

Warszawa, 25.09.2024

prof. dr hab. inż. Jan Szmidt
Instytut Mikroelektroniki i Optoelektroniki
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych
Politechnika Warszawska

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**DLA RADY DYSCYPLINY NAUKOWEJ AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA,
ELEKTROTECHNIKA I TECHNOLOGIE KOSMICZNE POLITECHNIKI
WROCLAWSKIEJ**

Tytuł rozprawy:

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

Autor rozprawy:

mgr inż. Michał Stępiak

Promotorzy:

dr hab. inż. Mateusz Wośko

prof. dr hab. inż. Regina Paszkiewicz

Wstęp

Związki AIIIN tj. azotki Glinu (AlN), Galu (GaN) i Indu (InN) są grupą związków, które znajdują coraz większe obszary aplikacji i przewiduje się dla nich nowe obszary zastosowań, co implikuje rozwój badań w tym zakresie w wielu laboratoriach na świecie.

Na bazie tych związków opracowywane są takie układy trójskładnikowe jak $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$, $\text{Al}_x\text{In}_{1-x}\text{N}$, które dzięki inżynierii energetycznego pasma zabronionego umożliwiają np. wytwarzanie emiterów promieniowania elektromagnetycznego w ciągłym zakresie długości fali od podczerwieni do ultrafioletu.

Nie jest to jedyna zaleta tych materiałów, z których największe zastosowanie znalazł GaN i jego pochodne w związkach trójskładnikowych, zwłaszcza z glinem (Al), np. do konstrukcji przyrządów półprzewodnikowych dużej mocy (gdzie konkurentem obecnie jest tylko węgiel krzemu SiC) i częstotliwości np. tranzystorów typu HEMT, a także laserów dużej mocy, rezonatorów elektrochemicznych, zasilaczach UPS, lokalnych sieciach elektrycznych w budynkach, silnikach elektrycznych, napędach pojazdów czy maszynach roboczych.

Należy podkreślić możliwości, jakie dają związki AIIIN w zintegrowanych urządzeniach fotonicznych i w końcu w fotonice scalonej, przed którą rysuje się wielka przyszłość i co warto podkreślić także w Polsce. Najwięcej zastosowań znajduje tutaj azotek galu (GaN).

Szczególne miejsce w tych procesach zajmuje selektywna epitaksja związków AIIIN, która stwarza nowe możliwości, zwłaszcza w konstrukcji monolitycznych przyrządów fotonicznych, takich jak lasery, światłowody, detektory i szereg innych. Jednak selektywność w przypadku mikrometrycznych czy nanometrycznych rozmiarów heteroepitaksjalnych wysp generuje konieczność uwzględnienia szeregu specyficznych procesów fizykochemicznych zachodzących w reaktorze i na lokalnie maskowanych fragmentach podłoża – zarówno w obszarze odsłoniętych obszarów podłoża jak i na powierzchni materiałów maskujących, a także wpływu kształtów i geometrii obszarów heteroepitaksjalnych.

Monokrystalizacja azotku galu jest możliwa metodą wysokociśnieniową wysokotemperaturową, ale od kilku lat opracowano metody bardziej praktyczne i tańsze (HVPE – Hydride Vapor Phase Epitaxy) czy amonothermalna. Mimo tego, głównym nurtem wytwarzania GaN dla większości zastosowań stała się jednak heteroepitaksja azotku galu na różnych podłożach. Należy uwzględnić tutaj szereg uwarunkowań. Najważniejsze z nich to struktura krystaliczna i niedopasowanie sieciowe, współczynnik rozszerzalności termicznej,

przewodność cieplna czy w końcu gęstość dyslokacji generowanych w warstwie epitaksjalnej. Analiza materiałoznawcza wskazuje jako możliwe do zastosowania podłoża 4H – SiC i szafir Al_2O_3 oraz ewentualnie krzem. Ten ostatni głównie z powodu ceny i dostępności, a także możliwości integracji funkcji *stricte* elektronicznych z fonicznymi w jednym układzie monolitycznym. Autor rozprawy dokonał krytycznej analizy wyboru podłoża do eksperymentów technologicznych (rozdz. 2.1, str. 32 i kolejne), związanych z selektywną epitaksją GaN, dokonując wyboru szafiru jako zdecydowanie tańszego (a planował bardzo dużą liczbę eksperymentów), ale także uwzględniając jego odporność chemiczną oraz stabilność w temperaturach epitaksji azotku galu ($\sim 1000^\circ C$). Uważam, że był to wybór uzasadniony i jak pokazuje całość pracy, trafny.

