

Załącznik 3

Autoreferat

3.1 Dane osobowe

Imię	Michał
Nazwisko	Kotkowiak
Miejsce pracy	Instytut Fizyki Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechnika Poznańska ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań
Numer ORCID	0000-0001-6611-0366
Scopus Author ID	35435414800
Data i miejsce urodzenia	██████████
Telefon kontaktowy	██████████
Adres e-mail	michal.kotkowiak@put.poznan.pl

3.2 Dyplomy i stopnie naukowe

10.2009 – 09.2017	Studia doktoranckie Wydział Fizyki Technicznej, Politechnika Poznańska Doktor nauk fizycznych w zakresie fizyki <u>Tytuł rozprawy doktorskiej:</u> <i>Właściwości fotofizyczne pochodnych hemu i chlorofilu w roztworach i w obecności nanocząstek metalicznych</i> <u>Promotor:</u> prof. dr hab. Alina Dudkowiak
03.2012 – 06.2013	Studia II stopnia Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska <u>Kierunek studiów, specjalność:</u> mechanika i budowa maszyn, silniki lotnicze <u>Tytuł pracy magisterskiej:</u> <i>Komory spalania współczesnych silników odrzutowych</i> <u>Promotor:</u> dr hab. inż. Agnieszka Wróblewska
10.2007 – 02.2011	Studia I stopnia Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Politechnika Poznańska <u>Kierunek studiów, specjalność:</u> mechanika i budowa maszyn, silniki lotnicze <u>Tytuł pracy inżynierskiej:</u> <i>Modelowane łopatk turbiny gazowej z jednorodnym rozkładem naprężeń</i> <u>Promotor:</u> dr hab. inż. Stanisław Kachel, prof. Wojskowej Akademii Technicznej
10.2004 – 06.2009	Studia jednolite magisterskie Wydział Fizyki Technicznej, Politechnika Poznańska <u>Kierunek studiów, specjalność:</u> fizyka techniczna, nanoinżynieria układów molekularnych i biomolekularnych <u>Tytuł pracy magisterskiej:</u> <i>Plazmony powierzchniowe generowane w układach barwników osadzonych na nanostrukturach metalicznych</i> <u>Promotor:</u> dr hab. Jacek Goc, prof. Politechniki Poznańskiej

3.3 Zatrudnienie w jednostkach naukowych

10.2019 – obecnie	Wydział Fizyki Technicznej (od 10.2020 Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej) Politechnika Poznańska <u>Stanowisko:</u> Adiunkt naukowo-dydaktyczny
10.2013 – 09.2019	Wydział Fizyki Technicznej Politechnika Poznańska <u>Stanowisko:</u> Asystent naukowo-dydaktyczny

3.4 Wskaźniki bibliometryczne

Wykaz ilościowy dorobku naukowo-badawczego na dzień 8 października 2026. W wykazie uwzględniono konferencje w których uczestniczono osobiście.

Wskaźnik	Przed doktoratem	Po doktoracie	Łącznie
Liczba publikacji z listy w JCR	16	19	35
Konferencje krajowe/międzynarodowe – referat	2/1	1/0	3/1
Konferencje krajowe – poster	6	1	7
Konferencje międzynarodowe – plakat	8	2	10
Współautorstwo rozdziału monografii	6	0	6
Patenty/zgłoszenia patentowe	0/0	1/1	1/1
Kierownik w projektach badawczych NCN	1	1	2
Promotor pomocniczy przy rozprawach doktorskich	0	1	1
Recenzje w czasopismach naukowych z listy JCR	10	55	65
Recenzje międzynarodowych grantów	0	3	3
Redaktor gościnny w wydaniu specjalnym	0	1	1
Staże zagraniczne	1	2	3
Liczba cytowań wg Scopus	65	426	491
Liczba cytowań bez autocytowań wg Scopus	55	368	423
Indeks Hirscha wg Web of Science/wg Scopus	5/5	14/14	14/14

3.5 Omówienie osiągnięć zgodnie z art. 219 ust. 1 pkt 2a ustawy

3.5.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 219 ust. 1 pkt. 2a Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. jest cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowym, pt. „*Inżynieria nanomateriałów plazmonicznych: struktura i właściwości optyczne w układach o różnym stopniu złożoności*”.

3.5.2 Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Do postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego wykazują dziewięć publikacji stanowiących cykl prac powiązanych tematycznie. Osiem z nich [H1-H6, H8-H9] zostało wydanych po uzyskaniu stopnia doktora. Jedna publikacja [H8] ukazała się przed uzyskaniem stopnia doktora, jednak nie jest powiązana tematycznie z publikacjami wykazanymi w rozprawie doktorskiej. Wszystkie czasopisma, w których opublikowałem powyższe prace znajdują się w wykazie Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (MNiSW).

Poniżej prezentuję listę publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe, a następnie opis wkładu własnego. Dla każdej z publikacji przedstawiłem 5-letni współczynnik wpływu czasopisma (IF_{5-year}). Wartość IF_{5-year} podałem na rok opublikowania wg. listy *Journal of Citation Reports*, punktację MNiSW podałem na podstawie bieżącego wykazów listy punktowanych czasopism naukowych. Liczba cytowań podana przy każdej publikacji odpowiada danym z bazy Scopus na dzień 8 października 2026. Oświadczenia współautorów, potwierdzające indywidualny wkład w publikacje stanowią załącznik nr 6 do autoreferatu.

- H1** P. Błaszkiwicz, **M. Kotkowiak***, E. Coy, A. Dudkowiak
Laser-induced optoacoustic spectroscopy studies of inorganic functionalized metallic nanorods
Journal of Physical Chemistry C 123 (2019) 27181-27186
IF_{5-year}=4,404; pkt. MNiSW=140
liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 13
- H2** B. Tim, P. Błaszkiwicz, **M. Kotkowiak***
Altering model cell membranes by means of photoactivated organic functionalized gold nanorods
Journal of Molecular Liquids 349 (2022) 118179-118186
IF_{5-year}=5,600; pkt. MNiSW=100
liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 10
- H3** B.Tim^{*,†}, **M. Kotkowiak^{*,†}**, N. Kowalska, A.B. Nowicka, W. Lewandowski
Influence of gold nanoparticle assembly in Langmuir-Schaefer monolayers on the surface-enhanced spectroscopy response of a nanoplatform
Journal of Physical Chemistry C 127 (2023) 15978-15987
IF_{5-year}=3,500; pkt. MNiSW=140
liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 7
- H4** B. Tim[†], P. Błaszkiwicz, A.B. Nowicka, **M. Kotkowiak^{*,†}**
Optimizing SERS performance through aggregation of gold nanorods in Langmuir-Blodgett films
Applied Surface Science 573 (2022) 151518-151527
IF_{5-year}=6,200; pkt. MNiSW=140
liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 37
- H5** **M. Kotkowiak***, B. Tim, M. Kotkowiak, J. Musiał, P. Błaszkiwicz
The role of the polyethylene glycol brush in the organization of gold nanorods at

the air-water and the air-solid interfaces

Langmuir 40 (2024) 14561-14569

IF_{5-year}=3,700; pkt. MNiSW=100

liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 4

- H6** M. Kotkowiak*, M. Zarzeczny, P. Roszkowski, P. Piszczek, A. Radtke, M. Kotkowiak

Optimizing nanostructured platform for enhanced detection of photosynthetic pigments

Applied Surface Science 712 (2025) 164091-164100

IF_{5-year}=6,300; pkt. MNiSW=140

liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 0

- H7** M. Kotkowiak*, B. Grześkiewicz, E. Robak, E. Wolarz

Interaction between nanoprisms with different coupling strength

Journal of Physical Chemistry C 119 (2015) 6195-6203

IF_{5-year}=4,919; pkt. MNiSW=140

liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 19

- H8** M. Kotkowiak*, M. Mleczko

In situ tracked hybridization phenomenon of gold nanorods in monolayer systems

Journal of Physical Chemistry C 128 (2024) 6065-6071

IF_{5-year}=3,500; pkt. MNiSW=140

liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 3

- H9** M. Kotkowiak*, M. Mleczko

Hybridization mechanism of nonamphiphilic capped gold nanoparticles in the presence of a surfactant

Journal of Physical Chemistry C 128 (2024) 21253-21261

IF_{5-year}=3,500; pkt. MNiSW=140

liczba cytowań wg. bazy SCOPUS: 1

Rodzaj współautora:

- pierwszy autor: siedmiokrotnie [H3-H9], w tym równoważny pierwszy autor (†): dwukrotnie [H3-H4],
- autor korespondencyjny (*): dziewięciokrotnie [H1-H9].

$\sum$ IF_{5-year}=41,62 średnio=4,62

Średnia liczba pkt. MNiSW: 131

Średnia liczba autorów publikacji: 4 (3,9)

Średnia liczba cytowań artykułu z/bez uwzględnienia autocytowań: 10/7

Poniżej przedstawiłem mój wkład w powstanie powyższych publikacji. W przypadku opisu wkładu poszczególnych autorów w sekcji publikacji *Author Contributions*, bezpośrednio zacytowałem fragmenty z tych sekcji publikacji. Dotyczy to prac [H3], [H5], [H8] oraz [H9].

- H1** wykonanie pomiarów zakresu czasowo-rozdzielczej laserowo indukowanej spektroskopii optoakustycznej (LIOAS) oraz symulacji komputerowych; analiza i interpretacja wyników; współredagowanie artykułu
- H2** opracowanie koncepcji oraz celów badań; opisanie wyników uzyskanych za pomocą metody oscylacji barier; współuczestnictwo w przeprowadzeniu dyskusji wyników, napisaniu poszczególnych części manuskryptu tj. *abstract*, *introduction* i *conclusions*; przygotowanie poprawionej wersji manuskryptu; nadzorowanie projektu; zarządzanie planowaniem i realizacją badań; pozyskanie wsparcia finansowego dla projektu
- H3** *designed the concept of research and general aims of experiments; performed microscopic, spectroscopic, and QCM studies of Langmuir-Schaefer layers; described*

the results of performed studies together with the discussion and analysis of all performed studies within this work; prepared a revised version of the manuscript together with additional experiments (Langmuir–Schaefer experiments); supervised the project; managed research planning and execution; and acquired the financial support for the project

- H4** opracowanie koncepcji oraz celów badań; wykonanie badań mikroskopowych oraz spektroskopowych (*in situ*) warstw otrzymanych za pomocą techniki Langmuira i Langmuira–Blodgett (wraz z opisem procedury); doświadczalne wyznaczenie ilości CTAB w roztworach nanoprętów złota; opisanie uzyskanych wyników (z wyłączeniem badań za pomocą techniki Langmuira) wraz z omówieniem i analizą wszystkich przeprowadzonych w tej pracy badań; współuczestniczenie w napisaniu poszczególnych części manuskryptu tj. *abstract, introduction i conclusions*; przygotowanie poprawionej wersji manuskryptu; nadzorowanie projektu; zarządzanie planowaniem i realizacją badań; pozyskanie wsparcia finansowego dla projektu
- H5** *designed the concept of research and general aims of experiments; performed microscopic studies of Langmuir–Schaefer and Langmuir–Blodgett layers (along with the procedure’s description); experimentally determined the amount of CTAB in gold nanorods solutions; described the results of performed studies (excluding Langmuir-like studies) together with discussion and analysis of all performed studies within this work; wrote abstract, part of introduction and conclusions; prepared rebuttal letter and revised version of the manuscript; supervised the project; managed research planning and execution; and acquired the financial support for the project*
- H6** opracowanie koncepcji oraz celów badań; wykonanie i analiza badań spektro- i mikroskopowych dotyczących warstw; napisanie manuskryptu (oprócz opisu fragmentu dotyczącego syntezy nanocząstek i ligandu promezogenicznego); przygotowanie poprawionej wersji manuskryptu; nadzorowanie projektu; zarządzanie planowaniem i realizacją badań
- H7** przeprowadzenie symulacji komputerowych; analiza i interpretacja wyników; przygotowanie wstępnej wersji manuskryptu; przygotowanie poprawionej wersji manuskryptu; nadzorowanie projektu; zarządzanie planowaniem i realizacją badań; pozyskanie wsparcia finansowego dla projektu
- H8** *designed the concept of research and general aims of experiments; performed surface film preparation and in situ absorption spectra measurement at the beginning of the project, performed computational simulations, and TEM measurements; described the results of performed studies together with discussion and analysis of all performed studies within this work; prepared the manuscript and its revised version; supervised the project; managed research planning and execution; acquired the financial support for the project*
- H9** *designed the concept of research and general aims of experiments, functionalized and purified gold nanoparticles, performed computational simulations and TEM measurements of layers transferred at copper grids, described the results of performed studies together with discussion and analysis of all performed studies within this work, prepared the manuscript and its revised version, supervised the project, managed research planning and execution, and acquired financial support for the project*

3.5.3 Opis osiągnięć naukowych

Wprowadzenie

Poszukiwanie nowych materiałów o unikalnych właściwościach optycznych jest kluczowe zarówno z punktu widzenia zastosowań praktycznych (w optoelektronice i nowoczesnej medycynie), jak i ekonomicznych. Wraz z rozwojem przemysłu i nowoczesnych technologii produkcji rosną wymagania wobec materiałów. Nanocząstki metaliczne (z ang. *mettalic nanoparticles* – NPs) mogą znacząco poprawić wydajność i trwałość materiałów poprzez modyfikację ich powierzchni lub wbudowanie ich w kompozyty. Dlatego intensywne badania nad syntezą, stabilizacją i funkcjonalizacją NPs stanowią obecnie istotny kierunek

naukowy o dużych perspektywach praktycznych. Nanocząstki, a w szczególności NPs są wyjątkowo ciekawe, ponieważ cechują się unikalnymi właściwościami wynikającymi z efektów kwantowych, a zwłaszcza z bardzo dużej powierzchni w stosunku do ich objętości. Metale w nanoskali mogą zmieniać kolor, przewodnictwo czy reaktywność w porównaniu z tymi samymi metalami w większych rozmiarach [1]. Dzięki temu wykorzystuje się je w medycynie (np. do obrazowania i terapii nowotworów) [2], w elektronice (jako przewodniki i elementy sensorów) [3], a także w katalizie chemicznej [4], gdzie przyspieszają reakcje chemiczne znacznie skuteczniej niż zwykłe metale.

