

## **Recenzja pracy doktorskiej**

**pani mgr Aleksandry Wierzbickiej:**

**„Naprężenia i defekty w półprzewodnikowych lateralnych strukturach epitaksjalnych badane technikami dyfrakcji i topografii rentgenowskiej**

Poniższa recenzja składa się z następujących części:

- 1) Ocena dorobku publikacyjnego Doktorantki
- 2) Trafność wyboru tematu
- 3) Poprawność doboru i wykonania eksperymentów
- 4) Poprawność analizy danych eksperymentalnych
- 5) Najważniejsze wyniki pracy
- 6) Inne uwagi
- 7) Podsumowanie

### **1) Ocena dorobku publikacyjnego Doktorantki**

Przedstawiana praca doktorska opiera się na siedmiu publikacjach z listy filadelfijskiej o współczynniku oddziaływania (impact factor) od ok. 0,5 (Acta Phys. Polonica) do ok. 3,5 (Applied Physics Letters). W pięciu z tych publikacji, Doktorantka jest pierwszym autorem. Dodając do tego siedem prezentacji konferencyjnych, Praca Doktorska spełnia w pełni zwyczajowe kryterium oparcia o kilka publikacji w recenzowanych czasopismach.

### **2) Trafność wyboru tematu**

Temat pracy jest niezwykle ważny, jako że dotyczy technologii ELOG (epitaxial lateral overgrowth), dzięki której możliwe jest filtrowanie dyslokacji i uzyskiwanie materiału znacznie lepszego krystalograficznie w porównaniu z materiałem wyjściowym. Jest to szczególnie ważne w przypadku warstw na silnie niedopasowanych podłożach, takich jak GaN na szafirze, GaAs na krzemie, czy GaSb na GaAs (przypadek opisywany w pracy).

Technologia ELOG, mimo pozornej prostoty, jest jednakże niezwykle trudna do wykonania, jako że wzrost następuje jednocześnie na różnych orientacjach krystalograficznych. Na każdej z nich prędkość wzrostu w danych warunkach jest inna, a także wbudowywanie się domieszek (i zanieczyszczeń) oraz defektów punktowych. Dodatkowo, w momencie zrastania się skrzydeł rosnących poziom warstw, następuje kreacja defektów i naprężeń. Problemem niezwykle poważnym, dyskutowanym szeroko w przedstawianej Pracy Doktorskiej, jest oddziaływanie maski i rosnącej nad nią warstwy.

Z tych powodów technologia ELOG nie znalazła jeszcze do tej pory szerszego zastosowania komercyjnego, mimo, na przykład, początkowych sukcesów w konstrukcji niebieskich laserów opartych o podłoża GaN/szafir.

Badania nad technologią ELOG, zapoczątkowane w Polsce przez Promotora Pracy, prof. Zbigniewa Żytkiewicza, uważam za niezwykle istotne, mogące doprowadzić do praktycznej aplikacji. Część tych badań, wykonana i opisana w pracy przez Doktorantkę, stanowią ważny wkład w zrozumienie, co dzieje się podczas rozrostu warstwy typu ELOG.

### **3) Poprawność doboru i wykonania eksperymentów**

Praca (część z wynikami doświadczalnymi) składa się z następujących rozdziałów:

- 1) pojedyncze paski homoepitaksjalnej warstwy GaAs na GaAs,
- 2) pojedyncze paski GaAs/GaAs z wytrawioną maską,
- 3) struktura wielu niezarośniętych pasków GaAs/GaAs,
- 4) struktura wielu zarośniętych pasków GaAs/GaAs,
- 5) paski heteroepitaksjalne GaSb na GaAs.

Dobór tego rodzaju próbek badawczych uważam za trafny i logiczny.

Próbki zostały wszechstronnie przebadane metodami rentgenowskiej dyfrakcji. Wykonanie bardzo pracochłonnych pomiarów oceniam wysoko.

Zarzutem, jaki można postawić, jest zbyt mała ilość danych dotyczących ujawniania dyslokacji (i innych defektów) poprzez trawienie selektywne. Jest to technika na tyle prosta i szybka, że można było ją łatwo włączyć w ramy wykonanej pracy doktorskiej. Bez tych wyników, nie wiemy, jak zmieniała się gęstość dyslokacji we wzroście lateralnym, a przecież zmniejszenie ilości dyslokacji jest głównym celem wykonywania technologii ELOG.

### **4) Poprawność analizy danych eksperymentalnych**

Do analizy wyników pomiarów rentgenowskich mam trzy poważne zastrzeżenia:

- i) w pracy podawane są absolutne wartości parametrów sieci. Przy użyciu monochromatora wieloodbiciowego, nie mamy pewności, jaka jest dokładnie długość fali, i wtedy konieczne jest stosowanie wzorca krzemowego. Poza tym, przy podawaniu parametrów sieciowych, należy podać temperaturę pomiaru oraz wartości współczynników rozszerzalności termicznej użytych do obliczenia parametrów sieci w temperaturze 21 stopni (zwyczajowo używana temperatura do podawania parametrów sieci). Gdyby Doktorantka zrezygnowała z

podawania absolutnych parametrów sieci, a używała tylko różnice pomiędzy różnymi materiałami, wnioski byłyby identyczne. Na przykład, stała sieci dla podłoża GaAs o wartości 5,65410 Å, czy jest zwiększona w stosunku do tablicowej 5,6533 Å z powodu domieszkowania, czy temperatury pomiaru, czy nieprawdziwej długości fali użytej do obliczeń?

