



Uniwersytet Warszawski

Wydział Fizyki

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

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

Warszawa, 24 marca 2017

Recenzja

rozprawy doktorskiej

"Światłowody dwójłomne do badania odkształceń dynamicznych w materiałach kompozytowych" **mgra inż. Marcina S. Biedy**

Rozprawa dotyczy polarymetrycznych czujników światłowodowych przeznaczonych do badania odkształceń materiałów kompozytowych, które wybrano do analizy ze względu na ich częste wykorzystanie w technice oraz łatwość wbudowania sond do ich wnętrza. W polarymetrycznych czujnikach światłowodowych na skutek zmian fizycznych czynników zewnętrznych dochodzi do różnych przesunięć fazy w propagujących się modach polaryzacyjnych. W polarymetrycznych czujnikach na światłowodach dwójłomnych zmiana fazy między modami zmienia się liniowo, czyli analizowany sygnał natężeniowy jest modulowany szybkozmienną sinusoidą. Tę modulację wywołuje podlegający analizie dynamicznie zmienny parametr fizyczny np. odkształcenie czy temperatura, ale również parametr niekontrolowany np. drobne zmiany w mechanicznej strukturze światłowodu.

Pan Bieda wykonał pracę doktorską w Zakładzie Optyki i Fotoniki Wydziału Fizyki PW pod opieką prof. dra hab. Tomasza Wolińskiego we współpracy z promotorem pomocniczym drem inż. Piotrem Sobotką. Badania składające się na rozprawę były finansowane przez NCBR w ramach projektu badań stosowanych „Fotoniczne materiały kompozytowe do monitorowania struktur lotniczych – PHOTCOM” umowa PBS1/B5/20/2012.

Pan Bieda jest współautorem następujących 7 publikacji, z których trzy [3, 6, 7] są związane tematycznie z ocenianą rozprawą:

1. P. Gasiór, M. Bieda, M. Kubkowska, R. Neu, J. Wolowski, Laser induced breakdown spectroscopy as diagnostics for fuel retention and removal and wall composition in fusion reactors with mixed-material components. *Fusion Engineering and Design* 86(6–8), 1239-1242 (2011). Doi: 10.1016/j.fusengdes.2011.02.046.
2. A. Kowalczyk, M. Bieda, M. Makowski, M. Sypek, A. Kolodziejczyk, Fiber-based real-time color digital in-line holography. *Applied Optics* 52(19), 4743-4748 (2013). Doi: 10.1364/AO.52.004743
3. A. W. Domański, M. Bieda, P. Lesiak, P. Makowski, M. Szelaąg, T. Poczesny, K. Prokopczuk, P. Sobotka, M. Chychłowski, M. Sierakowski, T. R. Woliński, Polarimetric optical fiber sensors for dynamic strain measurement in composite materials. *Acta Physica Polonica A* 124, 399-401 (2013).
4. J. Suszek, A. Siemion, M. S. Bieda, N. Błocki, D. Coquillat, G. Cywiński, E. Czerwińska, M. Doch, A. Kowalczyk, N. Palka, A. Sobczyk, P. Zagrajek, M. Zaremba, A. Kolodziejczyk, W. Knap, M.

- Sypek, 3-D-printed flat optics for THz linear scanners. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology* 5(2), 314-316 (2015). Doi: 10.1109/TTHZ.2015.2398313
5. I. Ducin, T. Shimobaba, M. Makowski, K. Kakarenko, A. Kowalczyk, J. Suszek, M. Bieda, A. Kolodziejczyk, M. Sypek, Holographic projection of images with step-less zoom and noise suppression by pixel separation. *Optics Communications* 340, 131-135 (2015). Doi: 10.1016/j.optcom.2014.11.100.
 6. M. S. Bieda, P. Lesiak, T. R. Woliński, Y. Semenova, G. Farrell, Demodulation algorithm using the Hilbert transform for a dynamic polarimetric optical fiber sensor. *IEEE Sensors Journal* 15(11), 6664-6670 (2015). Doi: 10.1109/JSEN.2015.2451704.
 7. M. S. Bieda, P. Sobotka, T. R. Woliński, Chirped fiber Bragg grating written in highly birefringent fiber in simultaneous strain and temperature monitoring. *Applied Optics* 56(6), 1625-1630 (2017). Doi: 10.1364/AO.56.001625.

Ponadto jest współautorem 3 komunikatów konferencyjnych opublikowanych w *Proceedings of SPIE*.

