Lublin, 15.11.2023 r.

POLITECHNIKA
LUBELSKA

prof. dr hab. inż. Piotr Kisała
Katedra Elektroniki i Technik Informacyjnych
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Lubelska

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Karola Czajkowskiego: „*Opracowanie światłowodu aktywnego wykazującego efekt plazmonowy*”

1. Podstawa prawna

- pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Wydziału Elektrycznego Politechniki Białostockiej, prof. dr. hab. inż. Andrzeja Sikorskiego, z dnia 31 października 2023 r. o sygnaturze WE-IA.4130.3.2023;
- rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Czajkowskiego pt.: „*Opracowanie światłowodu aktywnego wykazującego efekt plazmonowy*”;
- Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2023 r., poz. 742, ze zm.).

2. Ocena poziomu merytorycznego pracy

Rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Czajkowskiego dotyczy opracowania i charakteryzacji światłowodu aktywnego wykorzystującego efekt plazmonowy. Już na wstępie recenzji zaznaczam, że zaproponowana nowa struktura optyczna została zweryfikowana eksperymentalnie i posiada istotny aspekt aplikacyjny. Główny nacisk pracy położony został na wykazanie możliwości wytworzenia i doboru parametrów włókna optycznego wykazującego właściwości luminescencyjne dzięki odpowiednio zaprojektowanemu i precyzyjnie kontrolowanemu domieszkowaniu pierwiastkami ziem rzadkich oraz metali szlachetnych. W tym miejscu należy podkreślić, że uzyskanie efektu końcowego w postaci odpowiednio wykonanego i przebadanego światłowodu jest poprzedzone obszernym i wnikliwym opisem samego zjawiska powstawania plazmonów powierzchniowych oraz efektu plazmonowego. Przegląd literatury w tym zakresie jest wykonany bardzo sumiennie. Jeżeli uwzględni się również przedstawioną w rozprawie charakterystykę metali szlachetnych i ich właściwości spektroskopowych, wykonany na potrzeby pracy opis i analizę powstawania zjawiska powierzchniowego oraz zlokalizowanego powierzchniowo rezonansu plazmonowego oraz analizę mechanizmów oddziaływania jonów tzn. lantanowców i metali szlachetnych wówczas ocena analizy obecnego stanu wiedzy wykonana przez autora utwierdza czytelnika w przekonaniu, że przegląd literatury wykonany jest wręcz wzorowo. Praca posiada charakter badawczy oraz technologiczny. Wstęp zawiera syntetyczne wprowadzenie w tematykę i pozycjonuje pracę obok innych, należących do tego samego obszaru badawczego. Rozprawa zawiera siedem rozdziałów merytorycznych, których zawartość i aspekty naukowe omówiono w niniejszym punkcie recenzji oraz wnioski końcowe, których zasadność i trafność oceniono w końcowej części niniejszej recenzji. Obok rozdziałów *stricte* merytorycznych znajduje się również rozdział porządkowy (rozdział nr 5 za autorem), omawiający zakres poszczególnych rozdziałów rozprawy. Stwierdzam, że jego umieszczenie po czterech rozdziałach teoretycznych oraz biorąc pod uwagę treści i wnioski w nich zawarte skłoniło autora do sformułowania tezy, że cyt. „możliwe jest opracowanie światłowodu współdomieszkowanego jonami lantanowców oraz nanocząsteczkami metali szlachetnych, wykazującego efekt plazmonowy”. W dalszych rozdziałach pracy teza ta jest konsekwentnie broniona a jej zasadność ostatecznie udowodniona została w rozdziale ósmym, dotyczącym weryfikacji eksperymentalnej opracowanych włókien światłowodowych domieszkowanych pierwiastkami ziem rzadkich oraz nanocząstkami wybranych metali szlachetnych. Za cel Autor postawił opracowanie światłowodu współdomieszkowanego jonami lantanowców oraz nanocząsteczkami metali szlachetnych wykazującego efekt plazmonowy. Stwierdzam, że cel ten został osiągnięty, a stwierdzenie to zostało przeze nie rozwinięte w dalszej części niniejszej recenzji.

