

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

18 września 2024 r.

## RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marty Weroniki Bernaś**  
**pt.: "Kształtowanie właściwości transmisyjnych i czujnikowych światłowodów poprzez skręcanie"**

Przedmiotem recenzji jest w/wym. rozprawa doktorska mgr inż. Marty Weroniki Bernaś, której Promotorem jest dr hab. inż. Gabriela Statkiewicz-Barabach, zaś Promotorem pomocniczym dr Maciej Napiórkowski. Recenzję przygotowano na podstawie zawiadomienia nr 3/7/D11/2024 z dnia 9.07.2024 r. (data wpływu 16.07.2024 r.) Prorektora ds. Nauki Politechniki Wrocławskiej o wyznaczeniu mnie na recenzenta w oparciu o uchwałę Rady Dyscypliny Naukowej Nauki Fizyczne nr 582/43/RDND11/2024 z dnia 09.07.2024 r.

Zgodnie z obecnie obowiązującymi przepisami, ustawy *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* z dnia 20 lipca 2018 r (Dz.U. z 2023 r. poz. 742 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 dyscyplinie nauki fizyczne.
2. Rozprawa ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, zaś podane na stronie 3 trzy tezy są jasno sformułowane i możliwe do weryfikacji na bazie przedłożonej rozprawy.
3. Wsparcie rozprawy o **pięć** publikacji, dotyczące tematu rozprawy, znajdujących się w bazie JCR o średniej wartości IF równym 3,518, w których Doktorantka jest pierwszym współautorem w **czterech** pracach, stanowi podstawę do stwierdzenia spełnienia ustawowego wymogu Art. 186 z nawiązką co do posiadania przez Doktorantkę dorobku naukowego, jak i wymogu Art. 187 ust. 2 odnośnie zawarcia w pracy oryginalnego rozwiązania problemu naukowego.

Przystępując do szczegółowej recenzji rozprawy pozwalam sobie na stwierdzenie, iż jest to kolejna wybitna rozprawa doktorska jaką recenzuję z Katedry Optyki i Fotoniki Wydziału Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Układ pracy jest klasyczny - praca zawiera 116 stron obejmujących dziewięć rozdziałów, 151 pozycyjną bibliografię, oraz wykaz prac własnych Doktorantki – pięć prac z JCR związanych z pracą, dwie z JCR poza tematem pracy oraz sześć wystąpień konferencyjnych w tym pięć związanych z pracą. Wprowadzenie stanowiące pierwszy rozdział pracy to syntetyczny przegląd rozwiązań ukierunkowanych na wytwarzanie i

wykorzystanie będących przedmiotem pracy włókien skręcanych poparty przez dobrze dobrany zespół 58 pozycji literaturowych, prowadzący do sformułowania na stronie 3 trzech tez rozprawy:

T1: lokalne skręcenie światłowodu dwójłomnego umożliwia konwersję międzymodową w grupie modów pierwszego rzędu, w szczególności generacje modów wirowych,

T2: lokalna zmiana okresu skręcania światłowodu o spiralnym rdzeniu poprawia efektywność wprowadzania do niego światła,

T3: skręcenie światłowodu typu *side-hole* na całej długości podczas procesu wyciągania umożliwia kształtowanie jego czułości na ciśnienie hydrostatyczne.

Kolejne dwa rozdziały (2 i 3) mają charakter wprowadzający – opis trzech rodzajów dwójłomności we włóknach oraz przedstawienie modelowania propagacji fali elektromagnetycznej w światłowodach skręconych na bazie zastosowania formalizmu optyki transformacyjnej. Należy tu podkreślić, iż w tym ostatnim rozdziale Doktorantka przedstawiła wyniki symulacji dwu struktur światłowodowych będących podstawą jej dalszych badań. Kolejne rozdziały są poświęcone dowodom przyjętych tez rozprawy w oparciu o zespół pięciu prac opublikowanych w *Optics Express* (4 pozycje) oraz *Optics Letters* (jedna pozycja - mylnie przypisana do *Optics Express*). Dowodowi T1 Doktorantka poświęca rozdziały 4-6, zaś pozostałym dwu po jednym rozdziale – dla T2 jest to rozdział 7, zaś dla T3 – rozdział 8. Praca zakończona jest krótkim dwustronicowym podsumowaniem. Powyższy układ pracy jest niezwykle przejrzysty z punktu widzenia możliwości śledzenia przez recenzenta spełnienia przez Doktorantkę wymogu oryginalnego rozwiązania problemu naukowego. Oryginalność przeprowadzonych badań dobrze koreluje ze stypendium doktoranckim Kandydatki do tytułu, z NCN w ramach grantu Maestro 8 - 2016/22/A/ST7/00089: „Spiralne światłowody fotoniczne do zastosowań w metrologii i komunikacji optycznej”.

