ισχυρά ντοπαρισμένων ημιαγωγών από τους υπόλοιπους γίνεται με την προσθήκη του συμβόλου «+» μετά από τον τύπο του ημιαγωγού. Δηλαδή έχουμε p⁺ και n⁺ για τους ισχυρά ντοπαρισμένους ημιαγωγούς τύπου-p και τύπου-n αντίστοιχα.[6]

2.1.2 Δίοδος επαφής pn

Υπάρχουν δύο τύποι ημιαγωγών, οι **τύπου n** (negative) και οι ημιαγωγοί **τύπου p** (positive). Στους πρώτους, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια υπερτερούν σε αριθμό σε σχέση με τις οπές και γι' αυτό καλούνται φορείς πλειονότητας και οι οπές φορείς μειονότητας. Αντίθετα στους ημιαγωγούς τύπου p, οι οπές αποτελούν φορείς πλειονότητας και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια τους φορείς μειονότητας. Η ένωση των δύο τύπων ημιαγωγών ονομάζεται **επαφή pn ή δίοδος επαφής** (σύντμηση των λέξεων "δύο ηλεκτρόδια" [18]). Λόγω των διαφορετικών συγκεντρώσεων των φορέων στις δύο πλευρές, οι απωστικές δυνάμεις μεταξύ των ελεύθερων ηλεκτρονίων και μεταξύ των οπών οδηγούν στην **διάχυσή** τους προς όλες τις κατευθύνσεις. Κάποια από τα ηλεκτρόνια περνούν διαμέσου της επαφής pn στην περιοχή p και εκεί ως φορέας μειονότητας ανασυνδέεται γρήγορα με μία οπή. Δημιουργείται έτσι ένα θετικό ιόν. Αντίστοιχα, όταν μία οπή στην περιοχή τύπου n καλυφθεί, δημιουργεί ένα αρνητικό ιόν. Κάθε ζεύγος θετικού ή αρνητικού ιόντος που δημιουργείται κατά μήκος της επαφής, ονομάζεται **δίπολο** και λόγω των ομοιοπολικών δεσμών είναι σταθερό πάνω στον κρύσταλλο. Η αύξηση του αριθμού των διπόλων συνεπάγεται την εκκένωση της περιοχής κοντά στην επαφή. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **περιοχή απογύμνωσης (depletion layer)**. Σε αυτή την περιοχή λόγω της ύπαρξης ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται λόγω της διάχυσης, υπάρχει απουσία ελεύθερων φορέων φορτίου, μία πολύ χρήσιμη ιδιότητα για την ανίχνευση της ακτινοβολίας. Πιο συγκεκριμένα, κατά την πρόσπτωση της ακτινοβολίας στην περιοχή απογύμνωσης, δημιουργούνται φορείς φορτίου. Αυτοί, λόγω της παρουσίας του ηλεκτρικού πεδίου, απομακρύνονται προς τα άκρα της επαφής (για αυτό το λόγο ονομάζεται και περιοχή **άντλησης φορέων**). Η τοποθέτηση ηλεκτροδίων στα άκρα της επαφής, καθώς και η τοποθέτηση **αντίστασης σειριακά**, καθιστά ικανή την συλλογή ρεύματος όπου το σήμα του θα

είναι ανάλογο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού (V_0) κατά μήκος της επαφής. Αυτή είναι γνωστή ως **δυναμικό επαφής** και για διόδους πυριτίου είναι 0,7 V για θερμοκρασία 25°C. Η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου αυξάνεται με την πρόσπτωση κάθε εισερχόμενου ηλεκτρονίου στην περιοχή αυτή μέχρι να αποκατασταθεί η ισορροπία, δηλαδή μέχρι να σταματήσει η διάχυση στην επαφή.[6][18]



Σχήμα 2.3: (α) Σχηματική παράσταση μιας επαφής pn σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, (β) πυκνότητα φορτίων, (γ) ενεργειακό διάγραμμα της επαφής pn, (δ) ένταση ηλεκτρικού πεδίου.[6]

Για να μετρήσουμε όμως το ρεύμα που προκύπτει από την συγκέντρωση των φορέων φορτίου στα άκρα της επαφής δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί με την απλή τοποθέτηση μεταλλικού στοιχείου στην περιοχή αυτή. Αυτό συμβαίνει καθώς όταν οι ημιαγωγοί έρθουν σε επαφή με μέταλλα δημιουργείται μία «ανορθωτική τάση» (rectifying junction). Για την αποφυγή αυτή γίνεται χρήση στρωμάτων ημιαγωγών με ισχυρές συγκεντρώσεις προσμίξεων μεταξύ των δύο υλικών με αποτέλεσμα η περιοχή απογύμνωσης να αποκτά σχεδόν μηδενικό εύρος (σχήμα 2.2).[6]

2.1.3 Τρόποι εφαρμογής εξωτερικής τάσης πόλωσης

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως για την εφαρμογή εξωτερικής τάσης πόλωσης είναι απαραίτητη η τοποθέτηση ηλεκτροδίων με ενδιάμεσο στρώμα ημιαγωγού υψηλής συγκέντρωσης προσμίξεων. Υπάρχουν δύο τρόποι εφαρμογής της εξωτερικής τάσης πόλωσης σε μία δίοδο επαφής pn οι οποίοι είναι οι εξής:

A. Ορθή Πόλωση:

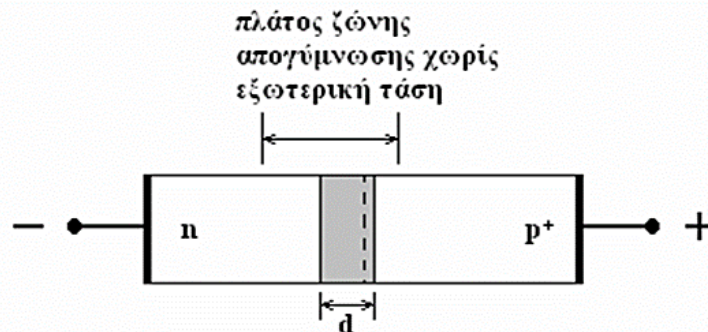
Κατά την ορθή πόλωση ο ημιαγωγός τύπου n συνδέεται με το αρνητικό άκρο της πηγής και ο ημιαγωγός τύπου p συνδέεται με το θετικό άκρο της. Ισχύει:

$$V_p > V_n \quad (2.1)$$

Όταν η εξωτερική τάση πόλωσης (V_{bias}) στα άκρα της επαφής pn είναι μικρότερη από το φράγμα δυναμικού (0,7 V για ημιαγωγούς πυριτίου), τα ελεύθερα ηλεκτρόνια δεν διαθέτουν αρκετή ενέργεια ώστε να καταφέρουν να περάσουν την περιοχή απογύμνωσης με αποτέλεσμα να μην διαρρέει ρεύμα την δίοδο.

Αντίθετα, όταν η τάση της πηγής είναι μεγαλύτερη από 0,7 V ένα μεγάλο **συνεχές ρεύμα** διαρρέει το κύκλωμα της διόδου κατά την ορθή φορά. Αυτό συμβαίνει καθώς η εφαρμοζόμενη τάση ωθεί τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τις οπές προς την επαφή και τα ελεύθερα ηλεκτρόνια διαθέτουν αρκετή ενέργεια ώστε να περάσουν την περιοχή απογύμνωσης και να ανασυνδυαστούν με τις οπές.[18]

Μειώνεται η περιοχή άντλησης φορέων με ταυτόχρονη αύξηση της χωρητικότητας της επαφής pn και επομένως και του ηλεκτροστατικού πεδίου κατά μήκος της περιοχής (σχήμα 2.4).[6]



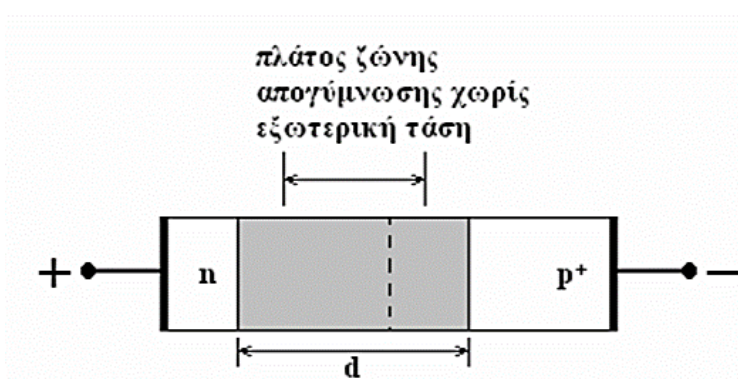
Σχήμα 2.4: Δίοδος επαφής pn. Παρουσιάζεται το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης μετά την εφαρμογή ορθής εξωτερικής τάσης.[6]

B. Ανάστροφη πόλωση:

Αντίθετα στην ανάστροφη πόλωση ο ημιαγωγός τύπου n συνδέεται με το θετικό άκρο της πηγής και ο ημιαγωγός τύπου p συνδέεται με το αρνητικό άκρο της.

$$V_p < V_n \quad (2.2)$$

Με την εφαρμογή ανάστροφης τάσης πόλωσης, τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι οπές ρέουν απομακρυνόμενα από την επαφή και η το εύρος της περιοχής απογύμνωσης επεκτείνεται (σχήμα 2.5). Σε αυτή την περίπτωση η χωρητικότητα της επαφής pn μειώνεται.



Σχήμα 2.5: Δίοδος επαφής pn. Παρουσιάζεται το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης μετά την εφαρμογή ανάστροφης εξωτερικής τάσης [6]

Τα νέα δίπολα που δημιουργούνται στην περιοχή απογύμνωσης, αυξάνουν το φράγμα δυναμικού στα άκρα της. Η περιοχή απογύμνωσης σταματά να διευρύνεται όταν το φράγμα δυναμικού γίνει ίσο με την ανάστροφη τάση πόλωσης.[18]

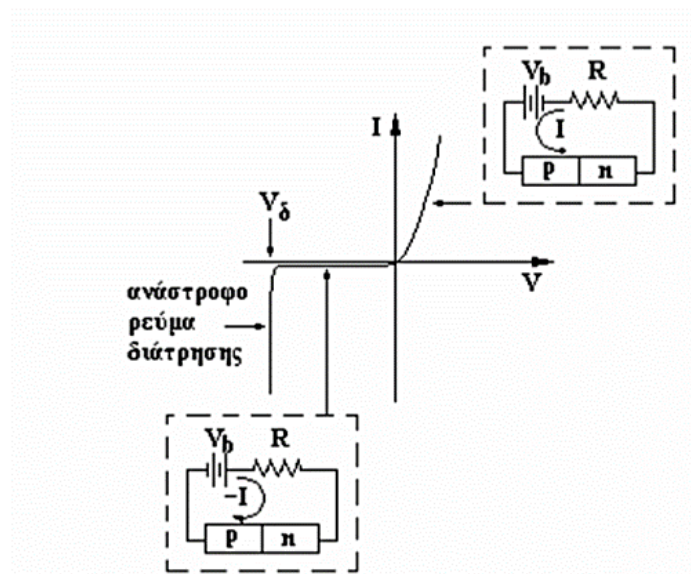
2.1.4 Φαινόμενο κατάρρευσης της διόδου επαφής pn

Ένα ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο και ένα αρκετά μεγάλο εύρος περιοχής απογύμνωσης είναι απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να λειτουργήσει η επαφή pn ως αποδοτικός ανιχνευτής ακτινοβολίας. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζουμε **ανάστροφη πόλωση** στα άκρα της επαφής της οποίας η τιμή καθορίζει την περιοχή άντλησης φορέων. Όσο πιο μεγάλη η τιμή της, τόσο πιο αποδοτικός είναι ο ανιχνευτής. Η μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοστεί στα άκρα της επαφής pn περιορίζεται από την εσωτερική αντίσταση του ημιαγωγού.

Έπειτα από μία τιμή $V_{breakdown}$ η επαφή αρχίζει να άγει πολύ μεγάλα ρεύματα τα οποία οφείλονται στην δημιουργία νέων φορέων αγωγιμότητας λόγω κατάρρευσής της.[19] (σχήμα 2.6). Η μέγιστη τιμή του ανάστροφου ρεύματος της επαφής pn είναι:

$$I = \frac{V_{bias} - V_{breakdown}}{R} \quad (2.3)$$

Το ρεύμα αυτό παίρνει μία καθορισμένη μέγιστη τιμή με την βοήθεια της εξωτερικής αντίστασης R που είναι συνδεδεμένη **σε σειρά**. Αν η τιμή αυτή ξεπεραστεί, η διόδος κινδυνεύει να καταστραφεί λόγω αύξησης της επιτρεπόμενης ισχύς και συνεπώς λόγω υπερθέρμανσης της διόδου.[6]



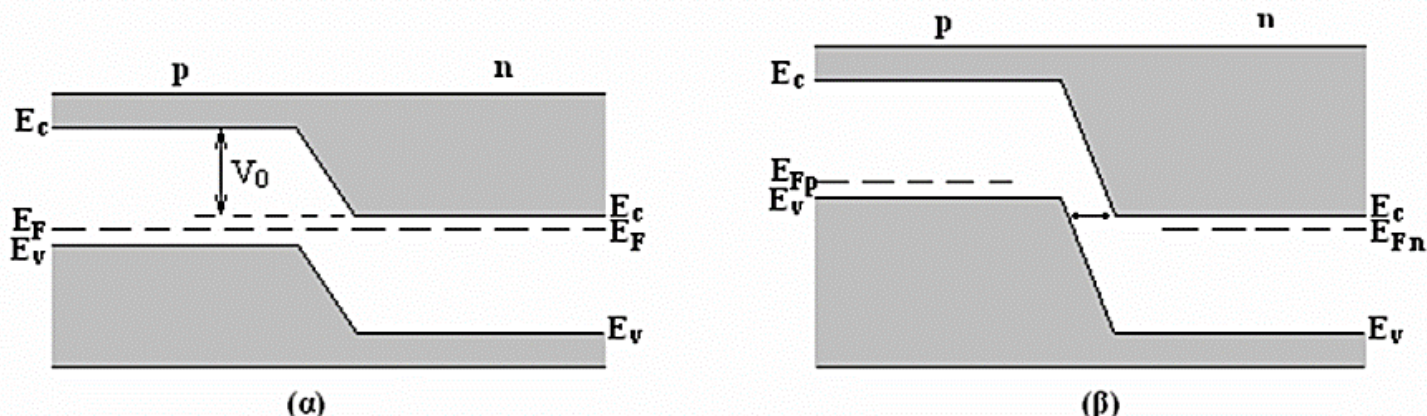
Σχήμα 2.6: Χαρακτηριστική I-V μιας διόδου επαφής pn κάτω από συνθήκες κατάρρευσης.[6]

Ωστόσο, η διαδικασία διατήρησης της επαφής pn δεν είναι καταστρεπτική, αν το ρεύμα που την διαρρέει περιοριστεί σε μία λογική τιμή σε συνδυασμό με την εξωτερική αντίσταση R ώστε να μην ξεπεραστεί η επιτρεπόμενη ισχύς για την επιλεγμένη διόδο.

2.1.4.1 Φαινόμενο Zener ή φαινόμενο σήραγγας

Σε διόδους που παρατηρείται **υψηλή συγκέντρωση προσμίξεων** παρατηρούνται και υψηλές τιμές έντασης του ηλεκτροστατικού πεδίου, ακόμα και σε χαμηλές τάσεις ανάστροφης πόλωσης. Ακόμη, η περιοχή άντλησης φορέων έχει πολύ **μικρό** εύρος. Αποτέλεσμα των παραπάνω, είναι η

απόσπαση των ηλεκτρονίων σθένους (ή άλλων φορέων αγωγιμότητας) από τους ομοιοπολικούς δεσμούς. Τα ηλεκτρόνια αυτά διαπερνούν το υψηλό ενεργειακό φράγμα, που υπάρχει λόγω ανάστροφης πόλωσης και άγουν **υψηλό** ανάστροφο ρεύμα. Ο μηχανισμός αυτός είναι συνέπεια ενός κβαντομηχανικού φαινομένου, που ονομάζεται φαινόμενο σήραγγας (tunneling) και παρατηρείται κυρίως για μεγάλες συγκεντρώσεις όπου το εύρος της περιοχής άντλησης δεν είναι πολύ μεγάλο. Μία ακόμη ονομασία του παραπάνω φαινομένου είναι και η **διατήρηση Zener**. Οι τιμή του πεδίου στην οποία εμφανίζεται η κατάρρευσης στον μηχανισμό Zener είναι 1 MV/cm. Ο μηχανισμός Zener λαμβάνει χώρα για τάσεις μεγαλύτερες από 5 V σε αντίθεση με το φαινόμενο χιονοστιβάδας που αναφέρεται παρακάτω, το οποίο συμβαίνει σε ανάστροφες τάσεις μεγαλύτερες από 8 V. [6][19]



Σχήμα 2.7: (α) Επαφή pn, στην κατάσταση της θερμοδυναμικής ισορροπίας, με πολύ μεγάλες συγκεντρώσεις προσμίξεων.

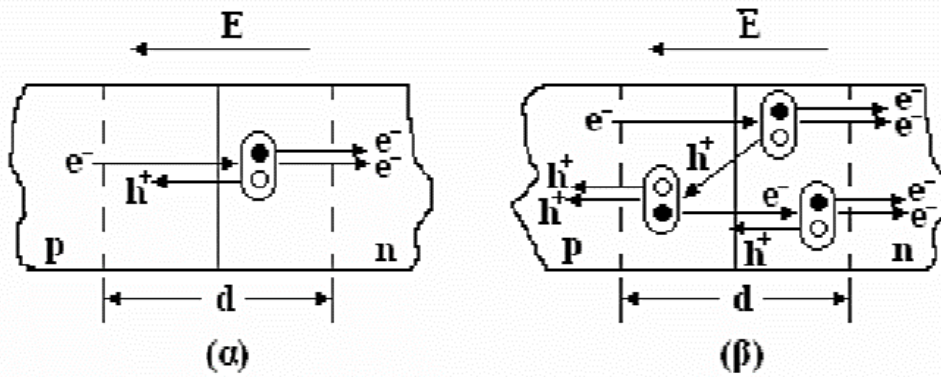
(β) Ανάστροφη τάση πόλωσης.[6]

2.1.4.2 Φαινόμενο χιονοστιβάδας (Geiger Mode)

Συχνά ο μηχανισμός πολλαπλασιασμού των φορέων εξαιτίας του φαινομένου της χιονοστιβάδας προηγείται του φαινομένου σήραγγας. Καθώς η τιμή της ανάστροφης τάσης πόλωσης αυξάνει, αυξάνει και η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην επαφή. Συνεπώς, θα αυξάνει και η ενέργεια των φορέων μειονότητας στην περιοχή απογύμνωσης.

