

# Συνοπτικό Σχέδιο Εκπόνησης Μεταδιδακτορικής Έρευνας

**Τίτλος Ελληνικά:** Βελτιστοποίηση μεθόδου εναπόθεσης λεπτών οθονών σπινθηριστών με ρητίνη. Χρήση σε απεικονιστικά συστήματα τύπου CMOS για ιατρικές εφαρμογές ακτίνων Χ.

**Τίτλος Αγγλικά:** Optimization of the resin method for thin scintillating screens deposition. Application in CMOS imaging systems for medical X-ray applications.

Στο πλαίσιο της Διδακτορικής διατριβής που ολοκληρώθηκε, μια νέα τεχνική παρασκευής φθορίζουσών οθονών αναπτύχθηκε, βελτιστοποιήθηκε και επικυρώθηκε με την ενσωμάτωση των παραγόμενων οθονών σε ανιχνευτικό σύστημα ακτίνων Χ. Ο οπτικός αισθητήρας ήταν τεχνολογίας CMOS με ενεργό επιφάνεια  $27 \times 36 \text{ mm}^2$  και βήμα εικονοστοιχείων  $22.5 \mu\text{m}$ . Οι φθορίζουσες οθόνες παρασκευάστηκαν με τη χρήση του σπινθηριστή  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ , που είναι ευρέως διαδεδομένος στην ιατρική απεικόνιση.

Η νέα μέθοδος βασίζεται στη θεώρηση ότι ένα υλικό-βάση ενθυλακώνει το υλικό του σπινθηριστή, παρέχει δομική αντοχή και το προστατεύει. Αυτό το υλικό είναι ένα μίγμα ρητίνης και σκληρυντή, στο οποίο προστίθεται και ορισμένη ποσότητα γραφίτη. Ο επιδιωκόμενος σκοπός του γραφίτη είναι να σχηματίσει ένα στρώμα οπτικής απορρόφησης που θα περιορίσει τη διάδοση του παραγόμενου φωτός σε ανεπιθύμητες κατευθύνσεις, όπου συμβάλει στη μείωση της οπτικής οξύτητας. Η τεχνική εκμεταλλεύεται την εγγενή διαφορά στις πυκνότητες του φωσφόρου και του γραφίτη, έτσι ώστε τα αντίστοιχα στρώματα να διαμορφωθούν στα επιθυμητά ύψη εντός του τελικού δοκιμίου.

Επίσης, οι φθορίζουσες οθόνες της νέας μεθόδου παρουσιάζουν αντοχή στις μηχανικές καταπονήσεις. Η σκόνη του σπινθηριστή παραμένει εντός περιβλήματος ρητίνης που την προστατεύει, ενώ αυτό προσφέρει αυξημένη ακαμψία στο δοκίμιο. Κατά την παρασκευή δεν χάνεται σχεδόν καθόλου υλικό σπινθηριστή. Η τεχνική δεν απαιτεί εξεζητημένο εξοπλισμό, κάτι που μπορεί να μειώσει δραματικά το κόστος και να ενθαρρύνει περαιτέρω επιστημονικές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Στη διάρκεια της μεταδιδακτορικής έρευνας θα βελτιστοποιηθούν διάφορες παράμετροι της μεθόδου που αναπτύχθηκε, όπως:

- Θα εξεταστεί η δυνατότητα μείωσης της διάρκειας της διαδικασίας. Επί του παρόντος, για κάθε κομμάτι ή παρτίδα οθονών χρειάζονται τουλάχιστον τρεις ημέρες αναμονής επιπρόσθετα της πραγματικής διεργασίας που μπορεί να απαιτήσει έως και 2 ώρες. Αυτό κατά κύριο λόγο οφείλεται στο χρόνο στερεοποίησης ρητίνης και σκληρυντή. Γενικά στις εποξικές ρητίνες, όσο πιο λεπτό είναι το δοκίμιο, τόσο περισσότερος χρόνος απαιτείται [1]. Αντίστροφα, και εντός συγκεκριμένων ορίων, όσο μεγαλύτερη είναι η συνολική μάζα, τόσο μικρότερος θα είναι ο χρόνος αυτός (mass effect). Για τους σκοπούς της παρούσας έρευνας, οι εμπλεκόμενοι όγκοι είναι αρκετά μικροί. Ένα πλακίδιο ρητίνης πάχους  $2 \text{ mm}$  απαιτεί λιγότερο από  $2 \text{ cm}^3$  συνολικό όγκο υλικού. Κατά συνέπεια, το mass effect δεν είναι αμελητέο. Ένας τρόπος μείωσης του χρόνου στερεοποίησης θα μπορούσε να είναι ο έλεγχος της θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Γενικά, η μείωση της θερμοκρασίας θα επιτάχυνε την αντίδραση. Ωστόσο, πρέπει να δοθεί προσοχή στη συμπύκνωση που πιθανόν να σχηματιστεί και να επηρεάσει την ομοιογένεια του στρώματος του φωσφόρου.

- Η ομοιομορφία του στρώματος φωσφόρου θα μπορούσε να βελτιωθεί, ιδιαίτερα κοντά στα περιθώρια του δοκιμίου. Επίσης, οι οθόνες θα μπορούσαν να έχουν μεγαλύτερη επαναληψιμότητα όσον αφορά την ομοιογένεια της κεντρικής τους περιοχής. Από αυτή την άποψη, η υιοθέτηση τεχνικών από άλλες μεθόδους επίστρωσης λεπτής μεμβράνης θα μπορούσε να συμβάλει, όπως για παράδειγμα η χρήση silane coupling agent.

- Θα γίνει προσπάθεια για παρασκευή οθονών μεγαλύτερου μεγέθους, υπό την προϋπόθεση ότι θα υπάρχει διαθέσιμος αντίστοιχος οπτικός αισθητήρας. Θα πρέπει να διερευνηθεί η βέλτιστη αναλογία

υλικών, καθώς και οι παράμετροι επεξεργασίας. Από την άλλη πλευρά, αυτό θα μπορούσε να αποτελέσει τη λύση για τη βελτίωση της ομοιογένειας κοντά στα περιθώρια της οθόνης.

Επιπλέον μπορούν να διερευνηθούν περαιτέρω ενδιαφέρουσες εφαρμογές, όπως:

- Ορισμένοι σπινθηριστές είναι επιρρεπείς σε αλλοίωση κατά την έκθεσή τους στην υγρασία (NaI, CeBr<sub>3</sub>, LaBr<sub>3</sub>, LaCl<sub>3</sub>, CsF). Η ιδιότητα τους αυτή θέτει περιορισμούς, καθώς πρέπει να περικλείονται σε αεροστεγές θύλακα [2], [3]. Η ρητίνη μπορεί να παίξει και αυτόν τον ρόλο. Αν το πρωτόκολλο προσαρμοστεί έτσι ώστε η υγροσκοπική σκόνη να μην εκτίθεται σε υγρασία κατά τη διάρκεια της παρασκευής, η τελική οθόνη θα λειτουργεί προστατευτικά για τον φώσφορο.

- Προς αυτή την κατεύθυνση, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά με μεγέθη κόκκων στη μικρο- έως νανο- κλίμακα, όπως για παράδειγμα το Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu [4], [5]. Η επίδραση του μεγέθους κόκκου στο μίγμα της ρητίνης και στην επιτεύξιμη ομοιογένεια της οθόνης πρέπει να διερευνηθεί σε βάθος. Λεπτοί κόκκοι ή νανοϋλικά μπορεί να εμφανίσουν συσσωματώματα, κάτι που μπορεί να εμποδίσει την ομοιόμορφη διασπορά τους στο μείγμα και σε όλη την επιφάνεια της οθόνης. Η τάση των νανοϋλικών να συσσωρεύονται εξαρτάται από τις δυνάμεις Van Der Waals μεταξύ των σωματιδίων και από το ιξώδες της ρητίνης [6]. Σε κάθε περίπτωση, η ομογενοποίηση με υπερήχους συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των συσσωματωμάτων, αλλά καταπονεί θερμικά το υλικό, επομένως η ένταση και η διάρκειά της πρέπει να διερευνηθούν περαιτέρω.

