

Warszawa, 6.05.2013

prof. dr hab. Maciej Bugajski
Instytut Technologii Elektronowej
Al.Lotników 32/46
02 668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Michała A. Borysiewicza
p.t. **Magnetron sputter deposition of electronic functional materials: MAX phases for ohmic contacts and thin ZnO films for transparent electronics**

Recenzowana praca ma charakter doświadczalny. Poświęcona jest badaniu możliwości zastosowania techniki rozpylania magnetronowego w technologii przyrządów mocy i przyrządów optoelektronicznych i czujnikowych z półprzewodników szerokoprzerwowych, GaN i ZnO. Praca wpisuje się w nurt badań poświęconych wytwarzaniu wybranych materiałów funkcjonalnych. Tematyka półprzewodników szerokoprzerwowych, w szczególności badania nad ZnO, należy ostatnich latach do intensywnie badanych w najlepszych laboratoriach na świecie. Związane jest to z nadziejami jakie wiąże się z tzw. przezroczystą elektroniką i czujnikami wielkoformatowymi. Praca nawiązuje w sposób właściwy do aktualnych trendów w tym obszarze techniki, a wybór jej tematyki jest wyjątkowo trafny, w czym upatruje niewątpliwą zasługę promotora. Cele jakie stawia sobie autor to:

- opanowanie technologii wytwarzania termicznie i chemicznie stabilnych kontaktów omowych do n-GaN,
- opanowanie technologii wytwarzania cienkich warstw ZnO o kontrolowanych własnościach strukturalnych, morfologicznych i elektrycznych, do zastosowań optoelektronicznych i sensorowych.

Badania prowadzone były w Zakładzie Mikro i Nanotechnologii Półprzewodników Szerokoprzerwowych ITE, w doświadczonym zespole, mającym na swoim koncie liczne sukcesy w konstrukcji przyrządów mikrofalowych i optoelektronicznych. W rezultacie

powstała praca o dużej wartości poznawczej, zawierająca wiele wyników o znaczeniu praktycznym.

Wyniki badań własnych autora poprzedzone są elementarnym wprowadzeniem w fizykę i technologię kontaktów omowych do n-GaN i ZnO (rozdział 3) i opisowi techniki rozpylania magnetronowego i wygrzewania po-procesowego (rozdział 4). Rozdziały te zawierają omówienie aktualnego stanu wiedzy w temacie i dowodzą, że autor orientuje się dobrze w zakresie zagadnień objętych pracą. Rozdział 5 poświęcony jest opisowi technik eksperymentalnych stosowanych w trakcie realizacji pracy i dotyczy zarówno technologii jak i metod charakteryzacji otrzymywanych materiałów i struktur. Rozdziały wprowadzające liczą w sumie 66 stron i stanowią połowę całej pracy. Mimo trochę zachwianych proporcji pomiędzy częścią opisową a wynikami własnymi nie uważam tego za błąd, a to z powodu wartości merytorycznej i klarowności tych pierwszych. Rozdziały wprowadzające świadczą o tym, że doktorant posiadał głęboką, uporządkowaną logicznie, wiedzę w przedmiocie swojej pracy.

Zasadniczą część pracy zawierającą wyniki badań autora stanowią rozdziały 6 i 7. W pierwszym z wymienionych rozdziałów omówiono badania nad wytwarzaniem i charakteryzacją kontaktów omowych do n-GaN na bazie fazy typu MAX. Autor bada różne sekwencje osadzania Ti, TiN i Al i w konkluzji dochodzi do określenia warunków wytwarzania kontaktu typu Ti_2AlN o optymalnych parametrach. Należy podkreślić, że własności opracowanych kontaktów, a w szczególności ich stabilność termiczna są na poziomie rekordów światowych. Rezystancja kontaktów do n-GaN o koncentracji elektronów $n = 10^{17} \text{cm}^{-3}$ była rzędu $7 \times 10^4 \Omega \text{cm}^2$ i pozostawała stała w trakcie wygrzewania kontaktów w powietrzu w temperaturach 300°C , 400°C i 500°C , przez czas 100 godzin. Uzyskane wyniki posłużyły do przygotowania 5 prezentacji konferencyjnych i 4 artykułów w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym. We wszystkich, prócz jednego, Michał Borysiewicz jest pierwszym autorem, co świadczy o jego wiodącej roli w badaniach.

