

Białystok, dnia 02.08.2024 r.

dr hab. inż. Piotr Miluski, prof. PB
Politechnika Białostocka
Wydział Elektryczny
Katedra Fotoniki, Elektroniki i Techniki Światłowej
ul. Wiejska 45D, 15-351 Białystok, Polska
e-mail p.miluski@pb.edu.pl

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne

wpłynęło dnia 02.08.2024

nr zał.

Recenzja rozprawy doktorskiej dla Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej

Tytuł rozprawy: Warstwy falowodowe wytwarzane metodą zol-żel aktywowane jonami wybranych lantanowców – technologia i charakteryzacja

Autor rozprawy: mgr inż. Magdalena Zięba

Promotor: dr hab. inż. Paweł Karasiński, prof. PŚ

Promotor pomocniczy: dr Katarzyna Wojtasik

Podstawą recenzji jest Uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej nr 53/2024 z dnia 02 lipca 2024 r. o powołaniu mnie przez Radę na recenzenta rozprawy doktorskiej Pani mgr. inż. Magdaleny Zięby.

1. Zakres rozprawy

Oceniana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Zięby pt. „Warstwy falowodowe wytwarzane metodą zol-żel aktywowane jonami wybranych lantanowców – technologia i charakteryzacja” przedstawia opracowaną przez Autorkę technologię wytwarzania warstw aktywnych (luminescencyjnych) metodą zol-żel do zastosowań w optoelektronice. Praca w znacznej części obejmuje badania materiałowe - w tym technologiczne. Pani mgr inż. Magdalena Zięba wykorzystwała powyższą metodę z zastosowaniem matrycy SiOx:TiOy do wytworzenia kompozytowych warstw falowodowych domieszkowanych lantanowcami (erbem i europem). Wytworzone metodą „dip-coatingu” warstwy poddane zostały pełnej charakteryzacji właściwości strukturalnych, morfologicznych i optycznych. Szczególną uwagę Autorka poświęca analizie wpływu domieszkowania warstw falowodowych SiOx:TiOy jonami wybranych lantanowców na ich straty optyczne i właściwości luminescencyjne. Rezultaty charakteryzacji poddane zostały pod dyskusję. Opracowane przez Autorkę dysertacji warstwy mogą znaleźć zastosowanie w wytwarzaniu nowych komponentów optyki zintegrowanej. Szczególnie atrakcyjna jest możliwość wytwarzania struktur aktywnych (laserów, wzmacniaczy, sensorów), stabilność wytworzonych warstw oraz niski koszt technologii produkcji.

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska zawarta została na 127 stronach. Składa się ona z 9 rozdziałów. Układ pracy został poprawnie zaplanowany. Część przeglądowa została wyraźnie oddzielona od badań własnych Autorki.

Dodatkowo w pracy zawarty został dorobek Autorki w tym spis publikacji, realizowanych projektów, udział w konferencjach i otrzymane za dotychczasową działalność nagrody i wyróżnienia.

