

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

Łódź, 19. 03. 2017

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI
WPŁYNĘŁO

2017 -03- 22 *JBielch.*

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Marcina Stolarka
p.t. Elementy dyfrakcyjne, refrakcyjne i absorpcyjne oparte na podfalowych periodycznych
strukturach metalicznych

Rozprawa doktorska mgra Marcina Stolarka została wykonana pod kierunkiem dra hab. Rafała Kotyńskiego na wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Rozprawa dotyczy badania własności optycznych struktur periodycznych wykorzystujących warstwy metaliczne.

Propagacja pola elektromagnetycznego przez warstwy metaliczne związana jest z bardzo silnym oddziaływaniem pomiędzy polem elektrycznym fali elektromagnetycznej a elektronami. Tego typu oddziaływanie powoduje bardzo silne skupienie promieniowania w pobliżu powierzchni metalowej do obszarów o rozmiarach mniejszych od długości fali, co umożliwia konstrukcję urządzeń optycznych o rozmiarach znacznie mniejszych od analogicznych urządzeń wykonywanych z materiałów dielektrycznych. Fakt ten ma niezwykle doniosłe znaczenie w przypadku urządzeń mających za zadanie integrację optyki z elektroniką, ale równocześnie niesie ze sobą szereg wyzwań z uwagi na ogromną absorpcję promieniowania optycznego na skutek oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z metalem. W efekcie propagacja promieniowania w układach wykorzystujących elementy metaliczne odbywa się na bardzo krótkich odcinkach minimalizując w ten sposób niechcianą absorpcję promieniowania elektromagnetycznego. Mimo silnej absorpcji, zjawiska plazmoneczne z powodzeniem wykorzystywane są do konstrukcji urządzeń takich jak falowody, filtry, soczewki, detektory itp., których główną zaletą jest ich podfalowy rozmiar.

Recenzowana praca poświęcona jest analizie oddziaływania pola elektromagnetycznego z periodycznymi podfalowymi strukturami zintegrowanymi z obszarami metalicznymi. Struktury te zostały rozważane w dwóch konfiguracjach: jako siatki podfalowe, w których metalowe paski były rozmieszczone periodycznie na powierzchni dielektryka oraz jako wielowarstwy, w których pary warstw metal-dielektryk tworzyły strukturę periodyczną. Autor w recenzowanej rozprawie:

1) pokazał możliwość sprzężenia z model falowodu promieniowania padającego prostopadłe do falowodu przy wykorzystaniu metalowej siatki podfalowej

2) analizował możliwość transmisji kierunkowej przez układ składający się z dwóch siatek podfalowych i zaproponował konstrukcję soczewki skupiającej na bazie takiego układu

3) pokazał możliwość wykorzystania wielowarstwy do konstrukcji obszaru umożliwiającego niemal całkowitą absorpcję padającego promieniowania oraz zaproponował realizację fizyczną tego typu struktury

4) zbadał wpływ niedoskonałości wytwarzania wielowarstw na ich własności optyczne.

Praca składa się z 6 rozdziałów. Część pierwsza obejmująca rozdziały 1 i 2 poświęcona jest prezentacji zagadnienia oraz opisowi wykorzystywanych metod numerycznych z uwzględnieniem metody propagacji wiązki, metody macierzy przejścia oraz metody różnic skończonych. Zostały omówione przyjęte w symulacjach warunki brzegowe oraz modele dyspersji materiałów.

