



Warszawa, 30.11.2022

dr hab. inż. Piotr Lesiak, prof. uczelni
Wydział Fizyki Politechniki Warszawskiej
Zakład II Fotoniki i Optyki
ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Joanny Korec,

pt. „**Kształtowanie właściwości propagacyjnych wiązki świetlnej w
hybrydowych elementach światłowodowych na bazie cienkiego pokrycia
metalicznego i warstwy ciekłego kryształu**”

Promotor: prof. dr hab. inż. Leszek R. Jaroszewicz

Promotor pomocniczy: dr inż. Karol A. Stasiewicz

1. Uwagi wstępne

Podstawą wydania opinii jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej „Inżynieria Materiałowa” Wojskowej Akademii Technicznej, prof. Tomasza Czujki z dnia 2 października 2022 r. Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska obejmuje w swej części merytorycznej wstęp zawierający wprowadzenie czytelnika w tematykę pracy, część doświadczalną zawierająca opis otrzymanych wyników pomiarów oraz zakończenie i zawiera się na 138 stronach. Część uzupełniającą stanowi bibliografia obejmująca 173 pozycje, spisy rysunków i tabel oraz prezentację dorobku naukowego obejmujący spis publikacji oraz spis prezentacji konferencyjnych.

**Politechnika
Warszawska**

ul. Koszykowa 75
00-662 Warszawa
www.fizyka.pw.edu.pl



2. Znaczenie podjętej tematyki

Zasadniczym problemem podjętym w rozprawie doktorskiej pani mgr inż. Joanny Korec jest zagadnienie propagacji wiązki świetlnej propagującej się w przewężonym światłowodzie pokrytym cienką warstwą metalu i zanurzonym w materiale ciekłokrystalicznym. W tym celu doktorantka zaprojektowała i zbudowała układ pomiarowy, w którym przewężone włókno światłowodowe zarówno bez pokrycia metalicznego jak i z pokryciem metalicznym (wykonanym ze złota i srebra) zostało otoczone trzema różnymi ciekłymi kryształami (E7, 6CHBT oraz 3092A). Dobór materiałów nie był przypadkowy. Zarówno złoto jak i srebro świetnie sprawdzają się jako warstwy umożliwiające budowę czujników wykorzystujących zjawisko powierzchniowego rezonansu plazmonowego. Czujniki te służą do bardzo czułej detekcji niewielkich zmian współczynnika załamania światła w warstwie dielektryka bezpośrednio przylegającej do cienkiej warstwy metalu pokrywającej włókno światłowodowe. Zmiany współczynnika załamania światła mogą być wywołane na wiele sposobów: mogą to być zmiany w zmodyfikowanej chemicznie powierzchni czujnika spowodowanej uwiązaniem różnego typu cząsteczek, jak również zaprezentowane w pracy zmiany orientacji molekuł ciekłego kryształu. Detekcja tych zmian jest możliwa z bardzo dużą dokładnością przez co budzą one bardzo żywe zainteresowanie w ostatnich latach zarówno przez firmy z branży farmaceutycznej jak i jednostki badawcze i uczelnie na całym świecie.

Dlatego można uznać, że podjęta w rozprawie doktorskiej pani mgr inż. Joanny Korec tematyka jest z naukowego punktu widzenia zarówno aktualna, jak i ważna.

3. Teza pracy

Teza pracy nie została sformułowana wprost we wstępie pracy a jedynie został określony cel prac badawczych w formie stwierdzenia w rozdziale drugim: „**Celem niniejszej rozprawy jest dobór parametrów materiałów funkcjonalnych stanowiących pokrycia przewężeń światłowodowych, które pozwalają na modyfikowanie parametrów wiązki świetlnej propagującej się wewnątrz struktury**



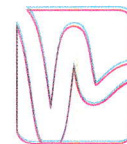
światłowodowej”. Doktorantka zrealizowała ten cel poprzez realizację kilku problemów badawczych. W pierwszej kolejności mgr inż. Joanna Korec zbadała wpływ różnych właściwości ciekłych kryształów na propagację światła w przewężeniu światłowodowym i wybrała optymalną strukturę oraz mieszaninę ciekłego kryształu do dalszych badań. Następnie doktorantka opracowała technologię pokrycia przewężenia warstwami metalicznymi i połączenia tych warstw z materiałem ciekłego kryształu aby w ostateczności przeprowadzić badania wpływu ułożenia molekuł ciekłego kryształu na propagację światła w przewężeniu światłowodowym.