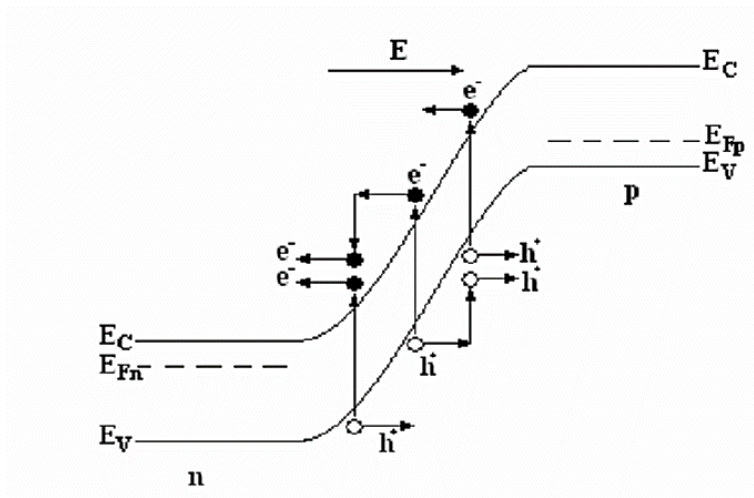
Το φαινόμενο χιονοστιβάδας περιλαμβάνει τον ιονισμό των μητρικών ατόμων μετά από κρούση με φορείς που έχουν υψηλές ταχύτητες (**impact ionization**). Ο ιονισμός αυτός συμβαίνει για συγκεκριμένη τιμή του πεδίου, η οποία για τι πυρίτιο (Si) είναι 300 KV/cm. Μετά την κρούση δημιουργούνται ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπής. Η μεγάλη ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στην

περιοχή άντλησης καθώς και η ανάστροφη εφαρμοσμένη τάση, επιταχύνουν τα ηλεκτρόνια, με τη σειρά τους συγκρούονται με το κρυσταλλικό πλέγμα και προκαλούν ιονισμούς.



Σχήμα 2.8 : (α) Ιονισμός κρούσης που προκαλείται από ένα ηλεκτρόνιο που μπαίνει στην περιοχή άντλησης της επαφής pn. (β) Πρωτογενείς, δευτερογενείς και τριτογενείς κρούσεις ιονισμού.[6]

Τα ηλεκτρόνια που προκύπτουν από τον ιονισμό, δημιουργούν νέα ζευγάρια ηλεκτρονίων-οπών με αποτέλεσμα τον πολλαπλασιασμό των φορέων. Στην περίπτωση αυτή η ανάστροφη τάση πόλωσης αυξάνει με την αύξηση του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού.[19]



Σχήμα 2.9: Μηχανισμός της χιονοστιβάδας.[6]

2.1.4.3 Γραμμική λειτουργία (Linear Mode)

Το κέρδος των APDs στην γραμμική λειτουργία δεν ξεπερνά τις μερικές εκατοντάδες ($10^1 - 10^3$). Η τάση λειτουργίας στην linear mode έχει μικρότερη τιμή από εκείνη της τάσης κατάρρευσης ($V_{bias} < V_{breakdown}$) και το κέρδος και το ποσοστό θορύβου είναι πολύ υψηλό.

Επίσης, παρατηρείται σημαντική εξάρτηση του κέρδους από την τάση λειτουργίας V_{bias} , την θερμοκρασία, κάτι που απαιτεί την διαρκή ρύθμιση αυτών των παραμέτρων ώστε οι τιμές τους να σταθεροποιούνται όσο είναι δυνατόν.

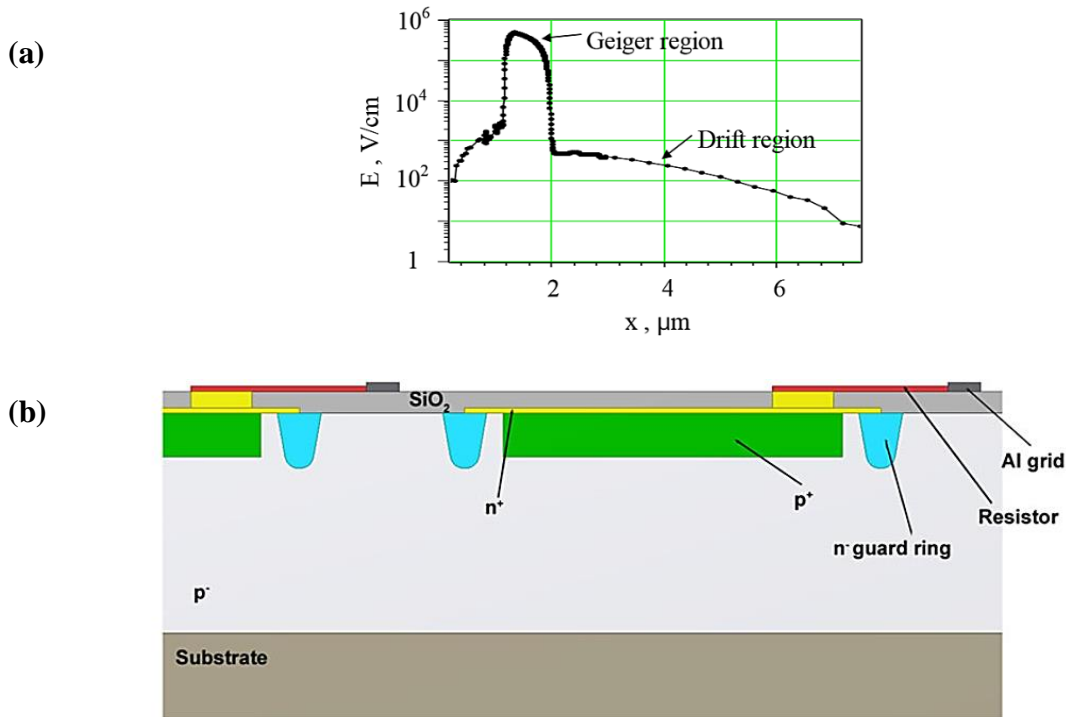
Το περιορισμένο εσωτερικό κέρδος των APDs (< 1000) είναι ένα ακόμη μειονέκτημα της λειτουργίας αυτής. Εξαιτίας αυτού υπάρχουν απαιτήσεις για ενισχυτές χαμηλού θορύβου ώστε να πραγματοποιηθεί η ανάγνωση του σήματος εξόδου, καθώς και η λειτουργία σε αυστηρά περιορισμένο εύρος.[6]

2.2 Φωτοδίοδος Χιονοστιβάδας (Avalanche Photodiodes – APDs)

Οι φωτοπολλαπλασιαστές πυριτίου αποτελούνται από παράλληλα κελιά (microcells ή απλά cells) τοποθετημένα σε ένα κοινό υπόστρωμα πυριτίου. Κάθε ένα κελί έχει ανεξάρτητη λειτουργία και αποτελείται από μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας (**Avalanche Photo Diode-APD**) που λειτουργεί σε Geiger Mode (10-20 % πάνω από την τάση κατάρρευσης, και γι' αυτό το λόγο ονομάζεται και G-APD ή GM-APD συνδεδεμένη με μία αντίσταση σε σειρά. Χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ενός φωτονίου και αναφέρονται με τον όρο SPADs (Single Photon Avalanche Counters). Κάθε φωτοδίοδος χιονοστιβάδας είναι ουσιαστικά μία φωτοδίοδος επαφής pn με συνήθεις διαστάσεις από 10-100 μm η οποία, μετά από την απορρόφηση ενός φωτονίου, παράγει στην έξοδο της έναν παλμό ρεύματος .

Στην περιοχή απογύμνωσης της επαφής pn δημιουργείται ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο ($3-5 \times 10^5$ V/cm) με απαραίτητη προϋπόθεση την εφαρμογή αναστροφής τάσης (μερικών Volt) στα άκρα της ($V_{overvoltage} = V_{bias} - V_{breakdown}$). Λόγω της παρουσίας αυτού του πεδίου, τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών διαχωρίζονται οι φορείς φορτίου επιταχύνονται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Προκύπτει έτσι μία σειρά από συνεχόμενους ιονισμούς προκαλώντας έτσι το φαινόμενο της χιονοστιβάδας. Αυτός είναι ο εσωτερικός μηχανισμός ενίσχυσης ο οποίος καθιστά τις APDs ικανά εξαρτήματα ανίχνευσης ορατών ακτινοβολιών χαμηλών εντάσεων.

Καθώς όλα τα κελιά λειτουργούν ταυτόχρονα, ο παλμός που λαμβάνουμε στην έξοδο πραγματοποιείται μέσω μίας κοινής αντίστασης φορτίου και είναι το άθροισμα των επιμέρους σημάτων. Το σήμα αυτό διαβάζεται μέσω λωρίδων αλουμινίου.



Σχήμα 2.10: (a) Γραφική παράσταση γενικής μορφής του ηλεκτρικού πεδίου μιας φωτοδιόδου APD, (b) Δομή ενός κελιού. [15] [20]

Η βασική διαφορά της από μία συμβατική φωτοδιόδο είναι **το εσωτερικό της κέρδος**.

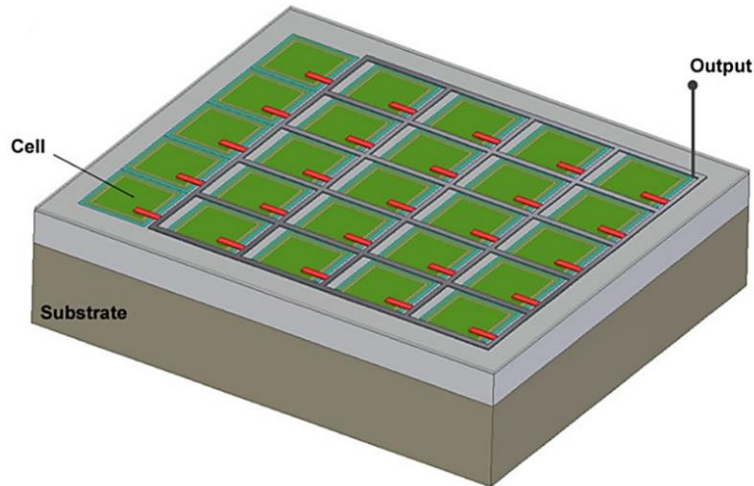
Το φορτίο που συσσωρεύεται σε κάθε APD ισούται με:

$$Q_{cell} = C_{cell} \times V_{overvoltage} \quad (2.4)$$

Όπου:

C_{cell} : χωρητικότητα του κελιού

$V_{overvoltage}$: τάση λειτουργίας της φωτοδιόδου ($V_{bias} - V_{breakdown}$). [15][16][20]



Σχήμα 2.11: Απλοποιημένη δομή ενός SiPM που αποτελείται από φωτοδιόδους G-APDs. Τα G-APD ενώνονται σε ένα κοινό υπόστρωμα και αποσυνδέονται ηλεκτρικά. Οι εξοδοί των pixels συνδέονται με ένα πλέγμα Al που χρησιμοποιείται για την ανάγνωση των σημάτων εξόδου. Κάθε στοιχείο έχει μια αντίσταση σβέσης σε σειρά.[20]

2.2.1 Χωρητικότητα επαφής pn

Η χρήση της επαφής ως ανιχνευτής καθώς και ο θόρυβος που παράγει, επηρεάζουν της περιοχή απογύμνωσης και συγκεκριμένα την χωρητικότητά της σύμφωνα με την σχέση 2.5.

$$C = \frac{dQ}{dV} = \epsilon \frac{A}{d} \quad (2.5)$$

όπου dQ : Η μεταβολή του φορτίου στην περιοχή απογύμνωσης

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

ϵ : η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού

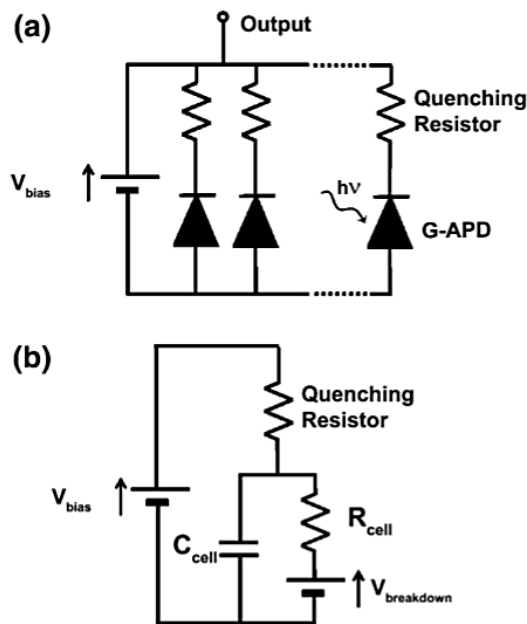
A : το εμβαδό της ζώνης απογύμνωσης και

d : το μήκος της περιοχής απογύμνωσης. [6][19]

2.2.2 Διαδικασία απόκρισης ενός SiPM σε εισερχόμενα φωτόνια

Οι APDs λειτουργούν με βάση τον μηχανισμό της χιονοστιβάδας και δίνουν στην έξοδό τους ισχυρούς παλμούς. Η διαδικασία λήψης των παλμών αυτών αναλύεται παρακάτω.

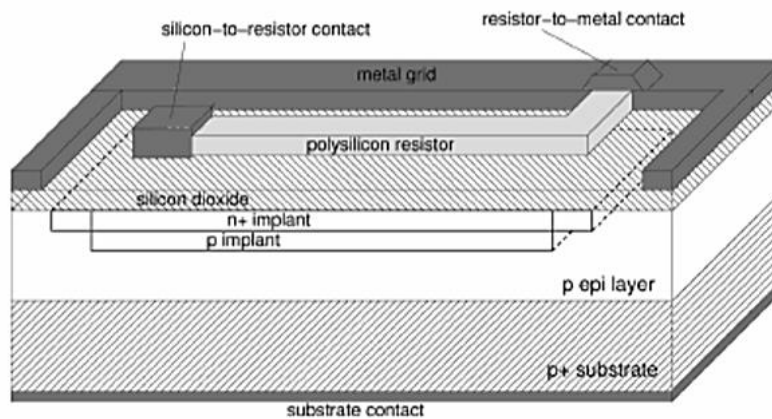
- Εκφόρτιση:** Όταν ένα φωτόνιο προσκρούει σε ένα κελί του SiPM, ο παλμός που παράγεται είναι ανεξάρτητος του συνολικού αριθμού των φωτονίων που προσκρούουν σε αυτό. Ο πυκνωτής εκφορτίζεται μέσω της αντίστασης. Η συνολική έξοδος του είναι ανάλογη του αριθμού των κελιών που εκφορτίστηκαν.
- Επαναφορά:** Η τάση λειτουργίας V_{bias} μειώνεται έως την τάση κατάρρευσης $V_{\text{breakdown}}$ και με αυτόν τον τρόπο το φαινόμενο της χιονοστιβάδας σταματά. Έτσι το κάθε κελί επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση.
- Αποκατάσταση:** Στο τελικό στάδιο η τάση λειτουργίας επιστρέφει στην αρχική της τιμή και ο SiPM είναι έτοιμος για την ανίχνευση του επόμενου φωτονίου.[6][20]



Σχήμα 2.11: (a) Απλοποιημένο διάγραμμα φωτοπολλαπλασιαστή πυριτίου. (b) Ισοδύναμο κύκλωμα κελιού σε λειτουργία. [20]

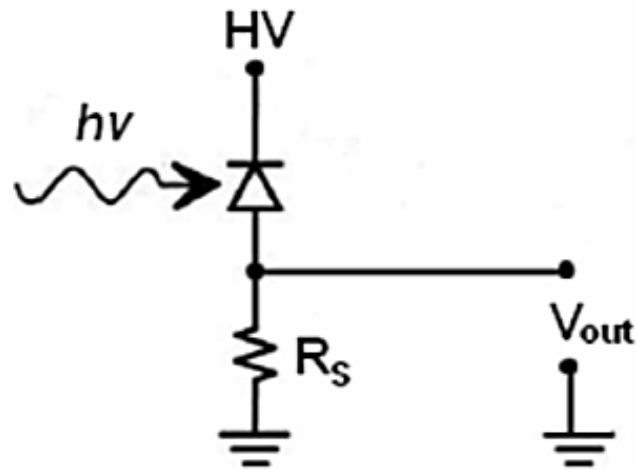
2.2.3 Μηχανισμός επαναφοράς της τάσης λειτουργίας (Quenching Mechanism- Resistor)

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, σε μία φωτοδίοδο χιονοστιβάδας APD τα κελιά που την απαρτίζουν συνδέονται μεταξύ τους μέσω μία αντίστασης η οποία είναι κατασκευασμένη από υλικά που διαθέτουν κατάλληλη αγωγιμότητα και υψηλό ενεργειακό κενό. Συγκεκριμένα, είναι ένα λεπτό στρώμα το οποίο προκαλεί αρνητική ανάδραση (quenching mechanism) στο φαινόμενο χιονοστοιβάδας (σχήμα 2.14). Κατά το φαινόμενο αυτό προκαλείται αύξηση του ρεύματος που διαρρέει την δίοδο με αποτέλεσμα την ανακατανομή των φορτίων και άρα του δυναμικού στην περιοχή αυτή. Έτσι, εμφανίζεται ένα ηλεκτρικό πεδίο αντίθετης κατεύθυνσης από το αρχικό το οποίο οδηγεί τελικά στον τερματισμό του φαινομένου αυτού (quenching).



