



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας

**ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ "LUCAS
CELL" - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ - ΔΟΚΙΜΗ
ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ
ΡΑΔΟΝΙΟΥ**

**RADON DETECTION USING "LUCAS CELL"
TECHNIQUE - CONSTRUCTION OF DETECTORS -
COUNTING TEST FOR VERY HIGH RADON
CONCENTRATIONS**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΗΣ

ΑΡΓΥΡΟΥ ΣΩΤΙΑΣ

(Α.Μ.: 02117712)

Σπουδάστριας της Σχολής
Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ

Επίβλεψη: Επίκ. Καθηγητής Ν.Π. Πετρόπουλος

ΑΘΗΝΑ 2022

Αποποίηση τυχόν ευθυνών

Αυτό το κείμενο συντάχθηκε ως προϊόν φοιτητικής Διπλωματικής Εργασίας και δεν είναι το αποτέλεσμα επαγγελματικής μελέτης διπλωματούχου μηχανικού. Στο κείμενο αυτό περιέχονται επιστημονικές πληροφορίες και αποτελέσματα σε σχέση με το αντικείμενο που περιγράφεται στον τίτλο. Για το περιεχόμενο αυτό έχει δοθεί κατά το δυνατό η αναγκαία προσοχή ώστε να διασφαλισθεί η ποιότητά του κατά τη στιγμή της δημοσίευσης. Διευκρινίζεται ότι η δημοσίευση του κειμένου αυτού γίνεται χωρίς να υπάρχει άμεση ή έμμεση σύνδεση της συγγραφέως ή του επιβλέποντός της με σχετικά εμπορικά ή οικονομικά συμφέροντα. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο διατυπώνουν κάποια γραπτή εγγύηση, ρητή ή έμμεση, συμπεριλαμβανομένων των εγγυήσεων που αφορούν στην ασφάλεια και την προστασία ατόμων και εξοπλισμού και στην καταλληλότητα για χρήση των περιεχόμενων επιστημονικών πληροφοριών και αποτελεσμάτων για τους σκοπούς ανίχνευσης ιοντιζουσών ακτινοβολιών και ιδιαίτερα συγκεντρώσεων ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της, ούτε το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο αποδέχονται κάποια νομική ή άλλη ευθύνη για την ποιότητα, την ακρίβεια, την πληρότητα, τη χρησιμότητα, τυχόν λάθη, τυχόν παραλείψεις στο περιεχόμενο του κειμένου ή για τις συνέπειες οποιασδήποτε απόφασης που θα ληφθεί με βάση το περιεχόμενο αυτό. Επίσης δεν αποδέχονται ειδικότερα και νομική ευθύνη για την απώλεια προσδοκώμενων κερδών ή για τη δημιουργία συνακόλουθων ζημιών από τη χρήση του περιεχόμενου αυτού. Παρόλα αυτά, καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια ώστε η παραγωγή των περιεχόμενων αποτελεσμάτων να προκύψει ως αποτέλεσμα καλών πρακτικών επιστημονικής ανάλυσης. Η συγγραφέας και ο επιβλέπων της είναι διαθέσιμοι για την παροχή συμβουλών σε ό,τι αφορά επιβεβαίωση των περιεχόμενων αποτελεσμάτων καθώς και για οδηγίες σχετικά με την ενδεδειγμένη χρήση τους.

Πνευματικά δικαιώματα και σχετικές ευθύνες

Οι αναγνώστες μπορούν να χρησιμοποιούν το μέρος του περιεχομένου που τους ενδιαφέρει για δική τους προσωπική και αποκλειστική χρήση αλλά όχι για δημοσίευση ή παρουσίασή τους ως δικό τους ή χωρίς κατάλληλη αναφορά στην πηγή. Τυχόν παράλειψη της αναφοράς στην πηγή συνιστά το αδίκημα της λογοκλοπής. Οι αναγνώστες έχουν τη ρητή υποχρέωση να μην παραβιάζουν ή να μην ενθαρρύνουν / επιτρέπουν την παραβίαση των νομίμων πνευματικών δικαιωμάτων των σχετικών με το κείμενο αυτό χρησιμοποιώντας τα περιεχόμενα αποτελέσματα με ανάρμοστο τρόπο. Ούτε η συγγραφέας, ούτε ο επιβλέπων της θα αποδεχθούν ποτέ όποια ευθύνη τυχόν προκύψει ως συνέπεια παραβιάσεων πνευματικών δικαιωμάτων. Τα φυσικά ή τα νομικά πρόσωπα, τα υπεύθυνα για τις παραβιάσεις αυτές θα είναι, ως εκ τούτου, τα μόνα υπόλογα για τυχόν ζημιές ή άλλες συνέπειες. Το κείμενο αυτό προστατεύεται σε ό,τι αφορά τα πνευματικά δικαιώματα από άδεια [Creative Commons License](#) by Attribution / No Derivatives, βάσει της οποίας οι χρήστες επιτρέπεται κυρίως να αντιγράψουν, διανέμουν και να χρησιμοποιούν το περιεχόμενο του (αλλά να μην δημιουργούν παράγωγα από αυτό), υπό την προϋπόθεση ότι κάνουν την πρέπουσα αναφορά στην πηγή. Όσοι από εσάς γνωρίζετε την συμβολική γλώσσα της αντίστοιχης άδειας Creative Commons, η σχετική εικόνα σήμανσης έχει ως εξής:



Η συνιστώμενη αναφορά στην πηγή είναι:

Argyrou, S.Y., Radon Detection Using "Lucas Cell" Technology - Construction of Detectors - Counting Test for Very High Radon Concentrations, Diploma Dissertation (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2022, available on-line (αναφέρατε διαδικτυακό σύνδεσμο και ημερομηνία ανάγνωσης). Σε περίπτωση που εντοπίσατε αυτό το κείμενο μέσω άλλης δημοσίευσης των συγγραφέων, παρακαλείσθε να αναφέρετε ως πηγή και αυτή τη δημοσίευση.

Υπεύθυνη δήλωση σχετικά με τη λογοκλοπή

Τόσο η συγγραφέας όσο και ο επιβλέπων της έχουν λάβει υπόψη τους το κανονιστικό και ηθικό πλαίσιο που ισχύει διεθνώς σχετικά με τη λογοκλοπή και δηλώνουν ότι, με βάση τα όσα γνωρίζουν, το περιεχόμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι προϊόν αυτόνομης εργασίας της συγγραφέως και ότι για τυχόν κείμενα άλλων αυτούσια ή σε παράφραση ή άλλες εξωτερικές πληροφορίες και δεδομένα που χρησιμοποιούνται υπάρχουν αναφορές σε όλες τις πηγές που χρησιμοποιήθηκαν.

Disclaimer

This document has been edited as a result of a Diploma Dissertation project accomplished by a student and it is not the result of a professional study by a certified engineer. This document is designed to provide scientific information and results with regard to the matter covered by its title; all reasonable care has been taken to ensure quality of the results at the time of publication. This document is published on the understanding that neither the author nor her supervisor are directly or indirectly connected to any relevant commercial or financial interests. Neither the author nor her supervisor or the National Technical University of Athens (NTUA) make any warranty, expressed or implied, including the warranties of personnel and installations safety and security and fitness for use of the herein included data for the purpose of detection of ionizing radiation and especially of radon concentrations in the air, or accept any legal liability or responsibility for the quality, accuracy, completeness, usefulness, any errors, any omissions within the content of this document, or for the consequences of any decisions taken on the basis of the information provided. This includes, but is not limited to, loss of anticipatory profits or consequential damages from the use of this information. Nonetheless, considerable effort has been put so that best scientific analysis practices were followed during the production of the presented results. The author and her supervisor are available for consultation regarding the verification and implementation of the presented data.

Copyright note and relevant liabilities

Readers may copy the part of the content, in which they are interested, for their own use and not for publication, display and/or plagiarism. Readers are expressly required not to infringe or authorize any infringement of any legal rights related to these data by inappropriately using the information provided. Neither the author nor her supervisor will accept any liability in respect of such infringement, and the individuals or entities responsible will be personally liable for any damages or other liability arising. This document is protected by the [Creative Commons License](#) by Attribution / No Derivatives, which primarily means that licensees may copy, distribute, display and repeat the work (**but not make derivatives based on it**) only if they give the author the credits. For those of you familiar with the Creative Commons Symbolic Signs, then the respective marking is as it follows:



Recommended citation is as it follows:

Argyrou, S.Y., Radon Detection Using "Lucas Cell" Technology - Construction of Detectors - Counting Test for Very High Radon Concentrations, Diploma Dissertation (in Greek), Nuclear Engineering Laboratory, National Technical University of Athens, Athens, 2022, available on-line (please mention URL and access date). *In case that you have reached this document through another publication of the authors, please, cite this publication as well.*

Plagiarism statement

Both the author and her supervisor are aware of the legal and ethics framework internationally applicable regarding plagiarism. Therefore, they both declare that the content of the present Diploma Dissertation is a product of the author's autonomous work. References to sources are duly and appropriately provided for texts of others either quoted directly or paraphrased as well as for external information and data employed.

ΜΕΛΗ ΤΡΙΜΕΛΟΥΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Επιβλέπων

Ν.Π. Πετρόπουλος Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Μέλη

Μ.Ι. Αναγνωστάκης Καθηγητής ΕΜΠ

Π.Κ. Ρούνη Λέκτορας ΕΜΠ

Ιούλιος 2022

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	ix
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή	
1.1 Γενικά.....	1-1
1.2 Παραγωγή Ραδονίου και Ραδόνιο στη φύση.....	1-1
1.3 Σύννοψη Διπλωματικής Εργασίας.....	1-3
1.4 Περίληψη συμπερασμάτων Διπλωματικής Εργασίας.....	1-3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Στοιχεία λειτουργίας φωτοπολλαπλασιαστή - Αρχή μέτρησης συγκέντρωσης Ραδονίου με στερεό σπινθηριστή	
2.1 Εισαγωγή.....	2-1
2.2 Στοιχεία λειτουργίας φωτοπολλαπλασιαστή.....	2-1
2.2.1 Γενικά.....	2-1
2.2.2 Δομή και λειτουργία.....	2-2
2.2.3 Επίδραση της θερμοκρασίας.....	2-4
2.2.4 Λίγα λόγια για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.....	2-4
2.2.5 Ιστορικά στοιχεία για τον PMT.....	2-4
2.2.6 Υλικά φωτοκαθόδου και παραθύρου.....	2-5
2.2.7 Ορθή χρήση φωτοπολλαπλασιαστή.....	2-6
2.2.8 Εφαρμογές φωτοπολλαπλασιαστών.....	2-6
2.3 Ο σπινθηριστής ZnS(Ag).....	2-7
2.4 Στοιχεία λειτουργίας τεχνικής "Lucas Cell".....	2-8
2.4.1 Γενικά.....	2-8
2.4.2 Κατασκευαστικά στοιχεία των δοκιμών του Lucas (1957).....	2-8
2.4.3 Βαθμονόμηση δοχείων.....	2-9
2.4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης και το υπόστρωμα.....	2-10
2.5 Δοχεία LC σύμφωνα με το πρότυπο του EML.....	2-12
2.5.1 Γενικά.....	2-12
2.5.2 Πρότυπο EML.....	2-12
2.6 Σχόλια και συμπεράσματα.....	2-14

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Απαραίτητα υλικά και εξοπλισμός πυρηνικών ηλεκτρονικών για την εφαρμογή της τεχνικής των δοχείων LUCAS CELL στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

3.1 Εισαγωγή	3-1
3.2 Προμήθεια σπινθηριστή ZnS(Ag)	3-1
3.2.1 Γενικά.....	3-1
3.2.2 Σκόνη σπινθηριστή	3-2
3.2.3 Φύλλα με σπινθηριστή.....	3-2
3.3 Προμήθεια φωτοπολλαπλασιαστή και προενισχυτή.....	3-3
3.4 Απαραίτητα πυρηνικά ηλεκτρονικά.....	3-6
3.4.1 Γενικά.....	3-6
3.4.2 Μονάδα NIM BIN και τροφοδοσία τάσεων.....	3-7
3.4.3 Τροφοδοτικό υψηλής τάσης.....	3-10
3.4.4 Άλλα πυρηνικά ηλεκτρονικά.....	3-14
3.5 Παλμογράφος.....	3-14
3.6 Σχόλια και συμπεράσματα	3-17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Κατασκευή ανιχνευτών για την εφαρμογή της τεχνικής δοχείων LUCAS CELL και την συγκρότηση της μετρητικής διάταξης

4.1 Εισαγωγή	4-1
4.2 Απαιτούμενα υλικά για την κατασκευή των δοχείων LC	4-1
4.3 Ανιχνευτές κατά την παραλλαγή "Α"	4-3
4.4 Ανιχνευτές κατά την παραλλαγή "Β"	4-7
4.5 Σφράγιση δοχείων.....	4-10
4.6 Σύνδεση δοχείου LC με PMT, διαιρέτη τάσης και προενισχυτή.....	4-12
4.7 Σχόλια και συμπεράσματα	4-17

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης δοχείων LC

5.1 Εισαγωγή	5-1
5.2 Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης	5-1
5.2.1 Απογραφή απαραίτητου εξοπλισμού.....	5-1
5.2.2 Πηγή Ραδονίου	5-2
5.2.3 Θάλαμος Ραδονίου	5-4
5.2.4 Μεταφορά Ραδονίου στο θάλαμο	5-7
5.2.5 Μετάγγιση Ραδονίου στο δοχείο LC	5-11

5.2.6 Πλύση δοχείου LC	5-12
5.3 Πειραματική διεργασία βαθμονόμησης	5-13
5.4 Σχόλια και συμπεράσματα	5-14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Πειραματικά αποτελέσματα βαθμονομήσεων και αξιολόγηση της τεχνικής	
6.1 Εισαγωγή	6-1
6.2 Διαφορικές εξισώσεις Bateman	6-2
6.2.1 Γενική περίπτωση	6-2
6.2.2 Περίπτωση Ραδονίου	6-3
6.3 Ρυθμίσεις για τις μετρήσεις	6-4
6.4 Μετρήσεις Ραδονίου εκτός ραδιενεργού ισορροπίας.....	6-9
6.5 Πρωτόκολλο μετρήσεων Ραδονίου εκτός ραδιενεργού ισορροπίας	6-10
6.5.1 Χρονική διάρκεια και πλήθος μετρήσεων – ρύθμιση καταμετρητή	6-10
6.5.2 Μέτρηση υποστρώματος (και τυχόν θορύβου).....	6-11
6.5.3 Μετάγγιση και μετρήσεις.....	6-12
6.6 Πειραματικά αποτελέσματα για το βαθμό απόδοσης	6-12
6.6.1 Πινακοποιημένη επίλυση των εξισώσεων Bateman	6-12
6.6.2 Βαθμός απόδοσης δοχείων LC.....	6-16
6.7 Συμπεράσματα για το βαθμό απόδοσης.....	6-29
6.7.1 Γενικά.....	6-29
6.7.2 Σκέψεις για το υπόστρωμα.....	6-30
6.7.3 Εξάρτηση βαθμού απόδοσης από την υψηλή τάση.....	6-30
6.7.4 Εξάρτηση βαθμού απόδοσης από τη συγκέντρωση Ραδονίου	6-32
6.7.5 Σφάλμα μέτρησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης.....	6-32
6.7.6 Σύνδεση LLD -α ισοτόπων με την ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση Ραδονίου.....	6-35
6.7.7 Αβεβαιότητες.....	6-35
6.8 Σχόλια.....	6-37
6.9 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	6-38
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το Ραδόνιο-222 είναι το βαρύτερο γνωστό αέριο στη φύση με ατομικό αριθμό 86, το οποίο επιπλέον είναι ευγενές και χημικά αδρανές. Το Ραδόνιο-222 παράγεται από την φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Ουρανίου-238 και ονομάζεται συνήθως απλά Ραδόνιο. Παρόλη τη χημική του αδράνεια το Ραδόνιο είναι ραδιενεργό και διασπάται προς άλλα ισότοπα εκπέμποντας α σωματίδια. Δεδομένου ότι το Ουράνιο-238 είναι στερεό μέταλλο που συναντάται στο έδαφος, οι μεγαλύτερες συγκεντρώσεις Ραδονίου βρίσκονται στο εδαφικό αέριο. Συγκεντρώσεις Ραδονίου απαντώνται επίσης στο νερό των πηγών και στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα. Στον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα η συγκέντρωση μπορεί να κυμαίνεται στην περιοχή $0 - 10 \text{ Bq m}^{-3}$. Στον ατμοσφαιρικό αέρα των εσωτερικών χώρων η συγκέντρωση του υπόψιν αερίου είναι πολύ πιο αυξημένη διότι όπως είναι φυσικό ο ρυθμός ανανέωσης είναι χαμηλός και το Ραδόνιο εισέρχεται συνεχώς από το εδαφικό αέριο γύρω από τα θεμέλια των χώρων με τη βοήθεια διαδικασιών διάχυσης ή μεταφοράς. Από ραδιενεργή άποψη το Ραδόνιο, διασπώμενο εκπέμπει α σωματίδια σχετικά μεγάλης ενέργειας - περί τα 5.5 MeV και ταυτόχρονα παράγει επίσης ραδιενεργά στερεά θυγατρικά που διασπώνται και αυτά εκπέμποντας α σωματίδια. Αν υπάρχει Ραδόνιο στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα τότε τα εκπεμπόμενα α σωματίδια από το εισπνεόμενο Ραδόνιο και τα θυγατρικά του, δυνατόν να δημιουργήσουν τραύματα στον εσωτερικό μαλακό ιστό του πνεύμονα, τα οποία έχουν σοβαρές πιθανότητες αν επαναλαμβάνονται συχνά με τον ίδιο τρόπο στο ίδιο ή κοντινό σημείο να οδηγήσουν σε καρκίνο. Δεδομένης της επικινδυνότητας που παρουσιάζουν το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του για τον άνθρωπο, επιβάλλεται η μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στους εσωτερικούς χώρους κατ' αρχήν των κατοικιών και κατά δεύτερο λόγο στους εσωτερικούς χώρους των κτιρίων στα οποία συναθροίζονται μαζικά άνθρωποι, είτε για εργασία είτε για άλλους λόγους (π.χ. εκπαίδευση, νοσηλεία κ.α.). Απαιτούνται για αυτό το σκοπό: τεχνικές και πρωτόκολλα μετρήσεων της συγκέντρωσης του Ραδονίου που να πληροφορούν για την επικρατούσα συγκέντρωση Ραδονίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Το διάστημα 1965 - 1980, αναπτύχθηκαν μέθοδοι για την μέτρηση της συγκέντρωσης του Ραδονίου στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα. Οι πιο ακριβείς μέθοδοι διαπιστώθηκε ότι ήταν οι ενεργητικές, όπως π.χ. οι ανοιχτοί θάλαμοι ιονισμού. Οι ενεργητικές μέθοδοι δεν έχουν αποκλειστικά πεδία εφαρμογής και δίνουν τη συγκέντρωση του Ραδονίου σχεδόν σε πραγματικό χρόνο δηλ. συνήθως ανά 10 min αλλά απαιτούν ακριβό εξοπλισμό, πηγές ενέργειας, διαρκή ανθρώπινη επιτήρηση, τακτική συντήρηση και κατά συνέπεια έχουν υψηλότατο κόστος. Το κόστος αυτό κάνει απαγορευτική την εφαρμογή τους σε

επαναλαμβανόμενες σειρές μετρήσεων και γενικά σε έρευνες μεγάλης κλίμακας. Στην πράξη, προκειμένου να εκτιμηθεί ο κίνδυνος από το Ραδόνιο δεν χρειάζεται παρά ο προσδιορισμός της μέσης συγκέντρωσής του για διαστήματα ημερών, εβδομάδων ή μηνών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αν υπάρχουν παθητικές - ολοκληρωτικές μέθοδοι, οι οποίες να μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των πολύπλοκων και χρηματοβόρων ενεργητικών μεθόδων. Μια ενεργητική τεχνική, σχετικά μικρού κόστους, με απλό μηχανισμό, μικρό χρόνο έκθεσης σε ατμόσφαιρα εσωτερικού χώρου, και σχετικά υψηλή αβεβαιότητα, είναι η τεχνική μέτρησης με τη χρήση δοχείων σπινθηριστών που είναι γνωστοί με το όνομα "LUCAS CELLS". Στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας ΕΜΠ, η τεχνική αυτή δεν έχει χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα. Στα πλαίσια αυτής της Διπλωματικής Εργασίας παρουσιάζεται η αρχή στην οποία βασίζεται αυτή η τεχνική, εξετάζονται δυνατοί τρόποι κατασκευής των σχετικών ανιχνευτών και δοκιμάζονται σε μετρήσεις υψηλών συγκεντρώσεων ραδονίου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Επίκουρο Καθηγητή κ. Ν.Π. Πετρόπουλο για τη βοήθειά του καθόλη τη διάρκεια της εκπόνησης της Διπλωματικής Εργασίας και ειδικά για τη συμβολή του στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω (α) τον αφυπηρέτησαντα Καθηγητή του University College Dublin, Dr. James McLaughlin (email: james.mclaughlin@ucd.ie) για τις πολύτιμες συμβουλές του για θέματα μετρολογίας ραδονίου, στην οποία είναι διάσημος και από τους πλέον ειδικούς, και, (β) Τον George Dowell, ιδιοκτήτη του διαδικτυακού καταστήματος οργάνων και αναλωσίμων για τη μέτρηση ραδιενέργειας GEOelectronics, 56791 Rivere Au Sel Pl., New London, MO 63459, USA (email: geoelectronics@rallstech.net), για τις επίσης πολύτιμες συμβουλές του και την προμήθεια αναγκαίων αναλωσίμων για την Διπλωματική Εργασία. Οι ευχαριστίες μου επεκτείνονται και στον επαγγελματία ηλεκτρονικό κ. Α. Πετρόπουλο (eastelectronics, Μεσογείων 29, 11526 Αθήνα) για τις υπηρεσίες επισκευής και συντήρησης των ηλεκτρονικών μετρητικών διατάξεων που απαιτήθηκαν για την υλοποίηση των μετρήσεων σε αυτή τη Διπλωματική Εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΜΕ ΤΗΝ ΤΕΧΝΙΚΗ "LUCAS CELL" - ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ - ΔΟΚΙΜΗ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΩΝ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΕΩΝ ΡΑΔΟΝΙΟΥ

Διπλωματική Εργασία της Σ. Αργυρού

Η τεχνική μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου στον αέρα που είναι γνωστή με το όνομα "Δοχείο Lucas" ή "Lucas Cell" (LC), προτάθηκε για πρώτη φορά από τον Lucas H.F. (1957). Ανήκει στην κατηγορία των απλών ενεργητικών μεθόδων μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου και θεωρείται ως μία από εκείνες με καλό βαθμό απόδοσης και κατάλληλη για τη διαπίστωση δυνητικά επικίνδυνων συγκεντρώσεων Ραδονίου. Το δοχείο LC είναι συνήθως κυλινδρικό. Η εσωτερική επιφάνεια του δοχείου καλύπτεται με λεπτή σκόνη από θειούχο ψευδάργυρο ενεργοποιημένο με άργυρο. Η ουσία αυτή συμβολίζεται με $ZnS(Ag)$ και έχει την ιδιότητα να σπινθηρίζει (δηλ. να παράγει φως), αν προσβληθεί από α ακτινοβολία. Το παραγόμενο φως έχει πιθανότερο μήκος κύματος 450 nm. Είναι γνωστό ότι το φυσικώς ραδιενεργό αέριο Ραδόνιο ($Rn-222$) και τα θυγατρικά του: $Po-218$, $Po-214$, $Po-210$, τα οποία ανήκουν και αυτά στη ραδιενεργό σειρά του $U-238$, διασπώμενα, εκπέμπουν α σωματίδια. Στην περίπτωση λοιπόν, που σε ένα δοχείο LC περιέχεται Ραδόνιο, τότε όταν κάποιο από τα εκπεμπόμενα α σωματίδια αλληλεπιδράσει με τον σπινθηριστή $ZnS(Ag)$, θα παραχθεί ορατό φως (υπεριώδες ~ 450 nm), το οποίο στη συνέχεια διαδίδεται στο δοχείο. Αν το δοχείο έχει ένα διαυγές ή διαφώτιστο παράθυρο, το φως αυτό μπορεί να βγει από το δοχείο. Αν τώρα κοντά στο παράθυρο αυτό τοποθετηθεί ένας φωτοπολλαπλασιαστής που είναι ευαίσθητος στο μήκος κύματος του φωτός αυτού, τα σχετικά φωτόνια θα μετατραπούν σε μετρήσιμο ηλεκτρικό ρεύμα. Μετά από κατάλληλη βαθμονόμηση το ρεύμα αυτό μπορεί να συνδεθεί με την τιμή της συγκέντρωσης του Ραδονίου μέσα στο δοχείο LC. Η απόδοση της τεχνικής θεωρείται ικανοποιητική διότι από μία αλληλεπίδραση με τον σπινθηριστή $ZnS(Ag)$ μπορεί να προκύψουν περισσότερα φωτόνια. Επιπλέον, η απόδοση ενισχύεται διότι για κάθε πυρήνα Ραδονίου που εκπέμπει α σωματίδια μπορεί να υπάρχουν και θυγατρικά του που εκπέμπουν επίσης α σωματίδια ενισχύοντας το σήμα. Το ηλεκτρικό σήμα που δημιουργείται από το σύστημα του δοχείου LC ως ανιχνευτή και του φωτοπολλαπλασιαστή οδηγείται σε κατάλληλες μονάδες πυρηνικών ηλεκτρονικών, όπου γίνεται η επεξεργασία του, ώστε να προκύψουν εκμεταλλεύσιμες πληροφορίες για την ανιχνευόμενη συγκέντρωση Ραδονίου. Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) συγκροτήθηκαν διάφορα δοχεία LC. Όλα τα

δοχεία βασίζονται στην ίδια γεωμετρία κυλίνδρου: τυποποιημένο διαυγές γυάλινο βάζο μαρμελάδας, ονομαστικού ύψους ~125 mm, ονομαστικής εξωτερικής διαμέτρου ~57 mm και ονομαστικού όγκου 255 cm³, με μεταλλικό πώμα στη μία βάση. Εφαρμόστηκαν διάφοροι τρόποι τοποθέτησης του σπινθηριστή ZnS(Ag) στα εσωτερικά τοιχώματα των γυάλινων δοχείων, με σκοπό την μελέτη βελτιστοποίησης της τεχνικής LC ως προς το βαθμό απόδοσης. Χρησιμοποιήθηκαν δύο βασικοί τρόποι τοποθέτησης του σπινθηριστή: (α) απευθείας επικόλληση στις εσωτερικές επιφάνειες του δοχείου σκόνης σπινθηριστή ZnS(Ag), (β) επικόλληση σκόνης σπινθηριστή σε φύλλα από διάφορα υλικά και εισαγωγή τους στο δοχείο σε κυλινδρική μορφή με την επιφάνεια με τη σκόνη να κοιτά στον άξονα του δοχείου. Στο σύνολο συγκροτήθηκαν έξι διαφορετικά δοχεία LC. Στο μεταλλικό πώμα, προσαρμόσθηκε κατάλληλη συνδεσμολογία σωληνίσκων για την είσοδο και την έξοδο Ραδονίου γνωστής συγκέντρωσης. Στην άλλη γυάλινη διαυγή βάση, η οποία δεν καλύφθηκε με σπινθηριστή εφαρμόσθηκε φωτοστεγανή σύζευξη του δοχείου με το φωτοπολλαπλασιαστή. Για τις δοκιμές των δοχείων LC, οι ανιχνευτές τροφοδοτήθηκαν με γνωστή συγκέντρωση Ραδονίου από έναν θάλαμο Ραδονίου όγκου ~2 m³ που βρίσκεται στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας. Η τεχνική αυτή, μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου, δοκιμάσθηκε για πρώτη φορά στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ και τα αποτελέσματα κρίνονται πολύ ενθαρρυντικά. Η τεχνική αυτή θα χρειασθεί να διερευνηθεί περαιτέρω με μεγαλύτερη λεπτομέρεια σε επόμενη ΔΕ.

ABSTRACT

RADON DETECTION USING "LUCAS CELL" TECHNIQUE - CONSTRUCTION OF DETECTORS - COUNTING TEST FOR VERY HIGH RADON CONCENTRATIONS

Diploma Dissertation of S. Argyrou

The concentration of Radon in air could be measured using a technique of, which is known as "Lucas Cell" (LC)". This technique was first proposed by Lucas H.F. (1957). It belongs to the family of simple active methods of Radon concentration measurement techniques and is considered to be one of good efficiency. Moreover, this technique is appropriate for the detection of potentially dangerous Radon concentrations. Typically, the LC cell is of cylindrical geometry. Its inner surface is covered with a fine powder of ZnS(Ag), (silver-activated zinc sulfide.) This substance has the property of scintillating (i.e. producing light), when interacting with α radiation. The produced light has a wavelength of about 450 nm. It is known that Radon (or Rn-222), a naturally radioactive gas, and its progeny: Po-218, Po-214, Po-210, which also belong to the radioactive series of U-238, emit α particles upon their decay. In case where Radon is enclosed in an LC cell, the interaction of the emitted α particles with the ZnS(Ag) scintillator, might produce visible light (ultraviolet \sim 450 nm), which in turn propagates through the cell. If the cell has a transparent or even translucent window, the produced light can find its way out of the cell. When a photomultiplier, sensitive to this emitted light wavelength, is placed near this window, the respective photons convert into measurable electric current. After an appropriate calibration, this current can be linked to the value of the Radon concentration in the LC cell. The efficiency of this technique is considered to be fairly satisfactory, because several photons can be generated with a single interaction with the ZnS(Ag) scintillator. Besides, the signal due to the emission of α particles from each Radon nucleus, is also amplified from the α particles emissions by Radon progeny, leading to an enhanced efficiency. The electrical signal generated by the LC cell (i.e. the Radon detector) and the photomultiplier is transferred to specialized nuclear electronics modules, where it is processed to obtain usable information about the detected Radon concentration. In the present Diploma Dissertation (DD) various LC cells were set-up. All cells were based on the same cylindrical geometry: a standardized transparent glass jar, height \sim 125 mm, outer diameter \sim 57 mm and volume \sim 255 cm³, with a metal cap. The ZnS(Ag) scintillator was applied in various ways in the inner walls of the glass cells, in order to study the optimization of the LC technique in terms of efficiency. The scintillator was

applied in two different ways: (a) glued directly on the inner surfaces of the cell and, (b) glued onto sheets made of various materials and inserting them into the cell in a cylindrical form with the powder-coated surface facing at the at the cell axis. In total, six different LC cells were finally set-up. In the metal cap base of each cell, two small diameter tubes were connected to accommodate input and output of known Radon concentration. The transparent/translucent base of the glass cell, which was not covered with scintillator powder, was attached to a photomultiplier in a light-tight manner. For the LC cell tests, the detectors were fed with a known Radon concentration from a $\sim 2 \text{ m}^3$ Radon chamber available in NTUA's Nuclear Engineering Laboratory. This technique of measuring Radon concentrations, was tested for the first time in the Nuclear Engineering Laboratory within the framework of this DD and the results are considered very promising. This technique will need to be further investigated in more detail in a future Diploma Dissertation.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Το Ραδόνιο (Rn) είναι το βαρύτερο γνωστό αέριο στη φύση με ατομικό αριθμό 86, το οποίο επιπλέον είναι ευγενές και χημικά αδρανές. Διακρίνονται τέσσερα γνωστά ισότοπα του Ραδονίου: το ^{218}Rn , το ^{219}Rn , το ^{220}Rn και το ^{222}Rn . Από αυτά στη φύση του πλανήτη μας συναντώνται μόνο τα δύο: το Ραδόνιο-220 (^{220}Rn) και το Ραδόνιο-222 (^{222}Rn). Το Ραδόνιο-220 ονομάζεται συνήθως ΘΟΡΟΝΙΟ (thoron) διότι προέρχεται από τη φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Θορίου-232 (^{232}Th). Το Ραδόνιο-222 που προέρχεται από την φυσικώς ραδιενεργή σειρά του Ουρανίου-238 (^{238}U) ονομάζεται συνήθως απλά ΡΑΔΟΝΙΟ (radon). Στη συνέχεια θα μας απασχολήσει πρακτικά μόνο το Ραδόνιο-222, το οποίο θα ονομάζουμε απλά Ραδόνιο. Σημειώνεται ότι το Ραδόνιο ανακαλύφθηκε στα τέλη του 19^{ου} αιώνα – αρχές του 20^{ου}. Το γεγονός ότι το Ραδόνιο (και φυσικά το Θορόνιο) είναι ευγενή αέρια, οδήγησε στην αρχή την επιστημονική κοινότητα να τα αγνοήσουν –εσφαλμένα- ως παράγοντες κινδύνου για τον άνθρωπο, εξαιτίας της χημικής τους αδράνειας. Παρόλη τη χημική του αδράνεια το Ραδόνιο είναι ραδιενεργό και διασπάται προς άλλα ισότοπα εκπέμποντας –α σωματίδια.

1.2 Παραγωγή Ραδονίου και Ραδόνιο στη φύση

Το Ραδόνιο παράγεται από το ^{238}U , με διαδοχικές –α διασπάσεις και –β διασπάσεις, οι οποίες χονδρικά αναπαριστώνται στη σειρά διασπάσεων της ραδιενεργού αλυσίδας του U-238, όπως παρακάτω



Σημειώνεται ότι τα ισότοπα σε αυτή τη σειρά των διασπάσεων έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

(α) πλην του Ραδονίου είναι στερεά, (β) ο χρόνος ημιζωής τους είναι γενικά πολύ μικρότερος από το χρόνο ημιζωής του ^{238}U και (γ) αν είναι $i = 1$ το ^{238}U και $i = 7$ το ^{222}Rn , τότε γενικά, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1.1, $T_{1/2}(i) \gg T_{1/2}(i+1)$.

Πίνακας 1.1. Ιδιότητες των ισοτόπων της αλυσίδα του U-238

i	Ισότοπο	Χρόνος Ημιζωής
1	^{238}U	4.47×10^9 years
2	^{234}Th	24.1 days
3	$^{234\text{m}}\text{Pa}$	1.17 min
4	^{234}U	2.45×10^5 years
5	^{230}Th	7.54×10^4 years
6	^{226}Ra	1600 years
7	^{222}Rn	3.8 days

Αυτές οι ιδιότητες ως γνωστές ιδιότητες της φυσικώς ραδιενεργού σειράς του ^{238}U , οδηγούν στο συμπέρασμα ότι, στον πλανήτη μας, τα διαθέσιμα Bq Ραδονίου είναι όσα και τα Bq του ^{238}U . Με μαθηματικό τρόπο αυτή η παρατήρηση γράφεται ως:

$$R_1 = R_2 = \dots = R_7 \quad (1.1)$$

ή αλλιώς:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_7 N_7 \quad (1.2)$$

όπου:

λ_i η πιθανότητα διασπάσεως του ισοτόπου i ($i = 1-7$), και

N_i ο αριθμός πυρήνων του ισοτόπου i

Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ (secular equilibrium).

Δεδομένου ότι το ^{238}U είναι ένας από τους πολυπληθέστερους πυρήνες στη φύση του πλανήτη μας, γίνεται αντιληπτό ότι η διαθέσιμη ραδιενέργεια από το Ραδόνιο είναι ποσοτικά εξαιρετικά σημαντική. Το Ραδόνιο παράγεται εμμέσως από το ^{238}U και αμέσως από το ^{226}Ra , τα οποία, όντας στερεά συναντώνται στο έδαφος. Η συγκέντρωση του Ραδονίου στο εδαφικό αέριο κυμαίνεται από 0.5 kBq m^{-3} έως αρκετά MBq m^{-3} . Συγκεντρώσεις Ραδονίου απαντώνται επίσης στο νερό των πηγών (το οποίο υπενθυμίζεται, ότι είναι δυνατόν να "παρασύρει" Ραδόνιο από τους πόρους του εδάφους). Ως αντιπροσωπευτική τιμή θεωρείται η συγκέντρωση 10 Bq L^{-1} . Στο νερό της θάλασσας αντίθετα –το οποίο δεν είναι, όπως γίνεται κατανοητό, σε άμεση επαφή με το έδαφος- η συγκέντρωση του Ραδονίου είναι συνήθως πολύ χαμηλότερη και γενικά

μικρότερη από 1 BqL^{-1} . Στον ελεύθερο εξωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα, επίσης, η συγκέντρωση του Ραδονίου μπορεί να κυμαίνεται στην περιοχή $0 - 10 \text{ Bqm}^{-3}$.

1.3 Σύνοψη Διπλωματικής Εργασίας

Ο στόχος της ΔΕ είναι να εφαρμοσθεί και να αξιολογηθεί για πρώτη φορά στο ΕΠΤ-ΕΜΠ μια μέθοδος μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου, η οποία είναι αρκετά διαδεδομένη, ικανοποιητικά απλή και εύκολη στην εφαρμογή της και ικανοποιητικά οικονομική. Η μέθοδος αυτή είναι η τεχνική των δοχείων LC (Lucas Cell). Για το σκοπό αυτό η ΔΕ αναπτύσσεται, πέραν του παρόντος σε πέντε επιπλέον Κεφάλαια. Το Κεφάλαιο 2 ασχολείται με το πώς λειτουργεί ο αναγκαίος για την τεχνική αυτή φωτοπολλαπλασιαστής και ποιο σήμα φωτός προερχόμενο από το δοχείο LC αυτός εκμεταλλεύεται ώστε να μετρώνται συγκεντρώσεις Ραδονίου. Το σήμα φωτός προέρχεται από σπινθηριστή κατάλληλα τοποθετημένο στο δοχείο LC ώστε να αλληλεπιδρά με τα -α σωματίδια που παράγει το Ραδόνιο. Στο Κεφάλαιο 3 αναφέρονται και περιγράφονται τα απαραίτητα υλικά και ο απαραίτητος εξοπλισμός πυρηνικών ηλεκτρονικών για την εφαρμογή της τεχνικής των δοχείων LC. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται πως μπορούν να κατασκευάζονται δοχεία LC για την υπόψη τεχνική. Εξετάζεται επιπλέον πως τα δοχεία LC μπορούν να συζευχθούν με φωτοπολλαπλασιαστή, διαιρέτη τάσεως και προενισχυτή ώστε να συγκροτήσουν ανιχνευτική διάταξη,. Όπως είναι γνωστό για κάθε διάταξη που περιέχει φωτοπολλαπλασιαστή, αυτή πρέπει να βρίσκεται σε φωτοστεγανή θήκη ώστε να μην προσβάλλεται από το φως του περιβάλλοντος. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα βαθμονόμησης της τεχνικής. Η περιγραφή συνοδεύεται από την ακολουθία των τεχνικών χειρισμών που πρέπει να γίνονται ώστε μέσα σε ένα δοχείο LC να καταλήξει μία γνωστή τιμή συγκέντρωσης Ραδονίου. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 αξιολογούνται όλα τα πειράματα βαθμονόμησης.

1.4 Περίληψη συμπερασμάτων Διπλωματικής Εργασίας

Ως κυριότερα συμπεράσματα, προέκυψαν από τα πειράματα βαθμονόμησης και την αξιολόγησή τους ότι:

(α) Η τεχνική εφαρμόστηκε με ικανοποιητική επιτυχία στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

(β) Η αβεβαιότητα των μετρήσεων με δοχεία LC είναι στην περιοχή που προβλέπεται από τη βιβλιογραφία

(γ) Το υπόστρωμα είναι αυτό που συμβάλλει αποφασιστικά στο σφάλμα μέτρησης και κατ' επέκταση στη μείωση του βαθμού απόδοσης.

(δ) Για να διατηρηθούν απλές οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται σε κατάσταση ραδιενεργού ισορροπίας και με χαμηλό υπόστρωμα. Η εξασφάλιση αυτών των προϋποθέσεων για ένα δοχείο LC απαιτεί σημαντικό χρόνο, ο οποίος δεν είναι πάντα διαθέσιμος. Για αυτό, για διαδοχικές μετρήσεις συγκεντρώσεων Ραδονίου με την τεχνική LC χρειάζονται να υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά δοχεία LC.

Η Διπλωματική Εργασία κλείνει με προτάσεις για επόμενη έρευνα σε επόμενες Διπλωματικές Εργασίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗ - ΑΡΧΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ ΜΕ ΣΤΕΡΕΟ ΣΠΙΝΘΗΡΙΣΤΗ

2.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 2 θα παρουσιασθεί μια σύντομη εισαγωγή στην τεχνολογία των φωτοπολλαπλασιαστών και την τεχνική ανίχνευσης και μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου στον αέρα με τη χρήση δοχείων "Lucas Cell". Στο πλαίσιο αυτό θα εξερευνηθούν τα γενικά χαρακτηριστικά των φωτοπολλαπλασιαστών και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της τεχνικής αυτής, η οποία παρουσιάστηκε με λεπτομέρεια για πρώτη φορά στο τέλος της δεκαετίας του '50. Επιπλέον θα παρουσιασθούν προτεινόμενοι τρόποι με τους οποίους μπορούν να κατασκευάζονται δοχεία "Lucas Cell" στο Εργαστήριο. Σημειώνεται ότι παρόλη την μεγάλη τεχνογνωσία του Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας του ΕΜΠ στην τεχνολογία μετρήσεων συγκεντρώσεων Ραδονίου στον αέρα, στο νερό, στο αέριο του εδάφους (soil gas) και αλλού, η υπόψη τεχνική δεν έχει δοκιμασθεί ούτε υπάρχει σχετική εμπειρία, για αυτό και οι πληροφορίες στο Κεφάλαιο 2 είναι απαραίτητες προκειμένου, στο πλαίσιο αυτής της ΔΕ να γίνει η πρώτη εφαρμογή της τεχνικής αυτής.

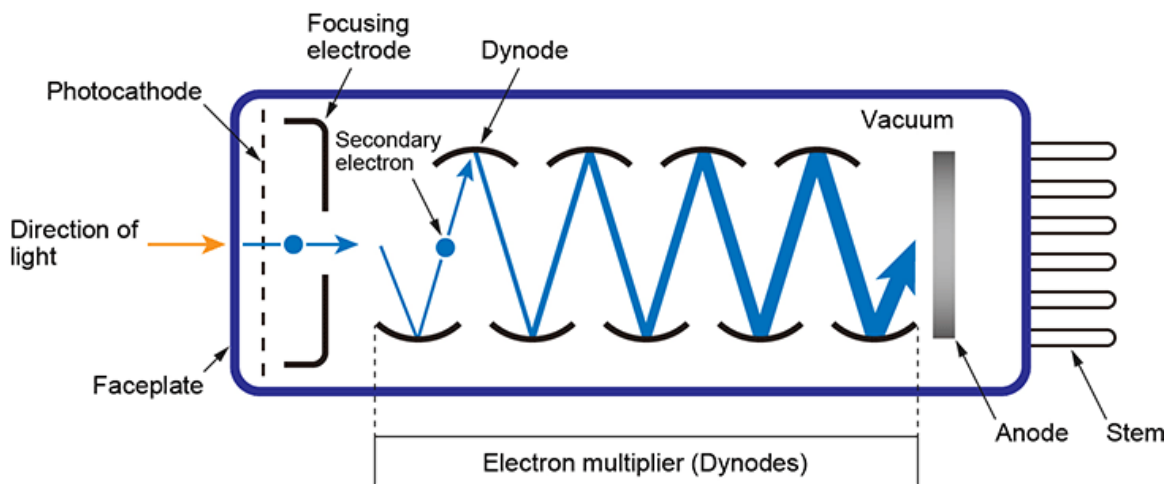
2.2 Στοιχεία λειτουργίας φωτοπολλαπλασιαστή

2.2.1 Γενικά

Ο φωτοπολλαπλασιαστής (στα αγγλικά photomultiplier ή PMT) είναι στην ουσία καθοδικός σωλήνας κενού, συνήθως κατασκευασμένος από κατάλληλο γυαλί. Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση και τη μέτρηση ορατού φωτός από το υπεριώδες έως το υπέρυθρο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Το βασικό πλεονέκτημα του PMT ως προς τα άλλα όργανα ανίχνευσης και μέτρησης του φωτός, είναι η ικανότητά του να ανιχνεύει πολύ χαμηλές εντάσεις φωτός, που φθάνει μέχρι και στο σημείο ανίχνευσης μεμονωμένων φωτονίων. Ακόμη, ένας PMT παρουσιάζει ικανοποιητική απόδοση μέτρησης (μετρούμενα φωτόνια / προσπίπτοντα φωτόνια), χαμηλό θόρυβο και γρήγορη απόκριση σε μεταβολές έντασης. Ο PMT χρησιμοποιείται ευρύτατα στη σύγχρονη Πειραματική Φυσική, στην Πυρηνική Τεχνολογία και στην Ιατρική.

2.2.2 Δομή και λειτουργία

Σύμφωνα και με την Wikipedia, ο PMT είναι συνήθως κατασκευασμένος από ένα εξαιρετικά ανθεκτικό διαφανές γυάλινο περίβλημα, κυλινδρικής γεωμετρίας. Στο εσωτερικό υψηλό κενό περιλαμβάνονται τρία κύρια τμήματα: (α) η φωτοκάθοδος, (β) οι δύνοδοι, και, (γ) η άνοδος. Η φωτοκάθοδος βρίσκεται πίσω ακριβώς από το παράθυρο εισόδου των φωτονίων και λογίζεται ως η είσοδος του PMT. Το παράθυρο εισόδου μπορεί να είναι από γυαλί, Pyrex, spectrosil, MgF_2 ή σάπφειρος ή ακόμα και άλλα κατάλληλα υλικά. Η φωτοκάθοδος είναι λεπτό, φωτοευαίσθητο και αγωγίμο υλικό, στο οποίο όταν προσπέσουν φωτόνια παράγονται (φωτο)ηλεκτρόνια. Ένας τυπικός PMT διακρίνεται στην Εικόνα 2.1.



Εικόνα 2.1: Τυπικός φωτοπολλαπλασιαστής

Ανάλογα με το υλικό της φωτοκαθόδου που χρησιμοποιείται, ο PMT είναι κατάλληλος για διαφορετικά μήκη κύματος ανιχνευόμενου φωτός. Το σύστημα παραθύρου-φωτοκαθόδου έχει δύο τύπους προσανατολισμού, τον σχεδιασμό head-on (ή αλλιώς end-on ή end-window) και τον σχεδιασμό side-on (ή αλλιώς side window). Στο σχεδιασμό side-on, το φως εισέρχεται από την πλευρική επιφάνεια του κυλίνδρου και προσκρούει στη φωτοκάθοδο. Η φωτοκάθοδος σε αυτή την περίπτωση είναι συνήθως αδιαφανής, ώστε να ευνοείται η αντανάκλαση. Στο σχεδιασμό head-on, το φως εισέρχεται από μία βάση του κυλίνδρου και προσπίπτει στην φωτοκάθοδο. Η φωτοκάθοδος σε αυτή την περίπτωση είναι ημιδιαφανής. Ο head-on τύπος είναι ο συνηθέστερος διότι επιτρέπει καλύτερη γεωμετρία φωτοκαθόδου, δυνόδων και ανόδου.

Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από τη φωτοκάθοδο μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου κατευθύνονται με τη βοήθεια ηλεκτρικού πεδίου σε μια διάταξη πολλαπλασιασμού ηλεκτρονίων. Η διάταξη αυτή αποτελείται από ένα αριθμό ηλεκτροδίων, συνήθως από 9 έως

13, που ονομάζονται δυνόδοι. Τα ηλεκτρόνια πολλαπλασιάζονται με τη διαδικασία παραγωγής δευτερογενών ηλεκτρονίων από τα πρωτογενή ηλεκτρόνια που προσβάλλουν τα ηλεκτρόδια των δυνόδων. Ο αριθμός των δευτερογενών ηλεκτρονίων είναι πάντοτε μεγαλύτερος από τον αριθμό των πρωτογενών της δευτερογενούς εκπομπής. Η πρώτη δύνodos βρίσκεται σε θετικότερο δυναμικό ως προς τη φωτοκάθοδο προκειμένου να έλκει τα πρωτογενή ηλεκτρόνια. Η δεύτερη δύνodos βρίσκεται σε θετικότερο δυναμικό ως προς την πρώτη προκειμένου να έλκει τα ηλεκτρόνια που αυτή παράγει, κ.ο.κ. Μεταξύ δυνόδων υπάρχει διαφορά δυναμικού που μπορεί να φθάσει μέχρι και 100 V. Πιο αναλυτικά: Ένα ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από τη φωτοκάθοδο έχει ενέργεια περίπου ίση με αυτή του προσπίπτοντος φωτονίου που το δημιούργησε. Λόγω του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ φωτοκαθόδου και πρώτης δυνόδου, τα παραγόμενα ηλεκτρόνια επιταχύνονται προς την πρώτη δύνodos. Τα ηλεκτρόνια αυτά ονομάζονται πρωτεύοντα. Πριν προσπέσουν στην πρώτη δύνodos η κινητική τους ενέργεια έχει αυξηθεί κατά περίπου 100 eV. Από την αλληλεπίδραση με την πρώτη δύνodos, για κάθε ένα πρωτεύον ηλεκτρόνιο εκπέμπονται περισσότερα από ένα ηλεκτρόνια, τα οποία αποτελούν τα δευτερογενή ηλεκτρόνια. Αυτά με τη σειρά τους επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο προς τη δεύτερη δύνodos. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται τόσες φορές όσες είναι ο αριθμός των δυνόδων. Η γεωμετρία της αλυσίδας των διαδοχικών δυνόδων είναι και αυτή που καθορίζει τον (εκθετικά) αυξανόμενο αριθμό των ηλεκτρονίων που παράγονται από κάθε δύνodos. Το τελευταίο στάδιο επιτάχυνσης των ηλεκτρονίων είναι η άνοδος. Η άνοδος βρίσκεται σε θετικότερο δυναμικό από αυτό της (φωτο)καθόδου, το οποίο φθάνει περίπου τα 1000 V. Στην άνοδο φτάνει ένας μεγάλος αριθμός ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός απότομου παλμού ρεύματος, ο οποίος είναι εύκολα ανιχνεύσιμος από ένα παλμογράφο ή άλλες ηλεκτρονικές συσκευές. Το σημαντικότερο συμπέρασμα, το οποίο προκύπτει από την πιο πάνω διαδικασία είναι ότι ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην έξοδο του PMT είναι ανάλογος (πολλαπλάσιος) με τον αριθμό των φωτονίων στην είσοδό του. Ως έξοδος του PMT λογίζεται η άνοδος. Μέσω των πολλών δυνόδων, ένας PMT πολλαπλασιάζει το σήμα, που παράγεται από το προσπίπτον φως, έως και 10^8 φορές.

