

Autoreferat

dr inż. Paweł Karpiński

Spis treści

1. Imię i nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych. .	3
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy.	4
Wstęp.....	4
Wykaz publikacji.....	5
Publikacje stanowiące osiągnięcia naukowe:	5
Publikacje powiązane tematycznie z osiągnięciami naukowymi, których jestem współautorem:	8
Osiągnięcie I: Wytwarzanie i badanie trójwymiarowych struktur optycznych w niecentrosymetrycznych kryształach przy pomocy femtosekundowych impulsów laserowych	9
Osiągnięcie II: Optyczna manipulacja nanocząstek.....	14
Podsumowanie	19
Referencje.....	20
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.	21
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.	21
6.1. Dydaktyka	21
6.1.1. Wykaz prowadzonych zajęć dydaktycznych:	21
6.1.2. Promotor prac dyplomowych:.....	22
6.1.3. Komisje programowe i dyplomowe.....	22
6.2. Popularyzacja nauki	22
7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	22
7.1. Projekty naukowe.....	22

1. Imię i nazwisko.

Paweł Karpiński

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

2014 doktor nauk chemicznych

Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska,

tytuł rozprawy: „*Modyfikacja właściwości optycznych matryc ciekłokrystalicznych i polimerowych z wykorzystaniem nanoskopowych struktur plazmonicznych*”

promotor: prof. Andrzej Miniewicz

2009 magister inżynier,

Wydział Podstawowych Problemów Techniki, Politechnika Wrocławska

kierunek: fizyka techniczna, specjalność fotonika

promotor: prof. Andrzej Miniewicz

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

2018 – Wydział Chemiczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska

2016 – 2018 Department of Physics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Szwecja

2014 – 2016 Laser Physics Center, Research School of Physics, Australian National University, Canberra, Australia

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy.

Wstęp

Na moje osiągnięcia naukowe składają się dwa monotematyczne cykle publikacji:

Osiągnięcie I: Wytwarzanie i badanie trójwymiarowych struktur optycznych w niecentrosymetrycznych kryształach przy pomocy femtosekundowych impulsów laserowych (A1-A3 oraz C1-C4).

Osiągnięcie II: Optyczna manipulacja nano- i mikro-cząstek (B1-B4 oraz C5-C8).

Celem pierwszego cyklu publikacji było badanie oddziaływania ultrakrótkich impulsów laserowych z niecentrosymetrycznymi kryształami wykorzystywanymi w optyce nieliniowej (Niobian Litu i Arsenek Gallu). W szczególności wykorzystania wielofotonowej absorpcji światła do lokalnej modyfikacji właściwości optycznych Niobian Litu (współczynnika załamania światła i drugorzędowej nieliniowej podatności optycznej $\chi^{(2)}$), co zostało pokazane w publikacjach A2 i A3 oraz C1-C4. Modyfikacja taka jest ograniczona jedynie do woksela w ognisku wiązki i umożliwia wytwarzanie trójwymiarowych struktur fotonicznych. Dodatkowo badałem nieliniową dyfrakcję i generację drugiej harmonicznej światła (z ang. second-harmonic generation SHG) typu Czernkowa, którą można wykorzystać jako kontrast w mikroskopii do wizualizacji zmian drugorzędowej nieliniowej podatności optycznej. Zmiany te nie są widoczne przy zastosowaniu standardowych liniowych kontrastów optycznych, ponieważ nie towarzyszą im zmiany współczynnika załamania światła. Jest to główną tematyką pracy A1. Generacja drugiej harmonicznej światła typu Czerenkowa została również wykorzystana w pracach C1-C4, a generacja drugiej harmonicznej światła z nanocząstek złota jest tematyką pracy C5.

W drugim cyklu badałem możliwość optycznego pułapkowania nano- i mikro-cząstek przy wykorzystaniu lasera pracy ciągłej. W szczególności używałem wiązki światła o odpowiednim rozkładzie natężenia i polaryzacji do pułapkowania silnie rozpraszających nanocząstek w trzech wymiarach (praca B1) i do indukowania ruchu cząstek w pułapce optycznej (prace B1 - B3). Obok wspomnianych prac, przeprowadziłem również eksperymenty związane z termicznymi efektami zachodzącymi w nano- i mikro-skali oraz ich wpływ na ruch cząstki będącej źródłem generowanego ciepła. Głównym celem badań opisanych w publikacjach B2 i B3 był pomiar

efektywnych temperatur dla różnych stopni swobody ruchu nanoobiektu stanowiącego źródło energii termicznej. W pracy B4 opisuję badania nad optycznie indukowanymi strukturami ustawionych jedna za drugą mikrocząstek polimerowych, które działają jak światłowody. Prace C5-C9 stanowią uzupełnienie tego osiągnięcia w tematyce pułapkowania optycznego i spektroskopii nanocząstek złota i krzemu.

Oba przedstawione cykle publikacji stanowią znaczny wkład w rozwój optyki i fotoniki. Wspólnym głównym celem przedstawionych osiągnięć naukowych było badanie oddziaływania światła z materią w nano- i mikro-skali. Pułapkowanie optyczne, będące tematem drugiego osiągnięcia, można traktować jako lokalną i czasową modyfikację właściwości medium (np. wody) poprzez umieszczenie w wybranym punkcie nano- lub mikro-cząstki o odpowiednich właściwościach. Taka modyfikacja może być dodatkowo aktywna, jeśli cząstka w pułapce wykonuje z góry zaprogramowany ruch np. obraca się wokół własnej osi. W związku z czym można się pokusić o połączenie tych cykli publikacyjnych pod jednym tytułem: **Mikroobróbka ultrakrótkimi impulsami światła i pułapkowanie optyczne jako metody modyfikowania właściwości materiałów w nano- i mikro-skali.**

Wykaz publikacji

Publikacje stanowiące osiągnięcia naukowe:

We wszystkich wymienionych poniżej pracach byłem wiodącym i pierwszym autorem (stworzyłem koncepcję badań, zaplanowałem proces badawczy, wykonałem rozeznanie literaturowe, miałem wiodący udział w powstaniu manuskryptów i ich korektach).

Osiągnięcie I: Wytwarzanie i badanie trójwymiarowych struktur optycznych w niecentrosymetrycznych kryształach przy pomocy femtosekundowych impulsów laserowych

A1. P. Karpiński, X. Chen, V. Shvedov, C. Hnatovsky, A. Grisard, E. Lallier, B. Luther-Davies, W. Krolikowski & Y. Sheng, Nonlinear diffraction in orientation-patterned semiconductors, *Optics Express* **23(11)**, 14903-14912 (2015).

IF: 03.148, punktacja MEiN: 40

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badawczej, zaplanowaniu eksperymentów, budowie układu eksperymentalnego i wykonaniu pomiarów nieliniowej dyfrakcji, opracowaniu i analizie wyników pomiarowych, przeprowadzeniu studiów literaturowych, opracowaniu opisu teoretycznego przygotowaniu manuskryptu i jego korekcie. Ponadto kierowałem projektem naukowym obejmującym część badań opisanych w tej pracy.