Uważam, że powyższe dobrze postawione tezy rozprawy, zostały w pełni udowodnione poprzez zaprezentowane omówienie przeprowadzonych badań, w których jako oryginalność rozwiązania problemu naukowego przyjmuję:

Względem T1. Dowód tej tezy niesie największy, zdaniem recenzenta, wkład oryginalnych prac Doktorantki. Poświęca mu też najwięcej, bo aż trzy rozdziały oraz wspiera wyniki trzema publikacjami z bazy JCR w których jest pierwszą współautorką. Wspólną cech tych prac jest przedstawienie rozwiązania technologicznego, które poprzez lokalne skręcenie istniejącego włókna optycznego pozwala na konwersję modową w grupie modów pierwszego rzędu. Osobiście najwyżej oceniam, z punktu widzenia dysertacyjnego, rozwiązanie oparte na włóknie PANDA skręconego w sposób ciągły ze zmiennym, rosnącym okresem na długości kilku centymetrów. W rozdziale 4 Doktoranta szeroko opisuje wyniki prac zaprezentowane w *Opt. Lett.* **46(8)**, 4446-449 (2021) dotyczące konwersji modów LP<sub>11</sub> do modów wirowych przez odpowiednie gradientowe skręcenie włókna PANDA na bazie wykorzystania palnika wodorowego stacji *Lighter Workstation CW-5000*. Należy podkreślić, iż dla potwierdzenia poprawnej konwersji konieczne było wykorzystanie odpowiedniej konfiguracji układu pobudzającego mod podstawowy w badanej strukturze, który to był w dyspozycji Doktorantki jako unikalna konstrukcja Katedry Optyki i Fotoniki PWr. Metoda pobudzenia została uprzednio opracowana i przetestowana przez dr K. Żołnacza w ramach jej pracy doktorskiej obronionej dwa lata wcześniej, stąd też nie mam zastrzeżeń co do prawidłowości pobudzenia. Jako istotny element wskazujący na prawidłowość procesu badawczego traktuję korekty początkowych założeń dla przeprowadzonych symulacji tej konwersji (opisanych w rozdziale 3) co do konieczności wprowadzenia poprawek dotyczących istnienia niecylicydrycznego

kształtu rdzenia prowadzącego dodatkowo do indukowania w jego otoczeniu naprężeń radialnych, których korekta pozwoliła Doktorantce na uzyskanie zbieżności uzyskanych wyników eksperymentalnych z symulacyjnymi. Doktorantka w zakresie wykorzystania powyższego konwertera przedstawia jako kolejne oryginalne rozwiązanie - światłowodowe źródło wiązek wirowych pracujące w trybie szerokopasmowym lub przestrzajalnym. Struktura ta bazuje na połączeniu specjalnie zaprojektowanego i wytworzonego przez Pracownię Światłowodów UMCS włókna mikrostrukturalnego pełniącego rolę szerokopasmowego lub przestrzajalnego źródła modów LP<sub>11</sub> z wyżej opisanym konwerterem na bazie gradientowo skręconego włókna PANDA. Jak dowodzi Doktorantka w rozdziale 5 oraz w publikacji *Opt. Express*, **30**(15), 27715-27729 (2022), powyższa struktura pozwala na wytwarzanie wiązek wirowych różnych typów zarówno w trybie szerokopasmowym jak i przestrzajalnym zależnie od długości czasu trwania impulsów lasera pompującego. Dopełnieniem dowodu tezy 1 są oryginalne badania nad wytworzeniem siatek typu *rocking-filter* do rezonansowych sprzężeń między różnymi parami modów LP<sub>11</sub>. Rozszerzone tym razem w rozdziale 6 wyniki badań, opublikowane jako *Opt. Express* **31**(14), 22837-22854 (2023), przedstawiają symulację działania takiej struktury, jej technologię wytworzenia jak i eksperymentalne badania wskazujące m.in. na możliwość sprzęgania tak modów polaryzacyjnych jak i przestrzajalnych a w konsekwencji generację cylindrycznych wiązek wektorowych, w tym o azymutalnej bądź radialnej polaryzacji.

