



UNIwersytet  
Warszawski

Wydział Fizyki  
Instytut Geofizyki

Warszawa, 21.08.2024 r.

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Marty Weroniki Bernaś

***pt. „Kształtowanie właściwości transmisyjnych i czujnikowych światłowodów  
poprzez skręcenie”***

Podstawa formalna przygotowania niniejszej recenzji to pismo z zawiadomieniem o wyznaczeniu na recenzenta od Prorektora ds. Nauki Politechniki Wrocławskiej, Pana prof. dr. hab. inż. Andrzeja Ożyhara, z dnia 9 lipca 2024 r.

### 1. Zasadność podjęcia tematu i ocena rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej Pani mgr. Marty Weroniki Bernaś obejmuje propagację fal świetlnych, głównie w postaci modów pierwszego rzędu, w światłowodach skręconych. W takich światłowodach skręcenie rdzenia wzdłuż kierunku propagacji pociąga za sobą dodatkową (w porównaniu do światłowodów nieskręconych) zmianę wektora polaryzacji propagowanego modu. Ponadto, zmiana kąta skręcenia modyfikuje strukturę modów własnych światłowodu skręconego w sposób, który jest na ogół trudno osiągnąć w światłowodzie nieskręconym. Wśród modów tych do najciekawszych, zarówno poznawczo jak i aplikacyjnie, zalicza się wiry optyczne (mody wirowe). Generacja i charakteryzacja wirów optycznych to główny kontekst przedłożonej do recenzji rozprawy. Światłowody skręcone to bardzo wygodne narzędzia do generacji takich modów, ale brak zachowanej niezmienniczości po kierunku propagacji jest źródłem istotnej komplikacji opisu matematycznego tej propagacji, jak również technik pomiarowych służących do charakteryzacji generowanych modów.

W badaniach doktorantka podjęła się realizacji niemalże kompletnego zakresu prac niezbędnych do otrzymania wyników w postaci światłowodowych generatorów wiązek wirowych wraz z ich analizą teoretyczną. W praktyce z tego zakresu wyłączone były jedynie prace technologiczne związane z wytworzeniem używanych światłowodów (w postaci nieskręconej!). Przed doktorantką stało zatem bardzo ambitne zadanie badawcze, w którym musiała się wykazać opanowaniem bardzo wszechstronnego zestawu umiejętności, od operowania aparatem matematycznym do opisu propagacji w światłowodach skręconych, poprzez nieelastyczne skręcenie włókien światłowodowych w kontrolowany sposób, projektowanie i budowę układów eksperymentalnych do charakteryzacji konwersji modów własnych (światłowodów nieskręconych na mody światłowodów skręconych), przeprowadzenie eksperymentów, skończywszy na konfrontacji i analizie wyników teoretycznych i eksperymentalnych. Ponadto, wprowadzenie gradientu kąta skręcenia światłowodu po jego długości wraz z rygorystycznym i kompleksowym opisem formalnym zaobserwowanych eksperymentalnie zjawisk konwersji modów  $LP_{11}$  do modów typu  $HE_{21}$  lub  $quasi-TE_{01}$  (lub  $TM_{01}$ ) nadaje wykonanej pracy znaczny element nowości.

W pracy postawiono trzy tezy, dla dowiedzenia których doktorantka prowadziła badania opisane w trzech kolejnych częściach rozprawy. Teza pierwsza odnosi się do możliwości generacji modów wirowych w szczególności, a w ogólności do możliwości konwersji modów pierwszego rzędu w skręconych światłowodach dwójłomnych. Została ona udowodniona przez doktorantkę w toku badań opisanych w najobszerniejszej i najważniejszej moim zdaniem, pierwszej części rozprawy zawierającej wyniki badań własnych autorki. Tutaj doktorantka wykazała, że gradientowe skręcenie komercyjnego światłowodu PANDA prowadzi do adiabaticznej konwersji modów  $LP_{11}$  włókna nieskręconego do modów wirowych, które są modami własnymi włókna skręconego. Szczególnie ważnym osiągnięciem moim zdaniem, oprócz szczegółowego opisu sekwencji konwersji modów zależnej od ich uporządkowania pod względem efektywnego współczynnika załamania (we włóknie nieskręconym), było uzyskanie bardzo dużej czystości polaryzacyjnej i modowej przy zastosowaniu komercyjnego światłowodu, który był poddawany przez doktorantkę obróbce termicznej (skręcaniu nieelastycznemu). Obydwa te fakty (czystość polaryzacyjna i modowa oraz możliwość zastosowania komercyjnego

włókna) są szczególnie istotne z punktu widzenia zastosowań w dalszych badaniach, jak choćby w mikroskopii.

