

dr hab. inż. Karol Tarnowski
Katedra Optyki i Fotoniki
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
e-mail: karol.tarnowski@pwr.edu.pl
tel: +48 71 320 44 41

Wrocław, 16.01.2026

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.:
„*Strongly coupled light in optical nanostructures based on excitonic materials*”
mgr. Arumony Edwarda Arumony

W rozprawie doktorskiej mgr Arumona Edward Arumona przedstawia wyniki badań numerycznych dotyczących zjawiska silnego sprzężenia modów optycznych z ekscytonami w jednoosiowych hiperbolicznych nanosferoidach wielowarstwowych. Autor szczegółowo analizuje wpływ parametrów geometrycznych oraz składu materiałowego na właściwości tego sprzężenia. Praca została przygotowana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr. hab. Tomasza Antosiewicza, prof. ucz., który pełnił rolę promotora.

Tematyka pracy wpisuje się w aktualnie rozwijane zagadnienia z zakresu kwantowej nanofotoniki, a uzyskane wyniki mogą przyczynić się do rozwoju kompaktowych urządzeń wykorzystujących polarytony. Wagę uzyskanych wyników podkreśla fakt ich opublikowania w następujących publikacjach:

- [1] **A. E. Arumona**, K. M. Czajkowski, T. J. Antosiewicz, „Material- and shape- dependent optical modes of hyperbolic spheroidal nanoresonators,” *Optics Express*, **31**(14): 23459–23474 (2023);
- [2] **A. E. Arumona**, T. J. Antosiewicz, „Self-hybridized strong coupling of optical modes to excitons in hyperbolic nanoresonators,” *Optics Express*, **33**(16): 34537–34552 (2025).

Mgr Arumona jest pierwszym autorem obu artykułów, co wskazuje na jego kluczową rolę w uzyskaniu przedstawionych wyników.

Na główną część rozprawy, napisanej w języku angielskim, składa się 8 rozdziałów. Układ pracy uzupełniają streszczenie w języku angielskim, streszczenie w języku polskim, podziękowania, spis treści, trzy dodatki oraz bibliografia licząca 161 pozycji. Dokument zawiera łącznie 126 stron, a jego układ jest czytelny.

Pierwszy rozdział wprowadza czytelnika w tematykę silnego sprzężenia i samohybrydyzacji modów optycznych z przejściami ekscytonowymi. Następnie autor przedstawia jednoosiowe hiperboliczne nanosferoidy wielowarstwowe jako klasę obiektów, która pozwala uzyskać silne sprzężenie optyczno-ekscytonowe. Celem pracy jest wskazanie, jak kontrolując kształt i skład nanosferoid wielowarstwowych można kształtować właściwości silnego sprzężenia. Cel ten

jest jasno określony, chociaż nie jest sformułowany w formie konwencjonalnej hipotezy badawczej.

Kolejne dwa rozdziały zawierają rozwinięte wprowadzenie teoretyczne do zagadnień poruszanych w rozprawie. W rozdziale drugim mgr Arumona wychodzi od równań Maxwella, następnie omawia propagację fali płaskiej przez ośrodki wielowarstwowe oraz model Drudego-Lorentza. W dalszej części rozdziału przedstawia metamateriały hiperboliczne, koncepcję działania nanorezonatorów (nanostruktur) wykorzystujących takie metamateriały oraz włączenie w rozważane struktury materiałów ekscytonowych, co umożliwia badanie silnego sprzężenia. Rozdział trzeci poświęcony jest silnemu sprzężeniu – zawiera kwantowo-mechaniczny opis tego zjawiska, wprowadza ilościowe kryteria pozwalające określić sprzężenie jako silne, a następnie prezentuje przegląd nanostruktur plazmonicznych opisanych w literaturze.

W mojej ocenie ta część rozprawy w zadowalającym stopniu dokumentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie nauki fizyczne. Autor prowadzi czytelnika, zaczynając od ogólnej postaci równań Maxwella, poprzez coraz bardziej szczegółowe zagadnienia, aż do ilościowego opisu silnego sprzężenia. Układ tej części rozprawy jest poprawny, jednak autor nie ustrzegł się błędów. Schemat przedstawiony na rys. 2.1 jest nieprawidłowy i ponadto błędnie opisany w tekście. Przedstawia on odbicie i załamanie na jednej warstwie (*single layer*), a nie na wielu warstwach (*multilayer*); zaznaczone składowe pól nie odpowiadają również polaryzacji TE (*transverse electric*). W mojej ocenie autor zbyt często wykorzystuje schematy zaczerpnięte z literatury; opracowanie ich autorskich wersji (np. rys. 2.3) zwiększyłoby elastyczność prezentacji i pozwoliłoby autorowi w bardziej przekonujący sposób zaprezentować swoją wiedzę w dyscyplinie.

