

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr. Agaty Roszkiewicz,  
zatytułowanej „Generacja plazmonów polarytonów powierzchniowych na strukturach  
periodycznych”.**

---

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska Pani mgr. Agaty Roszkiewicz powstała pod kierownictwem naukowym Pana Profesora dr hab. Wojciecha Nasalskiego z Zakładu Teorii Ośrodków Ciągłych Instytutu Problemów Techniki w Zespole Badawczym Nanofotoniki.

Praca składa się z dziewięciu rozdziałów, które zostały poprzedzone spisem treści, streszczeniem i listą akronimów. Pracę zamyka rozdział wymieniający elementy wkładu oryginalnego, obszerną bibliografię składającą się z ponad 130 referencji oraz spisu rysunków.

Praca poświęcona jest numerycznej analizie zagadnienia generacji plazmonów powierzchniowych na periodycznej dwuwarstwowej strukturze z asymetrycznością utworzoną przez dwie wzajemnie przesunięte siatki dyfrakcyjne z wypełnieniem dielektrycznym, oraz analizie modów cząstkowych struktury jednowymiarowej składającej się z warstwy metalu z nałożoną jednowymiarową siatką metalową. Pierwsza z analizowanych struktur optymalizowana jest w celu uzyskania możliwości manipulacji kierunkiem propagacji energii w wyniku modyfikacji tylko jednego parametru struktury. Symulacje numeryczne bazują na metodzie RCWA (Ścisła Metoda Fal Sprzężonych). Opracowany na jej podstawie kod numeryczny pozwala na wszechstronną symulację zachowania pola elektromagnetycznego sprzężonego z wielowarstwową strukturą periodyczną o dowolnym profilu z możliwością uwzględnienia warstw jednorodnych.

Przedstawiona w rozprawie analiza numeryczna stowarzyszona jest z wnikliwą interpretacją fizyczną działania rozpatrywanych struktur w oparciu o relacje dyspersji. Interpretacja ta bazuje na (zdawałoby się) dobrze znanych, znacznie prostszych relacjach dyspersji dla struktur elementarnych takich jak płaska powierzchnia styku metal-dielektryk czy cienka, jednorodna warstwa metalu w otoczeniu dielektrycznym. Ta część pracy (Rozdział Podstawy teoretyczne) stanowi podstawę dla wprowadzenia pojęć i terminów fizycznych użytych w analizie właściwości bardziej złożonych struktur rozważanych w rozprawie. W szczególności bardzo starannie omówione są przyczyny fizyczne możliwych zmian kierunku propagacji energii w tych strukturach w warunkach sprzężenia z polem elektromagnetycznym.

Praca napisana jest z dużym rozmachem z wnikliwym wykorzystaniem źródeł w klarownej polszczyźnie sprzyjającej lekturze rozprawy, która dotyczy pojęciowo trudnych, najbardziej zaawansowanych problemów współczesnej nanofotoniki. Jej zawartość stanowi również obszerny zbiór współczesnej wiedzy na temat fizyki procesów zachodzących w strukturach plazmonych.

W obszernym materiale wprowadzającym w tematykę plazmonową (Rozdział 1 i 4) w jej części poświęconej historii, który rozpoczyna się od zastosowań nanocząstek metali szlachetnych, pominięto wzmiankę o pracach Faradaya (pierwsze regularne prace badawcze nad koloidami nanocząstek złota). Pominięto również wzmiankę o przełomowej teorii Mie, która od ponad stu lat jest najbardziej

podstawowym narzędziem opisu rozpraszania i absorpcji światła padającego na cząsteczkę sferyczną o dowolnym rozmiarze.

Modelowanie struktur plazmonicznych jest niezwykle wrażliwe na wybór funkcji dielektrycznej opisującej właściwości optyczne metalu. Autorka stosuje funkcję dielektryczną Drudego-Lorentza w formie, która uwzględnia zderzenia elektronów swobodnych (równanie (4.14)), bądź zaniedbuje ten proces. Zaniedbanie relaksacji elektronów swobodnych sprawia, że zespolona funkcja dielektryczna staje się rzeczywista. Fakt ten ma drastyczny wpływ na modelowanie zjawiska plazmonów powierzchniowych poczynając od najprostszych sytuacji, takich jak płaska granica metal-dielektryk, przedstawionych w Rozdziale 4.5.

W przypadku, gdy modelowanie odbywa się z użyciem rzeczywistej funkcji dielektrycznej (idealny metal drudowski), pojęcie lokalizacji plazmonu przy powierzchni struktury, określenie *drogi propagacji* i *głębokości wnikania* plazmonu powierzchniowego nie nastroczą problemów pojęciowych i są jednoznacznie określone przez składową styczną  $k_x$  i składowe normalne do interfejsu  $k_z^d, k_z^m$  wektora falowego, przy czym wielkości te są tu wielkościami rzeczywistymi.

