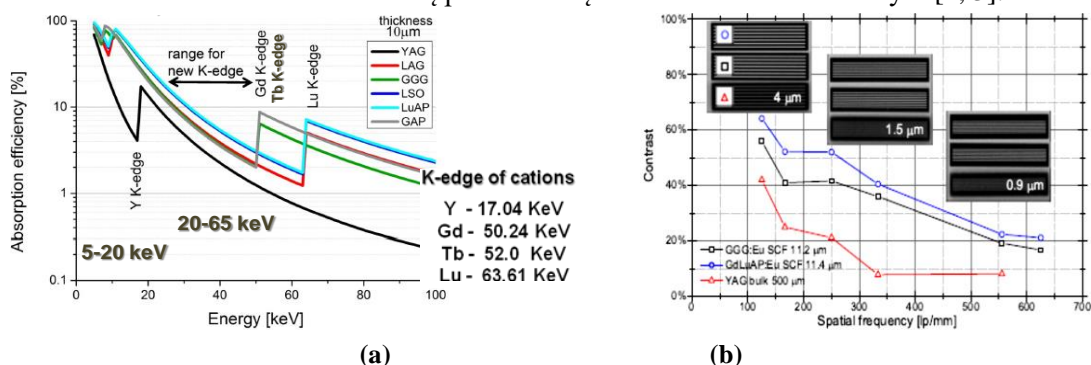


## Projekt NCN 2016/21/B/ST8/03200 „Nowe ekrany scyntylacyjne na bazie warstw monokrystalicznych mieszanych perowskitów i tlenków” (2017-2020)

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.*

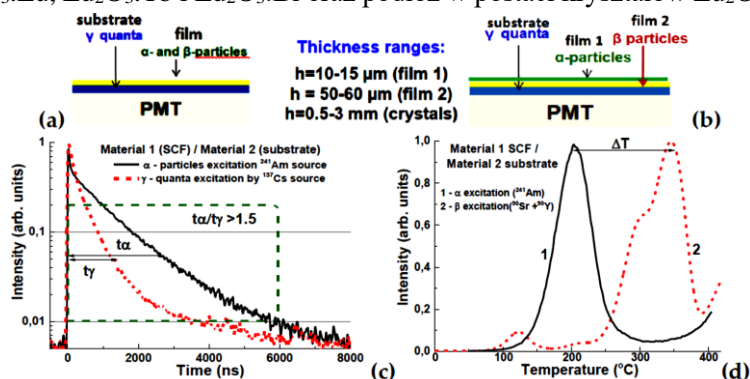
W projekcie została opracowana zaawansowana metoda obrazowania rentgenowskiego, oparta na *mikroskopii wymuszonego wygaszania emisji (STED)*. W tym celu zbadano właściwości wybranych typów warstw monokrystalicznych (granaty i ortokrzemiany), z domieszkami jonów  $Ce^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  i  $Eu^{3+}$ , a także różne rodzaje laserów, pod kątem zastosowania techniki 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 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  $\mu m$  w porównaniu z ekranami na bazie warstw  $Gd_3Ga_5O_{12}:Eu$  o grubości 11,2  $\mu m$  oraz kryształu  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  o grubości 500  $\mu m$ .

Używając metody LPE, pokazano także możliwość wytworzenia *nowoczesnych kompozytowych scyntylatorów typu "warstwa-podłoże"* umożliwiających 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-podłoży  $Gd_3Al_{2.5}Ga_{2.5}O_{12}:Ce$  (Rys.2); (ii) na bazie domieszkowanych jonami  $Ce^{3+}$ ,  $Pr^{3+}$ , 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 podłoży w postaci kryształów  $Lu_2O_3$  (R- ziemie rzadkie).



**Rys. 2.** Schematy dwuwarstwowego (a) i trójwarstwowego (b) kompozytowego scyntylatora oraz kompozytowego detektora TL, (c) – przykład detekcji cząstek  $\alpha$  i kwantów  $\gamma$  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].

1. M.S. Alekhin, C. Dujardin, P.-A. Douissard, T. Martin, Y. Zorenko, M. Stampanoni 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. Mrozik, W. Gieszczyk, P. Bilski, S. Witkiewicz-Lukaszek, V. Gorbenko, Y. Zorenko, wykłady na konferencjach SDD19 i ICDIM2020.

