

Autoreferat

1. Imię i nazwisko: Marcin Koba

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania:

2011 doktor nauk technicznych

dyscyplina: elektronika

praca pt.: "Model generacji promieniowania w laserach posiadających ośrodek aktywny w postaci kryształu fotonicznego"

promotor: prof. dr hab. inż. Paweł Szczepański

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

2006 magister inżynier

specjalność: optoelektronika

praca pt.: "Analiza pracy wielomodowej w laserach posiadających ośrodek aktywny w postaci kryształu fotonowego"

promotor: prof. dr hab. inż. Paweł Szczepański

Politechnika Warszawska, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych:

październik 2015 – obecnie

Politechnika Warszawska
(adiunkt naukowy)

styczeń 2009 – obecnie

Instytut Łączności – Państwowy Instytut Badawczy
(adiunkt)

lipiec 2013 – lipiec 2015

Université du Québec en Outaouais, Kanada
Photonics Research Center
(staż podoktorski)

czerwiec 2012 – czerwiec 2013

Politechnika Warszawska
(specjalista)

grudzień 2011 – czerwiec 2013

Uniwersytet Warszawski
(adiunkt naukowy)

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Jednotematyczny cykl publikacji zatytułowany:

Fotoniczne struktury periodyczne: modelowanie, technologie i aplikacje

b) publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego

Publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR (15):

- [A1] **M. Koba**, P. Szczepański, "The threshold mode structure analysis of the two-dimensional photonic crystal lasers," Progress In Electromagnetics Research (PIER), vol. 125, 365-389, 2012. **Wkład: 90 %**, **MNiSW: 25**, **IF: 1.229**.
- [A2] **M. Koba**, P. Szczepański, "Analysis of Mode Competition in a Two-Dimensional Square Lattice Photonic Crystal Laser with Transverse Magnetic Polarization," IEEE J. Quantum Electron., vol. 51, no. 10, 2015. **Wkład: 90 %**, **MNiSW: 30**, **IF: 1.887**.
- [A3] **M. Koba**, T. Osuch, P. Szczepański, "Threshold mode analysis of two-dimensional square and triangular lattice gain and index coupled photonic crystal lasers," IEEE J. Quantum Electron., vol. 50, no. 7, 554-562, 2014. **Wkład: 90 %**, **MNiSW: 30**, **IF: 1.887**.
- [A4] **M. Koba**, P. Szczepański, T. Osuch, "Nonlinear analysis of photonic crystal laser," Journal of Modern Optics, vol. 58, no. 17, 1538-1550, 2011. **Wkład: 90 %**, **MNiSW: 20**, **IF: 1.008**.
- [A5] **M. Koba**, J. Suffczyński, "Magneto-optical effects enhancement in DMS layers utilizing 1-D photonic crystal," Journal of Electromagnetic Waves and Applications, vol. 27, no. 6, 700-706, 2013. **Wkład: 50 %**, **MNiSW: 20**, **IF: 0.726**.
- [A6] **M. Koba**, J. Suffczyński, "Angle dependence of the photonic enhancement of the magneto-optical Kerr effect in DMS layers," EPL, vol. 108, no. 2, 27004 1-6, 2014. **Wkład: 50 %**, **MNiSW: 35**, **IF: 2.095**.
- [A7] M. Śmietana, **M. Koba**, P. Mikulic, W. J. Bock, "Tuning properties of long-period gratings by plasma post-processing of their diamond-like carbon nano-overlays," Measurement Science and Technology, vol. 25, no. 11, 114001 1-7, 2014. **Wkład: 40 %**, **MNiSW: 30**, **IF: 1.433**.
- [A8] M. Śmietana, **M. Koba**, P. Mikulic, W. J. Bock, "Measurements of reactive ion etching process effect using long-period fiber gratings," Optics Express, vol. 22, no. 5, 5986-5994, 2014. **Wkład: 40 %**, **MNiSW: 40**, **IF: 3.488**.
- [A9] M. Śmietana, **M. Koba**, P. Mikulic, R. Bogdanowicz, W. J. Bock, "Improved diamond-like carbon coating deposition uniformity on cylindrical sample by its suspension in RF PECVD

- chamber," *Physica Status Solidi A*, vol. 212, no. 11, 2496-2500, 2015. **Wkład: 40 %**, **MNiSW: 25**, **IF: 1.616**.
- [A10] M. Śmietana, **M. Koba**, P. Mikulic, W. J. Bock, "Combined plasma-based fiber etching and diamond-like carbon nano-overlay deposition for enhancing sensitivity of long-period gratings," *Journal of Lightwave Technology*, 2016. – Praca przyjęta do publikacji. **Wkład: 40 %**, **MNiSW: 35**, **IF: 2.965**.
- [A11] M. Smietana, **M. Koba**, E. Brzozowska, K. Krogulski, J. Nakonieczny, L. Wachnicki, P. Mikulic, M. Godlewski, W. J. Bock, "Label-free sensitivity of long-period gratings enhanced by atomic layer deposited TiO₂ nano-overlays," *Optics Express*, vol. 23, no. 7, 8441-8453, 2015. **Wkład: 20 %**, **MNiSW: 40**, **IF: 3.488**.
- [A12] E. Brzozowska, M. Śmietana, **M. Koba**, S. Górka, K. Pawlik, A. Gamian, W. J. Bock, "Recognition of bacterial lipopolysaccharide using bacteriophage-adhesin-coated long-period gratings," *Biosensors and Bioelectronics*, vol. 67, 93-99, 2015. **Wkład: 20 %**, **MNiSW: 40**, **IF: 6.409**.
- [A13] **M. Koba**, M. Śmietana, E. Brzozowska, S. Górka, P. Mikulic, W. J. Bock, "Reusable Bacteriophage Adhesin-coated Long-period Grating Sensor for Bacterial Lipopolysaccharide Recognition," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 33, no. 12, 2518-2523, 2015. **Wkład: 40 %**, **MNiSW: 35**, **IF: 2.965**.
- [A14] E. Brzozowska, **M. Koba**, M. Śmietana, S. Górka, M. Janik, A. Gamian, W. J. Bock, "Label-free Gram-negative bacteria detection using bacteriophage-adhesin-coated long-period gratings," *Biomedical Optics Express*, vol. 7, no. 3, 829-840, 2016. **Wkład: 20 %**, **MNiSW: 40**, **IF: 3.648**.
- [A15] **M. Koba**, M. Śmietana, E. Brzozowska, S. Górka, M. Janik, P. Mikulic, A. Cusano, W. J. Bock, "Bacteriophage Adhesin-Coated Long-Period Grating-Based Sensor: Bacteria Detection Specificity," *Journal of Lightwave Technology*, 2016. – Praca przyjęta do publikacji. **Wkład: 40 %**, **MNiSW: 35**, **IF: 2.965**.

c) pozostałe publikacje dokumentujące wskazane osiągnięcie naukowe

Publikacje w czasopismach pokonferencyjnych (6):

- [A16] M. J. Smietana, **M. Koba**, R. Rozycki-Bakon, "Stack of PECVD silicon nitride nano-films on optical fiber end-face for refractive index sensing," *Proc. of SPIE*, Vol. 9157, 91575F 1-4, 2014. **Wkład: 30 %**, **MNiSW: 10**.
- [A17] **M. Koba**, R. Rozycki-Bakon, P. Firek, M. Śmietana, "Sensing properties of periodic stack of nano-films deposited with various vapor-based techniques on optical fiber end-face," *Proc. of SPIE*, vol. 9655, 96550R 1-4, 2015. **Wkład: 30 %**, **MNiSW: 10**.

- [A18] D. Brabant, **M. Koba**, M. Śmietana, W. J. Bock, "Analysis of Mode Transitions in a Long-Period Fiber Grating with a Nano-Overlay of Diamond-Like Carbon," Proc. of SPIE, Vol. 9288 928810 1-8, 2014. **Wkład: 30 %**, **MNiSW: 10**.
- [A19] M. Śmietana, **M. Koba**, P. Mikulic, W. J. Bock, "Enhancing sensitivity of long-period gratings by combined fiber etching and diamond-like carbon nano-overlay deposition," Proc. of SPIE, vol. 9634 963456 1-4, 2015. **Wkład: 40 %**, **MNiSW: 10**.
- [A20] **M. Koba**, M. Śmietana, E. Brzozowska, S. Górską, P. Mikulic, W. J. Bock, "Bacteriophage adhesin-coated long-period gratings for bacterial lipopolysaccharide recognition," Proc. of SPIE, Vol. 9157, 915757 1-4, 2014. **Wkład: 40 %**. **MNiSW: 10**.
- [A21] **M. Koba**, M. Śmietana, E. Brzozowska, S. Górską, P. Mikulic, A. Cusano, W. J. Bock, "Detection specificity studies of bacteriophage adhesin-coated long-period grating-based biosensor," Proc. of SPIE, vol. 9634 963426 1-4, 2015. **Wkład: 30 %**, **MNiSW: 10**.