Wyniki przedstawione w dwóch ostatnich artykułach, których mgr inż. Marcin S. Bieda jest pierwszym autorem, pozwoliły mu na przedstawienie dwóch tez rozprawy. Autor dowodzi, że w badaniach odkształceń dynamicznych w materiałach kompozytowych możliwe jest wykorzystanie światłowodów dwójłomnych do:

- dynamicznego pomiaru odkształcenia za pomocą światłowodu dwójłomnego i pojedynczego detektora natężenia, oraz
- równoczesnego pomiaru odkształcenia oraz temperatury za pomocą zmienno-okresowej siatki Bragga zapisanej w światłowodzie dwójłomnym, przy wykorzystaniu dwóch detektorów natężenia światła.

W trzecim rozdziale (str. 49-63) Autor rozprawy przedstawił nową metodę analizy szybkich zmian stanu polaryzacji, która pozwala na zwiększenie zakresu pomiarowego zmian badanego parametru i poprawę dokładności pomiarów [M. S. Bieda, P. Lesiak, T. R. Woliński, Y. Semenova, G. Farrell, Chirped fiber Bragg grating written in highly birefringent fiber in simultaneous strain and temperature monitoring. *IEEE Sensors Journal* 15(11), 6664-6670 (2015)]. Zaproponowany algorytm przetwarza zapisany przez pojedynczy detektor sygnał natężeniowy, który sinusoidalnie zależy od temperatury i naprężenia. Z zapisanego sygnału rzeczywistego Autor najpierw filtruje stałą wartość tła (czyli usuwa składową widmową o zerowej częstotliwości) i separuje część sinusoidalnie zmienną. W części sinusoidalnej rozdziela część wolnozmienną i szybkozmienną. Następnie sinusoidalny sygnał rzeczywisty przekształca w sygnał zespolony wykorzystując do tego celu transformatę Hilberta. Ze stosunku części urojonej sygnału do rzeczywistej znajduje fazę tego sygnału. Na koniec, odfiltrowuje wolnozmienną zależność od temperatury i pozostaje z sygnałem zależnym tylko od odkształcenia. Wykorzystanie przekształcenia Hilberta połączone z dwukrotną filtracją górnoprzepustową pozwala na ograniczenie wpływu temperatury na wykonywany pomiar odkształcenia.

Drugą istotną częścią pracy jest czwarty rozdział (str. 64-77) oparty na wynikach przedstawionych w ostatnio opublikowanym artykule [M. S. Bieda, P. Sobotka, T. R. Woliński, Chirped fiber Bragg grating written in highly birefringent fiber in simultaneous strain and temperature monitoring. *Applied Optics* 56(6), 1625-1630 (2017)]. W rozdziale przedstawiono wykorzystanie układu zbudowanego z pojedynczego światłowodu dwójłomnego z zapisaną zmienno-okresową siatką Bragga i dwóch detektorów światła do jednoczesnego pomiaru odkształceń i temperatury. Do czujnika dociera spolaryzowane światło z szerokopasmowej diody superluminescencyjnej pracującej w zakresie 1300 ± 50 nm. Zwykła siatka Bragga ma różne efektywne współczynniki załamania dla dwóch wzajemnie prostopadłych modów polaryzacyjnych, a różnica długości spolaryzowanych fal odbitych jest duża i

zależna od okresu siatki oraz różnicy efektywnych współczynników załamania czyli dwójłomności fazowej. Natomiast widmo odbiciowe zmienno-okresowej siatki Bragga dla dwóch wzajemnie prostopadłych polaryzacji zależy od długości fali w znacznie mniejszym stopniu. To pozwala w jednym czujniku wykorzystywać do pomiaru dwie prostopadłe polaryzacje. Część promieniowania o jednej polaryzacji pada na siatkę Bragga od końca z większym okresem, odbija się i trafia do gałęzi detektora polarymetrycznego. Natężenie tej wiązki jest modulowane funkcją sinus. Informacje o zmianach temperatury wydobywa się z sygnału podobnie jak w poprzedniej metodzie, czyli wykorzystując transformatę Hilberta. Część wiązki o prostopadłej polaryzacji po odbiciu od zmienno-okresowej siatki Bragga trafia do drugiego detektora po przejściu przez drugą, identyczną z pierwszą, zmienno-okresową siatkę Bragga ustawioną w taki sam sposób, że wiązka natrafia najpierw na modulację z większym okresem. (Na Rys. 2.12 i 4.6 pokazano inne ustawienie siatek Bragga w sondzie i drugiej gałęzi detekcji.) Gdy obie siatki znajdują się w takich samych warunkach fizycznych, to mają identyczne widmo odbicia i na detektor trafia bardzo mały sygnał. Umieszczenie sondy w innej temperaturze zmienia widmo odbicia siatki i detektor w drugiej gałęzi mierzy zmianę widma. Na koniec Autor wyjaśnia algorytm analizy sygnałów z obu czujników.

