



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński

Wydział Fizyki

Uniwersytet Warszawski

Ul. Pasteura 5

02-093 Warszawa

e-mail: ryszard.buczynski@fuw.edu.pl

Tel. + 48 22 5532023

Recenzja

pracy doktorskiej

"Eksperymentalne badania wybranych procesów konwersji modowej w strukturyzowanych światłowodach"

mgr inż. Kingi Żołnacz

Rozprawa doktorska jest poświęcona eksperymentalnym badaniom mechanizmów liniowej i nieliniowej konwersji modów w światłowodach kilkumodowych. W ramach pracy Doktorantka badała nowe konstrukcje światłowodów ze skręceniem poosiowym, umożliwiające sprzężanie pomiędzy wybranymi modami przy wykorzystaniu światłowodów z dedykowaną strukturą wewnętrzną oraz pobudzania modów za pomocą wiązki strukturyzowanej, a także opracowała nowe metody selektywnego pobudzania wybranych modów i par modów we włóknach kilkumodowych. Praca powstała pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Wacława Urbańczyka w Katedrze Optyki i Fotoniki na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Obowiązki promotora pomocniczego pełnił dr Maciej Napiórkowski.

Optyka światłowodowa pozostaje od wielu lat jednym z dynamicznie rozwijających się działów optyki. Światłowody są ośrodkiem nie tylko transmitującym światło, ale także modyfikującym jego właściwości pod wpływem własnej struktury wewnętrznej, czynników zewnętrznych, a także samej prowadzonej wiązki świetlnej. Ze względu na silną lokalizację prowadzonej wiązki na długich odcinkach, możliwość kształtowania właściwości



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

dyspersyjnych i polaryzacyjnych ośrodka stanowią one ważny podmiot badań optyki nieliniowej. Szczególne właściwości propagacyjne dopuszczające propagację wiązek tylko o ściśle określonych parametrach powodują, że światłowody pełnią niezwykle istotną rolę w telekomunikacji i czujnikach. Rozwój optyki i dziedzin pokrewnych pociąga za sobą dynamiczny rozwój światłowodów i kształtowanie ich własności pod kątem określonych potrzeb, a rozwój technologii światłowodowych umożliwia realizację coraz bardziej złożonych struktur. Rosnące zapotrzebowanie na wyższą przepustowość łączy światłowodowych i rozwój czujników wieloparametrycznych spowodowało gwałtowny wzrost zainteresowania w ostatnich latach światłowodami kilkumodowymi, a w szczególności badaniami oddziaływań międzymodowych. Tematyka podejmowana przez mgr Kingę Żołnacz doskonale się wpisuje w ten aktualny trend światowych badań. Poruszane w rozprawie zagadnienia: konwersji modowej, transferu energii między modami i ich wpływ na charakterystyki wyjściowe światłowodów są obecnie podejmowane przez czołowe grupy badawcze. Synergia doskonałej technologii światłowodowej rozwijanej przez Pracownię Technologii Światłowodów na UMCS w Lublinie oraz umiejętności opracowywania nowych struktur światłowodów specjalnych oraz metod ich charakteryzacji rozwijane przez grupę badawczą prof. dr hab. Wacława Urbańczyka stworzyły Doktorantce możliwości prowadzenia prac badawczych na światowym poziomie. Pani mgr Kinga Żołnacz doskonale wykorzystwała te możliwości podejmując w niniejszej dysertacji trudne problemy badawcze i osiągnęła bardzo dobre wyniki przyczyniając się do rozwoju wiedzy w dziedzinie optyki światłowodowej. Prace podjęte przez Doktorantkę obejmowały badania konwersji modów w różnych typach światłowodów dwurdzeniowych i dwójłomnych, w tym mikrostrukturalnych. Badane światłowody posiadały unikalną cechę skręcenia struktury wzdłuż osi włókna, co umożliwiało otrzymanie dopasowania fazowego modów i efektywną konwersję modów. Ponadto badania obejmowały opracowanie nowych, oryginalnych metod selektywnego pobudzania pojedynczych oraz par modów, a także automatyzację stanowiska do pomiaru dyspersji chromatycznej i opracowanie nowych metod numerycznych do analizy interferogramów. Opracowanie tych narzędzi badawczych umożliwiło Doktorantce przeprowadzenie badań liniowych i nieliniowych konwersji modów, w tym m.in. zaobserwowanie wektorowych niestabilności modulacyjnych,



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

efektów modulacji dyspersji chromatycznej wywołanej zgięciem oraz generację modów wirowych.

