

Łódź, 12 listopada 2022

RECENZJA

Rozprawy Doktorskiej pana magistra Mateusza Króla zatytułowanej: „Spin effects of cavity photons and exciton-polaritons in planar optical resonators”

Wstęp

Rezonansowe wnęki optyczne są podstawowym komponentem wielu przyrządów fotonicznych, które umożliwiają wzmocnienie oddziaływania pomiędzy promieniowaniem elektromagnetycznym o określonej częstotliwości, a materią. Efekt ten leży u podstaw zjawiska emisji wymuszonej w laserach, wykorzystywany jest także w diodach elektroluminescencyjnych umożliwiając wzmocnienie emisji spontanicznej (efekt Purcella) i w detektorach zwiększając prawdopodobieństwo absorpcji fotonu. Wnęka rezonansowa jest także nieodłącznym elementem w procesie koherentnej emisji w reżimie silnego sprzężenia światło-materia, który to proces jest nie tylko fascynującym polem badań podstawowych o silnie kwantowej naturze, ale także kusi nadzieją uzyskania koherentnej emisji o wysokiej sprawności konwersji energii elektrycznej w optyczną.

Stany optyczne we wnęcie rezonansowej o wysokim stopniu symetrii posiadają stany zdegenerowane, które prowadzą do powstania tak zwanych modów hybrydowych o niejednorodnym rozkładzie polaryzacji. W realnych strukturach mikrownęk optycznych symetria mikrownęki jest silnie zaburzona co przyczynia się do zniesienia degeneracji modów oraz narzucenia dominującej liniowej polaryzacji modów.

Wprowadzenie do wnęki rezonansowej materiału o silnej anizotropii umożliwia uzyskanie modów hybrydowych, a dodatkowa możliwość zmiany wartości współczynników załamania materiału pozwala na zmianę częstotliwości własnych modów wnęki rezonansowej. Takie własności posiadają ciekłe kryształy, których parametry optyczne mogą być modyfikowane za pomocą zewnętrznego pola elektrycznego.

Recenzowana praca osadza się w głównej mierze na pomysł umieszczenia warstwy ciekłego kryształu we wnęcie rezonansowej znajdującej się między dwoma zwierciadłami Bragga, a także w wybranych przypadkach na zintegrowaniu tychże wnęk z obszarami emitującymi promieniowanie. W efekcie praca demonstrowa bogatą złożoność własności fizycznych promieniowania kształtowanego przez tego typu wnęki rezonansowe.

Praca jest bardzo pozytywnym przykładem połączenia badań doświadczalnych i teoretycznych świadcząc o znacznym potencjale naukowym autora, a badania przedstawione w rozprawie stanowią istotny wkład w naukę światową, w szczególności w fizykę falową.

Omówienie pracy

Rozprawa składa się z 7 rozdziałów i prezentuje przede wszystkim wyniki badań eksperymentalnych efektów optycznych zachodzących we wnękach rezonansowych wypełnionych ciekłym kryształem. W rozdziałach 5 i 6 wnęki posiadają także obszar czynny umożliwiający obserwowanie emisji na skutek optycznego pobudzenia. Pomimo, że praca ma dominujący charakter eksperymentalny to niemal każdy aspekt analizy interpretowany jest za pomocą modelu teoretycznego opartego na modelu Berremana propagacji światła w układach składających się z anizotropowych warstw planarnych.

To krótki wstęp, wprowadzający czytelnika w problematykę rezonatorów optycznych, silnego sprzężenia światło-materia oraz polaryzacji stanów optycznych.

Rozdział 2

Stanowi omówienie głównych zagadnień poruszanych w rozprawie oraz wykorzystywanych metod. W pierwszej części autor opisuje model numeryczny na podstawie metody Berremana wraz z przykładami jego wykorzystania w modelowaniu wnęk rezonansowych złożonych z dwóch zwierciadeł Bragga. W drugiej części została opisana metoda obrazowania odbicia od struktur planarnych w dziedzinie długości fali, kąta padania/odbicia (poprzecznej składowej wektora falowego) oraz polaryzacji. W rozdziale tym zaprezentowane są także przykładowe dyspersje modów oraz rozkładów ich stanów polaryzacji za pomocą parametrów Stokes'a.

Rozdział 3

Głównym pod względem istotności wynikiem opisanym w tym rozdziale jest eksperymentalna obserwacja specyficznego ukształtowania rozkładu lokalnej polaryzacji natężenia światła wewnątrz wnęki rezonansowej w postaci meronu i antymeronu drugiego rzędu. Takie ukształtowanie rozkładu polaryzacji światła o danej częstotliwości powstało na skutek oddziaływania gaussowskiej wiązki oświetlającej planarną wnękę rezonansową z ciekłym kryształem o anizotropowy współczynnik załamania światła. Kolejnym interesującym rezultatem przedstawionym w rozdziale jest pokazanie na drodze symulacji numerycznych możliwości zmiany znaku ładunku topologicznego tychże rozkładów lokalnych polaryzacji (topological charge).