Jednak za podstawowy problem w procesie selektywnej epitaksji warstw GaN Autor, obok parametrów procesu epitaksji metodą SA-MOVPE uważa dobór materiału maski.

Temu tematowi Autor poświęcił rozważania zaraz na początku pracy formułując przy okazji od razu główne parametry, którymi będzie operował w pracy, związane z doбором maski i jej geometrią oraz wymiarami okien, a także zwracając uwagę na ważne efekty, np. efekt sąsiedztwa okien. Tę część pracy wraz ze Wstępem należy uznać za wprowadzenie do lektury rozprawy, a kończy się ona tezą rozprawy i głównymi sześcioma celami, których osiągnięcie umożliwiłoby udowodnienie tezy.

Zarówno teza jak i cele do osiągnięcia sformułowane są jasno i zarazem zwięźle. Określiłbym je jako bardzo ambitne i rozległe, zawierające w sobie elementy inwencji naukowej oraz sztuki technologicznej, ale także jako wielowymiarowe, bowiem łączą ze sobą czynniki *stricte* fizykochemiczne związane z procesem osadzania warstw metodą epitaksji ze związków metaloorganicznych MOVPE, z cechami materiału podłoża i maski uwzględniając także geometrię obszarów maskujących i ich wpływ na jakość uzyskiwanych selektywnie struktur GaN. Analiza tych ostatnich uwarunkowań, zresztą trudnych do jednoznacznego sparametryzowania, stanowi chyba jedną z najważniejszych części pracy, umożliwiając wykorzystanie ich wprost w praktyce technologii SA-MOVPE i nie tylko. Mogą one zostać uogólnione i wykorzystane w innych szeroko rozumianych procesach selektywnej epitaksji. Zostało to bardzo trafnie pokazane na diagramie uzasadniającym sformułowanie celów pracy (str. 28). Do realizacji tych bardzo ambitnych i co podkreślam wielopłaszczyznowych zadań technologiczno-pomiarowych Autor wykorzystał cały szereg technik. Sama technologia nakładania warstw realizowana była w reaktorze AXTRON CCS 3x2 z głowicą homogenizującą doskonale wyposażoną. Warstwy maskujące SiO_2 i $Si_3 N_4$ nakładano

w reaktorze PlasmaLab 80 Plus, natomiast warstwy metaliczne osadzano metodą parowania z użyciem wiązki elektronowej (Mo, V, W, Ti, Ru).

Za narzędzie technologiczne należy również uznać stosowane maski w specyficznym, oryginalnym układzie geometrycznym (rys. 4.28 str. 120), dającym możliwość analizy profilu uzyskanych selektywnie warstw epitaksjalnych związków AIIIN, a także zjawisk niepożądanych – pasożytniczych w procesie wytwarzania tych warstw. Dzięki temu możliwe było również określenie zakresu trafności modelowania numerycznego (matematycznego) procesu SA MOVPE (str. 101, np. Rys. 4.8). Będzie o tym mowa w dalszej części recenzji.

Moja ocena działalności technologicznej Autora jest bardzo wysoka, swobodnie operuje możliwościami reaktorów i doбором parametrów planowanych procesów.

Podobnie bardzo wysoko oceniam realizację części pomiarowej realizowanych badań. Autor operował swobodnie i kompetentnie całym szeregiem technik pomiarowych, w tym reflektometrią optyczną, skaningową mikroskopią elektronową, mikroskopią sił atomowych, energodispersyjną spektroskopią rentgenowską i rentgenowską spektroskopią fotoelektronów, a dla pomiarów elektrycznych skaningową mikroskopią pojemnościową i rezystencyjną. Szczegółowy opis tych technik (str. 59, 60) oraz ich stosowanie wykazują wysokie kompetencje Autora w tym zakresie.

