

prof. dr hab. inż. Leszek R. Jaroszewicz  
członek korespondent PAN  
Instytut Fizyki Technicznej  
Wojskowa Akademia Techniczna  
jarosz@wat.edu.pl

10 lipca 2022 r.

## RECENZJA

*rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kingi Żońnac*

*pt.: "Eksperymentalne badania wybranych procesów konwersji modowej w strukturyzowanych światłowodach"*

Przedmiotem recenzji jest w/wym. rozprawa doktorska mgr inż. Kingi Żońnac, której Promotorem jest prof. dr hab. inż. Wacław Urbańczyk, zaś Promotorem pomocniczym dr Maciej Napiórkowski. Recenzję przygotowano na podstawie zawiadomienia nr 3/5/D11/2022 z dnia 04.05.2022 r. Prorektora ds. Nauki Politechniki Wrocławskiej o wyznaczeniu mnie na recenzenta w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne nr 228/18/RDNN11/2021-2024 z dnia 04.05.2022 r.

Zgodnie z obecnie obowiązującymi przepisami, ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r (Dz.U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), rolą recenzenta jest stwierdzenie czy osoba ubiegająca się o stopień naukowy doktora posiada wymagany dorobek naukowy (wymóg Art. 186), oraz czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie jak i umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej (wymóg Art. 187 ust. 1) a przede wszystkim czy przedmiotem rozprawy doktorskiej jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (wymóg Art. 187 ust. 2).

Po przestudiowaniu rozprawy nie mam żadnych wątpliwości co do poniższych faktów:

1. Rozprawa dla przewodu wszczętego w dyscyplinie nauki fizyczne w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych mieści się w całości w obecnej dyscyplinie nauki fizyczne.
2. Rozprawa ma charakter wybitnie eksperymentalny, co znajduje odzwierciedlenie już w jej tytule, zaś podane na stronie 5 dwie tezy są jasno sformułowane i możliwe do weryfikacji na bazie przedłożonej rozprawy.
3. Wsparcie rozprawy o **osiem** publikacji, dotyczące tematu rozprawy, znajdujących się w bazie JCR o średniej wartości IF równym 3,7486 stanowi podstawę do stwierdzenia spełnienia ustawowego wymogu Art. 186 z nawiązką, jak i przesłankę do stwierdzenia rozwiązania oryginalnego problemu naukowego.

Przystępując do szczegółowej recenzji rozprawy pozwałam sobie na stwierdzenie, iż jest to najlepsza rozprawa doktorska jaką recenzuję w okresie ponad 25 lat mej pracy jako samodzielnego pracownika naukowego. Układ pracy jest nietypowy, choćby z powodu ograniczenia części studium literaturowego do dwu stron (strony 3 – 4 w rozdziale 1) w których doktorantka przytacza 53 pozycje literaturowe, starannie dobrane umożliwiające sformułowanie na stronie 5 celu rozprawy jakim było udowodnienie dwu tez o eksperymentalnym wydźwignię, które sprowadzają się do wskazania „nowych sposobów konwersji modowej możliwych do uzyskania poprzez zastosowanie

jednoczesnej strukturalizacji wiązki oświetlającej i geometrii światłowodu” (cytat z podsumowania rozprawy na stronie 97 – niezwykle cenny i treściwy). Pozostałe przywołanie literaturowe - 68 pozycji, w tym 7 współautorstwa Doktorantki, zostały prawidłowo umieszczone w treści kolejnych 7 rozdziałów rozprawy, jako komentarze w dyskusji nad uzyskanymi wynikami prac własnych. Taki układ pracy jest niezwykle przejrzysty z punktu widzenia możliwości śledzenia przez recenzenta spełnienia przez Doktorantkę wymogu oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