# Project NCN 2016/21/B/ST8/03200 „Novel scintillating screens based on the single crystalline films of mixed perovskite and oxide compounds” (2017-2020)

The aim of the project was to create a new generation of scintillation screens in the form of single-crystalline films and crystals of mixed perovskites and other simple and complex oxides with a uniquely high ability for absorption of X-ray quanta, for use in micro-tomographic detectors with submicron spatial resolution and detectors for radiation monitoring of mixed ionizing fluxes.

An advanced X-ray imaging method based on *stimulated emission depletion (STED) microscopy* was developed in the project frame. For this purpose, the STED-properties of selected types of single-crystalline films (garnets and orthosilicates), doped with  $Ce^{3+}$ ,  $Tb^{3+}$  and  $Eu^{3+}$  ions, as well as various types of STED lasers were examined [1].  $Tb^{3+}$  and  $Eu^{3+}$  doped heavy scintillators ( $Lu_3Al_5O_{12}$  (LuAG),  $Lu_2SiO_5$ ,  $LuAlO_3$  and  $Lu_2O_3$ ), and the 628 nm laser STED have been shown to be the most promising combinations meeting the requirements of STED X-ray imaging [1].

Using the liquid phase epitaxy (LPE) method, new types of scintillators with very high X-ray absorption ability in the form of single-crystalline films of  $Lu_2O_3:Eu$  and  $Lu_2O_3:Tb$  oxides,  $Gd_{1-x}Lu_xAlO_3:Tb,Ce$  ( $x=0-1$ ) and  $RAIO_3:Eu$  ( $R = Y, Lu, Gd, Tb$ ) mixed perovskites (Fig. 1) as well as the  $Lu_3Al_{5-x}Ga_xO_{12}:Pr$  and  $Tb_{3-x}Gd_xAl_{5-y}Ga_yO_{12}:Ce$  mixed garnets were developed and used as screens in microimaging detectors with spatial resolution in the submicron range [2, 3].

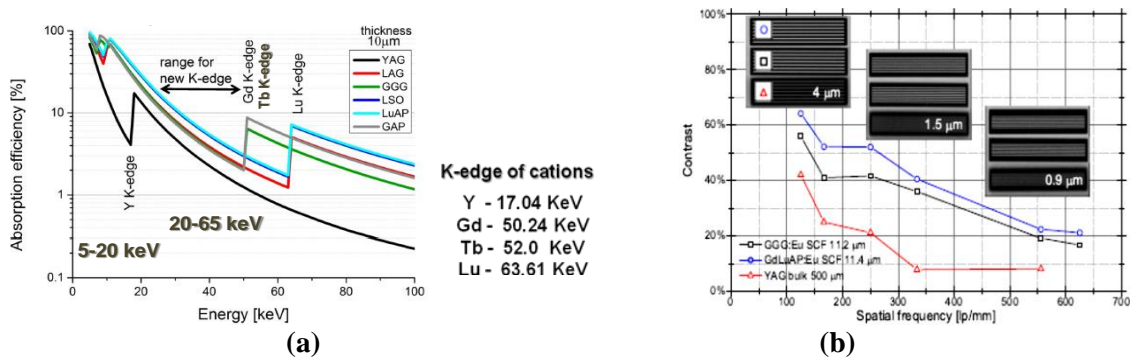


Fig.1. (a) - choice of cations in order of improvement absorption ability of scintillation screens in the 20-65 keV range using the Y, Gd, Tb and Lu ions. (b) - possibility of improvement of the tungsten pattern images, recorded using a  $(Gd_{0.45}Lu_{0.55})AlO_3:Eu$  solid solution film screen with 11.4 μm thickness in comparison with images recorded using a  $Gd_3Ga_5O_{12}:Eu$  film screens with 11.2 μm thickness and  $Y_3Al_5O_{12}:Ce$  crystal screens with 500 μm thickness.

