



Wpłynęło dnia 16 GRU. 2018

Instytut Chemii Fizycznej Polskiej Akademii Nauk

Zakład Chemii Fizycznej Układów
Biologicznych

Kasprzaka 44/52, PL-01 224 Warsaw, Poland

Prof. dr hab. Maciej Wojtkowski

Physical Optics and Biophotonics Group

Email: mwojtkowski@ichf.edu.pl

Tel. +(48 22) 343 3283

+(48 22) 343 20 00

Fax +(48 22) 343 33 33

+(48 22) 632 52 76

E-mail: ichf@ichf.edu.pl

Warszawa, 14 Grudnia 2018

Opinia o pracy doktorskiej pana magistra Łukasza Zinkiewicza

Opiniowana praca doktorska pana magistra Łukasza Zinkiewicza zatytułowana „Dyfrakcja światła w trójwymiarowych strukturach wykonanych za pomocą dwufotonowej fotolitografii laserowej” została wykonana pod promotorską opieką pana dr. hab. Piotra Wasylczyka na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Rozprawa doktorska jest jednolitym dziełem napisanym w języku polskim i zawierającym: streszczenie, spis treści, spis ilustracji, trzy rozdziały, podsumowanie, trzy dodatki oraz bibliografię. Wyniki opisane w rozprawie były również podstawą pięciu publikacji naukowych o zasięgu międzynarodowym, w tym trzy to prace w bardzo dobrych branżowych pismach (Optics Express i Optical Materials) oraz w dwóch publikacjach pokonferencyjnych. Autor szczegółowo opisał wkład współautorów tychże artykułów w przeprowadzone prace badawcze. Istotny jest również fakt, że autor pracy w trakcie studiów doktoranckich brał udział w kilku innych projektach badawczych z zakresu fizyki laserów femtosekundowych oraz fotoniki doświadczalnej w zakresie mikrostruktur optycznych. Wyniki tych działań opisane zostały w 10 dodatkowych publikacjach (8 z listy JCR).

Rozprawa doktorska Pana magistra Łukasza Zinkiewicza ma charakter eksperymentalny z głównym skupieniem uwagi na rozwiązywaniu problemów technicznych w zakresie opisywalnym za pomocą znanych modeli fizycznych. Jest to przykład pracy z zakresu zastosowań optyki. W pracy tej autor umiejętnie łączy aspekt rozszerzenia wiedzy z dziedziny optyki fizycznej z pracami technologicznymi, konstrukcyjnymi oraz modelowaniem numerycznym.

Przedmiot rozprawy doktorskiej związany jest z wytwarzaniem materiałów o unikatowych własnościach optycznych poprzez mikro-fabrykację struktur o rozmiarach zbliżonych do długości fali światła widzialnego z wykorzystaniem fotolitografii trójwymiarowej. W odróżnieniu od znanych dobrze i przyjętych powszechnie w technice metod fotolitograficznych, technika trójwymiarowa wymaga wykorzystania efektu absorpcji dwufotonowej, który umożliwia lokalną polimeryzację żywicy fotorezystu bez akumulacji energii w obszarach poza ogniskiem skanującej wiązki. Technika ta, choć stosunkowo nowa, jest już rozpowszechniona i istnieje możliwość zakupu sprzętu na warunkach komercyjnych. Nadal jednak urządzenia służące do fotolitografii trójwymiarowej mogą być udoskonalone,

czego przykładem jest modyfikacja urządzenia i metody jego pracy przeprowadzona przez opiekuna pracy doktorskiej w układzie pracy mikroskopu immersyjnego.

Tematem przewodnim pracy doktorskiej jest próba odpowiedzi na dwa pytania badawcze:

1. Czy możliwe jest poprawienie jakości transmisyjnych filtrów barwnych poprzez wytwarzanie fazowych siatek dyfrakcyjnych z wykorzystaniem fotolitografii 3-D?
2. Czy można stworzyć pasywny optyczny filtr selektywny dla różnych kierunków padania światła z wykorzystaniem mikrostruktur wytwarzanych przez fotolitografię 3-D?

Te dwa tematy mają duże znaczenie praktyczne ze względu na potencjalne możliwości osiągania znaczących wartości absorpcji przy bardzo małych grubościach filtrów - rzędu kilkunastu mikrometrów. Można sobie wyobrazić bardzo wiele gałęzi współczesnego przemysłu elektronicznego, dla których rozwiązania takie byłyby bardzo atrakcyjne. Tematyka badawcza pracy doktorskiej skonstruowana jest w taki sposób, aby jednocześnie zrozumieć i nabyć umiejętności w dziedzinie fotolitografii 3-D, które są unikatowe i niezbędne do pełnego wykorzystania urządzeń zakupionych przez Instytut Fizyki UW. Z drugiej strony odpowiadają na istotne problemy techniczne poprzez poznanie ograniczeń fizycznych metod wytwarzania struktur aktywnych optycznie.