Pragnę podkreślić, że było to możliwe dzięki wysokiej klasie laboratoriów, w których możliwa była realizacja tych rozległych, wielowątkowych i wcale niełatwych procesów technologiczno-pomiarowych.

Dopełnieniem całości pracy okazała się być część II, tj. rozdział 6 (str. 145 – 176), w której Autor podjął próbę modelowania numerycznego wzrostu związków AIIIN techniką MOVPE. Wykazał się w tym zakresie nie tylko znajomością procesów modelowania numerycznego, ale dyskutując wyniki symulacji w kontekście wyników eksperymentalnych zawartych w rozprawie, ale także dokonując w podsumowaniu krytycznej oceny tej dyskusji.

Analizując całość pracy i nasycenie zarówno dyskusją literatury dotyczącej jej głównych obszarów, jak i ogromną liczbą trafnych eksperymentów jestem przekonany, że można by na podstawie zawartych w niej wniosków, rozważań i hipotez sformułować 2-3 nowe tematy ambitnych rozpraw doktorskich. Autor podjął bowiem szereg wątków kompleksowo podchodząc do każdego z zagadnień, które zaproponował w celach pracy.

Rozprawa składa się z dwóch części, w sumie sześciu rozdziałów, oraz z wprowadzenia zawierającego wstęp, cele i tezę pracy.

Bardzo pomocne w lekturze pracy są: spis skrótów i oznaczeń oraz opis symboli używany w tekście. Praca zawiera także Aneks zawierający tabele: A – efektywnej długości drogi dyfuzji prekursorów procesu SA-MOVPE oraz B – dyfuzyjności wybranych związków metaloorganicznych galu w wodorze, a także bardzo przydatny w czytaniu rozprawy spis rysunków, których jest wiele.

Wykaz literatury zawiera 163 pozycje, w tym 5 pozycji współautorskich z udziałem mgr. inż. M. Stępnika (w 4 jako głównego autora). Na marginesie należy zauważyć, że w dorobku Autora pracy znajduje się 8 publikacji związanych z tematyką pracy, ale nie odnoszących się bezpośrednio do jej treści.

Zasadnicza część recenzji

Konstrukcja pracy jest logiczna i konsekwentnie dążąca do opisu realizacji celów pracy i udowodnienia tezy. Bardzo wartościowe są podsumowania obszernych (ok. 30 stronicowych) 5-ciu rozdziałów *stricto* merytorycznych z uwypukleniem najważniejszych wniosków wynikających z badań prezentowanych w danym rozdziale. Wnioski te są jasne, bardzo trafnie sformułowane i w pełni uprawnione. Uwaga powyższa odnosi się także do podsumowania całości pracy.

Odnosząc się do poszczególnych rozdziałów prezentujących procesy badawcze wraz z ich podsumowaniem mogę stwierdzić co następuje:

1. Do Wprowadzenia wraz z celami i tezą pracy odniosłem się powyżej. To klarowne i wartościowe wprowadzenie do tematyki pracy zawierające również niezbędne definicje i wyjaśnienia ułatwiające jej lekturę.
2. W **Rozdziale 2** dokonano analizy procesów heteroepitaksji ze szczególnym uwzględnieniem selektywnej epitaksji i jej uwarunkowań. Analiza dotyczy związków Al_{III}N w kontekście podłoży wykorzystywanych w praktyce technologicznej – głównie szafiru – Al₂O₃ i krzemu Si, ale także węgla krzemu SiC, który nie był jednak stosowany w badaniach Autora, o czym pisałem wcześniej.

Analizy dotyczyły także związków SiO₂ i Si₃N₄ rozważanych przez Autora jako maski w procesie selektywnej epitaksji. Omówiono zarówno właściwości strukturalne

jak i elektrofizyczne tych materiałów. Jest to krótka dyskusja wykazująca szerokie kompetencje Autora w ocenie możliwości współpracy tych materiałów w trakcie samego procesu epitaksji jak i w ewentualnych aplikacjach.

