

Prof. dr hab. Tomasz Stobiecki
Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Instytut Elektroniki
e-mail: stobieck@agh.edu.pl

Kraków, 20. 09. 2024

Recenzja

pracy doktorskiej mgra inż. Michała Stępnika

“Opracowanie technologii selektywnej epitaksji MOVPE struktur AlIn do zastosowań w przyrządach elektronicznych”

Promotorzy: dr hab. inż. Mateusz Wośko, prof. uczelni

prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz

Recenzja pracy doktorskiej o ww. tytule w dziedzinie **nauk inżyneryjno-technicznych** w dyscyplinie naukowej: **automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne** została opracowana na podstawie uchwały Rady Dyscypliny Naukowej **Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne** Politechniki Wrocławskiej nr 912/41/RDND 02/2021 – 2024 z dnia 8 lipca 2024 r.

Wybór tematu pracy

Praca doktorska mgra inż. Michała Stępnika jest pracą doświadczalno – teoretyczną i dotyczy opracowania technologii epitaksjalnego wzrostu półprzewodnikowych warstw AlIn (A: Ga, In, Al) z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (MOVPE: MetalOrganic Vapour-Phase Epitaxy) w zastosowaniu na przyrządy optoelektroniczne takie jak: diody laserowe i elektroluminescencyjne oraz ogniwa słoneczne. Szczególnie istotną wartością tej pracy jest opracowanie procesu technologicznego dla przemysłowego systemu epitaksjalnego AIXTRON CCS 3x2”. W mojej opinii podjęcie tematu optymalizacji procesu technologicznego na nowoczesnej maszynie jest ogromnie ważne dla zespołu badawczego z Katedry Mikroelektroniki i Nanotechnologii pani prof. Reginy Paszkiewicz, dlatego uważam temat za aktualny i naukowo oryginalny w zakresie technologii wytwarzania przyrządów optoelektronicznych.

Teza pracy

W rozdziale 1. *Motywacja i cele pracy* autor rozprawy formułuje następującą tezę: **„Profile półprzewodnikowych struktur przyrządowych AlIn, osadzanych metodą selektywnej epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych na częściowo zamaskowanym podłożu, są zdeterminowane parametrami procesu oraz materiałem i geometrią warstwy maskującej. Decydujący wpływ na proces selektywnego osadzania struktur AlIn ma temperatura podłoża”**. Dalej autor rozprawy formułuje cele, cztery eksperymentalne - odnoszą się do optymalizacji i wyznaczenia parametrów procesu oraz dwa teoretyczne - bazujące na danych eksperymentalnych, które dotyczą opracowania numerycznego modelu procesu selektywnej epitaksji z fazy gazowej oraz implementacji oprogramowania do symulacji selektywnego wzrostu warstw AlIn.

Treść pracy i uwagi ogólne

Przedstawiona rozprawa doktorska liczy 208 stron ma tradycyjny układ, została podzielona na dwie części: eksperymentalną opisującą *Selektywną epitaksję z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (SAMOVPE)* i część teoretyczną *Modelowanie numeryczne selektywnej epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych*. W części eksperymentalnej znajdujemy pięć rozdziałów, każdy podzielony na liczne podrozdziały, główne rozdziały kończy podsumowanie. Część teoretyczna ma jeden rozdział zatytułowany *Modelowanie numeryczne selektywnego wzrostu związków AIIIN techniką MOVPE epitaksja z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych*. Pracę kończy główne podsumowanie, liczna bibliografia 163 pozycje, spis rysunków i tabel oraz aneksy A i B zawierające tabele: w aneksie A wartości *efektywnej drogi dyfuzji prekursorów SA-MOVPE* (wyniki własne i literaturowe), w aneksie B dane *dyfuzyjności wybranych związków metaloorganicznych galu w wodorze* wyliczoną na podstawie kinetycznej teorii gazów Chapmana-Enskog. Na początku rozprawy znajdujemy spis skrótów i oznaczeń. We wstępie autor rozprawy uzasadnia zastosowanie technologii MOVPE do produkcji przemysłowej elementów optoelektronicznych dzięki osadzaniu związków AIIIN metodą addytywną na częściowo zamaskowanym podłożu (tzw. epitaksja selektywna). Metoda ta, dzięki zastosowaniu maski, umożliwia przestrzenne formowanie struktur przyrządowych bez udziału trawienia, podczas gdy metoda subtraktywna wymaga trawienia warstwy półprzewodnikowej (stosowana powszechnie w technologiach krzemowych), co komplikuje proces wytwarzania elementów.

W rozdziale 1 *Motywacja i cele pracy* autor rozprawy wprowadza czytelnika w pojęcia i podstawy procesu selektywnej epitaksji warstwy AIIIN na zamaskowanym podłożu: efektywną długość drogi dyfuzji prekursorów w fazie gazowej λ_{eff} i współczynnik przyspieszenia wzrostu GRE (*growth rate enhancement*). Podsumowuje omówieniem czynników wpływających na selektywny wzrost warstwy AIIIN, które związane są z procesem MOVPE oraz warstwą maskującą.

Część pierwsza *I. Selektywna epitaksja z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych (SA-MOVPE Selective Area Metalorganic Vapour-Phase Epitaxy)* zaczyna się rozdziałem 2. *Osadzanie związków AIIIN techniką SA-MOVPE* podzielonym na pięć podrozdziałów (od 2.1 do 2.5), w których doktorant na podstawie literatury zapoznaje czytelnika z podstawowymi zjawiskami fizycznymi i chemicznymi zachodzącymi podczas epitaksjalnego wzrostu warstwy AIIIN w zależności od rodzaju podłoża (krystaliczne Al_2O_3 , amorficzne SiO_2 i Si_3N_4) i warunków transportu masy na częściowo zamaskowanym podłożu. Należy podkreślić, że opis i analiza procesów selektywnej epitaksji zostały zredagowane wnikliwie i naukowo dojrzałe z dużą wiedzą teoretyczną z fizyki. Z kolei rozdział 2.5 *Proces technologiczny* podzielony jest na dalsze trzy podrozdziały (od 2.5.1 do 2.5.3), w których doktorant opisuje procesy technologiczne w (2.5.1 i 2.5.2):

- stanowisko technologiczne MOVPE AIXTRON CCS 3x2" (2.5.1), podaje parametry procesu i wyposażenie,
- stanowisko do osadzania warstw maskujących PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) (2.5.2) Oxford Instruments PlasmaLab 80 Plus, podaje parametry procesu czyszczenia podłoża epitaksjalnego (Tab. 2.9) i parametry osadzania warstw maskujących SiO_2 i Si_3N_4 (Tab. 2.10), metaliczne warstwy maskujące (Mo, V, W, Ti, Ru) nanosił przy użyciu systemu PVD₂₂₅ K. J. Lesker.

W podrozdziale 2.5.3 doktorant opisuje zastosowane techniki pomiarowe: grubości i topografii powierzchni próbek przy użyciu profilometru optycznego Taylor Hobson Talysurf CCI, skaningowego mikroskopu elektronowego SEM Hitachi SU6600 oraz mikroskopu sił atomowych AFM Bruker Multimode. Skład chemiczny próbek badał metodą EDS (Energy dispersive X-ray Spectroscopy) przy pomocy mikroskopu Hitachi SU6600 natomiast efekty zmian powierzchniowego składu chemicznego, na przykład pasożytniczej warstwy maskującej, metodą XPS (*X-ray photoelectron spectroscopy*). Charakteryzację elektryczną osadzonych warstw badał przy pomocy mikroskopu AFM Bruker Multimode ze sterownikiem Nanoscope V. Niestety, doktorant nanosząc warstwy **epitaksjalne** o strukturze wielowarstwowej (rys. 2.16) nie badał jakości wzrostu epitaksjalnego (monokrystaliczności) tych warstw metodami dyfrakcji elektronowej na poziomie atomowej zdolności rozdzielczej, na przykład transmisyjną mikroskopią elektronową (*TEM cross section*). W rozdziale 4.3 *Wpływ orientacji krystalograficznej okien w warstwie maskującej na selektywny wzrost struktur AlIIN nie znajduję badań strukturalnych*, dla krystalograficznie ukierunkowanego wzrostu warstw AlIIN, tylko analizę kątową wpływu orientacji krystalograficznej na profil osadzanych warstw poprzez badania współczynnika przyspieszenia wzrostu struktury epitaksjalnej GRE i współczynnika wzrostu krawędziowego EGF.

Po omówieniu procesów osadzania warstw AlIIN autor rozprawy zajął się w rozdziale 3. *Wpływem materiału maski na selektywny wzrost struktur AlIIN*, w rozdziale tym omówił badania warstw SiO_x i SiN_x , na dielektryczne maski wytworzone techniką PECVD oraz metaliczne maski Ti, V, Mo, Ru, W, osadzone metodą PVD parowania z użyciem wiązki elektronowej. Ocenę warstw maskujących na wzrost struktur AlIIN przeprowadził na podstawie kryteriów selektywności, reaktywności chemicznej oraz stabilności temperaturowej i chemicznej, uwzględniając kształty geometryczne maski oraz parametry procesu w komorze reaktora epitaksjalnego. Pod względem selektywności (podrozdział 3.1) jakościowo porównywał maski dielektryczne i metaliczne ilustrując badania licznymi obrazami SEM, natomiast ilościowo kinetycznym modelem pokrycia zaczerpniętym z literatury. Badania przeprowadził na: metalicznych maskach V, dwuwarstwy V/Mo Ti, W i dielektrycznych maskach SiO_2 i Si_3N_4 . Wykazał, że w przypadku epitaksji azotku galu maski dielektryczne z SiO_2 i Si_3N_4 , osadzone techniką PECVD, cechowały się większą selektywnością niż maski metaliczne osiągając w szerokim zakresie parametrów procesu MOVPE stuprocentową selektywność ($S = 1$) co związane jest ze zmianami energii swobodnej Gibbsa w wyniku reakcji między atomami III grupy a warstwą maskującą. Badając właściwości katalityczne (podrozdział 3.2), za pomocą lokalnych pomiarów składu chemicznego EDS wyznaczył zmiany zawartości pierwiastków w różnych miejscach próbki (rys.3.10), w warstwie GaN, podłożu (Al_2O_3), masce (Ti), polikryształów GaN na masce. Są to pomiary jakościowe informujące o rodzaju pierwiastków w miejscu pomiaru, z braku wzorców **nie są pomiarami ilościowymi**, dlatego wyniki zestawione w tabeli 3.1 są bardzo orientacyjne. Ciekawe są natomiast różne efekty krystalizacji na krawędziach maski wanadu ilustrowane licznymi obrazami SEM (rys.3.14, 3.16, 3.17). Ostatecznie doktorant wykazał, że warstwy maskujące wykonane z V, Mo, Ti i W katalizują rozkład bufora GaN, efektu tego nie stwierdził dla metalicznej maski Ru, jak również dla warstw dielektrycznych (SiO_2 i Si_3N_4). Stabilność temperaturowa (podrozdział 3.3) warstwy maskującej, jak wykazał doktorant, zależy od różnicy we współczynnikach rozszerzalności cieplnej (istotne dla masek dwuwarstwowych V/Mo) ma wpływ na azotowanie materiału masek metalicznych jak i dielektrycznych (SiO_x) a poprzez segregacje fazową w wysokiej temperaturze (300 – 600°C) prowadzi do chropowatości i tworzenia nanoklastrów Si w maskach SiO_x . Stabilność chemiczną (podrozdział 3.4) doktorant badał, ze względu na tworzenie pasożytniczej warstwy maskującej uformowanej wokół maski SiO_x , metodą XPS rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów (współpraca z Instytutem Fizyki

Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego). Zastosował oryginalną metodę identyfikacji wiązań chemicznych na powierzchni pasożytniczego obszaru maskowania (DFR), identyfikuje tlenki i azotki Ga i Si, wiązania związków węgla z tlenem (rys.3.25). Szkoda, że nie porównał między sobą stanów powierzchniowych maski SiO₂, warstwy GaN i warstwy pasożytniczej (proszę o komentarz w czasie obrony). Tego typu analiza dałaby nam informacje o czystości technologii MOVPE i PECVD, gdyż spektroskopia XPS jest dedykowaną metodą analizy powierzchni. Potwierdzenie tworzenia się warstwy pasożytniczej wykazał obrazami SEM (rys. 3.23) oraz pomiarami elektrycznymi z zastosowaniem skaningowej mikroskopii pojemnościowej SCM i rezystancji rozproszeniowej SSRM (rys.3.26). Badania podsumował, ze wskazaniem na dominującą właściwość selektywności oraz katalizy, pasożytniczego maskowania, wzrostu rozwiniętej mikrostruktury na powierzchni warstwy maskujące (V, Mo, Ti, W, Ru, Si O₂ i Si₃N₄) w epitaksji azotku galu techniką MOVPE (tabela 3.4).

*Wpływ geometrii warstwy maskującej na selektywny wzrost struktur AlIIN doktorant opisał w rozdziale 4. W tym przypadku problem badawczy sprowadził do projektowania wymiarów geometrycznych maski fotolitograficznej - determinującej profil osadzanych struktur przyrządowych – przy uwzględnieniu procesów fizyko-chemicznych, w szczególności efektywnej długości drogi dyfuzji λ_{eff} metaloorganicznych reagentów gazowych. Jeżeli efektywna długość drogi dyfuzji znacznie przekracza wymiary planarne okna w warstwie maskującej obserwujemy jednorodny wzrost warstwy epitaksjalnej, natomiast jeżeli efektywna długość drogi dyfuzji reagentów jest mniejsza niż planarne wymiary okna, to obserwowane jest zwiększone nagromadzenie materiału epitaksjalnego przy krawędzi maski. Doktorant wprowadza parametr wzrostu krawędziowego EGF (*edge growth factor*), wyznaczony ze stosunku wysokości struktury przy krawędzi, do wysokości na środku struktury epitaksjalnej mierzony profilometrem optycznym i mikroskopem sił atomowych AFM (rys. 4.3 wyniki porównywalne w granicach błędu pomiarowego). Analizę efektów krawędziowych wyrażonych parametrami EGF i GRE (*growth rate enhancement*) bada w funkcji szerokości okna w , szerokości maski m , również od wpływu efektu superpozycji masek w (podrozdział 4.2 *Zjawisko superpozycji maski*). Obserwuje niesymetryczne efekty krawędziowe i wysokościowe spowodowane zmiennością parametrów, w , m i d (szerokość warstwy separującej). Efekt superpozycji modeluje i porównuje z eksperymentem (rys. 4.27). Uważam te badania za bardzo wartościowe dla zastosowań z punktu widzenia optymalnego upakowania przyrządów na podłożu. Mam zastrzeżenia do podrozdziału 4.3 *Wpływ orientacji krystalograficznej okien w warstwie maskującej na selektywny wzrost struktur AlIIN*, w którym doktorant zakłada epitaksjalny, bez defektów wzrost warstwy GaN, w oknie maski SiO₂, na monokrystalicznym podłożu Al₂O₃ (szafirze), wymuszony teksturą podłoża, brak niestety eksperymentów dyfrakcyjnych (wspomnianych już powyżej w niniejszej recenzji) potwierdzających takie założenie. Nie czuje się przekonany, że pomijalnie małe zmiany w pomiarach kątowych parametrów GRE i EGF (rys.4.29) mogą świadczyć, za epitaksjalnym wzrostem warstwy GaN.*

Badanie warunków panujących w komorze reaktora epitaksjalnego doktorant opisał w rozdziale 5 *Wpływ wybranych parametrów procesu MOVPE na selektywny wzrost struktur AlIIN*. Do najważniejszych parametrów determinujących wzrost struktur przyrządowych, należy zaliczyć: temperaturę podłoża (jej wpływ opisał w podrozdziale 5.1), ciśnienie (wpływ opisał w podrozdziale 5.2), stosunek molowy reagentów (wpływ opisał w podrozdział 5.3). Doktorant na str. 128 cytuje: „W celu przeprowadzenia ilościowej analizy wpływu poszczególnych parametrów procesu MOVPE na profil wytworzonych struktur, wprowadzono pojęcie czułości współczynnika wzrostu krawędziowego, zdefiniowanego jako pochodną „współczynnika EGF... po temperaturze (5.2) lub ciśnieniu (5.3) dla stałej szerokości okna w i maski m , zgodnie z równaniem (5.1)....” poza odpowiednimi wzorami na

czułość s termiczną i baryczną parametru EGF nie znajduję systematycznych badań czułości. Natomiast, w podrozdziale 5.1 *Wpływ temperatury ...* znajdujemy analizę współczynnika przyspieszenia wzrostu GRE_c na środku struktury i krawędziowego GRE_e funkcji temperatury, widać że GRE nieznacznie maleje w przedziale temperatury 990°C – 1045°C a w temperaturze ok. 1100°C gwałtownie rośnie (jest to temperatura silnego wzrostu obszaru pasożytniczego, rys. 5.4). Z kolei współczynnik wzrostu krawędziowego EGF silnie maleje ze wzrostem temperatury dla dużych szerokości w (160 μm) warstwy GaN (wysoka czułość s profilu temperaturowego), prawie się nie zmienia dla małych szerokości w . Wyniki te dobrze korelują z efektywną drogą dyfuzji λ_{eff} , która rośnie z temperaturą, dłuższa droga dyfuzji reagentów w fazie gazowej odpowiada mniejszej różnicy wysokości między krawędzią a środkiem osadzanych struktur, co jest korzystnym efektem na wytwarzanie jednorodnych struktur przyrzadowych. W podrozdziale 5.2 *Wpływ ciśnienia na selektywny wzrost struktur AlIIN*, doktorant badając wpływ ciśnienia postępuje podobnie jak w przypadku temperatury wykazując, że współczynnik przyspieszenia wzrostu GRE_c , wyznaczonego na środku, w funkcji ciśnienia w komorze reaktora (rys. 5.6a) w zakresie od 50 hPa do 125 hPa lekko wzrasta, podczas gdy wysokość struktury mierzona przy krawędzi maski wyrażona współczynnikiem GRE_e nie zmienia się w sposób istotny. Takie zachowanie prowadzi do malenia efektywnej drogi dyfuzji λ_{eff} ze wzrostem ciśnienia do 100 hPa, powyżej λ_{eff} się nie zmienia (rys.5.8). Z kolei efekty zmian obszaru pasożytniczego maskowania od ciśnienia w ustalonej temperaturze ($T=1045^\circ\text{C}$) i przy ustalonym stosunku molowym amoniaku do trimetylogalu wynoszącym 1000 mol/mol doktorant przedstawił na rysunkach 5.9 i 5.10 z badań otrzymał, że dla ciśnienia większego od 500 hPa szerokość obszaru pasożytniczego się nasycza. Badania *Wpływu stosunku molowego reagentów na selektywny wzrost struktur AlIIN* doktorant opisał w podrozdziale 5.3 przeprowadzając dwa eksperymenty selektywnej epitaksji pierwszy pod wysokim ciśnieniem 800 hPa i niskim 50 hPa w temperaturze 1045°C, zmieniając stosunek molowy (poprzez zmianę przepływu Q reagentów) amoniaku NH_3 do trimetylogalu w zakresie od 1000 mol/mol do 5100 mol/mol dla ustalonych szerokości maski m i okna w . Przeprowadzone pomiary szerokości obszaru pasożytniczego DFW i współczynnika wzrostu krawędziowego DGF pozwoliły mu stwierdzić, że stosunek molowy reagentów nie wpływa istotnie na efektywną długość drogi dyfuzji λ_{eff} związków metaloorganicznych.

Część II Modelowanie numeryczne selektywnej epitaksji z fazy gazowej z użyciem związków metaloorganicznych składa się z czterech podrozdziałów modeli teoretycznych, w piątym znajdujemy opis oprogramowania do symulacji selektywnego wzrostu warstwy AlIIN. We wstępie do modelowania doktorant odwołuje się do matematycznego modelu Gibbona (1993) selektywnej epitaksji MOVPE w reaktorach z przepływem stagnacyjnym, opartym na równaniu Laplace'a dyfuzji reagentów gazowych. Doktorant adoptuje go na swoje potrzeby w rozdziale 6.2 *Model dyfuzji prekursorów epitaksji w fazie gazowej* i weryfikuje model poprzez porównanie pomiarów profilu współczynnika przyspieszenia wzrostu GRE z profilem GRE symulowanym (rys. 6.8). Kształt teoretycznego przebiegu profilu GRE , model Gibbona zmodyfikowany przez mgra Stępnika, odtwarza bardzo podobnie jak w eksperymencie (równoległe przesunięcie wyników), jednakowoż występuje różnica pomiędzy wartościami GRE eksperymentalnymi (większe wartości) a symulowanymi pomimo rozsądnej adjustacji parametrów efektywnej drogi dyfuzji λ_{eff} i hipotetycznej szerokość przykrawędziowego obszaru struktury epitaksjalnej ξ . Dla osiągnięcia zgodności doktorant wprowadza umowny wektor przesunięcia. Czy wektor przesunięcia można wyjaśnić fizycznymi efektami (proszę o komentarz podczas obrony)? Owszem, doktorant wzmiankuje o istotnych zjawiskach takich jak dyfuzja powierzchniowa prekursorów epitaksji (rozdział 6.3 *Model dyfuzji powierzchniowej prekursorów epitaksji*) i azotowanie maski SiO_2 (rozdział 6.4 *Modelowanie procesu azotowania maski SiO_2* w

amoniaku). Opisuje te modele teoretycznie w oparciu o literaturę, swobodnie porusza się w zaawansowanych teoriach fizycznych, ale nie wprowadza korekty na wymienione zjawiska do symulacji numerycznej. Część II teoretyczną modelowania numerycznego kończy rozdział 6.5 *Oprogramowanie do symulacji selektywnego wzrostu związków AlIIN*, w którym doktorant opisuje stworzone przez siebie oprogramowanie wersja *demonstrator* umożliwiające zarówno symulacje profili struktur epitaksjalnych dla wybranego materiału o określonej geometrii warstwy maskującej, jak również wyznaczanie efektywnej długości drogi dyfuzji λ_{eff} reagentów metaloorganicznych. Warunki brzegowe doktorant rozwiązywał z wykorzystaniem metody elementów skończonych w środowisku programistycznym MATLAB. Schemat procedury wyznaczania efektywnej długości drogi dyfuzji reagentów przedstawił na rysunku 6.16, wynik symulacji selektywnego wzrostu GaN w postaciach dwu- i trój-wymiarowym pokazał na rysunki 6.17. Doktorant oprogramowanie przygotował do udostępnienia użytkownikom zewnętrznym za pośrednictwem przeglądarki internetowej.

Rozprawę doktorską mgr inż. Michała Stępniaka kończy ogólne podsumowanie zredagowane treściwie, doktorant wymienia osiągnięte cele, które udowadniają postawioną tezę, którą można streścić do określenia, **że decydujący wpływ na proces selektywnego osadzania struktur AlIIN mają parametry procesu w tym największy temperatura podłoża.**

Oceniając całość rozprawy pragnę podkreślić, że układ treści pracy jest przejrzysty, rozdziały zostały ułożone logicznie. Forma graficzna bardzo staranna. Praca jest bardzo obszerna, w mojej opinii za obszerna, z pewnością dlatego, że doktorant - być może też pod wpływem promotorów - chciał napisać kompletną (zawierającą eksperyment, modelowanie teoretyczne, solidne studia literaturowe) monografię o technologii MOVPE, na pewno potrzebną dla doktorantów zespołu Katedry Mikroelektroniki i Nanotechnologii. Mgr inż. Michał Stępnia ma łatwość wypowiedzi „lekkie pióro”, miejscami praca jest rozwlekła, język rozprawy niestety nie jest dostatecznie ścisły, szczególnie w podsumowaniach rozdziałów. Pomimo wspomnianej wady oceniam pracę bardzo wysoko, nie zauważyłem błędów i pomyłek, co świadczy o dużej staranności edytorskiej doktoranta. W pracy doktorant powołuje się na cztery publikacje, w których jest pierwszym autorem, również autorem korespondencyjnym opublikowane w wysokoindeksowanych czasopismach, pozycje [6], [21], [22], [23]: *Electronics* (2020), *Materials Science in Semiconductor Processing* (2023) dwie, *Applied Surface Science* (2023). W wymienionych publikacjach znajdujemy większość wyników z pracy doktorskiej. Ponieważ praca dotyczy technologii przyrządowej brak mi porównania technologii MOVPE z innymi stosowanymi do przyrządów optoelektronicznych AlIIN, ze szczególnym uwzględnieniem możliwości wytwarzania przemysłowego, proszę o komentarz podczas obrony. Powyższe uwagi krytyczne i zadane pytania wynikają z zaciekawienia tematyką, mają charakter dyskusji naukowej i nie umniejszają mojej **bardzo wysokiej ocenie rozprawy doktorskiej** mgr inż. Michała Stępnia.

Ocena rozprawy i uzasadnienie wyróżnienia

Podsumowując stwierdzam, że praca doktorska mgr inż. Michała Stępnia pt. *“Opracowanie technologii selektywnej epitaksji MOVPE struktur AlIIN do zastosowań w przyrządach elektronicznych”* zawiera bardzo interesujące i oryginalne wyniki optymalizacji technologii MOVPE i symulacji numerycznych procesu.

Na szczególne podkreślenie zasługują następujące oryginalne wyniki:

- zbadanie zjawiska pasożytniczego maskowania (wyniki opublikowane w [21] i [22]),
- ograniczenie efektu krawędziowego na profil struktur epitaksjalnych AlIn poprzez zmianę geometrii maski,
- zbadanie wpływu temperatury podłoża i ciśnienia w komorze reaktora na profil epitaksjalnie struktur AlIn,
- opracowanie procedury numerycznego szacowania efektywnej długości drogi dyfuzji λ_{eff} reagentów przy zadanych parametrach procesu MOVPE,
- opracowanie oprogramowania *demonstrator* przeznaczonego do symulacji selektywnego wzrostu struktur AlIn.

Biorąc pod uwagę bardzo nowatorskie i oryginalne wyniki badań, ich wnikliwe i krytyczne opracowanie w formie rozprawy doktorskiej stawiam wniosek o wyróżnienie pracy doktorskiej pana mgr inż. Michała Stępniaaka pt. *“Opracowanie technologii selektywnej epitaksji MOVPE struktur AlIn do zastosowań w przyrządach elektronicznych”*.

Ponadto pragnę nadmienić, że na dorobek naukowy mgr inż. Michała Stępniaaka dołączony do dokumentacji składa się: 5 publikacji z Listy Filadelfijskiej (we wszystkich jest pierwszym autorem).

Wniosek końcowy

Na podstawie przeprowadzonej oceny rozprawy doktorskiej stwierdzam, że spełnia ona z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Dlatego biorąc pod uwagę bardzo wysoką naukowo ocenę Jego rozprawy doktorskiej i dorobek publikacyjny uważam, że w myśl ustawy z 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki mgr inż. Michał Stępniaak spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk technicznych, w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, wnioskuję o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawionej rozprawy oraz stawiam wniosek o jej wyróżnienie.

Tomasz Holbicki

