



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

Ετήσια έκθεση προόδου PhD

Τσερέμογλου Σταύρος, Οκτώβριος 2022

Τίτλος: Μελέτη και βελτιστοποίηση παραμέτρων απόδοσης φωταύγειας κρυσταλλικών σπινθηριστών, για χρήση σε ανιχνευτικές διατάξεις ιοντίζουσών ακτινοβολιών υβριδικών συστημάτων ιατρικής απεικόνισης (αρ. απόφασης 1/22-1-2021)

Επιβλέπων Καθηγητής: Νεκτάριος Καλύβας

Συμβουλευτική Επιτροπή: Νεκτάριος Καλύβας, Ιωάννης Βαλαής, Χρήστος Μιχαήλ

Αρχικοί ερευνητικοί στόχοι

- Η πειραματική και θεωρητική μελέτη της απόδοσης φωταύγειας αλογονούχων μονοκρυσταλλικών σπινθηριστών $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ και $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$ κάτω από την επίδραση ιοντίζουσών ακτινοβολιών. Ο προσδιορισμός της δυνατότητας χρήσης των σπινθηριστών σε απλά συστήματα ακτίνων-Χ και υβριδικά SPECT/CT και PET/CT. Επιπλέον θα προσδιοριστούν οι συνθήκες, που μεγιστοποιούν την απόδοση και οδηγούν σε μείωση της δόσης ακτινοβολίας στον εξεταζόμενο.
- Αξιολόγηση της αποδοτικότητας των κρυστάλλων μέσω προσδιορισμού παραμέτρων όπως: κβαντική ανιχνευτική απόδοση (QDE), απόδοση ενεργειακής απορρόφησης (EAE), απόλυτη απόδοση φωταύγειας (AE) καθώς και η ανιχνευτική κβαντική απόδοση του σπινθηριστή (DQE). Έλεγχος της συμβατότητας του εξερχομένου φάσματος από τους κρυστάλλους με διάφορους οπτικούς ανιχνευτές, μέσω του παράγοντα φασματικής σύζευξης (SMF), καθώς και της συνολικής απόδοσης φωταύγειας του συστήματος σπινθηριστής-οπτικός ανιχνευτής (Effective Efficiency).
- Επιπλέον ένα θεωρητικό μοντέλο που περιγράφει τη απορρόφηση της ιοντίζουσας ακτινοβολίας και τη διάδοση των παραγόμενων οπτικών φωτονίων θα προσαρμοσθεί στους υπό μελέτη κρυστάλλους και θα χρησιμοποιηθεί. Με αυτό το τρόπο θα μελετηθεί το ποσοστό διερχόμενου φωτός μέσα στο υλικό. Η χρήση του μοντέλου μπορεί να προτείνει βέλτιστες παραμέτρους απόδοσης του σπινθηριστή, όπως βέλτιστο πάχος για διαφορετικές ενέργειες ιοντίζουσας ακτινοβολίας.

Αναφορά προόδου για το έτος 2022

Σε συνέχεια της προηγούμενης έκθεσης προόδου έγινε η υποβολή, αναθεώρηση μετά από κρίση και τελικά δημοσίευση, των αποτελεσμάτων υπό τη μορφή ερευνητικής δημοσίευσης για τον κρύσταλλο $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ στο επιστημονικό περιοδικό "Crystals", με τίτλο "Efficiency Properties of Cerium-Doped Lanthanum Chloride ($\text{LaCl}_3:\text{Ce}$) Single Crystal Scintillator under Radiographic X-ray Excitation".

Μελετήθηκε η διεθνής βιβλιογραφία όσον αφορά στις ιδιότητες και στις εφαρμογές του $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$, σε σχέση και με τους στόχους της διατριβής.

