



# Uniwersytet Warszawski

## Wydział Fizyki

ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa  
tel.: (022) 55 46 827, fax.: (022) 55 46 882  
e-mail: sekretariat@igf.fuw.edu.pl  
[www.igf.fuw.edu.pl](http://www.igf.fuw.edu.pl)

Prof. dr hab. Tomasz Szoplik  
[tszoplik@mimuw.edu.pl](mailto:tszoplik@mimuw.edu.pl)  
Tel: 0 22 55 46 822

Warszawa, 27 lipca 2016

**Recenzja**  
**pracy doktorskiej**  
**“Numeryczne badania właściwości skręconych i zgiętych światłowodów**  
**z wykorzystaniem formalizmu optyki transformacyjnej”**  
**mgra Macieja Napiórkowskiego**

Rozprawa doktorska p. Napiórkowskiego powstała pod opieką profesora Wacława Urbańczyka na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej. Badania były finansowane przez stypendium doktorskie Etiuda 2 przyznane przez Narodowe Centrum Nauki oraz przez Wrocławskie Centrum Badań EIT+ w ramach projektu NanoMat.

Rozprawa doktorska zawiera wyniki przedstawione w pięciu współautorskich artykułach opublikowanych w latach 2013-16 przez p. Napiórkowskiego i jego promotora. Dwie prace ukazały się w Optics Express (2013 i 2014, IF = 3,488), dwie w Journal of Optics (2016, IF = 2,059) i jedna w Optics Letters (2015, IF = 3,04). Poza artykułami wykorzystanymi w rozprawie p. Napiórkowski jest współautorem dwóch dalszych prac w Applied Optics i Journal of Optics.

Idea światłowodu ze skręconym rdzeniem pojawiła się niemal 20 lat temu [R. D. Birch, Fabrication, characterization of circularly birefringent helical fibers, Electronic Lett. **23**, 50-52 (1987)]. Wykonanie takiego włókna polega na wyciąganiu i jednoczesnym obrocie preformy z niecentralnie położonym rdzeniem. Sztuka polega na takim doborze temperatury grzałki, żeby rdzeń skręcał się wokół osi symetrii płaszczka a ściany płaszczka nie podlegały deformacji. Motywacja tych badań była dwojaka. Po pierwsze, chodziło Birchowi o uzyskanie włókna z dwójłomnością kołową przydatną w metrologii. A po drugie, chodziło o wykorzystanie takich jednomodowych włókien do wytwarzania laserów światłowodowych dużej mocy. Mianowicie, skręcony rdzeń zwiększa powierzchnię przekroju ośrodka aktywnego i pozwala na zgromadzenie w nim większej ilości energii, co prowadzi do większej energii generowanego impulsu bez przekraczania takiej gęstości mocy, która wywołuje zjawiska nieliniowe. W klasycznych laserach światłowodowych zwiększenie energii impulsu uzyskuje się przez pompowanie optyczne rdzenia domieszkowanego jonami metali ziem rzadkich (np. neodymem czy iterbem). Jednakże, stopień domieszkowania czystej krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ) jonami ziem rzadkich podlega chemicznemu ograniczeniu ( $0,7 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ) i zwiększyć go można na przykład w szklach fosforanowych i tellurowych na bazie  $\text{SiO}_2$ , gdzie jonami erbu i iterbu  $\text{Er}^{3+}$  i  $\text{Yb}^{3+}$  domieszkowane są tlenek fosforu ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) i tlenek telluru ( $\text{TeO}_2$ ).

Dwie istotne prace na temat światłowodów ze skręconym rdzeniem wykonano w University of Southampton [R. D. Birch, *Electronic Lett.* **23**, 50 (1987) oraz P. Wang, L. J. Cooper, J. K. Sahu, W. A. Clarkson, Efficient single-mode operation of a cladding-pumped ytterbium-doped helical-core fiber laser, *Opt. Lett.* **31**, 226-228 (2006)], mają one 34 i 64 cytowań, odpowiednio. W Polsce, w 2010 roku zespół prof. Dominika Dorosza z Politechniki Białostockiej wykonał światłowod o spiralnym rdzeniu ze szkła tlenkowo-fluorkowego na bazie SiO<sub>2</sub> domieszkowanego jonami Nd<sup>3+</sup> i Yb<sup>3+</sup> [Proc. SPIE **7721**, 77211B (2010)]. W wytworzonym włóknie skok spirali wynosił kilka milimetrów. Prof. Dominik Dorosz był również współautorem krótkiego artykułu przeglądowego na temat włókien o spiralnym rdzeniu [Przegląd Elektrotechniczny **85**, zeszyt 6 (2009)]. Ograniczone zainteresowanie taką formą włókien częściowo wynika z trudności technicznych napotykanych przy ich wytwarzaniu ale również z niepełnego rozumienia właściwości włókien ze skręconym rdzeniem.