Rozdział 4

Układ badany w tym rozdziale jest analogiczny do opisanego w rozdziale 3. Główny wynik eksperymentalny, który także został odwzorowany symulacjami numerycznymi pokazuje, że wzrost niehermitowskości układu wyrażony za pomocą urojonej stałej propagacji zależnej od kierunku polaryzacji pola optycznego prowadzi do anihilacji punktów wyjątkowych (*exceptional points*), w których następuje degeneracja stanów energetycznych wnęki rezonansowej.

Rozdział 5

Różni się od dwóch poprzednich brakiem ciekłego kryształu we wnęcie rezonansową oraz obecnością ośrodka w postaci pojedynczych warstw atomowych selenku wolframu (WSe_2). W rozdziale tym warstwy selenku wolframu o grubościach od 1 do 6 warstw atomowych zostały przebadane pod kątem osiągnięcia silnego sprzężenia światło-materia, umożliwiając obserwację rozszczepienia pasm polarytonowych we wszystkich badanych przypadkach. Wynik ten jest zaskakujący ze względu na obecność skośnej przerwy energetycznej w przypadku warstw o grubościach większych niż jednoatomowa. Kolejnym istotnym wynikiem zawartym w tym rozdziale jest obserwacja polaryzacji kołowej emitowanego promieniowania w wyniku pobudzenia wiązką o kołowej polaryzacji. Stopień zachowania kołowej polaryzacji okazał się być zależny od różnicy energii pobudzenia i emisji. Energia emisji o maksymalnym stopniu kołowej polaryzacji odpowiada energii trionów w monowarstwie selenku wolframu.

Rozdział 6

W tym rozdziale we wnęcie rezonansowej został umieszczony zarówno ciekły kryształ jak i obszar emitujący promieniowanie w postaci warstwy perowskitowej. W eksperymencie demonstrującym pobudzenie układu w temperaturze pokojowej zostało zaobserwowane typowe rozszczepienie stanów dla silnego sprzężenia światło-materia. W układzie tym na skutek redukcji jego symetrii poprzez rotację molekuł ciekłego kryształu, uzyskano mody o przeważającym udziale kołowej polaryzacji co zaowocowało obserwacją krzywizn Berry'ego i możliwością przesuwania biegunów krzywizn w przestrzeni pędu.

Rozdział 7

Stanowi syntetyczne podsumowanie rozprawy.

Uwagi szczegółowe do rozprawy

Praca jest napisana w sposób przejrzysty z dobrym wstępem literaturowym do tematu. Praca ma bezpośrednie wsparcie w publikacjach autora, w których można znaleźć uzupełniające informacje. Rozprawa jest kompletna i nie mam zastrzeżeń formalnych ani merytorycznych, które mogłyby być podstawą dla obniżenia wysokiej oceny rozprawy. Poniższe pytania i komentarze traktuję jako polemikę z autorem lub potrzebą uściślenia informacji zawartych w rozprawie.

Rozdział 2.2.3 (N,N) regime

- Jaką interpretację fizyczną ma obrazowanie parametrów Stokesa (Rys. 2.22 c, f) w płaszczyźnie $k_x - k_y$ dla k określającego konkretną krzywą dyspersji modu?
- Czy można pokazać, że wykresy Rys. 2.22 c, f obrazują rozkład polaryzacji w konkretnym modzie ograniczonym przestrzennie w kierunku poprzecznym, który posiada określoną energię rezonansu?

Rozdział 3.2.2 Polarization textures in real space in (N,N) regime

- Dla jakiego z został wyznaczony rozkład parametrów Stokesa przedstawiony na Rys. 3.9?
- Czy położenie płaszczyzny obserwacji względem osi z nie będzie miało wpływu na rozkład lokalnej polaryzacji przedstawiony na Rys. 3.9?
- Dlaczego metoda Berremana nie została wykorzystana do wyznaczenia modów struktury, a jedynie do wyznaczenia transmisji/odbicia (propagacja fali)? Czy można nałożyć warunki brzegowe tak aby uzyskać problem własny (eigenvalue problem) jak pokazano w doi:10.1103/PhysRevA.95.023836?
- Zrozumiałe jest, że eksperyment ani symulacje przedstawione w rozprawie nie dają informacji o przestrzennym rozkładzie modu wnęki, dla którego można obserwować skyrmiony w świetle odbitym. Jednak czy można spodziewać się, że zbliżony rozkład polaryzacji może być obserwowany w wyniku pobudzenia wnęki (mod własny)? Czy raczej rozkład typowy dla skyrmionów jest możliwy poprzez interferencje z określonym rozkładem wiązki padającej?
- Odnośnie praktycznego aspektu obserwacji specyficznych struktur polaryzacji modów, jakie są możliwości zastosowania optycznych skyrmionów?