Względem T2. Teza ta została w pełni udowodniona w ramach zaprezentowanych w rozdziale siódmym wyników syntetycznie podanych w opublikowanej pracy w *Opt. Express*, **29**(4), 5343-5357 (2021) (współautorstwo Doktorantki). Wynik ten ma na dziś największy wydźwięk praktyczny, albowiem Doktorantka udowodniła, iż można uzyskać skuteczne zwiększenie efektywności sprzężenia światła między HCF (włóknem o spiralnym rdzeniu) a SMF-28 (standardowym światłowodem jednodomowym). Jeżeli mówić o efektywnym wykorzystaniu HCF to kwestia jego sprzężenia ze standardowymi źródłami wyposażonymi zazwyczaj w końcówki SMF jest rzeczą kluczową. Dla HCF front falowy modów własnych jest pochylony i klasyczne sprzężenie daje efektywność sprzężenia na poziomie mniejszym niż 10%. Doktorantka udowodniła eksperymentalnie, w wiarygodny sposób, iż częściowe odkręcenie HCF z wykorzystaniem palnika wodorowego może zwiększyć tę efektywność do ponad 60 %. Co prawda wymaga to zastosowania odpowiedniego oprzyrządowania – tutaj stacji wykonywania sprzęgaczy *Lightel Workstation CW-5000*, ale obecnie jest ona szeroko wykorzystywana w co najmniej kilku krajowych ośrodkach zajmujących się technologią i aplikacjami włókien specjalnych, stąd jest to rozwiązanie możliwe do powszechnego zastosowania.

Względem T3. Dowodowi tej tezy poświęcono ósmy rozdział pracy bazujący na rozszerzeniu wyników prezentowanych w artykule *Opt. Express* **31**(21), 34600-34607 (Doktorantka jest pierwszym współautorem). Zaprezentowane tu wyniki wykorzystują specjalnie do tego celu wytworzone przez Pracownię Światłowodów UMCS w Lublinie włókna *side-hole* o eliptycznym rdzeniu  $6 \times 9,7$  mm i heksagonalnym płaszczu, które w procesie wytwarzania było skręcane z okresem w zakresie 5-200 mm. Uważam, że końcowy wynik pokazujący, że wzrost skręcenia zmniejsza czułość polarymetryczną na ciśnienie oraz odmienny kierunek tych zmian dla dwu modów polaryzacyjnych struktury jest znacznie mniej spektakularny niż miało to miejsce przy udowadnianiu dwu pierwszych też rozprawy. Jeśli tego typu dwójłomne włókno jest stosowane dla pomiaru polarymetrycznego, np. ciśnienia hydrostatycznego, to poszukiwane rozwiązanie powinno zwiększać a nie zmniejszać tą czułość. Tym samym śmiem twierdzić, iż teza ta jest nadmiarowa z punktu widzenia tematu rozprawy, jednakże doskonale wypełnia wymogi stypendium doktorskiego

NCN w granie Opus 18 - 2019/35/B/ST7/04135: „Wielordzeniowe światłowody specjalne o dużej dwójłomności do jednoczesnych wieloparametrowych pomiarów”.

Odnosząc się do strony redakcyjnej rozprawy stwierdzam, że jest ona na niezwykle wysokim poziomie edytorskim. Zastosowany język jest bardzo 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,
- razi mnie wyrażanie wartości liczbowych w których występują wartości potęgowe liczby dziesięć z mnożnikiem w postaci „x” zamiast „.” albowiem ten pierwszy stosuje się do wyrażenia mnożenia wektorowego,
- kolor szary na rys.2.1. strona 8 jest nierozróżnialny od czarnego,
- opis rysunków jako (a), (b), ..., powinien być poza obszarem samego wykresu – w obecnej formie, w różnych miejscach na danym rysunku, jest mało czytelny,
- na stronie 83 w pierwszym wierszu pod rysunkiem jest zdublowane słowo „strat”,
- na stronie 107 poz. [62] oraz stronie 115 poz. 4 ma niepoprawnie podane źródło, zamiast *Opt. Express* powinno być *Opt. Lett.*

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. Z przyjemności studiuję się zaprezentowaną w rozprawie metodykę przeprowadzania eksperymentu: jego zestawienie, fizyczne omówienie wyników, wsparte o przeprowadzane badania analityczne bądź symulacyjne, a zwłaszcza próby wytłumaczenia uzyskanych rozbieżności poprzez poszerzenie pierwotnie przyjętych założeń i ponowne badania symulacyjne – to niezwykle prawidłowy i godny naśladowania tok pracy naukowej. Tym samym z satysfakcją stwierdzam, że Doktorantka wykazała się odpowiednią wiedzą i umiejętnościami pretendującymi ją do uzyskania tytułu doktorskiego.

