



GLIWICE, 2014.08.10

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Pustelny
Katedra Optoelektroniki
Politechnika Śląska
e-mail: tpustelny@polsl.pl

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Artura Szewczuka pt.:

OPRACOWANIE MODELU CZUJNIKA ŚWIATŁOWODOWEGO NA BAZIE WIELOMODOWYCH STRUKTUR INTERFERENCYJNYCH WYKOANANYCH TECHNIKĄ WYMIANY JNOWEJ W SZKLE

Praca doktorska została wykonana pod kierunkiem Pana dr hab. inż. Marka Błahuta, profesora nzw. w Politechnice Śląskiej, w Katedrze Optoelektroniki Wydziału Elektrycznego Politechniki Śląskiej.

Wyniki swoich badań literaturowych, analiz teoretycznych oraz badań numerycznych, prac technologicznych i badań eksperymentalnych pan mgr inż. Artur Szewczuk zawarł na 136 stronach maszynopisu. Praca zawiera 103 rysunki, wykresy i zdjęcia, dobrze dokumentujące zawarte w rozprawie treści. W rzeczywistości ilość rysunków jest znacznie (wielokrotnie) większa, gdyż często pod jednym numerem Doktorant umieszcza kilka wykresów lub obrazów. W spisie literatury, Autor podaje 84 pozycje, do których odwołuje się w swojej dysertacji doktorskiej. Są to wszystko prace istotne dla tematyki podjętej w rozprawie. Wśród nich jest pięć prac, których Doktorant jest współautorem – wszystkie opublikowane w czasopismach z listy ISI (tzw. listy filadelfijskiej). Praca doktorska zawiera *Spis Oznaczeń*, używanych przez Doktoranta w pracy, który ułatwia analizę zawartych w pracy treści.

1. Tematyka rozprawy doktorskiej

Praca doktorska Pana mgr inż. Artura Szewczuka dotyczy problemów szeroko rozumianej - fotoniki. Nie ma przesady w stwierdzeniu, że fotonika jest jedną z dziedzin, które w sposób zasadniczy kształtują poziom tzw. cywilizacji informatycznej XXI-go wieku. Dzisiejsze sukcesy informatyki i telekomunikacji, łącznie z internetem byłyby niemożliwe, gdyby nie światłowody i struktury fotoniczne. Układy optoelektroniczne (fotoniczne) na bazie falowodów optycznych odrywają coraz większą rolę we współczesnej metrologii, często umożliwiając pomiary w ekstremalnie trudnych warunkach, lub pozwalając na otrzymywanie wyników z bardzo dużą dokładnością. Praca doktorska Pana mgra Artura Szewczuka dotyczy badań nad układami wielomodowych struktur interferencyjnych (tzw. struktur MMI) w aspekcie możliwości ich zastosowania w czujnikach światłowodowych. Co prawda, pierwsze próby wykorzystania struktur MMI w czujnikach optoelektronicznych pojawiły się jeszcze w latach dziewięćdziesiątych XX-go wieku, lecz trzeba uznać, że w dalszym ciągu problem zastosowania struktur MMI w sensoryce, mimo ogromnych potencjalnych w tym względzie możliwości, nie osiągnął satysfakcjonującego poziomu. Wynika to z problemów zarówno o charakterze naukowym jak również z konieczności podjęcia trudnych prac i badań o charakterze technologicznym.

Dlatego z szacunkiem należy odnieść się do podjęcia tej tematyki przez mgra Artura Szewczuka w ramach swojej dysertacji doktorskiej.

Tematyka rozprawy doktorskiej mgra inż. Artura Szewczuka wpisuje się w nurt aktualnych i ważnych problemów współczesnej fotoniki i inżynierii układów optycznych.

2. Teza rozprawy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej Pan mgra inż. Artura Szewczuka jest analiza możliwości zastosowania fotonicznych struktur MMI w sensorach wybranych wielkości fizycznych.