- ii) Doktorantka do analizy położenia pików używała komercyjnego programu firmy Panalytical, który opisuje dyfrakcję rentgenowskiej fali płaskiej od płaskich płaszczyzn sieciowych, a wygięcie jest uwzględniane tylko poprzez dodawanie intensywności (a nie fal) w obrębie szerokiej (milimetrowej) wiązki. Przy promieniach wygięcia tak małych, jak w przypadku badanych próbek, podejście takie może prowadzić do znacznych błędów. Różnica w pozycji atomów zmienia się na odległości 1 mikrona o 20 %. W eksperymencie, właśnie tyle (około mikrona) wynosi długość koherencji fotonu rentgenowskiego, i bez zastosowania teorii rozpraszania promieniowania rentgenowskiego dla wygiętego kryształu można popełnić błędy przy analizie wyników doświadczalnych.
- iii) W pracy brakuje analizy intensywności krzywych rentgenowskich, a Doktorantka ograniczyła się do analizy tylko położenia pików. Z intensywności pików można było wyciągnąć dodatkowe informacje o jakości krystalograficznej warstw.

Spełnienie powyższych uwag dodałoby pracy elegancji, uściśliłoby dane liczbowe, natomiast najprawdopodobniej nie zmieniłoby jakościowo generalnych wniosków (które uważam za poprawnie wyciągnięte) dotyczących zachowania się warstw ELOG na różnych stadiach technologii.

Modele zaproponowane w pracy można było jedynie uzupełnić dyskusją, jak zmienia się stan naprężeń w warstwie podczas chłodzenia, kiedy mamy do czynienia z różnymi współczynnikami rozszerzalności warstwy, maski i podłoża.

## **5) Najważniejsze wyniki pracy**

Za najciekawszy i najważniejszy wynik Pracy uważam opis eksperymentu z wytrawieniem maski SiO<sub>2</sub>. Eksperyment ten w przekonujący sposób pokazuje, jak maska wpływa na deformację warstwy ELOG.

Drugim bardzo interesującym wynikiem jest obserwacja wpływu niejednorodnego rozkładu domieszki w warstwie GaAs:Si na pole naprężeń. Tego rodzaju zjawiska najprawdopodobniej

zachodzą także w innych układach typu ELOG.

Bardzo ważnym wynikiem technologicznym są warstwy GaSb na GaAs. Mimo braku szczegółowych danych na temat defektów w warstwie, wyniki uzyskane przez Doktorantkę do kontynuowania prac w kierunku uzyskania dobrych jakościowo warstw GaSb.

## 6) Inne uwagi

Za bardzo pozytywny należy uznać fakt, iż praca powstała w czasie 4 lat, co jest przypadkiem bardzo rzadkim w dziedzinie fizyki eksperymentalnej.

Praca została przygotowana bardzo porządnie i nie można mieć do strony edytorskiej większych zastrzeżeń.

Pewne uwagi mam co do eksponowania metody SRXRD jako czegoś nowego. Użycie niezwykle wąskich szczelin przy zachowaniu wysokiej rozdzielczości stało się możliwe dzięki dużej intensywności wiązki pierwotnej zapewnianej przez firmę Panalytical, a badanie własności próbki w funkcji jej położenia przestrzennego jest standardową procedurą charakteryzacyjną. Z drugiej jednak strony, nikt wcześniej nie wykonał takich badań na próbkach ELOG, i w tym sensie Doktorantka może być uważana za prekursorkę badań ELOG-ów metodą SRXRD.

Pewien niedosyt mam także po przeczytaniu opisu technologii ELOG. Z tekstu Pracy nie wynikają trudności tej technologii, ani nie ma informacji, że tak naprawdę nie jest ona jeszcze stosowana na skalę przemysłową.

Niewielkimi mankamentami Pracy są sformułowania typu:

„Obliczenia wykorzystujące dynamiczną teorię dyfrakcji T-T są często bardzo skomplikowane. Na szczęście, firma Panalytical oferuje program...”. Praca doktorska powinna raczej używać programów wyższych generacji niż te dostępne komercyjnie.

Także podawanie wyników z dokładnością 5 miejsc po przecinku przy podanym błędzie na trzecim miejscu, jest niewielkim, acz zauważalnym, odstępstwem od przyjętych reguł podawania wyników liczbowych.

Sprawą dyskusyjną jest podawanie własnych publikacji jako osobną listę, a nie w spisie referencji. Jako recenzent, wolałbym mieć w pracy odniesienie, który wynik został opublikowany w jakiej pracy.

## **7) Podsumowanie**

**Pracę doktorską pani Aleksandry Wierzbickiej oceniam wysoko.**

**Ze względów formalnych praca spełnia wszelkie wymogi stawiane pracom doktorskim. Praca powstała w oparciu o 7 artykułów, gdzie Doktorant jest głównym autorem i współautorem, w czasopismach o dość wysokim współczynniku oddziaływania (impact factor'ze).**

**Praca zawiera kilka bardzo interesujących elementów analizy naprężeń w ważnych technologicznie warstwach typu ELOG, jednakże pewne mankamenty w analizie danych z dyfrakcji rentgenowskiej, mimo iż nie wpływają zasadniczo na wyciągnięte wnioski, obniżają nieco rangę pracy.**

**PODUMOWUJĄC, UWAŻAM, ŻE PRACA SPEŁNIA WSZELKIE WYMOGI FORMALNE I ZWYCZAJOWE STAWIANE PRACOM DOKTORSKIEM I WNOSZĘ O DOPUSZCZENIE JEJ DO PUBLICZNEJ OBRONY.**

**Prof. Dr hab. Michał Leszczyński**