Dwie kolejne tezy rozprawy dotyczyły możliwości poprawy efektywności wprzęgania światła do światłowodów skręconych o spiralnym rdzeniu oraz możliwości kształtowania czułości na ciśnienie hydrostatyczne specjalnego wariantu światłowodów specjalnych tzw. side-hole, ale dodatkowo po ich skręceniu. Wyniki potwierdzające każdą z tych tez doktorantka zawarła w dwóch kolejnych, nieco bardziej zwięzłych częściach rozprawy. Należy podkreślić, że dowiedzenie każdej z tych tez wymagało zrealizowania w znacznym stopniu pierwszej części badań rozprawy, w szczególności opanowania opisu mechanizmów i zjawisk towarzyszących konwersji modowej w światłowodach skręconych.

## **2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Manuskrypt pracy zawiera 116 stron, nie licząc strony tytułowej i spisu treści, a cała treść została podzielona na 9 rozdziałów. Wyniki badań własnych autorka zawarła w rozdziałach 4-8. W pracy znajduje się 67 rysunków o kolejnej numeracji w każdym rozdziale.

Rozdział 1 zawiera wstęp, ogólny przegląd literatury tematu oraz umotywowanie podjęcia tematyki rozprawy. Tutaj ponadto zawarte są tezy pracy. Rozdziały 2 oraz 3 mają charakter wstępu merytorycznego do omawianych w pracy zagadnień, przy czym rozdział 2 poświęcony został omówieniu różnych rodzajów dwójłomności, w tym dwójłomności wywołanej skręceniem światłowodu. Rozdział 3 stanowi bardzo rozbudowane wprowadzenie do modelowania komputerowego propagacji fali elektromagnetycznej w światłowodach skręconych. Już na tym etapie, w ramach demonstracji działania wykorzystywanego modelu (opartego na formalizmie optyki transformacyjnej) doktorantka wykonuje obliczenia, które są wykorzystywane w dalszej części rozprawy, tzn. w badaniach własnych, w szczególności w rozdziałach 4, 5 oraz 7. Na uznanie zasługuje dbałość z jaką autorka przeprowadziła studia literaturowe, co umożliwiło później uwzględnienie szeregu zjawisk i czynników kształtujących właściwości propagacyjne światłowodów skręconych. Warto podkreślić, że nie są to informacje dostępne w jednym miejscu w literaturze.

Rozdziały 4 i 5 zawierają wyniki badań własnych doktorantki i jednocześnie są to wyniki, które pozwoliły na udowodnienie 1. tezy rozprawy. W rozdziale 4