Rozdziały w książkach (2):

- [A22] **M. Koba**, rozdział: "Threshold Mode Structure of Square and Triangular Lattice Gain and Index Coupled Photonic Crystal Lasers" w książce **Advances in Photonic Crystals** (Vittorio M.N. Passaro), ISBN 978-953-51-0954-9, InTech, 2013. **Wkład: 100 %**
- [A23] **M. Koba**, P. Szczepański, rozdział: "Coupled Mode Theory of Photonic Crystal Lasers" w książce **Photonic Crystals - Introduction, Applications and Theory** (Alessandro Massaro), ISBN 978-953-51-0431-5, InTech 2012. **Wkład: 90 %**

Publikacje recenzowane (konferencje krajowe i zagraniczne) (24):

- [A24] **M. Koba**, T. Osuch, P. Szczepański, "Progowy model generacji promieniowania w laserach posiadających ośrodek aktywnej w postaci kryształu fotonicznego o symetrii kwadratowej," X Sympozjum Techniki Laserowej, Świnoujście, Polska, 24 – 28 września, 2012. **Wkład: 90 %**
- [A25] **M. Koba**, P. Szczepański, T. Osuch, T. Kossek, " Progowy model generacji promieniowania w laserach posiadających ośrodek aktywnej w postaci kryształu fotonicznego o symetrii kwadratowej i trójkątnej," XI Konferencja Naukowa Technologia Elektronowa, ELTE'2013, Ryn, Polska, 16 – 20 kwietnia, 2013. **Wkład: 80 %**
- [A26] **M. Koba**, P. Szczepański, "Analysis of a Spatial Hole Burning Effect in a Square and Triangular Lattice Photonic Crystal Laser," Jaszowiec 2011, Krynica-Zdrój, Polska, 26 czerwca – 1 lipca, 2011. **Wkład: 90 %**
- [A27] **M. Koba**, P. Szczepański, "A Threshold and an Above Threshold Analysis of a 2D Square and Triangular Lattice Photonic Crystal Laser," FiO/LS 2011 (Frontiers in Optics 2011/ Laser Science XXVII), San Jose, USA, 16 – 20 października, 2011. – Referat. **Wkład: 90 %**

- [A28] **M. Koba**, P. Szczepański, "Threshold and Above Threshold Analysis of Two-Dimensional Square Lattice Index and Gain Coupled Photonic Crystal Laser with Transverse Magnetic Polarization," OSA Nonlinear Photonics, Colorado Springs, USA, 17 – 21 czerwca, 2012. **Wkład: 90 %**
- [A29] **M. Koba**, P. Szczepański, "Modeling of light generation in 2-D photonic crystal lasers," BIT's 2nd Annual World Congress of Nano Sciences and Technologies 2012, Qingdao, Chiny, 25 – 28 października, 2012. – Referat zaproszony. **Wkład: 90 %**
- [A30] **M. Koba**, J. Suffczyński, "Influence of Distributed Bragg Reflector on the Magnitude of Magneto-Optical Kerr Effect in Dilute Magnetic Semiconductors," Jaszowiec 2012, Krynica-Zdrój, Polska, 8 – 15 lipca, 2012. **Wkład: 50 %**
- [A31] **M. Koba**, J. Suffczyński, "Magneto-Optical Effects in DMS Structures with 1-D Photonic Crystal," Joint European Magnetic Symposia (JEMS) 2012, Parma, Włochy, 9 – 14 września, 2012. **Wkład: 50 %**
- [A32] **M. Koba**, J. Suffczyński, "Fotoniczne wzmocnienie magnetoptycznego efektu Kerra w półprzewodnikach półmagnetycznych," XI Scientific Conference on Electron Technology, ELTE'2013, Ryn, Polska, 16 – 20 kwietnia, 2013. **Wkład: 50 %**
- [A33] **M. Koba**, J. Suffczyński, "Angle dependencies in photonic enhancement of magneto-optical Kerr effect in DMS," Jaszowiec 2013, Wisła, Polska, 22 – 27 czerwca, 2013. **Wkład: 50 %**
- [A34] **M. Koba**, J. Suffczyński, "Angle dependent photonic enhancement of Magneto-Optic Kerr Effect in DMS layers: (Ga,Fe)N case," Spintech VII International School and Conference, Chicago, Illinois USA, 29 lipca – 2 sierpnia, 2013. **Wkład: 50 %**
- [A35] M. Śmietana, **M. Koba**, R. Różycki-Bakon, "Stack of PECVD silicon nitride nano-films on optical fiber end-face for refractive index sensing," 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors OFS23, Santander (Cantabria), Hiszpania, 2 – 6 czerwca, 2014. **Wkład: 30 %**
- [A36] **M. Koba**, R. Różycki-Bakon, P. Firek, M. Śmietana "Sensing properties of periodic stack of nano-films deposited with various vapor-based techniques on optical fiber end-face," The 5th Asia Pacific Optical Sensors (APOS 2015), Jeju Island, Korea, 20 – 22 maja, 2015. – Referat. **Wkład: 30 %**
- [A37] D. Brabant, **M. Koba**, M. Śmietana and W. J. Bock, "Analysis of Mode Transitions in a Long-Period Fiber Grating with a Nano-Overlay of Diamond-Like Carbon," 16th Photonics North Conference, Montreal, Kanada, 28 – 30 maja, 2014. **Wkład: 40 %**
- [A38] M. Śmietana, **M. Koba**, S. Tripathi, P. Mikulic, W. J. Bock, "Improving sensing properties of the long-period gratings by reactive ion etching," The 7th International Conference on Sensing Technology, Wellington, Nowa Zelandia, 3 – 5 grudnia, 2013. **Wkład: 40 %**
- [A39] M. Śmietana, **M. Koba**, P. Mikulic, W. J. Bock "Enhancing sensitivity of long-period gratings by combined fiber etching and diamond-like carbon nano-overlay deposition,"

International Conference on Optical Fibre Sensors, OFS24, Kurytyba, Brazylia, 28 września – 2 października, 2015. **Wkład: 40 %**

[A40] M. Smietana, **M. Koba**, W. J. Bock, "Plasma-modified Optical Fiber Bio-sensors," 35th Progress In Electromagnetics Research Symposium, Guangzhou (Canton), Chiny, 25 – 28 sierpnia, 2014. – Referat zaproszony. **Wkład: 40 %**

[A41] M. Śmietana, **M. Koba**, P. Mikulic, R. Bogdanowicz, W. J. Bock, "Improved diamond-like carbon coating deposition uniformity by sample suspension in RF PECVD chamber," 20th International Hasselt Diamond Workshop on CVD diamond and other carbon materials, SBDD XX, Hasselt, Belgia, 25 – 27 lutego, 2015. **Wkład: 40 %**

[A42] E. Brzozowska, S. Górską, M. Śmietana, **M. Koba**, W. J. Bock, "Recognition of bacterial lipopolysaccharide using bacteriophage-adhesin-coated long-period gratings," 24th Anniversary World Congress on Biosensors, Melbourne, Australia, 27 – 30 maja, 2014. **Wkład: 10 %**

[A43] **M. Koba**, M. Śmietana, E. Brzozowska, S. Górską, P. Mikulic, W. J. Bock, "Bacteriophage adhesin-coated long-period gratings for bacterial lipopolysaccharide recognition," 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors OFS23, Santander (Cantabria), Hiszpania, 2 – 6 czerwca, 2014. **Wkład: 30 %**

[A44] E. Brzozowska, **M. Koba**, M. Śmietana, S. Górską, A. Gamian, W. J. Bock, "Escherichia coli bacteria detection using bacteriophage-adhesin-coated long-period gratings," 4th International Conference on Bio-Sensing Technology, Lizbona, Portugalia, 10 – 13 maja, 2015. **Wkład: 20 %**

[A45] **M. Koba**, M. Śmietana, E. Brzozowska, S. Górską, P. Mikulic, A. Cusano, W. J. Bock, "Detection specificity studies of bacteriophage adhesin-coated long-period grating-based biosensor," International Conference on Optical Fibre Sensors, OFS24, Kurytyba, Brazylia, 28 września – 2 października, 2015. – Referat. **Wkład: 30 %**

[A46] W. J. Bock, S. M. Tripathi, M. Smietana, **M. Koba**, "Long period grating biosensors," Photonics West 2015 - BIOS, San Francisco, USA, 7 – 12 lutego, 2015. – Zaproszona prezentacja "Keynote" wygłoszona przez W.J. Bock. **Wkład: 20 %**

d) omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.¹

Fotoniczne struktury periodyczne są przedmiotem badań już od końca XIX wieku. Lord Rayleigh [B1] zajmował się wówczas propagacją fali elektromagnetycznej w ośrodkach krystalicznych, tj. materiałach, w których można wyróżnić płaszczyzny tworzące strukturę przestrzennie okresową. Ze

¹ Organizacja odniesień literaturowych:

[A..] – pozycje autora po uzyskaniu stopnia doktora

[B..] – światowe pozycje literaturowe, kluczowe z punktu widzenia osiągnięcia

względem na przestrzenny charakter zmian ośrodka takie odpowiadają obecnie stosowanym w optyce i fotonice jednowymiarowym kryształom fonicznym (ang. photonic crystal, PhC, zależnie od zastosowań określane są również np. jako siatki dyfrakcyjne, czy też siatki lub zwierciadła Bragga). Rozważania Rayleigha obejmowały analizę własności odbiciowych i wykazały występowanie w badanym zakresie widmowym wąskiej przerwy zabraniającej światłu przechodzenia przez kolejne płaszczyzny kryształu. Odkryto więc właściwość pozwalającą na odbijanie promieniowania elektromagnetycznego, co z kolei pozwoliło na wytworzenie struktury będącej selektywnym spektralnie zwierciadłem. Elementy tego typu – w postaci siatek dyfrakcyjnych czy tzw. zwierciadeł braggowskich znalazły liczne zastosowania – wykorzystuje się je powszechnie w urządzeniach spektroskopowych, systemach laserowych bądź czujnikowych.