- A2. P. Karpinski, V. Shvedov, W. Krolikowski & C. Hnatovsky, Laser-writing inside uniaxially birefringent crystals: fine morphology of ultrashort pulse-induced changes in lithium niobate, *Optics Express* **24(7)**, 7456-7476 (2016).

IF: 03.307, punktacja MEiN: 40

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badawczej, zaplanowaniu eksperymentów, budowie układów eksperymentalnych i wykonaniu eksperymentów modyfikacji Niobianu Litu przy użyciu lasera femtosekundowego. Wykonałem również obserwacje i pomiary wytworzonych struktur przy użyciu konfokalnego mikroskopu optycznego z kontrastem SHG i mikroskopu SEM. Brałem udział w przeprowadzeniu studiów literaturowych, opracowaniu opisu teoretycznego oraz przygotowaniu manuskryptu i jego korekcie. Ponadto kierowałem projektem naukowym obejmującym część badań opisanych w tej pracy.

- A3. P. Karpinski, V. Shvedov, W. Krolikowski, C. Hnatovsky, Engineering optical anisotropy in nonlinear crystals with ultrafast light, *J. Appl. Phys* **127(15)**, 153104 (2020).

IF: 02.546, punktacja MEiN: 100

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badawczej, zaplanowaniu eksperymentów, budowie układów eksperymentalnych i wykonaniu eksperymentów modyfikacji Niobianu Litu przy użyciu lasera femtosekundowego; wykonaniu pomiarów wyindukowanej dwójłomności i grubości wytworzonych struktur; opracowaniu procedury pomiarów konoskopowych i ich wykonaniu. Brałem udział w przeprowadzeniu studiów literaturowych, opracowaniu opisu teoretycznego oraz przygotowaniu manuskryptu i jego korekcie. Ponadto kierowałem projektem naukowym obejmującym część badań opisanych w tej pracy.

Osiągnięcie II: Optyczna manipulacja nano- i mikro-cząstek

- B1. P. Karpinski, S. Jones, D. Andrén & M. Käll, Counter-Propagating Optical Trapping of Resonant Nanoparticles Using a Uniaxial Crystal, *Laser & Photon. Rev.* **12 (9)**, 1800139 (2018).

IF: 09.056, punktacja MEiN: 45

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badawczej, zaplanowaniu eksperymentów, budowie układu eksperymentalnego i wykonaniu pomiarów pułapkowania optycznego z przeciwbieżnymi wiązkami światła, opracowaniu i analizie wyników pomiarowych, przeprowadzeniu studiów literaturowych, opracowaniu opisu teoretycznego oraz przygotowaniu manuskryptu i jego korekcie.

- B2. P. Karpinski, S. Jones, H. Šípová-Jungová, R. Verre, M. Käll, Optical rotation and thermometry of laser tweezeed silicon nanorods, *Nano letters* **20(9)**, 6494-6501 (2020).

IF: 11.189, punktacja MEiN: 200

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badawczej, zaplanowaniu eksperymentów, budowie układu eksperymentalnego i wykonaniu znacznej części pomiarów pułapkowania optycznego i pomiaru temperatury nanocząstek krzemu, opracowaniu i analizie wyników pomiarowych; koordynacji pracy pozostałych współautorów; przeprowadzeniu studiów literaturowych, opracowaniu opisu teoretycznego oraz przygotowaniu manuskryptu i jego korekcie. Ponadto kierowałem projektem naukowym obejmującym część badań opisanych w tej pracy.

- B3. P. Karpinski, Rotation and Revolution of Optically Trapped Gold Nanorods Induced by the Spin and Orbital Angular Momentum of a Laguerre–Gaussian Vortex Beam, *Adv. Optical Mater.* **10(1)**, 2101592 (2022).

IF: 10.050, punktacja MEiN: 140

Jest to praca jednoautorska, która powstała w ramach kierowanego przeze mnie projektu.

- B4. P. Karpinski, L. Sznitko, M. Wisniewska-Belej, A. Miniewicz, T.J. Antosiewicz, Optically controlled development of a waveguide from a reservoir of microparticles, *Small Methods* **2201545** (2023).

IF:15.367, MEiN = 100

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu koncepcji badawczej, zaplanowaniu eksperymentów, budowie układu eksperymentalnego i wykonaniu pomiarów eksperymentalnych powstawania indukowanych światłem łańcuchów mikrocząstek polimerowych; opracowaniu i analizie wyników pomiarowych; koordynacji pracy pozostałych współautorów; przeprowadzeniu studiów literaturowych, opracowaniu opisu teoretycznego oraz przygotowaniu manuskryptu i jego korekcie. Ponadto kierowałem projektem naukowym obejmującym część badań opisanych w tej pracy.

Publikacje powiązane tematycznie z osiągnięciami naukowymi, których jestem współautorem:

Wymienione poniżej prace pozwalają na bardziej uogólnione i całościowe spojrzenie na opisane osiągnięcia naukowe i pozwalają na wyciągnięcie szerszych i bardziej ogólnych wniosków. Ponieważ nie jestem pierwszym autorem tych prac nie wchodzi one w zakres osiągnięć naukowych i nie przedstawiam do nich oświadczeń dotyczących wkładu mojego i innych autorów. Mój wkład w te publikacje na ogół obejmował przeprowadzenie części eksperymentów i pomiarów, przanalizowaniu ich wyników, dyskusji nad nimi, oraz współudziale w pisaniu i poprawie manuskryptu.

- C1. Chen, X., Karpinski, P., Shvedov, V., Koynov, K., Wang, B., Trull, J., Cojocar, C., Krolikowski, W., & Sheng, Y. Ferroelectric domain engineering by focused infrared femtosecond pulses. *Appl Phys Lett* **107**, 141102 (2015).
- C2. Chen, X., Karpinski, P., Shvedov, V., Wang, B., Trull, J., Cojocar, C., Boes, A., Mitchell, A., Krolikowski, W., & Sheng, Y. Two-dimensional domain structures in lithium niobate via domain inversion with ultrafast light. *Photonics Lett Pol* **8**, 33–35 (2016).
- C3. Chen, X., Shvedov, V., Karpinski, P., Koynov, K., Boes, A., Mitchell, A., Trull Silvestre, J. F., Cojocar, C., Krolikowski, W., & Sheng, Y. Ferroelectric Domain Patterning with Ultrafast Light. *Opt Photonics News* **141102**, 141102 (2016).
- C4. Chen, X., Karpinski, P., Shvedov, V., Boes, A., Mitchell, A., Krolikowski, W., & Sheng, Y. Quasi-phase matching via femtosecond laser-induced domain inversion in lithium niobate waveguides. *Opt Lett* **41**, 2410 (2016).

