



**HORYZONTY
NANO —
TECHNOLOGII**

21.09 — 23.09
Wydział Fizyki UW

KSIĘGA ABSTRAKTÓW

I ogólnopolskiej studencko - doktoranckiej
konferencji **“Horyzonty Nanotechnologii”**



**WYDZIAŁ
FIZYKI**
UNIwersytet
Warszawski

REDAKCJA
Kacper Bożycki

PATRONAT HONOROWY



Ministerstwo
Rozwoju i Technologii

PATRONAT HONOROWY



RZECZNIK

Małych i Średnich Przedsiębiorców
AGNIESZKA MAJEWSKA

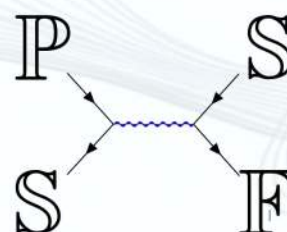
NCBR 

Narodowe Centrum Badań i Rozwoju

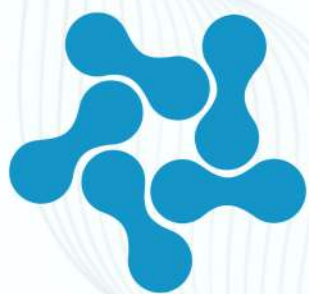
PATRONAT MEDIALNY



97,1 FM



SPONSOR NAGRÓD



nanores
lab

Spis treści

— ABSTRAKTY PLENARNE —	7
Cienkie struktury warstwowe LbL dla miniaturowych warstw sensorycznych	7
<i>Agnieszka Jastrzębska¹</i>	
Nanoroboty i maszyny biologiczne: jak projektować maszyny funkcjonujące w huraganie	8
<i>Prof. Robert Hołyst¹</i>	
Komercjalizacja w praktyce	9
<i>Dr inż. Piotr Hańczy^{1,2}</i>	
Highly Conductive Paths In Diamond And Their Application In High Pressure Measurements	10
<i>M. Gramala^{1,2}, A. Sikora³, A. Chudzynska^{1,4}, Ł. Gelczuk², F. Dybała², P. Modrzyński^{1,2} i R. Kudrawiec²</i>	
Miniature, Low-Power X-Ray Source For Special Applications	11
<i>P. Kunicki¹</i>	
The Universal Optical System For Monitoring And Control The Laser Deposition Process	12
<i>P. Kunicki¹</i>	
Innovative Endoscopy Light Source Based On Carbon Materials	13
<i>M. Sikora^{1,2}, P. Kunicki¹</i>	
Od nauki do biznesu – na przykładzie #polskafotonika	14
<i>Maciej J. Nowakowski¹</i>	
— ABSTRAKTY USTNE —	15
Charakterystyka emiterów pojedynczych fotonów w azotku galu uzyskiwanym metodą MOVPE	15
<i>M.Kasprzyk¹, J.Misiak¹, N.Dalla¹, P.Prystawko², H.Turski², T.Jakubczyk¹</i>	
Modelowanie <i>in silico</i> adsorpcji anionu glutaminianowego na modyfikowanym bizmucie 2D w redukcji ekscytotoksyczności	16
<i>E.Kaszkurska¹</i>	
Funkcjonalne materiały porowate oparte na motorach molekularnych napędzanych światłem – synteza i charakteryzacja	17
<i>J. Krajnik¹, J. Perego², A. Comotti², P. Ciecior¹, W. Danowski¹</i>	

Wpływ modyfikacji składu na przełączalność analogów błękitu pruskiego <i>J. Malik¹, M. Fitta², W. Sas²</i>	18
Towards resonant energy transfer in a MoSe₂/ReS₂ 2D heterostructure with tunable interlayer separation <i>T. Plak¹, N. Dalla¹, C. Mohanty¹, A. Karmakar¹, T. Jakubczyk¹</i>	19
Novel Approaches to the Fabrication of Metal Nanoparticles <i>B. Przybyła¹, K. Narojczyk¹, B. Nasiłowska²</i>	20
Interakcja fonon-ekscyton w magnetycznej studni kwantowej <i>A. Rzewuski¹, M. Kobecki¹, W. Pacuski¹, A. Szczurba¹, P. Kossacki¹</i>	21
Composition-Dependent Magnon Dynamics in CrSBr Mixed Crystals <i>Z. Śnioch¹, R. Komar¹, K. Mosina², A. Söll², Z. Sofer², P. Kossacki and T. Kazimierzczuk¹</i>	22
Nanokwiatki papainy w projektowaniu bioaktywnych materiałów opatrunkowych z ekstraktami <i>Clitoria ternatea</i> <i>Alina Zbaranskaya¹, Zuzanna Tkacz¹, Dorota Chetminiak-Dudkiewicz¹</i>	23
Nanokompozytowe żelkoty z MWCNT jako aktywne powłoki przeciwołódnieniowe dla turbin wiatrowych <i>A. Łabęda¹, B. Przybyszewski¹, R. Kozera¹, K. Ziętkowska¹, P. Jóźwiak¹ i A. Boczkowska¹</i>	24
— ABSTRAKTY PLAKATOWE —	25
Synthesis and structural characterization of nanometer sized atomically precise silver nanoclusters <i>Łukasz Cieszyński^{1,2}, Anna Makal²</i>	25
Od kofeiny do katalizatora: projektowanie i porównanie nanoporowatych węgli do elektrosyntezy <i>M. Anioł, O. Drzewniak, dr inż. M. Odziomek</i>	26
Analiza parametrów struktur kwantowych laserów kaskadowych emitujących przy długości fali 4.55 μm. <i>K. Gruszewska¹, A. Goławska¹, D. Pierścińska¹, D. Niewczas¹, A. Krząstek¹, K. Pierściński¹</i>	27
Badanie wpływu filmów polielektrolitowych na inkorporację w nich kropek kwantowych CdSe <i>G. Gołębiowska¹, T. Lasota¹, M. Bogusz¹, A. Stawiarska¹ i M. Kołasińska-Sojka²</i>	28
Badanie dynamiki transportu w nanowarstwach tlenkowych modyfikowanych wiązką jonów w układach memrystorowych <i>J. Malik¹, M. Jóźefiak-Piróg¹, J. Chojenka²</i>	29

Funkcjonalizowane nanodrutu srebra jako platforma do badania aktywności enzymów w metabolizmie mRNA	30
<i>W. Nakoneczna¹, J. Grzymkowska¹, K. Linek¹, W. Zacheja¹, T. Olejko², J. Jemielity², S. Maćkowski³, J. Niedziółka-Jönsson^{1*}</i>	
Magnetic-field-assisted FFF 3D printing from ferromagnetic TPU-based composites	31
<i>E. Pająk¹</i>	
Synthesis of the polymer-inorganic composites and thermoelectric properties investigation	32
<i>S. Pyliński², B. Rybak¹, J. Potempa¹, M. Bielak², M. Czechowski², K. Latusek², K. Zazakowny¹</i>	
Nanostructured copper-functionalized silica-based materials for nonlinear optical applications	33
<i>Sara El Houbbadi¹, Łukasz Laskowski², Magdalena Laskowska²</i>	
Materiał MXen i jego nowa modyfikacja	34
<i>J. Ulrych¹, A. Majorczyk¹, E. Kupis¹, N. Przybojewski¹, G. Opila¹, A. Gilarska¹, J. Przewoźnik¹, M. R. Ibarra^{2,3}, C. Kapusta¹</i>	
Indukcja chiralności morfologicznej w układach matryca - dopant oraz matryca - nanocząstki funkcyjonalizowane chiralnym ligandem	35
<i>P. Wachnicka¹, M. Bagiński¹, W. Lewandowski¹</i>	
Poprawa adhezji warstwy dielektrycznej do podłoża z antymonku galu w strukturach międzypasmowych laserów kaskadowych	36
<i>M. Wowra¹, P. Kozłowski¹, J. Branas¹, W. Lorenc¹, K. Pieniak¹, K. Pierściński¹</i>	

Cienkie struktury warstwowe LbL dla miniaturowych warstw sensorycznych

Agnieszka Jastrzębska¹

¹Politechnika Warszawska, Wydział Mechatroniki, św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa

Dynamiczny rozwój nanotechnologii umożliwił odkrycie i intensywne badania materiałów dwuwymiarowych (2D), których struktura ogranicza się do pojedynczych lub kilku warstw atomowych. Do najważniejszych przedstawicieli tej klasy należą grafen, borofen, heksagonalny azotek boru, dichalkogenki metali przejściowych oraz fazy MXenes. Materiały te łączą unikalne właściwości fizykochemiczne i elektronowe, w tym wysoką przewodność elektryczną, aktywność powierzchniową oraz interesujące właściwości optyczne, tworząc atrakcyjną platformę do rozwoju miniaturowych układów sensorycznych.

Celem wystąpienia jest przedstawienie możliwości wykorzystania materiałów 2D do projektowania cienkich, warstwowych struktur o funkcjach sensorycznych. Omówione zostaną podstawowe właściwości materiałów 2D, techniki ich otrzymywania techniką Layer-by-Layer (LbL) oraz integracji w wielowarstwowe struktury, a także mechanizmy decydujące o ich czułości i selektywności. Szczególna uwaga zostanie poświęcona możliwości łączenia różnych materiałów 2D w heterostruktury, umożliwiające projektowanie miniaturowych warstw sensorycznych o kontrolowanych właściwościach i zwiększonej funkcjonalności.

Omówione zostaną również najważniejsze wyzwania związane ze stabilnością materiałów, powtarzalnością ich właściwości, integracją z podłożami oraz skalowalnością. Cienkie struktury warstwowe oparte na materiałach 2D stanowią obiecującą platformę dla dalszej miniaturyzacji systemów sensorycznych oraz rozwoju inteligentnych, czułych i energooszczędnych urządzeń.

Nanoroboty i maszyny biologiczne: jak projektować maszyny funkcjonujące w huraganie

Prof. Robert Hołyst¹

¹ *Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk, ul. M. Kasprzaka 44/52 01-224 Warszawa*

Zasady projektowania nanorobotów są istotnie różne od tych, które stosujemy przy maszynach w makroskali. Funkcjonowanie nanorobota w szumie termicznym można by porównać z działaniem maszyny makroskopowej w huraganie.

Na wystąpieniu omówię zasady projektowania efektywnych nanorobotów, przedstawię przykłady nanorobotów opracowanych przez naukowców oraz porównam je z ich biologicznymi odpowiednikami.