Intensywny rozwój badań w zakresie struktur periodycznych nastąpił jednak dopiero po opublikowaniu w roku 1987 prac Yablonovitcha [B2] i Johna [B3]. Łącząc klasyczne podejście do opisu rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w ośrodkach ciągłych z formalizmem dobrze już znanym z fizyki ciała stałego wprowadzili oni ideę dwu- i trójwymiarowego kryształu fonicznego. Skutkiem rozszerzenia wymiarowości zagadnienia struktur periodycznych był rozwój wielu późniejszych koncepcji, modeli teoretycznych i aplikacji w fonicznych układach objętościowych i światłowodowych oraz fotoniki zintegrowanej. Potencjalne zastosowania wielowymiarowych struktur periodycznych obejmują zarówno przyrządy pasywne jak i aktywne – w szczególności wykorzystuje się je jako zwierciadła [A5,A6,A16,A17], elementy modyfikujące rozkład modów co znajduje zastosowanie w strukturach czujnikowych [A7-A15,A18-A21], falowodowy i sprzężone wnęki falowodowe [B4,B5], mikrownęki foniczne [B6] oraz obszary aktywne [A1-A4,A22,A23].

Moja działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora skupiała się głównie na kontynuacji prac związanych z szeroko pojętymi fonicznymi strukturami periodycznymi. Prace te rozszerzyłem w stosunku do wcześniejszych, obejmujących niemalże wyłącznie struktury laserowe wykorzystujące dwuwymiarowy kryształ foniczny, o jednowymiarowe struktury objętościowe i światłowodowe. Prace związane z układami laserowymi to rozważania teoretyczne ukierunkowane na określenie wpływu zmian właściwości kryształu fonicznego, takich jak współczynnik załamania czy geometria, na parametry generacyjne struktury. Celem badań nad półprzewodnikowymi konstrukcjami jednowymiarowymi było zaprojektowanie technologicznie realizowalnego układu, który pozwoli na możliwie maksymalne wzmocnienie magnetoptycznego efektu Kerra. Natomiast prace nad periodycznymi strukturami światłowodowymi objęły badania teoretyczne i eksperymentalne układów czujnikowych prowadzące do zwiększenia ich czułości i funkcjonalności.

Przedstawione w dalszej części tego opracowania prace dokumentują badania oraz obrazują możliwości jakie daje wykorzystanie periodycznych struktur w elementach i układach fonicznych. Obejmują one trzy zasadnicze zagadnienia składające się na jednotematyczny cykl publikacji. Do rozważanych kwestii należą:

- dwuwymiarowe struktury periodyczne, w szczególności analiza wpływu parametrów dwuwymiarowego kryształu fonicznego na strukturę modową i obniżenie progu generacji w laserach;
- jednowymiarowe objętościowe struktury periodyczne, w szczególności analiza wzmocnienia magnetoptycznego efektu Kerra w półprzewodnikach półmagnetycznych poprzez wykorzystanie zwierciadła braggowskiego;
- światłowodowe struktury periodyczne, w szczególności analiza i wykorzystanie światłowodowych siatek długookresowych (ang. Long-Period Fiber Grating, LPFG) oraz siatek braggowskich wytworzonych na końcu włókna światłowodowego.

Głównym celem naukowym prezentowanego cyklu publikacji była taka adaptacja metod pół-analitycznych bazujących na teorii modów sprzężonych i/lub metodzie macierzy przejścia, która pozwoli na określenie odpowiedzi ośrodków periodycznych przy pobudzeniu falą elektromagnetyczną oraz, w konsekwencji, na opracowanie metod wytwarzania, modyfikacji i charakteryzacji czujników światłowodowych ze strukturami periodycznymi.

Dwuwymiarowe struktury periodyczne

Badania związane z dwuwymiarowymi strukturami periodycznymi są w głównej mierze kontynuacją zagadnień podejmowanych w rozprawie doktorskiej. Obejmują one analizę generacji promieniowania elektromagnetycznego w ośrodku, którego obszarem aktywnym jest kryształ foniczny o symetrii trójkątnej lub kwadratowej komórki elementarnej. Struktury tego typu są interesujące ze względu na możliwość generacji jednomodowej wiązki laserowej o małym kącie rozbieżności z dużej powierzchni. Dodatkowo polaryzacja i przekrój wiązki mogą być kontrolowane poprzez odpowiedni dobór parametrów struktury i kształt komórki elementarnej kryształu fonicznego [B7].

W zaprezentowanych w [A1] badaniach przedstawiłem szczegółową analizę struktury modowej na progu akcji laserowej. Zaprezentowane tam wyniki rozszerzają wcześniejsze doniesienia literatury światowej np. [B8] o dokładny opis ewolucji modu podczas zmiany kontrastu współczynników załamania w kryształach fonicznych stanowiących ośrodek aktywny lasera. Celem analizy pokazanej w [A1] jest określenie zmian w przestrzennym rozkładzie pola wywołanych zmianą różnicy współczynników załamania. Badania te objęły struktury o symetrii kwadratowej i trójkątnej, w których pod uwagę wzięto polaryzację TE i TM pola elektromagnetycznego. W modelu założyłem okresowe zmiany współczynnika załamania, uznając, że wzmocnienie jest równomiernie rozłożone w całej objętości badanego lasera. W celu przeprowadzenia obliczeń posłużyłem się teorią modów sprzężonych odpowiednio uogólniając ją dla struktur dwuwymiarowych. Otrzymane wyniki wykreśliłem jako zależność wzmocnienia progowego lub odstrojenia od częstości Bragga w funkcji współczynnika sprzężenia, oraz wzmocnienia progowego w funkcji odstrojenia od częstości Bragga. Poprzez analizę ewolucji modów o najniższej częstotliwości wskazałem tendencję struktury laserowej

do podtrzymywania oscylacji dla modów o polaryzacji TM w przypadku struktur o małym kontraście współczynników załamania. Tezę tę pośrednio potwierdziłem w pracy [A2], gdzie posługując się teorią półklasyczną dla modów TM przeanalizowałem zjawisko konkurencji międzymodowej w laserze fonicznym z kryształem o symetrii kwadratowej. W teorii półklasycznej falę elektromagnetyczną opisuje się w sposób klasyczny, natomiast odpowiedź ośrodka na zadane pobudzenie klasyczne wyraża się poprzez zależności kwantowo-mechaniczne. Wskutek samouzgodnienia pola pobudzającego z polem będącym wynikiem odpowiedzi ośrodka aktywnego wyprowadziłem równania ruchu dla badanego lasera. Obliczenia przeprowadziłem dla dwóch modów o najniższym wzmocnieniu progowym. Wyzaczyłem współczynniki wzmocnienia, samonasycenia i nasycenia międzymodowego. Praca [A2] przedstawia oryginalny model, który pozwala na przeprowadzenie analizy pracy wielomodowej, określenie warunków stabilnej pracy jednomodowej dla badanej struktury kryształu fonicznego o symetrii kwadratowej i podaje, w stosunku do wcześniej prezentowanych prac, np. [B9], dokładniejszą i bardziej wnikliwą interpretację zależności dla przypadku konkurencji dwóch modów. W swojej pracy wskazałem również na jednomodowość struktury laserowej w szerokim zakresie zmian różnicy współczynników załamania oraz zanik oscylacji o polaryzacji TM dla dużego kontrastu współczynników załamania. Badania te w dużej mierze znajdują potwierdzenie w doniesieniach literaturowych, które mówią o występowaniu jednomodowych oscylacji o polaryzacji TE i braku oscylacji o polaryzacji TM w strukturach o dużym kontraście współczynników załamania, np. [B10].

