



UMCS
UNIwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
w Lublinie

Zakład Fizyki Powierzchni i Nanostruktur
Instytut Fizyki

Plac M. Curie-Skłodowskiej 1
PL 20-031 Lublin, Tel: (+48) 81 5376285

Prof. dr hab. Mieczysław Jałochowski

Lublin, 12 września 2014 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Marka Kolmera pt. „Nanoskopowe układy logiczne na powierzchni półprzewodników”

W swojej rozprawie doktorskiej Pan Marek Kolmer opisuje nanostruktury powierzchniowe uformowane ze swobodnych wiązań na pasywowanych wodorem powierzchniach Ge(001):H oraz Si(1001):H. Praca ma charakter doświadczalny a podstawową techniką pomiarową jest skaningowa mikroskopia tunelowa (*STM - Low Temperature Scanning Tunneling Microscopy*). Praca została wykonana pod kierunkiem prof. Marka Szymońskiego oraz doktora Szymona Godlewskiego, w Zakładzie Fizyki Nanostruktur i Nanotechnologii. Zakład kierowany przez prof. Marka Szymońskiego od wielu lat specjalizuje się w zagadnieniach obejmujących tematykę rozprawy i ma liczące się, światowe osiągnięcia naukowe.

Praca dotyczy zagadnień w obszarze badań podstawowych, ale przyświeca jej dalekosiężny praktyczny cel w postaci zastosowania w przyszłości badanych nanostruktur w molekularnych oraz w atomowych obwodach logicznych. Doświadczalne badania za pomocą mikroskopii STM (i w niewielkim stopniu mikroskopii AFM) są silnie sprzężone z badaniami teoretycznymi w oparciu o teorię funkcjonału gęstości (DFT). Prace teoretyczne były wykonywanymi w zespole, w skład którego wchodził Doktorant. Tematyka rozprawy jest niezwykle aktualna, gdyż ma ścisły związek z badaniami, mającymi na celu pokonanie rysujących się w nieodległej przyszłości barier dalszej miniaturyzacji układów scalonych wielkiej skali integracji.

Rozprawa ma formę spójnego tematycznie zbioru artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych. Zawiera następujące publikacje:

- I. M. Kolmer, S. Godlewski, H. Kawai, B. Such, F. Krok, M. Sayes, C. Joachim, M. Szymoński, *Electronic properties of STM-constructed dangling bond dimer lines on a Ge(001)-(2X1):H surface*, Phys. Rev. **B86**, 125307 (2012).
- II. M. Kolmer, S. Godlewski, J. Lis, B. Such, L. Kantorovich, M. Szymoński, *Construction of atomic-scale logic gates on a surface of hydrogen passivated germanium*, Microelectronic Engineering, **109**, 262-265 (2013).

- III. M. Kolmer, S. Godlewski, R. Zuzak, M. Wojtaszek, C. Rauer, A. Thuaire, J. M. Hartmann, H. Moriceau, C. Joachim, M. Szymoński, *Atomic scale fabrication of dangling bond structures on hydrogen passivated Si(001) wafers processed and nanopackaged in a clean room environment*, Applied Surface Science, **288**, 83-89 (2014).
- IV. M. Kolmer, S. Godlewski, B. Such, P. De Mendoza, C. De Leon, A. M. Echavarren, H. Kawai, M. Saeys, C. Joachim, M. Szymoński, *SPM imaging of trinaphthylene molecular states on a hydrogen passivated Ge(001) surface*, Springer series "Advanced in Atom and Single Molecule Machines", vol. 3, 105-114 (2013).
- V. S. Godlewski, M. Kolmer, H. Kawai, B. Such, R. Zuzak, M. Saeys, P. De Mendoza, A. M. Echavarren, C. Joachim, M. Szymoński, *Contacting a conjugated molecule with a surface dangling bond dimer on a Ge(001):H surface allows imaging of the hidden ground electronic state*, ACS Nano, **7**, 10105-10111 (2013).

Ponadto, rozprawa zawiera napisane w języku polskim: spis treści, spis artykułów stanowiących zasadniczą część rozprawy z deklaracjami roli Doktoranta w opisanych badaniach, krótki opis tematu badawczego rozprawy, zarys kontekstu naukowego pracy doktorskiej, krótki opis badań składających się na pracę doktorską, podsumowanie oraz wnioski z pracy doktorskiej a także bibliografię. Część nie będąca przedrukiem artykułów naukowych liczy 25 stron. Przedruk artykułów mieści się na 38 stronach. Biorąc pod uwagę, że tekst i rysunki w publikacjach naukowych są bardzo gęsto upakowane, można przypuszczać, że rozprawa przygotowana w konwencjonalny sposób liczyłaby około 140-150 stron.

Ponieważ publikacje są wieloautorskie (8, 6, 10, 10, 10 współautorów – odpowiednio w kolejności listy) należy dokładniej rozważyć rolę Doktoranta. Zgodnie z oświadczeniami współautorów wkład Pana M. Kolmera w powstanie publikacji I-IV był wiodący a w ostatniej był porównywalny z wkładem innych współautorów. W opisie indywidualnego wkładu można znaleźć następujące sformułowania: w publikacjach I i II „...wkład kandydata polegał na przygotowaniu uwodornionej powierzchni Ge(001):H, opracowaniu metodologii przeprowadzania eksperymentu z użyciem skaningowej mikroskopii i spektroskopii tunelowej, a w szczególności na opracowaniu protokołu kontrolowanej desorpcji atomów wodoru z powierzchni Ge(001):H. Kandydat wykonał większość pracy doświadczalnej, opracował dane eksperymentalne oraz uczestniczył w analizie wyników. Kandydat wspólnie z doktorem Szymonem Godlewskim napisał manuskrypt I. Kandydat napisał manuskrypt II”. Podobną charakterystykę udziału Doktoranta we wszystkich (poza obliczeniami teoretycznymi DFT) etapach badań naukowych i przygotowania manuskryptów znaleźć można w przypadku pozostałych publikacji III-V.

