

Załącznik nr 3 do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego na
podstawie cyklu publikacji powiązanych tematycznie

Autoreferat

dr Piotr Potera

Rzeszów, 2023

Spis treści

1.	Imię i nazwisko	3
2.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne	3
3.	Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych	4
4.	Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce	5
5	Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.	31
6.	Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę	32
7	Inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej	34

1. Imię i nazwisko.

Piotr Potera

Katedra Materiałów Funkcjonalnych, Instytut Inżynierii Materiałowej – Kolegium
Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu Rzeszowskiego

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- 2009 Politechnika Rzeszowska, Wydział Lotnictwa i Budowy Maszyn, Studia Podyplomowe: Termomodernizacja i odnawialne źródła energii
- 2004 stopień doktora nauk fizycznych z wyróżnieniem nadany przez Radę Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego, tytuł rozprawy doktorskiej: „Centra barwne w kryształach $Gd_3Ga_5O_{12}$, $LiNbO_3$, $YAlO_3$ ”, promotor Prof. dr hab. Andrzej Matkowski
- 2000 Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Rzeszowie, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Studia Podyplomowe: fizyka z dodatkową specjalnością informatyka i obsługa komputerów
- 1998 Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Rzeszowie, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Studia magisterskie uzupełniające z fizyki
- 1997 Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Rzeszowie, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Studia licencjackie: fizyka z dodatkową specjalnością informatyka i obsługa komputerów

- 1996 Wyższa Szkoła Pedagogiczna w Rzeszowie, Wydział Matematyczno-Przyrodniczy, Studia licencjackie: fizyka z dodatkową specjalnością matematyka

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

1.10.1998-31.12.2004	asystent w Zakładzie Fizyki Półprzewodników Instytutu Fizyki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Rzeszowie (od 1.09.2001 r. Uniwersytet Rzeszowski)
1.01.2005-30.09.2009	adiunkt w Zakładzie Fizyki Półprzewodników Instytutu Fizyki Uniwersytetu Rzeszowskiego
1.10.2009-31.10.2013	adiunkt w Zakładzie Informatyki Stosowanej Instytutu Fizyki Uniwersytetu Rzeszowskiego
1.11.2013-15.02.2016	adiunkt w Katedrze Fizyki Doświadczalnej Wydziału Matematyczno - Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego
16.02.2017- 31.08.2021	starszy wykładowca w Katedrze Fizyki Doświadczalnej Wydziału Matematyczno - Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego
1.09.2021 – do nadal	adiunkt badawczo-dydaktyczny w Katedrze Materiałów Funkcjonalnych Instytutu Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Rzeszowskiego
1.07.2014 - do nadal	Kierownik Pracowni Badania Materiałów Laserowych w Laboratorium Technologii Materiałów dla Przemysłu w Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego

W roku 1993 ukończyłem I Liceum Ogólnokształcącym im. Króla Stanisława Leszczyńskiego w Jaśle w klasie o profilu matematyczno - fizycznym. Bezpośrednio po zdaniu egzaminu dojrzałości podjąłem studia na kierunku Fizyka w Wyższej Szkole

Pedagogicznej w Rzeszowie. Studia ukończyłem w roku 1998 po przedstawieniu i obronie pracy magisterskiej z wynikiem bardzo dobrym. Po zatrudnieniu na stanowisku asystenta pracowałem w Zakładzie Fizyki Półprzewodników Instytutu Fizyki Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Rzeszowie (późniejszy Uniwersytet Rzeszowski), zajmując się zagadnieniami związanymi z centrami barwnymi i defektami w materiałach laserowych.

Zebrany w trakcie pracy w Zakładzie Fizyki Półprzewodników Instytutu Fizyki materiał doświadczalny oraz wyniki prac naukowych opublikowane w latach 1998-2004 pozwoliły mi na otwarcie przewodu doktorskiego, którego promotorem był prof. dr hab. Andrzej Matkowski. W roku 2004 przedstawiłem rozprawę doktorską „Centra barwne w kryształach $Gd_3Ga_5O_{12}$, $LiNbO_3$, $YAlO_3$ ”, która została dopuszczona do publicznej obrony. Po publicznej obronie Rada Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego nadała mi w dniu 18 listopada 2004 roku stopień naukowy doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki, wyróżniając przy tym rozprawę doktorską.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.).
Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

Prezentowane osiągnięcie stanowiące podstawę wszczęcia postępowania habilitacyjnego według art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.) to cykl powiązanych tematycznie 8 artykułów naukowych, w których jestem pierwszym lub jedynym autorem. We wszystkich pracach wieloautorskich byłem m.in. twórcą ich koncepcji oraz autorem planu badań, których znaczna część została wykonana przeze mnie osobiście bądź z moim bezpośrednim udziałem. Ponadto kierowałem procesem powstawania publikacji, byłem również odpowiedzialny za przygotowanie ostatecznych wersji manuskryptów z uwzględnieniem pytań i uwag

recenzentów. Wspomiane 8 prac stanowi znaczący wkład w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa.

Oświadczenia dotyczące indywidualnego wkładu współautorów w prace wieloautorские wchodzące w skład osiągnięcia zamieszczono w Załączniku 5, kopie prac stanowiących osiągnięcie w Załączniku 6, zaś wykaz wszystkich opublikowanych prac w Załączniku 4.

W dalszej części omówienia prace stanowiące cykl publikacji będą oznaczane symbolami [HX], gdzie X oznacza numer kolejnej pozycji.

- [H1] **P.Potera**, S.Ubizskii, D.Sugak, T.Łukasiewicz „Colour centres in $\text{LiNbO}_3\text{:Fe}$ and $\text{LiNbO}_3\text{:Cu}$ crystals irradiated by ^{12}C ions” *Radiation Measurements* 42(2), (2007), 232-235 (IF =1,054, PktMNiSW = 24)
- [H2] **P.Potera**, S.Ubizskii, Ya.Zhydachevskii, D.Sugak, I.Solskii, T.Lukasiewicz „Induced absorption in YAlO_3 crystals irradiated by ^{12}C and ^{235}U ions” *Radiation Effects and Defects in Solids*, 162(12), (2007), 821 – 824 (IF =0,303 , PktMNiSW = 15)
- [H3] **P.Potera**, S.Ubizskii, D.Sugak, K.Schwartz „Induced Absorption in Gadolinium Gallium Garnet Irradiated by High Energy ^{235}U Ions” *Acta Physica Polonica* 117(1), (2010), 181-183 (IF =0,467, PktMNiSW = 13)
- [H4] **P.Potera**, I.Stefaniuk „Influence of annealing and irradiation by heavy ions on optical absorption of doped lithium niobate crystals" *Acta Physica Polonica* 130(3), (2016), 800-804 (IF =0,469, PktMNiSW = 15)
- [H5] **P.Potera** „Concentration of radiation displacement defects in BSO and BGO crystals irradiated by electrons or neutrons” *Central European Journal of Physics* 6(1), (2008), 52-56 (IF =0,448, PktMNiSW = 25)
- [H6] **P.Potera** „Calculation of the atom displacement concentration in YVO_4 and PbMoO_4 crystals as a function of electrons or neutrons energy" *Radiation Effects and Defects in Solids* 170(9), (2015), 711-718 (IF =0,472, PktMNiSW = 15)
- [H7] **P. Potera** “Analytical description of concentration of radiation displacement defects in oxide crystals as function of electrons or neutrons energy”, *Advances in Materials Science*, Vol. 22, No. 3 (73), (2022), 41-52 (IF = 1,300, PktMNiSW = 70)
- [H8] **P.Potera** “Concentration of Radiation Displacement Defects in $\text{Ca}_{0.28}\text{Ba}_{0.72}\text{Nb}_2\text{O}_6$ Crystal as Function of Electrons or Neutrons Energy”, *Acta Physica Polonica A*. 6(141), (2022) 585-590 (IF =0,700, PktMNiSW = 70)

Tytuł osiągnięcia

"Defektowanie radiacyjne oraz zmiany absorpcji pod wpływem wysokoenergetycznego promieniowania korpuskularnego krystalicznych materiałów tlenkowych do zastosowań w optoelektronice"

Charakterystyka osiągnięcia

Tło problemu naukowego

W wyniku oddziaływania promieniowania jonizującego z materiałami krystalicznymi, w tym materiałami optoelektronicznymi, zmianie mogą ulegać m.in.:

- właściwości fizyczne materiałów (przenikalność dielektryczna, wrażliwość fotorefrakcyjna, przewodność elektryczna, gęstość, prędkość dźwięku w materiale, właściwości paramagnetyczne, piezoelektryczne itp.) [1-3],
- właściwości optyczne materiałów (absorpcja, luminescencja) [1],
- parametry charakteryzujące akcję laserową w ośrodkach czynnych (sprawność generacji, próg generacji) [4-7]
- parametry i właściwości strukturalne (stałe sieci, defekty struktury krystalicznej, struktura materiału) [8-10].

Dla przykładu, elementy czynne laserów na ciele stałym wykonane w oparciu o matryce krystaliczne są bardzo czułe na promieniowanie jonizujące - napromieniowanie prowadzi do pogorszenia charakterystyk wyjściowych lasera na ciele stałym (moc, energia, sprawność generacji) [5,11], jedynie dla nielicznych sensybilizowanych ośrodków krystalicznych (jak np. $Y_3Al_5O_{12}:Cr,Nd$; $LiYF_4:Cr,Nd$) parametry akcji laserowej nie ulegają zmianom [5] lub nawet ulegają polepszeniu ($Y_3Al_5O_{12}:Er$) [12] po napromieniowaniu, co pozostaje w ścisłym związku z tworzeniem centrów barwnych i zmianami absorpcji materiału w procesie napromieniowania. Dodatkowa absorpcja¹ materiału tworzona pod wpływem różnego rodzaju promieniowania jonizującego jak i sam proces defektowania może istotnie się różnić, co pokazały badania prowadzone dla promieniowania fotonowego oraz elektronów, neutronów i protonów o niewielkich energiach (m.in. zapoczątkowane przez monografię [1]).

¹ Absorpcja tworzona pod wpływem czynników zewnętrznych (np. napromieniowanie), mierzona jako różnica absorpcji materiału przed i po zadziaaniu czynnika

Ważną cechą decydującą o możliwości praktycznego zastosowania materiałów krystalicznych jako ośrodków czynnych laserów na ciele stałym lub elementów innych przyrządów optycznych i optoelektronicznych (m.in. modulatory, podwajacze częstotliwości, płytki światłodzielnice, optyczne oscylatory parametryczne) wykorzystywanych jako wyposażenie m.in. samolotów i statków kosmicznych (np. w lidary) jest więc ich odporność radiacyjna, rozumiana jako odporność na tworzenie defektów radiacyjnych² i powstawanie zmian absorpcji pod wpływem promieniowania jonizującego. Podczas kilkuletniego (3-10 lat) przebywania na orbicie okołoziemskiej dawka pochłonięta promieniowania kosmicznego (głównie wiatru słonecznego) przez materiały optoelektroniczne (np. element czynny lasera) może przekroczyć 10^3 - 10^4 Gy [4,5], co stanowi przyczynę częściowej destrukcji tych materiałów. Ten fakt stał się inspiracją do badań odporności radiacyjnej materiałów optoelektronicznych na promieniowanie fotonowe oraz promieniowanie korpuskularne (elektrony, neutrony, protony) o energii do około 20 MeV (m.in. [1,13]). W dobie rozwoju lotów międzyplanetarnych pojawiają się nowe problemy związane z pierwotnym galaktycznym promieniowaniem kosmicznym, w którego skład wchodzi wysokoenergetyczne protony, cząstki alfa, ciężkie jony i elektrony o średnich energiach około 10 GeV [14], przy strumieniu cząstek w przestrzeni międzyplanetarnej około 20 razy większym niż na granicy atmosfery [15,16] tj. dochodzącym do $6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ rok}^{-1}$ w latach niskiej aktywności słonecznej. Najnowsze badania pokazują, że ilość galaktycznego promieniowania kosmicznego stale rośnie od jednego do drugiego minimum słonecznego i może być nawet większa o 30% od wartości wcześniej mierzonych [17]. Silna ekspozycja na wysokoenergetyczne promieniowanie korpuskularne ma także miejsce na orbitach okołoziemskich na skutek flar słonecznych - szacuje się, że średni strumień cząstek o energii powyżej 30 MeV wynosi $0,9 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ rok}^{-1}$ [18], przy maksymalnych energiach jonów rzędu GeV [19] i impulsowych fluencjach³ jonów we flarze mogących osiągać wartość nawet do $1,9 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ [18], co pomijano we wcześniejszych badaniach odporności radiacyjnej materiałów.