Celem wypełnienia tematu rozprawy jakim jest *Eksperymentalne badania wybranych procesów konwersji modowej w strukturyzowanych światłowodach*, Doktoranta sformułowała dwie odrębne tezy (strona 5): 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*. Tak postawione tezy zawężają zakres prac eksperymentalnych w zasadzie do umiejętnego pobudzania strukturyzowanych światłowodów, jednakże NIE ograniczają tematu rozprawy, w którym założono badania wybranych procesów konwersji modowej. To słuszne, moim zdaniem, ograniczenie pozwoliło na skupienie się Doktorantce na najistotniejszych zagadnieniach jakimi było pomiar dyspersji chromatycznej i grupowego współczynnika załamania modu podstawowego, badania efektów nieliniowych we włóknach dwójłomnych oraz badania propagacji wiązki świetlnej w spiralnych światłowodach fotonicznych. Ostatnie zagadnienie jest moim zdaniem nawet nadmiarowe z punktu widzenia tematu rozprawy jednakże doskonale wypełnia wymogi stypendium doktorskiego NCN w granie Maestro 8 nr DEC-016/22/A/ST7/00089.

Uważam, że powyższe dobrze postawione tezy względem tematu rozprawy, zostały w pełni udowodnione poprzez badania w których jako oryginalność rozwiązania problemu naukowego przyjmuję:

1. Zbudowanie częściowo zautomatyzowanego stanowiska pozwalającego na pomiar dyspersji chromatycznej oraz grupowego współczynnika załamania metodą interferencji widmowej wraz z opracowaniem dwu algorytmów analizy danych pomiarowych pozwalających na wyznaczenie mierzonej wielkości z dokładnością pojedynczych ps/km/nm o skróconym czasie pomiaru dla pojedynczego modu do kilku-kilkudziesięciu minut. O oryginalności rozwiązania na światowym poziomie świadczy jego publikacja w *J. Light. Technol.* **37**(3), 1056-1062 (2019), której Doktorantka jest pierwszym współautorem.
2. Umiejętność indywidualnego pobudzania w szerokiej gamie strukturyzowanych włókien optycznych modu podstawowego jak i wybranych modów wyższych rzędów, dzięki zastosowaniu szerokopasmowego pobudzenia z wykorzystaniem SLM oraz także selektywnego pobudzania różnych kombinacji modów z użyciem pryzmatu Wollastona. Z pełną odpowiedzialnością stwierdzam, iż nie istnieje w literaturze udokumentowane takie eksperymentalne (nie symulacyjne) pobudzenie, stąd też z satysfakcją należy odebrać ich publikację w *Opt. Express* **29**(9), 13256-13268 (2021) oraz *Opt. Express* **30**(2), 926-938 (2022), których Doktorantka jest pierwszym współautorem. Zdaniem recenzenta jest to wybitne osiągnięcie zasługujące na wyróżnienie niniejszej rozprawy, co zostanie odpowiednio sformułowane w końcowej konkluzji.
3. Praktycznego wykorzystania selektywnego pobudzania różnych kombinacji modów na bazie pryzmatu Wollastona do generacji pasm wektorowych niestabilności modulacyjnych pozwalających na konwersję międzypolarizacyjną, mieszania czterofalowego czy też do

konwersji pobudzonych modów LP<sub>11</sub> do modów wirowych. Badanie zjawiska mieszania czterofalowego zostało uwieńczone współautorską publikacją Doktorantki przyjętą do druku w *Optics Letters*, zaś generacja modów wirowych publikacją w *Opt. Lett.* **46**(18), 4446-4449 (2021) Jej współautorstwa.

4. Zastosowania czujnikowe obejmujące czujniki na bazie skręconych światłowodów, w tym:
  - a. czujniki zgięcia i przemieszczenia na bazie skręconego niedomieszkowanego włókna z niedomkniętymi pierścieniami kanałów powietrznych położonych poza osią symetrii po raz pierwszy publikowane w *J. Light. Technol.* **38**(6), 1372-1381 (2020) (współautorstwo Doktorantki) w którym obserwowano eksperymentalnie zmiany efektywnego współczynnika załamania modu w funkcji zgięcia oraz stopnia skręcenia światłowodu,
  - b. badanie konwersji modowej wykorzystującej nowy efekt generacji siatki długookresowej poprzez zgięcie skręconego włókna dwurdzeniowego, co jak wykazała w rozprawie a także w artykule *Opt. Lett.* **45**(7), 1592-1598 (2020) (Doktorantka jest pierwszym współautorem), powoduje rezonansowe sprzężenie między rdzeniami na różnych długościach fali uzależnione od poziomu domieszkowania oraz poprzecznej i poosiowej strukturyzacji mogące znaleźć zastosowanie w filtracji spektralnej czy przełącznikach optycznych.