Ένα ακόμη σημαντικό κομμάτι του φωτοπολλαπλασιαστή είναι και ο διαιρέτης τάσης. Ρόλος του είναι να διατηρεί κατάλληλη την κατανομή τάσης κατά μήκος των δυνόδων. Η τάση που διαιρείται προέρχεται από εξωτερικό τροφοδοτικό υψηλής τάσης. Επίσης, κατά μήκος των τελευταίων δυνόδων υπάρχουν πυκνωτές που αποθηκεύουν φορτίο το οποίο συνεισφέρει στη διατήρηση της σταθερότητας της τάσης των δυνόδων.

Περισσότερες πληροφορίες για τα βασικά στοιχεία λειτουργίας ενός PMT υπάρχουν στον Λεωνίδου (1989) και στον Λεωνίδου (1990).

2.2.3 Επίδραση της θερμοκρασίας

Ο θόρυβος σε έναν PMT οφείλεται συνήθως σε θερμικά αίτια και επομένως μπορεί να ελεγχθεί διατηρώντας τη θερμοκρασία σταθερή. Αυτός ο θόρυβος ονομάζεται θερμικός θόρυβος ή θόρυβος Johnson. Βέβαια, η μείωση της θερμοκρασίας συνεισφέρει ως προς την μείωση του θορύβου αλλά η κατάλληλη χαμηλή θερμοκρασία για χαμηλό θόρυβο εξαρτάται από το είδος της φωτοκαθόδου. Επίσης κάτω από κάποια θερμοκρασία με περαιτέρω ψύξη δεν παρατηρείται καμία επιπλέον μείωση θορύβου. Για τις περισσότερες φωτοκαθόδους η τιμή αυτή της θερμοκρασίας είναι περίπου ίση με $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.2.4 Λίγα λόγια για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Η εφεύρεση του φωτοπολλαπλασιαστή βασίστηκε σε δύο σημαντικές ανακαλύψεις: του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και της εκπομπής δευτερογενών ηλεκτρονίων. Η πρώτη αναφορά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου πραγματοποιήθηκε το 1887 από τον Hertz (1887), ο οποίος για την παραγωγή ηλεκτρονίων από φωτόνια ορατού φωτός, χρησιμοποίησε υπεριώδες φως. Η χρήση φωτοκαθόδου με βάση αλκαλικές γαίες, και συγκεκριμένα φωτοκαθόδου με Καίσιο, του επέτρεψε την επέκταση των μετρήσεων και από φωτόνια από το υπέρυθρο φάσμα του ορατού φωτός. Από ιστορική άποψη το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο σχετίζεται κυρίως με τον Albert Einstein, ο οποίος το 1905 στηριζόμενος σε αυτό το φαινόμενο θεμελίωσε την κβαντομηχανική. Για το έργο του αυτό ο Einstein τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1921.

Όπως αναφέρεται στον Arifov (2013), η πρώτη αναφορά στη εκπομπή δευτερογενών ηλεκτρονίων έγινε το 1899 από τον Villard. Όπως όμως σημειώνει ο Bruining (1954), η ουσιαστικότερη ανακάλυψη έγινε από τους Austin και Strake το 1902, οι οποίοι απέδειξαν πως όταν τα ηλεκτρόνια προσπίπτουν σε μεταλλική επιφάνεια, ο αριθμός των δευτερογενών ηλεκτρονίων που προκύπτουν είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν των πρωτογενών ηλεκτρονίων. Η πρώτη εισήγηση αξιοποίησης του φαινομένου αυτού, έγινε από τον επιστήμονα Slepian (1923), σε εφαρμογή ενίσχυσης σήματος.

2.2.5 Ιστορικά στοιχεία για τον PMT

Σημειώνεται ότι:

- Η αρχή λειτουργίας του PMT βοήθησε στην κατασκευή της 1^{ης} τηλεοπτικής κάμερας (~1920).
- Ο πρώτος μονοβάθμιος PMT ως όργανο που ενσωμάτωνε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και την παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων από μία δύνοδο παρουσιάστηκε από τους Iams και Salzberg (1935). Η άνοδος είχε τη μορφή πλέγματος. Αυτός ο PMT είχε χαμηλό κέρδος ενίσχυσης ίσο περίπου με 8.
- Αν και ο μονοβάθμιος PMT απέδιδε ικανοποιητικό ηλεκτρικό σήμα, υπήρχε η ανάγκη επίτευξης υψηλότερου κέρδους ενίσχυσης. Αυτό κατορθώθηκε με τον πολυβάθμιο PMT. Ο πρώτος πολυβάθμιος PMT βασίστηκε στην έρευνα του Slepian (1923). Η αναγκαία επιτάχυνση των δευτερογενών ηλεκτρονίων επετεύχθηκε με κατάλληλο μαγνητικό πεδίο.
- Ο ηλεκτροστατικός PMT (αυτός δηλαδή που περιγράφηκε στην ενότητα 2.2.2) είναι αυτός που προτιμάται από το 1937 μέχρι και σήμερα. Η ανακάλυψη αυτού του είδους PMT έγινε από τον Rajchman (1937).
- Ο βαθμός απόδοσης του PMT βελτιώθηκε ακόμη περισσότερο όταν άρχισε να χρησιμοποιείται το Cs₃Sb (cesium-antimony) ως υλικό της φωτοκαθόδου. Παρόλα αυτά όμως, κανένα υλικό φωτοκαθόδου (μέχρι στιγμής) δεν έχει ανιχνεύσει μήκος κύματος μεγαλύτερο από 1700 nm.

2.2.6 Υλικά φωτοκαθόδου και παραθύρου

Η επιλογή του υλικού της φωτοκαθόδου αλλά και του παραθύρου καθορίζεται από τη χρήση για την οποία προορίζεται ο PMT. Η σωστή επιλογή υλικού και διαστάσεων φωτοκαθόδου και παραθύρου μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση του θορύβου. Τα υλικά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της φωτοκαθόδου είναι αρκετά και διαφέρουν ως προς τις ιδιότητές τους. Το παράθυρο του PMT λειτουργεί ως φίλτρο του μήκους κύματος του εισερχόμενου φωτός και το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο επηρεάζει καθοριστικά τη φωτοευαισθησία του PMT. Το υλικό παραθύρου που χρησιμοποιείται συνήθως είναι το διαφανές βοριοπυριτικό γυαλί (το Pyrex). Μπορεί να χρησιμοποιείται επίσης (α) γυαλί με πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε Κάλιο με σκοπό την μείωση θορύβου από φωτόνια εξαιτίας του ισοτόπου K-40, (β) υπεριώδες γυαλί, αυτό δηλαδή που επιτρέπει να το διαπεράσουν μόνο φωτόνια υψηλής ενέργειας από πάρα πολύ χαμηλό μήκος κύματος (αόρατα).

2.2.7 Ορθή χρήση φωτοπολλαπλασιαστή

Οι φωτοπολλαπλασιαστές συνήθως λειτουργούν με υψηλή τάση μεταξύ φωτοκαθόδου και ανόδου στην περιοχή από 1000 έως 2000 V, ώστε να επιταχύνονται κατάλληλα τα ηλεκτρόνια. Η υψηλή τάση κατανέμεται στις δυνόδους του φωτοπολλαπλασιαστή με τη βοήθεια του διαιρέτη τάσεως. Ο διαιρέτης τάσεως λειτουργεί με κατάλληλες αντιστάσεις με εφαρμογή του "Νόμου Τάσεων Kirchhoff". Ο σχεδιασμός του διαιρέτη επηρεάζει την ταχύτητα απόκρισης του φωτοπολλαπλασιαστή (αλλιώς ονομάζεται "χρόνος ανόδου") στο εισερχόμενο φως για αυτό οι διαιρέτες διαφέρουν από φωτοπολλαπλασιαστή σε φωτοπολλαπλασιαστή ανάλογα με την εφαρμογή. Όταν ένας φωτοπολλαπλασιαστής βρίσκεται σε λειτουργία, απαγορεύεται να προσβάλλεται από ορατό φως. Επιτρέπεται να προσβάλλεται μόνο από το φως που παράγει η διεργασία την οποία παρατηρεί. Το ορατό φως έχει τόσα πολλά φωτόνια που οι παραγόμενοι παλμοί θα καταστρέψουν αμετάκλητα τον φωτοπολλαπλασιαστή. Για την προστασία των φωτοπολλαπλασιαστών από την αλληλεπίδραση με το ορατό φως διατίθενται ηλεκτρονικά κυκλώματα διαφόρων τύπων, ικανά να μειώσουν ή να διακόψουν την υψηλή τάση όταν παρατηρηθεί υπερβολικό ρεύμα στην άνοδο. Όμως η συνηθέστερη μέθοδος για την προστασία των φωτοπολλαπλασιαστών από το ορατό φως είναι ο εγκλωβισμός τους σε σκοτεινό χώρο, στον οποίο δεν μπορεί να εισέρθει φως. Ισχυρά μαγνητικά πεδία κοντά σε λειτουργούντες φωτοπολλαπλασιαστές επηρεάζουν την πορεία των ηλεκτρονίων με αποτέλεσμα αυτά να κατευθύνονται μακριά απ' τις δυνόδους και συνεπώς να χάνεται σήμα. Για το λόγο αυτό οι φωτοπολλαπλασιαστές συνήθως θωρακίζονται απ' το μαγνητικό πεδίο μέσω μιας επικάλυψης από λεπτό φύλλο αλουμινίου ή άλλου ελαφρού μετάλλου.

2.2.8 Εφαρμογές φωτοπολλαπλασιαστών

Οι φωτοπολλαπλασιαστές ήταν τα πρώτα φωτοκύτταρα που χρησιμοποιήθηκαν για την ανίχνευση μιας διακοπής ακτίνας φωτός π.χ. σε συστήματα συναγερμών. Επίσης χρησιμοποιούνται σε ερευνητικά εργαστήρια για τη μέτρηση της έντασης και του φάσματος του φωτός που εκπέμπουν κάποια υλικά, όπως είναι οι σύνθετοι ημιαγωγοί και οι ημιαγωγοί νανοκρυστάλλοι. Οι φωτοπολλαπλασιαστές αξιοποιούνται επίσης και στην ιατρική. Για παράδειγμα, οι φωτοπολλαπλασιαστές σε συσκευές ανάλυσης αίματος, χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της σχετικής συγκέντρωσης διαφόρων συστατικών που βρίσκονται στο δείγμα αίματος μέσω της ανίχνευσης φωτός που το διαπερνά. Πολλοί φωτοπολλαπλασιαστές μαζί σε μία επιφάνεια, σε συγκρότηση που ονομάζεται - γ κάμερα,

χρησιμοποιούνται για τα λεγόμενα σπινθηρογραφήματα, για αποτυπώσεις δηλαδή φωτός από ιοντίζουσα ακτινοβολία που έχει εισαχθεί στο σώμα ασθενούς για διαγνωστικούς σκοπούς. Τέλος, σε συνδυασμό με σπινθηριστές, οι φωτοπολλαπλασιαστές χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

2.3 Ο σπινθηριστής ZnS(Ag)

Οι σπινθηριστές είναι υλικά, τα οποία αν προσβληθούν από -α ή -β σωματίδια ή φωτόνια παράγουν φως. Ο ρόλος των σπινθηριστών είναι γενικά η μετατροπή της προσπίπτουσας ιοντίζουσας ακτινοβολίας σε φωτόνια του ορατού φάσματος συγκεκριμένου μήκους κύματος κατάλληλου για μέτρηση. Οι σπινθηριστές διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με τη φυσική κατάσταση στην οποία βρίσκονται (στερεά, υγρή, αέρια) και ανάλογα με το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένοι (οργανικοί ή ανόργανοι κρύσταλλοι, οργανικά υλικά, πλαστικοί σπινθηριστές, αέριοι σπινθηριστές). Οι ανόργανοι κρύσταλλοι σπινθηριστές είναι συνήθως αλκαλικές ενώσεις με αλογόνα που περιέχουν μικρές ποσότητες μεταλλικής προσμίξεως που ονομάζεται ενεργοποιητής. Ο πλέον γνωστός τέτοιος σπινθηριστής είναι το NaI με ενεργοποιητή Tl. Οι ενεργοποιητές παίζουν σημαντικό ρόλο στη λειτουργία των ανόργανων σπινθηριστών, ο οποίος ερμηνεύεται με βάση τη θεωρία των ζωνών (band theory). Πολύ σύντομα, οι ενεργοποιητές δημιουργούν ελαττώματα στο κρυσταλλικό πλέγμα και ενεργειακές καταστάσεις στην απαγορευμένη περιοχή μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας του κρυστάλλου πράγμα που διευκολύνει την παραλαβή της ενέργειας που απόθεσε στον κρύσταλλο η ιοντίζουσα ακτινοβολία με μορφή φωτός. Η αλληλεπίδραση σωματιδίου ή φωτονίου ιοντίζουσας ακτινοβολίας από κρύσταλλο σπινθηριστή που περιέχει ενεργοποιητή, έχει ως αποτέλεσμα τη διέγερση ηλεκτρονίων της ζώνης σθένους, τα οποία έχουν την τάση να μεταπηδήσουν στη ζώνη αγωγιμότητας (αυτό είναι στην πράξη ιοντισμός). Το κενό που αφήνει ένα τέτοιο ηλεκτρόνιο ονομάζεται οπή. Τόσο οι οπές όσο και τα ηλεκτρόνια, καθώς επίσης και τα εξιτόνια, δηλαδή οι δυάδες ηλεκτρονίων - οπών κινούνται στο κρυσταλλικό πλέγμα. Όταν αυτά τα προϊόντα της αλληλεπίδρασης συναντήσουν κέντρα ενεργοποιητών, συλλαμβάνονται από αυτά, και έπειτα διεγείρονται προς ανώτερες στάθμες ενέργειας. Στη συνέχεια αποδιεγείρονται από τις στάθμες αυτές προς τη θεμελιώδη, σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, της τάξης περίπου 10^{-7} s, με εκπομπή φωτονίων συνήθως ορατού φωτός, στην περιοχή του κυανού έως του υπεριώδους. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φθορισμός. Ο σπινθηριστής θειούχου ψευδαργύρου (ZnS), δεν είναι αλκαλική ένωση με αλογόνο αλλά και πάλι ανήκει στην κατηγορία των ανόργανων κρυσταλλικών σπινθηριστών και διατίθεται σε μορφή λευκής σκόνης που μοιάζει με την άχνη ζάχαρη. Ο ενεργοποιητής

στην περίπτωση αυτή είναι ο Άργυρος, οπότε το σύμβολο του υπόψη σπινθηριστή είναι ZnS(Ag). Ο σπινθηριστής ZnS(Ag) είναι κατάλληλος κυρίως για αλληλεπιδράσεις με -α σωματίδια.

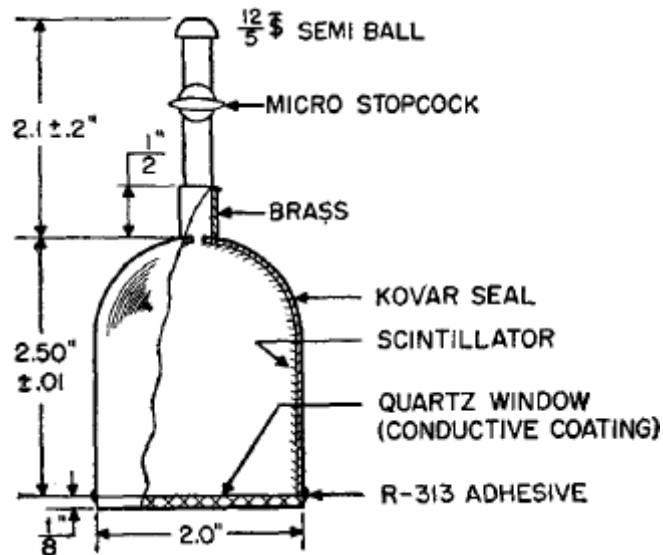
2.4 Στοιχεία λειτουργίας τεχνικής "Lucas Cell"

2.4.1 Γενικά

Για τη λειτουργία της τεχνικής "Lucas Cell" μπορεί να αντληθούν πληροφορίες από το σχετικό πρώτο επιστημονικό άρθρο του Lucas (1957). Η τεχνική, αν εφαρμοσθεί με προσοχή, παρουσιάζει χαμηλό υπόστρωμα. Τα δοχεία LC μπορεί να είναι κατασκευασμένα από φύλλα χάλυβα και φέρουν διαυγές ή διαφώτιστο παράθυρο π.χ. από χαλαζία (quartz) για την ανίχνευση του παραγόμενου φωτός. Μεγαλύτερη απόδοση επιτυγχάνεται αν το παράθυρο έχει καλυφθεί από την εσωτερική πλευρά με ηλεκτρικά αγωγή σκόνη οξειδίου του κασσιτέρου (SnO₂) σε λεπτό στρώμα, από το οποίο να περνάει το φως. Στις δοκιμές του Lucas (1957) επιτεύχθηκε σταθερός βαθμός απόδοσης ίσος με 5.58 cpm / 10⁻¹² Ci Ραδονίου. Σε μονάδες SI αυτός ο βαθμός απόδοσης μεταφράζεται σε περίπου 15 cpm / Bq Ραδονίου. Το υπόστρωμα υπολογίστηκε στα 0.08 cpm. Τα δοχεία LC δοκιμάστηκαν και βρέθηκαν κατάλληλα για τη μέτρηση ποσοτήτων Ραδονίου από 10⁻¹⁴ Ci (στο SI ~ 4 mBq) και συγκεντρώσεων Ραδονίου στον αέρα από 10⁻¹⁶ Ci/L (στο SI ~ 0.04 Bqm⁻³). Η γενική ιδέα των ανιχνευτών που δοκιμάστηκαν από τον Lucas (1957) βασίζεται στο ότι ο θειούχος ψευδάργυρος, ο ενεργοποιημένος με άργυρο, ZnS(Ag), παράγει φως αν προσβληθεί από -α σωματίδια. Για την εξασφάλιση χαμηλού υποστρώματος, τα δοχεία LC, προτιμήθηκε να κατασκευασθούν από μέταλλο (αντί π.χ. γυαλί) και το παράθυρο τους, προτιμήθηκε να κατασκευασθεί από χαλαζία (αντί π.χ. πάλι γυαλί). Τα υλικά αυτά φαίνεται ότι εξασφάλισαν και καλή επαναληψιμότητα στις μετρήσεις.

2.4.2 Κατασκευαστικά στοιχεία των δοκιμών του Lucas (1957)

Τα δοχεία LC που δοκιμάστηκαν από τον Lucas (1957) είχαν τη γενική μορφή της Εικόνας 2.2. Ο όγκος τους ήταν μικρός και ίσος με 96 cm³.



Εικόνα 2.2 Δοχείο LC. Micro Stopcock: βαλβίδα, Brass: ορειχάλκινη σωλήνα υποδοχής, Kovar Seal: Μεταλλικό δοχείο από κράμα Νικελίου-Κοβαλτίου, Scintillator: Λεπτό στρώμα από ZnS(Ag), Quartz Window: Παράθυρο από χαλαζία, Adhesive: Στεγανή κόλλα

Για τη κατασκευή του λεπτού στρώματος ZnS(Ag), σκόνη από το υλικό αυτό διαλύθηκε σε διχλωρίδιο του αιθυλενίου (ethylene dichloride). Σημειώνεται ότι σήμερα (2022) η χρήση αυτού του διαλύτη απαγορεύεται επειδή είναι τοξικός και καρκινογόνος. Το διάλυμα ψεκάστηκε στο εσωτερικό του τοιχώματος Kovar με όσο το δυνατό πιο ομοιογενή τρόπο και αφέθηκε να στεγνώσει. Στη συνέχεια προετοιμάστηκε το παράθυρο από χαλαζία. Πρώτα καλύφθηκε η μία όψη του παραθύρου με λεπτό στρώμα από σκόνη οξειδίου κασσιτέρου (SnO₂). Η σκόνη αυτή είναι αγωγίμη και χρησιμεύει ώστε να γειώνονται τυχόν ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις του χαλαζία και να ελαχιστοποιούνται τυχόν επιδράσεις από ηλεκτροστατικά πεδία. Μετά, το παράθυρο τοποθετήθηκε στο άνοιγμα του τοιχώματος Kovar με την καλυμμένη από οξείδιο του κασσιτέρου όψη προς τα μέσα. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε λίγο ασημί μεταλλικό χρώμα στα άκρα του παραθύρου ώστε το οξείδιο του κασσιτέρου να γειωθεί στο τοίχωμα Kovar. Έπειτα, με στεγανή κόλλα τύπου R-313 (βενζινόκολλα) το παράθυρο στεγανώθηκε και ενώθηκε ασφαλώς με το τοίχωμα Kovar.

2.4.3 Βαθμονόμηση δοχείων

Δοχεία LC που κατασκευάστηκαν όπως στην Εικόνα 2.2 δοκιμάστηκαν σε ό,τι αφορά την απόδοσή τους και την επαναληψιμότητα. Οι δοκιμές έγιναν με συγκεντρώσεις Ραδονίου στην περιοχή περί τα 4.5 kBq m⁻³. Οι δοκιμές με ένα δοχείο LC φαίνονται επαναλήψιμες για διάστημα 8 μηνών. Επιπλέον δοκιμές με περισσότερα δοχεία LC έδειξαν κύμανση

επαναληψιμότητας στην περιοχή του 3%. Το υπόστρωμα των δοχείων LC βρέθηκε σταθερό για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα τρία δοχεία που μέτρησαν 16 φορές για 900 min σε διάστημα 40 ημερών παρουσίασαν στατιστικά το ίδιο υπόστρωμα στην περιοχή από 0.08 cpm έως 0.11 cpm. Η αυξημένη τιμή των 0.11 cpm μπορεί να οφείλεται στα θυγατρικά του Ραδονίου από μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν σε υψηλές συγκεντρώσεις Ραδονίου. Άλλος συστηματικός θόρυβος των μετρήσεων υπολογίστηκε σε 0.003 cpm. Με βάση τις δοκιμές αυτές εκτιμήθηκε ότι ένα δοχείο LC, όπως αυτά που δοκιμάστηκαν, μπορεί να μετρήσει με καλή στατιστική περιεχόμενο Ραδόνιο ίσο με 4 mBq, αν η μέτρηση διαρκεί 8 - 12 ώρες. Αυτό το Ραδόνιο αντιστοιχεί σε συγκέντρωση περίπου 40 Bqm^{-3} . Για τις μετρήσεις, το δοχείο LC πληρώθηκε με αέρα που περιέχει Ραδόνιο και τοποθετήθηκε κάθετα σε έναν φωτοπολλαπλασιαστή (βλέπε στην επόμενη ενότητα), ώστε το παράθυρό του να είναι σε επαφή με την πλευρά που είναι η φωτοκάθοδος του φωτοπολλαπλασιαστή. Το δοχείο LC και ο φωτοπολλαπλασιαστής σκεπάστηκαν με ένα φωτοστεγανό κάλυμμα και οι μετρήσεις ξεκίνησαν μετά από 4 ώρες από την εισαγωγή του Ραδονίου, ώστε να έχει επιτευχθεί ραδιενεργή ισορροπία μεταξύ του Ραδονίου και των θυγατρικών του. Ο φωτοπολλαπλασιαστής ήταν συνδεδεμένος με τα κατάλληλα πυρηνικά ηλεκτρονικά. Επειδή είναι γνωστό ότι η απόδοση ενός φωτοπολλαπλασιαστή κυμαίνεται με τη θερμοκρασία, η σταθερότητα της συμπεριφοράς του συστήματος φωτοπολλαπλασιαστή και πυρηνικών ηλεκτρονικών διαπιστώθηκε με ένα δοχείο LC, στο οποίο δεν υπάρχει Ραδόνιο, αλλά μόνο μία πηγή -α σωματιδίων σε σταθερή θέση. Αν το σύστημα βρίσκονταν σε διαφορά απόδοσης σε σχέση με προηγούμενες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκε διορθωτικός συντελεστής. Η πηγή Ραδονίου πιστοποιημένης αβεβαιότητας 0.3%, με την οποία έγιναν οι βαθμονομήσεις προμηθεύτηκε από το NIST.

2.4.4 Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης και το υπόστρωμα

Η απόκριση του στρώματος σπινθηριστή ZnS(Ag) βρέθηκε ότι εξαρτάται από το πάχος του και φθάνει στη μέγιστη τιμή της όταν το πάχος του στρώματος φθάσει στα περίπου 20 mg cm^{-2} . Οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση δεν βελτιώνει την απόκριση. Οπότε συνιστάται στα δοχεία LC, το πάχος του στρώματος σπινθηριστή να είναι μέχρι 20 mg cm^{-2} . Αν το παράθυρο από χαλαζία δεν έχει επίστρωση από οξείδιο του κασσιτέρου, τα δοχεία LC που έχουν κατασκευασθεί με τις ίδιες κατά τα άλλα συνθήκες παρουσιάζουν κύμανση του βαθμού απόδοσης μέχρι και 25% στις ίδιες ή διαφορετικές ποσότητες Ραδονίου. Ένας άλλος παράγοντας που είναι δυνατόν να συμβάλλει στην κύμανση του βαθμού απόδοσης ενός δοχείου LC είναι η υγρασία που συγκεντρώνεται στο εσωτερικό του δοχείου και τυχόν

ανομοιομορφίες στο στρώμα του σπινθηριστή ZnS(Ag). Η υγρασία επηρεάζει την κατανομή των θυγατρικών του Ραδονίου στο εσωτερικό του δοχείου LC διότι τα θυγατρικά του Ραδονίου έχουν την τάση να προσκολλούνται στα μόρια του νερού στον αέρα του δοχείου και να μην διαχέονται προς το τοίχωμα του δοχείου. Επίσης η γεωμετρία ενός δοχείου LC παίζει καθοριστικό ρόλο ως προς τον βαθμό απόδοσης, αφού επηρεάζει την πιθανότητα ένα -α σωματίδιο να αλληλοεπιδράσει με το σπινθηριστή ZnS(Ag). Η αλληλεπίδραση των -α σωματιδίων με τον σπινθηριστή του δοχείου LC, εκτιμήθηκε από τον Lucas (1957) με τη χρήση της Μεθόδου Monde Carlo. Σύμφωνα με την προσομοίωση αυτή υπολογίστηκαν οι θεωρητικοί βαθμοί απόδοσης για διάφορες περιπτώσεις κατανομής Ραδονίου και θυγατρικών στο δοχείο LC. Το Ραδόνιο θεωρείται αέριο με ομοιογενή κατανομή στο δοχείο LC ενώ τα θυγατρικά μπορούν να βρίσκονται στο αέριο, στα τοιχώματα με ZnS(Ag) ή στο τοίχωμα του παραθύρου. Στις προσομοιώσεις βρέθηκε ότι ο βαθμός απόδοσης μπορεί να κυμαίνεται από $4.14 \text{ cpm} / 10^{-12} \text{ Ci}$ Ραδονίου έως $6.07 \text{ cpm} / 10^{-12} \text{ Ci}$ Ραδονίου. Σε μονάδες SI αυτοί οι βαθμοί απόδοσης μεταφράζονται από περίπου $12 \text{ cpm} / \text{Bq}$ Ραδονίου έως περίπου $16 \text{ cpm} / \text{Bq}$ Ραδονίου. Άλλος παράγοντας που επηρεάζει το βαθμό απόδοσης είναι οι τυχόν ποσότητες Ραδονίου που χάνονται κατά τη μετάγγισή του προς μέτρηση στο δοχείο LC. Στο πείραμα του Lucas (1957) οι απώλειες αυτές εκτιμήθηκαν σε περίπου 5%. Ακόμη ένας παράγοντας που επιδρά αρνητικά στο βαθμό απόδοσης είναι ο τρόπος ρύθμισης της μέτρησης των σχετικών παλμών φωτός από τα πυρηνικά ηλεκτρονικά (ΣΣ: π.χ. μπορεί το κατώτερο επίπεδο διαχωρισμού να είναι λάθος ή να υπάρχει σημαντικό Pile-Up).

Φαίνεται πάντως ότι η πλέον σημαντική αρνητική επίδραση στο βαθμό απόδοσης οφείλεται σε ηλεκτρικά πεδία που αναπτύσσονται μέσα στο δοχείο LC. Για παράδειγμα η φωτοκάθοδος του φωτοπολλαπλασιαστή έχει άμεση επαφή με το δοχείο LC ακουμπώντας το παράθυρό του. Συνεπώς το παράθυρο του δοχείου LC αποκτά την ίδια αρνητική φόρτιση με αυτή της φωτοκαθόδου. Ο βαθμός απόδοσης του δοχείου LC είναι χαμηλότερος όταν η φωτοκάθοδος έχει αρνητική φόρτιση, το οποίο είναι και η συνήθης περίπτωση, σε σχέση με τις περιπτώσεις που η φωτοκάθοδος είναι θετικά φορτισμένη ή ηλεκτροστατικά θωρακισμένη. Αυτό οφείλεται στο ότι, το αρνητικό δυναμικό που αναπτύσσεται στο παράθυρο ελκύει τα -α σωματίδια, με αποτέλεσμα μέρος τους να συγκεντρώνεται σε εκείνη την περιοχή και να μην αλληλοεπιδρά με τον σπινθηριστή ZnS(Ag). Για τον περιορισμό της επίδρασης των ηλεκτρικών πεδίων ο Lucas (1957) εφάρμοσε την αγωγίμη εσωτερική επιφάνεια του παραθύρου, όπως ήδη περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Κατά τις δοκιμές βρέθηκε επιπλέον ότι τυχόν ραδιενέργεια από τα τοιχώματα (ΣΣ: π.χ. K-40 που εκπέμπει φωτόνια μεγάλης ενέργειας, ~1.5 MeV, ή Po-210 που εκπέμπει -α σωματίδια ενέργειας 5.34 MeV) συνεισφέρει σημαντικά στο παρατηρούμενο υπόστρωμα. Για παράδειγμα, αν τα τοιχώματα του δοχείου LC ήταν από Pyrex, βρέθηκε υπόστρωμα, εξαιτίας -α σωματιδίων που ήταν 5 φορές μεγαλύτερο από αυτό με μεταλλικά τοιχώματα. Παρατηρήθηκε επίσης ότι το υπόστρωμα εξαιτίας των τοιχωμάτων Pyrex μειώνεται με την αύξηση του πάχους του στρώματος σπινθηριστή ZnS(Ag).

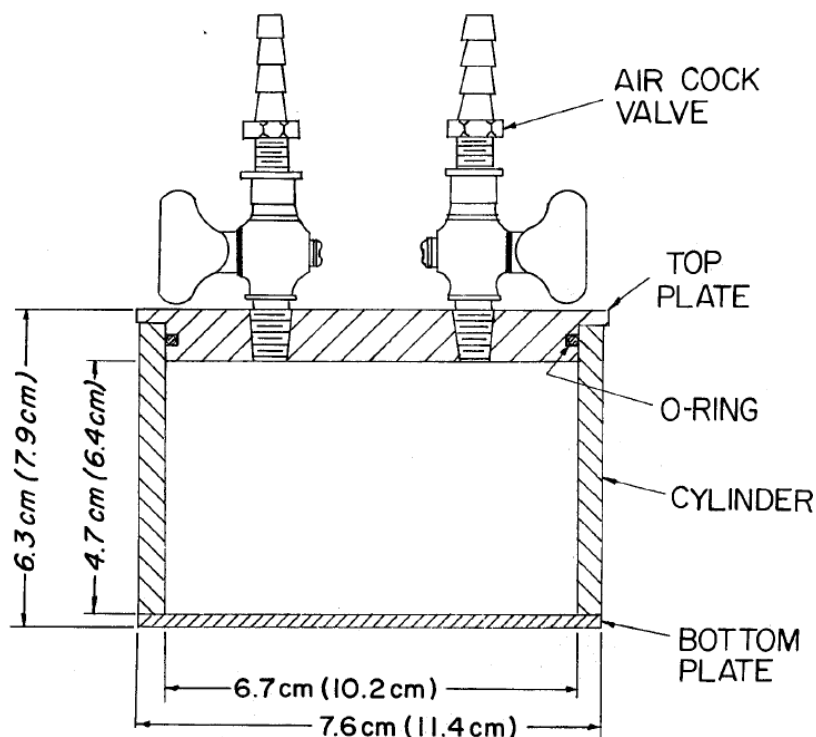
2.5 Δοχεία LC σύμφωνα με το πρότυπο του EML

2.5.1 Γενικά

Το Environmental Measurements Laboratory (EML) των ΗΠΑ, ανήκει στο Ομοσπονδιακό Υπουργείο Ενέργειας (Department of Energy ή DOE) και απασχολείται κυρίως με τη μέτρηση της ραδιενέργειας στο περιβάλλον. Το Ραδόνιο, σε ό,τι αφορά στο EML είναι μέρος της ραδιενέργειας του περιβάλλοντος και μπορεί να μετρείται με διάφορες τεχνικές. Μία από αυτές είναι και τα δοχεία LC, τα οποία μπορούν να κατασκευάζονται σύμφωνα με πρότυπο τρόπο που προτείνεται από το EML (βλ. George, 1992)

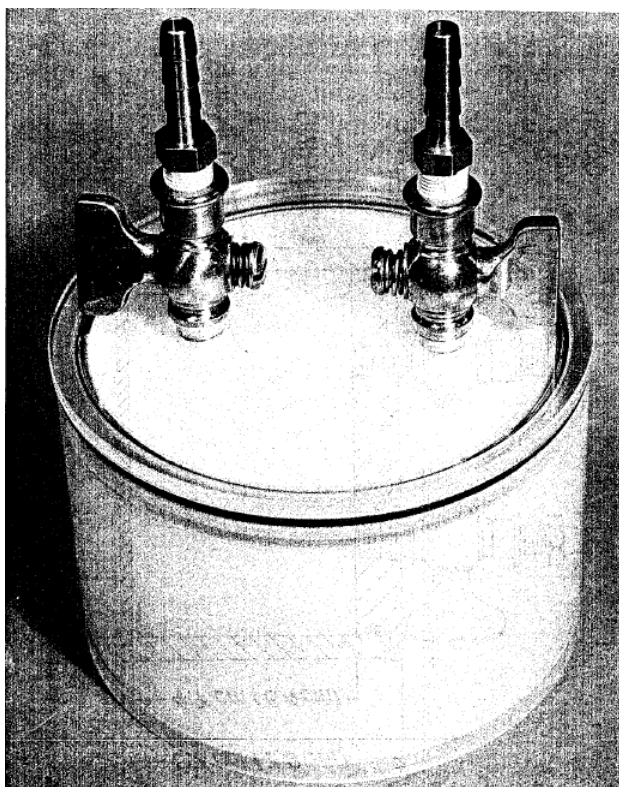
2.5.2 Πρότυπο EML

Τα απαιτούμενα υλικά είναι: Σωλήνες και επιφάνειες από Plexiglass (methyl methacrylate), σπινθηριστής ZnS(Ag) και κόλλα. Το δοχείο κατασκευάζεται ως εξής: (α) σωλήνα Plexiglass εξωτερικής διαμέτρου περίπου 100 mm κόβεται σε μήκος περί τα 70 mm. (β) Η κάτω βάση του κυλίνδρου κολλιέται σε μία κυκλική επιφάνεια από Plexiglass. (γ) Στην άνω βάση προσαρμόζεται στεγανά (με o-ring) κυκλικό κάλυμμα που φέρει βαλβίδες εισόδου και εξόδου αερίου. Η άνω βάση παίζει το ρόλο αφαιρούμενου πώματος. (δ) Ο εσωτερικός όγκος του δοχείου μπορεί να φθάνει περίπου στα 2 L. Ένα τυπικό σκαρίφημα του δοχείου διακρίνεται στην Εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Σκαρίφημα δοχείου LC σύμφωνα με το πρότυπο EML

Όταν ετοιμασθεί το δοχείο, παρασκευάζεται κόλλα, η οποία χρησιμοποιείται για την επικόλληση της σκόνης ZnS(Ag) στα τοιχώματα. Για την δημιουργία τη κόλλας χρησιμοποιούνται τα εξής υλικά: 30 mL υγρής σιλικόνης, 285 mL αντιδραστήριο βενζολίου, 285 mL αντιδραστήριο κυκλοεξανίου. Η ποσότητα της κόλλας αυτής φθάνει για περίπου 100 δοχεία. Προτού εφαρμοσθεί η κόλλα τα δοχεία καθαρίζονται με λείο πανί και με αφρό καθαρισμού πλαστικών. Στη συνέχεια κάθε δοχείο γεμίζει με 50 g κόλλα και σκεπάζεται με το πώμα του. Ακολουθούν αργές περιστροφικές κινήσεις του δοχείου ούτως ώστε όλη η εσωτερική του επιφάνεια να καλυφθεί με κόλλα. Το πώμα αφαιρείται και η κόλλα που περισσεύει απορρίπτεται. Έπειτα το δοχείο σφραγίζεται πάλι και η κόλλα αφήνεται να "τραβήξει" για λίγα λεπτά. Ακολούθως αφαιρείται και πάλι το πώμα και τοποθετούνται μέσα στο δοχείο 15-20 g σκόνης ZnS(Ag). Σφραγίζεται το δοχείο με το πώμα και ανακινείται προσεκτικά ώστε όλες οι επιφάνειές του να καλυφθούν με σπινθηριστή. Έπειτα αφαιρείται το πώμα και απομακρύνεται όσος σπινθηριστής έχει περισσέψει. Τέλος σφραγίζεται οριστικά το δοχείο με το πώμα και είναι έτοιμο για μετρήσεις. Όταν το υπόστρωμα του δοχείου αυξηθεί αρκετά μετά από πολλές μετρήσεις, ο σπινθηριστής μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί και να επανατοποθετηθεί νέος με την ίδια διαδικασία. Μια φωτογραφία του δοχείου LC που κατασκευάζεται με αυτόν τρόπο διακρίνεται στην Εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4: Δοχείο LC που κατασκευάστηκε κατά το πρότυπο EML

2.6 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 2 έγινε μια εισαγωγική γνωριμία με την τεχνολογία των φωτοπολλαπλασιαστών και την τεχνική ανίχνευσης και μέτρησης συγκεντρώσεων Ραδονίου στον αέρα με τη χρήση δοχείων LC. Για την τεχνική αυτή απαιτείται η χρήση κρυσταλλικού ανόργανου σπινθηριστή $ZnS(Ag)$ σε μορφή λεπτής σκόνης. Το μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνικής αυτής είναι ότι η κατασκευή του ανιχνευτή είναι πολύ εύκολη και σχετικά οικονομική. Το μειονέκτημα φαίνεται να είναι ότι ο βαθμός απόδοσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι είναι δύσκολο να ελεγχθούν. Στο επόμενο Κεφάλαιο 3 θα αναφερθούν όλα τα υλικά, ο εξοπλισμός, τα πυρηνικά ηλεκτρονικά και ό,τι άλλο είναι αναγκαίο, προκειμένου να γίνουν στο Εργαστήριο Πυρηνικής Τεχνολογίας τα πρώτα πειράματα με την τεχνική των δοχείων LC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΤΩΝ ΔΟΧΕΙΩΝ LUCAS CELL ΣΤΟ ΕΠΤ-ΕΜΠ

3.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 3 θα παρουσιασθεί μια σύντομη περιγραφή για τα απαραίτητα υλικά και τον απαραίτητο εξοπλισμό πυρηνικών ηλεκτρονικών για την εφαρμογή της τεχνικής των δοχείων LC. Πιο αναλυτικά θα γίνει αναφορά: (α) στον σπινθηριστή ZnS(Ag), στα τεχνικά χαρακτηριστικά του, στις μορφές που είναι διαθέσιμες και στη διαδικασία με την οποία έγινε η προμήθειά του, (β) στον κατάλληλο φωτοπολλαπλασιαστή και τον συνδεδεμένο με αυτόν διαιρέτη τάσης και προενισχυτή, ο συγκεκριμένος εξοπλισμός είχε προμηθευθεί στοχευμένα για την τεχνική LC στο ΕΠΤ-ΕΜΠ από παλαιότερα και (γ) στα απαραίτητα και κατάλληλα πυρηνικά ηλεκτρονικά, δηλαδή στο τροφοδοτικό υψηλής τάσης, στον ενισχυτή, το διαχωριστή και τον καταμετρητή που απαιτούνται κατ' ελάχιστο για να λαμβάνονται μετρήσεις αλληλεπιδράσεων -α σωματιδίων με τον σπινθηριστή. Σε ό,τι αφορά στα πυρηνικά ηλεκτρονικά χρησιμοποιήθηκαν κυρίως μονάδες που δεν ήταν απασχολημένες σε άλλες διατάξεις, έτσι ώστε να μην παρενοχληθεί η μετρητική διαδικασία του ΕΠΤ-ΕΜΠ από την παρούσα ΔΕ. Τον αναγκαίο εξοπλισμό πυρηνικών ηλεκτρονικών συμπληρώνουν μια μονάδα NIM BIN τύπου "slave", το κατάλληλο για αυτήν τροφοδοτικό της και ένας ψηφιακός παλμογράφος.

3.2 Προμήθεια σπινθηριστή ZnS(Ag)

3.2.1 Γενικά

Σύμφωνα με αλληλογραφία που έγινε με τον αφυπηρητήσαντα Καθηγητή του University College Dublin, Dr. James McLaughlin (email: james.mclaughlin@ucd.ie) διαπιστώθηκε ότι εκτός από τον σπινθηριστή ZnS(Ag) σε μορφή σκόνης, η οποία επικολλάται στο εσωτερικό ενός δοχείου LC (βλ. στο Κεφάλαιο 2), μπορούν να χρησιμοποιηθούν και προκατασκευασμένα λεπτά φύλλα, στην μία επιφάνεια των οποίων έχει τοποθετηθεί από τον κατασκευαστή λεπτό στρώμα σκόνης ZnS(Ag). Τα φύλλα αυτά μπορούν να τοποθετούνται στο δοχείο LC, ώστε η επιφάνειά τους με τον σπινθηριστή να "κοιτά" στο εσωτερικό των δοχείων. Δεδομένου ότι στο ΕΠΤ-ΕΜΠ δεν υπήρχε ούτε σκόνη ZnS(Ag), ούτε φύλλα με ZnS(Ag), έγιναν ενέργειες για την προμήθειά τους.

3.2.2 Σκόνη σπινθηριστή

Προκειμένου να γίνει προμήθεια σκόνης σπινθηριστή, πραγματοποιήθηκε επικοινωνία με την Καναδική Εταιρεία Pylonelectronics (www.pylonelectronics-radon.com), 147 Colonnade Road, Ottawa, ON K2E 7L9, CANADA, η οποία είναι γνωστό ότι κατασκευάζει και εμπορεύεται δοχεία LC. Μέσω της επικοινωνίας δόθηκε η πληροφορία ότι ο κυριότερος κατασκευαστής σκόνης ZnS(Ag) στην Ευρώπη είναι η εταιρεία Phosphor Technology Ltd (www.phosphor-technology.com), Norton Park, Norton Road, Stevenage, Herts. SG1 2BB, UK. Από την εταιρεία αυτή παραγγέλθηκε 100 g σκόνης ZnS(Ag), η οποία ξεπερνά κατά πολύ τις ανάγκες των πειραμάτων αυτής της ΔΕ, αλλά ήταν η μικρότερη δυνατή ποσότητα που εμπορευόταν η Phosphor Technology Ltd. Τα χαρακτηριστικά της σκόνης είναι: (α) μέγεθος κόκκου 8 μm, (β) Τύπος EIA-WTDS P22B-X, PTL Grade GL47/N-C2, (γ) CIE συντεταγμένες θερμοκρασίας εκπεμπόμενου φωτός $x = 0.148$, $y = 0.062$ (1840 K) και (δ) πιθανότερο μήκος κύματος εκπεμπόμενου φωτός 450 nm. Το κόστος των 100 g στο τέλος του 2021 ήταν περίπου 197,00 GBP (232,00 EUR) μαζί με τα ταχυδρομικά. Το κόστος εκτελωνισμού και ΦΠΑ ήταν 76,03 EUR. Εναλλακτικά με την Phosphor Technology Ltd, μπορεί κάποιος να απευθυνθεί για σκόνη ZnS(Ag) στην ELJEN TECHNOLOGY (<https://eljentechnology.com>), 1300 W. Broadway, Sweetwater, Texas 79556, United States.

3.2.3 Φύλλα με σπινθηριστή

Προκειμένου να γίνει προμήθεια φύλλων σπινθηριστή, πραγματοποιήθηκε επικοινωνία με τον κ. George Dowell, ο οποίος εμπορεύεται υλικά και όργανα για την ανίχνευση ιοντιζουσών ακτινοβολιών και ιδιαίτερα σπινθηριστές και φωτοπολλαπλασιαστές. Ο κ. Dowell διατηρεί και σχετικά group μετρολογίας ιοντιζουσών ακτινοβολιών στο διαδίκτυο με μεγάλο κοινό. Ο κ. Dowell ήταν πρόθυμος να μας προσφέρει σε φιλική τιμή 5 διαφανή φύλλα με ZnS(Ag) διαστάσεων 8"×10" και 5 λεπτά φύλλα Mylar διαστάσεων επίσης 8"×10". Από αυτά για την ΔΕ ενδιαφέρουν προφανώς τα πρώτα. Τα δεύτερα φύλλα είναι κατάλληλα για να καλύπτουν τα πρώτα αν χρειάζεται να κατασκευασθούν ανιχνευτές -α σωματιδίων, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται στη ΔΕ Ασάρβελης (2006). Το κόστος των υλικών αυτών στο τέλος του 2021 ήταν περίπου 138,00 USD (123,00 EUR) μαζί με τα ταχυδρομικά. Το κόστος εκτελωνισμού και ΦΠΑ ήταν 15,76 EUR. Για εμπορική προμήθεια φύλλων με σπινθηριστή μπορεί κάποιος να απευθυνθεί επίσης στην ELJEN TECHNOLOGY (<https://eljentechnology.com>), 1300 W. Broadway, Sweetwater, Texas 79556, United States.

3.3 Προμήθεια φωτοπολλαπλασιαστή και προενισχυτή

Η προμήθεια του φωτοπολλαπλασιαστή και του κατάλληλου για αυτόν προενισχυτή έγινε με πιστώσεις του Τακτικού Προϋπολογισμού του ΕΜΠ από την Ευρωπαϊκή Εταιρεία ORTEC / AMETEK, η οποία αντιπροσωπεύεται σήμερα (2022) στην Ελλάδα από την εταιρεία Zouboulakis SA, Βασ. Αλεξάνδρου 39, Περιστερί, Αθήνα 12131. Ο προενισχυτής, ο οποίος διακρίνεται στην Εικόνα 3.1, ήταν τύπου ORTEC 276L, S/N 14093558, έχει ενσωματωμένο διαιρέτη τάσεως 10 σταδίων και μπορεί να συνδεθεί απευθείας με τυποποιημένο συμβατό φωτοπολλαπλασιαστή.



Εικόνα 3.1: Προενισχυτής τύπου ORTEC 276L με ενσωματωμένο διαιρέτη τάσεως 10 σταδίων (διαιρέτης: photomultiplier base)



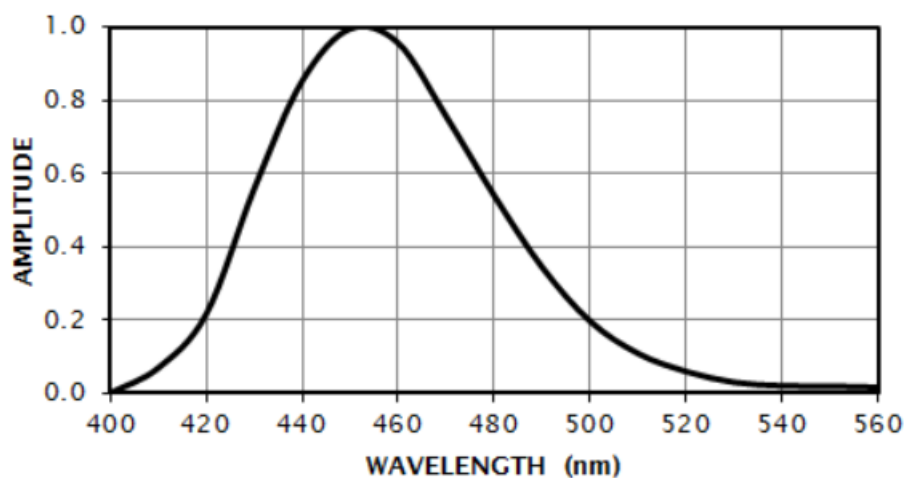
Εικόνα 3.2: Φωτοπολλαπλασιαστής ονομαστικής διαμέτρου 2", εταιρείας κατασκευής ET Enterprises, τύπου 9250QKSB, 10 σταδίων, 14 επαφών

Ο φωτοπολλαπλασιαστής, ο οποίος διακρίνεται στην Εικόνα 3.2, ήταν συμβατός, τυποποιημένος, ονομαστικής διαμέτρου 2", εταιρείας κατασκευής ET Enterprises, τύπου 9250QKSB, S/N 5164, 10 σταδίων, 14 επαφών. Τα χαρακτηριστικά γράμματα "Q" και "B" στον τύπο σημαίνουν ότι ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι περισσότερο κατάλληλος για υπεριώδες φως. Στην Εικόνα 3.3 φαίνεται ο προενισχυτής συνδεδεμένος με τον φωτοπολλαπλασιαστή.