W kolejnej pracy [A3] rozszerzyłem badania zaprezentowane w [A1] na przypadek, w którym oprócz okresowej zmiany współczynnika załamania występuje periodyczna zmiana wzmocnienia. Ideę taką wstępnie zaproponowałem w komunikatach konferencyjnych [A24,A25] oraz w autorskim rozdziale książki [A22], w którym przeprowadzone są dokładne wyprowadzenia zależności oraz pokazane wstępne wyniki analizy wskazujące na praktyczną możliwość obniżenia progu generacji. Dokładniejszą analizę struktury modowej na progu generacji przedstawiłem w pracy [A3], w której zbadałem ewolucję modu o najniższej częstotliwości (w strukturze o periodycznym rozkładzie współczynnika załamania i wzmocnienia) i porównałem ją z wynikami dla struktury o periodycznym rozkładzie współczynnika załamania i jednorodnym wzmocnieniu. Wynik tych badań wskazał na znaczny wpływ okresowego wzmocnienia, które wywołuje obniżenie progu generacji i zmniejszenie odstrojenia od częstotliwości Bragga. W szczególności wykazałem, że możliwość obniżenia progu generacji dla struktur laserowych z ośrodkiem aktywnym w postaci kryształu fonicznego występuje w układach o małym kontraście współczynnika załamania. Badania struktur laserowych z dwuwymiarowym kryształem fonicznym, w których zarówno wzmocnienie jak i współczynnik załamania są okresowe, zgodnie z moją wiedzą nie były dotychczas analizowane i stanowią mój nowatorski wkład w rozwój teorii modów sprzężonych.

Bezpośrednią kontynuacją przytoczonych powyżej prac opisujących próg generacji jest analiza akcji laserowej ponad progiem generacji. W celu przeprowadzenia takiej analizy do równań opisujących

liniową akcję laserową wprowadziłem nieliniowe wzmocnienie, co w konsekwencji pozwoliło na wyrażenie małosygnalowego współczynnika wzmocnienia w funkcji współczynnika sprzężenia. Podstawą obliczeń były zależności wyprowadzone na progu generacji oraz zasada zachowania energii. Odpowiednie wyprowadzenia oraz wyniki obliczeń i ich interpretację przedstawiłem na konferencjach naukowych [A26,A27] oraz w pracy [A4] będącej podsumowaniem i uzupełnieniem tych badań. Praca [A4] wskazuje na występowanie minimów w krzywych opisujących małosygnalowy współczynnik wzmocnienia w funkcji współczynnika sprzężenia. Występowanie tych minimów, dla zadanej mocy wyjściowej, oznacza możliwość takiego doboru parametrów struktury, aby z maksymalną sprawnością rozpocząć akcję laserową. Minima te wskazują więc na optymalne energetycznie parametry struktury, tj. symetrię, współczynnik wypełnienia i sprzężenia.

Prowadzone badania, bazujące na przedstawionych w publikacjach [A3] i [A4] obliczeniach, wskazują również na możliwość obniżenia wartości małosygnalowego współczynnika wzmocnienia w całym zakresie badanych zmian różnicy współczynników załamania dla struktur o periodycznym wzmocnieniu [A28].

Prace pokazujące analizę akcji laserowej ponad progiem generacji w strukturach z dwuwymiarowym kryształem fonicznym bazujące na teorii modów sprzężonych stanowią istotny wkład w rozwój relatywnie szybkich obliczeniowych technik półanalitycznych i mogą być wykorzystane do projektowania takich układów.

Podsumowanie prac przedstawionych w [A4] i częściowo prac opisanych w [A1] wygłosiłem w ramach referatu zaproszonego na konferencji [A29] oraz zawarłem w rozdziale "Coupled Mode Theory of Photonic Crystal Lasers" książki pt. "Photonic Crystals - Introduction, Applications and Theory" [A23]. Należy również zauważyć, że część omówionych powyżej prac była wynikiem realizacji kierowanego przeze mnie projektu MNiSW Iuventus Plus.

Reasumując, do najważniejszych elementów mojego wkładu w zakresie prac nad dwuwymiarowymi strukturami periodycznymi należy zaliczyć:

- rozwinięcie metod obliczeniowych opartych na teorii modów sprzężonych do analizy zagadnień związanych z akcją laserową na progu i ponad progiem generacji w strukturach bazujących na dwuwymiarowym kryształe fonicznym o symetrii kwadratowej i trójkątnej;
- opracowanie modelu struktury laserowej pozwalającej na obniżenie progu generacji;
- opracowanie oryginalnego modelu półklasycznego i analiza konkurencji międzymodowej w laserze bazującym na kryształe fonicznym o symetrii kwadratowej, a w szczególności określenie warunków stabilnej pracy jednomodowej dla modów TM.

Jednowymiarowe objętościowe struktury periodyczne

Doświadczenie zdobyte przy modelowaniu dwuwymiarowych struktur periodycznych pozwoliło mi nawiązać współpracę z zespołem Zakładu Fizyki Ciała Stałego z Instytutu Fizyki Doświadczalnej (Wydział Fizyki) Uniwersytetu Warszawskiego (UW). W wyniku tej współpracy prowadziłem szereg badań teoretycznych i eksperymentalnych związanych z charakteryzacją struktur półprzewodnikowych. Jednym z podjętych zagadnień była tematyka wiążąca półprzewodnikowe struktury magnetyczne z periodycznymi strukturami fonicznymi. Podczas prowadzonych badań opracowałem model i przeanalizowałem działanie jednowymiarowego kryształu fonicznego sprzężonego z cienką warstwą półprzewodnika półmagnetycznego (ang. Diluted Magnetic Semiconductor, DMS). Struktury DMS są półprzewodnikami zawierającymi niewielkie domieszki metali przejściowych, np. Mn lub Fe. Wykazują one interesujące własności magnetyczne, elektryczne i optyczne, potencjalnie mogące znaleźć zastosowanie w urządzeniach do przetwarzania i przechowywania informacji. W przypadku badań struktur magnetycznych, w tym DMS, określa się stan namagnesowania próbki poprzez wykorzystanie magneto-optycznego efektu Kerra. Okazuje się, że w strukturach o bardzo małych i dużych koncentracjach domieszek sygnał jest zbyt słaby lub ulega zniekształceniu, a uzyskanie informacji o namagnesowaniu jest trudne lub niemożliwe.

W celu wzmocnienia sygnału magneto-optycznego efektu Kerra zaproponowałem połączenie warstwy DMS ze strukturą jednowymiarowego kryształu fonicznego, co przedstawiłem komunikatach konferencyjnych [A31,A32] oraz w pracy [A5]. W układzie takim warstwa półprzewodnika półmagnetycznego umieszczona jest na powierzchni zwierciadła Bragga złożonego z naprzemiennych warstw półprzewodnikowych o różnym współczynniku załamania. Struktura taka jest nowatorska i z sukcesem konkuruje z prezentowanymi w literaturze światowej rozwiązaniami, w których warstwa DMS znajduje się wewnątrz wnęki złożonej z dwóch zwierciadeł bragowskich lub jest ułożona pod zwierciadłem. Na potrzeby modelowania zaproponowanej struktury opracowałem model bazujący na metodzie macierzy przejścia (ang. Transfer Matrix Method, TMM), w której uwzględniłem charakterystyki dyspersyjne badanych półprzewodników. W modelu dyspersyjnym funkcji dielektrycznych uwzględniłem zależności opisujące stany ekscytonowe wyrażone poprzez ich polaryzowalność, częstość, szerokość linii i wkład od stanów niezwiązanych. W wyniku symulacji numerycznych analizie poddano skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła po odbiciu od badanej struktury i porównano te wyniki z odbiciem od struktury w której brak jest zwierciadła. W pracy [A5] zbadano prostopadłe padanie wiązki światła o długościach fal z zakresu ekscytonowego dla półprzewodników III-V i II-VI (tj. odpowiednio z zakresu bliskiego nadfioletu i bliskiej podczerwieni). Do modelowania użyto wartości liczbowych opisujących strukturę (Ga,Mn)N na zwierciadle $Al_{1-x}Ga_xN/Al_{1-y}Ga_yN$ dla półprzewodników III-V oraz strukturę (Cd,Mn)Te na zwierciadle $Cd_{1-x}Mg_xTe/Cd_{1-y}Mg_yTe$ dla półprzewodników II-VI. Wykazano, że zastosowanie odpowiednio zaprojektowanej struktury periodycznej pod cienką warstwą półprzewodnika domieszkowanego

jonami magnetycznymi kilkukrotnie wzmacnia efekty magneto-optyczne. Pokazane wzmocnienie sygnału ma bardzo istotne znaczenie dla badań namagnesowania struktur o dużych i małych koncentracjach domieszek. Praktyczna implementacja tej nowatorskiej na skalę światową konstrukcji może więc pozwolić na przewyższenie ograniczeń w zakresach pomiaru namagnesowania struktur DMS.