Rozdział czwarty zawiera opis metod obliczeniowych wykorzystywanych przez autora w trakcie prowadzonych badań. Kolejne części tego rozdziału przybliżają teorię ośrodka efektywnego, metodę FDTD (*finite-difference time-domain*, różnic skończonych w dziedzinie czasu), metodę macierzy T (*T-matrix method*) oraz model sprzężonych oscylatorów harmoniczych. Opanowanie i umiejętne zastosowanie tych metod umożliwiło przeprowadzenie badań opisanych w rozprawie oraz potwierdza uzyskanie przez autora kompetencji niezbędnych do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w zakresie nanofotoniki.

W opisie tych metod zauważyłem kilka kwestii, które mogłyby zostać przedstawione w sposób bardziej rozwinięty i szczegółowy: (i) na ile wykorzystanie siatki Yee ogranicza modelowanie struktur o dowolnych geometriach, (ii) w jaki sposób w metodzie FDTD, która jest metodą czasową, uwzględnia się dyspersyjne zależności materiałowe, (iii) w jaki sposób uzyskuje się zależności częstotliwościowe (np. wielkości $\mathbf{J}^\omega(\mathbf{r})$ oraz $\mathbf{E}^\omega(\mathbf{r})$ w równaniu 4.8).

Rozdziały piąty, szósty oraz siódmy przedstawiają oryginalne wyniki uzyskane przez autora rozprawy. W pierwszej kolejności badane były właściwości optyczne nanosferoid

wielowarstwowych zbudowanych ze srebra i krzemionki. Przeprowadzone symulacje pozwoliły obliczyć odpowiedź optyczną nanorezonatorów (nanosferoid wydłużonych i spłaszczonych) oraz wyznaczyć na jej podstawie pozycje spektralne poszczególnych modów rezonatora (DE – dipola elektrycznego, DM – dipola magnetycznego). Autor wykazał również, że odpowiedź optyczną można kontrolować poprzez zmianę współczynnika kształtu nanosferoidy oraz proporcji materiałów składowych (srebra i krzemionki). Przeprowadzona analiza jest bardzo szczegółowa i opatrzona dokładną interpretacją, a jej wyniki oraz wnioski zostały przedstawione w czytelny sposób.

