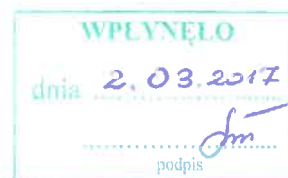


Prof. zw. dr hab. inż. Janusz Mroczka, czł. koresp. PAN, dr h.c. (mult.)

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej
Wydział Elektroniki Politechniki Wrocławskiej
ul. B. Prusa 53/55, 50-317 Wrocław
tel. (071)3211247
(071)3206232
fax: (071)3214277
e-mail: janusz.mroczka@pwr.edu.pl

adres prywatny:
ul. Wysłoucha 65
52-433 Wrocław
tel.: (071) 3635384

Wrocław, 28.02 2017r.



RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Krzysztofa Skorupskiego pt.: „Analiza wpływu wybranych parametrów układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych na charakterystyki spektralne wytwarzanych siatek Bragga w oparciu o zdefiniowane wskaźniki jakościowe”.

Niniejsza recenzja została przygotowana na prośbę Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie wyrażoną w piśmie L.Dz. WEAIiIB-b/510-1-2/16 z dnia 27.01.2017 r.

1. Ocena poziomu merytorycznego pracy

Praca doktorska mgr inż. Krzysztofa Skorupskiego jest poświęcona badaniom właściwości światłowodowych siatek Bragga wytwarzanych metodą maski fazowej oraz analizie wpływu parametrów układu laserowego do zapisu siatek na ich charakterystyki widmowe. Tytuł przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej „*Analiza wpływu wybranych parametrów układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych na charakterystyki spektralne wytwarzanych siatek Bragga w oparciu o zdefiniowane wskaźniki jakościowe*” jest zgodny z

jej zawartością i poruszaną w niej tematyką naukową. Za cel pracy Autor postawił wykazanie możliwości uzyskania określonych parametrów światłowodowych siatek Bragga poprzez zmianę warunków prowadzenia wiązki lasera UV zapisującego siatki. Jednocześnie, niniejsza praca jest ukierunkowana na wykazanie możliwości uzyskania optymalnych wartości parametrów siatek, pożądanych w zastosowaniach telekomunikacyjnych i czujnikowych, poprzez odpowiedni dobór parametrów optycznych, mechanicznych i elektrycznych układu laserowego do zapisu siatek. Powyższy cel został osiągnięty poprzez wykonanie obliczeń numerycznych, pozwalających na wstępne oszacowanie zakresu pożądanych parametrów siatek Bragga metodą maski fazowej, wykonanie projektu układu do zapisu struktur periodycznych, oraz układu przeniesienia wiązki promieniowania z wyjścia lasera na włókno światłowodowe oraz zaplanowanie i wykonanie badań wpływu parametrów układu do zapisu siatek Bragga na zdefiniowane wskaźniki określające jakość wytwarzanych struktur.

Autor formułuje i dowodzi w pracy tezę o następującej treści cyt.: „Dobór parametrów układu laserowego do zapisu siatek Bragga oraz zdefiniowanie odpowiednich kryteriów jakościowych siatek na podstawie ich widm, pozwala na wytworzenie struktur periodycznych o właściwościach odpowiednich do zastosowań w układach czujnikowych“. Zawartość recenzowanej rozprawy obejmuje trzy rozdziały wprowadzające oraz sześć rozdziałów merytorycznych. Dalsza część niniejszego punktu recenzji zawiera komentarze odniesione do rozdziałów merytorycznych pracy.