Από τη μελέτη αυτή διαπιστώθηκε ότι η διερεύνηση των χαρακτηριστικών του κρυστάλλου αυτού ξεκίνησε το 2001 [1], και από την αρχή θεωρήθηκε σαν ένας πολλά υποσχόμενος σπινθηριστής επειδή εμφάνιζε συνδυασμό πολύ καλών χαρακτηριστικών. Όπως και ο κρύσταλλος $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$, ο κρύσταλλος

LaBr₃:Ce συνδυάζει εξαιρετικά χαρακτηριστικά, όπως υψηλή απόδοση φωτός, εξαιρετική διακριτική ικανότητα και μικρό χρόνο απόκρισης [1,2]. Αν και το κρυσταλλικό πλέγμα των δύο κρυστάλλων είναι ίδιο, η προσθήκη του Ce³⁺ τους διαφοροποιεί, με το LaBr₃:Ce να εμφανίζει εμφανώς καλύτερα χαρακτηριστικά [3]. Η απόδοση φωτός του LaBr₃:Ce για απορρόφηση ακτινοβολίας γ στα 662 KeV (¹³⁷Cs), έχει υπολογιστεί ανάλογα με τις συνθήκες μέτρησης, την περιεκτικότητα σε Ce και το μέγεθος του κρυστάλλου από 60.000 photons/MeV έως 81.000 περίπου photons/MeV [1,3-10]. Για την κορυφή των 662 KeV, η διακριτική ικανότητα υπολογίστηκε από 2,8% έως 3,9% (FWHM over peak position) και θεωρείται η καλύτερη τιμή που έχει μετρηθεί για κρυσταλλικό σπινθηριστή [1,3,5,7-13]. Επίσης χαρακτηρίζεται από πολύ μικρό χρόνο απόκρισης, μεταξύ 35 ns και 25 ns [4,6,8], που πέφτει στα 15ns με την αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων Ce, λόγω της ισχυρής εξάρτησης από αυτή [3-6,8,14]. Το οπτικό φάσμα εκπομπής του LaBr₃:Ce σε θερμοκρασία δωματίου παρουσιάζει μια ζώνη εκπομπής μεταξύ 325 nm και 425 nm, με κορυφές στα 360 nm και 380 nm. Αυτές οι κορυφές οφείλονται στα ιόντα Ce³⁺ και εμφανίζονται σε όλα τα φάσματα του κρυστάλλου ανεξάρτητα από τη συγκέντρωση Ce³⁺ [3,4,6,9,15]. Ο κρύσταλλος LaBr₃:Ce έχει πλέγμα τύπου UCl₃ στο κρυσταλλικό σύστημα R6₃/m, με σταθερά πλέγματος 0,6196 και παρουσιάζει ανισοτροπία [3,4,7,15]. Η πυκνότητά του είναι 5,2 g/cm³, το σημείο τήξης 1116 °C και ο ενεργός ατομικός αριθμός 46,9 [13,15,16]. Μειονεκτήματα του κρυστάλλου είναι η υγροσκοπικότητα και η εσωτερική ραδιενέργεια λόγω των φυσικών ραδιοϊσοτόπων ¹³⁸La και ²²⁷Ac. Το τελευταίο είναι σημαντικό μόνο για ορισμένες εφαρμογές, όπως μετρήσεις χαμηλής ραδιενέργειας [12,16,17].

Πραγματοποιήθηκε πειραματική μέτρηση της απόλυτης απόδοσης φωταύγειας (AE) του κρυστάλλου LaBr₃:Ce, διαστάσεων 10mm x 10mm x 10mm και σε ενεργειακό εύρος 50-150 KeV, στο εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής του Τμήματος Μηχανικών Βιοϊατρικής, με χρήση της ιατρικής λυχνίας ακτίνων-X CPI, series CMP 200DR 50KW.

Επίσης, για τον κρύσταλλο LaBr₃:Ce έγινε στο ενεργειακό εύρος 50-150 KeV θεωρητικός υπολογισμός της κβαντικής ανιχνευτικής απόδοσης (QDE), της απόδοσης ενεργειακής απορρόφησης (EAE), καθώς και της ανιχνευτικής κβαντικής απόδοσης του σπινθηριστή (DQE), με τη χρήση κατάλληλου φορμαλισμού και του λογισμικού XMudat. Επιπλέον, ελέγχθηκε η συμβατότητα του εξερχομένου φάσματος από τον συγκεκριμένο κρύσταλλο με διάφορους οπτικούς ανιχνευτές, μέσω του παράγοντα φασματικής σύζευξης (SMF), καθώς και η συνολική απόδοση φωταύγειας του συστήματος σπινθηριστής-οπτικός ανιχνευτής (EE). Με βάση τα παραπάνω, για τον κρύσταλλο LaBr₃:Ce, είμαι στη διαδικασία ταξινόμησης και περαιτέρω ανάλυσης των αποτελεσμάτων με στόχο την υποβολή τους προς δημοσίευση σε επιστημονικό περιοδικό με σύστημα κριτών.