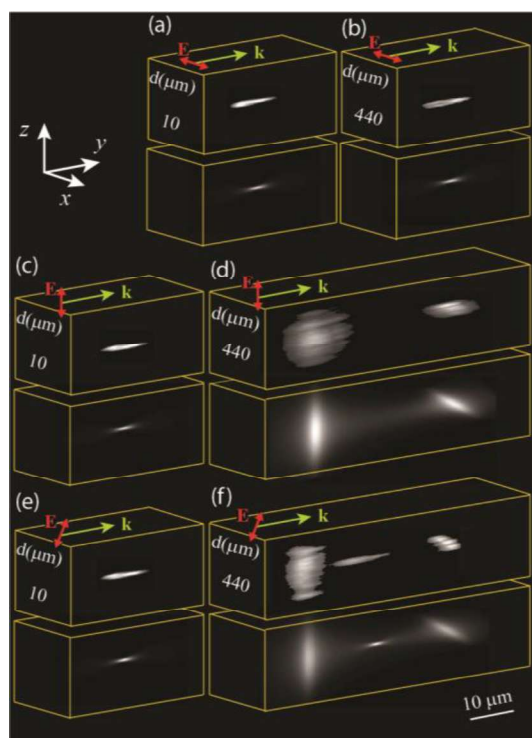
- C5. Kumar Balla, N., Rendón-Barraza, C., Hoang, L. M., Karpinski, P., Bermúdez-Ureña, E., & Brasselet, S. Polarized Nonlinear Nanoscopy of Metal Nanostructures. *ACS Photonics* **4**, 292–301 (2017).
- C6. Verre, R., Shao, L., Odebo Länk, N., Karpinski, P., Yankovich, A. B., Antosiewicz, T. J., Olsson, E., & Käll, M. Metasurfaces and Colloidal Suspensions Composed of 3D Chiral Si Nanoresonators. *Advanced Materials* **29**, (2017).
- C7. Andrén, D., Karpinski, P. & Käll, M. Construction and Operation of a Light-driven Gold Nanorod Rotary Motor System. *JoVE* **136**, e57947 (2018).
- C8. Baranov, D. G., Verre, R., Karpinski, P. & Käll, M. Anapole-Enhanced Intrinsic Raman Scattering from Silicon Nanodisks. *ACS Photonics* **5**, 2730–2736 (2018).
- C9. Jones, S., Andrén, D., Karpinski, P. & Käll, M. Photothermal Heating of Plasmonic Nano-antennas: Influence on Trapped Particle Dynamics and Colloid Distribution. *ACS Photonics* **5**, 2878–2887 (2018).

Osiągnięcie I: Wytwarzanie i badanie trójwymiarowych struktur optycznych w niecentrosymetrycznych kryształach przy pomocy femtosekundowych impulsów laserowych

Modyfikacje przezroczystych materiałów przy pomocy impulsów laserowych umożliwiają wytwarzanie mikrometrycznych struktur na powierzchni jak i w ich wnętrzu. Jest to metoda obróbki i strukturyzacji gotowego medium optycznego, która może być szeroko stosowana do polimerów, szkieł i kryształów. Znajduje ona zastosowanie między innymi do wytwarzania miniaturowych układów optycznych, układów do mikroprzepływów, pamięci optycznych i znakowania. Szeroko prowadzone są też badania podstawowe przemian jakie mogą zachodzić w różnych materiałach oświetlanych wiązką lasera impulsowego. Badania te prowadzone są od momentu powstania lasera impulsowego z synchronizacją modów (z ang. Mode-Locking) i prowadzone były między innymi przez Gérarda Mourou¹ i Erica Mazura.²

W swojej pracy naukowej, przedstawionej w ramach Osiągnięcia I, badałem modyfikacje Niobianu Litu (LiNbO_3) przy pomocy femtosekundowych impulsów laserowych. Niobianu Litu jest kryształem ferroelektrycznym o niecentrosymetrycznej budowie szeroko stosowanym w optyce nieliniowej. Jest on popularny ze względu na możliwość wytworzenia w nim periodycznych struktur o przeciwnie zorientowanych domenach ferroelektrycznych, które

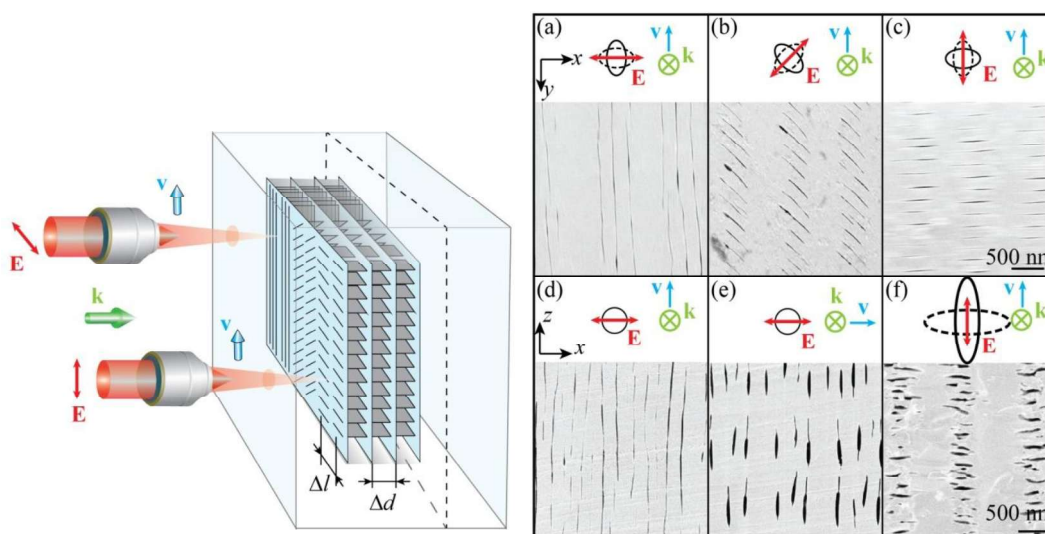
umożliwiają quasi-dopasowanie fazowe w procesach parametrycznej konwersji energii, takich jak generacja drugiej harmonicznej światła. Moje badania obejmowały termiczne procesy modyfikacji LiNbO_3 wykorzystujące efekt piroelektryczny, opisane w pracach C1-C4 i nietermiczne opisane w publikacjach A2 i A3. Są to jedne z pierwszych na świecie badań wykorzystujących femtosekundowe impulsy laserowe do modyfikacji ferroelektrycznych niecentrosymetrycznych kryształów do zastosowań w optyce nieliniowej. Rozwijana przeze mnie metoda umożliwiła w późniejszym czasie wytworzenie trójwymiarowych struktur do generacji wektorowych wiązek SHG.³⁻⁵ Publikacje A2 i A3, oraz C1-C4 wspólnie przedstawiają szeroki i ogólny opis modyfikacji optycznych LiNbO_3 przy wykorzystaniu ultrakrótkich impulsów światła.