Σχήμα 2.13: Εικόνα μίας φωτοδίοδου χιονοστιβάδας στην οποία διακρίνεται το λεπτό στρώμα του αντιστάτη (polysilicon resistor).[6]

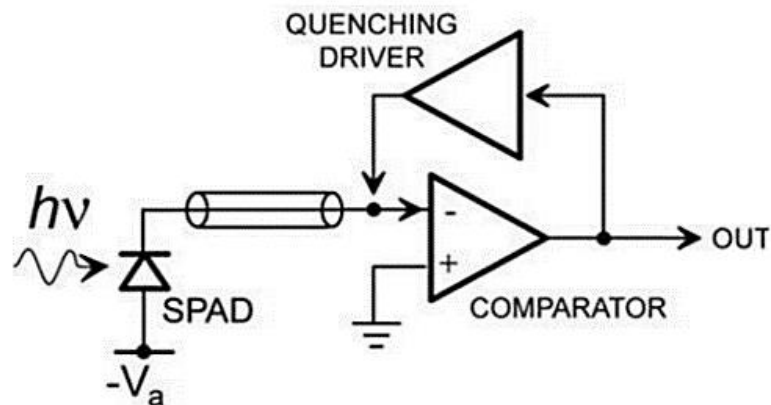
- i. **Passive Quenching:** Στην περίπτωση αυτή γίνεται χρήση μίας απλής αντίστασης R_S . Αν δεν διαρρέει ρεύμα την APD τότε η τάση στα άκρα της είναι ίση με V_{bias} (μερικά volts πάνω από την τάση κατάρρευσης $V_{breakdown}$). Κατά την εκκίνηση του φαινομένου της χιονοστοιβάδας, η αντίσταση R_S μειώνει την τάση V_{bias} στα άκρα της δίοδου κάτω από την τάση κατάρρευσης. Η επαναφορά της φωτοδίοδου στην τάση λειτουργίας της (επαναφόρτιση) γίνεται διαμέσου της ίδια αντίστασης R_S κάτι που αποτελεί βασικό μειονέκτημα του μηχανισμού αυτού.



Σχήμα 2.14: Ηλεκτρονικό κύκλωμα PQC.[6]

- ii. **Active Quenching:** Στην περίπτωση αυτή η αντίσταση R_s αντικαθίσταται από ένα κύκλωμα (σχήμα 2.15) το οποίο επαναφέρει γρήγορα την τάση στα άκρα της APD στην τάση λειτουργίας της σε συγκεκριμένο χρόνο βοηθώντας έτσι την επιτάχυνση της επαναφόρτισης της.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ο μηχανισμός αυτός απαιτείται να υπάρχει σε κάθε APD. Ωστόσο, το active quenching έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε χώρο και κόστος γι' αυτό και στους ανιχνευτές SiPM χρησιμοποιείται κυρίως το passive quenching. [6]

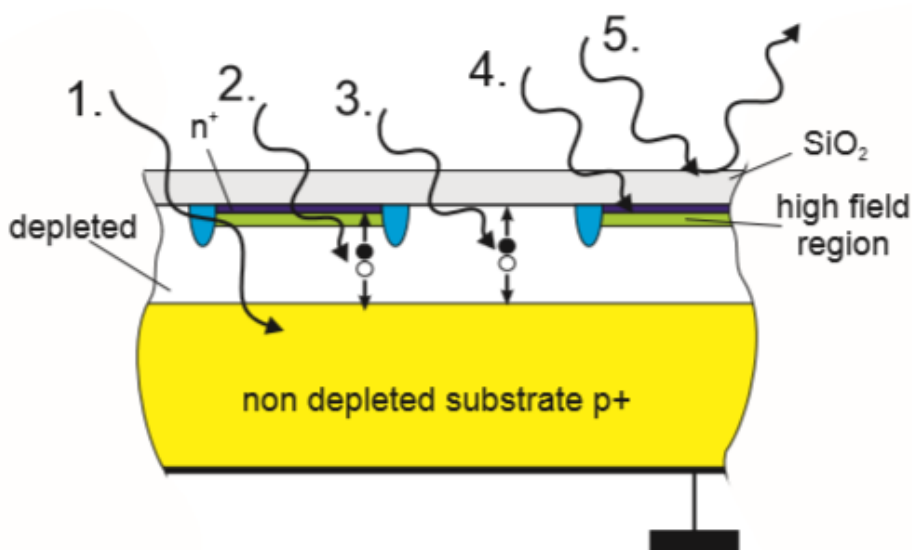


Σχήμα 2.15: Ηλεκτρονικό κύκλωμα AQC.[6]

2.3 Παράμετροι απόδοσης

2.3.1 Απόδοση Ανίχνευσης Φωτονίων (Photon Detection Efficiency- PDE)

Η ικανότητα ενός φωτοπολλαπλασιαστή να παράγει στην έξοδό του έναν παλμό μετά την πρόσπτωση ενός φωτονίου σε ένα κελί του αναφέρεται ως Photon Detection Efficiency (PDE). Επηρεάζεται από την τάση τροφοδοσίας του SiPM (V_{bias}) και από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (λ). Η PDE εξαρτάται και από άλλες παραμέτρους (σχήμα: 2.18) που εξηγούνται παρακάτω.



Σχήμα 2.18: Το σχέδιο δείχνει διαφορετικά σενάρια που μπορούν να συμβούν όταν ένα φωτόνιο χτυπήσει ένα SiPM:

1. Απορρόφηση του φωτονίου στο μη εξαντλημένο υπόστρωμα.
2. Απορρόφηση στην εξαντλημένη περιοχή και επακόλουθη μετατόπιση του φωτοηλεκτρονίου στην περιοχή υψηλού πεδίου.
3. Απορρόφηση μεταξύ δύο κυττάρων.
4. Απορρόφηση στο SiO₂ ή μη εξαντλημένη εμφύτευση κάτω από την επιφάνεια.
5. Αντανάκλαση στην επιφάνεια.[\[16\]](#)

- Quantum Efficiency (QE).** Η κβαντική απόδοση ορίζεται ως ο μέσος όρος του αριθμού των ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται από ένα φωτόνιο στον ημιαγωγό. Για ενέργειες που ξεπερνούν το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, το QE ισούται με την μονάδα και αυξάνεται όταν η ενέργεια του φωτοηλεκτρονίου είναι αρκετή ώστε να

προκαλέσει ιονισμό. Για το πυρίτιο η κβαντική απόδοση είναι μεγαλύτερη από 80% στο ορατό φάσμα. Επίσης, η κβαντική απόδοση επηρεάζεται άμεσα από την θερμοκρασία.

ii. Τάση τροφοδοσίας (V_{bias}) και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (λ)

$$PDE(\lambda, V_{bias}) = \eta(\lambda) \times \varepsilon(V_{bias}) \times F \quad (2.7)$$

$$PDE = QE \times Pg \times FF$$

όπου $\eta(\lambda)$ ή QE : η κβαντική απόδοση (quantum efficiency) του πυριτίου,

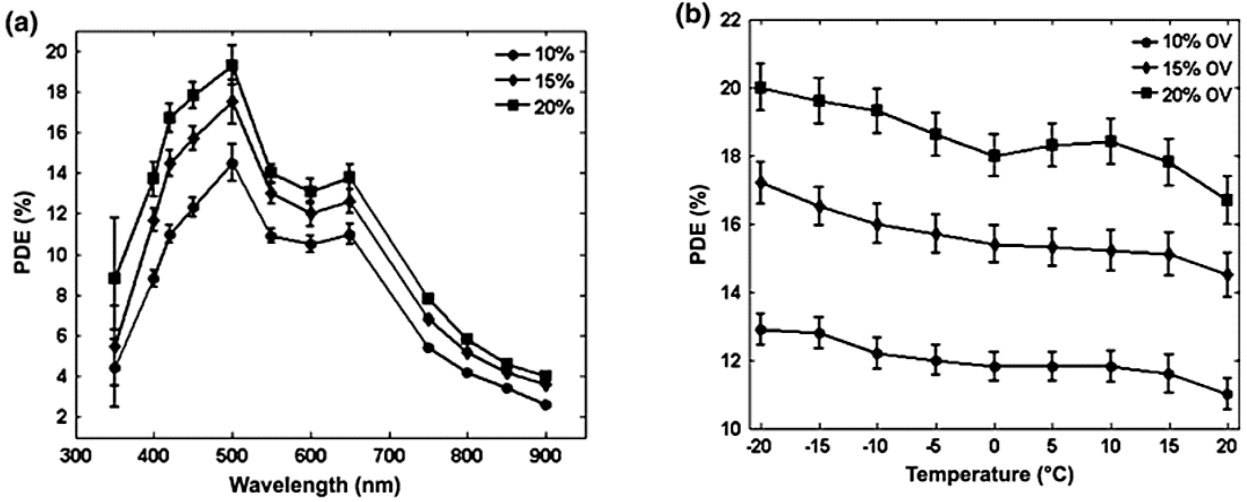
$\varepsilon(V_{bias})$ ή Pg : η πιθανότητα να ξεκινήσει το φαινόμενο της χιονοστιβάδας και εξαρτάται από τη θέση του πρωτεύοντος ζεύγους ηλεκτρονίων-οπής και την ισχύ του ηλεκτρικού πεδίου. Επιπλέον, αυξάνεται με την αύξηση της τιμής της $V_{overvoltage}$ και διαφέρει ανάλογα με το είδος του φορτίου που προκαλεί τη χιονοστιβάδα. Οι τυπικές τιμές για την πιθανότητα Pg είναι 0,5–1.

F ή FF : ο γεωμετρικός παράγοντας της διόδου (fill factor) δηλαδή η αναλογία της ενεργούς περιοχής (effective area) των pixels προς τη συνολική επιφάνεια του SiPM με τυπικές τιμές της τάξης των 20–80%.

iii. Απώλειες στο παράθυρο της εισόδου οι οποίες προκαλούνται λόγω των φαινομένων της απορρόφησης και της ανάκλασης και μπορούν να αντιμετωπιστούν με χρήση μη ανακλαστικών δομών και καθαρών υλικών.

iv. Ο Χρόνος Ανάκτησης. Ορίζεται ως η χρονική περίοδος ($< \mu sec$) έως ότου ένα pixel είναι ξανά πλήρως ευαίσθητο μετά από μια βλάβη. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάκτηση των μεμονωμένων SPADs συχνά παρερμηνεύεται ως ανάκτηση της συσκευής.

[6][16][20]



Σχήμα 2.19: (a) Απόδοση ανίχνευσης φωτονίων (PDE) συναρτήσει του μήκους κύματος της εισερχόμενης ακτινοβολίας για διαφορετικές τάσεις $V_{\text{overvoltage}}$. (b) Απόδοση ανίχνευσης φωτονίων (PDE) συναρτήσει της θερμοκρασίας για διαφορετικές τάσεις overvoltage.[20]

2.3.2 Κέρδος (Gain)

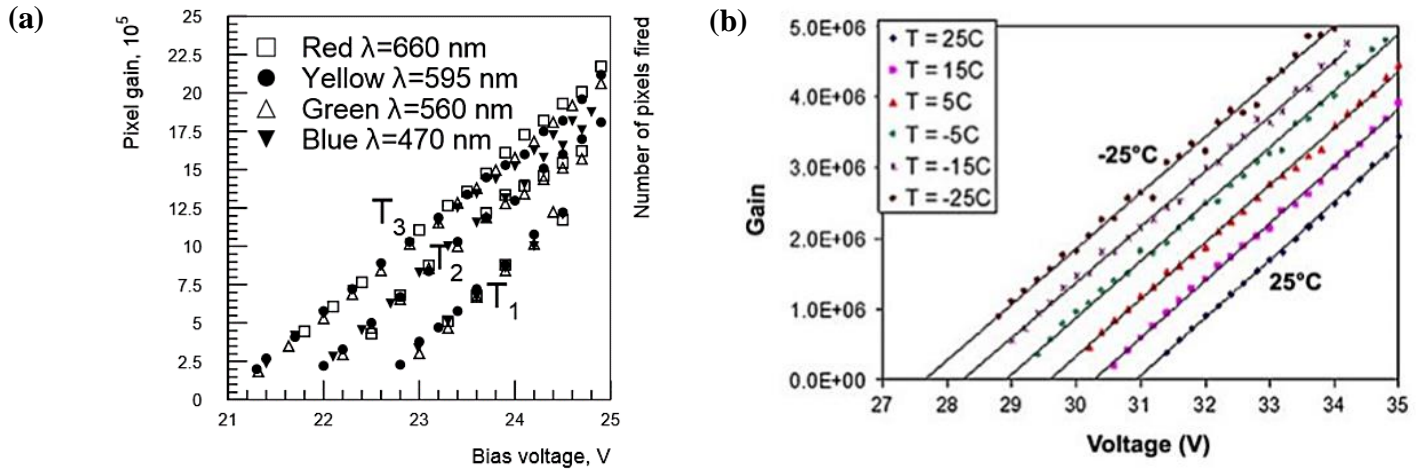
Όπως έχει αναφερθεί οι φωτοπολλαπλασιαστές πυριτίου χαρακτηρίζονται από υψηλό κέρδος (10^5 - 10^7). Είναι το κέρδος που παρέχουν στο σήμα εξόδου ενός SiPM, το οποίο προέρχεται από φωτόνια που προσπίπτουν πάνω του. Το κέρδος εξαρτάται από την τάση λειτουργίας V_{bias} , την θερμοκρασία καθώς και από την χωρητικότητα του κάθε κελιού C_{CELL} . Η μεταβολή στην θερμοκρασία έχει άμεση σχέση με την τάση κατάρρευσης $V_{\text{breakdown}}$. Κρατώντας σταθερή την V_{bias} και αυξάνοντας την θερμοκρασία τότε η τιμή της τάσης λειτουργίας $V_{\text{overvoltage}}$ ($V_{\text{overvoltage}} = V_{\text{bias}} - V_{\text{breakdown}} = \Delta V$) θα μειωθεί. Ισχύει λοιπόν η σχέση:

$$G = \frac{C_{\text{CELL}} \times \Delta V}{e^-} \quad (2.6)$$

όπου C_{CELL} : Η χωρητικότητα του κελιού.

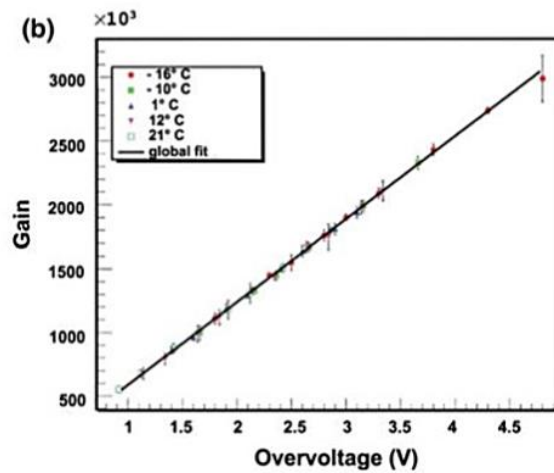
e^- : Το στοιχειώδες φορτίο του ηλεκτρονίου, που είναι ίσο με $1,602 \times 10^{-19}$ C

ΔV : Τάση $V_{\text{overvoltage}}$. [15][20]



Σχήμα 2.16: Το κέρδος συναρτίζεται της τάσης λειτουργίας για διάφορες θερμοκρασίες.

(a) Για θερμοκρασίες $T_1=+22$ °C, $T_2=-22$ °C, $T_3=-61$ °C. [15][20]



Σχήμα 2.17: Το κέρδος συναρτίζεται της τάσης $V_{\text{overvoltage}}$ για διάφορες θερμοκρασίες. [20]

2.3.3 Δυναμικό Εύρος (Dynamic Range)

Ως δυναμικό εύρος ορίζεται ο μέγιστος αριθμός φωτονίων που μπορεί να ανιχνεύσει ο ανιχνευτής πριν βρεθεί σε κορεσμό. Συγκεκριμένα για τους SiPMs το δυναμικό εύρος ορίζεται από τον συνολικό αριθμό των pixels.

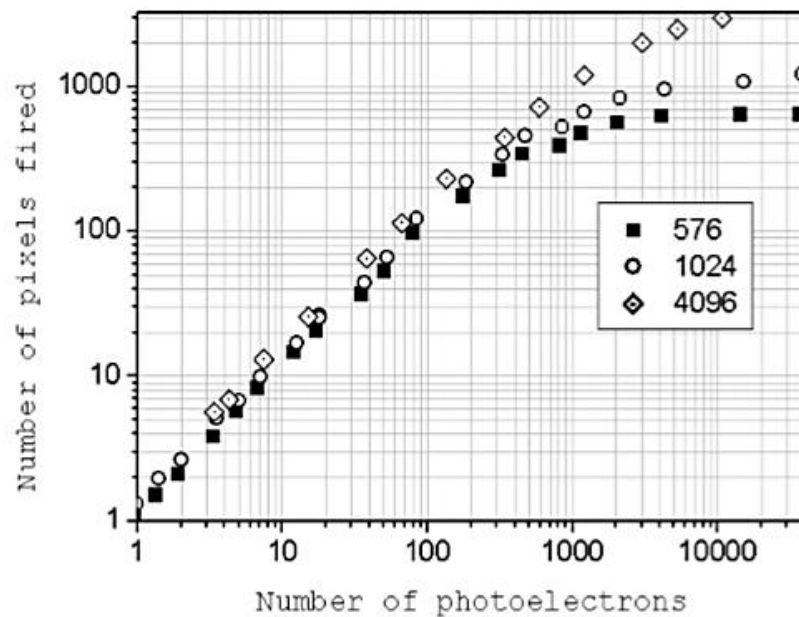
$$N_{fired} = N_{total} \left(1 - \exp \left(\frac{-N_{photons} \times PDE}{N_{total}} \right) \right) \quad (2.8)$$

όπου

N_{fired} : Τα pixels που θα ενεργοποιηθούν από τα φωτόνια.