Oddziaływanie pierwotnego promieniowania kosmicznego z atmosferą ziemską (a także z materią znajdującą się w przestrzeni kosmicznej np. poszyciem i wyposażeniem statków

² Termin „defekty radiacyjne” spotykany w fachowej literaturze oznacza szeroką grupę defektów utworzonych w kryształach pod wpływem promieniowania jonizującego m.in. defekty struktury krystalicznej, centra barwne

³ Międzynarodowa Komisja Radiologiczna ds. Jednostek i Pomiarów (ICRU) definiuje "fluencję cząstek" oraz "fluencję energii" - w niniejszym autoreferacie tam gdzie to możliwe stosuje się formę skróconą "fluencja" w rozumieniu "fluencji cząstek"

kosmicznych) prowadzi do powstania promieniowania wtórnego, dla którego główną trwałą składową korpuskularną są wysokoenergetyczne neutrony, elektrony i protony (o energiach do 1 GeV). Promieniowanie to w istotny sposób wpływa m.in. na urządzenia i materiały znajdujące się w samolotach i statkach kosmicznych. Znaczna część elektronów wtórnego promieniowania kosmicznego (około 90%) w górnych warstwach atmosfery ma energię z zakresu 10 - 350 MeV, przy czym rozkład liczby elektronów w funkcji energii w tym przedziale jest w zasadzie równomierny [20]. W przypadku neutronów obserwuje się dwa⁴ wyraźne maksima liczby cząstek w zakresie energii 1 - 10 MeV i 30 - 200 MeV z głębokim minimum w okolicy 20 MeV [21]. W erze rozwoju lotów kosmicznych i lotnictwa badanie wpływu wysokoenergetycznych cząstek na właściwości krystalicznych tlenkowych materiałów optoelektronicznych, w tym właściwości optyczne, pozwoli m.in. na wskazanie grupy materiałów wyróżniających się oczekiwaną odpornością radiacyjną na korpuskularne promieniowanie kosmiczne oraz określenie sposobów zapobiegania pogarszania ich właściwości optycznych pod wpływem tego promieniowania.

Napromieniowanie krystalicznych materiałów tlenkowych promieniowaniem korpuskularnym ma miejsce także w warunkach ziemskich. Implantacja lekkich jonów (głównie wodoru i helu), o energii do kilku MeV jest jednym ze sposobów otrzymywania światłowodów planarnych zakresu widzialnego i bliskiej podczerwieni, co opisano w szeregu prac m.in. [22,23,24,25]. Przegląd literatury pokazuje, że obecnie do wytwarzania światłowodów planarnych na bazie krystalicznych materiałów tlenkowych stosuje się coraz częściej cięższe oraz prędkie jony (w tym prędkie ciężkie jony) o energiach od kilku MeV do kilku GeV, głównie jony węgla (Tabela 1).

Tabela 1. Światłowody otrzymywane metodą implantacji prędkich jonów

Jon	Kryształ	Zakres energii [MeV]	Zakres fluencji [cm ⁻²]	Źródło
F	LiNbO ₃ ; LiNbO ₃ :Mg; KGd(WO ₄) ₂ ; SiO ₂	15,0-30,0	(0,1- 30,0)·10 ¹⁴	[26-30]

⁴ Występuje także 3 maksimum w okolicy 10 keV, jednak jest ono nieistotne z punktu widzenia tworzenia radiacyjnych defektów przemieszczenia

C	LiNbO ₃ ; LiNbO ₃ :Er; KGd(WO ₄) ₂ ; KTiOPO ₄ ; KT _{0.68} N _{0.32} O ₃ :Li; RbTiOPO ₄ ; LiTaO ₃ ; ZnWO ₄ ; ZnO; Bi ₁₂ SiO ₂₀ :Nd; Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Nd; Ca ₃ Nb ₂ Ga ₃ O ₁₂ :Nd; Gd ₃ Ga ₅ O ₁₂ :Nd; Ca ₄ GdO(BO ₃) ₃ :Nd; Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ ; K _{0.2} Na _{0.2} Sr _{0.4} Ba _{0.32} Nb ₂ O ₆ ; Lu ₂ SiO ₅ :Ce	3,9 - 40,0	1·10 ¹³ -1·10 ¹⁶	[31-51]
O	LiNbO ₃ ; LiNbO ₃ :Fe; KGd(WO ₄) ₂ ; Bi ₁₂ TiO ₂₀ ; ZnO; YbVO ₄ :Nd; YCa ₄ O(BO ₃) ₃ :Yb; SiO ₂ ; Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	1,5 - 25,0	5·10 ¹³ -2·10 ¹⁵	[30,49, 52-61]
Si	LiNbO ₃ ; YVO ₄ :Nd	3,6 i 3,0	3·10 ¹³ -1·10 ¹⁵	[62,63]
Kr	LiNbO ₃ , YVO ₄ :Nd	809, 1700, 1980	(0,2-8)·10 ¹¹	[64-66]
Xe	LiNbO ₃	1432	(0,5-8)·10 ¹¹	[65]
Ag	Ba ₁₁ Sr(BO ₃) ₈	120	5.0·10 ¹¹	[67]
N	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Nd	20	2·10 ¹⁴	[68]
Ar	Y ₃ Al ₅ O ₁₂ :Nd; YCa ₄ O(BO ₃) ₃ :Nd; LiNbO ₃	60 i 170	2·10 ¹²	[69-71]

Problemem aplikacyjnym w przypadku światłowodów planarnych otrzymywanych metodą implantacji jonów są wysokie straty optyczne przesyłanego sygnału. W procesie implantacji jonów tworzony jest obszar "bariery optycznej" o szerokości rzędu 1 μm, który powstaje na głębokości kilku μm i jest strefą o dużym stężeniu defektów struktury krystalicznej indukowanych napromieniowaniem [72]. W obszarze czynnym światłowodu stężenie centrów barwnych, które dopowiadają za straty absorpcyjne jest bardzo duże. Straty te mogą być znacznie zmniejszone przez odpowiednie wygrzewanie wytworzonego światłowodu (200°C - 500°C) w czasie od kilkudziesięciu minut do kilku godzin [72,73], które częściowo usuwa centra barwne obniżając jednocześnie gradient współczynnika załamania światła, co jest zjawiskiem niekorzystnym. Przyczyną znacznych strat optycznych jest także rozpraszanie na chropowatościach powierzchni falowodu, którego wielkość pozostaje w ścisłym związku z fluencją implantowanych jonów. W celu zminimalizowania strat rozproszonych fluencja jonów wymagana do utworzenia światłowodu powinna być jak najmniejsza [74], co oznacza podniesienie energii jonów.

Bezpośredni kontakt materiałów krystalicznych z wysokoenergetycznym promieniowaniem korpuskularnym ma także miejsce w detektorach i dozymetrach krystalicznych (m.in. dozymetry termoluminescencyjne) oraz w urządzeniach energetyki jądrowej, sprzęcie medycznym do radioterapii i w medycynie nuklearnej a także potencjalnie w przypadku

optoelektronicznych systemów wojskowych (wojna nuklearna). Materiały krystaliczne powinny przejść badania mające na celu określenie rodzaju i zakresu zmian w nich zachodzących pod wpływem wysokoenergetycznego promieniowania korpuskularnego, co pozwoli na wskazanie nowych potencjalnych obszarów ich zastosowań np. jako materiałów dla nowych detektorów wysokoenergetycznych cząstek.

Opisane w literaturze wyniki badań wpływu promieniowania korpuskularnego na właściwości optyczne krystalicznych materiałów tlenkowych dotyczą głównie elektronów i neutronów o energiach do kilkunastu MeV (np. monografia przeglądowa [1]), protonów o energiach do około 20 MeV (m.in. [5,13]) i jonów o niewielkich energiach (głównie implantacja jonów Ni, Xe, He, Au, Cu, Ag o energiach do kilkuset keV w takich kryształach jak Al_2O_3 , MgAl_2O_4 , LiTaO_3 i LiNbO_3 [75-81]). Brak jest natomiast kompleksowych badań wpływu wysokoenergetycznego promieniowania korpuskularnego na krystaliczne materiały tlenkowe oraz spójnej analizy natury defektów radiacyjnych odpowiedzialnych za zmiany absorpcji materiałów w procesie napromieniowania wysokoenergetycznymi cząstkami. Pewną przeszkodą w prowadzeniu tego typu badań są trudności w dostępie do źródeł wysokoenergetycznych cząstek oraz realizacji eksperymentów z ich wykorzystaniem. Dla przykładu w Europie znajdują się kilka ośrodków dysponujących źródłami prędkich jonów o energii rzędu 10 MeV/u, z których wiodący jest Instytut Badań Ciężkich Jonów w Darmstadt. Analogiczna sytuacja dotyczy dostępności źródeł wysokoenergetycznych elektronów i neutronów, co w połączeniu z trudnościami technicznymi realizacji eksperymentów przy wysokich energiach cząstek skutkuje niedostatkiem publikacji w tym zakresie. Pomocne w takim przypadku mogą okazać się symulacje komputerowe polegające m.in. na obliczeniach stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia w funkcji energii elektronów i neutronów.

Cel badań

Opisane w niniejszym autoreferacie badania można podzielić na 2 grupy:

1. Analiza wpływu napromieniowania wiązką prędkich jonów (tj. o energii $E > 1$ MeV/u) na właściwości optyczne wybranych krystalicznych materiałów tlenkowych wraz z analizą procesu tworzenia centrów barwnych w oparciu o defekty, domieszki i zanieczyszczenia w tych materiałach (prace [H1-H4]) oraz z identyfikacją tworzonych defektów radiacyjnych i procesów zmian ładunku domieszek i zanieczyszczeń;

2. Analiza procesu defektowania krystalicznych materiałów tlenkowych pod wpływem wiązki wysokoenergetycznych elektronów i neutronów z uwzględnieniem energii cząstek (prace [H5-H8]) przy wykorzystaniu obliczeń numerycznych.

Ogólnym celem badań było:

- określenie wpływu napromieniowania wiązką prędkich jonów (węgla, uranu i bizmutu) na absorpcję wybranych krystalicznych materiałów tlenkowych dla optoelektroniki;
- określenie podatności materiałów na tworzenie centrów barwnych w procesie napromieniowania, determinujących ich jakość optyczną po napromieniowaniu;
- identyfikacja przy pomocy spektroskopii optycznej mechanizmów odpowiedzialnych za zmiany absorpcji krystalicznych materiałów tlenkowych pod wpływem napromieniowania prędkimi jonami oraz identyfikacja powstających w procesie napromieniowania centrów barwnych;
- wyznaczenie stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia⁵ tworzonych w krystalicznych materiałach tlenkowych w funkcji energii elektronów i neutronów korespondującej z szerokim zakresem energii wtórnego promieniowania kosmicznego.

Autorski wkład w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa polega na:

- scharakteryzowaniu wrażliwości radiacyjnej krystalicznych materiałów tlenkowych stosowanych w optoelektronice na napromieniowanie wiązką prędkich jonów (rozumianej w kategoriach podatności na tworzenie dodatkowej absorpcji);
- określeniu, z wykorzystaniem spektroskopii optycznej, mechanizmów odpowiedzialnych za niekorzystny, z punktu widzenia zastosowań praktycznych, wzrost absorpcji materiału w obszarze falowodu w procesie wytwarzania światłowodów metodą implantacji szybkich jonów i wskazaniu możliwych sposobów zapobiegania tym zmianom;
- określeniu z wykorzystaniem spektroskopii optycznej mechanizmów prowadzących do zmian absorpcji krystalicznych materiałów tlenkowych narażonych na

⁵ Termin „radiacyjne defekty przemieszczenia” spotykany w literaturze fachowej oznacza strukturalne defekty punktowe (wakanse, atomy międzywęzłowe, etc.) utworzone w materiale pod wpływem promieniowania jonizującego

wysokoenergetyczne korpuskularne promieniowanie kosmiczne wraz z określeniem ich wrażliwości radiacyjnej na to promieniowanie i identyfikacją defektów radiacyjnych odpowiedzialnych za powstawanie zmian absorpcji materiału;

- określeniu przy użyciu komputerowych metod obliczeniowych wpływu energii neutronów i elektronów na proces defektowania krystalicznych materiałów tlenkowych w trakcie napromieniowania wysokoenergetycznymi neutronami lub elektronami oraz określeniu odporności radiacyjnej tych materiałów na wysokoenergetyczne elektrony i neutrony wtórnego promieniowania kosmicznego;
- wskazaniu potencjalnych nowych obszarów zastosowań wybranych krystalicznych materiałów tlenkowych.

Przedmiot, metoda i zakres zrealizowanych badań

Jako obiekty badań eksperymentalnych wybrano niedomieszkowane oraz domieszkowane kryształy granatu gadolinowo-galowego ($Gd_3Ga_5O_{12}$), perowskitu itrowo-glinowego ($YAlO_3$), niobianu litu ($LiNbO_3$), [H1-H4], zaś dla rozważań teoretycznych kryształy $Gd_3Ga_5O_{12}$, $YAlO_3$, $LiNbO_3$, $Y_3Al_5O_{12}$, YVO_4 , $PbMoO_4$, $Bi_4Ge_3O_{12}$ i $Bi_4Si_3O_{12}$ [H5-H8].

Wybrane obiekty badań mają szerokie zastosowanie jako materiały dla optoelektroniki.

