



Gliwice, 2020.07.19

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Pustelny
Katedra Optoelektroniki
Politechnika Śląska
44-100 Gliwice
ul. Krzywoustego 2
tel. +32 237 29 02
e-mail: Tadeusz.Pustelny@polsl.pl

DZIEKANAT
SEKCJA ds. DOKTORANCKICH

Wpłynęło dnia 2020-08-12

Recenzja pracy doktorskiej

Arkadiusza CIESIELSKIEGO pt.:

"Segregacja germanu i telluru w nanowarstwach metali plazmonicznych".

Praca została wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem promotora, Pana Profesora dr hab. Tomasza Szoplika oraz promotora pomocniczego - Dra Tomasza Stefaniuka.

1. Informacje wstępne

Wyniki swoich badań eksperymentalnych i analiz teoretycznych pan mgr Arkadiusz Ciesielski zawarł na 141 stronach maszynopisu (z *Załącznikiem A* oraz *Bibliografią*).

Praca zawiera 69 rysunków i zdjęć oraz 16 charakterystyk XRR (zawartych w *Załączniku A*). W rzeczywistości ilość rysunków jest istotnie większa (kilkukrotnie większa), ponieważ pod jednym numerem znajduje się z reguły więcej wykresów uzyskanych wyników eksperymentalnych i prowadzonych analiz. Doktorant prezentuje również schematy i wykresy z literatury dotyczącej szeroko rozumianej Fizyki Ciała Stałego (podając pozycje, z których zostały zaczerpnięte). W manuskrypcie doktoratu jest także 9 tabel z wynikami Autora. Doktorant powołuje się w swojej pracy na 204 pozycje literatury, z których korzystał przy realizacji doktoratu. W tej grupie znajduje się 8 prac, których Doktorant jest współautorem, opublikowanych w czasopismach naukowych o szerokiej, międzynarodowej cyrkulacji. Współautorem wszystkich prac Doktoranta z tematyki doktoratu jest Jego Promotor – Pan Profesor Tomasz Szoplik.

Współautorem jednej z wymienianych w Bibliografii prac jest promotor pomocniczy Pan dr Tomasz Stefaniuk.

2. Teza rozprawy

Plazmonika jest dziedziną fizyki, najczęściej klasyfikowaną jako dział optyki, a czasami jako dział - fotoniki. Efekty plazmoneczne polegają na wzbudzeniu powierzchniowych fal plazmonowych na granicy metal-dielektryk. Często w literaturze fale plazmonowe są bardziej precyzyjnie określane terminem fal plazmonowo-polarytonowych. Fale plazmonowe polegają na propagacji pola elektromagnetycznego, wywołanego drganiami chmury elektronów swobodnych w cienkiej warstwie metalicznej, wzbudzonymi polem elektromagnetycznym fali świetlnej z zakresu widzialnego i około widzialnego. Efekty plazmoneczne obserwowane były od dawna (m.in. już przez Izaaka Newtona, na początku 18-wieku, tj. ponad 300 lat temu). Teoria zjawiska plazmonowego pojawiła się za sprawą prac Arnolda Sommerfelda i Jonathana Zennecka już ponad 100 lat temu. Plazmonika jako dział fizyki ugruntowała się ok. 50 lat temu za sprawą badań teoretycznych i eksperymentalnych, przede wszystkim: Andreasa Otto oraz Ericha Kretschmana. Ogromny wpływ na rozwój plazmoniki wywołały badania prowadzone przez Thomasa Ebbesen'a ze Współpracownikami a opublikowane w NATURE w 1998 roku.

Zainteresowanie plazmoniką, oprócz badań nad fizyką zjawisk w złożonych strukturach warstwowych i wielowarstwowych typu: nanowarstwa metalu-dielektryk, wynika w ostatnim okresie przede wszystkim z możliwości szerokiego zastosowania tego zjawiska w metrologii, sensoryce, fotowoltaice, systemach optycznych, technikach wojskowych, inżynierii materiałowej, chemii procesowej oraz biologii i medycynie.

W mojej opinii, większość współczesnej literatury naukowej dotyczącej plazmoniki związana jest właśnie z praktycznymi zastosowaniami układów i struktur plazmonecznych.

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy badań nad optymalizacją struktury plazmonecznej, tak aby fale plazmonowo-polarytonowe mogły na interfejsie metal-dielektryk propagować się na jak najdłuższych odcinkach. Ma to istotne znaczenie dla zastosowań plazmoniki w systemach optoelektronicznych. Efekt lepszej propagacji fali plazmonowej można uzyskać poprzez poprawienie gładkości i jednorodności powierzchni metalu, co ograniczyłoby straty na rozpraszanie powierzchniowej fali plazmonowej na granicy metal-dielektryk.