W rozdziale tym analizowane są cztery metody selektywnej epitaksji.

Jest to stosunkowo krótka, ale bardzo wartościowa z punktu widzenia technologicznego analiza oparta o przegląd literatury i prace własne (wartościowe również dydaktycznie). Oryginalną częścią tej analizy jest opracowanie metody selektywnej epitaksji na strukturyzowanym i odkształconym podłożu. Autor zaproponował i zrealizował oryginalne eksperymenty w tym zakresie (rozd. 4.3, rys. 4.28 i 4.29). Umożliwiło to oszacowanie wpływu orientacji krystalograficznej na profil selektywnie osadzanych struktur GaN. Były one realizowane z wykorzystaniem metody epitaksji na częściowo zamaskowanym podłożu. Odkształcenie podłoża (nieintencjonalne) wynikało z naprężenia warstwy buforowej GaN. Wniosek z tych badań jest bardzo ważny. Autor udowodnił, że wpływ orientacji krystalograficznej na współczynnik przyspieszenia wzrostu w tym przypadku jest kilkuprocentowy, a także nie zaobserwowano wpływu na profil otrzymanych warstw. Oznacza to, że wpływ orientacji krystalograficznej okna względem podłoża może zostać pominięty. Zastrzega również, że wniosek ten dotyczy warstw epitaksjalnych o grubości nieprzekraczającej grubości maski (brak efektu przerastania warstwy, str. 122).

Szczególnie wartościowy jest opis teoretyczny procesów reakcji chemicznych i fizykochemicznych zachodzących przy wytwarzaniu zarówno warstw maskujących i samej warstwy GaN. Doprowadziło to Autora do określenia warunków prowadzenia całości procesów w dostępnym reaktorze w celu uzyskania warstw o najbardziej pożądanym właściwościach, przy jednoczesnej dużej szybkości ich narastania.

Za kluczowy parametr procesu uznał Autor temperaturę epitaksji określając ją z zakresu 950 – 1110° C, a najważniejsze zjawisko wpływające m.in. na profil wytwarzanych warstw, dyfuzję prekursorów w formie gazowej oraz po powierzchni maski. Są to dwa najważniejsze, uprawnione i trafnie określone wnioski wynikające z analizy całości procesu. Opis procesu z uwzględnieniem konstrukcji reaktora ma także aspekt dydaktyczny i może służyć następcom w pracach z tego zakresu.

3. **Rozdział 3.** Materiał maski uznał Autor (i słusznie) jako jeden z podstawowych parametrów wpływających zarówno na jakość wytworzonych selektywnie obszarów jak i na ich profil, a także pojawiające się efekty pasożytnicze. Wnikliwej analizie poddał zarówno maski dielektryczne (SiO_2 i Si_3N_4), jak i metaliczne Ti, V, Mo, Ru oraz W. Z

literatury wynika, że najczęściej stosowane są jednak maski dielektryczne. To bardzo wnikliwa analiza, która wykazała przewagę masek dielektrycznych z punktu widzenia jakości otrzymanych warstw azotku galu i efektywności procesu (np. pasożytnicze efekty związane z maskowaniem, nukleacja materiału epitaksjalnego na powierzchni maski czy katalityczny rozkład samej warstwy epitaksjalnej).

Znaczącą część rozdziału poświęcono analizie stabilności temperaturowej i chemicznej warstw maskujących, identyfikując szereg niekorzystnych zjawisk mogący występować w tym zakresie i udowadniając przewagę masek SiO₂ i Si₃N₄ nad metalicznymi (np. Rys. 3.8, str. 70). Maski dielektryczne wykazują np. niemal stuprocentową selektywność w szerokim zakresie parametrów procesu MOVPE. Autor analizował także możliwość powstawania dielektrycznych pasożytniczych warstw maskujących. Jest to oczywiście efekt niepożądany.

