

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ PRZEMYSŁAWA JÓŻWIKA „ZASTOSOWANIE KANAŁOWANIA JONÓW W ANALIZIE DEFORMACJI W KRYSZTAŁACH” WYKONANEJ W ZAKŁADZIE TECHNOLOGII PLAZMOWYCH I JONOWYCH NCBJ POD KIERUNKIEM PROF. DR HAB. ANDRZEJA TUROSA

1. Wskaźniki bibliograficzne

Wskaźniki bibliograficzne Doktoranta są powyżej średniej w Polsce: 7 publikacji, jedna z pierwszeństwem Autora. Nie są to jednak wskaźniki wybitne- wszystkie publikacje mają stosunkowo niskie wskaźniki oddziaływania. Należy mieć nadzieję, że nowe publikacje (napisane na podstawie pracy doktorskiej) o wyższych wskaźnikach oddziaływania umożliwią Doktorantowi staranie się o granty dla młodych naukowców (np., Sonaty).

2. Pozytywne aspekty przedstawionej pracy doktorskiej

Praca dotyczy niezwykle istotnego wpływu implantacji na własności materiałów półprzewodnikowych. Implantacje takie stosowane są w celu zmian własności elektrycznych (głównie dla uzyskania izolacyjności materiału), a także występują w reaktorach jądrowych, czy przestrzeni kosmicznej.

Najważniejszym rezultatem pracy jest modyfikacja programu McChasy służącego do analizy widm RBS (Rutherford Back Scattering) poprzez symulację ruchu wielu tysięcy wirtualnych jonów He w ekranowanym polu elektrostatycznym atomów próbki. Poprzez modelowanie dystorsji struktury krystalicznej w sąsiedztwie dyslokacji w oparciu o wyniki HRTEM (High Resolution Transmission Electron Microscopy) Doktorant dokonał odpowiednich zmian w programie McChasy umożliwiając bardziej mikroskopową analizę widm RBS. Wyniki Doktoranta spotkały się z dużym zainteresowaniem Jego środowiska naukowego, odzwierciedlone szeregiem referatów zaproszonych Doktoranta i Promotora na ważnych konferencjach międzynarodowych.

Poprawność symulacji wyników RBS przy użyciu zmodyfikowanego programu McChasy pokazała niezależność wyników od energii użytych jonów helu.

Najbardziej interesującym wynikiem materiałowym jest stwierdzenie, iż dyslokacje poimplantacyjne powstają poniżej zasięgu jonów. Wynika to z różnicy ruchliwości atomów międzywęzłowych i wakansów. Jest to zjawisko słabo opisane w literaturze i niewątpliwie przyniesie w przyszłości grupie Promotora szereg bardzo dobrze notowanych publikacji i wystąpień konferencyjnych.

Ważnym wynikiem jest też stwierdzenie, że dla każdego rodzaju materiału pole odkształceń jest inne, i nie można stworzyć modelu uniwersalnego, tylko dla każdego materiału osobny.

Wysoko należy ocenić bardzo pracochłonne eksperymenty implantacji jonami argonu trzech materiałów: AlGaN, SrTiO₃ i ZnO. Implantacje te zostały dokonane przy użyciu różnych

dawek, a następnie próbki były badane metodą RBS (używane różne energie wiązki He), HRTEM oraz dyfrakcji rentgenowskiej XRD (w przypadku ZnO).

Niezwykle istotny wynik jest przedstawiony na Rys. 6.9 (i przedyskutowany w rozdziale 6.2.3), na którym pokazano, jak zmieniają się zniszczenia ZnO przy bombardowaniu różnymi dawkami jonów argonu. Widoczny jest próg przy dawce jonów Ar o energii 300 keV ok. $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, a następnie nasycenie zniszczenia przy dawce ok 10^{16} cm^{-2} . Tego rodzaju informacje są niezbędne przy planowaniu wszelkich eksperymentów implantacyjnych.

Za wyróżniający się rozdział należy uznać opis metody RBS używanej w trybie „random” i trybie „aligned” (kanałowania). Rozdział jest napisany bardzo jasnym językiem i pokazuje, iż w Doktorant jest specjalistą w tej dziedzinie.

3. Krytyczne uwagi na temat przedstawionej pracy doktorskiej

Rozdział „Charakterystyka badanych materiałów”.

