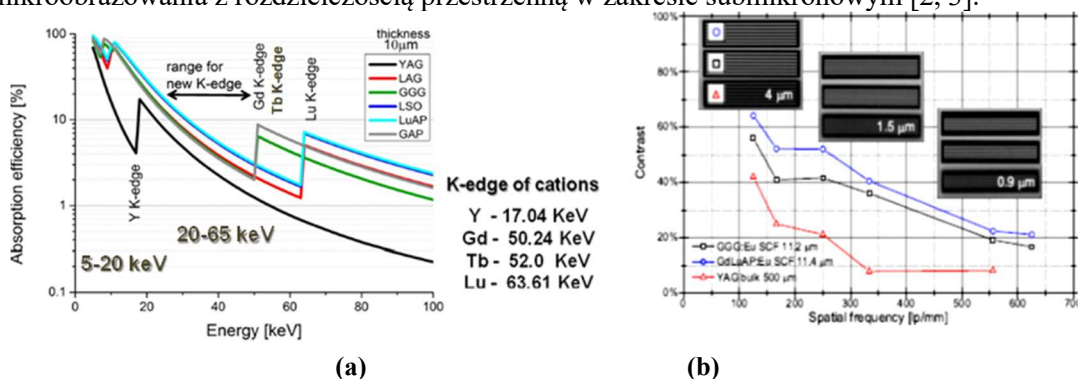


## Projekt NCN 2016/21/B/ST8/03200 „Nowe ekrany scyntylacyjne na bazie warstw monokrystalicznych mieszanych perowskitów i tlenków” (2017-2020)

Celem projektu było stworzenie *nowej generacji ekranów scyntylacyjnych w postaci warstw monokrystalicznych* i kryształów mieszanych perowskitów oraz innych prostych i złożonych tlenków z unikatowo wysoką zdolnością do absorpcji kwantów rentgenowskich, dla wykorzystania w detektorach mikrotomograficznych z submikronową rozdzielczością przestrzenną oraz detektorach monitoringu radiacyjnego mieszane go promieniowania jonizującego.

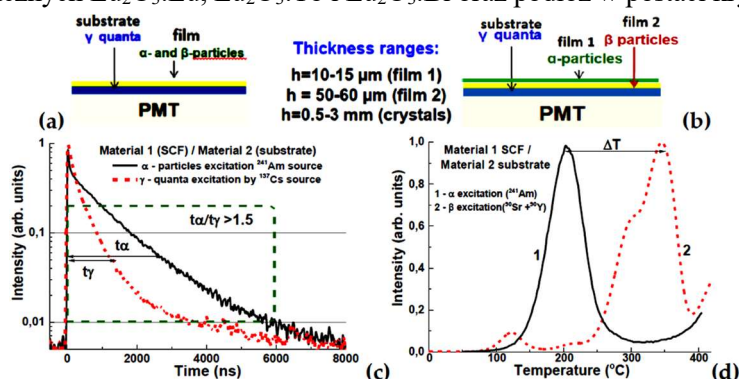
W projekcie została opracowana zaawansowana metoda obrazowania rentgenowskiego, oparta na *mikroskopii wymuszonego wygaszania emisji (STED)*. W tym celu zbadano właściwości STED wybranych typów warstw monokrystalicznych (granaty i ortokrzemiany), z domieszkami jonów  $Ce^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  i  $Eu^{3+}$ , a także różne rodzaje laserów STED [1]. Pokazano że domieszkowanie ciężkich scyntylatorów ( $Lu_3Al_5O_{12}$  (LuAG),  $Lu_2SiO_5$ ,  $LuAlO_3$  i  $Lu_2O_3$ ) jonami  $Tb^{3+}$  i  $Eu^{3+}$ , oraz laser STED z emisją na 628 nm są najbardziej obiecującymi kombinacjami spełniającymi wymagania obrazowania rentgenowskiego metodą STED [1].