$N_{photons}$: ο αριθμός των φωτονίων που προσπίπτουν

N_{total} : ο συνολικός αριθμός των pixels στον ανιχνευτή [6][16]



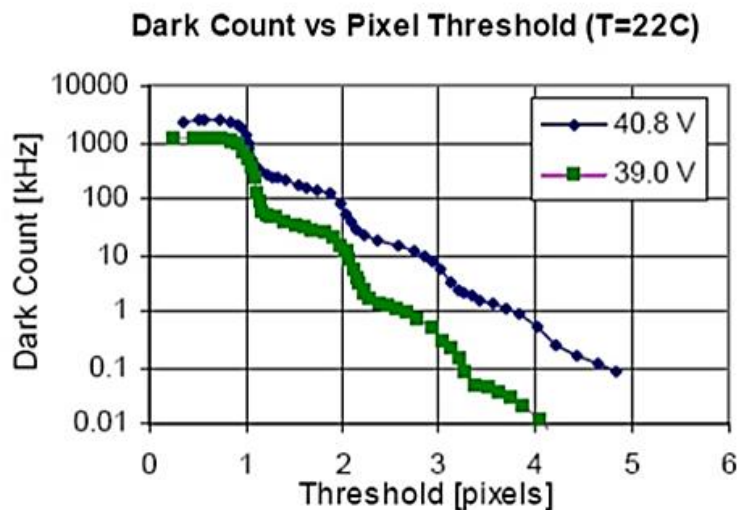
Σχήμα 2.20: Αντίδραση τριών διαφορετικών φωτοπολλαπλασιαστών πυριτίου με 575, 1024 και 4096 κελιά ως συνάρτηση των παραγόμενων φωτοηλεκτρονίων. [16]

Από το παραπάνω σχήμα είναι φανερό πως η απόκριση του αισθητήρα γίνεται μη γραμμική κατά 20% με ταυτόχρονη ενεργοποίηση περισσότερων από το 50% του συνολικού πλήθους των SPADs ενός SiPM. Όταν η ροή φωτονίων είναι χαμηλή απαιτείται υψηλή ευαισθησία στον ανιχνευτή αλλά όχι μεγάλο δυναμικό εύρος, ενώ για μεγάλη ροή (όπως στα συστήματα PET) απαιτείται μεγάλο δυναμικό εύρος. Το δυναμικό εύρος σε έναν ανιχνευτή καθορίζεται από τον αριθμό των κελιών του. Μία αύξηση, λοιπόν, στον αριθμό των κελιών προϋποθέτει την μείωση του μεγέθους τους, κάτι που μειώνει την γεωμετρική απόδοση GE και κατά συνέπεια την ολική απόδοση ανίχνευσης φωτονίων PDE. [6][16][20]

2.4 Πηγές θορύβου

2.4.1 Ρυθμός Σκότους (Dark Count Rate –DCR)

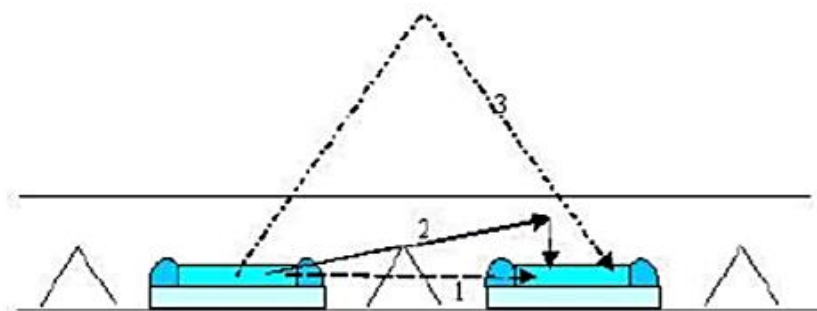
Κατά το φαινόμενο αυτό, φορείς φορτίων δημιουργούνται εκτός από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και από μεταβάσεις στην θερμοκρασία. Οι φορείς αυτοί μπορούν να προκαλέσουν το φαινόμενο της χιονοστιβάδας και γι' αυτό τον λόγο να μην μπορούν να διαφοροποιηθούν από αυτούς που επάγουν οπτικά φωτόνια. Ο ρυθμός σκότους ενός ανιχνευτή SiPM μπορεί να μετρηθεί όταν αυτός λειτουργεί σε συνθήκες σκότους, δηλαδή χωρίς εξωτερική ακτινοβολία. Τυπικές τιμές του ρυθμού σκότους σε θερμοκρασία δωματίου είναι 10^5 - 10^6 ανά δευτερόλεπτο και ανά τετραγωνικό χιλιοστό επιφάνειας αισθητήρα. [6][16]



Σχήμα 2.21 : Για δύο διαφορετικές τάσεις πόλωσης εμφανίζεται ο ρυθμός σκότους σε σχέση με το όριο διαχωρισμού. Αυτή η μέτρηση καταδεικνύει την ισχυρή εξάρτηση του τυχαίου ρυθμού ενεργοποίησης από το όριο ενεργοποίησης στα SiPM.[16]

2.4.2 Φαινόμενο Optical Crosstalk

Ένα ακόμα φαινόμενο που αποτελεί πηγή θορύβου είναι το optical crosstalk. Πρόκειται για δημιουργία παλμών από δευτερογενή ακτινοβολία που προέρχεται από φωτόνια που πέφτουν πάνω σε γειτονικά pixels και προέρχονται από ήδη ενεργοποιημένα pixels του ανιχνευτή SiPM. Υπάρχουν τρεις τρόποι παραγωγής του crosstalk: α. απευθείας, β. μέσα από την περιοχή απογύμνωσης είτε γ. μέσω ανακλάσεων. Για την μείωση αυτού του φαινομένου κάθε κελί θα πρέπει να είναι οπτικά μονωμένο σε σχέση με τα γειτονικά κελιά (trench). Όμως η λύση αυτή μειώνει την γεωμετρική απόδοση GE και την απόδοση ανίχνευσης φωτονίων του ανιχνευτή PDE.[6][16][20]



Σχήμα 2.22: Οι τρεις τρόποι παραγωγής του φαινομένου crosstalk.[6]

2.4.3 Φαινόμενο Afterpulsing

Το φαινόμενο afterpulsing συμβαίνει όταν κατά την διάρκεια της εκφόρτωσης ενός pixel ένας φορέας φορτίου παγιδεύεται και σε μεταγενέστερο χρόνο απελευθερώνεται προκαλώντας φαινόμενο χιονοστιβάδας. Το φαινόμενο afterpulsing αυξάνει με την μείωση της θερμοκρασία και εξαρτάται επίσης από την τάση λειτουργίας V_{bias} . Ακόμα έχει άμεση εξάρτηση από τον χρόνο αποκατάστασης (recovery time) του pixel και άρα από το κύκλωμα επαναφοράς της τάσης λειτουργίας (AQC, PQC). Το φαινόμενο afterpulsing οδηγεί στη δημιουργία δύο ή περισσότερων παλμών από ένα μόνο φωτόνιο καταλήγοντας σε λάθος συμπεράσματα για την απόδοση PDE του ανιχνευτή. [20]

3. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

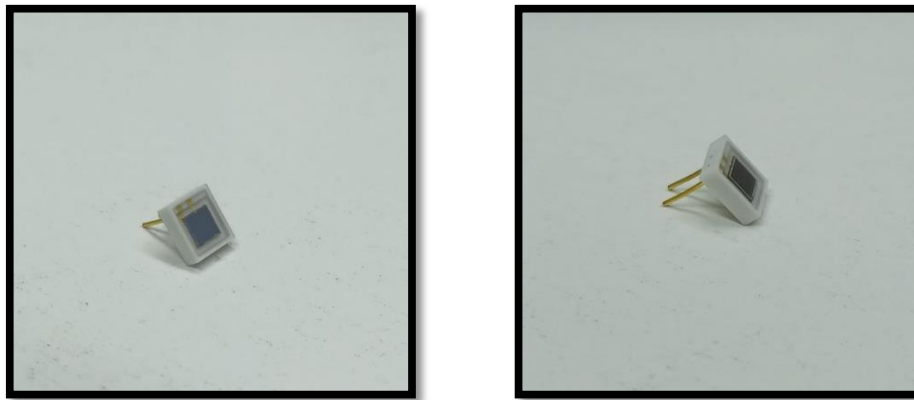
ΥΛΙΚΑ & ΜΕΘΟΔΟΣ

Για την υλοποίηση της ανιχνευτικής διάταξης που κατασκευάστηκε και μελετήθηκε σε αυτή την διπλωματική εργασία, έγινε χρήση διαφόρων δομικών στοιχείων όπως οι δύο τύποι ανιχνευτών SiPM, ο κρυσταλλικός σπινθηριστής, το κύκλωμα ενίσχυσης και μορφοποίησης των παλμών, ο ψηφιοποιητής και το λογισμικό σύνδεσης του ψηφιοποιητή με τον υπολογιστή, τα οποία συζευγμένα και συνδεδεμένα κατάλληλα έθεσαν το σύστημα σε κατάσταση λειτουργίας.

3.1 Φωτοπολλαπλασιαστές Πυριτίου S10362-33-series

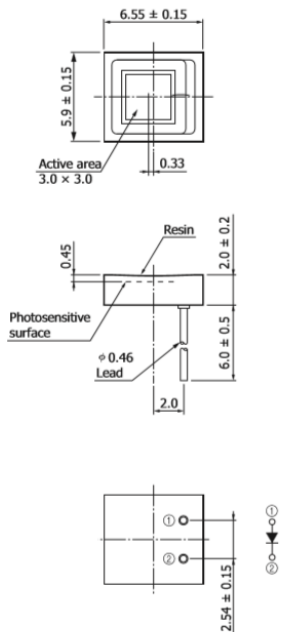
Στην παρούσα εργασία γίνεται αξιολόγηση δύο φωτοπολλαπλασιαστών πυριτίου της εταιρίας Hamamatsu Photonics K.K.. Οι φωτοπολλαπλασιαστές που χρησιμοποιήθηκαν είναι της σειράς «S10362-33 series» με επιφάνεια διαστάσεων $3 \times 3 \text{ mm}^2$.

Ο πρώτος φωτοπολλαπλασιαστής S10362-33-050C αποτελείται από 3600 φωτοευαίσθητα pixels με διαστάσεις $50 \times 50 \text{ }\mu\text{m}^2$ και ο δεύτερος S10362-33-100C αποτελείται από 900 pixels διαστάσεων $100 \times 100 \text{ }\mu\text{m}^2$. Ολόκληρη η συσκευή έχει διαστάσεις $6.55 \times 5.9 \times 2 \text{ mm}^3$ και διαθέτει δύο ακροδέκτες. Η διάμετρος τους είναι ίση με 0.51 mm και απέχουν μεταξύ τους κατά 6 mm.



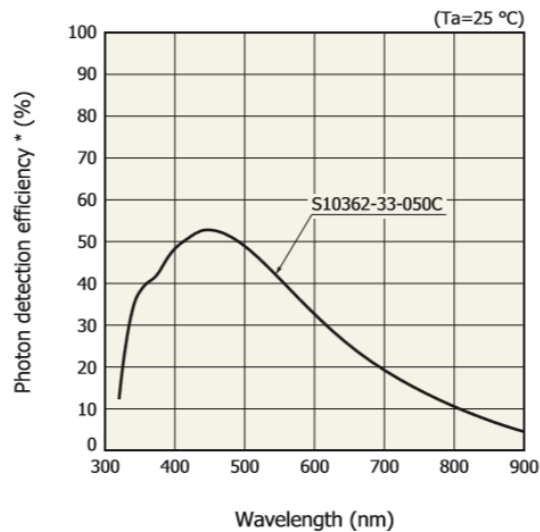
Σχήμα 3.1: Φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου της σειράς «S10362-33 series» από την εταιρεία Hamamatsu Photonics

S10362-33 series



KAPDA0123EB

Σχήμα 3.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά φωτοπολλαπλασιαστών πυριτίου της σειράς «S10362-33» από την εταιρεία Hamamatsu Photonics.



Σχήμα 3.3: Απόδοση ανίχνευσης φωτονίων (PDE) συναρτήσει του μήκους κύματος της εισερχόμενης ακτινοβολίας για τον φωτοπολλαπλασιαστή πυριτίου S10362-33-050C. Η απόδοση ανίχνευσης φωτονίων περιλαμβάνει φαινόμενα crosstalk και afterpulsing.

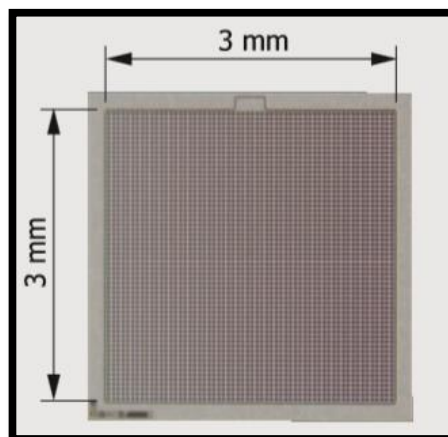
[27]

3.1.1 Λειτουργία

Τα MPPC (multi-pixel photon Counter) είναι ημιαγώγιμα εξαρτήματα μέτρησης φωτονίων τα οποία αποτελούνται από πολλά SPADs που λειτουργούν σε Geiger Mode. Κάθε ένα ξεχωριστό κελί εξάγει είναι παλμό σήματος όταν προσπέσει πάνω του ένα φωτόνιο. Αθροίζοντας τα σήματα αυτά προκύπτει ο τελικός παλμός στην έξοδο του συστήματος.

Βασικά χαρακτηριστικά αυτών των ανιχνευτικών διατάξεων είναι τα εξής:

1. Εξαιρετική ικανότητα καταμέτρησης φωτονίων (εξαιρετικό PDE σε σχέση με τα εισερχόμενα φωτόνια),
2. Υψηλό κέρδος ($10^5 - 10^6$),
3. Χαμηλή τάση λειτουργίας,
4. Λειτουργίας σε θερμοκρασία δωματίου,
5. Αναισθησία σε μαγνητικά πεδία,
6. Καλό time resolution,
7. Συμπαγή σχήμα.



Σχήμα 3.4: Μεγέθυνση φωτοπολλαπλασιαστή πυριτίου.

Βρίσκουν εφαρμογή:

1. Σε συστήματα PET,
2. Για περιβαλλοντικές αναλύσεις,
3. Πειράματα φυσικής υψηλής ενέργειας,
4. Μετρήσεις φθορισμού κ.α.

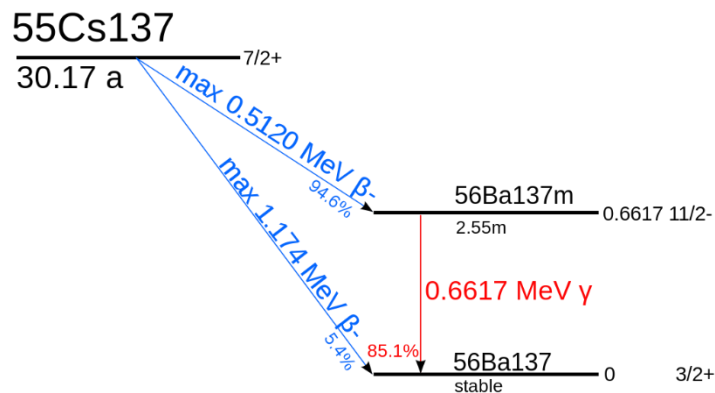
Πίνακας 3.1: Λειτουργικά χαρακτηριστικά φωτοπολλαπλασιαστών πυριτίου της σειράς «S10362-33 series» από την εταιρεία Hamamatsu Photonics. [27]

Παράμετρος	Σύμβολο	S10362-33		Μονάδα α
		-050C	-100C	
Γεωμετρική απόδοση	-	61.5	78.5	%
Φασματικό εύρος ανίχνευσης	λ	320-900		nm
Βέλτιστο μήκος κύματος	λ_p	440		nm
Τάση λειτουργίας	-	70 ± 10		V
Ρυθμός Σκότους	-	6	8	Mcps

Μέγιστος Ρυθμός Σκότους	-	10	12	<i>Mcps</i>
Time Resolution (FWHM)	-	500 to 600		<i>ps</i>
Συντελεστής θερμοκρασίας ανάστροφης τάσης	-	56		<i>mV/°C</i>
Κέρδος	<i>M</i>	7.5×10^5	2.4×10^6	-

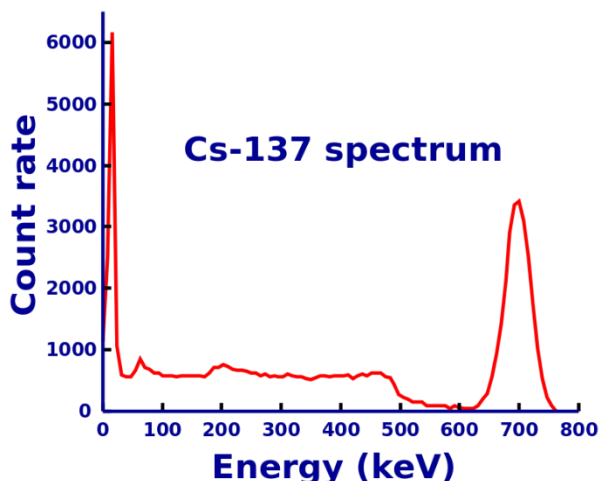
3.2 Καίσιο-137 (Cesium-137/ ^{137}Cs)

Στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας η πηγή ραδιενέργειας που χρησιμοποιήθηκε ήταν το καίσιο-137 (^{137}Cs). Το καίσιο είναι ένα τεχνητό ραδιενεργό ισότοπο, παράγει ακτίνες-γ ενέργειας 0.662 MeV και είναι προϊόν σχάσης του ουρανίου-235 (^{235}U). Έχει χρόνο ημιζωής περίπου 30,17 χρόνια και μέσω διάσπασης-β μετασχηματίζεται σε μετασταθές βάριο-137 ($^{137\text{m}}\text{Ba}$). Περίπου 95% της διάσπασης οδηγεί σε αυτό το ισομερές και το υπόλοιπο 5% μεταπίπτει απευθείας στην βασική στάθμη, η οποία είναι σταθερή. Το Ba-137m έχει χρόνο ημιζωής περίπου 153 δευτερόλεπτα, και ευθύνεται για όλες τις εκπομπές ακτίνων γ. Ένα γραμμάριο Cs-137 έχει ενεργότητα 3,215 TBq ($1\text{Bq}=1\text{s}^{-1}$).