Rozprawa doktorska mgra Arkadiusza Ciesielskiego dotyczy badań eksperymentalnych i analiz właściwości struktur plazmonowych z nanowarstwami złota lub srebra, z nałożonymi ultra cienkimi warstwami niektórych półprzewodników grup IV oraz VI układu okresowego. Niniejsza modyfikacja, powinna w opinii Doktoranta spowodować nie tylko zmiany w mikrostrukturze takiego układu, ale także kontrolowane zmiany jego właściwości optycznych i elektrycznych. Celem pracy były także interpretacje fizyczne uzyskanych wyników.

Autor rozprawy, w sposób wyraźny stawia trzy tezy (cytat):

- „*Osadzanie warstw metali plazmonicznych na podłoża szklane lub krzemowe z wykorzystaniem warstw zwilżających germanu lub telluru w taki sposób wpływa na strukturę metalu, że kierunkuje to proces segregacji atomów z warstw zwilżających w stronę powierzchni metalu*”;
- „*Atomy półprzewodnika obecne wskutek segregacji na granicach ziaren metalu, silnie wpływają na oporność (elektryczną) oraz właściwości optyczne warstw plazmonicznych, między innymi poprzez umożliwienie wzbudzenia zlokalizowanych plazmonów powierzchniowych*”;
- „*Zjawisko separacji daje się kontrolować poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu osadzania warstwy a także poprzez przetwarzanie końcowe (ang.. post-processing)*”;

Należy uznać, że tematyka plazmonów powierzchniowych podjęta w rozprawie mgra Arkadiusza Ciesielskiego, w szczególności tematyka fizycznej modyfikacji struktury plazmonowej, jest naukowo bardzo atrakcyjna (pomimo swej relatywnie długiej historii). Tematyka ta jest również ważna w aspekcie praktycznych zastosowań struktur plazmonowych.

Cel oraz tezy rozprawy sformułowane zostały jasno i poprawnie.

3. Zawartość rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska składa się z siedmiu rozdziałów, z wykazu pozycji literatury, wykorzystanej przy realizacji pracy (tzw. *Bibliografii*) oraz z *Załącznika A* zawierającego porównania charakterystyk rentgenowskich niektórych z analizowanych struktur z ich odpowiednikami modelowymi.

Pierwsze trzy rozdziały zatytułowane: *Struktura krystaliczna materiałów*, *Migracja atomów w ciałach stałych* oraz *Oddziaływanie światła z materią* stanowią „przypomnienie wybranych zagadnień fizyki ciała stałego”, które będą przez Doktoranta wykorzystywane w

dalszej części rozprawy. W dużej części jest to materiał opracowany na podstawie różnych monografii z zakresu fizyki ciała stałego. Rozdział 2, dotyczący problematyki migracji atomów ziarnistych, w wieloskładnikowych fazach stałych. Stanowi on w części oryginalny teoretyczny wkład własny Doktoranta w analizowaną tematykę. Rozdział 3 zawiera ważne dla plazmoniki informacje dotyczące elektrycznych i optycznych właściwości dyspersyjnych ośrodków materialnych. Omawiana jest także tematyka propagacji plazmonów powierzchniowych i ich właściwości. Są to zdaniem Doktoranta ważne informacje, pozwalające na fizyczną interpretację własnych wyników badań eksperymentalnych. Te wstępne rozważania z rozdziałów 1, 2 oraz 3 zajmują istotną część rozprawy i kończą się na stronie 52 (przy 130 stronach, na których zawarty jest cały materiał rozprawy (bez spisu literatury).

Rozdział 4 pt. *Współczynniki optyczne metali plazmonicznych* zawiera informacje o właściwościach dyspersyjnych nanowarstw dwóch głównych metali plazmonicznych, tj. złota i srebra. Doktorant, bazując na publikacjach z własnym współautorstwem, omawia wpływ różnych parametrów struktury plazmonicznej na jej właściwości elektryczne i optyczne. (Rozdział ten w pracy liczy 13 stron.)

Rozdział 5 pt. *Techniki wytwarzania i charakteryzacji próbek* dotyczy opisu metod wytwarzania próbek badanych w ramach realizacji rozprawy.