Rysunek 1. Porównanie symulacji i wyników eksperymentalnych: obrazów mikroskopowych SHG modyfikacji wytworzonej w LiNbO_3 domieszkowanym MgO o cięciu Y po oświetleniu jednego punktu pięcioma impulsami. Polaryzacja wiązki w (a) i (b) wzdłuż osi X, w (c) i (d) wzdłuż osi Z oraz w (e) i (f) pod kątem $\gamma = \pi/14$ względem osi Z, dla której natężenie światła we wszystkich trzech ogniskach jest równe. Górne panele przedstawiają dane eksperymentalne, dolne symulacje. Rysunek z publikacji A2.

Niobian Litu, tak jak wiele innych kryształów, wykazuje anizotropię optyczną, która ma znaczący wpływ na jego modyfikację przy użyciu światła. Silnie skupiona wiązka Gaussowska w materiale anizotropowym (jednoosiowym) ulega rozszczepieniu na dwa lub trzy ogniska w zależności od

kierunku propagacji i polaryzacji względem osi optycznej. W pierwszej części pracy A2 przedstawiony jest model teoretyczny w przybliżeniu przyosiowym i wyniki eksperymentalne pokazujące kształt ogniska liniowo spolaryzowanej wiązki Gaussowskiej w jednoosiowym kryształach dwójłomnym jakim jest LiNbO_3 . Wytworzyłem w nim zlokalizowane zmiany przy pomocy impulsów o czasie trwania kilku femtosekund, a następnie zmierzyłem kształt wytworzonych zmian używając mikroskopu konfokalnego z kontrastem SHG. Na Rysunku 1 widać dużą zgodność modelu teoretycznego z wynikami eksperymentalnymi.



Rysunek 2. Zdjęcia z mikroskopu SEM zmian nanostrukturalnych wytworzonych w LiNbO_3 w trybie zapisu ciągłego. Po lewej stronie ideowy schemat eksperymentu. Zapis odbywał się z prędkością $|v| = 100 \mu\text{m/s}$, przy $\sim 10^3$ impulsach na mikrometr przemieszczenia próbki względem ogniska lasera. (a)-(c) czysty LiNbO_3 o cięciu Z, energia w impulsie to $E_p \sim 100 \text{ nJ}$, $300 \mu\text{m} < d < 350 \mu\text{m}$. (d)-(f) LiNbO_3 domieszkowany MgO o cięciu Y, $400 \mu\text{m} < d < 450 \mu\text{m}$. $E_p \sim 100 \text{ nJ}$ w (d) i (e) oraz $E_p \sim 300 \text{ nJ}$ w (f). Dla każdej geometrii przedstawiono schematycznie przekroje ognisk przednich (linia ciągła) i tylnych (linia przerywana). Oś optyczna kryształu jest zgodna z osią z. Rysunek z publikacji A2.

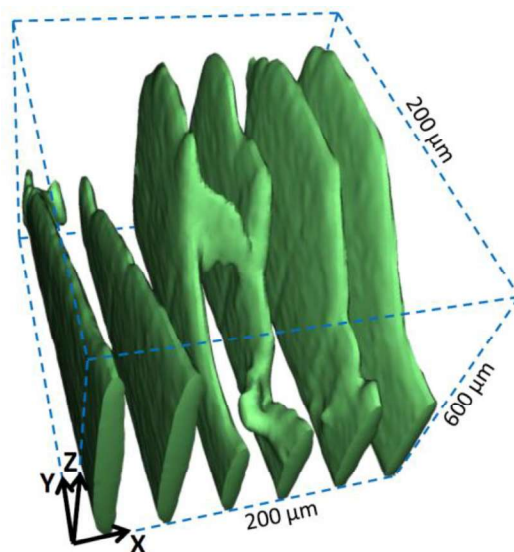
Druga część publikacji A2 opisuje morfologię zmian uzyskanych w LiNbO_3 przy pomocy impulsów femtosekundowych o dużej mocy i małej częstotliwości repetycji. Takie parametry wiązki laserowej ograniczają efekty termiczne w oświetlanym materiale. W celu zbadania morfologii zmian opracowałem metodę wytwarzania struktur o rozmiarach setek mikrometrów, które mogły być widoczne pod standardowym mikroskopem. To umożliwiło ich dalszą obróbkę, przecięcie, wypolerowanie i wytrawienie, a następnie badania morfologiczne przy pomocy mikroskopu SEM.

W zmodyfikowanym LiNbO_3 zaobserwowałem samoorganizujące się nanosiatki. Jest to jedna z możliwych modyfikacji ośrodka obserwowana również dla niektórych szkieł, która powstaje wskutek samoorganizacji plazmy wzbudzonej w materiale przez światło.^{6,7} Schemat metody wytwarzania makroskopowych struktur i morfologia wytworzonych zmian pokazująca samoorganizujące się nanosiatki została przedstawiona na Rysunku 2. W ramach publikacji A2 zbadałem wpływ kierunku padania i polaryzacji wiązki względem osi kryształu oraz wpływ długości impulsu na morfologię samoorganizujących się nanosiatek. Praca ta pokazuje jedne z pierwszych samoorganizujących się nanosiatek wytworzonych wewnątrz kryształu.

Publikacja A3 jest kontynuacją badań opisanych w publikacji A2 i wykorzystuje wytworzone optycznie samoorganizujące się nanosiatki do modyfikacji optycznych własności LiNbO_3 . Istnienie w materiale struktur o rozmiarach mniejszych od długości fali światła zmienia jego efektywny współczynnik załamania. Periodyczne i zorientowane nanosiatki powodują powstanie dwójłomności w takim ośrodku, ponieważ współczynnik załamania na kierunku prostopadłym i równoległym do wytworzonych nanosiatek będzie różny. Zjawisko to nazywamy indukowaną dwójłomnością (z ang. form-birefringence). W przypadku LiNbO_3 , który naturalnie jest kryształem dwójłomnym jednoosiowym, wyeliminowanie dodatkowej dwójłomności spowoduje, że będzie on materiałem dwuosiowym. W publikacji A3 opisałem sposób wytwarzania makroskopowych objętości zmodyfikowanego LiNbO_3 , zmierzyłem ich dwójłomność i wyznaczyłem kąt między osiami optycznymi. Pokazałem również, że wartość indukowanej dwójłomności jest niezależna od energii w impulsie lasera modyfikującego, natomiast zmianie ulega objętość zmodyfikowanego materiału. Te badania pozwoliły również na spekulacje dotyczące morfologii uzyskanej zmiany. Porównanie wartości zmierzonej indukowanej dwójłomności, periodu i przestrzennego rozkładu nanosiatek z modelem teoretycznym pozwoliły na oszacowanie współczynnika załamania zmodyfikowanego kryształu, który równy jest współczynnikowi załamania amorficznego LiNbO_3 . Dwójłomność i możliwość jej lokalnej inżynierii (zmieniania współczynnika załamania) jest istotnym zagadnieniem w fotonice i jest wykorzystywana w wytwarzaniu zintegrowanych struktur i obwodów optycznych. Inżynieria właściwości optycznych kryształów nieliniowych jest tym bardziej istotna.