Komercjalizacja w praktyce

Dr inż. Piotr Hańczyc ^{1,2}

¹ Politechnika Wrocławska, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska

² Chalmers University of Technology, Chalmersplatsen 1, 412 96 Göteborg, Sweden

Komercjalizacja wyników badań naukowych wymaga połączenia potencjału badawczego z kompetencjami w zakresie transferu technologii, współpracy z biznesem oraz przygotowania rozwiązań do wdrożenia. Wykład dr inż. Piotra Hańczycy pokaże, jak proces ten przebiega systemowo w praktyce - od identyfikacji potencjału aplikacyjnego wyników badań, poprzez rozwój technologii i budowanie relacji z otoczeniem gospodarczym, aż po przygotowanie rozwiązania do komercjalizacji w formie spółki spin-off lub spin-out.

Istotnym elementem procesu jest działalność brokerska, obejmująca identyfikację technologii o potencjale wdrożeniowym, łączenie środowiska naukowego z partnerami gospodarczymi oraz wspieranie przejścia od wyników badań do zastosowań rynkowych. Analiza tych doświadczeń wskazuje, że skuteczna komercjalizacja wymaga jednoczesnego uwzględnienia aspektów technologicznych, organizacyjnych, własności intelektualnej i biznesowych. Szczególne znaczenie ma stworzenie warunków umożliwiających przejście od wartości naukowej rozwiązania do jego rzeczywistego wykorzystania gospodarczego i społecznego.

Highly Conductive Paths In Diamond And Their Application In High Pressure Measurements

M. Gramala^{1,2}, A. Sikora³, A. Chudzynska^{1,4}, Ł. Gelczuk², F. Dybała², P. Modrzyński^{1,2} i R. Kudrawiec²

¹ Nanores Partner Sp. z o. o. sp. k., Bierutowska 57-59, 51-317 Wrocław, Poland

² Department of Semiconductor Materials Engineering, Wrocław University of Science and Technology, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland

³ Department of Nanometrology, Faculty of Electronics, Photonics and Microsystems, Wrocław University of Science and Technology, Janiszewskiego 11-17, 50-372 Wrocław, Poland

⁴ Department of Optical Spectroscopy, W. Trzebiatowski Institute of Low Temperature and Structural Research of the Polish Academy of Sciences, Okólna 2, 50-422 Wrocław, Poland

Diamonds are renowned for their remarkable properties, including impressive mechanical strength, excellent thermal conductivity, and significant electrical resistance, which makes them ideal for applications in high-power and opto-electronics. Nevertheless, the creation of conductive structures within diamond remains a notable technological hurdle. During this project, we have introduced a method for the precise fabrication of amorphous conductive pathways in monocrystalline diamond utilizing focused ion beam (FIB) technology. We have precisely determined the resistivity and thickness of these fabricated structures and conducted a thorough morphological characterization. Our findings revealed that the optimal charge dose for achieving minimal resistance was 1017 ions/cm². The resulting structures displayed an amorphous morphology, and elemental analysis confirmed the incorporation of gallium ions into the modified material. The resistivity measured for these conductive paths was an impressive 30 μΩ m, which is significantly lower than results from prior studies and only 1-2 orders of magnitude greater than that of metals. Furthermore, we showed the potential applications of this technology in high-pressure chambers and in the development of highpressure sensors using diamond anvils. This research offers meaningful insights into the fabrication of conductive structures in diamonds using FIB technology and paves the way for new advancements in diamond electronics.

We pursued the project within instrument Program Operacyjny Inteligentny Rozwój 1/4.1.4/2020 - Projekty Aplikacyjne about „Development of sensors for extreme pressure measurements”, funded by the European Union from European Regional Development Fund under Smart Growth Operational Programme 2014-2020.

Miniature, Low-Power X-Ray Source For Special Applications

P. Kunicki¹

¹ *Compact X Sp. z o. o. sp. k., Bierutowska 57-59, 51-317 Wrocław, Poland*

With the advent of innovations like the Compact X, new possibilities for X-ray technology are emerging, particularly in areas that were previously difficult or impossible to implement. This technology can be utilized in a variety of applications and conditions, including specific and demanding situations such as working at heights, in mine shafts, or even in space, as well as in home medical diagnostics, where it facilitates rapid and effective imaging to assess a patient's condition. The Compact X features high mechanical resistance, which is essential for X-ray sources used in industrial applications and non-laboratory conditions. Its ability to modulate radiation intensity allows it to be applied to various uses and materials without the need for complicated modifications. Additionally, the miniature design of the Compact X significantly reduces the cost of the device while enhancing its mechanical durability and expanding its range of applications. Finally, its mobility enables broader use of X-ray technology in locations and situations where it was previously challenging or impossible. The development of X-ray technology – from Roentgen's discovery to contemporary innovations – has transformed numerous fields, including medical imaging, quality control and security screening. The introduction of the Compact X has further expanded the possibilities for X-ray usage in demanding environments, thanks to its robust design, adaptability, and enhanced safety features. In the future, the Compact X source is planned to be adapted to security applications, such as scanning for harmful, hazardous or prohibited materials, as well as in the field of dentistry.

We pursued the project within instrument Fast Track 4/1.1.1/2018 about „Miniature, low-power x-ray source for special applications”, funded by the European Union from European Regional Development Fund under Smart Growth Operational Programme 2014-2020.

The Universal Optical System For Monitoring And Control The Laser Deposition Process

P. Kunicki¹

¹ *Aberrans X Sp. z o. o., Bierutowska 57-59, 51-317 Wrocław, Poland*

Laser deposition is one of the methods used to apply functional coatings. The critical parameter that should be monitored in this process is the distance between the laser head nozzle and the processed material (stand-off parameter). Currently used systems do not monitor the mentioned parameter during deposition, which often results in the presence of defects in the manufactured coatings.

We present a universal optical system for real-time monitoring and control of the laser deposition process that is based on a confocal chromatic sensor. In our solution the determination of the stand-off parameter is possible thanks to the developed algorithm to process the spectral signal. In order to get clear signal it was crucial to use specific intensity of the measurement beam. The required power was achieved by creating an original broadband source and increasing the light coupling efficiency of the used sensor. Using a focused ion beam (FIB) microscope the tips of the optical fibers were modified to form a Fresnel microlens.

Validation tests of the system were carried out using coatings that differed in height and chemical composition. The operation of the system for various deposition trajectories was also checked. The results confirmed the usefulness of the developed solution in controlling laser deposition process and compatibility with commercially available laser heads.

We pursued the project within instrument Fast Track 1/1.1.1/2021 about „The universal optical system for monitoring and controlling the laser metal deposition process.”, funded by the European Union from European Regional Development Fund under Smart Growth Operational Programme 2014-2020. This project was carried out in cooperation with Wrocław University of Technology.

Innovative Endoscopy Light Source Based On Carbon Materials

M. Sikora^{1,2}, P. Kunicki¹

¹ Whitecarbon Sp. z o. o., Bierutowska 57-59, 51-317 Wrocław, Poland

² Faculty of Electronics, Photonics and Microsystems, Wrocław University of Science and Technology,
Janiszewskiego 11-17, 50-372 Wrocław, Poland

For years, carbon has continued to astonish scientists with its properties. As one of the most fascinating elements, it consistently reveals new dimensions of its potential. While commonly associated with its black color, recent scientific reports demonstrate that carbon-based materials exhibit the ability to emit white light [1-3]. When graphene materials are excited by a focused near infrared laser diode, they generate efficient radiation emission within the visible spectrum (VIS). This emitted light is broad-spectrum, covering a range from 360 to 900 nm.

Research has shown that this method offers higher energy efficiency than conventional tungsten or halogen bulbs, while maintaining a high quality of light comparable to natural sunlight [1-3]. The quality of this light is characterized by parameters such as the color rendering index (CRI) and color temperature. For the studied light source, these values exceed 99 and approximately 4000 K, respectively (for comparison, sunlight, the best source for color rendering, has a CRI of 100). These features make this light source competitive with current energy-efficient lighting technologies, such as LEDs and fluorescent lamps, which are typically associated with a lower CRI (around 80) and a cooler color temperature. The high CRI and sunlight-like color temperature provide a significant advantage, especially in applications such as endoscopy, where accurate color revealing, particularly in the red spectrum, is crucial for effective diagnostic procedures and endoscopic surgeries.

The research and development work undertaken was aimed at developing graphene-based carbon materials, nanodiamonds and their composites and their use as a novel light source in an endoscopic illuminator. One challenge related to light emission from graphene-based active materials is the high emission threshold. Thus, reducing this threshold was a key objective of the project. Structural and morphological factors of carbon materials, including graphene oxide, nanodiamonds, and composite materials, were investigated to assess their impact on emission intensity, spectroscopic properties, and emission stability. These studies allowed for the selection of a group of materials with optimal properties for use as novel white light sources, currently unavailable on the market. The developed device is characterised by energy efficiency of 0.15 W/W, a luminous flux of 1800 lm, high light intensity stability and quiet operation (< 20 dB), placing it in a competitive position in the endoscope illuminator market.

References:

- [1] W. Strek, et al. *Sci Rep* **7**, 41281 (2017).
- [2] W. Strek, et al. *Light Sci Appl* **4**, e237 (2015).
- [3] A. Olejniczak, et al. *Carbon*, Volume **146**, 438-446 (2019).

We pursued the project within instrument Program Operacyjny Inteligentny Rozwój 1/1.1.1/2021 – Szybka ścieżka about „Innovative endoscopy light source based on carbon materials”, funded by the European Union from European Regional Development Fund under Smart Growth Operational

Od nauki do biznesu – na przykładzie #polskafotonika

Maciej J. Nowakowski¹

¹*Creotech Quantum S.A.*

Rozwijanie biznesu opartego na odkryciach naukowych zasadniczo różni się od uprawiania nauki – ale także od tradycyjnych rodzajów biznesów. Odkrycie od opartego na nim produktu dzieli długa droga i wiele trudnych decyzji.

Omówię przykłady polskich firm fotonicznych, które z powodzeniem rozwinęły się w oparciu o wyniki badań naukowych, wspomnę także o takich, którym się nie udało. Wskażę czynniki sukcesu firmy technologicznej i zaproponuję sposób postępowania przez badaczy wchodzących w świat przedsiębiorczości.

Charakterystyka emiterów pojedynczych fotonów w azotku galu uzyskiwanym metodą MOVPE

M.Kasprzyk¹, J.Misiak¹, N.Dalla¹, P.Prystawko², H.Turski², T.Jakubczyk¹

¹Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, Polska

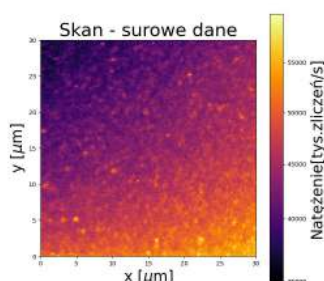
²Instytut Wysokich Ciśnień Polskiej Akademii Nauk (Unipress), Warszawa, Polska

Emitery pojedynczych fotonów znajdują szerokie zastosowanie m.in. w komunikacji kwantowej, procedurach kwantowej dystrybucji klucza (QKD) oraz w obliczeniach kwantowych. Istotnym wyzwaniem technologicznym pozostaje jednak konieczność chłodzenia układów do temperatur kriogenicznych (poniżej ok. 200 K) w celu uzyskania wysokiej jakości światła kwantowego.

