



Uniwersytet Wrocławski Wydział Fizyki i Astronomii DZIEKANAT (2)		
Wysłano do WFA	26-05-2023	Zał.
Nł. przeł. przes. wpi. wpi. wpi. wpi. wpi.		
wpl. do jedn. org.	data	symbol
znak sprawy		

Wrocław, 4 maja 2023r.

Prof. Robert Kudrawiec
Katedra Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wroclawska
ul. Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27,
50-370 Wrocław
Tel.: +48 723 645 481, Fax: +48 71 328 36 96
e-mail: robert.kudrawiec@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr Rafała Lewanków zatytułowanej „Wzrost i morfologia warstw Al_2O_3 i MgO na powierzchniach $SiC(0001)$ i $GaN(0001)$ ”

Praca doktorska Pana mgra Rafała Lewanków jest pracą eksperymentalną z fizyki powierzchni półprzewodników i jej przedmiotem są badania fotoemisji elektronów z warstw $SiC(0001)$ i $GaN(0001)$ pokrytych tlenkami Al_2O_3 i MgO . Są to układy dielektryk/półprzewodnik, które odgrywają bardzo ważną rolę w wytwarzaniu struktur tranzystorowych. Obecnie tranzystory na bazie GaN i SiC produkowane są na masową skalę ale wciąż trwają badania nad lepszym zrozumieniem zjawisk fizycznych na złączu dielektryk/ GaN oraz dielektryk/ SiC , a także technologią wykonywania tego typu złączy. Niniejsza praca doktorska wpisuje się w ten nurt badań. Podsumowując wybór tematyki dysertacji uważam go za wciąż bardzo ważny mimo tego, że prace z tej tematyki pojawiały się już dwie-trzy dekady wcześniej.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów, wniosków i poprzedzona jest wstępem w którym doktorant przedstawia motywację dla tego typu badań oraz formułuje cele badawcze. Zakładam, że przedstawione cele wynikają z przyjętych hipotez badawczych ale w całej dysertacji brakuje tych hipotez i dlatego wskazane jest aby podczas obrony doktorant jasno sformułował hipotezy badawcze jakie miał zweryfikować w pracy doktorskiej.

Rozdziały I-III wprowadzają czytelnika do tematyki dysertacji i obejmują: rozdział I – charakterystykę przedmiotu badań w którym doktorant opisał właściwości GaN i SiC ; rozdział II – opis złącza dielektryk/półprzewodnik; rozdział III – opis metod eksperymentalnych, a w tym aparatury pomiarowej oraz metod analizy danych. Te trzy rozdziały bazują na wiedzy literaturowej i czyta się je bardzo dobrze. Balans pomiędzy długością opisu oraz zawartością informacji potrzebnych do zrozumienia autorskich wyników eksperymentalnych przedstawionych w głównej części rozprawy jest dobrze wyważony. Doktorant w odpowiednich miejscach odsyła czytelnika do odpowiedniej literatury, a jej dobór jest właściwy i świadczy o dobrej znajomości literatury przedmiotu. Drobne mankamenty stylistyczne i edytorskie wylistowałem na końcu recenzji.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology
Department of Semiconductor
Materials Engineering
27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Account
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

Rozdziały IV i V stanowią kluczową część rozprawy, w której doktorant prezentuje wyniki swoich badań (rozdział IV) oraz prowadzi dyskusje i podsumowanie wyników (rozdział V). W pierwszej kolejności przedstawione zostały wyniki pomiarów XPS, UPS oraz LEED dla warstw GaN(0001) (typu n i p) i SiC(0001) (typu p) wraz z ich interpretacją i odniesieniem do literatury. Na tle literaturowym są to znane wyniki ale tego typu analiza jest niezbędna do zrozumienia dalszej części rozprawy gdzie doktorant przechodzi do pomiarów XPS, UPS oraz LEED dla warstw GaN(0001) i SiC(0001) pokrytych warstwami Al_2O_3 oraz MgO o różnej grubości. Do naniesienia warst dielektrycznych wykorzystano metodę osadzania z fazy gazowej gdzie dla warstwy Al_2O_3 fazę gazową uzyskano poprzez bombardowanie elektronami kryształu Al_2O_3 , a do pokrycia warstwą MgO bombardowano elektronami magnez i dodatkowo dostarczano tlen. Jest to bardzo elegancki eksperyment w którym próbki przed osadzeniem są referencją dla próbek po osadzeniu danych warstw dielektrycznych. W takim podejściu przeanalizowano zmiany położenia pasma walencyjnego oraz oszacowano wartość przerwy energetycznej dla dielektryka. Odnosząc się do dyskusji tych wyników chciałbym zaznaczyć, że nie dostrzegam błędów pojęciowych, interpretacyjnych lub wewnętrznych sprzeczności. Jedyna uwaga jaką mam do tych wyników dotyczy dokładności wyznaczania położenia pasma walencyjnego i ogólnie położen spektralnych pików. Doktorant w żadnym miejscu się do tego nie odnosi i dlatego wskazane jest aby się do tego ustosunkował podczas obrony. Przedstawione wyniki uważam za bardzo oryginalne i interesujące o czym świadczy to, że zostały one dobrze opublikowane.