doktorantka skupiła się na generacji wirów optycznych w światłowodach o gradientowym profilu skręcenia. Rozdział rozpoczyna się od zwięzłego przeglądu literatury ukierunkowanego ściśle na umotywowanie zakresu badań przedstawionego w tej części pracy. Jest to bardzo udany zabieg, ponieważ ułatwia skupienie się na elemencie nowości w wynikach własnych autorki. Opis badań rozpoczyna się od eksperymentu, w którym autorka samodzielnie przygotowała światłowody skręcone wykorzystując komercyjnie dostępne włókna jednomodowe typu PANDA (PM-GDF-6/125-M). Korzystając z wyników symulacji numerycznych z poprzedniego rozdziału, Pani mgr. Bernaś oczekiwała konwersji modów własnych w nieskręconym światłowodzie PANDA, po propagacji przez włókno skręcone, do modów własnych będących modami wirowymi, w czterech wariantach różniących się polaryzacją. Kryterium wyboru konwersji był rodzaj fali pobudzany na wejściu światłowodu skręconego. Pierwsze obserwacje eksperymentalne potwierdziły konwersję do każdego z oczekiwanych modów wirowych, lecz nie była zachowana kolejność konwersji taka jak w symulacjach opisanych w rozdziale 3. Dalsze badania w tej części pracy przybrały zatem sekwencję: (i) zrozumienie dynamiki konwersji modów (polaryzacja, skrętność, orbitalny moment pędu), (ii) postawienie hipotezy o przyczynie niezgodności eksperymentu z symulacją, (iii) obrona hipotezy poprzez uwzględnienie nowego efektu w symulacjach, (iv) pełny opis kolejności konwersji modów własnych włókna nieskręconego do modów wirowych włókna skręconego. Kolejno uwzględniane efekty w symulacjach to eliptyczność rdzenia komercyjnego, nieskręconego włókna PANDA, naprężenia tej struktury, naprężenia wbudowane do struktury na etapie skręcania oraz ich zmienność przestrzenna wokół rdzenia wynikająca z różnych współczynników rozszerzalności termicznej materiałów rdzenia i płaszcza światłowodu. Dopiero uwzględnienie po kolei wszystkich tych efektów w symulacjach umożliwiło odtworzenie sekwencji konwersji modów światłowodu PANDA do wirów optycznych z zachowaniem sekwencji takiej jak w eksperymencie. Dodatkowo, autorka zaobserwowała, że konwersja ta zachodzi z zachowaniem uporządkowania modów ze względu na wartość ich efektywnych współczynników załamania. Ponadto, symulacje numeryczne umożliwiły przyporządkowanie kolejnych uwzględnianych czynników związanych ze strukturą światłowodu zmianom wartości efektywnego współczynnika załamania propagowanych modów. W kontekście wykonanych symulacji numerycznych na szczególne uznanie zasługuje

kompleksowość opisu struktury światłowodu, która pozwoliła na odtworzenie za pomocą modelu matematycznego rzeczywistej, dość skomplikowanej dynamiki konwersji modowej w omawianych światłowodach. W przeprowadzonym eksperymencie wyróżnić należy osiągniętą bardzo dużą czystość polaryzacyjną i modową otrzymanych wirów optycznych. Z jednej strony jest to pochodną zastosowania wysokiej jakości światłowodu komercyjnego, lecz nie byłoby możliwe uzyskanie tak dobrych wyników bez dogłębnego zrozumienia dynamiki zjawisk kształtujących propagację w światłowodzie skręconym. To zaś pozwoliło doktorantce dobrać parametry procesu przygotowania włókna (skręcenia) oraz warunki eksperymentu (kontrola polaryzacji wejściowej) w taki sposób, aby osiągniętą czystość wygenerowanych wirów zademonstrować. Wyniki opisane w rozdziale 5 są kontynuacją i rozwinięciem pracy opisanej w poprzednim rozdziale. Tutaj doktorantka postawiła sobie za cel budowę całkowicie światłowodowego generatora wiązek wirowych. W tym celu Pani mgr. Bernaś na stopniu wejściowym układu zastosowała odpowiednio zaprojektowany światłowód fotoniczny, na wyjściu którego dysponowała modami LP11 o dużej czystości polaryzacyjnej i modowej. W pierwszej części rozdziału doktorantka skupiła się na opisie tego specjalnego światłowodu, jego projektowaniu, wytworzeniu (Laboratorium UMCS w Lublinie) oraz charakteryzacji. Włókno pracowało w kilku trybach zależnych od źródła laserowego. W trybie pobudzania superkontinuum nanosekundowym bardzo szeroki zakres długości fali (ok. 1000-1400 nm) był dostępny jednocześnie. W trybie pobudzania femtosekundowego możliwe były dwa warianty: praca przy niższej mocy pompy optycznej (mniejszej energii impulsów wejściowych do światłowodu), gdy dynamika nieliniowa oparta była głównie na zjawisku samoprzesunięcia częstotliwości solitonu oraz generacji superkontinuum przy większym poziomie mocy wejściowej (większej energii impulsów wejściowych). Ze względu na towarzyszące w tym ostatnim trybie zjawiska nieliniowe, tworzące niezwykle skomplikowaną dynamikę, nie było możliwe zachowanie czystości polaryzacyjnej co skłoniło doktorantkę do w pełni uzasadnionej rezygnacji z wykorzystania tego trybu pracy źródła do generacji wirów optycznych. Tryby pracy z impulsami nanosekundowymi oraz femtosekundowymi solitonami pozwoliły na wygenerowanie wirów optycznych o właściwościach odzwierciedlających pożądane cechy wirów opisanych w poprzednim rozdziale. Tutaj jednak konfiguracja układu była prostsza, bowiem całkowicie światłowodowa. Co