Opis trzech badanych materiałów AlGaIn, SrTiO₃ i ZnO jest bardzo skąpy. W szczególności, nie ma informacji o gęstości dyslokacji (w materiałach as-grown) w podziale na krawędziowe, śrubowe i mieszane. Informacje takie łatwo uzyskać poprzez trawienie selektywne (wspomniane zresztą na stronie 7). W przypadku AlGaIn i SrTiO₃ gęstość dyslokacji jest dodatkowo bardzo nierównomierna przestrzennie. Brak takich informacji bardzo utrudnia zrozumienie wyników eksperymentalnych po implantacji, ponieważ nie wiemy jaka była gęstość dyslokacji przed nią. Należy podkreślić, że metoda HRTEM daje informacje o dyslokacjach jedynie na bardzo małym obszarze i mogą nie być reprezentatywne dla całej próbki.

W rozdziale tym podana jest też motywacja wykonywania eksperymentów implantacji ziemiami rzadkimi jako prowadzących do konstrukcji diod RGB (red, green, blue). Nie jest to prawda, bo tego rodzaju diody mają luminescencję kilkaset razy mniejsze od komercyjnych opartych o tradycyjne domieszkowanie i składy InGaIn (niebieskie i zielone) oraz AlGaInAsP (czerwone).

Rozdział „Defekty struktury krystalicznej”

Komórki elementarne nie muszą być równoległościanami.

Wymienione są różne rodzaje wiązań atomowych. Szkoda, że nie ma odniesienia do badanych materiałów.

Podana jest informacja, że fonony są przyczyną powstawania defektów atomowych- tego rodzaju zdanie nie jest w ogólności prawdziwe.

Określenie „defekty elektronowe” nie jest używane.

„Atomy międzywęzłowe są zaburzeniami termicznymi”- bardzo niezręczne sformułowanie.

Pisząc o defektach Frenkla powinno się podać przewidywane koncentracje tego rodzaju defektów w badanych materiałach.

„Wymiary kationu są zwykle mniejsze od anionu”- nieprawda: GaSb, AlAs, i inne.

Jeżeli pisze się o stężeniu równowagowym defektów punktowych, powinno się podać komentarz kiedy nie jest równowagowe (w większości przypadków!).

Opisując dyslokacje nie ma słowa o pętlach dyslokacyjnych, a to jest najczęstszy defekt rozciągły związany z implantacją.

Rozdział „Techniki doświadczalne i metody analizy danych”

Na stronie 35 czytamy: „...dla monokryształu ZnO o grubości 500 nm, w którym 50% atomów Zn w warstwie przypowierzchniowej o grubości 5 nm zostało podstawionych atomami Au.” Z tekstu trudno wyczytać, czy na rysunku 4.2 są wyniki symulacji teoretycznych, czy eksperymentalnych. W przypadku pierwszym, warto byłoby napisać *explicite*, że tego rodzaju struktury są wymyślone jedynie w celu światopoglądowym. W drugim przypadku wątpliwość budzą niezwykle małe grubości kryształów, a także dziwny związek potrójny ZnAuO.

Rysunek 4.4 przedstawia wyniki eksperymentalne RBS dla kryształu SrTiO₃ o grubości zaledwie 1,8 mikrona. Wątpliwości budzi sposób przygotowania takiego kryształu oraz w jaki sposób taki kryształ był podtrzymywany w czasie eksperymentu.

O ile opis metody RBS jest bardzo dobry, o tyle opis HRTEM i XRD pozostawia wiele do życzenia. Jest niezwykle skrótowy, a przedstawienie metody XRD jedynie poprzez wzór Bragga nie powinno mieć miejsca w pracy doktorskiej.

Rozdział „Zastosowanie symulacji Monte Carlo do analizy widm RBS/C”

Najważniejszy zarzut merytoryczny do pracy doktorskiej Przemysława Jóźwika dotyczy tego rozdziału. We wstępie Autor pisze o różnych rodzajach dyslokacji, natomiast w tym rozdziale zajmuje się prawdopodobnie tylko dyslokacjami krawędziowymi (prawdopodobnie, bo nie jest to *explicite* napisane). Nie ma informacji, czy w badanych kryształach były także inne rodzaje dyslokacji, i jaki wpływ miałyby one na wyniki badań RBS.

Nie ma podanej informacji, czy dyslokacje objęte rozważaniem powstały podczas wzrostu, czy podczas implantacji argonem (wtedy raczej należy się spodziewać pętli dyslokacyjnych).

Rozdział „Przykłady zastosowań”

Bardzo ważnym parametrem opisującym wyniki kanałowania RBS jest f_{RDA} , opisująca jaki procent atomów zostało przemieszczonych podczas implantacji. W pracy brakuje dobrego opisu, co ten parametr oznacza mikroskopowo. Na przykład, w warstwie AlGaN możemy mieć atomy międzywęzłowe, aluminium i gal na miejscu azotu, i odwrotnie. Lokalnie możemy mieć

także strukturę amorficzną, a nawet klastry metalu. Parametr f_{RDA} jest powszechnie używany przez osoby zajmujące się metodą RBS, natomiast czytelnikom Doktoratu należało go lepiej wyjaśnić.