Using the LPE method, the possibility of creating advanced composite scintillators of the "film-substrate" type based on the single crystalline films of  $Ce^{3+}$  doped  $Lu_{1.5}Gd_{1.5}Al_{1.5}Ga_{3.5}O_{12}:Ce$  and  $Tb_3Al_5O_{12}:Ce$  garnets and  $Gd_3Al_{2.5}Ga_{2.5}O_{12}:Ce$  crystals-substrates (Fig. 2) as well as the single crystalline films and crystals of the  $Ce^{3+}$ , and  $Pr^{3+}$  and  $Sc^{3+}$  doped LuAG garnet were demonstrated [4]. These composite scintillators can be used for the selective detection of various components of mixed ionization fluxes and as the screens for X-ray microimaging detectors. The prototypes of composite scintillators based on the epitaxial structures of perovskite compounds, containing  $GdAlO_3:Ce$ ,  $YAlO_3:Sc$  and  $YAlO_3:Bi$  films and  $YAlO_3:Ce$  and  $YAlO_3:Pr$  crystal substrates, as well as composite thermoluminescent (TL) detectors based on the  $YAlO_3:Mn$  films and  $YAlO_3:Ce$  crystals-substrates [5] were also developed in the project frame. The possibility of crystallization by LPE method of the prototypes of composite scintillators based on  $Lu_2O_3:Eu$ ,  $Lu_2O_3:Tb$  and  $Lu_2O_3:Bi$  single crystalline films and  $Lu_2O_3:R$  ( $R$  - rare earth) crystals substrates was confirmed as well.

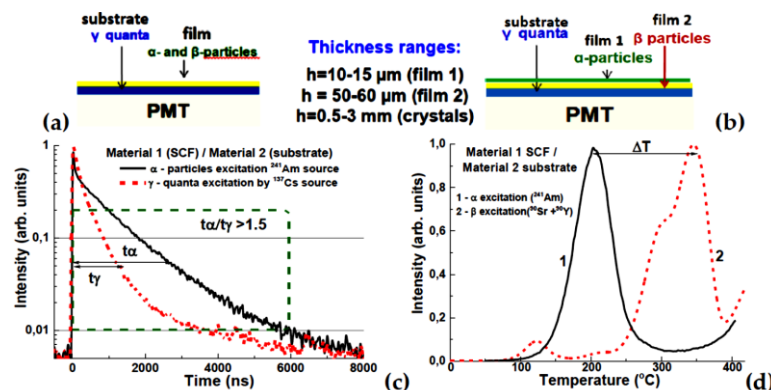


Fig. 2. Schemes of a two-layered (a) and three-layered (b) composite scintillators and composite TL detectors, (c) - an example of detection of α particles and γ quanta by recording the scintillation decay time from the film and crystal parts of composite scintillator [3], (d) - example recording the difference in temperatures of the main peaks of TL glow curves from the film and substrate parts of composite material TL, expressed by the parameter ΔT [5].

3. MS Alekhin, C. Dujardin, P.-A. Douissard, T. Martin, Y. Zorenko, M. Stampanoni e. a., Optics Express, 2017, 25, 1251-1261.
4. Yu. Zorenko, V. Gorbenko, T. Zorenko, F. Riva, PA Douissard, T. Martin, A. Suchocki, ea 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, ea CrystEngComm, 2018, 20, 3994-4002.
5. A. Mrozik, W. Gieszczyk, P. Bilski, S. Witkiewicz-Lukaszek, V. Gorbenko, Y. Zorenko, lectures at the SDD19 and ICDIM200 conferences.

## Publications in the frame of NCN 2016/21/B/ST8/03200 project

### 1. Development of scintillating screens based on the single crystalline films using LPE growth method

#### 1.1 Perovskites

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 Garnets

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 Orthosilicates

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. Development of film-crystal composite scintillators and screens using LPE growth method

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. Mrozik, 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. MPD grown crystals

#### 3.1 Perovskites

14. W. Gieszczyk, P. Bilski, M. Kłosowski, A. Mrozik, 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. Mrozik, 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 Other oxides (phosphates)

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

## 4. Nanopowders, films and ceramics:

### - based on $\text{Lu}_2\text{O}_3$

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.

### - based on the other oxides (silicates, titanates, borates)

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. Advanced optical and radiospectroscopic investigations of the powder, ceramic, crystal and films

### 5.1 Time resolved-luminescent spectroscopy under synchrotron radiation excitation

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 EPR spectroscopy

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 FTIR and Raman spectroscopy

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 of Inorganic and Organometallic Chemistry*, 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.