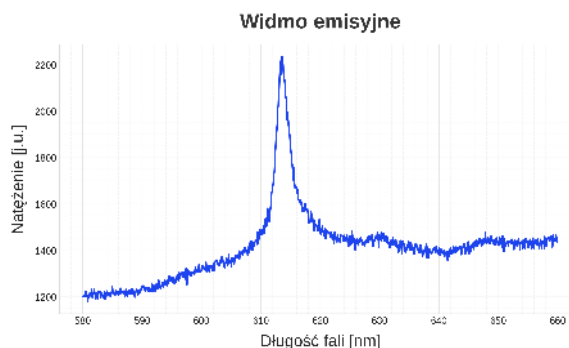
Obiecującą alternatywą pozwalającą na rozwiązanie tego problemu jest azotek galu (GaN) – dojrzały półprzewodnik o szerokiej przerwie energetycznej. Centra emisyjne w GaN mają charakter centrów barwnych, powstających w wyniku obecności defektów i wakancji w sieci krystalicznej. W widmach fotoluminescencji objawiają się one w postaci wąskich, intensywnych linii emisyjnych (tzw. linii zero-fononowych, ZPL, ang. zero-phonon line), odznaczających się ponad tłem widmowym. Przykładową mapę fotoluminescencji struktury oraz widmo pojedynczego emitera przedstawiono odpowiednio na Rysunku 1a i 1b.

W niniejszej pracy przeanalizowano właściwości emiterów w warstwach GaN wyhodowanych za pomocą epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE). Opracowano również algorytmy statystyczne służące do automatycznej analizy map fotoluminescencji, które umożliwiają identyfikację potencjalnych emiterów oraz weryfikację jakości dopasowania profilu widmowego na podstawie współczynnika determinacji R^2 .

Dla warstwy GaN o grubości 2 μm , wyhodowanej metodą MOVPE na podłożu szafirowym, zaobserwowano średnią gęstość emiterów równą $0.04 \mu\text{m}^{-2}$. Przebadano również inne próbki wyhodowane przy użyciu metody MOVPE, w których celem było wytworzenie cienkiej warstwy zawierającej glin (Al) w matrycy GaN w celu kontrolowanego indukowania defektów sieciowych. Mimo że w skali całej próbki odnotowano spadek gęstości emiterów o około 50%, analiza przestrzenna wykazuje, że obszar o najwyższej lokalnej koncentracji centrów emisyjnych znajduje się bezpośrednio w sąsiedztwie wprowadzonej warstwy glinu.



Rysunek 1a. Mapa fotoluminescencji badanej struktury - jasne punkty odpowiadają potencjalnym emiterom.



Rysunek 1b. Widmo fotoluminescencji pojedynczego emitera z wyraźną linią zero-fononową (ZPL).

Funkcjonalne materiały porowate oparte na motorach molekularnych napędzanych światłem – synteza i charakteryzacja

J. Krajnik¹, J. Perego², A. Comotti², P. Ciecior¹, W. Danowski¹

¹ Wydział Chemii Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, Polska

² Università degli Studi di Milano-Bicocca, Mediolan, Włochy

Maszyny molekularne to układy zdolne do wykonywania ruchu lub zmiany kształtu pod wpływem określonego bodźca. Natura wykorzystuje wiele tego typu systemów o różnym stopniu złożoności. Są to między innymi białka transportowe – kinezyiny, miozyny lub dyneiny, enzymy – syntaza ATP, helikaza oraz polimeraza DNA, czy nawet struktury komórkowe – wici i rzęski [1, 2, 3].

Układy te zainspirowały naukowców do stworzenia syntetycznych maszyn molekularnych. Ich kontrolowany ruch jest napędzany zewnętrznym czynnikiem, którym mogą być bodźce chemiczne, termiczne lub światło [4, 5]. Te małowymiarowe związki wykorzystywane są jako elementy inteligentnych materiałów czy nanourządzeń, które mogłyby znaleźć zastosowanie w medycynie, inżynierii, czy systemach energetycznych [6]. Jednakże, jednymi z największych wyzwań pozostają precyzyjna kontrola kierunkowego ruchu syntetycznych nanomaszyn oraz opracowanie układów molekularnych pracujących w skoordynowany sposób, podobnie jak ich naturalne odpowiedniki [7, 8].

W wystąpieniu przedstawiona zostanie synteza oraz charakterystyka spektroskopowa i fizykochemiczna uzyskanych motorów molekularnych, które następnie wykorzystano do otrzymania funkcjonalnych materiałów porowatych typu PAF (ang. *porous aromatic frameworks*). Opracowane polimery, cechujące się dużą powierzchnią właściwą i stabilnością chemiczną, umożliwiają integrację wielu cząsteczek, pozwalając na przeniesienie efektów zachodzących na poziomie molekularnym na właściwości całego porowatego materiału [9]. Ponadto, zaprezentowane zostaną wyniki badań sorpcji gazów, ukazując możliwe zastosowania uzyskanych układów. Przeprowadzone badania stanowią krok w kierunku rozwoju funkcjonalnych systemów organicznych o kontrolowanych właściwościach.

[1] M. Schliwa, et al. *Nature* **422**, 759 – 765 (2003).

[2] S. S. Patel, et al. *Curr. Opin. Chem. Biol.* **15**, 595 – 605 (2011).

[3] K. Kinbara, et al. *Chem. Rev.* **105**, 1377 – 1400 (2005).

[4] S. Kassem, et al. *Chem. Soc. Rev.* **46**, 2592 – 2621 (2017).

[5] P. L. Wang, et al. *Nature* **637**, 594 – 600 (2025).

[6] I. Aprahamian *ACS Cent. Sci.* **6**, 347 – 358 (2020).

[7] A. Coskun, et al. *Chem. Soc. Rev.* **41**, 19 – 30 (2011).

[8] B. Wang, et al. *Curr. Opin. Biotechnol.* **97**, 103400 – 103407 (2026).

[9] C. Stäler, et al. *Chem. Sci.* **13**, 8253 – 8264 (2022).

Wpływ modyfikacji składu na przełączalność analogów błękitu pruskiego

J. Malik¹, M. Fitta², W. Sas²

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

² Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, Kraków, Polska

Ze względu na swoje szerokie zastosowania w technice oraz w inżynierii medycznej (ogniwa paliwowe, układy kwantowe czy markery substancji) magnetyzm molekularny cieszy się sporym zainteresowaniem badaczy. Analogi błękitu pruskiego stanowią grupę materiałów molekularnych o unikalnych właściwościach magnetycznych i elektronowych. Szczególnie interesujące są układy $\text{RbMn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$, które wykazują odwracalne zjawisko przełączania związane z transferem elektronu pomiędzy centrami Fe i Mn. Efekt ten prowadzi do istotnych zmian właściwości magnetycznych materiału, czyniąc go obiecującym kandydatem do zastosowań w pamięciach molekularnych oraz materiałach funkcjonalnych.

W niniejszym projekcie zbadano wpływ częściowej substytucji kompleksów heksacyjanożelazianowych przez kompleksy heksacyjanokobaltianowe oraz heksacyjanochromianowe w związkach o składzie $\text{RbMn}[\text{Fe}(\text{CN})_6]_{1-x}[\text{M}(\text{CN})_6]_x$, gdzie $\text{M} = \text{Co}$ lub Cr , przy zachowaniu wysokiej zawartości rubidu. Syntezowano serie próbek zawierających domieszkę $[\text{Co}(\text{CN})_6]$ oraz $[\text{Cr}(\text{CN})_6]$ o stężeniach 2,5%, 5% i 10% względem centrów $[\text{Fe}(\text{CN})_6]$.

Głównym celem badań jest określenie wpływu niewielkiej ilości jonów kobaltu i chromu na zdolność materiałów do zachowania efektu przełączania oraz wyznaczenie granicy koncentracji domieszki, przy której właściwości te ulegają osłabieniu lub zanikają. Otrzymane próbki poddano charakterystyce strukturalnej oraz magnetycznej, a uzyskane wyniki porównano z materiałem niedomieszkowanym. Uzyskane rezultaty mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia mechanizmów odpowiedzialnych za przełączalność w analogach błękitu pruskiego oraz stanowić podstawę do projektowania nowych materiałów funkcjonalnych o kontrolowanych właściwościach magnetycznych.

W trakcie badań zaobserwowano zjawisko przełączalności dla materiałów częściowo substytuowanych przez kompleksy heksacyjanochromianowe i heksacyjanokobaltianowe.

W projekcie wykorzystano następujące techniki pomiarowe: skaningową mikroskopię elektronową (SEM), magnetometrię z wykorzystaniem magnetometru typu MPMS XL7 oraz spektroskopię rentgenowską z dyspersją energii (EDS).

[1] T. Thu Viet, et al. *Inorg. Chem.* **61**, 2945–2953 (2022).

Towards resonant energy transfer in a MoSe₂/ReS₂ 2D heterostructure with tunable interlayer separation

T. Plak¹, N. Dalla¹, C. Mohanty¹, A. Karmakar¹, T. Jakubczyk¹

¹*Faculty of Physics, University of Warsaw, Ludwika Pasteura 5, 02-093 Warsaw*

We present an experimental platform designed to study distance-dependent Förster resonant energy transfer [1] in a MoSe₂/ReS₂ van der Waals heterostructure with dynamically controlled interlayer distance. The interlayer distance is tuned in a controlled manner by piezoelectric positioners, allowing systematic investigation of measurement methodology.

The choice of MoSe₂ and ReS₂ is motivated by their spectral overlap of MoSe₂ absorption and ReS₂ emission (20.7%), which enhances resonant energy transfer between the donor ReS₂ and acceptor MoSe₂ layers [2].

The key feature of this approach is the use of piezoelectric positioners to set and adjust interlayer distance between monolayer flakes mounted separately. The approach is conceptually similar to distance control in tunable Fabry-Pérot microcavities, where piezoelectric positioners are used to stabilize and scan the cavity width. This configuration eliminates uncertainties inherent to permanently stacked heterostructures and allows direct experimental access to study distance dependent mechanisms in a fully tunable geometry.