We Wstępie Autorka przedstawia rys historyczny powstania i rozwoju technologii wytwarzania cienkich warstw optycznych. W kolejnym rozdziale Pani mgr inż. Magdalena Zięba opisuje podstawy fizyczne działania światłowodów planarnych, w tym opisuje źródła strat optycznych oraz metody wprowadzania promieniowania optycznego. W rozdziale trzecim, w syntetyczny sposób, przedstawione zostały obecnie wykorzystywane platformy materiałowe fotoniki scalonej. Autorka przedstawia charakterystyczne cechy tych technologii (InP, Si (SOI), Si_3N_4) w odniesieniu do proponowanej w rozprawie doktorskiej technologii na bazie $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$. W dalszej części rozprawy doktorskiej zawarty został opis grupy lantanowców wykorzystywanych w dziedzinie optoelektroniki do uzyskiwania materiałów aktywnych. Przedstawiony zostały właściwości materiałowe i fotoluminescencyjne. Autorka prezentuje również mechanizmy wzbudzenia luminescencji poprzez zastosowanie wzajemnego oddziaływania jonów lantanowców w tym mechanizm down and up -konwersji (absorpcja ze stanu wzbudzonego, konwersja z transferem energii w górę, kooperatywna up-konwersja, relaksacja krzyżowa). Szczegółowo przedstawia również właściwości luminescencyjne (w tym przejścia emisyjne) wykorzystanych do badań lantanowców (erb, europ). W rozdziale tym zawarty został przegląd obecnego stanu wiedzy z zakresu znanych metod wytwarzania warstw falowodowych aktywnych domieszkowanych jonami lantanowców. Rozdział piąty prezentuje metody wytwarzania szkielez z fazy ciekłej (zol-żel) oraz przegląd metod nanoszenia warstw z fazy ciekłej. W rozdziale szóstym Autorka przedstawia cel, zakres pracy i metodykę badawczą zaproponowaną do weryfikacji postawionej tezy badawczej. W kolejnym rozdziale szczegółowo omawia metody badawcze służące do charakteryzacji cienkich warstw falowodowych wykorzystywanych w optoelektronice. Rozdział ósmy wprowadza w zakres realizacji praktycznej rozprawy doktorskiej. Przedstawia materiały i procedury wykorzystane do wytworzenia i charakteryzacji warstw falowodowych. Prezentuje etapy: przygotowanie podłoża, syntezę hybrydowych zoli, wytworzenie warstw, projektowanie pasywnych i aktywnych struktur falowodowych oraz metody wprowadzania promieniowania z wykorzystaniem sprzęgacza siatkowego. Główną częścią tego rozdziału są rezultaty prac technologicznych (wytworzone warstwy) oraz wyniki ich charakteryzacji: w tym właściwości materiałowych, morfologii powierzchni i właściwości optycznych (zespolony współczynnik załamania światła, przerwa zabroniona, jednorodność optyczna). Autorka analizuje również wpływ domieszkowania wybranymi związkami lantanowców (erb, europ) oraz wpływ procesu wygrzewania na właściwości wytworzonych warstw. W dalszej części dysertacji zawarta została dyskusja oraz podsumowanie i wnioski. Integralną częścią pracy jest bibliografia, spis rysunków i tabel oraz wykaz dorobku naukowego Doktorantki.

3. Ocena zastosowanego piśmiennictwa

Piśmiennictwo składa się ze 174 pozycji. Są to wydawnictwa książkowe, artykuły oraz strony internetowe z zakresu tematyki dysertacji. Ich zakres jest dobrze dobrany i źródła literaturowe nie budzą zastrzeżeń merytorycznych. Dużą część pozycji stanowią artykuły opublikowane w międzynarodowych czasopismach o znacznej renomie. Pewną krytyczną uwagę kieruję pod kątem ich aktualności gdyż znacząca część przytoczonego w pracy piśmiennictwa została wydana przed 2014 rokiem. Może mieć na to wpływ rys historyczny przeprowadzony przez Autorkę.

4. Ocena celu pracy doktorskiej

Celem rozprawy doktorskiej postawionej przez Autorkę jest „opracowanie metody wytwarzania aktywnych warstw falowodowych, otrzymywanych poprzez domieszkowanie kompozytowych warstw $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ jonami wybranych lantanowców”. W tym celu Pani mgr inż. Magdalena Zięba proponuje wytworzenie warstw aktywnych metodą zol-żel i techniką „dip-coatingu”. Podjęta tematyka pracy jest niewątpliwie zagadnieniem atrakcyjnym pod względem naukowym o czym świadczy wykładniczy wzrost liczby publikacji w ostatnich latach (Rys. 5.1, str. 40). Doktorantka, nawiązując do postawionego celu pracy, proponuje weryfikację zestawu szczegółowych tez:

1. „Domieszkowanie kompozytowych warstw falowodowych $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ jonami wybranych lantanowców nie wpływa destrukcyjnie na strukturę materiału matrycy.
2. Domieszkowanie kompozytowych warstw falowodowych $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ jonami wybranych lantanowców nie powoduje istotnego wzrostu strat optycznych.
3. Aktywne warstwy falowodowe mogą być skutecznie pobudzone z użyciem sprzęgacza siatkowego.
4. W warstwach falowodowych $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ domieszkowanych jonami lantanowców może wystąpić efekt fotoluminescencji.
5. Metoda zol-żel i technika dip-coating są odpowiednie do wytwarzania aktywnych warstw falowodowych o wysokiej jednorodności parametrów.”

Doktorantka przedstawia plan badań. Zaproponowane i omówione w pracy metody badawcze (Rys. 6.1 Metodyka badawcza) potwierdzają dobrą znajomość tematyki i umożliwiają osiągnięcia postawionego celu rozprawy.

5. Ocena rozprawy

Oceniana rozprawa doktorska realizowana była w ramach projektu HYPHa „Hybrydowe platformy czujnikowe zintegrowanych układów fotonicznych na bazie materiałów ceramicznych i polimerowych”, finansowanego ze środków programu TEAM-NET Fundacji na rzecz Nauki Polskiej w ramach Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój na lata 2014-2020 (POIR.04.04.00-00-14D6/18-00). Umożliwiło to Autorce szeroką współpracę z gronem znakomitych naukowców w zakresie charakteryzacji wytworzonych warstw oraz z ośrodkami krajowymi m.in. Instytutu Mikroelektroniki i Optoelektroniki Politechniki Warszawskiej, Polskiego Ośrodka Rozwoju Technologii – Sieć Łukasiewicz (PORT), Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej, Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydziału Inżynierii Materiałowej i Ceramiki Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie, Centrum Zaawansowanych Materiałów i Technologii CEZAMAT Politechniki Warszawskiej.

Postawiony przez Autorkę cel rozprawy został zrealizowany w kolejnych etapach rozprawy doktorskiej. Pani mgr inż. Magdalena Zięba wprowadza podstawy fizyczne światłowodów planarnych. Opisuje zjawiska fizyczne umożliwiające propagację promieniowania optycznego i wpływające na straty transmisji w takich strukturach. Prezentuje również metody wprowadzania promieniowania optycznego w struktury falowodowe. W dalszej części (rozdział trzeci) Autorka przedstawia obecnie znane technologie wytwarzania układów optyki zintegrowanej. Dokonuje porównania wykorzystywanych współcześnie platform materiałowych do struktur optyki zintegrowanej (InP, Si (SOI), Si_3N_4 , $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$). Autorka rozprawy doktorskiej przeprowadza weryfikację postawionych tez badawczych w oparciu o technologię $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$. Dokonuje porównania wybranej przez siebie platformy materiałowej z pozostałymi dostępnymi na rynku komercyjnym. Współczynnik załamania tych warstw może być skalowany w szerokim zakresie, od około 1,45 do około 1,95 co jest zbliżone z technologią opartą o szkła krzemionkowe i wieloskładnikowe potencjalnie umożliwiając łatwiejszą integrację struktur planarnych i włóknistych. Kompozytowe warstwy falowodowe $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$, charakteryzują się wyjątkowo niskimi stratami optycznymi i długookresową stabilnością parametrów co niewątpliwie predysponuje je do zastosowań konstrukcyjnych. Technologia ta rozwijana była przez promotora pracy doktorskiej Pana dr hab. inż. Pawła Karasińskiego, prof. PŚ. Niewątpliwym aspektem nowości wprowadzonym przez Doktorantkę jest opracowanie metody domieszkowania warstw falowodowych związkami lantanowców i zbadanie wpływu ich obecności na właściwości strukturalne, materiałowe i optyczne. W konsekwencji rezultaty wykonanych prac opisane w dalszej części rozprawy prezentują nowe aktywne (luminescencyjne) falowodody optyczne o znacznym potencjale naukowym i komercyjnym. Wprowadzając ideę opracowania aktywnych struktur falowodowych Autorka, w rozdziale czwartym, dokonuje opisu właściwości chemicznych i fotoluminescencyjnych lantanowców. Swoje prace eksperymentalne Doktorantka oparła o dwa z nich: erb i europ. Dobór ich nie jest przypadkowy ze względu na fakt iż jony europu są często wykorzystywane jako sonda spektroskopowa wskazująca właściwości otoczenia jonu

pierwiastka ziemi rzadkiej (matrycy). Erb natomiast jest powszechnie znany jako ośrodek wzmacniający w telekomunikacji i konstrukcjach laserów. Możliwość uzyskania zjawiska up-konwersji również dając informacje o dynamice zjawisk gaszenia luminescencji (intensywności przejść bezpromienistych wynikających z energii fononów matrycy). Autorka dokonuje przeglądu obecnego stanu wiedzy z zakresu właściwości światłowodów aktywnych domieszkowanych wybranymi do dalszych prac eksperymentalnych lantanowcami (erbu, europu). Oceniana dysertacja ma niewątpliwie charakter technologiczny. W związku z tym, w rozdziale piątym przedstawione zostały procesy chemiczne zachodzące w metodzie zol-żel. Autorka analizuje prekursory tlenków metali i krzemionki oraz prezentuje i omawia etapy wytwarzania materiałów metodą zol-żel. Dodatkowo, analizuje wpływ rodzaju katalizatora na strukturę żeli krzemionkowych. Jest to zagadnienie istotne ze względu na jego wpływ na strukturę i homogeniczność finalnego materiału. Zagadnienie syntezy materiałów wieloskładnikowych wytwarzanych metodą zol-żel wymaga szczegółowego opracowania sposobu ich otrzymywania gdyż zmiana jednego z parametrów może istotnie wpłynąć na właściwości końcowego produktu. Nawiązując do faktu, że celem rozprawy było wytworzenie falowodów planarnych, Doktorantka prezentuje obecnie wykorzystywane technologie wytwarzania cienkich warstw optycznych: powlekania z użyciem wałka, metodę natryskową, rozwirowania (spin-coating) oraz powlekania zanurzeniowego (dip-coating). Omawia też szczegółowo parametry wpływające na grubość warstwy w zastosowanej w części eksperymentalnej pracy metody „dip-coatingu” (szybkość wynurzania podłoża z zolu, lepkość zolu i jego napięcie powierzchniowe). W rozdziale szóstym Autorka przedstawia cel, zakres pracy oraz zaproponowaną metodykę badawczą do weryfikacji postawionej tezy. W sposób syntetyczny przedstawia kolejne etapy realizacji pracy. Przedstawiony plan jest całościowy a wszystkie jego punkty są merytorycznie uzasadnione. W dalszej części rozprawy opisane zostały metody pomiarowe i aparatura wykorzystana do realizacji prac eksperymentalnych tj. charakteryzacji wytworzonych warstw falowodowych: elipsometria, spektrofotometria, pomiar strat optycznych, morfologia powierzchni (AFM, SEM, EDS), profilometria optyczna i spektrofлуorymetria. Na uwagę zasługuje szerokie spektrum zaplanowanych i przeprowadzonych badań. Dalsza część pracy (rozdział ósmy) opisuje technologię syntezy zoli oraz opracowaną metodę domieszkowania lantanowcami. Autorka realizuje plan badawczy w dwóch etapach: wytworzenie niedomieszkowanych (referencyjnych) warstw kompozytowych $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ oraz wytworzenie warstw kompozytowych $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ domieszkowanych erbem lub europem. Warto podkreślić szeroki zakres eksperymentalny – przeprowadzenie ponad stu syntez zoli (str. 105). Charakteryzacja właściwości materiałowych i optycznych przeprowadzona została we współpracy z wieloma ośrodkami naukowymi. Niezwykle ważnym aspektem było monitorowanie rozmiarów nanokrystalitów tlenku tytanu gdyż ich wzrost powyżej pewnych rozmiarów może powodować niepożądane efekty rozpraszania promieniowania znacząco zwiększające tłumienność wytworzonych warstw falowodowych. Matryca wykorzystana do wytworzenia warstw falowodowych bazowała na stosunku molowym krzemu do tytanu $\text{Si:Ti}=0,7:0,3$, co określało wartość współczynnika załamania światła zbliżoną do 1,65. Dobór uzasadniony został mniejszą wrażliwością właściwości optycznych warstw falowodowych (rozpraszania światła na nierównościach powierzchni podłoża) a w konsekwencji możliwością wykorzystania szerszej gamy podłoży. Doktorantka realizując postawiony cel badawczy przeprowadziła symulacje parametrów warstw optycznych struktury (profil współczynnika załamania światła, grubość warstwy) na właściwości modowe światłowodów planarnych w tym rozkład gęstości mocy czy udział mocy prowadzonej w modzie podstawowym. Dodatkowo, w rozprawie przedstawiona została analiza parametrów sprzęgacza na parametry (kąt) wzbudzenia badanych struktur falowodowych dla wybranych długości fal świetlnych ($\lambda=395\text{ nm}, 488\text{ nm}, 980\text{ nm}, 1550\text{ nm}$). Wytworzone warstwy falowodowe zostały poddane charakteryzacji ich właściwości. Na podstawie charakterystyk transmitancji w obszarze krawędzi absorpcji wyznaczona zostały, wykorzystując metodę Tauc'a , szerokości optycznych przerw zabronionych, metodą elipsometryczną wartości zespolonych współczynników załamania oraz charakterystyki dyspersyjne. Praca prezentuje również analizę SEM powierzchni warstw falowodowych i pomiar współczynnika tłumienia warstw falowodowych. Rezultaty głównego celu rozprawy tj. zbadanie wpływu domieszkowania kompozytowych warstw falowodowych $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ jonami lantanowców na ich straty optyczne i właściwości luminescencyjne zostały zrealizowane w oparciu o warstwy domieszkowane

jonami erbu i europu. W trakcie realizacji części eksperymentalnej rozprawy zbadany został również aspekt technologiczny tj. wpływ wygrzewania warstw po ich naniesieniu (500 i 800°C) na właściwości materiałowe i luminescencyjne oraz chropowatość powierzchni. Właściwości luminescencyjne lantanowców w matrycach tlenkowych silnie zależą od usunięcia z nich grup hydroksylowych stąd podjęte przez Autorkę badania. Uzyskane rezultaty potwierdziły fakt że wzrost temperatury wygrzewania warstwy referencyjnej wpływa na zwiększenie szorstkości powierzchni (co jest zjawiskiem niekorzystnym zwiększającym poziom strat transmisyjnym w falowodzie). Równocześnie przeprowadzone badania potwierdziły, że domieszkowanie warstw kompozytowych $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ europem i erbem powoduje osłabienie tego efektu. Wynika to z faktu zmniejszenia skłonności tlenku tytanu do krystalizacji w otoczeniu lantanowców. Autorka analizuje również obrazy z wysokorozdzielczego transmisyjnego mikroskopu elektronowego (HRTEM) warstw referencyjnej i domieszkowanych europem i erbem potwierdzając obecność krystalitów TiO_2 . Zmierzona wielkość krystalitów na poziomie 5 nm pozwala jednak, uwzględniając długość fali promieniowania optycznego, na uznanie wytworzonych warstw za amorficzne. Autorka zauważyła również, że wraz ze wzrostem poziomu domieszkowania warstw $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ europem, słabnie wpływ temperatury wygrzewania na ich straty optyczne. W pracy zbadane zostały właściwości optyczne wytworzonych struktur falowodowych wykorzystując wytworzone sprzęgacze siatkowe. Zbadane i przeanalizowane zostały widma luminescencyjne i potwierdzone oczekiwane pasma emisyjne. Dodatkowo, Autorka potwierdziła również, że wzrost temperatury wygrzewania warstw zwiększa intensywność sygnału luminescencji. Dynamika zaniku luminescencji została zbadana z wykorzystaniem metody skorelowanego w czasie zliczania pojedynczych fotonów dla próbek objętościowych (ze względu na nisko poziom sygnału uzyskiwany z warstw falowodowych). Dla zoli domieszkowanych europem do pomiaru wykorzystano promieniowanie o długości fali $\lambda_{\text{exc}}=392 \text{ nm}$. Zmierzone czasy zaniku luminescencji, dla próbek domieszkowanych 1- 5 % zawierają się w granicach 110 - 115 μs . W dalszej rozprawie doktorskiej zawarta została dyskusja oraz przedstawione wnioski podsumowujące uzyskane rezultaty.

6. Uwagi do rozprawy

Tematyka rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Magdaleny Zięby oraz postawiony cel, tj. opracowanie nowych aktywnych warstw falowodowych na bazie $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ o ultraniskiej tłumienności do zastosowań w dziedzinie falowodów optycznych są niewątpliwie atrakcyjne naukowo. Autorka szczegółowo charakteryzuje wytworzone warstwy optyczne oraz analizuje wpływ wprowadzenia domieszek aktywnych na właściwości materiałowe. Należy podkreślić technologiczny charakter rozprawy doktorskiej, który znacząco poszerza obecny stan wiedzy z prezentowanej w pracy tematyki. Nieliczne błędy językowe nie wpływają na wysoką wartość rozprawy. Pracę oceniam bardzo wysoko. Tym niemniej chciałbym przedstawić kilka uwag do dyskusji i poprosić Autorkę, aby się do tych uwag odniosła:

1. „Ponadto stosując katalizatory kwasowe można wytwarzać stabilne zole, które zachowują przydatność nawet w przeciągu wielu miesięcy. Zaletą tą wykorzystuję w prowadzonych badaniach nad wytwarzaniem warstw falowodowych.”, str. 46. Czy były prowadzone badania trwałości wytworzonych warstw?
2. „W ramach pracy doktorskiej skupiłam się na wytwarzaniu warstw kompozytowych $\text{SiO}_x\text{:TiO}_y$ o stosunku molowym krzemu do tytanu $\text{Si:Ti}=0,7:0,3$, których współczynniki załamania były zbliżone do 1,65. Wybór takich proporcji krzemu do tytanu i współczynnika załamania był efektem sugestii niektórych grup badawczych, że tytan niekorzystnie wpływa na efekt fotoluminescencji. Jak można wnioskować, z tej przyczyny, jak również i z powodu trudności w otrzymywaniu warstw amorficznych przy większej zawartości tytanu, w literaturze przedstawiane były warstwy $\text{SiO}_2\text{:TiO}_2$ domieszkowane jonami Ln^{3+} o mniejszych zawartościach tytanu i stąd o niższych współczynnikach załamania, n poniżej 1,65. Dla warstw takich uzyskiwano straty optyczne na poziomie ok. 1 dB/cm.”, str. 76. Czy Autorka zweryfikowała doświadczalnie informacje o wpływie tytanu na właściwości falowodów? Brakuje źródeł tych informacji (publikacji).

3. „Wpływ domieszkowania europem i erbem na charakterystyki technologiczne zilustrowano odpowiednio na rysunkach 8.20a i 8.20b. Molowa zawartość europu wynosiła odpowiednio 1%, 3% i 5% , natomiast molowa zawartość erbu wynosiła odpowiednio 2% , 4% , i 6%.”, str. 83. Co było powodem wyboru różnych koncentracji molowej europu i erbu? Jak jest możliwa do osiągnięcia maksymalna koncentracja domieszkowania?
4. Autorka zauważyła, że wraz ze wzrostem poziomu domieszkowania warstw $\text{SiOx}:\text{TiOy}$ europem, słabnie wpływ temperatury wygrzewania na ich straty optyczne, str. 99. Czy badania zostały wykonane również dla warstw domieszkowanych jonami erbu?
5. „Rys. 8.45 Charakterystyka absorbancji zolu $\text{SiOx}:\text{TiOy}$ domieszkowanego 2% mol erbu”, str. 101. W jaki sposób zbadana została absorbancja, jaka była grubość zolu podczas pomiaru?
6. „Rys. 8.48 Widma emisyjne dla warstw $\text{SiOx}:\text{TiOy}$ domieszkowanej 6% mol Er^{3+} ”, str. 103. Wykres przedstawia pasma emisyjne uzyskane dla temperatur 500 i 700°C. Wykres umieszczony po prawej stronie przedstawia profil emisji w pobliżu długości fali 1550 nm. Jaki był wpływ temperatury wygrzewania na intensywność emisji erbu w powyższym zakresie spektralnym?
7. Autorka opisuje dynamikę zaniku luminescencji dla próbek domieszkowanych europem, czy taka charakteryzacja została również wykonana dla próbek domieszkowanych erbem?

7. Wniosek końcowy

Problem nowych platform do wytwarzania układów zintegrowanych optyki jest atrakcyjny i rozwijany przez wiele międzynarodowych grup badawczych. Integralną częścią pracy jest wykaz dorobku naukowego Doktorantki. Na uwagę zasługuje szeroka współpraca z licznymi ośrodkami naukowymi. Warto pokreślić fakt, że prace posiadają wysoką wartość naukową. Realizując rozprawę doktorską, Pani mgr inż. Magdalena Zięba wykazała się znaczącą aktywnością naukową. Potwierdzenie tego jest udział w czterech projektach realizowanych w ramach działalności: Narodowego Centrum Nauk, Fundacji na rzecz Nauki Polskiej i M. Era-Net. Dodatkowo, pełniła funkcję kierownika w projekcie „Elektrody transparentne TiO_2 wytwarzane metodą zol-żel i techniką dip-coating” w ramach programu Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza. Na uwagę zasługuje współautorstwo 27 artykułów naukowych oraz czynny udział w konferencjach krajowych i zagranicznych (30 wystąpień). Oceniana rozprawa doktorska stanowi niewątpliwie oryginalne rozwiązanie problemu naukowego - szczególnie w aspekcie technologicznym. Przedstawione rozwiązanie potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Autorkę. Na podstawie przeprowadzonej analizy rozprawy Pani mgr inż. Magdaleny Zięby pt. „Warstwy falowodowe wytwarzane metodą zol-żel aktywowane jonami wybranych lantanowców – technologia i charakteryzacja” stwierdzam, że zaprezentowana w rozprawie analiza **spełnia w moim przekonaniu wymagania stawiane rozprawom doktorskim**. Pani mgr inż. Magdalena Zięba posiada ugruntowaną wiedzę z zakresu dyscypliny naukowej **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne**. Równocześnie **stwierdzam, że recenzowana rozprawa spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) i wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony**. Równocześnie, uwzględniając stopień zaawansowania technologicznego przeprowadzonych prac jak również działalność naukową i publikacyjną znacząco wykraczającą poza wymagania stawiane na tym etapie kariery naukowej (doktoratu) **wnioskuje o jej wyróżnienie**.

dr hab. inż. Piotr Miluski, prof. PB