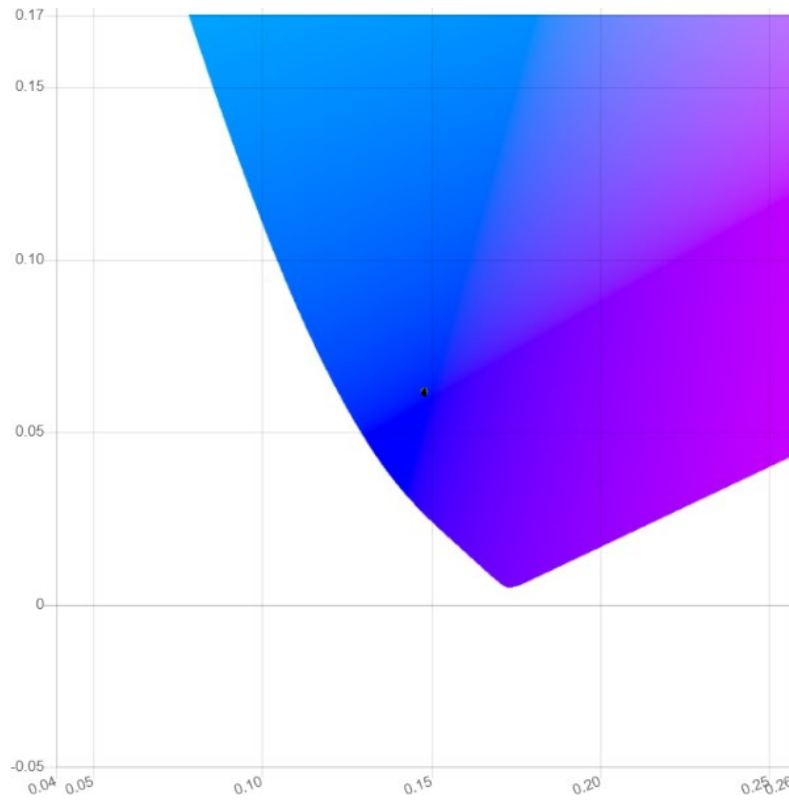


Εικόνα 3.3 Ο προενισχυτής συνδεδεμένος με τον φωτοπολλαπλασιαστή.

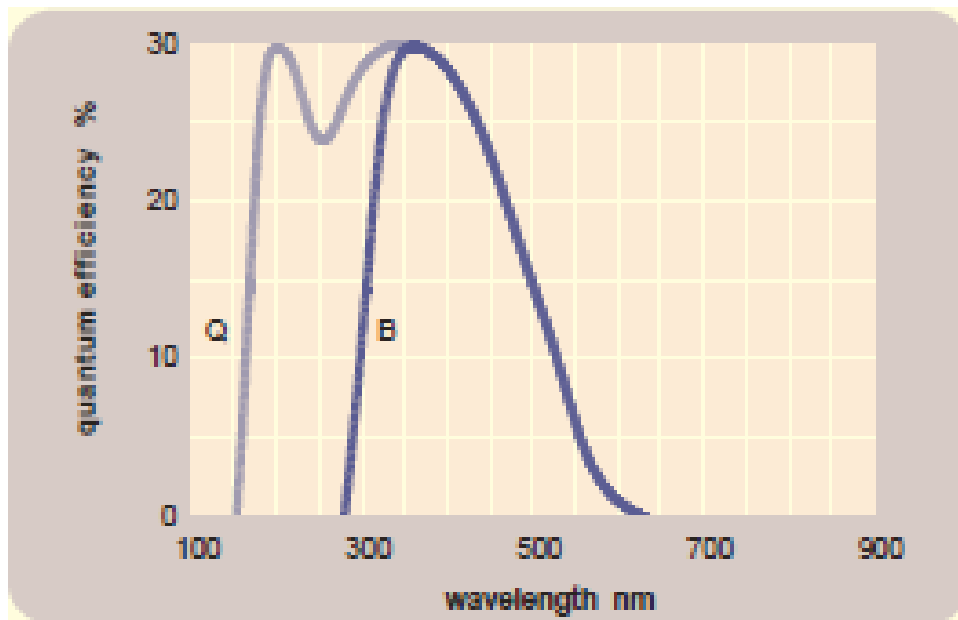
Εικόνες και περισσότερες πληροφορίες για τον προενισχυτή και τον φωτοπολλαπλασιαστή δίνονται στο Παράρτημα Α. Είναι σημαντικό στο σημείο αυτό να αναφερθεί ότι το πιθανότερο μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπει ο σπινθηριστής ZnS(Ag) μετά από μία αλληλεπίδραση με α σωματίδιο είναι 450 nm (κοντά στο μπλε υπεριώδες, βλ. Εικόνα 3.4 και Εικόνα 3.5 για Kelvin). Γίνεται φανερό με τη βοήθεια της Εικόνας 3.6 ότι ο φωτοπολλαπλασιαστής που έχει επιλεγθεί είναι απολύτως κατάλληλος για την ανίχνευση του υπόψη φωτός.



Εικόνα 3.4: Φάσμα εκπομπής φωτός από σπινθηριστή ZnS(Ag)
(βλ. <https://eljentechnology.com>)



Εικόνα 3.5: CIE συντεταγμένες θερμοκρασίας εκπεμπόμενου φωτός $x = 0.148$, $y = 0.062$ (ή υπεριώδες στους 1840 K) από σπινθηριστή ZnS(Ag). Προκύπτει (μαύρο σημείο) ότι το εκπεμπόμενο χρώμα φωτός είναι στην περιοχή του μπλε υπεριώδους (από το <https://waveformlighting.com>).



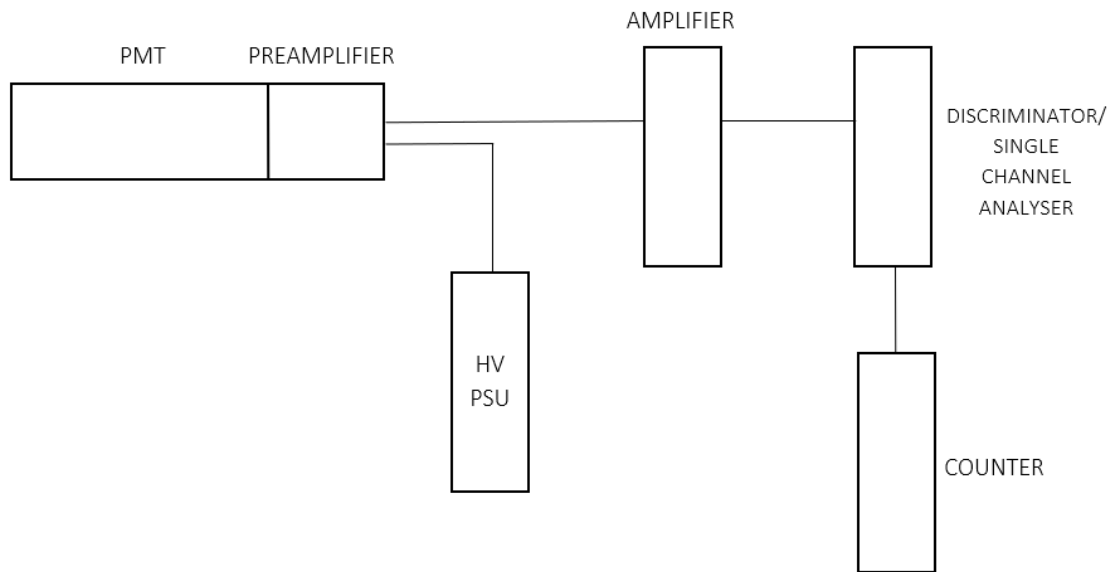
Εικόνα 3.6: Απόκριση φωτοπολλαπλασιαστή στο προσπίπτον φως. Η μέγιστη απόκριση βρίσκεται πολύ κοντά στο πιθανότερο μήκος κύματος φωτός από σπινθηριστή ZnS(Ag) (βλ. <https://et-enterprises.com>)

3.4 Απαραίτητα πυρηνικά ηλεκτρονικά

3.4.1 Γενικά

Για την παραλαβή και την εκμετάλλευση του ασθενούς ηλεκτρικού σήματος παλμών από τον φωτοπολλαπλασιαστή (PMT), απαιτείται ασφαλώς ο διαιρέτης τάσης και ο προενισχυτής (preamplifier), όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Ο προενισχυτής είναι το ηλεκτρονικό κύκλωμα που παρεμβάλλεται μεταξύ ανιχνευτή και ενισχυτή. Ρόλος του είναι να ενισχύσει και να διαμορφώνει το σήμα παλμών εξόδου του φωτοπολλαπλασιαστή που έχει τάξη μεγέθους 10^{-9} V, στην περιοχή τάσεων από 10^{-6} έως 10^{-3} V, πριν αυτό οδηγηθεί στον ενισχυτή παλμών (amplifier). Ο προενισχυτής με το διαιρέτη τάσης λειτουργούν συνήθως ενσωματωμένοι με τον φωτοπολλαπλασιαστή για να μειώνεται ο ηλεκτρονικός θόρυβος, ο οποίος μπορεί να υπερκαλύψει το σήμα από τον φωτοπολλαπλασιαστή. Μέσω του προενισχυτή γίνεται και η τροφοδοσία του φωτοπολλαπλασιαστή με την κατάλληλη υψηλή τάση από κατάλληλη μονάδα τροφοδοτικού (HV PSU). Ένας ηλεκτρικός παλμός τάσης από τον φωτοπολλαπλασιαστή, προενισχύεται στον προενισχυτή και για καλύτερη εκμετάλλευση οδηγείται σε ενισχυτή παλμών, στην έξοδο του οποίου έχει πάρει τη μορφή ενισχυμένου παλμού με ύψος μέχρι 10 V. Το κέρδος ενίσχυσης ρυθμίζεται ανάλογα με το ύψος του αρχικού σήματος ώστε, όσο είναι δυνατό, το ύψος του παλμού που προκύπτει να είναι ανάλογο με την ενέργεια της ανιχνευόμενης ακτινοβολίας και να αποφεύγονται οι κορεσμένοι παλμοί, αυτοί δηλαδή των οποίων το μέγιστο ύψος ξεπερνά τα 10 V. Αν προκύπτουν από την ενίσχυση κορεσμένοι παλμοί, τότε και αυτοί οδηγούνται στην έξοδο του ενισχυτή αλλά με μέγιστο ύψος 10 V. Κάθε παλμός που εξέρχεται ενισχυμένος από τον ενισχυτή, οδηγείται σε έναν διαχωριστή (discriminator), ο οποίος τον κατατάσσει σε θόρυβο (παλμός πολύ χαμηλού ύψους) ή σε γεγονός (νόμιμος παλμός που αντιστοιχεί σε πραγματική αλληλεπίδραση ιοντίζουσας ακτινοβολίας με τον ανιχνευτή). Η ρύθμιση των ορίων "νομιμότητας" παλμού γίνεται από το κατώτερο επίπεδο διαχωρισμού ή κατώφλι (στα αγγλικά Low Level ή Threshold σε V) και το παράθυρο (ή Window σε V). Νόμιμος είναι ένας παλμός ύψους ίσου ή μεγαλύτερου από το Lower Level και ίσου ή μικρότερου από το Window. Παλμοί ύψους μικρότερου από το Lower Level απορρίπτονται ως θόρυβος. Για κάθε νόμιμο παλμό ο διαχωριστής παράγει έναν λογικό παλμό TTL. Ένας λογικός παλμός είναι θετικός, τετραγωνικός, με μικρή διάρκεια της τάξης των μs και σταθερό ύψος, συνήθως ίσο με 3.3 V ή λίγο μεγαλύτερο. Κάθε λογικός παλμός οδηγείται στον καταμετρητή (counter) όπου καταγράφεται σε έναν καταχωρητή (αθροιστή) Ο χρόνος που πρόκειται να διαρκέσει η καταγραφή επιλέγεται από τον χρήστη. Ο αριθμός των λογικών παλμών που καταγράφονται

διά του χρόνου που διήρκεσε η καταγραφή δίνει το πλήθος των ανιχνευόμενων αλληλεπιδράσεων με ιοντίζουσα ακτινοβολία στη μονάδα του χρόνου. Η συγκρότηση αυτής της ακολουθίας συσκευών δίνεται στην Εικόνα 3.7. Σημειώνεται ότι οι συσκευές "amplifier", "discriminator" και "counter", πρέπει να τοποθετούνται σε μονάδα NIM BIN προκειμένου να τροφοδοτούνται με τις κατάλληλες συνεχείς τάσεις για την ορθή λειτουργία τους. Περισσότερα για τις μονάδες NIM BIN θα αναφερθούν στη συνέχεια.

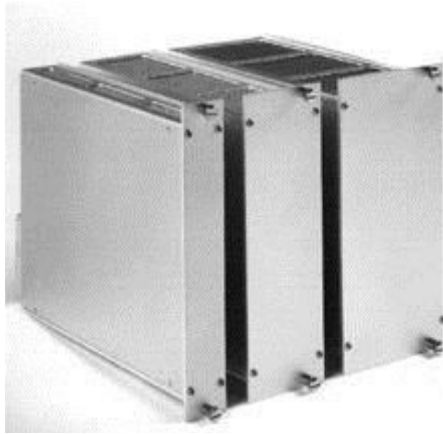


Εικόνα 3.7: Ακολουθία απαραίτητων πυρηνικών ηλεκτρονικών για την παραλαβή και την εκμετάλλευση σήματος παλμών από φωτοπολλαπλασιαστή

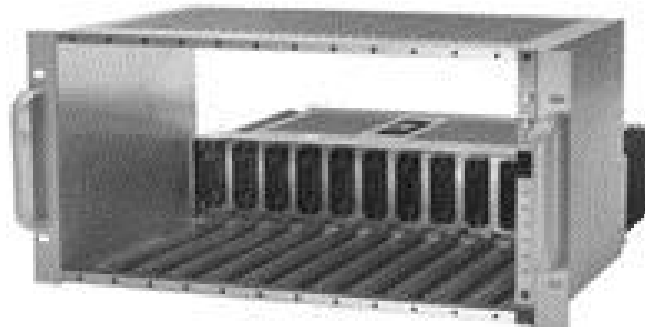
3.4.2 Μονάδα NIM BIN και τροφοδοσία τάσεων

Οι τυποποιημένες (κατά DOE/ER-0457/1964) μονάδες υποδοχής και τροφοδοσίας των μονάδων πυρηνικών ηλεκτρονικών γεωμετρίας NIM (Nuclear Instrument Modules), έχει επικρατήσει να ονομάζονται "δοχεία" NIM (στα αγγλικά NIM BIN ή NIM CRATE). Φωτογραφίες από γεωμετρίες τέτοιων μονάδων πυρηνικών ηλεκτρονικών διακρίνονται στην Εικόνα 3.8. Οι μονάδες NIM BIN, διαθέτουν συνήθως ενσωματωμένο τροφοδοτικό, το οποίο έχει τη δυνατότητα να τροφοδοτεί τις μονάδες NIM που τοποθετούνται στις υποδοχές της με +24, -24, +12 και -12 V τα οποία καταλήγουν σε κατάλληλο backplane. Κατά τη νεότερη τυποποίηση DOE/ER-0457T/1990, το τροφοδοτικό των NIM BIN απέκτησε τη δυνατότητα να τροφοδοτεί τις μονάδες NIM με επιπλέον +6 και -6 V πάλι από το backplane. Στην Εικόνα 3.9 διακρίνεται η γενική μορφή μιας μονάδας NIM BIN με το τροφοδοτικό της και το backplane. Οι μονάδες NIM BIN που έχουν ενσωματωμένο τροφοδοτικό ονομάζονται τύπου "master". Εκτός από τις μονάδες NIM BIN με αυτή τη γενική μορφή master υπάρχουν και

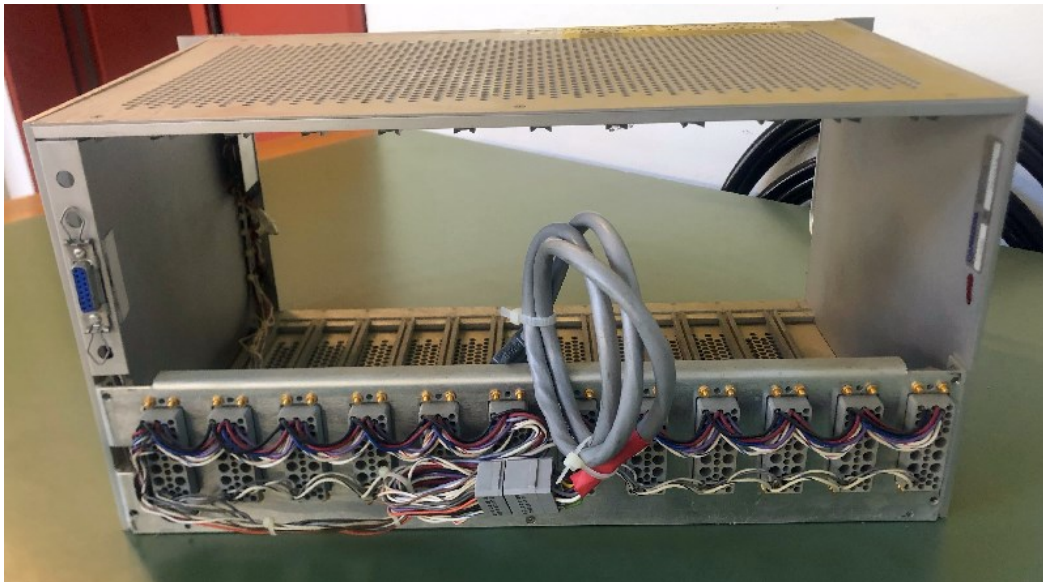
αυτές που δεν έχουν τροφοδοτικό αλλά μόνο backplane. Η NIM BIN αυτού του τύπου ονομάζεται "slave" και διακρίνεται στην Εικόνα 3.10. Η τροφοδοσία μιας τέτοιας NIM BIN με +24, -24, +12, -12, +6 και -6 V γίνεται από NIM BIN master με κατάλληλο καλώδιο. Εναλλακτικά, μπορεί σε μία NIM BIN slave να τοποθετηθεί τροφοδοτικό με γεωμετρία NIM, το οποίο να παρέχει στο backplane τις αναγκαίες τάσεις. Στη ΔΕ επιλέχθηκε μία μονάδα NIM BIN τύπου slave, που ήταν διαθέσιμη για χρήση. Η μονάδα αυτή ήταν εταιρείας κατασκευής CANBERRA, τύπου 2000A, S/N 1277801.



Εικόνα 3.8: Τυποποιημένα μεταλλικά ηλεκτροστατικά κουτιά NIM.
Από αριστερά: πλάτους 1U, πλάτους 2U και πλάτους 3U (1U \approx 4 cm)



Εικόνα 3.9: Μονάδα NIM BIN τύπου master (CANBERRA, Model 2000 / 2100).
Διακρίνεται το backplane υποδοχής και συνδέσεων και το τροφοδοτικό στο πίσω μέρος.



Εικόνα 3.10: Μονάδα NIM BIN τύπου slave. Πάνω: Εμπρόσθια όψη. Κάτω: Πίσω όψη. Στην πίσω όψη διακρίνεται το καλώδιο τροφοδοσίας τάσεων από NIM BIN τύπου master

Για την τροφοδοσία της τοποθετήθηκε τροφοδοτικό γεωμετρίας NIM με πλάτος 3U, εταιρείας κατασκευής WIENER, τύπου UEP-15, S/N 0893004, το οποίο διακρίνεται στην Εικόνα 3.11. Περισσότερα για αυτό το τροφοδοτικό μπορεί να δει κάποιος στο Παράρτημα.



Εικόνα 3.11: Τροφοδοτικό γεωμετρίας NIM εταιρείας κατασκευής WIENER, τύπου UEP-15, για τροφοδοσία μονάδας NIM BIN τύπου slave. Αριστερά: Εμπρόσθια όψη. Δεξιά: Πίσω όψη

3.4.3 Τροφοδοτικό υψηλής τάσης

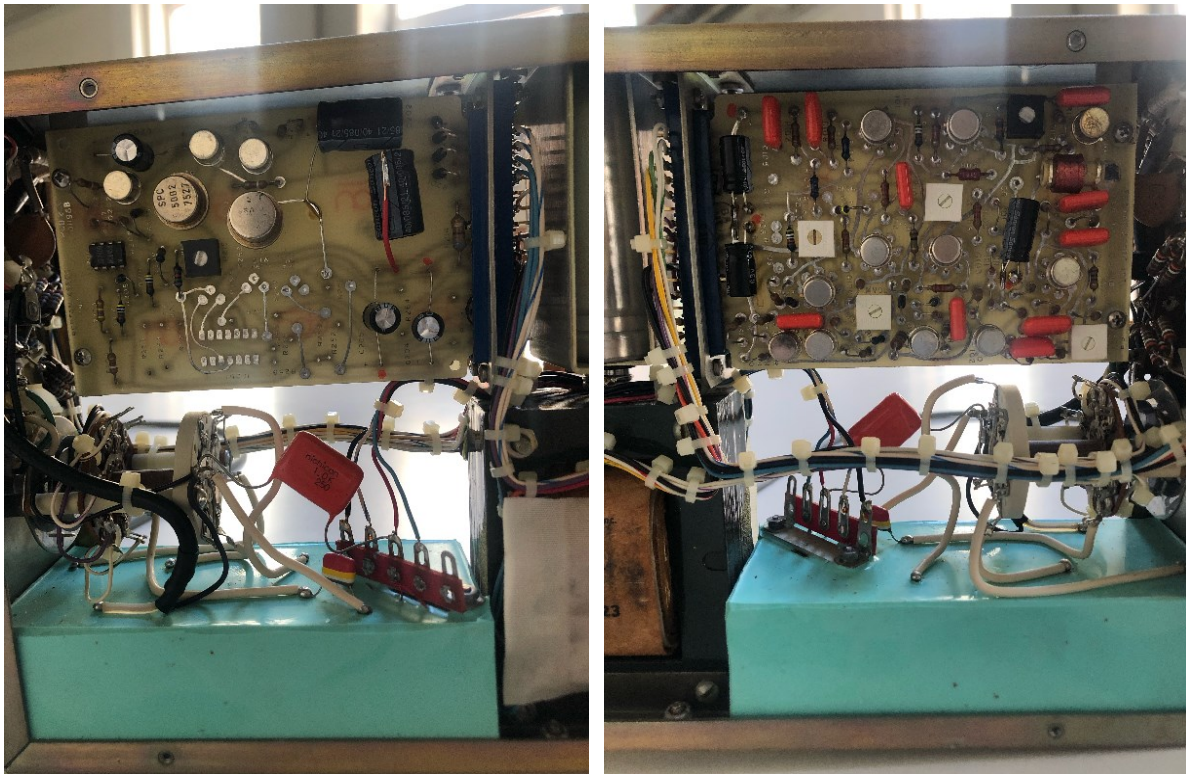
Το τροφοδοτικό υψηλής συνεχούς τάσης χρειάζεται για την τροφοδοσία του συστήματος διαίρετη και φωτοπολλαπλασιαστή με την κατάλληλη υψηλή τάση. Ως τροφοδοτικό επιλέχθηκε το εταιρείας κατασκευής CANBERRA, τύπου 3002, S/N 1175880 γεωμετρίας NIM με πλάτος 2U. Το τροφοδοτικό αυτό είναι σχεδιασμένο ακριβώς για να παρέχει κατάλληλη υψηλή τάση σε μια ποικιλία ανιχνευτών ιοντιζουσών ακτινοβολιών και ιδιαίτερα σε φωτοπολλαπλασιαστές, με έμφαση σε φωτοπολλαπλασιαστές που συνδέονται με κρυστάλλους NaI για την ανίχνευση και τη μέτρηση φωτονίων. Το τροφοδοτικό αυτού του τύπου έχει τη δυνατότητα ρύθμισης της πολικότητας της υψηλής τάσης στην έξοδο. Επίσης δεν χρειάζεται να τοποθετηθεί σε NIM BIN για να λειτουργήσει διότι τροφοδοτείται απευθείας και ξεχωριστά με εναλλασσόμενο ρεύμα 220 V. Παρόλα αυτά η κατασκευή του είναι έτσι (2U), ώστε, αν χρειάζεται, για λόγους ευκολίας και οργάνωσης, να μπορεί να τοποθετηθεί σε NIM BIN. Το συγκεκριμένο τροφοδοτικό, με αυτόν τον σειριακό αριθμό, επιλέχθηκε διότι ήταν διαθέσιμο προς χρήση. Περισσότερες πληροφορίες για αυτό το

τροφοδοτικό υπάρχουν στο Παράρτημα. Προτού χρησιμοποιηθεί το τροφοδοτικό, δοκιμάστηκε αν παράγει υψηλή τάση. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το High Impedance Probe του ΕΠΤ-ΕΜΠ σε συνδυασμό με κατάλληλο ψηφιακό πολύμετρο όπως διακρίνεται στην Εικόνα 3.12



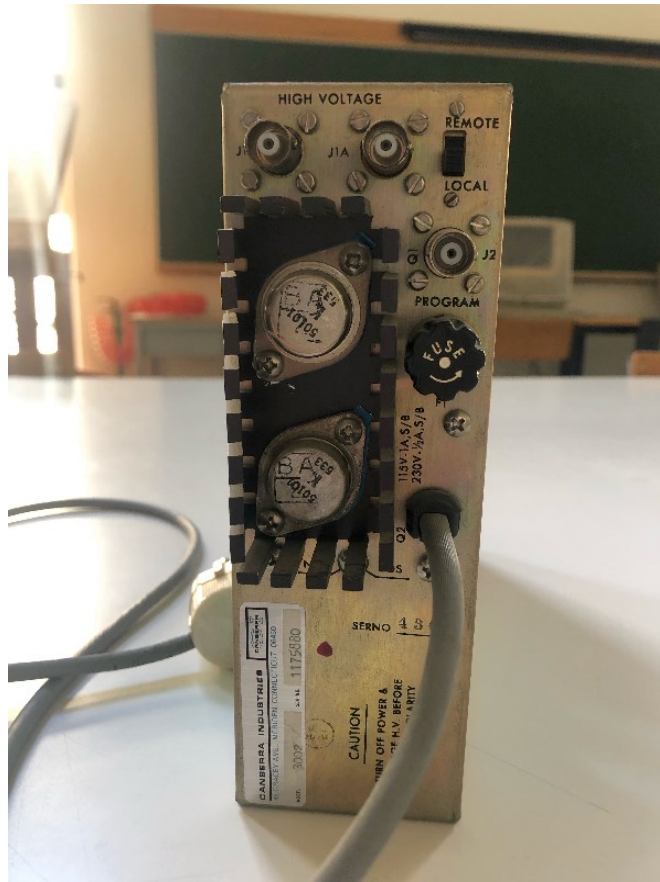
Εικόνα 3.12: Έλεγχος παραγόμενης υψηλής τάσης από το τροφοδοτικό CANBERRA τύπου 3002. Χρησιμοποιείται High Impedance Probe και απλό πολύμετρο.

Με το High Impedance Probe, μία ρύθμιση υψηλής τάσης στα π.χ. 700 V μετράται ως 0.7 σε ένα πολύμετρο εταιρείας κατασκευής Fluke τύπου 77. Η μέτρηση με το High Impedance Probe έδειξε ότι το τροφοδοτικό δεν λειτουργεί σωστά και για αυτό χρειάστηκε η επισκευή του από τον ηλεκτρονικό που συνεργάζεται το ΕΠΤ-ΕΜΠ, τον κ. Α. Πετρόπουλο (www.eastelectronics.gr, info@eastelectronics.gr). Ο κ. Α. Πετρόπουλος επισκεύασε και συντήρησε το τυπωμένο κύκλωμα παραγωγής υψηλής τάσης του τροφοδοτικού, αλλάζοντας ορισμένους πυκνωτές και αντιστάσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.13 και στη συνέχεια ρύθμισε την έξοδο υψηλής τάσης στην ορθή τιμή.



Εικόνα 3.13: Επισκευή κυκλωμάτων παραγωγής υψηλής τάσης σε τροφοδοτικό CANBERRA τύπου 3002. Διακρίνονται νέοι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές με μαύρο χρώμα.

Το υπόψη τροφοδοτικό έχει και μία άλλη ιδιαιτερότητα: όταν αγοράστηκε και ήρθε στο ΕΠΤ-ΕΜΠ στο τέλος δεκαετίας του '70, οι εξοδοί του για την υψηλή τάση, μετατράπηκαν από θηλυκά BNC αμερικάνικου τύπου σε θηλυκά BNC βρετανικού τύπου, διότι την εποχή εκείνη το ΕΠΤ-ΕΜΠ διέθετε κυρίως φωτοπολλαπλασιαστές με εισόδους υψηλής τάσης αρσενικά BNC βρετανικού τύπου και καλώδια σύνδεσης υψηλής τάσης με αρσενικά βύσματα BNC βρετανικού τύπου (βλ. Πετρόπουλος, 1986 και Εικόνα 3.14). Αυτή η ιδιαιτερότητα δημιουργεί τη δυσκολία ότι το τροφοδοτικό αυτό δεν μπορεί να συνεργασθεί για να δώσει υψηλή τάση σε διατάξεις που έχουν βύσμα εισόδου υψηλής τάσης αρσενικό BNC αμερικάνικου τύπου (όπως ο φωτοπολλαπλασιαστής ET Enterprises, τύπου 9250QKSB που περιγράφηκε σε προηγούμενη ενότητα). Για να ξεπερασθεί αυτό κατασκευάστηκε ειδικό καλώδιο υψηλής τάσης "ΑΡΣ BNC βρετανικού τύπου ↔ ΘΗΛ BNC αμερικανικού τύπου" (βλ. και Εικόνα 3.15)



Εικόνα 3.14: Έξοδοι υψηλής τάσης μορφής θηλυκών BNC βρετανικού τύπου στο τροφοδοτικό CANBERRA τύπου 3002 με S/N 1175880 (μετατροπή από αμερικάνικου τύπου στο ΕΠΤ-ΕΜΠ)



Εικόνα 3.15: Ειδικό καλώδιο υψηλής τάσης "ΑΡΣ BNC βρετανικού τύπου ↔ ΘΗΛ BNC αμερικάνικου τύπου". Κέντρο - Αριστερά: Βύσμα ΑΡΣ BNC βρετανικού τύπου. Δεξιά: Βύσμα ΘΗΛ BNC αμερικάνικου τύπου

3.4.4 Άλλα πυρηνικά ηλεκτρονικά

Ενισχυτής

Χρησιμοποιήθηκε ενισχυτής γεωμετρίας NIM (1U), εταιρείας κατασκευής CANBERRA, τύπου 2026X-2, SN 13000003. Ο ενισχυτής αυτός έχει τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά με τον CANBERRA 2026, αλλά οι ρυθμίσεις του σε ό,τι αφορά στο shaping time είναι 1, 2, 4, 8, 12 και 24 μ s έναντι των 0.5, 1, 2, 4, 6 και 12 του 2026. Περισσότερα για αυτόν τον ενισχυτή και σχετική εικόνα μπορεί να δει κάποιος στο Παράρτημα.

Διαχωριστής

Χρησιμοποιήθηκε διαχωριστής γεωμετρίας NIM (1U) εταιρείας κατασκευής CANBERRA, τύπου SCA 2030, SN 13000086. Περισσότερα για αυτόν τον διαχωριστή και σχετική εικόνα μπορεί να δει κάποιος στο Παράρτημα.

Καταμετρητής

Ο καταμετρητής/χρονόμετρο (ή στα αγγλικά Dual Counter/Timer) που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας ΔΕ είναι της εταιρείας CANBERRA, τύπου 512, S/N 13000110, γεωμετρίας NIM με πλάτος 2U. Ο καταμετρητής τύπου 512 διαθέτει δύο οθόνες καταγραφής μετρήσεων χρόνου ή παλμών, οκτώ (8) σημαντικών ψηφίων. Περισσότερα για αυτόν τον καταμετρητή και σχετική εικόνα μπορεί να δει κάποιος στο Παράρτημα.

3.5 Παλμογράφος

Για την ορθή ρύθμιση της κατάλληλης τάσεως στον φωτοπολλαπλασιαστή, την ορθή ρύθμιση του κέρδους και του shaping time στον ενισχυτή, την ρύθμιση του επιπέδου θορύβου (Lower Level) στον διαχωριστή, την αναγνώριση των παλμών που οφείλονται στις αλληλεπιδράσεις - α σωματιδίων με τον σπινθηριστή και την παρατήρηση τυχόν κορεσμένων παλμών, απαιτείται να χρησιμοποιηθεί παλμογράφος.

Μία από τις εξόδους UNI (δηλαδή Unipolar) του ενισχυτή συνδέθηκε με κατάλληλο παλμογράφο. Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο ψηφιακός PICOSCOPE 3424 της εταιρείας κατασκευής PICOTECH (www.picotech.com), ο οποίος διακρίνεται στην Εικόνα 3.16. Ο παλμογράφος για να λειτουργήσει απαιτείται σύνδεση USB με H/Y τύπου PC και κατάλληλο λογισμικό. Η σύνδεση USB χρησιμοποιείται, τόσο για την παραλαβή του σήματος από τον παλμογράφο, όσο και για την τροφοδοσία του με συνεχή τάση 5V. Το λογισμικό που χρειάζεται είναι το "Picoscope 6 PC Oscilloscope Software Version 6.11.12.1692". Τόσο ο παλμογράφος αυτός όσο και το λογισμικό του είναι παλαιότεροι τύποι που δεν είναι πλέον

διαθέσιμοι στην αγορά. Επιπλέον το λογισμικό είναι αρκετά παλαιό και δεν μπορεί να εγκατασταθεί σε Λειτουργικό Σύστημα νεότερο από MS Windows XP Pro 32 bit.

Επομένως, για την εξυπηρέτηση του λογισμικού και του παλμογράφου, εγκαταστάθηκε Λειτουργικό Σύστημα MS Windows XP Pro 32 bit SP4 (το SP4 είναι το ανεπίσημο τελευταίο Service Pack για αυτό το Λειτουργικό Σύστημα, διαθέσιμο από https://www.majorgeeks.com/files/details/windows_xp_service_pack_4_unofficial.html) σε έναν παλαιό φορητό Η/Υ τύπου HP Pavillion zv5000. Για να αποφευχθεί η ενεργοποίηση του Λειτουργικού Συστήματος χρησιμοποιήθηκε κατάλληλος κωδικός ενεργοποίησης από Volume License MS Windows XP Pro 32 bit, διαθέσιμος στο ΕΠΤ-ΕΜΠ.

Ένα πρόβλημα που συνήθως υπάρχει σε αυτούς τους ψηφιακούς παλμογράφους είναι ότι δεν έχουν ικανοποιητικά γρήγορη απόκριση. Αυτό, δεν είναι ενοχλητικό για την εφαρμογή που γίνεται σε αυτή τη ΔΕ, διότι οι παλμοί από τα -α σωματίδια που αλληλεπιδρούν με τον σπινθηριστή δεν είναι τόσοι πολλοί στη μονάδα του χρόνου ούτε έχουν πολύ μικρό πλάτος ώστε ο παλμογράφος να μην μπορεί να τους παρακολουθεί.

Ένα άλλο πρόβλημα που υπάρχει στους ψηφιακούς παλμογράφους με συνδεσιμότητα USB, είναι ότι τα 5V με τα οποία τροφοδοτούνται μέσω USB από τον Η/Υ δεν είναι αρκετά "καθαρά" από άποψη ηλεκτρονικού θορύβου. Αυτό έχει αποτέλεσμα ότι ο ηλεκτρονικός θόρυβος επιστρέφεται ως σήμα από τον παλμογράφο. Το πρόβλημα αυτό διαπιστώθηκε ότι υπήρχε και στον παλμογράφο PICOSCOPE 3424 σε συνδυασμό με τον παλαιό φορητό Η/Υ τύπου HP Pavillion zv5000. Για την αντιμετώπισή του, αγοράστηκε ένας USB to USB converter with 5 kV isolation της εταιρείας κατασκευής roline, με κόστος 33 ΕΥΡΩ. Ο μηχανισμός αυτός διακρίνεται στην Εικόνα 3.17.



Εικόνα 3.16: Ψηφιακός παλμογράφος PICOSCOPE 3424, τεσσάρων εισόδων A, B,C και D, συνδεσιμότητας USB



Εικόνα 3.17: USB to USB converter with 5 kV isolation της εταιρείας κατασκευής roline. Διάφορες όψεις και παρελκόμενα.

3.6 Σχόλια και συμπεράσματα

Προηγούμενα δόθηκε μια σύντομη περιγραφή για τα απαραίτητα υλικά και τον απαραίτητο εξοπλισμό πυρηνικών ηλεκτρονικών για την εφαρμογή της τεχνικής των δοχείων LC στο πλαίσιο της παρούσας ΔΕ. Στο Κεφάλαιο 5 θα αναφερθούν περισσότερες λεπτομέρειες για τη σύνδεση του εξοπλισμού σε μία ενιαία πειραματική διάταξη μετρήσεων και τις σχετικές αναγκαίες ρυθμίσεις. Στο επόμενο Κεφάλαιο 4, θα περιγραφούν οι ανιχνευτές Ραδονίου που κατασκευάστηκαν με βάση την τεχνική δοχείων LC και χρησιμοποιήθηκαν στη ΔΕ. Οι ανιχνευτές αυτοί πλησιάζουν το πρότυπο που δίνει ο George (1992), βλ. και στο Κεφάλαιο 2, παρά το δοχείο που προτείνει ο Lucas (1957).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΑΝΙΧΝΕΥΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΔΟΧΕΙΩΝ LUCAS CELL ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΟΤΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

4.1 Εισαγωγή

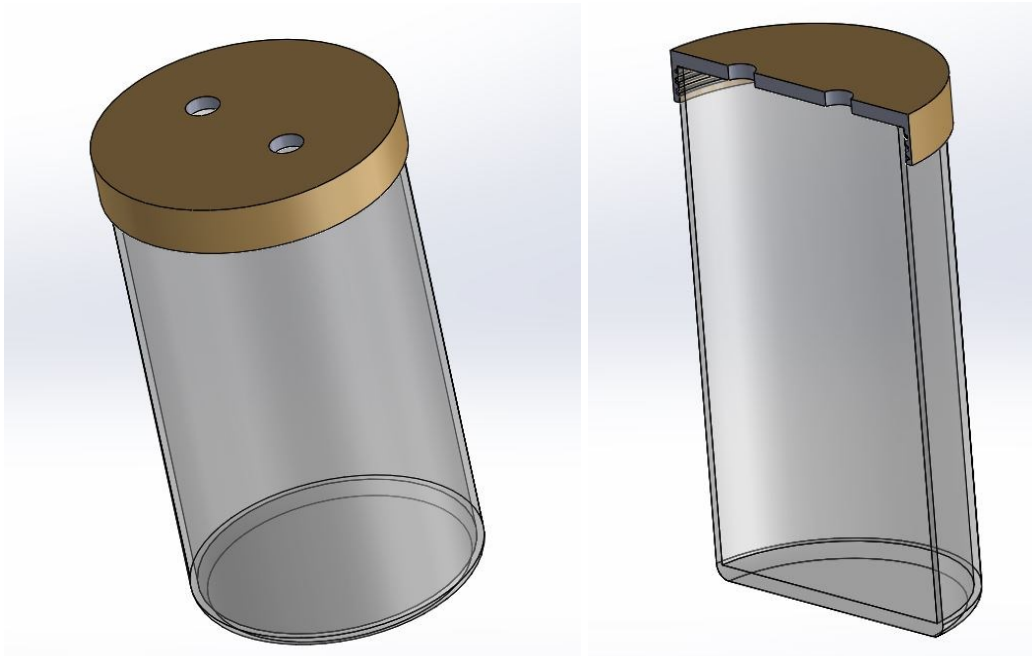
Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται ο τρόπος, με τον οποίο κατασκευάστηκαν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, στα πλαίσια της ΔΕ ένας αριθμός ανιχνευτών Ραδονίου με την τεχνική των δοχείων LC. Ο τρόπος κατασκευής είναι παρόμοιος με αυτόν που συστήνεται από τον George (1992) και παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Ως κατάλληλα δοχεία προτιμήθηκαν μεσαίου μεγέθους γυάλινα βάζα μαρμελάδας. Για την κατασκευή των ανιχνευτών χρησιμοποιήθηκαν δύο παραλλαγές "Α" και "Β". Κατά την παραλλαγή "Α" η τοποθέτηση της σκόνης ZnS(Ag) έγινε απευθείας στις εσωτερικές επιφάνειες των δοχείων με χρήση κατάλληλης κόλλας. Κατά την παραλλαγή "Β" προετοιμάστηκαν ορθογώνια παραλληλόγραμμα λεπτά φύλλα κατάλληλων διαστάσεων από διάφορα υλικά, στην μία επιφάνεια των οποίων τοποθετήθηκε σκόνη ZnS(Ag) με χρήση κατάλληλης κόλλας. Στα φύλλα αυτά στη συνέχεια δόθηκε κυλινδρικό σχήμα ώστε να εισέρθουν στα δοχεία με την πλευρά που ο σπινθηριστής βλέπει στον άξονα των δοχείων. Στη συνέχεια του Κεφαλαίου περιγράφεται η σφράγιση των δοχείων με το πώμα τους και πως τοποθετούνται τα ρακόρ για την είσοδο και έξοδο του αέρα, του οποίου χρειάζεται να μετρηθεί η συγκέντρωση σε Ραδόνιο. Κλείνοντας, περιγράφεται η συγκρότηση του συστήματος δοχείου LC - φωτοπολλαπλασιαστή - διαιρέτη τάσης - προενισχυτή σε φωτοστεγανή θήκη, όπως είναι απαραίτητο για να μην αλλοιώνεται το σήμα του φωτοπολλαπλασιαστή από άλλες πηγές φωτός και ασφαλώς για να μην καταστραφεί ο φωτοπολλαπλασιαστής από το ορατό φως.

4.2 Απαιτούμενα υλικά για την κατασκευή των δοχείων LC

Γυάλινο δοχείο

Σύμφωνα με τα όσα προτείνονται από τον Lucas (1957) και τον George (1992), το δοχείο LC μπορεί να είναι κυλινδρικό και να έχει τουλάχιστον ένα διαφανές ή διαφώτιστο τοίχωμα κατάλληλου εμβαδού, ώστε να μπορεί να συνεργάζεται με φωτοπολλαπλασιαστή. Παλαιότερες ενδείξεις αλλά και νεότερες έρευνες έχουν δείξει ότι τα δοχεία LC από οργανικά πολυμερή υλικά (πλαστικά, Plexiglass κλπ) απορροφούν Ραδόνιο, οπότε είναι ακατάλληλα για μετρήσεις διότι μειώνουν την απόδοση (βλ. π.χ. και Moere, 1997). Επομένως για την ΔΕ

επιλέχθηκαν γυάλινα δοχεία με μεταλλικό πώμα. Το επιθυμητό σχέδιο των δοχείων μπορεί να είναι αυτό των σκαριφημάτων Solidworks της Εικόνας 4.1. Διακρίνονται: το γυάλινο δοχείο, το μεταλλικό πώμα, οπές στο μεταλλικό πώμα μέσα από τις οποίες μπορεί να μεταγγίζεται ραδόνιο στο δοχείο.



Εικόνα 4.1: Σκαριφήματα Solidworks για γυάλινα δοχεία με μεταλλικό πώμα πιθανώς κατάλληλα για δοχεία τεχνικής LC

Με βάση αυτές τις σκέψεις ως κατάλληλα δοχεία προτιμήθηκαν, κυλινδρικά τυποποιημένα διαυγή γυάλινα βάζα μαρμελάδας, ονομαστικού ύψους ~125 mm, ονομαστικής εξωτερικής διαμέτρου ~57 mm και ονομαστικού όγκου 255 cm^3 , με μεταλλικό πώμα στη μία βάση. Τα δοχεία αγοράστηκαν με μαρμελάδα από supermarket. Η διάμετρος των δοχείων επιλέχθηκε ώστε η μέγιστη απόσταση από τον άξονα συμμετρίας προς την εσωτερική κυλινδρική επιφάνεια με τον σπινθηριστή να είναι μικρότερη από 4 cm. Αυτό έγινε διότι, όπως είναι γνωστό, η εμβέλεια των α σωματιδίων στον αέρα δεν είναι μεγαλύτερη από 4 cm, επειδή παρόλη την μεγάλη κινητική τους ενέργεια (στην περιοχή των ~5 MeV) η μάζα τους είναι επίσης μεγάλη και η ενέργειά τους χάνεται με αλληλεπιδράσεις στην ύλη. Μια απόσταση επομένως μικρότερη από 4 cm διευκολύνει την αλληλεπίδραση των α σωματιδίων με το ZnS(Ag). Από την άλλη το ύψος των δοχείων επιλέχθηκε στην περιοχή των 100 mm, ώστε τα δοχεία να χωρούν αρκετά μεγάλο όγκο αέρα με Ραδόνιο.

Σπινθηριστής

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρονται στο Κεφάλαιο 3, στην ενότητα 3.2. Για δοκιμές κατασκευής ανιχνευτών, ως υλικό προσομοίωσης του σπινθηριστή χρησιμοποιήθηκε σκόνη ζάχαρη "άχνη".

Αναλώσιμα

Βενζίνη καθαρισμού - Κόλλα σε σπρέι (UHU Spray adhesive permanent, 200 mL) - Αντικολλητικό χαρτί κουζίνας (λαδόκολλα) - Αλουμινόχαρτο - Ταινία διπλής όψεως - Μαύρη ηλεκτρολογική ταινία - Σιλικόνη (όχι ακρυλική) - Φύλλο αλουμινίου - Λεπτό διαφανές πλαστικό φύλλο βιβλιοδεσίας - Εξαρτήματα αέρος* (αυτόματα ρακόρ 6 mm, μούφες 6 mm, μαύρα πλαστικά σωληνάκια 6 mm, διαφανή πλαστικά σωληνάκια 6 mm, τρίοδοι βάνες 6 mm)

Μικροεργαλεία κουζίνας και χημείου

Λαβίδες, μικρό κόσκινο χειρός, κοχλιάρια

4.3 Ανιχνευτές κατά την παραλλαγή "Α"

Σειρά εργασίας

1. Καθαρισμός του γυάλινου δοχείου από το περιεχόμενο, αφαίρεση αυτοκόλλητων, πλύση εσωτερικά και εξωτερικά με βενζίνη καθαρισμού. Το αποτέλεσμα διακρίνεται στην Εικόνα 4.2
2. Επειδή δεν πρέπει να καλυφθεί ο πάτος του γυάλινου δοχείου με σκόνη σπινθηριστή ZnS(Ag), προστατεύτηκε εσωτερικά με χαρτί κυκλικής γεωμετρίας που κολλήθηκε με ταινία διπλής όψεως. Το πώς έγινε αυτό διακρίνεται στην Εικόνα 4.3.
3. Το δοχείο στερεώθηκε στο τσοκ μικρού επιτραπέζιου τόννου που διατίθεται στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ώστε η βάση με το άνοιγμα να είναι προσβάσιμη. Καθώς το δοχείο περιστρεφόταν με σχετικά αργή γωνιακή ταχύτητα, έγινε ο ψεκασμός των εσωτερικών του επιφανειών με κόλλα σε σπρέι. Η διαδικασία διακρίνεται στην Εικόνα 4.4.

* Η προμήθεια των εξαρτημάτων αέρα έγινε από την εταιρεία TECNOPNEUMATIC AE (www.tecnopneumatic.gr), Ιερά οδός 97, 1855Αθήνα, Τηλ: +30 210 34 67 000, με κόστος περίπου 90,00 ΕΥΡΩ

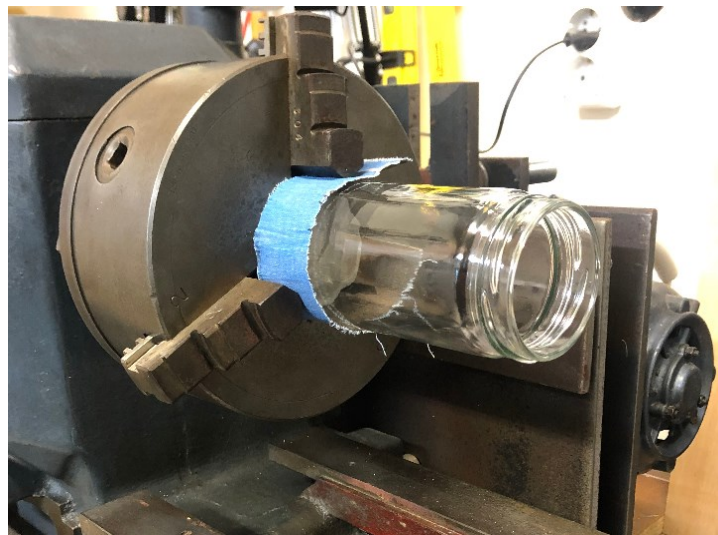


Εικόνα 4.2: Γυάλινο δοχείο με μεταλλικό πώμα κατάλληλο για δοχείο LC, το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη ΔΕ



Εικόνα 4.3: Κάλυψη της βάσης του δοχείου με χαρτί ώστε να μην καλυφθεί με κόλλα και σπινθηριστή και να παραμείνει διαφανές για την εύκολη μετάδοση του φωτός προς τον φωτοπολλαπλασιαστή. Αριστερά διακρίνεται και η ταινία διπλής όψης για τη στερέωση του χαρτιού.