Επιπλέον, αξιολογήθηκε θεωρητικά η απόδοση του κρυστάλλου LaCl₃:Ce με διαφορετικές συγκεντρώσεις Δημητρίου (Ce) (0,1%, 1%, 10% και 20%) για πιθανή χρήση σε υβριδικά συστήματα απεικόνισης, μέσω του θεωρητικού υπολογισμού του συνολικού αριθμού των οπτικών φωτονίων που παράγονται από τον σπινθηριστή. Από τα αποτελέσματα, οι κρύσταλλοι LaCl₃:Ce με 0,1%, 1% και 10% συγκέντρωση Ce παρουσίασαν την υψηλότερη απόδοση, σε συνδυασμό με συγκεκριμένους φωτοανιχνευτές. Τα αποτελέσματα της παραπάνω μελέτης ανακοινώθηκαν με τη μορφή e-poster στο 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Ιατρικής Φυσικής, το οποίο διεξήχθη στην Αθήνα 23-25 Σεπτεμβρίου 2022.

Δημοσιεύσεις - Συνέδρια

1. Stavros Tseremoglou, Christos Michail, Ioannis Valais, Konstantinos Ninos, Athanasios Bakas, Ioannis Kandarakis, George Fountos and Nektarios Kalyvas. Efficiency Properties of Cerium-Doped Lanthanum Chloride (LaCl₃:Ce) Single Crystal Scintillator under Radiographic X-ray Excitation. *Crystals*. 2022, 12(5), 655.
2. Stavros Tseremoglou, Ioannis Valais, Christos Michail, Athanasios Bakas, Konstantinos Ninos, Ioannis Kandarakis, George Fountos and Nektarios Kalyvas 2022. Luminescence Efficiency of LaCl₃:Ce crystalline scintillator for different Cerium concentrations. A theoretical study. Presented at the 1st Panhellenic Congress of Medical Physics. <https://pcmp2022.efie.gr/diagnostic-and-therapeutic-nuclear-medicine-nm/>

