

2017 -02- 07 *MBi. ul.*

Prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk
Katedra Optyki i Fotoniki
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
wacław.urbańczyk@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Marcina Stolarka pt. „Elementy dyfrakcyjne, refrakcyjne i absorpcyjne oparte na podfalowych periodycznych strukturach metalicznych”

Rozprawa doktorska Pana Marcina Stolarka została wykonana pod kierunkiem dra hab. Rafała Kotyńskiego na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, w zakładzie Optyki Informacyjnej. Badania o charakterze symulacyjnym koncentrują się na właściwościach struktur fotonicznych, zawierających elementy metaliczne (warstwy lub siatki dyfrakcyjne) o podfalowych rozmiarach. Autor wykazał, że struktury tego rodzaju wykazują unikalne właściwości, takie jak asymetryczna transmisja, bezdyfrakcyjna propagacja światła lub idealna absorpcja. Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna. Pojawianie się kryształów fotonicznych było impulsem stymulującym poszukiwania sztucznych materiałów (tzw. metamateriałów) o niezwykłych właściwościach optycznych, umożliwiających na przykład stworzenie płaszcza niewidzialności lub realizację odwzorowania nadrozdzielczego.

Rozprawa doktorska Pana mgra Marcina Stolarka, która wpisuje się w ten aktualny nurt badań, składa się z 5 rozdziałów i podsumowania o łącznej długości 124 stron oraz wyczerpującego spisu referencji (114 pozycji). Autor nie przedstawił oddzielnego wykazu własnych publikacji związanych z tematyką doktoratu. Według Web of Science opublikował dotychczas 4 artykuły z Listy Filadelfijskiej (Optics Letters-1, Optics Express-1, Optoelectronics Review-1, Optical and Quantum Electronics-1) oraz 12 komunikatów w materiałach z konferencji międzynarodowych. W jednym artykule opublikowanym w Optics Letters w 2013 roku, cytowanym już 30 razy, Autor rozprawy pojawia na pierwszym miejscu na liście współautorów.

Rozdział 2. stanowi wprowadzenie w tematykę rozprawy. Przytoczono w nim podstawowe informacje na temat najczęściej stosowanych metod modelowania struktur fotonicznych, takich jak metoda propagacji wiązki, metoda macierzy przejścia oraz metoda różnic skończonych w dziedzinie czasu. Omówiono także warunki brzegowe stosowane w symulacjach elektromagnetycznych, właściwości układów liniowych niezmienniczych ze

względu na przesunięcie, a także przybliżenie ośrodka efektywnego w odniesieniu do struktur warstwowych.

W rozdziale 3. przedstawiono właściwości zaproponowanych przez Autora struktur do zastosowań w obszarze częstości terahercowych. Pierwszym z analizowanych rozwiązań jest antena dla promieniowania THz. Jej kluczowym elementem jest metalowa siatka dyfrakcyjna naniesiona na falowodzie z GaAs, w którym umieszczony jest detektor promieniowania w postaci tranzystora polowego. Wyniki obliczeń numerycznych dla przykładowych struktur pokazują możliwość skutecznego sprzężenia promieniowania THz padającego prostopadłe na siatkę z modami falowodu, a także możliwość koncentracji promieniowania na centralnie umieszczonym detektorze przez siatkę o symetrii cylindrycznej. Autor deklaruje wprowadzić spektralną selektywność anteny, ale rozumiem, że jest ona zapewniona tylko dla normalnego padania. W tej części rozprawy zabrakło mi trochę analizy kątowych właściwości zaproponowanej anteny.

W dalszej części rozdziału 3. analizowane są właściwości transmisyjne podwójnych siatek metalowych. Struktura analizowana przez Autora składa się z dwóch siatek, przy czym druga ma dwukrotnie mniejszy okres niż pierwsza, który ponadto jest mniejszy od długości fali padającego promieniowania. Przeprowadzone symulacje wykazały, że dla odpowiednio dobranych parametrów, taka siatka charakteryzuje się asymetryczną transmisją w zależności od kierunku padania światła. Asymetria przejawia się wysokim współczynnikiem transmisji przy oświetleniu od strony siatki o mniejszym okresie i niskim współczynnikiem transmisji przy oświetleniu od strony przeciwnej. Nie jest to jednak warunek wystarczający na uzyskanie izolatora optycznego, ponieważ w konfiguracji transmisyjnej promieniowanie THz uginane jest w ± 1 rząd dyfrakcji. W końcowej części rozdziału 3. przedstawiono także możliwość wykorzystania podwójnej siatki metalicznej o symetrii cylindrycznej, jako jednokierunkowej soczewki promieniowania THz. Mocną stroną tej części rozprawy jest fakt, że przewidywane numerycznie właściwości transmisyjne podwójnej siatki metalicznej, jak i soczewki dyfrakcyjnej o jednokierunkowej transmisji, zostały potwierdzone eksperymentalnie, a uzyskana zgodność wyników pomiarów i obliczeń jest bardzo dobra.