Niniejsza rozprawa i składające się na nią publikacje pana Napiórkowskiego mogą sytuację radykalnie odmienić. Mianowicie, po raz pierwszy ściśle opisano takie właściwości światłowodów ze skręconym rdzeniem jak efektywny współczynnik załamania modu, polaryzację i profile natężenia oraz straty prowadzonego modu podstawowego i modów pierwszego rzędu. Opis zjawisk został uzyskany na podstawie symulacji numerycznych wykonanych metodami elementów skończonych i optyki transformacyjnej. Wcześniej, formalizm optyki transformacyjnej i metoda elementów skończonych były wykorzystane do opisu modów propagujących się w skręconych światłowodach fotonicznych [A. Nicolet, F. Zolla, S. Guenneau, Modelling of twisted optical waveguides with edge elements, *The European Physical Journal Applied Physics* **28**, 153-157 (2004)].

Rozprawę p. Napiórkowski zredagował bardzo starannie, co świadczy o jego głębokim rozumieniu optyki światłowodowej i stosowanych metod numerycznych. We Wprowadzeniu bardzo jasno przedstawił cel pracy i precyzyjnie wymienił swoje osiągnięcia. Zwrócił uwagę, że ścisły opis nieznanych wcześniej właściwości optycznych może wywołać prace doświadczalne prowadzące do nowych zastosowań w metrologii, telekomunikacji i w czujnikach. Szczególnie rozwój zastosowań w metrologii wydaje się przesądzony. Być może, nowy rodzaj czujników zbudowany z pokrytego nanowarstwą metalu włókna o spiralnym rdzeniu okaże się użyteczny w badaniach biologicznych.

Rozdział 2. poświęcony propagacji fal elektromagnetycznych w światłowodach streszcza wyjściowy stan wiedzy niezbędny do dalszych rozważań. W rozdziale 3. przedstawione są sposoby numerycznego modelowania propagacji światła we włóknach optycznych. Zastosowana metoda elementów skończonych pozwala na opis propagacji w trójwymiarowych strukturach o dowolnym rozkładzie współczynnika załamania. Zasady optyki transformacyjnej wynikają z niezmienniczości równań Maxwella względem zmiany układu współrzędnych. W ostatnich latach wykorzystanie optyki transformacyjnej stało się popularne przy projektowaniu wieloskładnikowych nanostruktur tworzących metamateriały.

Rozdział 4. dotyczy propagacji modów rdzeniowych we włóknie o spiralnym rdzeniu. Po raz pierwszy propagację w takim światłowodzie opisano metodą optyki transformacyjnej [62. M. Napiórkowski i W. Urbańczyk, Rigorous simulation of a helical core fiber by the use of transformation optics formalism, *Opt. Express* **22**, 23108 (2014)]. Celem rozważań było osiągnięcie pracy jednomodowej i niskiej tłumienności modu podstawowego przy zadanych współczynnikach załamania użytych materiałów i parametrach geometrycznych: promieniu rdzenia i przesunięciu środka rdzenia względem osi symetrii płaszcza. Podany został wzór na zgodny z intuicją wzrost średniej wartości efektywnego współczynnika załamania w wyniku zwiększenia współczynnika skręcenia (odwrotności skoku spirali). Wielkość współczynnika

skręcenia była kluczem do wyznaczenia dwójłomności kołowej, położenia środka modu względem osi symetrii płaszcza, ewolucji modów pierwszego rzędu, stanu polaryzacji modów i ich tłumienności. W tym rozdziale p. Napiórkowski przedstawił rezultaty swoich rachunków na tle wyników innych autorów i szczegółowo uzasadnił ich większą dokładność. Wyciągnął wnioski: 1°: duża efektywna średnica skręconego rdzenia przynosi wzrost dwójłomności kołowej, 2°: opracowany w rozprawie dokładny model wyznacza zupełnie inne zakresy jednomodowej i niskostratnej pracy włókna w funkcji skoku spirali niż podane przez innych autorów [32. Z. Jiang, J. R. Marciante, Mode-area scaling of helical-core, dual-clad fiber lasers and amplifiers using an improved bend-loss model, *J. Opt. Soc. Am. B*, **23**, 2051–2058 (2006)]. To ostatnie osiągnięcie może być decydujące dla przyszłych zastosowań.