Cel szczegółowy rozprawy obejmuje analizę możliwości opracowania sensora wybranych gazów w atmosferze powietrza z wykorzystaniem struktur MMI.

Doktorant formułuje następującą tezę pracy (cytat):

„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” (koniec cytatu).

Wykazanie tej tezy wymagało od Doktoranta:

- badań teoretycznych i numerycznych wielodomowych struktur interferencyjnych MMI,
- opanowania zagadnień z zakresu technologii struktur MMI, w tym - wykonania niektórych stanowisk technologicznych,
- wykonania układów pomiarowych,
- przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

Zarówno teza rozprawy doktorskiej jak i jej cel zostały sformułowane jasno i poprawnie.

3. Zakres rozprawy doktorskiej

Przedstawione w rozprawie doktorskiej zagadnienia zostały podzielone na 9 rozdziałów. (Dziwιάtym, nienumerowanym rozdziałem jest - *Podsumowanie*)

Manuskrypt pracy doktorskiej rozpoczyna nienumerowany rozdział *Wprowadzenie*. Doktorant dokonuje tu uzasadnienia podjęcia badań nad strukturami fonicznymi, w aspekcie praktycznego ich stosowania w sensorach optoelektronicznych. Wskazuje, że w tematyce sensorów optoelektronicznych ważną rolę mogą odegrać wielomodowe struktury interferencyjne MMI. Doktorant omawia tutaj także zawartość swojej rozprawy doktorskiej.

Drugą częścią rozprawy stanowi również nienumerowany rozdział pt. *Cel i teza pracy*. Formuluje *cele*, które chce osiągnąć i stawia *tezę*, której wykazanie zakończy rozprawę. W tej części Doktorant podaje spis *Publikacji w czasopismach indeksowanych (z listy filadelfijskiej)*, których jest współautorem. Podaje tu również wykaz *Ustnych wystąpień konferencyjnych* oraz wykaz *Prezentacji posterowych*. Nie uważam, za szczęśliwe i uzasadnione wypisywanie w tym miejscu (w części: *Cel i teza pracy*) informacji o swoim dorobku naukowym, tym bardziej, że już później w rozprawie Doktorant do swojego dorobku się nie odnosi.

W rozdziale numerowanym jako pierwszy – *Zjawisko interferencji międzymodowej w falowodach step-index* Doktorant podał podstawowe właściwości interferencji międzymodowej w falowodach optycznym o skokowym profilu współczynnika załamania światła. Omówił mechanizm interferencji optycznej w strukturze wielodomowej oraz zjawiska odbicia na granicach sekcji MMI.

W rozdziale drugim – *Zjawisko interferencji międzymodowej w gradientowych falowodach otrzymanych w procesie wymiany jonowej*, Doktorant omówił podstawy technologii wymiany jonowej. Przedstawił właściwości falowodów gradientowych

otrzymywanych w procesie wymiany jonowej $K^+ + Na^*$. Falowody otrzymywane tą technologią były wykorzystywane do wytwarzania struktur MMI, badanych w ramach realizacji pracy doktorskiej. Doktorant przedstawił i omówił także tzw. efekty samoobrazowania, występujące w falowodach gradientowych oraz zjawiska anizotropii współczynnika załamania wywołane naprężeniami mechanicznymi w falowodach wytwarzanych metodą wymiany jonowej.

Rozdział trzeci – *Numeryczne metody analizy światłowodów paskowych wykorzystywane w pracy* zawiera opis metod numerycznych stosowanych do analiz teoretycznych badanych w pracy. W swojej pracy Doktorant stosował dwie metody: metodę propagacji wiązki optycznej (tzw. metodę BPM) oraz metodę efektywnego współczynnika załamania. Autor koncentruje się głównie na tych aspektach zjawisk propagacji pola elektromagnetycznego, które są ważne w strukturach o gradientowym profilu współczynnika załamania.

