

Warszawa, 19 sierpnia 2013 r.

AUTOREFERAT

1. Imię i Nazwisko:

Mateusz Jakub Śmietana

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

06.10.2000	Inżyniera w zakresie Optoelektroniki i Mikroelektroniki na makrokierunku Informatyka, Automatyka i Robotyka, Elektronika i Telekomunikacja, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska.
04.03.2002	Magistra inżyniera w zakresie Elektroniki-Optoelektroniki na makrokierunku Informatyka, Automatyka i Robotyka, Elektronika i Telekomunikacja, Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych, Politechnika Warszawska.
23.01.2007	Doktora nauk technicznych w zakresie Elektroniki nadany uchwałą Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informacyjnych Politechniki Warszawskiej, rozprawa doktorska pt: „ <i>Warstwy diamentopodobne w światłowodowej technice czujnikowej</i> ”.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

03.2006-03-2007	Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Politechnika Warszawska, asystent
03.2007-obecnie	Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki, Politechnika Warszawska, adiunkt
02.2009-01.2011	Université du Québec en Outaouais (Kanada), post-doc

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

a) Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

Jako „osiągnięcie naukowe uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej” wskazuję **jednotematyczny cykl 14 publikacji** pod zbiorczym tytułem „**Technologia światłowodowych siatek długookresowych (ang. long-period grating, LPG) z pokryciami cienkowarstwowymi dla zastosowań czujnikowych**”.

b) Wykaz wybranego cyklu publikacji¹

- [1] **Smietana M.**, Szmidt J., Korwin-Pawlowski M.L., Bock W.J., Grabarczyk J., “*Application of diamond-like carbon films in optical fibre sensors based on long-period gratings*”, 2007, Diamond and Related Materials 16, 1374-1377 (IF=1,788)
- [2] **Smietana M.**, Korwin-Pawlowski M.L., Bock W.J., Pickrell G.R., Szmidt J., “*Refractive index sensing of fiber optic long-period grating structures coated with plasma deposited diamond-like carbon thin film*”, 2008, Measurement Science and Technology 19, 085301 (IF=1,493)
- [3] **Smietana M.**, Korwin-Pawlowski M.L., Grabarczyk J., Szmidt J., “*Correlation between thickness and optical properties of thin diamond-like carbon films deposited with RF PACVD method*”, 2009, Materials Science and Engineering B 165, 132–134 (IF=1,715)
- [4] **Smietana M.**, Bock W.J., Mikulic P., “*Comparative study of long-period gratings written in a boron co-doped fiber by an electric arc and UV irradiation*”, 2010, Measurement Science and Technology 21 025309 (IF=1,353)
- [5] Shao Li-Yang, Laronche A., **Smietana M.**, Mikulic P., Bock W.J., Albert J., “*Highly Sensitive Bend Sensor with Hybrid Long-Period and Tilted Fiber Bragg Grating*”, 2010, Optics Communications 283 2690-2694 (IF=1,517)
- [6] **Smietana M.**, Bock W.J., Chen J., Mikulic P., “*Highly sensitive pressure sensor based on long-period gratings written in boron co-doped optical fiber*”, 2010, Measurement Science and Technology 21 094026 (IF=1,353)

¹ W nawiasach podano „Impact Factor” (IF) czasopisma w roku publikacji.

- [7] **Smietana M.**, Bock W.J., Szmidt J., Grabarczyk J., „*Substrate effect on the optical properties and thickness of diamond-like carbon films deposited by the RF PACVD method*”, 2010, *Diamond & Related Materials* 19, 1461–1465 (IF=1,825)
- [8] **Smietana M.**, Bock W.J., Mikulic P., Chen J., „*Pressure Sensing in High-Refractive-Index Liquids Using Long-Period Gratings Nanocoated with Silicon Nitride*”, 2010, *Sensors* 10(12), 11301-11310 (IF=1,774)
- [9] **Smietana M.**, Bock W.J., Mikulic P., Chen J., „*Increasing sensitivity of arc-induced long-period gratings – pushing the fabrication technique towards its limits*”, 2011, *Measurements Science and Technology* 22, 015201 (6pp) (IF=1,494)
- [10] **Smietana M.**, Bock W.J., Szmidt J., „*Evolution of optical properties with thickness of silicon nitride and diamond-like carbon films deposited by RF PECVD method*”, 2011, *Thin Solid Films* 519, 6339–6343 (IF=1,890)
- [11] **Smietana M.**, Bock W.J., Mikulic P., Ng A., Chinnappan R., Zourob M., „*Detection of bacteria using bacteriophages as recognition elements immobilized on long-period fiber gratings*”, 2011, *Optics Express* 19(9), 7971-7978 (IF=3,587) oraz wybrane do publikacji w *The Virtual Journal for Biomedical Optics* Vol. 6, Iss. 5 — Jun. 1, 2011
- [12] Bock W.J., Eftimov T., **Smietana M.**, Mikulic P., „*Efficient distributed moisture-ingress sensing using diamond-like carbon-nanocoated long period gratings*”, 2011, *Optics Communications* 284, 4470–4472 (IF=1,486)
- [13] **Smietana M.**, Bock W.J., Mikulic P., „*Temperature sensitivity of silicon nitride nanocoated long-period gratings working in various surrounding media*”, 2011, *Measurement Science and Technology* 22, 115203 (IF=1,494)
- [14] **Smietana M.**, Bock W.J., Mikulic P., Chen J., „*Tuned Pressure Sensitivity of Dual Resonant Long-Period Gratings Written in Boron Co-doped Optical Fiber*”, 2012, *Journal of Lightwave Technology* 30(8), 1080-1084 (IF=2,555)

