

Prof. dr hab. inż. Marcin Kochanowicz
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
Katedra Fotoniki, Elektroniki
i Techniki Światłowej
e-mail: m.kochanowicz@pb.edu.pl

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Danuty Żuchowskiej pt. „Wytwarzanie i badanie mikrotyków polimerowych formowanych na końcach światłowodów wielomodowych”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska doktorskiej mgr inż. Moniki Danuty Żuchowskiej pt. „Wytwarzanie i badanie mikrotyków polimerowych formowanych na końcach światłowodów wielomodowych”, której promotorem jest dr hab. inż. Paweł Marć, Prof. WAT. Recenzja została na zlecenie Dziekana Wydziału Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej – dr hab. inż. Anny Spadło, prof. WAT (pismo z dnia 17.06.2025).

Tematyka i cel pracy

Obserwowany obecnie dynamiczny rozwój fotoniki, w szczególności układów sensorowych jest ściśle związany z opracowaniem nowych materiałów oraz ich integracji z szeroko pojętymi układami sensorowymi, w tym światłowodowymi. Dzięki wysokiemu stopniowi rozwoju technologii szkła krzemionkowego możliwe jest projektowanie światłowodów pasywnych o parametrach tłumienności zbliżonych do granic teoretycznych co poza zastosowaniami telekomunikacyjnymi daje możliwość konstruowania na ich bazie sensorów wielopunktowych oraz z rozłożoną detekcją. Drugi kierunek poszukiwań to materiały polimerowe. Wiadomym jest, że optyczne materiały z polimerowe w ogólności charakteryzują się większym tłumieniem niż światłowody kwarcowe. Jednakże ich niskie temperatury przetwarzania, możliwość polimeryzacji promieniowaniem optycznym otwierają możliwości ich domieszkowania różnymi centrami np. barwniki luminescencyjne, półprzewodnikowe lub metaliczne nanocząstki czynią je atrakcyjnymi pod kątem ich zastosowań sensorowych.

Nowym zagadnieniem badawczym jest integracja nowych materiałów polimerowych, w tym nanokompozytów, ze strukturami światłowodowymi (np. poprzez formowanie mikrotyków na czołach światłowodów). Polimery i nanokompozyty charakteryzują się wysoką

podatnością na modyfikacje chemiczne oraz dużą wrażliwością na czynniki środowiskowe, takie jak temperatura, wilgotność, pH czy obecność określonych związków chemicznych. Wprowadzenie takich materiałów do struktury światłowodowej umożliwia konstruowanie czujników o selektywności i czułości, przewyższających możliwości klasycznych włókien krzemionkowych. Przykładem mogą być światłowody z warstwą polimerową, która zmienia swoje właściwości optyczne (np. współczynnik załamania czy absorpcję) pod wpływem określonych substancji chemicznych – co pozwala na detekcję gazów, par chemicznych czy biomarkerów. Tego rodzaju hybrydowe rozwiązania znajdują potencjalne zastosowanie w medycynie (biosensory), ochronie środowiska, przemyśle chemicznym, a także w systemach bezpieczeństwa i monitoringu infrastruktury krytycznej. Celem tych badań jest stworzenie nowych układów hybrydowych, które znajdą zastosowanie w czujnikach fotonicznych o kształtowanych właściwościach optycznych.

W tym obszarze mieści się tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Moniki Żuchowskiej, która koncentruje się na opracowaniu technologii formowania i kształtowania geometrii mikrotipów polimerowych na czole światłowodu wielomodowego. Badania obejmują zarówno opracowanie i optymalizację metodologii wytwarzania, jak i szczegółową charakterystykę właściwości optycznych światłowodów zakończonych mikrotipami polimerowymi. Istotnym elementem pracy jest również analiza potencjalnych zastosowań opracowanych struktur jako czujników współczynnika załamania dla materiałów w stanie ciekłym oraz dla substancji lotnych.