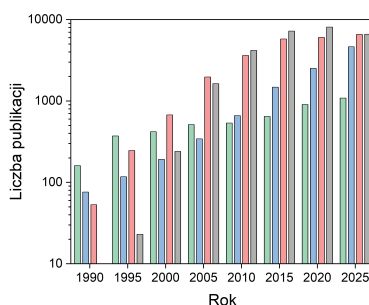
Nanocząstki złota (Au-NPs) stanowią jedną z najlepiej zbadanych i najczęściej stosowanych grup nanomateriałów metalicznych [5]. Wyróżniają się wyjątkową stabilnością chemiczną, wysoką biogodnością oraz możliwością precyzyjnej modyfikacji powierzchni. Ich szczególne właściwości wynikają z efektów kwantowych i zjawiska plazmowego rezonansu powierzchniowego SPR (z ang. *surface plasmon resonance*), który polega na kolektywnych oscylacjach wolnych elektronów wzbudzanych przez promieniowanie elektromagnetyczne. Dzięki temu Au-NPs wykazują intensywne i zależne od rozmiaru oraz kształtu pasma absorpcji w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni. Nanopręty (z ang. *nanorods*) złota (Au-NRs) stanowią szczególnie interesującą klasę nanostruktur ze względu na ich anizotropową morfologię, która nadaje im unikalne właściwości optyczne, odmienne od sferycznych Au-NPs. Kluczowym zjawiskiem determinującym ich atrakcyjność jest podłużny zlokalizowany rezonans plazmowy LLSPR (z ang. *longitudinal localized surface plasmon resonance*), którego położenie w widmie absorpcji można precyzyjnie kontrolować poprzez zmianę stosunku długości do średnicy AR (z ang. *aspect ratio*) Au-NRs. W praktyce pozwala to regulować maksimum absorpcji w szerokim zakresie spektralnym [6].

Ligandy stabilizujące metaliczne NPs to związki chemiczne, które wiążą się z powierzchnią NPs (najczęściej poprzez chemisorpcję lub oddziaływania elektrostatyczne) i pełnią kluczową rolę w zapewnieniu ich stabilności fizykochemicznej [7]. Ze względu na dużą powierzchnię właściwą i wysoką energię powierzchniową, Au-NPs wykazują naturalną tendencję do agregacji i wzrostu makroskopowych cząstek, co prowadziłoby do utraty ich unikalnych właściwości. Ligandy przeciwdziałają temu procesowi, zapewniając stabilizację elektrostatyczną i steryczną. CTAB, czyli bromek cetylotrimetyloamoniowy (z ang. *cetyltrimethylammonium bromide*), odgrywa kluczową rolę w syntezie wielu NPs, zwłaszcza Au-NRs. Jest to surfaktant kationowy, który pełni kilka istotnych funkcji w procesie wzrostu i stabilizacji nanostruktur takich jak: stabilizacja koloidu, kontrola morfologii, tworzenie miceli czy wpływ na właściwości powierzchniowe [8].

Spektroskopia to dziedzina nauki umożliwiająca analizę struktury oraz właściwości materii na poziomie molekularnym, oraz oddziaływania materii ze światłem. NPs mogą oddziaływać z cząsteczkami i dzięki temu zmieniać ich odpowiedź spektroskopową. Spektroskopia wzmocniona obecnością metalu odnosi się do grupy technik, w których nanostruktury metali – najczęściej srebra, złota i miedzi – znacząco zwiększają intensywność sygnałów spektroskopowych. Główny mechanizm tego zjawiska opiera się o LSPR (z ang. *localized surface plasmon resonance*), który prowadzi do silnego wzmocnienia pola elektromagnetycznego w pobliżu powierzchni metalicznej [9]. Najbardziej znanym przykładem jest spektroskopia Ramana wzmocniona powierzchniowo SERS (z ang. *surface enhanced Raman spectroscopy*), umożliwiająca detekcję pojedynczych cząsteczek [10]. Podobny efekt obserwuje się w spektroskopii fluorescencyjnej wzmocnionej obecnością metalu MEF (z ang. *metal enhanced fluorescence*), gdzie odpowiednio zaprojektowane nanostruktury metaliczne/NPs zwiększają wydajność kwantową fluoroforów i mogą redukować efekt fotowysbielania [11].

Samoorganizacja to proces w którym nieuporządkowany układ wcześniej istniejących komponentów tworzy zorganizowaną strukturę lub wzór w wyniku specyficznych lokalnych oddziaływań między komponentami. Nie każdy ligand organiczny, który stabilizuje powierzchnię NPs pozwala na ich samoorganizację w uporządkowane struktury przydatne do specyficznych zastosowań [12]. Z pomocą przychodzi grupa technik zwanych technikami Langmuira dzięki którym możemy sterować procesem organizacji NPs [13]. Monowarstwy Langmuira to jednowarstwowe układy wytworzone z molekuł amfifilowych bądź z innych materiałów zdolnych do gromadzenia się na granicy faz woda-powietrze. Monowarstwy Langmuira mogą stanowić model błon biologicznych, umożliwiający ba-

danie procesów związanych z organizacją lipidów, interakcją leków, białek czy jonów z powierzchnią [14]. Dzięki kontrolowanemu położeniu barier w wannie Langmuira można uzyskać różne fazy uporządkowania, od fazy gazowej po fazę skondensowaną, a następnie przenosić takie warstwy na podłoża stałe [15]. W ostatnich latach monowarstwy te znalazły zastosowanie w inżynierii nanomateriałów, biosensorach oraz w modelowaniu interakcji błon komórkowych z antybiotykami i toksynami środowiskowymi [16, 17].



Rysunek 3.1: Liczba publikacji w okresie ostatnich trzydziestu pięciu lat (1990-2025) (liczba podawana co 5 lat dla liczby publikacji >10) zawierająca jedno z czterech słów w tytule, streszczeniu bądź w słowach kluczowych: *gold nanoparticles* (czarny), *plasmon resonance* (czerwony), *metal enhanced spectroscopy* (niebieski) oraz *Langmuir monolayer* (zielony). Dane opracowałem na podstawie danych z bazy Scopus na dzień 8 października 2026.

W ostatnich latach obserwuje się znaczący wzrost w liczbie opublikowanych prac dotyczących NPs. Co więcej w ostatnich trzydziestu pięciu latach (od 1990 do 2025) (patrz Rys. 3.1) liczba publikacji naukowych zawierających następujące słowa (w tytule, streszczeniu bądź w słowach kluczowych): *gold nanoparticles*, *plasmon resonance*, *metal enhanced spectroscopy* czy *Langmuir monolayer* w trzech pierwszych spośród czterech przypadków rośnie nieliniowo. Statystyki te podkreślają, jak istotne i aktualne są poruszane przeze mnie zagadnienia ponieważ przedstawione przeze mnie prace są ściśle powiązane z poruszaną tematyką.

Cel naukowy

Cel ogólny badań obejmuje nie tylko opis właściwości fizykochemicznych nanocząstek (NPs) w układach o różnym stopniu złożoności, lecz także zrozumienie, w jaki sposób kontrolowane uporządkowanie NPs, uzyskiwane poprzez odpowiednio dobrane parametry technologiczne formowania warstw, wpływa na modyfikację ich właściwości optycznych. Optyczne właściwości NPs są szeroko wykorzystywane w inżynierii materiałowej, gdzie precyzyjne powiązanie struktury materiału z jego funkcjonalnością otwiera drogę do projektowania nanomateriałów o pożądanym parametrach. W tym kontekście istotnym elementem badań jest również optymalizacja procesu wytwarzania nanoukładów, umożliwiając świadome kształtowanie ich finalnych właściwości. Zaprezentowane w Rozdziale 3.5.2 publikacje można podzielić na trzy grupy ([H1-H2], [H3-H6] oraz [H7-H9]), które łącznie tworzą spójny cykl prac naukowo-technologicznych. Z tego podziału wynikają trzy główne cele badań:

1. określenie podstawowych właściwości Au-NRs, takich jak zdolność do zamiany zaabsorbowanej energii na ciepło, wpływ tej energii na mikrootoczenie oraz zależność tych parametrów od sposobu ich wytworzenia i modyfikacji powierzchni,
2. zbadanie zdolności Au-NRs do tworzenia aktywnych nanoplatform w spektroskopii wzmocnionej obecnością metalu, w szczególności w cienkich warstwach otrzy-

manych techniką Langmuira i jej pochodnymi, ze zwróceniem uwagi na kontrolę parametrów procesu formowania warstw,

3. zrozumienie zjawiska hybrydyzacji NPs w układach o różnym stopniu złożoności zarówno:

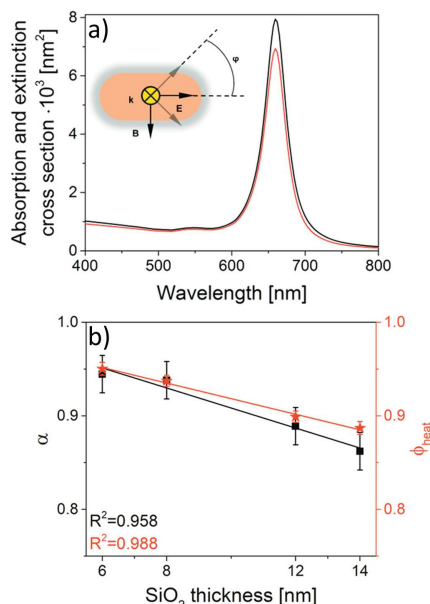
- teoretycznie (z wykorzystaniem modelowania numerycznego), gdzie sprzężenie plazmonowe Au-NPs analizowane jest w warunkach niezależnych od czynników technologicznych,
- jak i eksperymentalnie, w monowarstwach Langmuira, w których hybrydyzacja jest bezpośrednio regulowana przez parametry technologiczne procesu, takie jak rodzaj i ilość adsorbentu na granicy faz woda–powietrze.

Cykl dziewięciu publikacji składających się na osiągnięcie naukowe obejmuje prace dotyczące zarówno analizy właściwości plazmonicznych NPs, jak i kontroli procesu ich wytwarzania oraz organizacji w warstwach. W publikacjach [H1-H2] skoncentrowałem się na właściwościach cieplnych NPs, czyli zdolności do zamiany energii wzbudzenia na ciepło i wpływie tej energii na mikrootoczenie. W pracy [H1] oceniłem przydatność metody LIOAS do określania ilości energii zamienionej na ciepło przez Au-NRs o różnej grubości nieorganicznej otoczki SiO₂, podkreślając rolę parametrów syntezy w kształtowaniu tej otoczki. W publikacji [H2] zbadałem wpływ wzbudzenia Au-NRs na modyfikację organizacji molekularnej modelowej błony biologicznej. Cykl drugi prac został poprzedzony przeglądem literaturowym dotyczącym najnowszych doniesień na temat funkcjonalnych nanoplateform do spektroskopii optycznych wzmocnionych obecnością metalu [18]. Badania w [H3-H4] obejmują analizę SERS-aktywnych nanoplateform wytwarzanych z hydrofobowych [H3] i hydrofilowych [H4] NPs, gdzie różnice w sposobie organizacji wynikają bezpośrednio z warunków technologicznych formowania warstw. Publikacja [H5] rozwija wyniki z [H4] i analizuje wpływ rodzaju polimeru PEG na proces agregacji Au-NRs na podłożach stałych. W [H6] skupiłem się na wytworzeniu zoptymalizowanej platformy do detekcji barwników fotosyntetycznych, uzyskanej poprzez kontrolę organizacji hydrofobowych Au-NRs pod kątem emisji fluorescencyjnej modelowego barwnika – chlorofilu *a*. W publikacjach [H7-H9] przeanalizowałem właściwości hybrydyzacyjne NPs w układach o rosnącej złożoności. W [H7] zbadałem dimery zbudowane z Ag-NPrs o różnych konfiguracjach geometrycznych. W pracach [H8-H9] skupiłem się na hybrydyzacji dwóch typów Au-NPs w monowarstwach Langmuira, podkreślając wpływ parametrów procesu formowania warstw na finalną strukturę. W [H8] analizowałem Au-NRs o stałym stężeniu CTAB wynikającym z procedury syntezy chemicznej. W [H9] rozszerzyłem te badania o sferyczne Au-NPs z kontrolowanym stężeniem kwasu arachidowego (AA), co pozwoliło ocenić wpływ parametrów technologicznych na hybrydyzację i wynikające z niej właściwości optyczne.

