

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

Warszawa, 23 maja 2017 r.

D z i e k a n a t

Uprzejmie informuję, że na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych Politechniki Warszawskiej odbędzie się w dniu 13 czerwca 2017 r. publiczna obrona rozprawy doktorskiej

mgr inż. Konrada Markowskiego

temat: „Metody kształtowania właściwości spektralnych przewężanych struktur braggowskich wykazujących efekt Fabry-Perota”

promotor – dr hab. inż. Kazimierz Jędrzejewski z Politechniki Warszawskiej

promotor pomocniczy – dr inż. Tomasz Osuch z Politechniki Warszawskiej

recenzenci:

prof. dr hab. Tomasz Szoplik z Uniwersytetu Warszawskiego

prof. dr hab. inż. Zbigniew Jaroszewicz z Instytutu Łączności

Obrona odbędzie się w dniu 13 czerwca 2017 r. w sali 116 na Wydziale Elektroniki i Technik Informatycznych – Gmach im. Janusza Groszkowskiego, Warszawa, ul. Nowowiejska 15/19; początek godz. 11.00.

Po adresem: www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje zapewniony jest na stronie Wydziału dostęp do tekstów streszczenia rozprawy i recenzji, jak również do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Autor rozprawy: **mgr inż. Konrad Henryk Markowski**

Promotor: **dr hab. inż. Kazimierz Piotr Jędrzejewski**

Promotor Pomocniczy: **dr inż. Tomasz Przemysław Osuch**

Tytuł pracy: **Metody kształtowania właściwości spektralnych przewężanych struktur braggowskich wykazujących efekt Fabry-Perota**

Streszczenie

Niniejsza praca poświęcona jest badaniom nad efektem Fabry-Perota (F-P) występującym w siatkach wytworzonych na przewężeniach światłowodowych. W szczególności skoncentrowano się na dwóch zagadnieniach - opracowaniu rezonatora F-P na przewężeniu światłowodowym, oraz wykazaniu efektu samoopóźnienia minimalizującego oscylacje w charakterystyce opóźnienia grupowego wynikające z efektów F-P. Praca zawiera wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych.

W rozdziale 2 omówiono metody wytwarzania oraz typy światłowodowych siatek Bragga istotnych z punktu widzenia pracy. Rozdział 3 zawiera omówienie najważniejszych konstrukcji rezonatorów F-P oraz ich zastosowania czujnikowe. W rozdziale 4 przedstawiono metodę wykonywania rezonatora F-P na światłowodzie przewężonym, natomiast w rozdziale 5 zaproponowano konstrukcję siatki Bragga na przewężeniu o ujemnym nachyleniu charakterystyki opóźnienia grupowego dla fali elektromagnetycznej wprowadzanej od strony przewężenia. Ostatnią częścią opracowania jest podsumowanie i wskazanie kierunków dalszych badań.

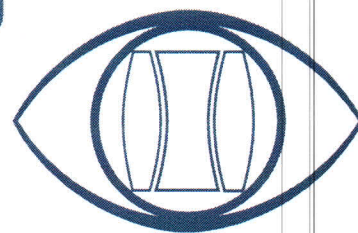
INSTYTUT OPTYKI STOSOWANEJ

im. prof. Maksymiliana Pluty

ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa

tel: +48 604 432 844
fax: +48 22 813 32 65
e-mail: galasj@inos.pl
<http://www.inos.pl>

KRS: 0000119363
REGON: 000035725
NIP: 525-000-87-90



INOS

Warszawa, dnia 28 kwietnia 2017 roku

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Jaroszewicz
Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Szachowa 1, 04-894 Warszawa
tel. 225128308
e-mail: mmtzjaroszewicz@post.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Konrada Henryka Markowskiego p.t. „Metody kształtowania właściwości spektralnych przewężanych struktur braggowskich wykazujących efekt Fabry-Perota”

Rozprawa doktorska p. mgr inż. Konrada Henryka Markowskiego p.t. "Metody kształtowania właściwości spektralnych przewężanych struktur braggowskich wykazujących efekt Fabry-Perota" zawiera, jak to już jej tytuł wskazuje, opis nowego rodzaju struktur dyfrakcyjnych, którymi są światłowodowe siatki Bragga wytwarzane na przewężeniach światłowodowych oraz analizę ich właściwości spektralnych. Dwa główne cele rozprawy stanowią opracowanie rezonatora Fabry-Perota opartego na proponowanym rozwiązaniu oraz analiza efektu samoapodyzacji pojawiającego się w analizowanej strukturze i wykazanie jego efektu przejawiającego się w zmniejszeniu niepożądanych oscylacji charakterystyki opóźnienia grupowego.