Przy użyciu metody epitaksji z fazy ciekłej (metoda LPE) opracowano nowe typy scyntylatorów z *bardzo wysokimi współczynnikami absorpcji promieniowania rentgenowskiego* w postaci warstw monokrystalicznych tlenków  $Lu_2O_3:Eu$  i  $Lu_2O_3:Tb$ , mieszanych perowskitów  $Gd_{1-x}Lu_xAlO_3:Tb,Ce$  ( $x=0-1$ ) i  $RAlO_3:Eu$  ( $R= Y, Lu, Gd, Tb$ ) (Fig.1) oraz granatów  $Lu_3Al_{5-x}Ga_xO_{12}:Pr$  i  $Tb_{3-x}Gd_xAl_{5-y}Ga_yO_{12}:Ce$  w celu zastosowania jako ekrany scyntylacyjne w detektorach mikroobrazowania z rozdzielczością przestrzenną w zakresie submikronowym [2, 3].



**Rys.1.** (a) - dobór kationów w celu poprawy zdolności absorpcyjnej ekranów scyntylacyjnych w zakresie 20-65 keV z wykorzystaniem jonów Y, Gd, Tb i Lu. (b) - możliwość ulepszenia obrazów wolframowego wzorca, zarejestrowanych za pomocą ekranu w postaci warstw monokrystalicznych  $Gd_{0.5}Lu_{0.5}AlO_3:Eu$  o grubości 11,4 μm w porównaniu z ekranami na bazie warstw  $Gd_3Ga_5O_{12}:Eu$  o grubości 11,2 μ oraz kryształu  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  o grubości 500 μm.

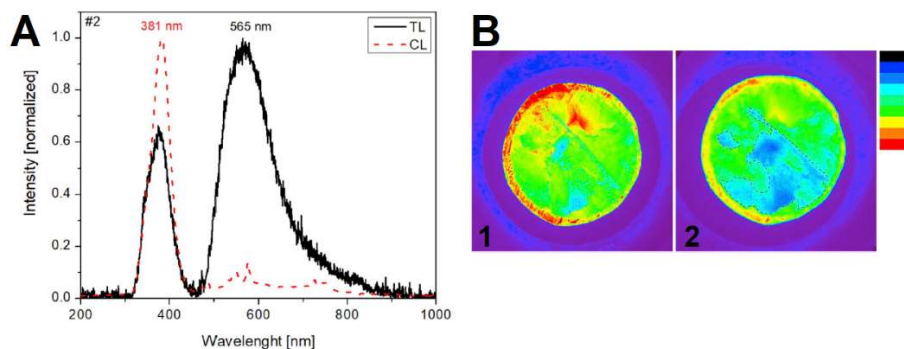
Używając metody LPE, pokazano także możliwość stworzenia *nowoczesnych kompozytowych scyntylatorów typu "warstwa-podłoże"* umożliwiające rozdzielczą detekcję różnych składników mieszanych wiązek kwantów i cząstek jonizujących oraz detektorów mikroobrazowania rentgenowskiego: (i) na bazie domieszkowanych jonami  $Ce^{3+}$  warstw prostych ( $Tb_3Al_5O_{12}:Ce$ ) i mieszanych ( $Lu_{1.5}Gd_{1.5}Al_{1.5}Ga_{3.5}O_{12}:Ce$ ) granatów oraz kryształów-podłoż  $Gd_3Al_{2.5}Ga_{2.5}O_{12}:Ce$  (Rys.2); (ii) na bazie domieszkowanych jonami  $Ce^{3+}$ , i  $Pr^{3+}$  i  $Sc^{3+}$  warstw i kryształów granatu LuAG. Opracowano także możliwość krystalizacji metodą LPE prototypowych kompozytowych scyntylatorów na bazie struktur epitaksjalnych perowskitów, zawierające warstwy  $GdAlO_3:Ce$ ,  $YAlO_3:Sc$  i  $YAlO_3:Bi$  oraz kryształy-podłoża  $YAlO_3:Ce$  i  $YAlO_3:Pr$ , a także kompozytowych detektorów termoluminescencyjnych (TL), opartych na warstwach  $YAlO_3:Mn$  oraz kryształach-podłożach  $YAlO_3:Ce$ . Opracowano również prototypy kompozytowych scyntylatorów na bazie warstw monokrystalicznych  $Lu_2O_3:Eu$ ,  $Lu_2O_3:Tb$  i  $Lu_2O_3:Bi$  oraz podłoż w postaci kryształów  $Lu_2O_3$ .