Omówienie zrealizowanych badań i uzyskanych wyników

W omawianym cyklu prac przedmiotem badań były NPs wytworzone metodą *bottom-up* z wykorzystaniem metod redukcji chemicznej. Zastosowałem różne metody funkcjonalizacji NPs w celu otrzymania materiału o pożądanych właściwościach. W pierwszym obszarze prac [H1-H2] skupiłem się na dość ważnej właściwości NPs polegającej na ich ultraszybkiej i efektywnej zdolności do zamiany energii wzbudzenia na ciepło, które jest rozpraszane do otoczenia. Wydajność konwersji światła na ciepło ma kluczowe znaczenie dla zastosowań terapeutycznych i diagnostycznych. Dzięki temu NPs mogą być wykorzystywane w terapii fototermicznej PTT (z ang. *photothermal therapy*) wskutek zdolności do wytwarzania lokalnego ciepła. W ramach drugiego cyklu prac [H3-H6] podjąłem się zbadania zdolności NPs do generowania gorących punktów (z ang. *hot spots*) (obszarów, gdzie lokalne pole elektryczne zostaje wzmocnione) z wykorzystaniem techniki Langmuira oraz określiłem mechanizm prowadzący do agregacji Au-NRs sfunkcjonalizowanych polimerami. Prace badawcze poprzedzone były wnikliwą analizą literatury i opisaniem swoich spostrzeżeń w pracy przeglądowej [18]. Ostatnie publikacje [H7-H9] dotyczyły kolejnej ciekawej właściwości NPs a mianowicie zdolności do hybrydyzacji rezonansowych modów plazmonicznych. Po raz pierwszy opisałem mechanizm hybrydyzacji dimerów zbudowanych ze srebrnych nanoprismatów (Ag-NPrs) oraz przeprowadzono eksperymentalną

weryfikację hybrydyzacji w układach monowarstwowych dla NPs o kształcie sferycznym (Au-NPs) i prętopodobnym (Au-NRs).



Rysunek 3.2: a) Teoretyczne przekroje czynne na absorpcję i ekstynkcję, odpowiednio linia czerwona i czarna złotych nanoprętów pokrytych SiO_2 dla kąta $\varphi=45^\circ$ (kąt φ pomiędzy wzdłużną osią nanopręta a wektorem elektrycznym fali elektromagnetycznej zaznaczono na widoku z góry geometrii nanopręta (wstawka w panelu a)). b) Porównanie wartości teoretycznej (ϕ_{heat}) i doświadczalnie (α) wyznaczonej ilości energii wzbudzenia zamienianej na ciepło w funkcji grubości otoczki SiO_2 Au-NPs.

Au-NPs wykazują zdolność do absorbowania energii wzbudzającej i przekształcania jej w ciepło, co ma istotne znaczenie dla ich potencjalnego zastosowania w PTT. W publikacji [H1] pokazałem, że metoda LIOAS może być użyteczna do określenia wydajności konwersji energii wzbudzenia na ciepło. Metoda LIOAS umożliwiła określenie, jaka część energii wzbudzenia była przekształcana w ciepło (parametr α) przez Au-NRs pokryte SiO_2 w czasie krótszym niż rozdzielczość czasowa aparatury ($<200 \text{ ns}$). Szczegółowe wyniki badań teoretycznych i eksperymentalnych przedstawione są na Rys. 3.2. Au-NRs pokryte SiO_2 charakteryzują się wysoką zdolnością do zamiany energii na ciepło co pokazały wyniki teoretyczne przedstawione na 3.2a) (stosunek pola pod krzywą przekroju czynnego na absorpcję (krzywa czerwona) do pola pod krzywą przekroju czynnego na ekstynkcję (krzywa czarna)). Otrzymane sygnały LIOAS wykazywały liniową zależność od energii lasera. Na podstawie Rys. 3.2b) można wywnioskować, że Au-NRs pokryte SiO_2 przekształcają około 87-95% energii wzbudzenia w ciepło (dla grubości otoczki SiO_2 wynoszącej odpowiednio 6-14 nm). Wyniki eksperymentalne zostały skorelowane z wynikami teoretycznymi które przedstawiono na Rys. 3.2a) dla zdefiniowanego kąta φ pomiędzy wzdłużną osią Au-NRs a wektorem elektrycznym fali elektromagnetycznej (wstawka Rys. 3.2a)). Wyniki eksperymentalne przedstawione na Rys. 3.2b) były zgodne z teoretycznymi obliczeniami właściwości optycznych Au-NRs pokrytych SiO_2 (krzywa czarna *versus* czerwona), co potwierdziło ich wiarygodność. Praca [H1] jest pierwszym dowodem na to, że metoda LIOAS może służyć do precyzyjnego określania ilości energii zamienianej na ciepło przez Au-NRs z otoczką nieorganiczną o zróżnicowanej grubości, co więcej metoda ta charakteryzuje się wysoką czułością i możliwością doboru długości fali wzbudzenia, co

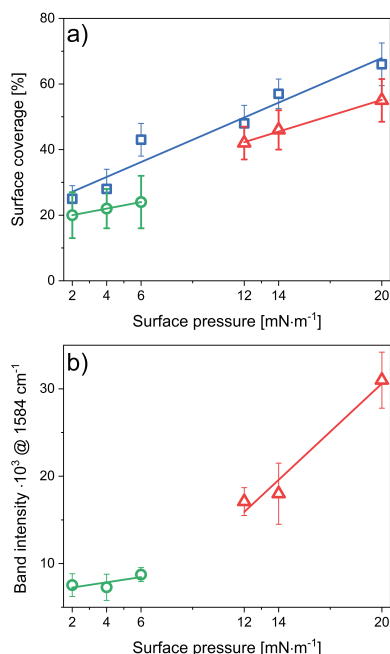
pozwala na selektywne wzbudzenie dowolnego pasma LSPR.

Wyniki przedstawione w pracy [H1] pokazały, że Au-NRs charakteryzują się wysokimi wartościami parametru α dlatego w pracy [H2] podjęto próbę zbadania wpływu lokalnego wzbudzenia światłem Au-NRs na zachowanie modelowej błony biologicznej, takie jak zdolność do formowania warstwy, jej stabilność i organizację. Do wytworzenia modelowej błony biologicznej wykorzystałem fosfolipid DPPC (z ang. *dipalmitoylphosphatidylcholine*), który jest powszechnie używany w badaniach modelowych oraz przy tworzeniu lipidów i dwuwarstw ze względu na jego wrażliwość na zmiany temperatury [19]. Przygotowano jedno- i dwuskładnikowe monowarstwy Langmuira. Porównano ich parametry termodynamiczne oraz określono charakter oddziaływania lipidów z Au-NRs – zarówno bez oświetlania, jak i w trakcie ekspozycji na światło. Wzbudzenie Au-NRs światłem o długości fali odpowiadającej pasmu LSPR powodowało skuteczną konwersję energii na ciepło przez Au-NRs. Dla ciśnień powierzchniowych (π) $\pi > 8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ wykazano, że obserwowany wzrost powierzchni zajmowanej przez molekuły DPPC nie wynikał ze zmiany orientacji fosfolipidów, lecz raczej z powiększenia odległości między nimi pod wpływem oświetlenia błony. Po ekspozycji na światło monowarstwy DPPC-Au-NRs, wykazywała większą stabilność i elastyczność niż w stanie nieoświetlonym. Ponadto, modelowa błona ulegała usztywnieniu, co wskazywało na stabilizację oddziaływań pomiędzy molekułami DPPC zaobserwowanej w czasie procesu relaksacji warstwy sprężonej do wartości natywnego ciśnienia powierzchniowego. Badania wykazały, że niewielka ilość NPs w warstwie lipidowej, zdolnych wydajnie zamienić energię wzbudzenia na ciepło, oraz oświetlenie ich światłem o odpowiedniej długości fali wpływa na stabilność, upakowanie i organizację lipidów w modelowych błonach komórkowych. Efekty fototermiczne mogą zatem prowadzić do zmian w przepuszczalności i/lub integralności błony, co wymaga dalszych badań w celu ustalenia optymalnych warunków wykorzystania Au-NRs w PTT.

Wszechstronne strategie opracowywania funkcjonalnych materiałów nanostrukturalnych często koncentrują się na organizacji NPs w odpowiednich strukturach [20–23]. Zainteresowanie badawcze takimi układami wynika z ich potencjalnych zastosowań w różnych dziedzinach nauki i technologii. W związku z powyższym w publikacji [18] przeanalizowałem ostatnie doniesienia literaturowe z zakresu uporządkowanych warstw zbudowanych z NPs i ich wykorzystaniu w spektroskopii wzmocnionych obecnością metalu. NPs wzbudziły w ostatnim czasie duże zainteresowanie ze względu na fakt, że w ich uporządkowanych układach mogą być generowane tzw. plazmoneczne gorące punkty. Przydatną techniką spektroskopową w tym kontekście jest SERS. Zjawisko SERS jest powszechnie stosowane w technikach detekcji śladowych ilości molekuł i opiera się na zasadzie, że nieelastyczne światło rozproszone może zostać znacznie wzmocnione na powierzchni. W celu wydajnego użycia tej techniki do powyższych zastosowań należy ją jeszcze dopracować. Dla przykładu jednym z wyzwań jest zaprojektowanie jednorodnych, wysoce powtarzalnych i efektywnie wzmacniających podłoży zbudowanych NPs o wysokiej precyzji strukturalnej.

Au-NPs ze względu na dość łatwą syntezę często wykorzystywane są jako materiał do konstrukcji aktywnych podłoży w spektroskopii Ramana [24]. Dodatkową zaletą Au-NPs jest łatwość ich hydrofobizacji [25], co stwarza nowe możliwości do formowania monowarstw na granicy faz woda-powietrze. Skuteczną metodą osadzania warstw z hydrofobowego materiału jest zastosowanie techniki Langmuira-Schaefera, która pozwala na uzyskanie monowarstw NPs na stałym podłożu. W publikacji [H3] skorelowałem gęstość upakowania i właściwości termodynamiczne monowarstwy Au-NPs z ich wydajnością jako podłoży do spektroskopii SERS. Aby uzyskać głębszy wgląd w to zjawisko, zbadalem rozkład Au-NPs w warstwach Langmuira i Langmuira-Schaefera. Zaobserwowałem korelację między współczynnikami wzmocnień sygnałów Ramana, a uporządkowaniem Au-NPs w skali mikro- i nano. Otrzymane rezultaty wykazały potencjał dostosowywania odpowiedzi Ramana poprzez kontrolowanie właściwości termodynamicznych monowarstw Au-NPs.