Kryształy $Gd_3Ga_5O_{12}$, $Y_3Al_5O_{12}$, $YAlO_3$ i YVO_4 domieszkowane jonami ziem rzadkich lub jonami metali przejściowych, stanowią liczną grupę ośrodków czynnych laserów na ciele stałym [82,83] o dużym potencjale aplikacyjnym (m.in. w lidarach).

Kryształy niobianu litu stosowane są m.in. w urządzeniach z akustyczną falą powierzchniową, urządzeniach akustooptycznych, komórkach Pockelsa, przełącznikach dobroci ("Q-switch"), optycznych oscylatorach parametrycznych, przełącznikach optycznych dla częstotliwości gigahercowych, optycznych przestrzennych filtrach dolnoprzepustowych oraz jako materiał dla holograficznego zapisu informacji i matryca laserów (w tym światłowodowych) [84], a także jako materiał dla światłowodów wytwarzanych metodą implantacji prędkich jonów (Tabela 1).

Kryształy $Bi_4Ge_3O_{12}$ i $Bi_4Si_3O_{12}$ stosowane są w diagnostyce medycznej i medycynie nuklearnej, optyce nieliniowej, eksperymentach z wysoką prędkością zliczania oraz fizyce wysokich energii jako: materiał scyntylacyjny, materiał czynny kalorymetrów

elektromagnetycznych, matryca laserów na ciele stałym oraz materiał dla światłowodów wytwarzanych metodą implantacji prędkich jonów [49, 85-90].

Kryształy PbMoO_4 są jednym z najbardziej wydajnych materiałów stosowanych w urządzeniach akustooptycznych takich jak modulatory akustyczno-optyczne, deflektory, przesuwniki fazowe, przełączniki "Q-switch", przesuwniki częstotliwości, przestrajalne filtry, skanery oraz wartościowymi ośrodkami czynnymi laserów ramanowskich [91-98].

Do napromieniowania zastosowano prędkie jony:

1. węgla - o energii 54 MeV, ze względu m.in. na fakt, że jony węgla o energii do kilkudziesięciu MeV są stosowane w procesie wytwarzania światłowodów metodą implantacji jonów⁶ (Tabela 1) oraz cząstki o energii tego rzędu są składnikiem promieniowania kosmicznego z flar słonecznych;
2. uranu i bizmutu - o energii około 2 GeV, ze względu na to, że były to jony o maksymalnej możliwej do uzyskania energii korespondującej ze średnią energią cząstek pierwotnego galaktycznego promieniowania kosmicznego.

Napromieniowanie miało miejsce w Instytucie Badań Ciężkich Jonów w Darmstadt w latach 2006 - 2015.

Identyfikacja centrów barwnych w napromieniowanych krystalicznych materiałach tlenkowych została wykonana w oparciu o analizę widm dodatkowej absorpcji. Metoda ta jest stosowana z powodzeniem przez wielu naukowców (m.in. [99-103]).

Obliczenia stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia tworzonych pod wpływem wysokoenergetycznych neutronów lub elektronów w wybranych kryształach tlenkowych przeprowadzono z wykorzystaniem modelu kaskadowego [H5-H8]. Przy dostatecznie dużej energii padającej cząstki możliwe jest tworzenie w procesie napromieniowania kaskady wybitych jonów. W tym przypadku pierwszy wybity jon (określany jako "PKA") może wybijać kolejne jony z różnych podsieci kryształu. Liczba powstających kaskadowo radiacyjnych defektów przemieszczenia w podsieci j-tego typu kryształu tworzonych przez PKA i-tego typu wybity z energią odrzutu T_i określona jest przez funkcję kaskadową $v_{ij}(T_i)$. W takim ujęciu (przy założeniu, że PKA traci energię na zderzenia z jonami różnego typu) stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia w podsieci j-tego typu powstałych dla PKA i-tego typu przypadające na jednostkową fluencję cząstek wynosi [H8]:

⁶ Zastosowana fluencja jonów ($2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$) jest wystarczająca dla tworzenia centrów barwnych, przy czym stężenie defektów strukturalnych tworzonych w materiale w procesie napromieniowania przy tej fluencji jest zaniedbywalne, co odpowiada obszarowi czynnemu falowodu, w którym powstają centra barwne odpowiedzialne za straty optyczne

$$n_{(F)d_{ij}} = n_i \cdot \int_{T_{di}}^{T_{max,i}} \frac{d\sigma_{d_i}(E, T_i)}{dT_i} v_{ij}(T_i) dT_i \quad (1)$$

gdzie n_i – jest stężeniem jonów i-tego typu w materiale, $d\sigma_{d_i}/dT_i$ różniczkowym przekrojem czynnym na zderzenie sprężyste cząstki z jonem podsieci i-tego typu, w rezultacie którego uzyskuje on energię T_i , $T_{max,i}$ - jest to maksymalna energia która może być przekazana jonowi podsieci i-tego typu podczas zderzenia, T_{di} - progowa energia przemieszczenia jonu z i-tej podsieci, $v_{ij}(T_i)$ - funkcja kaskadowa określająca liczbę kaskadowo wybitych jonów j-tego typu przez jeden PKA i-tego typu mający energię T_i .

Omówienie wyników zrealizowanych prac badawczych

W pracach [H1, H2] po raz pierwszy przedstawiono i opisano wyniki badań wpływu napromieniowania prędkimi jonami węgla ^{12}C o energii 54 MeV ($\sim 4,5$ MeV/u) z fluencją $2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ na właściwości optyczne niedomieszkowanych i domieszkowanych kryształów niobianu litu: LiNbO_3 , $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}(5\%)$, $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}(0,05\%)$ i $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}(0,2\%)$ oraz niedomieszkowanych i domieszkowanych neodymem kryształów perowskitu itrowo-glinowego: YAlO_3 , $\text{YAlO}_3:\text{Nd}(1\%)$ a także określono związek dodatkowej absorpcji z defektami radiacyjnymi. Kryształy niobianu litu zostały wybrane nieprzypadkowo. Większość danych literaturowych dotyczących wpływu napromieniowania jonami na właściwości optyczne krystalicznych materiałów tlenkowych dotyczy kryształów LiNbO_3 napromieniowanych lekkimi jonami o niewielkich energiach (maksymalnie do kilku MeV) [75-78], które prowadzi do dodatkowej absorpcji o wyraźnej strukturze i położeniu maksimum zależnych od rodzaju jonu [75,77,78].

W pracach [H1, H2] pokazano, że napromieniowanie kryształów LiNbO_3 i $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ prędkimi jonami węgla o energii 54 MeV z fluencją $2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ nie prowadzi do zauważalnych zmian absorpcji kryształów [H1], natomiast napromieniowanie z tą samą fluencją jonów kryształów $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ i $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ [H1] prowadzi do wyraźnych zmian ich absorpcji oraz nieco mniejszych dla YAlO_3 i $\text{YAlO}_3:\text{Nd}$ [H2].

Napromieniowanie kryształu $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ jonami węgla [H1] skutkuje wyraźnym wzrostem absorpcji w obszarze widzialnym. Intensywna dodatkowa absorpcja z maksimum

w okolicy 500 nm (o wartości około $2,5 \text{ cm}^{-1}$) ma złożony charakter i towarzyszy jej słaby wzrost absorpcji powyżej 770 nm i poniżej 385 nm. Rozkład indukowanej absorpcji na komponenty Gaussa prowadzi do dwóch pasm z maksimami 506 nm i 447 nm. Wynikiem napromieniowania jonami węgla kryształów $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ [H1] jest dodatkowa absorpcja w obszarze od nadfioletu do bliskiej podczerwieni - dla długości fali poniżej 690 nm ma miejsce wzrost absorpcji niewykazujący wyraźnej struktury, zaś powyżej spadek absorpcji. Zmiany absorpcji występują tylko dla kryształów niobianu litu domieszkowanych jonami łatwo zmieniającymi wartościowość (jony metali takich jak Fe i Cu), co oznacza, że są one powiązane ściśle z domieszką. Komponent Gaussa z maksimum 506 nm dla kryształu $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ powiązано w pracy [H1] z jonami Fe^{2+} , zaś jego powstawanie w procesie napromieniowania ze zmianą wartościowości jonów żelaza na drodze reakcji wychwytu elektronu $\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$. Z kolei pasmo 447 nm jest związane z centrami O^- powstającym na drodze wychwytu dziury w pobliżu anionów tlenowych w obecności defektów struktury krystalicznej: $\text{O}^{2-} + h \rightarrow \text{O}^-$. Obserwowane zmiany absorpcji kryształu $\text{LiNbO}_3:\text{Cu}$ przypisano reakcji wychwytu elektronu $\text{Cu}^{2+} + e^- \rightarrow \text{Cu}^+$ prowadzącej do zmiany wartościowości jonów miedzi. Brak zmian absorpcji dla kryształów niedomieszkowanych i domieszkowanych domieszką nieaktywną optycznie (jony magnezu) w przypadku napromieniowania jonami ^{12}C o energii 54 MeV z fluencją $2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ wskazuje, że przy niewielkich fluencjach cząstek jony domieszek i zanieczyszczeń aktywnych optycznie łatwo zmieniających swą wartościowość odgrywają kluczową rolę w procesie zmian absorpcji kryształów. Tezę tę potwierdzają wyniki badań napromieniowania jonami węgla kryształów YAlO_3 i $\text{YAlO}_3:\text{Nd}$, które prowadzi do dodatkowej absorpcji o wartości nie przekraczającej $0,4 \text{ cm}^{-1}$, a więc znacznie mniejszej niż w przypadku kryształów $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ [H1]. W wyniku napromieniowania jonami węgla powstają centra barwne absorbujące w zakresie długości fali 220 - 1000 nm. Dodatkowa absorpcja charakteryzuje się słabo widocznymi maksimami, przy czym położenie i intensywność maksimów nieznacznie różni się dla kryształów perowskitu itrowo-glinowego niedomieszkowanego i domieszkowanego. Dodatkową absorpcję kryształu perowskitu itrowo-glinowego powiązано w pracy [H2] z zanieczyszczeniami w postaci jonów żelaza Fe^{2+} (absorpcja dla długości fali około 330 nm), a także centrami F (absorpcja w zakresie 370 - 625 nm) oraz O^- (275 - 370 nm) powstającymi w wyniku zmiany ładunku defektów wzrostowych lub lokalizacji nośnika ładunku w pobliżu defektów struktury krystalicznej. Jony zanieczyszczeń Fe^{3+} (absorbujące w okolicy 220 nm) stanowią centra wychwytu łatwo zmieniające wartościowość na drodze reakcji $\text{Fe}^{3+} + e^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$, co prowadzi do

spadku absorpcji w okolicy krawędzi absorpcji podstawowej i wzrostu absorpcji w okolicy 330 nm tj. w obszarze charakterystycznym dla absorpcji jonów żelaza Fe^{2+} w kryształach $YAlO_3$. Znacznie mniejsze stężenie jonów żelaza (w postaci zanieczyszczeń) w kryształach perowskitu itrowo-glinowego w porównaniu do niobianu litu skutkuje mniejszą wartością dodatkowej absorpcji oraz umożliwia tworzenie elektronowych centrów barwnych (centrów F).

Centra F nie występują w kryształach $LiNbO_3:Fe$ i $LiNbO_3:Cu$ ze względu na silną konkurencję jonów domieszki z defektami wzrostowymi⁷ w wychwycie elektronów, spowodowaną dużym stężeniem domieszki łatwo zmieniającej wartościowość. Proces lokalizacji dziury w pobliżu defektów struktury krystalicznej dla napromieniowania jonami węgla z fluencją progową jest ściśle skorelowany z redukcją jonów Fe^{3+} (występujących w postaci domieszki lub zanieczyszczeń) w procesie napromieniowania [H1,H2], gdyż centra O^- nie występują w kryształach praktycznie wolnych od tych jonów [H1].

W pracach [H2, H3, H4] przedstawiono wyniki badań wpływu napromieniowania prędkimi (o energii rzędu kilku GeV) ciężkimi jonami uranu i bizmutu na absorpcję zarówno niedomieszkowanych jak i domieszkowanych kryształów $LiNbO_3$, $YAlO_3$, $Gd_3Ga_5O_{12}$. W przypadku tych kryształów (z wyłączeniem $LiNbO_3$) brak jest w literaturze informacji o wpływie napromieniowania jonami na ich właściwości optyczne.