Rozdział 6 pt. *Segregacja Ge i Te w warstwach Ag i Au* jest zasadniczą częścią rozprawy. Doktorant przedstawia analizy wpływu warstw zwilżających na bazie Ge oraz Te, naniesionych na granicy tlenkowego podłoża i nanowarstwy metalicznego materiału plazmonicznego, na właściwości optyczne struktur plazmonicznych. Doktorant przytacza wyniki prezentowane wcześniej we współautorskich publikacjach naukowych, których był pierwszym autorem. Wyniki są wykorzystane do wyznaczenia rozkładu przestrzennego atomów w strukturze plazmonicznej i do wyciągania wniosków o segregacji atomów Ge oraz Te w nanowarstwach srebra i złota. Otrzymane wyniki eksperymentalne są porównane z wynikami analiz teoretycznych. (Rozdział 6 w pracy liczy 50 stron, zawiera kilkadziesiąt oryginalnych rysunków, wykresów i zdjęć).

W rozdziale 7 pt. *Podsumowanie* zostało dokonane syntetyczne omówienie uzyskanych w ramach realizacji rozprawy doktorskiej wyników. Doktorant wyznacza kierunki przyszłych badań i przedstawia perspektywy wykorzystania uzyskanych wyników w praktyce.

Rozprawę doktorską kończy *Bibliografia* - wykaz pozycji literatury problemu, z których Doktorant korzystał zarówno przy realizacji badań, jak również przy przygotowaniu manuskryptu swojej rozprawy doktorskiej.

4. Ocena rozprawy doktorskiej

W recenzowanej pracy doktorskiej, jej autor – mgr Arkadiusz Ciesielski podjął się rozwiązania problemu optymalizacji struktury plazmonicznej w aspekcie ograniczenia tłumienia fal plazmonowych w rezultacie ich rozpraszania na nierównościach na granicy nanowarstwa metalu - dielektryk. Doktorant zaproponował rozwiązanie, polegające na segregacji germanu i telluru w nanowarstwach metali plazmonicznych – Ag oraz Au. Zaproponowane rozwiązanie pozwoliło również na kształtowanie właściwości optycznych struktur plazmonicznych.

Praca doktorska zawiera wiele oryginalnych i wartościowych wyników naukowych. O wysokiej wartości naukowej uzyskanych wyników świadczy fakt ich opublikowania w czasopismach o szerokiej międzynarodowej cyrkulacji i wysokiej randze naukowej.

Uważam, że w zakresie przeprowadzonych badań własnych, rozprawa ma charakter kompletny – zawiera szeroką analizę literaturową problemu, zawiera analizę teoretyczną badanych zagadnień z wątkiem własnego wkładu w teorię zjawiska, posiada wartościową część badań eksperymentalnych. Wyniki badań eksperymentalnych są wyjaśniane własnymi interpretacjami.

Z analizy zawartych w rozprawie treści wynika jednoznacznie, że cele rozprawy zostały osiągnięte.

Postawione na początku tezy, w wyniku przeprowadzonych badań i analiz, zostały wykazane.

Jako Recenzent pracy doktorskiej Pana mgra Arkadiusza Ciesielskiego uważam, że niniejsza rozprawa prezentuje wartościowy poziom naukowy w obszarze związanym z plazmoniką, nanooptyką i fizyką cienkich warstw. Rozprawa spełnia warunki jakie powinny spełniać prace doktorskie realizowane w dziedzinie nauk fizycznych.

Dorobek naukowy Pana mgra Arkadiusza Ciesielskiego, indeksowany w światowych bazach bibliometrycznych Web of Sciences oraz SCOPUS, jest wysoki i zasługuje na uznanie i szacunek

W mojej opinii, materiał zawarty w doktoracie, po odpowiedniej modyfikacji zasługuje na opublikowanie go w formie monografii.

5. Uwagi krytyczne

W tym miejscu, z obowiązku Recenzenta pragnę zgłosić swoje uwagi do niniejszej rozprawy.

Praca doktorska Pana mgra Arkadiusza Ciesielskiego napisana jest w sposób przemyślany i staranny. Usterki edycyjne i tzw. literówki zdarzają się w rozprawie rzadko i w opinii Recenzenta, uwzględniając wysoki poziom naukowy rozprawy, nie zasługują na to aby je szczegółowo wymienić.