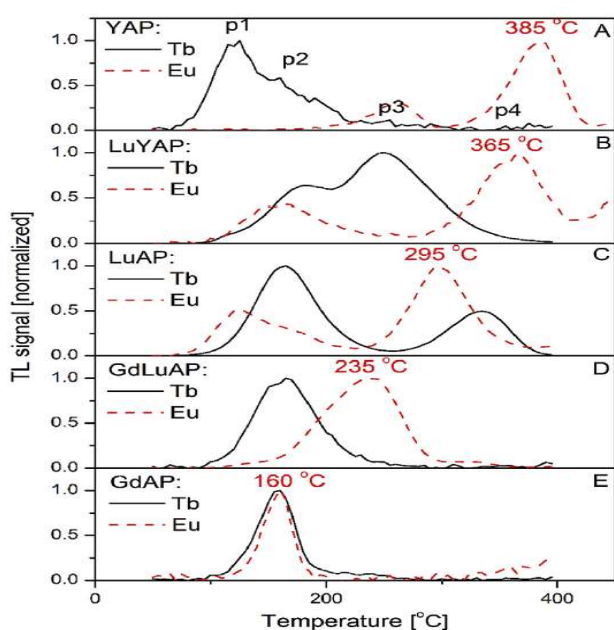
**Rys. 2.** Schematy dwuwarstwowego (a) i trójwarstwowego (b) kompozytowego scyntylatora oraz kompozytowego detektora TL, (c) – przykład detekcji cząstek α i kwantów γ w sposób rejestracji czasu zaników scyntylacyjnych, pochodzących od warstwy i podłoża kompozytowego scyntylatora [3], (d) – przykład rejestracji różnicy w temperaturach głównych pików krzywych jarzenia TL od warstwy i podłoża kompozytowego materiału TL, wyrażonej przez parametr  $\Delta T$  [5].

Przy użyciu nowoczesnej metody mikrowyciągania w dół (ang. micro-pulling down), w celu przeprowadzenia analizy porównawczej właściwości luminescencji warstw i kryształów, w Instytucie Fizyki Jądrowej (IFJ) PAN w Krakowie otrzymano szereg kryształów mieszanych perowskitów postaci  $A_{1-x}B_xAlO_3$  ( $A=Y, Lu, Gd; B=Lu; x=0, 0.5,$

1) domieszkowanych jonami wybranych pierwiastków ziem rzadkich, Ce, Tb, Eu, Sc i La. Wykazano, że domieszka jonów  $Ce^{3+}$  w układzie trójskładnikowym  $Y_2O_3 - Lu_2O_3 - Al_2O_3$  może być doskonałym wskaźnikiem otrzymanej fazy krystalicznej perowskitu lub granatu, gdyż emisja jonów ceru w tych dwóch fazach jest bardzo dobrze rozseparowana spektralnie (Rys. 3). Dzięki temu, przy użyciu odpowiednich filtrów optycznych, możliwe jest badanie luminescencji określonej fazy, nawet przy trudnościach z wykrystalizowaniem jednorodnej fazowo próbki kryształu [6].



**Rys. 3. Panel A** – widma emisyjne termoluminescencji (czarne) i katodoluminescencji (czerwone) kryształu  $YAlO_3:Ce$ . Pasma 381 nm odpowiada emisji jonów ceru w fazie perowskitu, natomiast pasmo 565 nm odpowiada emisji jonów ceru w fazie granatu. **Panel B** – dwuwymiarowy obraz termoluminescencji próbki  $YAlO_3:Ce$  bez dodatkowej filtracji optycznej (**B1**) oraz z filtrem BG39 (**B2**). Użycie filtra BG39 usunęło z widma luminescencji próbki emisję pochodzącą od fazy perowskitu.



**Rys. 4.** Krzywe TL zmierzono dla kryształów mieszanych perowskitów domieszkowanych jonami  $Tb^{3+}$  i  $Eu^{3+}$  [7].

Kryształy  $YAlO_3$ , domieszkowane izoelektronowo jonami Sc i La, badano pod kątem własności scyntylicyjnych oraz własności magazynowania energii. Te ostatnie są niezwykle ważne z punktu widzenia potencjalnych zastosowań dozymetrycznych badanych materiałów. Są to jedne z pierwszych prac, w których kryształy materiałów stricte scyntylicyjnych (znanych jako wydajne scyntylatory), otrzymane metodą MPD w IFJ PAN, przebadano pod kątem możliwości magazynowania energii promieniowania jonizującego dla zastosowań dozymetrycznych. Dla badanych materiałów określono charakterystykę dawkową, najmniejszą mierzalną dawkę promieniowania, fading oraz parametry kinetyki procesów luminescencji po ekspozycji kryształów na promieniowanie beta. Otrzymane wyniki jednoznacznie wskazują, że badane materiały, oprócz wydajnych scyntylatorów, mogą również stanowić grupę obiecujących fosforów magazynujących energię, odpowiednich do zastosowań dozymetrycznych [8].

