

dr hab. inż. Jacek Mariusz Żmojda, prof. PB
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Świetlnej

Białystok, dn. 5.07.2022 r.

SEKRETARIAT
Rady Dyscypliny AEE

Wpłynęło dnia 11. 07. 2022
Zarejestrowano pod nr
Podpis *dh*

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Harasima pt. „Wieloparametrowe czujniki wykorzystujące światłowodowe skośne siatki Bragga”

Recenzja została wykonana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika, Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie z dnia 7.04.2022 r.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska Pana mgr inż. Damiana Harasima dotyczy istotnego zagadnienia związanego z opracowaniem, wytwarzaniem i aplikacjami światłowodowych skośnych siatek Bragga w wieloparametrycznych systemach pomiarowych. Od kilku lat tematyka wykorzystania klasycznych siatek o periodycznej zmianie współczynnika światła rdzenia światłowodu, jako czujników wielkości fizycznych, jest rozwijana przez wiele znaczących ośrodków badawczych na całym świecie. Jednocześnie dynamiczny rozwój samej technologii zapisu struktur Bragga na rdzeniu światłowodów pozwala na kształtowanie coraz to nowszych struktur o unikalnych właściwościach. Przedstawione w rozprawie rozważania dotyczą możliwości pomiarowych wytworzonych przez Doktoranta światłowodowych siatek Bragga o skośnym rozkładzie współczynnika załamania światła, w celu ich aplikacji jako czujników do jednoczesnego pomiaru kąta skręcenia (polaryzacji), przesunięcia (promień zgięcia) oraz temperatury otoczenia. Oprócz tego światłowodowe skośne struktury Bragga charakteryzuje relatywnie łatwa konstrukcja oraz możliwość miniaturyzacji samego przetwornika.

Recenzowana rozprawa stanowi spójny tekst napisany w języku polskim, obejmujący spis treści, streszczenie (również w języku angielskim), wstęp, sześć rozdziałów zasadniczych oraz podsumowanie i wnioski. Zawiera również spis 109 cytowanych publikacji (w tym 11 współautorskich Doktoranta) oraz wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów. Całość tekstu zawarta jest na 140 stronach.

Wstęp rozprawy stanowi ogólny opis możliwości pomiarowych światłowodowych siatek Bragga oraz modyfikacji ich struktury wewnętrznej w celu uzyskania różnych parametrów spektralnych. Można tu również odnaleźć informację na temat struktury dysertacji. W rozdziale 2 Autor stawia tezę badawczą oraz określa cel pracy, którego realizację opisuje 4 kluczowymi zadaniami badawczymi. Rozdział 3 dotyczy budowy i zasady działania światłowodowych siatek Bragga, ich rodzajów oraz ich właściwości ze szczególnym uwzględnieniem skośnych struktur Bragga (TFBG). Autor syntetycznie opisuje zjawiska fizyczne definiujące długość fali Bragga oraz jej związek z periodem (stała siatki). W każdym analizowanym przykładzie podane zostały również zależności matematyczne opisujące właściwości struktur o periodycznym rozkładzie współczynnika załamania światła niezbędne do wyznaczenia czułości tychże struktur poddanych zaburzeniom zewnętrznym w postaci odkształcenia czy temperatury. Zdefiniowane zostały również podstawowe parametry widmowe zarówno konwencjonalnych, jak i skośnych siatek Bragga. W kolejnym rozdziale Autor opisuje założenia technologii zapisu periodycznych struktur zmian współczynnika załamania światła w rdzeniu światłowodu. Podaje dostępne metody wytwarzania siatek w oparciu o maskę fazową oraz zjawisko interferencji. Obszernym, i ważnym z punktu widzenia omawianej pracy jest opis stanowiska badawczego znajdującego się w Laboratorium Optoelektroniki i Technik Laserowych Politechniki Lubelskiej, które Doktorant rozbudował w oparciu o autorski układ optomechaniczny, pozwalający na precyzyjne ustawianie kąta obrotu maski fazowej

