

Prof. dr. hab. Detlef Hommel
Polski Ośrodek Rozwoju Technologii
PORT
Sieć Badawcza Łukasiewicz
ul. Stabłowicka 147
54-066 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. Rafała Lewandkova

Wzrost i morfologia warstw Al_2O_3 i MgO na powierzchniach $\text{SiC}(0001)$ i $\text{GaN}(0001)$

Pan mgr. Rafał Lewandków realizował swoją pracę doktorską w zespole profesora A. Ciszewskiego w Instytucie Fizyki Doświadczalnej na Uniwersytecie Wrocławskim. Tematem jego badań był wzrost i badanie własności cienkich warstw dielektrycznych MgO i Al_2O_3 na powierzchniach (0001) podwójnych półprzewodników GaN oraz 6H-SiC. Zarówno SiC jak i GaN mają potencjał przynajmniej częściowego zastąpienia krzemu (Si) w układach elektronicznych. Takie badania podstawowe są więc bardzo ważne z punktu widzenia ich aplikacji aby znaleźć alternatywy do powszechnie używanych cienkich warstw SiO_2 będące naturalnym dielektrykiem na Si. Warstwy MgO i Al_2O_3 osadzono metodą rozpylania wiązką elektronową poprzez fizyczne osadzanie z fazy gazowej (EB-PVD oraz RE-EB-PVD w przypadku MgO). Do charakteryzacji powierzchniowej takich warstw używano szeregu metod jak LEED, UPS XPS. Warstwy Al_2O_3 wytwarzano z kryształu szafiru a MgO z metalowego magnezu w atmosferze tlenu. O wydajności tych badań i otrzymanych cennych wyników świadczy liczba 10 publikacji w czasopiśmie przeważnie międzynarodowych. Pan Lewandków jest pierwszym autorem sześciu z tych publikacji m. i. w Materials (impact factor 3,7) oraz Vacuum (IF 4,1). Udokumentuje to jego ważny i samodzielny wkład do przedstawionych w tej dysertacji wyników.

Po krótkiej motywacji przedstawione są podstawowe własności powierzchni półprzewodników oraz możliwych dielektryków i ich stały dielektryczne. Główne cele swoich badań pan Lewandków podsumuje następująco:

- Zbadanie procesów wzrostu i morfologii wybranych warstw tlenkowych
- Wyznaczenie przerwy energetycznej i badanie, czy istnieje zależność od grubości tych cienkich warstw
- Badania struktury pasmowej dielektryk – półprzewodnik
- Porównanie tych wyników z rezultatami otrzymane przez inne grupy badawcze używające inne lub modyfikowane metody osadzania.

W pierwszym rozdziale umawiane są podłoża GaN oraz SiC, ich struktury krystaliczne oraz własności objętościowe. Szczególną uwagę pan Lewandków przywiązuje do własności ich powierzchni (0001) oraz adsorbatów. Ogólnie zastosowane metody osadzania są krótko ale dobrze dyskutowane.

W drugim rozdziale prowadzącym do tematyki badań opisane są szczegółowo złącze półprzewodnik z dielektrykami. Stanowi to podstawę rozumienia później diskutowanych wyników pana Lewandków. Trochę brakuje w tym miejscu obszerniejszy przegląd literatury, co ułatwiłby czytelnikowi wejście w następne rozdziały. Nie jest to krytyka jego rozeznania stanu literatury, bo spis i cytowanie innych prac w dalszej części rozprawy doktorskiej jest jak najbardziej obszerne i zadawalające.

Stosowane techniki pomiarowe są bardzo dobrze przedstawione w rozdziale trzecim. To samo tyczy metody do analizy otrzymanych warstw tlenkowych MgO i Al₂O₃. Pomaga to przy rozumieniu później diskutowanych wyników doświadczalnych.