Stwierdzam, iż podjęta w rozprawie problematyka badawcza jest w pełni aktualna, posiada istotny potencjał aplikacyjny i wpisuje się w jeden z kluczowych kierunków badań prowadzonych w wiodących ośrodkach naukowych na świecie, zajmujących się inżynierią materiałów fotonicznych na potrzeby techniki światłowodowej. Uważam, że przyjęte przez Doktorantkę założenia badawcze są uzasadnione merytorycznie, a sformułowany problem naukowy został przedstawiony w sposób trafny, precyzyjny i jednoznaczny.

Układ pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 122 strony jest podzielona na 5 rozdziałów. Pracę kończy literatura cytowana w treści pracy oraz streszczenie. Dodatkowo zestawiono dorobek i aktywność naukową doktorantki.

Struktura pracy jest przejrzysta i dobrze odpowiada logice badań eksperymentalnych nad mikrotipami polimerowymi w zastosowaniach światłowodowych. Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie, w którym Doktorantka zarysowuje tło problemu badawczego, uzasadnia wybór tematyki oraz określa cele pracy. Wstęp ten dobrze osadza rozważania w kontekście współczesnego rozwoju materiałów optycznych, fotoniki ze szczególnym uwzględnieniem sensorów światłowodowych. Uważam, że przedstawiony w pracy stan wiedzy jest zarówno reprezentatywny, jak i aktualny (212 pozycji). Jednocześnie zauważam brak ilustracji i wykresów, które mogłyby w znacznym stopniu ułatwić analizę zawartych w tekście informacji. W dalszej części pracy przedstawiono badania własne. Rozdział drugi poświęcony został technologii wytwarzania mikrotipów polimerowych na czołach włókien światłowodowych.

Autorka szczegółowo omawia proces ich wytwarzania, poczynając od właściwości mieszanin fotopolimeryzowalnych i charakterystyki źródeł światła, poprzez parametry techniczne światłowodów, aż po opis warunków procesu technologicznego. W dalszej części przedstawiono zagadnienia kształtowania geometrii mikrotipów, domieszkowania polimerów cząstkami tlenków metali, a także niepożądane zjawiska towarzyszące procesowi i wpływ temperatury. Rozdział kończy się wyciągnięciem spójnych wniosków, co świadczy o dojrzałym podejściu badawczym Doktorantki. Rozdział trzeci dotyczy konstrukcji światłowodowego czujnika odbiciowego z mikrotipem polimerowym. Najpierw przedstawiono podstawy optyczne przetworników oraz zasady pomiaru, następnie dokonano wyboru mikrotipów o optymalnych parametrach. Szczególnie cenne są fragmenty poświęcone polimerowym mikrotipom jako przetwornikom do czujników współczynnika załamania, w tym domieszkowanym nanocząstkami. Osobny podrozdział omawia zastosowanie mikrotipu jako przetwornika progowego czujnika lotnych związków organicznych, co stanowi praktyczny wymiar badań. Przedstawiono zarówno opis konstrukcji, jak i wyniki eksperymentów, a rozdział kończy się wnioskami. Rozdział czwarty koncentruje się na właściwościach transmisyjnych układów z mikrotipem polimerowym. Autor wprowadza pojęcie apertury numerycznej, następnie prezentuje wyniki badań transmisyjnych dla mikrotipów domieszkowanych nanocząstkami złota oraz tlenku tytanu. Interesująca jest także część poświęcona zastosowaniu mikrotipów w integracji światłowodów specjalnych, co wskazuje na potencjalne kierunki aplikacyjne prowadzonych badań. Rozdział kończy się przejrzystym zestawieniem wniosków. Rozdział piąty stanowi podsumowanie całej pracy. Autorka w syntetyczny sposób przedstawia główne rezultaty rozprawy, akcentując zarówno aspekty technologiczne, jak i potencjalne zastosowania praktyczne. Całość uzupełnia obszerna bibliografia, świadcząca o dobrym rozeznaniu Doktorantki w literaturze, a także streszczenia w języku polskim i angielskim.

Stwierdzam, że pod względem struktury praca prezentuje się bardzo dobrze. Poszczególne rozdziały zostały ułożone w sposób konsekwentny – od części technologicznej, poprzez charakterystykę funkcjonalną czujników, aż po analizę transmisyjną i syntezę wyników. Taki układ ułatwia czytelnikowi śledzenie toku badań i pozwala jasno dostrzec, w jaki sposób poszczególne etapy prowadzą do osiągnięcia sformułowanych celów.