Zmiana efektywnego współczynnika załamania na skutek zmiany grubości światłowodu połączona ze zmiennym periodem siatki Bragga (tzw. chirpem) znajdującym się wewnątrz niej pozwala na większą swobodę projektowania i w konsekwencji na jej dostrajanie, tj. manipulację jej parametrami w zależności od przewidywanych zastosowań. Autor w swojej rozprawie w wyczerpujący i dokładny sposób analizuje wszystkie te możliwości, w pierwszej kolejności przeprowadzając symulacje numeryczne efektów działania proponowanych struktur, a następnie realizując je i dokonując eksperymentalnego

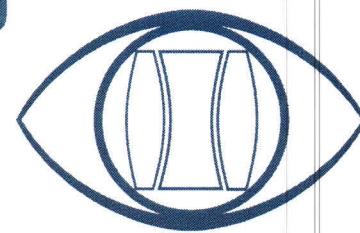
INSTYTUT OPTYKI STOSOWANEJ

im. prof. Maksymiliana Pluty

ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa

tel: +48 604 432 844
fax: +48 22 813 32 65
e-mail: galasi@inos.pl
<http://www.inos.pl>

KRS: 0000119363
REGON: 000035725
NIP: 525-000-87-90



INOS

sprawdzenia wyników przeprowadzonej wcześniej analizy.

Rozprawa liczy 71 stron i składa się ze streszczenia, sześciu rozdziałów, listy publikacji autora rozprawy i bibliografii liczącej 126 pozycji dotyczących zagadnienia rozważanego w rozprawie.

W pierwszym rozdziale będącym wstępem do rozprawy autor sytuuje swoją pracę na tle aktualnego stanu badań w dziedzinie światłowodowych siatek Bragga oraz przedstawia jej cele oraz tezy. Zgodnie ze słowami autora, celem pracy było „przeprowadzenie analizy możliwości konstruktywnego wykorzystania efektu Fabry-Perota w siatkach nanoszonych na włóknach przewężonych, jak również minimalizowania tego zjawiska, dla siatek dedykowanych do zastosowań telekomunikacyjnych.” Na podstawie tak ujętego celu pracy tezy, które autor miał zamiar dowieść w swojej rozprawie zostały sformułowane następująco:

„Istnieje możliwość wytworzenia na przewężonym odcinku włókna światłowodowego rezonatora Fabry-Perota, charakteryzującego się odmienną odpowiedzią na zmiany temperatury otoczenia i odkształcenie.

Efektom wprowadzenia promieniowania optycznego od strony przewężenia w strukturach braggowskich naniesionych na światłowodach przewężanych jest redukcja amplitudy oscylacji w charakterystyce opóźnienia grupowego (względem amplitudy oscylacji w charakterystyce opóźnienia grupowego dla promieniowania wprowadzanego od strony nieprzewężanej), nazywanym dalej efektem samoapodyzacji.”

Drugi rozdział zawiera wprowadzenie do tematyki poruszanej w rozprawie i zostają w nim przedstawione oraz opisane światłowodowe siatki Bragga, jak również podstawowe metody ich wytwarzania, tj. poprzez umieszczenie światłowodu, którego rdzeń jest domieszkowany germanem lub standardowego światłowodu poddanego technice ciśnieniowego wodorowania w polu interferencyjnym wytworzonym przez złożenie dwóch wiązek spójnego światła ultrafioletowego czy to bezpośrednio, czy to za pośrednictwem maski fazowej. Zwłaszcza ta druga technika oferuje możliwości kształtowania parametrów światłowodowej siatki Bragga poprzez wprowadzenie zmiennego okresu maski fazowej (chirpu) i zmiennej wysokości stopnia fazowego, czyli zmiany wydajności dyfrakcyjnej w funkcji położenia. Wprowadzenie chirpu daje możliwość modelowania charakterystyki dyspersyjnej siatki Bragga, a zmienna wydajność dyfrakcyjna pozwala na implementację funkcji apodyzacyjnej i wynikającą stąd możliwość zmniejszenia listków bocznych charakterystyki spektralnej siatki.

Dodatkowe efekty powoduje modyfikacja geometrii



Polska

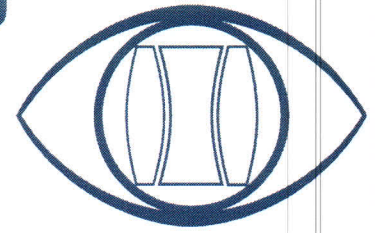
INSTYTUT OPTYKI STOSOWANEJ

im. prof. Maksymiliana Pluty

ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa

tel: +48 604 432 844
fax: +48 22 813 32 65
e-mail: galasi@inos.pl
<http://www.inos.pl>

KRS: 0000119363
REGON: 000035725
NIP: 525-000-87-90



INOS

włókna, czyli wykonanie siatki Bragga na odcinku przewężonego włókna optycznego. Z uwagi na to, że efektywny współczynnik załamania, a co za tym idzie, również długość fali Bragga, dla której ma miejsce odbicie zależą od poprzecznych rozmiarów, zyskuje się możliwość zmiany własności spektralnych takiej siatki. Naniesienie siatek ze zmiennym okresem na odcinku przewężonego włókna optycznego daje zatem dwojaką możliwość sterowania jej charakterystyką spektralną i prowadzi do dwóch nowych różnych struktur: ze zgodnymi chirpami oraz z przeciwnymi chirpami. W tym drugim przypadku, o ile oba chipy, jeden rzeczywisty, a drugi wynikający z przewężenia, kompensują się, możliwe jest uzyskanie dla siatek Bragga wykonanych na przewężeniach charakterystyki podobnej jak w przypadku siatek jednorodnych. Wziąwszy pod uwagę zmianę szerokości spektralnej siatki z przeciwnym chirpem po przyłożeniu do niej siły rozciągającej, stwarza to nowe możliwości zastosowań takich struktur jako czujników naprężeń.