To minimize the interlayer distance, three successive approaches were implemented: the approach of flat substrates, substrates with a mesa structure, and a convex substrate. Each approach represented a step in the optimization of the experimental system, with the goal of developing a stable, straightforward, and precise method for complete control of the interlayer separations on the order of tens of nanometers. The effectiveness and results of those methods will be presented.

[1] T. Förster, "Zwischenmolekulare Energiewanderung und Fluoreszenz", *Annalen der Physik* **437** (1948).

[2] A. Karmakar, A. Al-Mahboob, C. E. Petoukhoff et al., "Dominating Interlayer Resonant Energy Transfer in Type-II 2D Heterostructure", *ACS Nano* 2022 **16** (3), 3861–3869 *Nano Letters* **22** (2022).

Novel Approaches to the Fabrication of Metal Nanoparticles

B.Przybyła¹, K.Narojczyk¹, B.Nasiłowska²

¹ Doctoral School, Military University of Technology, gen. S.Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland

² Institute of Optoelectronics, Military University of Technology, gen. S.Kaliskiego 2, 00-908 Warsaw, Poland

Nanoparticles are defined as objects with at least one dimension ranging from 1 nm do 100 nm. Reducing the size of the particles and increasing their surface area results in unique and enhanced properties, such as a more desirable size or morphology [1]. For this reason, nanoparticles have found applications in various fields, such as medicine, pharmacy, and materials engineering. Several main groups of nanoparticles can be distinguished: fullerenes, metallic nanoparticles, ceramic nanoparticles, and polymeric nanoparticles [2].

The literature describes many methods for synthesizing nanoparticles, which are divided into two main groups: bottom-up methods and top-down methods. The authors of this publication primarily use methods based on the reduction of metal ions [1]. However, new solutions and approaches to the synthesis of metal nanoparticles are constantly being sought.

This publication describes a method for producing nanoparticles of various metals using a photosensitive polymer material deposited on an ultrathin, homogeneous semiconductor crystal. To confirm the presence of the obtained nanostructures, analyses were conducted using scanning electron microscopy (Quanta 25 FEG FEI) (Fig. 1a) and emission spectroscopy methods, using an Nd:YAG laser generating radiation with a wavelength of 1064 nm (Fig. 1b).

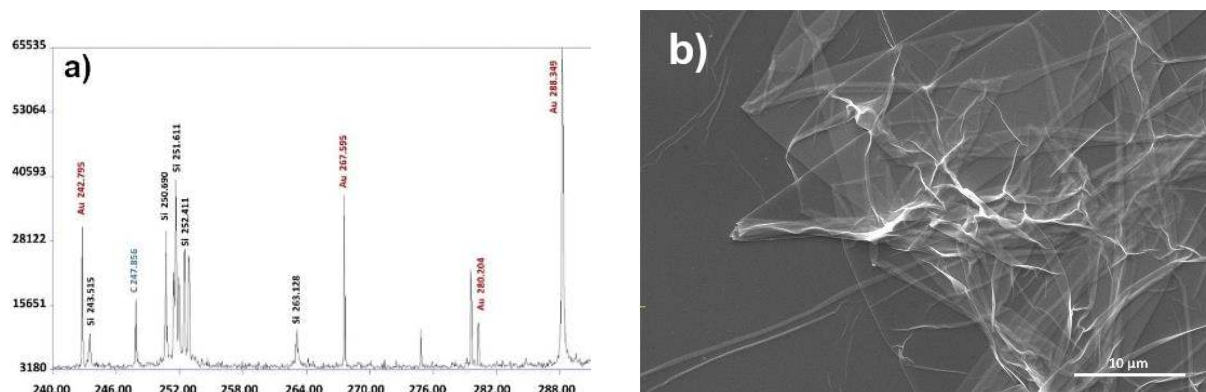


Fig. 1. LIBS analysis results (a), morphology of the resulting gold nanoplates imaged using SEM (b).

[1] Altammar, K. A. A review on nanoparticles: characteristics, synthesis, applications, and challenges. *Frontiers in microbiology*, **14**, 1155622. (2023)

[2] Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian journal of chemistry*, **12**(7), 908-931. (2019)

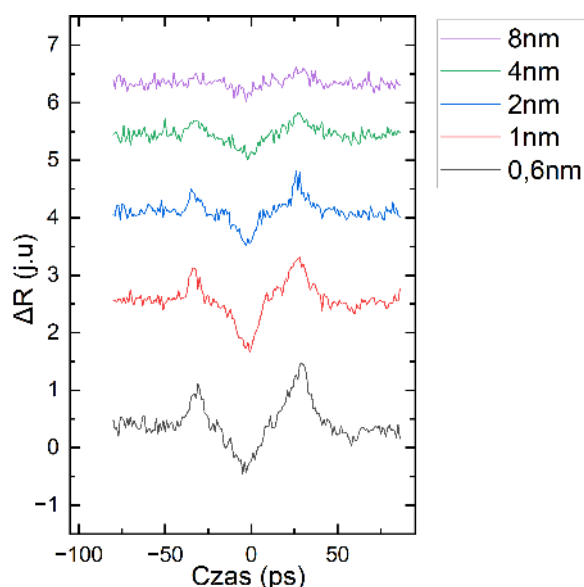
Interakcja fonon-ekscyton w magnetycznej studni kwantowej

A. Rzewuski¹, M. Kobecki¹, W. Pacuski¹, A. Szczerba¹, P. Kossacki¹

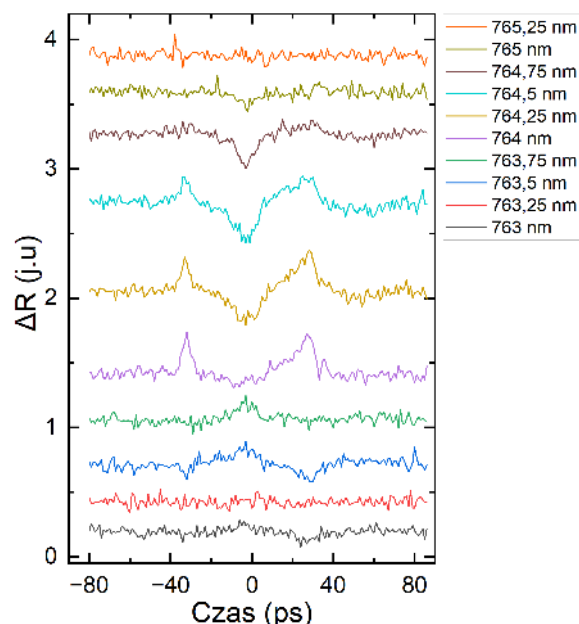
¹ Wydział Fizyki UW, Warszawa, Polska

Fonony – zbiorowe wzbudzenia sieci krystalicznej – są obiecującym nośnikiem energii i informacji. W odpowiednich strukturach mogą propagować się na duże odległości, a dzięki silnemu oddziaływaniu z innymi rodzajami wzbudzeń, elementy oparte na fononach mają potencjał stanowić część bardziej rozbudowanych systemów. W tej pracy prezentujemy kriogeniczne pomiary pompa-sonda charakteryzujące interakcję paczki fononowej z ekscytonami w półprzewodnikowej, magnetycznej studni kwantowej Cd(Mn,Te) zamkniętej pomiędzy barierami Cd(Mg,Te). Próbka była wyhodowana na warstwie buforowej CdTe na substracie GaAs. Na odwrocie próbki o grubości 100 μm znajduje się warstwa glinu o grubości 100 nm, w której wzbudzany jest impuls akustyczny.

Badania przedstawiają wpływ fononów na intensywność odbicia sondy dostrojonej do rezonansu ekscytonowego podczas przejścia impulsu akustycznego przez studnię kwantową utrzymywaną w temperaturze 5 K. Za pośrednictwem potencjału deformacyjnego impuls ten przesuwa energię rezonansu ekscytonowego, prowadząc do zmiany rejestrowanego sygnału [1]. Charakterystyka zarejestrowanych zmian zależy od energii wiązki sondującej, jej szerokości spektralnej oraz amplitudy impulsu akustycznego. Ze względu na obecność jonów Mn⁺ w badanej studni, sygnał jest podatny na zmiany pola magnetycznego, którym można wpływać na fotoelastyczność studni. Zmieniając poszczególne parametry układu jesteśmy w stanie poznać naturę interakcji fonon-ekscyton w magnetycznej studni kwantowej w obecności pola magnetycznego.



Rysunek 1: Pomiary pompa-sonda wykonane sondą o różnej szerokości widma. (Czas 0 ps wybrany arbitralnie.)



Rysunek 2: Pomiary pompa-sonda wykonane sondą o wąskim widmie, którego środek odpowiada różnym długościom fali. (Czas 0 ps wybrany arbitralnie.)

[1] M. Kobecki, A. V. Scherbakov, et al. *Phys. Rev. Lett.* **128**, 157401 (2022)

Composition-Dependent Magnon Dynamics in CrSBr Mixed Crystals

Z. Śnioch¹, R. Komar¹, K. Mosina², A. Söll², Z. Sofer², P. Kossacki and T. Kazimierczuk¹

¹ *Faculty of Physics, University of Warsaw, Warsaw, Poland*

² *Department of Inorganic Chemistry, University of Chemistry and Technology Prague, Prague,*

The discovery of intrinsic two-dimensional magnets and their integration into van der Waals heterostructures have expanded the landscape of collective phenomena in reduced dimensionality systems. Of particular interest are coherent magnons – elementary spin-wave excitations of an ordered magnetic lattice – which provide a platform for optically probing spin dynamics. This approach is especially compelling in materials that combine long-range magnetic order with semiconducting character, such as CrSBr, whose intrinsic band gap enables direct optical access to spin-related excitations[1].

To explore the tunability of magnetic and optical properties beyond those of the pure CrSBr we employ mixed-crystal engineering approach, which provides a direct means of modifying magnetic interactions within a single crystalline phase. In CrSBr, partial substitution of Br with Cl enables controlled modification of exchange parameters and magnetic anisotropy while preserving the layered structure. Here, we investigate whether gradual chemical substitution preserves the long-range magnetic order of the parent compound, e.g., in terms of the magnon spectrum and its magnetic-field evolution.

In this work we study magnon excitations using two-color femtosecond pump–probe spectroscopy, which provides high-resolution access to coherent spin dynamics at low temperatures and high magnetic fields. In particular, we investigate how magnon frequencies evolve with chemical composition and external magnetic field in mixed CrSBr crystals. By systematically varying the halogen content, we track composition-dependent shifts of spin-wave modes and their field response, revealing changes in exchange interactions and magnetic anisotropy induced by controlled substitution. We find that the resulting tunability of the magnon frequency exceeds a factor of 2x, and the change follows virtual crystal approximation.

[1] Y.J. Bae, et al. *Nature* **609**, 282 – 286 (2022).

