

Warszawa, 13 stycznia 2021

Prof. dr hab. Marek Godlewski
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Warszawa

**Recenzja pracy doktorskiej
Aleksandry Filatovej-Zalewskiej
zatytułowanej:**

**„Investigations of thermal conductivity of nitride semiconductors
thin films”**

Praca doktorska Pani Aleksandry Filatovej-Zalewskiej wykonana została w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu. Promotorem rozprawy, napisanej w języku angielskim, jest Prof. dr hab. Andrzej Jeżowski. Przed opisem/oceną tej pracy chcę zaznaczyć, że jest to bardzo wartościowa praca.

Tematyka rozprawy

Wprowadzenie struktur azotkowych (po przełomowych pracach dotyczących p-typu GaN) zaowocowało rewolucją w optoelektronice. Diody azotkowe, w tym tzw. białe diody, są obecnie masowo stosowane, a wymiana klasycznych źródeł światła (żarówki) na diodowe powoduje olbrzymie oszczędności liczone w setkach miliardów euro. Również ważne stało się wprowadzenie diod laserowych od koloru zielonego po ultrafiolet. Powstała cała generacja nowych przyrządów optoelektronicznych. Przykładem jest technologia Blu-ray masowo używana obecnie do zapisu filmów wysokiej jakości.

Względnie nowym kierunkiem badań struktur azotkowych są prace dotyczące tranzystorów wysokiej mocy opartych o GaN i AlGaN. Tego typu tranzystory skutecznie konkurują z tymi wykorzystującymi SiC, czy też GaAs/AlGaAs. Opanowanie produkcji azotkowych tranzystorów wysokiej mocy daje na przykład kluczową przewagę militarną umożliwiając produkcję nowej generacji radarów.

Kluczowym zagadnieniem zarówno w przypadku struktur optoelektronicznych jak i tranzystorów mocy jest odpowiednia dyssypacja generowanego ciepła. Nie jest więc dziwne, że ten problem był i jest intensywnie badany przez wiele grup na świecie. **Bieżąca praca dotyczy więc bardzo ważnego i aktualnego zagadnienia przewodnictwa cieplnego w warstwach i strukturach azotkowych. Wybór takiej tematyki badawczej należy docenić i wysoko ocenić.**

Cele rozprawy

Ten punkt jest w moim odczuciu słabszym elementem złożonej rozprawy. Kandydatka pisze, że celem rozprawy było przeprowadzenie badań jak i analiza procesów fizycznych odpowiedzialnych za przewodnictwo cieplne (patrz Streszczenie). **To stwierdzenie bardzo kontrastuje z ważnym problemem badawczym realizowanym w ramach rozprawy.** Analizując zawarty w rozprawie materiał badawczy uważam, że celem rozprawy powinna być weryfikacja wyników dotychczasowych prac, ocena stosowanych technik pomiarowych, a także sugestie jaka konstrukcja skomplikowanych struktur (na przykład supersieci) umożliwi najskuteczniejszą dyssypację ciepła. **Dla osób parających się wdrożeniami struktur azotkowych byłyby to niezwykle ważne wskazówki.**

Brak jasno zdefiniowanych celów rozprawy utrudnia także prostą odpowiedź na pytanie na ile przedstawione wyniki są oryginalne, czy też są tylko uzupełnieniem naszej dotychczasowej wiedzy.

Konstrukcja rozprawy, krótki opis treści

Rozprawa zawiera sześć głównych rozdziałów poprzedzonych Streszczeniem i krótkim Wstępem i zakończona jest Podsumowaniem uzyskanych wyników. Poniżej krótko analizuję poszczególne rozdziały. Zanim jednak przystąpię do tej analizy chcę zaznaczyć, że praca jest poprawnie napisana. Czyta się ją dobrze, a ilość usterek językowych nie jest znacząca.

Rozdział pierwszy składa się z pięciu części w których autorka opisuje przewodnictwo cieplne sieci, stosowane modele do analizy tego procesu, model kryształu wirtualnego,

pojęcie minimalnego przewodnictwa cieplnego oraz analizę zależności przewodnictwa cieplnego od temperatury sieci.

Mam kilka uwag dotyczących tej części rozprawy. Podając opis badanego zjawiska autorka podaje odpowiednie wzory, wskazuje na mechanizmy rozpraszania i wymienia używane procedury/modele używane do analizy wyników pomiarowych. Muszę przyznać, że miałem kłopot w śledzeniu jak otrzymywane są finalne wzory. W szczególności jak rozumieć stwierdzenie podane na stronie piątej, że:

$$(v_g^z)^2 = 1/3 v_g^z$$

Jeśli tak jest to:

$$v_g^z = 1/3$$

co to znaczy?