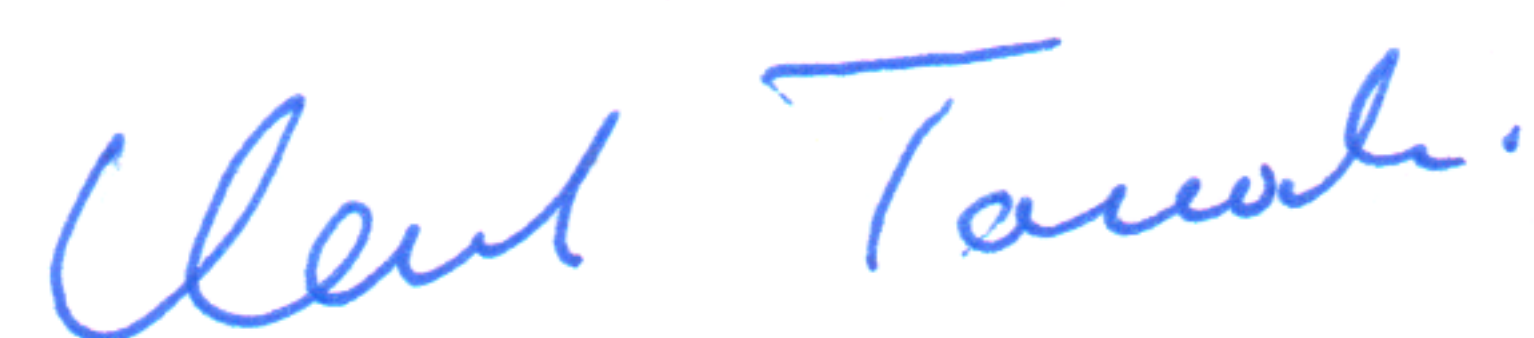
Bazując na wynikach poprzedniej części, mgr Arumona przechodzi do badań poświęconych silnemu sprzężeniu optyczno-ekscytonowemu. Sprzężenie to zachodzi w nanostrukturach wielowarstwowych, w których warstwie krzemionkowej umieszczono ekscytony. W tej części rozprawy autor ograniczył się do nanosferoid o kształcie kulistym i wydłużonym, ze względu na ich silniejszą odpowiedź optyczną niż dla nanosferoid spłaszczonych. Silne sprzężenie obserwowane jest w tym układzie dzięki dopasowaniu spektralnej pozycji ekscytonów do pozycji rezonansów optycznych (DE oraz DM). Mgr Arumona badał warunki, które powinny być spełnione, aby osiągnąć silne sprzężenie. Istotnym wnioskiem jest wykazanie, że dla modu dipola magnetycznego silne sprzężenie występuje przy znacznie niższej sile oscylatora niż dla modu dipola elektrycznego. Autor odniósł również wyniki uzyskane dla nanostruktur o wyidealizowanych kształtach (nanosferoid) do rezultatów otrzymanych dla nanorezonatorów w formie nanodysków, których geometria jest bliższa obecnym możliwościom technologicznym. Wyniki tej części rozprawy zostały zaprezentowane w przemyślny sposób. Szczególnie doceniam analizę przeprowadzoną dla nanodysków jako krok w stronę struktur osiągalnych technologicznie.

Kolejne kroki wykonane w tym kierunku zostały opisane w następnej części rozprawy. Mgr Arumona przedstawia w niej wyniki symulacji dla nanostruktur wielowarstwowych zbudowanych ze srebra i dichalkogenków metali przejściowych (rozważane były disiarczki molibdenu MoS_2 , diselenki molibdenu MoSe_2 , disiarczki wolframu WS_2 oraz diselenki wolframu WSe_2). Autor uzasadnił wybór tych materiałów możliwością wzbudzenia w nich ekscytonów w interesującym zakresie spektralnym. Następnie badana była możliwość uzyskania sprzężenia tych ekscytonów z modami optycznymi nanostruktur. Autor zidentyfikował trudność polegającą na braku dopasowania pozycji spektralnej modu dipola magnetycznego nanosferoid do osiągalnych pozycji spektralnych ekscytonów dichalkogenków metali przejściowych. Zaproponowane rozwiązanie polega na wykorzystaniu nanostruktur trójskładnikowych (srebro/krzemionka/dichalkogenek), w których – jak wykazał autor – obniżenie efektywnej przenikalności dielektrycznej umożliwia uzyskanie dopasowania spektralnego pozycji ekscytonów i modów optycznych. Ostatecznie mgr Arumona pokazał, że wydłużone nanostruktury o udziale objętościowym dichalkogenków metali przejściowych (w szczególności MoS_2 oraz WS_2) wynoszącym 10% pozwalają uzyskać silne sprzężenie optyczno-ekscytonowe, którego pozycja spektralna może być kontrolowana poprzez zmianę proporcji srebra i krzemionki. W mojej ocenie uzyskane wyniki są wartościowe, a sprawdzenie

możliwości ich eksperymentalnego odtworzenia stanowi niezwykle interesującą perspektywę badawczą.

W mojej ocenie praca jest bardzo dobrze zorganizowana, kolejne kroki są logicznie uzasadnione i czytelnie przedstawione. Przedstawione wyniki potwierdzają osiągnięcie celu, pokazując, jak – poprzez zmianę kształtu i składu nanostruktur wielowarstwowych – można kontrolować właściwości silnego sprzężenia.

Podsumowując, rozprawa opisuje oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, polegające na zaproponowaniu możliwości kontrolowania właściwości silnego sprzężenia optyczno-ekscytonowego w nanostrukturach. Na szczególne docenienie zasługuje konsekwencja w dążeniu do symulacji coraz bardziej realistycznych konstrukcji. Jednocześnie rozprawa dokumentuje wiedzę autora w dyscyplinie oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Biorąc pod uwagę powyższe, oceniam rozprawę pozytywnie.



dr hab. inż. Karol Tarnowski