Domieszkowanie kryształów  $YAlO_3$  jonami  $Tb^{3+}$  i  $Eu^{3+}$  przeprowadzono w celu porównania luminescencji obu materiałów. Domieszki wybrano nieprzypadkowo, gdyż związane z nimi centra pułpkowania wykazują przeciwny charakter pułpkowania nośników ładunku ( $Tb$  pułpkuje dziury,  $Eu$  pułpkuje elektrony). Materiałami wyjściowymi były perowskity  $YAlO_3:Tb$  oraz  $YAlO_3:Eu$ . Wykazano, że przez częściowe podstawienie jonów Y jonami Lu oraz jonów Lu jonami Gd (odpowiednio,  $Lu_xY_{1-x}AlO_3$  oraz  $Gd_xLu_{1-x}AlO_3$ ) oraz całkowite podstawienie jonów Y jonami Lu oraz Gd (odpowiednio,  $LuAlO_3$  oraz  $GdAlO_3$ ) powoduje wzrost liczby atomowej Z matrycy oraz daje możliwość poprawy transferu energii z kationów matrycy (w szczególności  $Gd^{3+}$ ) do jonów domieszek  $Eu^{3+}$  i  $Tb^{3+}$ . Wiadomo, że przerwa energetyczna materiału  $LuAlO_3$  jest szersza niż  $YAlO_3$ . Co również ma istotny wpływ na obserwowane właściwości emisji luminescencji badanych kryształów (Rys. 4).

1. M.S. Alekhin, C. Dujardin, P.-A. Douissard, T. Martin, Y. Zorenko, M. Stapanoni e. a., *Optics Express*, 2017,25,1251-1261.
2. Yu. Zorenko, V. Gorbenko, T. Zorenko, F. Riva, P.A. Douissard, T. Martin, A. Suchocki, e. a. *CrystEngComm*, 2018, **20**, 937-945
3. V. Gorbenko, T. Zorenko, K. Paprocki, F. Riva, P.-A. Douissard, T. Martin, Yu. Zorenko, *CrystEngComm*, 2019, **21**, 1433-1444.
4. S. Witkiewicz-Lukaszek, V. Gorbenko, T. Zorenko, J. Mares, M. Nikl, Yu. Zorenko, e. a. *CrystEngComm*, 2018, **20**, 3994-4002.
5. A. Mroziak, W. Gieszczyk, P. Bilski, S. Witkiewicz-Lukaszek, V. Gorbenko, Y. Zorenko, wykłady na konferencjach SDD19 i ICDIM2020.
6. W. Gieszczyk, P. Bilski, M. Kłosowski, A. Mroziak, Yu. Zorenko, T. Zorenko, K. Paprocki, *Opt. Mat.*, 2019, **89**, 408–413.
7. W. Gieszczyk, A. Mroziak, M. Kłosowski, P. Bilski, S. Witkiewicz, T. Zorenko, Yu. Zorenko, *Radiat. Meas.* 126 (2019) 106140.
8. W. Gieszczyk, A. Mroziak, P. Bilski, V. Vistovskyy, A. Voloshinovskii, K. Paprocki, T. Zorenko and Yu. Zorenko, *Crystals*, 2020, **10**, 385.