względem osi wiązki lasera ekscymerowego oraz stabilizacji włókna światłowodowego. W tym też rozdziale zostały przedstawione charakterystyki widmowe wytworzonych przez Doktoranta skośnych struktur o periodycznym rozkładzie współczynnika załamania światła. Rozdział 5 dotyczy zasad pomiaru oraz analizy właściwości widmowych wytworzonych siatek w zaprojektowanych przez Doktoranta układach i metodach pomiarowych kąta obrotu, promienia gięcia oraz temperatury otoczenia. Pan mgr inż. Damian Harasim swoje badania przeprowadził dla dwóch struktur skośnych o kącie 2° i 4° . Na bazie uzyskanych wyników w kolejnym rozdziale Autor przedstawia możliwość wykorzystania skośnych siatek Bragga do pomiaru jednocześnie kilku wielkości fizycznych. W ramach dyskusji nad problematyką pomiarów wieloparametrowych Autor opisuje też możliwe modyfikacje struktury TFBG poprawiające selektywność omawianego czujnika światłowodowego. Najważniejsze osiągnięcia pracy oraz opis przeprowadzonych analiz Autor zamieszcza w Rozdziale 7 w formie posumowania i wniosków. Swoje rozważania Autor pracy odniósł do aktualnej literatury przedmiotu dysertacji. Zdecydowana większość cytowanych prac pochodzi z renomowanych wydawnictw naukowych (w zdecydowanej większości anglojęzycznych) i dotyczy stricte tematyki światłowodowych siatek Bragga oraz ich możliwości sensorowych. Wykorzystane w dysertacji materiały źródłowe potwierdzają, iż Pan mgr inż. Damian Harasim posiadał zdolność do selektywnej i wnikliwej analizy w tematyce światłowodowych struktur o periodycznym rozkładzie współczynnika załamania światła. Warto również nadmienić, iż wśród 109 odnośników znajduje się również 20 prac zespołu, z którym współpracuje Doktorant, co więcej 11 cytowanych prac są to współautorskie artykuły o zasięgu międzynarodowym, indeksowane w bazie JCR oraz posiadające tzw. współczynnik wpływu (IF – impact factor). W sześciu z nich Doktorant jest pierwszym współautorem, natomiast sumaryczny IF dla cytowanych prac Autora wynosi 27,586. Jest to znakomity wynik, co świadczy o wysokiej wartości merytorycznej publikacji Doktoranta.

Układ pracy jest logiczny i przemyślany, co potwierdza zdolności doktoranta do analitycznego myślenia oraz stawiania odpowiednich wniosków na każdym etapie prac eksperymentalnych. Na wyróżnienie zasługuje też szata graficzna dysertacji. Przedstawione rysunki, wykresy oraz tabele są wykonane poprawnie i czytelnie, co sprzyja w interpretacji wyników prac eksperymentalnych Autora. Niemniej jednak, pewnym niedociągnięciem na niektórych wykresach jest zbyt duża skala wartości (np. rys 6.17) w stosunku do analizowanych zmian oraz brak określenia (czasem zaznaczenia) uzyskanych wartości w przypadku różnic w położeniu minimów modów pod wpływem danego zaburzenia (np. rys 6.18, 6.28). Drobne uwagi mam też do języka pracy, który przez zbytnią żargonowość (np. *używanie pojęcia światła jako promieniowania z zakresu podczerwieni jest daleko idącym uproszczeniem; podobnie promieniowanie ultrafioletowe powinno być jako nadfioletowe, „zacieśniania krzywizny”*) oraz kolokwializmy (tj. „...duża czułość..”, „...niewielkie zmiany..”, „...w szerszym zakresie..”, „...znikomy wpływ..”) sprawia lekki dyskomfort podczas czytania. Ponadto, zabrakło pewnej konsekwencji w nomenklaturze opisu niektórych parametrów czy układu odniesienia, np. Autor pisze mod parzysty/nieparzysty, a w innym miejscu mod odd/even, lub : „*skośne siatki Bragga*” czy „*pochylone siatki Bragga*”. W rozdziale 3 natomiast w opisie cech spektralnych struktur Bragga oś światłowodu pokrywa się z osią z układu odniesienia (rys. od 3.1 – 3.6). Niefortunnie, w tym samym rozdziale (rys. 3.9) oraz w pozostałej praktycznej części dysertacji do analizy właściwości siatek (określanie kąta polaryzacji) oś światłowodu przypisana została przez Autora jako oś x.

Praca zawiera też kilka błędów edytorskich i nieprawidłowości, które dla porządku pozwolę sobie wymienić:

- Str. 22 – w opisie (wzór 3.8) okresu siatki skośnej w mianowniku pojawia się cosinus kąta pochylenia płaszczyzn modulacji współczynnika załamania światła, gdzie błędne jest stwierdzenie, iż dla kąta równego 90° period TFBG będzie tożsamy z periodem siatki konwencjonalnej.
- Str. 24 – w opisie wzoru (3.13) r powinno być opisane jako promień a nie średnica.
- Str. 78 – błędne odwołanie do rys.4.4, faktycznie jest to 5.11.

