

Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński
Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
tel. 22 234 5689.
e-mail: tomasz.wolinski@pw.edu.pl

Warszawa, 25.04 2023 r.

Opinia dot. poprawionej rozprawy doktorskiej pt.:
“Światłowody nanostrukturyzowane ze swobodnie kształtowanym rozkładem współczynnika załamania” mgr. inż. Damiana Michalika

Podtrzymuję moją pozytywną opinię dot. rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Michalika, pt.: *“Światłowody nanostrukturyzowane ze swobodnie kształtowanym rozkładem współczynnika załamania”* wykonanej pod kierunkiem dr. hab. inż. Rafała Kasztelanica w Zakładzie Fotoniki Instytutu Geofizyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, w której promotorem pomocniczym rozprawy była dr hab. inż. Alicja Anuszkiewicz.

Większość podniesionych przeze mnie uwag i zarzutów została uwzględniona w przedstawionej mi do zaopiniowania poprawiczej rozprawie doktorskiej wydanej w 2023 r.

Stwierdzam więc, iż zgodnie z obowiązującą ustawą „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. Ustaw z dn. 20.01.2020 r. poz. 85) recenzowana rozprawa doktorska **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, a przez to może stanowić podstawę uzyskania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Damiana Michalika do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z uwagi na znaczącą rangę przedstawionego w rozprawie osiągnięcia naukowego, którego najważniejsze tezy zostały zawarte w postaci 4 pracach bezpośrednio związanych z rozprawą doktorską i opublikowanych w prestiżowych czasopismach optyczno-fotonicznych z dominującym wkładem Doktoranta w ich powstanie, a w szczególności za analizę teoretyczną i badania eksperymentalne właściwości polaryzacyjnych nowego typu nanostrukturalnych światłowodów dwójłomnych, stawiam wniosek o **wyróżnienie** rozprawy doktorskiej Damiana Michalika.



Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński
Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
Koszykowa 75, 00-662 Warszawa
tel. 22 234 5689.
e-mail: tomasz.wolinski@pw.edu.pl

Warszawa, 10.06 2022 r.

Ocena rozprawy doktorskiej pt.:
“Światłowody nanostrukturyzowane ze swobodnie kształtowanym rozkładem współczynnika załamania” mgr. inż. Damiana Michalika

Rozprawa doktorska mgr. inż. Damiana Michalika, pt.: *“Światłowody nanostrukturyzowane ze swobodnie kształtowanym rozkładem współczynnika załamania”* została wykonana pod kierunkiem dr. hab. inż. Rafała Kasztelanica w Zakładzie Fotoniki Instytutu Geofizyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego (UW). Promotorem pomocniczym rozprawy była dr inż. Alicja Anuszkiewicz z Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej (PW). Damian Michalik, doktorant Wydziału Fizyki UW ukończył studia inżynierskie na kierunku *Fizyka techniczna* na Wydziale Fizyki PW oraz anglojęzyczne magisterskie na kierunku *Photonics* również na Wydziale Fizyki PW.

Recenzowana rozprawa doktorska z zakresu optyki światłowodowej dotyczy zagadnienia swobodnego modyfikowania rozkładu współczynnika załamania w światłowodach cylindrycznych wykorzystując koncepcję nanostrukturyzacji włókna optycznego.

Głównym celem sformułowanym przez Autora rozprawy było rozszerzenie potencjału aplikacyjnego możliwości swobodnego modyfikowania rozkładu współczynnika załamania w światłowodach nanostrukturyzowanych. Istotą nanostrukturyzacji jest zaprojektowanie i wytworzenie światłowodu o ściśle określonym rozkładzie współczynnika załamania. W procesie wytwarzania światłowodu wykorzystywane są właściwości efektywne materiału złożonego z co najmniej dwóch dopasowanych termicznie rodzajów szkła. W ten sposób możliwe jest wytwarzanie wysokiej jakości całkowicie szklanych światłowodów optycznych o ściśle zaprojektowanych właściwościach pod kątem zastosowań zarówno w układach telekomunikacyjnych i laserowych jak i systemach pomiarowych i aplikacjach biomedycznych

Tematyka rozprawy doktorskiej Damiana Michalika jest nowatorska, jako że dotyczy całkowicie nowej klasy światłowodów optycznych, a jednocześnie uzyskane przez Doktoranta wyniki zawierają w sobie duży potencjał aplikacyjny ukierunkowany głównie na sektor telekomunikacyjny.