Nanokwiatki papainy w projektowaniu bioaktywnych materiałów opatrunkowych z ekstraktami *Clitoria ternatea*

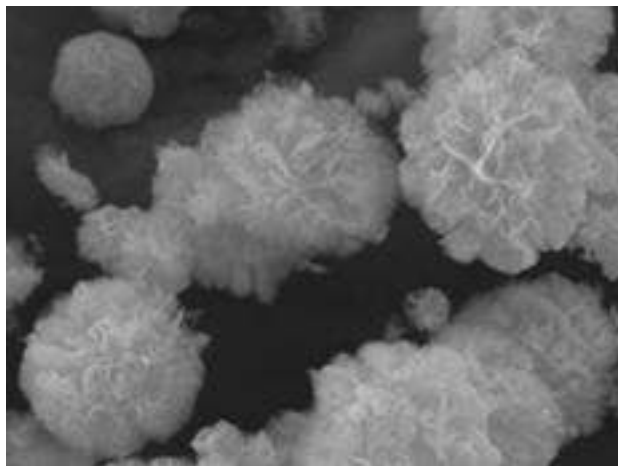
Alina Zbaranskaya¹, Zuzanna Tkacz¹, Dorota Chełminiak-Dudkiewicz¹

¹Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydział Chemii, Toruń, Polska

Nanokwiatki papainy (Rysunek 1) łączą aktywność enzymatyczną z rozwiniętą powierzchnią właściwą, co czyni je interesującymi komponentami materiałów biomedycznych [1].

Opracowano bioaktywne materiały opatrunkowe na bazie naturalnych polisacharydów, zawierające nanokwiatki papainy oraz ekstrakt z *Clitoria ternatea*. Ekstrakt roślinny stanowi źródło związków o potencjalnych właściwościach antyoksydacyjnych i przeciwzapalnych [2], natomiast kwas ferulowy zastosowano jako czynnik sieciujący matrycę [3].

Otrzymane kompozyty wykazały potencjał jako wielofunkcyjne materiały opatrunkowe do zastosowań biomedycznych.



Rysunek 1. Obraz SEM nanokwiatków.

[1] C. Sun et al. *Microchimica Acta* **193**, 449 (2026).

[2] E. J. Jeyaraj et al. *Journal of Food Science and Technology* **58**, 2054–2067 (2021).

[3] S. Pepi et al. *Heliyon* **9**, e22330 (2023).

Nanokompozytowe żelkoty z MWCNT jako aktywne powłoki przeciwołodziennowe dla turbin wiatrowych

A. Łabęda¹, B. Przybyszewski¹, R. Kozera¹, K. Ziętkowska¹, P. Józwiak¹ i A. Boczkowska¹

¹ Wydział Inżynierii Materiałowej, Politechnika Warszawska, Warszawa, Polska

Znaczenie energetyki wiatrowej we współczesnych systemach energetycznych nieustannie wzrasta. Jej efektywne wykorzystanie wiąże się jednak z koniecznością rozwiązania szeregu problemów technicznych. Jednym z najistotniejszych jest oblodzenie łopat turbin wiatrowych, które prowadzi do spadku ich wydajności, może powodować uszkodzenia mechaniczne oraz zwiększać koszty utrzymania i eksploatacji. W odpowiedzi na ten problem w niniejszej pracy podjęto próbę opracowania materiału mogącego pełnić funkcję aktywnej powłoki przeciwołodziennowej, wykorzystującej ogrzewanie rezystancyjne zasilane energią elektryczną generowaną przez turbinę.

Badania skoncentrowano na nanokompozytowych żelkotach na bazie nienasyconej żywicy poliestrowej, modyfikowanych wielościennymi nanorurkami węglowymi (MWCNT). Nanorurki wprowadzano i dyspergowano w osnowie polimerowej z wykorzystaniem procesu kalandrowania. Przygotowano próbki o różnym stężeniu napełniacza w zakresie od 0,1 do 3% mas., stosując jednocześnie dwie różne prędkości kalandrowania. W pracy analizowano wpływ składu materiału oraz parametrów procesu jego wytwarzania na wybrane właściwości użytkowe, w tym przewodnictwo elektryczne, stabilność termiczną, chropowatość powierzchni, połysk, kolor oraz zwilżalność. Analizę mikrostruktury przeprowadzono z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), ze szczególnym uwzględnieniem występowania oraz wielkości aglomeratów nanorurek węglowych.

Wyniki badań wykazały wzrost przewodnictwa elektrycznego wraz ze zwiększaniem zawartości nanorurek węglowych, osiągający wartość (503 ± 248) S/m. Potwierdza to potencjał opracowanego materiału do zastosowania jako aktywna powierzchnia przeciwołodzienna. Jednocześnie zwiększenie zawartości MWCNT prowadziło do pogorszenia jednorodności strukturalnej materiału, co wskazuje na konieczność dalszej optymalizacji zarówno jego składu, jak i parametrów procesu wytwarzania. Uzyskane wyniki stanowią podstawę do dalszego rozwoju materiałów, które w przyszłości mogą przyczynić się do zwiększenia niezawodności i efektywności pracy turbin wiatrowych.

Nie zaobserwowano natomiast istotnych zmian w zwilżalności powierzchni wraz ze zmianą zawartości nanorurek węglowych. W ramach dalszych badań planowane jest zatem zastosowanie modyfikacji chemicznej żelkotu z wykorzystaniem związków nadających powierzchni właściwości hydrofobowe. Planowane są również dodatkowe badania, które pozwolą na dokładniejszą charakterystykę opracowanych materiałów oraz ocenę ich przydatności w zastosowaniach przeciwołodziennych.

Niniejsze badania stanowią część projektu „Sustainable anti-icing active systems by development of conductive coatings - ActiCOAT”. Projekt „ActiCOAT” jest finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju na podstawie umowy o dofinansowanie nr CORNET/35/16/ActiCOAT/2024.

Synthesis and structural characterization of nanometer sized atomically precise silver nanoclusters

Łukasz Cieszyński^{1,2}, Anna Makal²

¹ Uniwersytet Warszawski, Kolegium MISMaP, ul. Stefana Banacha 2C, 02-097 Warszawa

² Uniwersytet Warszawski, Wydział Chemii, ul. Pasteura 1, 02-093 Warszawa

Atomically precise silver nanoclusters ranging from 0.5 to 2 nm and containing from a few to hundreds of metal atoms represent a new class of nanomaterials with well defined compositions. Because of their relatively small size, their energy levels are well resolved, in comparison to much bigger (2-100 nm) metal nanoparticles, leading to molecular properties such as photoluminescence (PL) dependent on the nanocluster size [1]. Their PL properties find applications in fields such as bioimaging or even photovoltaics [2].

In this work we present crystal structures for three types of silver nanoclusters:

- $\text{Ag}_{62}\text{S}_{13}(\text{StBu})_{32}(\text{CF}_3\text{COO})_4$ crystalizing in P-1 spacegroup
- $\text{Ag}_{50}\text{S}_{13}(\text{StBu})_{20}(\text{CF}_3\text{COO})_4$ crystalizing in Fm-3c spacegroup
- $\text{Ag}_{31}\text{S}_3(\text{StBu})_{17}(\text{CF}_3\text{COO})_8$ crystalizing in P2₁2₁2₁ spacegroup

Obtained by means of single crystal X-ray diffraction.

Based on obtained structural models, we discuss their core-shell interactions and attempt to connect them with their photophysical properties such as absorption and emission spectra in solution.

The observed geometries and interatomic interactions present in these silver nanoclusters depend on the reaction conditions. Studies on the subject are important for better understanding of mechanisms governing the cluster formation. This can provide guidelines for future, more reliable synthetic protocols of nanoclusters with desired photophysical properties.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge Prof. Christophe Vande Velde from the University of Antwerp for his assistance with the measurements. This work was supported by funding obtained through the Erasmus+ programme.

[1] New Advances in Atomically Precise Silver Nanoclusters, Jie Yang and Rongchao Jin, ACS Materials Letters 2019, **1** (4), 482–489, DOI: 10.1021/acsmaterialslett.9b00246

[2] Ag(I)-Thiolate-Protected Silver Nanoclusters for Solar Cells: Electrochemical and Spectroscopic Look into the Photoelectrode/Electrolyte Interface, Muhammad A. Abbas, Seog Joon Yoon, Hahkjoon Kim, Junghyun Lee, Prashant V. Kamat, and Jin Ho Bang, ACS Applied Materials & Interfaces 2019, **11** (13), 12492–12503 DOI: 10.1021/acsami.9b00049

Od kofeiny do katalizatora: projektowanie i porównanie nanoporowatych węgla do elektrosyntezy

M. Anioł, O. Drzewniak, dr inż. M. Odziomek

AGH, Kraków, Polska

Nanoporowate materiały węglowe są powszechnie wykorzystywane do magazynowania energii, między innymi w superkondensatorach. W ostatnich latach coraz większe zainteresowanie budzi również ich zastosowanie jako katalizatorów elektrochemicznych, które mogą częściowo zastąpić metale w procesach związanych z produkcją wodoru ogniwami paliwowymi oraz syntezą związków organicznych. Materiały te łączą dobrą przewodność elektryczną z dużą powierzchnią właściwą i rozwiniętą strukturą porów. Projektowanie aktywnych katalizatorów węglowych pozostaje jednak wyzwaniem. Ze względu na ich nieuporządkowaną strukturę trudno jest niezależnie kontrolować skład chemiczny powierzchni oraz wielkość porów. Oba te parametry wpływają na dostępność miejsc aktywnych, transport jonów i cząsteczek, a w konsekwencji na aktywność katalityczną materiału.

W przedstawionej pracy otrzymano materiały węglowe domieszkowane azotem, wykorzystując kofeinę lub TCNQ jako prekursor oraz mieszaniny stopionych soli jako środowisko syntezy. Poprzez zmianę składu soli kontrolowano wielkość porów w zakresie od około 0,5 do 20nm, zachowując zbliżony skład chemiczny materiałów otrzymanych z kofeiny. Umożliwiło to bezpośrednie zbadanie wpływu struktury porowatej na właściwości elektrochemiczne. Pomimo podobnych powierzchni właściwych, wynoszących $1200 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ – $1600 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$, materiały wykazywały wyraźnie różne elektrochemicznie dostępne powierzchnie. Różnice te wynikały z wielkości i dostępności porów, które decydowały o szybkości transportu jonów elektrolitu. Materiały otrzymane z kofeiny porównano z materiałem pochodzącym z TCNQ.

