



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

Ετήσια έκθεση προόδου PhD

Δημητρακόπουλος Αναστάσιος, Οκτώβριος 2024

Τίτλος: **Μελέτη χαρακτηριστικών απόδοσης κρυσταλλικού σπινθηριστή GAGG:Ce για χρήση σε συστήματα απεικόνισης ιοντιζουσών ακτινοβολιών (αρ. απόφασης 15/13-06-2024)**

Επιβλέπων καθηγητής: Νεκτάριος Καλύβας

Συμβουλευτική Επιτροπή: Νεκτάριος Καλύβας, Ιωάννης Βαλαής, Χρήστος Μιχαήλ

Αρχικοί ερευνητικοί στόχοι:

- Η πειραματική και θεωρητική μελέτη χαρακτηριστικών απόδοσης του κρυσταλλικού σπινθηριστή GAGG:Ce ($Gd_2Al_2Ga_3O_{12}:Ce$) όταν διεγείρεται από ιοντίζουσα ακτινοβολία που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης. Ανάδειξη απεικονιστικών διατάξεων βασισμένων στον εν λόγω κρυσταλλικό σπινθηριστή με μέγιστη δυνατή απόδοση και την ελάχιστη ιοντίζουσα ακτινοβολία.
- Μελέτη εγγενών ιδιοτήτων απόδοσης του σπινθηριστή όπως κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα (QDE), απόδοση ενεργειακής απορρόφησης (EAE), απόλυτη απόδοση φωταύγειας (AE), ανιχνευτική κβαντική απόδοση (DQE) και εν συνεχεία αξιολόγηση τους. Εξέταση της φασματικής σύζευξης (SMF) του GAGG:Ce με διαφόρους φωτοανιχνευτές και της συνολικής απόδοσης φωταύγειας (Effective Efficiency) της διάταξης αυτών.
- Αξιολόγηση χαρακτηριστικών απόδοσης για ανάδειξη παραμέτρων όπως βέλτιστο πάχος σπινθηριστή ανάλογου της ενέργειας της ακτινοβολίας με χρήση θεωρητικού μοντέλου ώστε να χαρακτηριστεί το ποσοστό του διερχόμενου φωτός μέσα στον κρύσταλλο, από την απορρόφηση του ως ιοντίζουσα ακτινοβολία έως την μετατροπή και εν τέλη διάδοση των παραγόμενων οπτικών φωτονίων.

Αναφορά προόδου για το έτος 2024:

Έγινε εκτενής βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις ιδιότητες και εφαρμογές του κρυσταλλικού σπινθηριστή GAGG:Ce ($Gd_2Al_2Ga_3O_{12}:Ce$) σε εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης. Πρόκειται για ένα από τα φωτεινότερα διαθέσιμα υλικά που για πρώτη φορά το 2011 παράχθηκε με την μέθοδο Czochralski (Cz) [1] και θεωρήθηκε ως πολλά υποσχόμενο για την

ιατρική απεικόνιση καθώς πρόκειται για έναν υψηλής ποιότητας σπινθηριστή που παρουσιάζει από τις μεγαλύτερες αποδόσεις φωτός στην κατηγορία των σπινθηριστών οξειδίου. [2,3]