Poza wytwarzaniem struktur ważna jest też możliwość ich obserwacji i pomiaru. Jeśli zmiany w ośrodku niecentrosymetrycznym polegają na zmianie orientacji domen będzie się to wiązać ze

zmianą kierunku drugorzędowej podatności optycznej. Pierwszorzędowa podatność optyczna i tym samym współczynnik załamania światła pozostanie jednorodny. Takie struktury wykorzystywane są do quasi-dopasowania fazowego w efektach parametrycznej konwersji energii. Obserwacja tych zmian jest trudna i najczęściej stosuje się metody niszczące polegające na trawieniu powierzchni i obserwacji różnicy wysokości zależnej od kierunku ustawienia kryształu. Pomiar i kontrola jakości wytworzonych struktur są tym bardziej istotne w materiałach, takich jak niecentrosymetryczne półprzewodniki, w których proces ich wytwarzania jest trudny i kosztowny, a jakość wytworzonych struktur nie jest idealna. Wytwarzanie periodycznie zorientowanych (z ang. Orientation Patterned) struktur zostało do tej pory pokazane jedynie dla kilku półprzewodników m.in.: Arsenek Galu (GaAs) i Arsenek Fosforu (GaP). Takie struktury mają potencjalnie szerokie zastosowanie w optyce nieliniowej, ponieważ półprzewodniki o niecentrosymetrycznej budowie mają jedne z najwyższych nieliniowych podatności optycznych, a ze względu na brak lub niewielką dwójłomność nie ma możliwości uzyskania w nich dopasowania fazowego opartego na dwójłomności.



Rysunek 3. Trójwymiarowy obraz periodycznej struktury OP-GaAs uzyskany w układzie mikroskopowym z kontrastem SHG typu Czerenkowa. Wymiary ramki to $200 \times 200 \times 600 \mu\text{m}^3$. Rysunek z publikacji A1.

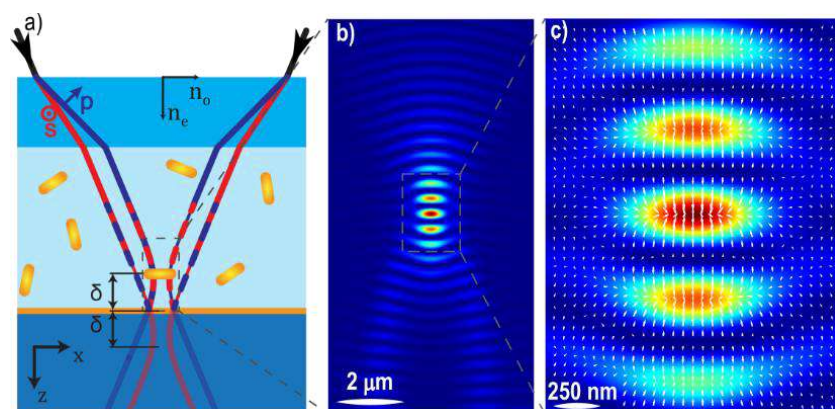
W ramach pracy A1 badałem periodycznie zorientowany GaAs (OP-GaAs), który został wytworzony przez firmę Thales. Praca ta powstała jako współpraca uczelni z przemysłem. W ramach tej publikacji opracowałem metodę obserwacji struktur OP-GaAs wewnątrz próbki. W tym

celu najpierw zbadałem eksperymentalnie i opisałem teoretycznie zjawisko nieliniowej dyfrakcji SHG w podczerwieni, a następnie zbudowałem skaningowy mikroskop optyczny z kontrastem SHG typu Czernkova, który umożliwił zwizualizowanie układu domen w całej próbce OP-GaAs o wymiarach $8 \times 4 \times 0.5 \text{ mm}^3$. Badania te wykorzystywały, unikatowy na tamte czasy, laser femtosekundowy z optycznym parametrycznym wzmacniaczem działający w podczerwieni w zakresie $2.9 - 4.0 \text{ }\mu\text{m}$.⁸ Na Rysunku 3 pokazałem fragment skanu struktury OP-GaAs, na którym widać granice między domenami, oraz fragmenty, gdzie te granice zanikają, a domeny łączą się w jedną większą całość. Mikroskopia optyczna z kontrastem SHG typu Czernkova była również wykorzystywana w pracach C1-C4. Mikroskopowe pomiary SHG z nanocząstek złota są tematem publikacji C5.

Osiągnięcie II: Optyczna manipulacja nanocząstek

Szczypce optyczne zostały po raz pierwszy skonstruowane przez Arthura Ashkina w 1970^{9,10} i od lat 80-tych dwudziestego wieku znajdują coraz to szersze zastosowanie głównie w badaniach biologicznych. Zjawisko to opiera się na wykorzystaniu sił indukowanych przez światło do wytworzenia przestrzennego rozkładu potencjału, w którego minimach obiekt może zostać uwięziony (pułapkowany). Obiekt w pułapce optycznej nie jest unieruchomiony, jednak jego ruchy Browna ulegają tłumieniu i są ograniczone do objętości określonej głębokością wnęki energii potencjalnej. Możliwe jest również indukowanie ruchu takiego obiektu poprzez odpowiednie zaprojektowanie rozkładu potencjału lub wykorzystanie momentu pędu światła.¹¹ Ze względu na wartość sił optycznych rzędu pikoniutonów, możliwe oddziaływanie na obiekty o rozmiarach mikrometrowych lub mniejsze, dla których siły optycznej są porównywalne lub wiesz od innych sił na nie działających takich jak grawitacja i siły oddziaływania z otoczenia. Większość prac w tej tematyce skupia się na pułapkowaniu mikrocząstek o wymiarach od pojedynczych do kilkudziesięciu mikrometrów. Funkcjonalność szczypiec optycznych można znacząco rozszerzyć wykorzystując nanocząstki. Nanocząstki mogą wykazywać efekty rezonansowego oddziaływania ze światłem, jak w przypadku nanocząstek metali, dla których obserwujemy efekty plazmoneczne, lub nanocząstek półprzewodników o wysokim współczynniku załamania światła (z ang. high-index dielectrics), dla których obserwujemy rezonanse geometryczne dla pola elektrycznego i magnetycznego światła.

