

Dr hab. Ryszard Zdyb, prof. UMCS
Instytut Fizyki
Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej
Pl. M. Curie-Skłodowskiej 1
20-031 Lublin

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Natalii Olszowskiej
pt. "Badania struktury elektronowej powierzchni InAs(001)"**

W rozprawie doktorskiej zatytułowanej „Badania struktury elektronowej powierzchni InAs(001)” mgr Natalia Olszowska prezentuje systematyczne studia struktury pasmowej powierzchni (001) monokryształu InAs. Praca została wykonana na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Jacek J. Kołodziej. W badaniach wykorzystano dwie powierzchniowo czułe techniki: kątowno-rozdzielczą spektroskopię fotoelektronów ARPES, współcześnie najważniejsze narzędzie stosowane do określania struktury elektronowej fazy skondensowanej, oraz dyfrakcję niskoenergetycznych elektronów LEED – do określenia struktury krystalograficznej powierzchni.

Rozprawa jest napisana w języku polskim i liczy 148 stron. Składa się z siedmiu rozdziałów, podsumowania i bibliografii zawierającej 128 pozycji.

Rozdział pierwszy wprowadza podstawowe pojęcia związane ze strukturą elektronową ciał stałych z naciskiem położonym na stany powierzchniowe.

W rozdziale drugim autorka omawia podstawy głównej techniki badawczej wykorzystywanej w pracy, czyli kątowno-rozdzielczej spektroskopii fotoelektronów ARPES.

Rozdział trzeci zawiera opis aparatury badawczej oraz preparatyki próbek. Szczegółowe omówienie różnych procedur przygotowania powierzchni InAs jest bardzo pożyteczne w zrozumieniu dalszej części rozprawy.

W kolejnym rozdziale omówione zostały właściwości krystalograficzne powierzchni (001) kryształu InAs. Przedstawione zostały możliwe rekonstrukcje powierzchni o terminacji indowej i arsenowej i odpowiadające im obrazy dyfrakcyjne LEED. Rozdziały: piąty, szósty i siódmy zawierają wyniki pomiarów, ich analizę oraz interpretację. Jako pierwsze zostały przedstawione wyniki struktury elektronowej czystych powierzchni InAs(001) o terminacji indowej i arsenowej oraz powierzchni o rekonstrukcji 1x1. Autorka identyfikuje pasma objętościowe InAs, które widoczne są na mapach fotoemisji niezależnie od terminacji powierzchni. Znajduje również szereg pasm powierzchniowych wykazujących symetrie charakterystyczne dla określonych

rekonstrukcji powierzchni. Znając modele poszczególnych nadstruktur przypisuje poszczególne pasma elektronowe odpowiednim atomom na powierzchni kryształu. W tym samym rozdziale autorka określa położenia maksimum pasma walencyjnego oraz położenia i symetrie kieszeni stanów elektronowych pasma przewodnictwa badanych powierzchni.

Następny rozdział przedstawia strukturę elektronową wyżej wspomnianych powierzchni po pasywacji siarką. W tej części znajduje się również zaproponowany przez autorkę model strukturalny zrekonstruowanej powierzchni, który został przygotowany na podstawie własnych danych doświadczalnych, między innymi pomiarów LEED, oraz danych literaturowych.

Ostatnia część z wynikami dotyczy kwantowania dwuwymiarowego gazu elektronowego obserwowanego dla powierzchni InAs(001) pasywowanych siarką. Wyznaczone zostały podstawowe parametry struktury pasmowej: ugięcie pasm, energia skwantowanych podpasów w punkcie Γ i ich wektory falowe na poziomie Fermiego. Wyznaczono również parametry gazu elektronowego: koncentracje nośników i ich masy efektywne. Otrzymane dane posłużyły do przetestowania nowego teoretycznego modelu opisującego dwuwymiarowy gaz elektronowy.