Trzeci rozdział zawiera krótkie przypomnienie zasady działania interferometru Fabry'ego Perota w wersji klasycznej oraz opis obu jego wersji światłowodowych, z rezonatorem zewnętrznym i z rezonatorem wewnętrznym. Ten drugi rodzaj światłowodowego interferometru Fabry'ego Perota, gdzie rolę zwierciadeł pełnią światłowodowe siatki Bragga, stanowi punkt wyjścia do treści kolejnego, czwartego rozdziału, gdzie po raz pierwszy jest przedstawiona nowatorska konstrukcja rezonatora Fabry-Perota, zbudowanego z dwóch siatek Bragga naniesionych na przewężane termicznie włókno o liniowo zmiennej średnicy. Rozdział ten jest jednym z dwóch najważniejszych rozdziałów rozprawy i zawiera propozycję numerycznej analizy takiej konstrukcji opartej na notacji macierzy przejścia. Wspomniana analiza obejmowała także sprawdzenie podatności struktury (a zwłaszcza jej odpowiedzi spektralnej) na zmiany jej parametrów wynikające np. z wpływu naprężenia początkowego w trakcie procesu naświetlania struktury. W rozdziale zostały też omówione wyniki pomiarów przeprowadzonych na światłowodowym interferometrze Fabry'ego Perota wytworzonym w trakcie realizacji pracy. Wyniki pozwoliły na uznanie pierwszej tezy rozprawy za dowiedzioną – otrzymano światłowodowy rezonator Fabry-Perota, zbudowany z dwóch siatek Bragga naniesionych na przewężane termicznie włókno o liniowo zmiennej średnicy, którego odpowiedź spektralna była funkcją temperatury otoczenia struktury i wobec powyższego może on znaleźć zastosowanie jako czujnik temperatury.

Drugim najważniejszym rozdziałem rozprawy jest rozdział piąty, gdzie zostało omówione nowe zjawisko, możliwe do zaobserwowania w przypadku struktur o zmiennym okresie naniesionych na przewężane włókno o zmiennej średnicy, któremu ze względu na



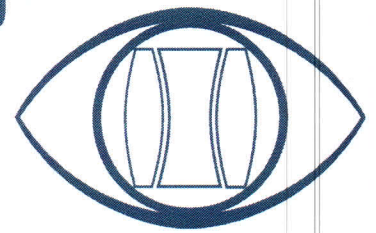
INSTYTUT OPTYKI STOSOWANEJ

im. prof. Maksymiliana Pluty

ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa

tel: +48 604 432 844
fax: +48 22 813 32 65
e-mail: galasi@inos.pl
<http://www.inos.pl>

KRS: 0000119363
REGON: 000035725
NIP: 525-000-87-90



INOS

jego naturę można nadać nazwę samoopodyzacji. Polega ono na zmniejszeniu poziomu oscylacji charakterystyki opóźnienia grupowego spowodowanego zmianą współczynnika sprężenia w funkcji długości siatki. Co więcej, będzie ono asymetryczne, tj. będzie zależało od kierunku wprowadzania promieniowania do takiej siatki. Rozdział piąty zawiera zarówno analizę numeryczną problemu, jak i wyniki eksperymentalne potwierdzające słuszność przyjętych założeń i stanowi tym samym potwierdzenie drugiej tezy rozprawy.

Podsumowanie zawiera omówienie zawartości całości kształtu rozprawy, wskazuje na możliwości zastosowań analizowanych w niej struktur oraz pokrótce omawia możliwości dalszych badań.

Nie mam uwag dotyczących układu pracy, bądź też sposobu potraktowania tematu. Na podkreślenie i uznanie zasługują opisy licznych procedur doświadczalnych i szeroki zakres prac eksperymentalnych, które były konieczne dla pomyślnej realizacji rozprawy. Sam problem podjęty w rozprawie uważam za ważny i mający istotne znaczenie zarówno teoretyczne, jak i praktyczne. To pierwsze, gdyż w pracy zostaje zapoczątkowana nowa dziedzina badań, jaką są światłowodowe siatki Bragga z chirpem wytwarzane na przewężeniach światłowodowych. Znaczenie praktyczne polega natomiast na opracowaniu nowych technik eksperymentalnych wytwarzania struktur będących przedmiotem rozprawy oraz ich metod pomiarowych, jak również ich potencjalne znaczenie dla dziedziny czujników światłowodowych. W mojej opinii tezy pracy zostały dowiedzione.

Autor w swoim dorobku posiada już jedenaście prac opublikowanych w wysoko punktowanych czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej i jedną czekającą jeszcze na ostateczną decyzję edytora.

Publikacje w czasopismach z listy filadelfijskiej:

1. K. Markowski, K. Jędrzejewski, M. Marzęcki, and T. Osuch, "Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry-Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement," *Opt. Lett.* **42**, 1464-1467 (2017).

2. M. Mądry, K. Markowski, K. Jędrzejewski, and E. Beres-Pawlik, "Power modulated temperature sensor with inscribed fibre Bragg gratings," *Opto-Electron. Rev.* **24**, 183-190 (2016).

