Prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
waclaw.urbanczyk@pwr.edu.pl

Recenzja poprawionej rozprawy doktorskiej mgra Damiana Michalika pt. „Światłowody nanostrukturyzowane ze swobodnie kształtowanym rozkładem współczynnika załamania"

Poprawki wprowadzone przez Autora w nowej wersji rozprawy dotyczyły głównie strony językowej, jakości prezentacji wyników i precyzji naukowej argumentacji. Zawierały także pewne zmiany i uściślenia merytoryczne. Po zapoznaniu się z poprawioną wersją rozprawy, podtrzymuję wysoką ocenę przedstawionych w niej wyników naukowych wyrażoną w opinii z dnia 15 czerwca 2022 roku. Moje krytyczne uwagi zawarte w poprzedniej recenzji dotyczyły głównie jakości prezentacji i języka, a także pewnych aspektów merytorycznych. W poprawianej rozprawie Autor uwzględnił moje uwagi, jednak w stopniu niewystarczającym, aby uznać rozprawę za wyróżniającą. Na przykład, w rozprawie pojawił się wprawdzie sugerowany przeze mnie i powszechnie używany termin „*mod polaryzacyjny*", ale nie zniknął niejasny, choć chyba używany równoważnie, termin „*komponent polaryzacyjny modu*". Stosowanie podwójnego nazewnictwa wprowadza jeszcze większy zamęt i czyni zdania w rodzaju „*...przedstawione wyniki uwzględniają dane oddzielnie dla obu komponentów polaryzacyjnych modu* LP_{01}^{x} *i* LP_{01}^{y}" zupełnie niezrozumiałymi. Ponadto, nie wyjaśniono we właściwy sposób fizycznych podstaw pomiaru dyspersji chromatycznej, wzór 5.9 jest nadal niepoprawny. Komentarz do rysunku 7.6 jest ciągle niezrozumiały. Również komentarz na temat stosowalności całek przykrycia (wzór 4.27) jest błędny. Język rozprawy został częściowo poprawiony, ale wciąż jego precyzja budzi wiele zastrzeżeń. Przytaczam tylko kilka przykładów: „*Ponadto pomiar tej zmiennej obarczony jest stałą, aczkolwiek przy dalszym różniczkowaniu do* $D(\lambda)$ *jest ona zerowana*"; „*...obrót polaryzatora o kąt 45° wprowadza równomiernie mody polaryzacyjne do włókna*"; „*Kalkulacje efektywnego pola modu* A_{eff} *uwzględniały 2 komponenty pola elektrycznego*"; „*W ramach wprowadzonych parametrów zgięć modyfikowana jest odpowiednio stała propagacji o wektor wskazujący na wygięcie i wprowadzany jest alternatywny efektywny współczynnik załamania*".

W podsumowaniu podtrzymuję pozytywną ocenę treści merytorycznych rozprawy. Recenzowana rozprawa zawiera oryginalne wyniki naukowe i może być podstawą uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych w świetle wymagań formalnych stawianych przez odpowiednie ustawy. Wnoszę więc o dopuszczenie mgra Damiana Michalika do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne.

W Urbańczyk

Prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk *Wrocław, 17 kwietnia 2023 r.*

Prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
waclaw.urbanczyk@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Damiana Michalika pt. „Światłowody nanostrukturyzowane ze swobodnie kształtowanym rozkładem współczynnika załamania"

Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Damiana Michalika została wykona pod kierunkiem dra hab. inż. Rafała Kasztelanica, a promotorem pomocniczym była dr inż. Alicja Anuszkiewicz, oboje z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Badania przeprowadzone w ramach rozprawy były finansowane przez Fundację Nauki Polskiej, projekt TEAM TECH/2016-1/1 „Nanostructurized microoptical components – towards new functionalities and applications".

Rozprawa składa się z 10 rozdziałów i wykazu cytowanej literatury (173 pozycje) o łącznej długości 146 stron. W rozdziale 1.4 Autor przedstawił spis własnych publikacji, który składa się z 7 współautorskich artykułów w czasopismach z Listy Filadelfijskiej o wysokim *impact factor* (Opt. Lett., J. Lightwave Tech.-2, Opt. Express-2, JOSA B-2), przy czym tylko cztery z nich wiążą się bezpośrednio z tematyką rozprawy (nie zaznaczono które). W trzech artykułach Autor rozprawy pojawia się na pierwszym miejscu na liście współautorów.