Rozprawa doktorska pana Damiana Michalika ma charakter zarówno teoretyczny jak i eksperymentalny i obejmuje zarówno symulacje numeryczne prowadzące do optymalizacji wybranych właściwości nanostrukturyzowanych włókien światłowodowych tj. dyspersja chromatyczna i dwójłomność jak również wyniki badań eksperymentalnych dotyczących właściwości wybranych realizacji światłowodów nanostrukturyzowanych: tj. hybrydowego,

utrzymującego polaryzację kompatybilnego z typowym światłowodem telekomunikacyjnym SMF-28, światłowodu utrzymującego polaryzację o dużym polu modowym oraz światłowodu kilkumodowego o słabym sprzężeniu.

Recenzowana rozprawa wpisuje się w kompleksowe badania nanostrukturyzowanych światłowodów specjalnych prowadzone w ramach projektu TEAM TECH „*Nanostructured microoptical components - towards new functionalities and applications*” kierowanego przez prof. Ryszarda Buczyńskiego i jest owocem wieloletniej współpracy zespołów zlokalizowanych zarówno w Zakładzie Fotoniki Instytutu Geofizyki UW jak i w Zakładzie Szkół Instytutu Mikroelektroniki i Fotoniki Sieci Łukasiewicz.

Według bazy *Web of Science* pan Damian Michalik jest współautorem 7. prac z listy JCR, z których 6 prac opublikowanych w latach 2018-2022 jest bezpośrednio związana z tematyką rozprawy doktorskiej. Należy nadmienić, że w 3 pracach Doktorant był pierwszym (wiodącym) autorem:

1. M. Franczyk, K. Stawicki, J. Lisowska, **D. Michalik**, A. Filipkowski, R. Buczyński, „Numerical studies on large-mode area fibers with nanostructured core for fiber lasers,” *J. Lightwave Tech.* 36, 5334-5343 (2018).
2. **D. Michalik**, T. Stefaniuk, R. Buczyński, „Dispersion management in hybrid optical fibers,” *J. Lightwave Tech.* 38, 1427-1434 (2019).
3. M. Franczyk, D. Pysz, P. Pucko, **D. Michalik**, M. Biduś, M. Dłubek, R. Buczyński, „Yb³⁺ doped silica nanostructured core fiber laser,” *Opt. Exp.* 27, 35108-35119 (2019).
4. **D. Michalik**, T. Stefaniuk, R. Kasztelaniec, R. Buczyński, „Polarization-maintaining optical fiber with an anisotropic core compatible with the SMF-28 standard,” *JOSA B* 37, 1722-1728 (2020).
5. **D. Michalik**, A. Anuszkiewicz, R. Buczyński, R. Kasztelaniec, „Toward highly birefringent silica Large Mode Area optical fibers with anisotropic core,” *Opt. Exp.* 29, 22883-22899 (2021).
6. A. Anuszkiewicz, M. Bouet, **D. Michalik**, G. Stępniewski, R. Kasztelaniec, A. Filipkowski, D. Pysz, A. Cassez, M. Klimczak, G. Bouwmans, A. Mussot, R. Buczyński, „All solid polarization maintaining silica fiber with birefringence induced by anisotropic metaglass,” *Opt. Lett.* 47 (2), 401-404 (2022).

Wszystkie te prace opublikowane zostały w najbardziej prestiżowych pismach wydawanych przez OPTICA (d. OSA) okresie kilku lat ostatnich i uzyskały już (stan z dnia 31.05.2022) 23 cytowania (wg bazy WoS), a sumaryczny współczynnik wpływu tych prac (IF) wynosi ponad 20. Świadczy bardzo dobrze o aktualności i rozpoznawalności w świecie tematyki badawczej.

Rozprawa składa się z dziesięciu rozdziałów, spisu stosowanych w pracy symboli i akronimów oraz spisu literatury, który obejmuje 173 pozycje bibliograficzne i zawiera łącznie 142 strony. Pierwsze nienumerowane strony pracy zawierają streszczenie w języku polskim i angielskim oraz spis treści.