W rozdziale 4 – *Przegląd zastosowań struktur MMI w technologiach sensorowych* zostają omówione wybrane konfiguracje sensorów optoelektronicznych, bazujących na wielodomowych strukturach interferencyjnych (strukturach MMI). Omawia pozycje charakterystyczne dla światowej literatury tego problemu. Wybór pozycji literaturowych, do których Doktorant się odnosi jest wprawdzie subiektywny, lecz wskazuje na Jego dobre rozeznanie w analizowanej tematyce.

Rozdział 5 – *Model czujnika światłowodowego na bazie gradientowych struktur MMI* omawia analizowane konfiguracje czujników optoelektronicznych na bazie struktur MMI, wykonanych techniką wymiany jonowej. Wszystkie z badanych konfiguracji bazowały na gradientowych strukturach wielodomowych pokrywanych warstwą zmieniającą swoje właściwości optyczne np. pod wpływem zmian atmosfery zewnętrznej, Doktorant wskazuje na kilka konfiguracji struktur czujnikowych.

W rozdziale 6 – *Procesy technologiczne* zostały przez Doktoranta opisane procesy i metody technologiczne wykorzystane do wytworzenia optycznych falowodów gradientowych, wykonanych w technologii wymiany jonowej $K^+ - Na^+$ w szkle BK7 z użyciem masek metalicznych. Maski zostały naniesione na podłoże szklane z wykorzystaniem procesu fotolitografii. Warstwy sensorowe nanoszone były z wykorzystaniem metody PVD oraz metody rozwirowania (typu spin coating) w zależności od stosowanego materiału sensorowego.

Rozdział 7 – *Struktury MMI pokryte dielektrycznymi warstwami sensorowymi* stanowi omówienie wyników badań teoretycznych (numerycznych) i eksperymentalnych struktur sensorowych na bazie MMI, których sekcja wielodomowa została pokryta dielektryczną

warstwą sensorową. Badania teoretyczne wykonano w oparciu o analizę właściwości modowych oraz analizę propagacji światła metodą BPM, dla przypadku zmian współczynnika załamania materiału pokrycia w szerokich granicach ($n \in 1.33-1.51$). W badaniach eksperymentalnych jako pokrycie Doktorant stosował wodne roztwory gliceryny o różnym stężeniu.

W rozdziale 8 – *Struktury MMI pokrywane absorpcyjną warstwą sensorową* zostały przedstawione wyniki badań, które Doktorant uzyskał dla konfiguracji optoelektronicznego czujnika gazu na bazie struktur MMI przy zastosowaniu pokrycia sensorowego, w którym w wyniku zmian atmosfery otaczającej, zmienia się zarówno wartość współczynnika załamania jak i współczynnika ekstynkcji. W badaniach teoretycznych wykorzystano dwie metody: pierwszą – opartą na analizie tłumienności modów propagujących się w sekcji MMI oraz drugą – stosującą analizę rozkładów amplitudowych z wykorzystaniem metody BPM. W wyniku przeprowadzonych analiz, Doktorant wykonał odpowiedni optoelektroniczny czujnik gazu na bazie struktury MMI oraz przetestował jego czułość na działanie amoniaku w atmosferze powietrza syntetycznego. W badaniach wykorzystał specjalistyczne stanowisko gazowe, istniejącego w Katedrze Optoelektroniki. Opracowany sensor wykazywał wrażliwość na zmiany stężenia NH_3 na poziomie kilkudziesięciu ppm.

Część merytoryczną manuskryptu pracy doktorskiej kończy nienumerowany rozdział *Podsumowanie*, zawierający omówienie przeprowadzonych w ramach realizacji rozprawy badań i uzyskanych wyników.

Literatura to wykaz pozycji literatury problemu, wykorzystanych w trakcie realizacji pracy doktorskiej. Jak już wspomniano, w spisie literatury znajduje się 84 pozycji, ważnych dla analizowanych w pracy zagadnień. Istotną część wykazu literatury stanowią publikacje nowe, które ukazały się w okresie ostatnich 2-3 lat.

