

Streszczenie

Silne sprzężenie światło-materia, które w ostatnich latach cieszy się szerokim zainteresowaniem badaczy na całym świecie, pozwala na modyfikację właściwości materiałów na poziomie fundamentalnym. Tradycyjnie silne sprzężenie uzyskuje się za pomocą zewnętrznych wnęk optycznych, które zapewniają elastyczność w doborze oddziałujących komponentów. Jednak to podejście ma ograniczenia, takie jak konieczność stosowania zaawansowanych technik wytwarzania i złożonych układów eksperymentalnych, co ogranicza skalowalność i praktyczne zastosowania. Alternatywnym podejściem jest auto-hybrydyzacja, która pozwala na współistnienie modów optycznych i przejść ekscytonowych w tym samym materiale, eliminując w ten sposób potrzebę stosowania zewnętrznych wnęk. Auto-hybrydyzacja upraszcza wytwarzanie, zachowując jednocześnie zalety silnego sprzężenia, co prowadzi do wydajnych i kompaktowych rozwiązań.

Niniejsza rozprawa doktorska bada silne sprzężenie między modami optycznymi a ekscytonami w auto-hybrydyzowanych, jednoosiowych hiperbolicznych nanosferoidach zbudowanych z materiałów wielowarstwowych. W pracy tej zawarto systematyczną analizę wpływu geometrii, rozmiaru i składu materiałowego na zjawiska sprzężenia. Nanosferoidy charakteryzują się szerokim zakresem doboru kształtu od wydłużonych nanocząstek poprzez sferyczne do spłaszczonych. Metody numeryczne i obliczeniowe wykorzystane w tym badaniu obejmują techniki macierzy T i skończonej dziedzinie czasu.

Pierwszą częścią oryginalnych badań jest analiza modów optycznych jednoosiowych hiperbolicznych nanosferoid zbudowanych z wielowarstw srebra i krzemionki. Ich odpowiedź optyczna i sprzężenie modów są badane w odniesieniu do ich kształtu i wewnętrznej struktury, przy czym współczynnik kształtu zmienia się od $1/3$ (wydłużony) przez 1 (sferyczny) do 3 (spłaszczony). Odpowiedź optyczna zależy od anizotropii materiału, kształtu i rodzaju oświetlenia. Wyniki pokazują, że w układzie występują dwa dominujące mody: dipol elektryczny (ED) sprzężony z kwadrupolem magnetycznym (MQ) oraz dipol magnetyczny (MD) sprzężony z kwadrupolem elektrycznym (EQ). Nanocząstki o spłaszczonym kształcie wykazują mniej korzystne własności modów optycznych w porównaniu z tym o wydłużonych i sferycznych geometriach.

Bazując na powyższych wynikach, druga część badań obejmuje auto-hybrydujące silne sprzężenie modów optycznych z ekscytonami w nanocząstkach o wydłużonych i sferycznych geometriach. Zakłada się, że ekscytony są umieszczone w matrycy dielektrycznej, która wchodzi w skład warstwowego materiału hiperbolicznego. Nanocząstki wydłużone i sferyczne wykazują duże rozszczepienie Rabiego, umożliwiając silne sprzężenie modów optycznych (ED i MD) z ekscytonami. Wyniki pokazują, w jakich warunkach mody MD lub ED oferują silniejsze sprzężenie z przejściami ekscytonowymi lub molekularnymi w badanych nanocząstkach.

Bazując na wydajnym dipolu magnetycznym, trzecia część badań koncentruje się na ocenie praktycznej realizacji auto-hybrydyzacji w reżimie silnego sprzężenia modów MD z ekscytonami. W tej części badań wykorzystuje się dichalkogenki metali przejściowych jako składnik materiału hiperbolicznego: MoS_2 (disiarczek molibdenu), MoSe_2 (diselenek molibdenu), WS_2 (disiarczek wolframu) i WSe_2 (diselenek wolframu). Najpierw dokonano oceny ogólnych własności ekscytonów dichalkogenków metali przejściowych z modami nanocząstek hiperbolicznych dla prostych materiałów dwuskładnikowych (srebro plus dichalkogenek), które jednak charakteryzują się brakiem silnego sprzężenia z powodu rozstrojenia widmowego modów z ekscytonami. Aby rozwiązać to ograniczenie, wprowadzono dodatkową dielektryczną warstwę tworząc trójwarstwowy materiał hiperboliczny (srebro/krzemionka/dichalkogenek). Wyniki pokazują,

że w nanocząstkach zbudowanych z takich materiałów silne sprzężenie z ekscytonami może być osiągnięte zarówno dla modu dipola magnetycznego jak i elektrycznego, co pokazano na przykładzie nanocząstki zbudowanej ze srebra/krzemionki/WS₂ i srebra/krzemionki/MoS₂.

Podsumowując, niniejsza rozprawa przedstawia wgląd w to, jak geometria, rozmiar i struktura wewnętrzna wpływają lub tłumią silne sprzężenie w jednoosiowych hiperbolicznych wielowarstwowych nanosferoidach. Mogą one usprawnić projektowanie urządzeń optoelektronicznych nowej generacji.