



POLITECHNIKA POZNAŃSKA



Wydział Fizyki Technicznej
Instytut Fizyki, ul. Nieszawska 13 A, 60-965 POZNAŃ
Zakład Spektroskopii Ciała Stałego
tel.: 61-6653177, fax.: 61-6653178, e-mail: office_phys@put.poznan.pl

Kierownik Zakładu:
prof. dr hab. Ryszard Czaika
e-mail: ryszard.czaika@put.poznan.pl
tel.: 61-665 3200 61-665 3234

Poznań, 7 lipca 2014 r.

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ
magistra Marka Kolmera
pt. „NANOSKOPOWE UKŁADY LOGICZNE
NA POWIERZCHNI PÓLPRZEWODNIKÓW”

Postęp w naukach ścisłych w zakresie wytwarzania nanocząstek i nanostruktur na powierzchniach ciał stałych jest, w ostatnich kilkunastu latach, ogromny. Układy te, określane jako układy o zredukowanej wymiarowości, są bardzo interesujące, ponieważ ich właściwości fizyczne, w wyniku kwantowego efektu rozmiarowego, są najczęściej różne od właściwości próbek litych, wykonanych z tego samego materiału i stwarzają możliwości tworzenia różnego rodzaju funkcjonalnych nanostruktur. Coraz wyższy stopień integracji w elektronice wymusza w naturalny sposób zapotrzebowanie na technologie umożliwiające wytwarzanie atomowo płaskich warstw, nanodrutów czy tzw. kropek kwantowych oraz zapotrzebowanie na techniki analityczne, których czułość pozwala charakteryzować lokalne, (w skali subnanometrowej) właściwości fizyczne (strukturę, właściwości elektronowe, magnetyczne, etc.) ww. układów o zredukowanej wymiarowości.

W kolejnych etapach miniaturyzacji pojedyncze atomy, cząsteczki oraz uporządkowane matryce atomów czy cząsteczek będą stanowić elementy przyrządów elektronowych, takich jak diody, tranzystory i przełączniki, które odpowiednio łączone będą tworzyć układy logiczne. Pierwsze takie układy w oparciu o sztucznie ułożone cząsteczki CO wytworzono w grupie IBM Fellow, Dr. D. Eiglera, kilkanaście lat temu. *(Szkoda, że w żadnym spisie referencji nie ma odnośnika do pracy "Molecule Cascades", A. J. Heinrich, C. P. Lutz, J. A. Gupta, D. M. Eigler, Science 298, 1381-1387 (2002).)*

Oceniana praca doktorska koncentruje się właśnie na możliwości wytworzenia układów logicznych na pasywowanych wodorem powierzchniach półprzewodników Ge(001) i Si(001), z wykorzystaniem osadzonych na tych powierzchniach cząsteczek organicznych. Praca została przygotowana w formie zestawu czterech publikacji wydrukowanych w czasopiśmie z listy JCR oraz jednego rozdziału w książce z materiałami przedstawianymi podczas konferencji

międzynarodowej, poprzedzonych rozszerzonym streszczeniem (lub przewodnikiem) w języku polskim, składającym się z 5 podrozdziałów oraz bibliografii.

Praca doktorska w tej formie, zgodnej z przepisami nowej Ustawy, ułatwia pracę recenzenta chociażby poprzez fakt, że opiera się o prace opublikowane w recenzowanych czasopismach o obiegu międzynarodowym, w szczególności, gdy czasopisma wykazują się wysokim *Impact Factor*, a oświadczenia współautorów wskazują wyraźnie na dominującą rolę Doktoranta w ich powstaniu. W przypadku niniejszej pracy doktorskiej artykuły zostały opublikowane w *Physical Review B* (5-letni *IF*=3,603), *Microelectronic Engineering* (*IF*=1,283), *Applied Surface Science* (*IF*=2,099), w których Doktorant był pierwszym współautorem oraz w *ACS Nano* (*IF*=12,524), w której to publikacji Doktorant był drugim współautorem. Całość uzupełnia artykuł w pracy zbiorowej, opublikowanej przez znane wydawnictwo Springer w ramach serii: *Advances in Atom and Single Molecule Machines*, w której Doktorant jest pierwszym współautorem.

