

Warszawa, 12 września 2022 r.

dr hab. Kamil Kosiel

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Mikroelektroniki i Fotoniki

Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa

**Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Pawlaczyka  
pt. „Dyfrakcja rentgenowska w badaniach niedopasowanych sieciowo stopów  
i struktur półprzewodnikowych”**

**Podstawa formalna**

Podstawą przygotowania recenzji jest decyzja Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Wrocławskiej z dn. 11.07.2022 r., która powołała mnie na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr. inż. Łukasza Pawlaczyka. Pismo w tej sprawie z dn. 20.07.2022 r. otrzymałem od Przewodniczącego Rady Pana Prof. dr. hab. inż. Andrzeja Dziejzica.

**Struktura recenzji**

Niniejsza recenzja składa się z trzech punktów zawierających kolejno: uwagi ogólne nt. pracy doktorskiej i opis jej struktury, ocenę pracy i komentarze, podsumowanie i wniosek końcowy.

**Uwagi ogólne nt. pracy doktorskiej i jej struktura**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Pawlaczyka została napisana na Wydziale Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów Politechniki Wrocławskiej pod opieką naukową dr. hab. inż. Jarosława Serafińczuka, profesora uczelni. Swoje badania Doktorant przeprowadził w Laboratorium Rentgenowskich Badań Strukturalnych PWr oraz w Laboratorium Badań Struktury i Właściwości Materiałów w Sieć Badawcza Łukasiewicz-PORT Polskim Ośrodku Rozwoju Technologii.

Przedmiotem badań opisanych w ramach pracy są metody charakteryzacji stopów niedopasowanych sieciowo i struktur półprzewodnikowych z zastosowaniem dyfraktometrii rentgenowskiej. Autor opracował adekwatne metody charakteryzacji takich materiałów, w

odpowiedni sposób modyfikując techniki pomiarowe i sposoby analizy wyników. W ramach swoich pomiarów Doktorant zastosował geometrię krawędziową, zwiększając tym samym możliwości analizy właściwości badanych struktur. Badanymi i analizowanymi w pracy parametrami struktur były: parametry sieciowe warstw, odkształcenia i naprężenia sieci, gęstość dyslokacji, grubości warstw w strukturach.

Charakter pracy jest zasadniczo eksperymentalny i dotyczy badań w zakresie materiałów i struktur cienkowarstwowych, głównie półprzewodnikowych; są to warstwy i struktury warstwowe azotków grupy III, arsenkowe struktury wielowarstwowe z warstwami wieloskładnikowymi oraz warstwy polikrystaliczne pochodnej jodku metyloamoniowego. Jednocześnie jednak znaczną część objętości rozprawy obejmują wiadomości stanowiące *de facto* wprowadzenie do opisów własnych prac eksperymentalnych Autora i są one podane na zróżnicowanym poziomie ogólności, w zależności od rozdziału/podrozdziału pracy. Sekcje rozprawy mające charakter wprowadzeń opisują np. różne rodzaje defektów spotykanych w kryształach, różne (w tym także nie rentgenograficzne) metody określania gęstości dyslokacji i in.

Rozprawa napisana jest po polsku na 156 stronach i składa się z siedmiu rozdziałów, z których Rozdział 1 stanowi wstęp, w którym wyjaśniono również cel pracy, a Rozdział 7 jest podsumowaniem pracy. Dołączono także spis najważniejszych skrótów i akronimów stosowanych w tekście rozprawy, streszczenie (po polsku i po angielsku) i bibliografię (liczącą 183 pozycje).

Rozdziały 2 i 3 stanowią wprowadzenie do rozprawy i opisują podstawy teoretyczne zagadnień w niej badanych. Rozdział 2 omawia wybrane elementy z dziedziny krystalografii (m.in. pojęcie komórki elementarnej, sieci odwrotnej i in.), a także opis struktur krystalograficznych charakterystycznych dla warstw epitaksjalnych azotków grupy III. Rozdział 3 omawia zjawisko dyfrakcji rentgenowskiej wraz z prawem Bragga, a także budowę i zasadę działania dyfraktometrów rentgenowskich, możliwe tryby pomiarowe, rodzaje pomiarów i in.