Analizując możliwość stosowania masek metalicznych, Autor skupił się (i słusznie) na efekcie katalizy warstw epitaksjalnych (rozdz. 3.2, str. 71-78), zaznaczając jednocześnie ich przydatność do szybkiego osadzania warstw AlIn czy wzrostu nanodrutów GaN np. na potrzeby wytwarzania czujników gazów (str. 92).

Wyniki badań Autora przedstawione w tym rozdziale, zarówno co do trafności eksperymentów, użytej aparatury technologiczno-pomiarowej, jak i sformułowanych wniosków są w większości oryginalne i zasługują na wysoką ocenę.

4. **Rozdział 4** jest równie obszerny jak rozdział poprzedni (30 stron) i odnosi się do rzadko rozważanego przez naukowców wpływu geometrii (wymiarów) i rozkładu przestrzennego badanych struktur na jakość tych struktur, tj. warstw selektywnej epitaksji.

Analizie poddawano strukturę, grubość i profile uzyskiwanych warstw epitaksjalnych wykonanych metodą maski większościowej (warstwa narasta w wytrawionych jej obszarach) i maski mniejszościowej (warstwa narasta na całym podłożu poza zamaskowanymi obszarami). Do pomiaru profili uzyskanych struktur paskowych przy różnych wymiarach okien stosowano metodę profilometrii optycznej i mikroskopię sił atomowych. Badania wykazały, że wyniki pomiarów obiema metodami są na tyle zbliżone, że do dalszych badań używano tylko profilometrii optycznej. Rodzaje maskowania (mniejszościowa i większościowa) mają swoje zalety i wady, do badań przyjęto maskę mniejszościową. Wzięto tutaj pod uwagę analizę teoretyczną, doniesienia literaturowe i wynik badań Autora, które wskazują, że maska większościowa nie pozwala na zwiększenie szybkości narastania warstwy epitaksjalnej

i prowadzi do pasożytniczego narastania warstwy na powierzchni maski. To bardzo ważny wniosek.

W trakcie prowadzonych badań analizowano współczynnik przyspieszenia wzrostu warstw selektywnej epitaksji dla różnej ich szerokości, jak również geometrii całego układu struktur (np. wzajemnej odległości pomiędzy tymi warstwami) - tj. charakteryzujący tzw. zjawisko superpozycji maski (rozdz. 4.3, str. 107-119). Autor analizował także szczegółowo efekt krawędziowy tj. zwiększone gromadzenie się narastającej warstwy przy krawędzi maski. Uzyskane wyniki badań wykazały poza tym wpływ geometrii warstwy maskującej na zmianę szybkości narastania obszarów warstw epitaksjalnych. Na wszystkie te efekty ma wpływ długość drogi dyfuzji reagentów w komorze reakcyjnej i na powierzchni maski oraz obszarze narastającej warstwy.

Głównym procesem determinującym profil warstwy epitaksjalnej jest dyfuzja prekursorów w fazie gazowej, a co za tym idzie dla ustalonej geometrii matrycy struktur epitaksjalnych wyłącznie zmiana długości drogi dyfuzyjnej umożliwia zmniejszenie niepożądanych efektów i otrzymanie w miarę jednorodnego frontu selektywnej krystalizacji.

Jeżeli spojrzymy na to zagadnienie odwrotnie, zakładając ustaloną długość drogi dyfuzyjnej, tj. ustalonych parametrach procesu wytwarzania badanych warstw, to tylko zmianą geometrii obszarów maskujących można modulować grubość narastających warstw, ale także skład pierwiastkowy materiałów wieloskładnikowych (rozdz. 4.5, str. 124).

Jeszcze bardziej szczegółowo analizowany jest tutaj wpływ warunków procesu na szybkość narastania warstwy i jej profil, a także na długość drogi dyfuzji reagujących gazów (rozdz. 2.3, str. 44-51). Jest to problem złożony i trudno jednoznacznie ten wpływ określić, a jeszcze trudniej przewidzieć.