Wybrane publikacje układają się w logiczny ciąg zaczynający się od charakteryzacji podłoża Ge(001) pasywowanego wodorem oraz tworzenia bramek logicznych w skali atomowej, po obrazowanie stanów molekularnych cząsteczek trinaftalenu (ang. *trinaphthylene*) zaadsorbowanych na uwodornionej powierzchni Ge(001). Cztery prace poświęcone tworzeniu układów logicznych na Ge(001) są przedzielone pracą dotyczącą pasywowanego wodorem podłoża Si(001), na którym Doktorant przeprowadził eksperymenty modyfikacji powierzchni w skali atomowej, poprzez usuwanie pojedynczych atomów wodoru, tworząc obszary z niewysyconymi wiązaniami powierzchniowych atomów Si.

Zbiór opublikowanych artykułów poprzedza obszerne streszczenie czy raczej przewodnik po zbiorze artykułów tworzących pracę doktorską. Przewodnik zawiera opis problemu badawczego, zarys kontekstu naukowego, krótki opis badań i jest zakończony podsumowaniem oraz bibliografią. Moim zdaniem, ten zestaw może służyć za wzór, jak przygotować pracę doktorską zgodnie z nowymi przepisami. Treść jest skondensowana, napisana jasno i zakończona wnioskami, z których jednoznacznie wynika, że główne cele, skoncentrowane na wytworzeniu prototypowych układów atomowych i molekularnych, jako platformy do wytwarzania układów logicznych w skali atomowej, zostały osiągnięte!

Prace Doktoranta mają charakter badań podstawowych, które w przyszłości mogą jednak znaleźć ważne aplikacje, prowadzące do dalszej miniaturyzacji i zwiększenia wydajności działania urządzeń elektronicznych. Najlepszym przykładem mogą tu być badania laureatów Nagrody Nobla

z 2007 r. profesorów A. Ferta i P. Grünberga nad zjawiskiem gigantycznego magnetooporu, które umożliwiły gwałtowny wzrost gęstości zapisu na twardych dyskach magnetycznych.

Przechodząc do krótkiej charakterystyki artykułów wchodzących do ocenianej pracy doktorskiej, stwierdzam, że już w pierwszej pracy, opublikowanej w roku 2012 w *Physical Review B*, Doktorant raportował bardzo trudny eksperyment tworzenia przewodzących nanodrutów na powierzchni Ge(001) z niewysyconych wiązań atomów Ge w wyniku wymuszonej desorpcji atomów wodoru za pomocą odpowiednio spolaryzowanej sondy STM. Zamieszczone w tym artykule obrazy STM jednoznacznie wskazują na kontrolowany, w skali pojedynczych atomów i dimerów, proces desorpcji. Dzięki współpracy z grupą teoretyków z Singapuru, wykorzystujących teorię funkcjonałów gęstości elektronowej (ang. akronim – DFT), Doktorant wykazał pełną zgodność swoich wyników eksperymentalnych z teoretycznymi symulacjami obrazów STM. W tej samej pracy zrelacjonował wyniki bardzo trudnych pomiarów spektroskopii tunelowej, pokazujących ewolucję krzywych lokalnego (w skali subnanometrowej) dynamicznego przewodnictwa dI/dV w funkcji długości nanodrutów, wykazując jednocześnie występowanie zgodnego z obliczeniami, przesunięcia maksimum dI/dV w kierunku niższych energii, w porównaniu do energii maksimum dla pojedynczego niewysyconego wiązania.

Druga praca wydaje się być rozwinięciem poprzedniej poprzez podanie precyzyjnej procedury kontrolowanej desorpcji wodoru, w celu tworzenia nanodrutów z atomów germanu z niewysyconymi wiązaniami oraz kontrolowania ich konfiguracji za pomocą sondy STM. Co więcej, zaproponowano wykorzystanie tej procedury do tworzenia analogu bramki logicznej czy obwodów elektrycznych tworzonych *in situ* w skali atomowej.