Pan magister Zinkiewicz w swojej pracy opisał własności dyfrakcyjne siatek fazowych wytworzonych z żywicy polimerowej w dwóch postaciach: równoodległych prostopadłościennych linii oraz cylindrycznych kolumn osadzonych na podłożu szklanym. Z wielką starannością pokazano podstawowe zależności determinujące własności widm transmisji siatek w zerowym rzędzie od geometrii siatek – to jest: grubości, wysokości i odległości pomiędzy liniami czy kolumnami. Zademonstrowano umiejętności wytwarzania siatek o dowolnej barwie. Stworzono analityczny opis matematyczny, który umożliwia zrozumienie roli istotnych parametrów geometrycznych na własności widm. Model ten rozszerzono o symulacje numeryczne odwzorowujące dokładnie wyniki pomiarów i pozwalające na projektowanie struktur o zadanych własnościach. W szczególności analizowano kształt widm pod kątem szerokości pasma transmisji, położenia maksimum transmisji oraz kontrastu widmowego. Analityczny opis zjawiska bazujący na skalarnej teorii dyfrakcji uzupełniono o zjawiska dwójłomności w symulacjach prowadzonych metodą różnic skończonych w domenie czasu (FDTD). Pomiary i symulacje były prowadzone również dla unikatowego układu siatek fazowych w kształcie cylindrycznych kolumn. Otrzymane wyniki eksperymentów, model matematyczny oraz wyniki symulacji nie budzą zastrzeżeń i wyczerpują zagadnienie podjęte w ramach tej pracy.

W kolejnej części przedstawionej pracy doktorskiej pan Zinkiewicz podjął się realizacji oryginalnego pomysłu wytworzenia filtru o asymetrycznej transmisji światła. Urządzenie takie jest pożądane w układach światłowodowych lub konstrukcjach laserowych jako podstawowy element izolatora lub cyrkulatora optycznego. Obecne konstrukcje bazujące na efekcie Faradaya są mało praktyczne ze względu na znaczące rozmiary kryształów oraz magnesów stałych. Oryginalny pomysł pana Zinkiewicza polega na połączeniu filtra interferencyjnego z dyfrakcyjną siatką fazową. Podobnie jak w przypadku filtrów barwnych wykorzystano tutaj obydwie geometrie siatek: równoodległych prostopadłościennych linii oraz cylindrycznych kolumn, obydwu osadzonych na lustrze dielektrycznym. Filtr interferencyjny jest zaprojektowany w taki sposób, aby transmitować światło o zadanej długości fali dla dobrze zdefiniowanego kąta padania, które następnie ulega dyfrakcji na siatce fazowej. W przypadku, gdy kąt padania się zmienia o znaną wartość wówczas większość energii fali elektromagnetycznej zostaje odbita. Zmianę kierunku w drodze powrotnej światła ma zapewnić ta sama struktura fotoniczna, która tworzy siatkę fazową. Wykorzystując narzędzia opracowane przy realizacji pierwszego zadania badawczego zaprojektowano optymalne

parametry takiego układu optycznego, wytworzono go oraz scharakteryzowano jego własności optyczne. Zgodnie z oczekiwaniami, w przypadku struktur o jednokierunkowym rozkładzie ciągłym uzyskano silną zależność własności transmisyjnych i asymetrii kierunkowej od polaryzacji światła padającego. Efekt ten nie występuje w przypadku geometrii kolumnowej. Również w przypadku tego zadania otrzymane wyniki eksperymentów oraz wyniki symulacji nie budzą zastrzeżeń i wyczerpują zagadnienie podjęte w ramach tej pracy