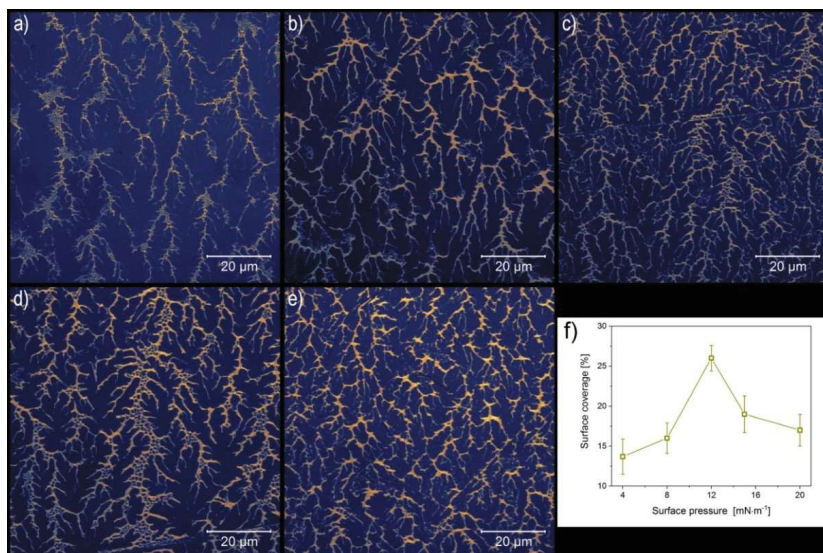
Na Rys. 3.3a)-b) uwidoczniono dwa regiony π ($< 9 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ oraz $\geq 12 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$). Sposób organizacji monowarstw Au-NPs był odmienny w mikro i nanoskali. W całym obszarze analizowanych π zaobserwowałem monotoniczny wzrost upakowania domen w mikroskali (krzywa niebieska na Rys. 3.3a)). Natomiast odległości pomiędzy Au-NPs, analizowane z wykorzystaniem mikroskopu TEM, w drugim obszarze $\geq 12 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ w porównaniu do pierwszego ($< 9 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ charakteryzowały się silniejszym wzrostem stopnia



Rysunek 3.3: a) Zależność stopnia pokrycia złotych nanocząstek w warstwie Langmuira-Schaefera od ciśnienia powierzchniowego przy którym przeniesiono monowarstwę Langmuira, wartości otrzymane z wykorzystaniem mikroskopu konfokalnego (niebieskie symbole) i mikroskopu TEM dla niskiego i wysokiego zakresu ciśnień powierzchniowych odpowiednio kolor zielony i czerwony. b) Intensywność pasma PMBA przy 1584 cm⁻¹ w funkcji ciśnienia powierzchniowego przy którym przeniesiono monowarstwę Langmuira. Punkty dopasowałem funkcją liniową dla zakresu niskiego i wysokiego ciśnienia powierzchniowego.

pokrycia (krzywa czerwona *versus* zielona). Bardziej wyraźną zależność potwierdzającą powyższe obserwacje, które zobrazowałem na wykresie zależności intensywności pasma Ramana PMBA w funkcji π , przy którym przeniesiono monowarstwę Langmuira (Rys. 3.3b)). Stosunek współczynników nachylenia krzywych regresji liniowej dla dwóch obszarów π , pokazanych na Rys. 3.3b), wynosi około 6. W związku z tym przy zastosowaniu wyższego π (≥ 12 mN·m⁻¹, odpowiadającego punktowi przemiany fazowej, dla którego obserwowałem stopniowy wzrost modułu ściśliwości monowarstwy Langmuira), Au-NPs miały tendencję do tworzenia struktur dobrze upakowanych w mikro- i nanoskali, co prowadziło do wzrostu intensywności pasma Ramana. Spektroskopia Ramana wykazała różny stopień wzmocnienia w zależności od zastosowanych zakresów π . Zmiana zakresu π podwoiła oczekiwaną intensywność sygnału SERS. Uzyskane wyniki wykazały jak duże znaczenie ma uwzględnienie wszystkich parametrów opisujących monowarstwę Langmuira dla zrozumienia i kompletnego opisu sposobu działania i zachowania nanoplatformy SERS.

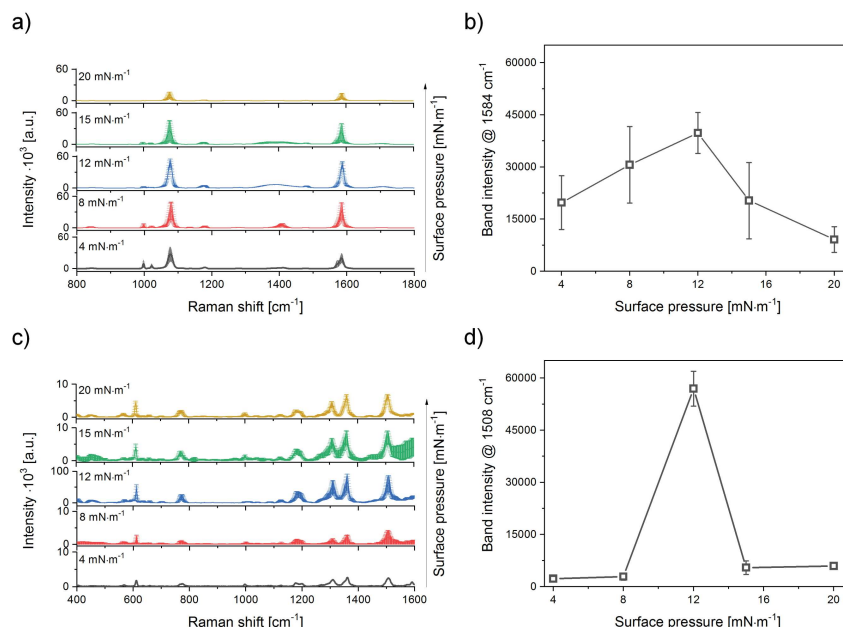
NPs o wyższym stopniu anizotropii niż Au-NPs charakteryzują się znaczącym wzmocnieniem pola elektromagnetycznego na poziomie pojedynczej cząstki, jednak ich ułożenie w struktury uporządkowane nie poprawia istotnie ich zdolności do wzmocnienia sygnału ramanowskiego [26]. Co zaskakujące, w przypadku Au-NRs obserwuje się zdecydowanie większą ilość gorących punktów przy pokryciu powierzchni powyżej 60%, co zapewnia wyższą efektywność w spektroskopii SERS. W publikacji [H4] użyto Au-NRs pokrytych polimerem typu PEG. Współczynnik wzmocnienia sygnału Ramana wyniósł



Rysunek 3.4: Przykładowe obrazy topografii złotych nanoprętów warstw Langmuira-Blodgett otrzymane z wykorzystaniem mikroskopu konfokalnego dla ciśnień powierzchniowych równych **a)** $4 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, **b)** $8 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, **c)** $12 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, **d)** $15 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ i **e)** $20 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. **f)** Zależność stopnia pokrycia złotych nanoprętów warstw Langmuira-Blodgett w funkcji ciśnienia powierzchniowego, przy którym przeniesiono monowarstwę Langmuira. Pionowe boki paneli **a)**-**e)** przedstawiają kierunek wynurzania podłoża kwarcowego z subfazy wodnej.

około $2 \cdot 10^5$ dla π równego $12 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, przy którym monowarstwa została przeniesiona. Ze względu na obecność polimeru PEG na powierzchni Au-NRs oraz proces odparowywania resztek wody podczas osadzania warstwy (*dewetting*), na stałym podłożu zaobserwowano charakterystyczne agregaty o dendrytycznym kształcie przedstawione na Rys. 3.4. Ilość struktur dendrytycznych oraz stopień pokrycia powierzchni Au-NR można dostosować poprzez kontrolowanie π osadzania. Uzyskane struktury dendrytyczne były zorientowane quasi-równoległe do kierunku wynurzania kwarcowego podłoża z wodnej subfazy. Wraz ze wzrostem π , jak pokazano na Rys. 3.4f), zwiększa się gęstość upakowania Au-NRs. Pozytywny wpływ zwiększenia stopnia pokrycia Au-NR na wydajność nanoplatformy SERS został opisany przez Solis i innych [26]. Ponadto, w widmach absorpcji Au-NRs na podłożu kwarcowym zaobserwowałem silne przesunięcie pasm w kierunku czerwonym (z ang. *redshift*) spowodowane agregacją Au-NRs oraz formowaniem struktur dendrytycznych. W przypadku monowarstw gęsto upakowanych Au-NRs szerokie maksima absorpcji wynikały z gęstego rozkładu spektralnego rezonansów związanych z różnorodną morfologią Au-NRs.

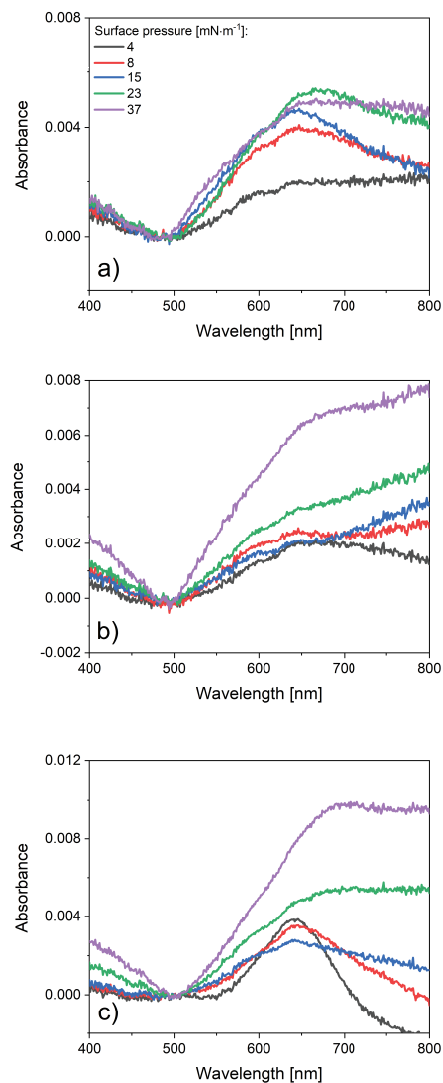
W celu zbadania wpływu π na właściwości nanoplatformy SERS, przeanalizowałem dwa materiały: PMBA oraz rodaminę 6G. Rys. 3.5a) oraz Rys. 3.5c) przedstawia uśrednione widma SERS odpowiednio dla PMBA i rodminy 6G zaadsorbowanych na monowarstwach Langmuira z Au-NRs przygotowanych przy różnych π . W obu przypadkach intensywność charakterystycznych pasm dla związków rośnie wraz ze wzrostem π . W obu przypadkach maksymalną intensywność obserwuje się przy $12 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, co udowadnia, że wydajność nanoplatform nie zależy od rodzaju analizowanej molekuly. Dalsza kompresja monowarstwy Langmuira oraz wzrost wartości modułu ściśliwości nie poprawiają wydajności SERS. Maksymalne pokrycie powierzchni uzyskano przy $12 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$, patrz Rys. 3.4f). Spadek intensywności pasm Ramana powyżej tej wartości π można przypisać formowaniu się agregatów wielowarstwowych i zmniejszeniu gęstości gorących punktów na stałych podłożach. Uzyskane wyniki wskazują na istotne znaczenie dalszych badań



Rysunek 3.5: Uśrednione widma SERS i ich odchylenia zebrane z różnych obszarów nanoplatfomy oraz średnia intensywność charakterystycznego pasma w funkcji ciśnienia powierzchniowego przy którym przeniesiono monowarstwę Langmuira: **a)** i **b)** dla PMBA oraz **c)** i **d)** dla rodaminu 6G.

nad uporządkowaniem metalicznych NPs w monowarstwach, z uwzględnieniem wielkości i kształtu NPs oraz rodzaju ligandów stabilizujących ich powierzchnię.

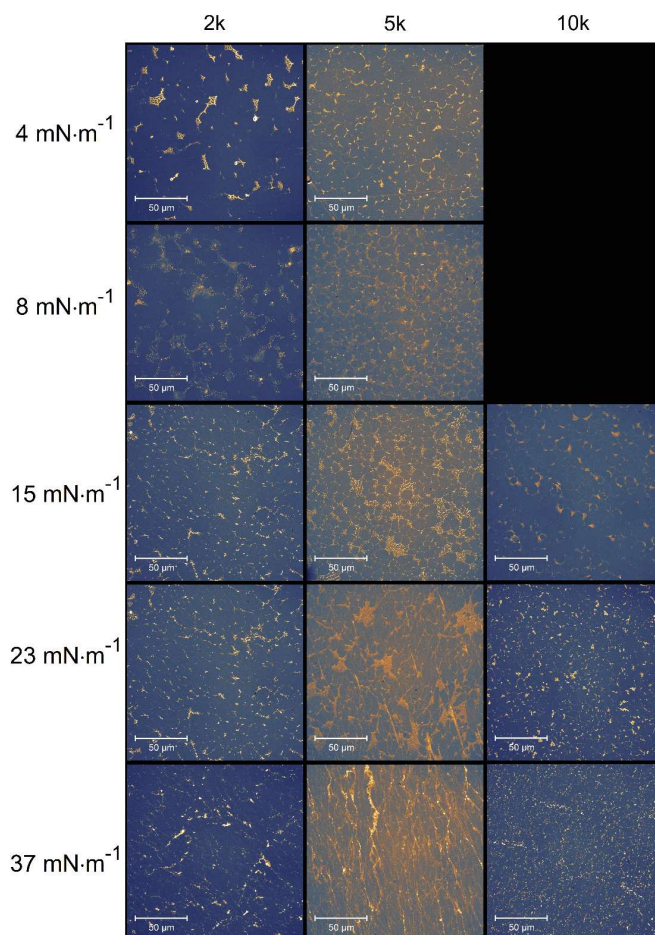
W procesie syntezy Au-NRs kluczową rolę odgrywa surfaktant stabilizujący (przeważnie CTAB), który powinien wytworzyć na powierzchni Au-NRs dwuwarstwę w celu zapewnienia ich stabilności [27, 28]. Dwuwarstwa tworzy się przy stężeniu molowym CTAB równym 5-100 mM [29]. Jest to zatem stężenie wyższe od stężenia surfaktantu, które jest wystarczające do wytworzenia monowarstwy Langmuira tj. całkowitego pokrycia wanny Langmuira. Ze względu na zdolność adsorpcji surfaktantu na granicy faz istotna jest dokładna kontrola jego stężenia w roztworze, który nanoszony jest na granicę faz woda-powietrze, o ile pożądanym nie jest perturbacja kształtu izotermy dla Au-NRs przez nadmiarową zawartość CTAB. Organizacja Au-NPs w uporządkowane filmy jest procesem złożonym. Rodzaj ligandu stabilizującego nanocząstki oraz metoda tworzenia uporządkowanej warstwy mogą znacząco wpływać na właściwości optyczne uzyskanych struktur [30, 31]. Badania nad strukturą ligandu i interakcjami między Au-NPs mogą dostarczyć lepszego zrozumienia procesu projektowania warstw oraz jakości otrzymywanych materiałów. Jedną z metod funkcjonalizacji stosowaną przy przygotowywaniu Au-NRs jest wykorzystanie polimeru PEG zakończonego grupą -SH, co było przedmiotem badań w publikacji [H4]. Pozwala to uzyskać Au-NRs zdolne do tworzenia stabilnych monowarstw na granicy woda-powietrze po ich zdyspergowaniu w odpowiednim rozpuszczalniku organicznym. W kolejnej z prac [H5] pokazałem, że w zależności od masy cząsteczkowej polimeru PEG, pokrywającego powierzchnię Au-NRs, możliwe jest uzyskanie odmiennych struktur na granicach faz. Nerozpuszczalne i stabilne monowarstwy Langmuira złożone z Au-NRs z polimerem PEG o wyższej masie cząsteczkowej tworzyły się jedynie w obecności dodatkowego stabilizatora. Na granicy faz ciało stałe-powietrze zmiany konformacyjne polimeru PEG powodowały agregację Au-NRs, które pod wpływem zwiększającego się π stawały



Rysunek 3.6: Widma absorpcji warstw Langmuira-Schaefera Au-NRs przeniesionych na podłoża kwarcowe dla różnych polimerów PEG: **a)** PEG-2k, **b)** PEG-5k oraz **c)** PEG-10k.

się gęsto upakowane.