Układ pracy jest oryginalny. Jak już wspomniałem dużą część maszynopisu (ok. jedną trzecią) stanowią rozdziały 1, 2 oraz 3, które w większości zawierają informacje fizyczne o charakterze ogólnym, dostępnym w monografiach i podręcznikach z zakresu ciała stałego. Moje wrażenie przy pierwszym kontakcie z manuskrypcie rozprawy było takie, że informacje te w doktoracie z nauk fizycznych są niepotrzebne w tak szerokim zakresie. Jednak po przeczytaniu pracy (a tym bardziej, po jej kolejnych lekturach) muszę uznać, że informacje te mają swoją wartość, która decyduje o odbiorze rozprawy i ocenie zawartych w niej treści.

W mojej opinii te informacje o charakterze fizycznym zostały opracowane przez Doktoranta inteligentnie i oryginalnie i nie kwestionuję zasadności umieszczenia rozdziałów 1, 2 i 3 w rozprawie.

Wykaz literatury wykorzystywanej przy realizacji pracy zawiera 204 pozycje. W tej grupie są pozycje bardzo już dzisiaj klasyczne dla plazmoniki, ale są także pozycje nowe, z ostatnich 3-4 lat. Spis literatury dobrze świadczy o znajomości zagadnień naukowych podejmowanych w pracy. W tej grupie jest 8 prac z współautorstwem Doktoranta. W 6-ciu pracach Doktorant był pierwszym autorem. Sześć współautorskich prac Doktoranta publikowanych zostało w czasopiśmie o szerokiej międzynarodowej cyrkulacji

Pracę doktorską czyta się dobrze i łatwo. Strona graficzna pracy jest jej bardzo silnym atutem. Praca zawiera wiele rysunków, wiele tabel, w których zostały prezentowane uzyskane wyniki.

W tym miejscu muszę wyrazić uznanie Doktorantowi za precyzyjne określenie zakresu współpracy z osobami, z którymi prowadził badania naukowe zamieszczone w manuskrypcie rozprawy doktorskiej. Swoją osobisty i bezpośredni udział w zaprezentowanych w rozprawie badaniach Doktorant przedstawił na stronie 12 manuskryptu w punkcie pt. *Wkład autor w badania stanowiące podstawę rozprawy*.

Na stronie rozpoczynającej manuskrypt rozprawy doktorskiej mgr Arkadiusz Ciesielski składa podziękowania siedmiu osobom (w tym Promotorowi oraz Promotorowi

pomocniczemu), które pomogły mu przy realizacji Jego doktoratu. Doktorant wymienia szczegółowo „komu” i „za co” jest winien podziękowania.

Jako Recenzent jestem wdzięczny Doktorantowi za te informacje, ponieważ bardzo ułatwiają one ocenę Jego własnego udziału w prezentowanych badaniach. Dla mnie, współpraca naukowa zawsze jest dużą wartością, również przy realizacji rozprawy doktorskiej.

Wśród uwag, jakie zgłaszam pod adresem niniejszej rozprawy jest uwaga dotycząca przedstawienia motywacji do podjęcia badań w zakresie plazmoniki. Skromnie pisze Doktorant o dużych możliwościach praktycznego wykorzystania struktur plazmonicznych. Nie wspomina o metamateriałach, których realizacja bez plazmoniki byłaby praktycznie niemożliwa.

Poczynione uwagi nie mają żadnego wpływu na ostateczną jednoznacznie pozytywną ocenę pracy doktorskiej mgra Arkadiusza Ciesielskiego.

Zarówno duży, wymierny dorobek naukowy, określany ilością opublikowanych prac naukowych ze współautorstwem Doktoranta oraz wysoką rangą naukową czasopism, w których zostały wydane, ale również szeroki zakres podjętych w rozprawie problemów i przeprowadzonych badań zaprezentowany w aktualnej wersji rozprawy, pozwalają w mojej opinii uważać, że rozprawa Pana mgra Arkadiusza Ciesielskiego zasługuje na jej wyróżnienie.

Konkluzja końcowa

Biorąc pod uwagę wyżej przedstawioną ocenę rozprawy doktorskiej

Mgra **Arkadiusza CIESIELSKIEGO** pt.:

"Segregacja germanu i telluru w nanowarstwach metali plazmonicznych ".

stwierdzam, że

w świetle obowiązującej *Ustawy - Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce z 20.07.2018r* (a także aktów wcześniejszych, w tym: *„Ustawą o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki"*, z dnia 14 marca 2003 roku wraz z *Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 roku. oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018)*

moja pozytywna ocena pracy doktorskiej stanowi podstawę do ubiegania się mgra Arkadiusza Ciesielskiego o stopień doktora nauk fizycznych.

Wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie mgra Arkadiusza Ciesielskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z wyrazami szacunku

Gliwice, 2020.07.19