Część druga pracy, na którą składają się rozdziały 3 - 5, zawierają oryginalne wyniki Autora. Rozdział 3 poświęcony został trzem zagadnieniom: konstrukcji metalowych siatek podfalowych pełniących rolę anteny (3.2), transmisji jednokierunkowej (3.3) oraz konstrukcji jednokierunkowych soczewek dyfrakcyjnych (3.4). Podrozdziały te zostały poprzedzone opisem własności dyspersyjnych wykorzystywanych materiałów (3.1). Prezentowane w rozdziale 3 wyniki analizy numerycznej dotyczą urządzeń zaprojektowanych dla fal terahercowych, dlatego zauważalny jest brak szczegółów dotyczących wartości współczynnika załamania światła w tym przedziale spektralnym dla arsenku galu, który wchodzi w skład budowy analizowanych urządzeń. Głębszego wyjaśnienia wymaga także przyjęte założenie, iż złoto dla rozważanych długości fali jest doskonałym przewodnikiem. Założenie takie rodzi pytania, np. czy pole elektromagnetyczne nie wnika do złota, a zatem nie jest uwzględniana absorpcja promieniowania? Jak założenie to wpływa na wyniki prezentowane w tym rozdziale i jak bardzo mogą się one różnić od wyników, które nie zakładałyby doskonałego przewodnika? Wyjaśnienie tej kwestii jest szczególnie istotne w przypadku analizy zjawisk plazmonicznych, zwłaszcza w kontekście wyniku podanego na stronie 99 mówiącego o bardzo silnej wrażliwości podobnych struktur na niedokładność ich wykonania. Można spodziewać się, iż struktury te także mogą okazać się wrażliwe na obecność absorpcji.

Wyniki zaprezentowane w podrozdziale 3.2 zostały opublikowane w *Proceedings of MIKON* (w której pan Marcin Stolarek był drugim autorem) i *Proceedings of ICTON* (pierwszy autor). Pan Marcin Stolarek wykorzystując metodę różnic skończonych w dziedzinie czasu (*Finite Difference Time Domain*) FDTD zaprezentował zależność transmisji przez metalową siatkę w zależności od parametrów siatki (okres, wysokość i współczynnik wypełnienia) dzięki czemu możliwe było wyznaczenie takiej kombinacji parametrów, która umożliwia transmisję sięgającą niemal 100% dla polaryzacji typu TM. Zabrakło w tej części informacji o parametrach optycznych otoczenia siatki oraz dokładnej definicji polaryzacji TM. Definicja znajdująca się w "Skorowidzu skrótów" jako pole

magnetyczne drgające równoległe do rozważanej płaszczyzny, może wydać się niejednoznaczna w świetle rozważanej struktury. W dalszej części zaproponowana została konstrukcja detektora promieniowania terahercowego w połączeniu z siatką podfalową wykonaną ze złota, pełniącą rolę anteny. W opisie struktury brak jest podania wymiarów, definicji układu odniesienia oraz parametrów optycznych tranzystora polowego umieszczonego w warstwie arsenku galu, pełniącego rolę detektora. Zaprojektowanie tego typu struktury jest zadaniem nietrywialnym, zatem dużym osiągnięciem jest wyznaczenie rozkładu gęstości energii pola w strukturze co zostało pokazane na wykresach 3.8 i 3.9. Jednak interesujący byłby także opis, którego zabrakło, dotyczący projektowania struktury i parametrów służących do oceny jej efektywności. Brak jest także wyznaczenia wydajności sprzężenia promieniowania z zaprojektowanym tranzystorem polowym. Interesujący byłby także opis zjawiska skupienia promieniowania w obszarze tranzystora i jego rozbudowana analiza. Najistotniejsze dla tej części wykresy 3.8 i 3.9 pozbawione są szkiców, obrazujących układ struktury oraz osi układu odniesienia co w znacznym stopniu utrudnia ich analizę.