Należy w tym miejscu dodać, że równie ważnym wynikiem badań Autora jest pokazanie na drodze eksperymentalnej, że wpływ orientacji krystalograficznej w oknie nie ma większego wpływu na selektywny wzrost GaN i może zostać pominięty przy grubościach warstw epitaksjalnych nieprzekraczających grubości maski. Należy podkreślić, że w tym celu Autor skonstruował strukturę próbną – matrycę masek paskowych (rys. 4.28, str. 120) umożliwiającą reprezentatywne badania tego wpływu. Autor analizował także efekt pasożytniczego maskowania tj. tworzenia się dodatkowej warstwy maskującej wokół pasków SiO₂. Analiza tego efektu pokazała, że przy gęstym ułożeniu tych pasków może nastąpić wręcz koalescencja sąsiadujących obszarów

pasożytniczych. Autor dyskutując ten problem określił warunki, przy których jest to efekt krytyczny dla całego procesu epitaksji selektywnej.

W rozdziale 6 Autor podjął próbę (udaną!) modelowania procesów narastania warstw epitaksjalnych w procesie ich krystalizacji, uzyskując zgodność wyników modelowania matematycznego z wynikami pomiarów dla zależności współczynnika przyspieszenia wzrostu na środku struktury epitaksjalnej w funkcji szerokości warstwy (Rys. 4.8, str. 101). Zgodność tę w zadowalającym zakresie uzyskano dla szerokości okien w masce poniżej 80 nm. Zgodność to malała wraz ze wzrostem tej szerokości.

Rozdział ten to prawdziwa łamigłówka naukowa. Nasycony rozważaniami teoretycznymi i wynikami eksperymentów technologiczno-pomiarowych, co stanowi pewną trudność w jego lekturze. Zawiera szereg oryginalnych wyników, a hipotezy formułowane na podstawie rozważań teoretycznych znajdują potwierdzenie w wynikach eksperymentalnych. Stanowi to w mojej ocenie w znacznym stopniu o oryginalności i bardzo wysokiej wartości całej pracy. Świadczą przy tym o dojrzałości naukowej autora i umiejętności przekonywującego dowodzenia stawianych tez.

- 5. Rozdział 5.** Jest to najkrótszy rozdział pracy, ale chyba najważniejszy ze względu na to, że prowadzi do określenia warunków umożliwiających praktyczne planowanie selektywnego osadzania wysp azotku galu GaN na przygotowanym podłożu, tj. szafirze z warstwami buforowymi opracowanymi wcześniej. W tym celu zrealizowano kompleksowy proces, tj. na podłożu z warstwami buforowymi naniesiono maskę mniejszościową z SiO₂. Szerokość pasków zmieniła się w zakresie od 20 nm do 40 nm, odległość między paskami zmieniła się w zakresie od 20 nm do 160 nm. Zaplanowano grubość warstwy epitaksjalnej na 200 nm.

Przedmiotem badań był wpływ trzech podstawowych parametrów procesu MOVPE na profil wytworzonych struktur, który mierzony był techniką profilometrii optycznej (była o tym mowa wcześniej) oraz stabilność warstwy maskującej SiO₂.

Jako parametry decydujące o grubości i profilu warstwy przyjęto temperaturę, ciśnienie w reaktorze i stosunek molowy reagentów, tj. amoniaku i trimetylogalu w zakresie określonym możliwościami aparaturowymi i wynikami wcześniej prowadzonych badań i analizy doniesień literaturowych.

Powyższe założenia przyjęte zostały rozsądnie i kompetentnie z punktu widzenia praktycznego.

W celu możliwości ujęcia ilościowego otrzymanych wyników Autor wprowadził pojęcie czułości współczynnika wzrostu krawędziowego. Okazało się to być bardzo

trafne i praktyczne przy analizie porównawczej tych współczynników dla różnych szerokości okien maski i obszarów maskowanych.