Rozdziały 4, 5, 6 zawierają opis prac eksperymentalnych przeprowadzonych przez Doktoranta wraz z ich wynikami. Dodatkowo, każdy z tych rozdziałów rozpoczyna się własnym wprowadzeniem, w ramach którego wstępnie omówione są szczegółowe elementy/zagadnienia, których znajomość jest niezbędna lub przydatna dla zrozumienia opisywanych przez Autora własnych pomiarów i ich wyników. Każdy z tych rozdziałów opatrzony jest również swoim własnym podsumowaniem.



W zakresie własnych eksperymentów Doktoranta, rozdziały 4-6 rozprawy poświęcone są zasadniczo następującym zagadnieniom:

Rozdział 4 – wyznaczaniu gęstości dyslokacji (krawędziowych, śrubowych, mieszanych i w ujęciu sumarycznym), głównie z zastosowaniem metod Williamsona-Halla i Ayersa, w warstwach/strukturach warstwowych: GaN, AlN, AlGaN/AlN osadzonych na podłożu szafirowym oraz w warstwach homoepitaksjalnych GaN (osadzonych na podłożu otrzymanym metodą ammonotermalną),

Rozdział 5 – wyznaczaniu wartości naprężeń i odkształceń w: materiałach polikrystalicznych (w perowskicie – pochodnej jodku metyloamoniowego) oraz w warstwach epitaksjalnych AlN na podłożu szafirowym – z pomiarami wykonywanymi od powierzchni i z krawędzi,

Rozdział 6 – wyznaczaniu grubości nanowarstw epitaksjalnych materiałów wieloskładnikowych typu *dilute nitride* w strukturach GaInNAs/GaAs, z zastosowaniem metody Szybkiej Transformaty Fouriera (FFT).

### **Ocena pracy doktorskiej i komentarze**

Nie ulega wątpliwości, że poruszana przez Doktoranta tematyka jest ważna. Materiały i struktury takie jak charakteryzowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej pojawiają się obecnie na froncie światowych badań. Struktury współczesnych przyrządów półprzewodnikowych są z reguły strukturami wielo- i cienkowarstwowymi (często tworzą kwantowe układy niskowymiarowe), a ich profile składu pierwiastkowego bywają niezwykle złożone – ze względu na konieczność formowania odpowiednich profilów przerwy energetycznej, krawędzi pasm, profilów domieszkowania itd. Z reguły występują także problemy związane z niedopasowaniem sieciowym - w przypadku struktur heteroepitaksjalnych, a tym bardziej w przypadku stosowania podłoży o stałej sieci bardzo różnej w porównaniu z osadzonymi warstwami. Ścisła kontrola nad technologią wytwarzania takich struktur, odtworzenia zaprojektowanej konstrukcji, powtarzalności procesów itd., są kluczowe, a w związku z tym rola odpowiednich narzędzi charakteryzacji struktur – takich jak opracowywane w ramach prezentowanej rozprawy - jest tu nie do przecenienia. Dodatkową zaletą tych metod jest to, że są nieniszczące.

Azotki grupy III są coraz intensywniej używane w technologii różnego typu przyrządów elektronicznych i optoelektronicznych (m.in. tranzystorów, diod elektroluminescencyjnych, różnego typu laserów i wielu innych). Warstwy typu *dilute nitrides* są interesujące m.in. ze względu na możliwe zastosowania w inżynierii przerwy energetycznej dla fotowoltaiki i emiterów promieniowania elektromagnetycznego. Perowskity, jak studiowany w ramach

pracy metyloamoniowy jodek ołowiu i wiele innych wciąż testowanych materiałów, znalazły znane powszechnie zainteresowanie w dziedzinie fotowoltaiki.

