



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

Wrocław, 4 sierpnia 2023r.

Prof. Robert Kudrawiec
Katedra Inżynierii Materiałów Półprzewodnikowych
Wydział Podstawowych Problemów Techniki
Politechnika Wrocławska
ul. Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27,
50-370 Wrocław
Tel.: +48 723 645 481, Fax: +48 71 328 36 96
e-mail: robert.kudrawiec@pwr.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Karoliny Kalbarczyk zatytułowanej
„Poszukiwanie funkcjonalności spintronicznych w strukturach GaN zawierających
Mn lub Fe” wykonanej pod opieką prof. dr hab. Macieja Sawickiego**

Praca doktorska Pani mgr Karoliny Kalbarczyk jest pracą eksperymentalną z fizyki ciała stałego i jej przedmiotem jest poszukiwanie właściwości spintronicznych w azotku galu domieszkowanym w sposób wysoce kontrolowany jonami manganu lub żelaza.

Dwie dekady temu po pracy T. Dietl et al. Science 287, 1019 (2000) azotek galu domieszkowany manganem budził duże zainteresowaniem ze względu na przewidywaną teoretycznie fazę ferromagnetyczną w temperaturze pokojowej. Na dzień dzisiejszy środowisko naukowe zajmujące się tą tematyką jest już przekonane do tego, że warunki wymagane do osiągnięcia takiej fazy są bardzo trudne do realizacji (Ga, Mn)N ze względu na jego wrodzone cechy (przeważające defekty punktowe typu donorowego, dyslokacje typowe dla heteroepitaksji, duża energia aktywacji dziur niezależnie od stosowanych domieszek, ...). Doktorantka też jest tego świadoma i pisze o tym we wstępie niniejszej dysertacji. Mimo utraty przekonania do realizacji kontrolowanego polem elektrycznym ferromagnetyzmu w temperaturze pokojowej w (Ga,Mn)N materiał ten oraz azotek galu domieszkowany żelazem są wciąż bardzo ciekawymi obiektami do badań w fizyce ciała stałego. Jest tak chociażby z powodu silnych efektów polaryzacyjnych (duża spontaniczna i piezoelektryczna polaryzacja) w GaN, które są do zaniebdania w półprzewodnikach III-V krystalizujących w strukturze kubicznej, oraz zastosowań w emiterach światła oraz tranzystorach wysokiej mocy. W tym ostatnim zastosowaniu wysoko rezystywne podłoża wymagane są w tranzystorach planarnych i wciąż stanowią wyzwanie. GaN domieszkowany żelazem stanowi jedno z rozwiązań tego problemu i jak dotąd dość intensywnie był badany pod tym kątem, a GaN domieszkowany manganem może być kolejnym alternatywnym rozwiązaniem tego problemu. W związku z tym dalsze poszukiwanie właściwości spintronicznych w azotku galu oraz lepsze zrozumienie jego wrodzonych cech ma swoje uzasadnienie mimo tego, że coraz mniej ludzi zajmuje się podobnymi badaniami. Ale tak już jest, że pewne



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Wrocław University
of Science and Technology
Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51
Bank Account
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

tematy z czasem tracą na zainteresowaniu, a po czasie mogą ponownie zyskać. Jak będzie w tym wypadku przekonamy się po latach.

