

Recenzja rozprawy doktorskiej
pt. „Investigation of thermal conductivity of nitride semiconductors
thin films”

autor rozprawy: mgr inż. Alexandra Filatowa - Zalewska

1. Uwagi wstępne

Przedstawiona praca doktorska została zrealizowana przez mgr inż. Alexandrę Filatową – Zalewską w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN we Wrocławiu. Promotorem pracy był prof. dr hab. Andrzej Jeżowski.

W ostatnim dwudziestoleciu obserwujemy dynamiczny rozwój technologii elementów i układów przeznaczonych do pracy w zakresie wysokich częstotliwości i dużych mocy min. do zastosowań w elektronice, energetyce lub jako źródła promieniowania laserowego w optoelektronice. Wprowadzanie konstrukcji przyrządów funkcjonalnych, z coraz mniejszym rozmiarem charakterystycznym, z zastosowaniem heterostruktur związków wieloskładnikowych stawia ogromne wyzwanie zarówno przed projektantami konstrukcji jak i technologami odpowiedzialnymi za ich praktyczną realizację. Baza materiałów dla elektroniki to przede wszystkim węgiel krzemu SiC, heterostruktury na bazie azotków AIIIIN, a w przypadku źródeł laserowych, np laserów kaskadowych, związki poczwórne lub pięcioskładnikowe materiałów AIIIIV. Większość proponowanych rozwiązań konstrukcyjnych związanych jest ze stosowaniem zaawansowanych metod inżynierii pasma zabronionego, inżynierii czasu życia nośników czy inżynierii kontroli wymaganych przejść energetycznych w strukturach przyrządowych. W ostatnim okresie, ze względu na szybki rozwój rozwiązań konstrukcyjnych, w których mamy do czynienia z wykorzystaniem transportu nośników o bardzo dużej gęstości nośników (dużymi prądami), istotnym ograniczeniem przy projektowaniu przyrządów jest efekt samonagrzewania się struktur, generacja gorących punktów w strukturze (szczególnie związana z defektami) i w konsekwencji pogorszenie charakterystyk wyjściowych poszczególnych przyrządów. Należy podkreślić, że stosowanie nowych warstw o różnych składach stopów, wzrost ilości warstw w heterostrukturach (dzisiaj przedmiotem badań i aplikacji są heterostruktury zawierające nawet do 1200 warstw, co oznacza np. występowanie 1200 interfejsów) o grubości nawet poniżej 1 nanometra, wymaga wyznaczenia, często niedostępnych w literaturze, parametrów termicznych stosowanych warstw, niezbędnych do

poprawnego modelowania zjawisk i mechanizmów rozpraszania mocy w tych strukturach oraz do zaawansowanego projektowania nowych generacji przyrządów elektroniki i optoelektroniki dużej mocy – zwanej inżynierią zarządzania procesami rozpraszania mocy.

W swoich pracach mgr inż. Alexandra Filatowa - Zalewska skoncentrowała się na badaniach przewodnictwa cieplnego warstw i struktur na bazie azotku galu (GaN). Celem pracy doktorskiej było przeprowadzenie badań przewodnictwa cieplnego warstw AlGaN i supersieci AlGaN/GaN oraz wyjaśnienie mechanizmów transportu ciepła w tych materiałach.

Dlatego uważam, że z naukowego punktu widzenia oraz potrzeb metod i technik pomiarowych rozprawa jest bardzo aktualna i jednocześnie ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Tematyka pracy mieści się w głównym nurcie badań z dziedziny inżynierii materiałowej, fizyki, nanoelektroniki, nowych konstrukcji przyrządowych i układów pomiarowych dla potrzeb mikro- i nanooptoelektroniki oraz dziedzin silnie z nimi powiązanych - medycyny i biologii. Dodatkowo więc ma charakter badań multidyscyplinarnych.

2. Zawartość merytoryczna pracy

Swoje rozważania, rezultaty badań teoretycznych, projektowych, eksperymentalnych oraz wyniki ich analizy Autorka przedstawiła na 119 stronach, wliczając w to wykaz literatury. Wykaz zawiera 158 źródeł literaturowych w tym 4, których mgr Alexandra Filatowa - Zalewska jest współautorką, wydzielonych spisów rysunków oraz tabel.