Praca doktorska mgr inż. Kingi Żołnacz zawiera wyniki opublikowane w 8 artykułach naukowych w latach 2019 – 2022. Wszystkie artykuły zostały opublikowane w najbardziej renomowanych czasopismach z wysokim współczynnikiem IF w dziedzinie optyki indeksowanych przez Web of Science: 3 prace w *Optics Letters*, 2 w *Optics Express*, 2 w *Journal of Lightwave Technology* oraz 1 w *IEEE Photonics Journal*. Doktorantka jest pierwszym autorem w 5 publikacjach, oraz drugim w pozostałych 3, co świadczy o jej wiodącej roli w opublikowanych badaniach. Jest to imponujące osiągnięcie na tak wczesnym etapie kariery. Publikacje w powyższych czasopismach świadczą o tym, że tematy podejmowane przez Doktorantkę są aktualne, a osiągnięte wyniki wnoszą istotny wkład w rozwój stanu wiedzy w dziedzinie. Ponadto wyniki wchodzące w skład poniższej rozprawy doktorskiej były upowszechniane przez Doktorantkę w opublikowanym jednym komunikacie konferencyjnym (*Proc. of SPIE*) oraz 4 ustnych wystąpieniach na konferencjach międzynarodowych. Należy zwrócić uwagę, że praca pt. *Selective excitation of LP01 and LP11 polarization modes in a birefringent optical fiber using a Wollaston prism* zaprezentowana podczas jednej z największych konferencji optycznych w Europie *SPIE Photonics Europe*, w Strasbourgu w 2022 była referatem zaproszonym. Zaproszenie do wygłoszenia referatu na tak prestiżowej konferencji potwierdza znaczące osiągnięcia naukowe Doktorantki przedstawione w rozprawie.

Doktorantka jest także współautorką 4 innych prac niezwiązanych bezpośrednio z tematem doktoratu opublikowanych w latach 2017-2022 w renomowanych czasopismach z wysokimi współczynnikami IF w dziedzinie optyki oraz 3 innych wystąpień na konferencjach międzynarodowych. Dwie prace opublikowane w uznanych czasopismach *Appl. Phys. Rev* (IF= 19,527) oraz *Adv. Quantum Technol.* (IF=5,31) dotyczą źródeł jednofotonowych i ich zastosowania w telekomunikacji do dystrybucji klucza kwantowego. Powyższe publikacje świadczą o szerokiej wiedzy i wszechstronności Doktorantki oraz jej zaangażowaniu w szeroki nurt aktualnych badań, nie tylko ściśle związanych z tematyką doktoratu.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

Spośród publikacji związanych bezpośrednio z tematem doktoratu na szczególną uwagę zasługuje praca zatytułowana „*Conversion of LP11 modes to vortex modes in a gradually twisted highly birefringent optical fiber*” opublikowana w 2021 roku w *Optics Letters*. Praca zawiera ważne wyniki eksperymentalne dotyczące możliwości sterowanego pobudzenia modów o orbitalnym momencie pędu w wysoko dwójłomnym włóknie spiralnym ze zmianą skoku spirali. Praca zawiera oryginalną koncepcję pobudzania modów wirowych i doskonale wpisuje się w nurt dynamicznie rozwijającej się tematyki zastosowania multipleksji przestrzennej do rozwoju telekomunikacji światłowodowej wykorzystującej mody przenoszące orbitalny moment pędu. W ciągu 9 miesięcy, które upłynęły od jej opublikowania, publikacja była cytowana 4 razy, z czego dwa cytowania to cytowania obce. Świadczy to o jej zauważeniu przez środowisko naukowe i należy się spodziewać dalszego dynamicznego wzrostu cytowań w następnych latach.