Rozdział 4. poświęcony jest metamateriałom o budowie warstwowej i zaczyna się od krótkiego wprowadzenia w tematykę warstw przeciwo odbiciowych. W dalszej części objaśnione jest pojęcie warstwy PML, która często stosowana jest w obliczeniach numerycznych, aby zapewnić pełne pochłanianie padającego na nią promieniowania elektromagnetycznego, przy całkowitym braku odbicia. W dalszej części przedstawiona została idea metamateriału absorbującego o charakterystyce PML złożonego z warstw

materiałów o szczególnych właściwościach elektrycznych i magnetycznych, niespotykanych w przyrodzie. Zaproponowana została także możliwość realizacji warstwy PML o gorszych parametrach absorpcyjnych przy pomocy dostępnych materiałów, nieposiadających zysku optycznego oraz właściwości magnetycznych w zakresie światła widzialnego. Chociaż część symulacyjna tej części rozprawy nie budzi żadnych zastrzeżeń, to jednak brakuje mi tu odniesień do praktycznych zastosowań. Nie jest jasne, do jakich celów takie absorbujące warstwy mogłyby być stosowane i czy nie ma prostszych sposobów wytworzenia struktur o podobnych właściwościach. W przypadku zastosowania realnie istniejących materiałów, w proponowanym przez Autora podejściu, wymagane jest wytworzenie wielu par warstw, co wydaje się niełatwe pod względem technologicznym i potencjalnie kosztowne.

Ostatni rozdział poświęcony jest właściwościom metamateriałów złożonych z warstw metaliczno-dielektrycznych, które w pewnym zakresie spektralnym umożliwiają propagację światła bez ograniczeń dyfrakcyjnych. W dalszej części Autor przedstawił budowę i właściwości elementów optycznych wykonanych z warstw metaliczno-dielektrycznych, które umożliwiają koncentrację światła na obszarach o rozmiarach podfalowych oraz realizację operacji geometrycznego rzutowania i obrotu rozkładów pola E-M o podfalowej strukturze. Przeanalizowany został także szczegółowo wpływ nierówności powierzchni warstw otrzymywanych metodą MCVD na właściwości transmisyjne i obrazujące, co pozwala zdefiniować wymagania technologiczne dotyczące jakości warstw. Wnioski wynikające z tej analizy nie są optymistyczne, gdyż w przypadku elementów składających się z kilkunastu warstw odchylenie standardowe od płaskości równe 0.5 nm uniemożliwia uzyskanie wysokiego współczynnika transmisji, a w konsekwencji praktycznego wykorzystania takich elementów.

Rozprawa jest staranie zredagowana, dostrzegłem tylko kilka drobnych błędów i potknięć językowych. Jednak tekst czyta się dość trudno, głównie ze względu na lakoniczną i skrótową argumentację, co jest uciążliwe zwłaszcza w części rozprawy prezentującej wyniki własne. Podam tylko kilka przykładów:

1. W tekście odnoszącym się do rysunku 3.6 Autor odwołuje się do osi z , która nie jest na tym rysunku pokazana, co utrudnia rozumienie tekstu.
2. Wydaje mi się, że Autor nie odwołuje się nigdzie do rysunku 5.3.
3. Na rys. 5.9, a także w tekście, nie objaśniono dla jakiej długości fali przeprowadzono pokazane tam symulacje.

Pomimo powyższych uwag krytycznych moja ogólna ocena pracy jest wysoka. Autor wykazał się dużymi kompetencjami w dziedzinie zaawansowanych symulacji

elektromagnetycznych. Za najważniejsze osiągnięcie Autora należy uznać pokazanie na drodze symulacji numerycznych (potwierdzonych również eksperymentalnie) jednokierunkowej transmisji promieniowania THz przez podwójne siatki metaliczne. Obiecujące są także zaproponowane przez Autora elementy złożone z warstw metaliczno-dielektrycznych do przenoszenia wiązek promieniowania E-M w zakresie widzialnym o podfalowej mikrostrukturze. Ze względu na ograniczenia technologiczne, niektóre z rozważanych w rozprawie struktur nie będą mogły być szybko wytworzone. Jest to jednak specyfika badań symulacyjnych, które często wyprzedzają aktualne możliwości technologiczne.

W podsumowaniu pragnę wyrazić przekonanie, że recenzowana rozprawa zawiera wartościowe wyniki badań i może być podstawą uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych w świetle wymagań formalnych stawianych przez odpowiednie ustawy. Proszę więc Wysoką Radę o dopuszczenie mgra Marcina Stolarka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk

Wrocław, 7 lutego 2017 r.