W ramach pracy naukowej, przedstawionej w ramach Osiągnięcia II, badałem nanocząstki złota (publikacje B1, B3, C5, C7 i C9) oraz nanocząstki krzemu (publikacje B2, C6 i C8). Nanocząstki tego typu silnie oddziałują ze światłem co wzmacnia siły optyczne na nie działające. Powoduje to, że wykorzystując wspomniane rezonanse możliwe jest łatwe pułapkowanie obiektów znacząco mniejszych od długości fali światła. Dodatkowo można nimi manipulować wewnątrz pułapki optycznej przy pomocy spinowego i orbitalnego momentu pędu. Duże siły optyczne mają pozytywne i negatywne konsekwencje. Z jednej strony umożliwiają łatwe pułapkowanie nanocząstki w płaszczyźnie xy - prostopadłej do kierunku propagacji wiązki poprzez siłę gradientową. Jednocześnie uniemożliwiają pułapkowanie nanocząstki w osi z - propagacji wiązki, ze względu na dużą siłę ciśnienia fotonów. Dlatego większość prac o optycznym pułapkowaniu rezonansowych nanocząstek ogranicza się do pułapkowania ich w dwóch wymiarach (2D) w płaszczyźnie xy . Wzdłuż osi z ruch nanocząstki jest ograniczony poprzez siłę ciśnienia fotonów i oddziaływanie elektrostatyczne z podłożem (na ogół szkłem mikroskopowym), do którego nanocząstka jest dociskana.



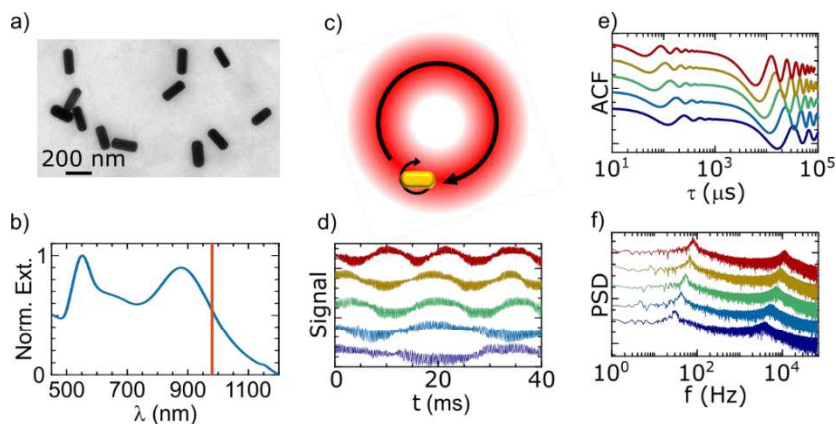
Rysunek 4. Schemat ideowy przeciwbieżnej pułapki optycznej z wykorzystaniem materiału dwójłomnego i zwierciadła. a) Schemat eksperymentalnej konfiguracji przeciwbieżnej pułapki optycznej oparty na jednoosiowym kryształ dwójłomnym o cięciu typu c i zwierciadle odbijającym drugie ognisko. Niebieska i czerwona linia przedstawiają odpowiednio wiązki o polaryzacji typu p i s. b) i c) Rozkład natężenia światła w izotropowej pułapce optycznej. Białe strzałki pokazują siły optyczne działające na pułapkowany obiekt. Rysunek z publikacji B1.

W ramach pracy B1 opracowałem i zrealizowałem eksperymentalnie układ pozwalający na efektywne pułapkowanie rezonansowych nanocząstek złota w trzech wymiarach (3D). Użyłem

architektury przeciwbieżnych wiązek światła, wykorzystując rozszczepienie wiązki Gaussowskiej w jednoosiowym anizotropowym optycznie materiale. Schemat pułapki optycznej opisanej w pracy B1, wraz z symulacją rozkładu natężenia światła i sił działających na nanocząstkę w takiej pułapce został przedstawiony na Rysunku 4. W układzie szczypiec optycznych między obiektywem, a komórką z roztworem nanocząstek umieściłem anizotropowy kryształ. Wiązka propagowała się wzdłuż osi optycznej kryształu, w związku z czym jej ognisko uległo rozszczepieniu na dwa, zgodnie z wynikami przedstawionymi w publikacji A2. Tylne ścianki komórki do pułapkowania była pokryta 30 nanometrową warstwą złota, która działała jak półprzepuszczalne zwierciadło. Taka 30 nanometrowa warstwa złota odbijała ponad 90% światła lasera podczerwonego, używanego do pułapkowania nanocząstek, jednocześnie przepuszczała ponad 70% światła w zakresie widzialnym umożliwiając obserwację z wykorzystaniem kontrastu ciemnego pola. Zwierciadło to umieszczone było w połowie odległości między pierwszym i drugim ogniskiem, co powodowało odbicie drugiego ogniska i jego interferencję z pierwszym. W ramach tej pracy opracowałem model opisujący rozszczepienie ogniska kołowo spolaryzowanej wiązki Gaussowskiej, który umożliwił zamodelowanie pułapki optycznej i określenie sił działających na nanocząstkę w takiej pułapce. Eksperymentalnie pokazałem, że nanocząstkę można pułpkować w kilku maksymalnych prążkach interferencyjnych oraz jak ustawienie zwierciadła wpływa na jakość pułapki optycznej. Pokazałem również, że jeśli nanocząstka jest anizotropowa (tutaj użyłem nanoprętów złota, patrz Rysunek 5a) i 5b)) i wiązka lasera jest kołowo spolaryzowana to taka nanocząstka obraca się wokół własnej osi z częstością rzędu kilku kilohertzów.

Publikacje B2 i B3 opisują badania nad ruchem nanocząstek w pułapce optycznej indukowanym spinowym i orbitalnym momentem pędu, oraz wykorzystaniem tych ruchów do pomiaru efektów termicznych towarzyszących optycznemu pułapkowaniu rezonansowych nanocząstek. Rezonansowe oddziaływanie ze światłem wzmacnia rozpraszanie (głównie odpowiedzialne za siły optyczne) jak również absorpcję światła. Powoduje to, że nanocząstka jest lokalnym źródłem ciepła, które rozchodzi się w otoczeniu. Jeśli cząstka porusza się, to taki układ jest termicznie nierównowagowy i nie można w nim zdefiniować jednej globalnej temperatury. W przypadku ruchów Browna, ruchy takiej cząstki nazywamy gorącymi ruchami Browna (z ang. Hot Brownian Motion, HBM).¹² Teoria HBM przewiduje, że temperatura nanocząstki powinna być oddzielnie zdefiniowana dla każdego stopnia swobody ruchu. W związku z czym temperatura wewnątrz

nanocząstki będzie inna niż temperatura opisująca jej ruch obrotowy i temperatura opisująca jej ruch translacyjny.



Rysunek 5. Nanopręty złota w pułapce optycznej. a) Zdjęcie TEM i b) widmo ekstynkcji nanoprętów złota. Czerwona linia pokazuje długość fali lasera pułapkującego. c) Schemat obrotu i obiegu nanocząstki spulapkowanej optycznie w kołowo spolaryzowanej wiązce Laguerre'a-Gaussa. d) Sygnał lasera pułapkującego rozproszonego przez nanocząstkę w pułapce, spektroskopia korelacji fotonów (z ang. photon correlation spectroscopy PCS), e) funkcja autokorelacji i f) spektralnej gęstości mocy (transformata Fouriera) sygnały PCS dla nanopręta złota pułapkowanego z mocą od 27 do 67 mW (od dołu do góry). Rysunek z publikacji B3.