Podsumowując wskaźniki bibliometryczne osiągnięte dotychczas przez Doktorantkę na podstawie bazy Web of Science należy zauważyć, że prace których jest współautorką były dotychczas cytowane 65 razy, z czego 57 stanowią cytowania obce. Współczynnik Hirscha osiągnięty przez Doktorantkę wynosi $H=4$. Biorąc pod uwagę krótki czas jaki upłynął od opublikowania prac oraz obecny etap rozwoju kariery, doczasowe osiągnięcia mgr inż. Kingi Żołnacza należy uznać za bardzo dobre, znacznie przewyższające typowe osiągnięcia młodych naukowców na etapie składania rozprawy doktorskiej w dziedzinie fotoniki i optyki światłowodowej.

Doktorantka postawiła w rozprawie doktorskiej 2 tezy dotyczące zastosowania strukturyzacji światłowodu oraz wiązki pobudzającej do konwersji modowej oraz selektywnego pobudzania wybranych modów wyższego rzędu i ich charakteryzacji. Obie tezy zostały systematycznie zbadane w ramach niniejszej pracy i pozytywnie zweryfikowane.

Praca doktorska mgr inż. Kingi Żołnacza składa się z 9 rozdziałów. Rozdział pierwszy stanowi formalny wstęp do pracy, motywację podjęcia tematu, tezy rozprawy oraz opis struktury pracy doktorskiej. Rozdziały 2-8 zawierają oryginalne wyniki badań Doktorantki upowszechnione w cyklu 8 publikacji, które można przyporządkować do poszczególnych



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

rozdziałów. Rozdział 9 zawiera krótkie podsumowanie przeprowadzonych prac badawczych i wykazanie osiągnięcia celów rozprawy doktorskiej.

Rozdział 2 przedstawia opis metody pomiarowej do wyznaczania szerokopasmowej dyspersji chromatycznej i grupowego współczynnika załamania dla światłowodów specjalnych zaimplementowanej i stosowanej przez Doktorantkę. Doktorantka zaimplementowała 2 znane metody interferometryczne pomiaru dyspersji chromatycznej światłowodów oparte na śledzeniu położenia prążka o maksymalnej szerokości („zerowego”) w serii interferogramów zarejestrowanych dla różnych długości ramienia referencyjnego oraz na odzyskiwaniu informacji o dyspersji chromatycznej z pojedynczego interferogramu na podstawie analizy minimów i maksimów prążków interferencyjnych. Opracowanie metody obejmowało zarówno budowę zautomatyzowanego stanowiska pomiarowego jak również implementację obu algorytmów do własnego zautomatyzowanego oprogramowania. Doktorantka opracowała własne metody aproksymacji krzywych i estymacji położenia środka prążka „zerowego” w interferogramach dostosowane do potrzeb wyznaczania krzywych dyspersji dla światłowodów specjalnych z wysoką dokładnością. Podobnie zastosowała własne rozwiązania do wyznaczania szerokości i położenia prążków interferencyjnych zapewniających prawidłowe wyniki w obecności szumów typowo występujących w interferometrach M-Z przeznaczonych do charakteryzacji krótkich odcinków światłowodów. Opracowany układ pomiarowy oraz programy obliczeniowe pozwalają na znaczące skrócenie czasu pomiaru pojedynczych włókien do kilkunastu minut. Przedstawione wyniki wskazują na dużą powtarzalność wyników w obecności statystycznych szumów w układzie pomiarowym oraz niewielkie błędy wyznaczania dyspersji chromatycznej rzędu 1% dla testów wykonanych dla znanych światłowodów komercyjnych. Wyniki prac przedstawionych w Rozdziale 2 zostały opublikowane w *Journal of Lightwave Technology* (IF= 4.439) w 2019 roku (Ref. [1]). Otrzymane wyniki świadczą o wysokich umiejętnościach Doktorantki w zakresie budowy układów pomiarowych oraz implementacji numerycznej algorytmów do analizy danych. Zakończona sukcesem budowa układu do analizy dyspersji jest kluczowa dla pozostałych prac badawczych przeprowadzonych w ramach rozprawy.