Wpływ porowatości potwierdzono w elektrochemicznej redukcji p-nitrofenolu do p - aminofenolu, stanowiącej modelową reakcję konwersji grupy nitrowej do aminowej. Wszystkie materiały wykazywały podobny potencjał rozpoczęcia reakcji, lecz znacznie różniły się jej szybkością i całkowitą konwersją. Obecność mezoporów ułatwiała transport reagentów i prowadziła do wyraźnego wzrostu wydajności procesu. Co istotne, zaprojektowane materiały węglowe wykazywały wyższą aktywność katalityczną niż platyna. Wynik ten potwierdza, że odpowiednia kontrola struktury porowatej i składu chemicznego węgla może prowadzić do katalizatorów konkurencyjnych wobec drogich metali szlachetnych. Opracowanie takich zrównoważonych i dostępnych materiałów jest głównym celem naszych badań.

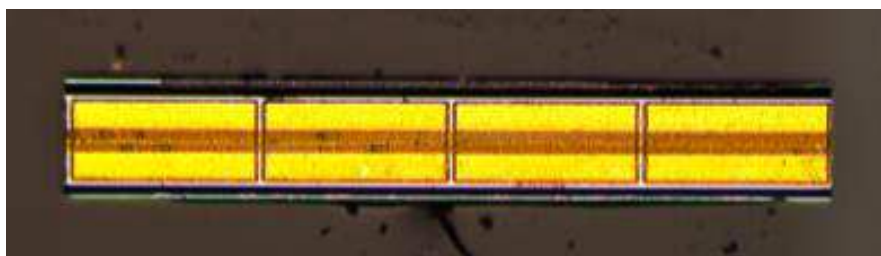
Analiza parametrów struktur kwantowych laserów kaskadowych emitujących przy długości fali 4.55 μm .

K. Gruszewska¹, A. Goławska¹, D. Pierścińska¹, D. Niewczas¹, A. Krząstek¹,
K. Pierściński¹

¹ *Institute of Microelectronics and Photonics Łukasiewicz Research Network, Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw, Poland*

Kwantowe lasery kaskadowe (QCL) to półprzewodnikowe struktury emitujące promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni. Urządzenia te znajdują zastosowanie w wielu obszarach, takich jak medycyna, spektroskopia, transmisja w wolnej przestrzeni oraz obronność. Ich istotnym atutem jest możliwość projektowania długości fali emisji poprzez odpowiednie kształtowanie struktury obszaru aktywnego. W szczególności, wykorzystując ten sam układ materiałów półprzewodnikowych, można uzyskać lasery QCL emitujące w różnych zakresach długości fal poprzez odpowiedni dobór grubości studni kwantowych i barier tworzących obszar aktywny, precyzyjnie wytwarzanych m.in. metodą epitaksji z wiązek molekularnych (MBE). Proces wytwarzania QCL jest bardzo złożony i wymaga wielu precyzyjnych etapów technologicznych, takich jak osadzanie, fotolitografia, nakładanie masek oraz ich trawienie.

W celu pełnego wykorzystania potencjału kwantowych laserów kaskadowych, niezbędne jest zbadanie ich podstawowych własności elektro-optycznych oraz charakterystyki działania. W niniejszej pracy przeprowadzono pomiary na chipach, dwóch różnych struktur kwantowych laserów kaskadowych, które różniły się konstrukcją obszaru aktywnego. Jeden ze zbadanych chipów przedstawiono na rysunku 1. Badane struktury emitowały promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni o długości fali około 4.55 μm .



Rysunek 1. Wygląd przykładowego kwantowego lasera kaskadowego.

Analizę badanych struktur rozpoczęto od wyznaczenia ich podstawowych parametrów elektrycznych i optycznych. W szczególności określono moc optyczną oraz napięcie progowe akcji laserowej, a uzyskane wyniki przedstawiono w postaci charakterystyki LIV (prąd-napięcie-moc optyczna). Pomiary przeprowadzono w temperaturze 20 °C dla struktur o różnych szerokościach ośrodka aktywnego, co umożliwiło dodatkową ocenę wpływu tego parametru na właściwości elektryczne i emisyjne badanych QCL.

Istotnym aspektem charakteryzującym QCL jest przestrzenny rozkład wiązki w polu dalekim. Stąd dla badanych laserów wyznaczono profil wiązki w polu dalekim w zakresie kątowym 120°, przy zasilaniu lasera w trybie impulsowym o długości impulsu 200 ns i częstotliwości 1 kHz. Dodatkowo wykonano pomiary widm emisyjnych, które pozwoliły na pełną charakterystykę badanych struktur oraz ocenę ich właściwości optycznych i potencjału dalszej optymalizacji.

Badanie wpływu filmów polielektrolitowych na inkorporację w nich kropek kwantowych CdSe

G. Gołębiowska¹, T. Lasota¹, M. Bogusz¹, A. Stawiarska¹ i M. Kolasińska-Sojka²

¹*Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej, AGH, Kraków, Polska*

²*Instytut Katalizy i Fizykochemii Powierzchni PAN im. Jerzego Habera, Kraków, Polska*

Kropki kwantowe (ang. quantum dots, QDs) są półprzewodnikowymi nanokryształami o rozmiarach rzędu kilku nanometrów, których wyjątkowe właściwości optyczne i elektronowe wynikają z efektu kwantowego ograniczenia nośników ładunku. Umożliwia to kontrolę widm absorpcji i emisji oraz wykorzystanie ich w optoelektronice, fotodetekcji i projektowaniu funkcjonalnych materiałów hybrydowych. Szczególne zainteresowanie wzbudzają układy łączące właściwości kropek kwantowych z uporządkowanymi strukturami polimerowymi.

Celem naszego projektu było określenie wpływu wielowarstwowych filmów polielektrolitowych (PEM) otrzymywanych metodą warstwa-po-warstwie (ang. Layer-by-layer, LbL) na osadzanie na nich kropek kwantowych CdSe. Technika LbL umożliwia formowanie wielowarstwowych struktur w sposób kontrolowany poprzez naprzemienną adsorpcję polielektrolitów lub innych cząstek o przeciwnych ładunkach, pozwalając na precyzyjną regulację grubości, składu oraz właściwości powierzchniowych i optycznych otrzymywanych filmów.

Kropki kwantowe CdSe adsorbowano na wielowarstwach polielektrolitowych (PAH/PSS oraz PDDA/PSS) zaadsorbowanych na podłożu szklanym, kryształach kwarcowych ze złotą elektrodą lub waflu krzemowym. Proces osadzania kropek kwantowych na filmach polielektrolitowych śledzono za pomocą mikrowagi kwarcowej z monitorowaniem dyssypacji (QCM-D). Zastosowanie QCM-D umożliwiło monitorowanie procesu adsorpcji na podstawie rejestracji zmian częstotliwości rezonansowej, związanych ze zmianą masy kryształu, na którym osadzano kropki kwantowe.

Otrzymane hybrydowe układy zostały poddane charakterystyce fizykochemicznej, obejmującej m.in. obrazowanie powierzchni metodą mikroskopii sił atomowych (AFM) oraz analizę właściwości optycznych filmów z zaadsorbowanymi QD za pomocą spektrofotometrii.

Rezultaty przeprowadzonych badań pozwoliły na określenie zależności pomiędzy składem jakościowym wielowarstwy polielektrolitowej a ilością i odpowiedzią optyczną zaadsorbowanych kropek kwantowych CdSe, co może stanowić podstawę do projektowania funkcjonalnych układów hybrydowych z zastosowaniem nowoczesnych nanomateriałów.

Badanie dynamiki transportu w nanowarstwach tlenkowych modyfikowanych wiązką jonów w układach memrystorowych

J. Malik¹, M. Józefiak-Piróg¹, J. Chojenka²

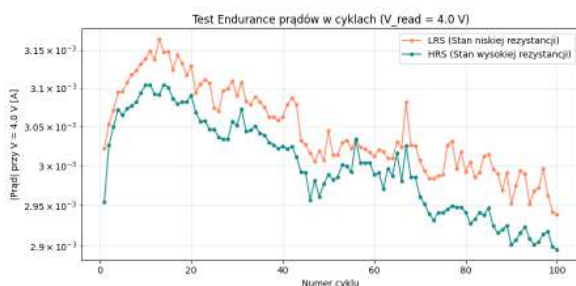
¹Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Kraków, Polska

²Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk, Kraków, Polska

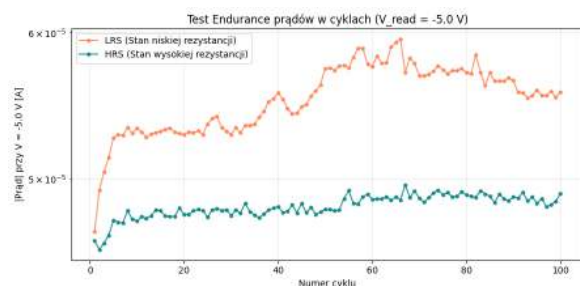
Tlenki metali przejściowych (np. TiO_2) stosowane w układach memrystorowych stanowią obiecujący fundament dla nowoczesnych architektur pamięciowych oraz sztucznych sieci neuronowych. Typowy memrystor składa się z aktywnej warstwy tlenkowej umieszczonej między dwiema elektrodami. Jednym z głównych wyzwań w rozwoju tej technologii jest potrzeba precyzyjnej kontroli i dostrajania parametrów transportu elektronowego, tzn. przełączania stanów układu między stanem o wysokiej rezystancji (HRS, z ang. *High Resistance State*) a stanem o niskiej rezystancji (LRS, z ang. *Low Resistance State*).

W pracy skupiono się na analizie wpływu modyfikacji jonowej na właściwości przełączania się memrystora między stanami HRS a LRS. Badaniom poddano trójwarstwę Pt/ TiO_2 /Pt. Cienkowarstwowe układy wytworzono za pomocą technik próżniowych, a następnie poddano naświetlaniu jonami przy użyciu implantatora jonów (proces ten poprzedzono symulacjami dynamicznymi w programie TRIDYN).

Przeprowadzono pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych (I-V) w 100 cyklach dla próbek nienaruszonych oraz poddanych implantacji jonami helu, w celu określenia zmian w transporcie elektronowym. Pomiary I-V zrealizowano dwiema metodami: z wykorzystaniem sond pomiarowych oraz przy użyciu wcześniej przygotowanych kontaktów naniesionych na próbki. Zjawisko przełączania rezystywnego (ang. *resistive switching*) analizowano poprzez rejestrację zmian rezystancji układu dla wybranego napięcia w trakcie całego cyklu pomiarowego. Zaobserwowano znaczące różnice we właściwościach transportu elektronowego pomiędzy badanymi próbkami. W próbce implantowanej helem różnica rezystancji pomiędzy stanami HRS i LRS jest kilkukrotnie wyższa, co zostało zilustrowane na rysunku 1.