Στην Βιβλιογραφία αναφέρεται πως έχει εξαιρετικές ιδιότητες για την ιατρική φυσική. Χαρακτηριστικό του προαναφερθέντος κρυστάλλου καθώς και των περισσότερων υλικών με ενεργοποιητή Δημήτριο (Ce), είναι ο βέλτιστος συνδυασμός χρόνου απόκρισης και απόδοσης φωτός που επιτυγχάνεται λόγω της γρήγορης και αποτελεσματικής μετάπτωσης $5d \rightarrow 4f$ και φωταύγειας του ιόντος Ce^{3+} . [4,5] Έχει υψηλή απόδοση φωτονίων 46000 φωτόνια/MeV, ενεργό ατομικό αριθμό $Z_{eff} = 54.4$ εξαιρετική διακριτική ικανότητα και είναι στιβαρό με καλά μηχανικά χαρακτηριστικά. Επιπλέον, η υψηλή πυκνότητά του 6.63 g/cm^3 το καθιστά κατάλληλο για εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης. [6,7] Έχει μη εγγενή ραδιενέργεια, δεδομένου ότι δεν περιέχει κάποιο φυσικό ραδιοϊσότοπο όπως το Λουτέσιο (Lu). Είναι μη υγροσκοπικό με γρήγορο χρόνο απόκρισης ίσο με 90ns, υψηλή απόδοση φωτός και χαμηλό afterglow,[8] έτσι οι εφαρμογές που βρίσκει χρήση περιλαμβάνουν το PET, SPECT, CT, φασματοσκοπία γάμμα και ανίχνευση σκέδασης Compton. [6,7] Το μήκος κύματος του φάσματος εκπομπής μετρήθηκε να εκτείνεται από τα 446nm έως 762nm με μέγιστο στα 540 nm. Θα εξεταστεί στα πλαίσια της διατριβής αν είναι συμβατός με διαφόρους νέους εμπορικά διαθέσιμους φωτοανιχνευτές όπως φωτοπολλαπλασιαστές και φωτοδιόδους πυριτίου.

Υλοποιήθηκε πειραματική διάταξη για την μέτρηση της απόλυτης απόδοσης φωταύγειας (AE) [9] κρυστάλλου GAGG:Ce, διαστάσεων $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$. [10] Ο κρύσταλλος ακτινοβολήθηκε χρησιμοποιώντας λυχνία ακτίνων X συζευγμένο με μια γεννήτρια CPI Inc. σειράς CMP 200 DR 50 kW στο εργαστήριο Ακτινοφυσικής, Τεχνολογίας Υλικών και Βιοϊατρικής Απεικόνισης (ΑΚΤΥΒΑ) του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής. [11-13] Η υψηλή τάση κυμαινόταν από 50 έως 150 kVp. Επίσης μετρήθηκε το οπτικό φάσμα εκπομπής του κρυστάλλου χρησιμοποιώντας φασματόμετρο HR2000+ (Ocean Optics Inc., Largo, FL, ΗΠΑ) υπό διέγερση UV ακτινοβολίας.

Κατόπιν, υπολογίστηκαν και αξιολογήθηκαν η κβαντική ανιχνευτική αποδοτικότητα (QDE) και η απόδοση ενεργειακής απορρόφησης (EAE) του κρυστάλλου. Για τον υπολογισμό αυτών έγινε χρήση του λογισμικού XMudat [14,15] καθώς και προσομοιωμένα πολυενεργειακά φάσματα ακτίνων X ελήφθησαν από το λογισμικό TASMIP. [16] Εξετάστηκε επίσης η φασματική συμβατότητα (SMF) του GAGG:Ce με την φωτοκάθοδο E-S20.

Εν συνεχεία, γίνεται η επεξεργασία των ανωτέρω ώστε τα αποτελέσματα να ανακοινωθούν σε επιστημονικό συνέδριο ή να υποβληθούν προς δημοσίευση.

Βιβλιογραφία

[1] Kamada, K.; Yanagida, T.; Endo, T.; Tsutumi, K.; Usuki, Y.; Nikl, M.; Fujimoto, Y.; Yoshikawa, A. 2-Inch Size Single Crystal Growth and Scintillation Properties of New Scintillator; Ce: $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}$. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record* **2011**, doi:10.1109/NSSMIC.2011.6154387.

[2] Seitz, B.; Rivera, N.; Stewart, A. Energy Resolution and Temperature Dependence of Ce:GAGG Coupled to Silicon Photomultipliers. *IEEE Transactions on Nuclear Science* **2016**, *63*, 503–508, doi:10.1109/TNS.2016.2535235.