Rozdział 5. dotyczy sprzężenia między modami rdzeniowymi i płaszczykowymi w światłowodach ze skręconym rdzeniem. Do tej pory sprzężenia w takich światłowodach badano metodą perturbacyjną, czyli zakładano że geometryczne modyfikacje tzn. skręcenie i odstępstwo od osiowości są bardzo małe. W rezultacie, wyniki takich symulacji były bardzo przybliżone. W ramach formalizmu optyki transformacyjnej p. Napiórkowski analizował sprzężenia modowe we włóknach z silnie przesuniętym spiralnym rdzeniem o przekroju kołowym i skoku spirali od 100 do 500  $\mu\text{m}$  [64. M. Napiórkowski i W. Urbańczyk, Coupling between core and cladding modes in a helical core fiber with large core offset, *J. Opt.* **18**, 055601 (2016)]. Druga analizowana odmiana skręconych światłowodów miała rdzeń eliptyczny skręcony wokół osi symetrii płaszcza ze skokiem spirali z przedziału 70 - 300  $\mu\text{m}$  [15. V. I. Kopp, V. M. Churikov, J. Singer, N. Chao, D. Neugroschl, A. Z. Genack, Chiral fiber gratings, *Science* **305**, 74-75 (2004)], [63. M. Napiórkowski i W. Urbańczyk, Rigorous simulations of coupling between core and cladding modes in a double-helix fiber, *Opt. Lett.* **40**, 3324-3327 (2015)].

Symulacje dotyczyły realistycznych struktur z rdzeniem o współczynniku załamania  $n_{co}=1,5$  i średnicy 2  $\mu\text{m}$ , co gwarantuje jednomodową propagację fali o długości 1550 nm, oraz płaszczem o  $n_{cl}=1,444$  o promieniach 7,5; 9 i 15  $\mu\text{m}$ . Przesunięcie rdzenia wynosiło 0,2; 3 i 6  $\mu\text{m}$ . We włóknach z rdzeniem eliptycznym stosunek wielkiej i małej osi elipsy wynosił 1,25 a jednomodowa propagacja była możliwa dla fal o długości z przedziału 700 do 1650 nm. Takie parametry włókien wybrano żeby móc porównać wyniki z rezultatami rachunków perturbacyjnych. W związku z tym nie mamy porównania strat we włóknach z silnie przesuniętym spiralnym rdzeniem o przekroju kołowym ze startami we włóknach z rdzeniem eliptycznym skręconym wokół osi symetrii płaszcza. Rysunki 5.7 i 5.9 pokazują straty modów podstawowych w funkcji długości fali i współczynnika skręcenia. Widoczne na nich ostre maksima strat modów podstawowych odpowiadają rezonansom sprzężeń z modami płaszczykowymi o dużej tłumienności. Straty rosną wraz z długością fali i współczynnikiem skręcenia. W rozdziale 5. Autor zbyt wiele miejsca poświęcił omawianiu nieprecyzyjnych wyników symulacji wykonanych przez innych autorów metodą perturbacyjną. Byłoby z pożytkiem skupić się na własnych wynikach i dokładnie zinterpretować otrzymane skomplikowane zależności przedstawione na wykresach 5.7 do 5.13.

Rozdział 6. jest poświęcony występowaniu rezonansowych plazmonów powierzchniowych (SPR) na granicy między otoczeniem a nanowarstwą metalu pokrywającą dielektryczne światłowody z skręconym rdzeniem [65. M. Napiórkowski i W. Urbańczyk, Surface plasmon resonance effect in helical core fibers, *J. Opt.* **18**, 085001 (2016)]. Analiza została przeprowadzona pod kątem ewentualnego wykorzystania takich struktur jako czujników substancji chemicznych i biologicznych o niskim stężeniu. Z całą pewnością p. Napiórkowski jest pierwszym, kto wykorzystuje do generacji pola zanikającego wokół metalizowanego włókna całkowite wewnętrzne odbicie wiązki prowadzonej w światłowodzie ze skręconym rdzeniem. Teoretyczne

stwierdzenie występowania rezonansowych strat spolaryzowanych kołowo modów podstawowych w dielektrycznych skręconych lub zgiętych światłowodach pokrytych nanowarstwą złota jest warunkiem koniecznym żeby móc myśleć o budowie czujnika na takim włóknie. Jednakże, mam wątpliwości co do ewentualnego zastosowania dielektrycznych światłowodów ze skręconym rdzeniem i z zewnętrzną nanowarstwą złota do detekcji substancji chemicznych i biologicznych o niskim stężeniu. Dobry czujnik plazmoniczny powinno cechować pole zanikające o dużym wzmocnieniu składowej elektrycznej (sprężone z oscylacjami elektronów w warstwie naskórkowej metalu) i duży zasięg pola ewanescentnego. Molekuła poszukiwanej substancji potrafi to pole ewanescentne rozproszyć i zamienić w falę biegnącą. Innymi słowy, zmiana przenikalności dielektrycznej otoczenia czujnika wywołuje wyprężanie się prowadzonego promieniowania o określonej częstotliwości na zewnątrz włókna, co znajduje odzwierciedlenie w dyskretnych, dużych stratach transmitowanego widma. Biorąc pod uwagę tłumienność wcześniej badanych modów płaszczowych można od razu zgadywać, że taka geometria będzie mniej wydajna od klasycznej konfiguracji Kretschmanna. Wszelako przewaga czujnika na zgiętym światłowodzie może wynikać z możliwości dotarcia nim do trudno dostępnych obszarów.