Drugim istotnym parametrem jest f_{DIS} , związany z ilością dyslokacji. Także w tym przypadku brakuje dyskusji, co ten parametr oznacza i jak się ma do gęstości dyslokacji wyznaczanej, np., poprzez trawienie selektywne.

Rysunki 6.3 i 6.6 mają podane na osi x jednostkę keV, podczas gdy w tabelkach są MeV.

Niezrozumiałym jest brak wyników dla próbek przed implantacją.

Na rysunkach 6.2, 6.5 i 6.8 mamy niezwykle interesujące wyniki, które mogłyby być najważniejszym rezultatem pracy, gdyby zostały odpowiednio zinterpretowane i wyjaśnione. Czytelnik (recenzent) w ten sposób je interpretuje:

- i) W przypadku AlGaIn atomy zostały przemieszczone w trybie RDA podczas implantacji zgodnie z zasięgiem jonów Ar. Natomiast dyslokacje powstały poniżej. Jak wspomniano wcześniej, zjawisko to najprawdopodobniej polega na różnych ruchliwościach atomów międzywęzłowych i wakansów. Te pierwsze tworzą defekty w obszarze zasięgu jonów, a wakanse następnie są wypychane do obszaru poniżej. Doktorant opisuje ten mechanizm w rozdziale 3, ale szkoda, że wyniki eksperymentalne nie zostały lepiej wyjaśnione.
- ii) W przypadku SrTiO₃ dyslokacje powstały zgodnie z zasięgiem jonów Ar, natomiast przemieszczenia atomów RDA są wyżej. Nie jest wyjaśnione, dlaczego, i na czym polega różnica między AlGaIn a STO.
- iii) W przypadku ZnO znowu sytuacja przypomina AlGaIn.

Wyniki badań rentgenowskich na Rys. 6.10 i 6.11 są interesujące, ale Autor pracy nie wykorzystał ich w pełni, analizując jedynie wyniki jakościowo. Symulacje wykonane przy użyciu komercyjnych programów przy założeniu zniszczeń uzyskanych w badaniach RBS najprawdopodobniej by potwierdziły poprawność rozkładów zniszczeń pokazanych na poprzednich rysunkach.

4. Uwagi dodatkowe

Czytając pracę Przemysława Jóźwika, odnosi się wrażenie, że jest On bardzo dobrym specjalistą w dziedzinie implantacji i badań metodą RBS, natomiast poświęcił On zbyt mało czasu na zdobycie informacji o badanych materiałach, a także na dwie uzupełniające metody analityczne: HRTEM i XRD. Dlatego, jeżeli Doktorant będzie dalej działał w tym obszarze nauki, ściślejsza współpraca z technologami oraz osobami wykonującymi inne badania, powinna zaowocować atrakcyjniejszymi wynikami i publikacjami.

Wynikiem, który mógł być przedstawiony znacznie atrakcyjniej, są dyslokacje, które powstały poniżej zasięgu jonów implantacji. Gdyby dobrze został przedstawiony mechanizm mikroskopowy tego zjawiska, praca mogłaby być zaliczona nawet do wybitnych.

5. Podsumowanie

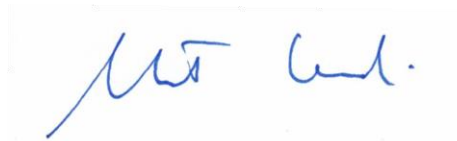
Praca doktorska Przemysława Józwicka jest pracą poprawną, i wraz z osiągnięciami bibliograficznymi, stanowią dobrą podstawę do jej publicznej obrony. Szczególnie cenne są w pracy uzupełnienia programu McChasy do symulacji wyników pomiarów RBS, powstawanie dyslokacji poniżej zasięgu jonów implantacji, oraz stwierdzenie krytycznych wartości dawek Ar 300 keV, powyżej których następuje zniszczenie sieci krystalicznej ZnO.

Praca posiada szereg mankamentów, które zostały przedstawione powyżej, ale nie są one tak znaczące, aby pracę kwestionować.

Dlatego oceniam pracę Przemysława Józwicka pozytywnie i wnoszę o dopuszczenie Go do dalszych etapów zmierzających do nadania stopnia doktora.

Warszawa 12 marca 2017

Prof. Dr hab. Michał Leszczyński

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'M. Leszczyński', is enclosed in a thin black rectangular border.