Jednocześnie studiowanie rozprawy nasuwa recenzentowi zbiór niżej zamieszczonych uwag dwójakiej 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. 1, trzecie zdanie – użycie w tym kontekście „interferometry [7, 8]” nie jest poprawne, albowiem światłowody nie są używane jako interferometry, gdyż w odróżnieniu od innych przykładów nie stanowią one same w sobie klasy rozwiązań;
- str. 5 piąte zdanie – użycie jako typu światłowodów „mikrostrukturalne i fotoniczne” jest niepoprawne, albowiem sugeruje, iż są to dwie oddzielne klasy włókien optycznych;
- str. 7 drugie zdanie poniżej wz. 2.1 cyt: „Efektywne współczynniki załamania oraz dwójłomność są w ogólności dyspersyjne” jest niepoprawne. Dwójłomność wynika z efektywnych współczynników załamania zatem powinno być nie „oraz” a „a stąd”;
- str. 57 ostatnie zdanie – powołanie na formalizm Jonesa jako [120] jest niepoprawne. Bardzo wysoko cenię sobie prace dr hab. A. Anuszkiewicz oraz prof. W. Urbańczyka, ale to nie oni są twórcami tego formalizmu. Prawidłowe powinno być odwołanie do pracy R. G. Jonesa „A new calculus for treatment of optical systems,” *J. Opt. Soc. Am.*, **31**, 488 (1941);

- stwierdzam, iż brak zdjęć układów pomiarowych dla kluczowych zastosowanych rozwiązań tzn. układów pokazanych na rysunkach: 4.3, 5.1, 6.3, 6.12, 8.3 jest jedynym mankamentem tej rozprawy;
- stwierdzam, iż stosowanie skrótów w nazewnictwie powinno być używane z dużą ostrożnością. Niewłaściwe jest podawanie na przykład w całym rozdziale 7: „włókna HCF” albowiem zgodnie z definicją skrótu HCF – pierwsze zdanie w rozdziale 7 jako ang. *helical-core fiber* oznacza to „włókno o spiralnym rdzeniu”.

Uwagi dyskusyjne:

- w pracy Doktorantka często przywołuje sformułowanie „wysoka czystość polaryzacyjna” – proszę rozszerzenie tego stwierdzenia, co Doktorantka rozumie pod tym stwierdzeniem;
- na stronie 7 w pierwszym akapicie Doktorantka stwierdza, iż „...perturbacje struktury światłowodu powodują, iż jego mody podstawowe mogą mieć różne stany polaryzacji (mogą być spolaryzowane liniowo, kołowo lub eliptycznie...”. Recenzent nie zgadza się z tym stwierdzeniem zatem prosi o jego potwierdzenie np. literaturowo;
- w rozdziale 3 przy symulacjach (podrozdział 3.2) przyjęto dwie długości fali: 1,00  $\mu\text{m}$  – włókno o spiralnym rdzeniu oraz 0,825  $\mu\text{m}$  włókno z centralnym rdzeniem oraz dwójłomnością naprężeniową. Proszę o szersze uzasadnienie tych długości w kontekście prezentowanych dalej rozwiązań aplikacyjnych;
- proszę o krótkie podsumowanie zalet i wad pompowania laserem nano- a femtosekundowym i dlaczego dla tego drugiego typu źródła połączenie włókien mikrostrukturalnego i PANDA w badanej strukturze było na kontakt.

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 2023 r. poz. 742 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 symulacyjnie, technologicznie oraz potwierdzone eksperymentalnie możliwość kontrolowanej konwersji modów podstawowych w grupę wybranych modów o zadanym rozkładzie przestrzennym i polaryzacyjnym. Stwierdzam, że jest to wzorcowo przeprowadzony tok „adaptacyjnych” badań naukowych, za co **wnoszę o wyróżnienie niniejszej rozprawy** oraz stawiam wniosek o jej przyjęcie jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie do publicznej obrony.