Szczegółowa lektura rozprawy pani mgr inż. Joanny Korec uprawnia do sformułowania następującego wniosku, że poprzez dobór odpowiednich materiałów funkcjonalnych oraz ich parametrów jako pokrycia przewężeń światłowodowych jest możliwe efektywne sterowanie parametrami wiązki świetlnej prowadzonej w strukturze światłowodu.

4. Struktura rozprawy

Praca została podzielona w sposób klasyczny na część teoretyczną i badawczą, które w sumie stanowią dwa główne rozdziały pracy. Rozdziały te przedzielone zostały rozdziałem prezentującym cel rozprawy. Pracę kończą rozdziały prezentujące podsumowanie i osiągnięcia doktorantki. Na uwagę zasługuje fakt dodania przez doktorantkę syntetycznego wykazu oznaczeń i skrótów na początku pracy oraz spisu rysunków i tabel na końcu rozprawy.

W rozdziale pierwszym, będącym jednocześnie wstępem i opisem teoretycznym badanych zjawisk, doktorantka w pierwszej kolejności przedstawiła metody wytwarzania mikrowłókien światłowodowych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu geometrii przewężenia na propagację światła w takiej strukturze i możliwości użycia takiej struktury jako czujnika światłowodowego. Opis ten ma istotne znaczenie dla zrozumienia działań jakie doktorantka podjęła przy budowie układu pomiarowego, a zwłaszcza przy wytwarzaniu przewężeń światłowodowych. W kolejnych częściach pierwszego rozdziału opisana została interakcja światła z metalami prowadząca do



możliwości tworzenia czujników wykorzystujących zjawisko powierzchniowego rezonansu plazmonowego. Rozdział ten kończy się wprowadzeniem w tematykę ciekłych kryształów.

Rozdział pierwszy jest napisany w przejrzysty sposób umożliwiając czytelnikowi zapoznanie się z najbardziej kluczowymi dla rozprawy zagadnieniami związanymi z projektowaniem czujnika wykorzystującego zjawisko powierzchniowego rezonansu plazmonowego. Pewien niedosyt budzi brak opisu propagacji światła w światłowodach włóknistych wykorzystujący zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia. Zagadnienie to jest wykorzystane do pobudzenia fali zanikającej a następnie do sprzężenia tej fali z plazmonami. Dodatkowo w drugiej części rozprawy doktorskiej, doktorantka wykorzystywała zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia do wyjaśnienia strat propagacyjnych występujących podczas propagacji światła w mikrowłóknie światłowodowym umieszczonym w komórce ciekłego kryształu typu E7.

Rozdział trzeci, będący jednocześnie głównym rozdziałem rozprawy doktorskiej, zawiera oryginalne wyniki badań propagacji światła w mikrowłóknie światłowodowym mającym charakter przewężki światłowodowej bez pokrycia warstwami metalicznymi umieszczonej w różnych komórkach zawierających różne typy ciekłego kryształu oraz wyniki badań propagacji światła w przewężkach światłowodowych pokrytych różnymi warstwami metalicznymi takimi jak: Au, Ag, Au/Ag i Ag/Au umieszczonych w ciekłym kryształach typu 3092A. W rozdziale tym znajduje się również opis technologiczny dotyczący przygotowania badanych próbek i uzasadnienie wyboru poszczególnych parametrów.

Rozdział trzeci przejrzysto prezentuje otrzymane wyniki badań i pozwala w łatwy sposób zrozumieć argumentację doktorantki. Zastanawiający jest jednakże brak analizy ułożenia molekuł ciekłego kryształu wokół przewężki światłowodowej bez pokrycia warstwami metalicznymi jak ma to miejsce dla przewężek światłowodowych pokrytych różnymi warstwami metalicznymi zaprezentowanym na rysunku 50a.



Analiza taka ułatwiłaby interpretację wyników otrzymanych dla przewężki światłowodowej bez pokrycia warstwami metalicznymi.

Na moment redakcji rozprawy doktorskiej dorobek pani mgr inż. Joanny Korec stanowią przede wszystkim cztery prace opublikowane w czasopismach z listy JCR: Journal of Sensors (IF 2.336), Optical Fiber Technology (IF 2.800), Materials (IF 3.748) oraz Molecules (IF 4.927) związane bezpośrednio z rozprawą doktorską oraz trzy prace opublikowane w czasopismach z listy JCR: Crystals (IF 2.670), Opto-Electronics Review (IF 2.489) i Micromachines (IF 3.523) niezwiązane z rozprawą doktorską. We wszystkich publikacjach związanych ściśle z rozprawą doktorską Doktorantka występuje jako główna współautorka. Wyniki z tych prac są opisane w trzecim rozdziale monografii.