Σχήμα 3.5 : Καίσιο-137 μετά την διάσπασης-β.

Το Cs-137 χρησιμοποιείται κυρίως για τη βαθμονόμηση ανιχνευτών ραδιενέργειας. Ακόμα, γίνεται χρήση του σαν εκπομπός ακτινοβολίας γ για μετρήσεις πυκνότητας σε πετρελαιοπηγές και σπανίως σε θεραπείες καρκίνου και σε βιομηχανικούς μετρητές ροής υγρών και πάχους υλικών. Είναι ανθρωπογενές και πολύ επικίνδυνο για την υγεία. Αντιδρά με το νερό παράγοντας υδροξείδιο του κασίου, το οποίο με την είσοδό του στο σώμα κατανέμεται στους μυς και δημιουργεί πληθώρα προβλημάτων.



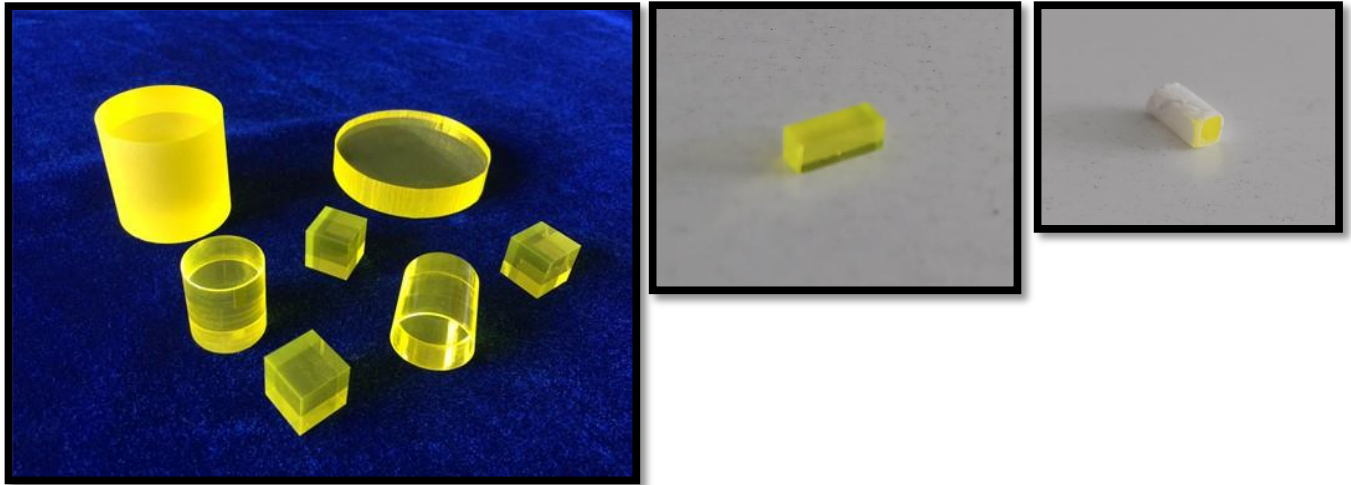
Σχήμα 3.6: Φάσμα ακτίνων- γ για ^{37}Cs . Η χαρακτηριστική κορυφή των 662 keV δεν προέρχεται απευθείας από τους ^{137}Cs , αλλά από τη διάσπαση του $^{137\text{m}}\text{Ba}$ στη σταθερή του κατάσταση. [26]

[21][22]

3.3 Κρυσταλλικοί σπινθηριστές $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG:Ce)

Οι ανιχνευτές ακτινοβολίας αποτελούνται συνήθως από σπινθηριστές συζευγμένους κατάλληλα με οπτικούς αισθητήρες. Οι λειτουργία των σπινθηριστών είναι η απορρόφηση ακτίνων X ή γ και η μετατροπή ενός μέρους της ενέργειάς τους σε ορατό φως. Οι πλέον γνωστοί ανόργανοι σπινθηριστές οξειδίου που χρησιμοποιούνται σε συστήματα φασματοσκοπίας- γ είναι αυτοί που περιέχουν προσμίξεις ιόντων δημητρίου (Ce). Ο σπινθηριστής $\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}:\text{Ce}$ (GAGG:Ce) με διαστάσεις $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ που χρησιμοποιήθηκε στην ανιχνευτική διάταξη της παρούσας εργασίας είναι εξαιρετικά σημαντικός καθώς παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλα υλικά σπινθηρισμού. Συγκεκριμένα, έχει υψηλή πυκνότητα (6.63 g/cm^3), υψηλή απόδοση φωτός (46000 φωτόνια/MeV) και σύντομο χρόνο απόσβεσης $\sim 90 \text{ ns}$. Επιπλέον, το υλικά αυτά έχουν καλή

απόκριση καθώς είναι μη υγροσκοπικά, δεν περιέχει εγγενή ραδιενέργεια και έχουν μέγιστη εκπομπή στα 530 nm που είναι ευαίσθητοι οι περισσότεροι οπτικοί ανιχνευτές. Οι συγκεκριμένοι κρύσταλλοι αγοράστηκαν από την ιαπωνική εταιρία Furukawa Co., LTD. [23]



Σχήμα 3.7: Σπινθηριστές τύπου GAGG:Ce διαφόρων μεγεθών (αριστερά), διαστάσεων $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ (μεσαία), διαστάσεων $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ με επικάλυψη τεφλόν (δεξιά).

Στην παρούσα διπλωματική εργασία για τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έγινε χρήση ενός φωτοστεγανού κουτιού που περιέχει κατάλληλο ηλεκτρονικό κύκλωμα (front end read out electronics) στο οποίο τοποθετούνται οι τρεις φωτοπολλαπλασιαστές πυριτίου της εταιρείας Hamamatsu photonics. Η ραδιενεργός πηγή συγκρατείται σε καθορισμένη απόσταση από τον ανιχνευτή. Πάνω στον κάθε ανιχνευτή SiPM είναι οπτικά συζευγμένος ο κρύσταλλος GAGG:Ce, τυλιγμένος από κατάλληλο υλικό (τεφλόν) ώστε να αυξάνεται η συλλογή των σπινθηρισμών που παράγονται στον κρύσταλλο από τον οπτικό αισθητήρα. Μεταξύ κρυστάλλου και της επιφάνειας του φωτοανιχνευτή δεν παρεμβάλλεται τεφλόν αλλά οπτικά κατάλληλο υλικό (BC-630 optical grease) που βελτιστοποιεί τη διέλευση του φωτός. Ο ανιχνευτής SiPM συνδέεται με το κύκλωμα του ενισχυτή, η έξοδος του οποίου συνδέεται στο κανάλι Ch0 του ψηφιοποιητή. Η λήψη των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω του λογισμικού DPP-CI Control Software.

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά του σπινθηριστή GAGG:Ce. [24]

<i>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ</i>	<i>ΤΙΜΗ</i>
<i>Φωτεινή απόδοση (light yield)</i>	<i>46000 photons/MeV</i>
<i>Χρόνος Απόσβεσης (decay time)</i>	<i>50 – 150 ns</i>
<i>Μέγιστη εκπομπή λ</i>	<i>520 nm</i>
<i>Πυκνότητα ρ</i>	<i>6,63 g/cm³</i>
<i>Ενεργός ατομικός αριθμός</i>	<i>54.4</i>
<i>Υδροσκοπικοί</i>	<i>Όχι</i>
<i>Σημείο τήξης</i>	<i>1850 °C</i>

3.4 Παράμετροι απόδοσης

Για την αξιολόγηση των φωτοπολλαπλασιαστών χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω παράμετροι:

- 1. Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα (Energy Resolution) R (%):** εκφράζει την ικανότητα ενός συστήματος να καταγράφει ως ξεχωριστά δύο φωτόνια με πολύ μικρή διαφορά στην ενέργειά τους, Μπορεί να διακρίνει δηλαδή την μικρή ενεργειακή διαφορά καθώς και τον βαθμό διεύρυνσης του φάσματος μίας πηγής από μονοενεργειακά φωτόνια.

$$R (\%) = \frac{FWHM}{\text{Photopeak Centroid}} \times 100\% \quad (3.1)$$

FWHM: το πλήρες εύρος στο μισό του μεγίστου, και

Photopeak centroid: η θέση στο ενεργειακό φάσμα της τιμής της ενέργειας των φωτονίων. [1]

- 2. Φωτοποσοστό (Photofraction) Pf (%):** χαρακτηρίζεται το ποσοστό των μετρήσεων που προέρχονται από το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Συγκεκριμένα, ορίζεται ως ο αριθμός μετρήσεων που καταγράφηκαν στην περιοχή της φωτοκορυφής του φάσματος προς τον αριθμό των γεγονότων που καταγράφηκαν κατά μήκος ολόκληρου του φάσματος. [1]

$$Pf (\%) = \frac{\text{Number of Events (Photopeak)}}{\text{Number of Events (Spectrum)}} \times 100\% \quad (3.2)$$

3. Ευαισθησία (Sensitivity) S (%): ορίζεται ως η απόκριση του ανιχνευτή σε μια συγκεκριμένη ραδιενεργό πηγή και είναι το πηλίκο του αριθμού των γεγονότων που καταγράφηκαν συνολικά σε όλο το μήκος του φάσματος προς τον αριθμό των φωτονίων- γ που εκπέμπονται από την πηγή κατά τη χρονική διάρκεια της μέτρησης. [1]

$$S (\%) = \frac{\text{Number of Events (Spectrum)}}{R_{Bq} \times 1800 \text{ sec}} \times 100\% \quad (3.3)$$

όπου R_{Bq} η τιμή της ενεργότητας της πηγής σε Becquerel.

3.5 Ψηφιοποιητής CAEN DT5720B

Για να μετατραπεί το αναλογικό σήμα που παίρνουμε από την έξοδο του φωτοπολλαπλασιαστή σε ψηφιακό σήμα γίνεται χρήση του **CAEN DT5720**. Είναι ένας σύγχρονος τετρακάναλος ψηφιοποιητής (Analog to Digital Converter – ADC). Διαθέτει δυναμικό εύρος στην είσοδο 2 Vpp, με δυνατότητα ανάλυσης 12 bit και εύρος ζώνης 125 MHz. Επιπλέον, η ταχύτητα δειγματοληψίας είναι 250 MS/s ταυτόχρονα σε κάθε κανάλι. Η συσκευή ζυγίζει 680 g και έχει διαστάσεις 154x50x164 mm³ και καταναλώνει ρεύμα 1.5 A (+12 V).

Κάθε ένα από τα κανάλια του διαθέτει μία SRAM μνήμη (Static RAM) η οποία αποτελείται από έναν αριθμό ενταμιευτών μνήμης (memory buffers) ο οποίος μπορεί να προγραμματιστεί. Η συσκευή, στην διάρκεια της ψηφιοποίησης, αποθηκεύει έναν αριθμό δειγμάτων σε κάθε ενταμιευτή και έπειτα τον «παγώνει», καθιστώντας με αυτόν τον τρόπο επιτρεπτή την ανάγνωση των δεδομένων. Υπάρχει δυνατότητα να συνεχιστεί η λήψη (acquisition) των δεδομένων στον επόμενο ενταμιευτή χωρίς την μεσολάβηση νεκρού χρόνου (dead time). Δηλαδή η ανάγνωση του «παγωμένου» ενταμιευτή καθώς και η διαδικασία εγγραφής των δεδομένων στην μνήμη δεν έχουν άμεση εξάρτηση. Με αυτόν τον τρόπο η συνεχής μετατροπή του αναλογικού σήματος στην είσοδο

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



Σχήμα 3.8: Ο τετρακάναλος ψηφιοποιητής DT5720 της εταιρίας CAEN S.p.A.

Το trigger signal, δηλαδή το σήμα ενεργοποίησης, χορηγείται είτε μέσω της εισόδου στη πρόσοψη της συσκευής με την ένδειξη TRG IN είτε μέσω του λογισμικού με αντίστοιχη ένδειξη SW triggers. Μπορεί επίσης να παραχθεί και εσωτερικά σε κάθε κανάλι (auto-trigger). Το μοντέλο DT5720 δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να αναγνώσει τα ληφθέντα δεδομένα μέσω οπτικής ζεύξης ή μέσω USB 2.0. Στην περίπτωση σύνδεσης με USB 2.0 υποστηρίζονται ταχύτητες μέχρι 30 MB/s ενώ με οπτική ζεύξη οι ταχύτητες επιτυγχάνονται μέχρι και 80 MB/s. [25]

3.5.1 Λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας των παλμών (DPP Firmware)

Το λογισμικό ψηφιακής επεξεργασίας των παλμών (Digital Pulse Processing Firmware – DPP Firmware) αφού εγκατασταθεί στον DT5720 και έπειτα από κατάλληλους αλγόριθμους διαχειρίζεται, τη λήψη των δεδομένων, την επεξεργασία και την απεικόνιση τους.

Με τον τρόπο αυτό, ο DT5720 μετατρέπεται σε ένα σύστημα με πολλαπλές δυνατότητες, που μπορεί ικανοποιητικά να αντικαταστήσει πολλές από τις συσκευές που βρίσκουν εφαρμογή στην φασματοσκοπία, όπως παραδείγματος χάρη τον πολυκαναλικό αναλυτή (Multichannel Analyzer – MCA).

Από την εταιρία CAEN S.p.A. παρέχονται δύο αλγόριθμοι για αυτό τον σκοπό:

i. ***Digital Pulse Processing for Charge Integration (DPP-CI):***

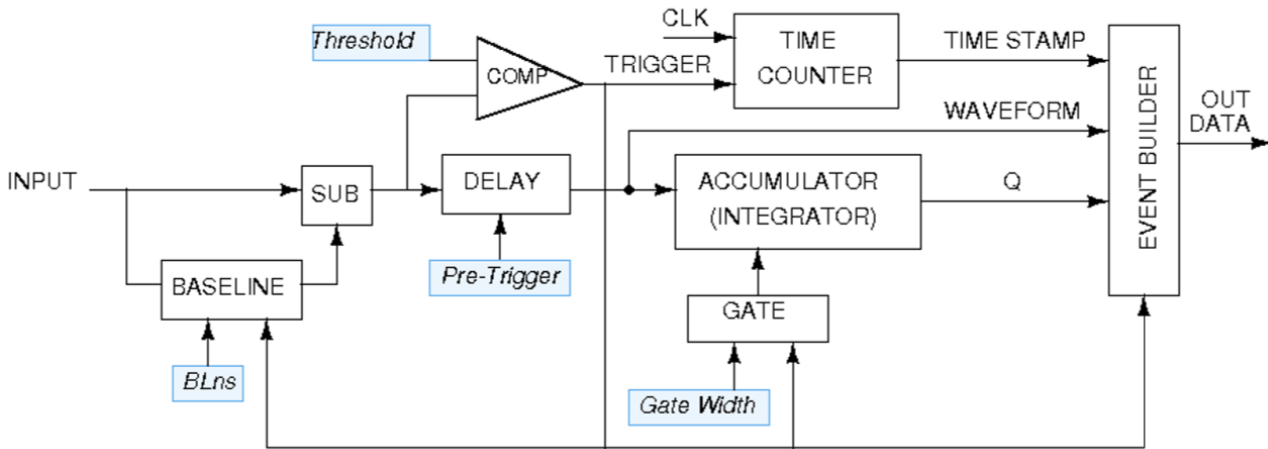
Αλγόριθμος single gate, δηλαδή μονής πύλης, που είναι συμβατός με το μοντέλο DT5720.

- ii. **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 τετρακάναλος ψηφιοποιητής, από την απλή καταγραφή κυματομορφών (oscilloscope mode), μπορεί να μετατραπεί σε ένα φασματοσκοπικό σύστημα με ικανότητα παροχής πληροφοριών οι οποίες αφορούν στα ενεργειακά αλλά και στα χρονικά χαρακτηριστικά του σήματος εισόδου (histogram mode). Μέσα από ένα γραφικό περιβάλλον χρήστη (Graphic User Interface – GUI), που έχει υλοποιηθεί σε Java, το λογισμικό επιτρέπει στον ίδιο τον χρήστη να καθορίζει τις παραμέτρους λήψης (acquisition parameters) που οδηγούν στην καταγραφή των παλμών εισόδου, καθώς επίσης τη δημιουργία αλλά και αποθήκευση των αρχείων εξόδου (κυματομορφές, ιστογράμματα). [25]

3.5.2 Αρχή λειτουργίας του αλγορίθμου DPP-CI

Ο αλγόριθμος αυτός υπολογίζει συνεχώς την τιμή της γραμμής βάσης (baseline) του σήματος εισόδου. Έπειτα πραγματοποιεί την πράξη της αφαίρεσης μεταξύ της παραπάνω τιμής από το σήμα εισόδου ($input - baseline = input_sub$). Συγκρίνει την $input_sub$, μέσα από έναν συγκριτή, με την τιμή ενός κατωφλιού (παράμετρος $threshold$). Για την έναρξη της καταγραφής το έναυσμα (trigger) δίνεται μόνο όταν ισχύει ότι $input_sub > threshold$. Μόλις το έναυσμα πραγματοποιηθεί, το σήμα εισόδου θα καθυστερήσει κατά έναν συγκεκριμένο αριθμό δειγμάτων (pre-trigger) που έχει προγραμματιστεί έτσι ώστε η καταγραφή να αρχίσει λίγο πριν την πραγματοποίηση του έναυσματός (gate offset).