W rozdziale czwartym Autor w sposób przejrzysty i logiczny definiuje wskaźniki jakościowe światłowodowych struktur periodycznych uzyskane na podstawie ich widm. Wskaźniki te odpowiadają najczęściej pojawiającym się efektom niepożądanym, występującym na charakterystykach wytwarzanych struktur. Autor definiuje w pracy wskaźnik, który określa poziom tzw. wstęg bocznych (ang.: *sidelobes*) widm struktur, wskaźnik określający nachylenie zbocza piku odbiciowego, wskaźnik poziomu reflektancji siatki, centralną długość fali Bragga, szerokość połówkową, a nawet wskaźnik określający reflektancję płatów bocznych. Przy pierwszej analizie zdefiniowanych wskaźników takie sparametryzowanie widm struktur wydaje się nadmiarowe, jednak w dalszej części pracy widać sens takiego podejścia. Autor wykazuje bowiem, że zmiana odpowiednich parametrów układu do zapisu struktur periodycznych powoduje z jednej strony zwiększenie współczynnika odbicia, ale z drugiej strony zmniejszenie szerokości połówkowej oraz zmniejszenie kąta nachylenia piku głównego na charakterystyce widmowej. Dopiero całościowa analiza wszystkich zdefiniowanych przez Doktoranta wskaźników jakościowych

pozwała na kompleksowe określenie wpływu układu zapisującego struktury periodyczne na parametry tych struktur i możliwość ich wykorzystania w konkretnych zastosowaniach.

Rozdział piąty obejmuje przegląd stosowanych obecnie technik wytwarzania światłowodowych struktur periodycznych. Ciężar naukowy tego rozdziału został położony na optymalizację struktury maski fazowej. Autor opisuje technikę nanoszenia na powierzchnię maski filmu o wysokim współczynniku załamania światła oraz wyznaczeniu wartości szerokości szczelin, odległości pomiędzy szczelinami, ich głębokości oraz kształtu struktury szczelin, tak by uzyskać minimum propagacji promienia zerowego rzędu oraz brak propagacji promieni ± 2 rzędu w zakresie iluminacji promieniowaniem UV. Ta część pracy zawiera syntetyczne ujęcie tematyki związanej z typami struktur światłowodowych oraz ich właściwościami. Autor przedstawia również wytrzymałość termiczną oraz zastosowania poszczególnych typów siatek.

Rozdział szósty pracy zawiera wyniki uzyskane z modelowania światłowodowych struktur periodycznych. Autor wykazał wpływ głębokości współczynnika załamania na transmisyjne charakterystyki widmowe w strukturze Bragga. Na tej podstawie określił możliwość wpływania na współczynnik odbicia oraz parametr FWHM głównego piku odbiciowego. Ważnym kamieniem milowym tej części pracy było określenie granicznego zakresu zmian mocy siatki (rozumianej w sensie wartości Δn), powodującego poprawę współczynnika odbicia. Autor wykazał, że powyżej pewnego progu zmian amplitudy modulacji Δn , dochodzi do „saturacji“ odbicia Bragga, co skutkuje charakterystycznym zakrzywieniem charakterystyki $R=f(\Delta n)$. Istnieje pewna wartość głębokości modulacji Δn , powyżej której jej zwiększanie nie powoduje już wyraźnego efektu (rozumianego jako poprawę) w postaci wzrastającej reflektancji siatki. Uważam, że istotne było również wykazanie przez Doktoranta, że istnieje taka wartość amplitudy modulacji współczynnika załamania w strukturze Bragga, dla której wyznaczyć można tzw. maksymalną wartość reflektancji płatów bocznych.

W siódmym rozdziale pracy Autor przedstawił autorski projekt i opis wykonania linii technologicznej do wytwarzania struktur periodycznych we włóknach światłowodowych. Spotykane obecnie układy do zapisu siatek Bragga są zazwyczaj ustawione w pozycji pionowej. Źródło promieniowania UV umieszczone jest w jednej linii ze światłowodem, a wiązka jest jedynie wstępnie ogniskowana zwierciadłem optycznym w rejonie światłowodu. Doktorant zaprojektował oraz wykonał układ przeniesienia i odwrócenia wiązki tak, aby uzyskać możliwość dowolnego obracania i skupiania wiązki laserowej w dowolnym miejscu