Rozdział 3.2.3 Polarization textures in (N + 2,N) regime

- Jaki jest związek pomiędzy wertykalną (I_v) i horyzontalną (I_h) polaryzacją a diagonalną (I_d) i antydiagonalną (I_a) polaryzacją?
- Na Rys. 3.20 zostały przedstawione oddziaływania między nieortogonalnymi modami w postaci antyprzecięć krzywych dyspersyjnych. Czy antyprzecięciom towarzyszy wzrost dobroci rezonansu w przypadku jednego z modów jak pokazano w innych układach fotonicznych, w których obserwowano antyprzecięcia: doi: 10.1103/PhysRevA.98.053840, 10.1103/PhysRevLett.97.253901?
- Jeśli prawdą jest wzrost dobroci, czy może to doprowadzić do kątowej emisji wiązki spolaryzowanej kołowo z wnęki?

Rozdział 4.1 A brief overview of non-Hermitian physics

- Dlaczego zostało wprowadzone pojęcie *PT symmetry* skoro analizowany układ nie posiada wzmocnienia? Czy *PT symmetry breaking* tłumaczy zanik punktów wyjątkowych?
- Czym muszą różnić się wektory własne (rozkłady modów) w przypadku takich samych wartości własnych (rezonansowe energie) w układzie analizowanym w rozdziale 4?
- Czy anihilacja punktów wyjątkowych byłaby także możliwa w układzie o zbalansowanym układzie wzmocnienia i absorpcji czy raczej jest to efekt możliwy do obserwacji w układzie o odpowiednio dużej absorpcji względem wzmocnienia i stopnia sprzężenia między modami?

Rozdział 5.3.3 Reflectance spectra model

- Nie jest jasne jak wyglądają spektra odbicia od DBR z płatkami selenku wolframu i bez nich, oraz jak duży jest błąd pomiarowy w przypadku szacowania różnicy między dwoma sygnałami, które posłużyły do wyznaczenia parametrów zawartych w tabeli 5.2

Rozdział 6.4 Engineering of nontrivial band geometry in LC cavities

- Jaki był powód, poza ewentualnym brakiem dostępności lasera pobudzającego, dla tak znacznej różnicy energii pobudzenia i emisji?
- Czy można spodziewać się emisji wymuszonej w takim układzie? Jak dużą absorpcję wprowadza ciekły kryształ?

Praca jest napisana bardzo starannie, wszelkie wykresy zostały przygotowane w czytelny sposób. Rzadkie błędy edytorskie nie utrudniają zrozumienia. Jedynie w drobne zakłopotanie mogą wprowadzić czytelnika „wiedźmy”, zwłaszcza w kontekście występowania w rozprawie takich pojęć jak „punkty diaboliczne”.

Najważniejsze wyniki rozprawy

Pionowe wnęki rezonansowe z ciekłym kryształem stają się coraz istotniejszą technologią umożliwiającą bardzo szybkie przestrajanie rezonansowej długości fali za pomocą zmian współczynnika załamania ciekłego kryształu, co wykorzystywane jest w laserach typu VCSEL. Prace zespołu profesor Barbary Piętki w popularyzacji tego rozwiązania posiadają znaczący wkład i wykraczają daleko poza zjawisko przestrajania rezonansowej długości fali.

Do najważniejszych wyników rozprawy należy zaliczyć:

1. Obserwację złożonych pól polaryzacji modów w układach z przestrajalnym anizotropowym ośrodkiem
2. Obserwację możliwości unicestwienia punktów wyjątkowych przez zwiększenie niehermitowskości układu.
3. Demonstrację możliwości przesuwania biegunów krzywizny Berry’ego w przestrzeni pędu.

Podsumowanie

Rozprawa pana mgra Mateusza Króla, obejmuje bardzo dogłębną analizę własności polaryzacyjnych wnęk rezonansowych. Rozprawa wskazuje na bardzo dobre opanowanie przez autora technik eksperymentalnych, w tym planowanie skomplikowanych zadań badawczych, opanowanie metod obliczeniowych dla pola optycznego w strukturach anizotropowych oraz gruntowne zrozumienie w ogólności fizyki falowej, zarówno w dziedzinie optyki jak i w kontekście kwantowym. Niezwykle cenne jest połączenie prac eksperymentalnych i teoretycznych co kształtuje w naukowcu szeroki horyzont poznawczy poprzez umiejętność doboru i eliminacji odpowiednich założeń względem analizowanego problemu.

Wyniki badań opisanych w rozprawie zostały opublikowane w najbardziej cenionych czasopismach co wskazuje na znaczącą wartość tych prac dla międzynarodowego środowiska.

Konkludując, uważam, że przedstawiona tu rozprawa spełnia wymagania, stawiane pracom doktorskim (zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym) i wnioskuję o dopuszczenie pana mgra Mateusza Króla do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Dodatkowo wnoszę o wyróżnienie pracy. Powodem wyróżnienia jest przeprowadzona przez autora: „głęboka analiza wpływu ośrodka anizotropowego wewnątrz wnęki rezonansowej na kształtowanie pola optycznego”. Analiza ta jest pionierską pracą, która odkrywa bogatą złożoność obserwowanych procesów, mogących w przyszłości kształtować rozwój spintroniki, kwantowej komunikacji, fotonicznego przetwarzania i przechowywania informacji.