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα λειτουργίας του αλγορίθμου DPP-CI.

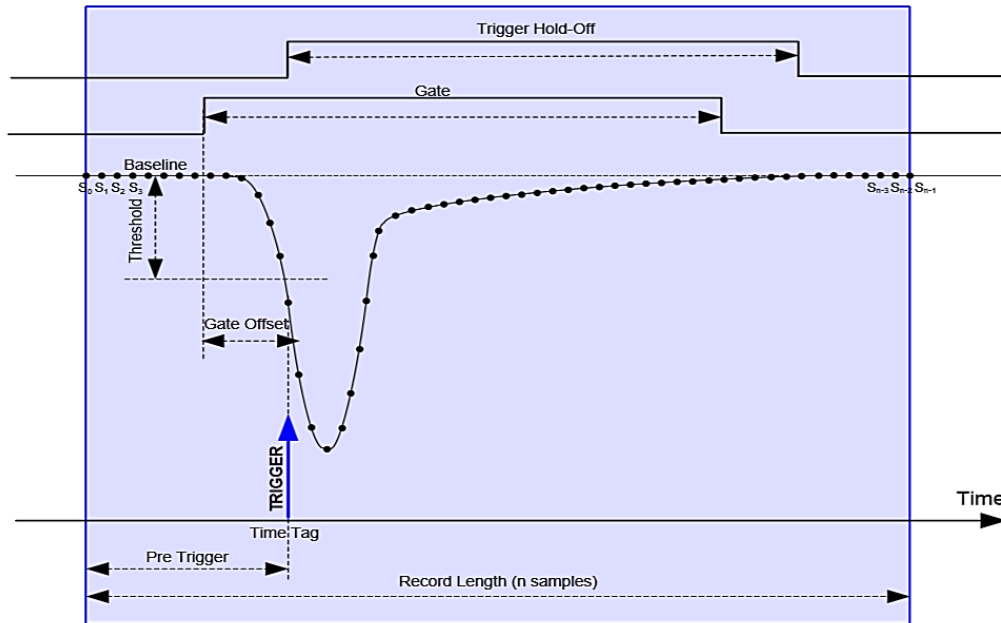
Το σήμα που ψηφιοποιείται από το σύστημα, είναι το τμήμα του σήματος εισόδου το οποίο εμπεριέχεται μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο (gate). Για την σωστή ψηφιοποίηση του σήματος, η παράμετρος trigger hold-off εξασφαλίζει ότι σε όλη τη διάρκειά της δεν θα συμβούν άλλα εναύσματα. Η τιμές της παραμέτρου trigger hold-off και η διάρκεια του σήματος που ψηφιοποιείται θα πρέπει να είναι συγκρίσιμα. Το σύστημα είναι έτοιμο να δώσει ένα νέο έναυσμα μετά το πέρας του χρονικού παραθύρου που ορίζουν οι παράμετροι gate και trigger hold-off. Τα δεδομένα αποθηκεύονται στην συσκευή, σε έναν ενταμιευτή μνήμης και τόσο ο όγκος των δεδομένων που θα αποθηκευτούν σε κάθε ενταμιευτή όσο και ο αριθμός των ενταμιευτών που διαιρείται η συνολική μνήμη SRAM, ρυθμίζονται αυτόματα. [25]

3.5.3 Παράμετροι λήψης δεδομένων (Data acquisition parameters)

Το λογισμικό του ψηφιοποιητή δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να ρυθμίζουν τις παραμέτρους για την σωστή απεικόνιση του σήματος εισόδου αλλά και την λήψη και αποθήκευση του ιστογράμματος ορίζοντας συγκεκριμένες τιμές για τις παρακάτω παραμέτρους:

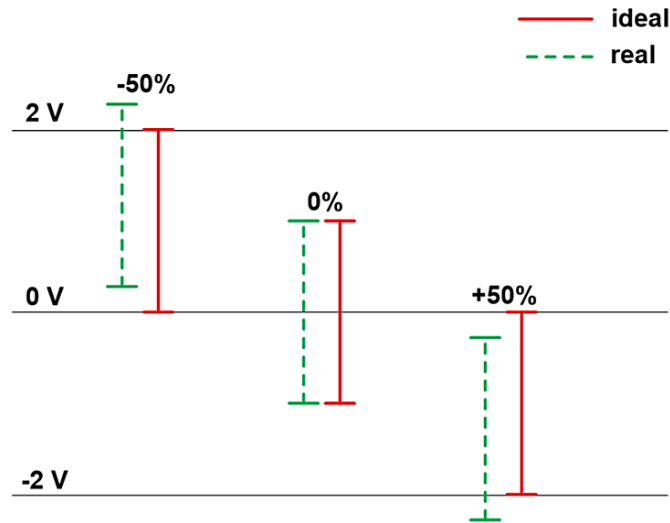
- **Stop Time (s):** η παράμετρος αυτή ορίζει την χρονική διάρκεια της λήψης των δεδομένων. Όταν το χρονικό αυτό διάστημα περάσει, η λήψη σταματά.

- **SW Triggers:** Σε περίπτωση που οι υπόλοιποι παράμετροι λήψης δεν έχουν ρυθμιστεί σωστά η παράμετρος SW Triggers επιβάλλει το έναυσμα στο σήμα εισόδου. Έπειτα από την σωστή ρύθμιση των παραμέτρων, ο χρήστης μπορεί να απενεργοποιήσει την επιλογή αυτή και έπειτα να ενεργοποιήσει το self-trigger για το κάθε κανάλι.



Σχήμα 3.11: Οι παράμετροι λήψης στο λογισμικό DPP-CI Control Software του ψηφιοποιητή.

- **DC Offset (%):** η τιμή αυτή προστίθεται στο σήμα εισόδου έτσι ώστε το εύρος του να προσαρμοστεί κατάλληλα στο δυναμικό εύρος εισόδου του ψηφιοποιητή. Εκφράζεται ως το επί τις εκατό (%) δυναμικό εύρος στην είσοδο του ψηφιοποιητή με εύρος τιμών μεταξύ -50% και +50%. Θεωρητικά η τιμή DC Offset = 0 σημαίνει ότι ο παλμός εισόδου βρίσκεται στο μέσον του δυναμικού εύρους του ψηφιοποιητή (2048 counts). Η τιμή DC Offset = +50% σημαίνει πως ο παλμός εισόδου βρίσκεται στο κατώτερο όριο (0 counts) ενώ, τέλος, η τιμή DC Offset = -50% τοποθετεί τον παλμό στο ανώτερο όριο (4096 counts). Για σήματα τα οποία βρίσκονται κοντά στα όρια του εύρους εισόδου του ψηφιοποιητή η παράμετρος αυτή αποτρέπει τον κορεσμό.



Σχήμα 3.12: Παράμετρος DC Offset.

- **Pulse Polarity:** η παράμετρος ρυθμίζει την πολικότητα του παλμού εισόδου και παίρνει τις τιμές NEGATIVE ή POSITIVE. Ο αλγόριθμος έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να διαχειρίζεται τους αρνητικούς παλμούς. Όταν ο αναλογικός παλμός στην είσοδο έχει θετικές τιμές, πριν από την εφαρμογή του αλγορίθμου είναι απαραίτητη η αντιστροφή του.
- **Threshold (LSB):** ορίζει ένα κατώφλι δυναμικού για τους παλμούς εισόδου. Όταν η τιμή του σήματος στην είσοδο ξεπερνάει την τιμή που έχει οριστεί, τότε θα πραγματοποιηθεί το έναυσμα και θα αρχίσει η ψηφιοποίηση του σήματος. Η τιμή του threshold εκφράζεται σε LSB. Η τιμή της σε mV υπολογίζεται σύμφωνα με το εύρος εισόδου του ψηφιοποιητή. Για την ψηφιοποιητή του σήματος εισόδου με δυνατότητα ανάλυσης 12 bit και εύρος εισόδου 2 V_{pp} ισχύει:

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

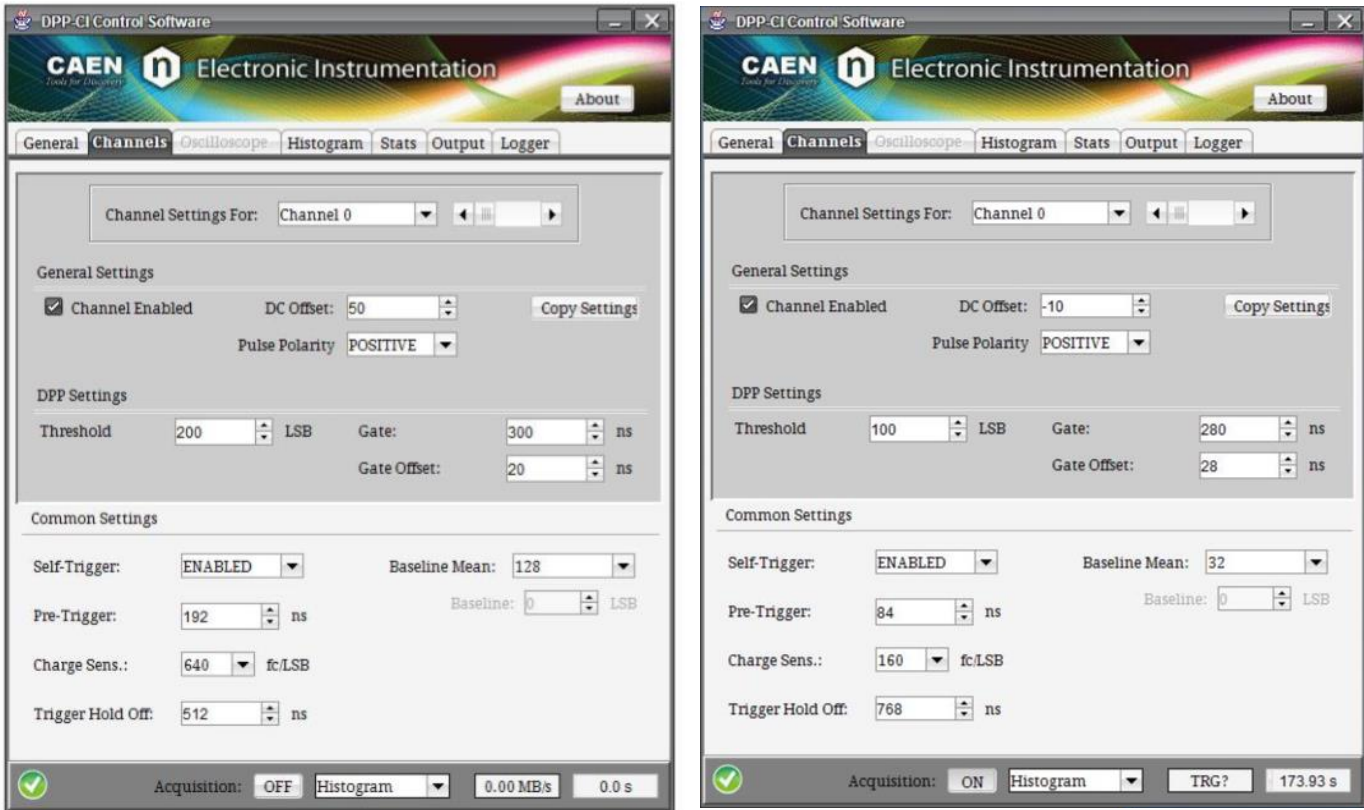
- **Gate (ns):** καθορίζει το τμήμα του σήματος που θα ψηφιοποιηθεί. Γενικά το gate θα πρέπει να καλύπτει ολόκληρο το εύρος του σήματος εισόδου.
- **Gate Offset (ns):** καθορίζει τον χρόνο για τον οποίο το σήμα εισόδου θα καθυστερήσει, ώστε η έναρξη της καταγραφής να πραγματοποιηθεί λίγο πριν πραγματοποιηθεί το έναυσμα. Πρέπει να ικανοποιείται η εξής σχέση:

$$\text{Gate Offset} \leq \text{Pre-trigger} + 28 \text{ ns}$$

- **Self-trigger:** η παράμετρος αυτή μπορεί να πάρει τιμές ENABLE ή DISABLE. Είναι απαραίτητη επιλογή για την παραγωγή του εναύσματος σε κάθε κανάλι.
- **Pre-trigger (ns):** καθορίζει το τμήμα του σήματος εισόδου που θα απεικονιστεί πριν από το έναυσμα. Στην ουσία είναι ο χρόνος για τον οποίο το σήμα ξεκινά να αποθηκεύεται, πριν παραχθεί το έναυσμα. Είναι επιθυμητό να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή.
- **Trigger Hold-off (ns):** καθορίζει το χρονικό εύρος 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 στην είσοδο ξεπερνάει το δυναμικό εύρος του ψηφιοποιητή συνίσταται η μείωση της παράμετρος αυτής έτσι ώστε να αποφευχθεί ο κορεσμός. Η παράμετρος charge sensitivity παίρνει τιμές 40, 160, 640 και 2560 fC/LSB.
- **Baseline Mean:** είναι ο αριθμός των δειγμάτων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της γραμμής βάσης του σήματος εισόδου.
- **Record Length (ns):** καθορίζει την χρονική διάρκεια του παραθύρου λήψης. Μετράται σε «points», και συγκεκριμένα 1 point = 4 ns. [25]

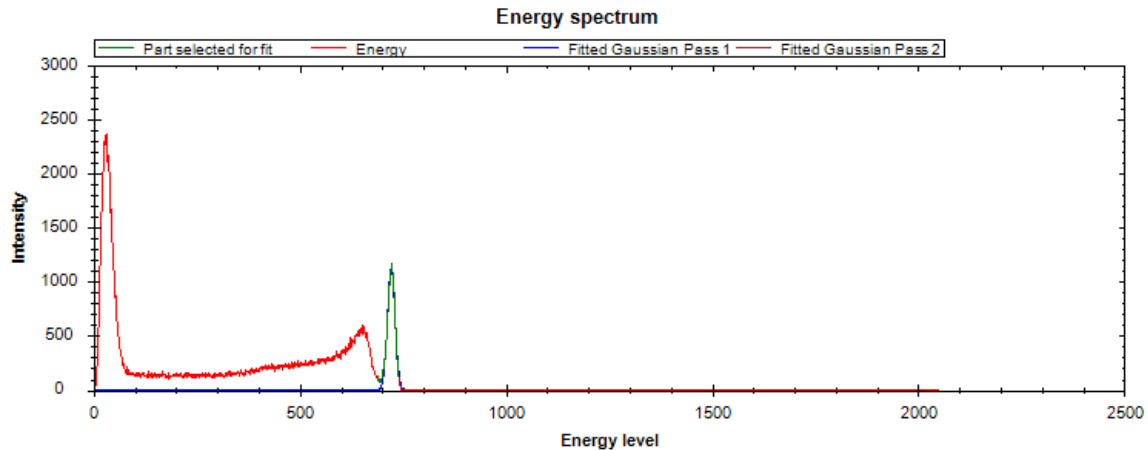
3.6 Καταγραφή ενεργειακών φασμάτων

Για την πραγματοποίηση των μετρήσεων και την καταγραφή των φασμάτων ο κρύσταλλος παρέμεινε στο σκοτάδι για περίπου 24 ώρες και η χρονική διάρκεια κάθε μέτρησης ήταν 30 λεπτά. Μέσα από το πρόγραμμα του ψηφιοποιητή ορίστηκαν οι κατάλληλες παράμετροι για την λήψη των δεδομένων ([σχήμα 3.12](#)). Αυτές ορίστηκαν με βάση το πλάτος και τη χρονική διάρκεια των παλμών ρεύματος που εμφανίζονται στον αναλογικό παλμογράφο.



Σχήμα 3.13: Παράμετροι λήψης δεδομένων στο πρόγραμμα DPP-CI Control Software για την πηγή ^{137}Cs . Για τον φωτοπολλαπλασιαστή πυριτίου S10362-33-050C (δεξιά) και για τον S10362-33-100C (αριστερά).

Το λογισμικό του ψηφιοποιητή δίνει την δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων σε αρχείο με την μορφή DAT, το οποίο περιέχει δύο στήλες. Στην πρώτη στήλη καταγράφεται ο αριθμός του καναλιού του τετρακάναλου ψηφιοποιητή και στην δεύτερη ο αριθμός των γεγονότων τα οποία καταγράφηκαν στο κάθε κανάλι. Μέσα από κατάλληλο κώδικα σε MATLAB τα 36000 κανάλια του αρχείου τα μετατρέψαμε σε 2048. Ο κώδικας αυτός μας επιστρέφει ένα αρχείο (txt) το οποίο αποτελείται από μία στήλη και 2048 τιμές. Οι τιμές αυτές αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των γεγονότων που καταγράφηκαν σε κάθε κανάλι. Το αρχείο έπειτα φορτώθηκε σε πρόγραμμα C++ (DPCT Energy v.04) που απεικονίζει το ενεργειακό φάσμα του ραδιοϊσοτόπου. Επιπλέον υπολογίζει το πλήρες εύρος στο μισό του μεγίστου (FWHM), την ενεργειακή διακριτική ικανότητα (energy resolution) και τον αριθμό των γεγονότων που καταγράφηκαν σε ολόκληρο το φάσμα ή τμήμα του.



Σχήμα 3.14: Πρόγραμμα DPCT Energy v.04.