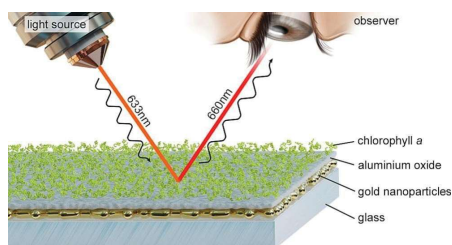
Widma absorpcji warstw Langmuira-Schaefera Au-NRs, pokazane na Rys. 3.6, sugerują różny stopień agregacji Au-NRs w zależności od polimeru PEG. Kształt widma Au-NRs na podłożu jest podobny do obserwowanego w roztworze Au-NRs (widma w roztworze można znaleźć w materiale wspomagającym publikację **[H5]** jako Rys. S2). Dla wyższych wartości π maksimum głównego pasma LSPR ulegało przesunięciu ku czerwieni. Takie zachowanie było widoczne również dla PEG-2k i PEG-5k. Pasma absorpcyjne ulegają poszerzeniu i przesunięciu ku czerwieni wraz ze wzrostem π . W przypadku polimerów



Rysunek 3.7: Przykładowe obrazy z mikroskopu konfokalnego warstw Langmuira-Schaefera Au-NRs sfunkcjonalizowanych polimerem typu PEG o masie cząsteczkowej 2k, 5k lub 10k dla różnych wartości ciśnień powierzchniowych, przy których przeniesiono monowarstwę Langmuira. Pionowe boki paneli są równoległe do dłuższych boków wanny Langmuira.

PEG-2k oraz PEG-5k wykryto dwa maksima przy 530 i 650 nm. Dla PEG-5k pojawiło się trzecie pasmo powyżej 800 nm. Dla wszystkich polimerów PEG oraz warstw Langmuira-Schaefera widoczne było pasmo przy 630 nm, co sugerowało przesunięcie ku czerwieni wraz ze wzrostem π . Polimer PEG z najdłuższym łańcuchem alkilowym (PEG-10k) i najniższym π zapewniał brak agregacji Au-NR w monowarstwach (Rys. 3.6c) – czarna linia). Podobną tendencję do tworzenia zagregowanych struktur Au-NRs opisały inne grupy badawcze, które wykorzystały zaawansowane techniki obliczeń elektromagnetycznych do opracowania symulacji dla szerokiego zakresu podłoży SERS opartych na nanocząstkach, obejmujących realistyczne konfiguracje z losowym rozmieszczeniem setek NPs [25, 26]. Autorzy tych badań stwierdzili, że agregacja NPs w dimery i monowarstwy powoduje dodatkowe przesunięcia pasm LSPR w stronę czerwieni oraz ich poszerzenie, a także wzrost wartości przekroju czynnego na ekstynkcję. Zachowanie agregacyjne Au-NRs na grani-

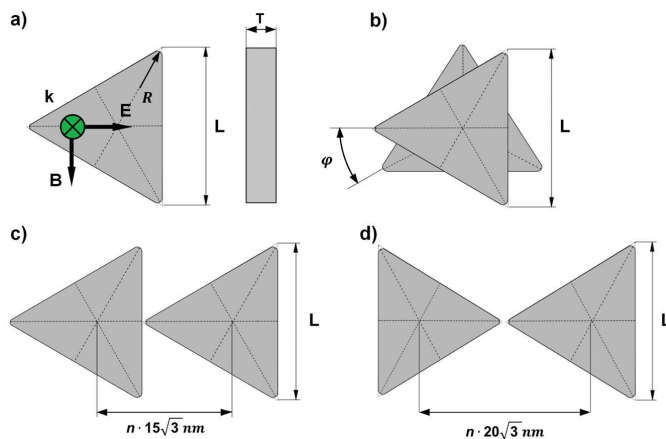
cach faz zbadałem również przy użyciu mikroskopii konfokalnej (Rys. 3.7). Rozmieszczenie Au-NRs w skali mikrometrycznej analizowałem w kontekście ich tendencji do agregacji. Ponadto, na podstawie uzyskanych danych obliczyłem pokrycie powierzchni. Warstwy osadzone metodą Langmuira-Schaefera wykazywały większą tendencję do agregacji niż warstwy osadzone metodą Langmuira-Blodgett. W związku z tym, wartości ich współczynników pokrycia oraz gęstości agregatów są większe. Przy wzroście π do $37 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ dla PEG-5k i warstw Langmuira-Schaefera powstawały agregaty o charakterze podłużnym, co odróżniało je od pozostałych badanych warstw. Jednak już przy $\pi \geq 15 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ obserwowałem w nich niewielkie agregaty mikrometryczne. Proces formowania agregatów można wyjaśnić przy pomocy dwóch mechanizmów. Zgodnie z naszymi wcześniejszymi badaniami nad Au-NRs, tworzenie się agregatów w skali mikrometrycznej jest wynikiem procesu odwadniania (*dewetting*), zachodzącego podczas wyciągania podłoża z granicy woda-powietrze, natomiast w skali nanometrycznej Au-NRs mają tendencję do tworzenia dwóch głównych typów agregatów (z ang. *end-to-end* oraz *side-to-side*) [32, 33]. Uzyskane wyniki przedstawione w publikacji [H5] sugerują, że sposób organizacji Au-NRs może być kontrolowany z zastosowaniem polimeru PEG o konkretnej masie cząsteczkowej.



Rysunek 3.8: Schemat ideowy nanoplatformy badanej w publikacji [H6].

Oprócz zastosowania uporządkowanych warstw NPs do produkcji aktywnych nanoplatform w spektroskopii SERS są one również wykorzystywane we wzmocnionej obecności metalu fluorescencji [34–36]. W kolejnej publikacji [H6], wchodzącej w skład cyklu, opracowałem nanoplatformę składającą się z Au-NRs sfunkcjonalizowanych ligandami promezogenicznymi i pochodnymi tiolu, w formie monowarstwy Langmuira-Schaefera z cienką warstwą tlenku glinu (Al_2O_3). Obecność Al_2O_3 pozwoliła na kontrolę odległości między Au-NRs, a cząsteczkami pigmentu. Schemat badanego układu pokazano na Rys. 3.8. Nanoplatforma została dodatkowo sfunkcjonalizowana chlorofilem *a*, co umożliwiło wzmocnienie plazmoniczne w celu poprawy detekcji pigmentu. Do najważniejszych wniosków płynących z badań przedstawionych w pracy [H6] należą: (i) optymalne wzmocnienie fluorescencji uzyskane dzięki 10 nm przekładce Al_2O_3 , co dowodzi kluczowej roli grubości przekładki w równoważeniu wzmocnienia i wygaszania, (ii) platforma wykazuje liniową odpowiedź w szerokim zakresie stężeń chlorofilu *a*, co czyni ją odpowiednią do zastosowań w zakresie czujników ilościowych, (iii) pomimo niejednorodnego rozkładu Au-NRs, platforma zapewnia wiarygodne i powtarzalne pomiary fluorescencji, co wskazuje na możliwość jej praktycznego zastosowania. Co istotne, konstrukcja układu umożliwia detekcję innych pigmentów fotosyntetycznych z maksimami pasma absorpcji Q przesuniętymi do długości fal powyżej 750 nm. Praca ta dostarczyła podstawowych informacji na temat efektów indukowanych plazmonami w pigmentach fotosyntetycznych i podkreśliła potencjał tej nanoplatformy w zastosowaniach związanych z detekcją barwników fotosyntetycznych.

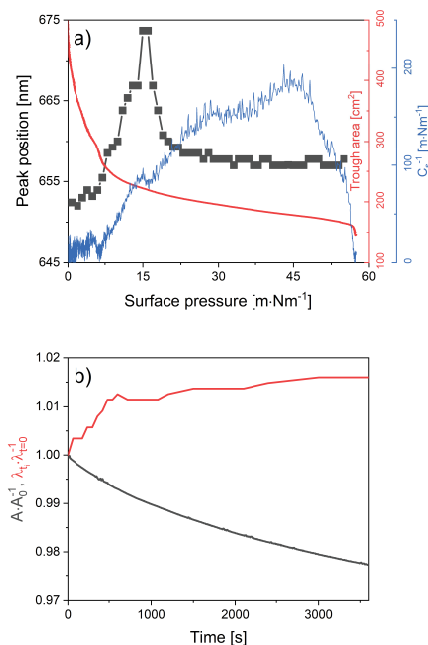
Zrozumienie zależności między odpowiedzią optyczną oddziałujących ze sobą NPs jest istotne dla skutecznego projektowania urządzeń opartych na ich właściwościach plazmonicznych. Właściwości optyczne układów składających się z pary lub większej ilości NPs posiadają unikalne właściwości optyczne, często odmienne niż te dla pojedynczej NP [20, 37–39]. Najważniejszą z nich jest zdolność do generowania lokalnego wzmocnienia pola elektrycznego. W publikacji [H7] badałem układ złożony z Ag-NPrs o różnych geometriach. W tym celu określiłem właściwości optyczne pojedynczego Ag-NPr oraz zagregowanego dimeru Ag-NPrs o przylegających i współpłaszczyznowych podstawach,



Rysunek 3.9: **a)** Pojedynczy nanoprzyzmat ($\varphi=0^\circ$) i wektory padającego światła zastosowane dla wszystkich konfiguracji. **b)** Układ nanoprzyzmatów z sąsiednimi podstawami ($\varphi=30^\circ$). **c)** Podstawy koplanarne z konfiguracją krawędź-wierzchołek ($n=2$, $\varphi=0^\circ$). **d)** Podstawy koplanarne z konfiguracją wierzchołek-wierzchołek ($n=2$, $\varphi=0^\circ$). Kąt φ zaznaczony na panelu **b)** reprezentuje obrót przeciwnie do ruchu wskazówek zegara jednego nanoprzyzmatu względem drugiego: dolnego **b)** i prawych **c)**-**d)**

wykorzystując technikę numerycznego modelowania w oparciu o metodę FIT (z ang. *finite integration technique*), pokazanych na Rys. 3.9. Analizowane typy agregacji Ag-NPrs są najbardziej korzystne energetycznie i dlatego są najczęściej rozważane w literaturze. Zmieniając orientację jednego Ag-NPr względem drugiego w układzie dimeru, określiłem siłę sprzężenia między nimi, analizując właściwości optyczne bliskiego i dalekiego pola (z ang. *near-* oraz *far-field*). Na podstawie tych wyników zaproponowałem model hybrydyzacji dimeru Ag-NPrs. Przedstawione wyniki pokazały, jak istotne są szczegółowe informacje strukturalne w badaniach pojedynczych i zagregowanych Ag-NPrs. Wykazałem, że agregacja może zaburzyć przewidywany profil optyczny NPs. Teoretyczne rozważania przedstawione w artykule mogą stanowić przydatne narzędzie do przewidywania właściwości optycznych uporządkowanych NPs oraz optymalizacji procesu ich ułożenia. Sprzężenie plazmoniczne to zjawisko występujące, gdy dwie lub więcej NPs zbliża się do siebie na odległość mniejszą niż ich rozmiary. W momencie wystąpienia sprzężenia plazmonicznego rezonans poszczególnych NPs zaczyna hybrydyzować, a ich widmo rezonansowe ulega przesunięciu (w kierunku fioletu lub czerwieni), w zależności od rozkładu gęstości ładunku powierzchniowego NPs. Dlatego też odpowiedź optyczna NPs może być zmieniana dzięki modulacji siły sprzężenia plazmonicznego. W kolejnej publikacji [H8] dzięki funkcjonalizacji Au-NRs polimerami typu PEG, wytworzono monowarstwy Langmuira Au-NRs i kontrolowano *in situ* zdolność Au-NPs do hybrydyzacji, regulując w ten sposób ich odpowiedź optyczną. Strategia ta umożliwia zrozumienie zjawiska hybrydyzacji Au-NRs w układach monowarstwowych.

