

dr hab. inż. Tomasz Czyszanowski prof. PŁ
Instytut Fizyki Politechniki Łódzkiej
ul. Wólczańska 219
90-924 Łódź

Łódź, 7 III 2014

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Pastuszczak
pt. Obrazowanie nadrozdzielcze za pomocą nanoukładów plazmonicznych**

Rozprawa doktorska mgr inż. Anny Pastuszczak została wykonana pod kierunkiem dra hab. Rafała Kotyńskiego na wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Temat rozprawy jest bardzo aktualny a poruszane w niej zagadnienia znakomicie wpisują się w nurt badań prowadzonych w czołowych światowych ośrodkach. Obrazowanie nadrozdzielcze w dużym stopniu redukujące zjawisko dyfrakcji pozwala na optyczną obserwację przedmiotów o rozmiarach podfałowych. Masowe wytwarzanie struktur zbudowanych z planarnych materiałów o naprzemiennie rozłożonej dodatniej i ujemnej stałej dielektrycznej wydaje się być opłacalne ekonomicznie i w krótkim czasie może znaleźć zastosowanie w litografii. Natomiast szerszego zastosowania obrazowania nadrozdzielczego można spodziewać się w dalszej przyszłości w mikroskopii optycznej, dzięki czemu tanie urządzenia umożliwiające obserwację obiektów submikrometrowych mogą szybko trafić do powszechnego użytku.

Stopień skomplikowania zjawisk optycznych, które należy rozpatrzyć przy projektowaniu nanoukładów plazmonicznych oraz konieczność uwzględnienia różnorodnych geometrii układów powoduje, że ich konstruowanie bez wcześniejszej analizy spodziewanych właściwości jest często trudne, a na pewno nieopłacalne. Projektowanie i optymalizacja konkretnego przyrządu, którego technologia jest w fazie badań rozwojowych narzuca duże wymagania na dokładność procedur numerycznych. Brak, bądź niewielka ilość badań doświadczalnych utrudnia weryfikację wyników teoretycznych i zmusza do stosowania metod dokładnych a przez to często bardzo czasochłonnych. Pomimo to eksperyment numeryczny bez wątpienia jest tańszy i szybszy niż technologiczna metoda prób i błędów. Pozwala on we wstępnym etapie badań na zawężenie pola działania i wytypowanie perspektywicznych rozwiązań konstrukcyjnych.

Recenzowana praca poświęcona jest numerycznej analizie właściwości periodycznych struktur metal-dielektryk w perspektywie wykorzystania ich do obrazowania nadrozdzielczego a zatem

takiego, które w znacznym stopniu eliminuje efekty dyfrakcyjne umożliwiając obrazowanie optyczne obiektów znacznie mniejszych niż długość fali świetlnej. Autorka w recenzowanej rozprawie

- weryfikuje poprawność prostego modelu zastępczego powszechnie używanego do analizy struktur nadrozdzielczych,
- przedstawia wyniki optymalizacji budowy struktur nadrozdzielczych skupiając się na analizie grubości warstw i właściwościach obrazujących optymalnych struktur,
- przedstawia strukturę zapewniającą koncentrację wiązki świetlnej do obszaru o rozmiarach podfalowych.