Oświadczenia wszystkich współautorów publikacji, potwierdzające ich indywidualny wkład w powstanie dorobku²

- **prof. Jacques Albert, Carleton University (Kanada)** - złożył także podpis w imieniu członków kierowanego przez niego zespołu tj. **dr Li-Yang Shao, Albane Laronche**

² Podpisane oświadczenia znajdują się kolejno w Załączniku 3

- **prof. Wojtek J. Bock, Université du Québec en Outaouais (Kanada)** – złożył także podpis w imieniu członków kierowanego przez niego zespołu tj. **Predrag Mikulic, Daniel Brabant, Jiahua Chen, dr Michael L. Korwin-Pawlowski, Daniela Niyonkuru, and prof. Roland Wiśniewski**
- **prof. Tinko Eftimov, Plovdiv University (Bułgaria)** - złożył także podpis w imieniu członków kierowanego przez niego zespołu tj. **Katerina Zhelyazkova**
- **dr hab inż. Jacek Grabarczyk, Politechnika Łódzka**
- **prof. Gary R. Pickrell, Virginia Polytechnic Institute and State University (USA)**
- **prof. dr hab. inż. Jan Franciszek Szmidt, Politechnika Warszawska**
- **Dr Mohammed Zourob, Institut national de la recherche scientifique - Énergie (Kanada)** złożył także podpis w imieniu członków kierowanego przez niego zespołu tj. **Andy Ng, Raja Chinnappan**

c) Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. prac/pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania³

Głównym obszarem moich zainteresowań badawczych są nowoczesne konstrukcje czujników światłowodowych, w szczególności wykorzystujące cienkie warstwy pokryciowe zdolne modyfikować czułość takich struktur w zależności od potrzeb użytkownika. Jako szczególnie interesujące z punktu widzenia przyszłych zastosowań czujnikowych uznałem struktury światłowodowych siatek długookresowych (ang. Long-period Fiber Grating, najczęściej nazewnictwo upraszczane do Long-period Grating, LPG). Siatki LPG znane są od 1996 r. [Vengsarkar1996]. W przeciwieństwie do zdecydowanie lepiej poznanych i już szeroko wykorzystywanych komercyjnie światłowodowych siatek braggowskich (ang. Fiber Bragg Grating, FBG) [Hill1978], struktury LPG charakteryzują się czułością na zmiany współczynnika załamania otoczenia. Precyzyjne badania takich zmian, w szczególności realizowane z wykorzystaniem tanich urządzeń, są obecnie pożądane choćby w obszarze przemysłu spożywczego, chemicznego, farmaceutycznego i diagnostyki medycznej. Wytworzenie struktur LPG, ze względu na długość okresu typowo zawierającego się w zakresie 150 – 700 μm , możliwe jest z wykorzystaniem, nie tylko metod laserowych (jak w przypadku FBG), ale także szeregu innych metod, jak choćby metody wykorzystującej wyładowanie w łuku elektrycznym

³ **Organizacja odniesień literaturowych:**

[1] do [14] – pozycje wybranego cyklu publikacji (str. 2 Autoreferatu)

[A1] do [L9] i [2A1] do [2Q3] – pozycje ujęte w „Wykazie opublikowanych prac naukowych...”

[NazwiskoROK] – kluczowe pozycje literaturowe z punktu widzenia osiągnięcia (str. 12 Autoreferatu)

[Dianov1997], periodyczną deformację mechaniczną [Savin2000], czy periodyczne trawienie struktury płaszczu światłowodu [Lin2000].

Ze względu na występujące oddziaływanie pola elektromagnetycznego z obszarem otaczającym strukturę LPG, stosuje się szereg warstw pokryciowych dla tych struktur, mających na celu zintensyfikować to oddziaływanie, w szczególności w obecności czynnika badanego. Można wyróżnić dwie grupy cienkich pokryć, tj. takie, których właściwości optyczne lub/i grubość zależą od czynnika badanego oraz takie, które ze względu na odpowiedni dobór relacji między właściwościami optycznymi materiałów światłowodu i właściwościami warstwy, mogą modyfikować rozkład pola elektromagnetycznego w strukturze LPG, przez co są zdolne kształtować czułość siatek. Pierwsze publikacje na temat drugiego rodzaju pokryć pojawiły się w 2002 r. [Rees2002] i dotyczyły warstw nietrwałych, lecz osadzanych z dużą dokładnością w zakresie kontroli ich grubości (na poziomie dziesiątek nanometrów) i właściwości optycznych. Dowiedziono wówczas, że tylko precyzyjna kontrola właściwości warstw umożliwia uzyskanie wysokoczułych na zmiany współczynnika załamania otoczenia struktur LPG. Mimo wielu wysiłków środowiska naukowego zmierzających w kierunku opracowania technologii trwałych i powtarzalnie otrzymywanych pokryć na takich strukturach cylindrycznych, realizacja tego zadania ciągle stwarza szereg problemów.