Struktura rozprawy jest prawidłowa. W pierwszym rozdziale autor przedstawił charakterystykę

światłowodów włóknistych skupiając się zarówno na opisie propagacji promieniowania elektromagnetycznego we włóknach optycznych, opisie światłowodów domieszkowanych pierwiastkami ziem rzadkich, a także przedstawieniu całej gamy zastosowań światłowodów w czujnikach SPR (ang.: *surface plasmon resonance*). W rozdziale autor wykazuje, że właściwości widmowe lantanowców są stabilne. Przedstawiony w pracy efekt koordynacji posłużył autorowi do wykazania, że parametry optyczne tych materiałów są zależne od otaczającego środowiska. Ważnym elementem tego rozdziału jest również usystematyzowanie wiedzy na temat rodzajów i kategorii czujników światłowodowych oraz wskazanie potencjalnych obszarów zastosowań tego typu sensorów.

Rozdział drugi dotyczy charakterystyki właściwości widmowych metali szlachetnych. Autor przedstawia fizyczny opis oddziaływania promieniowania optycznego z powierzchnią metali skupiając się na zjawisku absorpcji wielofotonowej, możliwości modyfikacji i wpływania na samo zjawisko rezonansu plazmonowego, a także na wybranych aspektach wzmocnienia luminescencji. Autor opisał także właściwości spektralne nanocząstek srebra i wpływu ich wielkości na charakterystyki widmowe, a także wpływu współczynnika załamania światła ośrodka oraz agregacji na właściwości optyczne tych cząstek. Przedstawienie właściwości spektroskopowych metali szlachetnych jest doskonałym wprowadzenie w dalszą część pracy.

Trzeci rozdział rozprawy poświęcony jest fundamentalnym, a jednocześnie różnym zjawiskom prowadzącym zarówno do powierzchniowego rezonansu plazmonowego, jak i zlokalizowanego rezonansu plazmonowego. Autor opisuje cechy charakterystyczne tego typu rezonansów oraz możliwości zmiany np. częstotliwości fali, dla których zjawiska te zachodzą. Jest to opis swego rodzaju metody sterowania rezonansem (wzmocnienie pola wewnętrznego jak i dipolowego) i dostosowywania go to takich długości fali, które byłyby korzystne w konkretnych aplikacjach. W rozdziale tym autor opisuje również teorię Mie jako tę, która przewiduje pojawienie się rezonansów plazmonowych wyższych rzędów, przy czym przy opisie autor skupił się na srebrze i złocie ze względu na to, że warunek lokalnego rezonansu plazmonowego spełniony jest dla tych pierwiastków w obszarze spektralnym odpowiadającym światłu widzialnemu. Ważnym elementem tego rozdziału jest również opis dwóch mechanizmów, które prowadzą do tłumienia zlokalizowanych plazmonów powierzchniowych, tj. absorpcji oraz emisji promieniowania. Autor słusznie zauważa, że wzbudzenie zlokalizowanego plazmonu powierzchniowego prowadzi do pojawienia się w otoczeniu cząstki pola elektrycznego o znacznie większej amplitudzie niż pole fali padającej.

Rozdział czwarty zawiera przegląd i charakterystykę mechanizmów oddziaływania jonów lantanowców oraz metali szlachetnych. Ze względu na wykonane i opisane w dalszej części pracy badania laboratoryjne autor skupił się w pierwszej części tego rozdziału na opisie oddziaływania jonów dysprozu i europu wraz z nanocząstkami srebra. Opis ten opiera się na analizie schematów energetycznych jonów wspomnianych lantanowców. Autor opisuje wszystkie możliwe oddziaływania energetyczne na przykładzie jonów dysprozu i nanocząstek srebra.

Rozdział piąty przedstawia koncepcję całej rozprawy. Autor, na bazie przedstawionych wcześniej teorii popartych stosownymi referencjami do prac badawczych z innych ośrodków naukowych, przedstawił tezę swojej pracy oraz jej cel. Ważnym elementem było również przedstawienie kluczowych obszarów badań naukowych i eksperymentalnych prowadzących do opracowania światłowodu aktywnego z wykorzystaniem efektu plazmowego. Dopełnieniem rozdziału jest wskazanie głównych tematów poruszanych w niniejszej rozprawie.

