

2018 -12- 14 MBiś.

dr hab. inż. Jarosław Sotor, prof. PWr
Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki
50-370 Wrocław, Wybrzeże Wyspiańskiego 27
tel. 71 320 48 32, fax 71 320 31 89
e-mail: jaroslaw.sotor@pwr.edu.pl

Wrocław 11.12.2018r

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Łukasza Zinkiewicza pt.:

„Dyfrakcja światła w trójwymiarowych strukturach wykonanych za pomocą dwufotonowej fotolitografii laserowej”

Recenzowana prac doktorska mgr. Łukasza Zinkiewicza pt. „Dyfrakcja światła w trójwymiarowych strukturach wykonanych za pomocą dwufotonowej fotolitografii laserowej” została zrealizowana w Pracowni Nanostruktur Fotonicznych Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod promotorską opieką dr. hab. Piotra Wasyleczyka. Przedstawiony interdyscyplinarny program badań można umiejscowić na styku dwóch dyscyplin: fizyki doświadczalnej i nanotechnologii. Formalnie tematyka rozprawy kwalifikuje się do dyscypliny fizyka. W ramach pracy badawczej Doktorant podjął się opracowania struktur dyfrakcyjnych realizujących funkcjonalność filtrów barwnych oraz asymetrycznych filtrów transmisyjnych. Do praktycznej realizacji zaprojektowanych struktur wykorzystał komercyjny system dwufotonowej fotolitografii 3D z szeregiem ulepszeń i modyfikacji opracowanych w Pracowni Nanostruktur Fotonicznych z istotnym udziałem Autora. Należy podkreślić, że podjęta tematyka, opracowane struktury i technologia nie są zagadnieniami czysto akademickimi i mają bardzo duży potencjał przy wytwarzaniu nowych zintegrowanych struktur fotonicznych, optoelektronicznych i mechanicznych dla praktycznych aplikacji. Wykorzystana technologia szybkiego prototypowania struktur fotonicznych wpisuje się w aktualne trendy ukierunkowane na możliwie szybką zmianę geometrii i funkcjonalności wytwarzanych elementów.

Rozprawa liczy 241 strony podzielone na 3 zasadnicze rozdziały, poprzedzone wprowadzeniem i domknięte podsumowaniem oraz 3 dodatki. Całość pracy dopełniają: spis rysunków i tablic oraz licząca 213 pozycje literaturowe bibliografia. Zgodnie z danymi zawartymi w bazie Web of Science doktorant jest współautorem 13 indeksowanych prac (11 prac z listy JCR w czasopismach o uznanej renomie min. Optics Express, Laser Physics Letters, Applied Physics B, w tym 5 prace bezpośrednio związane z tematyką rozprawy, do 3 z nich bezpośrednio Autor odnosi się w treści rozprawy), które były cytowane 31 razy (na dzień 07.12.2018r, 26 cytowań dotyczy prac związanych z rozprawą). Chcę dodatkowo nadmienić, że Pan Łukasz Zinkiewicz wygłosił 9-go kwietnia br. w Politechnice Wrocławskiej seminarium, podczas którego szczegółowo przedstawił wyniki oraz swoje osiągnięcia uzyskane w trakcie realizacji niniejszej pracy doktorskiej.

Jarosław Sotor

Charakterystyka i merytoryczna ocena pracy.

We wprowadzeniu Autor bazując na możliwościach dostępnej w laboratorium aparatury (system dwufotonowej litografii 3D) oraz inspirowany obserwacjami naturalnych nanostruktur fotonicznych oddziałujących z promieniowaniem elektromagnetycznym o długościach fal z zakresu światła widzialnego definiuje cel rozprawy tj. zbadanie możliwości kontroli procesu dyfrakcji poprzez kontrolę wytwarzania nano/mikro-struktur. Stawia dwie tezy:

- Przy pomocy dwufotonowej fotolitografii 3D można wytworzyć fazowe siatki dyfrakcyjne działające jak transmisyjne filtry barwne dla światła widzialnego,
- Zmieniając geometrię struktur, można kontrolować wydajność ugięcia światła w wyższe rzędy i w połączeniu ze stosem ćwierćfalowym skonstruować strukturę o różnej całkowitej transmisji światła dla dwóch przeciwnych kierunków fali padającej.

W tej części rozprawy Doktorant przedstawił również swój bardzo bogaty dorobek naukowy (6 prac z listy JCR) uzyskany w innych projektach realizowanych podczas studiów doktoranckich. Co istotne w sposób precyzyjny określa wkład poszczególnych członków Pracowni Nanostruktur Fotonicznych w wyniki przedstawione w niniejszej rozprawie. Świadczy to o jego dojrzałości naukowej w podejściu do realizacji zespołowych prac eksperymentalnych.