Napromieniowanie kryształów perowskitu itrowo-glinowego (niedomieszkowanego i domieszkowanego neodymem) jonami uranu o energii 2225 MeV ($\sim 9,5$ MeV/u) z fluencją $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ prowadzi do powstania defektów silnie absorbujących w zakresie długości fali 200 - 1000 nm [H2]. Dodatkowa absorpcja nie posiada wyraźnej struktury i istotnie różni się od obserwowanej dla jonów węgla, co oznacza, że jej powstawanie jest wynikiem innych procesów niż w przypadku napromieniowania jonami węgla z niskimi fluencjami [H2]. Napromieniowanie ciężkimi prędkimi jonami uranu prowadzi do tworzenia nie tylko pojedynczych radiacyjnych defektów przemieszczenia, ale także kompleksów i agregatów defektów wzdłuż ścieżek jonów. Defekty te mogą wychwytywać nośniki ładunku powstające w materiale w procesie napromieniowania, stając się centrami barwnymi. Maksymalna wartość współczynnika dodatkowej absorpcji wynosi około 16 cm^{-1} dla $YAlO_3$ i 6 cm^{-1} dla $YAlO_3:Nd$. Oznacza to, że domieszka wpływa na efektywność tworzenia w procesie napromieniowania defektów odpowiedzialnych

⁷ Termin „defekty wzrostowe” spotykany w fachowej literaturze polskojęzycznej oznacza strukturalne defekty punktowe (wakanse, atomy międzywęzłowe, etc.) utworzone w kryształach w trakcie jego wytwarzania

za pochłanianie światła, gdyż minimalne stężenie domieszki nie powinno mieć wpływu na przebieg tworzenia defektów struktury krystalicznej a jedynie na efektywność zmiany ładunku tych defektów, które stają się na skutek tego procesu centrami barwnymi. Oznacza to, że obecność domieszki neodymu wpływa na zmniejszenie efektywności wychwytu nośników ładunku przez defekty struktury krystalicznej tworzone w procesie napromieniowania, przy czym domieszka nie zmienia swojej wartościowości.

Napromieniowanie jonami ^{235}U o energii 2640 MeV ($\sim 11,2$ MeV/u) z fluencją z zakresu 10^9 - 10^{11} cm^{-2} kryształu granatu gadolinowo-galowego prowadzi do zmian absorpcji kryształu związanej ze zmianą ładunku defektów wzrostowych i tworzeniem defektów radiacyjnych w strukturze krystalicznej w zależności od wartości fluencji jonów [H3]. Po napromieniowaniu jonami uranu z fluencją $1 \cdot 10^9$ cm^{-2} zaobserwowano bardzo słabą (do $0,05$ cm^{-1}) dodatkową absorpcję w zakresie długości fali 330 - 1000 nm, nie wykazującą wyraźnej struktury, przy czym widoczne są słabo rozwinięte maksima w obszarze 400 - 500 nm i 325 - 360 nm. Powstawanie dodatkowej absorpcji ma miejsce na drodze zmiany ładunku defektów wzrostowych w procesie napromieniowania, w wyniku czego powstają centra F (absorpcja w obszarze 415 - 475 nm) i centra O⁻ (absorpcja w obszarze 335 - 370 nm) a także na skutek zmiany wartościowości jonów zanieczyszczeń⁸. Napromieniowanie wiązką jonów uranu z fluencją nie mniejszą niż $3 \cdot 10^9$ cm^{-2} prowadzi do znacznie intensywniejszej dodatkowej absorpcji, której wartość dla fluencji $1 \cdot 10^{11}$ cm^{-2} dochodzi do $0,6$ cm^{-1} . Widmo dodatkowej absorpcji nie wykazuje wyraźnej struktury, a napromieniowaniu towarzyszy przesunięcie krawędzi absorpcji podstawowej w kierunku długofalowym. Analogiczne przesunięcie krawędzi absorpcji podstawowej miało miejsce dla kryształu YVO_4 napromieniowanego jonami uranu o energii 2225 MeV z fluencją $5 \cdot 10^{11}$ cm^{-2} [104]. Intensywność indukowanej absorpcji kryształu $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ zależy od fluencji jonów. I tak, dla długości fali 392 nm i 339 nm w skali podwójnie logarytmicznej występuje liniowy wzrost indukowanej absorpcji z fluencją cząstek. Pozwala to zaproponować kryształ $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ jako potencjalny dozymetr jonów ciężkich. Zmiany absorpcji dla rozpatrywanych wartości fluencji jonów są wynikiem tworzenia centrów barwnych związanych z defektami struktury krystalicznej powstałymi w procesie napromieniowania. Analogiczny charakter mają zmiany absorpcji kryształów

⁸ W pracy [H3] nie wskazano konkretnych rodzajów zanieczyszczeń obecnych w kryształach, jednakże we wcześniejszej pracy A.Matkovskii, P. Potera, D. Sugak, L. Grigorjeva, D. Millers, V. Pankratov, A.Suchocki, Crystal Research & Technology 39(9), (2004) 788-795 potwierdzono obecność jonów żelaza w kryształach, z którego przygotowano próbki do badań opisanych w pracy [H3]

LiNbO₃ domieszkowanych żelazem lub miedzią powstające pod wpływem napromieniowania jonami ²⁰⁹Bi o energii 2382 MeV (~11,4 MeV/u) z fluencją 5·10¹¹ cm⁻² [H4]. Pokazano, że napromieniowanie prowadzi do wzrostu absorpcji kryształów, przy czym widmo dodatkowej absorpcji nie wykazuje struktury. Wartość dodatkowej absorpcji dochodzi do 5 cm⁻¹ a więc jest znacznie większa od obserwowanej dla kryształu Gd₃Ga₅O₁₂ przy zbliżonej fluencji jonów [H3]. Dodatkowa absorpcja związana jest z różnego typu defektami struktury krystalicznej tworzonymi w procesie napromieniowania (analiza widma EPR przed i po napromieniowaniu kryształu LiNbO₃:Fe wskazuje na powstawanie w procesie napromieniowania licznych centrów paramagnetycznych różnego typu [H4]) a jej około 10-krotnie większa wartość dla LiNbO₃ niż dla Gd₃Ga₅O₁₂ może być zarówno wynikiem różnej odporności materiałów na niszczenie sieci krystalicznej w procesie napromieniowania jak i wpływu domieszki na efektywność procesu wychwytu nośników ładunku przez defekty struktury krystalicznej tworzone w procesie napromieniowania. Należy także zwrócić uwagę na możliwy wpływ rodzaju jonów użytych do napromieniowania na proces defektowania, jednakże powinien być on minimalny ze względu na zbliżone parametry jonów (m.in. energia i masa).

W przypadku kryształu LiNbO₃ domieszkowanego żelazem w widmie dodatkowej absorpcji widoczne jest słabe maksimum w pobliżu 475 nm, co oznacza że wkład w powstawanie dodatkowej absorpcji mają jony żelaza dwuwartościowego. Dodatkowa absorpcja związana ze zmianą ładunku jonów była także obserwowana w przypadku domieszki chromu po napromieniowaniu jonami ²³⁵U o energii 2120 MeV (~9,0 MeV/u) z fluencją 5·10¹¹ cm⁻² dla kryształów Bi₁₂GeO₂₀:Cr [105] a zmiana ładunku potwierdzona badaniami EPR [106].

W pracach [H5-H8] przedstawiono wyniki obliczeń stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia tworzonych przez elektrony i neutrony w wieloskładnikowych kryształach tlenkowych ważnych z punktu widzenia optoelektroniki (Gd₃Ga₅O₁₂, Y₃Al₅O₁₂, YAlO₃, LiNbO₃, Bi₄Ge₃O₁₂ i Bi₄Si₃O₁₂, YVO₄, PbMoO₄, Ca_{0.28}Ba_{0.72}Nb₂O₆) w funkcji energii cząstek. W literaturze opisano wpływ napromieniowania wiązką elektronów oraz neutronów (o energiach do kilkunastu MeV) na absorpcję wieloskładnikowych kryształów tlenkowych m.in. takich jak granaty i perowskity oraz scharakteryzowano tworzone w procesie napromieniowania defekty radiacyjne (np. [1]). Zgodnie z danymi literaturowymi napromieniowanie wiązką elektronów lub neutronów o energii 2 - 8 MeV z fluencją powyżej 10¹⁷-10¹⁸ cm⁻² prowadzi do wzrostu absorpcji wieloskładnikowych kryształów tlenkowych o charakterze innym niż dla kwantów gamma i światła UV, co jest związane z tworzeniem

centrów barwnych w oparciu o radiacyjne defekty przemieszczenia. Brak jest wyników badań dotyczących wpływu energii cząstek na intensywność i strukturę indukowanej absorpcji, które pozwoliłyby na określenie zależności stężenia tworzonych defektów radiacyjnych od energii cząstek, a tym samym pośrednio wskazywały na możliwe mechanizmy tworzenia centrów barwnych przez wysokoenergetyczne neutrony i elektrony oraz umożliwiałyby określenie odporności radiacyjnej materiałów na wysokoenergetyczne elektrony i neutrony.

W pracach [H5 - H8] pokazano, że w przypadku elektronów i neutronów dla wszystkich rozważanych kryształów ma miejsce wzrost stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia z energią cząstek wykazujący wyraźną tendencją do nasycenia dla każdej podsieci kryształu. Stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia w funkcji energii cząstek może być aproksymowane do zależności [H6,H7,H8]:

$$DPA(j) = DPA(j)_{max} \left(1 - \exp \left(- \frac{E}{E_{j,nas}} \right) \right) \quad (2)$$

Energie nasycenia zmieniają się w zakresie 5,3 – 36,2 MeV dla elektronów i 2,5 - 12,5 MeV dla neutronów w zależności od kryształu i jonu podsieci, przy czym największe wartości otrzymujemy dla podsieci tlenowej [H6, H7, H8]

Całkowite stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia na jednostkową fluencję cząstek w obszarze nasycenia jest różne dla różnych kryształów i mieści się w szerokim zakresie wartości $(3,51 - 33,14) \cdot 10^{-22}$ dpa dla elektronów i $(15,77 - 968,03) \cdot 10^{-22}$ dpa dla neutronów [H5 - H8] Badane materiały wykazują znaczne różnice w odporności na tworzenie radiacyjnych defektów przemieszczenia. Zarówno dla elektronów jak i neutronów najefektywniejsze defektowanie w procesie napromieniowania ma miejsce dla kryształów $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ i $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ a najmniej efektywne dla kryształów LiNbO_3 , YAlO_3 . [H5-H8].

Dla kryształów $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ i $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ napromieniowanych elektronami (z jednostkową fluencją) w obszarze nasycenia powstaje około 9 razy więcej radiacyjnych defektów przemieszczenia niż dla kryształów LiNbO_3 i YAlO_3 , zaś dla napromieniowania neutronami około 60 razy więcej.

Pokazano, że dla napromieniowania elektronami (z jednostkową fluencją) o energii odpowiadającej obszarowi nasycenia obliczone całkowite stężenie radiacyjnych defektów

przemieszczenia dla kryształu granatu gadolinowo-galowego wynosi $25,7 \cdot 10^{-22}$ dpa, tj. nie przekracza 400% stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia tworzonych przy jednostkowej fluencji elektronów o energii 4 MeV (wartość obliczeniowa $6,3 \cdot 10^{-22}$ dpa, wartość otrzymana w oparciu o dane eksperymentalne $7,9 \cdot 10^{-22}$ dpa [H7]). Oznacza to, że w procesie oddziaływania składowej elektronowej promieniowania kosmicznego z krystalicznymi materiałami tlenkowymi liczba tworzonych radiacyjnych defektów przemieszczenia na jednostkową fluencję elektronów nie jest drastycznie większa od liczby tych defektów powstających w standardowo prowadzonych eksperymentach w warunkach ziemskich. Wskazuje to na fakt, że proces defektowania w obu przypadkach przebiega analogicznie, a dodatkowa absorpcja jest związana (dla niewielkich fluencji) głównie z pojedynczymi radiacyjnymi defektami przemieszczenia, gdyż prawdopodobieństwo tworzenia kompleksów defektów jest niewielkie. Taki sam wniosek można wysunąć dla składowej neutronowej wtórnego promieniowania kosmicznego.

W obszarze nasycenia stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia tworzonych pod wpływem napromieniowania neutronami jest od kilku do kilkunastu razy większe niż dla elektronów. Największe dysproporcje stężenia dotyczą kryształów $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$ i $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (około 28 razy), PbMoO_4 (około 25 razy) oraz YVO_4 (około 17), zaś znacznie najmniejsze występują dla granatów, niobianu litu i perowskitu itrowo-glinowego (około 4-6 razy). Sugeruje to dużą podatność radiacyjną kryształów $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ i $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$, w porównaniu do pozostałych kryształów, na tworzenie radiacyjnych defektów przemieszczenia pod wpływem napromieniowania wysokoenergetycznymi neutronami.

Wartość energii nasycenia zależy od rodzaju cząstek użytych do napromieniowania, kryształu i typu jego podsięci. Dla danego kryształu i ustalonej podsięci energia nasycenia jest mniejsza dla neutronów niż dla elektronów. Oznacza to, że stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia ulega znacznie szybszemu nasyceniu z energią dla neutronów niż elektronów. Wyjątek stanowi podsić kationowa kryształów $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ i $\text{Bi}_4\text{Si}_3\text{O}_{12}$. Wartość energii nasycenia dla napromieniowania neutronami nie przekracza 13 MeV, zaś elektronami 37 MeV, co oznacza, że w przypadku wtórnego promieniowania kosmicznego defekty radiacyjne (co najmniej w przypadku elektronów) powinny być w zasadzie tworzone z maksymalną wydajnością odpowiadającą obszarowi nasycenia.