Ocena pracy

Analiza przedstawionej pracy doktorskiej pozwala stwierdzić, że ma ona charakter w pełni eksperymentalny. Praca została starannie zaplanowana w celu przeprowadzenia systematycznych badań nad możliwościami kształtowania geometrii mikrotipów polimerowych, w tym nanokompozytowych, wytwarzanych na czołach światłowodów wielomodowych oraz nad wpływem zmian tych geometrii na ich właściwości optyczne. Jednocześnie Doktorantka zbadała praktyczne zastosowania opracowanych mikrotipów jako głowic sensorowych do pomiaru współczynnika załamania światła w cieczach. Praca obejmuje badania podstawowe, które zostały ukierunkowane na cele aplikacyjne, przede wszystkim rozwój nowych konstrukcji czujników światłowodowych.

W części literaturowej Autorka opisuje znane sensory światłowodowe oraz technologie wytwarzania mikrotyków na czołach światłowodów. Zaprezentowany stan wiedzy jest szeroki, oparty o aktualną literaturę światową. Pewnym mankamentem utrudniającym jego szybką analizę poprzez np. porównanie parametrów jest brak rysunków. Doktorantka nie zdecydowała się na również na szerszą krytyczną analizę wskazującą wprost, że np. w literaturze brakuje systematycznych badań nad procesem kształtowania geometrii mikrotyków polimerowych (w tym nanokompozytowych domieszkowanych nanocząstkami złota oraz dwutlenku tytanu, co pozwoliło na uzyskanie zróżnicowanej reaktywności względem promieniowania widzialnego i UV). Niemniej jednak, przeprowadzona dyskusja dotycząca właściwości analizowanego materiału jednoznacznie świadczy o rzetelnej znajomości tematu przez Autorkę. Na tej podstawie Doktorantka sformułowała tezę oraz wynikającą z niej cele prace. Są one dobrze zdefiniowane i uzasadniają przeprowadzenie zaplanowanych badań.

Opis metodyki wytwarzania mikrotyków polimerowych jest szczegółowy. Jednakże, uważam, że uszczegółowienia wymaga preparatyka czoła włókna światłowodowego. Nie podano również długości światłowodów, co pozwoliłoby na ocenę stabilności uzyskanego rozkładu modowego. Doktorantka wyselekcjonowała do badań monomery: PETA, TCDMA (z inicjatorami: sól disodowa Eozyny Y, DMPAP) polimerizowane promieniowaniem UV lub VIS i wykazała, że mogą być one z powodzeniem integrowane ze światłowodami jako mikrotyki. Zastosowanie dwóch typów monomerów – PETA i TCDMA – oraz różnych inicjatorów fotopolimeryzacji świadczy o kompleksowym podejściu do optymalizacji procesu wytwarzania. Proces technologiczny został zoptymalizowany w sposób umożliwiający kontrolowane formowanie mikrotyków o przewidywalnych parametrach geometrycznych i optycznych. Doktorantka trafnie zauważyła, że średnica mikrotyku zależy od wielu czynników, takich jak typ włókna, charakterystyka źródła światła, energia dostarczona do układu oraz skład mieszaniny. To pokazuje głębokie zrozumienie złożoności procesu fotopolimeryzacji na czołe światłowodu. Doktorantka, wskazuje również na niepożądane zjawiska oraz problemy z którymi się spotkała tj. delaminacja, powstawanie porów po pęcherzykach gazu uwalnianego z mieszaniny, pęknięć na mikrotykach, „polimerowy kołnierz” itd. Ważne, że jest świadoma ograniczeń procesu. Na uwagę zasługuje szeroki zakres prac technologicznych.