W pierwszym z zasadniczych rozdziałów Autor w zwięzły sposób dokonał przeglądu stanu wiedzy związanego z technologią druku 3D, ze szczególnym uwzględnieniem dwufotonowej fotolitografii laserowej. W instruktażowy sposób przedstawia budowę, standardowe możliwości i parametry systemu Photonic Professional firmy Nanoscribe. Przeprowadza analizę wpływu parametrów systemu na możliwą do uzyskania rozdzielczość druku – rozmiar woksele. Przedstawił tutaj również szereg rozwiązań praktycznych opracowanych w Pracowni Nanostruktur Fotonicznych znacząco rozszerzających standardowe możliwości systemu (np. przyspieszenie druku przez optymalizację kodu, druk wielkopowierzchniowy, druk bez ograniczenia wysokości czy druk na niestandardowych powierzchniach). Sposób przedstawienia tych zagadnień świadczy o bardzo dużej wiedzy eksperckiej Doktoranta w zakresie wytwarzania różnego rodzaju nano/mikrostruktur. Rozdział ten w połączeniu z dodatkiem B (procedury druku na światłowodzie) stanowi świetny materiał dydaktyczny i szkoleniowy dla potencjalnych nowych operatorów tego systemu.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił stosowane rozwiązania filtrów barwnych z zakresu światła widzialnego oraz aktualnie prowadzone prace badawcze nad tego typu strukturami. Zaproponował i praktycznie zrealizował strukturę filtrów barwnych na bazie liniowych siatek dyfrakcyjnych. Zbadał wpływ parametrów geometrycznych opracowanych struktur na ich parametry optyczne z uwzględnieniem polaryzacji fali padającej. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów określił zależności pomiędzy parametrami geometrycznymi filtru a transmitowaną środkową długością fali i kontrastem. Opracowane filtry charakteryzowały się maksymalną transmisją na poziomie 90% i kontrastem 9:1. Dopełnieniem tej części jest opracowany teoretyczny model filtru i symulacje numeryczne proponowanej struktury fotonicznej przeprowadzone z wykorzystaniem metody różnic skończonych. Wyniki obliczeń i symulacje komputerowe w większości analizowanych przypadków bardzo dobrze pokrywają się z danymi eksperymentalnymi. Dla wytworzonej w Pracowni Nanostruktur Fotonicznych kwadratowej siatki dyfrakcyjnej pełniącej rolę filtru barwnego nieczułego na stan polaryzacji światła Autor przeprowadził symulacje numeryczne wykorzystując metodę różnic skończonych.



Uzyskane wyniki są zbieżne z danymi eksperymentalnymi i tłumaczą zasadę działania opracowanej struktury fotonicznej.

W rozdziale trzecim Autor zaproponował strukturę asymetrycznych filtrów barwnych stanowiące połączenie liniowych i kwadratowych siatek dyfrakcyjnych ze stosami ćwierćfalowymi. W sposób analityczny (załącznik A) wyznaczył zależności łączące parametry geometryczne i materiałowe zwierciadeł Bragga z ich charakterystyką transmisyjną. Bazując na tych analizach zaprojektowano dedykowano struktury optyczne, na których wydrukowano liniowe i kwadratowe struktury siatek dyfrakcyjnych. Przeprowadzone prace eksperymentalne potwierdzone symulacjami numerycznymi pokazały, że tego typu struktury pozwalają na uzyskanie asymetrii: na poziomie do ok. 70% zależnej od stanu polaryzacji światła (siatki liniowe) i na poziomie do ok. 50% niezależnej od stanu polaryzacji.

Integralną część rozprawy stanowią 3 załączniki, w których Doktorant zawarł wyprowadzenia najważniejszych zależności opisujących woksel, liniowe siatki dyfrakcyjne oraz właściwości transmisyjne stosu ćwierćfalowego (załącznik A). W formie gotowych procedur udostępnił zdobytą wiedzę ekspercką z zakresu wydruku struktur fotonicznych na światłowodach (załącznik B) oraz zamieścił zwięzłe kompendium odnośnie sposobu widzenia barw przez człowieka (załącznik C). Dodatki te stanowią świetny materiał dydaktyczny i instruktażowy a umieszczenie ich w takiej formie znacząco zwiększyło przejrzystość pracy.

W podsumowaniu Doktorant przedstawił swoje najważniejsze osiągnięcia i nakreślił dalsze plany badawcze bezpośrednio związane z technologią druku 3D z wykorzystaniem układu do dwufotonowej fotolitografii.