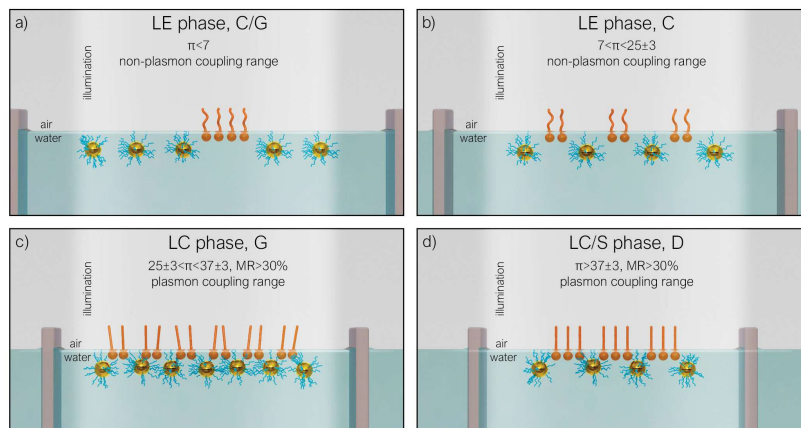
Aby skorelować obserwowaną hybrydyzację Au-NRs z właściwościami termodynamicznymi monowarstwy Langmuira, wykreślono zależność położenia maksimum LSPR, powierzchnię wanny oraz moduł ściśliwości w funkcji π , jak przedstawiono na Rys. 3.10. Można zauważyć, że maksymalne przesunięcie LSPR występuje przy pierwszym maksimum modułu ściśliwości. Takie zachowanie jest związane z obecnością dwóch związków powierzchniowo czynnych w monowarstwie Langmuira. Z jednej strony, pierwsze maksimum modułu ściśliwości dotyczy Au-NRs, pozostałe maksima modułu ściśliwości osiągane są przez cząstki CTAB. Jak wykazaliśmy w poprzednich badaniach [40] (publikacja [H4]), resztkowy CTAB w Au-NRs ma niewielki wpływ na przebieg izoterm obserwowanych dla monowarstw. Ponadto, przesunięcie maksimum głównego pasma LSPR wydaje się zależeć od konformacji łańcucha polimeru PEG na powierzchni Au-NR. Poprzez korelację wła-



Rysunek 3.10: **a)** Położenie wzdłużnego maksimum pasma LSPR złotych nanoprętów (Au-NRs), powierzchnia wanny oraz moduł ściśliwości w funkcji ciśnienia powierzchniowego. **b)** Względne zmiany powierzchni i położenia wzdłużnego maksimum pasma LSPR w funkcji czasu po sprężeniu do ciśnienia powierzchniowego wynoszącego 16 mN·m⁻¹ Au-NRs sfunkcjonalizowanych PEG-2k.

ściwości termodynamicznych z właściwościami optycznymi Au-NRs, zrozumiałem w jaki sposób hybrydują te typy NPs. Praca ta stanowi fundament dla rozwoju i dalszych badań w tym zakresie. Na przykład, NPs o różnych kształtach mogłyby być rozproszone w ośrodku modelowanych cząsteczek amfifilowych. Kontrolując stosunek liczby NPs do cząsteczek amfifilowych, możliwe byłoby ograniczenie obserwowanych zjawisk hybrydyzacji z warstwy ciągłej do poziomu agregatów pojedynczych NPs.

Kolejna publikacja [H9] jest rozwinięciem prac badawczych prowadzonych w pracy [H8]. Funkcjonalizacja Au-NPs jest niezbędna do uzyskania stabilnej dyspersji w rozpuszczalnikach organicznych. Charakter ligandu i obecność niepolarnych lub polarnych części cząsteczek determinują zdolność do tworzenia monowarstw na granicy faz woda-powietrze. Zatem, aby zbadać rezonanse optyczne zespołów NPs w monowarstwach Langmuira, należy unikać ich obecności lub dokładnie kontrolować ich stężenia. W pracy [H9] Au-NPs stabilizowane cytrynianem sodu i pokryte polimerem typu PEG wykorzystałem do zbadania i opisu mechanizmu ich hybrydyzacji. Strategia ta umożliwia zrozumienie zjawiska hybrydyzacji Au-NPs, które nie są zakłócane przez środki powierzchniowo czynne, zdolne do tworzenia warstwy. Wykazaliśmy, po raz pierwszy, że mechanizm hybrydyzacji Au-NPs, pokazany na Rys. 3.11, jest silnie zależny od obecności i orientacji molekularnej modelowych cząsteczek amfifilowych. Co więcej, zygzakowaty przebieg hybrydyzacji można kontrolować poprzez dostosowanie ilości surfaktantu w monowarstwie i jego stan fizyczny. Koncepcja mechanizmu hybrydyzacji Au-NPs zmodyfikowanych AA, została schematycznie przedstawiona na Rys. 3.11. Założono, że nanocząstki Au-NPs zanurzone są w wodzie, gdzie polarna głowa i niepolarny ogon AA znajdują się odpowiednio w wodzie i w powietrzu. W tym przypadku tylko polarne głowy AA mogą oddziaływać z



Rysunek 3.11: Mechanizm hybrydyzacji sferycznych nanocząstek metalicznych (Au-NPs) w zależności od ilości kwasu arachidowego (AA) w mieszaninie i położenia barier dla a), b) nieplazmowego sprzężenia i c), d) plazmowego sprzężenia. Faza cieczy rozprężonej (LE), która jest a) stała/rosnąca (C/G) i b) stała (C). c) Faza cieczy skondensowanej (LC), która jest rosnąca (G) oraz d) faza LC/stała (LC/S), która jest malejąca (D). C/G, C, G i D odnoszą się do zmian położenia maksimum głównego pasma LSPR. π to ciśnienie powierzchniowe w $\text{mN}\cdot\text{m}^{-1}$, a MR to ułamek molowy AA. Skala rysunku nie jest zachowana. Szczegółową dyskusję mechanizmu można znaleźć w publikacji [H9].

ligandami na powierzchni Au-NPs, ponieważ obie grupy znajdują się w roztworze wodnym. Zasadniczo mechanizm ten został podzielony na dwa etapy: – bez sprzężenia plazmowego (z ang. *non-plasmonic coupling regime*), w którym hybrydyzacja Au-NPs nie jest kontrolowana przez sprzężenie plazmowe, lecz wynika z agregacji Au-NPs podczas ich rozprzestrzeniania się na granicy faz woda-powietrze; – ze sprzężeniem plazmowym (z ang. *plasmonic coupling regime*), w którym stopień hybrydyzacji Au-NPs jest kontrolowany przez sprzężenie plazmowe.

Dwie pierwsze fazy mechanizmu hybrydyzacji kwalifikują się do etapu bez sprzężenia plazmowego, co przedstawiono na Rys. 3.11a)-b). Bezpośrednio po naniesieniu Au-NPs na granicę faz woda-powietrze znajdowały się one w większej odległości, ponieważ nie oddziaływały ze sobą na poziomie warstwy ciągłej. Pewne oddziaływania mogły jednak zachodzić w agregatach powstałych podczas rozprzestrzeniania mieszanin. W pierwszej fazie C/G zaobserwowano stałą lub rosnącą pozycję maksimum pików LSPR. W drugiej fazie, nazwanej fazą C, pozycja maksimum głównego pasma LSPR pozostaje stała dzięki większej swobodzie i przestrzeni dla Au-NPs i AA. Ostatnie fazy mechanizmu hybrydyzacji, czyli etap sprzężenia plazmowego, przedstawiono na Rys. 3.11c)-d). W tych fazach obserwuje się największy gradient funkcji położenia maksimum głównego pasma LSPR. W pierwszym obszarze sprzężenia plazmowego, tzw. regionie G, dla wartości π około $24 \pm 5 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$ (w zależności od rozmiaru Au-NPs), obserwuje się wzrost przesunięcia położenia pasma LSPR wraz ze wzrostem absorpcji w maksimum LSPR. W ostatniej fazie D pozycja maksimum głównego pasma LSPR zmniejsza się wraz ze wzrostem π . Odpowiedź plazmowa Au-NPs wynika wyłącznie z organizacji strukturalnej i reorganizacji filmu towarzyszących wzrostowi π . Podczas kompresji monowarstwy Langmuira ulega przebudowaniu, co wyjaśnia mechanizm zaproponowany w publikacji [H9]. Podsumowując, wnioski płynące z tej publikacji przyczyniają się do lepszego zrozumienia zjawiska hybrydyzacji Au-NPs, które nie jest zakłócanie przez obecność czynników stabilizujących dodawanych w trakcie syntezy NPs. Zarówno w tym przypadku, jak i we wcześniejszych badaniach nad Au-NRs (praca [H8]), surfaktanty odgrywają rolę w dostrajaniu sprzężenia plazmo-

nicznego Au-NPs. Uzyskane wyniki pozwalają lepiej zrozumieć współdziałanie substancji amfifilowej i hydrofilowego, optycznie aktywnego nanomateriału plazmonicznego, co może mieć szczególne znaczenie w kontekście zastosowań biologicznych.

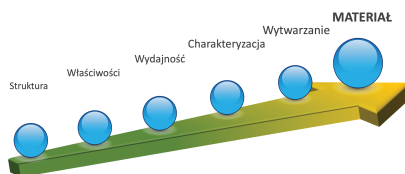
3.5.4 Podsumowanie badań i ich znaczenie dla rozwoju inżynierii materiałowej

Cykl dziewięciu powiązanych tematycznie artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych, pt. „*Inżynieria nanomateriałów plazmonicznych: struktura i właściwości optyczne w układach o różnym stopniu złożoności*” dotyczy analizy i badań nad właściwościami nowych materiałów o unikalnych właściwościach optycznych. Na podstawie aktualnego stanu wiedzy, podejmowane przeze mnie prace badawcze stanowią nowy, oryginalny i istotny wkład w dyscyplinę inżynierii materiałowej. Publikacje w renomowanych i cenionych w środowisku naukowym czasopismach z listy MNiSW, w tym czasopismach wyróżnionych w *Journal Citation Reports*, świadczą o oryginalności badań i globalnym ich zasięgu. Za najważniejsze osiągnięcia i elementy nowości naukowej, zawarte w cyklu publikacji, uznaję:

- wykazanie uniwersalności metody LIOAS do badania nanomateriałów i określania ich właściwości fototermicznych,
- wyjaśnienie wpływu wzbudzenia modelowej błony biologicznej zawierającej złote nanoprety na właściwości fosfolipidów,
- korelację właściwości termodynamicznych sferycznych złotych nanocząstek z ich zdolnością do wzmacniania sygnałów ramanowskich molekuł,
- wykorzystanie struktur dendrytycznych zbudowanych ze złotych nanopretów do wykrywania cząsteczek modelowych oraz modulowanie ich odpowiedzi z uwzględnieniem sprzężenia plazmonicznego nanocząstek i stopnia pokrycia powierzchni,
- opis organizacji złotych nanopretów pokrytych polimerami typu PEG na granicy faz woda-powietrze i ciało-stałe powietrze,
- budowę i charakteryzację nanoplatformy do detekcji barwników fotosyntetycznych w której rolę protekcyjną oraz kontrolującą oddziaływanie z warstwą aktywną odgrywa tlenek glinu,
- zaproponowanie modelu hybrydyzacji dimeru nanocząstek zbudowanego z nanopryzmatów,
- zbadanie i wyjaśnienie mechanizmu hybrydyzacji *in situ* złotych nanopretów w układach monowarstwowych,
- wykazanie, że mechanizm hybrydyzacji sferycznych złotych nanocząstek w monowarstwie Langmuira jest silnie zależny od obecności i orientacji molekularnej modelowych cząsteczek amfifilowych.

Przedstawione w autoreferacie badania wpisują się w założenia paradygmatu 6O (jedności oczekiwań) w dyscyplinie inżynierii materiałowej, ponieważ realizują jego kluczową ideę polegającą na ścisłym powiązaniu właściwości materiału z kontrolowanym procesem jego wytwarzania oraz docelową funkcjonalnością Rys. 3.12. W szczególności widoczne jest tu podejście charakterystyczne dla nowoczesnej inżynierii materiałowej, w którym materiał nie jest jedynie obiektem badań, lecz świadomie projektowanym układem spełniającym określone wymagania aplikacyjne.