Z punktu widzenia wartości naukowej i praktycznej pracy za najważniejszy uważam rozdział 7, poświęcony cienkim warstwom ZnO wytwarzanym techniką rozpylania magnetronowego na podłożach szafirowych (Al_2O_3). Szczegółowo przebadano warunki osadzania warstw metodą rozpylania DC i RF i określono parametry wzrostu i wygrzewania prowadzące do powstawania warstw porowatego ZnO, warstw polikrystalicznych i warstw o

najwyższej jakości strukturalnej. Określono, że czynnikiem determinującym strukturę warstw była zawartość tlenu w mieszance argonowo-tlenowej stosowanej w procesie rozpylania. Stwierdzono również, że warstwy poprawiały się poprzez zastąpienie rozpylania DC targetu Zn rozpylaniem RF targetu ZnO. Dodatkowo, warstwy otrzymywane tą ostatnią metodą zawierały wyraźnie niższą koncentrację wodoru, co ułatwia ich domieszkowanie na typ p. W rezultacie, używając Ag jako akceptora wytworzono warstwy o przewodnictwie dziurowym i otrzymano, jako jedne z pierwszych na świecie struktury homozłączone ZnO, wytworzone bez konieczności uciekania się do technik epitaksjalnych (MBE czy MO CVD). Kolejnym ważnym wynikiem było eksperymentalne potwierdzenie aktywnej roli defektów (luk cynkowych V_{Zn}) w formowaniu własności materiałowych warstw ZnO.

Badane były również warstwy porowatego ZnO, które znalazły zastosowanie w czujnikach gazów, działających w oparciu o rejestrację zmian charakterystyk I-V czy zmian transmisji i sensorach biochemicznych wykorzystujących struktury tranzystorów FET. Są to wartościowe rezultaty wskazujące na praktyczną użyteczność przeprowadzonych badań. Demonstracja działania przyrządów jest też zawsze ostatecznym testem jakości materiałów i struktur opracowanych przez doktoranta.

Zaprezentowane w pracy rezultaty stanowią oryginalny wkład doktoranta w badania nad funkcjonalnymi materiałami i strukturami na bazie półprzewodników szerokoprzerwowych GaN i ZnO wytwarzanymi metodą rozpylania magnetronowego. W pracy przedstawiono wyniki prac technologicznych jak i szeroko zakrojonych badań eksperymentalnych własności strukturalnych, składu chemicznego, charakteryzacji optycznej i elektrycznej. Rozprawa stanowi całościowe ujęcie problematyki związanej, wytwarzaniem i charakteryzacją struktur funkcjonalnych, kontaktów omowych do n-GaN na metalizacji Ti_2AlN i struktur homozłączowych na bazie ZnO. Ważnym elementem pracy jest opracowanie technologii wytwarzania porowatego ZnO o mikrostrukturze gąbczastej do zastosowań sensorowych.

Stwierdzam, że cel pracy, którym było opanowanie technologii wytwarzania termicznie i chemicznie stabilnych kontaktów omowych do n-GaN i opanowanie technologii wytwarzania cienkich warstw ZnO do zastosowań optoelektronicznych i sensorowych został w pełni osiągnięty. Udowodniono także, że technologia rozpylania magnetronowego połączona z późniejszym wygrzewaniem jest odpowiednia do tego celu i pozwala na

otrzymywanie materiałów o kontrolowanych własnościach strukturalnych, morfologicznych i elektrycznych. Przytoczone wyniki świadczą o tym, że wykonana została bardzo duża praca eksperymentalna. Wykonano wiele procesów technologicznych, materiał z których wszechstronnie przebadano różnymi metodami co pozwala mieć pełne zaufanie do wyciąganych wniosków. Chciałbym podkreślić przydatność wyników pracy do dalszych badań nad nowymi przyrządami elektroniki wysokotemperaturowej i nowymi strukturami przezroczystej elektroniki. Na wyróżnienie zasługuje rzetelność i pracowitość doktoranta, bardzo dobre opanowanie warsztatu badawczego i zrozumienie podstaw teoretycznych dyscypliny, pozwalające mu nie tylko na projektowanie i prowadzenie procesów technologicznych ale i na prawidłową interpretację wyników pomiarów. Wyniki rozprawy mogą być z powodzeniem zastosowane w praktyce co też powinno mieć wpływ na ostateczną ocenę pracy.

Mając na uwadze wszechstronność przeprowadzonych badań eksperymentalnych, rzetelność i dokładność analizy a także praktyczną wartość otrzymanych wyników wyrażam przekonanie, że praca mgr Michała Borysiewicza spełnia z naddatkiem wymagania stawiane pracom na stopień naukowy doktora. Stawiam wniosek o dopuszczenie mgr Michała Borysiewicza do publicznej obrony pracy doktorskiej a w razie jej pozytywnego zakończenia o wyróżnienie pracy.