Nawiązanie z moim udziałem współpracy z grupą prof. W. Bocka z Université du Québec en Outaouais (Kanada) [2L2, 2L4], która dysponuje zapleczem technologicznym i naukowym w zakresie wytwarzania struktur LPG, umożliwiło wykorzystanie metod plazmowych, nad których rozwojem od lat trwają prace w Instytucie Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej, do wytworzenia pokryć na strukturach LPG. Pierwsza praca z tego zakresu [1], opublikowana także przy współpracy z Instytutem Inżynierii Materiałowej Politechniki Łódzkiej, demonstruje możliwość otrzymania odpornych mechanicznie i chemicznie, a także biokompatybilnych warstw diamentopodobnych (ang. diamond-like carbon, DLC) wytworzonych na strukturach LPG w technologii chemicznego osadzania z fazy gazowej wspomaganego plazmą RF (ang. Radio Frequency Plasma Assisted/Enhanced Chemical Vapour Deposition, RF PACVD lub częściej RF PECVD). Było to pierwsze notowane w literaturze użycie tej metody, jak i warstw DLC, do sterowania odpowiedzią tej klasy czujników światłowodowych na zmiany parametrów optycznych otoczenia. Ponadto, w pracy zademonstrowano jak istotny wpływ na czułość uzyskiwanych struktur ma dobór parametrów procesu osadzania warstw, a co za tym idzie ich właściwości. Dzięki zastosowaniu warstwy DLC uzyskaliśmy ok. 15-krotną poprawę czułości w zakresie współczynnika załamania zbliżonego do charakterystycznego dla wody ($n_D=1,33$). Osiągnięcie to otworzyło możliwości zastosowania opracowanej platformy czujnikowej do zastosowań biosensorycznych. W kolejnych badaniach nad wykorzystaniem warstw DLC realizowanych też przy współpracy z grupą prof. Gary Pickrell'a z

Virginia Polytechnic Institute and State University (USA) [2L3], wykorzystaliśmy bardziej złożone struktury LPG, tzn. wytworzone w światłowodach fonicznych (ang. Photonic Crystal Fiber, PCF), które charakteryzują się bardzo niską czułością na zmiany temperatury, a także kaskadowe połączenie dwóch struktur LPG, które tworzą układ interferometru Mach-Zehnder [2]. Typowo dąży się do redukcji czułości na temperaturę przy pomiarach współczynnika załamania, więc struktury oparte na włóknach PCF stanowią bardzo atrakcyjną alternatywę dla tych opartych na światłowodach telekomunikacyjnych. Z kolei przy kaskadowym ułożeniu LPG uzyskuje się w widmie transmisyjny struktury serię rezonansów, których szerokość spektralna jest mniejsza niż w przypadku pojedynczej LPG, co umożliwia bardziej precyzyjne śledzenie ich przesunięcia niż w wyniku zastosowania pojedynczej siatki LPG. W pracy [2] przeanalizowano wpływ osadzenia warstw DLC na czułość wspomnianych struktur i porównano uzyskany efekt z analogicznym otrzymanym dla pojedynczych struktur LPG wytworzonych w światłowodach telekomunikacyjnych. Dla obu rodzajów struktur uzyskano również znaczącą poprawę czułości wynikającą z zastosowania warstw DLC.

Na dalszym etapie prac badano możliwość zastosowania struktur LPG z pokryciami DLC także do pomiaru wilgotności [12]. Dzięki możliwości uzyskania wysokiej czułości opracowanych struktur na zmiany współczynnika załamania w zakresie $n_D=1$ do 1,33, możliwe jest wykrywanie obecności cienkiej warstwy wody na powierzchni warstwy DLC. Ponadto, we wspomnianej pracy zaproponowano alternatywny schemat analizy odpowiedzi siatek, w szczególności z pokryciami DLC, na zmiany parametrów otoczenia. Schemat ten polega na pomiarze transmisji struktur LPG jedynie w wąskim zakresie widmowym, a następnie pomiarze różnicowym w odniesieniu do innego wąskiego zakresu widmowego. W pracy zademonstrowano, że zastosowanie struktur LPG z pokryciami DLC umożliwia realizację pomiarów w takim schemacie z dużą czułością.

Wyniki badań dotyczących struktur LPG z pokryciami DLC zostały też opublikowane w licznych innych pracach naukowych [E1, E2, E4, E6, E9, F1] oraz zostały zaprezentowane na szeregu konferencji [L1, L3, L5-L9, 2B2, 2B4, 2B8, 2B10, 2B11, 2B13, 2B16, 2B29, 2B31, 2B37, 2B40] i wystaw wynalazków [D1-D3]. W przypadku tych ostatnich, nasze prace zostały nagrodzone dwoma medalami [K12, K13], w tym jednym złotym z wyróżnieniem [K13], a także nagrodą *Genius Cup* [K11].

Badania przedstawione między innymi w pracach [1, 2] i później [12], udowodniły jak istotny wpływ ma odpowiedni dobór parametrów procesu osadzania warstw na możliwości zastosowań czujnikowych otrzymywanych struktur. Fakt ten niejako wymusił konieczność analizy wpływu parametrów osadzania na właściwości optyczne i kinetykę osadzania warstw DLC. Prace dotyczące poprawy czułości struktur LPG i analizy warstw pokryciowych prowadzone były więc równolegle. W zakresie badań warstw DLC udowodniono między innymi, że w przypadku metod plazmowych istnieje silna korelacja między grubością uzyskiwanych warstw, a ich właściwościami optycznymi, przez co nie

jest możliwe niezależne determinowanie ich grubości lub współczynnika załamania [3]. Planując więc zastosowania warstw DLC między innymi na potrzeby tak subtelnych struktur jak LPG, należy wziąć ten efekt także pod uwagę.