Należy zwrócić uwagę na fakt, że dla napromieniowania neutronami energie nasycenia dla kationów są zbliżone do energii nasycenia dla anionów tlenowych,

zaś dla napromieniowania elektronami energie nasycenia dla podsięci kationowej są zazwyczaj kilkukrotnie mniejsze niż dla podsięci tlenowej [H7, H8].

W przypadku napromieniowania neutronami względne stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia tworzonych w podsięci tlenowej w całkowitej liczbie defektów praktycznie nie zależy od energii cząstek a różnice pomiędzy poszczególnymi kryształami nie przekraczają 14% (otrzymane wartości wynoszą około 83% -85% dla $YAlO_3$, $Y_3Al_5O_{12}$ oraz 67%-69% dla $PbMoO_4$, $Bi_4Si_3O_{12}$, $Bi_4Ge_3O_{12}$, $LiNbO_3$) [H7]. Dla napromieniowania elektronami obliczenia wskazują na silną zależność względnego stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia podsięci tlenowej od energii elektronów (wartości zmieniają się w zakresie 26% -56% dla $Bi_4Si_3O_{12}$, 23%-55% dla $Bi_4Ge_3O_{12}$, 45%-60% dla $LiNbO_3$, 61%-83% dla $YAlO_3$, 64%-80% dla $Y_3Al_5O_{12}$, 46%-90% dla $Gd_3Ga_5O_{12}$) [H7].

Minimum względnego stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia podsięci tlenowej przypada dla energii elektronów z zakresu 4 - 8 MeV odpowiadającego energii elektronów standardowo stosowanych w eksperymentach opisanych w literaturze, w których wyznaczono dodatkową absorpcję. Centra barwne związane z defektami podsięci tlenowej (głównie centra typu F) absorbują w kryształach tlenkowych w zakresie długości fali powyżej 400 nm. Oznacza to, że długofalowe skrzydło dodatkowej absorpcji tworzonej przez elektronową składową promieniowania kosmicznego jest silniej rozwinięte w stosunku do obserwowanego w warunkach eksperymentu laboratoryjnego. Największy wzrost względnego stężenia defektów podsięci tlenowej z energią elektronów ma miejsce dla kryształów $PbMoO_4$, $Bi_4Si_3O_{12}$ i $Bi_4Ge_3O_{12}$ oraz nieco mniejszy dla YVO_4 i $Gd_3Ga_5O_{12}$ [H5,H6, H7] W związku z tym materiały te mają nieco mniejszą odporność radiacyjną na tworzenie dodatkowej absorpcji w obszarze długofalowym przez wtórne promieniowanie kosmiczne niż oczekiwana w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych. Jest to istotne m.in. ze względu na potencjalne zastosowania tych materiałów jako elementów czynnych laserów na ciele stałym pompowanych diodowo stanowiących wyposażenie samolotów i statków kosmicznych - obecność centrów barwnych absorbujących w obszarze długofalowym widma znacznie pogarsza sprawność lasera na skutek zmniejszenia efektywności wzbudzeń jonów aktywatora (nieefektywna absorpcja światła przez centra barwne). Najbardziej perspektywiczne są kryształy YVO_4 i $Gd_3Ga_5O_{12}$ -dla których wzrost względnego stężenia defektów podsięci tlenowej jest relatywnie mniejszy.

W pracy [H8] pokazano po raz pierwszy, na przykładzie kryształu CBN, że funkcja kaskadowa może być aproksymowana w funkcji energii padającej cząstki (elektronu, neutronu) do zależności:

$$v_{ij}(E) = v_{ij,1} + \frac{v_{ij,0} - v_{ij,1}}{1 + \left(\frac{E}{E_{ij}}\right)^p} \quad (3)$$

gdzie p , $v_{ij,0}$, $v_{ij,1}$, E_{ij} – stałe, E – energia padającej cząstki

Wartości parametrów $v_{ij,0}$, $v_{ij,1}$ silnie zależą od podsieci kryształu (zarówno pierwszego wybitego jonu i wtórnie wybitych jonów). Energia E_{ij} zależy praktycznie jedynie od rodzaju (podsieci) pierwszego wybitego jonu. Parametr p dla elektronów praktycznie nie zależy od pierwszego wybitego jonu i podsieci w jakiej rozwija się kaskada ($p = 2.80 - 2.96$), natomiast dla neutronów słabo zależy od podsieci pierwszego wybitego jonu ($p = 1.05 - 1.59$)

Podsumowanie

W oparciu o przeprowadzone badania można sformułować następujące wnioski ogólne:

1. Napromieniowanie krystalicznych materiałów tlenkowych wiązką prędkich jonów z fluencją nie przekraczającą $2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ może prowadzić do dodatkowej absorpcji o strukturze widma zależnej od kryształu, której charakter wskazuje na jej związek z jonami zanieczyszczeń i domieszek oraz defektami wzrostowymi. Odporność radiacyjna tych materiałów, rozumiana jako podatność na tworzenie dodatkowej absorpcji pod wpływem promieniowania korpuskularnego, silnie zależy od obecności w materiale jonów domieszek i zanieczyszczeń mogących łatwo zmieniać swoją wartościowość (jony metali przejściowych). Wartość dodatkowej absorpcji zmienia się w zakresie od około $2,5 \text{ cm}^{-1}$ dla kryształu $\text{LiNbO}_3:\text{Fe}$ zawierającego 0,2% domieszki żelaza do $0,05 \text{ cm}^{-1}$ dla $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ zawierającego śladowe ilości jonów zanieczyszczeń (lub dodatkowa absorpcja nie powstaje jak dla LiNbO_3 i $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$)⁹.
2. W przypadku fluencji jonów nie przekraczającej $2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ dodatkowa absorpcja jest wynikiem zmiany stanu ładunkowego jonów domieszek lub zanieczyszczeń łatwo zmieniających wartościowość na drodze reakcji wychwytu elektronu przez te jony

⁹ Dodatkowa absorpcja była obserwowana w badanych materiałach, dla których metodą spektroskopii optycznej potwierdzono obecność jonów zanieczyszczeń łatwo zmieniających wartościowość

$(Me^{(n+1)+} + e^- \rightarrow Me^{n+})$, której może towarzyszyć lokalizacja dziur tworzonych w procesie napromieniowania w pobliżu anionów tlenowych, przy ich jednoczesnej stabilizacji defektami struktury krystalicznej, prowadząca do tworzenia centrów O^{\cdot} . W przypadku niewielkiego stężenia jonów domieszki lub zanieczyszczeń łatwo zmieniających wartościowość możliwe jest także tworzenie centrów typu F na drodze wychwytu elektronów przez defekty wzrostowe. Dla podwyższonego stężenia domieszki w materiale centra tego typu nie powstają, ze względu na silną konkurencję domieszki z defektami wzrostowymi w procesie wychwytu elektronów. Istotne jest, że przy granicznych dawkach promieniowania dodatkowa absorpcja powstaje w przypadku obecności w materiale jonów łatwo zmieniających swoją wartościowość. Oznacza to, że obecność tych jonów pogarsza odporność radiacyjną krystalicznych materiałów tlenkowych na tworzenie dodatkowej absorpcji pod wpływem napromieniowania prędkimi jonami przy niewielkich fluencjach jonów.

3. Napromieniowanie krystalicznych materiałów tlenowych prędkimi ciężkimi jonami z fluencją co najmniej $3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ prowadzi do dodatkowej absorpcji pozbawionej wyraźnej struktury, przy czym wartość dodatkowej absorpcji zależy od materiału - kryształ granatu gadolinowo-galowego wykazuje znacznie większą odporność radiacyjną (przy tej samej fluencji jonów) na tworzenie dodatkowej absorpcji niż pozostałe kryształy. Efektowi wzrostu absorpcji może towarzyszyć przesunięcie krawędzi absorpcji podstawowej w kierunku obszaru długofalowego.
4. Dodatkowa absorpcja powstająca w wyniku napromieniowania krystalicznych materiałów tlenkowych prędkimi ciężkimi jonami z fluencją nie mniejszą niż $3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ związana jest z defektami struktury krystalicznej tworzonymi w procesie napromieniowania (m.in. izolowane defekty punktowe, defekty kompleksowe), przy czym w procesie powstawania zmian absorpcji pewną rolę mogą odgrywać jony domieszki. Obecność jonów domieszki o stabilnej wartościowości może prowadzić do zmiany intensywności dodatkowej absorpcji w porównaniu do materiału niedomieszkowanego, na skutek zmiany efektywności wychwytu nośników ładunku przez defekty struktury krystalicznej tworzone w procesie napromieniowania. W przypadku domieszki łatwo zmieniającej swoją wartościowość może ona aktywnie uczestniczyć w tworzeniu dodatkowej absorpcji dając wkład w absorpcję napromieniowanego materiału.
5. Stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia tworzonych pod wpływem wiązki elektronów lub neutronów zależy istotnie od energii cząstek, przy czym dla energii

elektronów powyżej 37 MeV a neutronów 13 MeV stężenie to przy stałej fluencji pozostaje praktycznie stałe, co oznacza że znaczny odsetek cząstek wtórnego promieniowania kosmicznego tworzy radiacyjne defekty przemieszczenia w analizowanych materiałach z maksymalną możliwą wydajnością.

6. Stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia dla tych samych wartości fluencji neutronów i elektronów jest tylko kilkukrotnie wyższe w obszarze nasycenia zależności stężenia tych defektów od energii cząstek niż dla energii rzędu kilku MeV (standardowo stosowanych w eksperymentach). Oznacza to, że w przypadku promieniowania kosmicznego powstają analogiczne struktury defektowe jak obserwowane w warunkach laboratoryjnych tj. centra barwne oparte o izolowane radiacyjne defekty przemieszczenia.
7. Badane materiały wykazują znaczne różnice w odporności radiacyjnej na tworzenie radiacyjnych defektów przemieszczenia pod wpływem neutronów lub elektronów - największą odporność mają kryształy ze strukturą perowskitu, mniejszą granaty a najmniejszą (około 10 razy) złożone tlenki bizmutowe.
8. Zależność stężenia radiacyjnych defektów przemieszczenia od energii cząstek (neutronów, elektronów) jest zmodyfikowaną funkcją eksponentyjalną, zaś funkcja kaskadowa może być przybliżona do znanej funkcji matematycznej o zmiennej niezależnej będącej energią padającej cząstki.

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski aplikacyjne:

1. Kryształy granatu gadolinowo-galowego w porównaniu do innych badanych krystalicznych materiałów tlenkowych wykazują stosunkowo dużą odporność na napromieniowanie prędkimi jonami (w rozumieniu odporności na tworzenie dodatkowej absorpcji), co czyni je perspektywnym materiałem dla wykorzystania w technologii kosmicznej. Ze względu na analogiczne właściwości strukturalne wniosek ten może być rozciągnięty na inne kryształy ze strukturą granatu.
2. Eliminacja lub znaczne ograniczenie zanieczyszczeń krystalicznych materiałów tlenkowych w postaci niekontrolowanych jonów łatwo zmieniających wartościowość (głównie żelaza) może przyczynić się do znacznego polepszenia odporności radiacyjnej tych materiałów (mierzonej zmianami ich absorpcji) na wysokoenergetyczne promieniowanie korpuskularne. Jest to istotne z punktu widzenia zastosowań w technologii kosmicznej (podwyższenie odporności na promieniowanie kosmiczne) jak

również w technologii światłowodów planarnych (zmniejszenie strat optycznych w stanie przed obróbką termiczną, co daje możliwość skrócenia obróbki termicznej a w skrajnych przypadkach możliwość rezygnacji z tej obróbki i łączy się z obniżeniem kosztów wytwarzania). Odpowiednie domieszkowanie tlenkowych matryc krystalicznych jonami aktywatora o stabilnej wartościowości może prowadzić do wzrostu odporności radiacyjnej materiałów na to promieniowanie dla podwyższonych dawek, dla których powstają defekty struktury krystalicznej (długoczasowe loty kosmiczne).