W kolejnym etapie Doktorantka wybrała do dalszych badań mikrotyki charakteryzujące się największymi stratami odbiciowymi, które uzyskała dla mocy optycznej wynoszącej 30 μ W oraz czasu polimeryzacji 30 s (dla obu mieszanin PETA, TCDMA oraz domieszkowanymi nanocząstkami złota oraz tlenku tytanu) i wytworzyła je na włóknach MMF62, MMF105 przy użyciu źródeł szerokopasmowych i zastosowała jako przetwornik do czujnika współczynnika załamania światła. W badaniach Doktorantka wykorzystwała reflektometr optyczny, który mierzył straty odbiciowe głowicy pomiarowej umieszczonej w cieczach o znanych współczynnikach załamania. Eksperymenty wykazały, że czujniki wykazują wysoką liniowość odpowiedzi w funkcji zmian współczynnika załamania, a ich czułość zależy od rodzaju zastosowanego materiału mikrotyku. Doktorantka prawidłowo określiła zakresy pomiarowe,

czułości oraz dynamikę sensorów. Szkoda, że nie przedstawiła charakterystyk czułości (bez wstępnej linearyzacji wyników). Interesujące byłoby również porównanie uzyskanych wyników z literaturą światową. Ciekawym aspektem jest przeprowadzenie wstępnych badań nad zastosowaniem na mikrotypy polimerów domieszkowanych nanocząstkami złota oraz tytanu. Autorka słusznie zaznacza problem rozpraszania światła z opracowanym mikrotypem. Zaprezentowane wyniki nie wskazują wprost na polepszenie np. czułości. Zastanawiające jest również, że (rys. 29b) w przypadku domieszkowania TiO_2 uzyskano przesunięcie minimum charakterystyki w stronę mniejszego współczynnika załamania. Współczynnik załamania TiO_2 w zakresie NIR wynosi ponad 2,2. Ponadto, w przypadku domieszkowania 16,67% TiO_2 uzyskana charakterystyka jest niesymetryczna. Autorka tłumaczy to ograniczoną powtarzalnością procesu wytwarzania mikrotypów. Jednakże, nie jest znana liczba wytworzonych mikrotypów o tych samych parametrach. Szczególnie interesujące są wyniki dotyczące detekcji wybranych substancji chemicznych (lotnych związków organicznych – LZO), takich jak fosforan trimetylu (TMP), 1,4-tioksan (THX), aceton oraz roztwory amoniaku. Zmiana sygnału spowodowana kondensacją materiału LZO pozwoliła na określenie opracowanego czujnika jako progowy ON/OFF. Doktorantka, słusznie wskazali, że miniaturowe rozmiary i niewielka masa czujników czynią je idealnymi do zastosowań mobilnych, w tym w monitoringu substancji niebezpiecznych, które można detekować w wyniku ich kondensacji na głowicy pomiarowej.

Rozdział 4 zawiera wyników badań nad mikrotypami polimerowymi, pełniącymi funkcję mikrosoczewek na zakończeniach światłowodów. Autorka trafnie identyfikuje ich rolę jako elementów skupiających lub rozpraszających wiązkę światła, co ma istotne znaczenie w kontekście czujników optycznych. Wyniki analizy profilu wiązki w polu dalekim zostały prawidłowo zinterpretowane. Doktorantka analizuje również charakterystyki widmowe światłowodów z mikrotypami z domieszkami nanocząstek złota oraz dwutlenku tytanu. Na szczególną uwagę zasługuje zastosowanie mikrotypów do sprzęgania standardowych włókien światłowodowych z włóknami ARF (Anti-Resonant Fibers). Doktorantka analizuje wpływ struktury sprzęgającej na charakterystykę spektralną włókien ARF. To podejście świadczy o innowacyjności i interdyscyplinarności prowadzonych badań. Jednakże, zdaniem recenzenta do porównania właściwości spektralnych celowym byłoby wyznaczenie np. widm transmisji lub tłumienia.

