



Recenzja Rozprawy Doktorskiej
mgra Arumony Edwarda Arumony
Strongly coupled light in optical nanostructures
based on excitonic materials

Rozprawa doktorska mgra Arumony Edwarda Arumony została przygotowana pod kierunkiem dr. hab. Tomasza Antosiewicza, prof. ucz., na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Praca dotyczy numerycznego modelowania rozpraszania światła na wielowarstwowych cząstkach sferoidalnych wykonanych z materiałów charakteryzujących się hiperboliczną anizotropią współczynnika załamania. Szczególną uwagę autor poświęca analizie silnego sprzężenia polarytonowego pomiędzy modami optycznymi a stanami ekscytonowymi w jednej z rozważanych warstw.

Podjęta tematyka jest interesująca i istotna z naukowego punktu widzenia. Analiza oddziaływania światło–materia w nowych nanostrukturach stanowi zagadnienie złożone i nietrywialne. W recenzowanej rozprawie kluczowe znaczenie ma nie tylko skład materiałowy wielowarstwowych cząstek, lecz także wpływ ich kształtu na siłę tego oddziaływania. W tym kontekście należy podkreślić, że oryginalność postawionego problemu badawczego jest w pełni adekwatna do wymagań stawianych rozprawom doktorskim. Jego realizacja wymagała zaawansowanej znajomości narzędzi matematycznych i numerycznych, które zostały w pracy poprawnie przedstawione i zastosowane.

Rozprawa nie zawiera jednoznacznie sformułowanych celów badawczych. Zamiast tego stanowi studium rozpraszania światła i generacji polarytonów w strukturach o różnym stopniu złożoności. Na podstawie analizy przedstawionych wyników można wyróżnić następujące zagadnienia będące przedmiotem badań:

- wpływ kształtu cząstek na siłę oddziaływania z poszczególnymi modami (rozdział 5),
- analiza oddziaływania polarytonowego w zależności od parametrów materiałowych (rozdział 6),
- wpływ właściwości optycznych zastosowanych materiałów na powstawanie polarytonów w trybie dipoli magnetycznych oraz optymalizacja tego efektu (rozdział 7).

Wszystkie powyższe zagadnienia zostały przeanalizowane wnikliwie i wyczerpująco. Pewnym mankamentem pracy jest brak bardziej szczegółowego omówienia potencjalnych zastosowań praktycznych analizowanych struktur oraz przykładów urządzeń, w których ich szczególne właściwości mogłyby znaleźć zastosowanie.

Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w dwóch artykułach naukowych:

1. A. E. Arumona, K. M. Czajkowski, and T. J. Antosiewicz, "Material- and shape-dependent optical modes of hyperbolic spheroidal nano-resonators", *Opt. Express* 31, 23459-23474 (2023),
2. A. E. Arumona and T. J. Antosiewicz, "Self-hybridized strong coupling of optical modes to excitons in hyperbolic nanoresonators", *Opt. Express* 33, 34537-34552 (2025),

Trzecia praca pt. „Self-Hybridized Strong Coupling of MD Mode to Exciton in Uniaxial Hyperbolic Multilayer Nanospheroids” jest w przygotowaniu. Ponadto, doktorant jest pierwszym autorem dodatkowej publikacji, niezwiązanej bezpośrednio z tematyką rozprawy:

1. A. E. Arumona and A. Johnson, "Prediction of optical properties of uniaxial hyperbolic nanospheres via artificial neural networks", *Physica Scripta* 99 (11), 116007 (2024).

Dorobek ten potwierdza wysoką jakość prowadzonych badań i świadczy o bardzo dobrej umiejętności pracy naukowej. Ma on również istotne znaczenie dla oceny wartości naukowej rozprawy, ponieważ zaprezentowane wyniki zostały poddane weryfikacji przez niezależnych recenzentów czasopism naukowych.

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów. Rozdziały 1–3 stanowią obszerny przegląd literatury, w którym omówiono zjawisko silnego sprzężenia oraz podstawowe koncepcje istotne dla dalszych analiz. Doktorant w sposób systematyczny przedstawia aktualny stan wiedzy w zakresie oddziaływania światło–materia w nanostrukturach oraz zagadnienia związane z polarytonami.

Rozdział 4 zawiera szczegółowy opis zastosowanych metod badawczych. Autor wykorzystuje klasyczne metody elektrodynamiki oraz modele sprzężonych oscylatorów do analizy efektów zależnych od kształtu cząstek w kontekście zjawiska silnego sprzężenia. Opis ten został uzupełniony o szczegóły matematyczne zamieszczone w dodatkach A–C, które razem tworzą solidną dokumentację zastosowanej metodologii. W tym kontekście nie budzi wątpliwości wysoki poziom opanowania aparatu matematycznego przez doktoranta oraz jego umiejętność posługiwania się nim. Ponadto, wyczerpujący opis metodyki przedstawiony w tym rozdziale stanowi podstawę do traktowania zaprezentowanych dalej wyników z dużą pewnością co do ich poprawności.

Rozdziały 5–7 tworzą zasadniczą część rozprawy i prezentują oryginalne wyniki badań. Rozdział 5 poświęcony jest analizie modów optycznych w wielowarstwowych nanosferoidach wykonanych z materiałów hiperbolicznych — srebra i krzemionki. Badana jest odpowiedź optyczna tych struktur w obecności pola elektromagnetycznego, co stanowi punkt wyjścia dla dalszych rozważań. Rozdział 6 wprowadza zagadnienie oddziaływania z ekscytonami i generacji polarytonów, natomiast Rozdział 7 rozwija te analizy, koncentrując się na zjawiskach zachodzących

w rzeczywistych materiałach, w których obserwowane są ekscytony — dichalkogenkach metali przejściowych (TMDC), takich jak WS_2 , WSe_2 , MoS_2 i $MoSe_2$.