Pięć pierwszych rozdziałów o łącznej długości ponad 60. stron stanowi wprowadzenie w tematykę rozprawy. Przedstawiono w nich podstawowe informacje dotyczące liniowych właściwości światłowodów, metod nanostrukturyzacji, numerycznych metod symulacji liniowych parametrów światłowodów oraz metod pomiaru ich podstawowych parametrów. Z wyjątkiem rozdziału dotyczącego technologii nanostrukturyzacji, który przedstawia oryginalny dorobek zespołu związany z rozwojem tej technologii, pozostałe rozdziały zawierają informacje podręcznikowe i moim zdaniem niepotrzebnie w tak szerokim zakresie zostały włączone do rozprawy. Potwierdzają wprawdzie specjalistyczną wiedzę Autora w obszarze tematyki światłowodowej, z drugiej jednak strony zawierają sporo błędów i nieścisłości (na przykład: na rys.2.2b oś pionowa jest błędnie opisana, wzór 2.30 jest błędny, komentarz do wzoru 4.27 dotyczący wymaganego perfekcyjnego ustawienia rdzeni jest mylący). Ponadto, niewłaściwie wyjaśniono fizyczne podstawy pomiaru dyspersji chromatycznej: we wzorze 5.7 OPD jest wyrażone poprzez fazowy współczynnik załamania (nie wyjaśniono pojawiających się w nim symboli), a we wzorze 5.9 poprzez grupowy współczynnik załamania - dlaczego?). Nie da się wyznaczyć bezwzględnej wartości

grupowego współczynnika załamania opisaną metodą, co błędnie sugeruje wzór 5.9 i komentarz pod nim. Strona językowa rozprawy pozostawia wiele do życzenia. W rozdziałach wprowadzających znalazłem liczne potknięcia i niezręczności językowe. Cytuję tylko kilka wybranych przykładów: *w ramach pomiarów eksperymentalnych; odchylenia od założonych ustaleń; oba włókna podlegały badaniom optycznych właściwości liniowych; budowa geometrii włókna; implementacja szkieł krzemionkowych; ale tego typu światłowody nie są przedmiotem w ramach tej rozprawy.*

W rozdziałach 6-9 przedstawiono oryginalne wyniki badań Autora wskazujące na możliwość swobodnego kształtowania parametrów transmisyjnych światłowodów poprzez nanostrukturyzację. Zaproponowano cztery konstrukcje światłowodów charakteryzujące się odpowiednio płaskim przebiegiem normalnej dyspersji w szerokim zakresie spektralnym, dwójłomnością wywołaną anizotropią strukturyzowanego rdzenia o standardowych i dużych rozmiarach oraz nanostrukturyzowany światłowód kilkumodowy o zminimalizowanych przesłuchach międzymodowych. Opracowane konstrukcje światłowodów wykorzystywały materiały stosowane do wytwarzania niskostratnych światłowodów telekomunikacyjnych (szkło krzemionkowe domieszkowane tlenkiem germanu lub fluorem) i nie zawierały kanałów powietrznych, co zapewnia ich kompatybilność z dotychczas stosowanymi standardowymi światłowodami telekomunikacyjnymi. Wszystkie cztery konstrukcje włókien zostały zoptymalizowane i przebadane numerycznie, a dwie z nich wytworzone i przebadane eksperymentalnie. Badania symulacyjne prowadzono przy założeniu, że maksymalna koncentracja domieszki nie może przekraczać 20 %mol, co jest trochę niezrozumiałe, gdyż wiadomo, że istnieją komercyjnie dostępne włókna o niemal dwukrotnie wyższym poziomie domieszkowania GeO_2 (UHNA4 - Nufern Ultra-High NA).