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

W rozdziale 3 Doktorantka przedstawiła 2 metody umożliwiające pobudzenie wybranych modów oraz par modów w światłowodzie przy wykorzystaniu światła strukturyzowanego. Pierwsza metoda wykorzystuje przestrzenny modulator światła. To podejście jest znane w literaturze, natomiast oryginalność implementacji polega na opracowaniu kilku predefiniowanych prostych wzorców fazowych wyświetlanych na przestrzennym modulatorze światła, które umożliwią wysoce selektywne pobudzenie jednego, wybranego modu. Doktorantka przeprowadziła wnikliwą analizę tolerancji błędów zaproponowanej metody pobudzania i wykazała jej wysoką odporność na błąd przesunięcia i kąt wprowadzania strukturyzowanej wiązki do rdzenia. Następnie metoda została zweryfikowana eksperymentalnie i wykazano jej wysoką efektywność do selektywnego pobudzania modów. Druga metoda jest oryginalnym osiągnięciem Doktorantki i opiera się na zastosowaniu pryzmatu Wollastona do pobudzania dowolnej pary modów w dwumodowym światłowodzie dwójłomnym. Metoda ta pozwala na jednoczesne pobudzenie wybranych par modów i nie ma ograniczeń związanych z mocą wprowadzanej wiązki, co odróżnia tę metodę od innych stosujących przestrzenne modulatory światła. Jej opracowanie umożliwiło Doktorantce zbadanie nieliniowej konwersji modów (w szczególności modów wyższych rzędów) przedstawione w Rozdziale 5. Wyniki badań przedstawionych w Rozdziale 3 zostały opublikowane w dwóch pracach opublikowanych w *Optics Express* (IF= 3.894) w 2021 i 2022 roku (Ref. [6,7]).

Rozdział 4 zawiera oryginalne wyniki badań generacji wektorowych niestabilności modulacyjnych w skręconych światłowodach dwójłomnych. Doktorantka przedstawiła analizę numeryczną zjawisk zachodzących w badanych włóknach przy zastosowaniu pary nieliniowych równań Schrodingera i wykazała wpływ struktury włókna, sposobu pobudzenia i mocy na generację, położenie i polaryzację pasm bocznych w badanych włóknach skręconych. Prace numeryczne zostały potwierdzone wynikami eksperymentalnymi przeprowadzonymi dla światłowodu dwójłomnego typu side-hole. Potwierdzono przewidzianą numerycznie zależność położenia i wartości wstęp bocznych widma od mocy wiązki i sposobu pobudzenia składowych polaryzacyjnych modu. Rozdział jest bardzo dobrze napisany, zawiera nowe wartościowe wyniki, ale brakuje w nim głębszej analizy wpływu oddziaływania pomiędzy



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

modami polaryzacyjnymi na generowane widmo. Analizę numeryczną zjawiska wektorowej niestabilności modulacyjnej przedstawiono w bardzo skondensowanej formie na rys. 4.3, natomiast bardzo interesująca byłby opisowa analiza zjawisk zachodzących podczas propagacji we włóknach o dużej dwójłomności grupowej. Wyniki prac zaprezentowanych w Rozdziale 4 zostały opublikowane w *IEEE Photonics Journal* (IF= 2.25) w 2021 roku (Ref. [4]).