Wyniki składające się na podrozdział 3.3 zostały opublikowane w *Optics Letters* i *Proceedings of ICTON*. W przypadku obu publikacji pan Marcin Stolarek był pierwszym autorem. Analizowana w tym podrozdziale struktura składa się z dwóch niejednakowych siatek metalowych umożliwiających jednokierunkową transmisję. Niesymetryczna transmisja została potwierdzona przez wyznaczone rozkłady pól optycznych w pobliżu siatek (rys. 3.12 oraz 3.13) oraz przez spektralną zależność transmisji uwzględniającą oba kierunki padającego promieniowania (rys. 3.14). Wyniki te stanowią przekonujący argument uwiarygodniający efektywność struktury. Niestety Autor nie określił parametrów, dla których zostały wykonane obliczenia oraz nie podał uzasadnienia dla ich wyboru. W przypadku wykresów 3.12 i 3.13 przykuwa uwagę niewielka rozdzielczość wykresu obrazującego przestrzenny rozkład pola optycznego. Czy wynika on z graficznej metody użytej do wykonania wykresu czy związany jest z przyjętą numeryczną dyskretyzacją? Jeżeli przyczyną jest przyjęta dyskretyzacja, to powstaje pytanie czy Autor przeprowadził analizę wpływu dyskretyzacji na dokładność obliczeń? Jest to szczególnie istotne w kontekście zjawisk plazmonicznych, w przypadku których należy zwracać uwagę na bardzo duże wartości pochodnych pól optycznych wymagających silnego zagęszczenia punktów obliczeniowych. Kolejną kwestią wymagającą wyjaśnienia związaną z wykresami 3.12 i 3.13 jest ich niesymetryczność względem osi x oraz silne ograniczenie przestrzenne względem osi x . Jakiego rodzaju fala padała na strukturę oraz czy struktura periodyczna wypełniała cały obszar symulowany względem x , czy tylko jego część? W dalszej części podrozdziału 3.3 znalazł się opis eksperymentu weryfikującego uzyskane wyniki numeryczne wykonanego w grupie prof. Jerzego Łusakowskiego, co jest cennym wynikiem potwierdzającym słuszność analizy numerycznej. W ostatniej części podrozdziału 3.3 została przeprowadzona analiza parametryczna struktury pod względem uzyskania możliwie największych różnic oraz możliwie największych ilorazów transmisji w obu kierunkach padania światła. Wyniki zostały przedstawione w postaci map w zależności od

parametrów d_1 i d_2 (prawdopodobnie mylnie oznaczonych, na rys. 3.11 są oznaczone jako a_1 i a_2) oraz w funkcji długości fali. Autor nie podał wartości pozostałych parametrów struktury ($h_0, h_1, h_2, \Lambda_1, \Lambda_2, a_3$), dla których wyniki zostały otrzymane poza podpisem pod rys. 3.14. Ponieważ przedstawiane wyniki pochodzą z jednej publikacji należy przypuszczać, że te same parametry zostały wykorzystane w przypadku wszystkich obliczeń prezentowanych w tym podrozdziale. Zastanawiający jest fakt użycia algorytmu genetycznego w celu znalezienia optymalnej struktury w przypadku tak niewielkiej ilości optymalizowanych parametrów oraz znajomości pochodnych optymalizowanej funkcji. W tym kontekście bardzo cenne byłoby podanie parametrów znalezionych optymalnej struktury lub optymalnych struktur w przypadku istnienia prawdopodobnie wielu maksimów lokalnych funkcji różnicy i ilorazu transmisji. Podanie jedynie przedziału optymalnych wartości parametrów a_1 i a_2 zdaje się nie wykorzystywać w pełni potencjału wykorzystanego narzędzia.

Wyniki opisane w podrozdziale 3.4 zostały opublikowane w *Optics Express*, którego pan Marcin Stolarek jest drugim spośród czterech autorów. Analizowana struktura jest pochodną struktury opisanej w podrozdziale 3.3. Jej parametry zostały tak dobrane aby charakteryzowała się wysokim współczynnikiem kontrastu. Autor wykazał na drodze analizy numerycznej zdolność skupiającą tego typu soczewki przy zachowaniu silnej kierunkowości co następnie zostało potwierdzone na drodze eksperymentu wykonanego w grupie prof. Jerzego Łusakowskiego.