(a) Rozkład rezystancji dla napięcia $V = 4 \text{ V}$



(b) Rozkład rezystancji dla próbki implantowanej $V = -5 \text{ V}$

Rysunek 1. Porównanie zjawiska przełączania rezystywnego dla różnych próbek

Funkcjonalizowane nanodrutu srebra jako platforma do badania aktywności enzymów w metabolizmie mRNA

W. Nakoneczna¹, J. Grzymkowska¹, K. Linek¹, W. Zacheja¹, T. Olejko², J. Jemielity², S. Maćkowski³, J. Niedziółka-Jönsson^{1*}

¹*Instytut Chemii Fizycznej, Polska Akademia Nauk, Warszawa, Polska*

²*Centrum Nowych Technologii, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, Polska*

³*Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska*

Metaliczne nanostruktury, w tym nanodrutu srebra (Ag NWs), charakteryzują się zdolnością do generowania powierzchniowego rezonansu plazmonowego pod wpływem oświetlenia. Zjawisko to indukuje zmiany lokalnego pola elektromagnetycznego, co może być wykorzystane do modyfikacji właściwości optycznych otoczenia. W odróżnieniu od nanocząstek o innych geometriach, nanodrutu srebra mogą być bezpośrednio obserwowane pod mikroskopem optycznym, zachowując przy tym unikalne właściwości wynikające z kwantowego ograniczenia rozmiarów [1].

Sprzężenie sond nukleotydowych znakowanych fluorescencyjnie ze strukturami plazmonicznymi, takimi jak nanodrutu srebra, prowadzi do wzmocnienia ich właściwości fluorescencyjnych. Takie koniugaty stanowią obiecującą platformę do badania kinetyki reakcji enzymatycznych na poziomie molekularnym.

Nanodrutu srebra wykorzystywane w projekcie syntezowano metodą polyol, optymalizując parametry takie jak czas trwania syntezy, czystość reduktora (glikolu etylenowego), stężenie soli (CuCl_2), szybkość mieszania oraz geometria mieszaniny [2]. Najbardziej znaczącymi parametrami okazały się odpowiednia czystość glikolu etylenowego oraz stężenie soli, a ich odpowiednie dostosowanie pozwoliło na zwiększenie wydajności syntezy, uzyskanie jednorodnych nanodrutów oraz zminimalizowanie udziału niepożądanych nanocząstek.

Przeanalizowano także proces koniugacji sond nukleotydowych znakowanych fluorescencyjnie z Ag NWs. Badania wykazały, że do utworzenia stabilnych koniugatów generujących możliwy do detekcji sygnał fluorescencyjny niezbędna jest obecność grupy tiolowej w strukturze sond. Dodatkowo w celu optymalizacji procesu koniugacji dopasowano czas inkubacji Ag NWs z sondami nukleotydowymi oraz stężenie nukleotydu.

Celem projektu jest monitorowanie reakcji enzymatycznej metabolizmu mRNA w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem mikroskopii fluorescencyjnej. Nasze eksperymenty wskazują, że poprzez analizę zmian intensywności sygnału fluorescencji koniugatów możliwa jest obserwacja działania enzymu degradującego mRNA, co umożliwia zastosowanie opracowanej platformy w badaniach regulacji ekspresji genów i odpowiedzi immunologicznej, znaczących dla rozwoju nowoczesnych terapeutyków bazujących na mRNA.

Badania finansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu OPUS 25 nr 2023/49/B/ST4/01450.

[1] J. Niedziółka-Jönsson, S. Mackowski, *Materials* **12** (2019) 1418.

[2] Y. Sun, B. Mayers, T. Herricks, Y. Xia, *Nano Lett.* **3** (2003) 955.

Magnetic-field-assisted FFF 3D printing from ferromagnetic TPU-based composites

E. Pająk¹

¹*Faculty of Physics, University of Warsaw, Warsaw, Poland*

The main goal of this study was to 3D print flexible objects with designed magnetisation. Such structures are capable of shifting geometry when an external magnetic field is applied and returning to their initial shape after the field is removed, showcasing possible applications in soft robotics, as they do not require electrical energy to function properly but instead rely on appropriate changes of the magnetic field [1–3]. Due to the commercial unavailability of 3D printing filaments that are both elastic and ferromagnetic, a method for manufacturing TPU-based composite filaments that remain flexible even after the mass fraction of the ferromagnetic infill exceeds 70 wt% was developed. To enable this, a uniform distribution and good wetting of the ferromagnetic microparticles had to be achieved, which was later confirmed by scanning electron microscopy. Multiple composite materials were studied, mainly formed by suspending varying mass fractions of hard and soft ferromagnetic infill microparticles in a polymer matrix. To optimise the morphology of used microparticles, ultrasonic atomisation was performed, followed by the microstructure analysis. Subsequently, the magnetic properties of created composites were determined by vibrating-sample magnetometry and the influence of mass fraction of the hard ferromagnetic material on the remanent magnetisation was measured. Furthermore, the nozzle of a 3D printer was modified to enable magnetic-field-assisted filament extrusion, which is schematically illustrated in figure 1. To validate the developed materials, proof-of-concept structures were 3D-printed that behaved as anticipated under the influence of a magnetic field, which demonstrates their potential utility in soft robotics.

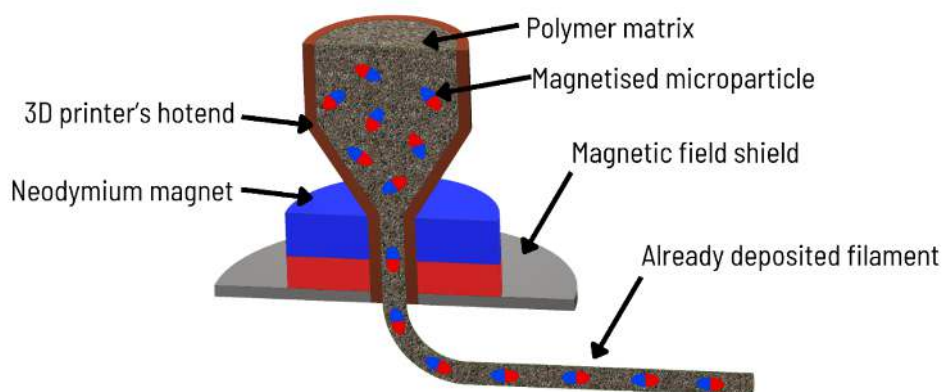


Figure 1. Illustration of the proposed magnetic-field-assisted FFF 3D printing method enabling the reorientation of magnetised infill microparticles after the polymer matrix is heated and plasticised.

- [1] Y. Kim, et al. *Nature* **558**, 274 – 279 (2018).
- [2] Y. Kim. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (2018).
- [3] Y. Kim. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (2022).

Synthesis of the polymer-inorganic composites and thermoelectric properties investigation

S. Pyliński², B. Rybak¹, J. Potempa¹, M. Bielak², M. Czechowski², K. Latusek², K. Zazakowny¹

¹*Faculty of Materials Science and Ceramics, AGH University of Kraków, Kraków, Poland*

²*Faculty of Physics and Applied Computer Science, AGH University of Kraków, Kraków, Poland*

Growing attention is being directed toward organic thermoelectric materials and their composites owing to their relatively low synthesis cost, the wide range of available compounds, and their inherent flexibility. Although polymer-inorganic composites generally demonstrate lower performance than conventional inorganic thermoelectric materials, they offer numerous promising applications. Examples include room-temperature cooling and microscale power generation. The main advantage of conductive organic materials is their inherently low thermal conductivity (κ). Furthermore, the incorporation of inorganic additives can enhance composite performance by introducing additional charge carriers, thereby improving electrical conductivity, or by facilitating phonon scattering at phase boundaries, which improves thermal properties. The flexibility and relatively low mass of organic materials are other key factors. Potential future applications include the development of lightweight, flexible biosensors that can be attached directly to the body; powering portable personal devices; harvesting waste-heat energy; and serving as power sources for mobile sensors used in sports. The mechanisms used and tested to improve the properties of this polymer include, among others, chain linking to enhance charge transport, leaching of the insulating PSS copolymer, and the introduction of additional charge carriers along with inorganic inclusions. To improve the thermoelectric properties of the polymer, ZnO powder with various morphologies, Bi₂Te₃ particles, and an organic additive in the form of Polyaniline Emeraldine Salt (PANI) were used. Various mass ratios of the polymer to additives, namely 5:1, 2:1, 1:1, and 2:3, were tested to determine their optimal content. The samples were prepared by the drop-casting technique as thin films with a thickness of several tens of micrometers. The morphology of the obtained composites was evaluated using scanning electron microscopy (SEM) and atomic force microscopy (AFM). The highest conductivity was achieved with the use of hydrochloric acid, while the highest power factor (PF) was obtained with Bi₂Te₃ and ZnO particles, respectively.

References:

- [1] Lee, W., Lee S., Kim, H., Kim, Y. Organic thermoelectric devices with PEDOT: PSS/ZnO hybrid composites. *Chemical Engineering Journal* **415** (2021).
- [2] Rath, V., Singh, K., et al. Boosting thermoelectric performance of PEDOT: PSS/Bi₂Te₃ hybrid films via structural and interfacial engineering. *Organic Electronics* **133** (2024).
- [3] Lee, H. J., Anoop, G., et al. Enhanced thermoelectric performance of PEDOT: PSS/PANI-CSA polymer multilayer structures. *Energy Environ. Sci.* **9** (2016)

Nanostructured copper-functionalized silica-based materials for nonlinear optical applications

Sara El Houbbadi¹, Łukasz Laskowski², Magdalena Laskowska²

¹Warsaw University of Technology, Faculty of Mechatronics, św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warsaw, Poland

²Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences, Krakow 31-342, Poland

Second harmonic generation (SHG) has emerged as a powerful nonlinear optical phenomenon for applications in photonics, optical sensing, and bioimaging. The development of efficient SHG-active materials with tunable optical properties remains a major challenge, particularly for hybrid nanostructures that combine structural order with molecular functionality. In this work, nanostructured mesoporous silica materials functionalized with phosphonate ligands and coordinated copper ions were designed as versatile nonlinear optical platforms.