na włóknie optycznym. Zaprojektowanie układu przeniesienia wiązki lasera w systemie klatkowym (klatka bazowa + klatki przesuwne) pozwalają na zamocowanie układu posuwu osiowego soczewki oraz układu rur osłonowych. Jest to ważne ze względu na możliwość umieszczenia wszystkich optycznych elementów układu w tzw. atmosferze nadciśnienia azotowego, co z kolei przekłada się na stabilizację parametrów wiązki laserowej i efektywniejszy, dokładniejszy oraz precyzyjniejszy zapis przez Doktoranta siatek dyfrakcyjnych na włóknach optycznych. Istotnym elementem tej części pracy było określenie rozkładu promieniowania wiązki laserowej w osi włókna światłowodowego przed i po jej skupieniu. Umożliwiło to określenie rozmiaru wiązki po skupieniu przez soczewkę cylindryczną, co pozwoliło na wyznaczenie gęstości energii występującej w układzie. Sporządzony na podstawie pomiarów wykres rozkładu jasności promieniowania wiązki laserowej skupianej za pomocą soczewki cylindrycznej wykonany w osi poziomej wskazuje, że wszystkie wytwarzane w dalszej części pracy siatki podlegają tzw. apodyzacji podczas zapisu. Wartość mocy optycznej na środku wiązki jest bowiem największa i spada wraz oddalaniem się od jej środka. Kolejnym autorskim elementem tej części pracy jest wykonanie systemu dystansowania i obserwacji położenia włókna światłowodowego względem maski fazowej oraz wyznaczenie teoretyczne i weryfikacja eksperymentalna warunków nieniszczących propagacji światła w układzie do zapisu siatek Bragga. Uważam, że ta część pracy, która dotyczy projektu układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych ma niewątpliwie charakter technologiczny i ważny aspekt aplikacyjny.

Rozdział ósmy zawiera analizę wyników eksperymentów mających na celu określenie wpływu poszczególnych parametrów konfiguracyjnych układu do wytwarzania struktur periodycznych na kształt ich charakterystyk spektralnych. We wstępnej części rozdziału Autor określa typ wytwarzanych struktur Bragga metodą termiczną, wygrzewając wytworzone siatki w stałej temperaturze równej 250°C, jednocześnie mierząc ich charakterystyki transmisyjne. Mgr inż. Krzysztof Skorupski wykonał również analizę powtarzalności wytwarzania siatek Bragga przyjmując jako wskaźniki: współczynnik odbicia, szerokość połówkową oraz długości fali Bragga. Autor wykazał, że istnieje tzw. obszar niestabilnej pracy lasera ekscymerowego oraz zjawisko wpływu naprężenia światłowodu w układzie mocowania włókna. Wykazał również, które parametry siatek są czułe na te zjawiska. Rozdział zawiera szereg wniosków. Dotyczą one przede wszystkim wpływu przesunięcia światłowodu wzdłuż i prostopadle do osi optycznej układu, wpływu zmiany czasu ekspozycji światłowodu na promieniowanie UV, wpływu zmiany częstotliwości

generowanych impulsów laserowych i czasu zapisu oraz wpływu zmiany energii impulsów laserowych na parametry siatek opisane zdefiniowanymi przez Autora wskaźnikami jakościowymi. Uważam, że rozdziały 7 i 8 zawierają wyniki najciekawsze, nieoczywiste w wielu przypadkach i posiadające ważny aspekt użytkowy.

