



Kierownik Zakładu
prof. dr hab. Ryszard Czajka
e-mail: ryszard.czajka@put.poznan.pl
tel.: 61-6653200

Poznań, 27 kwietnia 2017 r.

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr. Mateusza Wojtaszka

pt. „Transport elektronowy jedno i dwuwymiarowych nanostruktur
na powierzchni półprzewodników”

Rozwój współczesnej elektroniki oparty jest na układach o dużej skali integracji, które składają się z wielu miliardów tranzystorów, o rozmiarach sięgających pojedynczych nanometrów. Podobnie dużej skali integracji wymagają kontakty elektryczne. Wiąże się to, nie tylko z problemami technologii ich wytwarzania, ale także z kwantowymi efektami rozmiarowymi (ang. quantum size effect), wynikającymi z ograniczenia rozmiarowości elektrod (nanodruć) czy innymi, niż dyfuzyjne, mechanizmami przewodnictwa poprzez nanokontakty. Przewodnictwo pomiędzy nanokontaktami może być także funkcją ich wzajemnej odległości (efekty 2- i 3-wymiarowe) oraz rezystancji kontaktowych porównywalnych z rezystancjami samych nanostruktur. Pomiary przewodnictwa (czy oporności właściwej) wymagają specjalnych metod pomiarowych, z których najbardziej znana jest metoda 4-sondowa Kelwina. Nie mniej, jej zastosowanie do nanostruktur wymaga specjalnych i bardzo drogich urządzeń, takich jak czterogłowicowy UHV STM, z możliwością kontroli ruchu (nawigacji) wszystkich czterech sond ostrzowych za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM).

W okresie ostatnich kilku lat, w ramach strategii „More Moore” i „More than Moore”, w rozwoju nanoelektroniki odzyskuje swoje pierwotne miejsce german, ze względu na większą (w porównaniu z krzemem) ruchliwość nośników ładunków oraz węższą przerwę energetyczną (0,7 eV). Oczywiście, myśli się głównie o aplikacjach w formie ultracienkich warstw lub nanostruktur, ale także w formie litych płytek podłożowych.

Biorąc pod uwagę wyżej wymienione informacje należy stwierdzić, że zarówno tematyka pracy, jak i zastosowane metody pomiarowe należą do bardzo aktualnej tematyki badawczej, intensywnie rozwijanej w najlepszych ośrodkach badawczych i badawczo-rozwojowych na świecie, która jest ważna dla przyszłych aplikacji w nanoelektronice. W Polsce systematyczne badania w tym zakresie zainicjowała grupa prof. dr hab. Marka Szymońskiego z Uniwersytetu Jagiellońskiego, właściwie wykorzystując posiadany czterogłowicowy UHV STM.

Temat pracy doktorskiej jest zbyt ogólny w stosunku do zakresu badań zrealizowanych przez Doktoranta, ponieważ sugeruje badanie co najmniej kilku materiałów półprzewodnikowych. Tak naprawdę, badania dotyczą tylko jednej specyficznej powierzchni jednego półprzewodnika Ge(001) w dwóch formach – czystej zrekonstruowanej powierzchni oraz w formie powierzchni pasywowanej wodorem Ge(001):H. Prawdopodobnie pierwotne plany były dużo szersze i temat pracy doktorskiej powstał wcześniej niż pojawiły się wstępne wyniki badań. Osobiście mnie to nie dziwi, ponieważ prace na tak skomplikowanej aparaturze, przy trudnej i czasochłonnej technologii wytwarzania próbek, w pionierskiej tematyce mogą trwać znacznie dłużej niż standardowy czas przeznaczony na realizację jednej pracy doktorskiej. Ten fakt nie umniejsza mojej pozytywnej oceny końcowej recenzowanej pracy doktorskiej, ponieważ zawiera ona szereg oryginalnych i ważnych wyników eksperymentalnych. Ponadto Doktorant, poza techniką STM, opanował kilka innych technik badawczych, jak skaningowa mikroskopia elektronowa, skaningowa mikroskopia elektronów Auger (ang. skrót – SAM), dyfrakcję niskoenergetycznych elektronów (LEED) oraz nauczył się wykorzystywać wiązkę elektronów do lokalnej strukturyzacji nadanej powierzchni czy nanostruktur.

Przedstawiona do recenzji praca składa się z Wstępu, 5 rozdziałów, „Dodatku A” oraz spisu referencji literaturowych. Całość poprzedzają Spisy obrazów i tabel oraz wykaz użytych w pracy skrótów. Brakuje mi streszczeń w języku polskim i angielskim, które są często przydatne w rozpowszechnianiu wyników pracy.