Kolejny etap badań warstw DLC na potrzeby struktur LPG obejmował zadania zmierzające do wyjaśnienia wpływu materiału podłoża na właściwości uzyskiwanych warstw [7]. Wielu autorów prac naukowych zakłada, że warstwy osadzone w jednym procesie RF PECVD na podłożach choćby o różnej rezystywności, charakteryzują się takimi samymi właściwościami. W przypadku wykorzystania jako podłoża struktur LPG, podczas osadzania stosuje się płaskie podłoża referencyjne, na których wykonywany jest pomiar właściwości otrzymywanych warstw. W pracy [7] pokazano, że z punktu widzenia uzyskiwanych grubości warstw i ich właściwości optycznych zastosowany materiał podłoża ma duże znaczenie. Na właściwości warstw ma wpływ nie tylko materiał podłoża (badano krzem i utleniony krzem), ale także jego rezystywność (badano krzem o różnej rezystywności). Ponadto, różnica między tymi właściwościami zależy także od parametrów procesu osadzania. Poza wpływem długości trwania procesu osadzania, a co za tym idzie grubości warstw, efekt wynikający z materiału zastosowanego podłoża, powinien być wzięty pod uwagę projektując pokrycia o określonych właściwościach, w szczególności jeśli używa się podłoża referencyjnych wykonanych z innych materiałów niż właściwa próbka. Uzyskane wyniki niewątpliwie pomagają ustalić właściwości warstw uzyskiwane na światłowodach w odniesieniu do zastosowanych podłoża referencyjnych, nie tylko na potrzeby czujników światłowodowych, ale również do innych zastosowań, gdzie grubość i właściwości optyczne warstw DLC mają decydujące znaczenie dla funkcjonowania wytwarzanego przyrządu. Wyniki badań dotyczących właściwości warstw DLC zawarto także w treści innego artykułu [A1] i zaprezentowano na kilku konferencjach naukowych [L2, 2B1, 2B3, 2B5, 2B30].

Ze względu na specyfikę warstw DLC, w szczególności silną zależność ich składu fazowego od szeregu parametrów, jak choćby wspomnianych czasu trwania procesu i materiału użytego podłoża, rozpoczęto badania nad możliwościami zastosowania innych warstw wytwarzanych w metodach plazmowych jako pokryć dla struktur LPG. Analizę porównawczą warstw DLC i warstw azotku krzemu (SiN_x) wytwarzanego w wysokiej temperaturze ($>300\text{ }^\circ\text{C}$) przedstawiono w pracy [10]. Wysoka temperatura proces osadzania umożliwia uzyskanie warstw azotku o wysokiej jakości, twardości i wysokim współczynnikiem załamania (n na poziomie 2,4 dla $\lambda=1550\text{ nm}$). Należy zauważyć, że tak wysoka wartość n dla warstw DLC jest trudna do osiągnięcia. W przypadku pokryć SiN_x uzyskiwanych w metodach plazmowych także badano wpływ czasu trwania procesu osadzania na właściwości warstw. W pracy [10] wykazano, iż dla warstw SiN_x i DLC o grubości odpowiednio ponad 50 i 220 nm wpływ długości procesu osadzania na właściwości optyczne można zaniedbać. Wadą warstw DLC w porównaniu do warstw SiN_x jest przebudowa struktury warstw DLC zachodząca przy długich

procesach osadzania, która prowadzi do dalszych zmian właściwości optycznych wraz z grubością warstw. Należy podkreślić, że badane warstwy są na tyle cienkie, że muszą być analizowane jako struktura warstwa-podłoże, gdzie występuje ważny z punktu widzenia właściwości struktury obszar przejściowy (interfejs). Stan interfejsu i jego wpływ na właściwości całej struktury niewątpliwie zależą od wykorzystanego materiału podłoża, przygotowania jego powierzchni, jak i samej metody osadzania warstw. Wyniki zrealizowanych badań, które zostały przedstawione w omówionych powyżej pracach, pozwalają na dalszą wnikliwą analizę struktur LPG z pokryciami zarówno DLC jak i SiN_x.

Kolejne prace wykonane z moim udziałem dotyczyły technologii wytwarzania samych struktur LPG i zmierzały do poprawy ich czułości, jeszcze przed zastosowaniem cienkich pokryć. Seria eksperymentów i towarzyszących im symulacji komputerowych, umożliwiła porównanie działania struktur LPG wytworzonych w takim samym światłowodzie z użyciem metody wyładowania w łuku elektrycznym i metody tradycyjnej, czyli realizowanej poprzez naświetlenie światłowodu punkt po punkcie spójną wiązką UV [4]. Wyniki badań pokazały, że z punktu widzenia czułości na zmiany współczynnika załamania i temperatury, mechanizm powstawania siatki nie ma większego znaczenia, pod warunkiem, że zostanie zachowany przede wszystkim okres siatki. Zauważono także, że zastosowanie każdej z badanych metod może powodować uszkodzenie lub deformację struktury światłowodu, poprzez formowanie przewężeń w wyniku wyładowania elektrycznego, czy degradacji powierzchni światłowodu w efekcie długotrwałego jej naświetlania promieniowaniem UV. Oba zauważone efekty mogą mieć niekorzystny wpływ na funkcjonowanie wytwarzanych struktur czujnikowych. W kolejnej pracy z tego zakresu przedstawiono porównanie efektu wywołanego wysoką temperaturą (>300 °C) na funkcjonowanie struktur LPG wytworzonych z wykorzystaniem obu metod, w szczególności jako platform czujnikowych dla cienkich pokryć wytwarzanych w procesach wysokotemperaturowych, do których należą procesy CVD [13]. Udowodniono, że spośród badanych metod jedynie siatki LPG powstałe w wyniku wyładowania w łuku elektrycznym nie ulegają degradacji w wyniku podwyższonej temperatury. Dlatego w kolejnej pracy skupiłem się na usprawnieniu procesu wytwarzania struktur LPG z wykorzystaniem łuku elektrycznego, jako bardzo obiecującej i trwałej termicznie platformy do dalszych zastosowań czujnikowych [9]. Na potrzeby pracy przeprowadziłem symulacje komputerowe i zaproponowałem sposób prowadzenia procesu wytwarzania struktur LPG, który skutkuje efektem sprzężenia modów płaszczowych wyższych rzędów obserwowanego w zakresie długości fali ok. 1550 nm. Sprzężenie takie prowadzi do uzyskania podwyższonej czułości uzyskiwanych struktur, ale wiąże się też z potrzebą znacznego skrócenia długości okresu siatki. W pracy [9] zawarto także wyniki eksperymentalne pokazujące, że minimalny okres możliwy do uzyskania w metodzie łuku elektrycznego silnie zależy od składu materiału rdzenia

