

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

Ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Kingi Żołnacz pt.:
“Eksperymentalne badania wybranych procesów konwersji modowej w strukturyzowanych światłowodach”

Rozprawa doktorska mgr inż. Kingi Żołnacz pt.: „*Eksperymentalne badania wybranych procesów konwersji modowej w strukturyzowanych światłowodach*” została wykonana w Katedrze Optyki i Fotoniki WPPT Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Wacława Urbańczyka. Promotorem pomocniczym rozprawy był dr inż. Maciej Napiórkowski.

Rozprawa ma charakter eksperymentalny, co uwypuklone zostało już w samym tytule i powstawała przy wsparciu grantu NCN Maestro pt.: „Spiralne światłowody fotoniczne do zastosowań w metrologii i komunikacji optycznej” kierowanego przez prof. Wacława Urbańczyka. Rozprawa się z 9. rozdziałów, bibliografii obejmującej 121 pozycji literaturowych oraz krótkiego opisu dorobku naukowego Doktorantki i zajmuje łącznie 111 stron.

Doktorantka jest współautorem 8 prac bezpośrednio związane z tematyką rozprawy doktorskiej i opublikowanych w ostatnich dwóch latach (2020-2022) w wysoko punktowanych czasopismach optycznych o zasięgu światowym z listy JCR tj. *Optics Letters* (3), *Optics Express* (2), *Journal of Lightwave Technology* (2) oraz *IEEE Photonics Journal*; przy czym w 5 pracach pani Żołnacz jest umieszczona na pierwszym miejscu:

- [1] **K. Żołnacz**, J. Olszewski, T. Martynkien, W. Urbanczyk, "Effective method for determining chromatic dispersion from a spectral interferogram," *J. Light. Technol.* **37**(3), 1056–1062 (2019).
- [2] **K. Żołnacz**, M. Napiórkowski, A. Kiczor, M. Makara, P. Mergo, W. Urbanczyk, "Bend-induced long period grating in a helical core fiber," *Opt. Lett.* **45**(7), 1595–1598 (2020).
- [3] M. Napiórkowski, **K. Żołnacz**, G. Statkiewicz-Barabach, M. Bernas, A. Kiczor, P. Mergo, W. Urbanczyk, "Twist induced mode confinement in partially open ring of holes," *J. Light. Technol.* **38**(6), 1372–1381 (2020).
- [4] **K. Żołnacz**, K. Tarnowski, M. Napiórkowski, K. Poturaj, P. Mergo, W. Urbanczyk, "Vector modulation instability in highly birefringent fibers with circularly polarized eigenmodes," *IEEE Photonics J.* **13**(1), 7100616 (2021).
- [5] M. Bernas, **K. Żołnacz**, M. Napiórkowski, G. Statkiewicz-Barabach, W. Urbanczyk, "Conversion of LP₁₁ modes to vortex modes in a gradually twisted highly birefringent optical fiber," *Opt. Lett.* **46**(18), 4446–4449 (2021).
- [6] **K. Żołnacz**, M. Szatkowski, J. Masajada, W. Urbanczyk, "Broadband chromatic dispersion measurements in higher-order modes selectively excited in optical fibers using a spatial light modulator," *Opt. Express* **29**(9), 13256–13268 (2021).

- [7] **K. Żołnacz**, W. Urbanczyk, "Selective excitation of different combinations of LP01 and LP11 polarization modes in a birefringent optical fiber using a Wollaston prism," *Opt. Express* **30**(2), 926–938 (2022).
- [8] S. Majchrowska, **K. Żołnacz**, W. Urbanczyk, K. Tarnowski, "Multiple intermodal-vectorial four-wave mixing bands generated by selective excitation of orthogonally polarized LP01 and LP11 modes in a birefringent fiber," *Optics Letters* **47**(10), 2522–2522 (2022).

Wszystkie te prace – pomimo, że opublikowane w przeciągu ostatnich 2 lat – uzyskały już (stan z dnia 1.07.2022) 12 cytowań (wg bazy WoS), a sumaryczny ich współczynnik wpływu (*impact factor*) wynosi ponad 24. Świadczy to bardzo dobrze o aktualności tematyki badawczej. Warto podkreślić, że ostatnia (8.) publikacja z listy (która ukazała się już po złożeniu rozprawy) znalazła się w maju 2022 r. na liście 10. najczęściej pobieranych publikacji z *Optics Letters*. Jest to więc dorobek na etapie rozprawy doktorskiej bardzo poważny.