Odnosząc się do strony redakcyjnej rozprawy stwierdzam, że jest ona na wysokim poziomie edytorskim. Zastosowany język jest precyzyjny, logiczny i zwięzły, co czyni pracę łatwą w czytaniu. Nieliczne uwagi dotyczą następujących aspektów:

- nieprawidłowego użycia znaku separacji części dziesiętnej w liczbach – zastosowano notację angielską – kropkę, a powinien być zgodnie z zasadami pisowni polskiej przecinek,
- do opisu funkcji tangens zastosowano skrót angielski „tan” zamiast polskiego „tg” [np. (4.4), (6.6c)],
- umieszczania rysunków często daleko od fragmentu tekstu im poświęconemu, co znacznie utrudnia analizę, np. rys. 2.2 powinien być stroną bliżej, rys. 2.7 stroną dalej poniżej ostatniego akapitu na stronie 20, tabela 3.6 – dwie kartki dalej, itd.,
- nieliczne pominięcia opisu wprowadzonych symboli np. H we wz. 4.16, bo chyba to nie jest ten sam symbol co przy wz. 2.8,
- błąd edytorski na str. 66 w 3 akapicie w 7 zdaniu – powinno być zgodnie z rys. 5.6 quasi-TM<sub>01</sub> a nie quasi-TE<sub>01</sub>,
- nieczytelny, ze względu na dobór kolorów, wykres na rys.6.8 (spektralnej zależności tłumienności),
- braku przywołania cytacji [48] na koniec przedostatniego akapitu na stronie 98.

Rozprawa stanowi udokumentowanie posiadania pogłębionej wiedzy z zakresu nauk fizycznych przez Doktorantkę dotyczącej istoty badanych zjawisk fizycznych, czynników mających wpływ na ich przebieg jak i możliwości dokonywania ich praktycznej weryfikacji. W pracy eksperymentalnej jest to niezwykła umiejętność przynależna do niewielkiej grupy badaczy. Z przyjemnością studiuję się zaprezentowaną w rozprawie metodykę przeprowadzania eksperymentu zawierającą takie elementy jak: syntetyczną analizę matematyczną problemu, przeprowadzenie symulacji komputerowych, zaprojektowanie układu badawczego, oceny możliwych błędów wprowadzanych przez jego poszczególne elementy, przeprowadzenie pomiarów z właściwą analizą błędów oraz dokonanie głębokiej fizycznej interpretacji uzyskanych wyników. Tym samym z stwierdzam, że Doktorantka wykazała się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami pretendującymi ją do uzyskania tytułu doktorskiego.

Jednocześnie studiowanie rozprawy nasuwa recenzentowi zbiór niżej zamieszczonych uwag dwojakiej natury. Pierwsze z nich to uwagi merytoryczne, które zdaniem recenzenta stanowią zauważone błędy w pracy, drugie zaś to uwagi typu dyskusyjnego. Odpowiedź na tę drugą kategorię powinna być źródłem konstruktywnej dyskusji z Doktorantką w trakcie obrony publicznej. Jednocześnie ze względu na dążenie do ograniczenia objętości recenzji, uwagi nie są poprzedzone wprowadzeniem i w konsekwencji mogą być zrozumiałe jedynie w kontekście pracy.

#### Uwagi merytoryczne:

- Str. 75, trzecie zdanie – analiza rys. 6.5 nie potwierdza stwierdzenia, iż: „Porównując wyniki uzyskane dla włókien skręconych z różnym okresem można zaobserwować, że tłumienność po stronie krótkofalowej dla danego rdzenia jest mniejsza im słabiej skręcone jest włókno”.
- Str. 77, trzeci wiersz od dołu, - stwierdzenie :”... tłumienność w zakresie krótkofalowym rośnie, a w zakresie długofalowym maleje.” W obu zakresach zachowuje się tak samo ale z inną siłą.
- Str. 86, 3 akapit w podrozdz. 7.2, 3 wiersz - stwierdzenie „Jeżeli wiązka padająca ma kąt eliptyczności  $\theta < 45^\circ$ ” jest nieprawidłowe. Doktorantce niewątpliwie chodziło o wiązkę o niekołowym SOP, a powyżej zacytowany warunek dopuszcza  $\theta = -45^\circ$  czyli wiązkę spolaryzowaną kołowo lewoskrętnie wg. terminologii anglojęzycznej.