więcej, zakres spektralny pracy źródła wirów był znacznie szerszy niż w rozdziale 4 i pokrywał wspomniane 1000-1400 nm dla trybu nanosekundowego albo węższy zakres związany z szerokością spektralną solitonu, ale z możliwością jego przestrojenia (mocą lasera pompującego) w ww. zakresie spektralnym.

Rozdział 6 dotyczy specjalnej kategorii wirów optycznych, nazywanych cylindrycznymi wiązkami wektorowymi (cylindrical vector beams, CVB). W stanie wiedzy znane są przykłady ich generacji poprzez superpozycję „podwójnie ortogonalnych”, tzn. polaryzacyjnie i amplitudowo, modów  $LP_{11}$  w wolnej przestrzeni. Doktorantka podjęła się zadania przeniesienia generacji CVB do światłowodu. Zastosowane rozwiązanie polegało w pierwszym podejściu na zastosowaniu siatek długookresowych typu *rocking-filter* w dwumodowych światłowodach PANDA. W toku badań, Pani mgr. Bernaś po raz pierwszy zademonstrowała możliwość wykorzystania takich siatek do sprzęgania nie tylko modów podstawowych, ale również modów wyższych rzędów, w tym modów typu  $LP_{11}$ . Prace objęły zarówno zaprojektowanie i wytworzenie siatek, jak i eksperymenty związane ze sprzęganiem modów  $LP_{11}$  i ich charakteryzacją. Wydajna generacja wiązek CVB okazała się niełatwa, ponieważ doktorantka odkryła, że sprzężenie pomiędzy modami  $LP_{11}$  o ortogonalnych polaryzacjach oraz amplitudach jest o rząd wielkości słabsze niż pomiędzy modami „pojedynczo-ortogonalnymi” (np. o ortogonalnych amplitudach ale zgodnych polaryzacjach). Zaproponowane, nowatorskie rozwiązanie polegało na wykorzystaniu siatki *rocking-filter* do konwersji jednego z pobudzonych modów „pojedynczo-ortogonalnego” tak, aby na wyjściu światłowodu z zapisaną siatką otrzymać dwa mody „podwójnie-ortogonalne”. Superpozycja tych modów pozwoliła autorce na generację wiązek CVB typu  $TM_{01}$ ,  $TE_{01}$  oraz z grupy  $HE_{21}$ , zależnie od wprowadzonej różnicy faz pomiędzy wejściowymi modami  $LP_{11}$ . Generacja następowała w światłowodzie, tzn. bez użycia złożonego układu elementów optyki objętościowej, co jest istotnym osiągnięciem stanowiącym o nowości uzyskanych wyników. Ponadto, należy zwrócić uwagę z uznaniem na wysiłek, jaki autorka włożyła w zaprojektowanie i budowę układów eksperymentalnych do charakteryzacji wiązek CVB, co również zostało szczegółowo opisane w rozdziale 6.