4. Αναμονή για 2-3 λεπτά μέχρι να "τραβήξει" η κόλλα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε πολύ προσεκτικά μικρή ποσότητα σκόνης σπινθηριστή στο δοχείο (περίπου μισό κοχλιάριο του γλυκού). Σφραγίσθηκε το δοχείο με το πώμα και ανακινήθηκε έντονα ώστε όλη η εσωτερική του επιφάνεια να καλυφθεί όσο πιο ομοιόμορφα γίνεται με σκόνη. Άνοιγμα του πώματος και αφαίρεση της υπολειπόμενης σκόνης. Επιστροφή του υπολείμματος στο δοχείο της συσκευασίας της. Η διαδικασία διακρίνεται στην Εικόνα 4.5.
5. Αφαίρεση του χάρτινου καλύμματος από τη βάση του έτοιμου δοχείου ώστε να αποκαλυφθεί η διαφανής επιφάνεια καθαρή από κόλλα και σκόνη σπινθηριστή. (βλ. και Εικόνα 4.6)



Εικόνα 4.4: Ψεκάσμος των εσωτερικών τοιχωμάτων του δοχείου με κόλλα σε σπρέι. Πάνω: στερέωση στον τόρνο, Κάτω αριστερά: περιστροφή και ψεκάσμος, Κάτω δεξιά: τελικό αποτέλεσμα λεπτού στρώματος κόλλας.

Συνολικά κατασκευάστηκε ένας ανιχνευτής της παραλλαγής "Α". Η όλη διαδικασία 1 έως και 4 έγινε πρώτα με ζάχαρη άχνη ώστε με την προσομοίωση να αποφευχθούν λάθη και σπατάλη σκόνης σπινθηριστή. Επίσης το στάδιο 4 εξελίχθηκε σε τραπέζι καλυμμένο με λαδόκολλα. Στη λαδόκολλα συγκεντρώθηκε όλη η σκόνη σπινθηριστή που περίσσεψε. Το περίσσειμα επεστράφη στο δοχείο της συσκευασίας της σκόνης με τη βοήθεια της λαδόκολλας. Παρατηρήθηκε ότι η σκόνη του σπινθηριστή δεν αποκολλάται πολύ εύκολα από τη λαδόκολλα, οπότε αποφασίστηκε ότι άλλη φορά που θα χρειασθεί πρέπει να χρησιμοποιείται αλουμινόχαρτο.



Εικόνα 4.5: Επικόλληση σπινθηριστή στα εσωτερικά τοιχώματα του δοχείου. Πάνω αριστερά: ~2.5 mL σπινθηριστή. Πάνω δεξιά: ανακίνηση δοχείου. Κάτω αριστερά: Δοχείο συσκευασίας με σπινθηριστή, Κάτω δεξιά: τελικό αποτέλεσμα λεπτού στρώματος ομοιόμορφα κατανεμημένου σπινθηριστή.



Εικόνα 4.6: Διαφανής βάση του έτοιμου δοχείου LC μετά την αφαίρεση του κυκλικού χάρτινου καλύμματος.

4.4 Ανιχνευτές κατά την παραλλαγή "B"

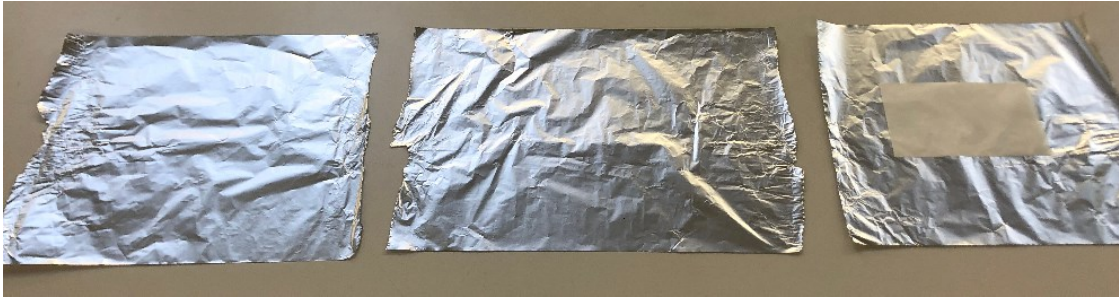
Σειρά εργασίας

1. Έγινε προσεγγιστική μέτρηση των διαστάσεων της εσωτερικής κυλινδρικής επιφάνειας του γυάλινου δοχείου οι οποίες βρέθηκαν περίπου 17×10 cm. Τα λεπτά ορθογώνια παραλληλόγραμμα φύλλα από διάφορα υλικά για την παραλλαγή "B" κόπηκαν σε αυτές τις διαστάσεις. Τα υλικά των φύλλων ήταν λαδόκολλα και διαφανές πλαστικό βιβλιοδεσίας. Στην Εικόνα 4.7 διακρίνεται ένα τέτοιο φύλλο από λαδόκολλα μαζί με κόλλα σε σπρέι και λαβίδες που θα χρειασθούν για τη συνέχεια.



Εικόνα 4.7: Φύλλο από λαδόκολλα 17×10 cm, κόλλα σε σπρέι, λαβίδες

2. Προετοιμασία επιφάνειας εργασίας: Τοποθέτηση τριών (σχετικά) μεγάλων φύλλων αλουμινόχαρτου (~0.25 m²), σε σειρά, το ένα δίπλα στο άλλο. Τα φύλλα αυτά θα εξυπηρετήσουν τα επόμενα βήματα (βλ. και Εικόνα 4.8).



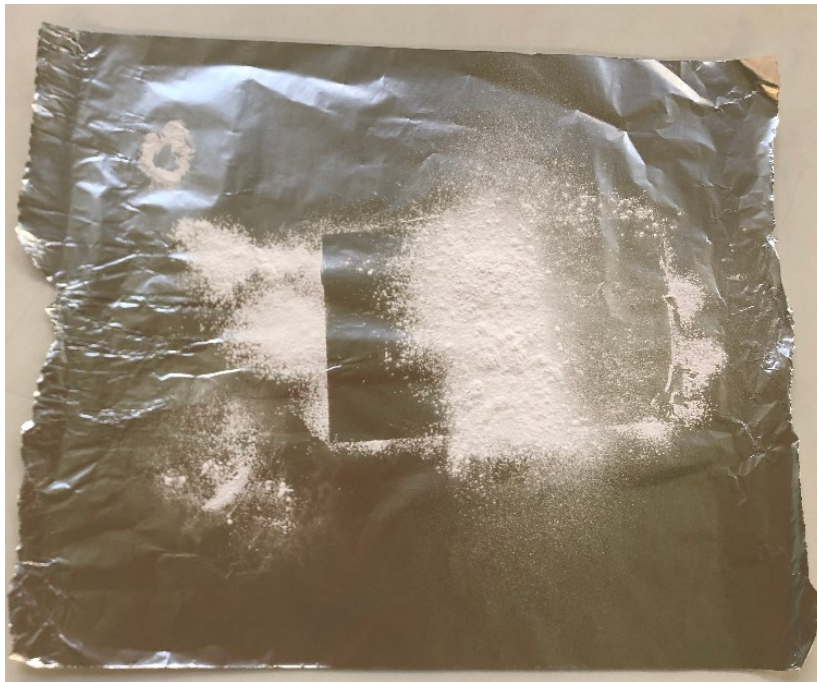
Εικόνα 4.8: Προετοιμασία επιφάνειας εργασίας:
Τοποθέτηση τριών διαδοχικών φύλλων αλουμινόχαρτου.

3. Τοποθέτηση ενός φύλλου διαστάσεων 17×10 cm στο πρώτο στη σειρά αλουμινόχαρτο (βλ. δεξιά στην Εικόνα 4.8). Ψεκάσμος φύλλου με κόλλα σπρέι, με οριζόντιες, συνεχείς και προσεκτικές κινήσεις, μέχρι να καλυφθεί όλη η επιφάνειά του από ένα λεπτό ομοιογενές στρώμα κόλλας. Ακολουθεί αναμονή 1 - 2 λεπτών για να "τραβήξει" η κόλλα.
4. Με τη βοήθεια των λαβίδων, κρατώντας το από τις άκρες του, το φύλλο μεταφέρεται στο δεύτερο αλουμινόχαρτο με την όψη με την κόλλα να βλέπει προς τα πάνω. Στο μικρό κόσκινο χειρός, τοποθετήθηκε μικρή ποσότητα σκόνης σπινθηριστή (~2.5 mL) με τη βοήθεια μικρού κοχλιαρίου. Με το κόσκινο η σκόνη διασκορπίστηκε πάνω στο φύλλο με την κόλλα. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε έως ότου να καλυφθεί όλη η επιφάνεια του φύλλου με λεπτή στρώση από σκόνη σπινθηριστή με όσο το δυνατό πιο ομοιογενή τρόπο. Μια ιδέα για τη διαδικασία δίνεται στην Εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9: Διαδικασία για το διασκορπισμό σκόνης σπινθηριστή σε φύλλο λαδόκολλας.

5. Αφού περάσουν 1-2 λεπτά, με τη βοήθεια πάλι των λαβίδων ανακινείται προσεκτικά το φύλλο με τη σκόνη πάνω από το αλουμινόχαρτο, ώστε να απομακρυνθεί από αυτό περίσσεια σκόνης που δεν έχει κολλήσει.
6. Το έτοιμο πλέον φύλλο μετακινείται στο τρίτο αλουμινόχαρτο. Η σκόνη που περίσσεψε και έπεσε στο δεύτερο αλουμινόχαρτο επανατοποθετείται στο δοχείο συσκευασίας της σκόνης σπινθηριστή ZnS(Ag). Για τη σκόνη σπινθηριστή που περίσσεψε βλ. και την Εικόνα 4.10



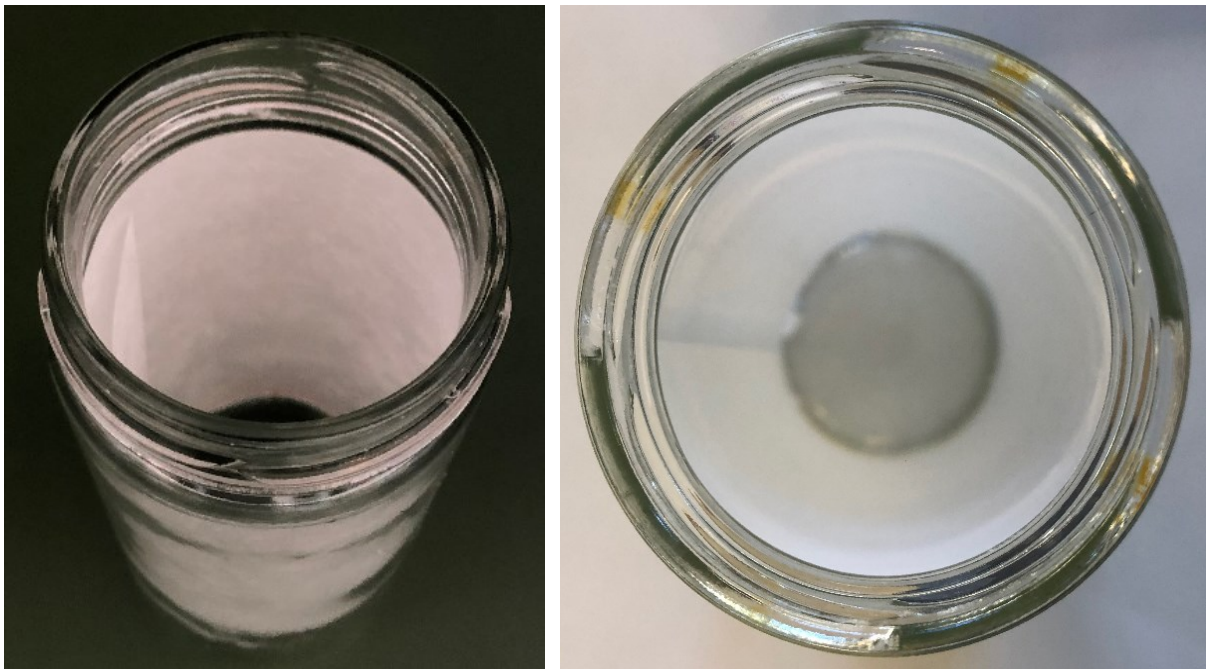
Εικόνα 4.10: Περίσσευμα σκόνης σπινθηριστή.

7. Το φύλλο αφήνεται να στεγνώσει για διάστημα 24 h. Στη συνέχεια ανακινείται προσεκτικά πάνω από το αλουμινόχαρτο, ώστε να απομακρυνθεί από αυτό και άλλη περίσσεια σκόνης που δεν έχει κολλήσει. Η σκόνη που περίσσεψε και έπεσε στο τρίτο αλουμινόχαρτο επανατοποθετείται στο δοχείο συσκευασίας της σκόνης σπινθηριστή ZnS(Ag).
8. Δίνεται στο φύλλο κυλινδρικό σχήμα και εισάγεται μέσα στο γυάλινο δοχείο με την επιφάνεια που φέρει τη σκόνη του σπινθηριστή να βλέπει τον άξονα του δοχείου. Το τελικό αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 4.11.

Συνολικά κατασκευάστηκαν δύο ανιχνευτές της παραλλαγής "B": Ένας με φύλλο από λαδόκολλα και ένας με πλαστικό φύλλο βιβλιοδεσίας. Η όλη διαδικασία 1 έως και 8 έγινε πρώτα με ζάχαρη άχνη ώστε με την προσομοίωση να αποφευχθούν λάθη και σπατάλη σκόνης

σπινθηριστή. Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας έγινε μια προσπάθεια να ζυγισθεί το φύλλο, στο οποίο κολλήθηκε ο σπινθηριστής για να βρεθεί πόση μάζα του σπινθηριστή χρησιμοποιήθηκε. Για το σκοπό αυτό ζυγίστηκε το φύλλο χωρίς την κόλλα, το φύλλο με την κόλλα και το φύλλο με την κόλλα και τον σπινθηριστή αλλά δεν ήταν δυνατό να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα, διότι η κόλλα εξατμιζόταν από τη στιγμή που τοποθετήθηκε μέχρι τη στιγμή που ζυγίστηκε στο φύλλο ή ξαναζυγίστηκε στο φύλλο με τη σκόνη. Εκτιμήθηκε πάντως ότι η σκόνη που χρησιμοποιήθηκε είναι μεταξύ 0.1 και 0.5 g.

Ως ανιχνευτές παραλλαγής "B" θεωρούνται και άλλοι τρεις που ετοιμάστηκαν χρησιμοποιώντας έτοιμα φύλλα με συγκολλημένη σκόνη σπινθηριστή, τα οποία αγοράστηκαν, όπως σημειώθηκε στο Κεφάλαιο 3, από τον G. Dowell στις Η.Π.Α.



Εικόνα 4.11: Τελικό αποτέλεσμα: δοχεία LC με φύλλα με σπινθηριστή

4.5 Σφράγιση δοχείων

Σειρά εργασίας

1. Προετοιμασία πώματος: Σε αντιδιαμετρικές θέσεις ανοίγονται 2 οπές 9.5 mm στο πώμα με τη βοήθεια του δραπάνου που διαθέτει το ΕΠΤ-ΕΜΠ. Το άνοιγμα τους έγινε σε δύο στάδια, ένα με τρυπάνι $\varnothing 5.5$ mm και ένα δεύτερο $\varnothing 9.5$ mm. Έπειτα οι οπές καθαρίστηκαν από τα γρέζια με έναν απλό γρεζοσπάστη.
2. Στις οπές αυτές τοποθετήθηκαν 2 αυτόματα ρακόρ αέρος διαμέτρου 6 mm, ώστε να βλέπουν στο εξωτερικό του πώματος. Τα ρακόρ στερεώθηκαν στο πώμα με μούφες

επίσης 6 mm που παίζουν το ρόλο του περικοχλίου. Η στεγανότητα των ρακόρ στο πώμα ελέγχθηκε με πίεση αέρος. Τα ρακόρ όπως είναι στερεωμένα στο πώμα φαίνονται στην Εικόνα 4.12.



Εικόνα 4.12 Πώμα με αυτόματα ρακόρ αέρα (αριστερά) στερεωμένα με μούφες 6 mm (δεξιά)

3. Για να επιτευχθεί στεγανότητα εφαρμόστηκε ένα λεπτό στρώμα σιλικόνης στο χείλος του γυάλινου δοχείου, βλ. αριστερά στην Εικόνα 4.13. Στη συνέχεια βιδώθηκε το πώμα καταλήγοντας στο δοχείο LC της Εικόνας 4.13 δεξιά.



Εικόνα 4.13: Αριστερά: γυάλινο δοχείο με σιλικόνη στο χείλος.
Δεξιά: Σφραγισμένο δοχείο LC

4. Για να επιτευχθεί φωτοστεγανότητα, απαραίτητη για την προστασία του συστήματος ανιχνευτή - φωτοπολλαπλασιαστή από άλλες πηγές φωτός εκτός του φωτός που παράγεται στον σπινθηριστή λόγω των αλληλεπιδράσεων με α σωματίδια προσαρμόσθηκε σε όλα τα δοχεία, περιφερειακά γύρω από την ένωση του πόματος με το δοχείο μαύρη ηλεκτρολογική ταινία. Η χρησιμότητα της μαύρης ταινίας θα εξηγηθεί σε επόμενη ενότητα. Στη συνέχεια τοποθετήθηκαν στα αυτόματα ρακόρ μαύρα πλαστικά σωληνάκια διαμέτρου 6 mm και μήκους περίπου 70 cm. Το αποτέλεσμα διακρίνεται στην Εικόνα 4.14.



Εικόνα 4.14: Τελική μορφή δοχείων LC του ΕΠΤ-ΕΜΠ

4.6 Σύνδεση δοχείου LC με PMT, διαίρετη τάσης και προενισχυτή

Τα εξαρτήματα που πρέπει να συνδεθούν διακρίνονται στην Εικόνα 4.15. Το συνολικό μήκος της διάταξης χωρίς το ενδιάμεσο κενό είναι ~ 35.3 cm.



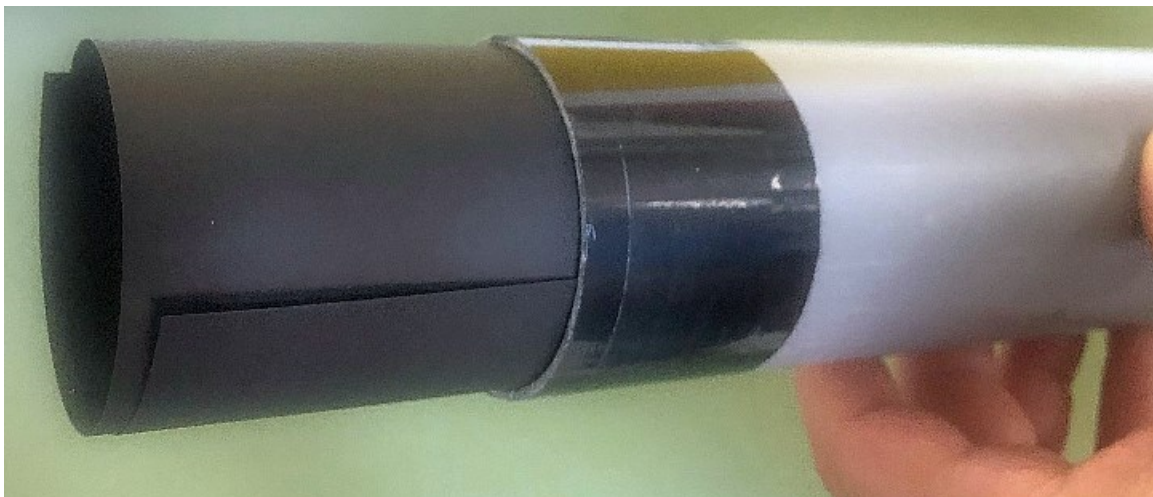
Εικόνα 4.15: Από αριστερά: Δοχείο LC, φωτοπολλαπλασιαστής και διαίρετης τάσης μαζί με προενισχυτή.

Για να λειτουργεί ορθά η διάταξη αυτή πρέπει να μην προσβάλλεται από εξωτερικό ορατό φως ή άλλο φως που δεν οφείλεται στις αλληλεπιδράσεις -α σωματιδίων με τον σπινθηριστή, σε καμία περίπτωση, επομένως πρέπει να γίνει φωτοστεγανή. Για το σκοπό αυτό συγκροτήθηκε φωτοστεγανή κυλινδρική θήκη, στην οποία τοποθετήθηκε η διάταξη με κατάλληλο τρόπο που εξηγείται στη συνέχεια. Το κύριο τμήμα της θήκης αποτελεί ένας σωλήνας PVC (αποχέτευσης) ονομαστικής εξωτερικής διαμέτρου 63 mm και μήκους ~29.5 cm, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.16. Το μήκος αυτό βρέθηκε κατάλληλο μετά από δοκιμές σε συνδυασμό και με τα υπόλοιπα απαραίτητα μέρη, όπως περιγράφονται παρακάτω.



Εικόνα 4.16: Σωλήνας PVC για τη φωτοστεγανοποίηση της διάταξης

Από την αριστερή βάση του σωλήνα εισέρχεται στην φωτοστεγανή θήκη το δοχείο LC. Η ονομαστική διάμετρος του δοχείου LC υπολείπεται λίγο από την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα PVC. Για να καλυφθεί το κενό αυτό αλλά και για λόγους φωτοστεγανότητας και αποφυγής αντανακλάσεων φωτός, χρησιμοποιήθηκε χαρτόνι A4 μαύρου χρώματος που τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του σωλήνα PVC, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.17.

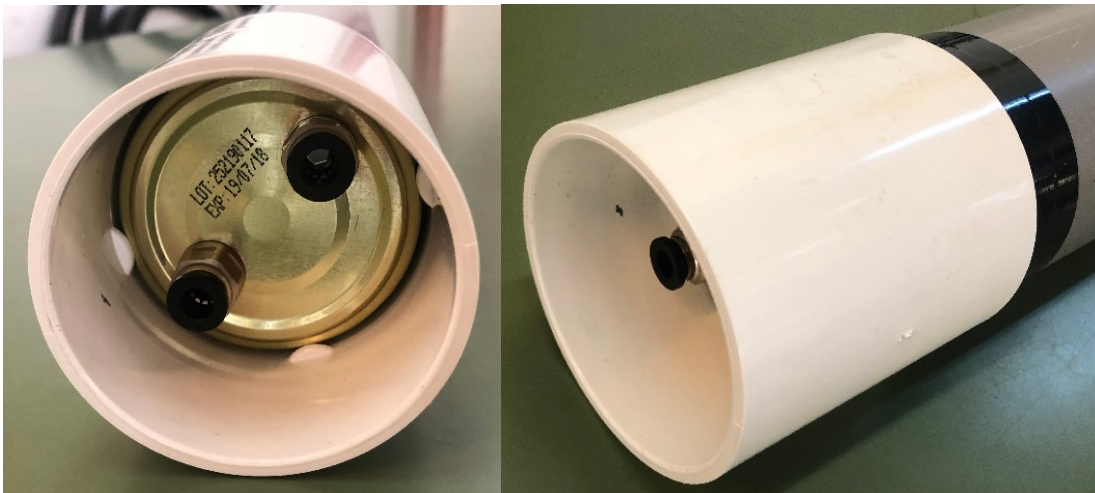


Εικόνα 4.17: Χαρτόνι A4 μαύρου χρώματος για φωτοστεγανότητα και καλή στερέωση του δοχείου LC



Εικόνα 4.18: Τοποθέτηση του δοχείου LC στο σωλήνα PVC

Το δοχείο LC εισέρχεται στο σωλήνα PVC όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.18. Στην τελική του θέση το χείλος του σωλήνα PVC έρχεται σε επαφή με το μαύρο παρέμβυσμα από λάστιχο που διακρίνεται γύρω από το πώμα του δοχείου LC. Το παρέμβυσμα έχει διαστάσεις $\text{Ø}55 \times \text{Ø}45 \times 2 \text{ mm}$. Ο ρόλος της μαύρης ηλεκτρολογικής ταινίας που έχει τοποθετηθεί γύρω από το πώμα είναι να βοηθήσει στη διασφάλιση της φωτοστεγανότητας και της σταθερότητας του δοχείου LC μέσα στο σωλήνα PVC. Όταν το δοχείο LC βρεθεί στην τελική του θέση σταθεροποιείται εκεί με μία μούφα PVC $\text{Ø}63 \text{ mm}$ (βλ. και Εικόνα 4.19). Η μούφα πρέπει να αφαιρείται εύκολα αλλά και να είναι αρκετά σταθερή στη θέση της. Για το σκοπό αυτό η μούφα τοποθετείται στη θήκη με σφιχτή προσαρμογή. Η σφιχτή προσαρμογή εξασφαλίσθηκε με μία - δύο στρώσεις μαύρης ταινίας συσκευασίας. Η μαύρη αυτή ταινία διακρίνεται στα δύο άκρα του σωλήνα PVC, σε πολλές εικόνες ξεκινώντας από την 4.16. Εννοείται ότι αυτές οι διευθετήσεις υιοθετήθηκαν μετά από αρκετές δοκιμές.



Εικόνα 4.19: Το δοχείο LC στην ασφαλή (φωτοστεγανή) του τελική θέση στο ένα άκρο του σωλήνα PVC

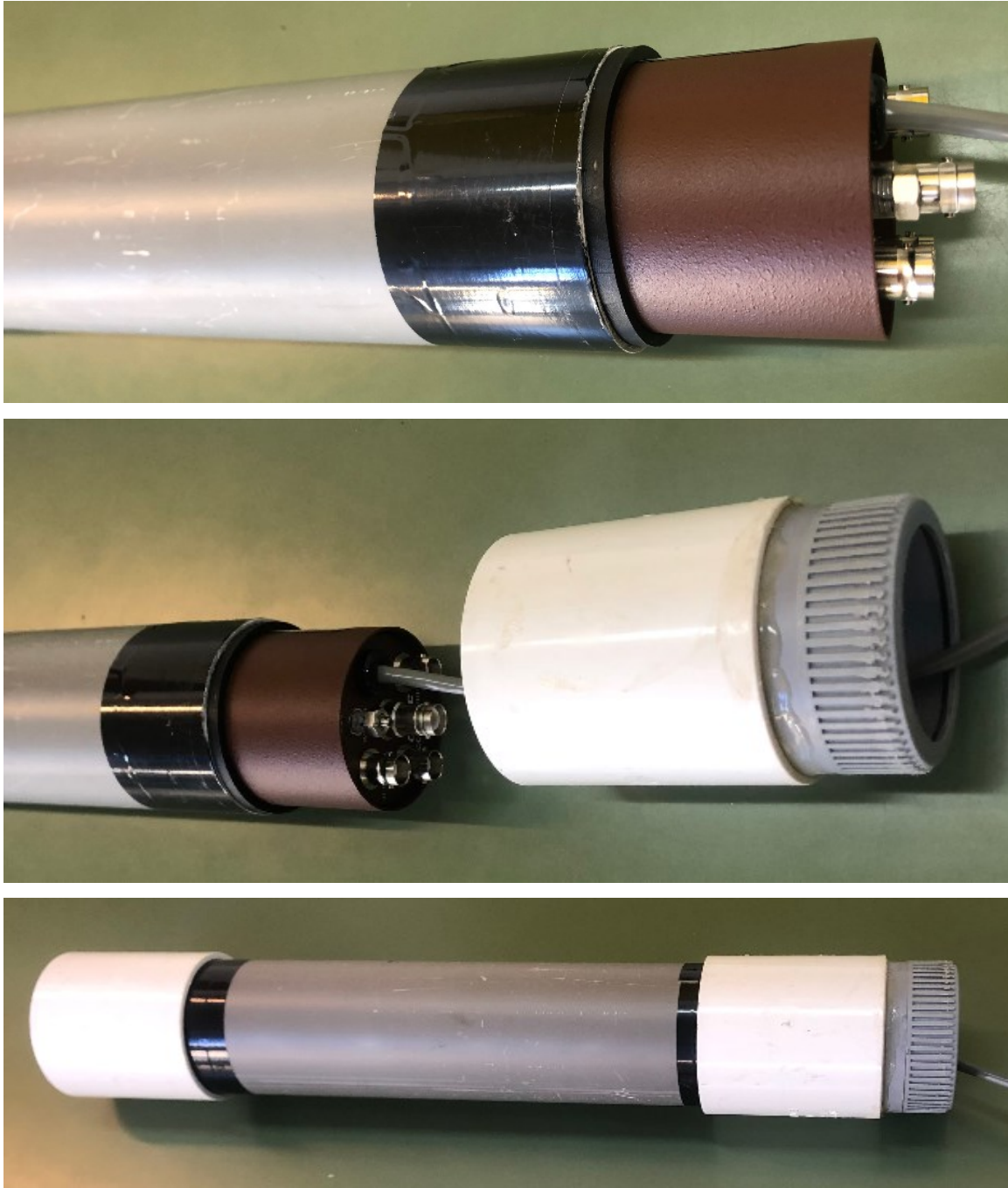
Από τη δεξιά βάση του σωλήνα εισέρχεται στην φωτοστεγανή θήκη το σύστημα φωτοπολλαπλασιαστής - διαιρέτης τάσης - προενισχυτής. Η διάμετρος του φωτοπολλαπλασιαστή μέχρι ένα μήκος ~ 10 cm, υπολείπεται αρκετά από την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα PVC, ενώ η διάμετρος του υπόλοιπου μήκους του φωτοπολλαπλασιαστή, του διαιρέτη τάσης και του προενισχυτή εφάπτεται σχεδόν με την εσωτερική διάμετρο του σωλήνα PVC. Για να καλυφθεί το κενό αυτό και για να σταθεροποιηθεί ο φωτοπολλαπλασιαστής μέσα στο σωλήνα, ώστε να μην σπάσει από τυχόν ατύχημα, διαμορφώθηκε ένας μικρός κύλινδρος από φύλλο συσκευασίας τύπου foam, πάχους $\sim 2.0 - 2.5$ mm διαστάσεων $M=10 \times \Pi=17$ cm, και τοποθετήθηκε όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.20.



Εικόνα 4.20: Τοποθέτηση του συστήματος φωτοπολλαπλασιαστή - διαιρέτη τάσης - προενισχυτή στον σωλήνα PVC

Στην τελική του θέση του συστήματος το χείλος του σωλήνα PVC στεγανώνεται από το φως με το μαύρο παρέμβυσμα από λάστιχο που διακρίνεται γύρω από το σώμα του προενισχυτή. Το παρέμβυσμα αυτό είναι ίδιων διαστάσεων με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε για τη φωτοστεγάνωση του δοχείου LC, δηλ. $\text{Ø}55 \times \text{Ø}45 \times 2$ mm. Όταν το σύστημα φωτοπολλαπλασιαστή - διαιρέτη τάσης - προενισχυτή βρεθεί στην τελική του θέση, δηλαδή όταν η βάση του φωτοπολλαπλασιαστή έρθει σε επαφή με τη βάση του δοχείου LC, τότε το

σύστημα σταθεροποιείται με μία μούφα PVC Ø63 mm (βλ. και Εικόνα 4.21). Η μούφα πιέζει το παρέμβυσμα στη θέση του. Η μούφα πρέπει να αφαιρείται εύκολα αλλά και να είναι αρκετά σταθερή στη θέση της. Για το σκοπό αυτό η μούφα τοποθετείται στη θήκη με σφιχτή προσαρμογή. Η σφιχτή προσαρμογή εξασφαλίσθηκε, όπως και στην περίπτωση της στερέωσης του δοχείου LC με μία - δύο στρώσεις μαύρης ταινίας συσκευασίας.



Εικόνα 4.21: Το σύστημα φωτοπολλαπλασιαστή - διαιρέτη τάσης - προενισχυτή στην ασφαλή (φωτοστεγανή) του τελική θέση στο ένα άκρο του σωλήνα PVC.

Τρίτη εικόνα κάτω: όλη η διάταξη στη φωτοστεγανή της θήκη.

4.7 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφηκε ο τρόπος, με τον οποίο κατασκευάστηκαν στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, ανιχνευτές Ραδονίου με την τεχνική των δοχείων LC. Για την κατασκευή των ανιχνευτών χρησιμοποιήθηκαν δύο παραλλαγές "Α" και "Β". Κατά την παραλλαγή "Α" η τοποθέτηση της σκόνης $ZnS(Ag)$ έγινε, όπως αναφέρθηκε, απευθείας στις εσωτερικές επιφάνειες των δοχείων με χρήση κατάλληλης κόλλας. Η παραλλαγή αυτή χρειάζεται πολλή προσοχή, διότι το στρώμα κόλλας πρέπει να τοποθετηθεί στα τοιχώματα του δοχείου LC σε ομοιόμορφο πάχος. Ομοίως η σκόνη του σπινθηριστή πρέπει να κατανεμηθεί με ομοιόμορφο τρόπο πάνω στην κόλλα. Επομένως, υπάρχουν τεχνικά προβλήματα και προβλήματα επαναληψιμότητας, τα οποία επισήμανε και ο Καθηγητής του University College Dublin, Dr. James McLaughlin σε επικοινωνία του με τον επιβλέποντα. Σε ό,τι αφορά την ομοιόμορφη στρώση της κόλλας βοήθησε πολύ η περιστροφική κίνηση του δοχείου στον τόρνο του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Κατά την παραλλαγή "Β", την οποία προτιμά ο Dr. James McLaughlin ως ευκολότερη και πιο επαναλήψιμη, προετοιμάστηκαν ορθογώνια παραλληλόγραμμα λεπτά φύλλα κατάλληλων διαστάσεων από διάφορα υλικά, στην μία επιφάνεια των οποίων τοποθετήθηκε σκόνη $ZnS(Ag)$ με χρήση κόλλας. Τα φύλλα τοποθετήθηκαν ως κύλινδροι στα δοχεία με την πλευρά που ο σπινθηριστής βλέπει στον άξονα των δοχείων. Η παραλλαγή αυτή επιτρέπει και τη δοκιμή διαφορετικών φύλλων και πιθανώς φύλλων που δεν επηρεάζονται από την υγρασία, δεν απορροφούν Ραδόνιο και είναι δυνατόν, αν πράγματι χρειάζεται, να γειωθούν. Και στις δύο παραλλαγές τα δοχεία LC πρέπει να σφραγίζονται με το πώμα τους και να τοποθετούνται ώστε το διαφανές παράθυρό τους να είναι σε επαφή με το παράθυρο του φωτοπολλαπλασιαστή. Το δοχείο LC μαζί με το φωτοπολλαπλασιαστή, το διαιρέτη τάσης και τον προενισχυτή ως ενιαίο σύστημα θα λειτουργούν μέσα σε φωτοστεγανή θήκη κατασκευής ΕΠΤ-ΕΜΠ. Στο επόμενο Κεφάλαιο 5 αναπτύσσεται ο τρόπος που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα βαθμονόμησης των δοχείων LC και εξάγονται τα πρώτα σχετικά συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΔΟΧΕΙΩΝ LC

5.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται οι λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη στην οποία έγιναν οι μετρήσεις βαθμονόμησης της τεχνικής των δοχείων LC. Πρώτα γίνεται μια απογραφή του αναγκαίου εξοπλισμού. Ακολουθεί μια παρουσίαση του εξοπλισμού με περισσότερες πληροφορίες. Στη συνέχεια επεξηγείται η διαδικασία μεταφοράς Ραδονίου από δοχείο όπου φυλάσσεται μια πηγή Ραδονίου σε έναν από τους θαλάμους Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ. Μετά, επεξηγείται η διαδικασία μετάγγισης Ραδονίου από το θάλαμο Ραδονίου σε ένα δοχείο LC. Επιπλέον, περιγράφεται η διαδικασία πλύσης δοχείου LC από Ραδόνιο. Η διαδικασία αυτή παρόλο που υπάρχει δεν χρησιμοποιήθηκε στα τελικά πειράματα βαθμονόμησης δοχείων LC στη ΔΕ. Τέλος περιγράφονται τα βήματα που πρέπει να γίνουν για ένα πείραμα βαθμονόμησης.

5.2 Πειραματική διάταξη βαθμονόμησης

5.2.1 Απογραφή απαραίτητου εξοπλισμού

Για τη συγκρότηση της πειραματικής διάταξης βαθμονόμησης απαιτούνται:

- i. Πηγή Ραδονίου, πιστοποιημένης ραδιενέργειας
- ii. Θάλαμος Ραδονίου, γνωστού όγκου, με ελάχιστο εσωτερικό εξοπλισμό, μία αεραντλία και έναν ανεμιστήρα 220 V
- iii. Σωληνώσεις, αντλία και διακόπτες για την ασφαλή μεταφορά του Ραδονίου από την πηγή στον θάλαμο.
- iv. Σωληνώσεις, αντλία και διακόπτες για την ασφαλή μετάγγιση αέρα με Ραδόνιο από τον θάλαμο σε δοχείο LC
- v. Σωληνώσεις, αντλία και διακόπτες για την ασφαλή πλύση των δοχείων LC με αέρα, ώστε να απομακρυνθεί το περιεχόμενο Ραδόνιο
- vi. Κατάλληλη καλωδίωση για τη σύνδεση του συστήματος "δοχείο LC - φωτοπολλαπλασιαστής - διαιρέτης τάσης και προενισχυτής σε φωτοστεγανή θήκη", με τα αναγκαία πυρηνικά ηλεκτρονικά.
- vii. Παλμογράφος και πυρηνικά ηλεκτρονικά όπως έχουν ήδη αναφερθεί, δηλ. ενισχυτής, διαχωριστής και καταμετρητής

5.2.2 Πηγή Ραδονίου

Όπως αναφέρεται και στον Μαρινάκη (2007) το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει, δύο κατάλληλες πηγές Ραδίου-226 (^{226}Ra), που χρησιμοποιούνται για να παρέχουν Ραδόνιο, με το οποίο επιτυγχάνονται επιθυμητές συγκεντρώσεις στον εσωτερικό ατμοσφαιρικό αέρα ενός αεροστεγούς θαλάμου. Μία από αυτές τις πηγές, η μικρότερη από τις δύο, είναι η πρότυπη πιστοποιημένη πηγή που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα ΔΕ: Τύπου 2000-100, σειράς 200Α, του κατασκευαστή οίκου Pylon Electronics Inc., του Καναδά, ονομαστικής ραδιενέργειας Ραδίου-226 102.8 kBq. Η πηγή Pylon έχει την ιδιότητα ότι πρακτικά το 100% του Ραδονίου που παράγεται απελευθερώνεται προς την ελεύθερη ατμόσφαιρα από το κρυσταλλικό στερεό που περιέχει το Ράδιο – 226. Η ιδιότητα αυτή (με μονάδες ποσοστού) έχει επικρατήσει να ονομάζεται στα αγγλικά "emanation power" και μπορεί να παίρνει τιμές από 0 έως 100%. Στο Παράρτημα υπάρχει το σχετικό πιστοποιητικό για την ραδιενέργεια της πηγής Pylon. Προκειμένου η πηγή να συνεργάζεται λειτουργικά, με τους θαλάμους Ραδονίου του ΕΠΤ-ΕΜΠ πρέπει να τοποθετείται σε δοχεία μικρού όγκου, ώστε

$$V_{\text{δοχείου πηγής}} \ll V_{\text{θαλάμου}} \quad (5.1)$$


τα οποία να μπορούν να επικοινωνούν με τους θαλάμους αυτούς με τη βοήθεια σωληνώσεων κατάλληλης διαμέτρου (8 – 20 mm). Η πηγή Pylon με φυλλάδιο προδιαγραφών αυτό που διακρίνεται στην Εικόνα 5.1, δεν διαθέτει τέτοιο δοχείο (στο εξής: "δοχείο πηγής") εκ κατασκευής.

Έτσι, όταν παρουσιάσθηκε η σχετική ανάγκη (δεκαετία του '90), πραγματοποιήθηκε η σχετική κατασκευή, η οποία παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2. Διαπραγμάτευση σχετικά με την υπόψη κατασκευή γίνεται στον Κατσανεβάκης (1995).

Επιπλέον, προκειμένου η πηγή να χρησιμοποιείται για την παραγωγή βαθμονομημένων ποσοτήτων Ραδονίου, πρέπει να περάσει από την διαδικασία μηδενισμού. Με τον όρο μηδενισμός εννοείται η πλήρης απομάκρυνση όποιας ποσότητας Ραδονίου υπάρχει στο αντίστοιχο δοχείο της πηγής. Ο τρόπος που γίνεται ο μηδενισμός είναι στην ουσία πλήρης εξαερισμός (degassing) του δοχείου πηγής με την παροχή ρεύματος καθαρού ατμοσφαιρικού αέρα με μέθοδο που περιγράφεται από τον Μαρινάκη (2007). Ένας άλλος τρόπος μηδενισμού της πηγής είναι η πλήρης μετάγγιση του περιεχομένου της σε θάλαμο Ραδονίου, αρκεί να ικανοποιείται η ανισότητα (5.1). Τη χρονική στιγμή ακριβώς που θεωρείται ότι έχει ολοκληρωθεί ο μηδενισμός, αρχίζει η λεγόμενη παραγωγή Ραδονίου. Η χρονική στιγμή αυτή θεωρείται ότι είναι η χρονική στιγμή "0".

RADIOACTIVE SOURCES

Model 2000A is a general purpose lab source whose compact design makes it an ideal choice for applications that require the passive dispersion of radon gas



2000A

- Passive diffusion

The Model 2000A is well suited to provide radon gas for radon measurement instrumentation, environmental chambers, radon enclosures and other closed systems. The 2000A is a passive radon gas source that provides calibrated quantities of radon gas which disperses in a passive manner through the radon enclosure. This radon source is available in various activities.

Applications:

- For continuous or intermittent applications in environmental chambers, radon enclosures and other types of confined systems
- It is ideally suited both as a convenient general purpose laboratory source of radon gas and as a radon gas standard for the calibration of radon measuring instrumentation

Features:

- Portable
- Lightweight
- Leakage proof (dry radium)
- Safe container
- May be sealed with the provided cap when not in use
- Convenient and easy to use

Theory of Operation:

The model 2000A source is calibrated and supplied with a removable cap, which is used to seal the container. The radium source material is securely and permanently confined while allowing, at the same time, radon gas to completely disperse when the cap is removed. The radium source material inside the container then continues to emanate radon gas at a constant rate. The concentration of radon gas inside the enclosure follows the standard growth and decay equations for radon with a decay constant of 0.0001258 per minute.

RADIOACTIVE SOURCES

Specifications:

	2000-20	2000-100	2000-500	
Parent nuclide:	Ra-226	Ra-226	Ra-226	
Nominal activity:	0.54 (20)	2.7 (100)	13.5 (500)	uCi (kBq)
Activity Tolerance:	-10 / +25	-10 / +25	-10 / +25	%
Calibration Accuracy ¹ :	± 4	± 4	± 4	%
Housing Material:	Aluminum	Aluminum	Aluminum	
Operating Temperature Range:	0 to +50	0 to +50	0 to +50	°C
	(+32 to +122)	(+32 to +122)	(+32 to +122)	(°F)
Storage Temperature Range:	-20 to +75	-20 to +75	-20 to +75	°C
	(-4 to +167)	(-4 to +167)	(-4 to +167)	(°F)
Relative Humidity Range ² :	0 to 90	0 to 90	0 to 90	%
Diameter:	4.4 (1.8)	4.4 (1.8)	4.4 (1.8)	cm (in.)
Height:	9.2 (3.6)	9.2 (3.6)	9.2 (3.6)	cm (in.)
Weight:	286 (0.63)	286 (0.63)	286 (0.63)	g (lb.)

¹ At a 1 σ Confidence Level.
² Non Condensing
 • Values are nominal.

Ordering Information:

Model	Part Number	Description
2000-20	6203671	Passive radon gas (Ra-226) source (20 kBq)
2000-100	6203672	Passive radon gas (Ra-226) source (100 kBq)
2000-500	6203673	Passive radon gas (Ra-226) source (500 kBq)


Custom activities available.

THESE SOURCES CONTAIN RADIOACTIVE MATERIALS. PYLON REQUIRES A COPY OF THE USER'S RADIOISOTOPE LICENCE PRIOR TO SHIPPING THESE PRODUCTS.

Specifications subject to change without notice.
 Trademarks are the properties of their respective holders. All Rights Reserved.
 Datasheet: 122 Rev 1

2000A

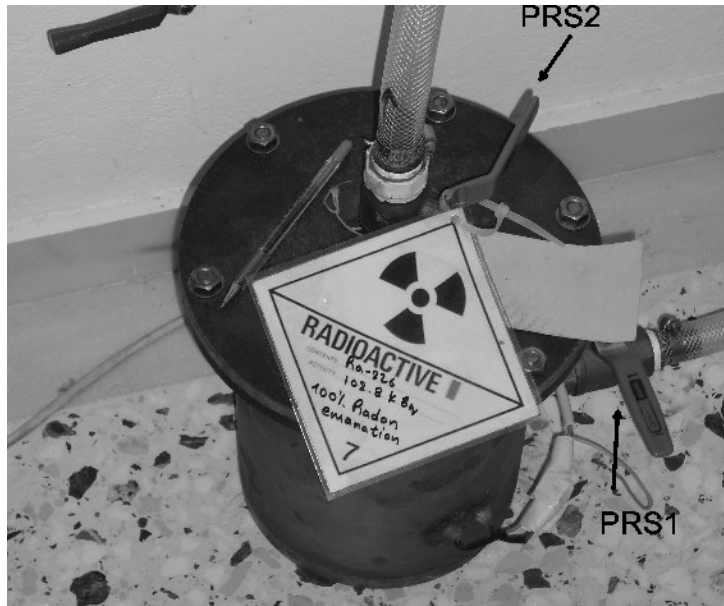
2000A



PYLON ELECTRONICS INC.
 147 Colonnade Road, Ottawa, ON K2E 7L9 CANADA
 www.pylonelectronics.com

TEL: 613-226 7920
 FAX: 613-226 8195
 instrument@pylonelectronics.com

Εικόνα 5.1: Προδιαγραφές πηγής Ραδονίου Pylon (βλ. Μαρινάκης 2007)



Εικόνα 5.2: Το δοχείο πηγής για την πηγή Pylon. Διακρίνονται οι σφαιρικοί διακόπτες PRS1 και PRS2 (βλ. Παπαδάκος, 2001, Μαρινάκης, 2007)

Έστω τώρα πηγή, με τεχνικά χαρακτηριστικά όπως της πηγής Pylon (δηλ. με emanation power 100%), η οποία αμέσως μετά τον μηδενισμό βρίσκεται στην χρονική στιγμή "0". Από

το χρονικό σημείο αυτό και μετά, αρχίζει στο δοχείο της πηγής να παράγεται Ραδόνιο, η ραδιενέργεια του οποίου είναι συνάρτηση του χρόνου ωρίμανσης T (min), ως εξής:

$$B(T) = A_0(1 - e^{-\lambda T}) \quad (5.2)$$

όπου

B είναι η ραδιενέργεια του Ραδονίου σε Bq που έχει παραχθεί μέχρι τη χρονική στιγμή T

A_0 είναι η ραδιενέργεια του περιεχόμενου Ραδίου-226 της πηγής, και

λ είναι η σταθερά διασπάσεως του Ραδονίου σε min^{-1} ($\lambda = 1.26 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$)

Η μέγιστη ραδιενέργεια Ραδονίου, η οποία μπορεί να παραχθεί από την πηγή είναι: $B_{\max} = A_0$

Ο χρόνος ωρίμανσης που χρειάζεται για την παραγωγή της μέγιστης ραδιενέργειας Ραδονίου υπολογίζεται από την αντίστοιχη επίλυση της σχέσης (5.2) σε $T \approx 21$ ημέρες.

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, η σχέση (5.2) υπάρχει τυποποιημένη σε κατάλληλους πίνακες σε συνάρτηση με τον χρόνο t σε ώρες, ώστε να αποφεύγονται υπολογισμοί.

5.2.3 Θάλαμος Ραδονίου

Το ΕΠΤ-ΕΜΠ διαθέτει δύο θαλάμους Ραδονίου. Τα γενικά χαρακτηριστικά των θαλάμων έχουν ως εξής:

- ΘΑΛΑΜΟΣ "Α": Όγκος 1.81 m^3 , Ύψος 1.56 m , Πλάτος 1.00 m , Βάθος 1.19 m , από φύλλα ανοξειδωτού χάλυβα πάχους 2 και 3 mm , αεροστεγής (βλ. και όψη στην Εικόνα 5.3)
- ΘΑΛΑΜΟΣ "Β": Όγκος 8.5 m^3 , Ύψος 1.95 m , Πλάτος 1.75 m , Βάθος 2.50 m , από φύλλα ανοξειδωτού χάλυβα πάχους 2 και 3 mm , αεροστεγής.

Για τα πειράματα βαθμονόμησης στην παρούσα ΔΕ επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ο θάλαμος "Α". Ο θάλαμος αυτός έχει τον εξοπλισμό και τις δυνατότητες που περιγράφουν οι Κατσανεβάκης (1995), Παπαδάκος (2001) και Μαρινάκης (2007).