3. Zastosowanie prędkich ciężkich jonów o energii rzędu kilku GeV do wytwarzania światłowodów planarnych metodą implantacji jonów pozwoli, w porównaniu do prędkich jonów o energii rzędu kilkudziesięciu MeV, zmniejszyć fluencję jonów wymaganą do utworzenia "bariery optycznej" co najmniej o 1 rząd wielkości (dla jonów o energii rzędu 2 GeV tworzenie defektów struktury krystalicznej odpowiedzialnych za formowanie „bariery optycznej” rozpoczyna się już od fluencji $3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-2}$ i jest wysoce efektywne dla fluencji $5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$), co może przyczynić się do zmniejszenia strat optycznych tych światłowodów.
4. Trwałe przesunięcie krawędzi absorpcji podstawowej na skutek ekspozycji materiału na wiązkę prędkich jonów obserwowane dla niektórych materiałów może być potencjalnie wykorzystane do detekcji tych jonów.
5. Kryształy ze strukturą perowskitu wykazują znacznie większą odporność radiacyjną na tworzenie radiacyjnych defektów przemieszczenia pod wpływem wysokoenergetycznych neutronów i elektronów niż pozostałe kryształy, co czyni je perspektywnymi m.in. do zastosowań w technologii lotniczej i kosmicznej.
6. Szeroki zakres energii elektronów (40 - 500 MeV) i neutronów (15 - 500 MeV), dla którego stężenie radiacyjnych defektów przemieszczenia w praktyce nie zależy od energii cząstek, pozwala wysunąć hipotezę, iż badane krystaliczne materiały tlenkowe (zwłaszcza złożone tlenki bizmutowe ze względu na dużą podatność na tworzenie defektów struktury krystalicznej) mogą być rozważane jako potencjalne dozymetry wysokoenergetycznych elektronów lub neutronów (pomiar fluencji cząstek) działające w oparciu analizę stężenia tworzonych radiacyjnych defektów przemieszczenia.

Literatura

- [1] A. O. Matkovskij, D. Yu. Sugak, S. B. Ubizskij, O. I. Špotjuk, E. A. Černyj, I.M.Vakiv, V A Morkichij "Vozdejstvie ionizirajuščich izlučenij na materialy elektronnoj techniki", „Svit” Lwow, 1994.

- [2] V. G. Gafurov, V. I. Kučerov "Uprugie i pezoelektričeskie svojstva oblučennogo niobata litija", *Fizika Tverdego Tela*, 28(7), (1986), 2264-2266
- [3] N. Ishikawa, A. Iwase, Y. Chimi, O. Michikami, H. Wakana, T. Kambara "Defect production induced by primary ionization in ion-irradiated oxide superconductors", *J. Phys. Soc. of Japan*, 69(11), (2000), 3563-3575
- [4] F. Brioschi, A. Caridi, E. Cereda, G.M. Marazzan, E. Zanzottera "Radiation effects on laser crystals for space applications", *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. B - Beam Interactions with Materials & Atoms B*, 66(3), (1992), 357-360
- [5] T. S. Rose, M. S. Hopkins, R. A. Fields "Characterization and control gamma and proton radiation effects on the performance of Nd:YAG and Nd:YLF lasers", *IEEE J. Quantum Elect.*, 31, 9, (1995) 1593-1602
- [6] M. Kh. Ashurov, S. P. Naselski, I. R. Rustamov, V. A. Smirnov, A. F. Umyskov, I. A. Shcherbakov "Influence of the spectral composition of the pump radiation on the lasing and the spectral-luminescence characteristics of a YAlO₃:Nd", *Sov. J. Quantum Elect.*, 20(11), (1990), 1353-1356, (*Kvant. Elektronika*, 17, 11, (1990), 1445-1448)
- [7] D. Sugak, A. Matkovskii, A. Durygin, A. Suchocki, I. Solski, S. Ubizskii, K. Kopczyński, Z. Mierczyk, P. Potera "Influence of color centers on optical and lasing properties of the gadolinium gallium garnet single crystal doped with Nd³⁺ ions", *J. Luminescence*, 82, (1999), 9-15
- [8] H. Abe, S. Yamamoto, H. Naramoto "Amorphization in aluminium oxide induced by ion irradiation", *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. B*, 127-128, (1997), 170-175
- [9] R. J. M. Konings, K. Bakker, J. G. Boshoven, R. Conrad, H. Hein "The influence of neutron irradiation on the microstructure of Al₂O₃, MgAl₂O₄, Y₃Al₅O₁₂ and CeO₂", *J. Nucl. Materials*, 254, (1998), 135-142
- [10] K. Yasuda, Ch. Kinoshita, M. Ohmura, H. Abe "Production and stability of dislocation loops in an MgO-Al₂O₃ system under concurrent irradiation with ions and electrons", *Nucl. Instr. & Meth. Phys. Res. B*, 166-167, (2000), 107-104
- [11] A. Matkovskii, S. Ubizskii, D. Sugak, P. Potera, Ya. Zhydachevskii „Radiation Effects in YAlO₃-Nd and Gd₃Ga₅O₁₂-Nd laser crystals” *IEEE Proceedings of the International Conference, TCSET (2002)*, 205-206.
- [12] A. O. Matkowski, D. Yu. Sugak, A. N. Durygin, S. Kaczmarek, K. Kopczyński, Z. Mierczyk, Z. Frukacz, T. Łukasiewicz, A. P. Shakhov „Effect of ionizing radiation on optical and lasing properties of Y₃Al₅O₁₂ single crystals doped with Nd, Er, Ho, Tm, Cr, ions” *Optical Materials* 6, (1996) 353-358.
- [13] S. M. Kaczmarek, J. Wojtkowska, Z. Moroz, J. Kisielewski "Influence of protons on oxide compounds applied in optoelectronic devices" *Biuletyn WAT XLVI (2)*, 2000, 99-113
- [14] W. M. Yao *Particle data group*, *Jour. Phys.* G33 (2006), 1.
- [15] D. Hassler i inni (22 współautorów), "2014 Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity rover", *Science* 343(6169) (2014), 1244797.
- [16] S. Bourdarie, M. Xapsos "The Near-Earth Space Radiation Environment" *IEEE Transactions on Nuclear Science* 55(4), (2008), 1810 - 1832
- [17] N. A. Schwadron i inni (20 współautorów) "Update on the Worsening Particle Radiation Environment Observed by CReTER and Implications for Future Human Deep-Space Exploration", *Space Weather* 16(3), (2018), 289-303
- [18] K. G. McCracken, G. A. M. Dreschhoff, E. J. Zeller 1, D. F. Smart, M. A. Shea "Solar cosmic ray events for the period 1561-1994", *Journal of Geophysical Research*, 106(A10), 21585-21598
- [19] B. T. Tsurutani, O. P. Verkhoglyadova, A. J. Mannucci, G. S. Lakhina, G. Li, G. P. Zank "A brief review of 'solar flare effects' on the ionosphere", *Radio Science* 44(1), (2009), RS0A17(1-14)
- [20] M. H. Israel "Cosmic-Ray Electrons between 12 Mev and 1 GeV in 1957", *Journal of Geophysical Research* 74(19), (1969), 4701-4713
- [21] M. Kowatari, K. Nagaoka, S. Satoh, Y. Ohta, J. Abukawa, S. Tachimori, T. Nakamura, "Evaluation of the Altitude Variation of the Cosmic-ray Induced Environmental Neutrons in the Mt. Fuji Area, *Journal of Nuclear Science And Technology*", 42(6), (2005), 495-502
- [22] F. Chen, X.-L. Wang, and K.-M. Wang "Development of ion-implanted optical waveguides in optical materials: A review", *Opt. Mater.* 29(11), (2007), 1523-1542.
- [23] F. Chen, "Photonic guiding structures in lithium niobate crystals produced by energetic ion beams" *J. Appl. Phys.* 106(8), (2009), 081101
- [24] P. D. Townsend "Helium ion implanted waveguide lasers" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 62, (1992), 405-409

- [25] C.X. Liu, J.H. Zhao, X.L. Wang "Property Studies of Optical Waveguide Formed by keV He-Ion Implanted into a Nd:CNGG Crystal", Journal of the Korean Physical Society. 55(6), (2009), 2638-2641
- [26] J.Olivares, G.García, A.García-Navarro, F.Agulló-López, O. Caballero, A. García-Cabañes "Generation of high-confinement step-like optical waveguides in LiNbO₃ by swift heavy ion-beam irradiation", Appl. Phys. Lett. 86(18), (2005), 183501
- [27] O.Caballero, A.García-Cabañes, J. Carnicero, M. Carrascosa, , F. Agulló-López, J. Olivares, A.García-Navarro, G. García "Non-linear and photorefractive characterisation of highly confined LiNbO₃ waveguides prepared by high-energy, low-fluence ion irradiation" In: Zhang, G. (Ed.) Proceedings of Photorefractive Effects, Materials, and Devices (2005), 179, Optical Society of America.
- [28] M. Jubera, A. Garcia-Cabanés, M. Carrascosa, J. Olivares "Nonlinear optical waveguides fabricated in Mg-doped LiNbO₃ by swift heavy ion irradiation: anomalous photorefractive damage behavior", Appl. Phys. B 116 , (2014), 507–514
- [29] A. García-Navarro, J. Olivares, G. García, F. Agulló-López, S. García-Blanco, C. Merchant, J.S. Aitchison "Fabrication of optical waveguides in KGW by swift heavy ion beam irradiation", Nucl. Instrum. Meth. B 249(1-2), (2006), 177-180
- [30] J. Manzano-Santamaría, J. Olivares, A. Rivera, F. Agulló-López "Electronic damage in quartz (c-SiO₂) by MeV ion irradiations: Potentiality for optical waveguiding applications" Nucl. Instrum. Meth. B 272, (2012), 271-274
- [31] S.Sugliani, M. Bianconi, G.G.Bentini, M.Chiarini, P.De Nicola, G. B. Montanari, A. Menin, A.Malacarne, L.Poti, "Refractive index tailoring in congruent Lithium Niobate by ion implantation", Nucl. Instrum. Meth. B 268(19), (2010), 2911-2914
- [32] S. M. Sher, P.Pintus, F. Di Pasquale, M. Bianconi, G. B. Montanari, , P. De Nicola, S.Sugliani, G. Prati "Design of 980 nm-pumped waveguide laser for continuous wave operation in ion implanted Er:LiNbO₃". IEEE J. Quant. Elect. 47(4), (2011), 526-533
- [33] F. Chen, Y. Tan, L. Wang, X.L.Wang, K.M. Wang, Q.M. Lu "Diverse mechanism of refractive index modification in neodymium-doped KGd(WO₄)₂crystal induced by MeV He⁺ or C³⁺ ion implantation for waveguide construction" J. Appl. Phys. 103(8), (2008), 083123
- [34] R. N. Frentrup, V.Tormo-Márquez, J. Olivares, S.M. García-Blanco "High-contrast slab waveguide fabrication in KY(WO₄)₂ by swift heavy ion irradiation", In Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXII (Vol. 10535). (2018), 1053500 (Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XXII). SPIE
- [35] L.L.Wang, K.M. Wang, Q.M. Lu, H.J. Ma "Enhanced refractive index well-confined planar and channel waveguides in KTiOPO₄ produced by MeV C³⁺ ion implantation with low dose" Appl. Phys. B 94(2), (2008), 295-299
- [36] H. Ilan, A. Gumennik, R. Fathei, A. J. Agranat, I. Shachar, M. Hass "Submerged waveguide constructed by the implantation of ¹²C ions in electro-optic crystals" Appl. Phys. Lett. 89(24), (2006), 241130
- [37] L.L. Wang, L. Wang, K.M. Wang, Q.M. Lu, H.J. Ma "Annealing effect on mono-mode refractive index enhanced RbTiOPO₄ waveguides formed by ion implantation" Opt. Express 17(7), (2009), 5069-5074
- [38] F. Gang, Q. X. Feng "Optical waveguide formed in LiTaO₃ crystal by MeV C³⁺ ion implantation" J. Korean Phys. Soc. 56(4), (2010), 1364-1368
- [39] G. Liu, R. He, S. Akhmadaliev, J.R. Vázquez de Aldana, S. Zhou, F. Chen "Optical waveguides in LiTaO₃ crystals fabricated by swift C⁵⁺ ion irradiation" , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 325 (2014) 43–46
- [40] J.H. Zhao, T. Liu, S.S. Guo, J. Guan, X.L. Wang "Optical properties of planar waveguides on ZnWO₄ formed by carbon and helium ion implantation and effects of annealing", Opt. Express 18(18), (2010), 18989-18996
- [41] Y. Yao, W. Wang, D. Zhang, X. Gao, "Planar and ridge ZnO optical waveguides produced by 15 MeV C⁵⁺ ion irradiation", Optical Materials Express, 5(7) , (2015), 1498-1504
- [42] T. Liu, S.S. Guo, J.H. Zhao, J. Guan, X.L. "Wang Planar optical waveguides in Nd:BSO crystals fabricated by He and C ion implantation" Opt. Mater. 33(3), (2011), 385-388
- [43] Y. Yao, Y. Jia, F. Chen, S. Akhmadaliev, S. Zhou "Channel waveguide lasers at 1064 nm in Nd:YAGcrystal produced by C⁵⁺ ion irradiation with shadow masking", Applied Optics 53(2), (2014) 195-199