Autor dokonał szerokiej analizy źródeł literaturowych, na które składają się 213 pozycje bezpośrednio związane z tematem pracy. Świadczy to o odpowiednio przeprowadzonej analizie stanu wiedzy. Moje zastrzeżenia dotyczą jednak zastosowanego w pracy sposobu odsyłania do poszczególnych pozycji w spisie literatury. Według mnie zastosowanie klasycznych odniesień numerycznych znacząco poprawiłoby czytelność rozprawy i pozwoliłoby na sprawniejsze poruszanie się w tak obszernym spisie. Od strony graficznej praca bez większych zastrzeżeń.

Recenzowana rozprawa ma charakter eksperymentalno-teoretyczny. Należy podkreślić, że opanowana przez Doktoranta technologia fotolitograficznego druku 3D ma bardzo duży potencjał aplikacyjny daleko wykraczający poza struktury fotoniczne zaprezentowane w rozprawie. Próbkę możliwości sytemu przedstawił Autor wraz z pozostałymi członkami Pracowni w pracy Opt. Express 26, 11513-11518 (2018) drukując port światłowodowy z precyzją centrowania rdzenia na poziomie 120 nm. W pracy Doktorant przeprowadził kompleksową analizę teoretyczną i eksperymentalną czterech struktur fotonicznych. Ich zakres świadczy o dogłębnym zrozumieniu tematu i specjalistycznej wiedzy z zakresu ogólnie rozumianej fizyki doświadczalnej. Do najważniejszych oryginalnych osiągnięć Autora zaliczam:

- Opracowanie szeregu procedur technologicznych pozwalających na elastyczny wydruk struktur fotonicznych i mechanicznych z wykorzystaniem dwufotonowej litografii 3D,
- Zaprojektowanie i praktyczna realizacji filtrów barwnych na bazie liniowej siatki dyfrakcyjnej na zakres światła widzialnego,
- Zaprojektowanie i praktyczna realizacja układów fotonicznych charakteryzujących się asymetryczną transmisją światła o asymetrii na poziomie do ok. 70%.

Uznaję, że postawione tezy zostały udowodnione a cel praktyczny został zrealizowany.



Uwagi merytoryczne:

- a) Na str. 37 Doktorant napisał, że „rozmiar woksela może być dowolnie mały, jednak w praktyce moc lasera fluktuuje, a ewentualne zanieczyszczenia żywicy, substratu, i optyki układu oraz gwałtowne zmiany w prędkości druku i znaczna złożoność procesu polimeryzacji uniemożliwiają utwardzanie rezystu z granicznymi wartościami mocy”. Czy eliminacja tych niepożądanych efektów rzeczywiście pozwoliłaby na uzyskanie dowolnie małego woksela? Co stanowi fizyczne ograniczenie rozdzielczości dwufotonowej fotolitografii? Biorąc pod uwagę zastosowane żywice, jaką minimalną rozdzielczość można uzyskać zakładając dowolnie małe ognisko wiązki aktywujące proces polimeryzacji? Czy zmiana żywicy wpłynie na rozdzielczość wydruku? Czy zastosowanie procesów trzypotonowych (np. źródeł laserowych pracujących w zakresie 1150 - 1200 nm – solitony optyczne przesunięte z zakresu 1 μm wykorzystując procesy Ramana) znacząco poprawiłoby rozdzielczość układu dla stosowanych przez Doktoranta żywic?
- b) W rozdziale drugim przeprowadzono proces optymalizacji liniowych i kwadratowych filtrów barwnych określając wpływ parametrów geometrycznych struktury na parametry optyczne filtrów. W mojej ocenie bardzo dobrym dopełnieniem tej części pracy byłoby wydrukowanie struktury o parametrach optycznych zbliżonych do komercyjnie dostępnych filtrów (np. filtru przedstawionego na Rys. 2.1) celem ich bezpośredniego porównania.
- c) Na rys. 2.30 Doktorant przedstawił analizę porównawczą kontrastu filtrów liniowych w funkcji odległości pomiędzy liniami biorąc pod uwagę wyniki pomiarowe, obliczenia analityczne i symulacje numeryczne. Porównanie to wskazuje na znaczną rozbieżność pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a symulacjami. Zadowalającą zbieżność uzyskano dla linii o wysokościach 0,75 μm . Dla pozostałych parametrów h , a w szczególności 1 μm i 1,25 μm trudno o jakieś daleko idące wnioski i powiązanie tej rozbieżności z niedokładnościami wykonania struktur jest mało przekonujące,
- d) Analizując asymetrię struktur wykorzystujących liniowe siatki transmisyjne (wyniki zaprezentowane na rys. 3.20) Doktorant tłumaczy rozbieżność pomiędzy danymi pomiarowymi a obliczeniami numerycznymi niedokładnościami wytworzenia rzeczywistej struktury siatki liniowej. Fakt zaistnienia takiej rozbieżności potwierdza badaniami eksperymentalnymi z wykorzystaniem mikroskopu AFM. Zaskakujące jest, że celem eliminacji tych rozbieżności i weryfikacji wyciągniętych wniosków nie przeprowadził nowych symulacji z rzeczywistymi parametrami wytworzonej struktury. Tym bardziej, że taki zabieg przeprowadził dla struktur wykorzystujących siatki kwadratowe.
- e) Na str. 25 przy opisie systemu laserowego zawarto informację: „....domieszkowane jonami erbu (Er^{2+})...”, powinno być „domieszkowane jonami erbu (Er^{3+})”. W światłowodach domieszkowanych jonami erbu stosuje się jony trójwartościowe,
- f) Na rysunku 2.17 zaprezentowano zdjęcia siatek dyfrakcyjnych dla dwóch sposobów oświetlania próbek. Zabrakło na nim opisu wierszy i kolumn, do których Doktorant odnosi się w tekście opisując uzyskane wyniki. Utrudnia to analizę tej części opisu.
- g) Przedstawione na rys. 2.36 dane pomiarowe i wyniki symulacji numerycznych na dwóch osobnych wykresach utrudnia ich szybkie porównanie. Zasadne było zamieszczenie tych danych na jednym wykresie.