3. K. Markowski, Ł. Chorchos, and J. P. Turkiewicz, "Influence of four-wave mixing in short- and medium-range 1310

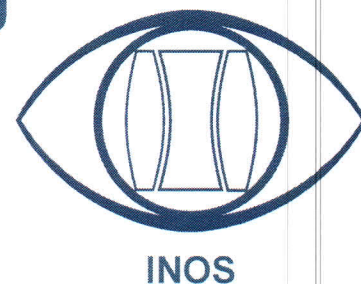
INSTYTUT OPTYKI STOSOWANEJ

im. prof. Maksymiliana Pluty

ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa

tel: +48 604 432 844
fax: +48 22 813 32 65
e-mail: galasi@inos.pl
<http://www.inos.pl>

KRS: 0000119363
REGON: 000035725
NIP: 525-000-87-90



nm dense wavelength division multiplexing systems,” *Appl. Opt.* **55**, 3051-3057 (2016).

4. T. Osuch, T. Jurek, K. Markowski, and K. Jedrzejewski, “Simultaneous Measurement of Liquid Level and Temperature Using Tilted Fiber Bragg Grating,” *IEEE Sens. J.* **16**, 1205-1209 (2016).

5. T. Osuch, K. Markowski, and K. Jedrzejewski, “Fiber-Optic Strain Sensors Based on Linearly Chirped Tapered Fiber Bragg Gratings With Tailored Intrinsic Chirp,” *IEEE Sens. J.* **16**, 7508-7514 (2016).

6. T. Osuch, K. Markowski, A. Manujło, and K. Jedrzejewski, “Coupling independent fiber optic tilt and temperature sensor based on chirped tapered fiber Bragg grating in double-pass configuration,” *Sensors Actuators A Phys.* **252**, 76-81 (2016).

7. K. Markowski, K. Jedrzejewski, and T. Osuch, “Numerical analysis of double chirp effect in tapered and linearly chirped fiber Bragg gratings,” *Appl. Opt.* **55**, 4505-4513 (2016).

8. T. Osuch, K. Markowski, and K. Jedrzejewski, “Numerical model of tapered fiber Bragg gratings for comprehensive analysis and optimization of their sensing and strain-induced tunable dispersion properties,” *Appl. Opt.* **54**, 5525-5533 (2015).

9. T. Osuch, K. Markowski, and K. Jedrzejewski, “Temperature Independent Tapered Fiber Bragg Grating-Based Inclinator,” *IEEE Photonics Technol. Lett.* **27**, 2312-2315 (2015).

10. T. Osuch, K. Markowski, P. Gąsior, and K. Jedrzejewski, “Quasi-Uniform Fiber Bragg Gratings,” *J. Light. Technol.* **33**, 4849-4856 (2015).

11. T. Osuch, P. Gąsior, K. Markowski, and K. Jedrzejewski, “Development of fiber Bragg gratings technology and their complex structures for sensing, telecommunications and microwave photonics applications,” *Bull. Polish Acad. Sci. Tech. Sci.* **62**, 627-633 (2014).

Wysłane do redakcji:

1. K. Markowski, K. Jedrzejewski, M. Słowikowski and T. Osuch, “Self-apodization effect in tapered fiber Bragg gratings,” *Opt. Lett.* (sent to Editor).

Ponadto na dorobek publikacyjny autora składa się jeszcze dziewięć publikacji zawartych w tomach materiałów konferencyjnych, z czego osiem publikacji ukazało się w tzw.



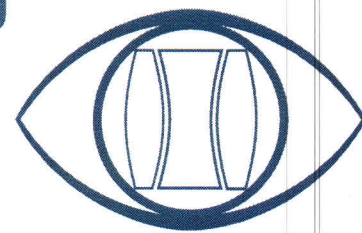
INSTYTUT OPTYKI STOSOWANEJ

im. prof. Maksymiliana Pluty

ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa

tel: +48 604 432 844
fax: +48 22 813 32 65
e-mail: galasi@inos.pl
<http://www.inos.pl>

KRS: 0000119363
REGON: 000035725
NIP: 525-000-87-90



INOS

żółtej serii Proc. Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., które również są uwzględniane na stronie Web of Knowledge.

Pozostałe publikacje:

1. M. Mądry, K. Markowski, K. Jędrzejewski, and E. Bereś-Pawlik, "Temperature monitoring system using correlated FBGs," Proc. of SPIE, **9634**, p. 963477 (2015).

2. K. Markowski, A. Perka, K. Jędrzejewski, and T. Osuch, "Custom FBGs inscription using modified phase mask method with precise micro- and nano-positioning," Proc. of SPIE, **10031**, p. 100311H (2016).

3. K. Markowski, S. Nevar, A. Dworzanski, K. Hackiewicz, and K. Jędrzejewski, "Fibre Bragg grating for flood embankment monitoring," Proc. of SPIE, **9290**, p. 92900W (2014).

4. M. Madry, K. Markowski, K. Jędrzejewski, and E. Beres-Pawlik, "Sensor monitoring system with embedded FBGs," in 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), 2014, pp. 1–4.