Wiązka światła o kołowej polaryzacji posiada spinowy moment pędu (z ang. Spin Angular Moemntum SAM). Wiązka wektorowa z nieciągłością fazy np. Laguerre'a-Gaussa, posiada orbitalny moment pędu (z ang. Orbital Angular Momentum). W pułapce optycznej SAM będzie działała na obiekty proporcjonalnie do ich absorpcji i anizotropowego rozpraszania (dwójłomności) i będzie powodował obrót obiektu wokół własnej osi. Dodatkowo, aby zobaczyć i zmierzyć obrót obiektu musi on mieć symetrię niższego rzędu niż sferyczna. OAM będzie działała na wszystkie cząstki proporcjonalnie do ich absorpcji i rozpraszania światła i będzie powodował periodyczny ruch (obieg) obiektu po orbicie wiązki (patrz Rysunek 5c)).

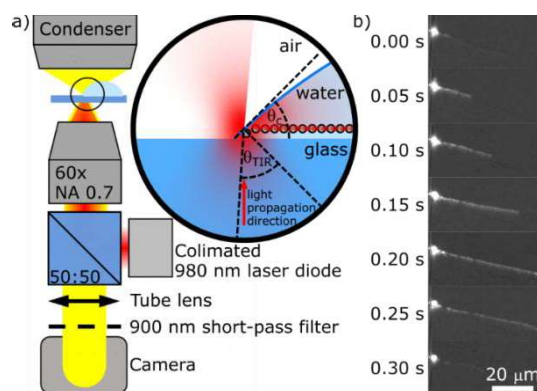
W pracy B2 pokazałem, że nanopręty krzemu, które posiadają anizotropię kształtu, w kołowo spolaryzowanej pułapce optycznej wykonują szybkie obroty z częstością kilku kilo-Hertzów. Z pomiarów zależności częstości obrotu nanocząstki w funkcji mocy lasera pułapkującego określiłem temperaturę jej ruchu obrotowego. Temperaturę wewnątrz nanocząstki krzemu określiłem na podstawie spektralnego przesunięcia modu rozpraszania Ramana krzemu w funkcji

temperatur, tzw. zjawiska mięknięcia modów (z ang. mode softening). W pracy B3 pokazałem, że nanopręty złota w pułapce optycznej stworzonej przez kołowo spolaryzowaną wiązkę Laguerre'a-Gaussa wykazują obrót wokół własnej osi i obieg po orbicie wiązki. Ruchy te są niezależne od siebie i mogą odbywać się z częstościami rzędu kilku kilo-Hertzów i około 100 Hertzów odpowiednio dla obrotu i obiegu (patrz Rysunki 5d) - 5f)). Zbadanie zależności częstości obrotu i obiegu w funkcji mocy lasera pozwoliło na oszacowanie wzrostu temperatury ruchu obrotowego i translacyjnego (obiegu) nanocząstek. Wyniki pomiarów temperatury wewnątrz nanoprętów krzemu i ich ruchu obrotowego, oraz temperatur ruchu obrotowego i translacyjnego nanoprętów złota zgadzają się i eksperymentalnie weryfikują teorię HBM. Wyniki obu tych prac stanowią eksperymentalne potwierdzenie teorii HBM dla nanoobiektów w pułapce optycznej.

Publikacja C6 opisuje metodę wytwarzania chiralnych nanocząstek krzemu oraz sposób ich optycznego pułapkowania. W tej pracy byłem odpowiedzialny za eksperymenty związane z pułapkowaniem optycznym. Ta sama metoda wytwarzania nanocząstek krzemu została wykorzystana do wytworzenia nanocząstek użytych w pracy B2. Praca C7 opisuje inżynierskie podejście do budowy i funkcjonowania pułapki optycznej pozwalającej na indukowanie i pomiar ruchów obrotowych nanocząstek złota. Publikacja C9 skupia się na efektach termicznych nanoanten plazmonicznych i możliwości ich wykorzystania do optycznego pułapkowania polimerowych nanocząstek. Wraz z publikacjami B1-B3 prace te stanowią szeroki opis możliwości zastosowania szczypiec optycznych do optycznego pułapkowania nanoskopowych obiektów, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości indukowania ruchu tych obiektów wewnątrz pułapki i opisie ich właściwości termicznych. Publikacja C8 opisuje spektroskopowe badania nad wzmocnionym rozpraszaniem Ramana poprzez mod anapolowy w nanocząstkach krzemu. Wraz z pracą B2 pokazuje ona wpływ rezonansowego oddziaływania światła z nanocząstkami krzemu na wzmocnienie rozpraszania Ramana.

W pracy B4 pokazałem, że przy odpowiednim oświetleniu wielu mikrocząstek polimerowych można je światłem ustawić jedna za drugą w łańcuszek, który porusza się (rozwija) w kierunku propagacji światła. Rysunek 6 przedstawia schemat eksperymentu i zdjęcia pokazujące powstawanie i propagację łańcuszka mikrocząstek. Łańcuszek taki działa jak światłowód i można go porównać z solitonem przestrzennym wytwarzanym w materiałach o nieliniowym współczynniku załamania. Własności takiego światłowodu zależą głównie od wielkości

mikrocząstek, a nie do rozkładu natężenia i polaryzacji wiązki jak w przypadku solitonu. Maksymalna długość łańcuszka zależy od warunków propagacji światła w takim światłowodzie. Jeśli światłowód jest jednodomowy łańcuszek może mieć długość przekraczającą 100 mikrocząstek ustawionych jedna za drugą. Jeśli propagacja światła jest wielomodowa, superpozycja modów prowadzi do periodycznych zmian natężenia światła wzdłuż drogi propagacji (bicia modów) i długość łańcuszka ograniczona jest do pozycji pierwszego minimum natężenia, to jest kilku mikrocząstek.



Rysunek 6. Pomiary eksperymentalne łańcuszków mikrocząstek. a) Schemat układu mikroskopu optycznego – układ pęsety optycznej z geometrią odbicia wiązki od powierzchni kropli (wstawka kołowa). b) Zdjęcia w kolejności chronologicznej pokazujące powstawanie i propagację łańcuszka mikrocząstek. Rysunek z publikacji B4.

Podsumowanie

Oba osiągnięcia naukowe były pracą eksperymentalną w dziedzinie optyki i fotoniki, opartą na układach mikroskopowych i wykorzystującą lasery pracy ciągłej i impulsowe. W ramach obu osiągnięć rozwijałem metody eksperymentalne, jak i wykorzystywałem je do badań podstawowych i materiałowych.

W ramach pierwszego osiągnięcia przedstawiłem jedne z pierwszych na świecie badań dotyczących modyfikacji niecentrosymetrycznych kryształów wykorzystywanych w optyce nieliniowej przy pomocy ultrakrótkich impulsów laserowych. Badania te są kontynuowane przez kilka grup naukowych na świecie i w chwili obecnej pozwalają na wytwarzanie trójwymiarowych struktur w nieliniowych kryształach do generacji SHG w postaci wiązek wektorowych.^{3–5} W przyszłości mogą one również znaleźć zastosowanie w optyce kwantowej do wytwarzania stanów

spłątanych trójwymiarowych wiązek wektorowych.¹³ Ja w dalszym ciągu rozwijam tą tematykę badając morfologię modyfikacji wytwarzanych przy pomocy ultrakrótkich impulsów światła w różnych niecentrosymetrycznych kryształach i jej zależność od parametrów impulsów laserowych.