Kontynuacją przedstawionych w [A5] prac były badania wpływu zmiany kąta padania wiązki oraz zmiany grubości warstwy półprzewodnika półmagnetycznego na magneto-optyczny efekt Kerra. Badania przeprowadzono dla struktury bazującej na półprzewodniku III-V (GaN) z jonami żelaza [A6,A33,A34]. Topologia struktury odpowiadała tej badanej w artykule [A5]. Na potrzeby symulacji numerycznych rozwinąłem stosowany we wcześniejszych badaniach algorytm TMM tak, by możliwe było badanie odbicia od struktury wielowarstwowej (półprzewodnik półmagnetyczny/kryształ foniczny) dla różnych kątów padania wiązki o polaryzacjach TE i TM. W pracy [A6] wykazałem istotny wpływ ułożenia całej struktury (DMS/PhC) względem wiązki padającej oraz grubości warstwy półprzewodnika domieszkowanego jonami magnetycznymi na wzmocnienie efektów magneto-optycznych, w szczególności magneto-optycznego efektu Kerra. Pokazałem tam również, że odpowiednie ustawienie badanej struktury z warstwą półprzewodnika półmagnetycznego o zadanej grubości może doprowadzić do zwiększenia sygnału związanego z efektem Kerra nawet o rząd wielkości w stosunku do struktury pozbawionej zwierciadła. Tak jak pokazano to w pracy [A5], wynik taki jednoznacznie wskazuje na możliwość przewyższenia ograniczeń związanych ze skrajnymi zawartościami domieszek oraz dokładniejsze określenie poziomu namagnesowania struktury DMS.

Warto zwrócić uwagę, że zaproponowany model daje poprawne wyniki dla struktur bazujących na półprzewodnikach zarówno z grupy III-V jak i II-VI, oraz że w przedstawionych obliczeniach przyjęto takie własności struktur (skład, topologia, domieszkowanie i grubości) by możliwa była ich fizyczna realizacja.

Przedstawione badania były wynikiem uczestnictwa w projektach prowadzonych na Wydziale Fizyki UW, między innymi w ramach projektu LIDER prowadzonego przez dr. Jana Suffczyńskiego.

Reasumując, do najważniejszych elementów mojego wkładu w zakresie badań nad jednowymiarowymi objętościowymi strukturami periodycznymi należy zaliczyć:

- opracowanie modelu bazującego na metodzie macierzy przejścia uwzględniającego charakterystyki dyspersyjne półprzewodników i półprzewodników półmagnetycznych;
- opracowanie nowatorskiej struktury, złożonej z jednowymiarowego kryształu fonicznego i półprzewodnika półmagnetycznego, pozwalającej na pomiar namagnesowania w szerszym niż dotychczas zakresie koncentracji domieszek metali przejściowych.

Światłowodowe struktury periodyczne

Podczas pobytu na stażu podoktorskim w Photonics Research Center (PRC) na Université du Québec en Outaouais (UQO) w Kanadzie i przy współpracy z zespołem IMiO PW brałem udział w szeregu

badan teoretycznych i doświadczalnych nad konstrukcjami czujników światłowodowych wykorzystujących struktury periodyczne. Do takich struktur należą włóknowe czujniki z cienkimi warstwami osadzonymi na czole światłowodu oraz światłowodowe siatki długookresowe.

Czujniki posiadające periodyczną strukturę osadzoną na czole włókna są stosunkowo nową konstrukcją [B11]. Bazują one na jednomodowym włóknie telekomunikacyjnym na końcu którego osadzono naprzemiennie warstwy materiału o periodycznie zmiennym współczynniku załamania, definiując w ten sposób siatkę Bragga. W opisywanych w literaturze przykładach wskazuje się na możliwość ich wykorzystania jako czujników temperatury [B11], wilgotności [B12], czy współczynnika załamania [B13]. Struktury te charakteryzują się bardzo małymi rozmiarami, trwałością i działaniem w trybie odbiciowym. Wymienione cechy sprawiają, że czujniki z osadzoną periodyczną strukturą na czole włókna stanowią interesujący kierunek badań. Prowadzone w ośrodkach badawczych prace mają na celu zwiększenie ich czułości, poprzez opracowanie odpowiedniej konstrukcji i technologii.

Wraz z zespołem IMiO PW opracowałem, wytworzyłem i zbadałem tego typu struktury pod kątem użyteczności w odbiciowych badaniach współczynnika załamania roztworów wodnych i układach biosensorycznych. W przypadku zaproponowanego czujnika z osadzoną strukturą periodyczną ograniczono liczbę okresów do zaledwie kilku w celu zmniejszenia odbicia i zwiększenia interakcji przechodzącej fali z otaczającą czujnik cieczą. Dodatkowo, zabieg taki miał na celu uproszczenie konstrukcji i zwiększenie jej niezawodności. Analizę czujnika tego typu, wykonanego w technologii RF PECVD (ang. Radio Frequency Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition), przedstawiłem na konferencji [A35], a opis zawarłem w artykule pokonferencyjnym [A16]. Do symulacji i projektowania struktur stworzonym program bazujący na metodzie macierzy przejścia. Obliczenia prowadzone przy jego pomocy pozwoliły uzyskać dobrą zgodność z wynikami pomiarów. Wskutek przeprowadzonych badań wskazano potencjalną użyteczność struktury jako odbiciowego czujnika zmian współczynnika załamania roztworów wodnych.

Wyniki kolejnych prac zespołu polegające na zbadaniu struktur o podobnej topologii, ale zbudowanych z różnych materiałów i wytworzonych różnymi technikami ogłoszono na konferencji [A36] i zamieszczono w artykule [A17]. W pracy tej porównano konstrukcje wykonane w technologii RF PECVD oraz osadzanie fizyczne w procesie rozpraszania magnetronowego (ang. Reactive Magnetron Sputtering, RMS). Techniki te pozwalają na uzyskanie odpowiednio warstw $\text{SiN}_x/\text{SiN}_y$ (różna zawartość azotu pozwala na zmianę współczynnika załamania materiału) oraz $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$. Tak jak w poprzedniej pracy zbadano odpowiedź spektralną na zmiany zewnętrznego współczynnika załamania cieczy, oraz dodatkowo zmiany temperatury otoczenia. Wyniki eksperymentalne z dobrą zgodnością jakościową odtworzono na podstawie zaproponowanej przez mnie analizy numerycznej. Zaobserwowano zmiany w charakterystykach spektralnych specyficzne dla warstw osadzanych różnymi technikami. Zauważono, że odbiciowe charakterystyki spektralne struktur osadzanych metodą

RMS są nieczułe na zewnętrzne zmiany temperatury (w zakresie od 10 do 90 st. C), natomiast pod wpływem zmian zewnętrznego współczynnika załamania występujące na charakterystykach widmowych minimum pogłębia się oraz przesuwa w stronę fal dłuższych. W przypadku struktur wykonanych metodą osadzania chemicznego minimum w charakterystykach widmowych przesuwa się wraz ze wzrostem temperatury w stronę fal dłuższych, a pod wpływem zmiany zewnętrznego współczynnika załamania zwiększa się wartość mocy odbitej. Rezultaty badań pokazują różnice pomiędzy rozpatrywanymi strukturami, jednocześnie wskazując na możliwość wykorzystania obu konstrukcji do badania zmian współczynnika załamania cieczy i potencjalnie jako układów biosensorycznych.

Badania teoretyczne i doświadczalne światłowodowych siatek długookresowych rozpocząłem podejmując współpracę z laboratorium fonicznym działającym w ramach UQO (Kanada). Światłowodowe siatki długookresowe to wprowadzone w rdzeniu włókna periodyczne zmiany współczynnika załamania prowadzące do wzbudzenia modów płaszczowych. Uważa się, że struktury tego typu mają bardzo duży potencjał w konstrukcjach czujnikowych, ponieważ propagujące się we włóknie mody płaszczowe oddziałują z otoczeniem i bezpośrednio wpływają na obserwowane widmo sygnału optycznego [B14]. Zmiany tego widma są rejestrowane i odczytywane jako wynik działania czynnika zewnętrznego. Potencjalne wykorzystanie czujników LPFG upatruje się między innymi w pomiarach temperatury [B15], ciśnienia [B16], odkształcenia [B15] i naprężenia [B17]. W literaturze naukowej można również spotkać doniesienia o intensywnych badaniach nad wykorzystaniem siatek długookresowych w biosensoryce [A11-A15]. W każdym z wymienionych obszarów pomiarowych jednym z istotnych wskaźników jest czułość struktury na badany czynnik. Wraz z zespołami w UQO i IMiO PW podjąłem prace doświadczalne i teoretyczne mające na celu zwiększenie czułości struktury LPFG przez modyfikację obszaru zajmowanego przez strukturę periodyczną oraz wykorzystanie struktury LPFG jako czujnika w różnych obszarach zastosowań. Wynikiem tych prac jest szereg publikacji [A7-A15,A17-A21] i wystąpień konferencyjnych [A35-A46].