użytego światłowodu i w szczególnych przypadkach możliwe jest wytworzenie siatek LPG o okresie skróconym do 221 μm . Wnikliwa analiza źródeł literaturowych pokazuje, że jest to najkrótszy okres z uzyskanych dotychczas w metodzie wykorzystującej łuk elektryczny, a zarazem otrzymane struktury charakteryzują się najwyższą czułością spośród wytwarzanych w tej metodzie. Tematyce poprawy czułości struktur LPG przed osadzeniem pokrycia poświęcono także prace [A7, E5] oraz wyniki z tego zakresu badań przedstawiono podczas kilku konferencji [2B9, 2B15, 2B21, 2B26].

Opanowanie metod kontrolowanego wytwarzania struktur LPG z wykorzystaniem obu metod umożliwiło ich kolejne aplikacje czujnikowe. Na uwagę zasługuje praca wykonana we współpracy z zespołem prof. J. Albert'a z Carleton University (Kanada), gdzie zaprojektowane i wykonane struktury LPG uzupełnione o ukośną siatkę FBG (ang. Tilted Fiber Brag Grating, TFBG) posłużyły do konstrukcji czujnika ugięcia [5]. Struktura LPG w zaproponowanym rozwiązaniu pełni rolę elementu sprzęgającego mody płaszczowe powstałe w wyniku odbicia od struktury TFBG.

Badania czułości struktur LPG na zmiany współczynnika załamania otoczenia zrealizowane na potrzeby powyższych prac zostały także wykorzystane do bezznacznikowej (ang. label-free) detekcji bakterii z użyciem warstwy bakteriofagów jako specyficznych receptorów nakierowanych na przyłączenie tylko określonego rodzaju bakterii [11]. Na tym etapie prac podjęto współpracę z grupą dr Mohammeda Zourob'a wówczas z Institut national de la recherche scientifique - Énergie (Kanada), a obecnie z Cranfield University (UK). Wykorzystanie bakteriofagów i struktur LPG do detekcji bakterii można uznać za pionierskie w skali światowej. Detekcja bezznacznikowa, w przeciwieństwie do metod znacznikowych polegających na pomiarze zmian fluorescencji zachodzących w wyniku reakcji biochemicznych po przyłączeniu molekuly badanej, polega na pomiarze zmian grubości lub gęstości (tj. współczynnika załamania) cienkich warstw powstających na powierzchni struktury czujnikowej. Prowadzone przez mnie prace pokazują, że z wykorzystaniem struktur LPG możliwe jest monitorowanie kinetyki reakcji zachodzących na powierzchni siatki, jak również samego procesu narastania warstwy biologicznej, którym jest między innymi przyłączenie bakterii do wysyczonej bakteriofagami powierzchni struktury LPG. Nowatorski mechanizm pomiaru został wyróżniony przez The Virtual Journal for Biomedical Optics, którego edytor wybrał artykuł do równoległej (poza Optics Express) publikacji w tym czasopiśmie. Rozwiązanie to zostało także zaprezentowane na wystawach wynalazków [D5, D6], gdzie zostało nagrodzone dwoma medalami (złoty [K2] i srebrny [K3]) oraz dyplomem uznania [K1]. Wyniki badań z zakresu detekcji bezznacznikowej były ponadto publikowane [E17] i przedstawiane na konferencjach naukowych [L8, L9, 2B34, 2B37, 2B40].

Niezależnie prowadzono badania czułości uzyskiwanych struktur LPG na zmiany ciśnienia hydrostatycznego. Wyniki pierwszych eksperymentów dotyczących efektu czułości siatek LPG wytworzonych w telekomunikacyjnych światłowodach jednomodowych, jak i włóknach PCF

opublikowała grupa prof. W. Bocka [Bock2007]. Prace prowadzone później z moim udziałem dowodzą, że czułość na zmiany ciśnienia wynika głównie z różnych współczynników ciśnieniowo-optycznych materiału rdzenia i płaszcza światłowodu [6]. Z tego punktu widzenia, wykorzystanie światłowodów z rdzeniem domieszkowanym borem oferuje od 4 do 8 razy większą czułość na ciśnienie dla wytworzonych w nim struktur LPG, niż uzyskiwana dla analogicznych struktur wytworzonych w standardowym światłowodzie telekomunikacyjnym, gdzie rdzeń jest domieszkowany tylko germanem lub w światłowodzie PCF, gdzie w wyniku zmian ciśnienia otwory doznają deformacji. Ponadto pokazałem, że symulacje komputerowe otrzymanych struktur uzupełnione o dane pomiarowe w zakresie czułości siatek na zmiany ciśnienia, pozwalają na wyznaczenie współczynnika ciśnieniowo-optycznego materiału rdzenia światłowodu.