5. Ocena formalna

Za najważniejsze osiągnięcia rozprawy doktorskiej pani mgr inż. Joanny Korec można przyjąć:

- opracowanie wytycznych konstrukcyjnych oraz określenie parametrów technologicznych przewęzek światłowodowych przeznaczonych do połączenia z wybranymi materiałami funkcjonalnymi,
- dobranie parametrów nanoszonych pokryć: Au, Ag, Au-Ag i Ag-Au na obszar właściwy przewężki światłowodowej i określenie wpływu grubości warstw metalicznych na jej właściwości optyczne
- wykazanie, iż dobrane materiały funkcjonalne pozwalają na sterowanie w szerokim zakresie właściwościami propagacyjnymi wiązki świetlnej prowadzonej przez wytworzoną przewężkę światłowodową.

Tematyka rozprawy doktorskiej pani mgr inż. Joanny Korec jest atrakcyjna w aspekcie technicznym i technologicznym. Analizowane zagadnienia są ważne dla współczesnej plazmoniki w perspektywie praktycznego wykorzystania wyników uzyskanych w ramach realizacji pracy doktorskiej. Aplikacyjny charakter uzyskanych wyników oceniam bardzo wysoko.



Zawarty w rozprawie materiał badawczy świadczy, że pani mgr inż. Joanna Korec posiada umiejętności zarówno samodzielnego formułowania problemów technicznych i technologicznych, jak i ich rozwiązywania.

Struktura rozprawy jest poprawna choć autorka nie ustrzegła się w niej błędów. Poniżej przedstawiam listę szczegółowych uwag krytycznych do części teoretycznej rozprawy a później do części eksperymentalnej.

1. Błędy edycyjne:

- a. Oznaczenie ρ ma w pracy wiele definicji. Raz jest to promień rdzenia, raz gęstość ładunku elektrycznego a innym razem znów promieniem przewężki światłowodowej.
 - b. Promień przewężki światłowodowej ma również wiele oznaczeń (por. str. 9, str. 14, str. 44)
 - c. Nieprawidłowa odmiana funkcji matematycznej eksponens
 - d. Brak wyjaśnienia TM (str. 21), SPW (str. 25), analit (str. 26), SNOM (str. 28), TIR (str. 29), BD (str. 35), TZZF (str. 51).
 - e. Dlaczego w całej pracy wszystkie skróty nazw są anglojęzyczne (np. PCF, SMF, itp.) a jedynie dla ciekłych kryształów używany skrót jest polskojęzyczny (CK)?
2. Jaki jest właściwy kolor na rysunku 12 – magenta czy fioletowy?
3. Na str. 41 autorka pisze: „Każde zniekształcenie powierzchni ograniczające CK powoduje modyfikację ułożenia molekuł w takim obszarze. W przypadku przewężenia światłowodowego, cylindryczny kształt i szklana powierzchnia powodują, że molekuły są zakotwiczone koncentrycznie i deformują ułożenie cząsteczek w swoim najbliższym otoczeniu, tak, że propagująca się w przewężeniu fala najpierw oddziałuje ze współczynnikiem załamania uśrednionym w tej okolicy, który jest inny niż w pozostałych częściach.” Na jakiej podstawie jest sformułowany ten wniosek?



