

Prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska
50-370 Wrocław
ul. Janiszewskiego 11/17

Wrocław, 13.03.2025

POLITECHNIKA ŚLĄSKA
Biuro Rady Dyscypliny
Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika
i Technologie Kosmiczne
wpłynęło dnia 19.03.25
Nr

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Mariusza Florka pt.: „Modułowy System do osadzania materiałów półprzewodnikowych”, wykonana dla Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Śląskiej na podstawie uchwały w wym. Rady nr 88/2024 z dnia 19.11.2024 i pisma Przewodniczącego Rady Dyscypliny AEETK Politechniki Śląskiej dr hab. inż. Adama Gałuszki, prof. PŚ z dnia 14.01.2025r.

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Monika Kwoka
Promotor przemysłowy: dr Łukasz Walczak

Recenzowana rozprawa poświęcona jest intensywnie rozwijanej, w wiodących ośrodkach badawczo rozwojowych, problematyce opracowania urządzeń i technologii osadzania dwuwymiarowych materiałów półprzewodnikowych. W tym celu Autor rozprawy podjął się opracowania modułowego systemu, pracującego w warunkach bardzo wysokiej próżni, przeznaczonego do osadzania struktur półprzewodnikowych, opracowanie procesu osadzania wybranych, nanowarstwowych struktur półprzewodnikowych oraz walidacji systemu na podstawie charakteryzacji powierzchniowych właściwości chemicznych wytwarzanych warstw.

Przedstawiona do recenzji rozprawa liczy 118 stron i składa się ze: spisu treści, siedmiu rozdziałów, podsumowania i uwag końcowych, spisu literatury oraz wykazu rysunków. Spis literatury, który bazuje na 26 aktualnych prawidłowo wybranych, aktualnych, pozycjach literaturowych jest wystarczający dla doktoratu wdrożeniowego.

W rozdziale pierwszym rozprawy mgr inż. Mariusz Florek przedstawił motywację podjęcia tematu pracy oraz jej tezę, że „innovacyjny modułowy system próżniowy, opracowany w firmie PREVAC, wyposażony w zaawansowany manipulator podłoża z możliwością jego precyzyjnego przemieszczania i podgrzewania za pomocą szerokiej wiązki lasera lub grzałki oporowej, pozwala na kontrolowane wytwarzanie warstw półprzewodnikowych o wysokiej jednorodności strukturalnej oraz doskonałych właściwościach optoelektronicznych”.

Teza pracy oraz jej cele zostały sformułowane przez Autora jasno i poprawnie. Praca ma znaczny element nowości, a jej tematyka jest ważna dla badań stosowanych.

W rozdziale drugim Autor rozprawy zaprezentował aktualny stan wiedzy w obszarze swoich badań. Omówił ogólną klasyfikację materiałów półprzewodnikowych, ich podstawowe właściwości oraz potencjalne obszary zastosowań. W analizie swojej uwzględnił krzem, german oraz półprzewodniki złożone grup AIIIBV i AIIIBVI, transparentne tlenki metali i typowe półprzewodniki organiczne. W dalszej części rozdziału dokonał porównania wybranych technik wytwarzania tych materiałów półprzewodnikowych takich jak MBE, ALD, rozpylanie jonowe, próżniowe odparowanie termiczne oraz zaprezentował wady i zalety tych metod w zastosowaniu do wybranych materiałów. W podsumowaniu rozdziału 2 mgr inż. Mariusz Florek zidentyfikował najważniejsze wyzwania technologiczne związane z procesami wytwarzania cienkich warstw i nanostruktur (nanowarstw) wybranych rodzajów materiałów półprzewodnikowych.

Na podstawie analizy tego rozdziału (strony od 7 do 39) recenzent stwierdza, że rozprawa doktorska właściwie prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną mgr inż. Mariusza Florek w tematyce jego badań, która zaliczana jest do dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.

W rozdziale trzecim, obejmującym strony od 40 do 41, Autor rozprawy, w sposób syntetyczny, przedstawił jej cel i zakres zrealizowanych prac własnych, które obejmowały: symulacje komputerowe systemu do osadzania materiałów półprzewodnikowych w warunkach bardzo wysokiej próżni i jego elementów, projekt i wykonanie systemu i elementów komory procesowej oraz opracowanie procesu osadzania struktur warstwowych (nanowarstw) trójtlenku indu (In_2O_3) metodą wzrostu reotaksjalnego z utlenianiem próżniowym (RGVO: rheotaxial growth and vacuum oxidation) i zbadanie właściwości chemicznych osadzonych struktur metodą rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronowej (XPS).

Rozdział czwarty rozprawy, który obejmuje strony od 42 do 90, opisuje badania mgr inż. Mariusza Floka nad zaprojektowaniem i wykonaniem modułowego systemu bardzo wysokiej próżni przeznaczonego do osadzania wybranych materiałów półprzewodnikowych. Autor rozprawy przedstawił ogólne wymagania dotyczące konstrukcji i funkcjonalności systemu oraz opisał jego główne elementy składowe w postaci: próżniowej komory załadowniczej, próżniowej komory przygotowania podłoży oraz komory procesowej. Autor rozprawy omówił też zaproponowane, nowe, rozwiązania techniczne w postaci udoskonalonego manipulatora

podłoża oraz dwóch typów komórek efuzyjnych: niskotemperaturowej komórki efuzyjnej (EF 40LT) oraz dwustrefowej komórki efuzyjnej (EF40DF). W dalszej części rozdziału mgr inż. Mariusz Florek opisał dodatkowe elementy wyposażenia systemu. W ostatniej części rozdziału czwartego Autor rozprawy przedstawił rezultaty swoich badań nad optymalizacją działania wybranych elementów systemu ukierunkowaną na osadzanie nanowarstw wybranych materiałów półprzewodnikowych o właściwościach pozwalających na ich praktyczne wykorzystanie. W szczególności optymalizacji poddano sposób przechwytywania nośnika podłoża przez ramię transferu liniowego, konstrukcję modułu grzejnego, sposób pomiaru temperatury podłoża w procesie jego wygrzewania próżniowego, oraz konstrukcję dwustrefowej komórki efuzyjnej.

Na podstawie analizy materiału zawartego w rozdziale trzecim i czwartym (odpowiednio strony od 7 do 39 oraz od 40 do 90) Recenzent stwierdza, że mgr inż. Mariusz Florek wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i badań.

Rozdział piąty rozprawy zawiera opis opracowanej przez Autora rozprawy oryginalnej metodyki osadzania nanowarstw trójtlenku indu (In_2O_3) z użyciem opracowanego do tego celu modułowego systemu pracującego w warunkach wysokiej próżni metodą RGVO. Szczegółowo opisano proces doboru materiałów źródłowych do osadzania In_2O_3 , proces czyszczenia podłoża Si wiązką jonów Ar^+ , dodatkowy proces jego wygrzewania w warunkach wysokiej próżni oraz proces wytwarzania nanowarstw tlenku indu w procesie obejmującym osadzenie warstwy In w warunkach bardzo wysokiej próżni oraz jej utlenieni w atmosferze cząsteczkowego O_2 w warunkach próżniowych.

W rozdziale 6 swojej rozprawy mgr inż. Mariusz Florek przedstawił wyniki swoich prac nad charakteryzacją osadzonych warstw techniką rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronowej (XPS).

Rozdział 7 zawiera podsumowanie rezultatów prac konstrukcyjnych oraz przeprowadzonych badań. W rozdziale tym podkreślono innowacyjność zaprojektowanego systemu, jego modułowość oraz możliwości modyfikacji procesu do osadzania wybranych warstw półprzewodników w tym transparentnych.

Do najważniejszych, oryginalnych, osiągnięć Autora rozprawy należy zaliczyć:

- opracowanie koncepcji i dokumentacji projektowej modułowego systemu próżniowego do nanoszenia warstw półprzewodnikowych z wykorzystaniem oprogramowania Solid Works,
- przygotowanie schematów układów pompowych, dozowania gazu, pneumatycznych i chłodzenia systemu,
- opracowanie koncepcji, wykonanie dokumentacji technicznej i integracja z systemem dwóch nowych konstrukcji komórek efuzyjnych: niskotemperaturowej EF 40LT oraz dwustrefowej EF40DF. W wypadku komórki efuzyjnej EF 40DF uzyskano poprawę czasu reakcji termopary na zmiany temperatury tygla,
- zaprojektowanie udoskonalonego manipulatora podłoża, pozwalającego na precyzyjne ułożenie próbki oraz lepszą regulację jej temperatury przy użyciu szerokiej wiązki lasera lub grzałki oporowej,
- zbadanie rozkładu temperatury wzdłuż średnicy podłoża w procesie jego wygrzewania oraz modyfikacja modułu wygrzewania nośnika podłoża ukierunkowana na poprawę jednorodności temperatury,
- optymalizacja parametrów technologicznych systemu dedykowanego do osadzania warstw i nanostruktur In_2O_3 , metodą wzrostu reotaksjalnego z utlenianiem próżniowym (RVGO), z wykorzystaniem dwustrefowej komórki efuzyjnej EF40LT oraz opracowanie dedykowanej metodyki osadzania tych warstw.

Wykonane przez mgr inż. Mariusza Florka prace symulacyjne, projektowe i konstrukcyjne oraz opracowany proces osadzania pozwoliły na uzyskanie nanowarstw testowych RVGO In_2O_3 , o dwóch grubościach (15 nm oraz 20 nm). Pomiary właściwości tych warstw metodą rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronowej (XPS) wykonane w Instytucie Katalizy i Chemii Powierzchni PAN w Krakowie, pozwoliły na analizę stechiometrii powierzchniowej i potwierdziły przydatność opracowanego i wytworzonego w firmie PREVAC systemu do osadzania warstw trójtlenku indu metodą RVGO.

Na podstawie analizy rozdziałów 3 do 7 Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Mariusz Florek stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego o dużym potencjale aplikacyjnym w sferze gospodarczej.

Wyniki badań mgr inż. Mariusz Florek są istotne dla rozwoju technologii wytwarzania nanowarstw półprzewodnikowych i stanowią ważny jego wkład ten obszar badań nad wytwarzaniem półprzewodników transparentnych, co jest ważne z punktu widzenia potencjalnych zastosowań takich materiałów.

Mgr inż. Mariusz Florek osiągnął wszystkie postawione cele rozprawy oraz zweryfikował sformułowaną hipotezę badawczą. Wielowątkowość prowadzonych prac badawczych obejmujących: symulacje, prace konstrukcyjne i technologiczne, wytwarzanie nanowarstw testowych RGVO In_2O_3 i ich charakteryzację pozwalają stwierdzić, że do rozwiązania postawionych zagadnień zostały użyte właściwe metody badawcze, które umożliwiły Autorowi udowodnienie sformułowanej tezy pracy oraz potwierdziły, że przyjął on prawidłowe założenia badawcze.

Autor rozprawy wykazał się umiejętnością prawidłowego i przekonującego zaprezentowania uzyskanych wyników swoich badań obejmujących symulacje, prace konstrukcyjne, technologiczne i pomiary. Dokonał też właściwego podziału treści pracy między poszczególnymi rozdziałami.

Rozprawa napisana jest w sposób staranny, jasny i logiczny, poprawny pod względem językowym i stylistycznym. Rysunki mają odpowiednią wielkość i są też prawidłowo opisane.

Recenzowana rozprawa dotyczy złożonej problematyki zaprojektowania i wytworzenia modułowego systemu do osadzania wybranych warstw półprzewodnikowych oraz weryfikacji przydatności tego systemu do osadzania transparentnej warstwy In_2O_3 techniką RGVO. Powoduje to, że uzyskane wyniki badań są wartościowe. Ze względu na złożoność zagadnienia Recenzent uważa, że rozprawa nie ma istotnie słabych stron i niedoskonałości. Pewien niedosyt recenzenta budzi jedynie ograniczona ilość informacji dotyczących wpływu procesu osadzania warstw In_2O_3 na ich parametry. Recenzent chciałby też uzyskać informację czy zaprojektowany system mógłby zostać zastosowany do wytwarzania struktur 2D np. dichalkogenków metali. Niezależnie od tych wątpliwości jednoznacznie stwierdzam, na podstawie rezultatów symulacji, przeprowadzonych prac konstrukcyjnych i technologicznych oraz wyników pomiarów testowych nanowarstw RGVO In_2O_3 , że rozprawa przygotowana przez mgr inż. Mariusz Florek jest oryginalna i wartościowa.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Mariusza Florka ma również duże znaczenie praktyczne, ponieważ zawiera ona całościowy opis metodyki projektowania i konstruowania skompilowanego systemu technologicznego dedykowanego do osadzania nanostruktur (nanowarstw) trudnego technologicznie materiału.

Ze względu na innowacyjność rozprawy oraz jej duże, potencjalne, możliwości aplikacyjne uważam ją za bardzo dobrą.

Podsumowując Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Mariusza Florka stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autora oraz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr inż. Mariusza Florka i pozytywną ocenę Jego pracy doktorskiej uważam, że w myśl ustawy z 20 lipca 2018 r (Dz. U. Nr Dz.U.2022.574, z późn. zm.) Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, mgr inż. Mariusz Florek spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne oraz wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej pracy.