- Str. 81 – w opisie rysunku 5.15 b, są pokazane charakterystyki modów wyższych rzędów, natomiast w tekście Autor pisze o modach niższych rzędów.
- Str. 90 – brak czułości siatki na zmiany temperatury dla modu wyższego rzędu (...urwany tekst?).
- Str. 92 – w tytule rozdziału 6 pojawia się siatka TFBG 6° , co nie znajduję przełożenia na dalszą zawartość rozdziału gdzie opisane są zmiany widm transmisji odpowiednio dla siatek o kącie pochylenia 2° i 4° .
- Str. 114 – rys.6.26 błędny opis kąta obrotu w legendzie wykresu.

Ocena merytoryczna

Recenzowana praca ma charakter eksperymentalny, której celem jest badanie i analiza wpływu zmian wybranych wielkości fizycznych na charakterystyki widmowe światłowodowych struktur Bragga o pochyłonych płaszczyznach dyfrakcyjnych oraz dobór takich cech spektralnych umożliwiających jednocześnie wyznaczenie wartości tych wielkości. Zagadnienie przedstawione przez Autora jest ambitnym podejściem do tematyki wieloparametrowych czujników optoelektronicznych wykorzystujących światłowodowe siatki Bragga i wymaga przeprowadzenia szeregu badań eksperymentalnych, licznych pomiarów oraz wnikliwych analiz w celu udowodnienia tezy pracy.

Zasadniczo w pracy doktorskiej Pana mgr inż. Damiana Harasima można wyróżnić dwie istotnie zależne od siebie części. W pierwszej Autor opracowuje autorski opto-mechaniczny układ badawczy, za pomocą którego zapisuje obrazy dyfrakcyjne skośnych siatek Bragga na fotoczułych światłowodach, a następnie przeprowadza pomiary ich cech spektralnych, wskazując na potencjalne możliwości wykorzystania modów płaszczyznowych w realizacji pomiarów wybranych wielkości fizycznych. W oparciu o syntetyczne rozważania teoretyczne dotyczące właściwości spektralnych skośnych siatek Bragga (TFBG) swoje badania Pan mgr inż. Damian Harasim skierował w kierunku analizy możliwości jednoczesnych pomiarów dwu lub więcej wielkości fizycznych z uwzględnieniem kompensacji temperatury. Aby tego dokonać Autor dysertacji bardzo szczegółowo przeanalizował parametry spektralne wytworzonych skośnych siatek Bragga, dla różnych kątów pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych oraz dla różnych czasów zapisu związanych bezpośrednio z głębokością modulacji. Na podstawie wyników pomiarów Autor wskazał najistotniejsze aspekty związane ze zmianą kąta pochylenia periodycznych struktur zmian współczynnika załamania światła warunkujących zakres widmowy występowania minimów współczynnika transmisji pochodzących od modów płaszczyznowych. W wyniku analizy Autor wykazał, iż wzrost kąta pochylenia struktury TFBG prowadzi do wzrostu zakresu widmowego oraz przesunięciu modu Bragga w kierunku fal dłuższych. Jednocześnie straty mocy charakterystyczne dla modu *ghost* oraz modu Bragga stają się coraz mniejsze, co ma duże znaczenie przy wykorzystaniu danej struktury w pomiarach wieloparametrycznych. Ponadto, na podstawie analizy zmian widma w zależności od czasu zapisu Autor stwierdził, iż zwiększenie amplitudy profilu zmian współczynnika załamania nie wpływa na poszerzenie zakresu widmowego występowania modów płaszczyznowych, a jedynie na stopień sprzężenia poszczególnych modów. Uzyskane przez Doktoranta wyniki pomiarów i analiz pozwoliły na **wyselekcjonowanie parametrów technologicznych istotnych przy wytworzeniu siatek TFBG do zastosowania w jednoczesnych pomiarach kilku wielkości fizycznych.**

Druga część rozprawy dotyczy natomiast samych pomiarów wielkości fizycznych: kąta skręcenia (polaryzacji), przesunięcia (promień zgięcia) oraz temperatury otoczenia. W tej części, w ramach pomiarów Pan mgr inż. Damian Harasim opracował stanowisko laboratoryjne, na którym przeprowadził serię pomiarów dla wytworzonych światłowodowych skośnych siatek Bragga (TFBG) o kącie pochylenia 2° i 4° . We wstępnych rozważaniach nad odpowiedzią struktury Bragga na zaburzenie wywołane zmianą promienia gięcia Doktorant określa, iż siła zginająca działa jedynie w płaszczyźnie zgodnej z płaszczyzną kąta pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych. Jest to w pewnym stopniu uproszczenie i może powodować pewne trudności w rzeczywistych aplikacjach, aczkolwiek w ocenie funkcjonalności Doktorant uzyskał