Ze względu na bardzo obiecujące wyniki czułości na zmiany ciśnienia uzyskane dzięki zastosowaniu światłowodu z rdzeniem domieszkowanym borem, kontynuowano badania tego efektu z wykorzystaniem siatek o skróconym okresie. W pracy [14] analizowano wpływ temperatury na zmiany ciśnienia hydrostatycznego monitorowanego z wykorzystaniem struktur LPG. Mając na uwadze wysoką czułość struktur zarówno na ciśnienie jak i temperaturę, przeprowadzono badania nad możliwością sterowania czułością na ciśnienie poprzez zmiany temperatury. Sterowanie termiczne zakresem czułości siatki na inne czynniki mierzone jest podejściem unikatowym. Dla struktur LPG wytwarzanych poprzez naświetlenie promieniowaniem UV, typowym jest sterowanie czułością poprzez dobór czasu naświetlania siatki podczas jej wytwarzania. W naszej pracy porównano wspomniane sposoby sterowania czułością na zmiany ciśnienia tj. poprzez dobór czasu naświetlania i temperaturę pracy, oraz udowodniono, że w obu przypadkach możliwe jest uzyskanie czułości sięgającej ponad 1 nm/bar. Należy podkreślić, że uzyskana wartość należy do najwyższych czułości na zmiany ciśnienia hydrostatycznego spotykanych w literaturze, w szczególności na struktur LPG wytworzonych w komercyjnie dostępnych włóknach światłowodowych. Wyniki badań dotyczące pomiaru ciśnienia opublikowano także w pracach [E3, E7, E12] i przedstawiono podczas konferencji naukowych [2B6, 2B7, 2B12, 2B20]. Prace z zakresu wykorzystania struktur LPG do pomiaru ciśnienia zostały nagrodzone złotym medalem [K10] podczas wystawy wynalazków [D4], a także nagrodą AGEPI [K9] i dyplomem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego [K8].

Doskonalenie zarówno metod uzyskiwania struktur LPG jak i pokryć na nie, umożliwiło wytworzenie struktur czujnikowych z pokryciami SiN_x do pomiaru ciśnienia i temperatury w ośrodkach o różnym współczynniku załamania. Opracowana technologia osadzania pokryć SiN_x na strukturach LPG nie tylko pozwala na poszerzenie gamy pokryć, ale przede wszystkim ze względu na wysoki i możliwy do modyfikacji w szerokim zakresie współczynnik załamania tych warstw, pozwala na ich osadzanie jako bardzo cienkich (dziesiątki nm), przez co możliwe jest skrócenie procesu

osadzania i uczynienie go bardziej ekonomicznym. Uzyskane warstwy należą do najcieńszych osadzonych dotychczas na strukturach LPG i zarazem zdolnych do modyfikacji czułości takich struktur na zmiany współczynnika załamania otoczenia. Należy także podkreślić, że dotychczas jedynie z wykorzystaniem metod plazmowych udało się uzyskać warstwy o precyzyjnie kontrolowanej grubości i wysokim współczynniku załamania ($n > 2.2$ dla $\lambda = 1550$ nm). W pracy [8] skupiłem się na minimalizacji wpływu współczynnika załamania otoczenia na pomiar ciśnienia hydrostatycznego zrealizowanego z udziałem struktur LPG z pokryciami SiN_x . Ze względu na wysoki współczynnik załamania oleju, dla którego zanika efekt rezonansowy w widmie struktury LPG, pomiar ciśnienia w tym medium nie jest możliwy z wykorzystaniem struktur LPG bez pokrycia. Jak pokazały nasze badania, poprzez zastosowanie pokryć SiN_x możliwe jest, w przeciwieństwie maksymalizacji czułości na potrzeby poprzednich badań, również zminimalizowanie czułości na zmiany współczynnika załamania, przez co jego wpływ zaburzający na pomiar ciśnienia w różnych ośrodkach (woda, olej) jest minimalny. Badania przedstawione w pracy [13] dowodzą z kolei, że podobna procedura minimalizacji czułości na zmiany współczynnika załamania może być przeprowadzona w przypadku pomiaru temperatury z użyciem struktur LPG. W pracy dodatkowo porównano efekt osadzenia warstw SiN_x na strukturach LPG wytworzonych z wykorzystaniem wyładowania w łuku elektrycznym i poprzez naświetlenie laserem UV. Omawianej tematyki dotyczą też publikacje [A4, A8, E13, E14, E18] i prezentacje konferencyjne [L4-L9, 2B22, 2B31, 2B32, 2B33, 2B35]. Należy podkreślić, że prace innych autorów zmierzające do minimalizacji czułości LPG na zmiany współczynnika załamania poprzez zastosowanie cienkich pokryć nie są znane. Fakt ten najprawdopodobniej wynika z trudności w uzyskaniu odpornych mechanicznie, chemicznie i temperaturowo pokryć zdolnych do długotrwałej pracy w wodzie lub oleju, szczególnie przy podwyższonym ciśnieniu i temperaturze.