W rozdziale szóstym przedstawiona została procedura tworzenia oraz charakteryzacji szkieł rdzeniowych domieszkowanych jonami srebra i złota oraz deuteru i europu. Autor prezentuje sposób doboru składu chemicznego oraz opis syntezy i redukcji termochemicznej. Na potrzeby eksperymentu opracował składy matryc szklistych wykorzystując tlenek antymonu jako jon redukcji termochemicznej. W tej części pracy zamieszczona została analiza możliwości prowadzenia wybranych przez autora reakcji chemicznych pod względem kinetycznym jak i termodynamicznym. Do pomiaru gęstości wytworzonych szkieł autor wykorzystał metodę hydrostatyczną, natomiast do zbadania ich właściwości termicznych użyta została metoda skaningowej kalorymetrii różnicowej. W przypadku obydwu metod w pracy określone zostały wszystkie kluczowe parametry, przy których wykonywane były badania. Autor zbadał również właściwości optyczne wytworzonych szkieł. Współczynnik załamania wyznaczony został poprzez rejestrację intensywności i polaryzacji odbitego światła. Do pomiarów luminescencji zastosowano spektrofluorymetr sprzężony z impulsowym optycznym oscylatorem parametrycznym, a cały układ wzbudzany był laserem neodymowo-yagowym.

Ważnym z punktu widzenia wkładu własnego autora jest rozdział siódmy. Autor zestawił w nim wartości gęstości i objętości molowych wytworzonych szkieł i przeprowadził analizę termiczną mierząc swobodny przepływ strumienia ciepła różnicową kalorymetrią skaningową typu przepływowego. Wyniki zebrał w postaci dyfraktometrów wszystkich wytworzonych i przygotowanych próbek, tj. domieszkowanych jonami dysprozu i europu bez oraz z tlenkiem disrebra 0,1%mol i 0,5%mol (stężenia procentowego molowego), zarówno w warunkach bez wygrzewania, jak i z wygrzewaniem w temperaturze 475ºC przez 1 godzinę i 15 minut oraz w temperaturze 450ºC przez 2 godziny. Autor potwierdził, że wytworzone przez niego próbki szkła nie mają uporządkowanej struktury krystalicznej, tj. są amorficzne, jeżeli tylko zachowane zostaną odpowiednie poziomy domieszkowania oraz zapewnione zostanie wygrzewanie w określonej temperaturze. Ten ważny wątek rozwinąłem w dalszej części niniejszej recenzji wypunktowując najważniejsze osiągnięcia rozprawy.

Istotną częścią rozdziału są również wyniki badań wykonanych z wykorzystaniem mikroskopii skaningowej próbek wygrzewanych oraz niewygrzewanych. Autor wykonał również analizę składu chemicznego, będącą swego rodzaju uzupełnieniem badań metodą dyfraktometrii proszkowej XRD (ang.: *X-Ray Diffraction*). Ogólny wniosek nasuwający się po analizie wyników zawartych w tym rozdziale jest taki, że wyniki badań z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego są zgodne z wynikami badań XRD dla wszystkich amorficznych próbek. Rozdział siódmy zawiera również wyniki badania widm wzbudzenia wytworzonych przez autora szkieł domieszkowanych Dy^{3+} oraz Eu^{3+}. Autor przedstawił również badania luminescencyjne serii szkieł o zróżnicowanej zawartości jonów azotanów srebra, tj. 0%mol, 0,1%mol oraz 0,5%mol przy ustalonym domieszkowaniu jonów dysprozu oraz europu na poziomie 0,5%mol. Autor przeanalizował charakterystyczne przejścia energetyczne dla danego lantanowca, które cechowały się uzyskaniem najwyższej wartości natężenia luminescencji. Te zmiany obserwowalne są na charakterystykach luminescencji próbek objętościowych jako zmiany maksymalnych dla danego zakresu widmowego wartości natężenia luminescencji. Autor wykazał, że niezależnie od czasu i temperatury wygrzewania próbek Ag+ natężenie luminescencji ma niezmienną wartość. Jednocześnie w tym samym rozdziale wyjaśnia, że powodem tego jest brak jonów srebra w składzie szkła i związany z tym brak możliwości wystąpienia procesu redukcji termochemicznej, która z kolei ma wpływ na zmianę intensywności luminescencji. Z drugiej strony poddając wygrzewaniu próbki przez 75 minut w temperaturze 500ºC oraz 120 minut w temperaturze 450ºC można zauważyć znaczący spadek poziomu luminescencji próbek domieszkowanych Ag+ na poziomie 0,1%mol oraz 0,5%mol. Ważnym wnioskiem wynikającym z tej części prac badawczych jest fakt, że obniżenie temperatury o 50ºC powoduje konieczność wydłużenia czasu wygrzewania o 45 minut, aby osiągnąć analogiczny spadek natężenia luminescencji. Rozdział siódmy jest również istotny ze względu na wyniki, które umożliwiły wybór długości fali lasera. Na podstawie wykonanych badań charakterystyk spektralnych luminescencji, wywołanych przez pobudzanie różnymi długościami fal autor zauważa, że pomiędzy stosowanymi długościami fal nie ma istotnych różnic w charakterystykach luminescencyjnych szkieł. W związku z tym, w kolejnych badaniach dotyczących charakteryzacji gotowych światłowodów opisanych w rozdziale, autor zdecydował się na wykorzystanie lasera o długości fali 395 nm.