Spis pozycji literatury, z których doktorant korzystał przy realizacji swojej rozprawy, świadczy o dobrej znajomości współczesnej literatury problemów, analizowanych w rozprawie.

4. Ocena rozprawy doktorskiej

Jak już zaznaczono, przedmiotem pracy doktorskiej Pana mgra Artura Szewczuka były problemy naukowe związane z propagacją pola elektromagnetycznego w wielodomowych strukturach interferencyjnych typu MMI.

W ramach swojej rozprawy Doktorant przeprowadził kompleksowe badania teoretyczne, technologiczne i eksperymentalne wielomodowych struktur interferencyjnych wykonanych w technologii wymiany jonowej w szkle. Szerokie i gruntowne badania numeryczne (i badania teoretyczne) pozwoliły Doktorantowi na ustalenie czynników decydujących o tworzeniu się rozkładu pola modowego w strukturze MMI. Ostateczną intencją badań było wyjaśnienie i rozstrzygnięcie, czy struktury MMI wykonane w technologii wymiany jonowej mogą znaleźć zastosowanie w optoelektronicznej sensoryce gazów.

W ramach pracy rozpatrywane były trzy główne konfiguracje optoelektronicznych struktur MMI. Pierwsza konfiguracja bazowała na sekcji MMI, której pokrycie stanowiła warstwa dielektryczna, zmieniająca wartości części rzeczywistej współczynnika załamania w przypadku jej oddziaływania z mierzonym analitem gazowym. Druga z rozpatrywanych przez Doktoranta konfiguracji wykorzystywała dodatkowo cienką warstwę buforową (o grubości od kilku nm do kilkudziesięciu nm) oraz o wysokiej wartości współczynnika załamania ($n_b = 1.9$). Zadaniem warstwy buforowej, na którą następnie nanoszone było gazoczułe pokrycie, było skoncentrowanie energii pola elektromagnetycznego jak najbliżej warstwy sensorowej i w efekcie – zwiększenie wpływu zmian parametrów pokrycia na propagujący się w falowodzie typu MMI sygnał. Trzecią konfigurację stanowiła sekcja MMI, której pokrycie stanowił materiał zmieniający pod wpływem oddziaływania z wybraną atmosferą gazową swój współczynnik załamania oraz współczynnik ekstynkcji. Badania numeryczne pokazały, że w aspekcie praktycznego zastosowania w optoelektronicznych strukturach sensorowych, jest to konfiguracja najbardziej obiecująca. Każda z analizowanych teoretycznie (i numerycznie) konfiguracji została technologicznie wykonana. Zostały przeprowadzone badania eksperymentalnie struktur dla każdej z konfiguracji. W przypadku dwóch pierwszych konfiguracji wyniki analiz nie są optymistyczne. Doktorant wykazuje, że w aspekcie wykorzystania takich struktur (tj. struktur MMI wykonanych technologią wymiany jonowej w szkle) w optoelektronicznych sensorach gazów możliwości ich zastosowania są bardzo ograniczone. Wynika to z racji zachodzących w takich strukturach efektów fizycznych i relatywnie małej wrażliwości obrazu pól modowych w analizowanych strukturach MMI (wykonanych technologią wymiany jonowej) na zmiany wartości współczynnika załamania zewnętrznego pokrycia. Wynika to również z ograniczeń technologicznych (np. wymiana jonowa) oraz z warunków optymalnej pracy takiego sensora (np. optymalna temperatura pracy na poziomie 300°C). Doktorant sugeruje, że najlepsze potencjalne możliwości aplikacyjne wykazuje konfiguracja trzecia. Konfiguracja ta może okazać się atrakcyjna – wrażliwość rozkładu pola modowego na zmiany wartości współczynnika załamania (zespolonej wartości współczynnika załamania) są istotnie wyższe, niż ma to miejsce w

przypadku konfiguracji pierwszej i drugiej. Zastosowanie tej konfiguracji (konfiguracji trzeciej) wymaga jednak bardzo starannego wyboru materiału pokrycia sensorowego, opracowanego każdorazowo indywidualnie dla detekcji konkretnego gazu.