Rozdział 4 poświęcony jest absorberom wielowarstwowym i wyniki tu opisane zostały wcześniej opublikowane w *Optical and Quantum Electronics* oraz w *Proceedings of SPIE*. W przypadku obu prac pan Marcin Stolarek był drugim autorem. W rozdziale tym znajduje się opis konstrukcji warstw typu PML (*Perfectly Matched Layer*) w postaci wielowarstwy, zbudowanej z periodycznie powtarzających się par warstw o różnych zespolonych współczynnikach załamania. W pierwszej części rozdziału znajduje się opis matematyczny pokazujący zależność efektywnych parametrów takiej wielowarstwy oraz została wyznaczona numerycznie zależność współczynnika odbicia wielowarstwy od wielkości komórki elementarnej oraz od kąta padania fali. Wyniki pokazują, iż możliwe są struktury zapewniające bardzo niewielkie odbicie w szerokim zakresie kątów padania. Dwie kwestie wymagają jednak wyjaśnienia. Dlaczego efektywne przenikalności $\epsilon_{w1}, \epsilon_{w2}$ nie zależą od składowych tensora przenikalności elektrycznej wielowarstwy (związki 4.19 i 4.20) oraz jaka jest interpretacja fizyczna stosunku k_x/k_0 większego od jedności? Ponadto nie zostały zdefiniowane symbole σ_x i ϵ_1 . W drugiej części została zaproponowana realizacja wielowarstwy absorbującej przy wykorzystaniu materiałów występujących w przyrodzie oraz jej spektralna charakterystyka pod względem odbicia i transmisji (rys. 4.12). Zaprezentowane wyniki wydają się być bardzo interesujące, jednak Autor ocenia je sceptycznie podkreślając znaczącą wartość odbicia przy dużych kątach padania. Nie motywuje swych wątpliwości odniesieniem do konkretnych danych opisujących analogiczne struktury o podobnej funkcjonalności.

Rozdział 5 poświęcony jest wykorzystaniu wielowarstw do realizacji nadrozdzielczego pryzmatu oraz analizie wpływu niedokładności wykonania wielowarstw na ich własności optyczne. Wyniki tu prezentowane zostały opublikowane w *Photonics Letters of Poland* (pierwszy autor), *Opto-Electronics Review* (drugi autor), *Proceedings of SPIE* (pierwszy autor), *Proceedings of ICTON* (drugi autor). Autor zaproponował konstrukcję pryzmatu umożliwiającą operację rzutowania obrazu niepodlegającego ograniczeniu dyfrakcyjnemu oraz zaproponował struktury służące do koncentracji promieniowania. W drugiej części rozdziału poświęconej analizie wpływu chropowatości na własności optyczne Autor dokonał przeglądu literaturowego poświęconego tej tematyce i zaprezentował własne obliczenia rozkładu pola optycznego w chropowatych wielowarstwach transmitujących oraz stwierdził, iż chropowatość zdefiniowana jako średnia kwadratowa różnic faktycznej grubości warstwy od grubości średniej (RMS) na poziomie 0.5 nm może uniemożliwić uzyskanie wysokiego współczynnika transmisji. Niestety poza podaną powyższą wartością brak jest analizy pokazującej współczynnik transmisji lub odbicia w funkcji RMS co stanowiłoby cenny wynik dla prób realizacji tego typu struktur.

Autor w całej rozprawie posługuje się formą bezosobową w odniesieniu do opisywanych wyników zarówno swoich jak i innych autorów. Jedyną możliwością uzyskania informacji o faktycznym autorstwie prezentowanych wyników jest równoległa lektura cytowanych publikacji. Jednak nie rozwiązuje to ostatecznie powstałych niejednoznaczności odnośnie autorstwa prezentowanych wyników. Dotyczy to wszystkich prac, w których pan Marcin Stolarek jest jednym z wielu autorów, a w szczególności tych, gdzie nie jest pierwszym autorem. W związku z tym konieczne jest określenie faktycznego autorstwa wszystkich wyników analiz numerycznych prezentowanych w rozprawie.

Poza powyższymi wątpliwościami, pragnę zauważyć, iż praca zredagowana jest dość starannie (za wyjątkiem nielicznych błędów edytorskich lub tak zwanych kalek językowych, które jednak nie utrudniają zrozumienia pracy). Wyniki obliczeń przedstawione są w postaci czytelnych wykresów, w przypadku niektórych wykresów (2.4, 3.5, 3.8, 3.9, 5.5) brak jest precyzyjnych oznaczeń na osiach lub podania skali w jakiej wykres został wykonany. Praca świadczy o wiedzy Autora w dziedzinie nauk fizycznych, a w szczególności w dziedzinie optyki falowej i fizyki stosowanej. Dowodzi ona także biegłości w zakresie metod numerycznych oraz wiedzy matematycznej.

Mając na uwadze wielostronność przeprowadzonych badań teoretycznych jak też ich praktyczną wartość wyrażam przekonanie, że praca mgra Marcina Stolaraka spełnia wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora i wnoszę o dopuszczenie do publicznej obrony.

Tomasz Czyszczanowski