Mam wrażenie, że inspiracją do budowy opisanego w czwartym rozdziale czujnika była lektura cytowanej w rozprawie pracy: [Y. Zhan, L. Li, F. Yang, K. Gu, H. Wu i M. Yu, „An all-fibre multi-parameter sensor for composite structures based on a chirped fibre Bragg grating,” *Opto-electronics Review* 21(3), 283–287 (2013)]. Szkoda, że p. Bieda nie podkreślił w rozprawie swojego oryginalnego wkładu do rozwoju czujnika hybrydowego wykorzystującego włókna dwójłomne z zapisanymi w nich zmienno-okresowymi siatkami Bragga.

Pozostałe rozdziały rozprawy mają charakter pomocniczy.

Pierwszy rozdział (str. 15-39) jest poświęcony opisowi propagacji światła spolaryzowanego w światłowodzie cylindrycznym. Autor przytacza pojęcia wektora i macierzy Jonesa potrzebne mu w dalszej części rozprawy do opisu stanu polaryzacji całkowicie spolaryzowanego światła monochromatycznego. Dla potrzeb opisu światła częściowo spolaryzowanego przypomina składowe wektora Stokesa i macierze Muellera. We włóknach dwójłomnych definiuje dwójłomność fazową jako różnicę skutecznych współczynników załamania wpływających na różne prędkości fazowe monochromatycznych i ortogonalnych modów polaryzacyjnych. Dla światła niemonochromatycznego wprowadza dwójłomność grupową jako różnicę wartości efektywnych grupowych współczynników załamania modów.

Pan Bieda przedstawia strukturę czujników na światłowodach dwójłomnych przez analogię do klasycznych interferometrów optycznych Macha-Zendera, Michelsona i Sagnaca. Podkreśla, że różnica faz między modami polaryzacyjnymi w czujnikach światłowodowych odpowiada różnicy faz w ramionach interferometrów. W czujnikach różnicę faz między dwoma ortogonalnymi modami polaryzacyjnymi wywołuje czynnik zewnętrzny, np. temperatura czy odkształcenie. W czujniku światłowodowym punktem interferencji dwóch ortogonalnych modów polaryzacyjnych jest spaw dwóch włókien tak wykonany, żeby kąt między osiami szybkimi w obu włóknach wynosił 45° . Dzięki temu, liniowo spolaryzowana wiązka we włóknie wejściowym pobudza dwa wzajemnie prostopadłe mody polaryzacyjne we włóknie pomiarowym.

Pierwszy rozdział zawiera również krótki opis sposobów instalowania światłowodowych czujników polarymetrycznych w badanych układach mechanicznych o anizotropowej strukturze, który jest rozwinięty w następnym rozdziale.

Drugi rozdział rozprawy (str. 40-48) przedstawia układy, materiały, metody pomiarowe i problemy z wykonywaniem próbek. Niepokój wzbudziło we mnie jedno zdanie: „Dużym wyzwaniem podczas wytwarzania próbek było zabezpieczenie końcówek światłowodów, które wystawały z materiału

kompozytowego, przed uszkodzeniami mechanicznymi podczas wykonywania oraz utwardzania kompozytu.” Strach pomyśleć jakim wyzwaniem może być budowa czujników do monitorowania rzeczywistych struktur lotniczych.

W ostatnim rozdziale (str. 78-86) p. Bieda podaje przykład zastosowania kilku czujników ze światłowodów izotropowych i wysoko dwójłomnych z dospawanymi siatkami Bragga do laboratoryjnego badania efektów zmęczeniowych w goleni kompozytowej ultralekkiego samolotu Aero AT3. Goleń wykonała współpracującą z nim firmą DELTA. Badania wykonano w komorze klimatycznej w temperaturach z zakresu od 0° do 65°C. Pomiar czujnikami światłowodowymi okazał się zgodny z równoległymi pomiarami wykonanymi tensometrem.

Rozprawa ma bardzo ładną szatę graficzną natomiast redakcja powinna być bardziej staranna. Kilka razy pojawia się błędne użycie przyimka: *...do pomiaru ...opartego o siatkę zmienno-okresową* zamiast *...opartego na siatce*.

Przedłożona mi do recenzji rozprawa może być podstawą uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych w świetle wymagań formalnych stawianych przez odpowiednie ustawy. Proszę więc o dopuszczenie mgr inż. Marcina S. Biedy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