Janusz Sata

- h) Zależności 3.2 na str. 138 w aktualnej formie jest zawsze równa jedności. W mianowniku powinna znaleźć się suma współczynników transmisji o czym Doktorant pisze w tekście odnosząc się do tej zależności. Można więc potraktować to jako oczywisty błąd pisarski.
- i) Doktorant nie ustrzegł się nielicznych potknięć językowych i gramatycznych (np. „...metodą FDTD znaleziono profil..” (str. 150), „Dwa najczęściej spotykane są” (str. 137)). W kilku miejscach w zapisach liczbowych zamiast „0” znaleźć można „o” (np. str. 149).

Powyższe niedociągnięcia nie wpływają jednak na moją ostateczną bardzo wysoką ocenę pracy.

Dodatkowe zagadnienia do dyskusji podczas publicznej obrony:

- a) Z symulacji numerycznych przedstawionych na rys. 2.31 wynika, co również Doktorant podkreślił w przeprowadzonej analizie wyników, że struktury te umożliwiają efektywną dyfrakcję w szerokim zakresie spektralnym. Biorąc pod uwagę parametry systemu fotolitografii laserowej jaką efektywność dyfrakcji przy odpowiednio zoptymalizowanych strukturach można uzyskać? Czy realnym jest wytworzenie siatek dyfrakcyjnych o wysokiej efektywności dyfrakcji np. na potrzeby układów laserowych pracujących w reżimie pasywnej synchronizacji modów?
- b) W badaniach transmisji asymetrycznych struktur fotonicznych wykorzystano impulsy laserowe generowane przez laser z pasywną synchronizacją modów. Czy zaobserwowano optyczną degradację wytworzonych struktur? Czy wykorzystana technologia druku umożliwiłaby wytwarzanie siatek dyfrakcyjnych lub izolatorów optycznych o progu zniszczenia umożliwiającym ich wykorzystanie do budowy femtosekundowych oscylatorów laserowych z zakresu bliskiej i średniej podczerwieni?
- c) Jak Doktorant w rozprawie zaznaczył, opracowane struktury o asymetrycznej transmisji realizują funkcje izolatora optycznego. Czy wg. Autora dalsza optymalizacja procesu daje realną szansę na uzyskanie asymetrii transmisji na poziomie >15 dB? Czy wykorzystanie opracowanej technologii pozwoliłoby na wytworzenie takich struktur na zakres średniej podczerwieni 3-6 μm ?

Należy podkreślić, że prace badawcze przedstawione w niniejszej rozprawie stanowią jedynie część z aktywności naukowych Doktoranta jakimi zajmował się podczas studiów doktoranckich. Z powodzeniem uczestniczył w projektach ukierunkowanych na generację ultrakrótkich impulsów w układach laserów ciała stałego (9 prac w tym 6 z listy JCR). Potwierdza to dodatkowo jego szerokie kompetencje z zakresu fizyki doświadczalnej obejmujące zagadnienia związane z nano/mikro- technologią, techniką laserową oraz obliczeniami numerycznymi.

Podsumowując zatem stwierdzam, że rozprawa doktorska **mgr. Łukasza Zinkiewicza** spełnia warunki stawiane przez *Ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy ze względu na jej bardzo duży wkład w rozwój technologii dwufotonowej fotolitografii laserowej. Dostęp do tego typu technologii w dalszej perspektywie daje możliwości realizacji interdyscyplinarnych prac naukowych na najwyższym poziomie.