Przeprowadzone analizy potrafiły określić zależność kształtu profili dla różnych szerokości okien i maski. W analizach posługiwano się także symulacjami numerycznymi umożliwiającymi analizę zjawisk (dotyczących np. mechanizmów transportu masy czy drogi dyfuzji reagentów). Oczywiście konieczne było dokonywanie niezbędnych uproszczeń – umożliwiły to wcześniejsze prace i analiza doniesień literaturowych. Wyniki pomiarów struktur paskowych i ich analiza wspomagana modelowaniem numerycznym pozwoliły określić wpływ w/w trzech głównych parametrów: temperatury, ciśnienia i stosunku molowego reagentów na współczynnik wzrostu krawędziowego, ale także współczynnik przyspieszenia wzrostu krawędziowego, szerokości obszarów pasożytniczych maskowania czy w końcu kluczowy parametr procesu – efektywną długość drogi dyfuzji reagentów. Obrazują to rysunki 5.1 i 5.8 a także 5.11-5.13. Główne wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz i uzyskanych zależności sformułowane zostały przez Autora w rozdziale 5.4, str. 141 a mianowicie:

- ✓ większość zjawisk fizycznych zachodzących w komorze reaktora epitaksjalnego jest aktywowana temperaturowo, z czego najważniejszym jest piroliza reagentów gazowych;
 - ✓ wraz ze wzrostem temperatury osadzania GaN rośnie efektywna długość drogi dyfuzji związków metaloorganicznych w fazie gazowej, czego konsekwencją jest bardziej jednorodny wzrost warstwy epitaksjalnej na odsłoniętych powierzchniach podłoża;
 - ✓ wraz ze wzrostem ciśnienia w komorze reaktora rośnie szybkość osadzania warstw epitaksjalnych, przy jednoczesnym wzroście względnej różnicy wysokości struktury przy krawędzi maski i na środku okna;
 - ✓ relacja między koncentracją amoniaku i trimetylogalu nie wpływa w sposób istotny na profil struktur przyrzadowych GaN o wysokości mniejszej od grubości warstwy maskującej.
6. **Rozdział 6** stanowiący II część pracy to część, w której Autor zaprezentował wyniki analizy zjawisk zachodzących w procesie SA-MOVPE w celu zaimplementowania ich do matematycznego modelu całości procesu. Swoje analizy realizował w zakresie jasno sformułowanych zjawisk fizycznych i reakcji chemicznych niezbędnych do uwzględnienia w tej analizie (str. 145).

Na tej bazie stworzone zostały modele matematyczne zjawisk zachodzących nad obszarem okien decydujących o składzie pierwiastkowym, szybkości narastania i profilu końcowym warstwy epitaksjalnej. Odrębnie analizuje obszar nad podłożem ponad warstwą graniczną, tj. powyżej której koncentracja reagentów jest stała, a w warstwie granicznej maleje liniowo do zera na powierzchni podłoża (rys. 2.10, str. 46, str. 147).

Analiza formuł matematycznych opiniujących zjawiska niezbędne do modelowania procesu epitaksji pokazują jak kompetentnie i zarazem krytycznie porusza się On w tym obszarze, wykorzystując cały szereg propozycji literaturowych do określenia warunków brzegowych np. dla elementarnej komórki obliczeniowej, czy uwzględniając proponowane w literaturze uproszczenia (np. dotyczy stopnia selektywności warstwy maskującej (str. 152). Kluczowym elementem wydaje się być jednak oszacowanie efektywnej długości drogi dyfuzji reagentów dla różnych parametrów procesu MOVPE. Uzyskuje się to w drodze dopasowania wyników symulacji tego parametru do wyników pomiarów dla wytworzonych wcześniej struktur epitaksjalnych przy określonych parametrach procesu epitaksji (str. 154 – 161, rys. 6.6 – 6.10). Proces dopasowywania został zrealizowany z sukcesem i jest ważnym osiągnięciem Autora. Procedura dopasowywania wyników symulacji do danych eksperymentów przedstawiona jest na Rys 6.16, str. 174.