W Rozdziale 5 Doktorantka przedstawiła wyniki badań eksperymentalnych wpływu nieliniowej konwersji modowej na generowane widma w światłowodach dwójłomnych typu Panda. Do pobudzania wybranych par modów zastosowano opracowany przed doktorantkę układ wykorzystujący pryzmat Wollastona umożliwiający pobudzenie pary wybranych modów. Przedstawione wyniki generacji widma z obecnością wstęg bocznych wskazują na występowanie efektu nieliniowego mieszania czterofalowego dla różnych par modów: modów różnych rzędów o tej samej polaryzacji i modów tego samego rzędu o różnych polaryzacjach m.in. modu podstawowego LP_{01} oraz modu wyższego LP_{11} o ortogonalnych polaryzacjach, oraz dwóch modów wyższego rzędu LP_{11} o tej samej polaryzacji i różnych rozkładach przestrzennych. Praca zawiera także zaobserwowane po raz pierwszy wyniki mieszania czterofalowego dla pobudzanych modów z różnych grup przestrzennych o ortogonalnych polaryzacjach. Najciekawsze wyniki dotyczą jednak konwersji modu LP_{11} do modu wirowego w skrzyżowanym włóknie PANDA o zmiennym okresie skręcenia włókna wzdłuż jego osi podłużnej. Przy zastosowaniu powyższego układu Doktorantka uzyskała konwersje pobudzonego selektywnie modu z grupy LP_{11} do modu wirowego o deklarowanej czystości modowej rzędu 20dB. Otrzymane wyniki są bardzo interesujące i posiadają duży potencjał praktyczny, natomiast w samej rozprawie brakuje istotnych szczegółów m.in. dotyczących włókna o gradientowym skręceniu, gdzie zastosowano metodę postprocessingu polegającą na podgrzewaniu włókna i skręcaniu. W szczególności brakuje informacji o układzie eksperymentalnym w jakim to wykonano oraz o powtarzalności procesu. Deklarowana zmierzona czystość modowa nie została poparta wynikami pomiarowymi ani opisem metody którą zastosowano. Deklarowana w opisie szerokopasmowe utrzymanie wiązki wirowej także nie zostało poparte wynikami pomiarowymi. Z rys. 5.8c wynika, że otrzymano wiązkę wirową o ładunku topologicznym 1, natomiast nie jest jasne czy zaproponowana metodą możliwe jest



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

Wydział Fizyki

otrzymanie wiązek o wyższych ładunkach topologicznych. Wyniki badań przedstawionych w Rozdziale 5 zostały opublikowane w dwóch pracach w *Optics Letters* (IF= 3.776) w 2021 i 2022 roku (Ref. [5,8]).

Rozdział 6 przedstawia wyniki badań oryginalnego włókna wielordzeniowego, w którym mody są zlokalizowane w strukturze skręconego włókna w obszarze niedomkniętych pierścieni utworzonych przez mikrootwory powietrzne w czystym szkle krzemionkowym. Rozdział zawiera opis teoretyczny działania światłowodu, badania numeryczne i eksperymentalne wpływu parametrów geometrycznych rezonatorów oraz okresu skręcenia włókna na jego charakterystyki transmisyjne i dyspersyjne oraz dwójłomność. Następnie włókno zostało wykorzystane do zademonstrowania czujnika przesunięcia, w którym wykorzystano jego czułość na straty zgięciowe. Rozpatrywana konstrukcja czujnika pozwala na otrzymywanie liniowej odpowiedzi w szerokim zakresie, a jego zakres i czułość mogą być modyfikowane przez liczbę kanałów powietrznych w rezonatorze, jego odległość od środka światłowodu oraz okres skręcenia włókna. Pozwala to na opracowanie szerokiej gamy czujników przy zastosowaniu opracowanej klasy światłowodów. Na szczególną uwagę zasługuje niezależność odpowiedzi od kierunku zgięcia, co pozwala na uproszczenie konstrukcji czujników przesuwu. Rozdział ten potwierdza unikalne właściwości światłowodów skręcanych oraz ich praktyczny potencjał do wykorzystania w układach czujnikowych. Wyniki badań przedstawionych w Rozdziale 6 zostały opublikowane w czasopiśmie *Journal of Lightwave Technology* (IF= 4.439) w 2020 roku (Ref. [3]).