Ο θάλαμος "Α" έχει τις εξής κύριες ιδιότητες:

- Έχει σχετικά μικρό όγκο, ο οποίος ικανοποιεί την ανισότητα (4.1).
- Είναι αεροστεγής.
- Δεν επιτρέπει την είσοδο και την έξοδο του προσωπικού.



Εικόνα 5.3: Θάλαμος Ραδονίου "Α" στο ΕΠΤ-ΕΜΠ

Το πρακτικό αποτέλεσμα αυτών των ιδιοτήτων είναι ότι μία συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο, εκτός από την αναπόφευκτη ραδιενεργό απομείωση, δεν μειώνεται λόγω διαρροών ή άλλων δραστηριοτήτων. Η ραδιενεργός απομείωση ακολουθεί το νόμο των ραδιενεργών διασπάσεων. Αν στον θάλαμο εισέρθει, τη χρονική στιγμή $t = 0$, όπου t ο χρόνος απομείωσης, ραδιενέργεια B (προερχόμενη από το δοχείο πηγής), τότε:

$$\frac{B'(t)}{B} = e^{-\lambda t} \quad (5.3)$$

Στο ΕΠΤ-ΕΜΠ, η σχέση (5.3) ως λόγος $B'(t)/B$ υπάρχει τυποποιημένη σε κατάλληλους πίνακες σε συνάρτηση με τον χρόνο t σε ώρες, ώστε να αποφεύγονται υπολογισμοί.

Πέρα από το μειονέκτημα ότι δεν επιτρέπεται η είσοδος - έξοδος εργαστηριακού προσωπικού, η λειτουργία του θαλάμου Ραδονίου "Α" του ΕΠΤ-ΕΜΠ, φαίνεται να είναι απλή από μετρολογική άποψη σε ό,τι αφορά τη ρύθμιση της συγκέντρωσης Ραδονίου στο εσωτερικό τους απαλλαγμένη από τυχαία σφάλματα. Η μόνη τεχνική λεπτομέρεια που πρέπει να ρυθμίζεται στους θαλάμους αυτούς είναι η ρύθμιση της αρχικής ποσότητας Ραδονίου B .

Στην ΔΕ ενδιαφέρει από τον υπάρχοντα εξοπλισμό του θαλάμου κυρίως

Η αεραντλία που διακρίνεται στην Εικόνα 5.4

Ο ρόλος της αεραντλίας σε αυτήν τη ΔΕ είναι να οδηγεί το μίγμα αέρα-Ραδονίου μέσω καταλλήλων σωληνώσεων από το θάλαμο προς το δοχείο LC. Στην πράξη αναρροφά μίγμα από το θάλαμο και το οδηγεί σε ένα δοχείο LC σε κλειστό κύκλωμα. Το μίγμα επιστρέφει στο θάλαμο. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι η συγκέντρωση Ραδονίου στο δοχείο LC να γίνει ίση με αυτήν του θαλάμου Ραδονίου.



Εικόνα 5.4: Αεραντλία στο εσωτερικό του θαλάμου "Α" (βλ. και Μαρινάκης, 2007)

Ο ανεμιστήρας 220 V πλευράς 120 mm που διακρίνεται στην Εικόνα 5.5

Σκοπός του ανεμιστήρα είναι: (α) να αναδεύει τον αέρα του θαλάμου ομοιογενώς με το Ραδόνιο, (β) να ωθεί τα παραγόμενα θυγατρικά του Ραδονίου που αιωρούνται στον θάλαμο προς τα τοιχώματα του θαλάμου (να προάγει δηλαδή το λεγόμενο plate out των θυγατρικών). Ο λόγος είναι να οδηγηθεί από την αεραντλία προς τον ανιχνευτή τύπου δοχείου LC, στον οποίο γίνεται βαθμονόμηση, καθαρό μίγμα αέρα Ραδονίου, απαλλαγμένο από θυγατρικά, τα οποία θα μπορούσαν να αλλοιώσουν τη βαθμονόμηση.



Εικόνα 5.5: Ανεμιστήρας στο εσωτερικό του θαλάμου "Α" (βλ. και Μαρινάκης, 2007)

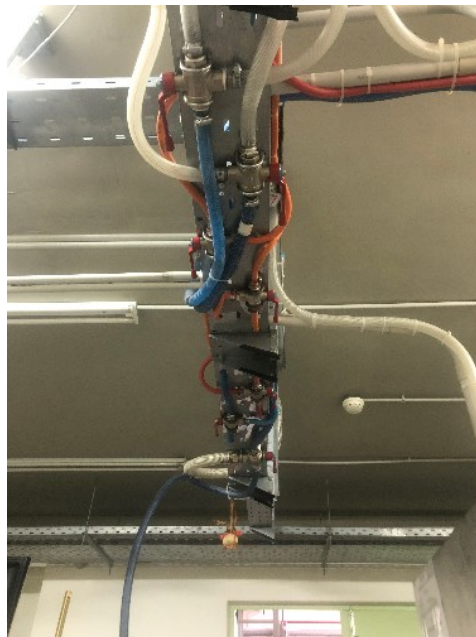
5.2.4 Μεταφορά Ραδονίου στο θάλαμο

Παρακολουθώντας τον χρόνο ωρίμανσης T , είναι δυνατόν να μεταφερθεί από το δοχείο της πηγής στον αεροστεγή και απομονωμένο από το λοιπό περιβάλλον- θάλαμο Ραδονίου όγκου V (m^3), όσο Ραδόνιο έχει σχηματισθεί στο δοχείο της πηγής, στο διάστημα από τη χρονική στιγμή "0" έως τη χρονική στιγμή " T ". Η μεταφορά αυτή γίνεται με τη βοήθεια σωληνώσεων και αντλιών αέρα, με τρόπο που θα περιγραφεί πιο κάτω. Αν θεωρηθεί ότι, με τη μέθοδο που ακολουθείται, η μεταφορά είναι πλήρης, τότε μέσα στο θάλαμο Ραδονίου θα δημιουργηθεί συγκέντρωση Ραδονίου Rn_0 (Bqm^{-3}) ίση με:

$$Rn_0 = B(T) / V \quad (4.4)$$



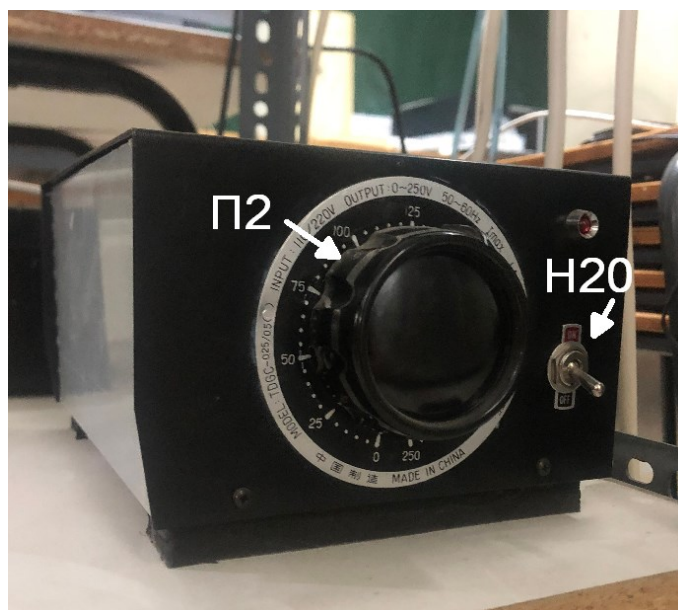
Εικόνα 5.6: Ηλεκτρικός - Ηλεκτρονικός πίνακας ελέγχου θαλάμου "Α"



Εικόνα 5.7: Λαβές των σφαιρικών διακοπών που ανήκουν στον "κοινό κλάδο" του κυκλώματος αερίων των θαλάμων "Α" και "Β". Οι λαβές βλέπουν προς την πόρτα, άρα τα αέρια κατευθύνονται μόνο στον θάλαμο "Α" (βλ. και Παπαδάκος, 2001).

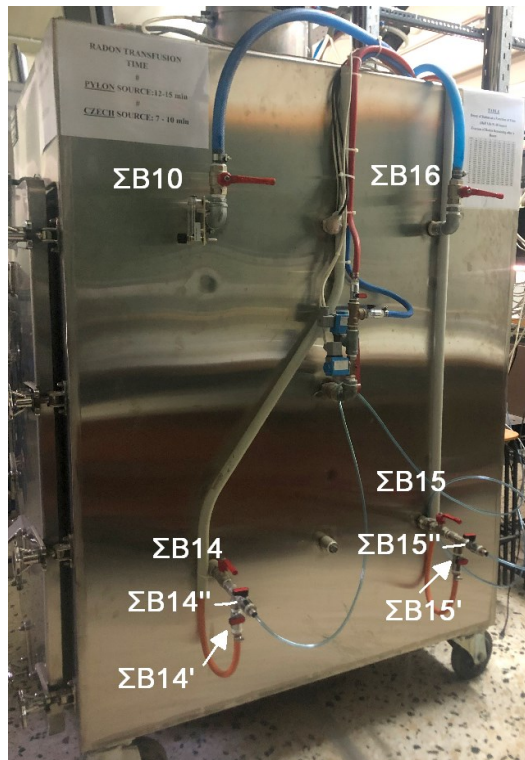
1. Κλείνουν όλοι οι διακόπτες του ηλεκτρικού – ηλεκτρονικού πίνακα ελέγχου (βλ. και Εικόνα 5.6)
2. Κλείνουν ΟΛΟΙ οι σφαιρικοί διακόπτες και οι βάνες που βρίσκονται τοποθετημένες στο σώμα του θαλάμου
3. Κλείνει η αεροστεγής θύρα του θαλάμου

4. Στρέφονται ΟΛΕΣ οι λαβές των σφαιρικών διακοπών που ανήκουν στον λεγόμενο "κοινό κλάδο" του κυκλώματος αερίων των θαλάμων "Α" και "Β" (Παπαδάκος, 2001) "προς την πόρτα του εργαστηριακού δωματίου" (βλ. και Εικόνα 5.7). Αυτό σημαίνει ότι από το κυκλώματα αερίων θα εξυπηρετηθεί ο θάλαμος "Α". Για τον θάλαμο "Β" οι λαβές των διακοπών πρέπει να βλέπουν προς το παράθυρο.
5. Ανοίγει ο διακόπτης H20 που τροφοδοτεί με ηλεκτρισμό τον ανεμιστήρα πλευράς του θαλάμου στο εσωτερικό του θαλάμου "Α". Ο διακόπτης διακρίνεται στην Εικόνα 5.8. Η ταχύτητα του ανεμιστήρα ρυθμίζεται στη θέση "150 V" (δηλ. "μέτρια") στο ποτενσιόμετρο Π2 (βλ. επίσης Εικόνα 5.8)



Εικόνα 5.8: Έλεγχος ανεμιστήρα θαλάμου "Α" με το διακόπτη H20 και το ποτενσιόμετρο Π2

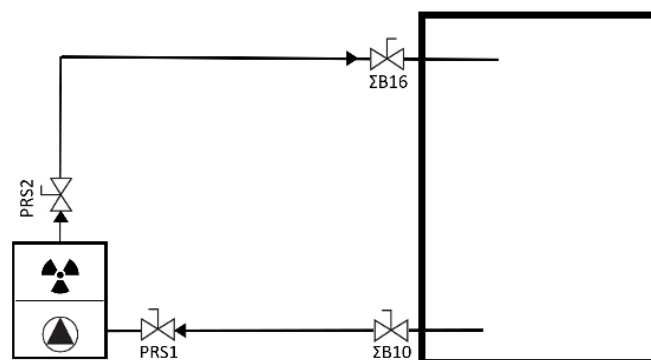
6. Ανοίγουν οι σφαιρικοί διακόπτες ΣΒ10 και ΣΒ16 των σωλήνων εισόδου Ραδονίου στο θάλαμο από την πηγή PYLON (βλ. και Εικόνα 5.9)
7. Ανοίγουν οι σφαιρικοί διακόπτες PRS1 και PRS2 του δοχείου της πηγής (βλ. και Εικόνα 5.2)
8. Αμέσως τροφοδοτείται με ρεύμα ένας μικρός ανεμιστήρας που βρίσκεται μέσα στο δοχείο της πηγής, ώστε να αρχίσει η μεταφορά του Ραδονίου προς το θάλαμο. Η μεταφορά γίνεται σε κλειστό κύκλωμα σωληνώσεων. Με τη διαδικασία αυτή το Ραδόνιο που υπάρχει εγκλωβισμένο στο δοχείο της πηγής μεταφέρεται στο θάλαμο. Η πλήρωση του θαλάμου από την πηγή απαιτεί περίπου 10 - 15 λεπτά λειτουργίας του ανεμιστήρα.



Εικόνα 5.9: Σφαιρικοί διακόπτες ΣB10 και ΣB16 του θαλάμου "A"
(βλ. και Παπαδάκος, 2001)

9. Μετά τη συμπλήρωση 10 - 15 min, αποσυνδέεται από το ρεύμα ο ανεμιστήρας της πηγής και κλείνουν κατά το δυνατόν σύντομα αλλά με αυτή την σειρά οι σφαιρικοί διακόπτες του δοχείου της πηγής PRS1 και PRS2 και τέλος κλείνουν οι σφαιρικές βαλβίδες του θαλάμου ΣB10 και ΣB16.

Η συγκέντρωση Ραδονίου που δημιουργείται στο θάλαμο θεωρείται βαθμονομημένη καθώς προέρχεται από πρότυπη και πιστοποιημένη πηγή Ραδονίου. Η τεχνική αρχή της λειτουργίας των κυκλωμάτων που περιγράφηκε στα προηγούμενα διακρίνεται στο μονογραμμικό σκαρίφημα της Εικόνας 5.10.

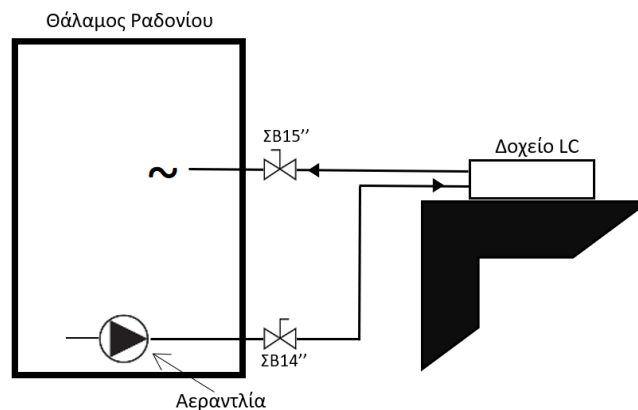


Εικόνα 5.10: Μονογραμμικό σκαρίφημα μεταφοράς Ραδονίου από την πηγή PYLON
(βλ. αριστερά δοχείο πηγής) στον θάλαμο "A" (βλ. δεξιά)

5.2.5 Μετάγγιση Ραδονίου στο δοχείο LC

Τα βήματα που ακολουθούνται για την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας είναι τα εξής:

Αρχικά ανοίγουν οι σφαιρικοί διακόπτες του θαλάμου που οδηγούν προς το δοχείο LC μέσω πλαστικών σωληνώσεων αέρα 6 mm. Οι διακόπτες αυτοί είναι οι ΣΒ14, ΣΒ15, ΣΒ14" και ΣΒ15", οι οποίοι φαίνονται στην Εικόνα 5.19. Οι διακόπτες ΣΒ14' και ΣΒ15' παραμένουν πάντα κλειστοί. Σημειώνεται ότι οι διακόπτες ΣΒ14', ΣΒ14", ΣΒ15', ΣΒ15" δεν υπήρχαν στις ΔΕ Παπαδάκος (2001) και Μαρινάκης (2007), προστέθηκαν δηλαδή αργότερα. Ακολούθως ενεργοποιείται ο γενικός διακόπτης Η4 του ηλεκτρικού - ηλεκτρονικού πίνακα ελέγχου του θαλάμου (βλ. Εικόνα 5.6). Στη συνέχεια ανοίγονται ακόμα δύο διακόπτες: ο Η7 που αφορά στον φωτισμό του θαλάμου και ο Η18 που τροφοδοτεί με ρεύμα την αεραντλία που φαίνεται στην Εικόνα 5.4. Όσο λειτουργεί η αεραντλία το μίγμα αέρα - Ραδονίου που υπάρχει στο θάλαμο προωθείται μέσω κλειστού κυκλώματος ανακυκλοφορίας στο δοχείο LC. Η διαδρομή του μίγματος διακρίνεται στην Εικόνα 5.11.

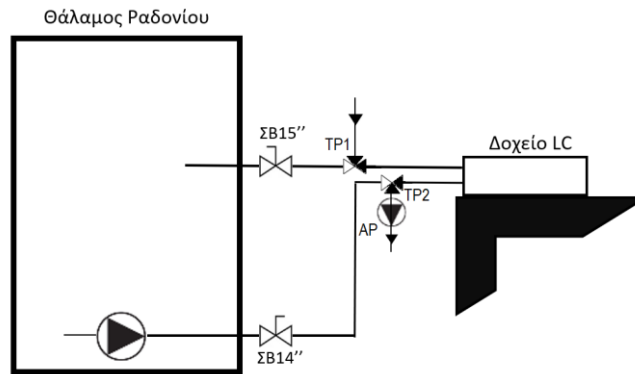


Εικόνα 5.11: Μονογραμμικό σκαρίφημα μεταφοράς μίγματος αέρα - Ραδονίου από τον θάλαμο "Α" στο δοχείο LC μέσω κλειστού κυκλώματος ανακυκλοφορίας

Ο φωτισμός του θαλάμου χρησιμεύει στον οπτικό έλεγχο ότι η αεραντλία δουλεύει σωστά. Ο έλεγχος γίνεται με τη βοήθεια ταινίας από χαρτί η οποία ταλαντώνεται όταν υπάρχει κυκλοφορία (βλ. την περισπωμένη στην Εικόνα 5.11). Για να πληρωθεί το δοχείο LC με το ίδιο μίγμα αέρα - Ραδονίου που υπάρχει στο θάλαμο αρκούν 10 min ανακυκλοφορίας. Αφού περάσουν τα 10 λεπτά, κλείνουν οι διακόπτες Η18, Η7 και Η4, και ακολούθως κλείνουν οι σφαιρικοί διακόπτες του θαλάμου ΣΒ14 και ΣΒ15. Η όλη διαδικασία γίνεται ενώ ο ανεμιστήρας βρίσκεται σε λειτουργία.

5.2.6 Πλύση δοχείου LC

Αν χρειάζεται για το ίδιο δοχείο LC να γίνουν περισσότερες από μία βαθμονομήσεις σε διαφορετικές συγκεντρώσεις Ραδονίου, σε κοντινά χρονικά διαστήματα, θα πρέπει το δοχείο LC να καθαρισθεί από την προηγούμενη συγκέντρωση Ραδονίου. Αυτό γίνεται με πλύση με αέρα σύμφωνα και με την Εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12: Μονογραμμικό σκαρίφημα πλύσης δοχείου LC με αέρα από το περιβάλλον

Για την διευκόλυνση της πλύσης προστέθηκαν στο κύκλωμα της Εικόνας 5.11 δύο τριόδοι σφαιρικοί διακόπτες, οι TP1 και TP2 καθώς και μία αεραντλία ΑΡ στην έξοδο του TP2. Όταν χρειάζεται πλύση, με τον TP1 το κύκλωμα αέρα του δοχείου LC απομονώνεται από τον θάλαμο Ραδονίου και έρχεται σε επικοινωνία με τον αέρα του περιβάλλοντος. Με τον TP2 το κύκλωμα αέρα του δοχείου LC απομονώνεται από τον θάλαμο Ραδονίου και έρχεται σε επικοινωνία με την αεραντλία ΑΡ. Για την πλύση η αεραντλία λειτουργεί αναρροφώντας αέρα μέσω της διαδρομής ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ > TP1 > ΔΟΧΕΙΟ LC > TP2 > ΑΕΡΑΝΤΛΙΑ ΑΡ > ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ. Γίνεται ανακύκλωση του μείγματος αέρα- Ραδονίου στο σύστημα θαλάμου δοχείου LC. Για μια επιτυχή πλύση θεωρείται ότι αρκούν 10 min λειτουργίας της ΑΡ με αυτόν τον τρόπο. Οι πλύσεις δεν είναι πάντοτε επιτυχείς διότι στο δοχείο LC παραμένουν στερεά θυγατρικά του Ραδονίου με μεγάλο χρόνο ημιζωής, όπως π.χ. το Po-210 ή στερεά θυγατρικά του Ραδονίου με μικρό χρόνο ημιζωής, π.χ. το Po-214, το οποίο οδηγεί μετά από διασπάσεις στο Po-210. Αυτό είναι και το κυριότερο πρόβλημα των δοχείων LC ως ανιχνευτών Ραδονίου, αφού μετά από διαδοχικές εκθέσεις σε διάφορες συγκεντρώσεις Ραδονίου, δημιουργούν υπόστρωμα εξαιτίας των θυγατρικών από το οποίο δεν είναι δυνατόν να απαλλαχθούν. Κάποια στιγμή μάλιστα το υπόστρωμα γίνεται τόσο μεγάλο που τα δοχεία LC δεν μπορούν πλέον να χρησιμοποιηθούν.

Μετά την πλύση και στην περίπτωση που θα ακολουθήσει νέα μέτρηση συγκέντρωσης Ραδονίου από τον θάλαμο στο ίδιο δοχείο LC, τότε μέσω των τριόδων TP1 και TP2 αποκαθίσταται η σύνδεση του δοχείου LC με το θάλαμο μέσω της διαδρομής θάλαμος > ΣΒ14" > TP2 > ΔΟΧΕΙΟ LC > TP1 > ΣΒ15" > θάλαμος. Στην Εικόνα 5.13 φαίνεται το πραγματικό κύκλωμα μαζί με τη διάταξη δοχείου LC στη φωτοστεγανή θήκη με τον φωτοπολλαπλασιαστή, το διαιρέτη τάσης και τον προενισχυτή. Η διάταξη έχει τοποθετηθεί για ασφάλεια πάνω σε μια βάση "V" από Plexiglass.



Εικόνα 5.13: Το πραγματικό κύκλωμα πλύσης. Διακρίνεται η (πράσινη) αεραντλία AP.

Τα σωληνάκια αέρα 6 mm στο κύκλωμα TP1 > δοχείο LC > TP2 επιλέχθηκε να είναι μαύρου χρώματος (αδιαφανή) ώστε να μην υπάρχει περίπτωση να εισέρθει φως στο δοχείο LC από τα σωληνάκια.

5.3 Πειραματική διεργασία βαθμονόμησης

Είναι φανερό ότι η πειραματική διεργασία βαθμονόμησης ενός δοχείου LC γίνεται κατά τα βήματα:

Επιλογή δοχείου LC για βαθμονόμηση

Τοποθέτηση του δοχείου στη στεγανή θήκη (με το φωτοπολλαπλασιαστή κλπ)

Σύνδεση του δοχείου με τα μαύρα σωληνάκια (βλ. Εικόνα 5.13)

Μεταφορά Ραδονίου από το δοχείο πηγής στο θάλαμο (βλ. προηγούμενη ενότητα)

Μετάγγιση Ραδονίου από το θάλαμο στο δοχείο LC (βλ. προηγούμενη ενότητα)

Σύνδεση προενισχυτή με πυρηνικά ηλεκτρονικά (βλ. επόμενο Κεφάλαιο 6), και τέλος

Μέτρηση (βλ. επόμενο Κεφάλαιο 6)

5.4 Σχόλια και συμπεράσματα

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάσθηκαν οι λεπτομέρειες για την πειραματική διάταξη στην οποία έγιναν οι μετρήσεις βαθμονόμησης της τεχνικής των δοχείων LC. Το περιεχόμενο του Κεφαλαίου 5 πρέπει να εξετάζεται μαζί με το επόμενο Κεφάλαιο 6, στο οποίο αξιολογούνται τα πειραματικά αποτελέσματα βαθμονόμησης της τεχνικής των δοχείων LC. Τα σημεία σύνδεσης του Κεφαλαίου 5 με το επόμενο Κεφάλαιο 6 είναι το πως συνδέεται η ανιχνευτική διάταξη με τα υπόλοιπα πυρηνικά ηλεκτρονικά και η εφαρμογή ενός πρωτοκόλλου μετρήσεων. Φυσικά, η απαραίτητη προϋπόθεση για τις ενέργειες αυτές είναι να προϋπάρξουν και να λειτουργήσουν τα παρακάτω: (α) η σύνδεση της πηγής με το θάλαμο Ραδονίου, (β) η σύνδεση του θαλάμου Ραδονίου με το δοχείο LC και τέλος (γ) η συγκρότηση της ανιχνευτικής διάταξης δοχείου LC, φωτοπολλαπλασιαστή, διαιρέτη τάσης και προενισχυτή στην κατάλληλη φωτοστεγανή θήκη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Στο Κεφάλαιο 6 εξετάζεται πρώτα ποια είναι και πως μπορεί να υπολογίζεται εύκολα η συγκέντρωση θυγατρικών Ραδονίου προτού επιτευχθεί η σχετική ισορροπία. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια της επίλυσης του γνωστού συστήματος διαφορικών εξισώσεων Bateman. Στη συνέχεια παρουσιάζονται η τελική διαμόρφωση του συστήματος μετρήσεων μαζί με τα πυρηνικά του ηλεκτρονικά ως διάταξη που συνδέεται με το θάλαμο Ραδονίου και χρησιμοποιεί το δοχείο LC, τον φωτοπολλαπλασιαστή, τον διαιρέτη τάσεως, τον προενισχυτή, τον ενισχυτή, τον διαχωριστή, τον καταμετρητή και τον παλμογράφο ως ενιαίο σύνολο. Το δοχείο LC, ο φωτοπολλαπλασιαστής, ο διαιρέτης τάσεως και ο προενισχυτής υπάρχουν σε φωτοστεγανή θήκη. Το τροφοδοτικό υψηλής τάσης του φωτοπολλαπλασιαστή είναι ξεχωριστή μονάδα. Το τελικά διαμορφωμένο σύστημα λειτουργεί με ρυθμίσεις ενισχυτή, διαχωριστή, καταμετρητή, οι οποίες επιλέχθηκαν με δοκιμές ώστε να επιτευχθεί ο καλύτερος βαθμός απόδοσης. Ακολουθεί εξήγηση σχετικά με το τι σημαίνει να λαμβάνονται μετρήσεις με την τεχνική των δοχείων LC σε χρονικές στιγμές, στις οποίες δεν έχει επιτευχθεί ακόμα ραδιενεργή ισορροπία μεταξύ του περιεχόμενου Ραδονίου και των θυγατρικών του. Έπειτα, παρουσιάζεται το πρωτόκολλο των μετρήσεων που επιλέχθηκε για τη βαθμονόμηση της τεχνικής, δηλαδή η διάρκεια μιας μέτρησης, το πλήθος μετρήσεων σε μια ομάδα μετρήσεων, οι υψηλές τάσεις του φωτοπολλαπλασιαστή στις οποίες έγιναν δοκιμές, πόσες και ποιες μετρήσεις υποστρώματος πρέπει να γίνονται κ.α. Σημειώνεται ότι όλες οι μετρήσεις στη ΔΕ έγιναν εκτός ραδιενεργού ισορροπίας για οικονομία χρόνου. Από την αξιολόγηση των μετρήσεων που έγιναν με αυτόν τον τρόπο με σκοπό την βαθμονόμηση των δοχείων LC που χρησιμοποιήθηκαν προέκυψαν συμπεράσματα κυρίως σχετικά με το σφάλμα των μετρήσεων, το κατώτερο επίπεδο ανίχνευσης συγκεντρώσεων Ραδονίου και την αβεβαιότητα της τεχνικής. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι η τεχνική όπως εφαρμόστηκε στην ΔΕ δίνει αποτελέσματα σε καλό επίπεδο. Στις δυσκολίες της τεχνικής επισημαίνονται κυρίως, το γεγονός ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εκτός ραδιενεργού ισορροπίας και σε αρκετές περιπτώσεις με αυξημένο υπόστρωμα.

6.2 Διαφορικές εξισώσεις Bateman

6.2.1 Γενική περίπτωση

Οι διαφορικές εξισώσεις Bateman είναι ένα μαθηματικό μοντέλο, κατάλληλο για την περιγραφή του πλήθους πυρήνων των μελών μιας αλυσίδας διασπάσεων σε συνάρτηση με το χρόνο. Το μοντέλο εξαρτάται από το ρυθμό διασπάσεως κάθε μέλους της σειράς. Η λύση του μοντέλου για το πλήθος πυρήνων κάθε μέλους εξαρτάται και από τις αρχικά πλήθη πυρήνων των μελών της σειράς τη χρονική στιγμή "μηδέν". Την πρώτη παρουσίαση του μοντέλου έκανε ο Rutherford το 1905. Η αναλυτική λύση του συστήματος δόθηκε από τον Bateman το 1910. Το μοντέλο διατυπώνεται ως εξής:

Αν θεωρηθεί η ραδιενεργός σειρά των ασταθών ισοτόπων $i, i+1, i+2, \dots$, τα οποία διαδοχικά διασπώμενα καταλήγουν στο ευσταθές ισότοπο k ,



τότε αν τη χρονική στιγμή t , υπάρχει N_i πλήθος πυρήνων του ισοτόπου i , αυτό θα απομειωθεί προς αύξηση του πλήθους πυρήνων του ισοτόπου $i+1$ με ρυθμό λ_i , όπου λ_i η σταθερή διασπάσεως του ισοτόπου i , και ούτω καθ' εξής για το ισότοπο $i+1, i+2, \dots, k$. Δηλαδή

$$\begin{aligned} \frac{dN_i(t)}{dt} &= -\lambda_i N_i(t) \\ \frac{dN_{i+1}(t)}{dt} &= -\lambda_{i+1} N_{i+1}(t) + \lambda_i N_i(t) \\ &\dots \\ \frac{dN_k(t)}{dt} &= \lambda_{k-1} N_{k-1}(t) \end{aligned} \quad (6.2)$$

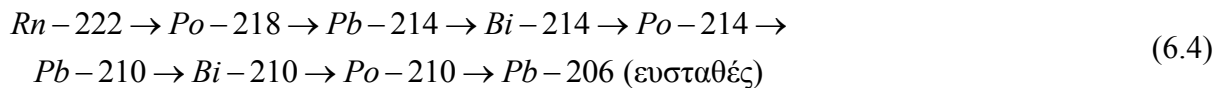
Το σύστημα (6.2) λύνεται εύκολα για $i = 2$ αλλά, η επίλυσή του για $i > 2$ είναι επίπονη. Παρόλα αυτά, το σύστημα έχει την ιδιότητα Bateman, ότι δηλαδή η μετάβαση από ισότοπο σε ισότοπο γίνεται από το είδος i προς το επόμενο είδος $i+1$ και ποτέ αντίστροφα (η μετάβαση από το $i+1$ στο προηγούμενο είδος i δεν επιτρέπεται). Ο Bateman κατέληξε ότι, αν τα αρχικά πλήθη πυρήνων των ισοτόπων με $i > 1$ είναι μηδενικά, τότε, με τη βοήθεια μετασχηματισμού Laplace, η λύση για το πλήθος πυρήνων κάθε ισοτόπου είναι:

$$N_n(t) = N_1(0) \times \left(\prod_{i=1}^{n-1} \lambda_i \right) \times \sum_{i=1}^n \frac{e^{-\lambda_i t}}{\prod_{j=1, j \neq i}^n (\lambda_j - \lambda_i)} \quad (6.3)$$

Συνήθως η σχέση (6.3) εφαρμόζεται σε υπολογιστικά προγράμματα. Λάθη μπορεί να προκύψουν όταν $\lambda_j \approx \lambda_i$. Για να αποφευχθούν τέτοια λάθη το σύστημα των διαφορικών εξισώσεων μπορεί να λύνεται και με άλλες μεθόδους.

6.2.2 Περίπτωση Ραδονίου

Για την εφαρμογή του μοντέλου Bateman στην περίπτωση διασπάσεως του Ραδονίου, λαμβάνεται υπόψη πρώτα η αλυσίδα διασπάσεως, η οποία είναι μέρος της ραδιενεργού σειράς του U-238. Είναι:



Οι σταθερές διασπάσεως των μελών της αλυσίδας δίνονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 6.1 Σταθερές διασπάσεως Ραδονίου και θυγατρικών του

i	Ισότοπο	$\lambda(\text{s}^{-1})$
1	Rn-222	2.48×10^{-6}
2	Po-218	3.73×10^{-3}
3	Pb-214	4.31×10^{-4}
4	Bi-214	5.81×10^{-4}
5	Po-214	$4.22 \times 10^{+3}$
6	Pb-210	9.86×10^{-10}
7	Bi-210	4.38×10^{-9}
8	Po-210	5.80×10^{-8}
9	Pb-206	ευσταθές

Έστω ότι τα αρχικά, για $t = 0$ s, πλήθη των πυρήνων των ισοτόπων της αλυσίδας με $i > 1$ είναι μηδέν. Η λύση του συστήματος (6.2) μπορεί να δοθεί για τη ραδιενέργεια R_i κάθε μέλους με τη βοήθεια λογιστικού φύλλου (spreadsheet), για διαδοχικές κοντινές χρονικές στιγμές που απέχουν μεταξύ τους μικρό χρόνο Δt . Αν $\Delta t = 1$ s το λογιστικό φύλλο υλοποιείται ως εξής:

Για $t = 0$ s

$$\begin{aligned}
R_1(0) &= \lambda_1 N_1(0) \neq 0 \\
R_2(0) &= \lambda_2 N_2(0) = 0 \\
R_3(0) &= \lambda_3 N_3(0) = 0
\end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned}
&\dots \\
R_8(0) &= \lambda_8 N_8(0) = 0
\end{aligned}$$

Για $t = t + \Delta t \Rightarrow t = 1 \text{ s}$

$$\begin{aligned}
R_1(1) &= R_1(0) e^{-\lambda_1 \Delta t} \\
R_2(1) &= R_1(1) (1 - e^{-\lambda_2 \Delta t}) \\
R_3(1) &= R_2(1) (1 - e^{-\lambda_3 \Delta t})
\end{aligned} \tag{6.6}$$

$$\begin{aligned}
&\dots \\
R_8(1) &= R_7(1) (1 - e^{-\lambda_8 \Delta t})
\end{aligned}$$

Για $t = t + \Delta t \Rightarrow t = 2 \text{ s}$

$$\begin{aligned}
R_1(2) &= R_1(1) e^{-\lambda_1 \Delta t} \\
R_2(2) &= R_1(2) (1 - e^{-\lambda_2 \Delta t}) \\
R_3(2) &= R_2(2) (1 - e^{-\lambda_3 \Delta t})
\end{aligned} \tag{6.7}$$

$$\begin{aligned}
&\dots \\
R_8(2) &= R_7(2) (1 - e^{-\lambda_8 \Delta t})
\end{aligned}$$

κ.ο.κ.

Για τους υπολογισμούς το λογιστικό φύλλο υλοποιήθηκε σε MS Excel.

Μετά την υλοποίηση, διαπιστώθηκε ότι οι υπολογισμοί ήταν ορθοί διότι το λογιστικό φύλλο ικανοποιούσε τη συνθήκη ραδιενεργού ισορροπίας, σύμφωνα με την οποία για $t \rightarrow \infty$, πρέπει όλες οι ραδιενέργειες όλων των μελών των ισοτόπων να έχουν εξισωθεί. Δηλαδή πρέπει

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_7 = R_8 \tag{6.8}$$

ή

$$R_{Rn-222} = R_{Po-218} = R_{Pb-214} = R_{Bi-214} = R_{Po-214} = R_{Pb-210} = R_{Bi-210} = R_{Po-210} \tag{6.9}$$

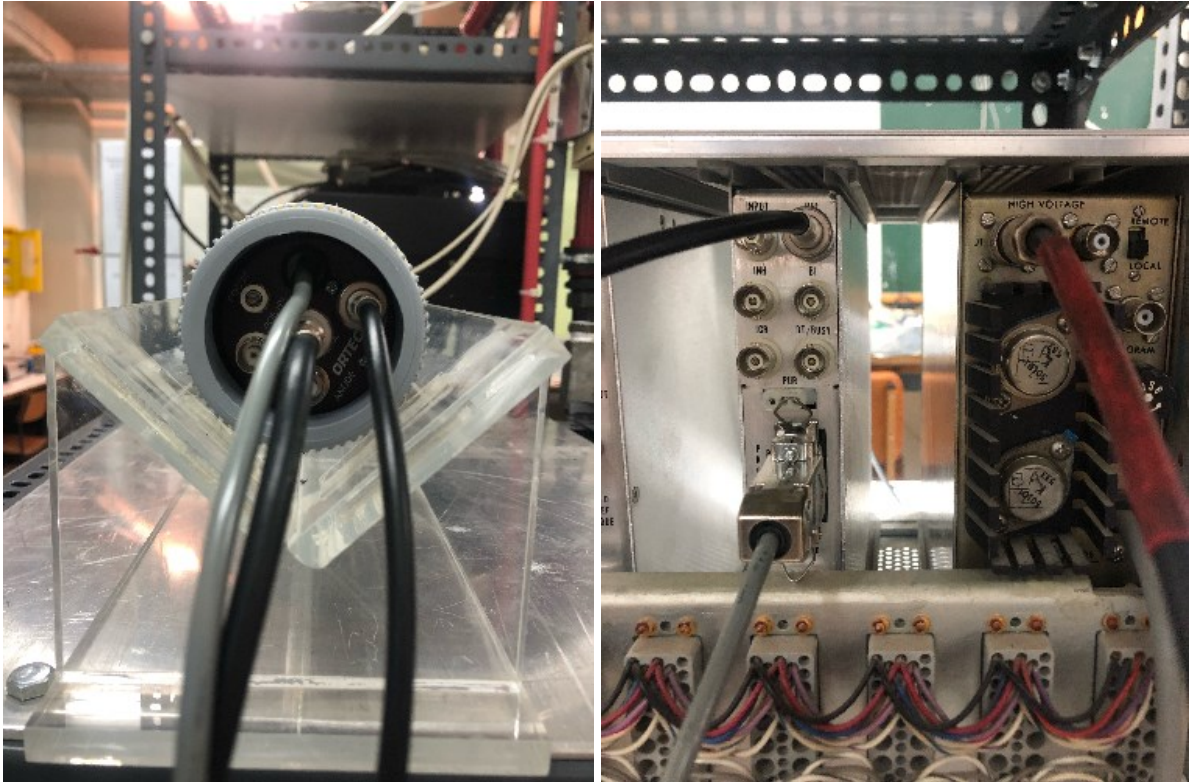
6.3 Ρυθμίσεις για τις μετρήσεις

Στην Εικόνα 6.1 διακρίνονται τα πυρηνικά ηλεκτρονικά όπως χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές μετρήσεις. Το πώς συνδέονται τα υπόψη πυρηνικά ηλεκτρονικά με τον

προενισχυτή του ανιχνευτικού συστήματος και ο ρόλος που παίζει κάθε τέτοια μονάδα έχει ήδη περιγραφεί στο Κεφάλαιο 3. Στην Εικόνα 6.2 φαίνεται το πώς συνδέεται ο προενισχυτής με την τάση των 24 V που χρειάζεται για την λειτουργία του με κατάλληλο καλώδιο που ξεκινά από το πίσω μέρος του ενισχυτή. Σημειώνεται εδώ ότι για σωστές και αποδοτικές μετρήσεις παλμών από το ανιχνευτικό σύστημα πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες ρυθμίσεις στο τροφοδοτικό του φωτοπολλαπλασιαστή, στον ενισχυτή και στον διαχωριστή. Μετά από δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με πρόχειρα ανιχνευτικά συστήματα δοχείων LC ακριβώς για να βρεθούν οι ρυθμίσεις αυτές βρέθηκε ότι:



Εικόνα 6.1: Συγκροτημένη διάταξη μετρήσεων. Πάνω, στο ντέξιον: NIM BIN με (από αριστερά) τροφοδικό υψηλής τάσης, ενισχυτής, διαχωριστής, καταμετρητής, τροφοδικό NIM. Κάτω στο τραπέζι (από δεξιά) εξωτερική μονάδα παλμογράφου, απομόνωση θορύβου USB (μαύρο κουτί στο μέσον), φορητός ΗΥ για τον παλμογράφο.



Εικόνα 6.2: Αριστερά: τροφοδοσία προενισχυτή με γκρι καλώδιο 24 V. Δεξιά: σύνδεση γκρι καλωδίου με τον ενισχυτή.

Το τροφοδοτικό ρυθμίσθηκε για μετρήσεις σε δύο υψηλές τάσεις ως εξής:

Υψηλή τάση 1: 700 V

ή

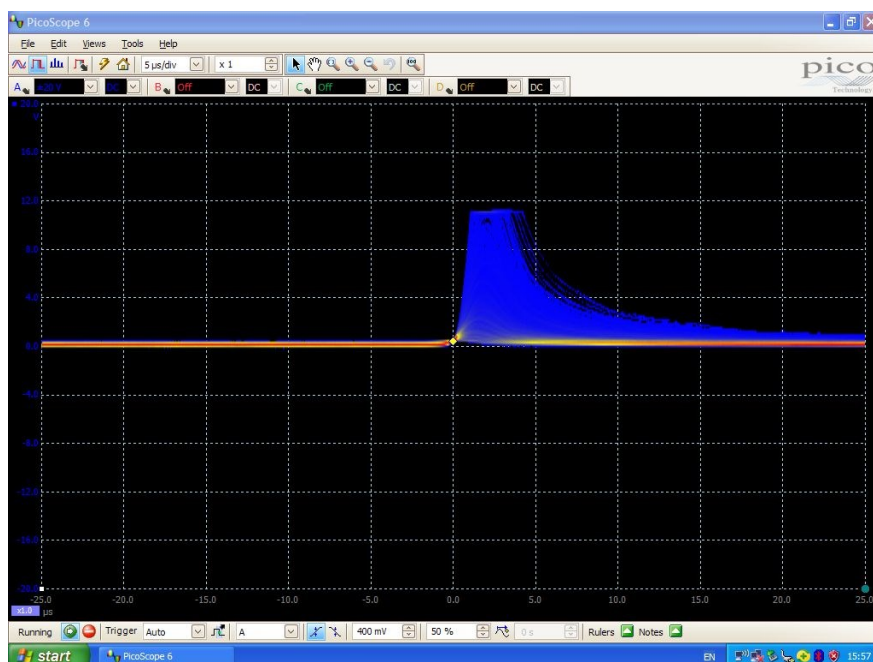
Υψηλή τάση 2: 750 V

Η πολικότητα της υψηλής τάσης ρυθμίσθηκε ως "θετική" (positive). Αυτό σημαίνει ότι το χαμηλό δυναμικό (0 V) αναπτύσσεται στο σώμα της πειραματικής διάταξης και ταυτίζεται με τη γείωση, το οποίο είναι και η πλέον συχνά σήμερα χρησιμοποιούμενη ρύθμιση, από άποψη ασφαλείας, ώστε ο χρήστης της διατάξεως να αποφεύγει τον κίνδυνο ηλεκτροπληξίας. Φυσικά με τα κατάλληλα μέτρα προστασίας η πολικότητα της υψηλής τάσης θα μπορούσε να ρυθμισθεί και αντίθετα ως "αρνητική" (negative) όπου το υψηλό δυναμικό (750 V) είναι στο σώμα της διάταξης.

Η υψηλή τάση στην περιοχή των 700 - 750 V επιλέχθηκε διότι σε αυτήν ανιχνεύονταν σήματα από διασπάσεις ραδονίου και θυγατρικών του στο δοχείο LC με ικανοποιητικό ρυθμό. Μεγαλύτερη υψηλή τάση δεν προτιμήθηκε διότι, με τη βοήθεια του παλμογράφου, διαπιστώθηκε ότι αυξάνει το πλήθος των κορεσμένων παλμών (βλ.

και την Εικόνα 6.3). Όπως ήδη αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, στα πυρηνικά ηλεκτρονικά ως κορεσμένος παλμός ορίζεται εκείνος, του οποίου το ύψος είναι μεγαλύτερο από 10 V. Επειδή όμως η έξοδος των ενισχυτών πυρηνικών ηλεκτρονικών δεν επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερη από 10 V, ο κορεσμένος παλμός εμφανίζεται στον παλμογράφο ως "λόφος" με ισοπεδωμένη κορυφή (βλ. Εικόνα 6.3). Γενικά στις διατάξεις ανιχνεύσεως πυρηνικών ακτινοβολιών οι κορεσμένοι παλμοί είναι ανεπιθύμητοι γιατί δεν επιτρέπουν τον εύκολο ενεργειακό διαχωρισμό των παλμών προκειμένου να γίνεται φασματοσκοπία. Όμως, στην περίπτωση αυτής της ΔΕ δεν πραγματοποιήθηκαν καλύτερες ρυθμίσεις διότι (α) η ανιχνευτική διάταξη δεν είναι κατάλληλη για φασματοσκοπία -α σωματιδίων και (β) φασματοσκοπία δεν απαιτείται για τη μέτρηση συγκεντρώσεων Ραδονίου.

Τυχόν σήμα που ανιχνεύεται σε τάσεις στην περιοχή από 450 έως 650 V σημαίνει ότι η ανιχνευτική διάταξη προσβάλλεται από φως του περιβάλλοντος και πρέπει άμεσα να ελεγχθεί η φωτοστεγανότητά της, δηλαδή η ακεραιότητα και η καλή τοποθέτηση των ελαστικών παρεμβυσμάτων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4. Ο έλεγχος φωτοστεγανότητας πρέπει να γίνεται χωρίς υψηλή τάση στην ανιχνευτική διάταξη, ή για περισσότερη ασφάλεια, με όλα τα πυρηνικά ηλεκτρονικά χωρίς τροφοδοσία ρεύματος. Αν και μετά τον έλεγχο ανιχνεύεται σήμα σε τάσεις στην ίδια περιοχή σημαίνει ότι το πρόβλημα δεν έχει λυθεί και ότι ο έλεγχος πρέπει να επαναληφθεί.



Εικόνα 6.3: Κορεσμένοι παλμοί παραγόμενοι από δοχείο LC και ηλεκτρονικός θόρυβος διάταξης (κόκκινη - πορτοκαλί λωρίδα)

Ο ενισχυτής ρυθμίσθηκε ως εξής:

Χονδρική Ενίσχυση (coarse gain): $\times 100$

Λεπτή ενίσχυση (fine gain): $\times 11$

Διαμόρφωση χρονικού πλάτους παλμού (shaping time): $\times 2\mu\text{s}$

Βρέθηκε ότι με τις ρυθμίσεις αυτές, σε συνδυασμό με την υψηλή τάση που επιλέχθηκε, παρατηρείται Pile-Up. Ως Pile-Up ορίζεται η σχεδόν ταυτόχρονη καταγραφή δύο ή περισσότερων παλμών σήματος από ακτινοβολία με αποτέλεσμα οι παλμοί να μην μπορούν να ξεχωρίσουν μεταξύ τους και να καταμετρηθούν χωριστά. Για να αντιμετωπίζεται το Pile-Up οι ενισχυτές των πυρηνικών ηλεκτρονικών έχουν ηλεκτρονικούς μηχανισμούς που λέγονται Pile-Up Rejectors (PUR). Οι μηχανισμοί αυτοί διαπιστώνουν την ύπαρξη ταυτόχρονων παλμών λόγω της παραμόρφωσης του συνιστάμενου παλμού και τους απορρίπτουν ως μη γενόμενους. Το φαινόμενο Pile-Up εμφανίζεται κυρίως αν η πηγή της ακτινοβολίας είναι πολύ ραδιενεργή. Όταν ο ενισχυτής μετρά με Pile-Up τότε η διαδικασία Pile-Up Rejection, καταναλώνει χρόνο, κατά τον οποίο το ηλεκτρονικό κύκλωμα ανίχνευσης δεν μπορεί να ανιχνεύσει. Ο χρόνος αυτός ονομάζεται "νεκρός χρόνος" (dead time). Το Pile-Up που παρατηρείται με τις ρυθμίσεις αυτές είναι λιγότερο έντονο από άλλες ρυθμίσεις που δοκιμάστηκαν. Το πόσο έντονο ήταν το Pile-Up δίνεται από τον ενισχυτή με ποιοτικό τρόπο με τη βοήθεια ενός λαμπτήρα LED. Όταν το Pile-Up είναι λίγο ο λαμπτήρας πάλλεται με πράσινο φως και όταν το Pile-Up είναι πολύ ο λαμπτήρας πάλλεται με έντονο κόκκινο φως. Λιγότερο Pile-Up υπήρχε στα 750 V και όταν η ραδιενέργεια στο δοχείο LC ήταν σχετικά χαμηλότερη. Για την αποφυγή του Pile-Up θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ταχύτερος ενισχυτής. Επιπλέον για το μετριάσμο του Pile-Up θα μπορούσε να επιλεγθεί μικρότερο shaping time, ώστε οι παλμοί σήματος από τις αλληλεπιδράσεις των -α σωματιδίων με το ZnS(Ag) να είναι μικρότερου χρονικού πλάτους.