Mocną stroną przedstawionych w ramach pracy rozwiązań jest także ich unikatowość, jak w przypadku zastosowania geometrii krawędziowej w metodzie wyznaczania gęstości dyslokacji w warstwach epitaksjalnych. Geometrię krawędziową zastosował Autor także i w metodzie znajdowania parametrów sieciowych odkształconych warstw (co pozwoliło na jednoczesne badanie stopnia odkształcenia elastycznego i ocenę wielkości naprężenia). Zastosowanie opracowanego przez Autora algorytmu dla metody FFT pozwoliło na przyspieszenie analizy struktur zawierających periodycznie powtarzające się moduły warstwowe.

Do słabszych stron rozprawy należą:

- brak jednoznacznej informacji/opisu niektórych rysunków, np. dotyczącej paneli (a, b, c) wyników na rys. 4.45 (str. 83), rys. 4.46 (str. 84),
- zdarzający się niefortunny dobór kolorów na rysunkach, zmniejszający ich czytelność, np. rys 5.30 (str. 123) – tu zbieżność kolorów dla danych dot. metody 1 refleksu (20.0) i met. 3 refleksów,
- niejasność odnośnie rzeczywistego składu badanych warstw polikrystalicznych w podrozdziale 5.4 - czy badano warstwę prekursora chemicznego perowskitu (MAI) czy samą warstwę perowskitu konkretnego rodzaju (MAPbI<sub>3</sub>)?

W odniesieniu do powyższych krytycznych uwag można zauważyć, że uważny czytelnik po chwili zastanowienia dojdzie oczywiście do właściwych/poprawnych wniosków, jednakże w opinii recenzenta praca powinna być zredagowana w sposób nie wymagający borykania się z tego typu wątpliwościami.

Dodatkowymi słabszymi stronami rozprawy są:

- powtarzające się dość liczne literówki, np. brak liter, lub dodatkowe litery w wyrazach, nazwisko Bragga napisane z małej litery (w spisie treści),
- rażący w opinii recenzenta sposób zapisywania nazw warstw materiałów, wymienianych w dopełniaczu, np. AlN-u itp. (zamiast po prostu AlN),
- stosunkowo częste sformułowania niegramatyczne (np. w pierwszym zdaniu podrozdziału 4.5.4 (str. 85), w pierwszym zdaniu rozdziału 5 (str. 141) i in.)
- tytuły rozdziałów i podrozdziałów, które zostały wydrukowane czasem na czarno a czasem na niebiesko (co zmniejsza nie tylko estetykę pracy, ale także zmniejsza wrażenie jednorodnej/powtarzalnej konstrukcji graficznej, co nie ułatwia szybkiego poruszania się w jej objętości).

### **Podsumowanie i wniosek końcowy**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska prezentuje wysoką wiedzę teoretyczną Doktoranta w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych. Dowodzi także Jego umiejętności jeśli chodzi o samodzielne prowadzenie pracy naukowej. Z przedmiotem Jego rozprawy doktorskiej wiąże się oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest opracowanie metod charakteryzacji materiałów cienkowarstwowych z użyciem dyfraktometrii rentgenowskiej – metod adekwatnych dla oceny parametrów sieciowych, odkształceń/naprężeń, gęstości defektów liniowych oraz grubości warstw w strukturach z występującym niedopasowaniem sieciowym (homo- i heteroepitaksjalnych oraz polikrystalicznych).

Oryginalność rozwiązania problemu a także wagę podejmowanych problemów i sposobów ich rozwiązania potwierdzają także publikacje ze współautorstwem Doktoranta, w czasopiśmie posiadających współczynnik wpływu.

Dostrzeżone niedoskonałości pracy nie obciążają jej oceny w stopniu poważnym.

**Dlatego też pozytywnie oceniam rozprawę doktorską mgr. inż. Łukasza Pawlaczyka i stwierdzam, że spełnia ona odpowiednie wymogi ustawowe. Wnioskuje również o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Kamil Kosiel