- Αντίστοιχα, θα μπορούσε να εξεταστεί η χρήση νανοσωματιδίων άνθρακα. Θα ήταν ενδιαφέρον να διερευνηθεί η κατανομή τους στην επιφάνεια της οθόνης, καθώς και στη διατομή του πλακιδίου σε σχέση με το στρώμα φωσφόρου. Από αυτή την άποψη, έχει αναφερθεί μια μέθοδος ελέγχου της πυκνότητας των νανοσωληνών άνθρακα [7], ιδιότητα που παρουσιάζει ενδιαφέρον στο πλαίσιο της προτεινόμενης έρευνας.

- Ένας τύπος ανιχνευτών διπλής ενέργειας χρησιμοποιεί δύο διαφορετικούς σπινθηριστές (detecting elements) σε έναν ανιχνευτή. Το πρώτο detecting element που δέχεται τα φωτόνια ακτίνων X είναι κατασκευασμένο από υλικό με χαμηλό ατομικό αριθμό και πυκνότητα και βελτιστοποιημένο για την απορρόφηση των φωτονίων χαμηλής ενέργειας. Το δεύτερο detecting element αποτελείται από φώσφορο με υψηλό ατομικό αριθμό και πυκνότητα [8], [9].

Ένα φωτόνιο χαμηλής ενέργειας πιθανότατα θα απορροφηθεί από το πρώτο στοιχείο. Αντίθετα, τα φωτόνια υψηλής ενέργειας θα διασχίσουν το πρώτο στοιχείο και θα απορροφηθούν με μεγαλύτερη πιθανότητα από το δεύτερο στοιχείο.

Επιπλέον, το πρώτο και το δεύτερο στρώμα φωσφόρου μπορούν να επιλεγούν ειδικά σύμφωνα με τα φάσματα εκπομπής τους. Επιθυμητά είναι τα μη-επικαλυπτόμενα φάσματα.

Ο συνδυασμός ZnSe:Te και Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb ως πρώτου και δεύτερου στρώματος φωσφόρου, αντίστοιχα, φαίνεται ιδανικός από αυτή την άποψη. Το ZnSe:Te έχει χαμηλότερη πυκνότητα (5.42 g/cm<sup>3</sup>, σε αντίθεση με τα 7.3 g/cm<sup>3</sup> του Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb) και ένα καλά διαχωρισμένο μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής (640 nm, σε αντίθεση με τα 545 nm του Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb). Σε συνδυασμό με τον διαθέσιμο αισθητήρα CMOS, έχει επίσης άριστη φασματική συμβατότητα (matching factor 0.97). Τέλος, ο ενεργός ατομικός του αριθμός είναι 33 και αυτός του Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb είναι 60 [10], [11].

Θα μπορούσε να παρασκευαστεί ένα πλακίδιο ρητίνης που να περιέχει αυτά τα δύο υλικά. Μετά τη φυγοκέντρηση αυτά θα σχημάτιζαν διακριτές στρώσεις μέσα στο πλακίδιο ρητίνης.

Έλα φίλτρο color filter array (CFA) προσαρμοσμένο στα φάσματα εκπομπής των δύο φωσφόρων θα μπορούσε να εισαχθεί μεταξύ του πλακιδίου ρητίνης και του CMOS. Έτσι αυτός θα μπορεί να διακρίνει από ποιο στοιχείο ανίχνευσης προέρχεται το εισερχόμενο φως, ανάλογα με το χρώμα του.

- Ένα μέσο για τη βελτίωση της χωρικής απόκρισης είναι η αύξηση του packing density του φωσφόρου [12]. Επί του παρόντος, η νέα μέθοδος επιτυγχάνει παρόμοιο packing density με εκείνο εμπορικών οθονών. Η βελτιστοποίηση των παραμέτρων φυγοκέντρησης ή/και των υλικών μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του.