Ο διαχωριστής ρυθμίσθηκε ως εξής:

Παράθυρο (window): 10 V

Κατώφλι (Lower level): 0.45 V

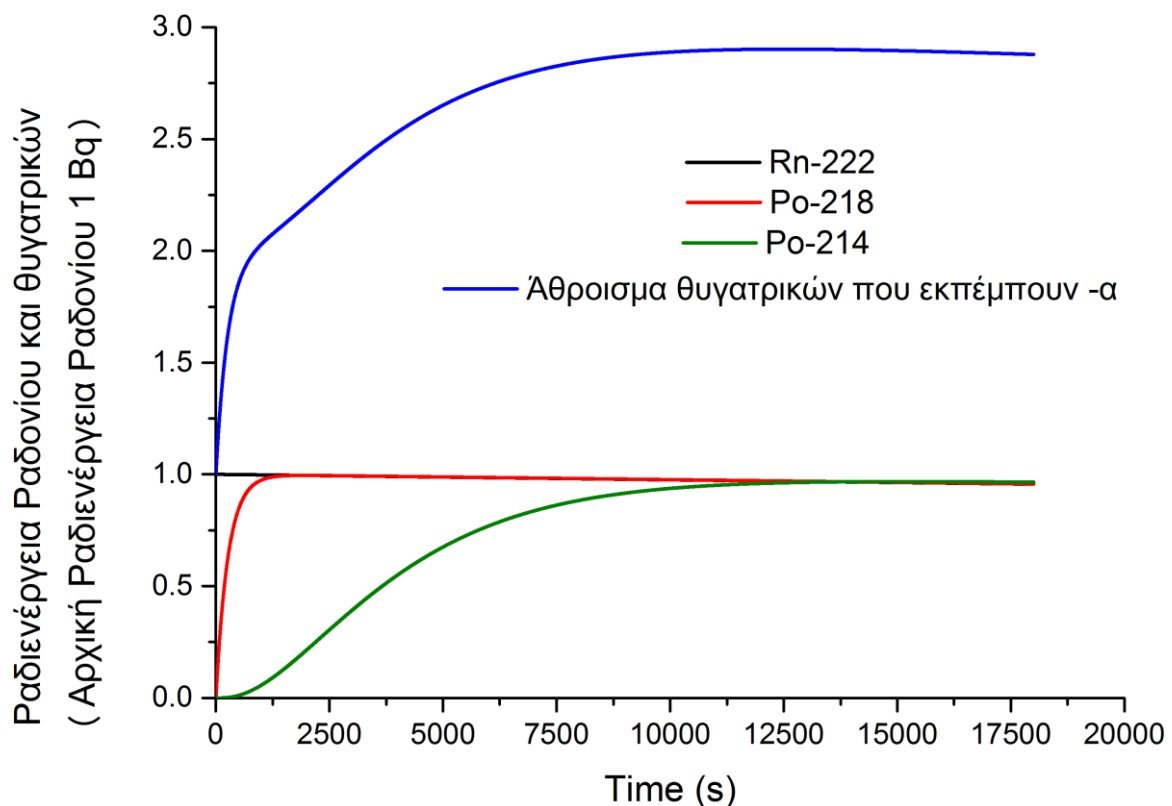
Η ρύθμιση του κατωφλίου έγινε σε αυτήν την τιμή, ώστε να αποκλεισθούν από τις μετρήσεις σήματα που οφείλονται στον ηλεκτρονικό θόρυβο της διάταξης. Τα

πειράματα ρύθμισης πραγματοποιήθηκαν με δοχεία LC που δεν είχαν ποτέ εκτεθεί σε Ραδόνιο. Η ρύθμιση κατώφλιου βρέθηκε ότι εξαρτάται πολύ από την χονδρική ενίσχυση. Η χονδρική ενίσχυση $\times 100$ δίνει τη δυνατότητα εύκολης ανίχνευσης του ενισχυμένου θορύβου. Επομένως δίνεται και η δυνατότητα εύκολης ρύθμισης του Lower level στην κατάλληλη τιμή για τον αποκλεισμό του θορύβου. Το ότι υπάρχει θόρυβος στις μετρήσεις διακρίνεται και με τη βοήθεια του παλμογράφου, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 6.3, στην οποία ο θόρυβος είναι η κόκκινη - πορτοκαλί λωρίδα. Η τιμή του θορύβου στον παλμογράφο φαίνεται να είναι στην περιοχή των μερικών δεκάδων mV. Το κατώφλι όμως αποκλεισμού του θορύβου στον διαχωριστή (Lower level) είναι, με τις ρυθμίσεις που αναφέρθηκαν, στην περιοχή του 0.5 V. Πρόκειται ασφαλώς για μια ασυμφωνία παλμογράφου και διαχωριστή, η οποία οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στη βαθμονόμηση που έκανε ο κατασκευαστής του διαχωριστή. Τέτοιες ανακολουθίες παλμογράφων και ρυθμίσεων μονάδων πυρηνικών ηλεκτρονικών παρατηρούνται συχνά.

6.4 Μετρήσεις Ραδονίου εκτός ραδιενεργού ισορροπίας

Η μετάγγιση δείγματος αέρα, ο οποίος περιέχει Ραδόνιο σε κατάλληλη συσκευή προς μέτρηση ονομάζεται "grab sampling" (λήψη δείγματος) και διαφέρει από τη διαδικασία συνεχούς μετάγγισης δείγματος προς κατάλληλη συσκευή για συνεχή μέτρηση (δηλ. continuous measurement). Τα δοχεία LC ως συσκευές μέτρησης είναι σχεδιασμένα, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, για διαδικασία μέτρησης με grab sampling, χωρίς να αποκλείεται και το continuous measurement. Για να λειτουργήσει σωστά η διαδικασία grab sampling πρέπει (α) το Ραδόνιο που οδηγείται στο δοχείο LC να είναι απαλλαγμένο από θυγατρικά και (β) η μέτρηση να γίνεται σε κατάλληλη χρονική στιγμή ή με τρόπο που να ελέγχει τη συγκέντρωση των θυγατρικών, ώστε τα θυγατρικά που αναπτύσσονται μέσα στο δοχείο LC εξαιτίας της διαδικασίας Bateman να μην ενοχλούν τα συμπεράσματα της μέτρησης. Η προϋπόθεση (α) σε αυτήν τη ΔΕ τηρείται με τη βοήθεια του ανεμιστήρα που λειτουργεί στο εσωτερικό του θαλάμου Ραδονίου και με τη βοήθεια των πλαστικών αγωγών μέσω των οποίων γίνεται η μετάγγιση του Ραδονίου στα δοχεία LC. Ο ανεμιστήρας ωθεί τα θυγατρικά του Ραδονίου που υπάρχουν στον θάλαμο προς τα τοιχώματά του, από τα οποία αυτά δεν επανέρχονται στην ατμόσφαιρα του θαλάμου. Επιπλέον οι αγωγοί μετάγγισης είναι αρκετά μεγάλου μήκους, ώστε τυχόν θυγατρικά του Ραδονίου που βρίσκονται μέσα σε αυτούς να ωθούνται και προσκολλώνται και αυτά με τη σειρά τους στα τοιχώματα των αγωγών εξαιτίας της ροής του αέρα. Ως αποτέλεσμα ο αέρας με το Ραδόνιο που εισέρχεται

μέσα στο δοχείο LC, μπορεί για τη ΔΕ να θεωρηθεί απαλλαγμένος από τα θυγατρικά του Ραδονίου. Από τη στιγμή που έχει ολοκληρωθεί η μετάγγιση, η ανάπτυξη των θυγατρικών μέσα στο δοχείο LC ακολουθεί το Διάγραμμα της Εικόνας 6.4. Γίνεται φανερό από το Διάγραμμα ότι οποιαδήποτε μέτρηση φωτός από το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του στο δοχείο LC μεταβάλλεται με το χρόνο όταν η μέτρηση γίνεται στην περιοχή χρόνων από 0 έως 12500 s, όταν δηλαδή το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του δεν έχουν έρθει ακόμη σε ισορροπία. Μια μέτρηση μπορεί να θεωρείται ότι δεν επηρεάζεται από το χρόνο που λαμβάνεται μόνο μετά από περίπου 11000 s (ή τρεις ώρες). Αυτό σημαίνει ότι ένα δοχείο LC θα είναι έτοιμο για μέτρηση μόνο τρεις ώρες μετά την μετάγγιση σε αυτό αέρα με Ραδόνιο από το θάλαμο, αυξάνοντας πολύ το χρόνο που χρειάζεται για μετρήσεις.



Εικόνα 6.4: Ανάπτυξη θυγατρικών Ραδονίου ραδιενέργειας 1 Bq, τα οποία εκπέμπουν -α σωματίδια μέσα στο δοχείο LC σε συνάρτηση με το χρόνο

6.5 Πρωτόκολλο μετρήσεων Ραδονίου εκτός ραδιενεργού ισορροπίας

6.5.1 Χρονική διάρκεια και πλήθος μετρήσεων - ρύθμιση καταμετρητή

Επιλέχθηκε κάθε μέτρηση να διαρκεί 100 s. Επιπλέον επιλέχθηκε, κάθε ομάδα μετρήσεων να αποτελείται από 15 διαδοχικές μετρήσεις των 100 s. Οι εξ ορισμού ρυθμίσεις του καταμετρητή είναι για διαδοχικές μετρήσεις διάρκειας 1 s. Για να διασφαλισθεί ο τρόπος

μετρήσεων που επιλέχθηκε, ο καταμετρητής ρυθμίσθηκε στα 100 s σύμφωνα με τα πιο κάτω βήματα που αναφέρονται στη ΔΕ του Βασδεκά (2016):

Πληκτρολόγηση (MODE) + (PROG PRESET)

για να γίνει είσοδος στην program presets mode

Πίεση του πλήκτρου (CH SEL / SCROLL)

μέχρι στην κάτω οθόνη να φανεί StdTmr A (δηλ. Standard Timer με ακρίβεια 0.01 s ή min)

Πίεση του πλήκτρου (CH SEL / ENTER)

Ρύθμιση της διάρκειας μέτρησης στα 100.00 s με τα πλήκτρα – βέλη ΠΑΝΩ – ΚΑΤΩ και ΑΡΙΣΤΕΡΑ – ΔΕΞΙΑ με προφανή τρόπο

Πίεση του πλήκτρου (CH SEL / ENTER)

για να αποθηκευτεί η ρύθμιση

Πληκτρολόγηση (MODE) + (OPER)

για να γίνει έξοδος προς την operate mode.

6.5.2 Μέτρηση υποστρώματος (και τυχόν θορύβου)

Το υπόστρωμα (και τυχόν θόρυβος) κάθε δοχείου LC μετρείται πριν γίνει η μετάγγιση ατμοσφαιρικού αέρα με Ραδόνιο από το θάλαμο Ραδονίου. Το υπόστρωμα μετρείται για δύο υψηλές τάσεις 700 και 750 V. Δεν τηρείται κάποιος κανόνας σχετικά με το ποια από τις τάσεις εξετάζεται πρώτη. Για κάθε υψηλή τάση λαμβάνεται μία ομάδα 15 διαδοχικών μετρήσεων διάρκειας 100 s η κάθε μία. Το υπόστρωμα οφείλεται κυρίως (α) σε προηγούμενες μεταγγίσεις προς το δοχείο LC με αέρα που περιέχει Ραδόνιο, (β) στην κυμαινόμενη συμπεριφορά του φωτοπολλαπλασιαστή κυρίως ανάλογα με τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και (γ) στο φυσικό υπόστρωμα Ραδονίου που περιέχει ο αέρας του περιβάλλοντος που βρίσκεται και μέσα στο δοχείο LC. Σε ό,τι αφορά το (α), οι προηγούμενες μεταγγίσεις αφήνουν στο δοχείο LC στερεά θυγατρικά του Ραδονίου με μεγάλο χρόνο ημιζωής με χαρακτηριστικότερο από όλα το Pb-210, ο οποίος διασπάται προς Po-210, το οποίο διασπώμενο με τη σειρά του εκπέμπει -α σωματίδια, τα οποία δεν έχουν σχέση με το Ραδόνιο από τρέχουσα μετάγγιση. Τα στερεά θυγατρικά του Ραδονίου από προηγούμενες μεταγγίσεις δεν μπορούν κατά κανόνα να απομακρυνθούν με την πλύση του δοχείου διότι έχουν προσκολληθεί στα τοιχώματά του ή στον ίδιο τον σπινθηριστή ZnS(Ag). Σε ό,τι αφορά το (β), έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 ότι ο φωτοπολλαπλασιαστής μεταβάλλει τη συμπεριφορά του για διάφορες αιτίες. Το προκαλούμενο επιπλέον σήμα παλμών εξαιτίας των

μεταβολών μπορεί να μετρείται ως υπόστρωμα ή ως επιπλέον θόρυβος που δεν έχει αποκλεισθεί από το ήδη ρυθμισμένο Lower level.

6.5.3 Μετάγγιση και μετρήσεις

Αφού γίνουν μετρήσεις υποστρώματος, γίνεται η μετάγγιση αέρα που περιέχει Ραδόνιο από το θάλαμο Ραδονίου με τρόπο που έχει περιγραφεί στο Κεφάλαιο 5. Ακολουθεί χρόνος αναμονής 20 min. Ο λόγος είναι ότι μετά την ολοκλήρωση της μετάγγισης ακολουθεί, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.4 μια άμεση (από τη χρονική στιγμή "μηδέν") ταχεία αύξηση της συγκέντρωσης του θυγατρικού Po-218 (βλ. κόκκινη γραμμή Εικόνα 6.4), η οποία φθάνει στη μέγιστη τιμή της σε περίπου 6 χρόνους ημιζωής του Po-218 (~3.05 min) δηλαδή σε περίπου 20 min (ή 1200 s). Ακολουθεί ραδιενεργός ισορροπία με το περιεχόμενο Ραδόνιο. Επομένως στο χρονικό διάστημα από μηδέν έως ~20 min τυχόν μετρήσεις δεν είναι αντιπροσωπευτικές για το Ραδόνιο και τα θυγατρικά του. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε και πειραματικά ως απότομη αύξηση του πλήθους του σήματος παλμών περί τα 20 min μετά το τέλος της μετάγγισης. Μετά το όριο των 20 min πραγματοποιούνται 15 διαδοχικές μετρήσεις διάρκειας 100 s για υψηλή τάση 700 και 750 V. Δεν τηρείται κάποιος κανόνας σχετικά με το ποια από τις τάσεις εξετάζεται πρώτη.

6.6 Πειραματικά αποτελέσματα για το βαθμό απόδοσης

6.6.1 Πινακοποιημένη επίλυση των εξισώσεων Bateman

Οι δύο ομάδες μετρήσεων Ραδονίου ενός δοχείου LC, σύμφωνα με το πρωτόκολλο που παρουσιάστηκε, γίνονται αφού περάσουν τα 20 min αναμονής από τη λήξη της μετάγγισης. Η πρώτη και αμέσως μετά, η δεύτερη ομάδα μετρήσεων για μία υψηλή τάση διαρκεί 25 min η κάθε μία. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι μετρήσεις γίνονται στο διάστημα από 20 έως 70 min (1200 έως 4200 s) από τη λήξη της μετάγγισης. Στο διάστημα αυτό δεν έχει αποκατασταθεί ισορροπία μεταξύ του Ραδονίου και των θυγατρικών του στο δοχείο LC (βλ. και Εικόνα 6.4). Επομένως όλες οι μετρήσεις έγιναν *εκτός ραδιενεργού ισορροπίας* σε διάστημα συνεχούς ανάπτυξης της συγκέντρωσης των θυγατρικών του Ραδονίου και ιδιαίτερα του Po-214, το οποίο διασπάται εκπέμποντας -α σωματίδια. Υπενθυμίζεται ότι για να επιτευχθεί ραδιενεργός ισορροπία του Ραδονίου με τα θυγατρικά του σε ένα χώρο, θα πρέπει να έχουν περάσει συνολικά 5 ώρες (300 min ή 18000 s). Για πρακτικές εφαρμογές θεωρείται ότι η ισορροπία έχει επιτευχθεί και νωρίτερα, στις 3 ώρες (180 min ή 10800 s). Το ότι οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν εκτός ραδιενεργού ισορροπίας εισάγει το πρόβλημα ότι ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται από τη χρονική στιγμή της μέτρησης. Για να αντιμετωπισθεί αυτό

επιλύθηκαν οι εξισώσεις Bateman (6.7) με τη βοήθεια λογιστικού φύλλου MS Excel και βήμα $\Delta t = 1 \text{ s}$. Τα αποτελέσματα της επίλυσης διακρίνονται στον Πίνακα 6.2 για ονομαστική ραδιενέργεια Ραδονίου στο δοχείο 1 Bq. Ο Πίνακας 6.2 έχει χρονικό βήμα 100 s για απλότητα.

Πίνακας 6.2: Πινακοποιημένη επίλυση των εξισώσεων Bateman για αρχική ραδιενέργεια Ραδονίου 1 Bq

t (s)	Rn-222 (Bq)	Po-218 (Bq)	Pb-214 (Bq)	Bi-214 (Bq)	Po-214 (Bq)	Pb-210 (Bq)	Bi-210 (Bq)	Po-210 (Bq)	Άθροισμα Bq -α ισοτόπων
1	1.00E+00	3.72E-03	1.60E-06	9.30E-10	9.30E-10	9.17E-19	4.02E-27	2.33E-34	1.00E+00
1200	9.97E-01	9.86E-01	3.27E-01	8.36E-02	8.36E-02	3.09E-08	3.78E-14	4.89E-19	2.07E+00
1300	9.97E-01	9.90E-01	3.55E-01	9.82E-02	9.82E-02	3.99E-08	5.33E-14	7.51E-19	2.08E+00
1400	9.97E-01	9.92E-01	3.82E-01	1.13E-01	1.13E-01	5.03E-08	7.30E-14	1.12E-18	2.10E+00
1500	9.96E-01	9.93E-01	4.08E-01	1.29E-01	1.29E-01	6.23E-08	9.77E-14	1.61E-18	2.12E+00
1600	9.96E-01	9.94E-01	4.32E-01	1.46E-01	1.46E-01	7.59E-08	1.28E-13	2.26E-18	2.14E+00
1700	9.96E-01	9.95E-01	4.56E-01	1.63E-01	1.63E-01	9.11E-08	1.64E-13	3.11E-18	2.15E+00
1800	9.96E-01	9.95E-01	4.79E-01	1.80E-01	1.80E-01	1.08E-07	2.08E-13	4.18E-18	2.17E+00
1900	9.95E-01	9.95E-01	5.01E-01	1.97E-01	1.97E-01	1.27E-07	2.59E-13	5.54E-18	2.19E+00
2000	9.95E-01	9.95E-01	5.21E-01	2.15E-01	2.15E-01	1.47E-07	3.19E-13	7.21E-18	2.21E+00
2100	9.95E-01	9.95E-01	5.41E-01	2.33E-01	2.33E-01	1.69E-07	3.88E-13	9.26E-18	2.22E+00
2200	9.95E-01	9.95E-01	5.61E-01	2.51E-01	2.51E-01	1.93E-07	4.68E-13	1.17E-17	2.24E+00
2300	9.94E-01	9.95E-01	5.79E-01	2.69E-01	2.69E-01	2.18E-07	5.58E-13	1.47E-17	2.26E+00
2400	9.94E-01	9.95E-01	5.96E-01	2.87E-01	2.87E-01	2.46E-07	6.60E-13	1.82E-17	2.28E+00
2500	9.94E-01	9.94E-01	6.13E-01	3.05E-01	3.05E-01	2.75E-07	7.74E-13	2.24E-17	2.29E+00
2600	9.94E-01	9.94E-01	6.29E-01	3.23E-01	3.23E-01	3.06E-07	9.01E-13	2.72E-17	2.31E+00
2700	9.93E-01	9.94E-01	6.45E-01	3.40E-01	3.40E-01	3.39E-07	1.04E-12	3.29E-17	2.33E+00
2800	9.93E-01	9.94E-01	6.59E-01	3.58E-01	3.58E-01	3.73E-07	1.20E-12	3.94E-17	2.34E+00
2900	9.93E-01	9.93E-01	6.73E-01	3.75E-01	3.75E-01	4.09E-07	1.37E-12	4.68E-17	2.36E+00
3000	9.93E-01	9.93E-01	6.87E-01	3.93E-01	3.93E-01	4.47E-07	1.56E-12	5.53E-17	2.38E+00
3100	9.92E-01	9.93E-01	7.00E-01	4.10E-01	4.10E-01	4.87E-07	1.76E-12	6.49E-17	2.39E+00
3200	9.92E-01	9.93E-01	7.12E-01	4.26E-01	4.26E-01	5.28E-07	1.98E-12	7.58E-17	2.41E+00
3300	9.92E-01	9.93E-01	7.24E-01	4.43E-01	4.43E-01	5.71E-07	2.22E-12	8.80E-17	2.43E+00
3400	9.92E-01	9.92E-01	7.35E-01	4.59E-01	4.59E-01	6.15E-07	2.48E-12	1.02E-16	2.44E+00
3500	9.91E-01	9.92E-01	7.46E-01	4.75E-01	4.75E-01	6.61E-07	2.76E-12	1.17E-16	2.46E+00
3600	9.91E-01	9.92E-01	7.57E-01	4.90E-01	4.90E-01	7.09E-07	3.06E-12	1.34E-16	2.47E+00
3700	9.91E-01	9.92E-01	7.67E-01	5.06E-01	5.06E-01	7.58E-07	3.39E-12	1.52E-16	2.49E+00

t (s)	Rn-222 (Bq)	Po-218 (Bq)	Pb-214 (Bq)	Bi-214 (Bq)	Po-214 (Bq)	Pb-210 (Bq)	Bi-210 (Bq)	Po-210 (Bq)	Άθροισμα Βq -α ισοτόπων
3800	9.91E-01	9.91E-01	7.76E-01	5.21E-01	5.21E-01	8.08E-07	3.73E-12	1.73E-16	2.50E+00
3900	9.90E-01	9.91E-01	7.85E-01	5.35E-01	5.35E-01	8.60E-07	4.09E-12	1.96E-16	2.52E+00
4000	9.90E-01	9.91E-01	7.94E-01	5.50E-01	5.50E-01	9.14E-07	4.48E-12	2.21E-16	2.53E+00
4100	9.90E-01	9.91E-01	8.02E-01	5.64E-01	5.64E-01	9.69E-07	4.90E-12	2.48E-16	2.54E+00
4200	9.90E-01	9.90E-01	8.10E-01	5.77E-01	5.77E-01	1.02E-06	5.33E-12	2.77E-16	2.56E+00
4300	9.89E-01	9.90E-01	8.18E-01	5.91E-01	5.91E-01	1.08E-06	5.79E-12	3.10E-16	2.57E+00
4400	9.89E-01	9.90E-01	8.25E-01	6.04E-01	6.04E-01	1.14E-06	6.28E-12	3.45E-16	2.58E+00
4500	9.89E-01	9.90E-01	8.32E-01	6.16E-01	6.16E-01	1.20E-06	6.80E-12	3.83E-16	2.59E+00
4600	9.89E-01	9.89E-01	8.38E-01	6.29E-01	6.29E-01	1.26E-06	7.34E-12	4.24E-16	2.61E+00
4700	9.88E-01	9.89E-01	8.45E-01	6.41E-01	6.41E-01	1.33E-06	7.90E-12	4.68E-16	2.62E+00
4800	9.88E-01	9.89E-01	8.51E-01	6.52E-01	6.52E-01	1.39E-06	8.50E-12	5.15E-16	2.63E+00
4900	9.88E-01	9.89E-01	8.57E-01	6.64E-01	6.64E-01	1.45E-06	9.12E-12	5.66E-16	2.64E+00
5000	9.88E-01	9.88E-01	8.62E-01	6.75E-01	6.75E-01	1.52E-06	9.77E-12	6.21E-16	2.65E+00
∞	9.56E-01	9.57E-01	9.62E-01	9.65E-01	9.65E-01	1.33E-05	4.18E-10	1.19E-13	2.88E+00

6.6.2 Βαθμός απόδοσης δοχείων LC

Γενικά

Υπενθυμίζεται ότι κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν, έξι δοχεία LC (με αύξοντα αριθμό από 1 έως 6), το κάθε ένα από τα οποία βαθμονομήθηκε σε δύο τιμές συγκέντρωσης Ραδονίου. Οι βαθμονομήσεις κωδικοποιούνται με το σύμβολο x.A και x.B, όπου x ο αύξων αριθμός του δοχείου, A η μία τιμή συγκέντρωσης Ραδονίου, B η άλλη τιμή συγκέντρωσης Ραδονίου.

Η ποσότητα Ραδονίου R_0 σε ένα δοχείο LC προκύπτει από τη σχέση:

$$R_0 = \frac{1000 \times R}{10^6} V_{LC} \quad (6.10)$$

όπου

R_0 σε Bq

$$V_{LC} = 255 \text{ cm}^3$$

και

R η συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο Ραδονίου σε kBqm^{-3}

Ο βαθμός απόδοσης του δοχείου σε cpmBq^{-1} -α ισοτόπων σε ένα διάστημα 100 s μετρήσεων προκύπτει ως

$$BA = \frac{\frac{\text{γεγονότα} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{min}}}{100 \text{ s}} - \frac{\text{υπόστρωμα} \times \frac{60 \text{ s}}{\text{min}}}{100 \text{ s}}}{\text{Bq -α ισοτόπων}} = \frac{\text{cpm γεγονότων} - \text{cpm υποστρώματος}}{\text{Bq -α ισοτόπων}} \quad (6.11)$$

Για τον παρονομαστή της σχέσης (6.11) χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.2, πολλαπλασιασμένα $\times R_0$ για τις χρονικές στιγμές από 1220 s έως 4100 s ανά 100 s.

Δοχείο #1 Χαρακτηριστικά: Ο σπινθηριστής ZnS(Ag) έχει επικολληθεί στο εσωτερικό του κυλινδρικού τοιχώματος του δοχείου.

Βαθμονόμηση #1.Α Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 50.338 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 12.84 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.3

Πίνακας 6.3 Βαθμονόμηση 1.Α

A/A	BKG@750V	BKG@700V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	19	19	1200	2277	2.65E+01	2700	2239	2.99E+01	4.45E+01	5.11E+01	
2	14	14	1300	2321	2.67E+01	2800	2267	3.01E+01	4.49E+01	5.18E+01	
3	19	19	1400	2379	2.69E+01	2900	2340	3.03E+01	4.60E+01	5.26E+01	
4	17	16	1500	2458	2.71E+01	3000	2310	3.05E+01	4.51E+01	5.40E+01	
5	26	25	1600	2387	2.73E+01	3100	2312	3.07E+01	4.47E+01	5.19E+01	
6	30	28	1700	2400	2.76E+01	3200	2320	3.09E+01	4.45E+01	5.15E+01	
7	14	13	1800	2503	2.78E+01	3300	2269	3.11E+01	4.35E+01	5.37E+01	
8	25	24	1900	2487	2.80E+01	3400	2358	3.13E+01	4.47E+01	5.28E+01	
9	27	25	2000	2504	2.82E+01	3500	2269	3.15E+01	4.27E+01	5.27E+01	
10	21	21	2100	2405	2.85E+01	3600	2370	3.17E+01	4.45E+01	5.02E+01	
11	22	21	2200	2488	2.87E+01	3700	2372	3.19E+01	4.42E+01	5.16E+01	
12	21	22	2300	2427	2.89E+01	3800	2494	3.21E+01	4.62E+01	5.00E+01	
13	18	18	2400	2435	2.91E+01	3900	2397	3.23E+01	4.42E+01	4.98E+01	
14	23	22	2500	2510	2.93E+01	4000	2383	3.25E+01	4.36E+01	5.09E+01	
15	19	19	2600	2446	2.96E+01	4100	2391	3.26E+01	4.37E+01	4.92E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	4.45E+01	5.16E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	9.04E-01	1.43E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	2.0%	2.8%

Βαθμονόμηση #1.Β

Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 11.816 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 3.01 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.4

Πίνακας 6.4 Βαθμονόμηση 1.Β

A/A	BKG@700V	BKG@750V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	153	171	1200	455	6.23E+00	2700	590	7.01E+00	2.91E+01	3.59E+01	
2	148	187	1300	440	6.28E+00	2800	598	7.07E+00	2.79E+01	3.49E+01	
3	142	174	1400	422	6.33E+00	2900	550	7.12E+00	2.65E+01	3.17E+01	
4	158	164	1500	481	6.38E+00	3000	561	7.17E+00	3.04E+01	3.32E+01	
5	154	184	1600	456	6.44E+00	3100	635	7.22E+00	2.81E+01	3.75E+01	
6	164	186	1700	450	6.49E+00	3200	571	7.27E+00	2.64E+01	3.18E+01	
7	151	158	1800	498	6.54E+00	3300	622	7.31E+00	3.18E+01	3.81E+01	
8	115	180	1900	461	6.59E+00	3400	598	7.36E+00	3.15E+01	3.41E+01	
9	124	174	2000	456	6.64E+00	3500	589	7.41E+00	3.00E+01	3.36E+01	
10	156	203	2100	473	6.70E+00	3600	650	7.45E+00	2.84E+01	3.60E+01	
11	157	190	2200	491	6.75E+00	3700	663	7.50E+00	2.97E+01	3.78E+01	
12	148	184	2300	462	6.80E+00	3800	620	7.54E+00	2.77E+01	3.47E+01	
13	158	163	2400	479	6.86E+00	3900	617	7.58E+00	2.81E+01	3.59E+01	
14	164	177	2500	491	6.91E+00	4000	609	7.63E+00	2.84E+01	3.40E+01	
15	146	173	2600	460	6.96E+00	4100	642	7.67E+00	2.71E+01	3.67E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	2.87E+01	3.51E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.65E+00	2.03E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	5.7%	5.8%

Δοχείο #2 Χαρακτηριστικά: Ο σπινθηριστής ZnS(Ag) έχει επικολληθεί φύλλο αντικολλητικό χαρτί (λαδόκολλα) στο εσωτερικό του κυλινδρικού τοιχώματος του δοχείου.

Βαθμονόμηση #2.Α Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 42.969 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 10.96 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.5

Πίνακας 6.5 Βαθμονόμηση 2.Α

A/A	BKG@700V	BKG@750V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)
1	72	85	1200	1103	2.26E+01	2700	1532	2.55E+01	2.74E+01	3.40E+01
2	78	82	1300	1180	2.28E+01	2800	1564	2.57E+01	2.90E+01	3.46E+01
3	61	77	1400	1160	2.30E+01	2900	1544	2.59E+01	2.87E+01	3.40E+01
4	76	73	1500	1140	2.32E+01	3000	1576	2.61E+01	2.75E+01	3.46E+01
5	61	97	1600	1140	2.34E+01	3100	1526	2.62E+01	2.77E+01	3.27E+01
6	66	87	1700	1147	2.36E+01	3200	1513	2.64E+01	2.75E+01	3.24E+01
7	67	94	1800	1187	2.38E+01	3300	1511	2.66E+01	2.82E+01	3.20E+01
8	57	66	1900	1224	2.40E+01	3400	1495	2.68E+01	2.92E+01	3.20E+01
9	69	92	2000	1160	2.42E+01	3500	1555	2.69E+01	2.70E+01	3.26E+01
10	68	87	2100	1174	2.44E+01	3600	1621	2.71E+01	2.72E+01	3.40E+01
11	69	88	2200	1203	2.45E+01	3700	1516	2.73E+01	2.78E+01	3.14E+01
12	58	76	2300	1221	2.47E+01	3800	1521	2.74E+01	2.83E+01	3.16E+01
13	80	79	2400	1280	2.49E+01	3900	1454	2.76E+01	2.89E+01	2.99E+01
14	57	86	2500	1174	2.51E+01	4000	1615	2.77E+01	2.67E+01	3.31E+01
15	63	77	2600	1220	2.53E+01	4100	1648	2.79E+01	2.74E+01	3.38E+01
ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ									2.79E+01	3.28E+01
ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ									7.67E-01	1.34E+00
ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ									2.7%	4.1%

Βαθμονόμηση #2.Β Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 9.709 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 2.48 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.6

Πίνακας 6.6 Βαθμονόμηση 2.Β

A/A	BKG@700V	BKG@750V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	137	179	1200	245	5.12E+00	2700	337	5.76E+00	1.27E+01	1.65E+01	
2	147	192	1300	230	5.16E+00	2800	310	5.81E+00	9.65E+00	1.22E+01	
3	192	196	1400	254	5.20E+00	2900	293	5.85E+00	7.15E+00	9.95E+00	
4	150	200	1500	242	5.25E+00	3000	316	5.89E+00	1.05E+01	1.18E+01	
5	165	184	1600	243	5.29E+00	3100	336	5.93E+00	8.85E+00	1.54E+01	
6	166	194	1700	211	5.33E+00	3200	327	5.97E+00	5.07E+00	1.34E+01	
7	144	194	1800	246	5.37E+00	3300	300	6.01E+00	1.14E+01	1.06E+01	
8	168	217	1900	266	5.42E+00	3400	297	6.05E+00	1.08E+01	7.93E+00	
9	167	176	2000	255	5.46E+00	3500	308	6.09E+00	9.67E+00	1.30E+01	
10	147	194	2100	242	5.50E+00	3600	296	6.12E+00	1.04E+01	1.00E+01	
11	126	171	2200	234	5.55E+00	3700	329	6.16E+00	1.17E+01	1.54E+01	
12	155	197	2300	255	5.59E+00	3800	332	6.20E+00	1.07E+01	1.31E+01	
13	128	190	2400	277	5.63E+00	3900	296	6.23E+00	1.59E+01	1.02E+01	
14	155	187	2500	258	5.68E+00	4000	309	6.27E+00	1.09E+01	1.17E+01	
15	170	195	2600	244	5.72E+00	4100	314	6.30E+00	7.76E+00	1.13E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	1.02E+01	1.22E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	2.50E+00	2.35E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	24.4%	19.3%

Δοχείο #3 Χαρακτηριστικά: Χρησιμοποιήθηκε το εμπορικά διαθέσιμο φύλλο με σπινθηριστή ZnS(Ag), το οποίο τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του κυλινδρικού τοιχώματος του δοχείου.

Βαθμονόμηση #3.Α Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 35.619 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 9.08 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.7

Πίνακας 6.7 Βαθμονόμηση 3.Α

A/A	BKG@700V	BKG@750V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	106	118	1200	1232	1.88E+01	2700	1473	2.11E+01	3.59E+01	3.85E+01	
2	92	125	1300	1084	1.89E+01	2800	1424	2.13E+01	3.15E+01	3.66E+01	
3	116	203	1400	1091	1.91E+01	2900	1470	2.15E+01	3.06E+01	3.54E+01	
4	91	217	1500	1139	1.92E+01	3000	1438	2.16E+01	3.28E+01	3.39E+01	
5	89	188	1600	1186	1.94E+01	3100	1476	2.18E+01	3.39E+01	3.54E+01	
6	110	181	1700	1167	1.96E+01	3200	1472	2.19E+01	3.24E+01	3.54E+01	
7	96	121	1800	1235	1.97E+01	3300	1477	2.20E+01	3.47E+01	3.70E+01	
8	94	117	1900	1229	1.99E+01	3400	1410	2.22E+01	3.42E+01	3.49E+01	
9	102	114	2000	1156	2.00E+01	3500	1548	2.23E+01	3.16E+01	3.86E+01	
10	98	114	2100	1203	2.02E+01	3600	1519	2.25E+01	3.28E+01	3.75E+01	
11	104	147	2200	1203	2.03E+01	3700	1534	2.26E+01	3.25E+01	3.68E+01	
12	94	105	2300	1232	2.05E+01	3800	1622	2.27E+01	3.33E+01	4.01E+01	
13	109	123	2400	1225	2.07E+01	3900	1598	2.29E+01	3.23E+01	3.86E+01	
14	115	119	2500	1153	2.08E+01	4000	1555	2.30E+01	2.99E+01	3.75E+01	
15	85	117	2600	1268	2.10E+01	4100	1591	2.31E+01	3.38E+01	3.83E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.28E+01	3.70E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.57E+00	1.71E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	4.8%	4.6%

Βαθμονόμηση #3.Β Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 47.515 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 12.12 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.8

Πίνακας 6.8 Βαθμονόμηση 3.Β

A/A	BKG@700V	BKG@750V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	166	176	1200	2089	2.50E+01	2700	2428	2.82E+01	4.62E+01	4.79E+01	
2	142	186	1300	2081	2.53E+01	2800	2456	2.84E+01	4.60E+01	4.80E+01	
3	158	195	1400	2155	2.55E+01	2900	2467	2.86E+01	4.70E+01	4.77E+01	
4	135	194	1500	2027	2.57E+01	3000	2484	2.88E+01	4.42E+01	4.77E+01	
5	162	212	1600	2081	2.59E+01	3100	2430	2.90E+01	4.45E+01	4.59E+01	
6	197	190	1700	2089	2.61E+01	3200	2429	2.92E+01	4.35E+01	4.60E+01	
7	142	165	1800	2114	2.63E+01	3300	2535	2.94E+01	4.50E+01	4.84E+01	
8	166	173	1900	2059	2.65E+01	3400	2433	2.96E+01	4.29E+01	4.58E+01	
9	154	215	2000	2129	2.67E+01	3500	2476	2.98E+01	4.44E+01	4.55E+01	
10	167	202	2100	2106	2.69E+01	3600	2361	3.00E+01	4.32E+01	4.32E+01	
11	152	201	2200	2200	2.71E+01	3700	2441	3.01E+01	4.53E+01	4.47E+01	
12	171	195	2300	2128	2.74E+01	3800	2431	3.03E+01	4.29E+01	4.43E+01	
13	155	216	2400	2027	2.76E+01	3900	2509	3.05E+01	4.07E+01	4.51E+01	
14	153	182	2500	2192	2.78E+01	4000	2487	3.07E+01	4.40E+01	4.50E+01	
15	165	196	2600	2146	2.80E+01	4100	2491	3.08E+01	4.25E+01	4.47E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	4.41E+01	4.60E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.63E+00	1.59E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	3.7%	3.5%

Δοχείο #4 Χαρακτηριστικά: Ο σπινθηριστής ZnS(Ag) έχει επικολληθεί διαφανές πλαστικό φύλλο βιβλιοδεσίας στο εσωτερικό του κυλινδρικού τοιχώματος του δοχείου.

Βαθμονόμηση #4.A Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 28.365 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 7.23 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.9

Πίνακας 6.9 Βαθμονόμηση 4.A

A/A	BKG@750V	BKG@700V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	70	61	1200	945	1.50E+01	2700	882	1.68E+01	2.93E+01	3.50E+01	
2	54	69	1300	919	1.51E+01	2800	957	1.70E+01	3.13E+01	3.44E+01	
3	59	58	1400	904	1.52E+01	2900	953	1.71E+01	3.14E+01	3.34E+01	
4	64	48	1500	890	1.53E+01	3000	998	1.72E+01	3.31E+01	3.24E+01	
5	81	50	1600	966	1.54E+01	3100	950	1.73E+01	3.12E+01	3.45E+01	
6	56	54	1700	1005	1.56E+01	3200	976	1.74E+01	3.18E+01	3.65E+01	
7	65	48	1800	962	1.57E+01	3300	954	1.76E+01	3.09E+01	3.43E+01	
8	69	46	1900	936	1.58E+01	3400	997	1.77E+01	3.22E+01	3.29E+01	
9	56	47	2000	948	1.60E+01	3500	1027	1.78E+01	3.30E+01	3.35E+01	
10	32	43	2100	971	1.61E+01	3600	1011	1.79E+01	3.24E+01	3.50E+01	
11	55	58	2200	1002	1.62E+01	3700	995	1.80E+01	3.12E+01	3.51E+01	
12	50	58	2300	1005	1.63E+01	3800	986	1.81E+01	3.08E+01	3.52E+01	
13	53	57	2400	1036	1.65E+01	3900	958	1.82E+01	2.97E+01	3.57E+01	
14	48	50	2500	1053	1.66E+01	4000	1062	1.83E+01	3.32E+01	3.63E+01	
15	48	52	2600	1066	1.67E+01	4100	1024	1.84E+01	3.17E+01	3.66E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.16E+01	3.47E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.15E+00	1.29E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	3.6%	3.7%

Βαθμονόμηση #4.Β Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 40.559 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 10.34 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.10

Πίνακας 6.10 Βαθμονόμηση 4.Β

A/A	BKG@700V	BKG@750V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	129	142	1200	1187	2.14E+01	2700	1559	2.41E+01	2.97E+01	3.53E+01	
2	119	171	1300	1200	2.16E+01	2800	1520	2.43E+01	3.00E+01	3.33E+01	
3	119	145	1400	1258	2.17E+01	2900	1624	2.44E+01	3.15E+01	3.64E+01	
4	121	165	1500	1218	2.19E+01	3000	1588	2.46E+01	3.01E+01	3.47E+01	
5	134	142	1600	1302	2.21E+01	3100	1619	2.48E+01	3.17E+01	3.57E+01	
6	114	132	1700	1221	2.23E+01	3200	1633	2.49E+01	2.98E+01	3.62E+01	
7	130	153	1800	1213	2.24E+01	3300	1635	2.51E+01	2.90E+01	3.54E+01	
8	130	139	1900	1219	2.26E+01	3400	1757	2.53E+01	2.89E+01	3.84E+01	
9	120	152	2000	1288	2.28E+01	3500	1653	2.54E+01	3.07E+01	3.55E+01	
10	133	160	2100	1307	2.30E+01	3600	1653	2.56E+01	3.06E+01	3.50E+01	
11	125	178	2200	1295	2.32E+01	3700	1643	2.57E+01	3.03E+01	3.42E+01	
12	128	165	2300	1365	2.34E+01	3800	1757	2.59E+01	3.17E+01	3.69E+01	
13	119	144	2400	1313	2.35E+01	3900	1730	2.60E+01	3.05E+01	3.66E+01	
14	118	162	2500	1337	2.37E+01	4000	1622	2.62E+01	3.09E+01	3.34E+01	
15	125	127	2600	1344	2.39E+01	4100	1692	2.63E+01	3.06E+01	3.57E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.04E+01	3.55E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	8.63E-01	1.32E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	2.8%	3.7%

Δοχείο #5 Χαρακτηριστικά: Χρησιμοποιήθηκε (για δεύτερη φορά σε άλλο δοχείο) το εμπορικά διαθέσιμο φύλλο με σπινθηριστή ZnS(Ag), το οποίο τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του κυλινδρικού τοιχώματος του δοχείου.

Βαθμονόμηση #5.A Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 24.839 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 6.22 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.11

Πίνακας 6.11 Βαθμονόμηση 5.A

A/A	BKG@750V	BKG@700V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	19	18	1200	841	1.29E+01	2700	829	1.45E+01	3.36E+01	3.82E+01	
2	18	28	1300	815	1.30E+01	2800	913	1.46E+01	3.64E+01	3.68E+01	
3	18	17	1400	846	1.31E+01	2900	920	1.47E+01	3.69E+01	3.79E+01	
4	25	24	1500	926	1.32E+01	3000	858	1.48E+01	3.38E+01	4.10E+01	
5	25	16	1600	850	1.33E+01	3100	925	1.49E+01	3.66E+01	3.72E+01	
6	25	23	1700	862	1.34E+01	3200	838	1.50E+01	3.26E+01	3.75E+01	
7	21	17	1800	889	1.35E+01	3300	906	1.51E+01	3.53E+01	3.86E+01	
8	34	21	1900	940	1.36E+01	3400	935	1.52E+01	3.61E+01	4.00E+01	
9	31	22	2000	901	1.37E+01	3500	944	1.53E+01	3.62E+01	3.81E+01	
10	34	24	2100	918	1.38E+01	3600	890	1.54E+01	3.37E+01	3.84E+01	
11	33	17	2200	881	1.39E+01	3700	915	1.55E+01	3.48E+01	3.66E+01	
12	35	28	2300	909	1.40E+01	3800	924	1.56E+01	3.45E+01	3.75E+01	
13	37	19	2400	1019	1.42E+01	3900	949	1.57E+01	3.55E+01	4.15E+01	
14	24	19	2500	905	1.43E+01	4000	901	1.57E+01	3.37E+01	3.70E+01	
15	27	11	2600	993	1.44E+01	4100	912	1.58E+01	3.42E+01	4.03E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.49E+01	3.84E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.31E+00	1.54E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	3.8%	4.0%

Βαθμονόμηση #5.Β Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 40.559 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 10.34 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.12

Πίνακας 6.12 Βαθμονόμηση 5.Β

A/A	BKG@700V	BKG@750V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	45	56	1200	1277	2.14E+01	2700	1558	2.41E+01	3.45E+01	3.74E+01	
2	51	68	1300	1305	2.16E+01	2800	1696	2.43E+01	3.48E+01	4.02E+01	
3	44	53	1400	1207	2.17E+01	2900	1609	2.44E+01	3.22E+01	3.83E+01	
4	40	69	1500	1282	2.19E+01	3000	1636	2.46E+01	3.40E+01	3.82E+01	
5	36	59	1600	1340	2.21E+01	3100	1701	2.48E+01	3.54E+01	3.97E+01	
6	39	57	1700	1349	2.23E+01	3200	1613	2.49E+01	3.52E+01	3.75E+01	
7	53	54	1800	1344	2.24E+01	3300	1662	2.51E+01	3.46E+01	3.84E+01	
8	30	56	1900	1370	2.26E+01	3400	1718	2.53E+01	3.56E+01	3.94E+01	
9	27	52	2000	1313	2.28E+01	3500	1732	2.54E+01	3.38E+01	3.97E+01	
10	41	53	2100	1273	2.30E+01	3600	1728	2.56E+01	3.21E+01	3.93E+01	
11	44	64	2200	1413	2.32E+01	3700	1716	2.57E+01	3.54E+01	3.86E+01	
12	46	71	2300	1468	2.34E+01	3800	1722	2.59E+01	3.65E+01	3.82E+01	
13	47	49	2400	1417	2.35E+01	3900	1759	2.60E+01	3.50E+01	3.95E+01	
14	26	52	2500	1424	2.37E+01	4000	1772	2.62E+01	3.54E+01	3.94E+01	
15	42	70	2600	1469	2.39E+01	4100	1740	2.63E+01	3.58E+01	3.81E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.47E+01	3.88E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.23E+00	8.56E-01
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	3.5%	2.2%

Δοχείο #6 Χαρακτηριστικά: Χρησιμοποιήθηκε το εμπορικά διαθέσιμο φύλλο με σπινθηριστή ZnS(Ag), το οποίο τοποθετήθηκε στο εσωτερικό του κυλινδρικού τοιχώματος του δοχείου. Μεταξύ του κυλινδρικού τοιχώματος και του φύλλου τοποθετήθηκε κύλινδρος από λεπτό φύλλο αλουμινίου, ώστε να ενισχυθεί η ανάκλαση του φωτός που παράγεται στον σπινθηριστή.

Βαθμονόμηση #6.Α Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 14.270 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 3.64 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.13

Πίνακας 6.13 Βαθμονόμηση 6.Α

A/A	BKG@750V	BKG@700V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	32	14	1200	439	7.52E+00	2700	508	8.47E+00	3.50E+01	3.25E+01	
2	33	28	1300	466	7.59E+00	2800	478	8.53E+00	3.17E+01	3.42E+01	
3	31	14	1400	509	7.65E+00	2900	544	8.59E+00	3.70E+01	3.75E+01	
4	22	29	1500	538	7.71E+00	3000	497	8.65E+00	3.25E+01	4.02E+01	
5	30	11	1600	560	7.77E+00	3100	528	8.71E+00	3.56E+01	4.09E+01	
6	28	20	1700	560	7.83E+00	3200	477	8.77E+00	3.13E+01	4.08E+01	
7	21	13	1800	566	7.90E+00	3300	524	8.83E+00	3.47E+01	4.14E+01	
8	32	19	1900	498	7.96E+00	3400	493	8.89E+00	3.20E+01	3.51E+01	
9	30	25	2000	470	8.02E+00	3500	482	8.95E+00	3.06E+01	3.29E+01	
10	36	16	2100	497	8.09E+00	3600	514	9.00E+00	3.32E+01	3.42E+01	
11	33	16	2200	521	8.15E+00	3700	505	9.05E+00	3.24E+01	3.59E+01	
12	32	25	2300	567	8.22E+00	3800	526	9.11E+00	3.30E+01	3.91E+01	
13	29	56	2400	550	8.28E+00	3900	511	9.16E+00	2.98E+01	3.78E+01	
14	34	13	2500	551	8.34E+00	4000	504	9.21E+00	3.20E+01	3.72E+01	
15	28	13	2600	631	8.41E+00	4100	468	9.26E+00	2.95E+01	4.30E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.27E+01	3.75E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	2.14E+00	3.31E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	6.6%	8.8%

Βαθμονόμηση #6.Β Αποτελέσματα για συγκέντρωση Ραδονίου στο θάλαμο $R = 23.021 \text{ kBq m}^{-3}$ (ισοδύναμα $R_0 = 5.87 \text{ Bq}$), βλ. Πίνακα 6.12

Πίνακας 6.14 Βαθμονόμηση 6.Β

A/A	BKG@700V	BKG@750V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 700 V (s)	Γεγονότα/100s @ 700 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 700 V	Χρονική ακολουθία μετρήσεων @ 750 V (s)	Γεγονότα/100s @ 750 V	Bq -α ισοτόπων στο δοχείο LC @ 750 V	BA @700V (cpm Bq ⁻¹)	BA @750V (cpm Bq ⁻¹)	
1	64	92	1200	768	1.21E+01	2700	1053	1.37E+01	3.49E+01	4.21E+01	
2	63	67	1300	759	1.22E+01	2800	987	1.38E+01	3.42E+01	4.00E+01	
3	56	86	1400	807	1.23E+01	2900	986	1.39E+01	3.66E+01	3.88E+01	
4	58	78	1500	814	1.24E+01	3000	1046	1.40E+01	3.66E+01	4.15E+01	
5	55	91	1600	771	1.25E+01	3100	1039	1.41E+01	3.44E+01	4.03E+01	
6	73	77	1700	755	1.26E+01	3200	994	1.42E+01	3.25E+01	3.87E+01	
7	66	78	1800	851	1.27E+01	3300	1024	1.42E+01	3.71E+01	4.00E+01	
8	64	66	1900	842	1.28E+01	3400	1051	1.43E+01	3.65E+01	4.13E+01	
9	70	90	2000	839	1.29E+01	3500	1087	1.44E+01	3.58E+01	4.15E+01	
10	66	106	2100	860	1.30E+01	3600	1066	1.45E+01	3.66E+01	3.97E+01	
11	63	76	2200	861	1.32E+01	3700	1138	1.46E+01	3.63E+01	4.36E+01	
12	57	86	2300	851	1.33E+01	3800	1106	1.47E+01	3.58E+01	4.16E+01	
13	68	83	2400	879	1.34E+01	3900	1046	1.48E+01	3.63E+01	3.90E+01	
14	71	90	2500	886	1.35E+01	4000	1076	1.49E+01	3.62E+01	3.97E+01	
15	59	85	2600	918	1.36E+01	4100	1122	1.49E+01	3.79E+01	4.18E+01	
									ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	3.58E+01	4.07E+01
									ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	1.35E+00	1.40E+00
									ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ	3.8%	3.4%

6.7 Συμπεράσματα για το βαθμό απόδοσης

6.7.1 Γενικά

Το πρώτο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η τεχνική των δοχείων LC όπως εφαρμόστηκε σε αυτή τη ΔΕ, καταλήγει σε αποτελέσματα που δείχνουν ότι μπορούν με αυτή να μετρηθούν συγκεντρώσεις Ραδονίου. Σημειώνεται ότι η τεχνική αυτή δοκιμάστηκε για πρώτη φορά στο ΕΠΤ-ΕΜΠ και για να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητά της χρησιμοποιήθηκαν μεγάλες συγκεντρώσεις Ραδονίου στο θάλαμο Ραδονίου. Από τα πειράματα βαθμονόμησης που πραγματοποιήθηκαν, το πείραμα #2.B πρέπει να απορριφθεί από την συνολική αξιολόγηση, ως πολύ χαμηλής απόδοσης, λόγω του ότι το ανιχνευτικό αντικολλητικό φύλλο με σπινθηριστή είχε χάσει την κυλινδρική του γεωμετρία, μέσα στο δοχείο LC, όπως διακρίνεται στην Εικόνα 6.5.