## 1. Rozwój ekranów scyntylacyjnych na bazie warstw monokrystalicznych przy użyciu metody LPE

### 1.1 Perowskity

1. M.S. Alekhin, J. Renger, M. Kasperczyk, G. Patton, C. Dujardin, P.-A. Douissard, T. Martin, Y. Zorenko, L. Novotny, M. Stampanoni, Stimulated scintillation emission depletion X-ray imaging based on STED nanoscopy. *Optics Express*, 2017, **25**(2), 1251-1261.
2. V. Gorbenko, T. Zorenko, K. Paprocki, F. Riva, P.-A. Douissard, T. Martin and Yu. Zorenko, Epitaxial growth of the single crystalline films scintillators based on the Tb<sup>3+</sup> doped Gd<sub>1-x</sub>Lu<sub>x</sub>AlO<sub>3</sub> (x=0-1) mixed perovskites, *CrystEngComm*, 2019, **21**(9) 433-144.
3. Yu. Zorenko, V. Gorbenko, T. Zorenko, K. Paprocki, F. Riva, P.A. Douissard, T. Martin, Ya. Zhydachevskii, A. Suchocki, A. Fedorov. Epitaxial growth of the single crystalline films scintillating screens based on the Eu<sup>3+</sup> doped RAlO<sub>3</sub> (R= Y, Lu, Gd, Tb) perovskites. *CrystEngComm*, 2018, **20**, 937-945.
4. L.-I. Bulyk, Yu. Zorenko, V. Gorbenko, A. Suchocki, Influence of high pressure on Eu<sup>3+</sup> luminescence in epitaxial RAlO<sub>3</sub> (R= Gd, Tb, Lu, Gd<sub>0.6</sub>Lu<sub>0.4</sub>, or Y) single crystalline films, *Journal of Luminescence*, 2020, **220**, 116991.

### 1.2 Granaty

5. V. Gorbenko, T. Zorenko, K. Paprocki, B. Mahlovanyi, B. Mazalon, A. Fedorov, Ya. Zhydachevskyy, A. Suchocki, Yu. Zorenko, Epitaxial growth of single crystalline film scintillators based on the Pr<sup>3+</sup> doped solid solution of Lu<sub>3</sub>Al<sub>5-x</sub>Ga<sub>x</sub>O<sub>12</sub> garnet, *CrystEngComm*, 2017, V.19, P.7031 – 7040. 6
6. K. Bartosiewicz, V. Babin, J.A. Mares, A. Beitlerova, Yu. Zorenko, A. Iskaliyeva, V. Gorbenko, Z. Bryknar, M. Nikl, Luminescence and energy transfer processes in Ce<sup>3+</sup> activated (Gd,Tb)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> single crystalline film, *Journal of Luminescence*, 2017, vol.88, P.60-66.
7. V. Gorbenko, T. Zorenko, S. Witkiewicz, K. Paprocki, O. Sidletskiy, A. Fedorov, P. Bilski, A. Twardak, Yu. Zorenko. LPE growth of single crystalline film scintillators based on the Ce<sup>3+</sup> doped Tb<sub>3-x</sub>Gd<sub>x</sub>Al<sub>5-y</sub>Ga<sub>y</sub>O<sub>12</sub> mixed garnets, *Crystals*, 2017, 7, 262(15).

### 1.3 Ortokrzemiany

8. A. Kilian, P. Bilski, V. Gorbenko, T. Zorenko, S. Witkiewicz, K. Paprocki, Yu. Zorenko. Thermoluminescent properties of cerium doped Lu<sub>2</sub>SO<sub>5</sub> and Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> single crystalline films grown from PbO-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fluxes, *Crystals*, 2018, V.8, 120(12).

## 2. Rozwój kompozytowych scyntylatorów i ekranów przy użyciu metody LPE

9. S. Witkiewicz-Lukaszek, V. Gorbenko, T. Zorenko, O. Sidletskiy, I. Gerasymov, A. Fedorov, A. Yoshikawa, J. A. Mares, M. Nikl, and Yu. Zorenko. Development of Composite Scintillators Based on Single Crystalline Films and Crystals of Ce<sup>3+</sup>-Doped (Lu,Gd)<sub>3</sub>(Al,Ga)<sub>5</sub>O<sub>12</sub> Mixed Garnet Compounds, *Crystal Growth & Design*, 2018, V. 18 (3), pp 1834–1842.
10. S. Witkiewicz-Lukaszek, V. Gorbenko, T. Zorenko, K. Paprocki, O. Sidletskiy, A. Fedorov, J.A. Mares, R. Kucerkova, M. Nikl, Yu. Zorenko. Epitaxial growth of composite scintillator based on the Tb<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>:Ce single crystalline film and Gd<sub>3</sub>Al<sub>2.5</sub>Ga<sub>2.5</sub>O<sub>12</sub>:Ce crystal substrates, *CrystEngComm*, 2018, 20, 3994-4002.
11. S. Witkiewicz-Lukaszek, V. Gorbenko, T. Zorenko, K. Paprocki, O. Sidletskiy, I. Gerasymov, J.A. Mares, R. Kucerkova, M. Nikl, Yu. Zorenko. Novel all-solid-state composite scintillators based on the epitaxial structures of LuAG garnet doped with Pr, Sc and Ce ions. *IEEE TNS*, 2018, 65 (8) 2114-2119.
12. S. Witkiewicz-Lukaszek, V. Gorbenko, T. Zorenko, K. Paprocki, O. Sidletski, I. Gerasymov, J.A.Mares, R. Kucerkova, M. Nikl, Yu. Zorenko, Composite scintillators based on the crystals and single crystalline films of LuAG garnet doped with Ce<sup>3+</sup>, Pr<sup>3+</sup> and Sc<sup>3+</sup> ions, *Optical Materials*, 2018, V.84, P. 593-599.
13. A. Mroziak, P. Bilski, W. Gieszczyk, Yu. Zorenko. Investigations of the influence of Am-241 photons on the measured alpha particle response of luminescent materials. *Radiation Measurements*, 2020, 134, 106331.