Kolejnym etapem było opracowanie modelu dyfuzji prekursorów epitaksji w fazie gazowej. Przeprowadzone analizy doprowadziły do opracowania tabeli 6.3 str. 167, tj. zestawienia porównawczego parametrów materiałowych wybranych związków metaloorganicznych galu do danych warunków procesu. Tabela ta to bardzo ważny element niezbędny do modelowania dyfuzji tych prekursorów na potrzeby procesu epitaksji.

Autor uwzględnił także zjawisko dyfuzji prekursorów po powierzchni maski (rozd. 6.3, str. 168 – 172) oraz proces azotowania maski SiO_2 w amoniaku. Oba te procesy dyskutowano w rozdziale 6.3 i 6.4, są procesami pasożytniczymi, które szczegółowo opisane zostały wcześniej. W tym rozdziale przedstawiono modele tych zjawisk umożliwiające symulację całego procesu. Kończącym osiągnięciem tego modelowania jest opracowanie oprogramowania do symulacji selektywnego wzrostu związków AlIIN. Schemat architektury systemu obliczeniowego procesu selektywnej epitaksji przedstawiono na rys. 6.18 (str. 175).

Na rys. 6.7 (str. 156) umieszczono porównanie wyników jednowymiarowej symulacji z danymi eksperymentalnymi dla profilu struktury GaN, zaś na rys. 6.17 (str. 175) wynik symulacji profilu warstwy epitaksjalnej dwu i trójwymiarowej. Potwierdzają one trafność zaproponowanych modeli i poprawność całego procesu symulacji. Jest to jeden z najważniejszych oryginalnych wyników prac Autora.

Podsumowanie

1. Wnioski końcowe zawarte w podsumowaniu pracy, zwłaszcza te określone przez Autora jako oryginalne są w pełni uprawnione i udokumentowane w pracy.
2. Praca w całości ma charakter nowatorski ujmując całościowo problem selektywnej epitaksji warstw AlIn metodą MOVPE. Dotyczy to analizy teoretycznej różnego rodzaju warstw na różnych podłożach dla masek dielektrycznych i metalicznych.
3. Praca jest wielowątkowa – bowiem zagadnienie ma wiele aspektów teoretycznych, technologicznych i pomiarowych wzajemnie się zazębiających i przewijających się przez całą pracę. Nie można ich rozpatrywać oddzielnie. Stanowi to pewną trudność w lekturze rozprawy, ale tak musi być gdy chcemy ująć tak szeroki wachlarz zagadnień w jednej pracy. Dlatego też na początku mojej recenzji zaznaczyłem, że jej zakres merytoryczny mógłby być przedmiotem nie jednej, ale dwóch czy trzech rozpraw doktorskich. To stanowi jednak o wartości pracy, którą uważam za wybitną i nie mogłem mojej recenzji ograniczyć do kilku stron (co zazwyczaj ma miejsce). Praca stanowi punkt wyjścia do doskonalenia zarówno zagadnień technologicznych jak i pomiarowych w przyszłości. Autor słusznie zauważa to w podsumowaniu całości pracy jak i pisze o tym w podsumowaniach poszczególnych rozdziałów (i ma rację!).
4. Dla analizy tak szerokiego zagadnienia, którego dotyczy rozprawa, niezbędne wydaje się być opracowanie modeli matematyczno-fizycznych umożliwiających symulacje numeryczne całości procesu lub jego części.
Autor z sukcesem podjął to wyzwanie i jest to oryginalne, bardzo przydatne praktycznie i wartościowe osiągnięcie.

Stwierdzam, że przesłana mi do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Stępnika pt. „Opracowanie technologii selektywnej epitaksji MOVPE struktur AlIn do zastosowań w przyrządach elektronicznych” spełnia z wyraźnym nadmiarem wymagania przewidziane dla rozpraw doktorskich w aktualnie obowiązującej Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. z późniejszymi zmianami i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony rozprawy.

Na zakończenie mojej recenzji chciałbym zaznaczyć, że znane są mi warunki uznania pracy doktorskiej za wyróżniającą się. Niezależnie od tych warunków, (które są wg mnie spełnione) uważam, że praca ta jako wybitna zdecydowanie powinna zostać uznana za wyróżniającą się.