Εικόνα 6.5: Απώλεια γεωμετρίας ανιχνευτικού αντικολλητικού φύλλου με σπινθηριστή ZnS(Ag) , η πιθανότερη αιτία είναι η υγρασία του αέρα.

Η απώλεια της γεωμετρίας, η οποία είχε συνέπεια την απώλεια ενεργής επιφάνειας του ανιχνευτικού συστήματος, μπορεί να οφείλεται στο ότι το αντικολλητικό φύλλο ήταν πολύ λεπτό και στο ότι απορρόφησε υγρασία από τον αέρα. Με βάση αυτή την παρατήρηση για απώλεια γεωμετρίας κατασκευάστηκε το δοχείο LC #4, στο οποίο ο σπινθηριστής ZnS(Ag) επικολλήθηκε σε διαφανές πλαστικό φύλλο βιβλιοδεσίας. Το φύλλο αυτό μπορεί να διατηρεί

την κυλινδρική του γεωμετρία ανεξάρτητα της υγρασίας. Από το σύνολο των πειραμάτων προκύπτει ότι "καλύτερο" (με καλό βαθμό απόδοσης και μικρότερο συντελεστή μεταβολής) φαίνεται να είναι το δοχείο LC #1. Γενικά πάντως, η υγρασία, όπως σημειώνει και ο Lucas (1957) αλλά και πολλοί άλλοι ερευνητές, παίζει, για λόγους που δεν χρειάζεται να εξηγηθούν τώρα, πολύ σημαντικό ρόλο στη συμπεριφορά των δοχείων LC.

6.7.2 Σκέψεις για το υπόστρωμα

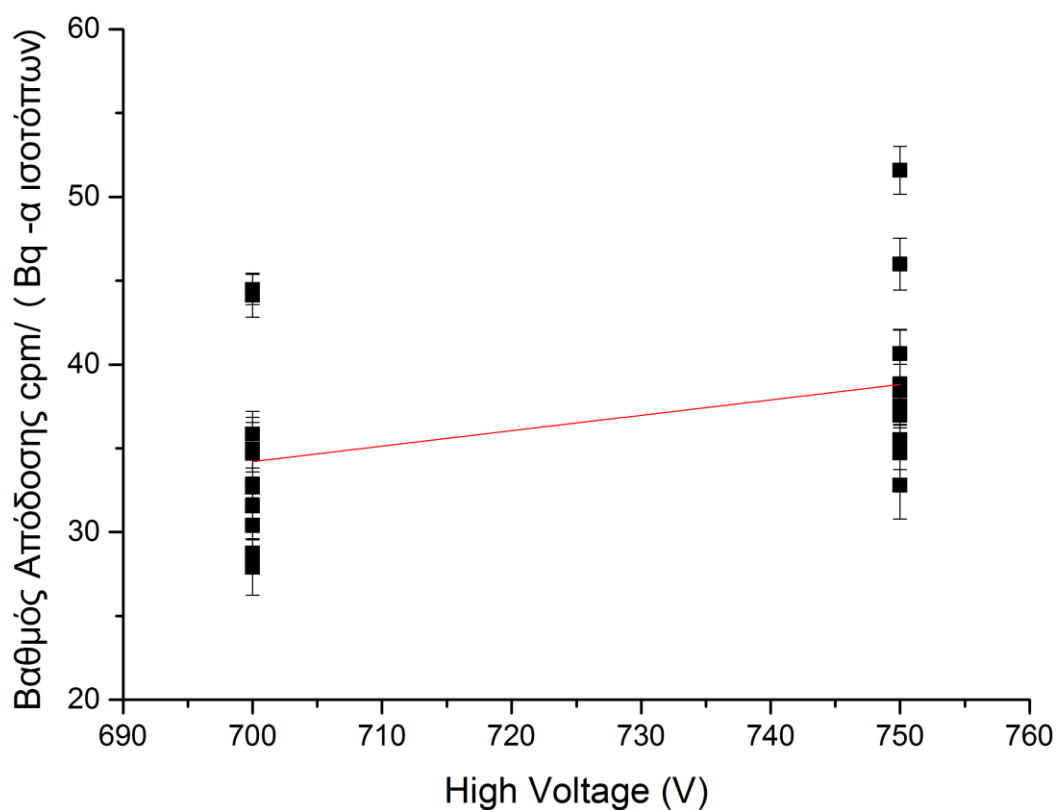
Το υπόστρωμα της τεχνικής κυμαίνεται αρκετά στην περιοχή από ~20 γεγονότα έως ~200 γεγονότα ανά 100 s. Οι τυχόν αυξημένες τιμές υποστρώματος μπορεί να οφείλονται σε διάφορες αιτίες, μερικές από τις οποίες έχουν ήδη επισημανθεί: (α) επιπλέον ηλεκτρονικός θόρυβος, (β) κυμαινόμενη συμπεριφορά του φωτοπολλαπλασιαστή, (γ) απορρόφηση και παραμονή Ραδονίου στο δοχείο LC σε υλικά του δοχείου που έχουν την ιδιότητα να απορροφούν Ραδόνιο, όπως π.χ. η πλαστική εσωτερική επικάλυψη του πώματος (όλα τα δοχεία), η κόλλα με την οποία συγκρατείται ο σπινθηριστής (δοχείο #1, δοχείο #2), η κυτταρίνη των φύλλων με σπινθηριστή (δοχείο #2, δοχείο #3, δοχείο #5, δοχείο #6), το διαφανές πλαστικό φύλλο βιβλιοδεσίας (δοχείο #4) και (δ) διάφορες ηλεκτροστατικές αιτίες που συνδέονται κυρίως με την ηλεκτροστατική φόρτιση του γυαλιού του δοχείου LC. Το υπόστρωμα γενικά παρατηρήθηκε ότι είναι ελάχιστο όταν ένα δοχείο LC χρησιμοποιείται για πρώτη φορά ή όταν ένα δοχείο LC χρησιμοποιείται τουλάχιστον 20 μέρες (= ~ 6 × χρόνος ημιζωής Ραδονίου) μετά την τελευταία χρήση του, ώστε τυχόν Ραδόνιο που έχει απορροφηθεί να έχει διασπασθεί.

6.7.3 Εξάρτηση βαθμού απόδοσης από την υψηλή τάση

Σύμφωνα με την Εικόνα 6.6 για τους βαθμούς απόδοσης, πλην της περιπτώσεως του πειράματος #2.B, προκύπτει ότι ΔΕΝ υπάρχει σημαντική εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από την υψηλή τάση V σε V , σύμφωνα με τη γραμμική σχέση:

$$BA = aV + b \quad (6.13)$$

διότι η κλίση a δεν προκύπτει σημαντικά διάφορη του μηδενός στο επίπεδο εμπιστοσύνης 95%. Το αποτέλεσμα αυτό προέκυψε με τη βοήθεια του λογισμικού Origin Pro 9.0.0 (32 bit) SR2, σύμφωνα με τον Πίνακα 6.15. Ασφαλώς, όπως φαίνεται και από την Εικόνα 6.6 υπάρχει χαμηλότερο επίπεδο εμπιστοσύνης, για το οποίο η κλίση είναι στατιστικά σημαντική. Η τιμή αυτού του επιπέδου εμπιστοσύνης δεν υπολογίστηκε σε αυτήν τη ΔΕ.



Εικόνα 6.6: Αξιολόγηση της εξάρτησης του βαθμού απόδοσης της τεχνικής από την υψηλή τάση

Πίνακας 6.15. Αποτελέσματα ανάλυσης του λογισμικού Origin 9.0 σχετικά με το επίπεδο εμπιστοσύνης της κλίσεως α , σχέση (6.13)

Statistics		B	
Number of Points		22	
Degrees of Freedom		20	
Residual Sum of Squares		403.13873	
Pearson's r		0.3438	
R-Square(COD)		0.1182	
Adj. R-Square		0.07411	

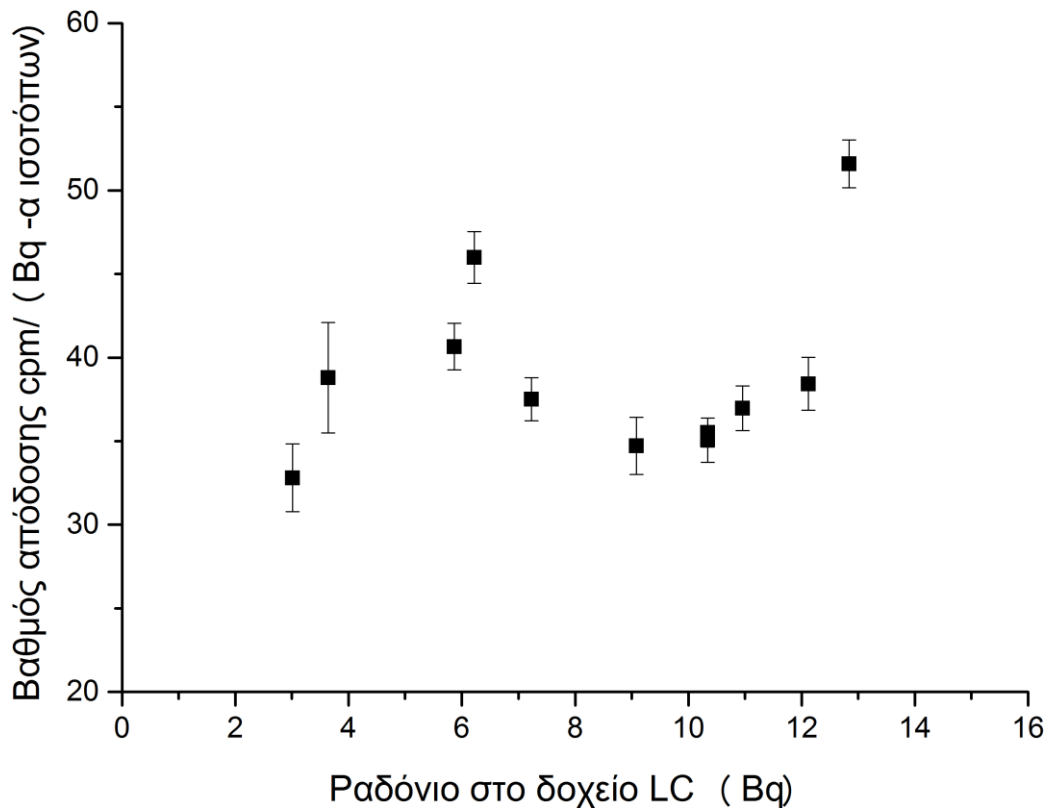
Summary		Intercept		Slope		Statistics
	Value	Standard Error	Value	Standard Error	Adj. R-Square	
B	-21.91172	35.50398	0.08066	0.04926	0.07411	

ANOVA		DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
B	Model	1	54.03768	54.03768	2.68085	0.1172
	Error	20	403.13873	20.15694		
	Total	21	457.17641			

At the 0.05 level, the slope is NOT significantly different from zero.

6.7.4 Εξάρτηση βαθμού απόδοσης από τη συγκέντρωση Ραδονίου

Σύμφωνα με την Εικόνα 6.7 για τους βαθμούς απόδοσης, πλην της περιπτώσεως του πειράματος #2.B, προκύπτει ότι ΔΕΝ υπάρχει εξάρτηση του βαθμού απόδοσης από τη συγκέντρωση του Ραδονίου R_0 σε Bq, στο δοχείο LC.



Εικόνα 6.7: Αξιολόγηση της εξάρτησης του βαθμού απόδοσης της τεχνικής από το Ραδόνιο στο δοχείο LC

6.7.5 Σφάλμα μέτρησης και κατώτερο όριο ανίχνευσης

Σφάλμα μέτρησης

Για παρόμοιες μετρήσεις, με αυτές που πραγματοποιήθηκαν σε αυτήν τη ΔΕ, το σφάλμα μέτρησης συστήνεται (Gray, 1987) να υπολογίζεται (σε %) ως πιθανό σφάλμα από τη σχέση:

$$e = 2 \times \frac{\sqrt{\text{γεγονότα μέτρησης} + \text{γεγονότα υποστρώματος}}}{\text{γεγονότα μέτρησης} - \text{γεγονότα υποστρώματος}} \times 100 \quad (6.14)$$

Προφανώς υπάρχουν και άλλα σφάλματα, τα οποία ο Gray (1987) δεν λαμβάνει υπόψη, αλλά τα σφάλματα που προκύπτουν από τη σχέση (6.15) θεωρούνται τα σημαντικότερα.

Πίνακας 6.16 Επί τοις εκατό σφάλμα μέτρησης και συντελεστής μεταβολής βαθμού απόδοσης δοχείων LC

A/A	e (%) @ 700 V	Συντελεστής μεταβολής @ 700 V	e (%) @ 750 V	Συντελεστής μεταβολής @ 750 V
1A	4.19	2.0	4.11	2.8
1B	15.70	5.7	13.04	5.8
2A	6.34	2.7	5.52	4.1
3A	6.60	4.8	5.94	4.6
3B	4.89	3.7	4.55	3.5
4A	6.93	3.6	7.01	3.7
4B	6.51	2.8	5.68	3.7
5A	6.88	3.8	6.98	4.0
5B	5.70	3.5	5.13	2.2
6A	9.48	6.6	9.49	8.8
6B	7.80	3.8	6.95	3.4
MIN	4.19	2.0	4.11	2.2
MAX	15.70	6.6	13.04	8.8

Από τον Πίνακα 6.16 προκύπτει ότι: Το σφάλμα μέτρησης e (%) είναι υψηλότερο κατά τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με υψηλό υπόστρωμα (βλ. και τους Πίνακες στην ενότητα 6.6.2). Το συμπέρασμα αυτό είναι ιδιαίτερα προφανές για τις μετρήσεις που έγιναν με το δοχείο LC #1. Για αυτό το λόγο προτείνεται όλα τα δοχεία να χρησιμοποιούνται ξανά, μόνο αφού περάσουν τουλάχιστον 20 μέρες, (6 χρόνοι ημιζωής Ραδονίου) από την προηγούμενη μέτρηση, ώστε να έχει μηδενισθεί η ραδιενέργεια Ραδονίου που έχει απορροφηθεί σε υλικά των δοχείων που απορροφούν Ραδόνιο. Προκύπτει επίσης από τον ίδιο πίνακα ότι οι συντελεστές μεταβολής δεν συνδέονται με το σφάλμα μέτρησης. Οι συντελεστές δείχνουν αν ένα δοχείο LC συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο από μέτρηση σε μέτρηση. Διαπιστώνεται ότι το καλύτερο δοχείο από αυτήν την άποψη είναι για τα 700 V το #1 και το χειρότερο είναι το #6. Για τα 750 V το καλύτερο δοχείο είναι το #5 και το χειρότερο είναι το #6. Μια πιθανή αιτία για ανεπιθύμητα μεγάλους συντελεστές μεταβολής είναι τυχόν ανομοιομορφία της κατανομής του σπινθηριστή ZnS(Ag) στην εσωτερική επιφάνεια του δοχείου LC. Άλλη πιθανή αιτία για ανεπιθύμητα μεγάλους συντελεστές μεταβολής στο ίδιο δοχείο LC, είναι ότι από ομάδα μετρήσεων σε επόμενη ομάδα μετρήσεων σε άλλη χρονική στιγμή, το δοχείο LC τοποθετήθηκε σε άλλη οριζόντια θέση, έχει δηλαδή περιστραφεί και αυτό μπορεί να συμβάλλει αρνητικά. Καλό είναι επομένως να αποφεύγεται η περιστροφή των δοχείων LC από ομάδα μετρήσεων σε ομάδα μετρήσεων.

Ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια σε γεγονότα

Η ελάχιστη ανιχνεύσιμη ραδιενέργεια Ραδονίου (*MDA*, Minimum Detectable Activity σε γεγονότα ανά 100s), μπορεί να υπολογίζεται όπως:

$$MDA = 3 \times \sqrt{\text{γεγονότα υποστρώματος}} \quad (6.15)$$

Η σχέση (6.17) προκύπτει σύμφωνα με αυτά που αναφέρονται σε μία από τις πρώτες σχετικές εργασίες για την ποσότητα *MDA*, δηλαδή αυτήν του Althuser (1963).

Πίνακας 6.17 *MDA* δοχείων LC σε γεγονότα ανά 100 s

A/A	700 V	750 V
1A	13.55	13.73
1B	36.64	40.01
2A	24.52	27.34
3A	30.01	35.57
3B	37.83	41.70
4A	21.90	22.72
4B	33.44	36.96
5A	13.51	15.61
5B	19.15	23.02
6A	13.68	16.45
6B	23.91	27.40
MIN	13.51	13.73
MAX	37.83	41.70

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.17 προκύπτει ότι το δοχείο LC #1, αυτό δηλαδή στο οποίο έχει κολληθεί στα εσωτερικά του τοιχώματα σκόνη σπινθηριστή ZnS(Ag), παρουσιάζει, συγκριτικά με όλα τα άλλα δοχεία την καλύτερη συμπεριφορά. Από την άλλη, το χειρότερο δοχείο από αυτήν την άποψη είναι το #3, το οποίο έχει κατασκευαστεί με εμπορικά διαθέσιμο φύλλο με σπινθηριστή ZnS(Ag).

Κατώτατο όριο ανίχνευσης -α ισοτόπων

Το κατώτατο όριο ανίχνευσης συγκέντρωσης -α ισοτόπων (*LLD*, Lower Limit of Detection σε Bq -α ισοτόπων) μπορεί να υπολογίζεται αν στη σχέση (6.11), αντικατασταθεί ο αριθμητής με την ποσότητα *MDA*.

$$LLD \text{ Bq } \alpha \text{ ισοτόπων} = \frac{MDA \times \frac{60 \text{ s}}{\text{min}}}{BA} \quad (6.16)$$

Πίνακας 6.18 Κατώτατο όριο ανίχνευσης δοχείων LC σε Bq -α ισοτόπων

A/A	700 V	750 V
1A	0.18	0.16
1B	0.77	0.68
2A	0.53	0.50
3A	0.55	0.58
3B	0.51	0.54
4A	0.42	0.39
4B	0.66	0.62
5A	0.23	0.24
5B	0.33	0.36
6A	0.25	0.26
6B	0.40	0.40
MIN	0.18	0.16
MAX	0.77	0.68

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.18 προκύπτει ότι το δοχείο LC #1, αυτό δηλαδή στο οποίο έχει κολληθεί στα εσωτερικά του τοιχώματα σκόνη σπινθηριστή ZnS(Ag), παρουσιάζει, συγκριτικά με όλα τα άλλα δοχεία την καλύτερη συμπεριφορά στις μετρήσεις που έγιναν με χαμηλό υπόστρωμα. Από την άλλη, το ίδιο δοχείο παρουσιάζει τη χειρότερη συμπεριφορά στις μετρήσεις που έγιναν με υψηλό υπόστρωμα.

6.7.6 Σύνδεση *LLD* -α ισοτόπων με την ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση Ραδονίου

Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.18, η ποσότητα *LLD* κυμαίνεται για όλα τα δοχεία που δοκιμάστηκαν στην περιοχή από 0.16 έως 0.68 Bq -α ισοτόπων. Για να μετατραπεί αυτή η ποσότητα σε Bq Ραδονίου πολλαπλασιάζεται με δοκιμές με τη βοήθεια λογιστικού φύλλου η τελευταία στήλη του Πίνακα 6.2 με την τιμή Bq Ραδονίου που θα δώσει 0.16 και 0.68 Bq -α ισοτόπων, τη χρονική στιγμή μέτρησης 4100 s. Η χρονική στιγμή αυτή επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική της στιγμής των μετρήσεων των δοχείων, μετά τη μετάγχιση Ραδονίου σε αυτά από το θάλαμο Ραδονίου. Βρέθηκε από τις δοκιμές με τη βοήθεια λογιστικού φύλλου, ότι το *LLD* του 0.16 Bq -α ισοτόπων αντιστοιχεί σε 0.063 Bq Ραδονίου στα δοχεία και ότι το *LLD* του 0.68 Bq -α ισοτόπων αντιστοιχεί σε 0.3 Bq Ραδονίου στα δοχεία. Με τη βοήθεια της σχέσης (6.10) προκύπτει ότι η ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση Ραδονίου για τα δοχεία LC που δοκιμάστηκαν βρίσκεται στην περιοχή από 0.24 kBq^m⁻³ και 1.17 kBq^m⁻³.

6.7.7 Αβεβαιότητες

Ο Lucas (1957) σημειώνει ότι η συνολική αβεβαιότητα της μεθόδου δοχείων LC για τη μέτρηση της συγκέντρωσης Ραδονίου στον αέρα του εσωτερικού περιβάλλοντος, μπορεί να φθάνει και μέχρι το 20% (αλλά δεν αναφέρει το συντελεστή κάλυψης *k*). Με τη σειρά της

πειραματικής διαδικασίας βαθμονόμησης μπορούν να διακρίνονται τα ακόλουθα κυριότερα σφάλματα:

Αβεβαιότητα πηγής βαθμονόμησης και παραγωγής Ραδονίου

Πρόκειται για συστηματικό σφάλμα. Οφείλεται στην ακρίβεια της χρησιμοποιούμενης πηγής Ραδονίου, η οποία κατά κανόνα αποτελεί δευτερεύον πρότυπο κατευθείαν ιχνηλάσιμο (traceable) προς πρωτεύον πρότυπο διεθνώς αναγνωρισμένων ινστιτούτων μετρολογίας, όπως το National Institute of Standards and Technology των ΗΠΑ (NIST-US). Το πιθανό σφάλμα της πηγής που χρησιμοποιήθηκε εκτιμάται σε 3%, με βάση το τυπικό σφάλμα που αναφέρεται στο σχετικό πιστοποιητικό (βλ. και στο Παράρτημα)

Αβεβαιότητα όγκου θαλάμου Ραδονίου

Πρόκειται για συστηματικό σφάλμα. Οφείλεται στις κατασκευαστικές ανακρίβειες διαστάσεων του θαλάμου, στον εργαστηριακό εξοπλισμό που τοποθετείται στο εσωτερικό του με αποτέλεσμα την μείωση του όγκου, στις σωληνώσεις που συνδέουν τον θάλαμο με το δοχείο της πηγής, στις σωληνώσεις που συνδέουν το θάλαμο με το δοχείο LC και στον όγκο του δοχείου της πηγής. Για τον θάλαμο Ραδονίου που χρησιμοποιήθηκε υπολογίζεται σε περίπου 5%.

Αβεβαιότητα χρόνου παραγωγής Ραδονίου

Πρόκειται για τυχαίο σφάλμα. Οφείλεται στο χρόνο αντίδρασης του χειριστή, για την σύντομη διεκπεραίωση του χειρισμού των διατάξεων έναρξης – λήξης της διαδικασίας μετάγγισης του Ραδονίου από το δοχείο της πηγής στον θάλαμο. Το σφάλμα αυτού του είδους μπορεί να εκτιμηθεί από την ασφαλή πλευρά σε μονάδες χρόνου περί τα 2 min. Επειδή όμως στην ΔΕ χρησιμοποιήθηκαν μεγάλες συγκεντρώσεις Ραδονίου στο θάλαμο αυτός ο χρόνος δεν συμβάλει στην αβεβαιότητα.

Αβεβαιότητα μέτρησης

Πρόκειται για τυχαίο σφάλμα. Οφείλεται κυρίως στην ποσότητα e από τη σχέση (6.15). Μπορεί κανείς να πει ότι στην χειρότερη περίπτωση αυτό δεν ξεπερνά δεν ξεπερνάει το 15.7% σύμφωνα με όσα φαίνονται στον Πίνακα 6.16.

Αξιολόγηση της συνδυασμένης αβεβαιότητας πειραμάτων βαθμονόμησης

Για την αξιολόγηση της συνδυασμένης αβεβαιότητας πρέπει από τις συνιστώσες που παρουσιάστηκαν προηγούμενα να απομονωθούν οι πλέον σημαντικές. Ως τέτοιες επιλέγονται:

- η αβεβαιότητα "πηγής βαθμονόμησης και παραγωγής Ραδονίου": ~ 4%
- η αβεβαιότητα "όγκου θαλάμου Ραδονίου": ~ 5%
- η αβεβαιότητα "μέτρησης"

Η πιθανή (%) αβεβαιότητα του βαθμού απόδοσης υπολογίζεται ως συνδυασμός e_C των συνιστωσών αβεβαιότητας με τη βοήθεια της σχέσης:

$$e_C = \sqrt{\sum_1^v e_i^2} \quad (6.17)$$

για την οποία εδώ λαμβάνονται υπόψη $v = 3$ συνιστώσες αβεβαιότητας όπως πιο πάνω.

Με αντικατάσταση προκύπτει για το χειρότερο σενάριο με βάση το σφάλμα μέτρησης $e(\%)$ ότι η αβεβαιότητα βρίσκεται στην περιοχή που εκτιμάται και από τον Lucas (1957)

$$e_c = \sqrt{4^2 + 5^2 + 15.7^2} = 16.95\%$$

6.8 Σχόλια

Τα δοχεία LC δεν είναι κατάλληλα για φασματοσκοπική ανάλυση -α ισοτόπων. Ο διαχωρισμός ενεργειών τω -α σωματιδίων που είναι απαραίτητος για τη φασματοσκοπική ανάλυση είναι αδύνατος διότι ένα -α σωματίδιο μικρής ενέργειας που θα παραχθεί πάνω ή κοντά στο σπινθηριστή, θα δώσει το ίδιο φως με άλλο -α σωματίδιο μεγαλύτερης ενέργειας που θα παραχθεί μακριά από τον σπινθηριστή και θα χάσει ενέργεια μέχρι να αλληλεπιδράσει με τον σπινθηριστή.

Ως γενικά ποιοτικά συμπεράσματα, προέκυψαν από τα πειράματα βαθμονόμησης και την αξιολόγησή τους ότι:

(α) Χρειάζεται να ξαναγίνουν πειράματα σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις Ραδονίου ώστε να αξιολογηθεί καλύτερα η ελάχιστη ανιχνεύσιμη συγκέντρωση Ραδονίου

(β) Από την αξιολόγηση που έγινε στη ΔΕ προέκυψε ότι το καλύτερο δοχείο LC είναι του τύπου #1. Επίσης, καλά δοχεία LC είναι αυτά, στα οποία χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα φύλλα με σπινθηριστή ZnS(Ag)

(γ) Όπως αναφέρθηκε πολλές φορές, το υπόστρωμα είναι αυτό που συμβάλλει αποφασιστικά στο σφάλμα μέτρησης και κατ' επέκταση στη μείωση του βαθμού απόδοσης. Πρέπει να επιδιώκεται οι μετρήσεις με τα δοχεία LC να γίνονται με το κατά το δυνατόν ελάχιστο υπόστρωμα. Για να επιτευχθεί αυτό χρειάζεται μεταξύ μετρήσεων με το ίδιο δοχείο LC να

μεσολαβεί αρκετός χρόνος, κατά προτίμηση \geq των 20 ημερών, ώστε τυχόν Ραδόνιο που έχει απορροφηθεί στα υλικά του δοχείου να έχει πλήρως απομειωθεί λόγω διάσπασης. Στη ΔΕ αυτή η πρακτική δεν εφαρμόστηκε για λόγους εξοικονόμησης χρόνου. Από την άλλη, το ότι ακριβώς δεν εφαρμόστηκε ανέδειξε και το πρόβλημα που δημιουργεί το υπόστρωμα. Σε ένα Εργαστήριο, στο οποίο χρησιμοποιείται η τεχνική των δοχείων LC, θα πρέπει να υπάρχουν περισσότερα από ένα δοχεία διαθέσιμα, ώστε να ξεπερνιέται το πρόβλημα χρόνου αναμονής - υποστρώματος. Εννοείται φυσικά ότι κάθε δοχείο LC έχει το δικό του βαθμό απόδοσης.

(δ) Σε σχέση με το χρόνο έναρξης των μετρήσεων, στην ΔΕ επιλέχθηκε, κυρίως για εξοικονόμηση χρόνου, οι μετρήσεις να γίνονται στην περιοχή χρόνων εκτός ραδιενεργού ισορροπίας. Διαφορετικά ο χρόνος αναμονής για την έναρξη των μετρήσεων με δοχείο LC θα ήταν στο διάστημα 3 - 5 ωρών για την αποκατάσταση ραδιενεργού ισορροπίας. Για να επιτευχθούν καλές μετρήσεις εκτός ραδιενεργού ισορροπίας, επιλύθηκαν προσεγγιστικά οι εξισώσεις Bateman.

(ε) Η αβεβαιότητα των μετρήσεων με δοχεία LC είναι στην περιοχή που προβλέπεται από τη βιβλιογραφία αλλά και στην περιοχή που έχει διαπιστωθεί για παρόμοιους ανιχνευτές Ραδονίου, απλής τεχνολογίας, όπως οι ανιχνευτές με ενεργό άνθρακα (βλ. και Μαρινάκης, 2008)

6.9 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Πέρα από το ότι χρειάζεται να ξαναγίνουν πειράματα σε χαμηλότερες συγκεντρώσεις Ραδονίου προτείνονται και τα εξής:

(α) Αξιολόγηση της τεχνικής μόνο σε καταστάσεις ραδιενεργού ισορροπίας

(β) Αξιολόγηση της τεχνικής μόνο σε καταστάσεις χαμηλού υποστρώματος

(γ) Τοποθέτηση στα δοχεία LC ενός συμπαγούς μεταλλικού κυλινδρικού άξονα μικρής διαμέτρου ομοαξονικά, ο οποίος θα φέρει στην εξωτερική του επιφάνεια επικολλημένο σπινθηριστή ZnS(Ag), ώστε να αυξηθεί η επιφάνεια και η πιθανότητα αλληλεπίδρασης των - α σωματιδίων με το υλικό του σπινθηριστή. Με αυτό το τρόπο δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα η χωρητικότητα του δοχείου LC άρα ούτε και η συγκέντρωση του Ραδονίου στο εσωτερικό του. Με την προτεινόμενη βελτίωση αναμένεται να αυξηθεί ο βαθμός απόδοσης

(δ) Η τοποθέτηση του μεταλλικού αξονίσκου όπως στην πρόταση (γ) πιθανόν, με την κατάλληλη γείωση, να απαλλάξει τα δοχεία LC από τυχόν ηλεκτροστατικά φορτία, τα οποία επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης.

(ε) Αντί για φωτοπολλαπλασιαστή και τα σχετικά πυρηνικά ηλεκτρονικά, θα μπορούσε το ανιχνευτικό σύστημα να αντικατασταθεί με μία ή περισσότερες οπτικές ίνες, οι οποίες μπορούν να μεταφέρουν το φως που παράγεται στο δοχείο LC από τον σπινθηριστή. Στη συνέχεια, οι οπτικές ίνες θα μπορούσαν να συνδεθούν με έναν μετρητή ισχύος οπτικών ινών, κατάλληλο για το μήκος κύματος του παραγόμενου φωτός, το οποίο είναι γνωστό ότι είναι στα 450 nm. Αναμένεται ότι από τις σχετικές δοκιμές, θα προκύψει σύνδεση της ισχύος με το περιεχόμενο Ραδόνιο στο δοχείο LC. Ο μετρητής ισχύος οπτικών ινών θα πρέπει να διαθέτει κάποιο κατάλληλο data logger, ώστε οι μετρήσεις του να μπορούν να αποθηκευθούν συναρτήσει του χρόνου σε ΗΥ. Μια τέτοια διάταξη θεωρείται πάρα πολύ οικονομικότερη και πάρα πολύ απλούστερη από αυτή που χρησιμοποιήθηκε στη ΔΕ. Σημειώνεται ότι, όπως αναφέρεται σε εκτεταμένη βιβλιογραφία, οι οπτικές ίνες και οι μετρητές ισχύος οπτικών ινών έχουν χρησιμοποιηθεί, ήδη, αρκετά για την καταγραφή ισχύος φωτός από σπινθηριστές.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Althuser B., Pasternack B., "Statistical Measures of the Lower Limit of Detection of a Radioactivity Counter", Health Physics, 9(3):293-298, 1963
2. Arifov U. A., "Interaction of Atomic Particles with a Solid Surface / Vzaimodeistvie Atomnykh Chastits S Poverkhnost'yu Tverdogo Tela / Взаимодействие Атомных Частиц С Поверхностью Твердого Тела", Springer, ISBN 9781489948090, 2013
3. Ασάρβελης Π., "Εγκατάσταση και Βαθμονόμηση Διατάξεων Μετρήσεων Ολικής -α και Ολικής -β Ακτινοβολίας", Διπλωματική Εργασία, Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ, Αθήνα, 2006
4. Βασδεκάς Ι.Α., "Ανάπτυξη προγραμμάτων MATLAB για τον έλεγχο και την ανάγνωση καταμετρητή - χρονομέτρου NIM τύπου CANBERRA 512 μέσω θύρας H/Y RS-232" Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2016.
5. Bateman H., "The solution of a system of differential equations occurring in the theory of radioactive transformations", Proc. Cambridge Philos. Soc. 15(V): 423–427, 1910
6. Bruining H., "Physics and applications of secondary electron emission", McGraw-Hill Book Co. Inc., 1954
7. Einstein A., "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt", Annalen der Physik, 322 (6): 132–148, 1905
8. George A.C., "Radon sampling and counting flasks", Environmental Measurements Laboratory, U.S. Department of Energy, 1992
9. Gray D.J., Windman S.T., "EERF Standard Operating Procedures for Rn-222 Measurement Using Charcoal Canisters", Report EPA 520/5-87-005, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Radiation Programs, Easter Environmental Radiation Facility (EERF), 1890 Federal Drive, Montgomery Alabama 36109, March 1987.
10. Hertz H., "Ueber einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung", Annalen der Physik, 267(8): 983–1000, 1887
11. Iams H., Salzberg B., "The Secondary Emission Phototube". Proceedings of the IRE. 23: 55, 1935
12. Κατσανεβάκης Σ., "Μετρήσεις Φυσικής Ραδιενέργειας των Ελληνικών Τσιγάρων και Μελέτη της Επίδρασης του Καπνού τους στη Ραδιενέργεια των Εσωτερικών Χώρων", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 1995.

13. Λεωνίδου Δ.Ι., "Προστασία από τις Πυρηνικές Ακτινοβολίες", Σύλλογος προς Διάδοση Ωφέλιμων Βιβλίων. Αθήνα, 1989
14. Λεωνίδου Δ.Ι., "Μέθοδοι και Όργανα Ανιχνεύσεως Πυρηνικών Ακτινοβολιών", ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα 1990
15. Lucas H.F., "Improved Low-Level Alpha Scintillation Counter for Radon", The Review of Scientific Instruments, 28(9): 680-683, 1957
16. Μαρινάκης Γ., "Βαθμονόμηση Δοχείων με Ενεργό Άνθρακα για τη Μέτρηση Συγκεντρώσεων Ραδονίου σε Εσωτερικούς Χώρους", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2007
17. Moere H. and Hubbard L.M., "Rn-222 Absorption in Plastic Holders for Alpha Track Detectors: a Source of Error", Radiation Protection Dosimetry, 74(1/2):85-91, 1997
18. Παπαδάκος Γ., "Διαπίστευση Εργαστηρίου Πυρηνικής Τεχνολογίας σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN ISO/IEC 17025", Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ Τομέας Πυρηνικής Τεχνολογίας, Αθήνα, 2001.
19. Πέογλος Β., Ράπτης Ι., Χριστοδουλίδης Κ., "Τεχνικές Πειραματικής Φυσικής", Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Κεφάλαιο 8: Φωτοπολλαπλασιαστής, ΕΜΠ, Τομέας Φυσικής, 2004
20. Πετρόπουλος Δ., Προσωπική Επικοινωνία, 1986
21. Rajchman J., Pike E.W., RCA Technical Report TR-362, "Electrostatic Focusing in Secondary Emission Multipliers", 1937
22. Slepian J., Westinghouse Electric, "Hot Cathode Tube" U.S. Patent 1,450,265, Issued April 3, 1923 (Filed 1919)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Π1. ΠΡΟΕΝΙΣΧΥΤΗΣ ORTEC 276L

ORTEC®

276L

Low-Power Photomultiplier Base

- For use with 10-stage PMTs that fit standard 14-pin sockets
- Built-in low-noise preamplifier and focus control
- Both preamplifier output and anode output
- Test input for system testing
- Protection circuit for internal transistors



The ORTEC Model 276L Low-Power Photomultiplier Tube Base and Preamplifier incorporates an integral low-noise preamplifier, a PMT base with a low-power voltage divider network, and a focus control for optimum performance in scintillation detector applications. The unit is ideally suited for use with NaI(Tl) detectors.

The Model 276L provides two outputs: the preamplifier output for energy analysis and the anode output for either timing or auxiliary energy analysis. The preamplifier is decoupled to simplify pole-zero cancellation in the main amplifier. A Test Input accepts the output of a pulse generator to calibrate and test the preamplifier and the system. The Model 276L has a diode protection network to prevent damage to the internal transistors due to sudden application or removal of high voltage to the unit. The Model 276L is powered from any ORTEC main amplifier or preamplifier power supply.

The Model 276L is directly compatible with many commercially available integrated NaI-PMT assemblies including:

ORTEC Model 905-2, -3, -4 NaI(Tl) Scintillation Detector Assemblies;
Bicron Model 2M2 and 3M3 Monoline Spectrometers;
Harshaw Model S288 and S332 Integral Line Assemblies;
Teledyne S-88-I and S-1212-I Integral Assemblies.

Also, the Model 276L is directly compatible with 10-stage PMTs that fit standard 14-pin sockets including those listed in Table 1.

The Model 276L is also compatible with other 10-stage tubes not listed in Table 1 (see Fig. 1). Compatibility may be determined by comparison with those listed.

Specifications

PERFORMANCE

PREAMPLIFIER

Integral Nonlinearity $< \pm 0.02\%$, 0 to +10 V.
Temperature Instability $< \pm 0.005\%/^{\circ}\text{C}$, 0 to 50°C.
Output Rise Time < 100 ns for test input or fast scintillator.
Output Fall Time Time constant of 50 μs .
Output Noise < 50 μV rms with ORTEC main amplifier such as Model 672 and time constant of 1 μs .
Conversion Gain Nominally 5 $\mu\text{V}/\text{MeV}$ with 2- by 2-inch NaI(Tl) crystal and PMT gain of 10^7 ; the typical output for a 511-keV gamma ray will be 250 mV at a PMT gain of 10^7 .
Saturation Level +10 V into an open circuit; +5 V into 93- Ω load.

VOLTAGE DIVIDER Resistor-divider connected to 10-stage PMT base. Total resistance 5.6 M Ω resulting in bleeder current of 200 μA with typical high voltage of 1 kV. The distribution is linear to all stages with the focus adjustment on the grid.

CONTROL

FOCUS Single-turn locking potentiometer on panel for external adjustment of PMT grid potential.

INPUTS

POS HV SHV connector, AMP 51494-2, for distribution of positive high voltage to PMT base; +2000 V maximum.

TEST BNC connector, accepts pulses from an ORTEC pulse generator for testing and calibration.

SIGNAL Preamplifier input is connected internally to dynode 10.

POWER Captive 4-m (12-ft) power cable terminated in Amphenol 17-20090 connector accepts preamplifier operating power; compatible with all ORTEC main amplifiers and the Model 4002P Portable Power Supply.

PMT SOCKET TRW 3814. Fits JEDEC B 14-38 PMT pin base (see Fig. 1).

Table 1. Compatible Photomultiplier Tubes.

ADIT		Burrle (formerly RCA)		Hamamatsu		Philips
B51B01	B76C01	4900	S83020F	PM55	R1512	XP2202
L51B01	B89B01	5819	S83021E	R208	R1513	XP2203B
V51B01	B89C01	6342A	S83022F	R550	R1612	XP24 12B
B51D01	B89D01	6655A	S83025F	R594	R1791	
B51C01	B 133D01	S83008E		R877	R1836	
B78B01	B 133C01	S83013F		R878	R1847-07	
V78B01	V 133B01	S83019F		R1507	R1848-07	
					7896	

276L

Low-Power Photomultiplier Base

OUTPUTS

PREAMP BNC connector furnishes preamplifier positive output pulse to any ORTEC main shaping amplifier for linear energy analysis; $Z_0 = 93 \Omega$, decoupled.

ANODE BNC connector furnishes negative anode output pulse for use for either timing or auxiliary energy analysis; $Z_0 = 1 k\Omega$ ac-coupled.

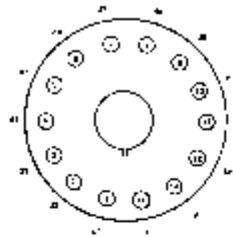
ELECTRICAL AND MECHANICAL

POWER REQUIRED For preamplifier, +24 V, 16 mA; -24 V, 16 mA; for PMT base, +2000 V maximum (use rated voltage for the tube that is installed).

WEIGHT

Net 0.65 kg (1.5 lb).
Shipping 1.3 kg (3.0 lb).

DIMENSIONS 5.6 cm (2.2 in.) diameter x 10.2 cm (4 in.) long; equipped with 4-m (12-ft) captive power cable.



d1-d10 dynodes 1 to 10
a anode
ic internal connection
g grid
k cathode

Fig. 1. JEDEC 14-38 PMT Pin Base, with Pin Assignments:

Ordering Information

To order, specify:

Model	Description
276L	Low-Power Photomultiplier Base with Preamplifier
C-36-12	RG-69A/U 75- Ω Cable with two SHV female plugs, 12-ft length
C-24-12	RG-62A/U 93- Ω Cable with two BNC male plugs, 12-ft length
T50	50- Ω Terminator, BNC

Spec features subject to change
070620

ORTEC[®]

www.ortec-online.com

Tel. (865) 482-4411 • Fax (865) 483-0396 • ortec_nfo@ametek.com
801 South Illinois Ave., Oak Ridge, TN 37830 U.S.A.
For International Office Locations, Visit Our Website

AMETEK[®]

Π2. ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗΣ ET ENTERPRISES

(πρώην Electron Tubes), τύπου 9250QKSB

51 mm (2") photomultiplier 9250B series data sheet



1 description

The 9250B is a 51mm (2") diameter, end window photomultiplier with blue-green sensitive bialkali photocathode on a sandblasted window for enhanced cathode sensitivity, 10 high gain, high stability, SbCs dynodes of linear focused design. The 9250QB is a variant for applications requiring UV sensitivity.

2 applications

- spectroscopy

3 features

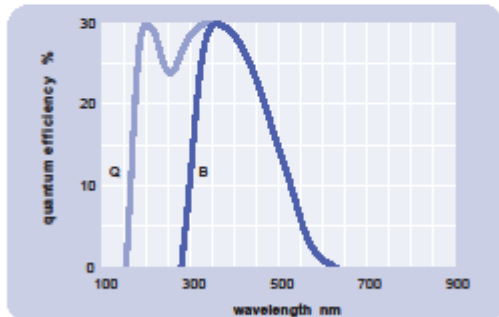
- good pulse height resolution

4 window characteristics

	9250B borosilicate	9250QB* fused silica
spectral range**(nm)	290 - 630	160 - 630
refractive index (n _w)	1.49	1.46
K (ppm)	300	<10
Th (ppb)	250	<10
U (ppb)	100	<10

*note that the sidewall of the envelope contains graded seals of high K content
**wavelength range over which quantum efficiency exceeds 1 % of peak

5 typical spectral response curves

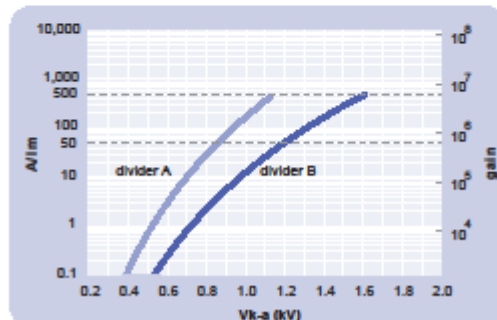


6 characteristics

	unit	min	typ	max
photocathode: bialkali				
active diameter	mm		48	
quantum efficiency at peak	%		30	
luminous sensitivity	μA/m		80	
with CB filter		9	12.5	
with CR filter			2	
dynodes: 10LFSbCs				
anode sensitivity in divider A:				
nominal anode sensitivity	A/m		50	
max. rated anode sensitivity	A/m		500	
overall V for nominal A/m	V		850	1150
overall V for max. rated A/m	V		1150	
gain at nominal A/m	x 10 ⁶		0.6	
dark current at 20 °C:				
dc at nominal A/m	nA		0.3	1.5
dc at max. rated A/m	nA		3	
dark count rate	s ⁻¹		300	
pulsed linearity (-5% deviation):				
divider A	mA		30	
divider B	mA		100	
pulse height resolution:				
single electron peak to valley	ratio		2	
rate effect (I _a for Δg/g=1%):	μA		20	
magnetic field sensitivity:				
the field for which the output decreases by 50 %				
most sensitive direction	T x 10 ⁻⁴			
temperature coefficient:	% °C ⁻¹		± 0.5	
timing:				
single electron rise time	ns		2	
single electron fwhm	ns		3.5	
single electron jitter (fwhm)	ns		6	
multi electron rise time	ns		4	
multi electron fwhm	ns		6.5	
transit time	ns		40	
weight:	g		105	
maximum ratings:				
anode current	μA			100
cathode current	nA			100
gain	x 10 ⁶			6
sensitivity	A/m			500
temperature	°C			60
V (k-a) ⁽¹⁾	V			1800
V (k-d1)	V			300
V (d-d) ⁽²⁾	V			300
ambient pressure (absolute)	kPa			202

⁽¹⁾ subject to not exceeding max. rated sensitivity ⁽²⁾ subject to not exceeding max rated V(k-a)

7 typical voltage gain characteristics



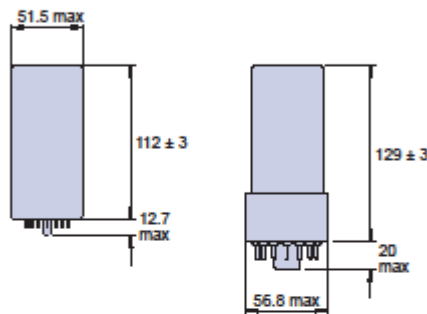
8 voltage divider distribution

	k	d ₁	d ₂	.....	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉	a	
A	2R	R	.....	R	R	R	2R	R		Standard
B	2R	R	.....	R	2R	3R	4R	3R		High Pulsed Linearity

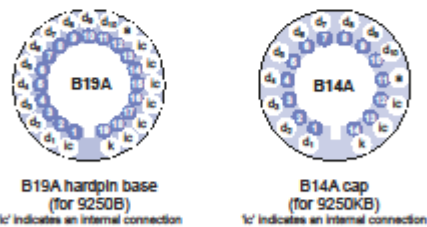
Characteristics contained in this data sheet refer to divider A unless stated otherwise.

9 external dimensions mm

The drawings below show the 9250B in hardpin format and the 9250KB with the B14A cap fitted.



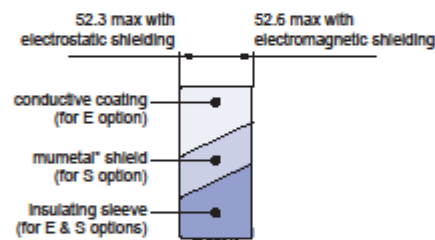
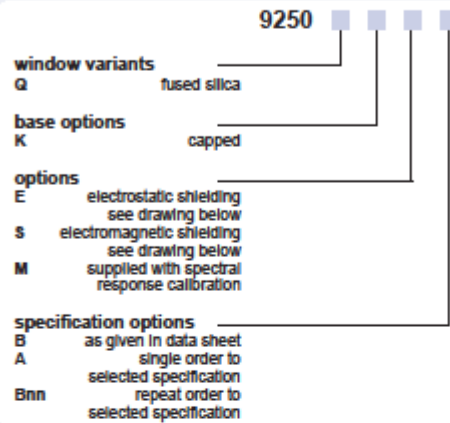
10 base configuration (viewed from below)



Our range of B19A sockets is available to suit the hardpin base. Our range of B14A sockets is available to suit the B14A cap. Both socket ranges include versions with or without a mounting flange, and versions with contacts for mounting directly onto printed circuit boards.

