



dr hab. Dominik Dorosz, prof. PB
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Artura Szewczuka

pt.: „Opracowanie modelu czujnika światłowodowego na bazie wielomodowych struktur interferencyjnych wykonanych techniką wymiany jonowej w szkle”.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Artura Szewczuka. Promotorem Doktoranta jest Pan dr hab. inż. Mark Błahut, profesor nzw. w Politechnice Śląskiej.

Recenzja została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Elektrycznego, Politechniki Śląskiej, prof. dr hab. inż. Pawła Sowy, (pismo RE 522/13/14 z dnia 1 lipca 2014 roku).

Tematyka i teza pracy

Fotonika już w ubiegłym stuleciu była jednoznacznie wskazywana jako jeden z głównych kierunków rozwoju w XXI wieku. Przekonanie to wynikało przede wszystkim z olbrzymich możliwości aplikacyjnych do jakich można zaprzęgnąć fale elektromagnetyczne. Najlepszym przykładem, potwierdzonym nagrodą Nobla (Charles Kao, 2009, „*groundbreaking achievements concerning the transmission of light in fibers for optical communication*”), jest telekomunikacja światłowodowa, która zrewolucjonizowała współczesny świat, tworząc praktycznie nieograniczone możliwości w odniesieniu do komunikacji społecznej czy przesyłu dużych ilości danych. Kolejnym szczególnie dynamicznie rozwijanym kierunkiem jest fotonika zintegrowana, która łączy cechy najszybszego „posłańca” jakim jest foton z inżynierią układów optycznych, tak by w oparciu o najnowsze technologie konstruować urządzenia o wysokim poziomie selektywności i czułości przy jednoczesnej ich integracji w inteligentne sieci komunikacyjne. W tym właśnie obszarze mieści się tematyka pracy doktorskiej mgra inż. Artura Szewczuka, obejmująca opracowanie modelu sensora optycznego działającego w konfiguracji falowodu planarnego wykonanego za pomocą technologii wymiany jonowej w szkle.

Zaproponowany przez Autora cel dysertacji to opracowanie falowodowych wielomodowych struktur interferencyjnych (tzw. MMI, ang. multimode interference structures), pozwalających na rejestrację powstających obrazów interferencyjnych, pod wpływem zmiennych warunków zewnętrznych. Należy podkreślić, że opracowanie czujników planarnych wykorzystujących zjawisko interferencji w strukturach MMI jest zadaniem ambitnym i trudnym do realizacji. Wymaga bowiem nie tylko analiz numerycznych rozkładu pól elektromagnetycznych, ale również uwzględnienia technologii odwzorowania struktur falowodowych i warstw o grubościach nanometrycznych. Podejmując to wyzwanie, Autor postawił w pracy następującą tezę: *„Zmiany rozkładu pola, obserwowane w obrazie interferencyjnym w wielomodowych gradientowych falowodach wykonanych metodą wymiany jonowej K^+ - Na^+ , wynikające ze zmian zewnętrznych warunków propagacji sygnału optycznego, mogą być wykorzystane do celów sensorowych”*. Należy zwrócić uwagę, że teza pracy jest jednoznacznie ukierunkowana na rozwiązanie konkretnego problemu aplikacyjnego, jakim są fotoniczne czujniki planarne, a zastosowanie struktur MMI jako elementów sensorowych stanowi nowatorski aspekt pracy. Udowodnienie tezy wymagało od Autora przeprowadzenia badań teoretycznych oraz prac doświadczalnych poprzedzonych analizą stanu wiedzy. Stwierdzam, że przyjęte przez Autora założenia są słuszne, a cel i teza pracy zostały sformułowane prawidłowo.

Układ pracy

Rozprawa doktorska mgra inż. Artura Szewczuka liczy 136 stron i podzielona jest na 8 rozdziałów zawierających: analizę stanu wiedzy (rozdziały 1-4), badania własne i ich dyskusję (rozdziały 5-8), podsumowanie oraz spis literatury. Na początku dysertacji znajduje się spis oznaczeń i nienumerowane rozdziały zawierające wprowadzenie oraz cel i tezę pracy, w których skrótowo przedstawiono obszary badawcze jakie zostaną poruszone w dysertacji. Taki układ pracy pozwala na jednoznaczną ocenę własnych osiągnięć jej Autora. W części literaturowej stanowiącej ok. 1/3 objętości pracy, scharakteryzowano obszar tematyczny uzasadniając cel oraz wskazując na możliwości analityczne i technologiczne podjętego tematu. W rozdziałach 1 i 2 scharakteryzowano zjawisko interferencji modowej w falowodach planarnych. Autor przedstawił rozkłady pól wzbudzanych modów w strukturze o skokowym profilu współczynnika załamania światła, wskazując przy tym na zauważalne efekty odbiciowe propagujących modów, co jest nie bez znaczenia dla obserwacji rozkładu pól w strukturze MMI. Kolejno przeszedł do omówienia powyższych efektów w strukturze gradientowej, a więc takiej, która była przedmiotem pracy doktorskiej. Już na tym etapie