Βιβλιογραφία

- [1] E. V. D. van Loef, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, Karl W. Kramer, H. U. Gudel, High-energy-resolution scintillator: Ce³⁺ activated LaBr₃, *Applied Physics Letters* 79(10) (2001) 1573 – 1575.
- [2] E. V. D. van Loef, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, Karl W. Kramer, H. U. Gudel, High-energy-resolution scintillator: Ce³⁺ activated LaCl₃, *Applied Physics Letters* 77(10) (2000) 1467 – 1468.
- [3] E. V. D. van Loef, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, Karl W. Kramer, H. U. Gudel, Scintillation properties of LaBr₃:Ce³⁺ crystals: fast, efficient and high-energy-resolution scintillators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 486(1-2) (2002) 254-258.
- [4] K. S. Shah, J. Glodo, M. Klugerman, W. W. Moses, S. E. Derenzo, M. J. Weber, LaBr₃:Ce Scintillators for Gamma-Ray Spectroscopy, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 50(6) (2004) 2410 – 2413.
- [5] P. Dorenbos, J. T. M. de Haas, C. W. E. van Eijk, Gamma ray spectroscopy with a 0.19×0.19 mm² LaBr₃:0.5% Ce³⁺ scintillator, *IEEE Transactions on Nuclear Science* (2004) 1289–1296.
- [6] J. Glodo, W. W. Moses, W. M. Higgins, E. V. D. van Loef, P. Wong, S. E. Derenzo, M. J. Weber, K. S. Shah, Effects of Ce concentration on scintillation properties of LaBr₃:Ce, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 52(5) (2005) 1805 – 1808.
- [7] Alain Iltis, M.R. Mayhugh, P. Menge, C.M. Rozsa, O. Selles, V. Solovyev, Lanthanum halide scintillators: Properties and applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 563(2) (2006) 359-363.
- [8] G. Bizarri, J. T. M. de Haas, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijk, Scintillation properties of 0.1×0.1 inch² LaBr₃:5%Ce³⁺ crystal, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 53(2) (2006) 615 – 619.
- [9] W.M. Higgins, J. Glodo, E. Van Loef, M. Klugerman, T. Gupta, L. Cirignano, P. Wong, K.S. Shah, Bridgman growth of LaBr₃:Ce and LaCl₃:Ce crystals for high-resolution gamma-ray spectrometers, *Journal of Crystal Growth* 287(2) (2006) 239–242.
- [10] Jin-da Chen, Zheng-guo Hu, Xiu-ling Zhang, Ze Chen, Xiao-hua Yuan, Zhi-yu Sun, Zhong-yan Guo, Hushan Xu, Investigation of LaBr₃:Ce scintillator with excellent property, *Journal of Physics Conference Series* 488(14) (2014) 142013.
- [11] P. Dorenbos, Light Output and Energy Resolution of Ce³⁺-Doped Scintillators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment* 486(1-2) (2002) 208-213.
- [12] K. Alzimami, E. Abuelhia, Z. Podolyak, A. Ioannou, N. M. Spyrou, Characterization of LaBr₃:Ce and LaCl₃:Ce scintillators for gamma-ray spectroscopy, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 278(3) (2008) 755-759.
- [13] Weerapong Chewpraditkul, Marek Moszynski, Scintillation Properties of Lu₃Al₅O₁₂, Lu₂SiO₅ and LaBr₃ Crystals Activated with Cerium, *Physics Procedia* 22 (2011) 218–226.
- [14] A. Kuhn, S. Surti, J. S. Karp, P. S. Raby, K. S. Shah, A. E. Perkins, G. Muehllehner, Design of a lanthanum bromide detector for time-of-flight PET, *IEEE Transactions on Nuclear Science* 51(5) (2004) 2550 – 2557.
- [15] Advatech UK— LaBr₃:Ce. Available online: https://www.advatech-uk.co.uk/labr3_ce.html.
- [16] S. Dey Chaudhuri, D. Banerjee, T. Bhattacharjee, Sk Wasim Raja, R. Acharya, P. K. Pujari, Performance study of LaBr₃:Ce detectors coupled to R2083 PM tube for energy and timing characteristics, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 324(2) (2020).
- [17] K. S. Alzimami, N. M. Spyrou, S. A. Sassi, Investigation of LaBr₃:Ce and LaCl₃:Ce scintillators for SPECT imaging, *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: from nano to macro* (2008).

ΤΑ ΜΕΛΗ ΤΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

**Nektarios
s Kalyvas** Digitally signed
by Nektarios
Kalyvas
Date: 2022.10.24
20:51:33 +03'00'

Νεκτάριος Καλύβας
Αναπληρωτής Καθηγητής (ΕΚ)

**Ioannis
Valais** Digitally signed
by Ioannis Valais
Date:
2022.10.25
15:41:50 +03'00'

Ιωάννης Βαλαής
Καθηγητής

**Christos
Michail**

Digitally signed by
Christos Michail
Date: 2022.10.25
16:41:21 +03'00'

Χρήστος Μιχαήλ
Επίκουρος Καθηγητής



Σχόλια στην δεύτερη ετήσια έκθεση προόδου του υποψήφιου διδάκτορα Σταύρου Τσερέμογλου, σύμφωνα με το ΦΕΚ Β' 4854/31-10-2018, παράγραφος 2

Τίτλος: **Μελέτη και βελτιστοποίηση παραμέτρων απόδοσης φωταύγειας κρυσταλλικών σπινθηριστών, για χρήση σε ανιχνευτικές διατάξεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών υβριδικών συστημάτων ιατρικής απεικόνισης (αρ. απόφασης 1/22-1-2021)**