Rozdział 7 zawiera wyniki badań autorki nad sposobami poprawy efektywności sprzężenia ze światłowodami o spiralnym rdzeniu. Treść rozdziału zawiera zwięzły przegląd stanu wiedzy motywujący kierunek prac autorki. Podejście

zaproponowane przez Panią mgr. Bernaś polegało na kontrolowanym odkręceniu światłowodu ze spiralnym rdzeniem co pozwalałoby na redukcję do zera kąta, pod jakim należy wprowadzać wiązkę do tego typu włókna z wolnej przestrzeni. W następstwie, możliwe byłoby spawanie takiego włókna. Doktorantka uzyskała poprawę wobec istniejącego stanu wiedzy – efektywność sprzężenia do 6% - o około rząd wielkości, tj. do 60%, co należy uznać za sukces. Co ważne, nie była to praca metodą prób i błędów, a metodyczne badania wsparte ponownie – zaawansowanym aparatem numerycznym. Należy zaznaczyć, że symulacje efektywności sprzężenia pomiędzy dwoma różnymi światłowodami nie należą do łatwych, zaś doktorantka dodatkowo podjęła się tych symulacji w szerokim zakresie widma (1200-1700 nm). Ocena zgodności przeprowadzonych symulacji z eksperymentem jest zadowalająca, tzn. dla większości parametrów procesu obróbki światłowodu o spiralnym rdzeniu (okres skręcenia na wejściu) zgodność symulacji z eksperymentem jest charakteru jakościowego lub lepsza. To co rodzi pytanie, to praktycznie brak jakiegokolwiek zgodności dla bardzo dużego okresu skręcenia (Rys. 7.6,  $\Lambda_0 = 10.44$  mm). Nie traktuję jednak tej kwestii jako umniejszającej znaczenie badań doktorantki.

W rozdziale 8 doktorantka opisała wyniki badań wpływu skręcenia (nieelastycznego) światłowodów typu side-hole na czułość na ciśnienie hydrostatyczne. Treść tego rozdziału rozpoczęta jest bardzo obszernym (w stosunku od objętości opisu badań własnych) przeglądem literatury oraz opisem metod pomiarowych. W żaden sposób nie umniejsza to wartości zaprezentowanych wyników, jakkolwiek może wskazywać, że badania przeprowadzone przez doktorantkę w tym wątku mają charakter pewnego wstępu do tematyki. Doktorantka odkryła, że czułość na ciśnienie badanej struktury światłowodowej maleje wraz ze skracaniem okresu skręcenia włókna, zaś maksymalna czułość charakteryzuje włókno nieskręcone. Wynik tej obserwacji kwestionuje co prawda zasadność wykorzystania skręconego włókna side-hole do bezpośredniego pomiaru ciśnienia, skoro włókno nieskręcone będzie działało lepiej. Jednakże doktorantka słusznie wskazała, że struktura o takiej właściwości, że czułość maleje wraz ze skracaniem okresu skręcenia, może posłużyć do pomiaru innych parametrów fizycznych w warunkach zmiennego ciśnienia hydrostatycznego. Sugestia taka prowokuje pytanie o przykładowy scenariusz pomiarowy i sposób kalibracji czujnika w odpowiedzi na

zmienne ciśnienie, co być może doktorantka mogłaby przedyskutować podczas swojego wystąpienia.

Rozprawę kończy rozdział 9, w którym autorka zawarła uwagi końcowe, w tym w szczególności ustosunkowanie się do tej pracy. Ta część nie budzi uwag a odniesienie się do tej jest każdorazowo jasne i potwierdza ich udowodnienie.

### 3. Uwagi do doktorantki

W mojej ocenie rozprawa została napisana nienagannie od strony edytorskiej. Nieliczne (natknąłem się na dosłownie kilka) „literówki” nie są na tyle istotne aby je wymieniać. Jedynym, drobnym wyjątkiem jest oczywista pomyłka w tytule czasopisma, w którym ukazał się pierwszo-autorski artykuł doktorantki pt. „Conversion of LP<sub>11</sub> modes to vortex modes in a gradually twisted highly birefringent optical fiber”, który zawiera wyniki najistotniejszego, w mojej ocenie, rozdziału 4 rozprawy. Tytuł czasopisma to *Optics Letters*, a nie *Optics Express* jak omyłkowo zapisano na stronach 107 i 115. Pozostałe dane bibliograficzne (w tym numery wydania i stron oraz rok) są jednak podane prawidłowo w manuskrypcie.

Jakość rysunków jest bardzo wysoka, również w wersji drukowanej. Nie mam zastrzeżeń do wielkości czcionki rysunków. Podpisy pod rysunkami są kompletne i wystarczające do rozeznania jakie informacje są przedstawiane na danym rysunku lub wykresie, np. schematy układów pomiarowych opatrzone są w podpisie pełną legendą. Informacje tekstowe lub liczbowe na obrazach SEM struktur światłowodowych zostały naniesione kontrastowym kolorem.