Sytuacja staje się bardziej skomplikowana rachunkowo, a przede wszystkim pojęciowo, w przypadku rzeczywistych metali, gdy funkcja dielektryczna metalu jest zespolona. Wówczas wszystkie składowe wektorów falowych  $k_x$  i składowych normalnych do interfejsu  $k_z^d, k_z^m$  są liczbami zespolonymi i znaczenie plazmonu jako fali zlokalizowanej na powierzchni metal-dielektryk i propagującej się wzdłuż tej powierzchni gubi swój sens. Dyskusja tej sytuacji fizycznej budzi niedosyt w wielu miejscach pracy. Jest tak np. w podrozdziale „Długość drogi propagacji” (str.25), gdzie Autorka przytacza definicję tej wielkości. Jeśli długość drogi propagacji, zdefiniowana jako wielkość proporcjonalna do odwrotności części rzeczywistej składowej równoległej wektora falowego  $Rek_x = Re k_{SPP}$ , ma poprawny sens fizyczny, można się spodziewać, że, głębokość wnikania fali plazmonowej zarówno w dielektryk jak i w metal też są dobrze zdefiniowane, zgodnie z interpretacją plazmonu powierzchniowego przedstawioną na Rysunku 4.2. Jednak zamiast dyskusji tej wielkości w podrozdziale „Głębokość wnikania” (str.26), pojawia się tekst negujący istnienie plazmonów na gładkiej powierzchni, co stanowi sprzeczność z poprzednimi rozważaniami. W rozprawie przeprowadzono jedynie niepełną, werbalną dyskusję plazmonów powierzchniowych w przypadku rzeczywistych metali (str.25), co sprawia, że dyskusja miejscami jest niejasna. Na przykład nie wiadomo, co Autorka rozumie przez „maksymalny wektor falowy”  $k_{SPP}$ , (wyrażenie (4.25)) dla częstości  $\omega_{SPP}$ , która nie została zdefiniowana..

Brak definicji wielkości  $k$ , które pojawia się po raz pierwszy w równaniu (4.20), powoduje że wielkości  $k_z^d$  i  $k_z^m$ . (równania (4.21)) są również niezdefiniowane. W tekście brak jest jawnego związku liczby falowej plazmonu powierzchniowego  $k_{SPP}$  z składową wektora falowego wzdłuż interfejsu  $k_x$  (wielkość pominięta w dyskusji fali plazmonowej). Brak jest też wyrażeń wiążących składowe  $k_z^d$  i  $k_z^m$  z częstością pola  $\omega$  analogicznych do równania (4.24), choć byłyby one ważne ze względu na wielkość drogi wnikania plazmonu w dielektryk i metal. Ponadto, równanie (4.24) wprowadzające podstawową dla prowadzonych rozważań wielkość  $k_{SPP}$  nie wynika z równań (4.23) i (4.21) jak pisze Autorka, gdyż wielkość taka w tych równaniach nie występuje.

Wiele ze sformułowanych powyżej uwag bierze się z faktu, że Autorka pracy w części poświęconej podstawom teoretycznym oparła się głównie na jednej pracy przeglądowej (Zayats et al., 2005). Odbiło się to również na niektórych definicjach zacytowanych w rozprawie, choć przegląd tych autorów nie wyznacza jednoznacznego kanonu pojęciowego i nazewnictwa stosowanego w bardzo szerokiej dziedzinie, jaką jest fizyka plazmonów powierzchniowych. Dotyczy to na przykład stwierdzenia, że plazmony powierzchniowe są granicznym przypadkiem plazmonów polarytonów powierzchniowych, gdy w rozwiązaniach równań Maxwella zaniedbuje się retardację. Takie

określenie plazmonów powierzchniowych nie znajduje potwierdzenia w literaturze przedmiotu włączając to recenzowana rozprawę. Wielu z autorów stosuje nazwą „plazmony powierzchniowe” mając na myśli fale elektromagnetyczne czy też oscylacje kolektywne ładunków, które mogą być (lub są) indukowane na powierzchni granicznej metal-dielektryk. Praktyka ta ma miejsce również w pracach cytowanych w rozprawie (np. (Stelle et al., 2003)) jak i w samej rozprawie.

Jak sądzę, angielski termin *surface plasmon polariton* zgrabniej byłoby używać w tłumaczeniu *plazmonowy polaryton powierzchniowy*, a nie *plazmon polaryton powierzchniowy*, termin używany w recenzowanej pracy.

W części rozprawy poświęconej modom struktury dielektryk-metal-dielektryk (str.66) dyskusja rozszczepienia *poziomów* na mod o niższej i wyższej częstotliwości jest mało klarowny. Pojawiające się w tym rozdziale terminy „rozszczepienie poziomów” oraz „przerwa energetyczna” w kontekście dotychczasowego modelowania jest słabo uzasadniony. Uzasadnienie stosowalności pojęć znanych z opisu kryształów fotonicznych pojawia się w rozprawie dopiero od jej koniec (Rozdział 8) i jest przedstawione klarownie i wyczerpująco. Pojawienie się dwóch równań (7.4) w miejsce równania dyspersji (7.3) dla struktury dielektryk-metal-dielektryk nie zostało dostatecznie uzasadnione, a odsyłacz do referencji (Zayats et al., 2005) sprawy nie wyjaśnia.