W kontekście pierwszego elementu paradygmatu, jakim jest „oczekiwany materiał”, koncentruję się na projektowaniu nanomateriałów o ściśle kontrolowanych właściwościach optycznych i plazmonicznych. Wykazałem, że poprzez odpowiedni dobór parametrów strukturalnych, takich jak kształt, rozmiar oraz stopień uporządkowania nanocząstek, możliwe jest precyzyjne sterowanie ich odpowiedzią optyczną. Szczególnie istotne jest tu powiązanie właściwości materiału z jego funkcjonalnością, co znajduje odzwierciedlenie w analizie efektów takich jak SERS i MEF, a także w badaniach nad konwersją energii



Rysunek 3.12: Paradygmat inżynierii materiałowej: od struktury do wytwarzania materiału.

wzbudzenia na ciepło. Otrzymane nanostruktury analizuję nie tylko pod kątem ich właściwości fizycznych, lecz również jako funkcjonalne platformy mogące znaleźć zastosowanie w detekcji molekularnej, optoelektronice czy medycynie.

Drugim istotnym aspektem paradygmatu 6O jest „oczekiwany proces technologiczny”, który w prowadzonych przeze mnie badaniach odgrywa kluczową rolę. Wykorzystuję zaawansowane techniki formowania warstw, w szczególności metody Langmuira i ich pochodne, umożliwiające precyzyjną kontrolę organizacji nanocząstek na granicach faz. Poprzez świadome sterowanie parametrami procesu, takimi jak ciśnienie powierzchniowe, rodzaj ligandu czy stężenie surfaktantu, kształtuję strukturę powstających układów. Wykazałem, że proces technologiczny nie stanowi jedynie etapu wytwarzania materiału, lecz jest kluczowym narzędziem determinującym jego strukturę, a tym samym właściwości i funkcjonalność.

Szczególnie wyraźnie realizuję ideę jedności oczekiwania, polegającą na integracji różnych poziomów opisu materiału – od mechanizmów fundamentalnych, przez strukturę, aż po zastosowanie. W badaniach analizuję zarówno podstawowe zjawiska fizyczne, takie jak konwersja energii czy hybrydyzacja plazmonowa, jak i bardziej złożone układy w postaci uporządkowanych monowarstw oraz nanoplateform funkcjonalnych. Uzyskane wyniki prowadzą bezpośrednio do możliwości projektowania materiałów o określonych właściwościach użytkowych. Istotnym elementem tego podejścia jest również połączenie metod eksperymentalnych z modelowaniem numerycznym, co pozwala mi na pełniejsze zrozumienie badanych zjawisk oraz ich świadome wykorzystanie w procesie projektowania materiałów.

Prowadzone przeze mnie badania mają wyraźnie interdyscyplinarny charakter, łącząc zagadnienia z zakresu fizyki, chemii oraz inżynierii materiałowej. Takie podejście jest zgodne z założeniami paradygmatu 6O, który wymaga integracji wiedzy z różnych dziedzin w celu opracowania zaawansowanych materiałów o z góry określonych właściwościach. Jednocześnie tematyka badań wpisuje się w aktualne trendy rozwoju nauki i technologii, szczególnie w obszarze nanotechnologii i materiałów funkcjonalnych, które znajdują zastosowanie w nowoczesnych systemach detekcyjnych, medycynie oraz optoelektronice.

Podsumowując, przedstawione badania stanowią spójny przykład realizacji paradygmatu 6O w praktyce. Obejmują one pełny łańcuch projektowania as – od zrozumienia mechanizmów fizycznych, poprzez kontrolę procesu technologicznego i struktury, aż po uzyskanie określonych właściwości funkcjonalnych. Tym samym wpisują się w nowoczesne podejście do inżynierii materiałowej, w którym kluczowe znaczenie ma świadome projektowanie materiałów zgodnie z oczekiwaniami ich przyszłych zastosowań.

3.5.5 Plany badawcze

W dalszych etapach pracy badawczej zamierzam bazować na zgromadzonym doświadczeniu w zakresie nanocząstek metalicznych i wykorzystać je w nowych obszarach badań z położeniem szczególnego nacisku na współpracę z międzynarodowymi grupami badawczymi. Moje plany badawcze dotyczą kontynuacji badań nad wytworzeniem powierzchni antybakteryjnych oraz fotokatalitycznych na bazie dwutlenku tytanu zapoczątkowanych

podczas stażu w grupie Pani Doktor Belindy Heyne. Co więcej planuję rozwinąć badania nad nanoklastrami złota i ich zastosowaniem w układach z barwnikami fotosyntetycznymi. W tym celu planuję aplikować o granty naukowe we współpracy międzynarodowej. Ponadto planuję zakończyć obecne etapy badań stanowiące rozwinięcie wyników przedstawionych w publikacji [H6]. W tym celu zbadana zostanie interferencja materii organicznej i jonów soli w próbkach wody naturalnej w procesie detekcji barwników. Przyszłe prace badawcze skupią się również na udoskonaleniu skalowalności platformy. Co więcej badanie kompatybilności platformy z innymi pigmentami fotosyntetycznymi otworzy nowe możliwości zastosowań w bioczułnikach i w zbieraniu światła.

3.6 Wykaz istotnej aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej instytucji naukowej

3.6.1 Zagraniczne staże naukowe

1. **Faculty of Science, Department of Chemistry, University of Calgary, Calgary, Canada**

Staż naukowy w terminie od 01.06.2025 do 28.07.2025, finansowany w ramach środków Rektora Politechniki Poznańskiej w ramach programu konkursowego pt., *Program stażowy - inicjatywa doskonała współpraca międzynarodowa*

Zrealizowane cele: realizacja projektu pt. „*The mechanism of photophysical parameters enhancement of dye-metallic nanoparticles conjugates in thin layers: basic studies toward improved antimicrobial surfaces*”. Określiłem wpływ warstwy dwutlenku tytanu TiO₂ na właściwości do generowania tlenu singletowego oraz fotokatalityczne złotych nanocząstek.

Badania realizowane w zespole dr Belindy Heyne

2. **ICFO – The Institute of Photonic Sciences, Castelldefels, Spain**

Staż naukowy w terminie od 14.09.2024 do 29.09.2024, finansowany w ramach grantu Sonata NCN

Zrealizowane cele: pomiar czasów życia funkcjonalnych nanoplateform do ultraczułej detekcji barwników fotosyntetycznych. Część otrzymanych wyników opisano w publikacji [H7] Kotkowiak et al. *Optimizing nanostructured platform for enhanced detection of photosynthetic pigments* Applied Surface Science 712 (2025) 164091-164100.

Badania realizowane w zespole prof. dr. Nieka van Hulsta

3. **School of Chemical Engineering, Aalto University, Espoo, Finland**

Staż naukowy w terminie od 01.05.2012 do 31.07.2012, finansowany w ramach programy *Era Inżyniera – Rozbudowa potencjału rozwojowego Politechniki Poznańskiej*.

Zrealizowane cele: badanie kompozycji modelowych błon biologicznych na ich zdolność do transportu tlenu z wykorzystaniem metod elektrochemicznych.

Badania realizowane w zespole prof. dr. Kyösti Kontturi

3.6.2 Współpraca naukowa

1. Jednostka: *Department of Chemistry, University of Calgary, Canada*

Współpraca: dr Belinda Heyne

Opis: Panią Doktor Belindę Heyne miałem przyjemność poznać na konferencji naukowej „2024 Noble Metal Nanoparticles Conference GRC” która odbyła się w Stanach Zjednoczonych w czerwcu 2024. Udział w tym wydarzeniu, wymiana doświadczeń oraz pomysłów na dalsze badania otworzyły przed nami nowe perspektywy współpracy naukowej, wynikające z komplementarności naszych zainteresowań badawczych. W roku 2025 odbyłem dwumiesięczny staż w zespole Pani Doktor co było kluczowym krokiem w dalszym rozwoju naukowym i umożliwiło mi zdobycie cennego doświadczenia w zakresie zaawansowanych badań fotofizycznych nad układami organiczno-nieorganicznymi, które są specjalnością zespołu dr Heyne. Obecnie prowadzimy wspólne badania do publikacji naukowej dotyczącej otrzymania powierzchni antybakteryjnych i zamierzamy zaaplikować o wspólny grant badawczy.

2. Jednostka: *Department of Chemistry, Southern Methodist University, Dallas, TX, USA*

Współpraca: dr Anindita Das

Opis: Grupa Pani Doktor skupia się na syntezie multifunkcyjnych nanomateriałów z atomową precyzją tzw. nanoklastry metaliczne i ich zastosowaniu w takich obszarach jak zrównoważona energia i zdrowie człowieka. Dr. Das odbyła staż podoktorski w jednej z najlepszych na świecie grup z dziedziny nanocząstek metalicznych prowadzonej przez Profesora Chada Mirkina z Northwestern University, IL, USA. Obecnie prowadzi niezależną grupę badawczą, z którą mam okazję współpracować w zakresie tworzenia monowarstw składających się z hydrofobowych nanoklastrow złota i ich zastosowania w układach z barwnikami fotosyntetycznymi.

3. Jednostka: Wydział Chemii, Uniwersytet Warszawski, Warszawa, Polska

Współpraca: prof. dr hab. Wiktor Lewandowski

Opis: Osoby z zespołu Profesora Lewandowskiego były głównymi wykonawcami w realizowanym przeze mnie grantie SONATA NCN. Ich prace badawcze polegały na syntezie i charakterystyce nanocząstek metalicznych o pożądanych właściwościach i sposobie oddziaływania z medium, w którym są zawieszone. Zainteresowana naukowe grupy badawczej skupiają się wokół syntezy nanocząstek metalicznych i wykorzystaniu ich w konstrukcji nowych materiałów o chiralnych właściwościach. W wyniku realizacji wspólnych badań określiliśmy zdolność funkcjonalnych nanoplateform bazujących na nanocząstkach złota do wzmocnionej obecnością metalu powierzchniowej detekcji molekuł. Dotychczasowe wyniki badań, wynikające z podjętej współpracy, opisaliśmy w dwóch artykułach naukowych [41, 42].

4. Jednostka: Wydział Chemii, Uniwersytet im. Mikołaja Kopernika w Toruniu, Toruń, Polska

Współpraca: dr hab. Aleksandra Radtke

Opis: Pani Doktor jest specjalistką z zakresu chemii nieorganicznej ze szczególnym uwzględnieniem wytwarzania cienkich warstw metodą chemiczną o grubościach atomowych z wykorzystaniem metodą ALD (z ang. *atomic layer deposition*). Dotychczasowe wyniki badań, wynikające z podjętej współpracy opisaliśmy w jednym wspólnym artykule naukowym [42]. W dalszym etapie prowadzimy badania wspólne z grupą Pani Doktor Belindy Heyne nad otrzymaniem powierzchni antybakteryjnych o ulepszonych właściwościach względem tych obecnie opisanych w literaturze i stosowanych w przemyśle.

5. Jednostka: Zakład Bioinżynierii Kwasów Nukleinowych, Instytut Chemii Bioorganicznej Polskiej Akademii Nauk, Poznań, Polska

Współpraca: prof. dr hab. Anna Pasternak

Opis: Pani Profesor jest specjalistką z zakresu chemii organicznej kwasów nukleinowych. Ze swoją grupą skupia się na wykorzystaniu modyfikowanych oligonukleotydów, jako nowoczesnych narzędzi terapeutycznych. Nasza współpraca naukowa skupia się na badaniu *in vitro* koniugatów kwasów nukleinowych z barwnikami do ich potencjalnego zastosowania w terapii fotodynamicznej.

3.6.3 Działalność recenzencka

Angażuję się w szeroko pojętą działalność recenzencką zarówno grantów badawczych, jak i publikacji naukowych. W ciągu całej kariery naukowej miałem możliwość zrecenzować ciekawe zagraniczne projekty naukowe i manuskrypty dla topowych czasopism naukowych z dyscypliny (np. *Nano-Micro Letters*, *Advanced Functional Materials* czy *ACS Nano*) i wydawnictw naukowych takich jak *American Chemical Society*, *The Royal Society of Chemistry*, *Wiley*, *Springer* i inne. Poniżej przedstawiam szczegółowe zestawienie.

- Międzynarodowe granty naukowe
 - French National Research Agency (jedna recenzja),
 - The Czech Science Foundation (dwie recenzje).
- Czasopisma z listy *Journal Citation Reports* (sumarycznie sześćdziesiąt pięć recenzji). W całkowitej liczbie wykonanych recenzji nie uwzględniono manuskryptów po przeglądach autorskich. Nazwy czasopism posortowano alfabetycznie.

3.6. Wykaz istotnej aktywności naukowej realizowanej w więcej niż jednej instytucji naukowej

33

Tabela 3.1: Zestawienie wykonanych recenzji dla czasopism z listy *Journal of Citation Reports*.