#### Uwagi dyskusyjne:

- w rozdziale 2 omówiono dwa algorytmy wyznaczania dyspersji chromatycznej światłowodu: jedna bazująca na analizie automatycznej serii interferogramów, druga z pojedynczego interferogramu, przy czym oba algorytmy dają dokładność rzędu pojedynczych ps/km/nm. Na tej podstawie brak jest mi jasnej deklaracji, którą z metod należałoby stosować, zwłaszcza w zautomatyzowanym pomiarze, tym bardziej, że pierwsza wymaga włókien o długości powyżej kilkudziesięciu centymetrów zaś druga znacznie krótszych (od kilku do kilkudziesięciu centymetrów),
- na rys. 2.5 – 2.7 zaznaczona z prawej strony dokładność pomiaru nie jest skorelowana z określoną wartością liczonej dyspersji (zerowa dokładność jest dla dyspersji około - 8 ps/km/nm), uprzejmie proszę o stosowny komentarz w tym zakresie,
- uprzejmie proszę o ustosunkowanie się do rozbieżności wyników teoretycznych i eksperymentalnych z rys. 3.12(b) - użyta kolorystyka punktów pomiarowych uniemożliwia mi zajęcie stanowiska w zakresie uzyskania podobnego przebiegu wyników eksperymentalnych co symulacyjnych,
- jak należy rozumieć stwierdzenie „gradientowe skręcenie końcówki włókna” o którym jest mowa w przypadku konwersji modów polaryzacyjnych LP<sub>11</sub> do modów wirowych – patrz ostatnie zdanie w pierwszym akapicie na stronie 6 oraz podrozdział 5.3,
- w przypadku analizy wektorowej niestabilności modulacyjnej włókien dwójfomnych, Doktorantka przytacza rozważania teoretyczne bazujące na pracach S. Wabnitza (1988) oraz G.P. Agrawala (1987), zakładające zaniedbywalność tłumienności światłowodu. Co to oznacza dla przypadku użycia eksperymentalnych włókien UMCS o długości rzędu 6 m – dla których nie podano spektralnej tłumienności w badanym zakresie widmowym 1000-1100 nm,
- w tabeli 5.1 określając parametry włókien PM-GDF-6 i PM-1550B-XP firmy Nufern podano stałe wartości NA. Czy fakt posiadania przez te włókna eliptycznego rdzenia (zwłaszcza dla PM1550B-XP) nie powoduje zależności kierunkowej dla NA?

Jako podsumowanie niniejszym stwierdzam, iż przedłożona rozprawa spełnia z nadmiarem wymogi zawarte w Art. 186 i 187 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z 20 lipca 2018 r.

(Dz.U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), zarówno co do wymaganego dorobku naukowego, zaprezentowania przez Doktorantkę ogólnej wiedzy teoretycznej w dyscyplinie nauki fizyczne jak i umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przede wszystkim jako oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. W tym ostatnim zakresie, najistotniejszym z punktu widzenia obecnie obowiązujących przepisów, stwierdzam, iż praca reprezentuje wybitne osiągnięcie naukowe jakim jest udokumentowane eksperymentalnie selektywne pobudzenie wybranego modu w strukturyzowanym włóknie, na bazie nowatorskiego układu pomiarowego, co zostało zaprezentowane na rys. 3.7, 3.13, 5.2, 5.4, 5.5 oraz 5.7. Stwierdzam, że tak doskonałych obrazów struktur modowych (eksperymentalnych nie symulacyjnych) trudno szukać w literaturze, za co **wnoszę o wyróżnienie niniejszej rozprawy** oraz stawiam wniosek o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