W pierwszym rozdziale Autorka wprowadza nas w tematykę badań i zakres tematyki badawczej rozprawy. Rozważa zagadnienia dotyczące przewodnictwa ciepła w materiałach półprzewodnikowych i dielektrykach. Analizuje zagadnienia opisujące transport ciepła w takich materiałach, przedstawiając jednocześnie podstawowe równania opisujące te zjawiska wychodząc z podstawowej zależności opisującej funkcję rozkładu fononów w stanie równowagi. Wprowadzając funkcję Boltzmana rozwija teorię opisującą transport ciepła i przedstawia zależność końcową niezbędną dla określenia przewodnictwa cieplnego. Następnie opisuje model Callaway'a i teorię kryształu wirtualnego, które zastosowała do analizy eksperymentalnych wyników otrzymanych z pomiarów warstw AlGaN i supersieci AlGaN. Omawia przykładowe przebiegi temperaturowej zależności przewodnictwa cieplnego materiałów objętościowych oraz przykładowych warstw. Wstępnie wskazuje wpływ zakresu temperatury na charakter tych zależności w powiązaniu z dominującymi mechanizmami procesów rozpraszania. Podkreśla, że zupełnie innych zależności należy oczekiwać w wypadku warstw i supersieci na bazie GaN ze względu na istotny wpływ zjawisk występujących na granicach warstw oraz wpływ granic ziaren.

Rozdział drugi zawiera analizę danych literaturowych dotyczących eksperymentalnej i teoretycznej analizy przewodnictwa cieplnego w supersieciach. Analiza została przeprowadzona na podstawie wybranych doniesień literaturowych uznanych za reprezentatywne dla tego obszaru badawczego. Badania literaturowe dotyczyły różnych układów materiałowych stosowanych do wytwarzania supersieci, przykładowo takich jak: Si/Ge, InN/InGaN, GaAs/AlAs. Brak większej ilości pozycji literaturowych dotyczących zagadnień transportu ciepła w supersieciach na bazie azotku galu. Podsumowując część analizy danych dotyczących transportu ciepła w supersieciach Autorka przytoczyła podstawowe zależności temperaturowe dla rozpraszania ciepła z uwzględnieniem różnych mechanizmów rozpraszania. W tym rozdziale wprowadzane są również pojęcia rozpraszania ciepła w płaszczyźnie (in - plane) i w poprzek płaszczyzny (cross - plane) obserwowane przede wszystkim w supersieciach. Na podstawie analizy danych Autorka definiuje trzy obszary zależności przewodności cieplnej supersieci dla trzech różnych relacji między grubością okresu supersieci i drogą swobodną fononu (Λ). Omówiono również teoretyczne zależności opisujące przewodnictwo cieplne w płaszczyźnie oraz poprzecznie do płaszczyzny. W końcowej części rozdziału Autorka dyskutuje problemy związane z rezystancją termiczną granic warstw.

Rozdział trzeci rozprawy dotyczy analizy danych dotyczących przewodnictwa cieplnego w materiałach objętościowych i warstwach GaN, warstwach AlGaIn oraz supersieciach AlN/GaN i AlGaIn/GaN. Należy podkreślić, że analiza danych dotyczy publikacji istotnych dla określenia parametrów przewodnictwa cieplnego prezentowanych przede wszystkim w okresie ostatnich piętnastu latach. Jednocześnie prezentowane zależności i wyznaczone parametry, przedstawione w wymienionych publikacjach, były podstawą do porównania i oceny parametrów podobnych struktur badawczych wyznaczonych na podstawie pomiarów i obliczeń prezentowanych przez Autorkę w następnych rozdziałach.

W rozdziale czwartym mgr Alexandra Filatowa - Zalewska omawia podstawowe zasady metody pomiarowej 3ω koncentrując się na rozważaniach dotyczących zastosowania jedno- i dwuwymiarowego modelu przewodnictwa ciepła. Omówiony został układ eksperymentalny zbudowany na potrzeby przeprowadzenia pomiarów cienkich warstw i supersieci będących przedmiotem badań w ramach rozprawy. Istotą zaproponowanego układu pomiarowego jest zaprojektowanie i wykonanie specjalnej konfiguracji struktury pomiarowej zawierającej grzejnik oporowy jako źródło ciepła oraz spełniający również wymagania czujnika zmian napięcia w efekcie rozpraszania ciepła w badanym materiale. Zasada pomiaru 3ω opiera się na rejestracji czasowych przebiegów prądu zasilającego grzejnik, mocy traconej w grzejniku, temperatury i przebiegu napięcia odkładającego się na grzejniku. Omówiono szczegółowe