Wyniki pomiarów są omówione w drugiej części tej pracy. Używane podłoża 6H-SiC firmy CREE są 'objętościowe' i nie podlegają dyskusji. W odróżnieniu tzw. podłoża GaN są – z punktu widzenia epitaksji – templetami (10 i 8 μm) z warstwami GaN typu n lub p osadzone metodą MOCVD na szafirze. Dla fizyków 'powierzchni' nie gra to wielkiej roli, ale tu należałoby chociaż krótko dyskutować własności tych templatów. Ze względu na grubość warstw położonych należy zakładać, że są relaksowane i mają na powierzchni stałą sieciową jak GaN. Jednak położona warstwa epitaksjalna GaN przechodzi relaksacji od stałej sieci Al₂O₃ do GaN, co jest związane z powstaniem większej ilości defektów. Wpływ tego na cienkie warstwy tlenkowe nie jest nawet wspomniane tu. W dyskusji używanych substratów dokładnie są omówione warunki ich czyszczenia, co jest istotnie i wpływa zasadniczo na otrzymane wyniki doświadczalne. Własności substratów n- i p-GaN są badane metodami XPS, UPS oraz LEED. Na końcu dłuższych podrozdziałów (jak 4.1.1) przydało się krótkie podsumowanie najważniejszych wyników. W dalszej części przedstawione są wyniki badań morfologiczne i struktury elektronowej metodami powierzchniowymi napylnych warstw Al₂O₃ na templatach GaN typu n i p oraz na 6H-SiC. Badania te są bardzo systematyczne i prowadzone krok-po-kroku. Pan Lewandków przez to dochodzi do dobrze uzasadnionych wniosków o własnościach interfaców itd. Udało się rozległe płaskie domeny/obszary tych cienkich warstw położyć na obu rodzajach substratów. Struktura elektronowa jednak silnie zależy od procedury przygotowania powierzchni, na co szczególnie czułe jest położenie maksimum pasma walencyjnego.

W piątym rozdziale struktury elektronowe są dokładnie dyskutowane. Rzetelna analiza jest podsumowana zarówno w tabelkach 18 – 23 dla poszczególnych złączy oraz w rysunkach 50 – 54. W sposób charakterystyczny zmieniają się zagięcia pasm struktury elektronicznej zarówno dla podłoży jak

i nasadzonych cienkich warstw z wyjątkiem struktur typu $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{p-6H-SiC}$. Pan Lewandków dyskutuje dwie możliwości, aby wyjaśnić swoje niepodważalne wyniki doświadczalne. Jednym takim efektem jest zjawisko foto-napięcia powierzchniowego (SPV) a drugim to powstające defekty na granicach faz półprzewodnik – dielektryk. Pierwszy efekt może być spowodowany promieniowaniem elektromagnetycznym (UV w przypadku UPS a X-ray dla XPS). W drugim przypadku argumentem jest amorficzność nakładanych dielektryków, co robi wystąpienie takich defektów bardzo prawdopodobne. Tu chcę wrócić do uwagi wcześniejszej mojej o dużej różnicy gęstości defektów dla podłoża monokrystalicznego SiC a templates GaN na szafirze. Ciekawe pytanie, czy to też może mieć wpływ na obserwowane efekty.

Ogólnie można twierdzić, że dyskusja końcowa jest bardzo rzetelna robiona i nie mam uwag do tego. Otrzymane wyniki są podsumowanie na rysunku 55 i mogą tworzyć podstawę na dalsze rozważania co do zastosowalności badanych złącz w układach elektronicznych.

W ostatnim rozdziale podsumowane są wyniki otrzymane w tej pracy doktorskiej. Pan Lewandków twierdzi, że stawione na początku cele są realizowane. Z tym się zgadam. Dotyczy to zarówno badania morfologii warstw tlenkowych na GaN i 6H-SiC, wyznaczenie przerwy wzbronionej tych warstw, przesunięcie pasm oraz struktury elektronowe złącz oraz ustosunkowanie się do wyników innych grup badawczych. O ile na powierzchni GaN twierdzono obecność tlenu natywnego, to powierzchnie SiC były wzbogacone w węgiel. Już warstwy 2-4 nm były w miarę stechiometryczne. Warto podkreślić fakt jest używanie częściowo komplementarnych metod XPS i UPS pozwoliło do wyciągania wiarygodnych wniosków o strukturach granicznych złącz i ugięć pasmowych. Pan mgr. Rafał Lewandków na końcu wskazuje na to, co jeszcze należałoby dokładniej badać, aby takie cienkie warstwy tlenkowe mogłyby być zastosowane w elektronice na SiC lub GaN. Należy wrócić uwagę na to, że wyniki opublikowane w międzynarodowych czasopismach były też przedstawione na pięciu konferencjach krajowych i zagranicznych.

Rozprawa doktorska jest dobrze strukturyzowana, logicznie budowana i zawiera wiele ciekawych i nowych wyników. Obszerny spis literatury świadczy o bardzo dobrym rozeznaniu pana mgr. Rafała Lewandkova w tej dziedzinie i jest jak najbardziej przydatny dla czytelnika.

Praca doktorska pana mgr. Rafała Lewandkova spełnia zarówno wszystkie wymagania formalne jak i merytoryczne. Poproszę więc o dopuszczenie do dalszej części rozprawy doktorskiej tzn. do publicznej obrony.

Wrocław, 05. 10. 2023

prof. dr. hab. Detlef Hommel

Lider Grupy Badawczej EpiMat