- [3] You, Q.; Lin, H.; Hong, R.; Han, Z.; Zhang, D.; Ding, Y. Structural and Scintillation Properties of Ce³⁺:Gd₃Al₃Ga₂O₁₂ Translucent Ceramics Prepared by One-Step Sintering. *Materials* **2023**, *16*, 3373, doi:10.3390/ma16093373.
- [4] Kamada, K.; Yanagida, T.; Endo, T.; Tsutumi, K.; Usuki, Y.; Nikl, M.; Fujimoto, Y.; Fukabori, A.; Yoshikawa, A. 2inch Diameter Single Crystal Growth and Scintillation Properties of Ce:Gd₃Al₂Ga₃O₁₂. *Journal of Crystal Growth* **2012**, *352*, 88–90, doi:10.1016/j.jcrysgro.2011.11.085
- [5] Pédrini C. Cerium-based and cerium-doped fluorescent and scintillating materials. Proceedings of The Fifth International Conference on Inorganic Scintillators and Their Applications' August 16-20, **1999** Moscow State University, 119899 Moscow, Russia
- [6] Yeom, J.Y.; Yamamoto, S.; Derenzo, S.; Spanoudaki, V.; Kamada, K.; Endo, T.; Levin, C. First Performance Results of Ce:GAGG Scintillation Crystals With Silicon Photomultipliers. *IEEE Transactions on Nuclear Science* **2013**, *60*, 988–992, doi:10.1109/TNS.2012.2233497.
- [7] Yamamoto, S.; Yeom, J.Y.; Kamada, K.; Endo, T.; Levin, C. Development of an Ultrahigh Resolution Block Detector Based on 0.4 Mm Pixel Ce:GAGG Scintillators and a Silicon Photomultiplier Array. *Nuclear Science, IEEE Transactions on* **2013**, *60*, 4582–4587, doi:10.1109/TNS.2013.2282294.
- [8] Moses, W.W. Scintillator Requirements for Medical Imaging. **1999**
- [9] Boone, J. X-ray production, interaction, and detection in diagnostic imaging. In *Handbook of Medical Imaging*. Volume 1: Physics and Psychophysics; Beutel, J., Kundel, H.L., Van Metter, R.L., Eds.; SPIE Press: Bellingham, WA, USA, **2000**; Volume 1, pp. 36–57. ISBN 978-0-8194-7772-9.
- [10] GAGG(Ce) - Scintillator Crystal | Advatech UK Available online: https://www.advatech-uk.co.uk/gagg_ce.html (accessed on 30 October 2024).
- [11] Valais, I.G.; Kandarakis, I.S.; Nikolopoulos, D.N.; Sianoudis, I.A.; Dimitropoulos, N.; Cavouras, D.A.; Nomicos, C.D.; Panayiotakis, G.S. Luminescence Efficiency of Gd₂SiO₅:Ce Scintillator under X-Ray Excitation. *IEEE Transactions on Nuclear Science* **2005**, *52*, 1830–1835, doi:10.1109/TNS.2005.856895.
- [12] Michail, C.; Liaparinos, P.; Kalyvas, N.; Kandarakis, I.; Fountos, G.; Valais, I. Phosphors and Scintillators in Biomedical Imaging. *Crystals* **2024**, *14*, 169, doi:10.3390/cryst14020169.
- [13] Kalyvas, N.; Liaparinos, P.; Michail, C.; David, S.; Fountos, G.; Wójtowicz, M.; Zych, E.; Kandarakis, I. Studying the Luminescence Efficiency of Lu₂O₃:Eu Nanophosphor Material for Digital X-Ray Imaging Applications. *Appl. Phys. A* **2012**, *106*, 131–136, doi:10.1007/s00339-011-6640-5.
- [14] Report IAEA-NDS-195, XMuDat Available online: <https://www-nds.iaea.org/publications/iaea-nds/iaea-nds-0195.htm> (accessed on 30 October 2024).
- [15] X-Ray Mass Attenuation Coefficients. *NIST* **2009**.

[16] TASMIP Spectra Calculator - Calculate X-Ray Imaging Spectra Available online: <https://solutionsilico.com/medical-physics/applications/tasmip-app.php> (accessed on 30 October 2024).

ΤΑ ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Νεκτάριος Καλύβας
Καθηγητής

Ιωάννης Βαλαής
Καθηγητής

Χρήστος Μιχαήλ
Αναπληρωτής Καθηγητής