Czułość czujnika plazmonicznego jest zdefiniowana jako  $S_B = \frac{d\lambda_r}{dn_B}$ , czyli pochodna rezonansowej długości fali względem współczynnika załamania ośrodka będącego w kontakcie z powierzchnią czujnika. Jest to czułość objętościowa, co oznacza detekcję zmiany współczynnika załamania cieczy w odległości większej od głębokości wnikania plazmonu do dielektryka. Zwykle odpowiedź czujnika bada się mierząc zmianę położenia rezonansu pod wpływem cieczy o różnych współczynnikach załamania. Ma to znaczenie, ponieważ w przypadku detekcji molekuł ich rozmiar jest mniejszy lub znacznie mniejszy od głębokości wnikania i w efekcie czułość czujnika na adsorpcję molekuł może być znacznie niższa niż podawana czułość objętościowa. Np czułość najbardziej popularnych czujników SPR w układzie Kretschmanna z pryzmatem może być o rząd wielkości mniejsza dla cząstek o rozmiarze 10 nm w stosunku do czułości objętościowej. Ponadto wartości czułości mogą się znacznie różnić w zależności od długości fali. Ze względu na chemiczną stabilność i względnie małą absorpcyjność słuszne jest użycie złota jako pokrycia światłowodu.

Pan Napiórkowski podaje, że wyznaczona przez niego czułość czujnika na włóknie z nieskręconym lecz przesuniętym rdzeniem umieszczonym w środowisku wodnym ( $n = 1,33$ ), wynosi 1400 nm/RIU (refractive index unit). Informacji o czułości czujnika na włóknie ze skręconym i przesuniętym rdzeniem w pracy nie znalazłem. Klasyczne czujniki światłowodowe z bocznie polerowanym rdzeniem mają czułość objętościową sięgającą 3150 nm/RIU. Czujniki z przewężeniem rdzenia są jeszcze lepsze, według szacunku teoretycznego ich czułość może sięgać 15000 nm/RIU. Natomiast klasyczne czujniki oparte na rezonansie plazmonów powierzchniowych układzie Kretschmanna mają czułość od 1000 do 14000 nm/RIU w zakresie 600-1000nm. Tytułem uzupełnienia dodam, że w doświadczeniu z czujnikiem w postaci gęsto upakowanego lasu słupków uzyskano czułość objętościową 32000 nm/RIU dla długości fali 1,28  $\mu\text{m}$  [A. V. Kabashin, P. Evans, S. Pastkovsky, W. Hendren, G. A. Wurtz, R. Atkinson, R. Pollard, V. A. Podolskiy, A. V. Zayats, Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing, *Nature Materials* **8**, 867-871 (2009)].

Z przykrością zwracam uwagę na powtarzający się błąd językowy. Nie są poprawne konstrukcje: „laser zbudowany w oparciu o światłowód...” (str.33) oraz „zastosowano metodę symulacji opartą o mapowanie konforemne” (str. 80). Trzeba jednak przyznać, że częściej pojawiały się zwroty poprawne: „przybliżenie bazujące na optyce geometrycznej” (str. 11) oraz „metoda symulacji oparta na formalizmie optyki transformacyjnej...” (str. 79).

Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska p. Macieja Napiórkowskiego odpowiada warunkom określonym w artykule 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku a przewód doktorski jest prowadzony zgodnie z przepisami obowiązującymi od 1 października 2011 roku. Zatem rozprawa może być podstawą do ubiegania się o stopień doktora nauk fizycznych. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do obrony publicznej.

Trzeba przyznać, że zastosowanie formalizmu optyki transformacyjnej do modelowania włókien z dowolną geometrią spiralnego rdzenia lub rdzeniem zgiętym pod dużym kątem pozwoliło na uzyskanie wyników ważnych dla rozwoju optyki światłowodowej. Rozprawa doktorska mgra Macieja Napiórkowskiego opisuje nieznane wcześniej subtelne zjawiska propagacyjne w światłowodach ze skręconym rdzeniem. Jego opis odbiega znacznie od wyników otrzymanych metodą perturbacyjną, która nie zawodzi tylko w przypadku małego odstępstwa od idealnej geometrii włókna z centralnie położonym rdzeniem. Jestem przekonany, że rozprawa doktorska mgra Macieja Napiórkowskiego reprezentuje bardzo wysoki poziom naukowy, dlatego wnoszę o przyznanie mu doktoratu z wyróżnieniem.

Tomasz Szepiński