Czułość struktury LPFG można zwiększyć poprzez doprowadzenie do jej działania w tak zwanym trybie podwójnego rezonansu w okolicy punktu zmiany dyspersji (ang. Dispersion Turning Point, DTP) lub wywołanie przeskoku modów (ang. mode transition, MT). Badania prowadzone przeze mnie i zespoły, z którymi współpracowałem miały na celu złożenie dwóch wymienionych efektów tak, by jednocześnie uzyskać pracę czujnika w okolicy DTP oraz przeskoc modów. W celu uzyskania takiego podwójnego efektu powierzchnię czujnika trawiono, a następnie osadzano na niej cienką warstwę o współczynniku załamania przewyższającym współczynnik załamania płaszczu światłowodu. Zabiegi te powodowały kolejno odstrojenie od DTP, a następnie poprzez dobranie warstwy o odpowiedniej grubości i odpowiednim współczynniku załamania powrót do trybu podwójnego rezonansu i wymuszenie przeskoku modów. W wyniku tego ostatniego efektu najniższy mod prowadzony

w płaszczu przechodzi do cienkiej warstwy, a jego miejsce zajmuje następny mod płaszczowy. Ostatecznie wywołanie MT powoduje, że w pokryciu cienkowarstwowym propaguje się fala elektromagnetyczna o rozkładzie odpowiadającym modowi płaszczowemu najniższego rzędu, a najwyższy mod płaszczowy jest o rząd niższy niż poprzednio. Wspomniane modyfikacje technologicznie prowadzą do znacznego zwiększenia czułości struktury. Potwierdzają to obliczenia, z których wynika, że istnieje optymalna grubość osadzonej warstwy dla której przesunięcie modów wywołuje znaczne zwiększenie czułości [A18].

Badania teoretyczne przedstawione w [A18,A37] wskazują na możliwość zwiększenia czułości znacznie powyżej 20 000 nm/RIU (ang. refractive index unit, RIU; jednostka współczynnika załamania) poprzez zastosowanie warstwy diamentopodobnej (ang. diamond like carbon, DLC) o odpowiednio dobranej grubości. Czułość tej samej struktury bez warstwy DLC, lecz po wstępnej optymalizacji warunków propagacji modów płaszczowych wynosiła poniżej 8 000 nm/RIU. W badaniach teoretycznych wykorzystano narzędzia komercyjne i algorytm oparty na teorii modów sprzężonych stworzony przez kierowany przeze mnie zespół w ramach PRC UQO.

Równoległe do badań teoretycznych prowadziłem badania doświadczalne. W opisanych poniżej pracach brałem udział i samodzielnie przeprowadzałem procesy wytwarzania siatek długookresowych, osadzania cienkich warstw dielektrycznych (w szczególności warstw DLC), charakteryzacji otrzymanych struktur, projektowaniu i przeprowadzaniu doświadczeń oraz opracowywaniu procedur i programów do gromadzenia, analizy i przetwarzania danych pomiarowych.

W pracy [A7] eksperymentalnie zbadano zmiany w transmisji długookresowej siatki światłowodowej pod wpływem osadzania na jej powierzchni cienkiej warstwy diamentopodobnej. Zbadano również możliwość trawienia warstwy DLC w atmosferze tlenu przy udziale plazmy. Zarówno warstwy jak i procesy ich trawienia przeprowadzono w reaktorze do chemicznego osadzania z fazy gazowej przy wspomaganie plazmy (PECVD). Zmiany w badanych strukturach periodycznych śledzono w trybie transmisyjnym. Dodatkowo, w wyniku przeprowadzonych badań określono zmiany własności optycznych warstw DLC w zależności od grubości osadzonej warstwy (w szczególności zmiany współczynnika załamania i ekstynkcji) oraz potwierdzono możliwość selektywnego trawienia warstwy DLC w atmosferze tlenowej na powierzchni światłowodu. Badania te były niezbędne dla określenia możliwości zwiększenia czułości struktury LPFG z cienką warstwą diamentopodobną, a wyniki pomiarów wykorzystano w przytoczonej już pracy [A18]. Prowadzone badania potwierdziły możliwość osadzenia warstwy DLC na powierzchni włókna oraz modyfikację własności czujnika.

Analiza struktur czujnikowych w komorze PECVD pozwoliła na podjęcie prac związanych z określeniem możliwości zwiększenia czułości struktury LPFG poprzez procesy trawienia jonowego [A38], jak również monitorowanie procesów zachodzących w komorze [A8]. W ramach pracy [A8] w serii testów wykorzystano czujnik bazujący na siatce długookresowej jako wskaźnik kontroli procesów zachodzących podczas trawienia w komorze PECVD. W wyniku przeprowadzonych doświadczeń potwierdzono użyteczność analizowanego czujnika poprzez rejestrację zmian położenia

rezonansu wywołaną trawieniem płaszczą włókna (tj. trawieniem warstwy SiO_2). Wskazano również na użyteczność metody podczas np. kontrolowania procesów osadzania. Warto nadmienić, że jest to pierwsza propozycja wykorzystania tego typu czujnika do kontroli kinetyki procesów w komorze PECVD.

W związku z koniecznością dokładnego zbadania jakości cienkich pokryć i ich wpływu na zmiany odpowiedzi spektralnej struktury LPFG przeprowadzono badania ukierunkowane na określenie wpływu jednorodności warstwy DLC [A9,A41]. W serii eksperymentów w komorze PECVD zmieniano wysokość ułożenia siatki względem elektrody i określono optymalne położenie włókna pozwalające na uzyskanie możliwie jednorodnego pokrycia DLC. Na podstawie pomiarów wskazano istotne znaczenie jednorodności warstwy dla czułości otrzymanej struktury, jak również potwierdzono użyteczność włóknowego czujnika LPFG w diagnostyce procesów PECVD.

Na podstawie powyżej opisanych prac i doświadczeń zaprojektowałem serię eksperymentów bezpośrednio związanych ze zwiększeniem czułości struktury LPFG poprzez wykorzystanie efektu przeskoku modów i punktu zwrotnego dyspersji [A10,A19,A39]. Obydwa efekty wzbudzono jednocześnie poprzez wykorzystanie kolejnych procesów plazmowego trawienia i osadzania (w przypadku warstwy DLC były to zarówno procesy osadzania jak i trawienia, natomiast w przypadku płaszczą światłowodu był to proces trawienia). Wszystkie zmiany w strukturze czujnika dokonywano w jednej komorze prowadząc kolejne procesy w jednym ciągu technologicznym. Przeprowadzone prace pozwoliły na uzyskanie czułości rzędu 12 000 nm/RIU (czułość struktury bez pokrycia wynosiła 4 000 nm/RIU). Wartość ta jest największą wartością czułości przedstawianą w doniesieniach literaturowych dla czujników LPFG.

Oprócz badania wpływu warstw DLC na zmiany odpowiedzi spektralnej światłowodowej struktury periodycznej rozważono również warstwy TiO_2 . W artykule [A11] przedstawiono wyniki prac prowadzących do zwiększenia czułości struktur LPFG poprzez zastosowanie warstwy TiO_2 . Pokrycie cienkowarstwowe, tak jak w poprzednim przykładzie, miało za zadanie doprowadzić do złożenia dwóch zjawisk, tj. przeskoku modów oraz dopasowanie do punktu zwrotnego dyspersji. Zastosowanie odpowiedniej grubości warstwy TiO_2 pozwoliło uzyskać czułość rzędu 6 200 nm/RIU (przed osadzeniem warstwy czułość ta wyniosła około 2 000 nm/RIU) w zakresie zmian współczynnika załamania odpowiadającym roztworom wodnym, tj. współczynników załamania z zakresu 1,33 do 1,34. W tym przypadku otrzymana wartość czułości jest mniejsza niż w przypadku pokrycia DLC ze względu na niższą wartość początkową, tj. struktury bez pokrycia, oraz inny materiał cienkiej warstwy. W kolejnym etapie eksperymentu zbadano i potwierdzono użyteczność czujnika z cienką warstwą TiO_2 jako biosensora.

W przedstawianych badaniach przez wykorzystanie czujnika jako biosensora rozumie się możliwość jego użycia do selektywnego wykrywania zadanego czynnika biologicznego. Uzyskanie takiej funkcjonalności wiąże się z koniecznością funkcjonalizacji powierzchni sensora substancją, która spełni dwa warunki. Po pierwsze, będzie trwale związana z czujnikiem nie zaburzając jego działania.

Po drugie, będzie specyficznie wiązała tylko i wyłącznie pożądane czynniki biologiczne. Spełnienie pierwszego z tych warunków w odniesieniu do struktur LPFG wymaga przygotowania powierzchni światłowodu i zadbanie o stabilność uzyskiwanych wyników pomiarów optycznych. Natomiast w celu sprawdzenia użyteczności przygotowanego biosensora konieczne jest opracowanie i zastosowanie powtarzalnej i dającej pewne wyniki procedury pomiarowej.

W pracach prowadzonych w zakresie biosensorów, mających charakter aplikacyjny dla wcześniej badanych periodycznych struktur światłowodowych byłem odpowiedzialny za projektowanie, przygotowanie i charakteryzację struktur LPFG, oraz przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentów i procedur pomiarowych. Możliwości wykorzystania czujników LPFG bez modyfikacji i z modyfikacją cienkowarstwową, tj. stosowaniem np. warstw DLC, TiO₂, do bio-detekcji omówiono podczas referatów na konferencjach [A40,A46].