## 3. Kryształy otrzymane metodą MPD

### 3.1 Perowskity

14. W. Gieszczyk, P. Bilski, M. Kłosowski, A. Mroziak, Yu. Zorenko, T. Zorenko, K. Paprocki, Luminescent properties of undoped and Ce<sup>3+</sup> doped crystals in Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> triple oxide system grown by micro-pulling-down method. *Optical Materials*, 2019, V.89, P.408–413.
15. W. Gieszczyk, A. Mroziak, M. Kłosowski, P. Bilski, S. Witkiewicz, T. Zorenko, Yu. Zorenko, Luminescent properties of Tb and Eu activated A<sub>x</sub>B<sub>1-x</sub>AlO<sub>3</sub> (A = Y, Lu, Gd; B = Lu; x= 0, 0.5, 1) mixed oxides crystals prepared by micro-pulling-down method, *Radiation Measurements*, 126 (2019) 106140.

16. W. Gieszczyk, A. Mrozik, P. Bilski, V. Vistovskyy, A. Voloshinovskii, K. Paprocki, T. Zorenko and Yu. Zorenko. Scintillation and energy-storage properties of micro-pulling-down grown crystals of  $\text{Ce}^{3+}$  and  $\text{La}^{3+}$  doped  $\text{YAlO}_3$  perovskite, *Crystals*, 2020, 10, 385.

17. O. Sidletskiy, P. Arhipov, S. Tkachenko, I. Gerasymov, G. Trushkovskyy, T. Zorenko, Yu. Zorenko, P. Mateichenko, A. Puzan, W. Gieszczyk, P. Bilski. Luminescent and scintillation properties of  $\text{CeAlO}_3$  crystals and phase-separated  $\text{CeAlO}_3/\text{CeAl}_{11}\text{O}_{18}$  metamaterials. *Crystals* 2019, 9, 296.

### 3.2 Inne tlennki

18. T. Zorenko, K. Paprocki, I. Levchuk, M. Batentschuk, B. Epelbaum, A. Fedorov, Yu. Zorenko. Luminescent properties of  $\text{Ce}^{3+}$  doped  $\text{LiLuP}_4\text{O}_{12}$  tetraphosphate under synchrotron radiation excitation, *Journal of Luminescence*, 2019, 210, P.47-51.

## 4. Nanoproszki, warstwy i ceramika:

### - na bazie $\text{Lu}_2\text{O}_3$

19. N.A. Safronova, R.P. Yavetskiy, O.S. Kryzhanovska, S.V. Parkhomenko, A.G. Doroshenko, M.V. Dobrotvorska, A.V. Tolmachev, R. Boulesteix, A. Maître, T. Zorenko, Yu. Zorenko. Fabrication and VUV luminescence of  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}^{3+}$  (5 at. %) nanopowders and transparent ceramics. *Optical Materials*, 2020, 101, 109730.

20. P. Popielarski, J. Zeler, P. Bolek, T. Zorenko, K. Paprocki, E. Zych and Yu. Zorenko. Radio-, Thermo- and Photoluminescence Properties of  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}$  and  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Tb}$  Nanopowder and Film Scintillators, *Crystals* 2019, 9, 148.