11 ordering information

The 9250B meets the specification given in this data sheet. You may order variants by adding a suffix to the type number. You may also order options by adding a suffix to the type number. You may order product with specification options by discussing your requirements with us. If your selection option is for one-off order, then the product will be referred to as 9250A. For a repeat order, ET Enterprises will give the product a two digit suffix after the letter B, for example B21. This identifies your specific requirement.



12 voltage dividers

The standard voltage dividers available for these pmnts are tabulated below:

9250B	9250KB	k	d ₁	d ₂	.....	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉	d ₁₀	a
C647A	C636A	2R	R	.....	R	R	R	R	R	R	
C647B	C636B	2R	R	.....	R	2R	3R	4R	3R		
C647C	C636C	150 V	R	.....	R	R	R	R	R		
C647D	C636D	150 V	R	.....	R	2R	3R	4R	3R		

R = 330 kΩ

*mumetal is a registered trademark of Magnetic Shield Corporation

ET Enterprises Limited
45 Riverside Way
Uxbridge UB8 2YF
United Kingdom
tel: +44 (0) 1895 200880
fax: +44 (0) 1895 270873
e-mail: sales@et-enterprises.com
web site: www.et-enterprises.com

ADIT Electron Tubes
300 Crane Street
Sweetwater TX 79556 USA
tel: (325) 235 1418
toll free: (800) 399 4557
fax: (325) 235 2872
e-mail: sales@electron tubes.com
web site: www.electrontubes.com

choose accessories for this pmt on our website

an ISO 9001 registered company

The company reserves the right to modify these designs and specifications without notice. Developmental devices are intended for evaluation and no obligation is assumed for future manufacture. While every effort is made to ensure accuracy of published information the company cannot be held responsible for errors or consequences arising therefrom.




© ET Enterprises Ltd, 2010
DS_9250B Issue 7 (08/09/10)

Π3. ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ NIM με πλάτος 3U, εταιρείας κατασκευής WIENER, τύπου UEP-15, για τροφοδοσία μονάδας NIM BIN τύπου slave

UEP 15 | W-IE-NE-R Power Electronics

<https://www.wiener-d.com/product/uep-15/#>



W-IE-NE-R
A Phoenix Mecano Company

UEP 15

The UEP 15 is a plug in power supply for use in UEN 04 bin or for powering every non-powered extant NIM bin. The UEP 15 features all 6 voltages, stabilized by adjustable monolithic voltage regulators. Outputs are ported using a rear mounted NIM connector with a standard NIM pin out.

An integrated DC blower provides perfect cooling of the unit to avoid overheating. Voltage regulators and transformer are protected against over temperature. Unique design of Over/Under voltage discriminator, maintains proper output regulation within +/- 3% of nominal voltages. Should the voltage fall out of this range the mains relay shuts down the power supply with a, "Bad Status", (red LED indicator on front panel).

Optional CAN-bus interface for DC voltage monitoring and remote on/off via rear 9 pin sub-D connector.

Features

- UEP 15 power supply:
- Front side plug-in slot power supply 2.5 NIM slots wide, 150W power output
- 6-fold DC outputs (+/-6V, +/-12V, +/-24V), stabilized by adjustable monolithic voltage regulators switch-off protection for over / under voltage and over temperature failures
- Power distribution rear side via standard NIM connector
- Front panel with mains switch and control LED's for status and failure
- Optional with CAN-bus interface for remote monitoring and control
- AC input 230V/50 Hz or 110V/60Hz
- Dimensions: width 2 1/2 NIM, height 183 mm, depth 249 mm, weight: 7.5 kg
- CE Conformity

Ordering Information

Standard configurations (others possible by request).

Type	+6V/-6V	+12V/-12V	+24V/-24V	115VAC	Power
UEP15_x	5A/5A	3A/3A	1.5A/1.5A	0.25A	150W

x = defines the AC input voltage, factory default is 220V AC (without index)
 x = B: 110V AC
 x = J: 100V AC
 x = E: 240V AC

Technical Information

NIM Compact Slot Power Supply UEP 15

Plug in power supply for use in UEN 04 bins or for powering every non-powered extant NIM bin. UEP 15 features all 6 voltages, stabilized by adjustable monolithic voltage regulators, on the rear NIM connector with standard NIM pin out. Ground and 6V outputs are spliced to two pins for minimized voltage drop. ^

The integrated blower cools heat sink, components and the toroid transformer. Voltage regulators and transformer are protected against over temperature. Over- under voltage detector (limits ca. +/-3% of nominal voltages) activates mains cutting relay (red signal "bad status" at front panel).

AC Mains voltages: 100, 115, 225, 240VAC by use of different internal transformer taps.

Power supply DC-Outputs:	+6V	-6V	+12V	-12V	+24
UEP15	5A	5A	3A	3A	1,5A

UEP15 as	5A	5A	3A	3A	3A
Power supply DC-Outputs:	-24V	115VAC	max. power	regulation	application
UEP15	1,5A	0.1A	150W	linear	NIM
UEP15 as	0,5A	0.1A	150W	linear	NIM
UEP15					
Input voltage, 47-63Hz	100V, 110V, 215V, 220V, 240V all (+/-10%), 5 internal taps				
Soft start	yes				
Output: Noise and Ripple: Full load +/-6 / 12 / 24V	<3mVpp / <5mVpp / <10mVpp				
Regulation static: Change of output voltage versus load change 10-100%	<0,2% for 6V, 0,1% for 12/24V				
Regulation static: change of output voltage versus line change +/-10%	0,02%				
Recovery time versus load change 10-100%	<0,15ms				
Output impedance: Static / Dynamic(at 100kHz)	1,5mOhm / 0,5 Ohm				
Temperature Error	<0,02%/K				
Thermal Protection (No. of thermal switches)	(1x) and Regulators internally				
Output Current Characteristics (short <3A in foldback regulators), reverse bias diodes!	Constant current and trip off				
Dual tracking for complementary outputs	no				
Calibration ranges Voltage / Currents	+/-5% / fix limits				
Sense compensation ranges, all DC voltages	0V				
Status Control for all voltages (Over- Under-Voltage Comparator, defaults +/-0,3%)	Bad Status red LED, unit trips off				
Overvoltage Protection, trip off thresholds (defaults)	+/-0,3% of nom voltages				
Derating	>40°C with 2% up to 60°C max.				
Optional CAN-bus interface for DC voltage monitoring and remote on/off via rear 9 pin sub D connector					



Π4. ΤΡΟΦΟΔΟΤΙΚΟ ΥΨΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ γεωμετρίας NIM με πλάτος 2U, εταιρείας κατασκευής CANBERRA, τύπου 3002

HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY model 3002

CANBERRA

NUCLEAR ELECTRONICS

Features

- Compact NIM Bin Package
- Regulated $\pm 0-3000$ VDC, 0-10mA Output
- External Control of Output Voltage over Full Range
- Front Panel Lights Indicate Polarity
- Noise and Ripple < 10 mV P-P – No Audible Noise
- 115 or 230VAC Input Power
- Overload and Short-Circuit Protected
- Meter to Monitor Output Voltage

Description

The Canberra Model 3002 is a NIM-bin compatible high voltage power supply designed for operation with essentially all types of nuclear radiation detectors. Particularly well-suited to high resolution system applications, the standard two-width NIM module supplies well-regulated stable detector bias with extremely low ripple and noise content.

A recessed switch on the bottom panel is used to select either 115 or 230VAC input power furnished through a power line cord and connector. The Model 3002 can also be operated outside the NIM bin from any ac power receptacle, since it requires no power from the bin. The unit has no audible noise; and, therefore, can be operated in close proximity to users without the effects of irritating, unpleasant audio sounds. The power supply will withstand any overload or direct output short-circuit for an indefinite period of time and provide normal output automatically upon removal of the overload.

Output voltage is continuously adjustable by means of the two calibrated front panel voltage controls over the full range from 0 to ± 3000 volts. The output voltage can also be controlled over its full range by application of an external input DC level of 0 to -5V through a rear panel BNC connector. This feature is desirable for control applications and is standard on all units. A meter is provided to monitor the output voltage.

A polarity reversal switch provides selection of positive or negative output polarity. To prevent inadvertent polarity reversal, the switch is rear panel mounted and screwdriver activated. In addition, the setting of the polarity selector switch is indicated by illumination of either the positive or negative LED indicator on the front panel for safety and convenience of the user.

Specifications

INPUTS

AC POWER LINE - 115/230VAC $\pm 10\%$, 50-60Hz; power supplied through rear panel 3-wire captive line cord with standard NEMA male connector

PROGRAM (REMOTE) - accepts external reference input to determine output voltage when PROGRAM switch is in REMOTE; 0 to -5 volt input provides 0 to ± 3000 VDC output; rear panel BNC connector; the output polarity is set by the polarity selector switch

OUTPUTS

REGULATED H.V. OUTPUT - 0 to ± 3000 VDC, continuously adjustable; 0 to 10mA output current capability; two rear panel MHV high voltage coaxial connectors

CONTROLS

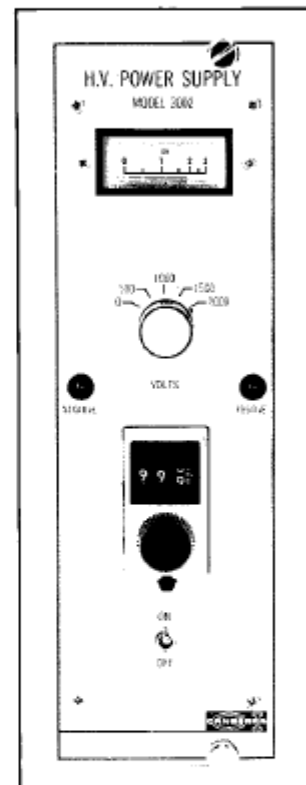
POWER - front panel 2-position toggle switch for main AC power input

OUTPUT VOLTAGE - two front panel controls to set output amplitude when rear panel program switch is set in the local position; 0-2000V in 500V steps; 0-1000V with 10-turn precision potentiometer, output voltage is sum of the two control settings $\pm 0.25\%$

INDICATORS

METER - output voltage monitor

LED LAMPS - polarity (positive and negative)



Specifications (continued)

CONTROLS(Cont.)

PROGRAM LOCAL/REMOTE - rear panel slide switch selects LOCAL (manual) operation or REMOTE reference input to determine output voltage

POLARITY - rear panel 2-position screwdriver switch selects either POSitive or NEGative output polarity

115/230 VAC - recessed slide switch on the bottom panel permits operation on either 115 or 230VAC nominal input power

PERFORMANCE

RIPPLE AND NOISE - <10mV peak-to-peak, 5Hz to 50MHz

OUTPUT STABILITY - long term drift of output voltage is <0.01%/hr. and <0.02%/B hr. period, at constant input line voltage, load, and ambient temperature, after a 30 minute warmup

REGULATION - $\leq 0.001\%$ variation in output voltage for line changes; $\leq 0.01\%$ variation in output voltage for load changes within the operating range at constant ambient temperature

TEMPERATURE COEFFICIENT - $\leq \pm 50\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ after 30 minute warmup, operating range 0 to 50 $^{\circ}\text{C}$

OVERLOAD PROTECTION - power supply will withstand any overload, including a short-circuit for an indefinite period, and will automatically resume normal operation upon removal of the overload

CALIBRATION ACCURACY - output voltage will differ by $< \pm 0.25\%$ from sum of control settings plus 0.05% of maximum voltage

RESETABILITY - output voltage can be reset to within ± 0.2 volt

OUTPUT LOAD CAPACITY - 0 to 10mA

OUTPUT RANGE - 0 to $\pm 3000\text{VDC}$

CONNECTORS

INPUT POWER - rear panel 3-wire captive AC line cord with standard NEMA male connector

OUTPUT VOLTAGE - two rear panel type MHV female high voltage coaxial connectors

REMOTE CONTROL - rear panel, BNC, UG-1094/U

POWER REQUIREMENTS

115/230VAC, 50-60Hz, no DC power requirements; AC power line protection via rear panel 1 amp SLO BLO fuse (0.5 amp SLO BLO for 230VAC)

PHYSICAL

SIZE - standard double-width NIM module, 2.70 x 8.714 inches, (6.85 x 22.13 cm) per TID-20893 (rev.)

NET WEIGHT - 12lb (5.40kg)

SHIPPING WEIGHT - 17 lb(7.65kg)

Π5. ΕΝΙΣΧΥΤΗΣ γεωμετρίας NIM με πλάτος 1U, εταιρείας κατασκευής CANBERRA (MIRION), τύπου 2026



SIGNAL PROCESSING

2026

Spectroscopy Amplifier

The 2026 amplifier provides the features and performance of a research amplifier in an easy to use single width NIM module.



FEATURES

- Gaussian/Triangular shaping
- Super fine gain control
- Pileup rejector and live time corrector
- Automatic baseline recovery rate and threshold
- Differential Input
- Excellent overload recovery
- Compact single width NIM

DESCRIPTION

The Model 2026 amplifier provides the features and performance of a research amplifier in an easy to use single width NIM module. Now you can have the flexibility you need without the amplifier set-up and adjustment aggravation you don't need.

The 2026 unit lets you select either Gaussian or Triangular pulse shaping for the Unipolar output with a convenient front panel switch. In addition, it offers a choice of six front panel switch-selectable shaping time constants for each of the pulse shaping methods. This direct control of both the shaping method and time constants lets you select the configuration that will optimize resolution and throughput performance based on your application.

The 2026 unit's Pileup Rejector/Live Time Corrector (PUR/LTC) circuitry allows quantitative gamma analysis with minimal dependence on system count rate. The PUR circuit interrogates incoming pulses for pile up and generates a signal that prevents the ADC from converting the piled up events. The LTC circuit then generates a system dead time that extends the collection time to compensate for the events lost due to pileup rejection. The result: lower background, better resolution and accurate live time information for the best possible analysis results.



2026 | SPECTROSCOPY AMPLIFIER

But don't worry about setting up this amplifier. Many of the 2026 unit's features are self-adjusting so you get the performance you need and a trouble-free setup. The 2026 amplifier automatically adjusts the PUR threshold just above your system noise level, insuring PUR efficiency and minimizing the spectral distortion caused by pile up at high count rates. The restoration rate and threshold of the gated baseline restorer are also automatically optimized for both low and high count rate applications. With all these automatic features the 2026 unit gives you consistently better data for your activity calculations, regardless of the count rate, the application or the operator.

The 2026 amplifier lets you position peaks precisely and easily with its Super Fine Gain (SFG) control. The SFG provides gain resolution better than 1 in 16 000 (0.00625%), allowing greater precision for more accurate peak location in less time. This feature is now a requirement, instead of a luxury, for most spectroscopy systems. This is especially true in applications using detector arrays in which the inputs from several detectors must be combined into a single spectrum.

The excellent overload recovery characteristics of the 2026 unit make it ideal for use with today's high throughput reset preamplifiers such as the Mirion 2101 Transistor Reset Preamplifier. This allows you to assemble a high resolution spectroscopy system without the energy rate limitations normally associated with RC preamplifiers.

The Model 2026 unit's wide gain range allows you to use it with a wide range of detectors including germanium, silicon, scintillation, proportional counters or pulsed ion chambers. The versatility of the 2026 amplifier is further enhanced by a bipolar output for use in timing and gating applications.

SPECIFICATIONS

Inputs

- Input (Front Panel): BNC connector accepts positive or negative tail pulses from an associated preamplifier; amplitude ± 10 V divided by the selected gain, ± 25 V maximum; rise time: less than shaping time constant; decay time constant: $40 \mu\text{s}$ to ∞ ; polarity set with the POLARITY switch. Z_{in} changes with COARSE GAIN and POLARITY settings, $21 \text{ k}\Omega < Z_{in} < 0.5 \text{ k}\Omega$; front panel BNC connector
- Input (Rear Panel): BNC connector is wired in parallel with the front panel INPUT BNC when the internal NORM/DIFF slide switch is set to NORM; functionality and specification are the same as the front panel INPUT BNC; with the DIFF mode selected the rear panel BNC accepts a preamplifier ground reference. Z_{in} changes with COARSE GAIN and POLARITY settings, $21 \text{ k}\Omega < Z_{in} < 0.5 \text{ k}\Omega$; front panel BNC connector
- Inhibit: Accepts a standard TTL logic signal from associated reset preamplifier, used to extend the Dead Time signal, inhibit and reset the pileup rejector during the preamplifier's reset cycle; positive true or negative true signal polarities, internally selectable; Loading: $5.2 \text{ k}\Omega$ resistor connected to $+5$ V for positive true or ground for negative true; rear panel BNC connector

- LG (Linear Gate): Accepts a standard TTL logic signal from associated Mirion ADC. Indicates to the 2026 unit that the ADC is acquiring an event; logic low during ADC acquire, returns high at conclusion; loading: $4.7 \text{ k}\Omega$ pull up resistor to $+5$ V; accessible through pin 1 of the rear panel PUR connector

Outputs

- UN: Provides positive, linear actively filtered shaped pulses; amplitude linear to $+10$ V, 12 V max.; dc restored; output dc level factory calibrated to 0 ± 5 mV; front panel $Z_{out} < 1 \Omega$ or 93Ω , internally selectable; rear panel Z_{out} is 93Ω ; short circuit protected; front and rear panel BNC connectors
- BI: Provides prompt positive lobe leading linear active filter bipolar shaped pulses; amplitude linear to $+10$ V, 12 V max., negative lobe is approximately 70% of positive lobe; dc coupled; output dc level $\leq \pm 10$ mV; front panel $Z_{out} < 1 \Omega$ or 93Ω ; internally selectable; rear panel Z_{out} is 93Ω ; short circuit protected; front and rear panel BNCs
- DT/BSY: Rear panel BNC with two functions: Dead Time or Busy Time, internally selected; TTL output with $1 \text{ k}\Omega$ pull up resistor through a 47Ω series resistor
 - DT: Provides a negative true TTL logic signal and when ORed with ADC dead time, provides Live Time correction for the amplifier and pileup rejector. Operational only with PUR/LTC invoked by installation of the C15M PUR/LTC cable between the amplifier and the ADC
 - BSY: Provides a negative true TTL logic signal that represents the amplifier busy time; logic low during amplifier processing time or from external INHIBIT
- REJECT: Provides a positive true TTL logic signal that is used to initiate an ADC reject sequence. Operational only with PUR/LTC invoked by installation of the C15M PUR/LTC cable between the 2026 amplifier and the ADC. REJECT is set true for piled up events (determined by the 2026 unit), negative unipolar output signals that exceed -500 mV and while the rear panel INHIBIT is true. REJECT provides TTL output with a $1 \text{ k}\Omega$ pull up resistor through 47Ω series resistor; accessible through pin 2 of the rear panel PUR connector
- ICR (Incoming Count Rate): Provides a standard TTL logic signal corresponding to input count rate; disabled by INHIBIT; positive true; width nominally 150 ns, TTL output with $1 \text{ k}\Omega$ pull up resistor through 47Ω output resistor; rear panel BNC connector

Front Panel Controls and Indicators

- Coarse gain: Eight-position rotary switch selects gain factors of X5, X10, X20, X50, X100, X200, X500, and X1000
- Fine gain: Ten-turn locking dial precision potentiometer selects variable gain factor of X0.5 to X1.5; resetability 0.03%
- SFG (Super Fine Gain): Multi-turn screwdriver potentiometer adjusts fine gain; resolution better than 0.00625% (1 in 16 000); adjustment range: 1% of the FINE GAIN RANGE
- PIZ: Multi-turn screwdriver adjustable pole/zero matching potentiometer optimizes amplifier baseline recovery and overload performance for the preamplifier's fall time constant and the amplifier's chosen shaping time; range: $40 \mu\text{s}$ to ∞
- Mode: Two-position toggle switch selects semi-triangular or semi-Gaussian pulse shaping for the unipolar (UN) output
- Shaping time: Six-position rotary switch provides 0.5, 1, 2, 4, 6 and $12 \mu\text{s}$ shaping time constants
- Limit: Momentary pushbutton switch clamps the UN signal to approximately ± 300 mV, which minimizes oscilloscope overload for precise PIZ adjustment
- Polarity: Two-position toggle switch selects positive or negative input polarity to match the incoming preamplifier signal polarity
- PUR Accept/Reject: Multi-color green/yellow/red LED indicates pile up status when PUR is selected. Appears green for approximately up to 40% of pulses rejected, yellow for 40-70%, and red for 70% and above

2026 | SPECTROSCOPY AMPLIFIER

Internal Controls and Jumpers

- Normal/Differential: Two-position slide switch selects rear panel INPUT BNC for DIFFERENTIAL input ground reference
- CM Bal: Multi-turn potentiometer equalizes the NORM and DIFF input gains to maximize the common-mode noise rejection; operates only in DIFF mode
- Restorer mode: Two-position internal jumper selects SYMMETRICAL or ASYMMETRICAL baseline restorer modes

Connectors

- With the exception of the PUR and PREAMP POWER connectors, all signal connectors are BNC type
- PUR: Rear panel Molex plug 03-06-1031
- Preamp power: Rear panel, Amphenol, type 9-10070

Performance

- Gain range: Continuously variable from X2.5 to X1500
- Temperature coefficients: UNipolar: Gain – 0.005%/°C, dc level – $\leq 7.5 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$; BIpolar: Gain – $\leq 0.007\%/^\circ\text{C}$, dc level – $\leq 30 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
- Integral nonlinearity: $\leq 0.04\%$ over total output range for 2 μs shaping
- Crossover walk: BIpolar output: $\leq 3 \text{ ns}$ for 50:1 dynamic range and 2 μs shaping when used with Mirion Model 2037A Edge/Crossover Timing SCA
- Overload recovery: UNipolar (BIpolar) output recovers to within $\pm 2\%$ (1%) of full scale output from X1000 overload in 2.5 (2.0) non-overloaded pulse widths at full gain, at any shaping time constant, and with PIZ properly set
- Noise contribution: $\leq 4.5 \mu\text{V}$ (7.0 μV) true RMS, UNipolar (BIpolar) output referred to input, 2 μs shaping, and amplifier gain ≥ 100
- Pulse shaping: Near-Gaussian or near-triangular shape; one differentiator (two for bipolar); three active filter integrators realizing eight-pole shaping network; shaping time parameters referenced to 1 μs are listed in following table:

Parameter	Shaping Time Multiplier		
	Triangular	Gaussian	Bipolar
Time to peak	2.7	2.9	2.3
0.1% full scale output to peak	2.5	2.2	
Pulse width at half maximum	2.5	2.1	1.4
Pulse width at tenth maximum	5.6	5.0	
Pulse width at 1/100 maximum	6.7	6.2	
Bipolar crossover/Unipolar peak delay			0.8

- Restorer: Active gated. Restorer rate and threshold are set automatically by internal circuits
- Spectrum broadening: The FWHM of ^{60}Co 1.33 MeV gamma peak for an incoming count rate of 2 kcps to 100 kcps and a 9 V pulse height will typically change less than 6% for 2 μs Gaussian shaping, ASYM restorer mode, and with PIZ properly set. These results may not be reproducible if the associated detector exhibits an inordinate amount of long rise time signals
- Count rate stability: The peak position of a ^{60}Co 1.33 MeV gamma peak for an incoming count rate of 2 kcps to 100 kcps and a 9 V pulse height will typically shift less than 0.02% for 2 μs Gaussian shaping, ASYM restorer mode, and with PIZ properly set
- Common mode rejection: 60 dB at 60 Hz; 20 dB at 1 MHz

Pileup Rejection/Live Time Corrector

- PUR (Pileup Rejection) Enabled when the C1514 PUR/LTC cable is connected; disconnect C1514 cable to disable
- Pulse pair resolution: $\leq 500 \text{ ns}$
- Minimum detectable signal: Limited by detector/preamp noise characteristics
- Pur threshold: Threshold set automatically by internal circuit

Power Requirements

- +24 V dc – 110 mA +12 V dc – 220 mA
- –24 V dc – 130 mA –12 V dc – 160 mA
- These current requirements exceed the normal single-width Bin allotment of 167 mA for 12 V and 83 mA for 24 V

Accessories

- C1514 PUR/LTC and DT cable set

Physical

- Size: Standard single-width NIM module 3.43 x 22.12 cm (1.35 x 8.71 in.) per DOE/ER-0457T
- Net weight: 1.0 kg (2.2 lb)
- Shipping weight: 1.9 kg (4.2 lb)

Environmental

- Operating temperature: 0 to 50 °C
- Operating humidity: 0 to 80% relative, non-condensing
- Meets the environmental conditions specified by EN 61010, Installation Category I, Pollution Degree 2



NSP0024 – 11/2010

Copyright © 2010 Mirion Technologies, Inc. or its affiliates. All rights reserved. Mirion, the Mirion logo, and other trade names of Mirion products listed herein are registered trademarks or trademarks of Mirion Technologies, Inc. or its affiliates in the United States and other countries. Third party trademarks mentioned are the property of their respective owners.



www.mirion.com

Π6. ΔΙΑΧΩΡΙΣΤΗΣ γεωμετρίας NIM με πλάτος 1U, εταιρείας κατασκευής CANBERRA, τύπου SCA 2030

Model 2030 Single Channel Analyzer

Features

- Independent ULD, LLD, and SCA outputs
- Precise threshold discrimination
- Exceptional stability – dc-coupled input
- External baseline sweep input
- Dynamic range 1000:1
- LLD monitored by LED display
- Source matched logic outputs

Description

The Canberra Model 2030 analyzes the peak amplitude of energy pulses from nuclear pulse shaping amplifiers, and generates its primary logic output (SCA) for input analog pulses between the levels referenced by the Lower Level (E) and Window (ΔE) front panel ten-turn controls. Auxiliary outputs from the Lower Level Discriminator (LLD) as set by (E), and the Upper Level Discriminator (ULD) as set by (E + ΔE) are also provided. Timing of these logic outputs is set as the trailing edge of the input signal crosses the (E) reference.

The several outputs may be used together or individually to assist in a wide variety of applications from simple noise removal to extraction of a narrow energy range from a wide spectrum of signals for energy analysis. The sharp, precise threshold discrimination levels are exceptionally stable (drift is less than $\pm 0.005\%/^{\circ}\text{C}$, full scale). The dc coupled input allows excellent baseline stability limited only by the shaping amplifier's restorer. These significant features permit excellent amplitude discrimination, even in high count rate spectra.

The Lower Level (E) threshold is calibrated by reference to the regulated NIM supply voltages, and is usable over the range from +0.001 V dc to +10.0 V dc. Linearity of control is limited only by the specified $\pm 0.25\%$ maximum nonlinearity of the front panel potentiometer. A front panel mounted LED is useful in visually monitoring the setting of the Lower Level (E) reference just above the shaping amplifier's noise level (the LED will fade off).

The Window (ΔE) threshold is also calibrated by reference to the regulated NIM supply voltages, and is usable over the range from the Lower Level (E) setting to +10.0 V dc. A front panel ΔE Range switch allows use of a 1.0 V full scale range for very fine adjustments of the desired window.

An external lower level discriminator (LLD) input on the rear panel may be used in place of the front panel control for applications requiring a ratioed or sweeping baseline reference over the energy range. This input requires a positive polarity reference voltage, and is linear over the full scale of 0 to +10.0 V dc. A locking toggle switch is used to select this input.

All output logic signals are positive logic, and are adjustable in peak amplitude for compatibility with interfacing instruments. All outputs are source matched with 50 Ω series resistive terminations to prevent ringing due to reflections on unterminated cables, and the resulting multiple counting frequently experienced. The instrument is shipped with a socketed resistor which limits the output to +5 V nominal (open circuit) for direct interface with common TTL circuitry. The resistor (1 for each output) can be removed to obtain a +8 V nominal open circuit voltage for instruments requiring the NIM pulse level, or +4 V nominal into the 50 Ω load termination which some other instruments provide. This flexibility adapts the output signal to various needs without risking the problem encountered with improperly driven cables. Load end terminations are not necessary.



Careful attention has been paid to minimize reflections of the fast logic pulses back to the analog input. Thus all logic outputs are isolated from chassis to prevent circulating pulse currents in the instrument bin.

Specifications

INPUTS

SIGNAL INPUT – Accepts +0.01 to +10.0 V dc, unipolar or bipolar (positive lobe leading) pulses from shaping amplifier. $Z_{in} = 1 \text{ k}\Omega$. Shaping time constant range 0.1 to 20 μs ; front and rear panel BNCs.

EXTERNAL LLD REFERENCE – Accepts 0 to +10.0 V dc; $Z_{in} = 1 \text{ k}\Omega$; rear panel BNC.

OUTPUTS

SCA – Positive logic +5 V nominal pulse amplitude, adjustable to +8 V nominal pulse by removing socketed resistor; $Z_{out} = 50 \Omega$; pulse width 0.5 μs , nominal; rise time and fall time <25 ns; front and rear panel BNCs.

ULD – Same characteristics as SCA output; rear panel BNC.

LLD – Same characteristics as SCA output; rear panel BNC.

CONTROLS

LOWER LEVEL (E) – Front panel ten-turn locking dial potentiometer to set lower discriminator threshold level.

WINDOW (ΔE) – Front panel ten-turn locking dial potentiometer to set window width (upper discriminator threshold level above lower level).

ΔE RANGE – Front panel toggle switch to set full scale range of WINDOW (ΔE) control as +1.0 V dc or +10.0 V dc.
LLD REF MODE – Rear panel locking toggle switch to select INTERNAL lower level via front panel control, or EXTERNAL input.

INDICATOR

LOWER LEVEL – Front panel LED blinks when input exceeds LLD setting.

PERFORMANCE

DISCRIMINATOR NONLINEARITY – $< \pm 0.25\%$ of full scale.
DISCRIMINATOR STABILITY – $< \pm 0.005\%/^{\circ}\text{C}$ (± 50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$) of full scale, referenced to NIM class A supply +12 V dc line.
DISCRIMINATOR RANGE – $\leq 1000:1$.
DISCRIMINATOR PULSE PAIR RESOLUTION – < 0.65 μs .

CONNECTORS

All signal connectors are BNC type.

POWER REQUIREMENTS

+12 V dc – 155 mA –12 V dc – 5 mA

PHYSICAL

SIZE – Standard single width NIM module 3.43 x 22.12 cm (1.35 x 8.71 in.) per DOE/ER-0457T.
NET WEIGHT – 0.8 kg (1.8 lb).
SHIPPING WEIGHT – 1.8 kg (4.0 lb).

ENVIRONMENTAL

OPERATING TEMPERATURE – 0 to 50 $^{\circ}\text{C}$.
OPERATING HUMIDITY – 0-80% relative, non-condensing.
Tested to the environmental conditions specified by EN 61010, Installation Category I, Pollution Degree 2.



Π7. ΚΑΤΑΜΕΤΡΗΤΗΣ (και ΧΡΟΝΟΜΕΤΡΟ) γεωμετρίας NIM με πλάτος
2U, εταιρείας κατασκευής CANBERRA, τύπου 512
(πρώην TENNELEC τύπου 512)

TENNELEC

TC 512
Dual Counter and Timer

DESCRIPTION

The TENNELEC model TC 512 Dual Counter and Timer opens a new era in high performance, computer-control Nuclear Instrumentation Module (NIM) counters and timers. Housed in a double-width NIM module, the TC 512 offers **greater than 250 MHz count rate capability** for the most demanding counting applications. In addition, the counters in the TC 512 have a **count capacity of $10^{15}-1$** . Photon counting applications, or experiments requiring pulse-pair resolutions of <4 nanoseconds, are now no longer limited by the counter/timer. When used with the TENNELEC model TC 454 or TC 455 Quad Constant Fraction Discriminators, the TC 512 provides unparalleled performance.

The TC 512 offers stand-alone performance in addition to being **completely computer-controllable**, if desired. **Stand-alone operations** are menu-driven and illuminated push buttons are used to select displayed data, operating mode, count/stop/reset operation, and in the manual programming. All functions, including threshold settings, are programmable via the instrument's front panel or the **optional IEEE-488 or RS 232C interfaces**. Two additional options further extend the flexibility of the TC 512 Dual Counter and Timer. **The Print-loop interface option allows older TENNELEC counters and timers to interface with computers. The Parallel printer interface option** allows the system to output data to a standard, inexpensive, personal computer-type printer instead of dedicated NIM units.

The TC 512 includes two timers. The non-gateable standard timer has a selectable resolution of 0.01 seconds (sec) or 0.01 minutes (min), and is fully programmable from 0.01 to 99999999.99 sec/min. The standard timer is software-based so that both counting channels are available for counting.

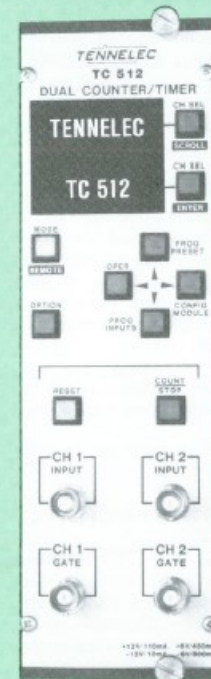
The **gateable high resolution timer has a resolution of 0.1 μ sec** and is fully programmable from 0.0000001 sec to 9.9999999 sec, and further programmable in 10 sec increments up to 99999990.0 sec. Depending on the mode of operation, the high resolution timer utilizes channel 1 or channel 2, so that only one counting channel is available when the high resolution timer is used. Also included is a **programmable recycle timer** which resets and initiates a new counting interval at the completion of a cycle.

The TC 512 includes two high-speed counters capable of greater than 250 MHz operation. Polarity, threshold, and counter/timer presets are all fully front-panel programmable. Depending on the mode of operation, channel 1 may be defined as a preset counter or preset high resolution timer. Also, depending on the mode selected, channel 2 may be defined as a high resolution interval timer. When channel 1 is defined as the Preset Counter, it is fully programmable from 1 to 99999999 counts. Both counter channels have a dynamic range of $10^{15}-1$ counts, so overflow outputs are not required. Both channels are gateable from the front-panel GATE inputs in both the counter and timer configurations.

The TC 512 includes a software-based **event counter** which increments at the completion of each counting interval. If the event counter value equals the event preset register, then further count intervals are inhibited (recycle is disabled).

Eight different operating configuration-presets, input polarity/threshold, counting modes, etc. may be saved in non-volatile memory and recalled on command. In addition, one of these configurations may be selected as the **power-on default configuration**. A **self-test mode** allows confirmation of proper counter/timer functioning at power on.

- >250 MHz count rate capability; $10^{15}-1$ count capacity
- Complete computer control via optional IEEE-488 or RS-232C interface
- Stand-alone programming capability
- Print-loop interface option allows older TENNELEC counters to interface with computers
- Parallel printer interface option
- High resolution timer with 0.1 μ sec preset capability
- Self-test mode



TENNELEC

INNOVATION TO MAKE IT FIRST... RELIABILITY TO MAKE IT LAST

SPECIFICATIONS

PERFORMANCE

COUNT CAPACITY Counter channels have a count capacity of 10^{15} -1 counts. Preset counter channel has a count capacity of 10^8 -1 counts.

MAXIMUM COUNTING RATE Maximum counting rate for positive inputs is 25 MHz. For negative inputs, maximum rate is greater than 250 MHz.

PULSE PAIR RESOLUTION <40ns for positive inputs; <4ns for negative inputs.

INPUT DISCRIMINATOR With positive polarity selected, the discriminator threshold is adjustable from +100 mV to +10V. With negative polarity, the threshold is adjustable from -100 mV to -5V. Threshold resolution for both polarities is 5 mV. When the polarity is first changed, the threshold defaults to the appropriate NIM logic level threshold: +1.5V (pos) or -250 mV (neg).

MINIMUM PULSE WIDTH <20ns for positive inputs; <2ns for negative inputs.

TIME BASE Two time bases are provided, depending on mode. The high resolution timer is based on a 10 MHz oscillator and has a resolution of 10^{-7} sec. Preset Ranges are 0.0000001 sec to 9.9999999 sec or 10.0 sec to 99999990.0 sec in 10 sec increments. The standard timer is selectable to 0.01 sec or 0.01 min resolution. Preset Range is 0.01 sec/min to 9999999.99 sec/min.

TIME BASE INACCURACY Maximum error for both time bases is $\pm 0.0025\%$.

OPERATING TEMPERATURE
0 to 50°C.

CONTROLS AND INDICATORS

Displays Two 8-digit alphanumeric dot-matrix displays. The data display features automatic formatting and leading zero suppression. The display shifts to exponential format when accumulated counts exceed 10^8 -1 counts, or displayed time is greater than 10^4 -1 sec or min. In addition, using the high resolution timer, or displaying intervals of less than one second, results in a mS (millisecond) or μ S (microsecond) display. Full display restoration is obtained by using the Left/Right cursor keys to reformat the display.

CH SEL/SCROLL CH SEL: In local or remote, this pushbutton selects one channel for display from all available for that mode. SCROLL: In local, used to scroll through menu selections during programming. Disabled in remote.

CH SEL/ENTER CH SEL: In local or remote, used to select one channel for display from all available for that mode. ENTER: In local, used to select an item from the menu or to enter new presets, thresholds, etc. Disabled in remote.

MODE/REMOTE In local, when pressed, illuminates and enables (for two seconds) OPER, PROG PRESET, CONFIG MODULE, and PROG INPUTS function pushbuttons. In remote state, illuminated continuously to indicate computer control and disables local programming, COUNT/STOP/RESET pushbuttons.

CURSORS In local and remote, Left, Right, Up, Down keys reformat display (for 20 sec) and scan display left and right. In local only, also used to enter presets and thresholds during programming.

OPER In local, MODE+OPER returns module to normal operation from one of the programming modes and illuminates.

PROG PRESET In local, MODE+PROG PRESET enters the Presets Programming Mode and illuminates.

CONFIG MODULE In local, MODE+CONFIG MODULE enters the Configure Module Programming Mode and illuminates.

PROG INPUTS In local, MODE+PROG INPUTS enters the Program Inputs Programming Mode and illuminates.

OPTION In local, used for selection of various functions.

RESET In local, RESET+COUNT/STOP resets timers/counters.

COUNT/STOP In local, starts or stops counting. Synchronized to timer channel 1, depending on mode.

CONNECTORS

CH 1 INPUT Front-panel input connector for Channel 1 counter. Polarity and threshold are selected through the PROG INPUTS function. With Negative polarity selected: input impedance is 50 ohms, dc-coupled. Threshold is adjustable from -100 mV to -5V, in 5 mV increments. With Positive polarity selected: input

impedance is 1200 ohms, dc-coupled. Threshold is adjustable from +100 mV to +10V, in 5 mV increments.

CH 1 GATE Front-panel Gate input connector for Channel 1. Accepts NIM Positive Logic signals to enable/disable counting in Channel 1. Open circuit, or $V_{in} > 2.0V$ enables counting; $V_{in} < 1.5V$ disables counting.

CH 2 INPUT Front-panel input connector for Channel 2 counter. Polarity and threshold are selected through the PROG INPUTS function. With negative polarity selected: input impedance is 50 ohms, dc-coupled. Threshold is adjustable from -100 mV to -5V, in 5 mV increments. With positive polarity selected: input impedance is 1200 ohms, dc-coupled. Threshold is adjustable from +100 mV to +10V, in 5 mV increments.

CH 2 GATE Front-panel Gate input connector for Channel 2. Accepts NIM Positive Logic signals to enable/disable counting in Channel 2. Open circuit, or $V_{in} > 2.0V$ enables counting. $V_{in} < 1.5V$ disables counting.

INTERVAL IN/OUT Rear-panel Interval In/Out connector. This connector controls or is controlled by the master count interval. In the counters only mode this connector is an input. In all other modes it is an output. As an input, it responds to standard NIM positive logic levels: open circuit, or $V_{in} > 2.0V$, to count, less than 1.5V to disable counters. As an output, it provides a nominal +5V during the counting interval, and <0.5V when counting is disabled.

COUNTING MODES

1. Two Counters and Timer:

The non-gateable, software-based timer controls the master gate applied to the counting channels. Used for constant counting intervals where dead-time correction is not needed, Channel 1 and Channel 2 function as non-preset counters. The rear-panel INTERVAL IN/OUT connector functions as master gate output to control other counters.

2. High Resolution Timer and Counter:

When this mode is selected, Channel 1 is programmed to act as a high frequency timer. The front-panel CH1 INPUT is internally disconnected and a 10 MHz oscillator signal is gated into Channel 1.

This timer may be gated through the CH1 GATE input. CH2 functions as a non-presettable counter. Rear-panel INTERVAL IN/OUT connector functions as the master gate output to control other counters.

3. Preset Counter and High Resolution Interval Timer:

When this mode is selected, Channel 2 is programmed to act as a high frequency timer. The front-panel CH2 INPUT is internally disconnected and a 10MHz oscillator signal is gated into Channel 2. This timer may be gated through the CH2 GATE input. Channel 1 functions as a fully presettable counter (Note: in this mode, the timer is not presettable - it measures the time required to accumulate N counts). The rear-panel INTERVAL IN/OUT connector functions as a master gate output to control other counters.

4. Preset Counter and Counter:

When this mode is selected, Channel 1 functions as a fully presettable counter and Channel 2 functions as a normal counter. No timer is available in this mode. Rear-panel INTERVAL IN/OUT connector functions as the master gate output to control other counters.

5. Counters Only:

When this mode is selected, Channel 1 and Channel 2 function as normal counters, for instance, when used with other counters and timers. No timer is available in this mode. Rear-panel INTERVAL IN/OUT connector functions as the master gate input.

INTERFACES

MODEL TC 512-01 Optional, user-installable IEEE-488 interface, provides computer control of all TC 512 functions (except bus address). Programming interface via IEEE Std 488.2-1987. Power required: +6V @ 325 mA.

MODEL TC 512-02 Optional, user-installable RS-232 interface, provides computer control of all TC 512 functions (except communication parameters). Programming interface is similar to that required for the IEEE-488 Interface, with certain modification. Power required: +6V @ 10 mA.

MODEL TC 512-03 Optional, user-installable Print Loop interface, provides

connection to daisy-chain print loop systems. Power required: +6V @ 50 mA.

MODEL TC 512-04 Optional, user-installable parallel printer interface, provides connection to personal computer-type printer. Power required: +6V @ 50 mA.

ORDERING INFORMATION

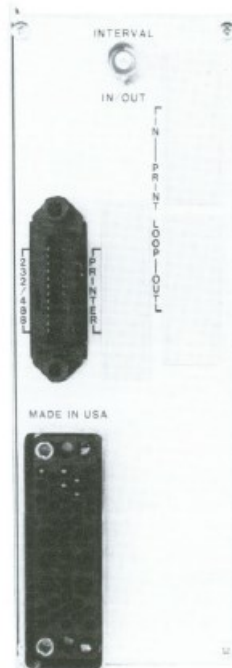
POWER REQUIREMENTS

+12 V, 110 mA; +6 V, 450 mA
-12 V, 10 mA; -6 V, 800 mA

WEIGHT (SHIPPING) 5 lbs. (2.27 kg)
(NET) 3 lbs. (1.36 kg)

DIMENSIONS Standard double-width NIM module (2.70 x 8.714 in.) per TID-20893 (Rev.).

INSTRUCTION MANUAL One provided with each instrument ordered.

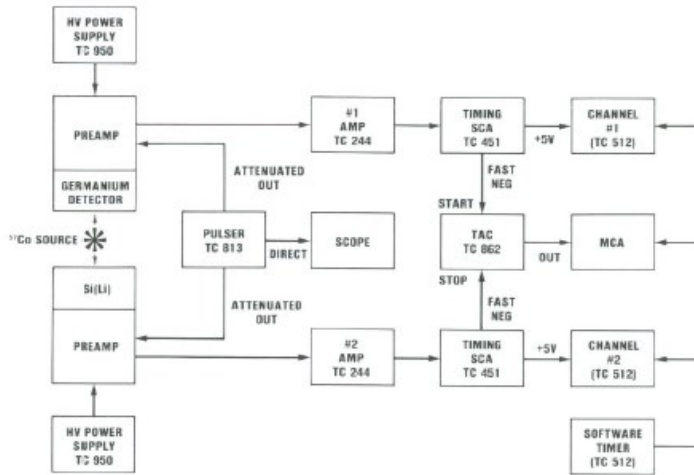


TYPICAL APPLICATIONS*

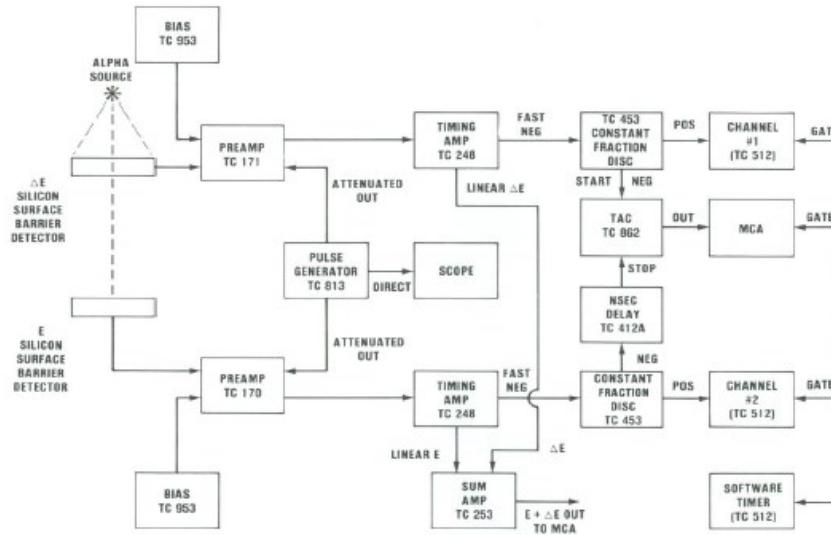
The following applications represent only two of the many possible uses of the versatile TC 512 Dual Counter and Timer.

When used with a Nucleus PCA card, and an optional IEEE 488 or RS 232C interface card, all data can be read and controlled from a single personal computer.

As more laboratories discover the usefulness of the personal computer, the TC 512 may become the counter/timer of choice for discriminating institutions.



Electronics for measuring the mean life of the 14.39 keV state in ⁵⁷Fe. This set up uses a Germanium detector to start the TAC and a Si(Li) detector to stop the time sequences. The measurement of nuclear lifetimes is one of the best experimental techniques to verify the Heisenberg uncertainty principle.



Electronics for an alpha particle time-of-flight experiment.

* (Taken from *Laboratory Investigations in Nuclear Science*, available from Tennelec/Nucleus, Inc.)



TENNELEC/NUCLEUS, INC.
 801 Oak Ridge Turnpike, P.O. Box 2560, Oak Ridge, Tennessee 37831-2560, U.S.A.
 PHONE 615-483-8405 TWX 810-572-1018 FAX 615-483-5891

TC 512 5.0K 091

**Π8. ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗΣ ΠΗΓΗΣ ΡΑΔΟΝΙΟΥ
PYLON RN-2000A**



**CERTIFICATE OF CALIBRATION
RADIUM-226**

ΑΝΤΙ - ΣΕΛ Ο.Ε.
ΑΦΟΙ Α. ΣΕΛΙΔΗ
ΑΝΑΣΙΜΑΔΡΟΥ - ΦΛΕΜΙΝΚ 2
542 50 ΘΕΣΣΟΝΙΚΗ ΤΗΛ. 322.525 FAX 321.912
ΜΙΧΑΛΑΚΟΠΟΥΛΟΥ 116 - 115 27 ΑΘΗΝΑ
ΤΗΛ. 7795.980 - 7700.753

PYLON MODEL	<u>RN-2000A</u>	SERIAL NO.	<u>159</u>
ACTIVE MATERIAL	<u>Radium-226</u>	FORM	<u>dry powder</u>
HALF-LIFE	<u>1600±7 yr</u>	HOUSING	<u>aluminum</u>
DATE OF CALIBRATION	<u>February 3, 1993</u>		
<input type="checkbox"/> SOURCE ACTIVITY	_____ DPM±4%		
<input checked="" type="checkbox"/> SOURCE ACTIVITY	<u>102.8</u>	kBq±4%	
<input type="checkbox"/> ACTIVITY DEPOSITED	_____ DPM/cm ² ±4%		
<input type="checkbox"/> DISPENSED ACTIVITY	_____ Bq±4%		
METHOD OF CALIBRATION			
<input checked="" type="checkbox"/>	Source calibrated by Alpha Scintillation methods on a Model RM-1003 Radon Gas Monitor against NIST Standards. RM-1003 S/N <u>118-112</u>		
<input checked="" type="checkbox"/>	Source calibrated by Alpha Scintillation methods on a Model AB-5 Radon Gas Monitor against NIST Standards. AB-5 S/N <u>235</u>		
<input type="checkbox"/>	Source assayed by Gamma Spectrometry on a NaI(Tl) detector in conjunction with a Multi-Channel Analyzer against NIST Standards. MCA S/N _____		
ESTIMATED ERROR			
Error = $\sqrt{e_1^2 + e_2^2}$ + Error of Reference Standard			
Where e ₁ = Precision of Source Count e ₂ = Precision of Standard Count			
 _____ Laboratory Supervisor		Date <u>September 15, 1993</u>	
 _____ Quality Control Inspector		Date <u>September 15, 1993</u>	

B201203

PYLON ELECTRONIC DEVELOPMENT company, Ltd.
147 Colonnade Rd., Ottawa, Ontario Canada K2E 7L9