



# Uniwersytet Warszawski

## Wydział Fizyki

ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa  
tel.: (022) 55 46 827, fax.: (022) 55 46 882  
e-mail: sekretariat@igf.fuw.edu.pl  
www.igf.fuw.edu.pl

dr hab. Ryszard Buczyński  
[rbuczyns@igf.fuw.edu.pl](mailto:rbuczyns@igf.fuw.edu.pl)  
Tel: 0 22 55 46 857

Warszawa, 26 września 2016

**Recenzja**  
**pracy doktorskiej**  
**"Struktury periodyczne w światłowodach polimerowych"**  
**mgr Dominika Kowala**

Rozprawa doktorska jest poświęcona badaniom metod pozwalających na trwały zapis siatek Bragga i długookresowych w światłowodach polimerowych oraz możliwościom zastosowania ich w układach czujnikowych. Praca obejmuje szeroko zakrojony zakres prac eksperymentalnych obejmujący opracowanie metod zapisu siatek metodami termo-mechanicznymi i optycznymi oraz pomiary stabilności czasowej siatek oraz czułości na temperaturę, wilgotność, ciśnienie hydrostatyczne i inne parametry fizyczne. Praca powstała pod kierunkiem profesora dr hab. Wacława Urbańczyka (promotor) oraz dr inż. Gabrieli Statkiewicz-Barabach (promotor pomocniczy) na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej.

W rozprawie Autor bada zjawiska występujące w światłowodach polimerowych podczas zapisu siatek periodycznych oraz możliwości zastosowania ich w czujnikach ciśnienia, rozciągania, temperatury. W szczególności w pracy przedstawione są nowe wyniki dotyczące metod wytwarzania siatek periodycznych w polimerach domieszkowanych substancjami fotouczulającymi na promieniowanie UV oraz ich stabilności w warunkach rzeczywistych. Wyniki przedstawionych badań mogą mieć istotny wpływ na zastosowanie światłowodów polimerowych z siatkami periodycznymi do monitoringu ludzkiego organizmu, ze względu na biokompatybilność rozważanych materiałów polimerowych.

Praca doktorska pana Dominika Kowala zawiera wyniki opublikowane w latach 2013-15 w 6 artykułach indeksowanych przez Web of Science: 1 w Proc. of SPIE, oraz 5 w wiodących czasopismach z dziedziny optyki znajdujących się na liście filadelfijskiej: Optics Express, Optics

Letters, Applied Optics, Journal of Optics oraz IEEE Photonics Technology Letters. Pan Kowal jest pierwszym autorem w 2 publikacjach. Na szczególną uwagę zasługują w pracy opublikowane w Optics Express w 2013 oraz Optics Letters 2014, które prezentują oryginalne osiągnięcia w zakresie zapisu siatek Bragga z wyższymi rzędami oraz siatek długookresowych metodami optycznymi z wykorzystaniem źródeł UV. Prace te zyskały już duże uznanie środowiska o czym świadczą liczne cytowania obce. Natomiast praca opublikowana w IEEE Photonics Technology Letters w 2013 dotycząca zapisu siatek długookresowych metodą termiczno-mechaniczną jest pierwszą pracą przedstawiającą zastosowanie światłowodów polimerowych z siatkami tego typu do czujników ciśnienia hydrostatycznego.

Praca doktorska pana Dominika Kowala składa się z dwóch części. Pierwsza część składa się z czterech rozdziałów (1-4) i stanowi wprowadzenie merytoryczne do pracy obejmujące stan wiedzy w dziedzinie światłowodów specjalnych, ich zastosowań w czujnikach oraz opis teoretyczny działania światłowodowych struktur periodycznych. Druga część pracy, obejmująca rozdziały 5, 6 oraz wnioski końcowe przedstawia oryginalne wyniki badawcze Autora.