Analiza modów struktury warstwowej dielektryk-metal-dielektryk przedstawiona w Rozdziale 7.1 jest klarowna i nie budzi zastrzeżeń tak długo, jak dotyczy idealnego (bezstratnego) modelu metalu opisywanego rzeczywistą funkcją dielektryczną. Pojawienie się w modelowaniu urojonej części liczby falowej i jego skutki zaburza klarowność i kompletność dyskusji, podobnie jak to miało miejsce w Rozdziale 4 „Podstawy teoretyczne”. W szczególności niejasna jest dyskusja urojonej części liczby falowej modu o wyższej i niższej energii.

Poniżej zamieszczam spis niektórych zauważonych nieścisłości i niezręczności, które pojawiają się w tekście pracy. Nie rzutują one jednak w najmniejszym stopniu na wartość oryginalnych wyników przedstawione w pracy.

Str.7. „Nanocząstki metali, ..., wykazują silną absorpcję w zakresie widzialnym i ultrafiolecie...” – jest to prawda jedynie dla nanocząstek najmniejszych, o rozmiarach dużo mniejszych od długości fali wzbudzającej. Wraz ze wzrostem rozmiarów nanocząstek ich właściwości absorpcyjne zanikają na rzecz rosnących zdolności rozpraszających w mechanizmie plazmonowym. To właśnie silne rozpraszanie na częstościach rezonansów plazmonowych sprawia, że materiały zawierające nanocząstki metalowe posiadają spektakularne właściwości barwne (przykład: czara Likurga) różniące je od szkła barwionych, których własności optyczne ( w transmisji czy odbiciu) związane są z selektywną absorpcją światła.

Str.17. W „makroskopowym” zapisie równań Maxwella (4.1-4.4), symbole  $J$  (równanie (4.2)) i  $\rho$  oznaczają odpowiednio gęstość prądu i gęstość *ładunków niezwiązanych*, podczas gdy w dalszych rozważaniach punktem wyjścia są równania opisujące sytuację, w której obie te wielkości są równe zero.

Str.24. Zamiast: „Relacja dyspersji plazmonu powierzchniowego na granicy metalu z dielektrykiem jest *nietrywialnym rozwiązaniem* powyższych zależności...” powinno być: „... jest *warunkiem istnienia nietrywialnego rozwiązania* powyższych równań...”.

Str.25. Fakt, że krzywa dyspersji przecina linię światła wynika z faktu, że funkcja dielektryczna metalu, która została wprowadzona do opisu jako jego zewnętrzny parametr jest zespolona, a nie że jej zespoloność wynika przecinania tych krzywych.

Str.42. „...elementy siatki mają wymiary o wiele mniejsze od pola padającego...” – niefortunna składnia.

Str. 68. „...następuje zwiększenie wektora falowego o współczynnik załamania ośrodka.” – błędne sformułowanie.

Str. 70. „...tylko taka konfiguracja zapewnia przestrzenne ograniczenie elektronów w nanodrucie.” W nanodrucie elektrony są ograniczone przestrzennie do wymiarów nanodruta niezależnie od konfiguracji oświetlenia.

Analiza relacji dyspersji dotyczy sytuacji w nieobecności zewnętrznego pola EM fali oświetlającej strukturę. W tym kontekście analizowane mody plazmonowe stanowią mody własne struktury, o których należałoby pisać, że *mogą być wzbudzone* (przy odpowiednich parametrach wzbudzenia), a nie *są wzbudzane* (co się zdarzyło w kilku miejscach pracy).

Mimo sformułowanych wyżej uwag uważam, że recenzowana rozprawa zdaje sprawę z głębokiej wiedzy Autorki rozprawy na temat zjawisk plazmonów powierzchniowych oraz fizyki procesów generowanych w rozpatrywanych strukturach w wyniku z oddziaływania z polem elektromagnetycznym. W części stanowiącej wkład własny, mgr. Roszkiewicz potrafiła bardzo przejrzysto określić cele poszczególnych etapów pracy, opisać tło fizyczne zjawisk i użyć metodę rozwiązania problemu jak i nakreślić interpretację fizyczną wyników złożonych symulacji numerycznych, które stanowią wartościowy wkład w dynamicznie rozwijającą się dziedzinę plazmoniki w nieobecności zewnętrznego pola EM fali świetlnej padającej na nanostrukturę (pochodzącego z odległych źródeł).

Podsumowując, chciałabym podkreślić, że rozprawa doktorska mgr. Roszkiewicz prezentuje bardzo wysoki poziom merytoryczny. Przedstawione powyżej uwagi krytyczne przytoczone z obowiązku recenzenckiego nie umniejszają tej wysokiej oceny. Rozprawa mgr. Agaty Roszkiewicz w pełni spełnia (a nawet przekracza) wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie pani mgr. Agaty Roszkiewicz do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Krystyna Kolwas