W świetle powyższych informacji można z całym przekonaniem stwierdzić, że publikacje są owocem pracy przede wszystkim Pana Marka Kolmera. Jego rola wskazuje, że wykazał

umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej w dużym zespole i że posiada umiejętności oczekiwane od adepta nauki.

Pan Marek Kolmer we wszystkich badaniach opisanych w publikacjach doktoratu wykonywał pomiary techniką STM i STS. Wyniki tych prac stanowią podstawę zarówno tez publikacji jak i materiał porównawczy z wynikami obliczeń metodą DFT. Chociaż takie prace są uważane w większości laboratoriów fizyki powierzchni za dość rutynowe to jednak zadanie, przed jakim stanął, było wyjątkowo ambitne i trudne. Wytwarzanie atomowych struktur a następnie ich badanie wymaga wielkiej precyzji aparatury i cierpliwości eksperymentatora. Mikroskopia tunelowa, jeśli jest zastosowana do badania pojedynczych atomów, okazuje się techniką wyjątkowo kapryśną i wymagającą dużego doświadczenia zarówno w przewidywaniu skutków wpływu zazwyczaj przypadkowo uformowanego ostrza jak i umiejętności odróżniania prawdziwych obrazów (bądź charakterystyk $I(V)$) powierzchni od obrazów i danych utworzonych w wyniku różnego rodzaju nakładających się niezdefiniowanych efektów. Doktorant wykazał w tym doskonałą umiejętność i pokazał, że potrafi badać powierzchnię z dokładnością sięgającą granic możliwości wyznaczonych przez prawa fizyki a nie niedoskonałości aparatury lub umiejętności eksperymentatora. We wszystkich publikacjach obrazy STM są modelowo doskonałe.

Doktorant posiadał także umiejętność manipulowania za pomocą STM pojedynczymi atomami wodoru, przez co mógł zmieniać lokalnie strukturę elektronową pojedynczych, wybranych atomów. i potrafił w sposób w pełni kontrolowany tworzyć kombinacje atomów z niewysyconymi wiązaniami na powierzchniach Ge(001) i Si(001). Udowodnił, że takie nanostruktury atomowe, z funkcją przetwarzania informacji na podobieństwo układów logicznych, mogą być wytwarzane i funkcjonują zgodnie z teoretycznymi przewidywaniami. Ten wynik Jego badań uważam za najważniejszy rezultat badań prowadzonych w ramach doktoratu.

Dwukrotnie miałem okazję wysłuchać wystąpień Pana Marka Kolmera podczas seminarium i podczas międzynarodowej konferencji (gdzie wygłosił referat na zaproszenie organizatorów) i wysoko oceniam jego umiejętność przedstawiania przed licznym audytorium specjalistów naukowych tez swego doktoratu i rezultatów badań. Wykazał, że oprócz doskonałej znajomości zagadnień związanych z STM i STS równie swobodnie porusza się w obszarach technologii nanostruktur na powierzchniach Ge(001) i Si(001), interpretacji wyników DFT jak i innych pokrewnych obszarach nanofizyki.

Moje uwagi krytyczne mają charakter wyłącznie stylistyczny/edytorski tekstu w języku polskim stanowiącym uzupełnienie zbioru artykułów. W wielu miejscach znalazłem niezręczne, mające charakter żargonu sformułowania takie jak:

Na str. 11 – „drut zbudowany z podwójnie nienasyconych wiązań”,

„wykrzywienie geometrii dimerów”,

„silne sprzężenie pomiędzy geometrią a strukturą elektronową”

Na str. 13: „...może świadczyć o wyprostowaniu geometrii dimeru Ge”

Str. 17: „...natywna geometria struktur z podwójnych niewysyconych wiązań wykazuje wygięcie dimerów germanowych względem płaszczyzny powierzchni.”

Str. 18: „... w odróżnieniu od powierzchni Ge(001):H, dla której są to zazwyczaj dwa wodory.”

Str. 21: „...mogą zostać rzeczywiście wytworzone...”

Str. 22: „Rysunek przekopiowany...”

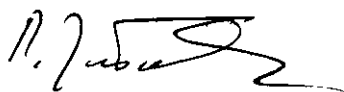
Str. 23: „...wafli półprzewodnikowych...”

Uwaga ogólna tekstu w języku polskim dotyczy stosowania w sposób mało konsekwentny i często nieuzasadniony różnych form czasów czasowników oraz ich stron - biernej i czynnej.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska jest na wysokim poziomie naukowym, dotyczy bardzo ważnego obszaru fizyki nanostruktur i została zrealizowana w ramach współpracy z większym naukowym zespołem. Za podstawowe osiągnięcie Doktoranta uważam wytworzenie układów atomowych z niewysyconymi wiązaniami na powierzchniach Ge(001):H i Si(001):H oraz udowodnienie, że właściwości sprzężeń pomiędzy nimi mogą zostać wykorzystane do wytwarzania skomplikowanych układów logicznych.

W mojej ocenie rozprawa doktorska Pana Marka Kolmera i Jego zaangażowanie w realizację ambitnych i trudnych badań zasługują na wyróżnienie.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymagania Ustawy o Stopniach i Tytułach Naukowych i wnioskuję o dopuszczenie Pana Marka Kolmera do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



prof. dr hab. Mieczysław Jałochowski