Rozdział 1, który stanowi wstęp do pracy, zawiera opis motywacji podjęcia tematu badawczego, tezę pracy oraz opis jej struktury. Rozdział 2 zawiera wprowadzenie podstawowych pojęć z zakresu optyki światłowodów, opis budowy i właściwości światłowodów mikrostrukturalnych. Jest on w większości poświęcony światłowodom krzemionkowym. Światłowodom polimerowym jest poświęcony tylko krótki podrozdział, który daje syntetyczny przegląd dotychczasowych osiągnięć w tej dziedzinie. Oba rozdziały zawierają odnośniki do aktualnej literatury światowej i pozwalają czytelnikowi na szybkie, choć dość powierzchowne, zapoznanie się aktualnym stanem wiedzy w dziedzinie światłowodów mikrostrukturalnych i polimerowych.

Rozdział 3 przedstawia teoretyczny opis wpływu struktur periodycznych na propagację światła we włóknach optycznych. Autor przedstawia opisy zarówno jakościowy, jak również ilościowy oparty na metodzie modów sprzężonych. Rozdział zawiera także szczegółowy opis matematyczny zaawansowanych siatek periodycznych z apodyzacją, przesunięciem fazowym oraz siatką superstrukturalną. Sposób opisu jest bardzo przystępny, ale równocześnie precyzyjny i świadczy o dogłębnym zrozumieniu tematyki od strony teoretycznej przez Autora.

Rozdział 4 zawiera szczegółową analizę zastosowań siatek Bragga i długookresowych w telekomunikacji, laserach i wzmacniaczach światłowodowych oraz w czujnikach. Szczególnie dokładana i wartościowa jest analiza zastosowań czujnikowych zawierająca liczne odnośniki do materiałów źródłowych. Rozdział ten poświęcony jest w znacznej części zastosowaniom siatek periodycznych we włóknach krzemionkowych, natomiast zastosowania włókien polimerowych z siatkami periodycznymi przedstawiono w rozdziale 4.3.2.

Rozdział 5 przedstawia oryginalne wyniki badań Autora w zakresie zapisu siatek długofalowych.. Autor opracował zapis siatek metodą termiczno-mechaniczną oraz metodą zapisu punktowego przy pomocy lasera UV we włóknach z czystego PMMA oraz włóknach domieszkowanych azobenzenem oraz trans-4-stibenemetanolem. W pracy przedstawiono wyniki przeprowadzonych testów stabilności oraz czułości zapisanych siatek. Do zapisu siatek metodą optyczną zastosowano 2 rodzaje oryginalne opracowanych włókien polimerowych domieszkowanych odpowiednio na poziomie przygotowania preformy (pręty PMMA domieszkowane trans-4-stibenemetanolem) lub przy pomocy dyfuzji azobenzenu do włókien mikrostrukturalnych z czystego PMMA. Autor opracował własny proces dyfuzji zoptymalizowany pod kątem transmitancji włókna i czułości na promieniowanie UV. W rozdziale przedstawiono wyniki badań wskazujące na ograniczone możliwości zapisu siatek długookresowych w światłowodach z czystego PMMA (niska powtarzalność, brak stabilności czasowej) oraz zalety zapisu w PMMA domieszkowanym substancjami zwiększającymi fotoczułość PMMA. Autor wykazał, że metody termiczno-mechaniczna odciskania siatek oraz zapisu UV we włóknie domieszkowanym azobenzenem dają powtarzalne wyniki zapisu siatek oraz stabilne działanie czujników ciśnienia hydrostatycznego oraz rozciągania w pespektywie długookresowej. Autor przeprowadził także szczegółową analizę zjawisk fizycznych i chemicznych, które są odpowiedzialne za trwały zapis siatek w światłowodach metodami optycznymi. Dzięki przeprowadzonej analizie Autor wykazał dominującą rolę naprężeń zamrożonych podczas zapisu siatek długookresowych powstających w polimerze podczas wyciągania włókna.