Przedłożona do recenzji rozprawa składa się z sześciu rozdziałów z czego rozdział 5 przedstawia oryginalne wyniki uzyskane przez doktorantkę lub przy udziale doktorantki, rozdział 1 przedstawia cel i motywację, a rozdział 6 zawiera podsumowanie. Rozdziały 2-4 wprowadzają czytelnika do tematyki dysertacji i obejmują: rozdział 2 – opis funkcjonalności spintronicznych obejmujący opis gigantycznego magnetooporu, magnetooporu tunelowego, spinowego efektu Halla, przeniesienia spinowego momentu pędu, filtru spinowego oraz efektu piezoelektromagnetyczny w GaN z Mn; rozdział 3 – podstawowe informacje dotyczące badanych kryształów, a w tym informacje o metodach wzrostu badanych kryształów; rozdział 4 – opis aparatury pomiarowej wykorzystanej w niniejszej dysertacji. Podsumowując rozdziały 2-4 niniejszej rozprawy uważam, że czyta się je bardzo dobrze. Doktorantka w odpowiednich miejscach odsyła czytelnika do odpowiedniej literatury, a jej dobór jest właściwy i świadczy o bardzo dobrej znajomości literatury przedmiotu. Balans pomiędzy długością opisu oraz zawartością informacji potrzebnych do zrozumienia wyników przedstawionych w głównej części rozprawy jest dobrze wyważony. Nie znalazłem w tych opisach błędów merytorycznych poza jednym niedopatrzaniem na stronie 19-stej gdzie doktorantka pisze, że '...pasma przewodnictwa formowane jest z atomowych powłok s, a pasmo walencyjne jest liniową kombinacją powłok p^3 .' Zakładam, że miała na myśli orbitale s i p, a nie powłoki elektronowe.

Odnosząc się do oryginalnych wyników uzyskanych przez doktorantkę i opisanych w rozdziale 5, podzielone są one na dwie części. W pierwszej części doktorantka opisuje struktury zawierające warstwę (Ga, Mn)N uzyskane metodą MOVPE oraz MBE, a w drugiej struktury na bazie GaN domieszkowane żelazem. Do wykonania pomiarów elektrycznych w polu magnetycznym i zaobserwowania efektów spinowych w warstwie (Ga, Mn)N kluczowe jest odpowiednie przygotowanie próbki tj. wykonanie odpowiednich kontaktów elektrycznych oraz ograniczenie obszaru przepływu prądu poprzez odpowiednie wytrawienie obszaru aktywnego próbki. Po takich zabiegach wykonanych w trzech podejściach doktorantka ostatecznie dochodzi do wniosku, że dyslokacje, które są typowe dla warstw GaN osadzanych na obcych podłożach a w tym szafirze, są główną przeszkodą w uzyskaniu próbki, która nadawałaby się do badania efektów spinowych, a dokładnie w tym wypadku zaobserwowania filtrowania spinowego. Jest to negatywny wynik, który jest bardzo rzetelnie opisany i rzuca sporo światła na ewentualne dalsze badania w tym kierunku. W tym wypadku nasuwa się wniosek, że do tego typu badań potrzebne są próbki osadzone na prawdziwie litym kryształ GaN o niskiej liczbie dyslokacji. Taki też wniosek doktorantka formułuje po badaniach przeprowadzonych dla warstw (Ga, Mn)N wykonanych metodą MBE. W tym wypadku architektura struktury była inna i do ograniczenia przepływu prądu po dyslokacjach osadzono warstwę dielektryczną Al_2O_3 metodą ALD. Pomiarami

unite! 
University Network for Innovation,
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614

NIP: 896-000-58-51

Bank Account

37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



magnetyzacji w niskiej temperaturze potwierdzono fazę ferromagnetyczną w (Ga, Mn)N. W temperaturze pokojowej takiej fazy nie zaobserwowano. Pomiary charakterystyk prądowych dla tego typu struktury (tj. diody Schottky'ego) pozwoliły wyznaczyć wysokość bariery Schottky'ego dla złącza Au/Ti/(Ga,Mn)N oraz współczynnik idealności dla takiej diody. Wyniki te zostały opublikowane przez doktorantkę w pracy K. Kalbarczyk, et al., „*Electrical characteristics of vertical-geometry Schottky junction to magnetic insulator (Ga, Mn)N heteroepitaxy grown on sapphire*”, Journal of Alloys and Compounds 804, 415-420 (2019). Jest to ciekawy wynik tym bardziej, że wielkości te (bariera Schottky'ego oraz współczynnik idealności) wyznaczone są w przedziale temperatur 150-300 K gdzie istotnie się zmieniają. Przyczyny tych zmian nie są wytłumaczone przez doktorantkę, może dlatego że nie były głównym celem badań ale mimo tego warto byłoby to w jakiś sposób wyjaśnić lub skomentować. Takich wyjaśnień/komentarzy spodziewałbym się na obronie.