Opisując stosowany w pracy model Callaway'a autorka wymienia jego ograniczenia. Są to: nie uwzględnienie fononów optycznych oraz silnie ograniczenie ilości włączonych do modelu fononów akustycznych. Nie jest to w pełni jasne skąd wynikają takie ograniczenia modelu.

Rozdział drugi zawiera przegląd danych literaturowych dotyczących opisu zjawiska transportu ciepła w różnych materiałach. Podrozdział 2.1 zawiera podsumowanie co wiadomo dotychczas o procesie przewodnictwa cieplnego (w warstwie i prostopadle do niej) w cienkich warstwach. Z punktu widzenia dalszych prac ważne są wyniki omówione w podrozdziale 2.3, który dotyczy analizy wyników dla supersieci.

Wielowarstwy, w tym supersieci, zawierają wiele międzypowierzchni. Tym samym dla analizy wyników pomiarowych istotna jest analiza procesów rozpraszania fononów na granicy pomiędzy warstwami. Autorka omawia krótko dwa używane modele do analizy tego procesu i ich stosowalność.

Rozdział trzeci poświęcony jest omówieniu dotychczasowych wyników badawczych dla azotku galu (GaN), azotku glinowo-galowego (AlGaN), warstw GaN/AlGaN i w końcu

supersieci tych dwóch materiałów. Rozdział zawiera bogatą w cytowania informację o wynikach dotychczasowych prac.

To zestawienie jednak częściowo rozczarowuje. Implikuje ono dwa zasadnicze pytania:

1) **Która z używanych metod pomiarowych daje prawidłowe oszacowanie przewodnictwa cieplnego?** A może każda z nich daje prawidłowe wyniki? **Bardzo szkoda, że autorka rozprawy poza zestawieniem danych literaturowych nie zestawiała uzyskanych wyników w omawianych prac, co prawdo podobnie umożliwiłoby odpowiedź na moje pytania.**

2) **Co nowego wnoszą wyniki rozprawy?** Czy dotychczasowe wyniki były rozbieżne lub dawały sprzeczne informacje o mechanizmach rozpraszania? Taka analiza pomogłaby w ocenie wagi zawartych w pracy wyników.

Rozdział czwarty zawiera opis metody 3ω stosowanej przez autorkę rozprawy i opis zbudowanego układu pomiarowego. Opis metody pomiarowej zaczyna się zaskakująco od opisu próbki cylindrycznej. Wydaje się to dziwne i stawia pytanie co ma wspólnego taki układ z realną konfiguracją eksperymentu. Dopiero w trakcie dalszego czytania zrozumiałem, że jest to stosowane przybliżenie do opisu układu pomiarowego.

W podrozdziale 4.7 przedstawiona jest walidacja używanej procedury pomiarowej zaczynając od wyników dla prostej struktury Si/SiO₂, kończąc na wynikach dla supersieci. **Powtarzam tutaj moją uwagę: szkoda, że autorka nie przedstawiła wcześniej porównania różnych stosowanych metod pomiarowych. W konsekwencji nie wiemy jak dokładne są przedstawiane wyniki pomiarowe.**

Wyniki uzyskane przez autorkę rozprawy przedstawione są **w rozdziałach pięć i sześć. To jest najważniejsza część pracy.** To w tych rozdziałach autorka zestawia własne wyniki z dostępnymi dotychczas w literaturze. Przedstawia wyniki dla różnych struktur, w tym także rozbudowanych (supersieci), przedstawia wyniki zależności temperaturowych procesów transferu ciepła. Autorka pisze także o rozbieżnościach pomiędzy wynikami eksperymentalnymi i teorią i weryfikuje informacje o mechanizmach rozpraszania.

Są to bardzo ważne wyniki choć „chciałoby się więcej”. W obecnej formie (patrz zadziwiająco krótkie podsumowanie wyników – **rozdział siódmy**) bieżąca praca zawiera pewien zestaw informacji, choć prawdopodobnie na podstawie bieżących wyników można zaryzykować pewne generalizacje – w szczególności jak konstruować struktury azotkowe, aby w miarę możliwości minimalizować problemy z dyssypacją ciepła. Rozumiem jednak, że dotychczasowa wiedza może być jeszcze zbyt uboga aby takie generalizacje zaproponować.

Podsumowanie rozprawy

Jak już pisałem powyżej rozprawa dotyczy bardzo ważnego zagadnienia dyssypacji energii (ciepła) w warstwach i rozbudowanych nanostrukturach (supersieci) materiałów azotkowych. Mimo pewnych zastrzeżeń wymienianych powyżej uważam, że **jest to bardzo wartościowa praca doktorska, która spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim.** Tym samym wnioskuję dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów postępowania.