Podsumowując, do najważniejszych elementów wkładu przedłożonego osiągnięcia naukowego w rozwój technologii struktur LPG z pokryciami cienkowarstwowymi należy zaliczyć:

- opracowanie technologii kontrolowanego plazmowego osadzania cienkich warstw diamentopodobnych (DLC) i azotku krzemu (SiN_x) na strukturach LPG
 - *uzyskanie najtwardszych i najbardziej trwałych pokryć, a jednocześnie najcieńszych i o najwyższym współczynniku załamania, zdolnych modyfikować czułość struktur LPG,*
 - *pierwsze zastosowanie cienkich pokryć do minimalizacji wpływu współczynnika załamania otoczenia zaburzającego pomiar ciśnienia i temperatury realizowany z użyciem struktur LPG,*
- analizy właściwości warstw DLC i SiN_x z punktu widzenia ich zastosowań jako pokryć dla światłowodowych struktur sensorycznych

- *pierwsze badania korelacji grubości i właściwości optycznych dla warstw uzyskiwanych w technologiach plazmowych,*
- *oryginalne badania wpływu materiału podłoża na właściwości warstw uzyskiwanych w technologiach plazmowych,*
- *rozwój technologii otrzymywania struktur LPG w metodzie wyładowania łukowego w aspekcie optymalizacji ich czułości*
 - *uzyskanie najwyższej czułości (najniższy okres) struktur LPG otrzymywanych w metodzie wyładowania łukowego,*
- *opracowanie technologii czujników ciśnienia hydrostatycznego opartych na strukturach światłowodowych siatek długookresowych LPG wytworzonych w światłowodach z rdzeniem domieszkowanym borem*
 - *uzyskanie najwyższej czułości na zmiany ciśnienia hydrostatycznego w zakresie zastosowań struktur LPG wytwarzanych w komercyjnie dostępnych światłowodach,*
 - *pierwsze zastosowanie zmian temperatury do sterowania zakresem czułości na zmiany ciśnienia,*
- *opracowanie technologii struktur LPG wykorzystujących pokrycie z bakteriofagów do selektywnego wykrywania obecności bakterii*
 - *pierwsze zastosowanie bakteriofagów jako warstwy receptorowej na powierzchni struktur LPG.*

Kluczowe pozycje literaturowe z punktu widzenia zakresu tematycznego osiągnięcia

- [Bock2007] W.J. Bock, J. Chen, P. Mikulic, T. Eftimov, "A Novel Fiber-Optic Tapered Long-Period Grating Sensor for Pressure Monitoring", IEEE Trans. Instr. Meas. 56 (2007) 1176-80
- [Dianov1997] E.M. Dianov, V.I. Karpov, M. V. Grekov, K. M. Golant, S.A. Vasiliev, O.I. Medvekov, R.R. Khrapko, "Thermo-induced long period fibre grating", IOOC-ECOC 2 (1997) 53-6
- [Hill1978] K. O. Hill, Y. Fuji, D.C. Johnson and B.S. Kawasaki, "Photosensitivity in optical fiber waveguides - application to reflection filter fabrication," Appl. Phys. Lett. 32 (1978) 647-9
- [Lin2000] C.Y. Lin, L.A. Wang, L.A. Wang, "Corrugated long period fiber gratings as band-rejection filters", Optical Fiber Communication Conference 1 (2000) 20-2
- [Rees2002] N.D. Rees, S.W. James, R.P. Tatam, G.J. Ashwell, "Optical fibre long period gratings with Langmuir Blodgett thin film overlays" Opt. Lett. 9 (2002) 686-8
- [Savin2000] S. Savin, M.J.F. Digonnet, G.S. Kino, H.J. Shaw, "Tunable mechanically induced long-period fibre gratings", Opt. Lett. 25 (2000) 710-2
- [Vengsarkar1996] A.M. Vengsarkar, P.J. Lemaire, J. B. Judkins, V. Bhatia, T. Erdogan, J.E. Sipe, "Long-period fiber gratings as band-rejection filters", J. Lightwave Technol. 14 (1996) 58-65

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych⁴

Poza jednotematycznym cyklem 14 publikacji, moje osiągnięcia naukowo-badawcze obejmują 1 patent [C1], 27 innych publikacji (w tym 8 z list JRC [A1-A8]) i prezentacji konferencyjnych. Większość z nich dotyczy badania cienkich warstw oraz innych niż LPG konstrukcji czujnikowych tj. interferometrów międzymodowych (ang. intermodal inteferometer) opartych na światłowodach PCF [A2, E8, 2B14], nanorezonatorów Fabry-Perot [E10, 2B18] i struktur światłowodów wielomodowych PCS (ang. Polymer-Clad Silica) z odsłoniętym odcinkiem rdzenia [A5, E11, 2B19, 2B25]. W każdej z tych konstrukcji kluczowe jest wykorzystanie cienkich pokryć niezbędnych do funkcjonowania struktury czujnikowej. Pokrycia te były wytwarzane na potrzeby prac nie tylko w metodach wykorzystujących plazmę RF, ale także z udziałem plazmy mikrofalowej (ang. Microwave, MW) [A6, 2B17, 2B24, 2B26, 2B38] i techniki osadzania warstw atomowych (ang. Atomic Layer Deposition, ALD) [E16, 2B18, 2B27]. Niezależnie w moim dorobku występuje kilka prac dotyczących struktur tranzystorowych w tym struktur typu FET (ang. Field Effect Transistor) [E15] i TFT (ang. Thin Film Transistor) [A3].