W rozdziale V doktorant skoncentrował się na wyznaczeniu diagramu nieciągłości pasm dla badanych złączy dielektryk/półprzewodnik na podstawie uzyskanych pomiarów XPS. Znając położenia spektralne charakterystycznych pików rdzeni przed osadzeniem dielektryka i po osadzeniu dielektryka można tego typu analizę przeprowadzić. Ale w tym miejscu mam podobne pytanie co do dokładności odczytu położen spektralnych pików rdzeni a tym samym dokładności analizy nieciągłości pasm dla badanych złączy. Nie mam zastrzeżeń co do koncepcji wyznaczania tego typu nieciągłości ale mam obawy co do ilościowego opisu tego zjawiska. Przedstawione diagramy (Rys. 50-54) koncepcyjnie są bardzo interesujące ale nie biorą pod uwagę grubości warstwy zubożonej w GaN i SiC oraz faktu, że dielektryk też ma powierzchnię. Dlatego chciałbym aby doktorant ustosunkował się do tej uwagi podczas obrony.

Ponadto w dysertacji pojawiają się komentarze dotyczące efektu fotowoltaicznego oraz efektu foto-napięcia powierzchniowego ale brakuje bezpośredniego odniesienia się do tego jakie znaczenie mają te efekty w pomiarach XPS i UPS przy zastosowanych natężeniach promieniowania X w XPS i UV w UPS. W półprzewodniku zawsze mamy do czynienia z wypłaszczeniem pasm na skutek generacji par elektron-dziura i w związku z tym nie bardzo rozumiem komentarz co do znaku zmiany potencjału powierzchniowego. Zwracam uwagę, że pomiary



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-gaa.org

Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000 58 51
Bank Account

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

fotonapięcia powierzchniowego opisane w Ref. [217] są w innym reżimie wypłaszczenia pasm i w związku z tym dyskusja w rozdziale 5.3 jest bardzo niefortunna. W przypadku złącza dielektryk/półprzewodnik należy rozważyć transfer ładunku z warstwy dielektryka do półprzewodnika i na odwrót. Oczywiście transfer ten będzie zależał od typu półprzewodnika (n czy p) stanów defektowych w dielektryku itd. i w tą stronę należy poprowadzić dyskusję. Również niefortunne są schematy na rysunku 55 (brak niepewności przy wartościach wyznaczonych eksperymentalnie i w związku z tym brak spójności między tymi samymi złączami).

Przechodząc do końcowej oceny dysertacji uważam, że doktorant uzyskał bardzo wartościowe wyniki, które zostały opublikowane w dobrych czasopismach (*Surface and Interface Analysis, Surface Review and Letters, Vacuum, Thin Solid Films, ...*). Prace te stanowią istotny wkład do literatury przedmiotu i są już dostrzegane przez środowisko naukowe zajmujące się tą tematyką, tj. są już cytowane ponad 20 razy i z pewnością będą cytowane w przyszłości. W siedmiu z dziesięć prac wskazanych w dysertacji doktorant jest pierwszym autorem co dodatkowo podkreśla jego rolę w przytoczonych badaniach/publikacjach. Uważam, że w takim wypadku pomimo publikacji, które mogły by być podstawą do obrony doktoratu, ważną rolę odgrywa zebranie wyników i opisanie ich w jednym miejscu tj. w pracy doktorskiej. To zadanie doktorant zrealizował dobrze zarówno pod względem merytorycznym jak i redakcyjnym. Nie ustrzegł się w tym błędów stylistycznych i językowych o których już wspominałem i które przytoczyłem na końcu mojej recenzji. Błędy te nie umniejszają mojego pozytywnego odbioru tej dysertacji.

Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska Pana mgra Rafała Lewandków spełnia wszystkie wymagania stawiane przez ustawę o stopniach naukowych dla rozpraw na stopień doktora oraz zwyczajowo przyjęte kryteria w środowisku fizyki ciała stałego. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie Pana mgra Rafała Lewandków do publicznej obrony niniejszej rozprawy.

Robert Kudrawiec

Uwagi redakcyjne:

Strona 9: '...materiałów, które ? sprostac...', '...szerokością przerwy...'

Strona 22: powtórzenie 'o mechanizmach'

Strona 32: nie powinno być kropki między zdaniem '...kubiczną (Rys. 13). Jego...'

Strona 36: '...pracy wyjścia metalu i półprzewodnika...' nie mówimy o pracy wyjścia jako takiej w półprzewodniku



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 00001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Account

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

Strona 37: '...a w półprzewodniku znajdują się nadmiarowe donory,...' dziwne sformułowanie te 'nadmiarowe donory'

Strona 48: powtórzenie 'gdzie h – stała Plancka'

Strona 53: w tabeli przy krzemie powinno być N_d

Strona 58: powinno być 'na Rysunku 22'

Strona 59: powinno być '(Rys. 23)'

Strona 62: powinno być 'widać na Rys. 26'

Strona 65: 'co skutkuje obecnością warstwy inwersyjnej' dlaczego? Nie spodziewam się tutaj warstwy inwersyjnej.

Strona 70: '...wyższych h energii...'

Strona 101: '... mogący zastąpić kosztocłonne metody MBE i ALD.' – stwierdzenie zbyt mocne.

Reszta uwag językowych/redakcyjnych do wglądu w egzemplarzu recenzenta.



HR EXCELLENCE IN RESEARCH



Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Account

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434