Nazwa czasopisma	Liczba recenzji
ACS Applied Bio Materials	2
ACS Applied Materials and Interfaces	3
ACS Applied Nano Materials	3
ACS Biomaterials Science and Engineering	2
ACS Nano	1
ACS Omega	1
Acta Physica Polonica A	1
Advanced Engineering Materials	1
Advanced Functional Materials	2
Advanced Healthcare Materials	1
Advanced Optical Materials	1
Biosensors	1
ChemCatChem	1
Chemical Physics Letters	1
Chemistry of Materials	1
Colloids and Surfaces A	1
Current Organic Chemistry	1
Engineering Applications of Artificial Intelligence	1
IEEE Sensors Journal	1
Journal of Macromolecular Science Part A	1
Journal of Materials Chemistry C	1
Journal of Molecular Liquids	2
Journal of Nanoparticle Research	1
Journal of Physical Chemistry Letters	1
Langmuir	7
Materials Chemistry and Physics	1
Materials	1
Nano Letters	1
Nano-Micro Letters	1
Nanomaterials	1
Nanoscale Advances	1
Parasitology Research	1
Plasmonics	8

Kontynuacja na następnej stronie

kontynuacja z poprzedniej strony

Nazwa czasopisma	Liczba recenzji
Regenerative Biomaterials	1
RSC Advances	1
Sensors and Actuators B: Chemical	1
Small	3
Small Methods	1
Small Science	2
Spectrochimica Acta Part A	1
Surfaces and Interfaces	1

3.7 Wykaz osiągnięć dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę

3.7.1 Prowadzone zajęcia, opieka nad studentami i doktorantami

Prowadzone zajęcia

Zajęcia dydaktyczne dla studentów prowadzę od roku 2009 (początek studiów doktoranckich) w wymiarze 90 godzin oraz w wymiarze 240 godzin (1 godzina zajęć = 45 min) na rok akademicki od momentu rozpoczęcia pracy na Politechnice Poznańskiej na stanowisku asystenta tj. od 2013 roku. Zajęcia prowadziłem dla studentów pierwszego i drugiego stopnia nauczania, studiów dziennych i zaocznych, na różnych kierunkach studiów oferowanych przez Politechnikę Poznańską.

1. Wykłady

- Nazwa przedmiotu: **Fizyka**
Opis: Wykład, który przybliży studentom pierwszych lat studiów inżynierskich różnych kierunków Politechniki Poznańskiej zagadnienia z obszaru fizyki klasycznej.
- Nazwa przedmiotu: **Fizyka współczesna**
Opis: Wykład wprowadza studentów w zagadnienia z obszaru fizyki XXI wieku ze szczególnym uwzględnieniem zastosowania efektów kwantowych w nowoczesnej inżynierii mechanicznej i transportu.
- Nazwa przedmiotu: **Aspekty fizyczne, ekonomiczne i ekologiczne odnawialnych źródeł energii**
Opis: W ramach wykładu studenci zostają wprowadzeni w zagadnienia odnawialnych źródeł energii ze szczególnym uwzględnieniem fizycznych podstaw działania elementów energetyki odnawialnej. Zarysowany zostaje również aspekt ekonomiczny i ekologiczny dający przesłankę do konkretnych zastosowań.

2. Ćwiczenia

- Nazwa przedmiotu: **Fizyka**
Opis: Zajęcia rachunkowe, podczas których studenci rozwiązują zadania z zakresu fizyki klasycznej w sposób klasyczny, następnie mierzą się z trudniejszymi zadaniami z uwzględnieniem rachunku różniczkowo-całkowego.

3. Laboratoria

- Nazwa przedmiotu: **I pracownia fizyczna**
Opis: Zajęcia umożliwiają studentom zapoznanie się z podstawowymi prawami fizycznymi i ich eksperymentalną weryfikację. Dodatkowo studenci uczą się jak opracować wyniki badań i przedstawić je w postaci ostatecznej jako wykresy czy wyniki końcowe.
- Nazwa przedmiotu: **Pracownia specjalistyczna**
Opis: W zajęciach uczestniczą studenci studiów pierwszego i drugiego stopnia przed przystąpieniem do badań związanych z pracą dyplomową. Przedmiot przybliży studentom zaawansowane techniki badawcze, które będą wykorzystane do realizacji prac dyplomowych w późniejszym etapie.

Opieka i promotorstwo nad studentami i doktorantami

1. **Promotor pomocniczy pracy doktorskiej:** nadanie stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa, praca obroniona 19.12.2022 roku z wyróżnieniem
Doktorantka: Paulina Błaszkievicz
Tytuł: „*Optymalizacja procesu syntezy i funkcjonalizacji nanocząstek złota oraz określenie istotnych do zastosowań biomedycznych parametrów fotofizycznych nanocząstek i ich układów hybrydowych z wybranymi barwnikami*”
2. **Promotor pracy magisterskiej:** praca obroniona w 2025
Student: Michał Mleczo
Tytuł: „*Właściwości termodynamiczne i optyczne nanocząstek złota w cienkich warstwach*”
3. **Promotor pracy inżynierskiej:** praca obroniona w 2024
Student: Michał Mleczo
Tytuł: „*Projekt i adaptacja modułu do pomiarów widm absorpcji nanocząstek metalicznych w warstwach Langmuira*”
4. **Promotor pracy inżynierskiej:** praca obroniona w 2020
Studentka: Anna Martin
Tytuł: „*Nanoszenie cienkich warstw nanomateriałów węglowych na podłoża stałe metodą natryskową*”
5. **Opiekun pracy magisterskiej:** praca obroniona w 2019
Studentka: Hanna Orlikowska-Rzeźnik
Tytuł: „*Wytwarzanie oraz charakteryzacja liposomów w obecności kationowych surfaktantów fotochromowych*”
6. **Opiekun pracy inżynierskiej:** praca obroniona w 2018
Studentka: Anna Polowa
Tytuł: „*Generowanie tlenu singletowego w układzie hybrydowym feoforbida – nanoprzęty złota*”
7. **Opiekun pracy inżynierskiej:** praca obroniona w 2014
Student: Krzysztof Ptaszyński
Tytuł: „*Badanie właściwości optycznych nanostruktur metalicznych*”

Recenzje prac dyplomowych

1. **Recenzent pracy inżynierskiej:** praca obroniona w 2023
Student: Kacper Czarnolewski
Tytuł: „*Budowa układu umożliwiającego badanie cienkowarstwowych rezystancyjnych czujników odkształceń*”
2. **Recenzent pracy inżynierskiej:** praca obroniona w 2021
Studentka: Natalia Szpott
Tytuł: „*Właściwości fotofizyczne wybranej pochodnej diketopirolopiroli w rozpuszczalnikach organicznych i matrycy polimerowej*”
3. **Recenzent pracy inżynierskiej:** praca obroniona w 2020
Student: Nicolas Hoffmann
Tytuł: „*Modernizacja układu do pomiaru przewodnictwa elektrycznego w zakresie temperatur kriogenicznych*”
4. **Recenzent pracy magisterskiej:** praca obroniona w 2019
Student: Hubert Szeszula
Tytuł: „*Otrzymywanie i charakteryzacja hybrydowych podłoży do powierzchniowo wzmacnionych spektroskopii*”

5. **Recenzent pracy inżynierskiej:** praca obroniona w 2018

Studentka: Beata Gaca

Tytuł: „Badanie nanostruktur węglowych jako ciekłych absorberów w kolektorach słonecznych”

3.7.2 Osiągnięcia organizacyjne

1. Członek Rady Wydziału na kadencję 2024-2028.
2. Sekretarz w przewodzie doktorskim dr inż. Emilii Krok (2024) oraz dr Shyantana Dasgupta (2024).
3. Członek Komisji Odbioru tematów badawczych realizowanych na Wydziale Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej.
4. Członek Zespołu Zadaniowego ds. Klas Akademickich w latach 2016-2028.
5. Członek Komitetu Organizacyjnego 42 Zjazdu Fizyków Polskich, 2013.
6. Współorganizowanie szkoły międzynarodowej pt. „*German-Polish Summer School Micro- & Nanoelectronics*”, (opieka nad zagraniczną grupą oraz wygłoszenie wykładu wprowadzającego), 2013.

3.7.3 Osiągnięcia popularyzujące naukę

1. *Studencki Nobel* – udział w Krajowej Komisji Konkursowej, 2025.
2. Wygłoszenie wykładu popularnonaukowego z cyklu *Sekrety Fizyki i Inżynierii* organizowanego przez Wydział Inżynierii Materiałowej i Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej pt.: „*Jak on pracuje i to wytrzymuje? Rzecz o turbinowym silniku odrzutowym*”, 2024.
3. Prowadzenie zajęć laboratoryjnych na Politechnice Poznańskiej dla *Klasy Akademickiej* z Publicznego LO Katolickiego Stowarzyszenia Wychowawców im. bł. Natalii Tułasiewicz w Poznaniu, 2024.
4. Opiekun projektu w Kole Naukowym *Nanoinżynierii Molekularnej* 2023-2025.
5. Prowadzenie zajęć laboratoryjnych na Politechnice Poznańskiej dla *Klasy Akademickiej* z III LO im. św. Jana Kantego w Poznaniu, 2018-2024.
6. Prowadzenie warsztatów naukowych pt. „*Molecular spectroscopy in the investigation of the materials*” dla doktorantów z University of Technology Sydney, 2022.
7. Prowadzenie zajęć laboratoryjnych na Politechnice Poznańskiej dla *Klasy Akademickiej* z VII LO im. Dąbrówki w Poznaniu, 2016-2021.
8. Wygłoszenie wykładu popularnonaukowego z cyklu *Piękno Fizyki* organizowanego przez Wydział Fizyki Technicznej Politechniki Poznańskiej pt.: „*Zimno, ciepło, gorąco – fizyka turbo silnika*”, 2013.

3.7.4 Granty, patenty nagrody i wyróżnienia

Kierownik grantów NCN

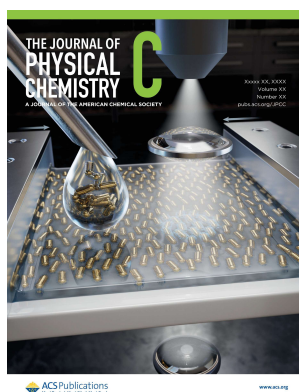
- Sonata 15 NCN, 2019/35/D/ST4/02037, pt. „*Optymalizacja struktury nanoplatformy do powierzchniowo wzmocnionej detekcji pochodnych chlorofilu z wykorzystaniem techniki Langmuira*”, okres realizacji 2020-2024, kwota projektu: 965 760 PLN,
- Preludium 6 NCN, 2013/11/N/NZ7/00738, pt. „*Modyfikowane pochodne chlorofilu i ich hybrydowe koniugaty z RNA dla współczesnej fotomedycyny*”, okres realizacji 2014-2017, kwota projektu: 99 970 PLN.

Patenty i zgłoszenia patentowe

- Biadasz A.; Łukawski D.; Rytel K.; Kędzierski K.; Kotkowiak M.
Układ przesyłu gazu o kontrolowanej wilgotności
UPP-440689, 2022 — patent (5% udziału),
- Biadasz A.; Kotkowiak M.; Kędzierski K.; Rytel K.; Łukawski D.
Wanna Langmuira z elementem użytkowym
UPP-343969, 2023 — zgłoszenie patentowe (40% udziału).

Nagrody i wyróżnienia

- Stypendium MNiSW dla wybitnych Młodych Naukowców, 2020-2023,
- Beneficjent stypendium na czteromiesięczny staż naukowy w USA finansowany w ramach Fundacji Kościuszkowskiej (*Fellowships: awarded to successful candidates with doctoral degrees, including postgraduate scholars, professionals, or artists*),
- Beneficjent stypendium na dwumiesięczny staż naukowy w Kanadzie finansowane ze środków Jego Magnificencji Rektora Politechniki Poznańskiej w ramach programu stażowego „*Inicjatywa doskonała współpraca międzynarodowa – programy stażowe*”, okres stażu od 01.06.2025 do 28.07.2025,
- Indywidualna Nagroda Jego Magnificencji Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia naukowe:
 - III stopnia 2024/2025,
 - II stopnia 2022/2023,
 - III stopnia 2020/2021,
 - III stopnia 2018/2019,
 - III stopnia 2016/2017,
 - II stopnia 2015/2016,
 - II stopnia 2014/2015,
- Zespołowa Nagroda Jego Magnificencji Rektora Politechniki Poznańskiej za osiągnięcia naukowe:
 - I stopnia 2017/2018.



Rysunek 3.13: Front cover art wydania czasopisma *The Journal of Physical Chemistry C* (Volume 128, Issue 14).

3.7.5 Inne osiągnięcia

Okladki czasopism

- Okładka główna (z ang. *front cover art*) wydania czasopisma The Journal of Physical Chemistry C (<https://pubs.acs.org/toc/jpcck/128/14>)