Kolejna praca, w *Applied Surface Science*, przerywa ciąg artykułów poświęconych, ostatnio bardzo modnemu w nanoelektronice materiałowi, czyli germanowi i wykazuje możliwość przeprowadzania podobnych manipulacji atomami na bazowym podłożu – Si(001). W pracy opisano innowacyjną metodę preparatyki podłoża Si(001) spasywowanych wodorem i takie ich połączenie z wykorzystaniem oddziaływań van der Waalsa, które umożliwia utrzymanie czystych powierzchni w warunkach atmosferycznych i ponowne rozdzielenie w warunkach UHV przed procedurą tworzenia nanodrutów czy bramek logicznych, z zachowaniem pierwotnej czystości podłoża. Jeśli proponowana w tej pracy procedura nie ma szybkiej perspektywy tworzenia obwodów logicznych w nanoelektronice, to nie wyklucza takich możliwości w przyszłości, kiedy tylko zostanie opanowana masowa produkcja nanoobwodów np. za pomocą matryc wielu tysięcy, sprzężonych ze sobą sond STM.

Następne dwie prace rozwijają tematykę tworzenia molekularnych bramek logicznych o osadzone na pasywowanych podłożach cząsteczki organiczne, na przykładzie trinaftalenu. W artykule, opublikowanym w formie rozdziału w monografii poświęconej obrazowaniu i manipulowaniu molekularnymi orbitalami, Doktorant wykazał się umiejętnością obrazowania powierzchni i zaadsorbowanych cząsteczek zarówno za pomocą STM, jak i NC-AFM z sondą typu qPlus. Te dwa pomiary dostarczają fizycznie różnych, ale komplementarnych informacji, umożliwiając m.in. identyfikację wewnątrzcząsteczkowej struktury. Druga z tych prac opublikowana w ACS-Nano (IF=12,524) to dojrzała praca łącząca bardzo trudny eksperyment obrazowania cząsteczek organicznych na uwodornionej powierzchni germanu z pomiarami spektroskopowymi, umożliwiającymi kontrolę stanów elektronowych cząsteczek. Autorzy wykazali też, że w sytuacji, gdy cząsteczka organiczna jest zaadsorbowana nad dimerem z niewysyconym wiązaniem, można zaobserwować za pomocą STM elektronowy stan podstawowy.

Wszystkie omówione wyżej prace stanowią logiczny ciąg, wskazujący na konsekwentne dążenie do założonego celu, jakim było tworzenie, z atomową precyzją, logicznych obwodów z wykorzystaniem pojedynczych cząsteczek organicznych oraz łączników w postaci nanodrutów z atomów czy dimerów półprzewodnika z niewysyconymi wiązaniami. Doktorant znakomicie wykorzystał warunki stworzone przez promotora i promotora pomocniczego oraz szeroką międzynarodową i krajową współpracę grupy prof. dr hab. Marka Szymońskiego. Z punktu widzenia nowych uregulowań prawnych dotyczących przewodów doktorskich, uważam ocenianą pracę doktorską za wzorcową.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca doktorska spełnia wymogi ustawy o tytule naukowym i stopniach naukowych – przedstawiony zbiór publikacji, w których udział Doktoranta był dominujący lub znaczący, reprezentuje merytorycznie bardzo wysoki poziom zarówno w zakresie przedstawionych wyników eksperymentalnych, jak i dyskusji wyników. Prace te zawierają oryginalne rozwiązania zagadnienia naukowego, są bardzo dobrze zredagowane, a treści w nich zawarte wskazują, że wiodący autor (Doktorant) jest bardzo dobrym eksperymentatorem, który opanował kilka, wzajemnie się uzupełniających technik badawczych oraz potrafi przeprowadzić wnikliwą dyskusję wyników korzystając z obliczeń i modeli teoretycznych.

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

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej ze względu na Jej bardzo wysoki poziom. Doktorant wykazał się mistrzowskim opanowaniem bardzo trudnej techniki eksperymentalnej – skaningowej mikroskopii i spektroskopii tunelowej realizowanej w warunkach bardzo wysokiej próżni i w bardzo niskich (helowych) temperaturach. Doktorant jest współautorem 10 artykułów, które mimo bardzo krótkiego czasu od daty opublikowania (2 lata) były cytowane 10-krotnie a Jego indeks Hirscha wynosi 2. Wykazał się także zdolnością do efektywnej współpracy z międzynarodowymi zespołami badawczymi oraz prezentowania wyników swoich badań podczas krajowych i międzynarodowych konferencji naukowych na bardzo wysokim poziomie.



Ryszard Czajka