interesujące wyniki pomiarów, na podstawie których wykazał, iż implikowana zmiana profilu załamania wyraźnie wpływa na amplitudy (minima wsp. transmisji) oraz długość fali modów płaszczowych najniższych rzędów. Równocześnie wykazuje, iż w obszarze widma odpowiadającym krótszym długościom fali, rozkład modów wyższego rzędu pozostaje bez zmian. W przypadku pomiarów zmian widma transmisji skośnych siatek Bragga pod wpływem kąta polaryzacji promieniowania wprowadzanego największą zmianę Autor zauważa w zakresie długości fal odpowiadających modom wyższych rzędów. Natomiast mody będące w bezpośrednim sąsiedztwie modu *ghost* oraz modu Bragga pozostają niezmiennie. Na tej podstawie, w widmie transmisji siatek Bragga o skośnych płaszczyznach dyfrakcyjnych Autor poprawnie definiuje obszary czułe na wybrane wielkości fizyczne. Ponadto, analizując wpływ temperatury otoczenia na cechy spektralne wytworzonych siatek wykazuje, iż mody o parametrach powiązanych z wartością promienia gięcia czy kąta obrotu ulegają wyłącznie przesunięciu położenia minimów widma transmisji, co przy odniesieniu do modu Bragga pozwala na uniezależnienie wyników pomiarów od temperatury otoczenia. Tym samym Pan mgr inż. Damian Harasim **udowodnił unikalną właściwość wytworzonych skośnych siatek Bragga**, która potwierdza postawioną w rozprawie tezę, iż „dobór cech spektralnych oraz parametrów struktur pochyłonych siatek Bragga pozwala na wyznaczanie wartości kilku wielkości fizycznych działających jednocześnie na jeden element TFBG.”

Na szczególną uwagę zasługuje rzetelnie przeprowadzona przez Autora analiza eksperymentalna możliwości pomiaru trzech wielkości fizycznych jednocześnie, na podstawie której udowadnia, iż jedynie struktura TFBG o kącie pochylenia płaszczyzn dyfrakcyjnych wynoszącym 2° spełnia określone kryteria równoczesnego pomiaru kąta obrotu, promienia gięcia i temperatury. Natomiast w przypadku struktury o kącie pochylenia 4° pomiar jednoczesny trzech wielkości jest utrudniony, ponieważ jak dowodzi Autor, znaczący wpływ na pomiar mają zmiany kąta polaryzacji. Dodatkowo Autor zauważa, iż silne sprzężenie rezonansów modów płaszczowych powoduje osłabienie modu Bragga, co niemal dyskwalifikuje wykorzystanie długości fali tego modu jako wartości odniesienia. Powyższe wyniki pomiarów oraz analiz skłoniły Pana mgr inż. Damiana Harasima do zaproponowania interesującej modyfikacji struktur TFBG poprawiającej selektywność czujnika w pomiarach kilku wielkości fizycznych jednocześnie. Nowatorska koncepcja zakłada wykorzystanie złożenia skośnych siatek Bragga skręconych względem siebie o kąt 90° , tworząc tzw. P-TFBG. W rozwiązaniu zaproponowanym przez Autora zachodzi znaczące zmniejszenie czułości parametrów widmowych czujnika na zmiany kąta polaryzacji promieniowania wprowadzanego do struktury. Autor słusznie zauważa, iż szczególnie w przypadku pomiaru współczynnika załamania światła ośrodka przy wykorzystaniu struktur TFBG kąt polaryzacji promieniowania jest pomijany, a niestety ma znaczący wpływ na wyniki pomiarów, co zostało udowodnione w pracy doktorskiej. Szczegółowy opis właściwości skręconej struktury znajduje się w publikacji Doktoranta [108] wraz z potencjalnym wykorzystaniem wytworzonej struktury P-TFBG przy pomiarach współczynnika załamania światła ośrodka otaczającego czujnik. Należy podkreślić, iż uzyskane w dysertacji przez Pana mgr inż. Damiana Harasima wyniki badań oraz analiz eksperymentalnych poszerzają w sposób jednoznaczny wiedzę dotyczącą możliwości wykorzystania skośnych siatek Bragga w jednoczesnych pomiarach kilku wielkości fizycznych. Jednocześnie, zaproponowane i wprowadzone przez Autora modyfikacje badanych struktur TFBG potwierdzają skuteczność oraz przydatność aplikacyjną światłowodowych skośnych siatek Bragga w wieloparametrycznych systemach pomiarowych.