2. Ocena oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej

Rozprawa dotyczy zagadnień związanych z wytwarzaniem światłowodowych struktur periodycznych przy wykorzystaniu lasera ekscymerowego oraz masek dyfrakcyjnych. Struktury tego typu znajdują zastosowanie jako czujniki temperatury, odkształcenia, wydłużenia, poziomu płynów, współczynnika załamania światła, pola elektromagnetycznego i wielu innych wielkości fizycznych. Są stosowane tam gdzie użycie czujników elektronicznych jest utrudnione lub niemożliwe. Znane są wyspecjalizowane systemy czujnikowe przeznaczone do pomiaru żądanych wielkości fizycznych w ściśle określonych warunkach np. pomiary bardzo niskich zmian pól elektromagnetycznych, w których zastosowanie czujników elektronicznych, wprowadzających zakłócenia pola elektromagnetycznego byłoby niemożliwe. Opracowywanie nowych rodzajów czujników fonicznych wymaga odpowiedniego kształtowania charakterystyk widmowych siatek Bragga, stosowanych w charakterze przetworników pomiarowych. Z tego punktu widzenia prowadzone przez Doktoranta i opisane w pracy doktorskiej badania są aktualne. Dotyczy to przede wszystkim rozwiązywanego problemu badawczego polegającego na opanowaniu procesu optymalnego zapisu siatek o zadanych parametrach optycznych i mechanicznych. Oryginalność rozprawy wyznaczają przeprowadzone przez Autora obliczenia numeryczne dla parametrów wejściowych odwzorowujących warunki zapisu siatek Bragga, zaprojektowane stanowisko do wytwarzania i ich charakteryzacji, wykonane badania temperaturowe i widmowe oraz analiza uzyskanych wyników. Z tego punktu widzenia badania i symulacje numeryczne, których wyniki przedstawiono w rozprawie doktorskiej są niezwykle ważne i mają znaczenie aplikacyjne.

Za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. Określenie wskaźników jakościowych światłowodowych struktur periodycznych w oparciu o ich spektralne charakterystyki odbiciowe i transmisyjne.

2. Zamodelowanie odpowiedzi widmowych struktur w środowisku OPTIGRATING i wykazanie możliwości przewidywania ich parametrów już na etapie modelowania.
3. Wykonanie projektu oraz gotowego układu przeniesienia i sterowania geometrią wiązki UV z lasera na włókno światłowodowe.
4. Opracowanie metody pomiaru rozkładu natężenia wiązki UV po przejściu przez układ przeniesienia oraz fizyczna realizacja takiej metody.
5. Teoretyczne i praktyczne wyznaczenie warunków nieniszczących elementów optycznych podczas propagacji wiązki UV w układzie do zapisu siatek.
6. Projekt i wykonanie układu dystansowania włókna światłowodowego względem maski fazowej.
7. Wykonanie badań określających warunki, w których możliwe jest uzyskanie maksymalnej powtarzalności parametrów wytwarzanych struktur.
8. Określenie wpływu parametrów geometrycznych układu przeniesienia wiązki laserowej na wskaźniki jakościowe charakteryzujące struktury na podstawie ich widm.
9. Wyznaczenie wpływu parametrów pracy lasera ekscymerowego na zdefiniowane wskaźniki jakościowe siatek.

Reasumując, Autor udowadnia możliwość wpływania na parametry wytworzonych struktur periodycznych. Wprowadza wskaźniki jakościowe, parametryzujące widmowe charakterystyki takich struktur i pozwalające na ocenę wpływu parametrów układu do zapisu siatek na ich właściwości optyczne i parametry fizyczne. Wykonane badania i przeprowadzone symulacje numeryczne stanowią niewątpliwie cenny wkład Autora oraz oryginalny element Jego pracy. W pracy poruszono zagadnienia nowe i istotne z punktu widzenia ich potencjalnych zastosowań w systemach pomiarowych szeregu wielkości fizycznych.

3. Uwagi krytyczne, pytania

Do opiniowanej pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Skorupskiego recenzent zgłasza następujące **krytyczne** uwagi szczegółowe.

- s. 21: na początku rozdziału 5 Autor stwierdził, że typ wytwarzanej struktury, metoda wytwarzania struktury oraz technika fotouczulania włókna światłowodowego są elementami technologii wytwarzania światłowodowych siatek Bragga. Takie stwierdzenie nie jest w całości prawdziwe, gdyż fotouczulanie nie jest elementem

koniecznym do wytworzenia siatek Bragga a stwierdzenie, że typ wytwarzanej struktury jest elementem jej wytwarzania jest niefortunne i mylące,