5. T. Osuch, D. Herman, K. Markowski, and K. Jędrzejewski, "Accelerated-aging tests of fiber Bragg gratings written in hydrogen loaded tapered optical fibers," Proc. of SPIE, **9228**, p. 922808 (2014).

6. T. Osuch, T. Kossek, and K. Markowski, "Impact of fiber ring laser configuration on detection capabilities in FBG based sensor systems," Proc. of SPIE, **9290**, p. 92900Y (2014).

7. K. Markowski and T. Osuch, "Numerical and experimental studies of dispersion characteristics of tapered fiber Bragg gratings under the influence of axial strain," Proc. of SPIE, **9228**, p. 92280T (2014).

8. K. Markowski and J. P. Turkiewicz, "Impact of the fibre characteristics on four-wave mixing in the 1310-nm wavelength domain," Proc. of SPIE, **9290**, p. 92900X (2014).

9. K. Markowski and P. Gąsior, "Inscription of the fibre Bragg gratings with femtosecond lasers," Proc. of SPIE, **9290**, p. 92900Z (2014).

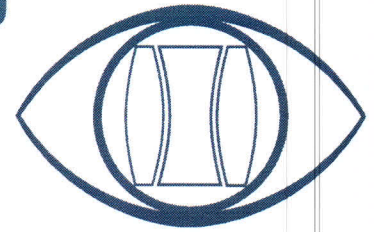
INSTYTUT OPTYKI STOSOWANEJ

im. prof. Maksymiliana Pluty

ul. Kamionkowska 18, 03-805 Warszawa

tel: +48 604 432 844
fax: +48 22 813 32 65
e-mail: galasj@inos.pl
<http://www.inos.pl>

KRS: 0000119363
REGON: 000035725
NIP: 525-000-87-90



INOS

Ilość cytowań prac p. mgr inż. Konrada Henryka Markowskiego wg bazy Web of Knowledge wynosi 56, w tym cytowań innych autorów 31, a indeks Hirscha jest równy 5. Najwyżej cytowana z prac, tj. Tomasz Osuch, Konrad Markowski, and Kazimierz Jędrzejewski, "Numerical model of tapered fiber Bragg gratings for comprehensive analysis and optimization of their sensing and strain-induced tunable dispersion properties," *Appl. Opt.* **54**, No. 17, 5525-5533 (2015) zebrała już 14 cytowań i to pomimo tego, że została opublikowana niedawno, bo w 2015 roku. Z kolei ogólnodostępna baza Scholar Google podaje liczbę wszystkich cytowań równą 93, a indeks Hirscha równy 6. Wspomniana poprzednio najwyżej cytowana praca jest wymieniana tu 16 razy.

Jest to wynik zdecydowanie powyżej średniej, a osiągnięcia i wyniki doktoranta bez zastrzeżeń należy uznać za imponujące. Wziąwszy ponadto pod uwagę rangę czasopism, w których ukazały się wyniki badań p. mgr inż. Konrada Henryka Markowskiego uważam, że wniosek o przyznanie autorowi rozprawy wyróżnienia jest w pełni uzasadniony.

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona mi do oceny rozprawa doktorska p. mgr inż. Konrada Henryka Markowskiego p.t. "Metody kształtowania właściwości spektralnych przewężanych struktur braggowskich wykazujących efekt Fabry-Perota" zawiera rozwiązanie oryginalnego problemu naukowego i tym samym spełnia wymogi ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2014 r. poz. 1852, z 2015 r. poz. 249.) i na tej podstawie wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony oraz o uznanie jej za wyróżniającą.

Zbigniew Jaroszewicz

Prof. dr hab. Tomasz Szoplík
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
tszoplík@mimuw.edu.pl
Tel: 0 22 55 46 822

Warszawa, 30 kwietnia 2017

**Kwestionariusz
Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych
Politechniki Warszawskiej**

Tytuł rozprawy: "Metody kształtowania właściwości spektralnych przewężanych struktur braggowskich wykazujących efekt Fabry-Perota"

Autor rozprawy: mgr inż. Konrad Henryk Markowski

(1)

Rozprawa dotyczy badania właściwości optycznych przewężonych światłowodów włóknistych, w których wysoce światłoczułym rdzeniu, dzięki domieszkowaniu germanem i wodoryzowaniu, zapisane są siatki Bragga. O właściwościach optycznych przewężanych struktur braggowskich decydują dwa zjawiska. Po pierwsze, w obrębie siatki Bragga zmodulowany jest współczynnik załamania rdzenia ($\Delta n \sim 10^{-4}$). Po drugie, efektywny współczynnik załamania światłowodu zależy od lokalnej średnicy włókna.

Pan Markowski wykonał tę pracę w Instytucie Systemów Elektronicznych Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych PW pod opieką dra hab. Kazimierza Piotra Jędrzejewskiego i we współpracy z promotorem pomocniczym dr inż. Tomaszem Przemysławem Osuchem. Rozprawa obejmuje wyniki symulacji numerycznych oraz doświadczeń.