Mam kilka pytań do Pani mgr. Bernaś, które wynikają z mojej ciekawości badawczej raczej niż z zastrzeżeń do przedstawionej rozprawy.

1. Poziom domieszki GeO w rdzeniu włókna w rozdziale 3 założono na poziomie 23%. To dużo, czy mało, i dlaczego tyle założono w symulacjach?
2. Rozdział 4, strona 32: dlaczego analizowany kierunek skręcenia był  $A < 0$  i jakie ma to znaczenie dla danych zawartych w tabeli 4.2?
3. Dalej rozdział 4, strona 39: czy był kontrolowany i jak kontrolowano w eksperymencie kierunek skręcenia  $A < 0$  lub  $A > 0$ ?
4. Rozdział 5, strona 43: jaka jest matematyczna definicja efektywności pobudzania modów typu LP<sub>11</sub>?
5. W dalszym ciągu roz. 5, str. 47: efekt nieliniowej dwójłomności jest dość ciekawy, szkoda że w tym miejscu nie pojawiły się odniesienia do literatury w stanie wiedzy. Nie traktuję tego jako uchybienie umniejszające wartości pracy.
6. Czy nieliniową dwójłomność można by wykorzystać do powtarzalnego polepszenia PER w generatorze wiązek wirowych?



## Podsumowanie

Pani mgr. Marta Weronika Bernaś zrealizowała bardzo obszerny program badawczy. Zebranie wyników pozwalających na ustosunkowanie się do tez pracy wymagało opanowania i zastosowania umiejętności badawczych z bardzo różnych stron pracy naukowej: symulacji komputerowych, wymagających precyzji pomiarów złożonych stanów polaryzacji modów światłowodów specjalnych a także umiejętności inżynierskich związanych z bardzo precyzyjną obróbką cieplną delikatnych włókien światłowodowych. W trakcie badań, co widoczne jest w szczególności w rozdziale 4 i w zastosowanym podejściu „hipoteza-badanie-obrona-analiza” doktorantka dowiodła wysokiego poziomu samodzielności i dojrzałości naukowej.

W mojej ocenie rozprawa doktorska Pani mgr. Marty Weroniki Bernaś pt. „*Kształtowanie właściwości transmisyjnych i czujnikowych światłowodów poprzez skręcenie*” **spełnia z wyraźną nawiązką** zwyczajowe oraz ustawowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i stanowi podstawę do nadania stopnia naukowego doktora. **Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony.**

Uwagę zwraca fakt, że wyniki każdej z głównych części badań opisanych w rozprawie zostały opublikowane w postaci artykułów w periodykach recenzowanych *Optics Express* oraz *Optics Letters*. Jest to pięć publikacji, wśród których cztery to publikacje pierwszo-autorskie doktorantki. Wyniki najobszerniejszej i najważniejszej – w mojej ocenie – części rozprawy w rozdziale 4 opublikowano w czasopiśmie *Optics Letters* (M. Bernaś i in. *Optics Letters* 46, 4446) we wrześniu 2021 r. Publikacja była cytowana 8 razy przez zespoły badawcze niezwiązane bezpośrednio z grupą w której badania realizowała doktorantka. Mimo że taka ilość cytowań może być uznana za skromną, to biorąc pod uwagę datę publikacji, została ona zauważona w środowisku. Rygorystyczny opis matematyczny, zgodny z eksperymentem konwersji modów w światłowodzie skręconym, zawarty w rozdziale 4 i wypracowany w wyniku metodycznej sekwencji stawiania i obrony hipotez badawczych, jest nie tylko cennym przewodnikiem po dynamice modów w skomplikowanych strukturach światłowodowych. Może służyć jako wzorzec uporządkowanego i systematycznego sposobu prowadzenia badań podczas doktoratu. Po uwzględnieniu powyższych uwag, **wnioskuje o wyróżnienie rozprawy.**

*Mariusz Klimczak*