W rozdziale ósmym stanowiącym *credo* poczynań naukowych doktoranta w ramach niniejszej rozprawy znajduje się opis metody wytworzenia światłowodu domieszkowanego pierwiastkami ziem rzadkich oraz nanocząstkami metali szlachetnych. Uważam, że ustalenie odpowiednich parametrów technologicznych procesu wyciągania światłowodu oraz analiza właściwości luminescencyjnych wytworzonych przez autora światłowodów to najważniejsza część niniejszej pracy. Autor dokonał opisu całej procedury wytworzenia gotowych włókien optycznych od odmierzenia odpowiednich wartości pierwiastków szkłotwórczych wysokiej czystości, wprowadzenia pierwiastków ziem rzadkich oraz jonów srebra, ujednorodnienie zestaw oraz transformacji do stanu szklistego. Autor wykonywał schładzanie do temperatury, w której atomy mają niewystarczająco dużo czasu na ułożenie się w regularną strukturę krystaliczną. Jest to niewątpliwie bardzo ważny i krytyczny etap, który umiejętnie prowadzony prowadzi do tworzenia struktury bez wywołania krystalizacji i powstania naprężeń wewnętrznych. Autor udowodnił w tym rozdziale, że opanował ten proces i potrafi go kontrolować. Ważnym krokiem opisanym w pracy była również obróbka mechaniczna cylindrycznego rdzenia prowadzona w taki sposób, aby zniwelować wszelkie niejednorodności. Praca stanowi zatem niewątpliwie obok naukowego, również osiągnięcie technologiczne. Autor opisał również istotny etap doboru parametrów technologicznych procesu wyciągania światłowodu. Kluczową częścią tego rozdziału jest analiza właściwości luminescencyjnych wytworzonych światłowodów prowadzona na autorskim stanowisku laboratoryjnym. W pracy zestawiono charakterystyki spektralne luminescencji wytworzonych światłowodów oznaczonych (za autorem) jako 0%Ag_0,5Dy, 0,1%Ag_0,5Dy, 0,5%Ag_Dy, 0% Ag_0,5Eu, 0,1%Ag_0,5Eu, 0,5%Ag_0,5Eu. Wyniki pomiarów spektralnych bez wątpienia dowodzą wykazanie przez autora możliwości opracowania światłowodu aktywnego wykazującego efekt plazmonowy. W tym miejscu należy podkreślić również, że włókna te przy odpowiednim doborze domieszek oraz parametrów procesu wytwarzania charakteryzują się wysoką stabilnością termiczną przy jednoczesnym braku krystalizacji.

Uważam, że rozdziały siódmy oraz szczególnie ósmy rozprawy są najbardziej wartościowe, wnoszą nową wiedzę w obszarze badań luminescencji oraz efektów SPR i zawierają wiele nieoczywistych i ważnych wniosków.

3. Ocena oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej tematyki badawczej

Rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Oryginalnym dziełem autora jest niewątpliwie zaproponowanie, zaprojektowanie i wykonanie struktury falowodowej aktywnej, wykazującej efekt plazmonowy. Tematyka ta jest ważna i aktualna z punktu widzenia możliwości badania pojedynczych fotonów i ich interakcji z nanocząstkami. Wszelkie badania zmierzające do uzyskania, a także nawet wzmocnienia efektu plazmonowego umożliwiają efektywniejszą kontrolę rozkładu energii pola elektromagnetycznego wokół cząstek, co jest niezwykle istotne z punktu widzenia badania właściwości optycznych materiałów. Uzyskany przez doktoranta efekt plazmonowy może być również wykorzystany do detekcji szeregu substancji fizycznych, m.in. temperatury, ciśnienia, wilgotności, a także

biologicznych, np. w biosensoryce.

