

18.03.2014
data i podpis

17.03.2014
Warszawa, 07.03.2014

Dr hab. Dorota A. Pawlak, prof. ITME
Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Anny Pastuszcak
pt.: „OBRAZOWANIE NADROZDZIELCZE ZA POMOCĄ NANOUKŁADÓW
PLAZMONICZNYCH”**

Rozprawa przedstawiona mi do recenzji wpisuje się w nurt badań poświęconych układom plazmonicznym i metamateriałom dla zastosowań optycznych. Praca powstała pod kierunkiem dr hab. Rafała Kotyńskiego z Zakładu Optyki Informacyjnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Niniejsza rozprawa dotyczy nanostruktur metaliczno-dielektrycznych, w których światło propaguje się dzięki wzbudzeniom powierzchniowych plazmonów-polarytonów. Autorka postawiła sobie za cel zweryfikowanie trzech tez, które można podsumować następująco: (i) Cienkowarstwowe struktury nadrozdzielcze można zoptymalizować numerycznie przy użyciu teorii ośrodków efektywnych ze względu na uzyskiwaną rozdzielczość i współczynnik transmisji, i że optymalne struktury to struktury o grubszych warstwach; (ii) W strukturze o skończonej grubości warstw można uzyskać mniejsze straty niż w strukturze o podobnej zawartości metalu ale złożonej z bardzo cienkich warstw; (iii) Cienkowarstwowe struktury nadrozdzielcze o niskim współczynniku odbicia można łączyć w nanoukłady optyczne pozwalające zmieniać przestrzenny rozkład natężenia padającej wiązki świetlnej bez zaburzania rozkładu przestrzennego fazy pola.

Wszystkie tezy zostały w pełni zweryfikowane. W pracy wykazano, że cienkowarstwowe metaliczno-dielektryczne struktury nadrozdzielcze zaprojektowane przy użyciu teorii ośrodków efektywnych są suboptymalne ze względu na uzyskiwaną rozdzielczość i współczynnik transmisji. Wykazano, że w drodze optymalizacji numerycznej możliwa jest poprawa obu tych wielkości, otrzymując ponadto struktury o grubszych warstwach, które z technologicznego punktu widzenia są łatwiejsze do wykonania. Straty propagacyjne dla struktury cienkowarstwowej przewidywane przez teorię ośrodków efektywnych mogą znacznie odbiegać od wyniku obliczonego ściśle, nawet gdy warstwy z których składa się struktura są kilkukrotnie cieńsze od długości fali. W szczególności, wykazano, że w strukturze o skończonej grubości warstw można uzyskać kilkukrotnie niższe straty niż w strukturze o podobnym składzie o infinitezymalnie cienkich warstwach. Ponadto wykazano, że cienkowarstwowe struktury nadrozdzielcze można łączyć w nanoukłady optyczne pozwalające zmieniać przestrzenny rozkład natężenia wiązki świetlnej bez zaburzania rozkładu fazy pola. Zaproponowano użycie trzech połączonych ze sobą struktur cienkowarstwowych, do utworzenia struktury, która zmienia rozkład natężenia padającej wiązki gaussowskiej, ogniskując wiązkę w obszarze o podfalowych rozmiarach, oraz pozostawia przy tym niezaburzony, płaski kształt powierzchni stałej fazy.

Praca składa się z 9 rozdziałów oraz dodatku opisującego stosowaną metodę macierzy przejścia. Rozdział pierwszy, czyli wstęp, wprowadza w tematykę pracy, określa strukturę, cele i tezy pracy.

Rozdziały 2 oraz 3 w bardzo jasny i dokładny sposób, wprowadzają w dziedzinę elektromagnetycznego opisu światła oraz w wybrane elementy optyki fourierowskiej. Rozdział czwarty dotyczy powierzchniowych plazmonów-polarytonów i zawiera już pierwsze oryginalne wyniki autorki dotyczące wyprowadzenia związku dyspersyjnego dla struktury wielowarstwowej oraz wyniki analizy numerycznej pokazującej właściwości tego związku. Trzeba tu podkreślić, że autorka wykorzystywała napisane przez siebie kody numeryczne.

Kolejny rozdział opisuje rozchodzenie się fali w metaliczno-dielektrycznych nanoukładach wielowarstwowych. W tym rozdziale omówione zostały najważniejsze modele fizyczne wykorzystywane do opisu rozchodzenia się fal elektromagnetycznych w takich układach. Oprócz dokładnego i wyczerpującego opisu teoretycznego rozdział zawiera wyniki wykonanych przez autorkę symulacji rozkładu pól elektromagnetycznych w metaliczno-dielektrycznych nanostrukturach warstwowych oraz transmisji fal przez te struktury. Jak w powyższym rozdziale również tutaj autorka wykorzystała napisany przez siebie kod oparty na metodzie macierzy przejścia, która przedstawiona jest w dodatku do pracy.

Rozdział szósty dotyczy doskonałej płaskiej soczewki. Opisane zostały w nim zagadnienia takie jak zjawisko ujemnego załamania światła i możliwość jego wykorzystania do obrazowania obiektów poprzez planarne układy nadrozdzielcze. Omówiono w nim również inne przykłady nadrozdzielczego obrazowania na przykład za pomocą cienkiej warstwy metalicznej, czy też płaskich soczewek wielowarstwowych.

Rozdział siódmy dotyczy obrazowania nadrozdzielczego w bliskim polu za pomocą metaliczno-dielektrycznych nanoukładów warstwowych. Rozdział zawiera wyniki własne autorki. Szczegółowo rozpatrywane jest obrazowanie wykorzystujące zjawisko kanalizacji. Analizowana jest głębokość wnikania fali do wielowarstwy i właściwości obrazujące wielowarstwy.