Światłowód, którego projekt przedstawiono w rozdziale 6., charakteryzuje się płaską dyspersją normalną o wartości około -37 ps/km/nm w zakresie spektralnym od 1,3 do 2,15 μm. Takie właściwości uzyskano poprzez zastosowanie wokół rdzenia pierścieniowo ułożonych inkluzji domieszkowanych GeO_2 o rozmiarach około 1 μm. Pokazano, że kolejne pierścienie modyfikują przebieg dyspersji dla coraz większych długości fali, co umożliwia niemal swobodne jej kształtowanie. Zoptymalizowany światłowód został następnie wytworzony, jednak z zastosowaniem mniejszego poziomu domieszki GeO_2 niż przewidywał projekt oraz przebadany eksperymentalnie pod względem modowości, strat i przebiegu dyspersji chromatycznej. Wyniki eksperymentalne generalnie potwierdziły przewidywane właściwości światłowodu, jednak ujawniły także pewne problemy związane z wielomodową propagacją sięgającą do 1,7 μm. Zaproponowana przez Autora konstrukcja włókna ma

potencjał aplikacyjny i po dopracowaniu może znaleźć zastosowania w optyce nieliniowej, laserach i do kompensacji dyspersji w systemach telekomunikacyjnych. Pewien niedosyt budzi brak analizy efektów zgięciowych, w szczególności strat zgięciowych, które mogą okazać się ograniczające. Ciekaw jestem także z jakiego powodu plateau dyspersji zaprojektowano na poziomie -37 ps/km/nm ?

Kolejny nanostrukturyzowany światłowód przedstawiono w rozdziale 7. Jest to włókno utrzymujące polaryzację z rdzeniem o anizotropii wymuszonej warstwową nanostrukturyzacją, w założeniach kompatybilne z telekomunikacyjnym włóknem SMF-28. Zoptymalizowano numerycznie dwie konstrukcje takiego włókna. Typ 1 charakteryzował się jednomodową propagacją w trzecim oknie transmisyjnym, dwójłomnością fazową rzędu $1{,}2\times10^{-4}$ oraz stratami na spawie z włóknem SMF-28 rzędu -0,38 dB. Włókno typu II było kilkumodowe w trzecim oknie transmisyjnym, ale wykazywało większą dwójłomność ($1{,}42\times10^{-4}$) i mniejsze straty na spawie z SMF-28 (-0,1 dB). Wytworzone włókno charakteryzowało się mniejszym poziomem domieszki GeO_2 (8,17 %mol) niż projekt (14 %mol), przez co wykazywało stosunkowo niewielką dwójłomność rzędu 3×10^{-5} dla długości fali 1550 nm. Systematyczne badania eksperymentalne prototypu włókna potwierdziły wstępne założenia, w tym zadowalający PER (jednak nie wiadomo dla jakiej długości włókna zmierzony), a także niewielkie straty zgięciowe oraz straty na spawach z SMF-28. Ten wątek rozprawy uważam za najbardziej wartościowy, gdyż składa się na niego pełny cykl badań obejmujący koncepcję i projekt włókna, jego numeryczną optymalizację, wytworzenie oraz charakteryzację prototypu włókna potwierdzającą wstępne założenia projektu. Zaproponowana konstrukcja włókna ze strukturalną anizotropią rdzenia charakteryzuje się bardzo dobrymi parametrami i może znaleźć praktyczne zastosowania w czujnikach światłowodowych, laserach i optyce nieliniowej.

Jedyne zastrzeżenie związane z tą częścią rozprawy (oprócz jakości języka) dotyczy wyników obliczeń pokazanych na rysunku 7.6 i sugestii, że straty na spawie zależą od kierunku transmisji. Całka przykrycia (wzór 4.27) nie zależy od kierunku przejścia światła, zatem moim zdaniem, pokazane na rysunku 7.6 różnice strat spowodowane są niedokładnością obliczeń numerycznych, a nie realnym efektem fizycznym.