stwierdził, na podstawie analizy wyników badań, że możliwe jest modelowanie położenia obrazu pola wejściowego w sekcji gradientowej MMI wykonanej metodą wymiany jonowej $K^+ \rightarrow Na^+$. W rozdziale trzecim zaprezentowane zostały metody analizy propagacji wiązki optycznej (BPM, ang. beam propagation method) i efektywnego współczynnika załamania, które zastosowano do opisu zjawisk w opracowywanych strukturach MMI. Rozdział 4 zawiera przegląd zastosowań struktur MMI w układach sensorowych. Autor prezentuje tu szczegółowo 4 prace opublikowane w uznanych czasopismach zagranicznych w latach 2003-2009, wskazując na istotne cechy propagacyjne w strukturach wielomodowych, które odnoszą się do projektowanego czujnika. Na koniec rozdziału znajduje się krótka informacja o innych typach czujników wielomodowych opartych o światłowody cylindryczne, zawierająca odniesienia literaturowe. Autor, co należy szczególnie podkreślić, w jasny sposób przedstawił materiał źródłowy, który jest ściśle związany z tematyką przeprowadzonych badań. Na tej podstawie w kolejnym piątym rozdziale zatytułowanym „*Model czujnika światłowodowego na bazie gradientowych struktur MMI*”, Autor zawarł swoją propozycję dotyczącą analizowanych w pracy konfiguracji struktur falowodowych zawierających warstwy sensorowe i absorpcyjne osadzone na gradientowej strukturze MMI. W części doświadczalnej pracy znajdujemy rozwinięcie tych propozycji i konkretne przykłady sensorów oraz ich praktyczną realizację. Opis metod użytych do ich wytwarzania znajduje się w kolejnym szóstym rozdziale, zatytułowanym „*Procesy technologiczne*”. Struktury falowodowe wykonane zostały metodą wymiany jonowej $K^+ \rightarrow Na^+$ w szkle borokrzemianowym typu kron oznaczonym symbolem BK7. Maski były nakładane techniką fotolitografii, natomiast warstwy sensorowe metodami osadzania z fazy gazowej (PVD - ang. physical vapour deposition) i rozwirowania (ang. spin coating). W rozdziale 7 znajdują się wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych nad strukturami MMI pokrytymi dielektrycznymi warstwami sensorowymi. Autor zaproponował dwa układy struktur: jedna była bezpośrednio pokrywana warstwami dielektrycznymi w zakresie współczynnika załamania światła 1,33-1,51 ($\lambda=635\text{nm}$), druga zaś zawierała warstwę buforową wykonaną z TiO_2 naniesioną metodą PVD pomiędzy strukturą MMI, a badanym analitem. W obydwu przypadkach przedstawiono wyniki analiz teoretycznych dotyczących szerokości i grubości poszczególnych warstw oraz wpływu parametrów optycznych na rozkłady pola w wielomodowej sekcji sensorowej. Na tej podstawie zrealizowano układy czujnikowe, których charakterystyki sygnałów wyjściowych pozwoliły na ocenę postawionych założeń konstrukcyjnych. W rozdziale 8 Autor przedstawił wyniki badań, w których jako warstwy

sensorowe zastosował WO_3 i związek purpury bromokrezolowej. Przeprowadzona została analiza teoretyczna określająca funkcje falowe modów wzbudzanych w sekcjach sensorowych oraz ich tłumienności w zależności od wartości grubości nakładanych warstw. W efekcie zaproponowano warstwy WO_3 o grubościach 30-120 nm oraz purpury bromokrezolowej ok. 40 nm, które były nakładane odpowiednio metodami PVD i spin coating. Wykorzystując strukturę MMI z warstwą purpury bromokrezolowej Autor zbudował sensor fotoniczny, który pozwala na detekcję NH_3 w zakresie 10-50 ppm. Pracę kończy podsumowanie, w którym znajdują się wnioski z przeprowadzonych badań wraz z komentarzem wyjaśniającym kolejne kroki podejmowane przez Autora.

Należy podkreślić, że układ pracy mgra inż. Artura Szewczuka jest przejrzysty i jednoznacznie pozwala na ocenę osiągnięć Autora.