Można uznać, że postawiana przez Doktorant teza rozprawy, że

„Zmiany rozkładu pola, obserwowane w obrazie interferencyjnym w wieomodowych gradientowych falowodach wykonanych metodą wymiany jonowej K^+ - Na^+ , wynikające ze zmian zewnętrznych warunków propagacji sygnału optycznego, mogą być wykorzystane do celów sensorowych”

została potwierdzona w wyniku jej realizacji.

W opinii Recenzent, badania wykonane przez mgra Szewczuka pokazują więcej – wskazują, że do problemu potencjalnych możliwości zastosowania struktur MMI wykonanych w technologii wymiany jonowej w szkle w optoelektronicznej sensoryce gazów, należy podchodzić z ostrożnością – należy mieć świadomość ograniczeń stosowania tych struktur w sensoryce.

Podsumowując ten punkt recenzji pragnę zauważyć, że praca doktorska mgra Szewczuka realizowana jest w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie elektronika. W tym aspekcie uważam, że zakres podjętych w niej zadań jest wzorowy. W ramach realizacji pracy doktorskiej mgr Artur Szewczuk przeprowadził analizy teoretyczne i wartościowe badania numeryczne analizowanych problemów. Są w rozprawie analizy projektowe, szerokie i wszechstronne prace technologiczne, jest i budowa stanowisk badawczych do prowadzenia badań eksperymentalnych, są także bogate i wartościowe własne badania eksperymentalne.

Podjęty i zrealizowany przez Doktoranta zakres prac i badań w ramach swojej rozprawy doktorskiej oceniam wysoko. Zawarty w rozprawie materiał badawczy świadczy, że mgr inż. Artur Szewczuk jest dojrzałym pracownikiem naukowym, posiadającym umiejętności samodzielnego formułowania problemów naukowych jak i ich samodzielnego rozwiązywania.

5. Uwagi krytyczne

Układ pracy jest starannie przemyślany i zdaniem Recenzenta - poprawny. Praca Pana mgra inż. Artura Szewczuka zawiera bogaty materiał analiz i badań numerycznych. Zawiera wartościowe wyniki prac technologicznych oraz badań eksperymentalnych.

Praca nie jest obszerna ponad miarę - zawiera w sumie 136 stron maszynopisu. Pracę czyta się dobrze, choć wymaga ona do czytelnika ciągłej uwagi. Praca nie zawiera informacji o charakterze ogólnym – Doktorant zawarte w rozprawie treści kieruje do specjalistów – do osób zajmujących się optoelektroniką i optyką zintegrowaną. Można dyskutować, czy pewne fragmenty pracy (rozdział 1 oraz 2) nie powinny być omówione szerzej. Tę samą uwagę mam również do rozdziału 5, w którym problem „*modelu czujnika światłowodowego na bazie gradientowych struktur MMI*” potraktowany został bardzo pobieżnie (wprost - lapidarnie). Lektura pracy jednak najczęściej dostarczała mi naukowej satysfakcji.

Z obowiązku recenzenta muszę także zgłosić uwagi krytyczne.

Nie bardzo rozumiem, dlaczego wstępne części pracy (zatytułowane: *Wprowadzenie* oraz *Cel i teza pracy*) są w rozdziałach nienumerowanych. Nie rozumiem intencji Doktoranta umieszczania wykazu swojego dorobku naukowego (wykazu publikacji oraz wykazu wystąpień konferencyjnych) w części pt. *Cel i teza pracy*. Tę samą uwagę mam do rozdziału *Podsumowani* – nie wiem dlaczego nie otrzymał od swojego numeru.