Praca składa się z 9 rozdziałów oraz dodatku. Część pierwsza, obejmująca rozdziały od 1 do 7 poświęcona jest sformułowaniu i prezentacji niezbędnego formalizmu teoretycznego, który wykorzystany będzie później na przykładzie konkretnych struktur. W szczególności rozdział 4 poświęcony jest wzbudzeniu plazmonów-polarytonów na granicy warstw metal-dielektryk. Rozdział ten zawiera oryginalne wyniki symulacyjne Autorki ilustrujące właściwości związku dyspersyjnego dla przykładowej struktury wielowarstwowej. W rozdziale 5 Autorka opisuje propagację fali w periodycznych układach metal-półprzewodnik wykorzystując do tego celu metodę macierzy przejścia. Innym prezentowanym podejściem jest potraktowanie struktury periodycznej jako nieskończony kryształ fotoniczny, w którym rozwiązania równań Maxwella wyrażają się w postaci fal Blocha. Autorka weryfikuje poprawność zastępczego modelu efektywnego konkludując w dalszych rozdziałach, iż jego poprawność jest ograniczona do struktur o grubości warstw znacznie mniejszych niż długość fali świetlnej. W rozdziale 6 przedstawiono mechanizm obrazowania z podfalową rozdzielczością za pomocą periodycznych układów metal-dielektryk. Część druga pracy, tj. rozdziały 7 - 9, przynosi wspomnianą optymalizację budowy periodycznych struktur nadrozdzielczych. Przedstawiono tu wyniki optymalizacji planarnych struktur periodycznych wykonanych z dwutlenku tytanu (TiO_2), tytanianu strontu (SrTiO_3) oraz fosforku galu (GaP) przedzielonych warstwami srebra (Ag). Optymalizacja tych struktur nakierowana jest na wykorzystanie ich do obrazowania z podfalową rozdzielczością przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej transmisji światła przez strukturę. W szczególności przeprowadzono analizę głębokości wnikania płaskiej fali elektromagnetycznej do struktury w zależności od wielkości komórki elementarnej definiowanej jako grubość pary warstw metal-dielektryk, procentowego udziału srebra oraz długości propagującej fali. Autorka analizowała także możliwość znalezienia optymalnej budowy struktury przy pomocy funkcji przenoszenia oraz pokazała, iż w przypadku optymalnej periodycznej struktury metal-dielektryk możliwe jest uzyskanie niemal bezdyfrakcyjnej propagacji światła. W kolejnym rozdziale Autorka zaproponowała periodyczną strukturę służącą do koncentracji wiązki optycznej przy jednoczesnym zachowaniu płaskich powierzchni stałej fazy w całej strukturze.

Podstawowym wynikiem pracy jest zaprojektowanie struktury umożliwiającej uzyskanie zdolności rozdzielczej obiektów pięciokrotnie mniejszych od długości fali świetlnej. Drugim istotnym wynikiem pracy jest określenie obszaru stosowności metod efektywnych. Autorka wykazała

poprawność metody przybliżonej do analizy struktur złożonych z warstw o kilkunastu nanometrowych grubościach, zaś jej zawodność dla warstw o realistycznych grubościach powyżej kilkunastu nanometrów. Trzecim istotnym wynikiem pracy jest zaproponowanie konstrukcji koncentratora optycznego umożliwiającego skupienie światła w obszarze o podfalowych rozmiarach przy jednoczesnym zachowaniu jednorodnego kształtu i rozkładu przestrzennego frontów falowych.

Należy dodać, że procedury numeryczne na podstawie których uzyskano większość wyników prezentowanych w rozprawie są dziełem Autorki, a jedynie program oparty na metodzie różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD - *finite-difference time domain*), który został wykorzystany do uzyskania części wyników obrazujących przestrzenną propagację światła, jest ogólnodostępnym pakietem numerycznym opracowanym w Massachusetts Institute of Technology.

Pewien niedosyt budzą wyniki przedstawione w rozdziale 7.3.1. poświęconym głębokości wnikania fali do struktury periodycznej. Pokazano tam bardzo cenny wynik wskazujący na istnienie rezonansu pozwalającego na głęboką propagację fali świetlnej wewnątrz struktury, jednak przedstawione wyniki zostały ograniczone jedynie do wybranych grubości komórek elementarnych (a). Z wykresu 7.10 widać, że zmiana grubości komórki elementarnej powoduje szybką zmianę funkcji głębokości wnikania. W związku z tym znacznie bardziej pouczający byłby wykres konturowy na którym głębokość wnikania byłaby przedstawiona w funkcji współczynnika wypełnienia (f) oraz gęsto próbkowanej grubości komórki elementarnej. Wykresy takie dla różnych konfiguracji byłyby możliwe do uzyskania przy relatywnie niewielkim nakładzie pracy dzięki bardzo efektywnej metodzie macierzy przejścia, którą wykorzystywała autorka. W wyniku braku powyższej analizy problematyczny jest także wybór dwóch grubości komórki elementarnej $a = 40$ nm i $a = 60$ nm wykorzystanych w dalszych optymalizacjach. Pytanie, które się nasuwa dotyczy możliwości znalezienia struktury o innym a pozwalającej na jeszcze głębsze wnikanie światła niż pokazane na rys. 7.11b. Pytanie to o tyle jest zasadne, że różnica pomiędzy głębokością wnikania pomiędzy obydwojma wybranymi przez Autorkę przypadkami sięga niemal 50%.