Sama koncepcja wykorzystania metali szlachetnych, takich jak srebro i złoto do budowy struktury fotonicznej aktywnej wykazującej efekt plazmonowy dla częstotliwości odpowiadającej światłu widzialnemu jest niewątpliwie rozwiązaniem nowatorskim i posiadającym szerokie pole zastosowań i przyszłych aplikacji.

Za najważniejsze osiągnięcia doktoranta uważam zatem:

1. Zaproponowanie koncepcji struktury falowodowej aktywnej, wykazującej efekt plazmonowy.
2. Zaprojektowanie takich konfiguracji i składu szkieł optycznych, które umożliwiają domieszkowanie zarówno pierwiastkami z grupy lantanowców jak również jonami metali szlachetnych.
3. Wykazanie wpływu jednoczesnego domieszkowania szkieł wykorzystywanych do budowy światłowodów jonami lantanowców oraz cząsteczkami metali na właściwości spektralne, termiczne oraz strukturalne tego typu włókien optycznych.
4. Analiza i opis mechanizmów oddziaływania nanocząstek w szkłach domieszkowanych jonami europu (Eu^{3+}) oraz dysprozu (Dy^{3+}).
5. Wytworzenie włókien optycznych współdomieszkowanych pierwiastkami ziem rzadkich oraz jonami metali.
6. Charakteryzacja światłowodów domieszkowanych pierwiastkami ziem rzadkich oraz nanocząstkami metali szlachetnych wraz z analizą ich właściwości luminescencyjnych.
7. Wykazanie, że domieszkowanie jonami srebra w ilości 0,1%mol do szkła z domieszką jonów dysprozu nie powoduje zmiany składu fazowego.
8. Udowodnienie, że w przypadku domieszki Ag_2O_3 na poziomie 0,1%mol oraz 0,5%mol wygrzewanie szkła współdomieszkowanego również jonami dysprozu w temperaturze 450ºC i 500ºC nie powoduje krystalizacji.
9. Wykazanie, że w określonych warunkach zmiana domieszki lantanowca z dysprozu na europ powoduje krystalizację fazy zawierającą domieszkę aktywną.
10. Wykazanie, że dodatek oraz wzrost stężenia jonów srebra w układzie domieszkowanym jonami europu nie powoduje pojawienia się fazy krystalicznej.
11. Udowodnienie, że wygrzanie szkła domieszkowanego jonami europu współdomieszkowanymi jonami srebra na poziomie 0,1%mol oraz 0,5%mol w temperaturze w warunkach 450°C przez 2 godz. oraz 475°C przez 1 godz. 15 minut nie prowadzi do pojawienia się fazy krystalicznej.

Stwierdzam, że powyższe osiągnięcia wskazują niewątpliwie na umiejętność samodzielnego prowadzenia przez doktoranta prac naukowych.

4. Uwagi krytyczne, pytania

Do recenzowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Karola Czajkowskiego recenzent zgłasza następujące krytyczne uwagi szczegółowe:

- w pracy pojawiają się stwierdzenia zarówno w pierwszej jak i trzeciej osobie, np. na stronie 127 „*Dokonano pomiarów właściwości optycznych…*” i dalej na tej samej stronie „*… przeprowadziłem syntezy …*”,
- sformułowanie „*promieniowanie z zakresu optycznego*” jest nieprecyzyjne, chociaż wiemy, że chodziło w tym miejscu o „*promieniowanie elektromagnetyczne widzialne*” {rozdział 1, strona 9},
- niejasne jest sformułowanie kategoria telekomunikacyjna i kategoria nietelekomunikacyjna światłowodów, {rozdział 1, strona 10} wydaje się, że fortunniejsze byłoby określenie podziału ze względu na zastosowania: telekomunikacyjne i nietelekomunikacyjne,
- sformułowanie „*każde różne rozmieszczenie*” użyte przez autora w stosunku do elektronów, będące bezpośrednim tłumaczeniem z języka angielskiego należałoby zapisać jako „*każdy osobny stan rozmieszczenia*” {rozdział 1, strona 13},
- w pracy pojawiają się nieliczne stwierdzenia żargonowe, np. jon ziemi rzadkiej, które są zrozumiałe dla czytelnika i pochodzą z dosłownego tłumaczenia z jęz. angielskiego, ale w pracy doktorskiej powinny być zastąpione np. przez sformułowanie, jony pierwiastków ziem rzadkich {rozdział 1, strona 13},
- pierwsze wystąpienia skrótów pochodzących od nazw angielskich powinny być wyjaśnione, np. (SP) {rozdział 1, strona 15},
- stosowanie indeksów dolnych do zapisu części rzeczywistej – $Re_{(em)}$ i urojonej $iIm_{(em)}$ stałej dielektrycznej metalu wydaje się niepotrzebne {rozdział 1, strona 15},
- autor symbolem ω oznaczył cyt. „*częstotliwość kątową*” powinno być „*częstotliwość fali*” lub po prostu „*częstość kątowa*” {rozdział 1, strona 15},
- w pracy jako zaletę techniki odbiciowej stosowanej przy pomiarach czujników SPR autor wymienił występowanie dwukrotnej interakcji światła z obszarem detekcji {rozdział 1, strona 16}. Jest to prawda,