## Αναφορές

- [1] “Resoltech WWA epoxy system Product Datasheet.” <https://www.resoltech.com/en/markets/wwa-range-detail.html> (accessed Feb. 07, 2023).
- [2] D. Linardatos *et al.*, “Light output dependence of CeBr<sub>3</sub> hygroscopic scintillator upon temperature,” presented at the 27<sup>th</sup> International Conference on Fracture and Structural Integrity 22-24 February, 2023, Rome, Italy, 2023.
- [3] D. Linardatos, N. Kalyvas, I. Valais, G. Fountos, I. Kandarakis, and C. Michail, “Cerium Bromide X-ray Scintillation Properties,” in *Physica Medica*, Athens, Greece: Elsevier, Dec. 2022, p. S56. doi: 10.1016/S1120-1797(22)03176-3.
- [4] I. E. Seferis *et al.*, “Detective quantum efficiency (DQE) of high X-ray absorption Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>:Eu thin screens: the role of shape and size of nano- and micro-grains,” *Applied Physics A*, vol. 124, no. 9, p. 604, Sep. 2018, doi: 10.1007/s00339-018-2034-2.
- [5] P. Liaparinos, C. Michail, I. Valais, G. Fountos, A. Karabotsos, and I. Kandarakis, “Grain Size Distribution Analysis of Different Activator Doped Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S Powder Phosphors for Use in Medical Image Sensors,” *Sensors*, vol. 22, no. 22, p. 8702, Nov. 2022, doi: 10.3390/s22228702.
- [6] M. S. Goyat, S. Ray, and P. K. Ghosh, “Innovative application of ultrasonic mixing to produce homogeneously mixed nanoparticulate-epoxy composite of improved physical properties,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 42, no. 10, pp. 1421–1431, Oct. 2011, doi: 10.1016/j.compositesa.2011.06.006.
- [7] H. Na, J. H. Park, J. Hwang, and J. Kim, “Site-specific growth and density control of carbon nanotubes by direct deposition of catalytic nanoparticles generated by spark discharge,” *Nanoscale Res Lett*, vol. 8, no. 1, p. 409, Oct. 2013, doi: 10.1186/1556-276X-8-409.
- [8] N. Martini, V. Koukou, C. Michail, and G. Fountos, “Dual Energy X-ray Methods for the Characterization, Quantification and Imaging of Calcification Minerals and Masses in Breast,” *Crystals*, vol. 10, no. 3, p. 198, Mar. 2020, doi: 10.3390/cryst10030198.
- [9] V. Koukou *et al.*, “Dual energy subtraction method for breast calcification imaging,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A: Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.*, vol. 848, pp. 31–38, 2017, doi: 10.1016/j.nima.2016.12.034.
- [10] D. Linardatos *et al.*, “On the Optical Response of Tellurium Activated Zinc Selenide ZnSe:Te Single Crystal,” *Crystals*, vol. 10, no. 11, p. 961, Oct. 2020, doi: 10.3390/cryst10110961.
- [11] D. Linardatos *et al.*, “Temperature dependence of ZnSe:Te scintillator,” in *Procedia Structural Integrity*, Catania, Italy: Elsevier, 2022, pp. 82–86. doi: 10.1016/j.prostr.2022.05.010.
- [12] P. Liaparinos, N. Kalyvas, E. Katsiotis, and I. Kandarakis, “Investigating the particle packing of powder phosphors for imaging instrumentation technology: an examination of Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb phosphor,” *J. Inst.*, vol. 11, no. 10, pp. P10001–P10001, Oct. 2016, doi: 10.1088/1748-0221/11/10/P10001.

Υποψήφιος Μεταδιδακτορικός Ερευνητής

Διονύσιος Λιναρδάτος

Επιβλέπων Καθηγητής

Χρήστος Μιχαήλ  
Επίκουρος Καθηγητής