Ocena wyników pracy

Przedmiotem niniejszej pracy była analiza i opracowanie wielomodowych struktur interferencyjnych wykonanych metodą wymiany jonowej w szkle w kontekście ich zastosowania w czujnikach fotonicznych. Jak już wspomniano, tematyka pracy należy do jednego z najszybciej rozwijającego się obszaru fotoniki zintegrowanej, wspieranej w nowej perspektywie UE w aspekcie najnowszych rozwiązań sensorów stosowanych w ochronie środowiska i przemyśle spożywczym.

Oceniając wyniki pracy stwierdzam, że na każdym etapie jej realizacji Autorowi szczególnie zależało na przyszłych zastosowaniach opracowywanych struktur sensorowych. Taki kierunek realizacji pracy doktorskiej, jak wiemy, stawia wysokie wymagania w stosunku do wiedzy Doktoranta, ale i samozaparcia w pracach technologicznych, które zawsze są pasmem wzlotów i upadków.

Przechodząc do szczegółowych wyników pracy należy stwierdzić, że pracę w pierwszej kolejności należy traktować jako kompletny opis teoretyczny trzech konfiguracji wielomodowych o parametrach pozwalających uzyskanie efektu samoobrazowania interferujących modów oraz analizy wpływu czynników zewnętrznych na to zjawisko. Zaproponowana pierwsza z konfiguracji to układ, w którym uzyskano interferencje modów w sekcjach o szerokościach 15 i 30 mm i długości do 5240 mm. Stwierdzono jednocześnie, że zmiany sygnału dla warstwy dielektrycznej o współczynniku załamania światła w zakresie (1,33-1,45) są małe i sięgają kilku procent. Słusznie Autor zaproponował analizę wydłużenia strefy wielomodowej w celu uzyskania większego przesunięcia punktu samoobrazowania przy wyjściu ze strefy w porównaniu z obrazem w krótszej strefie MMI. Przeprowadzona

weryfikacja doświadczalna została zrealizowana przy użyciu roztworów gliceryny o różnym stężeniu, potwierdzając analizę numeryczną. Druga konfiguracja sensora zakładała nałożenie na strukturę MMI dodatkowej warstwy o wysokim współczynniku załamania światła, w celu przesunięcia rozkładu energii propagującego się w rdzeniu modu w kierunku warstwy sensorowej. W efekcie miało to zapewnić większą czułość struktury na zmiany powierzchniowe wynikające z kontaktu analitu z warstwą sensorową. Zastosowano warstwy z tlenku tytanu o grubościach 10 i 20 nm i współczynniku załamania światła 2,6. Autor stwierdził w tym przypadku jeszcze mniejszą dynamikę zmian niż dla struktury bez warstwy buforowej przy zastosowaniu, podobnie jak uprzednio, roztworów gliceryny. Koncepcja warstwy buforowej jest ciekawym pomysłem, a jej główną zaletą to stabilizacja sygnału pochodzącego od struktury MMI. Wynika to zarówno z analizy numerycznej jak i pomiarów eksperymentalnych. Autor wprowadzić nie zauważa tego faktu, ale wykonane w pracy analizy mogą być pomocne przy konstruowaniu takich czujników, gdzie bezpośrednia ekspozycja badanego analitu nie jest możliwa z różnych powodów np. jej toksyczności lub wysokiej korozyjności wodnej. Kolejną propozycją Doktoranta jest użycie specyficznej warstwy sensorowej, która znacząco zmienia swoje parametry pod wpływem badanego analitu. Z punktu widzenia struktury MMI może być brana pod uwagę zmiana wartości parametrów współczynnika załamania światła i/lub ekstynkcji. Stąd słuszny wybór Autora i zastosowanie warstw WO_3 oraz purpury bromokrezolowej. W badaniach numerycznych wskazano na wysoką czułość tej struktury, która jest silnie zależna od grubości warstwy wpływającej na warunki tłumienia modów, ale również silnie uzależniona od polaryzacji TE i TM. Wyniki te jednoznacznie wskazują na możliwość wykorzystania tego typu struktur w sensorach dedykowanych do selektywnych pomiarów substancji o stężeniach rzędu dziesiątek ppm. Udowadnia to Autor w opracowanym czujniku NH_3 z warstwą purpury bromokrezolowej, w przypadku którego uzyskał możliwości pomiarowe w zakresie stężeń 10-50 ppm.

Podsumowując ocenę wyników pracy stwierdzam, że zostały one osiągnięte zgodnie z obecnie stosowanymi metodami analitycznymi i technologicznymi. Analizę stanu wiedzy wykonano w oparciu o najnowszą literaturę obejmującą 84 pozycje (w tym 50 powyżej 2000 r.), co pozwala stwierdzić, że mgr inż. Artur Szewczuk dysponuje głęboką wiedzą przedmiotu. Należy podkreślić, że znajduje to swoje potwierdzenie w kolejnych krokach badawczych podejmowanych przez Autora, a w efekcie wskazanie trzech konfiguracji MMI, ich analityczne scharakteryzowanie oraz opracowanie technologiczne czujników zbudowanych w architekturze fotoniki zintegrowanej.

