

Prof. dr hab. inż. Waław Urbańczyk
Katedra Optyki i Fotoniki
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
waław.urbaczyk@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Biedy pt. „Światłowody dwójłomne do badania odkształceń dynamicznych w materiałach kompozytowych”

Rozprawa doktorska Pana mgra inż Marcina Biedy została wykona pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Tomasza Wolińskiego, a promotorem pomocniczym był dr inż. Piotr Sobotka, obaj z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej. Badania przedstawione w ramach rozprawy były finansowane z grantu NCBiR pod tytułem „Fotoniczne materiały kompozytowe do monitorowania struktur lotniczych”. Rozprawa ma charakter głównie eksperymentalny i koncentruje się na wykorzystaniu światłowodów dwójłomnych i siatek Bragga do monitorowania mechanicznych i termicznych obciążeń struktur kompozytowych.

Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna i wpisuje się w trend zastępowania konstrukcji metalowych przez ich kompozytowe odpowiedniki, co związane jest z wysoką mechaniczną wytrzymałością kompozytów i stosunkowo małą masą. Takie właściwości kompozytów umożliwiają ich zastosowania w przemyśle lotniczym, maszynowym i budownictwie.

Rozprawa składa się z 6 rozdziałów, 1 załącznika i wykazu cytowanej literatury (96 pozycji) o łącznej długości 102 stron. Na końcu rozprawy Autor dołączył także wykaz własnych publikacji, który składa się z 6 współautorskich artykułów w czasopismach z Listy Filadelfijskiej, przy czym tylko 3 z nich wiążą się bezpośrednio z tematyką rozprawy: *Applied Optics*, *IEEE Sensors Journal*, *Acta Physica Polonica A*, 7 artykułów w czasopismach spoza LF (1 związany z rozprawą), 10 komunikatów konferencyjnych (7 związanych z rozprawą) oraz 1 zgłoszenia patentowego dotyczącego holograficznego projektora obrazów barwnych. W dwóch artykułach z LF Autor rozprawy pojawia się na pierwszym miejscu na liście współautorów.

Rozdział 1. stanowi wprowadzenie w tematykę rozprawy. Przedstawiono w nim podstawowe pojęcia dotyczące światłowodów, w tym w szczególności światłowodów dwójłomnych oraz polarymetrycznych czujników światłowodowych. W rozdziale 1. zawarto również informacje na temat klasyfikacji materiałów kompozytowych i ich podstawowych

właściwości oraz przegląd znanych z literatury rozwiązań dotyczących zastosowań polarymetrycznych czujników światłowodowych.

W rozdziale 2. omówiono proces wytwarzania kompozytu oraz sposób integracji czujników światłowodowych z elementami kompozytowymi. Przedstawiono w nim także różne konfiguracje czujników polarymetrycznych stosowanych do monitorowania stanu kompozytu, w tym czujniki transmisyjne i odbiciowe, sposób kompensowania efektów temperaturowych oraz czujniki, w których jako element odbiciowy zastosowano siatkę Bragga o zmiennym okresie. Ciekawym rozwiązaniem zaproponowanym przez Autora jest prosty, natężeniowy sposób detekcji, umożliwiający jednoczesne śledzenie zmian stanu polaryzacji w czujniku polarymetrycznym i przesunięcia widma odbiciowego siatki Bragga o zmiennym okresie, co w konsekwencji umożliwia jednoczesny pomiar dwóch parametrów fizycznych, na przykład odkształcenia i temperatury.

W rozdziale 3. przedstawiono oryginalny algorytm analizy sygnału optycznego z czujnika polarymetrycznego, wykorzystujący transformatę Hilberta. Główną zaletą zaproponowanego algorytmu jest powiększenie dynamiki pomiaru zmian fazy do 27 dB, co znacznie wykracza poza liniową część odpowiedzi tradycyjnego systemu detekcji ograniczonego sinusoidalną charakterystyką czujnika polarymetrycznego. Skuteczność opracowanego algorytmu została potwierdzona w praktyce, poprzez porównanie odpowiedzi na dynamiczne zamiany odkształcenia z czujnika polarymetrycznego i elektronicznego czujnika przyspieszenia.

W rozdziale 4. Autor przedstawił oryginalną metodę umożliwiającą jednoczesny pomiar temperatury oraz odkształceń za pomocą pojedynczego czujnika polarymetrycznego, w którym jako element odbiciowy zastosowano siatkę Bragga o zmiennym okresie. Wielkościami mierzonymi bezpośrednio jest różnicowa zmiana fazy w czujniku polarymetrycznym i przesunięcie widma odbiciowego siatki Bragga. Autor potwierdził eksperymentalnie, że oba elementy pomiarowe wykazują różną czułość na temperaturę i wydłużenie, co umożliwia jednoznaczne rozwiązanie układu równań liniowych opisujących odpowiedź czujnika i w konsekwencji wyznaczenie obu parametrów. W zaproponowanym rozwiązaniu czujnik optyczny jest zbudowany wyłącznie z elementów światłowodowych, co podwyższa jego funkcjonalność i niezawodność. Dodatkową zaletą tego czujnika jest wyłącznie natężeniowy sposób detekcji, co redukuje czas odpowiedzi, a także koszty. Opracowaną metodę przetestowano zarówno w pomiarach statycznych, jak i dynamicznych. Przy stałej temperaturze czujnika uzyskano rozdzielczość pomiaru odkształcenia rzędu $\pm 20 \mu\epsilon$. Przy równoczesnym pomiarze temperatury i odkształcenia uzyskano nieco gorszą