W drugiej części dotyczącej warstw GaN domieszkowanych żelazem doktorantka chciała sprawdzić czy poprzez odwrotny efekt piezoelektryczny będzie można kontrolować właściwości magnetyczne wytrąceń o nanometrowych rozmiarach. W tym wypadku odpowiednie przygotowanie próbek do pomiarów elektryczny było również dużym wyzwaniem. Wyniki uzyskane przez doktorantkę nie były jednoznaczne co zostało rzetelnie opisane w dysertacji. Ostatecznie doktorantka stwierdziła, że dla badanych próbek „nie udało się zarejestrować zmian które mogły by świadczyć o istnieniu związku pomiędzy elektrycznym modulowaniem struktury GaN a właściwościami magnetycznymi zawartych w niej kryształów”. Dodatkowo na podstawie przeprowadzonych pomiarów doktorantka doszła do wniosków, że jeżeli taki związek jest to zmiany oporu powinny być mniejsze niż 1 na 10000.

Przechodząc do końcowej oceny oryginalnych rezultatów uzyskanych przez doktorantkę i opisanych w rozdziale 5 uważam, że są to rzetelne wyniki z obszaru fizyki ciała stałego, które przedstawione są w spójnym wywodzie i prowadzą do ważnych wniosków jeżeli ktoś chciałby tego typu badania kontynuować. Gdyby doktorantka zaobserwowała filtrowanie spinowe lub wpływ odwrotnego efektu piezoelektrycznego na właściwości magnetyczne badanej próbki wartość tej dysertacji była by dużo większa. Jednak trzeba tutaj pamiętać, że było to przedsięwzięcie bardzo ambitne i w związku z tym obarczone dużym ryzykiem.

Podsumowując, przedstawiona do recenzji dysertacja jest dziełem doktorantki które dowodzi, że kandydatka na doktora nauk fizycznych potrafi na odpowiednim poziomie naukowym opisać uzyskane wyniki, przedstawić je w odpowiednim kontekście literaturowym oraz przeprowadzić ich merytoryczną i krytyczną dyskusję. Chciałbym również podkreślić, że niniejsza dysertacja jest bardzo dobrze zredagowana (znaleziono przez mnie literówki i uwagi co do sformułowań są bardzo nieliczne i podane są na końcu niniejszej recenzji).



unite! University Network for Innovation,
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 00001614
NIP: 896-000-58-51

Bank Account
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434



Wrocław University of Science and Technology

Department of Semiconductor Materials Engineering

W związku z powyższym uważam, że rozprawa doktorska Pani mgr Karoliny Kalbarczyk spełnia wszystkie wymagania stawiane przez ustawę o stopniach naukowych dla rozpraw na stopień doktora oraz zwyczajowo przyjęte kryteria w środowisku fizyki ciała stałego. Dlatego wnioskuję o dopuszczenie mgr Karoliny Kalbarczyk do publicznej obrony niniejszej rozprawy.

Robert Kudrawiec

Uwagi redakcyjne:

Strona 51: Powinno być '... elektrony przyśpieszone w polu ...'. Ponadto sformułowanie 'Rozdzielczość zależy w dużej mierze od rozmiarów wiązki skanującej...' jest trochę niefortunne bo nie wiadomo jak to się ma do rozdzielczości wynikającej z limitu dyfrakcyjnego wyznaczonego przez energię wiązki.

Strona 55: '...ultradźwiękowej na 5 minut.' Powinno być w jednej linii. Ten sam błąd edytorski pojawia się na stronie 88 oraz 90.

Strony 103: Pierwszy akapit nie jest wyjustowany.

Strona 113: '...odstępach...' zamiast '...odstępstwach...'

Strona 121: '...też...' zamiast '...tez...'



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org

Wrocław University
of Science and Technology

Department of Semiconductor
Materials Engineering

27 Wybrzeże Wyspiańskiego St
50-370 Wrocław

T: + 48 71 320 35 50
T/F: + 48 71 328 07 77

www.pwr.edu.pl

REGON: 000001614
NIP: 896-000-58-51

Bank Account
37 1090 2402 0000 0006 1000 0434