W prowadzonych badaniach aplikacyjnych zdecydowano się na wykrywanie bakterii *E. coli* B. Jak już wspomniano, w celu wykrycia określonych substancji biologicznych (tutaj danego szczepu bakterii) przy użyciu czujników światłowodowych konieczne jest wykorzystanie pośredniej warstwy detekcyjnej osadzonej na powierzchni struktury czujnikowej. Do wykrywania bakterii takimi warstwami pośrednimi mogą być substancje biologiczne, takie jak: bakteriofagi, aptamery czy białka (np. adhezyna). W doświadczeniach i pracach przytoczonych w dalszej części tekstu wykorzystano adhezynę specyficzną dla bakterii *E. coli* B. Białko przyłączono do powierzchni czujnika LPFG metodami chemicznymi tak by tworzyło wiązanie kowalencyjne. W pracach [A12-A15,A20,A21] przyłączono adhezynę bezpośrednio do powierzchni włókna (SiO₂), natomiast w wymienionej wcześniej pracy [A11] uzyskano przyłączenie adhezyny do cienkiej warstwy TiO₂.

Badania aplikacyjne rozpoczęto od zbadania możliwości dołączenia adhezyny gp37 do powierzchni czujnika [A12] oraz specyficzne przyłączenie do tego białka komplementarnych lipopolisacharydów (LPS) *E. coli* B [A42]. Wykazano zdolność światłowodowej struktury siatkowej do rejestracji zmian wywołanych specyficznymi wiązaniami. Wyniki kolejnych prac zaprezentowanych w [A13,A20,A43] pokazują możliwość regeneracji czujników LPFG, a badania przedstawione w artykułach [A14,A15] i komunikatach [A21,A44,A45] wykazują na specyficzność badanej struktury czujnikowej względem różnych szczepów bakterii. W przypadku prac [A14,A15,A21,A44,A45] pokazano przyłączanie nie tylko elementów bakterii jakimi są lipopolisacharydy do adhezyny, ale całych komórek bakteryjnych. Przedstawione badania mają charakter nowatorski, co pośrednio potwierdza fakt, iż zbiór artykułów [A12-A14,A19,A20] stanowi podstawowy element badań i część opracowania, na podstawie którego laboratorium PRC UQO uzyskało finansowanie projektu przemysłowego mającego na celu komercyjne wdrożenie omówionych światłowodowych struktur periodycznych.

Zaprezentowane badania są wynikiem mojego uczestnictwa w licznych projektach prowadzonych przez PRC UQO oraz w IMiO PW, między innymi były to kanadyjskie projekty *Discovery*, *Strategic* i *Engage Grant*, ufundowane przez kanadyjski NSERC i prowadzone przez prof. Wojtkę Bockę, oraz

projekty krajowe *LIDER*, *Iuventus Plus*, *Homing Plus* prowadzone przez dr. hab. inż. Mateusza Śmietanę.

Reasumując, do najważniejszych elementów mojego wkładu w zakresie prac nad jednowymiarowymi światłowodowymi strukturami periodycznymi należy zaliczyć:

- opracowanie modelu numerycznego pozwalającego na projektowanie i analizę czujnika światłowodowego z periodyczną warstwą osadzoną na końcu włókna;
- zaprojektowanie unikatowych konstrukcji czujników światłowodowych z periodycznymi warstwami osadzonymi na końcu włókien;
- pierwsze teoretyczne wyznaczenie czułości siatki długookresowej z cienką warstwą diamentopodobną w trybie pracy będącym złożeniem efektu DTP oraz MT;
- pionierskie prace w zakresie badań procesów technologicznych (osadzanie i trawienie nanowarstw) przy użyciu światłowodowych siatek długookresowych;
- pierwsze badania jednorodności cienkiej warstwy wytworzonej na powierzchni światłowodu w technologiach plazmowych;
- uzyskanie jak dotychczas najwyższej czułości na zmiany współczynnika załamania cieczy dla światłowodowej siatki długookresowej z pokryciem ciekowarstwowym;
- pierwsze zastosowanie adhezyn i badania specyficzności w czujnikowych strukturach LPFG;
- pierwsze wykorzystanie czujnika LPFG z cienką warstwą jako stabilnego i selektywnego biosensora.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Publikacje w czasopismach indeksowanych w bazie ISI JCR (2):

- [A47] M. Śmietana, M. Dudek, **M. Koba**, B. Michalak, "Influence of diamond-like carbon overlay properties on refractive index sensitivity of nano-coated optical fibers," *Physica Status Solidi A*, vol. 210, no. 10, 2100–2105, 2013.
- [A48] B. Michalak, **M. Koba**, M. Śmietana, "Silicon Nitride Overlays Deposited on Optical Fibers with RF PECVD Method for Sensing Applications: Overlay Uniformity Aspects," *Acta Physica Polonica A*, vol. 127, no. 6, 1587-1590, 2015.

Publikacje w czasopismach pokonferencyjnych (1):

- [A49] B. Michalak, M. Śmietana, **M. Koba**, "Optical fiber refractometer based on silicon nitride nano-overlay deposited with PECVD method," *Proc. of SPIE*, Vol. 9157, 91575A 1-4, 2014.

Publikacje recenzowane (konferencje krajowe i zagraniczne) (5):

- [A50] M. Śmietana, M. Dudek, **M. Koba**, B. Michalak, "Sensing applications of diamond-like carbon nano-coated optical fibers," 18th International Hasselt Diamond Workshop 2013 SBDD XVIII, Hasselt, Belgia, 27 lutego - 1 marca, 2013.
- [A51] B. Michalak, M. Śmietana, **M. Koba**, "Silicon nitride overlays deposited on optical fibers with RF PECVD method for sensing applications: overlay uniformity aspects," 8th Conference Integrated Optics - Sensors, Sensing Structures and Methods IOS2014, Szczyrk, Polska, 3 - 7 marca, 2014.
- [A52] M. Śmietana, B. Michalak, **M. Koba**, "Optical fiber refractometer based on silicon nitride nano-overlay deposited with PECVD method," 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors OFS23, Santander (Cantabria), Hiszpania, 2 - 6 czerwca, 2014.
- [A53] **M. Koba**, J. Suffczyński, M. Ekielski, W. Jung, K. Golaszewska, E. Kaminska, R. Jakiela, A. Navarro-Quezada, T. Li, T. Dietl, A. Bonanni, "Electrical and Optical Properties of a p-n junction with GaFeN/AlGaN Quantum Wells," Jaszowiec 2013, Wisła, Polska, 22 - 27 czerwca, 2013. – Referat.
- [A54] T. Osuch, **M. Koba**, P. Szczepański, Z. Jaroszewicz, "Badania własności spektralnych i generacyjnych złożonych struktur quasi-periodycznych jednowymiarowych kryształów fotonicznych," XI Scientific Conference on Electron Technology, ELTE'2013, Ryn, Polska, 16 - 20 kwietnia, 2013.

W swojej pracy naukowo-badawczej, oprócz omówionych już struktur periodycznych badałem również czujniki światłowodowe, w których odsłonięty rdzeń wielomodowy (wykorzystano światłowody o grubym rdzeniu SiO₂ z plastikowym płaszczem) pokrywano cienką warstwą dielektryczną w celu wzbudzenia efektu rezonansu modu tłumionego (ang. Lossy Mode Resonance, LMR). W badaniach osadzano cienkie warstwy DLC oraz SiN_x wykorzystując metodę RF PECVD.

W pracach [A48,A50] przedstawiono wyniki osadzania i charakteryzacji czujnika LMR z cienką warstwą DLC. Zaprezentowano również zaimplementowaną przeze mnie metodę symulacji takich struktur bazującą na modelach dedykowanych układom wielowarstwowym (w szczególności strukturom periodycznym). Zbadano wpływ grubości cienkiej warstwy DLC na charakterystyki transmisyjne i wyznaczono czułość struktury rzędu 250 nm/RIU, co nie jest wartością dużą w odniesieniu do osiągniętych dla innych struktur czujnikowych, lecz mając na uwadze prostotę wytworzenia czujników, pozwala na traktowanie ich jako bardzo atrakcyjne rynkowo. W kolejnych pracach dotyczących struktur wykorzystujących efekt LMR [A49,A52] pokazano teoretycznie i eksperymentalnie wpływ cienkiej warstwy o wysokim współczynniku załamania (tutaj SiN_x) na własności transmisyjne światłowodu wielomodowego. Wykazano, iż osadzenie warstwy SiN_x pozwala na wykorzystanie odcinka włókna z pokryciem jako czujnika i wyznaczono maksymalną czułość wytworzonych struktur na poziomie 690 nm/RIU. Jednocześnie pokazano, iż czułość ta zależy

w znacznym stopniu od grubości osadzonej warstwy. Uzupełnieniem tej pracy były badania przedstawione na konferencji [A51] i opisane w [A49], gdzie wraz z zespołem z IMiO PW zaprezentowałem badania wskazujące na znaczący wpływ jednorodności warstwy na czułość struktury LMR. Mimo stosunkowo niewielkich czułości uzyskiwanych na obecnym etapie badań, prace te wpisują się w nurt działań prowadzonych w ośrodkach zagranicznych np. [B18], są względem nich konkurencyjne i obiecujące.