4. Na str. 42 autorka pisze: „Z tego względu zwykle molekuly CK o budowie liniowej zazwyczaj wykazują niższe wartości γ .” Wartości niższe od czego? Co to jest liniowa budowa ciekłych kryształów?
5. Dla jakiej długości fali zaprezentowano wykresy współczynników załamania światła zaprezentowane na rys. 34a? Wyniki pomiarów są analizowane dla zakresu długości fali 550 nm – 1150 nm.
6. Na str. 58 jest opis układu pomiarowego: „w układzie skrzyżowanych polaryzatorów.. .” , a powinno być raczej w spektrofotometrze do badania komórek ciekłokrystalicznych w skrzyżowanych polaryzatorach.
7. Doktorantka niezbyt jasno wyjaśniła sposób otrzymania wyników zaprezentowanych na wykresach 36, 37b, 38d,e,f, 39d,e,f, itd. Wydaje się, że zmiany sygnału z częstotliwością 1 Hz wymagają zaprezentowania wyników w funkcji czasu, a są zaprezentowane w funkcji długości fali. Dodatkowo, czy na rys. 36 prawidłowo zostały opisane wartości w legendzie?
8. Brakuje porównania charakterystyk transmisyjnych dla wszystkich typów ciekłych kryształów umieszczonych wokół przewężki światłowodowej bez pokrycia warstwami metalicznymi. Czy otrzymane wyniki mają związek z wartościami współczynników załamania światła poszczególnych ciekłych kryształów?
9. Rysunek 39 chyba odnosi się do wyników otrzymanych dla 3092A
10. Na str. 66 autorka pisze: „Ze względu na to, że jeden ze składników tej mieszaniny (którego udział wynosi ok. 30% objętościowy) posiada ujemną anizotropię elektrooptyczną w zależności od ułożenia początkowego molekuł CK oddziałuje z różnymi RI oraz część molekuł obraca się w przeciwnym kierunku niż pozostałe.” Dodania wartość anizotropii dielektrycznej materiału umieszczonego w polu elektrycznym oznacza, że molekuly ciekłokrystaliczne preferują ułożenie równoległe do pola, a ujemna, że prostopadłe.
11. Doktorantka nadmiernie używa w pracy oznaczenia RI. Właściwiej byłoby używać współczynnik załamania „n” oraz odniesienia do zwyczajnego i nadzwyczajnego współczynnika załamania ciekłego kryształu.



12. Na str. 67 autorka pisze: „Im wyższa jest wartość stałych K i mniejsze $\Delta\epsilon$ tym napięcie progowe jest wyższe.” Czy mamy prawo tak twierdzić? W pracy nie ma podanych wartości K dla 3092Aco potwierdziłoby powyższe zdanie.
13. Rekomenduję użycie [arb. u.], tak jak jest to wymagane dla czasopism naukowych aby uniknąć złej interpretacji wykresów.
14. Analiza Tabeli 10 na str. 70 jest zbyt pobieżna. Zmiany czasów przełączenia w innych konfiguracjach próbek są również ciekawe. Dlaczego np. czas t_{off} jest krótszy od t_{on} dla typów komórek równoległej i twist?
15. Na str. 67 autorka pisze: „W każdym przypadku najwyższą transmisją charakteryzuje się pomiar wykonany w temperaturze T przejścia fazowego w ciecz izotropową. Na podstawie wykresów dwójłomności CK faza ta zawsze charakteryzuje się najniższym RI. Dodatkowo w tej temperaturze zanika anizotropia elektrooptyczna i nie można dalej sterować komórką przy użyciu pola elektrycznego.” Komórka 6CHBT zachowuje się inaczej. Jak zmieni się ułożenie molekuł ciekłego kryształu wokół przewężki światłowodowej jeśli nastąpi przejście fazowe ciekłego kryształu z fazy nematycznej do fazy izotropowej? Co autorka rozumie przez anizotropię elektrooptyczną?
16. Niezbyt widoczne jest przesuwanie się widm zaprezentowanych na rysunkach 55a i c.
17. Jaki wpływ na charakterystykę widmową ma kotwiczenie molekuł ciekłego kryształu na cienkich warstwach złota i srebra? Czy orientacja molekuł ciekłego kryształu jest w obu przypadkach jednakowa?

Przedstawione uwagi nie zmieniają pozytywnej opinii Recenzenta o rozprawie doktorskiej pani mgr inż. Joanny Korec.

6. Podsumowanie

Moja ogólna ocena pracy jest pozytywna. Praca zawiera duży materiał badawczy. Jest to materiał o charakterze badań eksperymentalnych (wykonanie i charakteryzacja zaprojektowanych struktur plazmonicznych). Doktorantka wykazała,



że każda modyfikacja współczynnika załamania światła wywołana reorientacją molekuł ciekłego kryształu wpływa na propagującą się wiązkę światła w pokrytej warstwą metaliczną przewężce światłowodowej.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Korec pt.:

„Kształtowanie właściwości propagacyjnych wiązki świetlnej w hybrydowych elementach światłowodowych na bazie cienkiego pokrycia metalicznego i warstwy ciekłego kryształu”

spełnia ustawowe wymagania dotyczące uzyskania stopnia doktora. Wnioskuje więc o dopuszczenie mgr inż. Joanny Korec do dalszych etapów procedury doktorskiej.