korelacje między poszczególnymi przebiegami. Wyznaczenie trzeciej harmonicznej spadku napięcia na grzejniku umożliwia określenie przewodnictwa cieplnego próbki bezpośrednio zlokalizowanej pod grzejnikiem w powiązaniu ze współczynnikiem ΔT_{AC} . Zastosowanie jednowymiarowego modelu w ocenie doktorantki ma szereg ograniczeń. Model ten jest słuszny przy założeniu że przewodność cieplna próbki jest znacznie mniejsza od przewodności cieplnej podłoża. W odwrotnym wypadku spadek temperatury będzie miał wartość ujemną lub w przybliżeniu równą zero co uniemożliwia zastosowanie tego modelu. Te ograniczenia były podstawą do analizy układu z dwuwymiarowym modelem przewodnictwa ciepła zarówno w płaszczyźnie jak i w poprzek płaszczyzny. Zaproponowano metodologię wyznaczania przewodnictwa ciepła w strukturze składającej się z podłoża w pojedynczej sekwencji oraz dwóch warstw, analizując warunki brzegowe brane pod uwagę zarówno dla każdej warstwy jak i dla podłoża. Omówiono również końcową zależność zmian temperatury grzejnika w funkcji parametrów, min. geometrii grzejnika, przewodnictwa cieplnego czy częstości przebiegów. Zaprezentowano metodę dwu – grzejnikową (two-wire 3ω method) pomiaru parametrów przewodnictwa. W podrozdziale 4.6 Autorka rozprawy szczegółowo opisała opracowany uchwyt struktur testowych na płytce z miedzi i sposób montowania jej w kriostacie. Omówiła zaproponowany system pomiarowy do wyznaczania przewodnictwa temperaturowego oraz opracowany własny schemat układu elektronicznego do pomiaru trzeciej harmonicznej przebiegu napięciowego na grzejniku. Pomiary były prowadzone w zakresie temperatur od 150 do 325 K z krokiem zmian temperatury 5 K przy zdefiniowanych warunkach pomiaru. Szkoda, że Autorka nie miała możliwości przeprowadzenia pomiarów w większym zakresie temperatur. Mówiąc o zastosowaniu badanych heterostruktur w konstrukcji elementów elektroniki wysokotemperaturowej należy mieć na uwadze fakt, że ze względu na rozpraszaną moc temperatura w tych przyrządach osiąga wielkość nawet 600 K przy przepływie prądu na poziomie pojedynczych amperów. Wtedy zjawiska rozpraszania ciepła z udziałem nośników prądu często mają bardziej złożony charakter i nie można go pominąć. Uwzględniono konfigurację warstw, zawartość glinu w stopie, grubość poszczególnych warstw i heterostruktur oraz konfigurację supersieci. Wyniki badań za pomocą zaproponowanego systemu, a także wyniki modelowania przedstawiono, w rozprawie, na rysunkach od 19 do 27. Niepewność otrzymanych wyników z pomiarów i modelowania oszacowano na poziomie 10%. Wielkość ta jest porównywalna z przytoczonymi danymi literaturowymi. Przeprowadzona szczegółowa analiza danych teoretycznych, uporządkowanie podstawowych korelacji między poszczególnymi parametrami charakteryzującymi przewodnictwo cieplne, z uwzględnieniem tych mechanizmów transportu, które mają istotny wpływ na badane przewodnictwo, a parametrami badanych struktur testowych było podstawą opracowania metodologii

przewodzenia badań i założeń do modelowania i obliczania parametrów termicznych. Przeprowadzone badania potwierdziły słuszność założeń przyjętych przy opracowaniu metody pomiarowej i z powodzeniem zostały zastosowane przez mgr inż. Alexandrę Filatową - Zalewską w badaniach bardziej złożonych heterostruktur AlGa_N/Ga_N, opisanych w rozdziałach 5 i 6.