Reasumując, uznaję, że przedstawione wyniki badań stanowią istotny wkład Doktorantki w rozwój inżynierii materiałów fotonicznych oraz ich zastosowania technologii światłowodowej poprzez zastosowanie mikrotypów polimerowych jako funkcjonalnych zakończeń światłowodów. Praca wymagała interdyscyplinarnego podejścia, obejmującego opracowanie materiałów polimerowych (w tym nanokompozytowych), opracowanie technologii wytwarzania struktur typu mikrotyp na czołach światłowodów, ich funkcjonalizację z wykorzystaniem nanocząstek złota oraz tlenku tytanu, a także szczegółową analizę właściwości optycznych, sensorowych i sprzęgających tych struktur. Doktorantka wykazała się dużą samodzielnością badawczą, umiejętnie łącząc aspekty materiałowe, technologiczne i

optyczne. Przyjęte założenia badawcze oceniam jako trafne i dobrze uzasadnione, a uzyskane rezultaty – jako wartościowe zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i aplikacyjnego.

Uwagi wynikające z lektury rozprawy

Recenzując rozprawę doktorską mgr inż. Moniki Danuty Żuchowskiej stwierdzam, że nie posiada ona błędów merytorycznych. Została napisana starannie. Można znaleźć kilka błędów edytorskich. Jednak, uważam, że jest ich bardzo mało i nie wpływają na pozytywny odbiór pracy. Dlatego też, nie warto ich tu przytaczać. Poniżej przedstawiam dyskusyjne uwagi, które na celu pogłębienie refleksji nad przedstawionymi wynikami:

1. Doktoranta w pracy używa pojęć: światło UV oraz światło o centralnej długości fali 1550 nm. Zadaniem recenzenta oba powyższe zakresy spektralne leżą poza zakresem światła widzialnego. Zatem, właściwe byłoby stosowanie sformułowania promieniowanie.
2. Str. 23,24. Doktorantka używa sformułowań, które trudno uznać na inżynierskie: „... odpowiednią preparatkę..., ... nałożenie kropli specjalnie opracowanej mieszaniny..., podłączenie odpowiedniego kabla...”
3. Str. 25. Doktorantka podaje wysokość kropli w mm. Zdaniem recenzenta powinno być μm .
4. Str. 57. Doktorantka pisze „..... skanowanie w zakresie długości fali może być regulowane od 1,31 nm do 21,20 nm...”. Proszę o komentarz i wyjaśnienie.
5. Proszę o uzasadnienie wybranych stężeń domieszek Au oraz TiO_2 w polimerach.
6. Str. 65, 66, 69, rys. 25, 26, 29b (zielona prosta). Proszę o szerszy komentarz dotyczący niesymetryczności uzyskanych charakterystyk.
7. Str. 90, 95, rys. 45, 49. Wydaje się, że lepszym obiektywnym parametrem byłyby charakterystyki transmisji lub tłumienia spektralnego.
8. Doktorantka pisze, że w przypadku nanokompozytów z domieszką Au oraz TiO_2 na zmniejszenie strat odbiciowych wpływało rozpraszanie światła na nanocząstkach. Czy znane są rozmiary wprowadzonych cząstek? Pozwoliłoby to na oszacowanie poziomu rozpraszania.
9. Str. 99. Linia 2. Zdaniem recenzenta krzemionka tłumienie krzemionki nie wpływa tu na charakterystykę. Jej tłumienie jest o kilka rzędów wielkości mniejsze niż polimerów.
10. Proszę o szerszy komentarz dotyczący powtarzalności parametrów wytwarzania mikrotipów, które wpływają bezpośrednio na uzyskiwane charakterystyki. Doktorantka pisze, że czasem występowała delaminacja.

Końcowa ocena rozprawy

Podsumowując, stwierdzam, że Pani mgr inż. Moniki Żuchowskiej rozwiązała postawiony w rozprawie problem badawczy, wymagający zarówno głębokiej znajomości zagadnień

teoretycznych, jak i zaawansowanych kompetencji praktycznych w obszarze inżynierii materiałowej materiałowej oraz metrologii. Realizacja pracy świadczy o wysokim poziomie przygotowania merytorycznego oraz umiejętności prowadzenia samodzielnych badań naukowych.

W związku z czym stwierdzam, że w opiniowana rozprawa doktorska spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowych oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn. zmian)* i wnioskuję o jej do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie Inżynieria Materiałowa.