Rozdział 6 przedstawia oryginalne wyniki Autora dotyczące zapisu siatek Bragga przy pomocy naświetlania włókna laserem UV poprzez maskę fazową. W badaniach wykorzystano zarówno światłowody mikrostrukturalne z czystego PMMA, jak również światłowody klasyczne ze skokowym rdzeniem wykonanym z kopolimeru PMMA/PS. Autor przedstawił wyniki zapisu siatek w obecności wyższych rzędów interferencyjnych otrzymanych poprzez niewyzerowanie wyższych

rzędów ugięcia w siatce fazowej. Dzięki temu otrzymano dodatkowe piki odbiciowe w zapisanej siatce Bragga, które mogą być wykorzystane wieloparametrycznych czujnikach np. ciśnienia, wilgotności i temperatury. Przeprowadzone pomiary siatek wytworzonych w zoptymalizowanych warunkach wykazały ich stabilność czasową. Autor zmierzył także ich czułość temperaturową oraz czułość na zmiany wilgotności.

Moja ogólna ocena rozprawy jest bardzo wysoka. Praca stanowi ważny element aktualnych badań światowych dotyczących zastosowań światłowodów polimerowych w czujnikach biomedycznych. Olbrzymią wartość pracy stanowi opracowanie efektywnych metod trwałego zapisu siatek periodycznych w światłowodach. To osiągnięcie nie jest prostym powtórzeniem wyników znanych ze światłowodów ze szkła nieorganicznych, gdyż ze względu na zupełnie odmienne właściwości fizykochemiczne polimeru w stosunku do szkła nie jest możliwe zastosowanie tych samych mechanizmów odpowiadających za zapis siatek. Ponadto przedstawione wyniki i wnioski opierają się na przeprowadzeniu systematycznych badań na seriach włókien, a nie na studium pojedynczych przypadków co nadaje otrzymanym wynikom olbrzymią wartość praktyczną i jednocześnie wskazuje na nakład pracy Autora.

Na szczególnie wyróżnienie zasługuje systematyczność i szczegółowość prac technologicznych oraz dokładna analiza eksperymentalna wytworzonych siatek periodycznych przeprowadzonych przez Autora. Autor opracował własną technologię wytwarzania siatek periodycznych metodami termo-mechanicznymi i optycznymi opierając się na istniejących publikacjach innych grup. Praca nie stanowi jednak powtórzenia wcześniejszych prac. Autor nie tylko opracował trzy różne technologie wytwarzania siatek periodycznych, ale także przeprowadził czasochłonny proces optymalizacji każdej z nich zmieniając warunki wytwarzania siatek i analizując powtarzalność otrzymywanych wyników przy udziale wielu czynników zewnętrznych w tym temperatury i wilgotności. Autor przeprowadził również pomiary stabilności długoterminowej które są konieczne w przypadku praktycznego zastosowania czujników, a są często pomijane w badaniach naukowych.

Otrzymane wyniki dotyczące prac technologicznych mają bardzo dużą wartość praktyczną i mogą stanowić podstawę do komercjalizacji czujników na światłowodach polimerowych z siatkami periodycznymi. Autor dokonał szczegółowej analizy zalet i wad czujników opartych na włóknach polimerowych z siatkami periodycznymi, przedstawił i wyjaśnił ograniczenia ich praktycznych

zastosowań w zakresie pomiarów dynamicznych oraz wykazał możliwość wykorzystania do pomiarów quasi statycznych.

Rozprawa jest napisana w jasny i precyzyjny sposób, bogato ilustrowana wynikami doświadczalnymi szczególnie w części opisującej wyniki prac wykonanych przez Autora. Jak każda praca zawiera też pewne słabsze fragmenty. W części stanowiącej wprowadzenie do własnych badań, w Rozdziale 2, Autor oszczędnie stosuje odnośniki do materiałów źródłowych, m.in. w przypadku niektórych przytaczanych równań i definicji. W równaniu (2.3) brakuje wyjaśnienia wprowadzonych oznaczeń, które jednak są wyjaśnione w jednym z późniejszych rozdziałów. Opis stanu wiedzy dotyczącej światłowodów polimerowych także pozostawia pewien niedosyt, gdyż jest zbyt ogólny i nie podano informacji o właściwościach optycznych rozważanych materiałów m.in. wykresów tłumienności polistyrenu oraz dyspersji materiałowej PMMA oraz polistyrenu.