Autorka w drugiej części rozdziału 7.3.2. postanowiła wykorzystać metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (FDTD) zastępując metodę macierzy przejścia (TMM). O ile ta druga (TMM) w przypadku jednowymiarowym i zakładając obszary o stałym rozkładzie ϵ (stałej dielektrycznej) jest metodą dokładną to pierwsza (FDTD) jest jedynie metodą przybliżoną. Zastanawiające jest co skłoniło Autorkę do zmiany metody w tym przypadku? Czy wyniki uzyskane przy pomocy obu metod są identyczne?

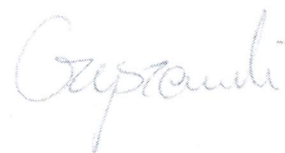
Użycie metody FDTD wydaje się w pełni uzasadnione począwszy od rozdziału 7.3.4 gdzie analizowana jest propagacja wiązki w dwóch wymiarach. Zauważalny jest jednak brak choćby dodatku do rozprawy poświęconego analizie błędów generowanego przez metodę FDTD. Główne wątpliwości dotyczą gęstości siatki obliczeniowej i poprawności jej doboru, co może mieć w przypadku tej metody bardzo znaczący wpływ na wyniki.

Kolejne pytania pojawiają się przy opisie zaproponowanej struktury koncentratora optycznego, który składa się z wielowarstw nachylonych pod kątem 70.5° do osi optycznej układu. Kąt ten został wybrany tak aby w obszarze całej struktury zachować fronty falowe płaskie i równoległe do powierzchni stałej fazy fali padającej na układ. Wydaje się iż niezwykle pouczający byłby również wykres pokazujący zależność kąta nachylenia wielowarstwy od parametru określającego równoległość stałej fazy, a dodatkowo pokazywałby dopuszczalny błąd technologiczny jakim mogłaby być obciążona struktura.

Poza powyższymi nielicznymi wątpliwościami, które nie wpływają na moją wysoką ocenę rozprawy, pragnę zauważyć iż praca zredagowana jest bardzo starannie (z wyjątkiem pojedynczych drobnych błędów edytorskich). Wyniki obliczeń przedstawione są w postaci czytelnych wykresów. Praca świadczy o gruntownej wiedzy Autorki w dziedzinie fizyki, a w szczególności w dziedzinie optyki falowej. Dowodzi ona także dużej biegłości w zakresie wiedzy matematycznej i to zarówno w dziedzinie algebry liniowej, metod numerycznych, jak i programowania.

Recenzowana praca stanowi samodzielny i oryginalny dorobek naukowy Autorki, potwierdzony pięcioma publikacjami konferencyjnymi oraz trzema artykułami recenzowanymi z czego w jednym mgr inż. Anna Pastuszczak jest pierwszym autorem. Na uwagę zasługuje fakt, iż mgr inż. Anna Pastuszczak jest także pierwszym autorem niedawno opublikowanego zaproszonego artykułu w Opto-Electronics Review, który nie znalazł się na liście prac cytowanych w rozprawie doktorskiej. Publikacje Autorki doczekały się 24 obcych cytowań co jest ilością znaczącą biorąc pod uwagę młody wiek Autorki oraz specyfikę prac teoretycznych.

Mając na uwadze wielostronność przeprowadzonych badań teoretycznych i dużą naukową jak też praktyczną wartość otrzymanych wyników wyrażam przekonanie, że praca mgr inż. Anny Pastuszczak spełnia wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr inż. Anny Pastuszczak do publicznej obrony pracy doktorskiej a w przypadku pozytywnego jej zakończenia o wyróżnienie pracy.



Tomasz Czyszanowski