Rozdział 8 stanowi podsumowanie uzyskanych wyników oraz przedstawia perspektywy dalszych badań w omawianym obszarze.

Całość rozprawy świadczy o szerokiej wiedzy doktoranta w zakresie omawianej tematyki. Badania zostały przeprowadzone rzetelnie i wnikliwie. Ich głównym przedmiotem są cząstki sferoidalne, jednak szczególnie wartościowa jest analiza wielowarstwowych nanodysków, które mogą być wytwarzane metodami klasycznej epitaksji. Takie podejście pozwala wyobrazić sobie praktyczną realizację opisywanych struktur. Za pewien mankament należy uznać nieuwzględnienie wpływu fizycznego podłoża, na którym dyski mogłyby być umieszczone. Zbadanie, w jakim stopniu takie podłoże — np. wykonane z SiO_2 — mogłoby zaburzyć uzyskane wyniki, byłoby bardzo interesujące i wartościowe.

Kolejnym pozytywnym aspektem rozprawy jest logiczny ciąg rozumowania przedstawiony w rozdziale 7. Po analizie hipotetycznych struktur w rozdziale 6 doktorant przechodzi do badania sprzężenia dipoli magnetycznych (MD) z ekscytonami w rzeczywistych materiałach, w których ekscytony faktycznie występują. Dochodzi do wniosku, że zbyt wysoki współczynnik załamania TMDC uniemożliwia obserwację takiego oddziaływania. W odpowiedzi na ten problem autor proponuje eleganckie rozwiązanie polegające na zastosowaniu struktur trójwarstwowych, składających się ze srebra, TMDC oraz krzemionki, której zadaniem jest obniżenie efektywnego współczynnika załamania. W takim układzie udaje się zaobserwować polarytony MD w strukturze o wydłużonym kształcie.

Rozprawa została opatrzona obszernym spisem literatury, obejmującym 161 pozycji. Zestaw ten umożliwia szczegółowe zapoznanie się z kontekstem przeprowadzonych badań oraz pogłębione przestudiowanie zagadnień, które — choć istotne dla pracy — nie stanowiły jej głównej treści merytorycznej. Odniesienia do literatury są precyzyjne i prawidłowo umieszczone w tekście, co świadczy o staranności autora w zakresie dokumentowania źródeł.

Pod względem redakcyjnym rozprawa została przygotowana bardzo starannie. Układ treści jest poprawny i logiczny. W pierwszych rozdziałach autor nakreśla podstawy fizyczne analizowanych zjawisk oraz przedstawia aparat narzędziowy, natomiast w dalszych częściach prezentuje wyniki badań — poczynawszy od najprostszych struktur niewykazujących właściwości polarytonowych, poprzez teoretyczną analizę oddziaływania światła ze sztucznie wykreowanymi ekscytonami w materiale SiO_2 , aż po badania struktur złożonych z rzeczywistych materiałów, w których występują ekscytony o energiach odpowiadających falom elektromagnetycznym z zakresu widzialnego.

Zidentyfikowałem jednak kilka uchybień, które pogarszają czytelność pracy. Wśród nich warto wymienić:

1. Wiele rysunków jest mało przejrzystych, co wynika zarówno z ich niewielkich rozmiarów, jak i zbyt dużej liczby informacji umieszczonych na jednym wykresie (np. zbyt wiele linii).

Praca zyskałaby na klarowności, gdyby niektóre rysunki zostały rozbite na większą liczbę ilustracji. Przykładowo, na Rys. 6.3 wykresy dla dipola elektrycznego i magnetycznego mogłyby zostać przedstawione osobno. Na Rys. 6.6 (i-v) nie jest jasne, co zostało zilustrowane. Podobnych przykładów jest więcej, choć nie będę ich wszystkich wymieniać.

2. Podpisy pod ilustracjami nie zawsze są jasne i wyczerpujące. Kilka wykresów (np. Rys. 5.1d) nie jest w ogóle opisanych.
3. Dodatek A w zasadzie powtarza treść sekcji 4.2.1, wnosząc bardzo niewiele dodatkowych informacji.
4. W dodatku B brakuje wyjaśnienia niektórych symboli, np. Q_{anis}^{11} oraz Q_{anis}^{31} .

Zamieszczone powyżej uwagi krytyczne mają w większości charakter marginalny lub polemiczny i jedynie w niewielkim stopniu obniżają moją wysoką ogólną ocenę przedstawionych badań. Podsumowując, stwierdzam, że autor wykazał się rozległą wiedzą w zakresie optyki oraz fizyki oddziaływania światła z materią, a także skutecznie zademonstrował umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Sama rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego wpływu parametrów hybrydowych nanosferoidów na powstawanie stanów polarytonowych.

W związku z powyższym potwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Arumony Edwarda Arumony spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Doktorant wykazał się dużą biegłością w posługiwaniu się zaawansowanym aparatem matematycznym. Z treści rozprawy jednoznacznie wynika, że posiada on głębokie zrozumienie analizowanych struktur oraz potrafi krytycznie i efektywnie prowadzić ich badania. Mając na uwadze ten fakt oraz ogólną wysoką jakość przeprowadzonych badań, wnoszę o wyróżnienie recenzowanej rozprawy.

dr hab. inż. Maciej Dems, prof. ucz.