W Rozdziale 7 Doktorantka rozważa włókna z rdzeniem utworzonym przez silnie domieszkowany rdzeń o podwyższonym współczynniku załamania oraz zmodyfikowany płaszcz utworzony przez niedomknięty pierścień złożony z 3 mikrootworów powietrznych. W tym przypadku rdzeń jest umieszczony na osi światłowodu a dodatkowym elementem modyfikującym strukturę jest skręcenie poosiowe włókna. Doktorantka w tej części pracy badała wpływ wielkości i kierunku zgięcia na charakterystyki dyspersyjne w obecności lub braku skłecenia włókna. Zaproponowana konstrukcja z otworami powietrznymi silnie modyfikuje charakterystyki dyspersyjne światłowodu umożliwiając otrzymanie niewielkiej płaskiej anomalnej dyspersji w szerokim pasmie bliskiej podczerwieni 1400 -2000 nm.



Dodatkowo Doktorantka wykazała, że poprzez zgięcia oraz wybór kierunku zgięcia charakterystyka dyspersyjna może być dynamicznie znacząco modyfikowana. Doktorantka wykorzystwała efekt sprzęgania modów kołowych w rozważanym włóknie do przestrajania solitonów w funkcji wypadkowej eliptyczności propagującego się modu. Przy zmianie eliptyczności wprowadzanej wiązki za pomocą obrotu ćwierćfalówki otrzymano przesunięcie solitonu w zakresie ponad 110 nm od 1760 nm do 1870 nm. Podobne efekty uzyskano przy zginaniu światłowodu ze zmiennym promieniem. Otrzymane wyniki są bardzo obiecujące, ze względu na prostotę metody oraz szeroki zakres przesuwania solitonów. Mogą one znaleźć zastosowanie do budowy przestrajalnych, całkowicie światłowodowych źródeł światła w średniej podczerwieni, dzięki zastosowaniu generacji parametrycznej z wykorzystaniem przestrajalnego solitonu.

W Rozdziale 8 Doktorantka rozważa kolejną oryginalną strukturę włókna dwurdzeniowego ze skręceniem poosiowym. Włókno posiada rdzeń centralny na osi włókna oraz niewielki rdzeń boczny poza osią w odległości umożliwiającej sprzęganie modów pomiędzy rdzeniami tylko w określonych warunkach. Skręcanie włókna podczas procesu wytwarzania powoduje utworzenie przez rdzeń boczny helisy otaczającej rdzeń centralny i powstanie efektywnej siatki długookresowej odpowiadającej za sprzęganie między modami. Doktorantka przedstawiła wyniki eksperymentalne charakteryzacji powyższych włókien i obecność pików rezonansowych odpowiadających sprzęganiu modu prowadzonego w rdzeniu centralnym z wytworzoną siatką długookresową. Wykazano, że położenie oraz wysokość pików rezonansowych zależy od okresu skręcenia włókna oraz parametrów geometrycznych światłowodu. Przedstawione w rozdziale 8 wyniki opisujące zjawiska rezonansu w badanych włóknach dwurdzeniowych mają moim zdaniem duży potencjał aplikacyjny, ponieważ omawiana konstrukcja jest bardzo obiecująca pod kątem zastosowań w przełącznikach światłowodowych, filtracji częstotliwościowej oraz czujnikach. Wyniki badań przedstawionych w Rozdziale 8 zostały opublikowane w *Optics Letters* (IF= 3.776) w 2020 roku (Ref. [2]).

Ostatni Rozdział 9 zawiera krótkie podsumowanie najważniejszych wyników przeprowadzonych prac badawczych i weryfikację tez rozprawy doktorskiej. Przeprowadzone



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

badania w pełni potwierdziły obie tezy rozprawy. Przedstawione wyniki eksperymentalne potwierdzają możliwość sterowania liniową i nieliniową konwersją modów we włóknach dwójłomnych i wielordzeniowych skręconych poosiowo, ze stałym i zmiennym okresem. Opracowane przez doktorantkę dwa układy ze strukturyzacją wiązki wprowadzanej umożliwiają selektywne pobudzania pojedynczych modów lub par modów we włóknach kilkumodowych.