W krótkim rozdziale 1. przedstawiającym skrótowo najważniejsze kamienie milowe rozwoju optyki/fotoniki światłowodowej od słynnej publikacji Charlesa Kao z 1965 r. Doktorantka formułuje następujące dwie tezy pracy:

1. *Strukturyzacja parametrów światłowodu w połączeniu ze strukturyzacją wiązki oświetlającej zapewnia nowe możliwości liniowej i nieliniowej konwersji modowej.*
2. *Strukturyzacja wiązki oświetlającej umożliwia selektywne pobudzenie modów wyższych rzędów i bezpośredni pomiar ich parametrów transmisyjnych.*

W swojej rozprawie Doktorantka dowodzi tych dwóch na drodze eksperymentalnej poprzez badania procesów konwersji modowej w wybranych typach światłowodach strukturyzowanych. Strukturyzacji podlega zarówno geometria przekroju światłowodu (średnica włókna i rdzenia, poziom domieszkowania, rozmieszczenie asymetrycznych elementów mikrostrukturalnych), jak i strukturyzacja podłużna w wyniku skręcenia oraz ugięcia światłowodu. W dalszej części rozdziału 1. Doktorantka nakreśla przyjętą w rozprawie strategię, która ma doprowadzić do udowodnienia tej dwuczłonowej tezy.

Rozdział 2. przedstawia oryginalne stanowisko do interferencyjnego pomiaru dyspersji chromatycznej i efektywnych grupowych współczynników załamania w szerokim zakresie spektralnym od 600 do 3400 nm zbudowane przez Doktorantkę oraz metodę automatycznej analizy serii interferogramów w celu wyznaczenia spektralnego przebiegu różnicy grupowych dróg optycznych, a stąd dyspersji chromatycznej światłowodu. Zaproponowana w tym rozdziale metoda wyznaczania dyspersji chromatycznej została opisana w publikacji [1] i stanowi niewątpliwie osiągnięcie Doktorantki

W rozdziale 3. przedstawione zostały dwie metody selektywnego pobudzenia modów wyższego rzędu w szerokim zakresie spektralnym: wykorzystująca ciekłokrystaliczny przestrzenny modulator światła oraz pryzmat Wollastona. Metoda selektywnego pobudzania modów z użyciem pryzmatu Wollastona jest oryginalnym wynikiem Doktorantki i została opublikowana *Optics Express* w 2022 r [7]. Metoda ta dotyczy w szczególności 6 modów polaryzacyjnych należących do 2 modów przestrzennych: podstawowego LP₀₁ oraz modu LP₁₁ w światłowodzie dwójłomnym i może być przydatna do generacji nieliniowych efektów

międzymodowych. Na Rys. 3.10 (a) podpisy dotyczące modów parzystych (LP_{11e}) i nieparzystych (LP_{11o}) o polaryzacji y zostały błędnie umieszczone.

Tematem rozdziału 4. było badanie wpływu skręcenia światłowodu o dwójłomności liniowej na generację wektorowych niestabilności modulacyjnych. Składanie dwóch rodzajów ortogonalnych dwójłomności: liniowej oraz kołowej (indukowanej przez skręcenie) może prowadzić do wypadkowej dwójłomności eliptycznej z eliptycznie spolaryzowanymi modami własnym światłowodu. Warto byłoby przedyskutować podczas obrony wzajemne relacje tych dwóch składowych dwójłomności i ich wpływ na wypadkowe stany własne polaryzacji modów. Wyniki eksperymentalne zostały zademonstrowane przy pomocy skręconego światłowodu dwójłomnego typu *side-hole* wytworzonego z zastosowaniem techniki wirującej preformy w trakcie procesu wyciągania w Pracowni Technologii Światłowodów na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie kierowanej przez prof. Pawła Mergo. Efekty skręcenia i ich wpływ na właściwości polaryzacyjne światłowodów (również dwójłomnych) analizowane były teoretycznie już w 1979 r. (Urlich, Simon, 1979, *Applied Optics* vol. 18, p. 2241-2251) oraz badane eksperymentalnie w latach 90. XX w, (Wolinski, Bock, 1993, *J. Lightwave Tech.* vol. 11, pp. 389-394 oraz Wolinski, 1994, "Stress effects in twisted highly birefringent fibers", *Proc. SPIE*, Vol.2070(1), pp.392-403). Oczywiście, w recenzowanej rozprawie skręcenie powstaje w procesie wyciągania włókna, ale szereg opisów formalnych jest analogicznych i szkoda, że w rozprawie zabrakło odniesienia do tych wcześniejszych prac. Podpis pod Rys. 4.6 nie uwzględnia literki (c).