Podczas stażu podoktorskiego w PRC UQO brałem również czynny udział w szeregu badań nad wytwarzaniem, modyfikacją i charakteryzacją czujników światłowodowych, których nie da się zaliczyć do grupy struktur okresowych. Przykładem może być światłowodowy interferometr Macha-Zehndera wytworzony we włóknie przy pomocy lasera femtosekundowego. Struktura tego typu charakteryzuje się wyjątkowo małym rozmiarem i bardzo wysoką czułością (powyżej 10 000 nm/RIU), obecnie między innymi badam potencjalne możliwości wykorzystania tego typu struktur. W trakcie prac związanych z wytwarzaniem struktur czujnikowych zapoznałem się z metodami mikroobróbki laserowej. Prace prowadzone w tym zakresie są w trakcie realizacji, część wyników jest opracowywana na potrzeby przygotowania szeregu publikacji.

Podczas prac na stażu podoktorskim na Uniwersytecie Warszawskim z zespołem Fizyki Ciała Stałego badałem własności elektryczne i optyczne złącz p-n z domieszkowanymi żelazem studniami kwantowymi. Celem tych badań było określenie możliwości wykorzystania takich struktur jako elementów dla spintroniki (np. spin LED) [A53]. Wykazano potencjał badanych obiektów jako detektorów promieniowania z zakresu ultrafioletu, źródeł światła szerokopasmowego, a także pokazano zmiany polaryzacji emitowanego światła w polu magnetycznym.

Poza licznymi pracami nad strukturami periodycznymi, brałem udział w analizie struktur quasi-periodycznych kryształów fonicznych [A54].

Wynikiem moich prac w licznych projektach są również zaimplementowane algorytmy numeryczne oraz programy pomiarowe. Zaprojektowałem i wykonałem szereg elementów mechanicznych i optomechanicznych, w tym elementy kriostatu w układzie do pobudzania kropek kwantowych, adaptory zwiększające możliwości pomiarowe układów spektroskopowych, elementy w układach do pomiaru światłowodowych struktur czujnikowych oraz elementy systemu mikroobróbki laserowej. Opracowane przeze mnie rozwiązania wykorzystywane są w laboratoriach jednostek z którymi współpracowałem.

6. Podsumowanie

Zaprezentowane opracowanie omawia zbiór publikacji związanych z tematyką jedno- i dwuwymiarowych struktur periodycznych. Wyróżnione są trzy obszary badań, w skład których wchodzi: analiza numeryczna wpływu parametrów dwuwymiarowego kryształu fonicznego na strukturę modową i obniżenie progu generacji w laserach; analiza wzmocnienia magnetoptycznego efektu Kerra w półprzewodnikach półmagnetycznych wykorzystujących zwierciadło braggowskie,

oraz analiza i wykorzystanie światłowodowych struktur periodycznych w układach czujnikowych. Przytoczone prace wskazują na możliwości zastosowania metod bazujących na teorii modów sprzężonych i/lub metodzie macierzy przejścia do wyznaczenia odpowiedzi ośrodków periodycznych na pobudzenie falą elektromagnetyczną. Dodatkowo prace te prezentują możliwości praktycznego wykorzystania wyników obliczeń do opracowania i weryfikacji metod wytwarzania, modyfikacji i charakteryzacji czujników światłowodowych ze strukturami periodycznymi.

Do najważniejszych osiągnięć wymienionych w opracowaniu należy zaliczyć:

- opracowanie modelu struktury laserowej pozwalającej na obniżenie progu generacji;
- opracowanie nowatorskiej struktury, złożonej z jednowymiarowego kryształu fotonicznego i półprzewodnika półmagnetycznego, pozwalającej na pomiar namagnesowania w szerszym niż dotychczas zakresie koncentracji domieszek metali przejściowych;
- zaprojektowanie unikatowych konstrukcji czujników światłowodowych z periodycznymi warstwami osadzonymi na końcu włókien.

Oprócz wymienionych osiągnięć na oryginalność prac wskazują dokonania mające charakter pionierski stanowiące istotny wkład w obecny stan wiedzy:

- opracowanie oryginalnego modelu półklasycznego i analiza konkurencji międzymodowej w laserze bazującym na kryształach fotonicznych o symetrii kwadratowej, a w szczególności określenie warunków stabilnej pracy jednomodowej dla modów TM;
- pierwsze teoretyczne wyznaczenie czułości siatki długookresowej z cienką warstwą diamentopodobną w trybie pracy będącym złożeniem efektu DTP oraz MT;
- pierwsze prace w zakresie badań procesów technologicznych (osadzanie i trawienie nanowarstw) przy użyciu światłowodowych siatek długookresowych;
- pierwsze badania jednorodności cienkiej warstwy wytworzonej na powierzchni światłowodu w technologiach plazmowych;
- uzyskanie jak dotychczas najwyższej czułości na zmiany współczynnika załamania cieczy dla światłowodowej siatki długookresowej z pokryciem cienkowarstwowym;
- pierwsze zastosowanie adhezyn i badania specyficzności w czujnikowych strukturach LPFG;
- pierwsze wykorzystanie czujnika LPFG z cienką warstwą jako stabilnego i selektywnego biosensora.

Wymieniony dorobek uzupełniają opracowane modele numeryczne bazujące na metodzie macierzy przejścia i teorii modów sprzężonych pozwalające na analizę struktur światłowodowych i półmagnetycznych struktur półprzewodnikowych oraz struktur laserowych.

Literatura

- [B1] J. W. S. Rayleigh (1888), "On the remarkable phenomenon of crystalline reflexion described by Prof. Stokes", *Phil. Mag* 26: 256-265, 1888.
- [B2] E. Yablonovitch "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, 2059-2062, 1987.
- [B3] S. John "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices", *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 23, 2486-2489, 1987.
- [B4] H. Watanabe, T. Baba "Active/passive-integrated photonic crystal slab microlaser," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 12, 695-696, 2006.
- [B5] S. Mahnkopf, et al. "Tunable photonic crystal coupled-cavity laser," *IEEE J. Quantum Elect.*, vol. 40, no. 9, 1306-1314, 2004.
- [B6] K.-H. Lee, et al. "Square-lattice photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers," *Opt. Express*, vol. 12, no. 17, 4136-4143, 2004.
- [B7] Y. Liang, et al. "Three-dimensional coupled-wave model for square lattice photonic-crystal lasers with transverse electric polarization: A general approach," *Phys. Rev. B*, vol. 84, no. 19, 195119 1-11, 2011.
- [B8] K. Sakai, et al. "Coupled-wave theory for square-lattice photonic crystal lasers with TE polarization," *IEEE J. Quantum Elect.*, vol. 46, no. 5, 788-795, 2010.
- [B9] L. Florescu, et al. "Semiclassical theory of lasing in photonic crystals", *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 19, no. 9, 2215-2223, 2002.
- [B10] K. Sakai, et al. "Lasing band-edge identification for a surface-emitting photonic crystal laser," *IEEE J. Sel. Area. Comm.*, vol. 23, no. 7, 1335-1340, 2005.
- [B11] S. Onoda, et al. "A proposal of temperature sensing using a thin-film bandpass filter and dual-wavelength push-pull reflectometry," *IEEE Photonic. Tech. L.*, vol. 20, no. 9, 688-690, 2008.
- [B12] M. Yang, et al. "Optical fiber sensors based on Fabry-Perot multilayer coatings," *Chin. Opt. Lett.*, vol.8, 189-191, 2010.
- [B13] K. S. Kim, et al. "Refractive index sensor for liquids and solids using dielectric multilayer films deposited on optical fiber end surface," *IEEE Photonic. Tech. L.*, vol. 23, no. 20, 1472-1474, 2011.
- [B14] X. Shu, et al. "Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings," *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 2, 255-266, 2002.
- [B15] C. C. Ye, et al. "Simultaneous temperature and bend sensing with long-period fiber gratings," *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 14, 1007-1009, 2000.
- [B16] W. J. Bock, et al. "A novel fiber-optic tapered long-period grating sensor for pressure monitoring," *IEEE T. Instrum. Meas.*, vol. 56, no. 4, 1176 – 1180, 2007.

- [B17] V. Bhatia, "Applications of long-period gratings to single and multi-parameter sensing," Opt. Express, vol. 4, no. 11, 457-466, 1999.
- [B18] I. Del Villar, et al. "Design rules for lossy mode resonance based sensors," Appl. Opt., vol. 51, no. 19, 4298-4307, 2014.

Marcin Koba