### - na baize innych tlenków (krzemiany, tytaniany, borany)

21. Deshmukh Abdul Hakeema, Amir Muhammad Afzal, Asad Syedd, Hongli Wen, Andrzej Suchocki. Influence of  $\text{Dy}^{3+}$  co-doping on the luminescent properties of bluish-green  $\text{Ba}_{1-0.5y}\text{Sr}_{1-0.5y}\text{Al}_2\text{SiO}_7:y\text{Eu}^{2+}$  phosphors. *New J. Chem.*, 2020, 44, 15821-15827.

22. Y. Wang, V. Tsumra, Qi Peng, H. Liang, Y. Zhydachevskyy, Przybylińska, A. Suchocki. Hole Trapping Process and Highly Sensitive Ratiometric Thermometry over a Wide Temperature Range in  $\text{Pr}^{3+}$ -Doped  $\text{Na}_2\text{La}_2\text{Ti}_3\text{O}_{10}$  Layered Perovskite Microcrystals. *J. Phys. Chem. A* 2019, 123, 4021–4033.

23. L.-I. Bulyk, L. Vasylechko, V. Mykhaylyk, C. Tang, Ya. Zhydachevskyy, Y. A. Hizhnyi, S. G. Nedilko, N. I. Klyui and A. Suchocki.  $\text{Mn}^{2+}$  luminescence of  $\text{Gd}(\text{Zn,Mg})\text{B}_5\text{O}_{10}$  pentaborate under high pressure. *Dalton Trans.*, 2020, 49, 14268.

## 5. Zaawansowane badania optyczne i radio-spektroskopowe proszków, ceramik, kryształów i warstw

### 5.1 Czasowo-rozdzielcza spektroskopia luminescencyjna wzbudzana promieniowaniem synchrotronowym

24. T. Zorenko, V. Gorbenko, A. Petrosyan, W. Gieszczyk, P. Bilski, Yu. Zorenko, Intrinsic and defect-related luminescence of  $\text{YAlO}_3$  and  $\text{LuAlO}_3$  single crystals and films, *Optical Material*, 2018, 86, 376–381.

25. T. Zorenko, V. Gorbenko, N. Dulina, N. Matveevskaya, R. Yavetskiy, N. Babayevskaya, Yu. Zorenko. Comparative study of the luminescent properties of oxide compounds under synchrotron radiation excitation:  $\text{Lu}_2\text{O}_3:\text{Eu}$  nano-powders, ceramics and films, *Journal of Luminescence*, 2018, 199, 461-464.

26. T. Zorenko, V. Gorbenko, S. Nizankovskiy, Yu. Zorenko, Comparison of the luminescent properties of  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Pr}$  crystals and films under synchrotron radiation excitation, *Acta Physica Polonica A*, 2018, 133, 948-953.

### 5.2 Spektroskopia EPR

27. M. Buryi, V.V. Laguta, M. Nikl, T. Zorenko, V. Gorbenko, Yu. Zorenko. LPE growth and study of the  $\text{Ce}^{3+}$  incorporation in  $\text{LuAlO}_3:\text{Ce}$  Single Crystalline Film Scintillators, *CrystEngComm*, 2019, 21(21) 3313-3321.

28. V. Laguta, Yu. Zorenko, M. Buryi, V. Gorbenko, T. Zorenko, M. Nikl, EPR study of  $\text{Ce}^{3+}$  luminescent centers in the  $\text{Y}_2\text{SiO}_5$  single crystalline films, *Optical Materials*, 2017, 72, 833-837.

### 5.3 Spektroskopia ramanowska i FTIR

29. Yongjie Wang, D. Włodarczyk, Li Li, A. Wittlin, H. Przybylińska, P. Sybilski, Ya. Zhydachevskii, Chong-Geng Ma, M.G. Brik, M. Malinowski, Yu. Zorenko, V. Gorbenko, and A. Suchocki, Electronic structure of  $\text{Ce}^{3+}$  in yttrium and lutetium orthoaluminate crystals and single crystal layers, *Journal Allows and Compounds*, 2017, 723, 157-163.

30. W. Dewo, K. Łuczyńska, Yu. Zorenko, K. Drużbicki, T. Runka, In silico Raman spectroscopy of  $\text{YAlO}_3$  single-crystalline film, *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 231, 118111.

31. W. Dewo, V. Gorbenko, Yu. Zorenko, T. Runka, Raman spectroscopy of  $\text{Ce}^{3+}$  doped  $\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  single crystalline films grown onto  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  substrate. *Optical Materials X*., 2019, 3, 100029.