- s. 23: opis osi na rysunku 5.1 powinien zostać wykonany w języku polskim, konsekwentnie do języka całej rozprawy,
- s. 25-31: jak wyżej, dotyczy rysunków 5.2 - 5.10,
- s. 52: Autor pisze, że na podstawie uzyskanych widm wykreśla zależności parametrów jakościowych siatek Bragga, zdefiniowanych na potrzeby niniejszej pracy, w funkcji głębokości modulacji współczynnika załamania w strukturze. Tak naprawdę w rozdziale 6 przedstawiona jest przecież analiza zachowania się współczynnika odbicia siatek, szerokości połówkowej głównego rezonansu Bragga oraz reflektancji płatów bocznych w funkcji głębokości modulacji współczynnika załamania światła we włóknie. Określenie tych zależności ma oczywiście sens w kontekście zawartości dalszych rozdziałów i badań laboratoryjnych (np. badanie parametrów siatek w zależności od czasu naświetlania, który ma z kolei bezpośrednie przełożenie na głębokość modulacji Δn). Powstaje jednak pytanie dlaczego Autor nie wyznaczył pozostałych parametrów jakościowych siatek, które przecież zdefiniował w rozdziale 4.3. Z punktu widzenia możliwości wpływania na parametry siatek ciekawe byłoby określenie np. nachylenia charakterystyki piku głównego dla siatek słabych = mała wartość Δn , oraz dla siatek silnych = duża wartość Δn , oczywiście w zakresie realnych wartości Δn , możliwych do uzyskania podczas wytwarzania siatek w warunkach rzeczywistych,
- s. 57: na rysunku 7.3 Autor prezentuje układ przeniesienia i odwrócenia wiązki i komentuje poniżej rysunku, że nieparzysta liczba odbić wiązki zapewnia odwrócenie wiązki. Powyższe stwierdzenie powinno zostać wyjaśnione lub poparte odpowiednim rysunkiem,
- s. 57: zdanie: „niektóre elementy, ze względu na geometrię oraz zakres regulacji, wymagały zaprojektowania i wykonania” jest również bez dodatkowego komentarza niezrozumiałe,
- s. 63: po określeniu rozkładu promieniowania wiązki laserowej w osi włókna światłowodowego przed i po skupieniu Autor stwierdza, że uzyskany kształt decyduje o wstępnej apodyzacji wytwarzanych siatek. Co to jest „wstępna apodyzacja”?
- s. 81: Autor używa nieprecyzyjnego określenia: „Maksymalna rozdzielczość spektralna wynikająca z próbkowania wynosi 0,002nm”,

- s. 81: Autor stwierdza, że unika odbić występujących na połączeniach rozłączalnych stosując optyczne złączki FC/APC, są to złączki kątowe i precyzyjniej byłoby użyć określenie ograniczania odbić, a nie ich unikania,
- s. 93: na wykres zależności reflektancji w funkcji odległości światłowodu od maski fazowej (rys. 8.15) została naniesiona prosta regresji liniowej. Stwierdzenie, że zależność ta ma w przybliżeniu charakter liniowy jest dużym uproszczeniem, należałoby wyznaczyć np. błąd nieliniowości i podać jego wartość,
- s. 102: błędne oznaczenie rysunku (824b),
- s. 115: podczas prób wytwarzania siatek Bragga za pomocą stałej ilości impulsów lasera o takiej samej energii uzyskane charakterystyki widmowe transmisyjne, a w szczególności wartość współczynnika transmisji dla długości fali Bragga różni się nieznacznie. Wiemy, że zmianie ulegał czas ekspozycji światłowodu wynikający ze zmiany częstotliwość pracy lasera, tak aby zapis FBG następował na skutek generacji stałej ilości (w tym przypadku 3600) impulsów laserowych. W komentarzach do uzyskanych wyników zabrakło podjęcia próby wyjaśnienia istnienia tych rozbieżności.