We wstępie (Rozdział 1.) Damian Michalik omawia kamienie milowe rozwoju technologii światłowodowych poczynając od demonstracji Colladona w 1841 r. wieku aż do współczesnych światłowodów fotonicznych, mikrostrukturalnych i nanostrukturyzowanych, w których istnieje możliwość swobodnego kształtowania rozkładu współczynnika załamania. Doktorant formułuje główny cel rozprawy, którym jest „**zbadanie możliwości wykorzystania koncepcji nanostrukturyzacji do poprawy wybranych właściwości włókien światłowodowych**” oraz przedstawia pięć rozbudowanych tez pracy:

- *Teza 1: Metoda nanostrukturyzacji pozwala na swobodne kształtowanie właściwości optycznych światłowodów krzemionkowych, zgodnie z założeniem free-form optics.*
- *Teza 2: Dodanie strukturyzacji wokół rdzenia umożliwia otrzymanie płaskiej dyspersji chromatycznej światłowodu krzemionkowego w zakresie bliskiej podczerwieni.*
- *Teza 3: Nanostrukturyzacja pozwala na uzyskanie włókna kompatybilnego z SMF-28 utrzymującego polaryzację dzięki anizotropii samego rdzenia.*
- *Teza 4: Nanostrukturyzacja pozwala na uzyskanie włókien krzemionkowych o dużym polu modowym utrzymujących polaryzację bez naprężających stref płaszczowych.*
- *Teza 5: Optymalizacja rozkładu nanostruktury dwuszkłanej umożliwia separację stałych propagacji modów w światłowodzie kilkumodowym szklanego światłowodu dwurdzeniowego wytworzonego ze szkła miękkich powodując poprawę warunków przełączania w szerokim zakresie spektralnym (przy pompowaniu falami o długościach 1560 nm oraz 1700 nm).*

Rozdział 1. zamyka wykaz wszystkich 7 publikacji oraz 14 wystąpień konferencyjnych autora rozprawy. Kolejne cztery rozdziały zawierają wprowadzenie do zasadniczej części rozprawy i poświęcone są właściwościom liniowym i aktualnemu stanowi badań światłowodów krzemionkowych (Rozdział 2.), technologii wytwarzania włókien nanostrukturyzowanych (Rozdział 3), narzędziom numerycznych do optymalizacji światłowodów nanostrukturyzowanych ze swobodnie kształtowanym rozkładem współczynnika załamania, (Rozdział 4.) oraz metodyce badań eksperymentalnych wykorzystanych w niniejszej pracy (Rozdział 5). Wprowadzenie modów liniowo spolaryzowanych LP w rozdziale 2. (str. 16) milcząco pomija założenia teorii przybliżenia słabego prowadzenia, a warto byłoby poświęcić temu zagadnieniu przynajmniej parę zdań.

Zasadnicza część rozprawy zawarta jest w rozdziałach od 6. do 9. i prezentuje oryginalne wyniki badań dotyczące poszczególnych typów nanostrukturyzowanych światłowodów: hybrydowego, utrzymującego polaryzację i kompatybilnego z SMF-28, utrzymującego polaryzację o dużym polu modowym oraz słabo sprzężonego włókna kilkumodowego, które mają doprowadzić do udowodnienia rozbudowanej tezy rozprawy.

Rozdziały 1-5 zawierają łącznie 64 strony, natomiast objętość głównej części rozprawy (Rozdziały 6-9) jest niewiele większa (68 strony). W opinii recenzenta część wstępna - z natury swojej pomocnicza - powinna być bardziej ograniczona w stosunku do oryginalnej części rozprawy.

W Rozdziale 6. zostało zaproponowane i wytworzone włókno hybrydowe umożliwiające swobodne kształtowanie dyspersji chromatycznej w światłowodzie całkowicie szklanym, który

z łatwością może być integrowany z systemami telekomunikacyjnymi. Doktorant przedstawił analizę numeryczną mechanizmu kształtowania dyspersji w celu uzyskania optymalnej struktury umożliwiającej osiągnięcie płaskiej dyspersji w bardzo szerokim zakresie spektralnym. Taka struktura została wytworzona w Instytucie Mikroelektroniki i Fotoniki a następnie zweryfikowana eksperymentalnie. Warto podkreślić benedyktyńską cierpliwość zespołu technologów w układaniu w kołowy rdzeń z trzema otaczającymi pierścieniami 3445 prętów z czystej krzemionki i 336 prętów domieszkowanych germanem w celu wykonania preformy. Wyniki eksperymentalne wytworzonego włókna potwierdziły przedział płaskiej charakterystyki dyspersji chromatycznej w zakresie widmowym od 1,09 μm do 1,38 μm , pomimo problemów z dostępem do odpowiednio domieszkowanych germanem szkieł krzemionkowych. W rozdziale tym brakuje odniesienia do Rys. 6.18.