Uwagi merytoryczne do dyskusji

W analizowanych przykładach możliwości wykorzystania skośnych siatek Bragga jako elementów czujnikowych w jednoczesnych pomiarach dwóch lub więcej wielkości fizycznych, Autor wykorzystuje zmiany cech spektralnych struktur wraz z opisem wybranych modów płaszczowych. W zależności od zaburzenia, rozważaniom poddawane są mody niższych lub najniższych rzędów (pomiar promienia gięcia) oraz mody rzędów najwyższych (pomiar kąta polaryzacji). Choć sam sposób analizy jest poprawny, nie

znalazłem jednak jednoznaczny opis dotyczący wyboru konkretnego modu płaszczyznowego lub pary modów poddanych analizie. Czym kierował się Autor dysertacji przy wyborze danego modu/modów płaszczyznowych? Jednocześnie rozwijając swoją uwagę w kierunku praktycznej aplikacji zaproponowanych przez Doktoranta struktur w wieloparametrycznym systemie pomiarowym chciałbym zapytać – Czy możliwe jest bezpośrednio powiązanie, rodzaju modu/pary modów płaszczyznowych istotnych dla danego zaburzenia?

Drugą zasadniczą sprawą, na którą zwróciłem uwagę jest kwestia określania niepewności oraz błędu wyznaczania danej wielkości fizycznej (kąt polaryzacji, promień gięcia). Ogólnie rzecz ujmując, niepewność jest to parametr rozkładu prawdopodobieństwa błędu związany z wynikiem pomiaru, natomiast błąd jest pewną zmienną losową. Z przedstawionego opisu analizy zmian współczynnika transmisji wybranego modu wynika, że Autor wyznacza błąd z jakim można określić daną wielkość fizyczną. Niestety, Autor używa obu pojęć wymiennie, co jest w mojej opinii niepoprawnym zabiegiem. W związku z powyższym, jaką metodologię/metodę wybrał Doktorant do analizy błędów?

Kolejną kwestią wymagającą wyjaśnienia jest przedstawiona w rozprawie (podrozdział 6.4) modyfikacja struktury TFBG w kierunku poprawy selektywności czujnika, polegająca na skręceniu płaszczyzn dyfrakcyjnych względem siebie o pewien kąt radialny. W opisie Autor odnosi się do trzech publikacji, z których w dwóch jest współautorem [22, 108] oraz do jednej [109] autorstwa zespołu badawczego (bez udziału Doktoranta). Autor opisuje koncepcję wykonania struktur skrzyżowanych oraz przedstawia wyniki przeprowadzonych badań wraz z przykładową aplikacją w pomiarach współczynnika załamania ośrodka znajdującego się w otoczeniu światłowodowej struktury TTFBG. W związku z powyższym chciałbym poprosić Pana mgra inż. Damiana Harasima, o konkretne wskazanie swojego autorskiego udziału w przedstawionych badaniach oraz czego ten udział dotyczył, ponieważ w podsumowaniu pojawia się odniesienie mam wrażenie do niewłaściwej publikacji - [109]?

Powyższe tematy pozostawiam do dyskusji w trakcie publicznej obrony.

Wnioski końcowe

Biorąc pod uwagę zakres pracy i jej wysoki poziom merytoryczny, jak również jej interdyscyplinarny charakter, recenzowaną pracę oceniam jako **spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem**. Uważam, iż recenzowana dysertacja stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego i jest znaczącym, autorskim opracowaniem Pana mgra inż. Damiana Harasima, które w odniesieniu do dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika, potwierdza uzyskanie przez Autora pracy ogólnej wiedzy teoretycznej oraz umiejętności do samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

W związku z powyższym stwierdzam, iż rozprawa doktorska Pana mgra inż. Damiana Harasima, pt. „Wieloparametrowe czujniki wykorzystujące światłowodowe skośne siatki Bragga” **spełnia wymagania**, o których mowa w art. 13 ust 1 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytułach naukowych oraz o stopniach i tytułach w zakresie sztuki (tj. Dz.U. z 2017 r. poz. 1789) oraz w art. 179 ust. 1 i 2 Ustawy z dnia 3 lipca 2018r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, (Dz.U. z 2018r. poz 1669 z późn.zm) i **wnoszę o dopuszczenie Pana mgr inż. Damiana Harasima do publicznej obrony**.

Ponadto, mając na uwadze wysoki poziom merytoryczny oraz skuteczne rozwiązanie skomplikowanego problemu naukowego **wnoszę o wyróżnienie niniejszej rozprawy**.

Janek Zwójol