Do opiniowanej pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Skorupskiego recenzent zgłasza następujące **pytania szczegółowe**:

1. Autor w rozdziale 6 pisze, że maksymalna, uzyskana w drodze obliczeń numerycznych wartość reflektancji płatów bocznych wynosi 0,84. To stwierdzenie nie jest precyzyjne, jakie parametry siatki należałoby podać, aby to stwierdzenie miało sens? Co wpływa na wartość reflektancji płatów bocznych siatki i jakie Autor zna metody ograniczania tego zjawiska?
2. Autor w tabeli 8.1 zestawiał parametry wykorzystanych włókien o różnym stopniu fotoczułości, ale są to dane podane przez producenta. Czy Autor rozważał możliwość nasycania włókien wodorem w laboratorium? Układ umożliwiający wodorowanie włókien byłby bardzo pożądanym w kraju, a Doktorantowi umożliwiłoby uzyskanie różnych poziomów nasycenia włókien wodorem.
3. Czy możliwe jest zastosowanie użytego źródła światła do rozbudowy układu polegającej na zastosowaniu innych metod zapisu siatek Bragga?
4. W ramach pracy doktorskiej przedstawiono wyniki dla światłowodowych siatek Bragga pierwszego typu. Czy podjęte zostały próby zapisu struktur pozostałych typów?

5. Czy wykorzystana metoda wyznaczenia typu wytwarzanych struktur pozwala na jednoznaczne określenie wszystkich typów struktur?
6. Czy zostały określone granice przedziałów wartości parametrów jakościowych siatek Bragga określonych na podstawie ich widm?
7. Jak można określić uniwersalność uzyskanych krzywych zapisu w przypadku zastosowania różnych rodzajów światłowodów użytych do zapisu siatek Bragga?
8. Dlaczego na podstawie przeprowadzonej analizy wpływu parametrów lasera ekscymerowego na wskaźniki jakościowe siatek Bragga, jako główny parametr regulacji parametrów wytwarzanych siatek Bragga został wskazany czas ekspozycji włókna światłowodowego?

Wymienione przeze mnie uwagi krytyczne oraz wątpliwości wyrażone w pytaniach nie wpływają na pozytywną ocenę przedstawionej pracy doktorskiej i nie umniejszają mojej pozytywnej oceny oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej.

4. Ocena analizy źródeł

Analiza źródeł literaturowych obejmuje łącznie 112 pozycji. Większość pozycji odnosi się do aktualnego stanu wiedzy w zakresie technologii otrzymywania i badania siatek Bragga. Dla przykładu 9 pozycji to publikacje z 2015 roku, 13 pozycji to publikacje z roku 2016, a jedna z roku 2017. W przypadku 7 pozycji mgr inż. Krzysztof Skorupski występuje jako współautor. Cytowane artykuły dotyczą zagadnień związanych z wytwarzaniem i charakteryzacją światłowodowych struktur periodycznych oraz ich zastosowaniem jako czujniki wielkości fizycznych i chemicznych. Literatura cytowana jest w sposób prawidłowy, jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy, a dobór poszczególnych pozycji jest uzasadniony merytorycznie.

5. Podsumowanie

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Skorupskiego „Analiza wpływu wybranych parametrów układu do zapisu światłowodowych struktur periodycznych na charakterystyki spektralne wytwarzanych siatek Bragga w oparciu o zdefiniowane wskaźniki jakościowe” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim

zawarte w art. 13 Ustawy o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14.03.2004r. (Dz. U. nr 65, poz. 595) w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej w dyscyplinie elektronika. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Krzysztofa Skorupskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Istotnym elementem dorobku naukowego mgr inż. Krzysztofa Skorupskiego są jego wskaźniki bibliometryczne: w bazie Scopus liczba cytowań wynosi 179, bez autocytowań 160, indeks Hirsha 6; w bazie Web of Science liczba cytowań wynosi 138; bez autocytowań 121, indeks Hirsha 5.

Biorąc pod uwagę wartości merytoryczne zaprezentowane przez Autora w przedstawionej do oceny pracy doktorskiej, Jego umiejętności intelektualne oraz jakość i zakres przeprowadzonych badań, które charakteryzują się istotnymi walorami poznawczymi i aplikacyjnymi wnioskuję o jej wyróżnienie.

Janusz Albroch