Przedstawioną przez mgr inż. Kingę Żołnacz rozprawę doktorską oceniam bardzo wysoko. Praca zawiera nowe, wartościowe wyniki dotyczące liniowej i nieliniowej konwersji modów oraz metod ich pobudzania w światłowodach kilkumodowych. Zakres merytoryczny wykonanej pracy badawczej znacząco przekracza typowe rozmiary od rozprawy doktorskiej. Wyniki badań przedstawione w poszczególnych rozdziałach od 2 do 8 zostały opublikowane w oddzielnych publikacjach w bardzo dobrych czasopismach naukowych. Jednocześnie każdy rozdział stanowi odrębną zamkniętą całość, a większość z nich mogłaby być rozwinięta do oddzielnej rozprawy doktorskiej. Praca stanowi ważny element aktualnych badań światowych dotyczących badania mechanizmów sprzęgania międzymodowego opartego na zjawiskach liniowych i nieliniowych w światłowodach strukturyzowanych. Otrzymane wyniki wskazują na wiele możliwości wykorzystania badanych mechanizmów konwersji modowej w układach przełączników telekomunikacyjnych i czujnikowych, konwersji częstotliwości, a także do otrzymywania światła strukturyzowanego w zakresie rozkładu przestrzennego jego polaryzacji i natężenia.

Praca jest napisana bardzo starannie i czyta się ją z dużą przyjemnością. Nie zawiera ona żadnych istotnych błędów merytorycznych. Wszystkie analizy w rozprawie są poparte odniesieniami do właściwej literatury. Otrzymane wyniki są dogłębnie analizowane i ilustrowane rysunkami, które pozwalają na łatwe zrozumienie przedstawionej analizy i wniosków. Świadczy to o bardzo głębokiej wiedzy i zrozumieniu badanych zagadnień przez Doktorantkę. Praca jest także doskonale przygotowana pod względem edycyjnym i nie zawiera żadnych istotnych błędów. Jedynie mogę zwrócić uwagę na powtórzenie tej samej referencji pod numerami [79] i [107]. Pewną niedogodność stanowi niska czytelność niektórych rysunków zawierających wykresy, na których krzywe są wykreślone kolorami czarnym i



grantowym. Przy stosunkowo małych rysunkach stają się one trudne do analizy przez czytelnika np. Rys. 3.9, 3.13, 4.6, 4.7, 4.8.

W samej przedstawionej rozprawie doktorskiej zabrakło w niektórych rozdziałach precyzyjnego wskazanego wkładu własnego Doktorantki m.in. w rozdziałach 3, 4, 5.3. W szczególności w Rozdziale 3.2 brakuje informacji jaki jest wkład Doktorantki w prace związane z opracowaniem układu do pobudzania wybranej sekwencji modów przy zastosowaniu pryzmatu Wollastona? Czy jej rola obejmowała tylko wykonanie badań eksperymentalnych czy także miała udział w opracowaniu koncepcji metody? Samodzielne wykonanie przez Doktorantkę wszystkich prac eksperymentalnych i ich analiza nie budzi wątpliwości, natomiast jej wkład m.in. w postprocessing termiczny włókien PANDA przy ich skręcaniu, prace numeryczne, oraz w rozwój koncepcji algorytmów i metodologii prac badawczych nie wszędzie jest jasno zadeklarowany.

Pewnym niedostatkim Rozdziału 2 jest brak głębszej analizy dokładności pomiarów dyspersji, bezpośredniego porównania zalet i ograniczeń obu zaimplementowanych metod pomiarowych oraz brak porównania otrzymanywanych dokładności z układami publikowanymi przez inne grupy badawcze. W szczególności brak jest informacji o dokładności pomiarów dyspersji w zależności od jej bezwzględnych wartości. W rozdziale rozważane są tylko pomiary wartości dyspersji zbliżonej do 0 w zakresie $-40 - +20$ ps/nm/km. Brakuje informacji czy układ może być stosowany do pomiaru wyższych bezwzględnych wartości dyspersji i jaka jest oczekiwana wtedy dokładność pomiarów.