Doktorant zbyt rzadko w swoich analizach odwołuje się do literatury, z której korzysta - nie wiem skąd pochodzą niektóre wzory, np. 8.4 i 8.5, ale również i inne wyrażenia analityczne. Omawiając czułość sensora opracowanego według tzw. trzeciej konfiguracji Doktorant stwierdza, że (cytat ze str. 129) „poddany działaniu amoniaku cechował się on wysoka czułością, pozwalająca na określenie stężenia gazu o koncentracji pojedynczych ppm”. Skąd taki wniosek? Na działanie amoniaku o stężeniach pojedynczych ppm w atmosferze powietrza czujnik nie był w ogóle badany!

Praca, w sensie edycyjnym - napisana jest starannie. Błędy edycyjne (tzw. literówki i interpunkcje), zdarzają się rzadko i nie zasługują, aby wymieniać je w recenzji.

Uważam, że zawarty w pracy materiał, który dotychczas nie był prezentowany „publicznie”, powinien zostać opublikowany w czasopiśmie o międzynarodowym zasięgu.

Dużą wartością naukową pracy są wyniki analiz numerycznych struktur MMI. Doktorant nic nie pisze o tym w oparciu o jakie systemy numeryczne prowadził swoje analizy i z jakich programów korzystał. Czy współuczestniczył w tworzeniu programów numerycznych do prowadzenia stosowanych w pracy doktorskiej analiz? Proszę o wyjaśnienie tego problemu w trakcie publicznej obrony. Przeprowadzone analizy pokazały, że rozkłady pola w strukturach MMI o gradientowym rozkładzie współczynnika załamania i o prostokątnym kształcie struktury są relatywnie mało wrażliwe na zmiany właściwości optycznych środowiska otaczającego. Jak ten problem prezentowałby się w przypadku struktur MMI jednomodowych o skokowym profilu współczynnika załamania? Sugeruję Doktorantowi przeanalizowanie w przyszłości problemu w jaki sposób formować kształt wielodomowej struktury, aby rozkład

pola modowego był w niej bardziej wrażliwy na zmiany właściwości optycznych zewnętrznego otoczenia.

Nie ma w pracy również informacji z kim Doktorant współpracował i w jakim zakresie?

Doktorant we *Wprowadzeniu*, omawiając grupy czujników optycznych wymienia prace różnych autorów, nie zauważając zupełnie prac autorów z Katedry Optoelektroniki, które w wielu aspektach prezentują wysoki (międzynarodowy) poziom naukowy. Szkoda! Uwaga ta odnosi się przede wszystkim do czujników optoelektronicznych na bazie zjawiska powierzchniowego rezonansu plazmonowego. Tę samą uwagę mam również w odniesieniu do sensorów interferencyjnych!

Powyższe uwagi nie mają żadnego wpływu na ogólną wysoką ocenę pracy.

6. Konkluzja końcowa

Jak to już podkreśliłem wcześniej, ogólna ocena pracy jest jednoznacznie pozytywna. Praca zawiera duży materiał badawczy. Jest to materiał dotyczący zarówno analiz teoretycznych jak i badań numerycznych, prac technologicznych oraz badań eksperymentalnych.

Badania realizowane w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zasługują na uznanie. Zakres rozprawy wykracza poza poziom przeciętny i spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim z nadmiarem.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska

mgr inż. Artura Szewczuka pt.:

**OPRACOWANIE MODELU CZUJNIKA ŚWIATŁOWODOWEGO NA
BAZIE WIELOMODOWYCH STRUKTUR INTERFERENCYJNYCH
WYKOANANYCH TECHNIKĄ WYMIANY JNOWEJ W SZKLE**

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, w części dotyczącej stopnia doktora, **spełnia warunki stawiane rozprawom doktorskim.**

Po spełnieniu innych warunków formalnych wnoszę o jej publiczną obronę.



Z wyrazami szacunku