ale występują również inne, np. możliwość pracy głowicy pomiarowej w tzw. trybie jednokońcówkowym,
- stwierdzenia typu „*w kierunku dłuższych długości fal*" należałoby zastąpić „*w kierunku fal dłuższych*" {rozdział 2, strony 27, 28, 29},
- co oznacza Φ_{in} zdefiniowane równaniem (3.1), nie wiemy jak autor określa tę wielkość w pracy,
- w równaniu (3.7) pojawia się oznaczenie „*n*" dla wektora jednostkowego skierowanego w kierunku punktu *P*. Symbol ten był wykorzystany do oznaczenia współczynnika załamania światła,
- w pracy nie ma informacji jaka wielkość kryje się pod oznaczeniem *kr* {rozdział 2, strona 35}, czy *r* nie powinno być w indeksie dolnym, tj. (k_r<<1)?
- podpis do rysunku 3.2 „*Przekrój czynny*" wydaje się zbyt ogólny a sam rysunek jest zbyt mało czytelny, natomiast podpisy części *a)* i *b)* tego rysunku są wykonane prawidłowo,
- co oznacza zapis (*D*<<) {rozdział 3, strona 38}?
- brak wyjaśnienia skrótu SERS w miejscu jego pierwszego pojawienia się, podane jest polskie tłumaczenia, ale skrót pochodzi o nazwy w jęz. angielskim {rozdział 3, strona 39},
- ze stwierdzenia „*Zestawy były o masie 25 g*." {rozdział 6, strona 57} nie wynika czy wszystkie posiadały masę 25 g czy jest to masa każdego z nich,
- symbol „*n*" został użyty po raz kolejny, tym razem do oznaczenia liczby elektronów wymienianych w reakcji redoks, ten symbol był już w pracy użyty do oznaczenia innych wielkości fizycznych {rozdział 6, strona 59},
- wspomniane przez autora podniesienie tła na dyfraktogramach w rozdziale 7.3 występuje w zakresie od 2Theta = 20-35°, a nie 10-40° {rozdział 7, strona 67},
- autor w rozdziale 7.8 opisuje, że charakterystyki widmowe Ramana szkieł zostały znormalizowane, jednakże na osi *y* brakuje podziałki i nie zaznaczono poziomu referencyjnego (1) {rozdział 7, strona 108},
- w pracy pojawia się również niewielka ilość drobnych błędów edycyjnych.

W tym miejscu podkreślam, że wymienione przeze mnie uwagi krytyczne, a także wątpliwości wyrażone w pytaniach poniżej nie wpływają na <u>pozytywną ocenę</u> przedstawionej pracy doktorskiej i nie umniejszają mojej pozytywnej oceny oryginalności rozprawy i aktualności poruszanej w niej tematyki badawczej.