W rozdziale 5. przedstawione zostały trzy przykłady zastosowania pobudzania wybranych kombinacji dwóch pierwszych modów przestrzennych (LP_{01} oraz LP_{11}) przy użyciu pryzmatu Wollastona w celu uzyskania efekty nieliniowych w światłowodach dwójłomnych typu Panda. Doktorantka wykorzystała tutaj własną i oryginalną metodę pobudzania. W Tab. 5.1 oraz na Rys. 5.1 mody parzyste oraz nieparzyste LP_{11} zostały mylnie oznaczone (podobnie jak w rozdziale 3.).

Rozdział 6. demonstuje bardzo ciekawe trójrdzeniowe skręcone włókno mikrostrukturalne wykonane w Pracowni Technologii Światłowodów UMCS, którego rdzenie stanowią niedomknięty układ kanałów powietrznych umieszczony poza osią symetrii płaszczka. Jest to więc przykład światłowodu strukturyzowanego poprzecznie. Skręcenie włókna umożliwia propagację światła wskutek pojawienia się bariery współczynnika załamania. Opisany w 6.1 formalizm optyki transformacyjnej przydatny do analizy propagacji w światłowodach zarówno skręconych jak i zginanych posiada wiele analogii do mechanizmu modów lokalnych opisanych w klasycznym podejściu D. Marcuse'a (*Theory of Dielectric Optical Waveguides*, New York: Academic, 1974). Okazało się, że takie włókno może posłużyć do wytworzenia czujnika zgięcia lub przemieszczenia, którego czułość można kontrolować liczbą kanałów powietrznych tworzących rdzeń, ich odległością od środka światłowodu oraz okresem skręcenia włókna. Ten nowy rodzaj włókna mikrostrukturalnego posiada właściwości takie jakie tłumienność, zakres transmisji, dwójłomność oraz straty zgięciowe zależne zarówno od strukturyzacji poosiowej włókna (okresu skręcenia) jak i jego strukturyzacji w przekroju włókna. Wyniki przedstawione w tym rozdziale znalazły się w publikacji [3] oraz zostały bardzo ciekawie zaprezentowane na sensorowej konferencji międzynarodowej I3S w dniu 22.06.2022 r. w Warszawie w obecności recenzenta niniejszej rozprawy.

Dwa kolejne rozdziały (7. i 8.) opisują efekt periodycznej modulacji dyspersji wywołany zgięciem w skręconym włóknie z domieszkowanym centralnym rdzeniem z asymetryczną mikrostrukturą w jego pobliżu (rozdz. 7) oraz generację siatki długookresowej poprzez zgięcie skręconego włókna dwurdzeniowego, w którym jeden z rdzeni jest umieszczony na osi symetrii płaszcza, a drugi poza tą osią (rozdz. 8)

W podsumowaniu (rozdział 9.) Doktorantka podkreśla najciekawsze i oryginalne uzyskane wyniki badawcze, które zaprezentowała w rozprawie dowodząc jednocześnie prawdziwości postawionej tezy. Pracę zamyka bogaty spis literatury (121 pozycji), który mógłby być uzupełniony o wyżej podane pozycje literaturowe. Praca z 1993 r. w *Applied Optics* pojawia się dwukrotnie jako pozycja [79] oraz [107].

Powyższe uwagi i komentarze oraz nieliczne formalne uchybienia nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę recenzowanej rozprawy. Doktorantka ze starannością opisuje metody i procedury eksperymentalne oraz wnikliwie analizuje uzyskane wyniki badań formułując logiczne wnioski. Świadczy to o poprawności i rzetelności warsztatu badawczego, a jednocześnie o sumienności i skrupulatności zarówno w badaniach eksperymentalnych jak i analizach teoretycznych.

W podsumowaniu 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. Kingi Żołnacz do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Z uwagi na znaczącą rangę przedstawionego w rozprawie osiągnięcia naukowego, którego najważniejsze tezy zostały opublikowane w postaci 8. artykułów w wysoko notowanych czasopismach z zakresu optyki i fotoniki z dominującym wkładem Doktorantki w ich powstanie, a w szczególności za oryginalne opracowanie metod selektywnego pobudzenia przestrzennych i polaryzacyjnych modów światłowodowych poprzez strukturyzację fazową i amplitudową wiązki pobudzającej stawiam wniosek o **wyróżnienie** tej rozprawy.



Warszawa, dnia 5.07.2022 r.

Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński