



Politechnika Warszawska

Wydział Fizyki

Zakład Optyki i Fotoniki

Koszykowa 75, 00-662 Warszawa

tel. (22) 234 5689, e-mail: tomasz.wolinski@pw.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński

Warszawa, dnia 28.11.2019 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.:

“Światłowodowe czujniki do pomiaru współczynnika załamania światła wykorzystujące efekt powierzchniowego rezonansu plazmonowego”

mgr KATARZYNY GĄSIOR

Rozprawa doktorska mgr Katarzyny Gąsior pt.: *“Światłowodowe czujniki do pomiaru współczynnika załamania światła wykorzystujące efekt powierzchniowego rezonansu plazmonowego”* została wykonana w Katedrze Optyki i Fotoniki na Wydziale Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej pod kierunkiem prof. dra hab. inż. Wacława Urbańczyka. Promotorem pomocniczym rozprawy był dr inż. Tadeusz Martynkien.

Plazmonami powierzchniowymi nazywamy fale elektromagnetyczne propagujące po powierzchni rozgraniczającej materiał przewodzący (metal) z dielektrykiem. Oddziaływanie światła z materią w nanostrukturach metalicznych doprowadziło do powstania plazmoniki, czyli fotoniki wykorzystującej plazmony powierzchniowe. W tym kontekście tematyka rozprawy doktorskiej pani Katarzyny Gąsior dotycząca wykorzystania zjawiska powierzchniowego rezonansu plazmonowego do budowy czujników światłowodowych do pomiaru współczynnika załamania światła jest niewątpliwie nowatorska i aktualna.

Rozprawa pani Katarzyny Gąsior ma głównie charakter eksperymentalny (z elementami symulacji numerycznych opisanych w rozdz. 7) i przedstawia szeroką gamę zbudowanych przez Doktorantkę czujników plazmonicznych reagujących na zmianę współczynnika załamania otoczenia, które zostały wytworzone zarówno w światłowodach wielomodowych jak i jednomodowych, klasycznych oraz mikrostrukturalnych a także polimerowych i krzemionkowych. Większość z tych światłowodów nie jest dostępna komercyjnie i jest owocem wieloletniej współpracy Grupy prof. W. Urbańczyka z Pracownią Technologii Światłowodów UMCS w Lublinie.

Rozprawa składa się z 8. rozdziałów wraz ze spis literatury (rozdział 9), który obejmuje 83 pozycje bibliograficzne, a całość rozprawy zawiera łącznie 94 strony.

Według bazy *Web of Science* pani Gąsior była współautorką 6. publikacji. W czterech opublikowanych w latach 2014-2018 publikacjach z listy JCR, które były bezpośrednio związane z tematyką rozprawy doktorskiej, Doktorantka jest pierwszym autorem:

[1] **K. Gąsior**, T. Martynkien, W. Urbanczyk, „Effect of constructional parameters on the performance of a surface plasmon resonance sensor based on a multimode polymer optical fiber,” *Appl. Opt.* 53, 8167-8174 (2014). [IF = 1.784]

[2] **K. Gąsior**, T. Martynkien, G. Wojcik, P. Mergo, W. Urbanczyk, „D-shape polymer optical fibres for surface plasmon resonance sensing,” *Opto-Electron. Rev.* 24, 209-215 (2016). [IF = 1.449]

[3] **K. Gąsior**, T. Martynkien, M. Napiorkowski, K. Zolnacz, P. Mergo, W. Urbanczyk, „A surface plasmon resonance sensor based on a single mode D-shape polymer optical fiber,” *J. Opt.* 19, 025001 (2017). [IF = 2.323]

[4] **K. Gąsior**, T. Martynkien, P. Mergo, W. Urbanczyk, „Fiber-optic surface plasmon resonance sensor based on spectral phase shift interferometric measurements,” *Sens. and Actuators B* 257, 602-608 (2018). [IF = **6.393**]

Te cztery prace uzyskały już 28 cytowań (wg bazy WoS) a sumaryczny ich współczynnik wpływu (IF) wynosi 11,949, co świadczy dobrze o aktualności tematyki badawczej.

We wstępnym rozdziale 1. pani Gąsior definiuje tezę swojej pracy, która można streścić następująco: „*Dzięki zastosowaniu światłowodów o odpowiedniej konstrukcji możliwe jest wytworzenie w nich czujników SPR o dobrych parametrach metrologicznych. Dodatkowo, zgięcie światłowodu poprawia właściwości metrologiczne czujników SPR oraz w przypadku dwójłomnych światłowodów jednomodowych możliwa jest poprawa rozdzielczości czujnika SPR poprzez zastosowanie fazowej detekcji rezonansu plazmonowego*”.

Dwa rozdziały początkowe (2. i 3.) mają charakter pomocniczy i stanowią wstęp do zasadniczej i oryginalnej części pracy. Zostały w nich przedstawione podstawowe informacje na temat zjawiska powierzchniowego rezonansu plazmonowego, SPR (ang. *surface plasmon resonance*) oraz jego zastosowań czujnikowych. W rozdziale drugim przedstawiono warunki konieczne do powstania zjawiska powierzchniowego rezonansu plazmonowego oraz zasady działania czujników, które do wzbudzenia plazmonów powierzchniowych mogą wykorzystywać zarówno pryzmat jak i światłowod. W rozdziale trzecim zawarty jest krótki przegląd literatury dotyczącej czujników światłowodowych wykorzystujących zjawiska powierzchniowego rezonansu plazmonowego.

Zasadnicza i oryginalna część rozprawy doktorskiej zawarta jest rozdziałach od 4. do 8. (str.28-89). W rozdziale 4. pani Gąsior opisuje zbudowane układy eksperymentalne umożliwiające wyznaczenie rezonansowej długości fali dwoma metodami: transmisyjną i fazową. Obie metody zostały w dalszej części wykorzystane do badania właściwości czujników SPR wytworzonych w wybranych typach światłowodów.

W rozdziale 5. Doktorantka opisuje nanoszenie cienkich warstw złota oraz srebra metodą napyłania plazmowego zarówno na folię polimetakrylanu metylu (PMMA) jak i na wypolerowane mechanicznie płytki szklane oraz włókna polimerowe. Jakość napyłonych

warstw (chropowatość powierzchni) oceniona została na podstawie map topograficznych uzyskanych w mikroskopie sił atomowych.

Doktorantka przedstawiła szereg zmierzonych charakterystyk czujników SPR wytworzonych zarówno ze światłowodów wielomodowych jak i jednomodowych. (m. in. położenia minimum, głębokość wraz z szerokością połówkową krzywych rezonansowych w funkcji długości części czujnikowej światłowodu). Czułość na zmianę współczynnika załamania była badana w roztworach wodnych gliceryny; przy czym odpowiedź czujników SPR na zmianę współczynnika załamania sprawdzano poprzez nakładanie na warstwę złota roztworu wodnego gliceryny o współczynnikach załamania z zakresu wartości od 1,332 do 1,422.

W rozdziale 6. Doktorantka badała czujniki wytworzone z polimerowych światłowodów wielomodowych. W pierwszej kolejności zbadała powierzchniowy rezonans plazmonowy dla komercyjnie dostępnych światłowodów o skokowym profilu współczynnika załamania w funkcji zarówno głębokości zeszlifowania światłowodu jak i jego promienia zgięcia. Okazało się, że nanoszona warstwa złota wykazuje większą głębokość rezonansu niż warstwa srebra, a dla prostych bocznie szlifowanych włókien światłowodowych głębokość rezonansu zależy od długości drogi oddziaływania światła z plazmonami, czyli od długości części czujnikowej. Głębokość rezonansu słabo zależała od głębokości zeszlifowania włókna, a największe wartości czułości uzyskano przy zeszlifowaniu na głębokość zaledwie 10% średnicy rdzenia. Dodatkowo, głębokość rezonansu udało się zwiększyć poprzez zgięcie światłowodu. Wyniki tych badań Doktorantka opublikowała w *Applied Optics* w 2014 r. Kolejnym krokiem było zaprojektowanie specjalnych polimerowych światłowodów mikrostrukturalnych w kształcie litery D, które zostały wytworzone w Pracowni Technologii Światłowodów UMCS w Lublinie kierowanej przez dra Pawła Mergo. Okazało się, że najlepszymi parametrami czujnikowymi charakteryzował się światłowod, w którym płaszcz mikrostrukturalny składał się z dwóch pierścieni otworów powietrznych, przy czym w zewnętrznej części płaszcz wprowadzono inkluzje węglowe tłumiące mody płaszczowe – wyniki te opisano w publikacji w *Opto-Electronics Review* z 2016 r.

W rozdz. 7. pani Gąsior zaproponowała oraz przebadła nowe konstrukcje światłowodów jednomodowych w kształcie litery D. Pierwszym z nich był światłowod polimerowy z rdzeniem z kopolimeru PMMA/PS (polimetakrylan metylu/polistyren) – publikacja w *J. Optics* w 2017 r., a drugi ze szkła krzemionkowego domieszkowanego dwutlenkiem germanu.

Dzięki istnieniu dwójłomności modowej możliwe było zastosowanie dwóch metod: transmisyjnej i fazowej do wyznaczania położenia rezonansu plazmonowego. Niewątpliwym osiągnięciem pracy było po raz pierwszy zastosowanie spektralnej metody pomiaru przesunięcia fazowego do detekcji rezonansowej długości fali w światłowodowych czujnikach SPR – publikacja z 2018 r. w *Sensors and Actuators B* o wysokim współczynniku wpływu (ponad 6). Bardzo ważnym osiągnięciem Doktorantki było wykazanie wyższości metody pomiaru przesunięcia fazowego w porównaniu do metody transmisyjnej. Dodatkowo, zaletą zastosowanej po raz pierwszy w światłowodach metody fazowej wykorzystującej interferometrię spektralną był znacznie szerszy zakres działania czujnika, np. rezonansowa

długość fali w granicach 590-710 nm odpowiadała wyraźnej zmianie mierzonego współczynnika załamania od 1,332 do 1,386.

W rozdziale tym Doktorantka przedstawiła również wyniki numerycznego modelowania przy pomocy metody elementów skończonych (pakiet COMSOL Multiphysics), które z grubsza oddawały charakter zmian zmierzonych eksperymentalnie charakterystyk rezonansowych badanych czujników.

Ostatni rozdział 8. przedstawia podsumowanie uzyskanych wyników. Uzyskane przez mgr Katarzynę Gąsior wyniki udowodniły trójczłonową tezę rozprawy:

- użycie światłowodów o odpowiedniej konstrukcji możliwe jest wytworzenie w nich czujników SPR o dobrych parametrach metrologicznych, bez potrzeby odślaniania rdzenia światłowodu;
- zastosowanie fazowej detekcji rezonansu plazmonowego umożliwia poprawę rozdzielczości czujnika SPR;
- zgięcie światłowodu prowadzi do poprawy właściwości metrologicznych czujników SPR.

W pracy dostrzegłem pewne niefortunne sformułowania i błędy edytorskie takie jak np.: na str. 18 - wzory (2.41) do (2.44), na str. 21 - szkło kwarcowe, na str. 31 – wzór (4.3) i akapit poniżej rys. 4.4, W rozdziałach 4. oraz 5. brak jest krótkiego podsumowania, tak jak to ma miejsce w podrozdziałach 6.3 oraz 7.3.

Powyższe drobne uchybienia, nie wpływają na moją pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy. Doktorantka ze starannością opisuje procedury technologiczne i badawcze oraz wnikliwie analizuje otrzymane wyniki a także krytycznie analizuje rozbieżności pomiędzy wynikami eksperymentalnymi a symulacjami (rozdz. 7). Świadczy to o poprawności i rzetelności warsztatu badawczego, a jednocześnie o sumienności i skrupulatności w badaniach eksperymentalnych i symulacjach numerycznych.

W podsumowaniu stwierdzam, iż zgodnie z obowiązującymi ustawami recenzowana rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki naukowe, a przez to może stanowić podstawę uzyskania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr Katarzyny Gąsior do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. inż. Tomasz R. Woliński