Praca doktorska napisana jest bardzo starannie i przejrzysto. Nie mam zastrzeżeń do strony edytorskiej i zawartości merytorycznej ocenianej pracy. Autor wykazał umiejętność przedstawiania celu pracy i uzyskanych wyników. Wstęp do pracy jest również napisany czytelnie i syntetycznie. Ilustracje i źródła dobrane są prawidłowo umożliwiając czytelnikowi łatwe zrozumienie tematyki podejmowanych prac, oraz stan bieżący badań prowadzonych w tej dziedzinie. W dużej mierze praca ma charakter opisowy – dotyczy to w szczególności rozdziału pierwszego wprowadzającego czytelnika w świat dwufotonowej litografii 3D oraz w części rozdziału 3 opisującego podstawy projektowania lusterek dielektrycznych czy filtrów interferometrycznych. Ze względu na dydaktyczną wartość samej dysertacji oraz aspekt rozwoju pewnych unikatowych umiejętności związanych z wykorzystaniem urządzeń fotolitograficznych opisowe części pracy nabierają dodatkowych walorów i podnoszą jej wartość. Dodatkowym pozytywnym elementem przedstawionej pracy jest dobre zaplanowanie zadań badawczych, dzięki któremu rozdział 2 i 3 stanowią zamkniętą całość a eksperymenty zweryfikowane są przez stosunkowo proste modele i symulacje. Tematyka pracy nie ma charakteru otwartego i nie pozostawia wielu dodatkowych pytań. W każdym z przedstawionych rozdziałów autor bardzo dobrze zdefiniował problemy badawcze jakie rozwiązywał i opisał szczegółowo metodologię oraz wyniki.

Jednym z nieco słabszych fragmentów pracy jest wstęp do rozdziału 3, który wprowadza zamieszanie poznawcze przez próbę nadmiernego uogólnienia zagadnienia asymetrycznej transmisji światła. Celem większości opisywanych we wstępie prac jest uzyskiwanie metamateriałów fotonicznych, których własności pozwalają przesunąć granice kontroli propagującego światła w warunkach niespotykanych (lub spotykanych niezmiernie rzadko) w naturze takich jak na przykład obecność odwróconej dyspersji. Materiały takie mogą mieć potencjalnie nieznane własności i ich rozwój pozwala na lepsze zrozumienie natury światła i granic stosowalności klasycznej optyki falowej. Podczas gdy opracowywana metoda, która jest bardzo ciekawym i oryginalnym rozwiązaniem, działa w pełni w reżimie klasycznym opisywalnym podstawową teorią dyfrakcji - czego dowodzą skutecznie przeprowadzone symulacje.

W pracy brakuje również rozważań i dyskusji związanych z potencjalnym rozwojem lub wykorzystaniem opracowanego urządzenia wykazującego własności asymetrycznej transmisji. Zależność od polaryzacji, która była przedmiotem analiz nie jest aż tak istotnym problemem dla potencjalnego wykorzystania. W bieżącej realizacji trudno jest wykorzystać to rozwiązanie ze względu na straty związane z wsteczną propagacją światła wcześniej ulegającego dyfrakcji przez dyfrakcyjną siatkę fazową. Jednak można sobie wyobrazić pewne alternatywne rozwiązania z niesymetrycznym rozkładem kolumn tworzącym specyficzne siatki o silnej transmisji w jeden z rzędów dyfrakcji. Można też pomyśleć o zastosowaniu kolejnych elementów dyfrakcyjnych, które umożliwiłyby propagację wsteczną.

Kolejnym fragmentem pracy zasługującym na rozwinięcie lub wyjaśnienie jest fragment znajdujący się na stronie 117 i zawierający stwierdzenie: „ (...) struktura była projektowana i wykonana dla polaryzacji prostopadłej.” – nie jest jasne czy autorowi chodziło o orientację linii siatki względem zwierciadła dielektrycznego?

W przypadku pomiaru za pomocą mikroskopii sił atomowych (AFM) nie jest do końca jasne czy rekonstrukcja struktury była precyzyjna i czy wnioskowanie o asymetrii transmisji na jej podstawie jest stosowne – głębokość linii mogła być tak samo zaniżona jak wzajemne odległości pomiędzy liniami na skutek splotu z funkcją rozmycia punktowego AFM-u.

W pracy wyraźny jest wkład pana Zinkiewicza w realizację wszystkich opisywanych zadań. W czasie studiów doktoranckich nabył unikatowe umiejętności w wytwarzaniu struktur aktywnych optycznie za pomocą mikrofotolitografii z wykorzystaniem absorpcji dwufotonowej. Poszerzył on swój warsztat o dogłębnie przeprowadzone prace eksperymentalne poparte analizą teoretyczną. Oryginalnym wkładem autorskim pana Zinkiewicza jest zaproponowana metoda asymetrycznej transmisji światła w układzie zwierciadło dielektryczne – dyfrakcyjna siatka fazowa. Podejmowane prace badawcze mają ograniczony wpływ na dziedzinę ze względu na ogólną dostępność alternatywnych metod uzyskiwania filtrów barwnych lub układów o transmisji asymetrycznej. Jednak jakość przeprowadzonych prac oraz znaczący element oryginalności zdominowały całość pracy i pozwalają uznać przedstawioną pracę jako istotną i wystarczającą do uzyskania stopnia doktora.

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska Pana mgr Łukasza Zinkiewicza w pełni spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Z poważaniem,