Wyniki moich prac były prezentowane ponad 40 razy podczas konferencji naukowych zarówno z zakresu elektroniki, jak i inżynierii materiałowej oraz fotoniki. W przypadku znaczącej większości ze wspomnianych prezentacji ustnych (9 referatów [L1-L9], w tym 1 zaproszony [L3]) i plakatowych byłem pierwszym i prezentującym autorem. W przypadku kilku konferencji międzynarodowych byłem członkiem komitetu programowego [2C1, 2C3] i organizacyjnego [2C2]. Należy podkreślić, że jako członek komitetu organizacyjnego *21st International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS21)* brałem czynny udział w przygotowaniu najbardziej renomowanej i cenionej konferencji z zakresu czujników światłowodowych na świecie. Ponadto, najwartościowsze z osiągnięć technicznych były przedmiotem prezentacji na wystawach wynalazków [D1-D6], gdzie zdobyły w sumie 5 medali [K2, K3, K10, K12, K13] i 4 wyróżnienia [K1, K8, K9, K11].

Uzyskanie wielu z omawianych osiągnięć nie byłoby możliwe bez pozyskania finansowania na przeprowadzenie kosztownych badań technologicznych. Moje starania zaowocowały przyznaniem finansowania w ramach tak prestiżowych konkursów jak LIDER (II edycja, Narodowe Centrum Badań i Rozwoju) [J4], Homing Plus (Fundacja na rzecz Nauk Polskiej) [J6], czy IUVENTUS Plus (Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego) [J3]. W ramach tych projektów również rozwijana była i jest tematyka struktur LPG wytwarzanych już w laboratoriach IMiO [E19], szczególnie w aspekcie możliwości zastosowania innych warstw i metod ich osadzania, tak aby nadawać strukturom LPG nowe cechy użytkowe. Ponadto, kierowałem 9 [J1-J9] i współrealizowałem 11 [J10-J20] projektów badawczych.

⁴ dotyczy okresu po uzyskaniu stopnia doktora

Jestem obecnie szczególnie zaangażowany w charakterze wykonawcy w realizację 2 interdyscyplinarnych projektów badawczych mających na celu powołanie nowego zespołu naukowego (Sonata BIS, Narodowe Centrum Nauki) [J10, J11]. Prowadzenie badań interdyscyplinarnych nie byłoby możliwe bez współpracy [2Q1, 2Q2] ze specjalistami z zakresu inżynierii materiałowej (Politechnika Łódzka, Narodowe Centrum Badań Jądrowych, Instytut Transportu Samochodowego, Instytut Fizyki PAN, Instytut Technologii i Materiałów Elektronicznych, Politechnika Gdańska), fotoniki (Universite du Quebec en Outaouais, Virginia Polytechnic Institute and State University, Carleton University, Indian Institute of Technology Delhi) i biologii (Institut national de la recherche scientifique – Énergie, Instytut Immunologii i Terapii Doświadczalnej PAN, Uniwersytet Medyczny w Łodzi). Ponadto, jako opiekun naukowy Studenckiego Koła Naukowego Mikroelektroniki i Nanoelektroniki kieruję projektami studenckimi [J1, J5, J8], które z inicjatywy studentów są realizowane przy finansowaniu ze środków J.M. Rektora Politechniki Warszawskiej.

W ramach prowadzonych prac badawczych także uzyskałem pomoc stypendialną pozwalającą mi intensywnie prowadzić dalsze prace naukowo-badawcze. Stypendia były mi przyznane ze środków Fundacji na rzecz Nauki Polskiej [K7], Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego (stypendium dla wybitnych młodych naukowców) [K4], Centrum Studiów Zaawansowanych Politechniki Warszawskiej (stypendium dla młodych doktorów) [K15] i le ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport du Québec, Kanada (Le Fonds québécois de la recherche sur la nature et les Technologies, FQRNT) [K14]. Ponadto, zostałem też dwukrotnie uhonorowany za osiągnięcia naukowe indywidualną nagrodą J.M. Rektora Politechniki Warszawskiej [K5, K16].

Odrębną grupę mojej aktywności stanowią zagadnienia związane z komercjalizacją wyników badań naukowych. Udział w pilotażowej edycji programu stażowo-szkoleniowego „TOP 500 Innovators – Science, Management, Commercialization” [2D3] odbywającej się na Uniwersytecie Stanforda w USA [2L1], pozwolił mi na zaangażowanie się w wyzwania stojące przed jednostkami naukowymi w zakresie transferu technologii. Byłem współautorem opracowania na zlecenie J.M. Rektora Politechniki Warszawskiej „Koncepcja systemu transferu wiedzy i technologii w Politechnice Warszawskiej” oraz dokumentu obejmującego „Regulamin zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi oraz prawami własności przemysłowej oraz zasad komercjalizacji wyników badań naukowych i prac rozwojowych” [F2, 2M2]. Obecnie jestem zaangażowany w działalność stowarzyszenia „TOP 500 Innovators” [2H1], inicjatywę „Boomerang” [2H2] oraz działania zmierzające do powstania Interdyscyplinarnego Centrum Studenckiego Ruchu Naukowego i Szkoły Myślenia Projektowego (ang. Desing Thinking) na Politechnice Warszawskiej [2Q3].

Szczegółowe zestawienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych zawarto w Załączniku 4a pt. „Wykaz opublikowanych prac naukowych lub twórczych prac zawodowych oraz informacja o osiągnięciach dydaktycznych, współpracy naukowej i popularyzacji nauki”.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "M. Śmietana". The signature is fluid and cursive, with a long horizontal stroke at the end.