W rozprawie mgr inż. Konrad H. Markowski dowiódł słuszności dwóch tez, a mianowicie twierdzi że:

- Istnieje możliwość wytworzenia na przewężonym odcinku włókna światłowodowego rezonatora Fabry-Perota, charakteryzującego się odmienną odpowiedzią na zmiany temperatury otoczenia i odkształcenie.
- Efektem wprowadzenia promieniowania optycznego od strony przewężenia w strukturach braggowskich naniesionych na światłowodach przewężanych jest redukcja amplitudy oscylacji w charakterystyce opóźnienia grupowego (względem amplitudy oscylacji w charakterystyce opóźnienia grupowego dla promieniowania wprowadzanego od strony nieprzewężanej), nazywanym dalej efektem samoapodyzacji.

Rozprawa dotyczy dwóch właściwości optycznych przewężonych światłowodów włóknistych, w których zapisane są zmienno-okresowe siatki Bragga, a mianowicie widma reflektancji i opóźnienia grupowego zależnych od rezonansu Fabry-Perot. Cytuję: „...celem pracy było przeprowadzenie analizy możliwości konstruktywnego wykorzystania efektu Fabry-Perota w siatkach nanoszonych na włóknach przewężonych, jak również minimalizowania tego zjawiska, dla siatek dedykowanych do zastosowań telekomunikacyjnych.” W wielu miejscach Autor pisze jednak o wykorzystaniu projektowanych odpowiedzi widmowych badanych struktur w czujnikach światłowodowych. Z tego względu brakuje mi

uzasadnienia tych rozważań i podania przewag termicznych czujników światłowodowych nad elektronicznymi w postaci termometrów oporowych lub termoparowych, które cechuje bardzo szeroki zakres pomiarowy.

Pan Markowski jest współautorem następujących 11 publikacji, z których pięć [4, 5, 6, 7, 8] jest bezpośrednio związane tematycznie z ocenianą rozprawą:

1. T. Osuch, P. Gąsior, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Development of fiber Bragg gratings technology and their complex structures for sensing, telecommunications and microwave photonics applications," *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 62(4), 627–633 (2014).
2. T. Osuch, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Temperature Independent Tapered Fiber Bragg Grating-Based Inclinator," *IEEE Photonics Technology Letters* 27(21), 2312–2315 (2015).
3. T. Osuch, K. Markowski, P. Gąsior, K. Jędrzejewski, "Quasi-Uniform Fiber Bragg Gratings," *Journal of Lightwave Technology* 33(23), 4849–4856 (2015).
4. T. Osuch, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Numerical model of tapered fiber Bragg gratings for comprehensive analysis and optimization of their sensing and strain-induced tunable dispersion properties," *Applied Optics* 54(17), 5525–5533 (2015).
5. T. Osuch, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Fiber-Optic Strain Sensors Based on Linearly Chirped Tapered Fiber Bragg Gratings With Tailored Intrinsic Chirp," *IEEE Sensors Journal* 16(20), 7508–7514 (2016).
6. T. Osuch, K. Markowski, A. Manujło, Jędrzejewski, "Coupling independent fiber optic tilt and temperature sensor based on chirped tapered fiber Bragg grating in double-pass configuration," *Sensors and Actuators A Physical* 252, 76–81 (2016).
7. K. Markowski, K. Jędrzejewski, T. Osuch, "Numerical analysis of double chirp effect in tapered and linearly chirped fiber Bragg gratings," *Applied Optics* 55(17), 4505–4513 (2016).
8. K. Markowski, K. Jędrzejewski, M. Marzęcki, T. Osuch, "Linearly chirped tapered fiber-Bragg-grating-based Fabry-Perot cavity and its application in simultaneous strain and temperature measurement," *Optics Letters* 42(7), 1464-1467 (2017).
9. M. Mądry, K. Markowski, K. Jędrzejewski, E. Beres-Pawlik, "Power modulated temperature sensor with inscribed fibre Bragg gratings," *Opto-Electronics Review* 24(4), 183–190 (2016).
10. T. Osuch, T. Jurek, K. Markowski, K. Jędrzejewski, "Simultaneous Measurement of Liquid Level and Temperature Using Tilted Fiber Bragg Grating," *IEEE Sensors Journal* 16(5), 1205–1209 (2016).
11. K. Markowski, Ł. Chorchos, J. P. Turkiewicz, "Influence of four-wave mixing in short- and medium-range 1310 nm dense wavelength division multiplexing systems," *Applied Optics* 55(11), 3051–3057 (2016).

Ponadto jest współautorem 8 komunikatów konferencyjnych opublikowanych w *Proceedings of SPIE*. Według Google Scholar, do dnia 30 kwietnia 2017, jego prace były cytowane 93 razy a indeks Hirscha wynosił 6.

(2)

Dobierając artykuły źródłowe w rozprawie Autor poświadczył swoją dobrą znajomość światowego stanu wiedzy w dziedzinie przewężanych włókien z zapisanymi siatkami Bragga. Drobnym niedostatkim rozprawy jest brak cytowania wczesnych prac ważnych dla badania charakterystyk widmowych siatek Bragga wykazujących zjawisko rezonansu Fabry-Perota zawartych w przewężeniu włókna:

- L. Quetel, L. Rivoallan, M. Morvan, M. Monerie, E. Delevaque, J.Y. Guilloux, J.F. Bayon, Chromatic Dispersion Compensation by Apodised Bragg Gratings within Controlled Tapered Fibers. *Optical Fiber Technology* 3(3), 267-271 (1997).
- J. Mora, A. Díez, M.V. Andrés, P.-Y. Fonjallaz, M. Popov, Tunable dispersion compensator based on a fiber Bragg grating written in a tapered fiber. *IEEE Photonics Technology Letters* 16(12), 2631-2633 (2004).