W ramach drugiego osiągnięcia zaprezentowałem eksperymentalne badania nad ruchem rezonansowych nanocząstek złota i krzemu w pułapce optycznej indukowanych spinowym i orbitalnym momentem pędu światła. Badałem również efekty termiczne i pokazałem eksperymentalną weryfikację teorii HBM dla nanoobiektywów w pułapce optycznej. W tej tematyce, prowadzę obecnie badania nad możliwością uzyskania indukowanego światłem chłodzenia w mikrokryształach domieszkowanych jonami Iterbu oraz rozwijam metody eksperymentalne pozwalające na pomiar szybkie pomiary mikroreologiczne cieczy w mikroskali w funkcji temperatury, w których podgrzewane będzie jedynie najbliższe otoczenia cząstki.

Referencje

1. Du, D., Liu, X., Korn, G., Squier, J. & Mourou, G. Laser-induced breakdown by impact ionization in SiO₂ with pulse widths from 7 ns to 150 fs. *Appl Phys Lett* 64, 3071–3073 (1994).
2. Gattass, R. R. & Mazur, E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials. *Nat Photonics* 2, 219–225 (2008).
3. Xu, T. *et al.* Three-dimensional nonlinear photonic crystal in ferroelectric barium calcium titanate. *Nat Photonics* 12, 591–595 (2018).
4. Mazur, L. M., Liu, S., Chen, X., Krolikowski, W. & Sheng, Y. Localized Ferroelectric Domains via Laser Poling in Monodomain Calcium Barium Niobate Crystal. *Laser Photon Rev* 15, 2100088 (2021).
5. Wei, D. *et al.* Experimental demonstration of a three-dimensional lithium niobate nonlinear photonic crystal. *Nat Photonics* 12, 596–600 (2018).
6. Shimotsuma, Y., Kazansky, P. G., Qiu, J. & Hirao, K. Self-organized nanogratings in glass irradiated by ultrashort light pulses. *Phys Rev Lett* 91, 247405 (2003).
7. Bhardwaj, V. R. *et al.* Optically produced arrays of planar nanostructures inside fused silica. *Phys Rev Lett* 96, 057404 (2006).
8. Yu, Y. *et al.* A broadband, quasi-continuous, mid-infrared supercontinuum generated in a chalcogenide glass waveguide. *Laser Photon Rev* 8, 792–798 (2014).

9. Ashkin, A. Acceleration and Trapping of Particles by Radiation Pressure. *Phys Rev Lett* 24, 156–159 (1970).
10. Ashkin, A., Dziedzic, J. M., Bjorkholm, J. E. & Chu, S. Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles. *Opt. Lett.* 11, 288–290 (1986).
11. He, H., Friese, M. E. J., Heckenberg, N. R. & Rubinsztein-Dunlop, H. Direct Observation of Transfer of Angular Momentum to Absorptive Particles from a Laser Beam with a Phase Singularity. *Phys Rev Lett* 75, 826 (1995).
12. Rings, D., Schachoff, R., Selmke, M., Cichos, F. & Kroy, K. Hot Brownian motion. *Phys Rev Lett* 105, 090604 (2010).
13. Yesharim, O., Pearl, S., Foley-Comer, J., Juwiler, I. & Arie, A. Direct generation of spatially entangled qubits using quantum nonlinear optical holography. *Sci Adv* 9, eade7968 (2026).

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

Wykazałem się istotną aktywnością naukową na trzech różnych uczelniach:

1. Australian National University, Canberra, Australia,
2. Chalmers University of Technology, Goteborg, Szwecja,
3. Politechnika Wrocławska, Wrocław, Polska.

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

6.1. Dydaktyka

6.1.1. Wykaz prowadzonych zajęć dydaktycznych:

1. Fizyka I - ćwiczenia obliczeniowe i laboratoria dla studentów studiów I stopnia w języku polskim,

2. Zaawansowane Materiały Funkcjonalne - wykład dla studentów studiów II stopnia w języku polskim,
3. Optyka nieliniowa - wykład i laboratoria dla studentów studiów I i II stopnia w języku polskim i angielskim.

6.1.2. Promotor prac dyplomowych:

1. Byłem opiekunem 4 prac inżynierskich i 2 prac magisterskich.

6.1.3. Komisje programowe i dyplomowe

Jestem członkiem komisji programowej anglojęzycznego kierunku studiów II stopnia: Advanced Nano and Biomaterials – MONABIPHOT na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej.

Jestem członkiem Komisji Egzaminów Dyplomowej na studiach I stopnia na kierunku Chemia i Inżynieria Materiałów na Wydziale Chemicznym Politechniki Wrocławskiej.

6.2. Popularyzacja nauki

W latach 2018-2022 brałem czynny udział w Dolnośląskim Festiwalu Nauki prezentując wykład i pokaz dla uczniów szkół podstawowych i ponadpodstawowych pod tytułem „Siła Światła”. W 2023 roku brałem udział w Nocy Politechniki z pokazami dla dzieci w tematyce szczypiec optycznych i ciekłych kryształów.

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

7.1. Projekty naukowe

W trakcie swojej kariery naukowej uzyskałem finansowanie dla 5 projektów naukowych, w których pełniłem lub pełnię rolę kierownika (PI):

1. Mobilność plus (Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego), Nr grantu: 1080/MOB/2013, 2014-2015

Tytuł: *„Przestrzenna modulacja drugorzędowych nieliniowych właściwości optycznych ferroelektryków i półprzewodników w mikroskali przy wykorzystaniu ultrakrótkich impulsów laserowych”*

2. Polonez (Narodowe Centrum Nauki), Nr grantu: 2016/23/P/ST3/02156, 2018-2020

Tytuł: *„Optical nanomanipulation: stochastic motion of a nanoparticle trapped by structured light”*

3. Sonata (Narodowe Centrum Nauki), Nr grantu: 2019/35/D/ST3/02272, 2020-2024

Tytuł: *„Szczypce optyczne w badaniu translacyjnej i rotacyjnej aktywnej mikrореologii materiałów miękkich”*

4. Opus LAP (Narodowe Centrum Nauki), Nr grantu: 2020/39/I/ST3/01827, 2021-2025

Tytuł: *„Anty-Stokesowskie Chłodzenie dla Fluidyki”*

5. Sonata BIS (Narodowe Centrum Nauki), Nr grantu: 2022/46/E/ST3/00152, 2023-2028

Tytuł: *„Modyfikacje nieliniowych właściwości optycznych w kryształach przy użyciu ultraszybkich impulsów laserowych”*