Opis stanu wiedzy w dziedzinie konwersji modowej został przedstawiony przez doktorantkę bardzo skrótowo, zawiera wszystkie informacje niezbędne do określenia oryginalnego wkładu, ale nie stanowi samodzielnej analizy stanu wiedzy. Ogólny opis stanu wiedzy znajduje się tylko w Rozdziale 1, a we wstępnych częściach kolejnych rozdziałów przedstawiono stan wiedzy wyłącznie w kontekście tematyki konkretnego rozdziału. Wymaga to od czytelnika dużej wiedzy pozyskanej z innych źródeł, aby docenić osiągnięcia badawcze Doktorantki. Taka struktura pracy jest trudniejsza do odbioru, ale podyktowana olbrzymim materiałem badawczym, który Doktorantka przedstawiła w rozprawie. Powyższa uwaga nie



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki

stanowi krytycznej uwagi, tylko komentarz do przyjętej przed Doktorantkę koncepcji rozprawy. Natomiast pewien niedosyt pozostawia lektura Rozdziału 9 podsumowującego badania. W tym rozdziale Doktorantka ograniczyła się do weryfikacji tez rozprawy i opisu najważniejszych wyników badań. Zabrakło analizy jak otrzymane wyniki mogą wpłynąć na rozwój dziedziny, propozycji dalszych badań i zastosowań konwersji modowej.

Powyższe uwagi dotyczą słabszych elementów przedstawionej pracy w subiektywnej ocenie recenzenta, ale nie podważają w żaden sposób mojej bardzo wysokiej oceny rozprawy doktorskiej jako całości oraz ważnych i oryginalnych osiągnięć badawczych Doktorantki. Bogactwo wyników przedstawionych przez Doktorantkę i wielość poruszonych aspektów konwersji modowej starczyłaby z pewnością na 3 dobre doktoraty.

Uzyskane wyniki stanowią oryginalny i istotny krok do lepszego zrozumienia konwersji modów, w szczególności w zakresie zjawisk nieliniowych i mogą prowadzić do opracowania nowych programowalnych źródeł światła strukturyzowanego oraz całkowicie światłowodowych źródeł przeznaczonych do parametrycznej generacji częstotliwości wykorzystującej procesy nieliniowe.

Mając na uwadze bardzo aktualną tematykę pracy, jej potencjał praktyczny oraz wysoki poziom naukowy rozprawy wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej magister Kingi Żołnacz. W szczególności na wyróżnienie zasługuje eksperymentalna demonstracja zastosowania modów polaryzacyjnych LP₁₁ generowanych w nieliniowym procesie wektorowej niestabilności modulacyjnej do otrzymywania modów wirowych w światłowodzie typu Panda z gradientowym skręceniem włókna. Do pobudzenia wybranej sekwencji modów został użyty oryginalny, opracowany przez Doktorantkę układ pozwalający na selektywne pobudzenie wybranej pary modów we włóknie umożliwiającą wprowadzenie wiązki o bardzo wysokiej mocy niemożliwej do uzyskania w typowych układach wykorzystujących przestrzenne modulatory światła. Powyższe osiągnięcie zostało opublikowane w 2 artykułach naukowych w uznanych czasopismach naukowych w dziedzinie optyki: Optics Letters w 2021 (ref. 5) oraz Optics Express w 2022 (Ref. 2).



UNIWERSYTET
WARSZAWSKI

Wydział Fizyki

Uważam, że przedstawiona rozprawa doktorska oraz dotychczasowy dorobek naukowy mgr inż. Kingi Żołnacz spełniają warunki przewidziane ustawą o tytułach i stopniach naukowych i mogą być podstawą do ubiegania się o stopień doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Warszawa, 10.07.2022

Prof. dr hab. inż. Ryszard Buczyński