Na tej podstawie stwierdzam, że mgr inż. Artur Szewczuk w pełni zrealizował cel pracy i udowodnił postawioną tezę. Uzyskane wyniki stanowią wartościowy dorobek Autora i czyni rozprawę znaczącą w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie elektronika.

Uwagi wynikające z lektury rozprawy

Oceniając rozprawę doktorską mgr inż. Artura Szewczuka stwierdzam, że nie posiada ona zasadniczych błędów merytorycznych i została zrealizowana poprawnie. Do nielicznych słabych strony pracy należą:

1. W rozdziale 4 Autor przedstawił kilka czujników wykorzystujących struktury wielomodowe, przy czym najnowsze rozwiązanie pochodzi z 2009 roku. Czy nie pojawiały się tego typu struktury w ostatnich 4 latach?
2. Na rysunku 7.11 znajduje się schemat czujnika oparty o strukturę z warstwą dielektryczną. Dlaczego użyto struktury o wymiarach ($69\mu\text{m}$ i $2720\mu\text{m}$) innych niż te które były analizowane teoretycznie? W jakim celu zastosowano cztery światłowody detekcyjne?
3. Jaka szerokość struktury MMI została zastosowana w przypadku warstwy buforowej TiO_2 ? Dlaczego Autor twierdzi (str. 93), że sposób pobudzenia tej struktury będzie wpływał na „charakterystykę pracy” czujnika? Czy analiz nie powinien mieć zbliżonego współczynnika światła w stosunku do warstwy buforowej, co wywołałoby większe zaburzenie w propagacji promieniowania w tej warstwie?
4. W podsumowaniu Autor niesłusznie zamieścił stwierdzenie, mówiące iż struktura pokryta purpurą bromokrezolową cechuje się „czułością pozwalającą na określenie stężenia gazu o koncentracjach pojedynczych ppm” (str. 129).
5. Rysunki 4.1, 5.1 i 7.1 przedstawiają ten sam model czujnika opartego na strukturze MMI. Ponadto schematy te są na tyle ogólne, że mogą przedstawiać dowolny sensor planarny.
6. Autor w całej pracy nadużywa słowa „koncentracja” zamiast szczególnie w przypadku roztworów pojęcia „stężenie”.
7. Podstawy technologiczne metody wymiany jonowej znajdujące się w rozdziale 2 powinny być umieszczone w rozdziale 6 „Procesy technologiczne”.
8. Mało czytelne rysunki 4.10 i 6.7b.
9. Drobne uchybienia językowe typu „wytlumianie sygnału” (str. 101), „zwiększenie ilości światła” (str. 95), „rozdyfundowanie... profili rozkładu” (str. 110), część opisów wykresów w języku angielskim (np. rys. 8.5, 8.7, 8.13).

10. Brak zależności wydłużenia względnego w funkcji temperatury dla szkła wapniowo sodowego wskazanego w legendzie wykresu 8.18.

Uwagi te podnoszę z racji obowiązku recenzenta, w tym także dla wskazania kierunków dalszych badań nad tematem podjętym w tej pracy. Dotyczą one szczegółów, które nie wpływają na wartość recenzowanej rozprawy doktorskiej, którą oceniam wysoko.

Konkluzja

Reasumując stwierdzam, że Pan mgr inż. Artur Szewczuk rozwiązał trudny problem naukowo-badawczy, wymagający zarówno szerokiego zasobu wiedzy teoretycznej, jak też zawansowanych umiejętności w zakresie technologii fotonicznych i metrologii optoelektronicznej. Dysertację oceniam wysoko, stwierdzając, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim w dziedzinie elektroniki. Dopełnieniem, wizerunku Doktoranta jest jego dorobek naukowy zawierający 5 publikacji z listy filadelfijskiej, 5 wystąpień ustnych i również 5 prezentacji posterowych na międzynarodowych konferencjach optoelektronicznych. Na tej podstawie uważam, że mgr inż. Artur Szewczuk jest dojrzałym młodym naukowcem, który może samodzielnie formułować i rozwiązywać zadania badawcze.

Osiągnięcia poznawcze zaprezentowane w pracy mgr inż. Artura Szewczuka pozwalają mi stwierdzić, że zgodnie z „Ustawą o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki”, z dnia 14 marca 2003 roku, wraz ze zmianami z dnia 18 marca 2011 roku, spełnia ona wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim z naddatkiem i wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Białystok, 28.08.2014 r.

Dominik Dorosz