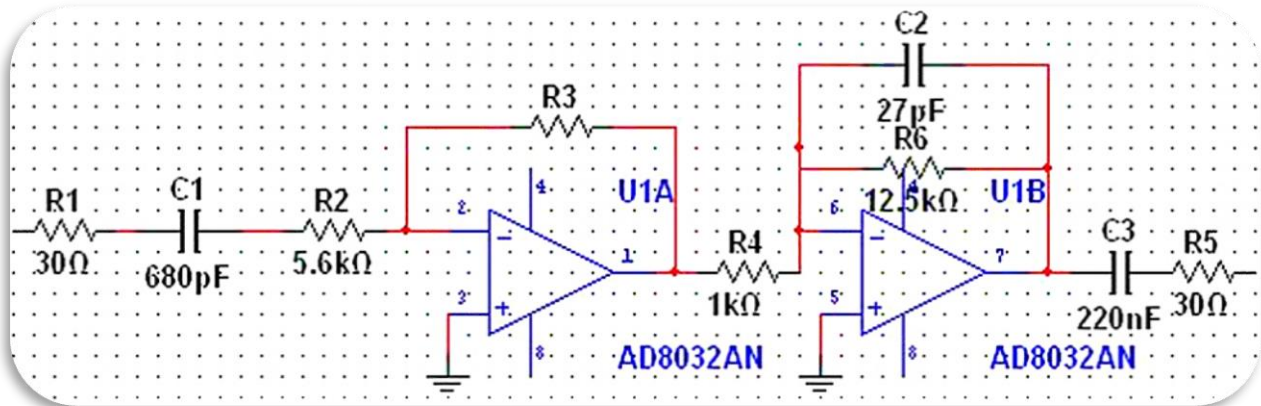
3.7 Πειραματικό μέρος & μέθοδοι

Η πειραματική διάταξη πραγματοποιήθηκε μέσα σε φωτοστεγανό κουτί. Η πηγή ραδιενέργειας (^{137}Cs) σταθεροποιήθηκε κατάλληλα σε ορισμένη απόσταση από τον κρύσταλλο GAGG:Ce, ο οποίος ήταν οπτικά συζευγμένος με τον φωτοπολλαπλασιαστή πυριτίου SiPM. Μεταξύ του σπινθηριστή και φωτοπολλαπλασιαστή παρεμβάλλεται διαφανές τζελ (BC-630 optical grease). Το τζελ αυτό χρησιμοποιείται με σκοπό να βελτιστοποιεί τη διέλευση του φωτός. Ο



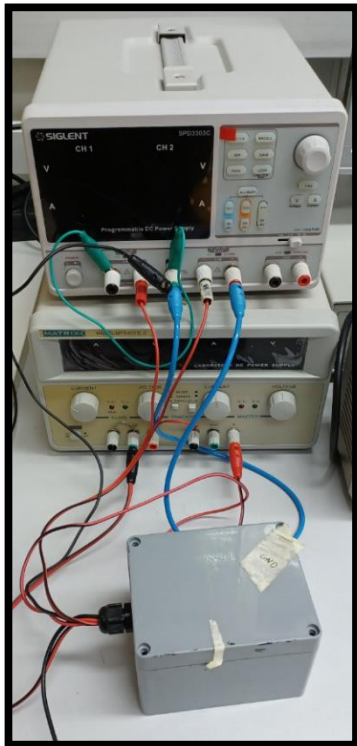
Σχήμα 3.15 : Τμήμα της πειραματικής διάταξης. Διακρίνονται το εσωτερικό του φωτοστεγανού κουτιού.

φωτοπολλαπλασιαστής συνδέεται κατάλληλα με τον ενισχυτή η έξοδος του οποίου έρχεται σε σύνδεση με το κανάλι Ch0 του ψηφιοποιητή. Τα δεδομένα λήφθηκαν μέσω του λογισμικού DPP-CI Control Software.

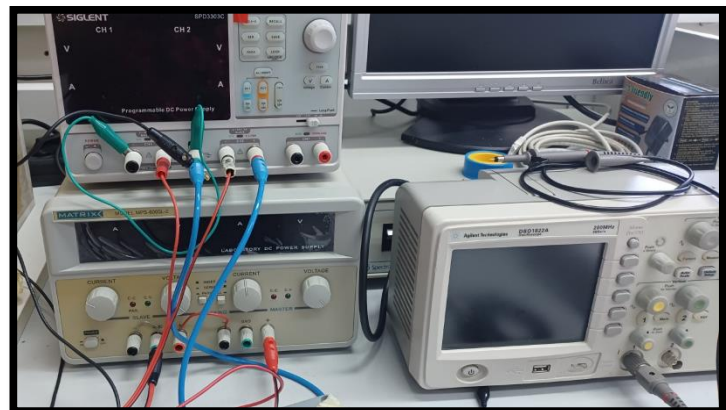


Σχήμα 3.16: Κυκλωματικό διάγραμμα πειραματικής διάταξης. [33]

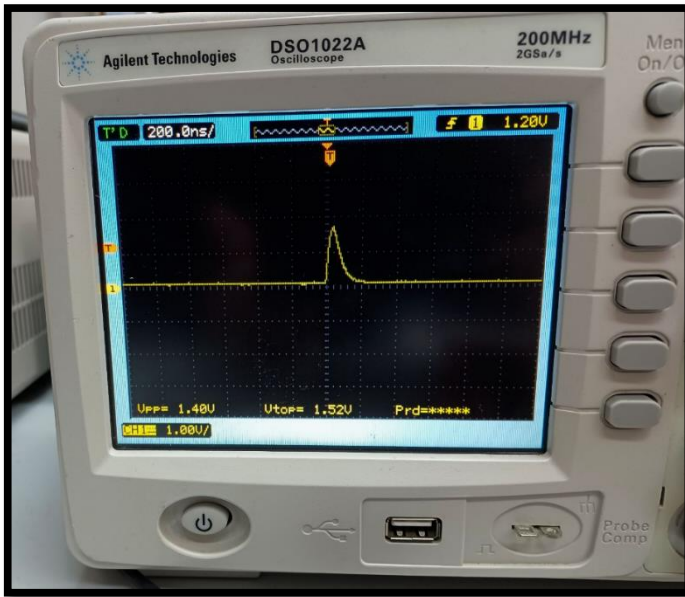
Πραγματοποιήθηκαν διαφορετικές μετρήσεις των 30 λεπτών η καθεμία, για τον κάθε φωτοπολλαπλασιαστή ξεχωριστά. Με την βοήθεια δύο τροφοδοτικών (SIGLENT, Model: SPD3303C και MATRIX, Model: MPS-6005L-2) και ενός πολυμέτρου (GoldStar DM-331) ρυθμίστηκαν οι κατάλληλες τιμές τάσης για τον κάθε φωτοπολλαπλασιαστή ελέγχοντας ότι δίνουν σήμα στον παλμογράφο (Agilent Technologies, Model: DSO1022A).



Σχήμα 3.17: Πειραματική διάταξη. Διακρίνονται το φωτοστεγανό κουτί και τα δύο τροφοδοτικά.



Σχήμα 3.18: Πειραματική διάταξη. Διακρίνονται τα δύο τροφοδοτικά και ο παλμογράφος.



Σχήμα 3.19: Πειραματική διάταξη. Διακρίνεται το σήμα από την έξοδο του ενισχυτή, όπως αυτό εμφανίζεται στον αναλογικό παλμογράφο(αριστερά) και ο τετρακάναλος ψηφιοποιητής DT5720 της εταιρίας CAEN (δεξιά).

4. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

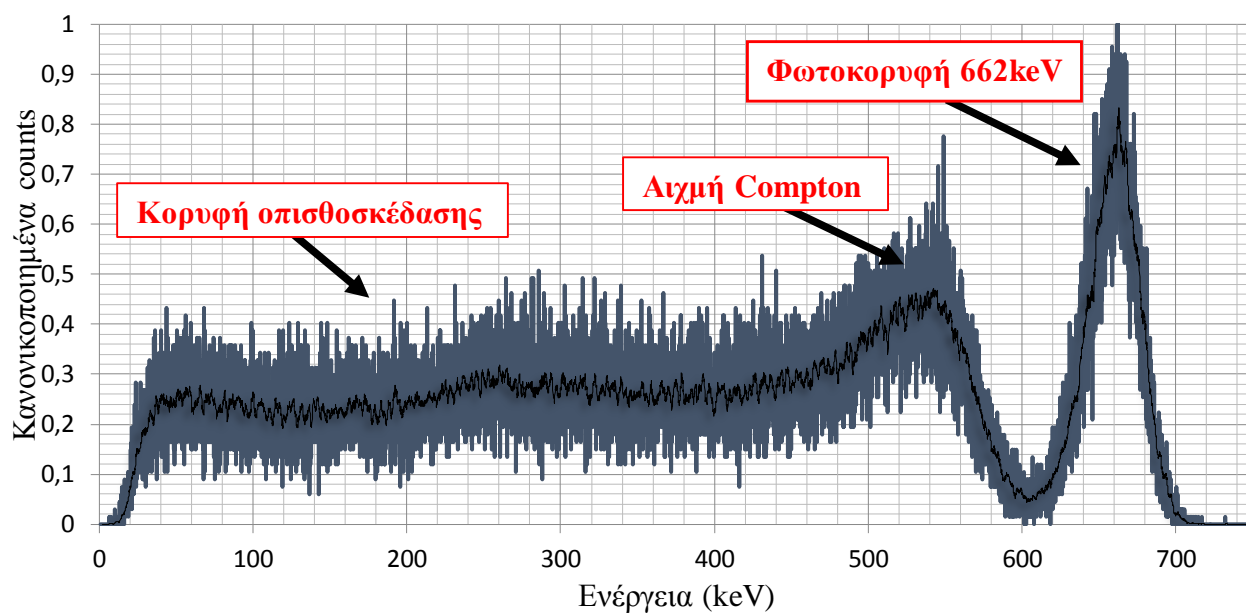
Στόχος της παρούσας πειραματικής εργασίας είναι η αξιολόγηση των δύο φωτοπολλαπλασιαστών πυριτίου της εταιρείας Hamamatsu Photonics οι οποίοι έρχονται σε σύζευξη με τον κρυσταλλικό σπινθηριστή GAGG:Ce ($3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$). Σκοπός είναι η κατασκευή και η μελέτη μίας ολοκληρωμένης διάταξης φασματικής ανίχνευσης ακτινοβολίας γ , καθώς και η ενσωμάτωση της διάταξης αυτής σε συστήματα διάγνωσης και θεραπείας. Ο ανιχνευτής αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας μία πηγή ^{137}Cs (0.662 MeV) ως προς τρεις παραμέτρους:

- την ενεργειακή διακριτική ικανότητα,
- την ευαισθησία και
- το φωτοποσοστού.

4.1 Φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου S10362-33-100C

Πίνακας 4.1: Τιμές ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, φωτοποσοστού και ευαισθησίας για κάθε τάση λειτουργίας.

Τάση Λειτουργίας (V)	Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα (%)	Φωτοποσοστό (%)	Ευαισθησία (%)
71.00	6.10	16.73	0.26
71.10	5.10	16.00	0.27

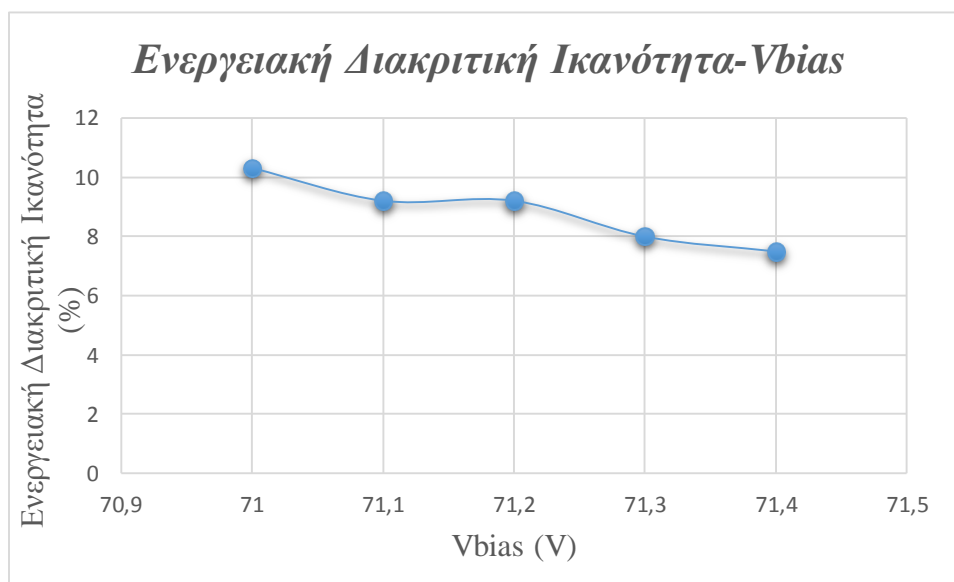


Σχήμα 4.1 : Κανονικοποιημένο φάσμα ^{137}Cs με σπινθηριστή διαστάσεων $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ με τερφλόν σε σύζευξη με τον SiPM S1032-33-100 για τάση λειτουργίας 71 V.

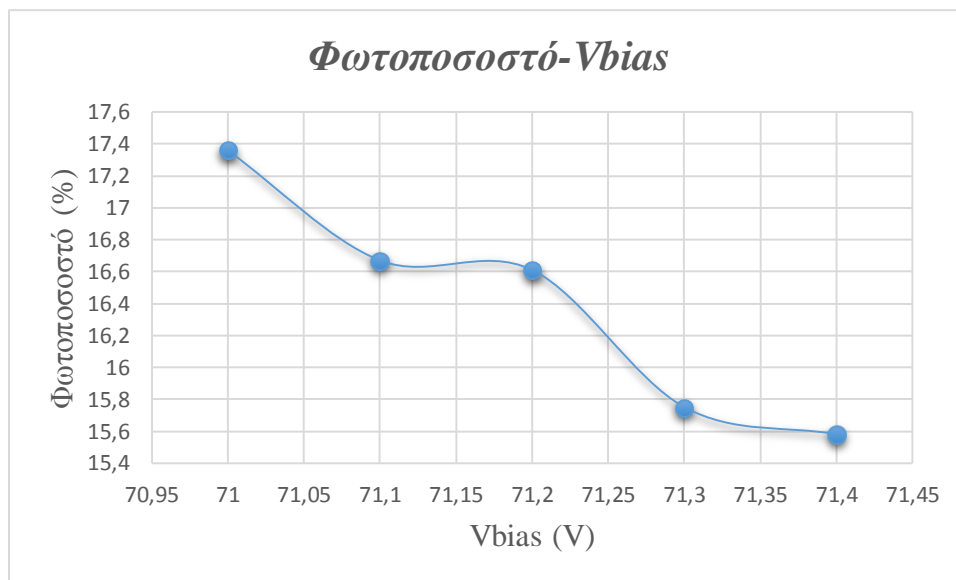
4.2 Φωτοπολλαπλασιαστής πυριτίου S10362-33-050C

Πίνακας 4.2: Τιμές ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, φωτοποσοστού και ευαισθησίας για κάθε τάση λειτουργίας.

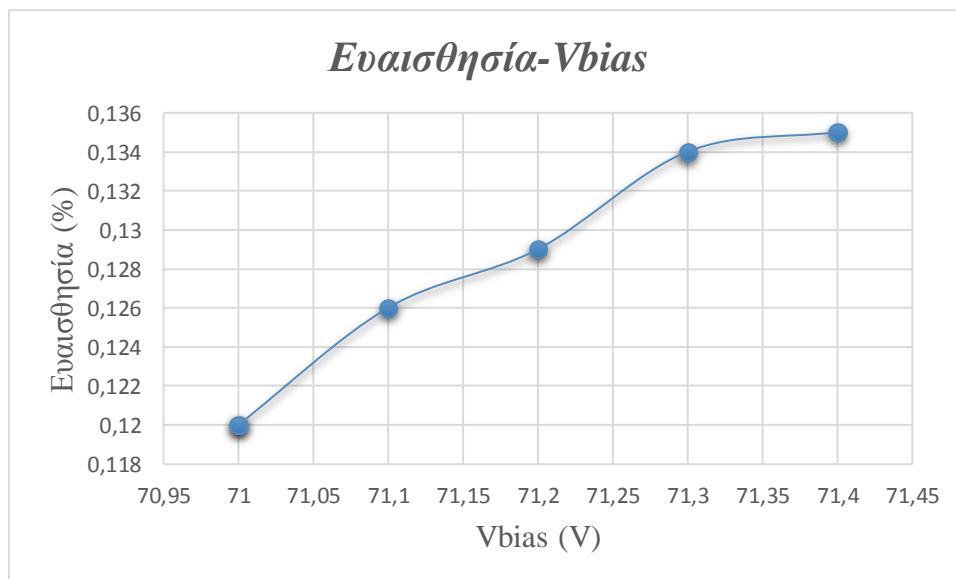
Τάση Λειτουργίας (V)	Ενεργειακή Διακριτική Ικανότητα (%)	Φωτοποσοστό (%)	Ευαισθησία (%)
71.00	10.30	17.36	0.12
71.10	9.20	16.67	0.13
71.20	9.20	16.61	0.13
71.30	8.00	15.75	0.13
71.40	7.50	15.58	0.14



Σχήμα 4.2: Γραφική παράσταση της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας.

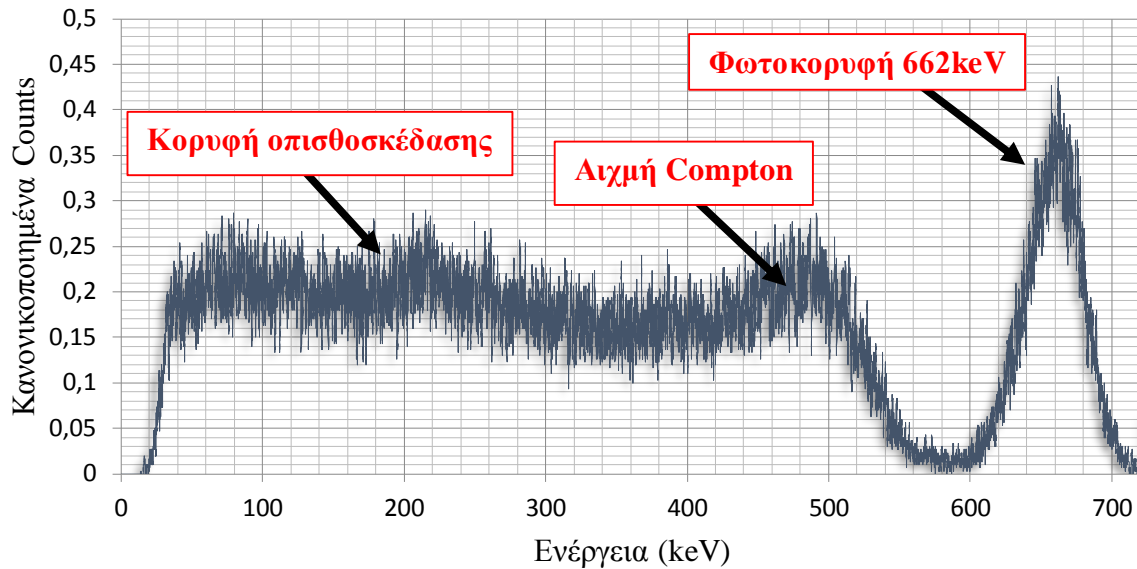


Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση του φωτοποσοστού σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας.



Σχήμα 4.4: Γραφική παράσταση της ευαισθησίας σε συνάρτηση με την τάση λειτουργίας.

Από τα σχήματα 4.2 έως 4.4 εύκολα παρατηρείται πως και οι παράμετροι της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας και του φωτοποσοστού μειώνονται με την αύξηση της τάσης ενώ αντίθετα η ευαισθησία αυξάνεται με την αύξηση της τάσης.



Σχήμα 4.8: Κανονικοποιημένο φάσμα ^{137}Cs με σπινθηριστή διαστάσεων $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ με τεφλόν σε σύζευξη με τον SiPM S1032-33-050C για τάση 71,4 V.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ανεξάρτητα από την ενέργεια των φωτονίων- γ που αλληλεπιδρούν με τον σπινθηριστή, το σύστημα μας είναι ικανό να εντοπίζει και να εναποθέτει τις μετρούμενες ενέργειες σε κατάλληλα κανάλια και να σχηματίζει σε κάθε περίπτωση ένα ικανοποιητικό φάσμα μέχρι την ενέργεια των 662keV.

Μετά από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, παρατηρήθηκε πως ο πιο αποδοτικός φωτοπολλαπλασιαστής από τους δύο, ως προς την παράμετρο της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, είναι ο **S10362-33-100C**.

Πίνακας 4.3: Συγκενρωτικός πίνακας με τις τιμές της ενεργειακής διακριτικής ικανότητας, του φωτοποσοστού και της ευαισθησίας για κάθε τάση λειτουργίας.

Gd₃Al₂Ga₃O₁₂:Ce (3×3×8 mm³)							
¹³⁷Cs (662 keV)							
S10362-33-050C				S10362-33-100C			
V_{bias}	E.R.	Ph.	Sens.	V_{bias}	E.R.	Ph.	Sens.
(v)	(%)	(%)	(%)	(v)	(%)	(%)	(%)
71.00	10.30	17.36	0.12	71.00	6.10	16.73	0.26
71.10	9.20	16.67	0.13	71.10	5.10	16.00	0.27
71.20	9.20	16.61	0.13				
71.30	8.00	15.75	0.13				
71.40	7.50	15.58	0.14				

3x3x8 mm³ GAGG:Ce κρύσταλλος	Cs-137 0.662 MeV		
	Παρούσα έρευνα	R (%)	R (%)
	R (%)	¹Metallinos et.al with KETEK SiPM	²Yeom et.al
-050C	7.50	6.90	8.00
-100C	5.10		—

[23] [28]

ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΥΣ ΜΟΛΥΝΣΗΣ

Το πρόβλημα το οποίο προσπαθεί να επιλύσει η εφαρμογή αυτή, είναι η **ραδιενεργή μόλυνση και κυρίως η εξάπλωση της**. Το πιο τρανταχτό παράδειγμα ραδιενεργούς μόλυνσης είναι στον πυρηνικό σταθμό παραγωγής ενέργειας του Τσερνόμπιλ τον Απρίλιο του 1986 έπειτα από

έκρηξη που σημειώθηκε στον αντιδραστήρα αρ. 4 και είχε ως αποτέλεσμα πέρα από τον άμεσο ή έμμεσο θάνατο εκατοντάδων ανθρώπων, την μόλυνση του εδάφους, του αέρα και των υδάτων της περιοχής έχοντας αντίκτυπο πέρα από την υγεία και στην οικονομία σχεδόν όλη της ανατολικής Ευρώπης.

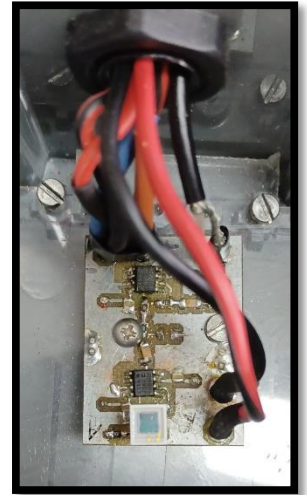
Ακόμη, το πυρηνικό δυστύχημα στον σταθμό Φουκουσίμα 1 το 2011 στην Ιαπωνία προέκυψε ως ακολουθία του μεγάλου σεισμού στις 11 Μαρτίου στο Σεντάι και του τσουνάμι που τον ακολούθησε. Και στις δύο περιπτώσεις πέρα από την μόλυνση του εδάφους και της ατμόσφαιρας υπήρξε μόλυνση και οργανισμών, των οποίων η κατανάλωση ενδέχεται να εξέθεσε σε ραδιενέργεια ένα μεγάλο αριθμό καταναλωτών.

Γίνεται λοιπόν εμφανές πόσο εύκολά είναι να εκτεθεί κάποιος σε ραδιενέργεια χωρίς να το γνωρίζει και πόσο σημαντικό είναι να μπορεί κάποιος να εντοπίσει ενδεχομένως μολυσμένα αντικείμενα που χρησιμοποιεί ή καταναλώνει στην καθημερινότητα του.

ΑΝΑΓΚΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΚΡΩΝ ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΜΙΚΡΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ

Ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους εντοπισμού και μέτρησης ραδιενέργειας αποτελεί ο φορητός μετρητής Geiger Muller, ο οποίος όμως είναι ικανός να μετρήσει μόνο αριθμό συμβάντων, μη μπορώντας να κάνει διάκριση όσον αφορά την ενέργεια των συμβάντων αυτών και επομένως να προσδιορίσει ποια είναι η πηγή η οποία παράγει την μετρούμενη ραδιενέργεια. Παρότι ο μετρητής GM έχει μεγάλη χρησιμότητα σε περιπτώσεις που θέλουμε να εντοπίσουμε αν υπάρχει ραδιενέργεια, οι δυνατότητες τους και η χρηστικότητα τους τελειώνουν εκεί.

Η κατασκευή ενός φορητού φασματοσκοπικού ανιχνευτή χαμηλού κόστους μπορεί να αντικαταστήσει τους φορητούς μετρητές Geiger Muller, εντοπίζοντας ενδεχόμενη ύπαρξη ραδιενέργειας **και ταυτόχρονα να προσδιορίσει την πηγή αυτής**, κάτι το οποίο μας δίνει μια ιδέα για την σοβαρότητα της μόλυνσης, αφού γνωρίζοντας την πηγή μπορούμε να ξέρουμε και τον χρόνο ημιζωής της. Παράδειγμα, σε ένα εισαγόμενο φορτίο θα μπορούσε να γίνει διαχωρισμός ανάμεσα στο ραδιενεργό Κάλιο το οποίο εμπεριέχεται σε όλες τις μπανάνες και σε ενδεχομένως μολυσμένα, με Καίσιιο, ψάρια από Ειρηνικό Ωκεανό.



Βιβλιογραφία

- [1] Κανδαράκης, Ι., 2007. *Πυρηνική Ιατρική*, Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αράκυνθος.
- [2] Maher, K. and Wikibooks contributors. 2004–2006, *Basic Physics of Nuclear Medicine*. [e-book] USA: Free Software Foundation, Inc. Διαθέσιμο από: https://en.wikibooks.org/wiki/Basic_Physics_of_Nuclear_Medicine [Πρόσβαση στις 10 Μαΐου 2022].
- [3] Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA), *Alpha particles*. [online] Διαθέσιμο από: <https://www.arpansa.gov.au/understanding-radiation/what-is-radiation/ionising-radiation/alpha-particles> [Πρόσβαση στις 11 Μαΐου 2022].
- [4] Μισαηλίδης, Π. και Νόλη, Φ., 2020. *Ραδιοχημεία και Πυρηνική Χημεία*, Θεσσαλονίκη: ΖΗΤΗ,[online] Διαθέσιμο από: https://eclass.uoa.gr/modules/document/file.php/CHEM199/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%A1%CE%B1%CE%B4%CE%B9%CE%BF%CF%87%CE%B7%CE%BC%CE%B5%CE%AF%CE%B1%CF%82%20%28%CE%9A%CE%B1%CE%B8%CE%B7%CE%B3%CE%B7%CF%84%CE%BF%CF%8D%20%CE%A0.%20%CE%9C%CE%B9%CF%83%CE%B1%CE%B7%CE%BB%CE%AF%CE%B4%CE%B7%2C%20%CE%91%CE%A0%CE%98%29/KEFALAI0-2_RADIENEROS-DIASPASH.pdf [Πρόσβαση στις 11 Μαΐου 2022].
- [5] Καγκάδης, Γ., 2021-2022. *Φυσική της Πυρηνικής Ιατρικής*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [6] Αργυρόπουλος, Ι., 2010. *Αξιολόγηση Φωτοπολλαπλασιαστών Πυριτίου (SiPMs) ως ανιχνευτές υβριδικών απεικονιστικών συστημάτων Πυρηνικής Ιατρικής*. Μεταπτυχιακή εργασία [online]. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών. Διαθέσιμο στο: <https://hdl.handle.net/10889/4028> [Πρόσβαση στις 10 Νοεμβρίου 2022].
- [7] Duclos, S. J., 1998. Scintillator Phosphors for Medical Imaging. *The Electrochemical Society Interface*, [e-journal] 7(2) pp. 34-38. <http://dx.doi.org/10.1149/2.F07982IF>

- [8] Bandieramonte, M., 2017. *Photoelectric effect review*. CERN [online] Διαθέσιμο από: https://indico.cern.ch/event/629729/contributions/2569301/attachments/1449139/2233786/PhotoElectricEffect_MB.pdf [Πρόσβαση στις 10 Νοεμβρίου 2022].
- [9] Παναγιωτάκης, Γ. και Κωσταρίδου, Ε., 2015. *Φυσική της Ακτινοδιαγνωστικής*. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [10] PhysicsOpenLab, 2016. *Energy Resolution in Gamma Spectrometry*. [online] Διαθέσιμο από: <https://physicsopenlab.org/2016/02/07/energy-resolution-in-gamma-spectrometry/> [Πρόσβαση στις 23 Ιουλίου 2022].
- [11] Shalom EO Crystal, optics and components, 2023. *Scintillation Crystal Materials*. [online] Διαθέσιμο από: <https://www.shalomeo.com/Scintillators/Scintillation-Crystal-Materials>[Πρόσβαση στις 28 Ιουνίου 2022].
- [12] Hamamatsu Photonics K.K., Editorial Committee, 2007. *Photomultiplier Tubes: Basics and Applications* (Edition 3a). [e-book] Hamamatsu Photonics K.K., Electron Tube Division. Διαθέσιμο από: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/etd/PMT_handbook_v3aE.pdf [Πρόσβαση στις 29 Ιουνίου 2022].
- [13] Knoll, G.F., 2000. *Radiation Detection and Measurement (Third Edition)*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- [14] Βικιπαίδεια, 2006. *Σχήμα 2: Φάσμα ακτίνων γ κοβαλτίου-60 (60Co) με ανιχνευτή NaI*. [online] Διαθέσιμο από: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A6%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%BF%CF%83%CE%BA%CE%BF%CF%80%CE%AF%CE%B1_%CE%B1%CE%BA%CF%84%CE%AF%CE%BD%CF%89%CE%BD_%CE%B3%CE%AC%CE%BC%CE%BC%CE%B1#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Co60_Spectrum.JPG [Πρόσβαση στις 3 Αυγούστου 2022].

[15] Buzhan, P., Dolgoshein, B., Ilyin, A., Kantserov, V., Kaplin, V., Karakash, A., Pleshko, A., Popova, E., Smirnov, S., Volkov, Yu., Filatov, L., Klemin, S., Kayumov, F., 2002. An Advanced Study of Silicon Photomultiplier. *ICFA Instrumentation Bulletin*, [e-journal]

https://doi.org/10.1142/9789812776464_0101

[16] Otte, N., 2006. The Silicon Photomultiplier - A new device for High Energy Physics, Astroparticle Physics, Industrial and Medical Applications, *SNIC Symposium, Stanford, California*, [online] Διαθέσιμο από: <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Silicon-Photomultiplier-A-new-device-for-High-Otte/ec7e503c0ee3ad5c231fa2f4f924bd8f06e5a0c4> [Πρόσβαση στις 23 Νοεμβρίου 2022].

[17] Sandilya, S., 2011. Experimental Project Report on Characterization of Silicon Photomultipliers, *Tata Institute of Fundamental Research*, [online] Διαθέσιμο από: https://www.tifr.res.in/~saurabh/work/report_sipm.pdf [Πρόσβαση στις 23 Νοεμβρίου 2022].

[18] Malvino, A. and Bates, D. J., 2017. *Ηλεκτρονική (8^η έκδοση)*. Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις ΤΖΙΟΛΑ.

[19] Χαριτάντης, Γ., 2013. *Ηλεκτρονικά*, Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αράκυνθος.

[20] Roncali, E., Cherry, S. R., 2011. Application of Silicon Photomultipliers to Positron Emission Tomography. *Annals of Biomedical Engineering*, [e-journal] 39(4), pp. 1358–1377. <http://dx.doi.org/10.1007/s10439-011-0266-9>

[21] Caesium-137.

[online] Διαθέσιμο από: <https://www.ld-didactic.de/software/524221en/Content/Appendix/Cs137.htm> [Πρόσβαση στις 3 Δεκεμβρίου 2022].

[22] Βικιπαίδεια, 2001. *Cs-137 Decay Scheme*. [online] Διαθέσιμο από: https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CE%B1%CE%AF%CF%83%CE%B9%CE%BF_137#/media/%CE%91%CF%81%CF%87%CE%B5%CE%AF%CE%BF:Cs-137-decay.svg [Πρόσβαση στις 3 Δεκεμβρίου 2022].

[23] Metallinos, A., 2017. Experimental evaluation of $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ (GAGG:Ce) single crystals coupled to a silicon photomultiplier (SiPM) under high gamma ray irradiation conditions. *Journal of Physics: Conference Series*, [e-journal] 931, pp. 1-5.

<http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/931/1/012040>

[24] Advatech-uk. *GAGG(Ce)-Gadolinium Aluminium Gallium Garnet (Ce)*. [online] Διαθέσιμο από: https://www.advatech-uk.co.uk/gagg_ce.html [Πρόσβαση στις 8 Δεκεμβρίου 2022].

[25] CAEN Tools for Discovery, 2013. *UM2089, DPCI User Manual Rev.0-08*. Italy: CAEN S.p.A.

[26] Βικιπαίδεια, 2015. ^{137}Cs gamma spectrum. The characteristic 662 keV peak does not originate directly from ^{137}Cs , but from the decay of ^{137m}Ba to its stable state. [online] Διαθέσιμο από:

https://en.wikipedia.org/wiki/Caesium-137#/media/File:Caesium-137_Gamma_Ray_Spectrum-en.svg [Πρόσβαση στις 3 Δεκεμβρίου 2022].

[27] Hamamatsu Photonics K.K., 2009. *MPPC (multi-pixel photon Counter) Datasheet*. Japan: HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division. [online] Διαθέσιμο από:

<https://www.electronicdatasheets.com/manufacturers/hamamatsu/parts/s1036233050c#datasheet> [Πρόσβαση στις 18 Απριλίου 2022].

[28] Yeom, J. Y., Yamamoto, S., Derenzo, S. E., Spanoudaki, V. C., Kamada, K., Endo, T., Levin, C. S., 2013. First performance results of Ce:GAGG scintillation crystals with silicon photomultipliers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, [e-journal] 60(2), pp. 988–992.

<http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2012.2233497>

[29] Leming, E., De Santo, A., Salvatore, F., Camanzi, B., Lohstroh, A., 2014. A GEANT4 Monte Carlo simulation to describe the time response of a coupled SiPM and LYSO detection system. *Journal of Instrumentation*, [e-journal] 9, pp.1-8. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-0221/9/06/C06008>

[30] Kamada, K., Yanagida, T., Kurosawa, S., Yokota, Y., Endo, T., Tsutsumi, K., Yoshikawa, A., 2014. Read Out Test of Pr:LuAG Scintillator Coupled to Organic Wavelength Shifter Using

Si Based Photodetectors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, [e-journal] 61(1), pp. 452-455.
<http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2013.2278024>

[31] Fysikopoulos, E., Georgiou, M., Efthimiou, N., David, S., Loudos, G., Matsopoulos, G., 2014. Fully Digital FPGA-Based Data Acquisition System for Dual Head PET Detectors, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, [e-journal] 61(5), pp. 2764-2770.
<http://dx.doi.org/10.1109/TNS.2014.2354984>

[32] David, S., Georgiou, M., Fysikopoulos, E., Loudos, G., 2015. Evaluation of a SiPM array coupled to a $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$ (GAGG:Ce) discrete scintillator, *Fisica Medica*, [e-journal] 31(7), pp.763–766. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2015.03.008>

[33] Efthimiou, N., Georgiou, M., Argyropoulos, G., Fysikopoulos, E., David, S., Loudos, G., Panayiotakis, G., 2011. Initial Results on SiPMs Performance for use in Medical Imaging, *Measurement Science and Technology*, [e-journal] 22(11). <https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/11/114001>