We Wstępie Doktorant przedstawia motywację do podjęcia tematyki badawczej, cele badawcze, ogólną historię badań transportu elektronowego metodą czterosondową, charakterystykę struktury i zawartość pracy doktorskiej oraz kończy spisem publikacji „częściowo opartych na zaprezentowanych w pracy wynikach badań”, których był współautorem. Prace te obejmują jeden rozdział w monografii wydanej przez wydawnictwo Springer oraz trzy wieloautorskie artykuły

w renomowanych czasopismach z tzw. listy filadelfijskiej: Applied Physics Letters, Journal of Applied Physics oraz w Physical Review B. W trzech z wymienionych pozycji Doktorant jest pierwszym autorem i drugim w czwartej, co świadczy o istotnym wkładzie Doktoranta w ich powstanie i jednocześnie podnosi rangę wyników przedstawionych w pracy doktorskiej.

Rozdział 1 („Wykorzystane techniki doświadczalne”) obejmuje bardzo skondensowany (2 strony) opis podstaw skaningowej mikroskopii tunelowej oraz obszerniejszy, zawierający także podstawy teoretyczne, opis metod pomiaru przewodności – dwu- i cztero-próbnikowych. Wydaje się, że w tym miejscu opis ten mógłby być rozszerzony o informacje zawarte w rozdziale 3, w podrozdziałach 3.1, 3.2 i 3.3, co uprościłoby strukturę całej pracy doktorskiej. W kolejnych podrozdziałach Doktorant przedstawił wprowadzenie do skaningowej mikroskopii elektronowej i elektronów Auger oraz opis wykorzystywanego w badaniach podstawowego układu pomiarowego, mianowicie układu bardzo wysokiej próżni (UHV) zawierającego cztery głowice STM oraz komorę z nisko-temperaturowym mikroskopem tunelowym (LT STM), który może pracować w temperaturze ciekłego helu.

Kolejny rozdział jest poświęcony charakteryzacji zrekonstruowanego podłoża Ge(001) oraz nanostruktur złota (Au) wytworzonych na powierzchni Ge(001). Nanostruktury Au posłużyły, jako optymalne miejsca do kontaktu z sondami STM i do przeprowadzenia pomiarów metodą dwu-próbnikową lokalnego transportu elektronowego na próbkach niedomieszkowanych oraz domieszkowanych typu n i p . Powierzchnie próbek scharakteryzowano z atomową zdolnością rozdzielczą za pomocą STM, a dominujące rekonstrukcje powierzchniowe określono za pomocą techniki LEED. Do charakteryzacji nanostruktur Au/Ge(001) Doktorant użył STM, SEM oraz LEED wykazując obecność nanodrutów Au i ich ewolucję, wraz ze wzrostem temperatury, w nanowyspy Au na powierzchni Ge(001). Szczegółowa analiza uzyskanych danych eksperymentalnych umożliwiła Doktorantowi przedstawienie wykresów zależności średniego promienia wysp Au i ich liczby w funkcji temperatury wygrzewania podłoża. Z kolei skład pierwiastkowy struktur powierzchniowych został scharakteryzowany za pomocą SAM. Pomiary przewodnictwa metodą dwu-próbnikową między wyspami Au o różnych wzajemnych odległościach doprowadziły Doktoranta do wniosku, że dominujący charakter transportu elektronowego wykazuje właściwości przewodnictwa dwuwymiarowego, za co może odpowiadać ultracienka warstwa Au utworzona pod powierzchnią Ge(001). Interpretacja ta została

przekonywująco wsparta wynikami eksperymentalnymi uzyskanymi metodą TEM przez grupę prof. F. Kroka z UJ z udziałem m.in. mgr. M. Wojtaszka.

Najobszerniejszą i chyba najważniejszą częścią pracy jest Rozdział 3, w którym Doktorant zrelacjonował pomiary transportu elektronowego na powierzchni Ge(001) i Ge(001):H metodą czteropróbnikową. W podrozdziałach 3.4 do 3.8 Doktorant przedstawił wyniki systematycznych pomiarów przewodnictwa germanu domieszkowanego galem typu p , niedomieszkowanego (typu n) oraz domieszkowanego antymonem typu n , germanu pasywowanego wodorem typu p i n przed i po naświetleniu wiązką elektronową. Ze względu na dużą ilość danych pomiarowych, ilustrowanych odpowiednimi wykresami dla kilkunastu różnych wartości parametru „ x ”, oznaczającego stosunek odległości pomiędzy sondami mierzącymi różnicę potencjałów (s) do odległości ostrzy zasilających (D), rozdział ten jest bardzo trudny w czytaniu. Chciałbym jednak podkreślić, że wszystkie wyniki są dokładnie przeanalizowane, łącznie z rachunkiem błędów, które są wyraźnie zaznaczone na większości wykresów. Poprzez wykreślenie tzw. wykresów DR(x) (R to wartość zmierzonej rezystancji dla danego x) Doktorant wykazał również, że dla parametru „ x ” < 0,7 n -krotna zmiana odległości między ostrzami zasilającymi skutkuje n -krotnym skalowaniem wartości punktów pomiarowych w modelu przewodnictwa 3D.