Do opiniowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Karola Czajkowskiego recenzent zgłasza następujące <u>pytania</u>:

1. Autor w rozdziale 1.3.1 stwierdza, że wzmocnione pole elektromagnetyczne w dielektryku oraz silna zależność warunków rezonansu czynią SPR niezastąpionym narzędziem do wykrywania zmian współczynnika załamania. Od jakich wielkości zależność (warunków rezonansu) miał autor na myśli?
2. W rozdziale 1.3.3 autor stwierdza, że czułość sondy plazmonowej w dużej mierze zależy od właściwości optycznych użytych materiałów a nie od geometrii. Dlaczego taki jest? Czy autor mógłby to rozwinąć?
3. Autor wykorzystał w pracy srebro w charakterze metalu szlachetnego do wytworzenia aktywnego rdzenia. Proszę o komentarz, dlaczego właśnie jony tego pierwiastka zostały wykorzystane w charakterze nanocząstek metalicznych (np. w kontekście prawdopodobieństwa SPR),
4. Wyniki przedstawione w pracy na rysunku 7.6 wydają się słabo czytelne, czy autor mógłby omówić dokładniej ten rysunek, a także wyjaśnić jakie wartości są oznaczone na osiach *x* i *y*?
5. Autor w rozdziale 7.4.2 stwierdził, że obserwacje pod skaningowym mikroskopem elektronowym pokrywają się z wynikami analizy fazowej dla wszystkich próbek amorficznych. W jaki sposób zmierzona została taka zgodność? tj. co było miernikiem? czy wyznaczany był np. błąd średniokwadratowy?
6. Autor w rozdziale 7.5.1 udowodnił, że szkło oznaczone jako 0,5%Ag_0,5Dy (oznaczenie za autorem) bez wygrzewania cechuje się natężeniem luminescencji wyższym niż w przypadku szkła bez domieszki srebra. Wzrost natężenia luminescencji udowodnił również w przypadku przejść $^6H_{15/2}$ na $^4F_{7/2}$. (w warunkach wygrzewania następował przecież spadek wartości luminescencji dla tego szkła). To bardzo istotne wnioski. Czy autor mógłby wyjaśnić przyczynę (ewentualnie: jaki jest mechanizm) tego zjawiska?
7. Proszę wyjaśnić co w pracy było iksem „*x*" przy wyznaczaniu niepewności pomiaru typu A oraz ile wynosiło „*n*" w równaniu określającym średnią arytmetyczną wielkości *x*.

5. Ocena analizy źródeł

Przegląd źródeł literaturowych obejmuje łącznie 123 pozycje. Cytowane artykuły dotyczą głównie zagadnień związanych z SPR, metodami analizy sygnałów z czujników światłowodowych, zastosowaniem światłowodów, mechanizmami oddziaływania jonów lantanowców i metali szlachetnych, a także zjawiskami luminescencji. Stwierdzam, że tematyka poruszana przez doktoranta jest aktualna, literatura cytowana jest w sposób prawidłowy, a jej zakres wiąże się ściśle z tematyką pracy.

6. Podsumowanie

Recenzowana rozprawa dotyczy opracowania i charakteryzacji światłowodu aktywnego wykorzystującego efekt plazmonowy. Tematyka pracy jest aktualna, a sama praca ma wiele aspektów aplikacyjnych. Autor opracował włókna wykazujące właściwości luminescencyjne, poddając wcześniejszej analizie charakterystyczne przejścia energetyczne dla danego pierwiastka należącego do grupy lantanowców, wybierając te, które cechowały się uzyskaniem najwyższej wartości natężenia luminescencji. Wytworzone struktury optyczne poddawał wygrzewaniu analizując różnice ich właściwości spektralnych oraz zmiany luminescencji wskutek zmiany temperatury. Autor wytworzył włókna optyczne wielomodowe o rdzeniu z zawieszonymi nanocząstkami, wykonał ich charakteryzację i przeprowadził badania, udowadniając tym samym postawioną w pracy tezę i osiągając założony cel. Wykazał, że zmiany natężenia luminescencji w wytworzonych włóknach spowodowane są uzyskaniem redukcji termochemicznej jonów srebra w procesie wyciągania co pozwliło na uzyskanie efektu plazmonowego nanocząstek srebra. Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że zaproponowane przez Autora podejście pozwala na budowę nowych światłowodów współdomieszkowanych jonami lantanowców oraz nanocząsteczkami metali szlachetnych wykazujących efekt plasmonowy.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Karola Czajkowskiego „*Opracowanie światłowodu aktywnego wykazującego efekt plazmonowy*" <u>spełnia wymogi</u> Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2023 r., poz. 742, ze zm.) stawiane pracom doktorskim w odniesieniu do oryginalności problemu naukowego, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz wiedzy teoretycznej. W związku z powyższym <u>wnioskuję o dopuszczenie</u> Pana mgr. inż. Karola Czajkowskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

/recenzent/

prof. nadzw. dr hab. inż. Piotr Kisała