Obie te prace były wprawdzie poświęcone zastosowaniom telekomunikacyjnym, których rozprawa w zasadzie nie dotyczy. Ponadto w spisie literatury występuje praca

[62] J. Mora, J. Villatoro, A. Díez, J. L. Cruz, M. V. Andrés, "Tunable chirp in Bragg gratings written in tapered core fibers," *Opt. Commun.* 210(1-2), 51-55 (2002),

która nie jest przywoływana w tekście rozprawy, natomiast była cytowana w publikacjach p. Markowskiego [12, 16, 84].

W zwartym rozdziale drugim (str. 11-24) Autor rozprawy streścił stan wiedzy na temat siatek Bragga zapisanych w światłowodach. Omówił wykonywanie włókien ze szkła kwarcowego domieszkowanego germanem i wodoryzowanego w celu obniżenia tłumienności, niszczenie odpowiedzialnych za fotoczułość wiązań Ge-Si oraz Ge-Ge na skutek zapisu w szkłe pola interferencyjnego światła nadfioletowego i w rezultacie uzyskanie lokalnych modulacji współczynnika załamania ($\Delta n \sim 10^{-4}$). Pan Markowski używał lasera o pracy ciągłej o długości fali 244 nm, więc zapisywał siatki typu I, które zachowują kontrast modulacji w temperaturach poniżej 320 °C. We wzorze 2.2 na zmienną długość fali Bragga we włóknie pojawia się czynnik C_{PM} nazwany chirpem maski fazowej, Autor nie wyjaśnił, że jest to prędkość zmiany okresu siatki na jednostkę długości $C(z)$, która ma wymiar [nm/cm].

W podrozdziale 2.2.2 omawiane są bardzo istotne dla rozprawy dwa sposoby przewężania włókien z zapisaną siatką Bragga. Pierwszy, polega na podtrawianiu w kwasie fluorowodorowym tylko płaszcz włókna. Drugi, stosowany w Instytucie Systemów Elektronicznych polega na wyciąganiu termicznym, które prowadzi do pocieniania zarówno rdzenia jak i płaszcz. Gdy średnica rdzenia maleje, to mod podstawowy wnika głębiej w płaszcz. We włóknach pocienianych metodą termiczną odbicie od siatki Bragga jest gorsze niż w pierwszym przypadku, bo światło prowadzone w płaszczu nie ulega odbiciu. Żeby przewężenie włókna nie prowadziło do dużych strat transmisyjnych musi ono spełniać warunek adiabatyżności, co w praktyce oznacza, że kąt stożka przewężenia musi być dostatecznie mały. Zapobiega to przekazywaniu mocy modu podstawowego LP_{01} do modów wyższych rzędów, np. LP_{02} .

W końcowej części rozdziału 2. Autor przedstawił wyniki symulacji, potwierdzone wynikami eksperymentalnymi, widmowych charakterystyk reflektancji i opóźnienia grupowego, które pojawiają się we włóknach przewężonych z zapisaną zmiennie-okresową siatką Bragga w przypadku zerowego i niezerowego wydłużenia mierzonego w mikrostrainach [$\mu\epsilon$]. Zależne od przyłożonej siły ściskającej/rociągnącej odkształcenie liniowe ϵ jest granicą ilorazu skrócenia/wydłużenia ΔL do długości wyjściowej L , gdy odległość wyjściowa zmierza do zera.

Trzeci rozdział rozprawy (str. 25-31) sygnalizuje problem rezonansów Fabry-Perota obserwowanych w rezonatorach światłowodowych. Autor wymienił kilka realizacji światłowodowych rezonatorów zewnętrznych, w których pole interferencyjne jest zwykle uformowane w powietrzu i w rezultacie ich charakterystyka spektralna nie zależy od temperatury. Możliwych wersji światłowodowych rezonatorów wewnętrznych jest mnogość i Autor zwraca uwagę jedynie na kilkanaście realizacji z ostatniej dekady.

(3, 4)

W czwartym rozdziale (str. 32-48), który stanowi jądro rozprawy, Autor omówił działanie wewnętrznego rezonatora Fabry-Perota zawartego w termicznie przewężanym włóknie o liniowo zmiennej średnicy między dwiema zmiennie-okresowymi siatkami Bragga. Warto przypomnieć, że konstrukcja przewężanego włókna z zapisaną stało-okresową siatką Bragga po raz pierwszy pojawiła się 20 lat temu w nie cytowanej w rozprawie pracy L. Quetel, L. Rivoallan, M. Morvan, M. Monerie, E. Delevaque, J.Y.

Guilloux, J.F. Bayon, Chromatic Dispersion Compensation by Apodised Bragg Gratings within Controlled Tapered Fibers. *Optical Fiber Technology* 3(3), 267-271 (1997). Pan Markowski cytował tę pracę w swojej publikacji z roku 2015 [12].