- [44] E. Flores-Romero, G. V. Vázquez, H. Márquez, R. Rangel-Rojo, J. Rickards, R. Trejo-Luna "Optical channel waveguides by proton and carbon implantation in Nd:YAG crystals", *Optics Express* 15(14), (2007), 8513-20
- [45] G. V. Vázquez, J. Rickards, G. Lifante, M. Domenech, E. Cantelar "Low dose carbon implanted waveguides in Nd:YAG", *Optics Express*, 11, (2003), 1291 - 1296
- [46] L.L. Wang, Y.G. Yu "Characterization of laser waveguides in Nd:CNGG crystals formed by low fluence carbon ion implantation" *Appl. Surf. Sci.* 256(8), (2010), 2616-2619
- [47] Y.Y. Ren, F. Chen, Q.M. Lu, H.J. Ma "Optical waveguides in Nd:GGG crystals produced by H^+ or C^{3+} ion implantation" *Appl. Opt.* 49(11), (2010), 2085-2089
- [48] Y. Ren, Y. Jia, F. Chen, Q. Lu, S. Akhmadaliev, S. Zhou "Second harmonic generation of swift carbon ion irradiated Nd:GdCOB waveguides" *Opt. Express* 19(13), (2011), 12490-12495
- [49] J. Yang, C. Zhang, F. Chen, Sh. Akhmadaliev, S. Zhou "Planar optical waveguides in $Bi_4Ge_3O_{12}$ crystal fabricated by swift heavy-ion irradiation" *Applied Optics* 50(36), (2011), 6678-6681
- [50] J. Guan, L. Wang, X. Qin, "Fabrication of planar waveguide in KNSBN crystal by swift heavy ion beam irradiation", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 315, (2013), 318-320
- [51] T.J.Wang, M. Qiao, J. Zhang, Y. Liu, P. Liu, X.L.Wang "Ce: Lu_2SiO_5 optical waveguide by carbon ion irradiation with properties of enhanced photoluminescence", *Surface and Coatings Technology* 342, (2018), 117-120
- [52] X. L. Wang, F. Chen, L. Wang, Y. Jiao "Channel waveguides of $LiNbO_3$ crystals fabricated by low-dose oxygen ion implantation" *J. Appl. Phys.* 100(5), (2006), 056106
- [53] F. Lu, F. Chen, R. Zhang, H. Liu, L. Wang, G. Fu, H. Wang, "Reconstruction of extraordinary refractive index profile of O^{2+} ion-implanted $LiNbO_3$ single-mode channel waveguide based on beam propagation method and image processing", *Opt. Commun.* 274(1), (2007), 80-84
- [54] Q. Song, F. Lu, X. Ma, , H. Liu, X. Liu, R. Zhang, X. Wang, " $MgO:LiNbO_3$ planar waveguide formed by MeV O^{2+} implantation and its annealing characteristics", *Laser Phys.* 18, (2008), 815-818
- [55] Y. Tan, F. Chen, D. Kip, "Photorefractive properties of optical waveguides in $Fe:LiNbO_3$ crystals produced by O^{3+} ion implantation", *Appl. Phys. B* 94(3), (2008), 467- 471
- [56] L. Wang, Q.M. Lu, "Formation and characterization of a near-stoichiometric $LiNbO_3$ waveguide by MeV oxygen implantation" *Appl. Opt.* 48(14), (2009), 2619-2624
- [57] J.H. Zhao, Q. Huang, L. Wang, G. Fu, X.F. Qin, P. Liu, S.S. Guo, T. Liu, X.L. Wang, "The properties of ion-implanted $LiNbO_3$ waveguides measured by the RBS and ion beam etching stripping methods" *Opt. Mater.* 33(8), (2011), 1357-1361
- [58] J.H. Zhao, X.L. Wang, G. Fu, X.H. Liu, Q. Huang P. Liu "The fabrication of planar waveguides on $Bi_{12}TiO_{20}$ crystals by oxygen and helium ion implantation" *Nucl. Instrum. Meth. B.* 268(22), (2010), 3434-3437
- [59] X. Ming, F. Lu, J. Yin, M. Chen, S. Zhang, X. Liu, Z. Qin, Y. Ma "Optical confinement achieved in ZnO crystal by O^+ ions implantation: Analysis of waveguide formation and properties" *Opt. Express* 19(8), (2011), 7139-7146
- [60] C.L. Jia, Y. Jiang, L. Wang, X.L. Wang, K.M. Wang, H.J. Zhang "Characterization of optical waveguides in $YbVO_4$ crystals formed by 3.0 MeV oxygen ion implantation" *Appl. Opt.* 47(8), (2008), 1117-1121
- [61] Y. Jiao, F. Chen, X.L. Wang, K.M. Wang, L. Wang, L.L. Wang, H.J. Zhang, Q.M. Lu, H.J. Ma, R. Nie "Fabrication of waveguides in Yb:YCOB crystal by MeV oxygen ion implantation" *Appl. Surf. Sci.* 253(18), (2007), 7360-7364
- [62] L.Wang, F. Chen, X.L. Wang, L.L.Wang, K.M.Wang, L.Gao, H.J. Ma, R.Nie " Si^{2+} ion implanted into stoichiometric lithium niobate crystals: Waveguide characterization and lattice disorder analysis" *Nucl. Instrum. Meth. B* 251(1), (2006), 104-108
- [63] F. Chen, X.L. Wang, K.M. Wang, Q.M. Lu, D.Y. Shen "Optical waveguides formed in Nd:YVO₄ by MeV Si^+ implantation", *Appl. Phys. Lett.* 80, 3473 (2002)
- [64] L.Zhang, P.Liu, T.Liu, Y.Zhou, J.Sun, Z.Wang, X.Wang "Optical properties of planar waveguide in Nd:YVO₄ crystal formed by swift Kr⁸⁺ ion irradiation" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 307(15), (2013), 459-462
- [65] J. Olivares, M. L. Crespillo, O. Caballero-Calero, M. D. Ynsa, A. García-Cabañes, M. Toulemonde, C. Trautmann, F. Agulló-López, "Thick optical waveguides in lithium niobate

- induced by swift heavy ions (~10 MeV/amu) at ultralow fluences*", Opt. Express 17(26), (2009), 24175-24182
- [66] T. Liu, Q.Huang, J.H.Zhao, W.J. Kong, P. Liu, L. Zhang, Y.F. Zhou, X.F. Yu, L. Wang, X.L.Wang "Two waveguide layers in lithium niobate crystal formed by swift heavy Kr ion irradiation", Chin. Phys. B Vol. 24, No. 5 (2015) 056102
- [67] S.I. Bhat, , P. M. Rao, A. P. Bhat, D. K. Avasthi "Irradiation effects on the optical properties of a new NLO mixed borate crystal" Surf. Coat. Technol. 158-159, (2002), 725-728
- [68] Y. Ren, N. Dong, F. Chen, D. Jaque "Swift nitrogen ion irradiated waveguide lasers in Nd:YAG crystal", Opt. Express 19(6), (2011), 5522-5527
- [69] Y. Ren, N. Dong, F. Chen, A. Benayas, D. Jaque, F. Qiu, T. Narusawa "Swift heavy-ion irradiated active waveguides in Nd:YAG crystals: Fabrication and laser generation" Opt. Lett. 35(19), (2010), 3276-3278
- [70] Y. Ren, N Dong, Y. Jia, L. Pang, Z. Wang, Q. Lu, F. Chen "Efficient laser emissions at 1.06 μm of swift heavy ion irradiated Nd:YCOB waveguides" Optics Letters, 36(23), (2011), 4521-4523
- [71] N. Dong, F. Chen, D. Jaque, A. Benayas, F. Qiu, T. Narusawa "Characterization of active waveguides fabricated by ultralow-fluence swift heavy ion irradiation in lithium niobate crystals", J. Phys. D: Appl. Phys. 44(10), (2011), 105103
- [72] L.Zhang, J.Zhao, P.Liu, T.Liu, Y.Zhou, X.Yu, X.Wang "Low Propagation Loss of Single-Mode Planar Waveguides on MgF₂ Crystals" Journal of Lightwave Technology, 33(11), (2015), 2228-2232
- [73] F.Chen, X.Wang, K.Wang "Development of ion-implanted optical waveguides in optical materials: A review" Optical Materials 29, (2007), 1523-1542
- [74] G.V.Vázquez, H.Márquez, E.Flores-Romero, M.E.Sánchez-Morales "Optical waveguides fabricated by ion implantation in laser crystals" Recent Research in Photonics (2009), Editors: Rafael Espinosa-Luna, Eusebio Bernabeu and Vicente Aboites, 153-181
- [75] I.W. Kim, B.Ch. Park, B.M. Jin, J.H. Jeong, K.S. Lee "Ion irradiation influence on optical absorption spectra of MgO:LiNbO₃ and MgO + Fe₂O₃:LiNbO₃ single crystals" Ferroelectrics 269 (2002), 243–248.
- [76] D.Y. Shang, H. Matsuno, Y. Saito, S. Suganomata "Optical characteristics of LiNbO₃ implanted with Au ions", J. Appl. Phys. 80 (1), (1996), 406-408
- [77] Y. Saito, D.Y. Shang, R. Kitsutaka, A. Kitahara "Optical properties of Cu-implanted LiNbO₃", Journal of Applied Physics 81, 3621 (1997);
- [78] S. Deying, Y. Saito S. Suganomata "Optical Properties of LiNbO₃ Implanted with Ag⁺ Ions", Japanese Journal of Applied Physics, 33(7A), (1994), L966
- [79] X. Xiang, X. T. Zu, J. W. Bao, S. Zhu . L. M. Wang "Optical properties and structure characterization of sapphire after Ni ion implantation and annealing", Journal of Applied Physics 98, (2005), 073524
- [80] I.V. Afanasyev-Charkin, V.T. Gritsyna, D.W. Cooke, B.L. Bennett, C.R. Evans, M.G. Hollander, K.E. Sickafus "Optical absorption and thermoluminescence of MgAl₂O₄ spinel crystals implanted with Xe ions", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 148 (1999) 787-792
- [81] L.L.Pang,Z.G.Wang J.R.Sun C.F.Yao, X.Gao, K.F.Wei, M.H.Cui, , T.L.Shen, Y.B.Sheng, H.L.Chang, H.P.Zhang "Evolution of optical absorption and strain in LiTaO₃ crystal implanted by energetic He-ion", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms 354, (2015), 301-304
- [82] A.A.Kaminski „*Laser crystals. Their Physics and Properties*" Springer; 2nd ed. edition (March 23, 1990), ISBN-13: 978-3540520269
- [83] A.A. Kaminski „*Today and Tommorrow of laser crystals physics*" Phys. Stat. Sol. 148 (1), (1995), 9-79
- [84] J. Toney "Lithium Niobate Photonics", Artech House. (2015). ISBN 978-1-60807-923-0.
- [85] G. Blasse "Scintillator materials", Chem. Mater. 6 (1994), 1465-1475
- [86] S. P. Lecoq "The high energy physics demand for a new generation of scintillators" J. Lumin. 60-61 (1994), 948 -955.
- [87] M. Z. Akhmetshin, R. S. Wang, H. C. Guo, Huang, R. S. Lu, K. L. Tsai, K. Ueno, C. H. Wang, F. I. Chou, Y. Y. Wei, W. S. Hou "Survey of the properties of BGO crystals for the Extreme Forward Calorimeter at BELLE", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 455, (2000), 324-328
- [88] H.Shimizu, F.Miyahara, H.Hariu, T.Hayakawa, T.Ishikawa, M.Itaya, T.Iwata, T.Kinoshita M.Moriya, T.Nakabayashi, T.Sasaki, Y.Tajima, S.Takita, M.Yamamoto, H.Yamazaki, H.Y.Yoshida, Y.Yoshida "First beam test on a BSO electromagnetic calorimeter", Nuclear Instruments and Methods in Physics

- Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 550(1–2), (2005), 258-266
- [89] Haifeng Lin, Zhanglang Lin, Yujin Chen, Yidong Huang, Ge Zhang, and Weidong Chen, SESAM mode-locked femtosecond Yb:Bi₄Si₃O₁₂ laser, Laser Congress 2018 (ASSL) OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2018), paper ATh2A.24
- [90] G. A. Kumar, R. E. Riman, Alexander A. Kaminskii, R. Praveena, C. K. Jayasankar, I. K. Bae, S. C. Chae, and Y. N. Jang "Optical properties of single crystal Nd³⁺-doped Bi₄Ge₃O₁₂: Laser transitions at room and low temperature" Phys. Rev. B 74, (2006), 014306
- [91] A. Goutzoulis; D. Pape "Design and Fabrication of Acousto-Optic Devices" Marcel Dekker Inc., NewYork, 1994.
- [92] G.A. Coquin; D.A. Pinnow, A.W. Warner "Physical Properties of Lead Molybdate Relevant to Acousto-Optic Device Applications" J. Applied Phys. 42(6), (1971), 2162-2168
- [93] N.A. Massie, R.D. Nelson "Beam quality of acousto-optic frequency shifters" Optics Letters 3(2), (1978), 46-47
- [94] L.J. Bromley, D.C. Hanna "Single-frequency Q-switched operation of a diode-laser-pumped Nd:YAG ring laser using an acousto-optic modulator" Optics Letters 16(6), (1991), 378-380
- [95] M.Wakaki "Optical Materials and Applications", CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, 2013.
- [96] Y.Fujii, H. Hayashi "Acousto-optic tunable filter with controllable passband" J. Applied Phys. 46(11), (1975), 5046-5048
- [97] W.Koechner "Solid State Laser Engineering", Springer, Berlin, 2006
- [98] M.B. Kosmyna, B.P. Nazarenko, V.M. Puzikov, A.N. Shekhovtsov "Development of Growth Technologies for the Photonic Single Crystals by the Czochralski Method at Institute for Single Crystals, NAS of Ukraine", Acta Physica Polonica A 124(2), (2013), 305-313
- [99] D.S. Sun, Q.L. Zhang, J.Z. Xiao, J.Q. Luo, H.H. Jiang, S.T. Yin "Influence of Gamma-Ray Irradiation on Absorption and Fluorescent Spectra of Nd:YAG and Yb:YAG Laser Crystals" Chin. Phys. Lett. 25(6), (2008), 2081
- [100] N. Mironova-Ulmane, V. Skvortsova, A.I. Popov "Optical absorption and luminescence studies of fast neutron-irradiated complex oxides for jewellery applications" Low Temperature Physics, 42(7), (2016), 743–747
- [101] C. Pandurangappa, B.N. Lakshminarasappa "Optical studies in gamma irradiated Mg doped CaF₂ single crystals" Optics Communications 284 (2011), 1259–1261
- [102] S.M. Kaczmarek, W. Zendzian, T. Lukasiewicz, K. Stepka, Z. Moroz, S. Warchol "Effects of gamma irradiation and annealing treatments on the performance of Cr;Tm;Ho:YAG lasers" Spectrochimica Acta Part A 54 (1998), 2109–2116
- [103] E R Hodgson and F Agullo-Lopez "Colouring and annealing behaviour of electron irradiated LiNbO₃:Fe" J. Phys.: Condens. Matter 3 (1991) 285
- [104] P.Potera "Optical properties of air annealed YVO₄ crystals and irradiated by uranium ions" Materials of Scientifics and Technical Conference Laser Technologies, Laser and their Applications 2015, (2015), 19-21 (ISBN 978-966-384-345-2)
- [105] P.Potera, A.Piecuch, K.Schwartz „Defects in Cr-doped bismuth germanium oxide crystal irradiated by high energy ²³⁵U ions" IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 15, (2010), 012050
- [106] I.Stefaniuk, P.Potera, I.Rogalska, D.Wróbel „EPR investigations of defects in Bi₁₂GeO₂₀:Cr single crystal irradiated by high energy uranium ions" Current Topics in Biophysics 33 (suppl A), (2010), 231-235

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

- Udział w międzynarodowym projekcie badawczym „CAMART- Excellence Centre of Advanced Material Research and Technology” (2000 - 2001), Komisja Europejska (ICA1-CT-2000-7007) – wykonawca
- Dwa staże naukowe (łącznie 2 miesiące) w Instytucie Fizyki Ciała Stałego Uniwersytetu Łotewskiego w Rydze w ramach grantu NATO (programu „Camart – Excelent Center”) w latach 2001 - 2002 (15.01.2021-13.02.2021, 11.11.2002 – 10.12.2002)
- Dwa jedynogodniowe staże na kierunku elektronika w FH Joanneum (Kapfenberg, Austria) w ramach programu Sokrates (2005, 2011)
- Tygodniowy wyjazd szkoleniowy w ramach programu Erasmus+ na Politechnikę Lwowską - luty 2017 r.
- Krótkotrwałe (tygodniowe) wyjazdy naukowe na Politechnikę Lwowską i Uniwersytet Lwowski (w całym okresie pracy)
- Wykłady i seminaria na zaproszenie ośrodków krajowych i zagranicznych m.in. INTiBS PAN we Wrocławiu i Uniwersytetu Łotewskiego w Rydze
- Współpracowałem/współpracuję naukowo z Politechniką Lwowską, Uniwersytetem Lwowskim, Uniwersytetem Łotewskim w Rydze, Uniwersytetem Pedagogicznym w Drohobyczu i GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH w Darmstad

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

- Recenzent w I Regionalnym Konkursie Prac Uczniowskich z Fizyki (1998 r.)
- Sekretarz Naukowy w II Regionalnym Konkursie Prac Uczniowskich z Fizyki (2000 r.)
- Opiekun praktyk pedagogicznych z fizyki, matematyki i informatyki (2001-2006 r.)
- Recenzent w rejonowych etapach Olimpiady Fizycznej dla uczniów szkół średnich (2004 i 2006 r.)

- Opracowanie planu i programu studiów specjalności Fizyka laserów i optoelektronika na kierunku Fizyka Techniczna (z dr hab. I. Stefaniukiem) (2007 r.)
- Wykłady popularyzatorskie z pokazami dla młodzieży szkolnej w cyklu „Fizyka wokół nas” (2007 r.)
- Utworzenie od podstaw (z dr hab. I. Stefaniukiem) studenckiej Pracowni Techniki Laserowych (2008 r.)
- Udział w zespole opracowującym projekt „NANO - Nowoczesna Atrakcyjna oferta edukacyjna Nowo Otwartego kierunku „Inżynieria materiałowa” na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Rzeszowskiego”, projekt zrealizowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego
- Utworzenie studenckiej Pracowni Techniki Sensorowych (2012 r.)
- Pokazy eksperymentów w ramach Pikników Naukowych w Kańczudze (2017, 2018, 2002 r.) i Dębicy (2018 r.)
- Członek Zespołu przygotowującego Raport Samooceny kierunku Fizyka (2017 r.) oraz Raport Samooceny dla kierunku Systemy diagnostyczne w medycynie (2019 r.) dla PKA
- Prowadzenie zajęć z laboratorium z fizyki w klasie akademickiej I LO w Jarosławiu (rok szkolny 2013/2014 i 2014/2015)

Ponadto uczestniczyłem w projektach propagujących nauki ścisłe i techniczne

- Program Operacyjny Kapitał Ludzki (konkurs nr 1/POKL/3.3.4/08), „Projekt Feniks - długofalowy program odbudowy, popularyzacji i wspomagania fizyki w szkołach w celu rozwijania podstawowych kompetencji naukowo - technicznych, matematycznych i informatycznych uczniów”, projekt realizowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, poddziałanie 3.3.4, instytucja pośrednicząca: Departament Funduszy Strukturalnych Ministerstwa Edukacji Narodowej, (2009-2012), wykonawca
- Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Projekt „EDISON - Wzbogacenie oferty edukacyjnej kierunku „Fizyka Techniczna”, projekt realizowany ze środków

Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (2010-2014), wykonawca

- Program Operacyjny Kapitał Ludzki „TESLA - Techniczna Edukacja Sukcesem Ludzi Ambitnych - Wzbogacenie oferty edukacyjnej kierunku Fizyka Techniczna" projekt realizowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (2011-2015), wykonawca
- Program Operacyjny Kapitał Ludzki „NANO - Nowoczesna Atrakcyjna oferta edukacyjna Nowo Otwartego kierunku „Inżynieria materiałowa” na Wydziale Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Rzeszowskiego", projekt realizowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (2012-2015), wykonawca
- Program Operacyjny Kapitał Ludzki „UR – nowoczesność i przyszłość regionu”, projekt realizowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (2010-2015), wykonawca
- Program Operacyjny Kapitał Ludzki „Z fizyką na "TI"- warsztaty z fizyki dla uczniów II Liceum Ogólnokształcącego z wykorzystaniem technologii informacyjnych przeprowadzone przy współpracy z Uniwersytetem Rzeszowskim", projekt realizowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego (2009), wykonawca
- Program Operacyjny Kapitał Ludzki „Młodzi odkrywcy - zajęcia pozalekcyjne i pozaszkolne dla uczniów gimnazjum z fizyki, astronomii, geografii, języka angielskiego i ICT" projekt realizowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego, instytucja pośrednicząca Wojewódzki Urząd Pracy w Rzeszowie, Instytucja realizująca wsparcie Gmina Dzikowiec - Zespół Szkół w Dzikowcu (2008-2009), wykonawca

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Pełnione funkcje i uprawnienia

- Biegły sądowy z zakresu optyki i przyrządów optycznych (2006 -2020 r.) oraz charakterystyki energetycznej budynków (2011 -2020 r.)
- Egzaminator ECDL nr upr. PL-E1756 –poziom podstawowy (2008 -2014 r.)
- Audytor energetyczny ZAE nr 1408 (od 2009 r. do nadal)
- Audytor energetyczny BGK nr 352 (od 2012 r. do nadal)
- Certyfikator energetyczny nr upr. MI1718 (od 2009 r. do nadal)
- Członek Wydziałowej Komisji Dydaktycznej w latach 2012 - 2014
- Członek Wydziałowej Komisji ds. Jakości Kształcenia w latach 2012 - 2014
- Członek Komitetu Technicznego nr 49 ds. Optyki i Przyrządów Optycznych Polskiego Komitetu Normalizacyjnego (2005 r.-2009 r.)
- Przedstawiciel Uniwersytetu Rzeszowskiego w Komitecie Technicznym nr 49 ds. Optyki i Przyrządów Optycznych Polskiego Komitetu Normalizacyjnego (od 2010 r. do nadal)
- Członek Zespołu Ekspertów Zewnętrznych ds. Analiz Delphi Narodowego Programu Foresight Polska 2020 (2007-2008)
- Promotor pomocniczy przewodu doktorskiego z Inżynierii materiałowej, Politechnika Rzeszowska, mgr Bogumił Cieniek "Wpływ domieszek Co, Mn i Cr na strukturę elektronową i właściwości magnetyczne półprzewodnika ZnO". (przed obroną)

Kształcenie dyplomantów

1. Promotorstwo obronionych prac inżynierskich i magisterskich (lata 2006 -2023):
 - Fizyka i Fizyka techniczna - 36 prac licencjackich i inżynierskich, 4 prace magisterskie
 - Inżynieria materiałowa - 11 prac inżynierskich, 8 prac magisterskich
 - Inżynieria bezpieczeństwa - 10 prac inżynierskich
 - Inżynieria produkcji - 2 prace magisterskie
 - Odnawialne źródła energii i gospodarka odpadami – 3 prace magisterskie
2. Recenzent 42 prac inżynierskich i magisterskich na kierunkach: Inżynieria materiałowa i Fizyka (lata 2006 -2023)

Kształcenie studentów

W ramach działalności dydaktycznej prowadzę/prowadziłem wykłady i ćwiczenia na studiach I i II stopnia na kierunkach: Inżynieria materiałowa, Fizyka, Odnawialne źródła energii i gospodarka odpadami, Mechatronika, Inżynieria bezpieczeństwa.

Prowadziłem lub prowadzę następujące zajęcia ze studentami:

- Materiały inżynierskie
- Nowoczesne materiały inżynierskie
- Obróbka cieplno-chemiczna
- Fizyka materiałów laserowych
- Komputerowe modelowanie struktury i własności materiałów
- Przyrządy optyczne
- Zastosowanie światła laserowego w diagnostyce i terapii
- Spektroskopia
- Pracownia technik laserowych
- Komputerowe wspomaganie projektowania materiałowego
- Audyt energetyczny
- Rekuperacja i magazynowanie energii
- Technologia informacyjna
- Pracownia specjalistyczna informatyki
- Języki i techniki programowania
- Programowanie obrabiarek CNC
- Komputerowe systemy pomiarowe
- Informatyka i komputerowe wspomaganie prac inżynierskich
- Układy logiczne
- Technika sensorowa
- Seminarium dyplomowe

Przygotowane sylabusy i instrukcje oraz materiały dydaktyczne do tych przedmiotów stanowią mój autorski wkład do dydaktyki prowadzonej na Uniwersytecie Rzeszowskim.

Dodatkowo jestem promotorem pomocniczym przewodu doktorskiego z Inżynierii materiałowej (Politechnika Rzeszowska), mgr Bogumiła Cienka "Wpływ domieszek Co, Mn i Cr na strukturę elektronową i właściwości magnetyczne półprzewodnika ZnO". (przed obroną)

Kursy i szkolenia

- Kurs programowania obrabiarek CNC (2008 r.)
- Kurs „Grafika menadżerska i prezentacyjna” (2007 r.)
- Certyfikat ECDL Advenced „Grafika menadżerska i prezentacyjna –poziom zaawansowany”
- Certyfikat ECDL Advenced „Arkusze kalkulacyjne –poziom zaawansowany”
- Szkolenie świadomościowe dotyczące problemów osób z niepełnosprawnością dla pracowników Uniwersytetu Rzeszowskiego (2021 r)
- Kompetencje dydaktyczne i informatyczne kadry Uniwersytetu Rzeszowskiego w zakresie kształcenia na odległość (2021 r)
- Szkolenie z zakresu praw własności przemysłowej i zasad komercjalizacji (2022 r.)

Inne

- Nagroda Rektora UR za wyróżniającą się rozprawę doktorską (2005)
- Nagroda Rektora przyznana w roku 2017 za wkład wniesiony w rozwój infrastruktury badawczo-rozwojowej Uniwersytetu Rzeszowskiego.

Piob Patwa

.....
(podpis wnioskodawcy)