Επιβλέπων Καθηγητής: Νεκτάριος Καλύβας, Αναπληρωτής Καθηγητής

Σχόλια

Οι πειραματικές μετρήσεις για το υλικό $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ έγιναν στους χώρους του εργαστηρίου Ακτινοφυσικής, Τεχνολογίας Υλικών και Βιοιατρικής Απεικόνισης (ΑΚΤΥΒΑ) [1] και συγκεκριμένα με τη λυχνία ακτίνων-Χ CPI, series CMP 200DR 50KW, που είναι εγκατεστημένη στον εργαστηριακό χώρο Εφαρμοσμένης Ακτινοφυσικής. Αναφορικά με τη διέγερση με ακτινοβολία-Χ, τα δημοσιευμένα αποτελέσματα στο περιοδικό Crystals [2] ανέδειξαν το γεγονός ότι η χρήση του κρυστάλλου $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ μπορεί να οδηγήσει σε ισοδύναμο αποτέλεσμα από πλευράς σήματος με άλλους κρυστάλλους που χρησιμοποιούνται σε υβριδικά απεικονιστικά συστήματα SPECT/CT και PET/CT. Συγκεκριμένα για υψηλή τάση 140 KVp το $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ εκτιμήθηκε ότι μπορεί να δώσει την ίδια έξοδο με το LSO και το BGO με το 46% και το 10% της ακτινοβολίας αντίστοιχα. Επομένως η χρήση του συγκεκριμένου σπινθηριστή αναμένεται να μειώσει την δόση ακτινοβολίας στον εξεταζόμενο, αλλά και αυτήν των περιβαλλόντων χώρων. Επιπλέον από την ηλεκτρονικά αναρτημένη παρουσίαση στο 1^ο Συνέδριο Ιατρικής Φυσικής [3] φαίνεται ότι οι κρύσταλλοι $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ με 0,1%, 1% και 10% συγκέντρωση Ce παρουσίασαν την υψηλότερη απόδοση, σε συνδυασμό με συγκεκριμένους φωτοανιχνευτές, επομένως μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μικρότερες συνθήκες έκθεσης ακτινοβολίας και να μειώσουν έτσι την δόση στον εξεταζόμενο. Τα ανωτέρω αποτελέσματα οδηγούν στην βελτιστοποίηση της έκθεσης και κρίνονται σημαντικά από άποψη ακτινοπροστασίας και ακτινοφυσικής.

Αναφορές

1. Εργαστήριο Ακτινοφυσικής Τεχνολογίας Υλικών και Βιοιατρικής Απεικόνισης <https://aktyva.uniwa.gr/>
2. Stavros Tseremoglou, Christos Michail, Ioannis Valais, Konstantinos Ninos, Athanasios Bakas, Ioannis Kandarakis, George Fountos and Nektarios Kalyvas. Efficiency Properties of Cerium-Doped Lanthanum Chloride ($\text{LaCl}_3:\text{Ce}$) Single Crystal Scintillator under Radiographic X-ray Excitation. *Crystals*. 2022, 12(5), 655.
3. Stavros Tseremoglou, Ioannis Valais, Christos Michail, Athanasios Bakas, Konstantinos Ninos, Ioannis Kandarakis, George Fountos and Nektarios Kalyvas 2022. Luminescence Efficiency of $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$ crystalline scintillator for different Cerium concentrations. A theoretical study. Presented at the 1st Panhellenic Congress of Medical Physics. <https://pcmp2022.efie.gr/diagnostic-and-therapeutic-nuclear-medicine-nm/>

Nektario
s Kalyvas
Νεκτάριος Καλύβας (ΕΚ)

Digitally signed by
Nektarios Kalyvas
Date: 2022.10.24
21:38:28 +03'00'

Ioannis
Valais
Ιωάννης Βαλαής (Μέλος ΤΣΕ)

Digitally signed by
Ioannis Valais
Date: 2022.10.25
15:46:06 +03'00'

Christos
Michail
Χρήστος Μιχαήλ (Μέλος ΤΣΕ)

Digitally signed by Christos
Michail
Date: 2022.10.25 16:41:58
+03'00'