Na Rys. 7.5 przedstawiony jest logarytm dziesiętny modułu i argument zespolony amplitudowej funkcji przenoszenia T oraz moduł amplitudowego współczynnika odbicia R w funkcji grubości struktury wielowarstwowej L dla struktury spełniającej warunki kanalizacji i wykonanej z nieabsorbujących materiałów o przenikalnościach elektrycznych $\epsilon_1 = -6.37$ i $\epsilon_2 = 7.37$. Warto by było w pracy podkreślić, że jest to sytuacja modelowa ponieważ w rzeczywistości materiałom o ujemnej wartości przenikalności musi towarzyszyć dyspersja i zwykle musi to pociągać za sobą straty czyli absorpcję.

Na stronie 84-tej autorka stwierdza, że "im mniejsza jest grubość struktury wielowarstwowej L , tym większy jest wpływ rezonansów Fabry-Perot na jej właściwości". Nasuwa się pytanie - dlaczego? W podrozdziale 7.2.3 autorka przedstawia różnice pomiędzy opisem struktury modelowanej w oparciu o przybliżenie ośrodka efektywnego a opisem wykorzystującym rzeczywistą grubość poszczególnych warstw tworzących strukturę wielowarstwową uświadamiając ewentualne błędy w opisie rzeczywistości przy wykorzystaniu tego przybliżenia.

Na Rys. 7.10 przedstawiona jest głębokość wnikania płaskiej fali elektromagnetycznej rozchodzącej się w kierunku normalnym do powierzchni warstw w wielowarstwowej strukturze srebrno-dielektrycznej w funkcji współczynnika wypełnienia struktury srebrem. Skąd wynika różnica pomiędzy kształtem krzywej głębokości wnikania dla komórki elementarnej $a =$ od 40 do 60 nm i ośrodka efektywnego a kształtem dla struktur o większej komórce elementarnej $a =$ od 80 do 200 nm? Do analizy wybrane zostały trzy materiały dielektryczne: SrTiO_3 , TiO_2 oraz GaP . Jakich ich właściwości sprawiły, że właśnie te materiały Pani wybrała jako materiały modelowe? Może korzystne byłoby pokazanie ich przenikalności elektrycznych w badanym zakresie. Na stronach 92 - 94 przedstawione są wartości głębokości wnikania fali do układów wielowarstwowych srebro-dielektryk (z powyżej wymienionych) oraz ich zdolność rozdzielcza. Jakich właściwości tych materiałów dielektrycznych wpłynęły na fakt, że na przykład struktura z SrTiO_3 charakteryzuje się najwyższą zdolnością rozdzielczą, ale za to małą głębokością wnikania, a z kolei dla struktury Ag-TiO_2 uzyskano głębokość wnikania $\delta \approx 14\lambda$?

Rozdział ósmy dotyczy plazmonicznych nanoukładów do koncentracji wiązki światła. Pani Anna Pastuszczała zaproponowała autorski projekt wielowarstwowej struktury do koncentracji wiązki światła. Autorka wykazała, że zaproponowana struktura plazmoniczna pozwala na ogniskowanie energii monochromatycznej wiązki świetlnej przy jednoczesnym zachowaniu niezaburzonego kształtu i rozkładu przestrzennego powierzchni stałej fazy tej wiązki. Wiązka jednocześnie ma wielokrotnie zmniejszoną szerokość połówkową.

Praca kończy się rzeczowym i interesującym podsumowaniem wyników oraz wnioskami końcowymi (rozdział dziewiąty).

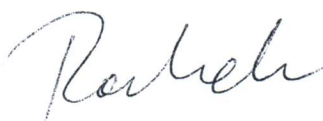
Praca jest napisana niezwykle starannie, każde użyte pojęcie jest wyjaśnione. Wyniki przedstawione w pracy w dużej mierze zostały wykonane przy użyciu oprogramowania napisanego przez autorkę. Praca powołuje się na 71 pozycji literaturowych w tym na osiem pozycji, których p. Anna Pastuszczała jest współautorem.

W tym miejscu pracy jako recenzent powinienem przedstawić ewentualne błędy i usterki jednak w przypadku pracy p. Anny Pastuszczała usterek trzeba było naprawdę w pracy szukać. Drobne edytorskie uwagi: na stronie 82, trzecia linia od dołu zamiast 'wykres 7.7' powinno być 'wykres 7.5'; powtórzone słowo 'grubości' na stronie 83. Na uwagę zasługuje fakt, że praca jest ładnie przygotowana pod względem edytorskim.

Pani mgr inż. Anna Pastuszczała jest współautorem 6 publikacji o zasięgu międzynarodowym w tym 5 w czasopismach z listy filadelfijskiej (w tym między innymi J. Appl. Phys. – czasopismo o współczynniku oddziaływania $IF(2012) = 2.21$, czy Applied Physics A-Materials Science & Processing, $IF(2011) = 1.545$). W trzech publikacjach pani Anna Pastuszczała jest pierwszym autorem. Pani Anna Pastuszczała jest również współautorem dwunastu publikacji konferencyjnych (takich jak Proc. of SPIE i inne), w siedmiu z nich jest pierwszym autorem.

Przedstawiona do recenzji praca mgr inż. Anny Pastuszczała pt. „Obrazowanie nadrozdzielcze za pomocą nanoukładów plazmonicznych” spełnia wszystkie ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o jej przyjęcie oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

Zarazem z uwagi na niezwykle staranne i jasne przygotowanie pracy i bardzo wyczerpujące połączenie wyników własnych wykonanych, w oparciu o autorskie oprogramowanie, z doniesieniami literaturowymi wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej mgr inż. Anny Pastuszczała



Dorota A. Pawlak