W przedstawionej rozprawie brakuje syntetycznego porównania parametrów opracowanej przez Autora technologii zapisu siatek oraz otrzymywanych parametrów siatek z wynikami uprzednio opublikowanymi przez innych autorów. Także na podstawie samego tekstu rozprawy trudno docenić wkład Autora w opracowanie technologii zapisu siatek, gdyż w pracy nie odnosi się bezpośrednio do metod stosowanych przez inne grupy badawcze m.in. z University of Sydney oraz Aston University. W opisie technologii wytwarzania siatek długookresowych metodami termiczno-mechanicznymi w polimerowych włóknach mikrostrukturalnych (rozdział 5.1.) brak jest pogłębionego opisu mechanizmu zapisu siatki. Opis jest poprawny na poziomie ogólnym, ale brak jest pogłębionej analizy jakie zjawiska fizyczne lub chemiczne są odpowiedzialne za zapis siatki np. czy siatka powstaje poprzez deformacje geometryczną rdzenia, deformacje otworów powietrznych w płaszczyźnie fotonicznej czy też zmiany uprządkowania łańcuchów polimerowych. Z przedstawionych wyników wynika, że istnieje optymalny nacisk, który pozwala zapisać trwale siatki o wysokim kontraście, ale nie wyjaśniono dlaczego podane parametry zapisu są optymalne. Należy jednak dodać, że prace dotyczące wytwarzania siatek długookresowych metodami termiczno-mechanicznymi stanowiły tylko niewielki fragment prac badawczych Autora i służyły do porównania względem metod optycznych, które stanowią główną część przeprowadzonych badań. Dla zapisu siatek metodami optycznymi autor przeprowadził pełną analizę zjawisk fizycznych i chemicznych zachodzących we włóknie podczas zapisu siatek i wykazał dominującą rolę naprężeń zamrożonych w polimerze podczas wyciągania włókna podczas zapisu siatek długookresowych.

Powyższe uwagi dotyczą słabszych aspektów przedstawionej pracy, ale nie podważają w żaden sposób mojej bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej jako całości oraz ważnych i oryginalnych osiągnięć badawczych Autora dotyczących opracowania 3 różnych technologii wytwarzania siatek periodycznych oraz analizy możliwości ich praktycznego zastosowania w czujnikach. W całym tekście rozprawy nie zauważyłem poważnych błędów językowych i merytorycznych.

Uzyskane wyniki stanowią istotny krok w rozwoju polimerowych czujników światłowodowych i mogą się znacząco przyczynić do wdrożenia ich do systemów monitoringu organów wewnętrznych człowieka. Ze względu na biokompatybilność jedynie polimerowe elementy optyczne mogą być stosowane jako długoterminowe lub stałe elementy umieszczone wewnątrz organizmu człowieka oraz być stosowane zarówno do celów poznawczych, jak i terapeutycznych.

Mając na uwadze bardzo aktualną tematykę pracy, jej olbrzymi potencjał praktyczny oraz wysoki poziom naukowy rozprawy wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej magistra Dominika Kowala. W szczególności na wyróżnienie zasługują prace nad optymalizacją technologii wytwarzania stabilnych siatek periodycznych metodami optycznymi przy zastosowaniu PMMA domieszkowanego azobenzenem metodami dyfuzyjnymi oraz wieloparametryczna analiza wytworzonych siatek, która miała na celu weryfikację możliwości praktycznego zastosowania włókien polimerowych z zapisanymi siatkami jako czujników biomedycznych.

Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa magistra Dominika Kowala, w świetle artykułu 13. Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, jak również zgodnie z Ustawą z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych ustaw, może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Ryszard Buczyński

