

Prof. dr hab. Witold Daniel Dobrowolski

Warszawa, 18-09-2012

Instytut Fizyki PAN

w Warszawie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Tomasza Aleksandra Krajewskiego pt.  
„Właściwości elektryczne cienkich warstw tlenku cynku otrzymywanych w procesie  
osadzania warstw atomowych (ALD)”**

Praca doktorska magistra Tomasza Krajewskiego dotyczy poznania własności ważnych z punktu widzenia przyszłych zastosowań warstw półprzewodnikowych tlenku cynku (ZnO) wykonanych metodą *atomic layer deposition* (ALD). Praca powstała w kilkunastopersonowym zespole realizującym od lat duże, w tym międzynarodowe projekty badawcze. Autor we współpracy z innymi członkami zespołu przeprowadził szeroko zakrojone eksperymentalne badania takich warstw oraz wnikliwie przeanalizował związek własności fizycznych (transportowych, optycznych i strukturalnych) warstw z parametrami ich wzrostu. Końowy rozdział fragment pracy opisuje konstrukcje oraz możliwości zastosowań złącz Shottky'ego wytworzonych w oparciu o warstwy ZnO otrzymane techniką ALD.

Praca jest obszerna. Liczy 164 strony a bibliografia zawiera ponad 200 pozycji. Praca składa się ze wstępu przedstawiającego cel rozprawy, pięciu rozdziałów i podsumowania. Ponadto Doktorant zamieścił również kilkustronicowy spis swoich prac, wystąpień konferencyjnych, prezentacji plakatowych etc. Przejdę teraz do krótkiego streszczenia pracy. Po wprowadzeniu w tematykę doktoratu, zawarła we wstępie, doktorant

w pierwszym rozdziale dokonuje przeglądu literatury dotyczącego ZnO, jego struktury krystalicznej i elektronowej, porusza problem defektów, omawia też własności transportowe. Rozdział II przedstawia metody otrzymywania kryształów ZnO. Autor opisuje metody otrzymywania kryształów litych oraz cienkich warstw. Znaczną część tego rozdziału zajmuje szczegółowy opis wzrostu warstw metodą ALD. Kolejny (III) rozdział zawiera opis stosowanych do charakteryzacji próbek metod pomiarowych. Czytelnik znajdzie tu zwięzłe opisy zasady działania mikroskopu sił atomowych (AFM), skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), spektroskopii dyspersji energii (EDX), spektroskopii masowej jonów wtórnych (SIMS) i dyfrakcji rentgenowskiej (XRD). Omówione są również pokrótce metody optyczne, a mianowicie pomiary fotoluminescencyjne oraz transmisyjne. Rozdział kończy szczegółowy opis techniki pomiarów transportowych – przewodnictwa elektrycznego i efektu Halla. Autor omawia w detalach technikę sześciokontaktową oraz metodę van der Pauw'a. Można tu się zastanowić, czy aż tak szczegółowy opis dobrze znanych i powszechnie używanych metod jest potrzebny. Niemniej rozdział ten może stanowić wartościowy materiał dla studentów rozpoczynających pracę w tej dziedzinie.

Rozdział czwarty, obok piątego najistotniejszy, zawiera wyniki pomiarów Autora pracy. Autor szuka związków między warunkami wzrostu warstw a parametrami morfologicznymi, strukturalnymi, optycznymi i elektrycznymi. Doktorant zauważa szereg istotnych prawidłowości, które umożliwiają hodowlę warstw o ściśle zadanych własnościach. Poza szeregiem istotnych dla praktyki spostrzeżeń zwraca uwagę staranna analiza mechanizmów rozpraszania nośników w warstwach ZnO otrzymanych metodą ALD.

Rozdział piąty przedstawia rozważania Autora na temat zastosowań warstw. Omawia konstrukcje i zastosowania złącz Schottky'ego wykonanych na warstwach ZnO. Przedstawione są próby otrzymania sensorów gazów, związków organicznych i pamięci typu „cross-bar”. Całość zamyka zwięzłe, dwustronicowe „Podsumowanie”.

Praca napisana jest bardzo ładnym i poprawnym językiem. Recenzent nie znalazł istotnych błędów, które mógłby tu zacytować. Tekst ilustrowany jest starannie przygotowanymi schematami i diagramami. Tylko w jednym miejscu dostrzegłem błędy (str. 82) – nie są to jednak błędy Autora – a wynik braku odpowiednich czcionek w drukarce – czego Autor robiąc korektę na ekranie komputera nie zauważył. Praca niewątpliwie jest jedną z najstaranniej przygotowanych prac doktorskich z jakimi miałem do czynienia. Układ pracy nie budzi moich zastrzeżeń, choć oczywiście można sobie wyobrazić inny układ pracy i inne proporcje prezentowanego materiału. Autor wykazuje dobrą znajomość literatury tematu, o czym świadczą między innymi liczne cytowania. Choć tu z pewnym zdziwieniem nie znalazłem odniesień do prac prowadzonych w Instytucie w innych niż robocza grupa Doktoranta zespołach. Mam tu na myśli prace doświadczalne Ewy Przedzieckiej czy teoretyczne Oksany Volnianskiej i Piotra Bogusławskiego. Prace te nie mają wprawdzie ścisłego związku z prowadzonymi przez Doktoranta pracami, jednak wspomnienie o nich, choćby we wstępie mogłoby mieć miejsce.

Niezależnie od powyżej wspomnianych, kilku, w sumie nieistotnych uchybień, należy podkreślić, że mgr Tomasz Krajewski w swojej pracy doktorskiej zrealizował wartościowy, bardzo szeroki program doświadczalnych badań właściwości warstw tlenku cynku otrzymanych metodą ALD. Doktorant umiejętnie wykorzystał szereg technik pomiarowych. Przeprowadził dogłębną analizę wyników doświadczalnych, Wskazuje to na dobre opanowanie przez mgra Tomasza Krajewskiego metod doświadczalnych stosowanych w badaniach półprzewodników, a także świadczy o jego dużej wnikliwości i aktywności. Wyniki badawcze uzyskane przez doktoranta mają już swoje odzwierciedlenie w znacznej liczbie prac opublikowanych w międzynarodowych czasopismach i wydawnictwach fizycznych oraz wielu prezentacji konferencyjnych i referatów seminaryjnych. Wszystkie prace (co jest oczywiście typowe dla współczesnej fizyki doświadczalnej) są wieloautorskie,

i to o liczbie autorów często przekraczającej dziesięć, ale istotna rola Doktoranta w ich powstaniu wydaje się być bezdyskusyjna, o czym świadczy chociażby kolejność autorów .

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Tomasza Krajewskiego pt. „Właściwości elektryczne cienkich warstw tlenku cynku otrzymywanych w procesie osadzania warstw atomowych (ALD)” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.

W Dobrowolny