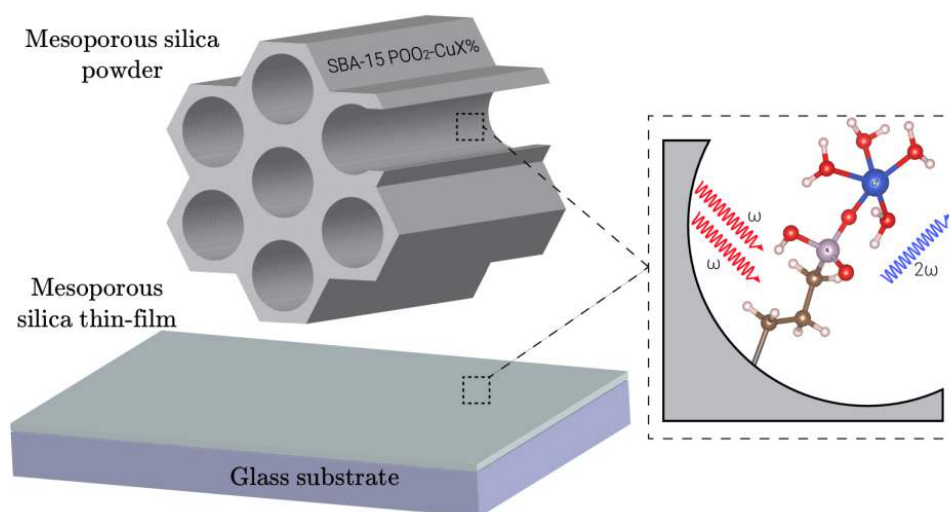


Figure 1. Illustration of copper-phosphonate-functionalized mesoporous silica powders and thin films.

Nonlinear optical performance was evaluated using second-harmonic generation measurements under near-infrared excitation. The results demonstrate that SHG efficiency strongly depends on the degree of functionalization, copper coordination, and mesostructured organization. An optimal copper loading yielded the highest SHG response, whereas excessive incorporation reduced optical performance due to structural disorder and changes in the local coordination environment [1–3].

References

- [1] S. El Houbbadi, et al., *Applied Surface Science* (2024).
- [2] M. Laskowska, et al., *Nanoscale* **33** (2017), 12110–12123.
- [3] L. Laskowski, et al., *Journal of Nanomaterials* 2017 (1) (2017), 1287698.

Materiał MXen i jego nowa modyfikacja

J. Ulrych¹, A. Majorczyk¹, E. Kupis¹, N. Przybojewski¹, G. Opila¹, A. Gilarska¹, J. Przewoźnik¹, M. R. Ibarra^{2,3}, C. Kapusta¹

¹Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej AGH, Kraków, Poland

²Instituto de Nanociencia y Materiales de Aragón (INMA), CSIC-Universidad de Zaragoza, Laboratorio de Microscopías Avanzadas (LMA), Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spain

³Wydział Technologii Kosmicznych AGH, Kraków, Poland

Materiał MXen badany w ramach niniejszej pracy, to związek o strukturze dwuwymiarowych płatków i składzie $M_{n+1}X_nT_k$, gdzie M to metal przejściowy, X - węgiel lub azot, T to symbol grupy przyłączonej do powierzchni płatka, n opisuje liczbę warstw pierwiastka X w materiale, a k – ilość grup T na wzór jednostkowy. Naszym celem było zbadanie absorpcji jonów żelaza przez materiał $Ti_3C_2T_k$ (T to głównie OH), a następnie próbę zmiany stanu chemicznego zaabsorbowanego żelaza przez poddanie działaniu roztworu NH_4OH . Modyfikacja ta miała na celu wytworzenie pomiędzy warstwami MXen nowej, magnetycznej fazy zawierającej żelazo. Prezentowany plakat będzie przedstawiał wyniki przeprowadzonych dla uzyskanego materiału badań składu metodą rentgenowskiej analizy fluorescencyjnej, obrazy cząstek materiału uzyskane metodą skaningowej transmisyjnej mikroskopii elektronowej oraz wyniki badań struktury krystalicznej metodą dyfraktometrii rentgenowskiej.

[1] Naguib M. et al., *Adv. Mater.* **23** (2011)

[2] Srivatsa S. et al., *Materials.* **17** (2024)

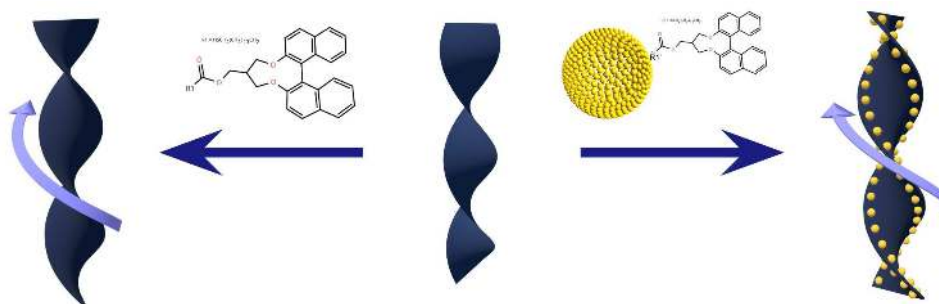
Indukcja chiralności morfologicznej w układach matryca - dopant oraz matryca - nanocząstki funkcjonalizowane chiralnym ligandem

P. Wachnicka¹, M. Bagiński¹, W. Lewandowski¹

¹Laboratorium Nanomateriałów Organicznych, Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, ul. Pasteura 1, Warszawa, 02-093, Polska

W środowisku naukowym idea samoorganizacji cieszy się coraz większą popularnością. Jej istotą jest tworzenie układów, w których skomplikowane struktury przestrzenne formują się spontanicznie bez bezpośredniej ingerencji człowieka. Podejście to umożliwia stworzenie kompozytów chiralnych o unikalnych właściwościach optycznych, które mogą znaleźć zastosowanie, między innymi, w fotonice. Precyzyjna kontrola chiralności ma kluczowe znaczenie dla efektywnego wdrożenia tych rozwiązań.

W badaniach analizuję wpływ pochodnych BINOL-u, pełniących rolę zarówno dopantu, jak i ligandu na powierzchni nanocząstek złota, na indukcję nadmiaru enancjomerycznego domen helikalnych nanofilamentów zbudowanych z achiralnego związku ciekłokrystalicznego. Za pomocą mikroskopii polaryzacyjnej (POM) zbadałam rozkład domen oraz sygnał chiralooptyczny (za pomocą spektroskopii dichroizmu kołowego - CD) układów matrycy ciekłokrystalicznej z komercyjnie dostępnym dopantem oraz z ligandem binolowym, a następnie z nanocząstkami sfunkcjonalizowanymi tym ligandem. Wykazałam, że ligand pochodnej BINOL-u może skutecznie pełnić funkcję dopantu w matrycach ciekłokrystalicznych. W kolejnym etapie zbadałam wpływ nanocząstek funkcjonalizowanych wyżej wymienionym ligandem na właściwości chiralne układów ciekłokrystalicznych. W celu osiągnięcia pożądanego efektu zastosowałam nanocząstki złota o małej średnicy, zakładając, że ich niewielki rozmiar oraz wysoki stosunek części organicznej do rdzenia metalicznego zwiększy ich wpływ na indukcję chiralności w kompozytach.



Rysunek 1. Schemat układu funkcjonalizowane nanocząstki - matryca ciekłokrystaliczna helikalnych nanofilamentów.

[1] D.Grzelak et al., Adv. Funct. Mater., 2022, **32**(16), 2111280

Poprawa adhezji warstwy dielektrycznej do podłoża z antymonku galu w strukturach międzypasmowych laserów kaskadowych

M. Wowra¹, P. Kozłowski¹, J. Branas¹, W. Lorenc¹, K. Pieniak¹, K. Pierściński¹

¹*Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki, Warszawa, Polska*

Międzypasmowe lasery kaskadowe (ang. *Interband Cascade Lasers*, ICL) to zaawansowane technologicznie przyrządy półprzewodnikowe emitujące promieniowanie w zakresie średniej podczerwieni (3 – 6 μm). Łączą one ze sobą cechy klasycznych diod laserowych i zalety kwantowych laserów kaskadowych (ang. *Quantum Cascade Laser*, QCL). Zasada działania ICL opiera się na przepływie elektronów przez ciąg połączonych ze sobą stopni (kaskad). W każdym z nich elektrony i dziury są wprowadzane do aktywnych studni kwantowych o wyrównaniu pasm typu II, gdzie ich rekombinacja prowadzi do emisji fotonu wskutek przejścia elektronu z pasma przewodnictwa do walencyjnego [1]. Kluczową cechą ICL jest niski prąd progowy i niewielki pobór mocy, co umożliwia pracę laserów w temperaturach bliskich pokojowej [2] oraz liczne zastosowania w spektroskopii, detekcji gazów [3], medycynie [4] czy badaniach kosmicznych [5].

Wytwarzanie wysokiej jakości warstw dielektrycznych stanowi kluczowy etap technologii międzypasmowych laserów kaskadowych, warunkujący skuteczną pasywację powierzchni oraz ograniczenie strat optycznych i prądów upływu. Uzyskanie warstw o dobrej adhezji, wysokiej jednorodności, niskiej gęstości defektów i odpowiedniej stabilności termicznej umożliwia poprawę parametrów elektrooptycznych przyrządu. W konsekwencji właściwości dielektryka oraz jakość jego interfejsu z półprzewodnikiem mają istotny wpływ na sprawność, stabilność pracy i niezawodność lasera.

Główną przyczyną słabej adhezji jest szybkie powstawanie tlenków natywnych na powierzchni GaSb poddanej działaniu powietrza przed nałożeniem dielektryka. Przygotowanie powierzchni przed osadzeniem warstw dielektrycznych ma kluczowe znaczenie na późniejszą adhezję i jakość otrzymywanych warstw. Na podstawie przeglądu literatury wytypowano kilka roztworów (m.in. na bazie rozcieńczonego kwasu solnego [6]) przeznaczonych do usuwania tlenków bezpośrednio przed osadzaniem. W drodze eksperymentów dobrano optymalny skład roztworu oraz czas trawienia, gwarantujące minimalne uszkodzenie podłoża.

W celu weryfikacji jakości adhezji wykonano serię próbną na czystym podłożu GaSb. Celem oceny jakości i stopnia adhezji osadzonych warstw przeprowadzono testy wygrzewania i moczenia w wodzie destylowanej, które w przypadku niskiej adhezji doprowadziłyby do delaminacji dielektryka. Doświadczenia potwierdziły, że opracowana procedura znacząco poprawia adhezję warstw dielektrycznych do półprzewodnika.

[1] R. Q. Yang. *Superlattices and Microstructures* **17**, 77 – 83 (1995).

[2] I. Vurgaftman, et al. *New Journal of Physics* **11**, 125015 (2009). [3] M. von Edlinger, et al. *IEEE Photonics Technology Letters* **26**, 480 – 482 (2014).

[4] R. Ghorbani, et al. *Optics Express* **25**, 12743-12752 (2017).

[5] C. R. Webster, et al. *Science* **347**, 415 – 417 (2015).

[6] E. Papis-Polakowska. *Electron Technology Internet Journal* **37/38**(4), 1 – 34 (2005/2006).