Najciekawsze i oryginalne wyniki badawcze bazujące na bardzo dobrych publikacjach Doktoranta (nr 4 i nr 5) prezentuje Rozdział 7., w którym opisano projekt i wytworzenie światłowodu o wysokiej dwójłomności składającego się z tzw. warstw podfałowych. Jest to ciekawy przykład światłowodu dwójłomnego a jednocześnie pierwsza próba zaprojektowania włókna o sztucznej anizotropii profilu współczynnika załamania rdzenia. W porównaniu do poprzednich rozwiązań stosowanych we włóknach dwójłomnych, całkowicie szklana struktura bazuje na domieszkowaniu kolejnych warstw dwutlenkiem germanu, a optymalizacja oparta jest zarówno na osiągnięciu wysokiej dwójłomności jak i jednomodowej propagacji oraz na efektywnym dwukierunkowym połączeniu ze typowym światłowodem telekomunikacyjnym SMF-28. Wytworzone nanostrukturalne włókno dwójłomne (ZEBRA) zostało przez Doktoranta scharakteryzowane pod względem parametrów metrologicznych i okazało się niezwykle interesujące do wykorzystania w szerokiej gamie aplikacji typu sprzęgacze polaryzacyjne, kompensatory PMD, czy depolaryzatory w żyroskopach światłowodowych. Okazało się, że właściwości światłowodu ZEBRA w wielu przypadkach są bardziej korzystne niż komercyjnie dostępne światłowody dwójłomne PANDA oraz typu *bow-tie* czy włókna o rdzeniu eliptycznym.

Rozdział 8. przedstawia wyniki analiz teoretycznych i symulacji numerycznych dotyczących wytworzenia krzemionkowego światłowodu utrzymującego polaryzację o dużym polu modowym. Dwójłomność włókna uzyskano dla pasma telekomunikacyjnego C wskutek wewnętrznej nanostruktury anizotropowej w rdzeniu bez zewnętrznych stref naprężeniowych w płaszczu. Analizy te zostały potwierdzone eksperymentalnie w pracy w *Optics Letters* z 2022 (nr 6), która ukazała się po złożeniu niniejszej rozprawy.

Rozdział 9. przedstawia koncepcję wielomodowego światłowodu nanostrukturyzowanego ograniczonego do pierwszych 4 modów LP. Rozdział 10. podsumowuje najważniejsze wyniki rozprawy z punktu widzenia weryfikacji 5-członowej rozbudowanej tezy.

Spis literatury obejmujący 173 pozycje jest na ogół prawidłowo zestawiony. Z bogatego wykazu prac dotyczących zjawisk polaryzacyjnych w światłowodach zabrakło pracy przeglądowej w *Progress in Optics* pt. „*Polarimetric optical fibers and sensors*” (vol. XL, 1-75, 2000) tym bardziej, że Doktorant podczas studiów na Wydziale Fizyki PW miał okazję zapoznać się z tą pracą.

Przedstawione powyżej uwagi i zastrzeżenia nie wpływają na wysoką ocenę recenzowanej rozprawy. Doktorant ze starannością opisuje wszystkie procedury numeryczne, technologiczne i eksperymentalne oraz wnikliwie analizuje otrzymane wyniki, krytycznie analizując rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a analizami teoretycznymi. Świadczy to o poprawności i rzetelności warsztatu badawczego, a jednocześnie o sumienności i skrupulatności w badaniach eksperymentalnych i symulacjach numerycznych.

W związku z powyższym stwierdzam, iż zgodnie z obowiązującą ustawą „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (Dz. Ustaw z dn. 20.01.2020 r. poz. 85) recenzowana rozprawa doktorska **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, a przez to może stanowić podstawę uzyskania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr. inż. Damiana Michalika do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z uwagi na znaczącą rangę przedstawionego w rozprawie osiągnięcia naukowego, którego najważniejsze tezy zostały opublikowane w postaci 6 artykułów w prestiżowych czasopismach optyczno-fotonicznych z dominującym wkładem Doktoranta w ich powstanie, a w szczególności za analizę teoretyczną i badania eksperymentalne właściwości polaryzacyjnych nowego typu nanostrukturalnych światłowodów dwójłomnych, stawiam wniosek o **wyróżnienie** rozprawy doktorskiej Damiana Michalika.