Badania prezentowane w rozdziale 5 są kontynuacją wstępnych badań przedstawionych w rozdziale 4 i dotyczą konfiguracji struktury przedstawionej na rysunku 28. Struktura ta jest dość nietypowa i dlatego w ramach dyskusji proszę Autorkę rozprawy o komentarz, dlaczego wybrano taką strukturę. Rezultaty badań zostały przedstawione w formie graficznej i w tabelach 1 i 2 nie budzą wątpliwości. Brakuje dokładnego wyjaśnienia jak dobierano grubość, d , (efektywny rozmiar próbki) w celu otrzymania najlepszego dopasowania do zmierzonego przewodnictwa termicznego (str. 73). Bardzo pozytywnie oceniam zakres prowadzonych badań oraz otrzymane wyniki i ich interpretację dla supersieci omówione w rozdziale 6. Dyskutowane są zagadnienia wpływu zmniejszenia okresu supersieci na zmniejszenie przewodnictwa cieplnego związane ze wzrostem rozpraszania fononów na granicach w supersieci. Autorka wykazała również, na podstawie analizy czasu relaksacji obserwowanego dla różnych mechanizmów rozpraszania, że dominującym procesem jest rozpraszanie na granicach supersieci. Dodatkowo stwierdzono, że rozpraszanie występujące w warstwach AlGa_N związane jest z dużym nieuporządkowaniem samego stopu.

Szczegółowe wyniki prowadzonych badań i wyznaczone korelacje dla zaproponowanych konfiguracji heterostruktur zostały bardzo dobrze przedstawione w podsumowaniu pracy i dlatego nie będę ich przytaczał w mojej recenzji.

Do najważniejszych osiągnięć Autorki można zaliczyć:

- przeprowadzenie badań izotropowego przewodnictwa cieplnego w funkcji temperatury i składu stopu AlGa_N, dla zawartości glinu poniżej 11%,
- wielowątkowe badania zależności anizotropowego przewodnictwa cieplnego AlGa_N w funkcji temperatury i grubości okresu supersieci,
- wyznaczanie przewodnictwa cieplnego supersieci AlGa_N / Ga_N z wykorzystaniem modelu Callaway'a i Umklappa, z uwzględnieniem wpływu defektów punktowych i procesów rozpraszania fononów na granicach warstw,

3. Uwagi dyskusyjne:

Zdaję sobie sprawę z tego, że zaproponowana tematyka rozprawy doktorskiej oraz cel pracy stanowią duże wyzwanie dla młodego naukowca. Azotki trzeciej grupy układu okresowego,

AIII-N, mimo 50 letniej historii ich badań, nadal stanowią ogromne wyzwanie technologiczne. Ich technologię należy zaliczyć do wyjątkowo trudnej, prowadzonej w bardzo wysokich temperaturach i jednocześnie przy ograniczonym dostępie do objętościowego azotku galu. Sosowane są podłoża szafirowe (Al_2O_3), z węglika krzemu czy ostatnio bardzo intensywnie podłoża krzemu. Największym problemem jest niedopasowanie strukturalne podłoża, warstw azotków i heterostruktur. W wypadku tych struktur trudno mówić o uporządkowaniu dalekiego zasięgu. Heterostrukturek charakteryzują się dużymi naprężeniami, rozbudowanymi interfejsami i silnym zdefektowaniem. W wielu wypadkach mamy do czynienia z blokową strukturą. Przyrządy wytwarzane w heterostrukturach przeznaczone są do pracy w bardzo wysokiej temperaturze i problemem staje się rozpraszanie dużej mocy (ciepła). W pracy przedstawiono wyniki pomiarów w zakresie do 325 K.

Bardzo pozytywnie należy ocenić opracowaną metodologię badań i weryfikację przedstawionej eksperymentalnej metody pomiaru właściwości przewodnictwa cieplnego. Ma ona istotne znaczenie i zastosowanie praktyczne do wyznaczenia własności termicznych nowych, trudnych technologicznie materiałów w dziedzinie fizyki i inżynierii materiałowej. Kilka swoich uwag odnośnie prezentowanych wyników przedstawiłem przy omawianiu zawartości merytorycznej poszczególnych rozdziałów. Analizując wyniki badań i omawiając je w kontekście zastosowania w nanoelektronice i optoelektronice, mając na uwadze stosowaną strukturę testową proszę o wyjaśnienie:

- roli tak grubej warstwy SiO_2 na powierzchni struktury testowej,
- zastosowanie grubej warstwy AlGaIn na poziomie kilkuset, nawet 500 nm (w strukturach tranzystorowych typowa grubość tych warstw to 20 – 30 nm). Czy tak duże zmniejszenie grubości będzie miało istotny wpływ na zmianę charakteru przewodności cieplnej,
- jak określono wymagania w stosunku do grubości drugiego, cienkiego grzejnika na strukturze testowej. Czy w wypadku warstw nanometrowych miałyby znaczenie naniesienie linii grzejnej, o szerokości porównywalnej z grubością warstwy AlGaIn czy okresu supersieci?

4. Uwagi redakcyjne

- Wyraźnie brakuje, na wstępie pracy, wykazu stosowanych skrótów i akronimów. Obecnie w literaturze źródłowej stosuje się tak ogromną ilość skrótów i akronimów utrudniających szybką lekturę i dlatego wykaz taki wydaje się niezbędnym. Należy pamiętać, że wiele oznaczeń w różnych dziedzinach oznacza zupełnie inne parametry.
- Pomiaru zawsze prowadzimy w funkcji temperatury. Dlatego przedstawiając zależność graficzną nie możemy stosować określenia „w funkcji logarytmu z temperatury (poprawnie

zależność wyznaczona w skali logarytmicznej).

- Al nie jest domieszką w stopie AlGa_N. Jest to częsty błąd spotykany w literaturze, dotyczący zawartości glinu. Różnica polega na tym, że domieszka wbudowywana w podsić galu występuje na poziomie zawartości o kilka rzędów mniejszym i spełnia zupełnie inną rolę w warstwie, niż składnik stopu.
- W niektórych podpisach pod rysunkami brakuje informacji, czy przedstawione wyniki są autorstwa doktorantki (np. rys. 30, 31, 32, 33) – brakuje określenia prace własne

Niezależnie od powyższych uwag poziom redakcji oceniam bardzo dobrze, praca napisana jest logicznie i zrozumiale. Konstrukcja pracy, podział na poszczególne rozdziały i podrozdziały oraz dobór cytowanych prac źródłowych nie budzą żadnych zastrzeżeń.

Nie przytaczam szczegółowych wyników czy parametrów przewodnictwa cieplnego zakładając, że autor przedstawi szczegółowe końcowe wyniki w swoim wystąpieniu. Przedstawione wyniki badań i wnioski będące rezultatem badań rozszerzają wiedzę na temat możliwości pomiarowych zaproponowanego układu pomiarowego i opracowanej metodologii prowadzenia badań, szczególnie dla heterostruktur i superieci na bazie dwuwarstwy AlGa_N/Ga_N i stanowią istotny wkład w zrozumienie zjawisk rozpraszania ciepła i zjawisk decydujących o przewodnictwie ciepła w powyższych strukturach.

Tym samym mogę stwierdzić, że Autorka osiągnęła proponowany cel rozprawy doktorskiej oraz rozwiązała przedstawione w rozprawie zadania szczegółowe. Ze względu na duże walory poznawcze i wyraźny aspekt praktyczny przedstawioną rozprawę uważam za bardzo dobrą. Recenzent stwierdza, że rozprawa mgr inż. Alexandry Filatowej - Zalewskiej stanowi oryginalny i samodzielny dorobek Autorki oraz spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy.

5. Wniosek końcowy

Biorąc pod uwagę dorobek naukowy mgr Alexandry Filatowej - Zalewskiej i pozytywną ocenę Jej rozprawy doktorskiej uważam, że **spełnione są wszystkie wymagania wynikające z Ustawy z 14.03.2003r. o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wraz ze wszystkimi późniejszymi nowelami.** Mgr inż. Alexandra Filatowa - Zalewska **spełnia wymagania stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora nauk fizycznych i wnioskuje o dopuszczenie do publicznej obrony przedstawioną rozprawę doktorską.**

Dodatkowo pragnę stwierdzić, że na tym etapie postępowania nie mogę sformułować wniosku o wyróżnienie rozprawy przez Radę Naukową. Zawsze stosuję zasadę, że taki wniosek należy rozważyć dodatkowo uwzględniając poziom prezentacji oraz przebieg dyskusji merytorycznej.