Tę trudną do ogarnięcia ilość wyników pomiarów, wykresów i tabel porządkuje następny rozdział poświęcony dyskusji wyników pomiarowych. Z dyskusji wynika np., że dla powierzchni germanu typu p dominuje trójwymiarowy charakter przewodnictwa i to niezależnie od rodzaju modyfikacji powierzchni np. pasywacji wodorem, czy za pomocą bombardowania wiązką elektronów. Z kolei dla powierzchni germanu niedomieszkowanego (typu n) dominuje dwuwymiarowy charakter przewodnictwa w wyniku powstania warstwy inwersyjnej typu p . Podobnie w próbce domieszkowanej typu n dominuje dwuwymiarowy charakter przewodnictwa, nawet po wygrzaniu próbki w temperaturze 775 K. Generalnie dyskusja opiera się o interpretacje wychodzące raczej z klasycznej teorii przewodnictwa czy właściwości półprzewodników. Intuicyjnie wydaje mi się, że przydałoby się odniesienie do teorii uwzględniających efekty kwantowe, pojawiające się w układzie wielu niskowymiarowych kanałów przewodnictwa wzdłuż i poniżej powierzchni półprzewodnika, ale chyba łatwiej

wysymulować przewodnictwo w pojedynczych monoatomowych, o idealnej strukturze, nanodrutach Au niż w układach rozpatrywanych w niniejszej pracy doktorskiej.

Podsumowanie, a przynajmniej jego najważniejsza część, jest w zasadzie streszczeniem sformułowań zawartych w Rozdziale 4 poświęconym dyskusji wyników. Osobiście preferuję jasno i zwięźle sformułowane wnioski w ujęciu ilościowym. W pracy eksperymentalnej z fizyki sformułowania typu „ Zauważono niewielki wpływ na mierzone wartości przewodnictwa” czy „wpływ modyfikacji był ... lepiej widoczny dla niewielkich odległości sond zasilających” budzą mieszane uczucia, co do sensu ich zamieszczania w podsumowaniu, czy we wnioskach pracy doktorskiej. Moim zdaniem, brakuje precyzyjnie sformułowanych wniosków obejmujących najważniejsze wyniki ilościowe i/lub najważniejsze interpretacje wyników, odpowiadające na postawione na początku pracy cele.

Przedostatnim elementem pracy jest Dodatek A, poświęcony procedurom wykonywania pomiarów. Tytuł sugeruje obecność także innych Dodatków B, itd., a w „Dodatku” znajdujemy podpunkty od A1 do A4. Uważam jednak, ze względu na wartość merytoryczną dotyczącą szczegółów technologicznych i metodycznych stosowanych przez Doktoranta, „Dodatek A” może być bardzo przydatny dla młodszych adeptów pracy naukowej i dobrze, że Doktorant go zamieścił.

Bibliografia obejmuje 128 pozycji optymalnie dobranych do treści pracy doktorskiej. Zawiera zarówno odniesienia do prac historycznie pierwszych, jak i najbardziej aktualnych artykułów publikowanych w czasopismach z listy JCR oraz podręczników i monografii.

Stronę redakcyjną pracy oceniam jako bardzo dobrą. Zauważyłem tylko jeden błąd gramatyczny na przeskoku stron 20 i 21 („ ... badaniu tego układ mikroskopią .. „), niedookreślenie na stronie 23 („... udało się zaobserwować strukturę w tym fragmencie” - jaką? czego?). Określenie „halo”, w tekście rozdziału 2.2, używałbym w cudzysłowie, ze względu na potoczne rozumienie tego słowa w j. polskim. W kilku tabelach, w niektórych przypadkach, błędy zaokrągliłbym w górę, zostawiając jedną cyfrę znaczącą.

Wszystkie powyższe krytyczne uwagi szczegółowe, nie zmieniają mojej bardzo pozytywnej, ze względu na zawartość merytoryczną, oceny pracy doktorskiej mgr. Mateusza Wojtaszka.

Podsumowując, stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymogi ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych – wykazuje szeroką wiedzę teoretyczną Doktoranta oraz Jego umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Praca zawiera wyniki oryginalnych badań i obszerną dyskusję wyników, generalnie jest napisana jasno, a treści w niej zawarte wskazują, że Autor jest bardzo dobrym eksperymentatorem, który opanował zaawansowane techniki wytwarzania, modyfikacji i charakteryzacji zrekonstruowanych powierzchni półprzewodników oraz wytwarzania na tych powierzchniach nanostruktur metali. Doktorant opanował także nowoczesne techniki pomiaru przewodnictwa i określania właściwości elektronowych materiałów w skali nanometrowej. Doktorant wykazał, że potrafi przeprowadzić wnikliwą dyskusję własnych wyników eksperymentalnych oraz skonfrontować je z doniesieniami i interpretacjami innych badaczy.

Wnioskuje o dopuszczenie mgr. Mateusza Wojtaszka do publicznej obrony pracy doktorskiej przed Radą Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego.



Ryszard Czajka