We włóknie o liniowo zmiennej średnicy efektywny współczynnik załamania maleje wraz ze średnicą. Stało-okresowa siatka Bragga zapisana w obszarze o zmiennej średnicy włókna zachowuje się jak siatka zmienno-okresowa, w której (przy ustalonym okresie siatki) wraz ze średnicą maleje długość fali Bragga. W 2016 roku dr Osuch rozważał właściwości optyczne przewężanego włókna z zapisaną zmienno-okresową siatką, które zależą od kierunku propagacji modu w rdzeniu [13]. Oryginalny wkład p. Markowskiego polega na dokładnej symulacji tych właściwości [84], precyzyjnym wykonaniu takich struktur i doświadczalnym zbadaniu ich przydatności jako czujniki osiowo przyłożonych naprężeń [16] oraz temperatury. Pan Markowski stwierdził, że w przypadku nanoszenia siatek Bragga na włókna przewężane, możliwa jest kompensacja zmniejszania się długości fali Bragga wraz ze średnicą przewężenia dzięki wykorzystaniu zmienno-okresowej maski fazowej.

Żeby długości fali Bragga w obu siatkach były takie same trzeba dobrać okresy siatek do ich położenia na przewężonym włóknie. Dodatkowo, Autor rozprawy zaproponował wykorzystanie w zapisie rezonatora Fabry-Perot fazowych siatek zmienno-okresowych i ustawianie ich wzdłuż zwężenia na dwa sposoby. Umożliwia to zachowanie stałej długości fali Bragga wzdłuż rezonatora, odpowiedź widmowa struktury jest wówczas zbliżona do odpowiedzi siatki jednorodnej.

W oryginalnych eksperymentach Autor pokazał, że zmiany temperatury rezonatora nie wpływają na kształt charakterystyki widmowej reflektancji, zaś wzrost temperatury przesuwają widmo w stronę fal dłuższych. Wydłużenie struktury w wyniku przyłożonego do struktury naprężenia wywołuje poszerzenie charakterystyki widmowej reflektancji i rozdzielenie jej na dwa osobne maksima.

(5)

Ostatni rozdział (str. 49-59) Autor poświęcił badaniu możliwości kompensacji dyspersji widmowej w łączach światłowodowych. Opóźnienie grupowe siatki braggowskiej i oscylacje tego opóźnienia wyznacza się na podstawie argumentu θ_r , czyli fazy zespolonego współczynnika reflektancji siatki r . Funkcja opóźnienia grupowego τ_r siatki Bragga jest pochodną fazy θ_r po pulsacji ω sygnału: $\tau_r = d\theta_r/d\omega = -(\lambda^2/2\pi c) d\theta_r/d\lambda$, czyli jest funkcją długości fali. Na głębokość oscylacji opóźnienia grupowego można wpływać przez apodyzację, czyli kształtowanie obwiedni zmian efektywnego współczynnika załamania siatek Bragga. Ze względu na fakt występowania poszerzania się pola modowego w przewężonym włóknie - głębokość oscylacji opóźnienia grupowego zależy do kierunku wprowadzania wiązki światła do struktury. Autor rozprawy eksperymentalnie udowodnił istnienie efektu samoapodyzacji w siatkach Bragga zapisanych we włóknaach przewężonych. Dzięki tej obserwacji, p. Markowski pokazał, że możliwe jest uzyskanie redukcji oscylacji w charakterystyce opóźnienia grupowego oraz otrzymanie ujemnego nachylenia charakterystyki opóźnienia grupowego, bez potrzeby stosowania technologii apodyzowania siatki Bragga.

W jednostronicowym Podsumowaniu Autor rozprawy podkreślił, że

- dopracował technologię zapisu siatek Bragga we włóknaach o liniowo zmiennej średnicy;
- zbadał wpływ odkształcenia oraz zmian temperatury na odpowiedzi spektralne rezonatora Fabry-Perot zapisanego w przewężonym włóknie i dowiódł że struktura tego typu może służyć do jednoczesnego pomiaru odkształcenia i temperatury;
- w zmienno-okresowej siatce Bragga zapisanej we włóknie o zmiennej średnicy ograniczył do minimum oscylacje opóźnienia grupowego dzięki wprowadzeniu wiązki światła od strony przewężenia włókna, otrzymując jednocześnie ujemne nachylenie charakterystyki opóźnienia grupowego, co może być wykorzystane do kompensacji dyspersji w sieciach światłowodowych.

(6, 7)

W moim przekonaniu rozprawa mgra Markowskiego wysoki poziom naukowy i daje nadzieje na wykorzystanie jej w szeregu zastosowań, np. w światłowodowych czujnikach naprężeń i temperatury. Wielką zaletą rozprawy jest jej zwięzłość.

(8)

Uważam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra inż. Konrada Henryka Markowskiego 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. Proszę więc o dopuszczenie mgra inż. Konrada Markowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jestem przekonany, że dotychczasowy dorobek naukowy i wysoki poziom rozprawy świadczą o dojrzałości naukowej p. Markowskiego, dlatego wnoszę o przyznanie mgrowi inż. Konradowi Markowskiemu doktoratu z wyróżnieniem.