W rozdziale 8. pokazano na drodze numerycznych symulacji możliwość uzyskania włókien utrzymujących polaryzację ze strukturalną anizotropią rdzenia o dużej średnicy, sięgającej 40 μm. Rozważano różne kompozycje materiałowe bazujące na SiO_2, GeO_2 i F. Istotnym wynikiem tej części rozprawy jest wykazanie, że poprzez odpowiedni dobór składu szkieł oraz geometrii włókna, można uzyskać dwójłomność fazową przekraczającą 1×10^{-4} , co

zapewnia dobrą separację modów polaryzacyjnych, i jednocześnie jednomodowość w trzecim oknie transmisyjnym. Warto podkreślić także, że zaproponowane rozwiązanie umożliwia powiększanie rozmiarów rdzenia przy zachowaniu dużej dwójłomności, bez konieczności zwiększania zewnętrznych wymiarów światłowodu, co gwarantuje kompatybilność z tradycyjnymi światłowodami.

W rozdziale 9. przedstawiono autorską metodę oraz wyniki optymalizacji nanostrukturyzowanego włókna kilkumodowego do zastosowań komunikacyjnych z wykorzystaniem multipleksacji przestrzennej. Optymalizacja polegała na modyfikacji gęstości ułożenia nanoprętów domieszkowanych GeO_2 w rdzeniu, w celu zmaksymalizowania różnicy efektywnych współczynników załamania dla pierwszych czterech modów LP (LP_{01}, LP_{11}, LP_{21}, LP_{02}). Uzyskano rekordową separację modów pod względem efektywnego współczynnika załamania ($1{,}9\times10^{-3}$), co jest związane z unikalną cechą nanostrukturyzacji, która w przeciwieństwie do MCVD, umożliwia wytworzenie struktur bez symetrii cylindrycznej. Z drugiej strony, brak symetrii rdzenia skutkował niesymetryczną strukturą niektórych modów, szczególnie widoczną dla większych koncentracji GeO_2 w nanoprętach. Być może ten problem udałoby się rozwiązać poprzez wymuszenie czterokrotnej symetrii rdzenia w procesie optymalizacji.

Moja merytoryczna ocena rozprawy jest bardzo wysoka. Tematyka rozprawy lokuje się w obszarze nanotechnologii, w tym przypadku stosowanej w celu uzyskania nowych, nieosiągalnych wcześniej funkcjonalności światłowodów specjalnych poprzez nanostrukturyzację rdzenia i/lub płaszcza. W ramach rozprawy przeprowadzono badania symulacyjne umożliwiające wybór optymalnych i realistycznych pod względem technologicznym konstrukcji nanostrukturyzowanych światłowodów różnych typów. Niektóre z nich zostały następnie wytworzone i przebadane eksperymentalnie, co potwierdziło przewidywania symulacyjnie, a przez to także możliwości stosowania nanostrukturyzacji do swobodnego kształtowania istotnych parametrów światłowodów, takich jak przebieg dyspersji chromatycznej, dwójłomności, pola modu lub kilkumodowej propagacji bez sprzężeń między modami przestrzennymi. Autor wykazał się dużą wiedzą w zakresie optyki światłowodów, a także kreatywnością w formułowaniu i rozwiązywaniu problemów naukowych. Uzyskane wyniki stanowią istotny wkład w rozwój nowej techniki wytwarzania światłowodów poprzez nanostrukturyzację. Zaproponowane i przebadane konstrukcje światłowodów są oryginalne i mają perspektywy aplikacyjne, o czym pośrednio świadczy także liczba i jakość publikacji naukowych powstałych w ramach rozprawy.

Przed wnioskiem o wyróżnienie powstrzymuje mnie jednak strona redakcyjna. Liczba błędów i potknięć językowych znacząco przekracza akceptowalny poziom. Ponadto, w niektórych przypadkach stosowana terminologia odbiega od przyjętych standardów i jest przez to myląca. Na przykład Autor używa konsekwentnie w całej rozprawie terminu „komponenty polaryzacyjne modu" w znaczeniu „modów polaryzacyjnych" (ang. *polarization modes*). Powszechnie stosowany termin „mod polaryzacyjny" pojawia się tylko jeden raz w Tabelce 7.3. Krytyczne uwagi dotyczące głownie aspektów redakcyjnych nie podważają jednak wysokiego poziomu merytorycznego pracy.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa zawiera oryginalne wyniki naukowe i może być podstawą uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych w świetle wymagań formalnych stawianych przez odpowiednie ustawy. Wnoszę więc o dopuszczenie mgra Damiana Michalika do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne.

Prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk

Wrocław, 15 czerwca 2022 r.