rozdzielczość, odpowiednio $\pm 50 \mu\epsilon$ oraz $\pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$. Uzyskane rozdzielczości pomiaru nie są rekordowe, ale jednak wystarczające do monitorowania elementów kompozytowych. Fakt ten został praktycznie potwierdzony w rozdziale 5., w którym przedstawiono wyniki laboratoryjnych testów czujnika hybrydowego zamocowanego na goleni kompozytowej ultralekkiego samolotu Aero AT-3 oraz czujników zatopionych w materiale kompozytowym. W pierwszym etapie elementy kompozytowe z czujnikami optycznymi były poddane badaniom zmęczeniowym, obejmującym wielokrotne cykle odkształceń w zmiennych warunkach środowiskowych. Następnie przeprowadzono testy obciążeniowe goleni z przymocowanym do niej czujnikiem optycznym. W obu przypadkach, wyniki uzyskane z czujnika światłowodowego wykazywały dobrą zgodność ze wskazaniami referencyjnego czujnika temperatury i czujnika tensometrycznego. Przedstawione w rozdziale 5. wyniki potwierdzają możliwość praktycznego wykorzystania opracowanych przez Autora rozwiązań. Pasma układu detekcyjnego rzędu 10 kHz oraz dość duża dynamika (27dB) powodują, że zaproponowany czujnik może rejestrować zarówno krótkotrwałe odkształcenie o dużej amplitudzie jak i powolne zmiany odkształcenia spowodowane np. wpływem temperatury.

Rozprawa jest na ogół dobrze napisana i zilustrowana przemyślanymi rysunkami. Liczba potknięć i niezręczności językowych jest jednak dość znaczna, przy czym najbardziej obciążające są niezręcznie sformułowane tezy rozprawy.

W trakcie czytania rozprawy nasunęły mi się dwie uwagi o charakterze merytorycznym. Pierwsza dotyczy pomiarów czułości włókna dwójłomnego (Bow-Tie) na temperaturę i rozciąganie. Wyniki przedstawione na rys.4.4 i 4.5 sugerują, że zmiany dwójłomności fazowej pod wpływem rosnącej temperatury i rozciągania są odpowiednio dodatnie i ujemne, tymczasem dany literaturowe mówią o odwrotnych znakach czułości. Druga wątpliwość dotyczy powodów ograniczenia zakresu rekonstrukcji fazy z wykorzystaniem transformaty Hilberta do przedziału $0-10\pi \text{ rad}$. Z opisu algorytmu wydaje się, że mógłby on działać w nieskończonym zakresie zmian fazy. Autor nie wyjaśnił jakie są fizyczne powody jego ograniczonej stosowalności?

Przytoczone wątpliwości nie wpływają jednak na ogólnie wysoką ocenę merytoryczną rozprawy. Moje uznanie budzi aktualna tematyka, szeroki zakres przeprowadzonych badań eksperymentalnych wspartych odpowiednimi symulacjami, a także potwierdzenie praktycznej stosowalności opracowanych rozwiązań w laboratoryjnych testach obciążeniowych goleni samolotowej.

Za najważniejsze wyniki rozprawy należy uznać opracowanie i implementację algorytmu rekonstrukcji zmian fazy z wykorzystaniem transformaty Hilberta, który znosi

ograniczenie zakresu pomiarowego wynikające z periodyczności sygnału interferencyjnego. Ważnym wynikiem jest także propozycja hybrydowego czujnika bazującego na włóknie dwójłomnym i zmiennie-okresowej siatce Bragga, który z powodzeniem zastosowano do jednoczesnego pomiaru odkształceń i temperatury. Zaletami czujnika są w pełni światłowodowa konfiguracja oraz natężeniowa metoda detekcji, gwarantująca niezawodność, niskie koszty i dość szerokie pasmo częstotliwościowe (do 10 kHz). Przydatność czujnika do monitorowania statycznych i dynamicznych obciążeń elementów kompozytowych została potwierdzona praktycznie. Ponadto, istotnym wynikiem rozprawy o charakterze technologicznym było opanowanie sposobów integracji czujników światłowodowych z elementem kompozytowym.

W podsumowaniu stwierdzam, że recenzowana rozprawa zawiera istotne wyniki naukowe i może być podstawą uzyskania stopnia doktora nauk fizycznych w świetle wymagań formalnych stawianych przez odpowiednie ustawy. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr inż. Marcina Biedy do dalszych etapów przewodu doktorskiego, a także o wyróżnienie rozprawy ze względu na wysoką wartość uzyskanych wyników, potwierdzoną trzema publikacjami w czasopismach z Listy Filadelfijskiej. Dodatkowo, Autor opublikował trzy inne prace w czasopismach wysokiej rangi (*Applied Optics*, *Optics Communications*, *Fusion Engineering and Design*) z zakresu holografii optycznej i metrologii, które wskazują na jego świetne przygotowanie do prowadzenia badań naukowych w dziedzinie optyki.



Prof. dr hab. inż. Waclaw Urbańczyk

Wrocław, 15 marca 2017 r.