Niewątpliwą zaletą niniejszej rozprawy jest systematyczność przeprowadzonych badań, która ułatwia zrozumienie wielu procesów zachodzących na badanej powierzchni. Wśród zaprezentowanych wyników znajduje się kilka szczególnie wartościowych i zasługujących na podkreślenie. Do takich zaliczam na przykład te, otrzymane dla dwuwymiarowego gazu elektronowego. Okazuje się, że prosty jednoelektronowy model Poissona-Schrödingera może dać poprawny opis gazu 2DEG, jeżeli uwzględnione zostaną odpowiednie warunki brzegowe na funkcje falowe. Z pewnością eksperymenty przeprowadzone przez autorkę dla jednej powierzchni o różnych terminacjach, ale tego samego kryształu, umożliwiły zweryfikowanie poprawności skorygowanego modelu Poissona-Schrödingera.

Innym interesującym wynikiem jest zaproponowanie nowego modelu powierzchni InAs pasywowanej siarką. Chociaż model jest prosty, w sposób zadowalający wyjaśnia rezultaty uzyskane w eksperymentach.

Ciekawe jest również otrzymanie metodą WCT powierzchni (001) InAs z rekonstrukcją 1×1 , której dotychczas nie zaobserwowano.

Zasygnalizowane powyżej wyniki stanowią tylko niewielki wycinek całości, który wzbudził moje szczególne zainteresowanie.

Warto zaznaczyć, że pani mgr Natalia Olszowska bardzo dobrze poznała kątowo-rozdzielczą spektroskopię fotoelektronów ARPES, o czym świadczy między innymi swobodne „poruszanie się” w przestrzeni odwrotnej w trakcie pomiarów, i potrafi wykorzystać szerokie możliwości jakie oferuje ta technika w badaniach struktury elektronowej. Niewątpliwie związana jest z tym również znajomość technik i technologii ultra wysokiej próżni.

Rozprawa jest napisana w sposób przejrzysty i precyzyjny. Układ poszczególnych rozdziałów stanowi logiczny ciąg. Język jest zwięzły i zrozumiały. Praca od strony technicznej właściwie nie zawiera większych błędów.

Pytania i uwagi, które są zamieszczone poniżej, dotyczą spraw drugorzędnych.

- Czy natężenie światła z lampy helowej jest na tyle stabilne, żeby można w sposób ilościowy porównywać intensywności pasm otrzymanych w różnych, niezależnych eksperymentach? Dotyczy to np. porównania intensywności kieszeni CAS dla próbki domieszkowanej i niedomieszkowanej.

- Stwierdzenie, że „...powierzchniowe stany są obsadzone niezależnie od poziomu domieszkowania kryształu.” wydaje się zbyt mocne biorąc pod uwagę fakt, że badane były próbki tylko o jednej koncentracji domieszek (str. 93).

- „kiesz” stanów elektronowych widoczna na rys. 5.24(c) wydaje się mieć maksimum natężenia przy energii -0,2 eV. Czy to jest efekt obserwowany w eksperymencie, a jeżeli tak, to dlaczego tak jest, czy też jest to związane z jakością rysunku?

- W ostatnim zdaniu na str. 92 autorka stwierdza, że „Powierzchnia ta nie rekonstruuje do czystej rekonstrukcji 2x1...”. Jednak obraz LEED przedstawiony na rys. 6.2(c) przedstawia właśnie taką rekonstrukcję powierzchni.

- Aby utworzyć powierzchnię S(2x1)/As/InAs założono desorpcję cząsteczek S-As lub atomów S i As. W zaproponowanym modelu zakłada się tyle samo atomów As co przed desorpcją S i As. Czy oznacza to dyfuzję atomów As z objętości kryształu do powierzchni?

Drobne uwagi dotyczące rozprawy

- Rys. 6.1 nie zawiera obrazu LEED rekonstrukcji c(8x2)/(4x2), co jest zasugerowane w tekście. Na tym samym rysunku według podpisu obrazy LEED zostały otrzymane „dla jednej próbki poddanej stopniowemu wygrzewaniu ...”. Jednak z dodatkowych opisów zamieszczonych przy obrazach LEED wynika, że pierwsza próbka została przygotowana metodą WCT, a pozostałe metodą IBA.

- Na rys. 6.9(f) brakuje podpisów pasm powierzchniowych, na które powołuje się autorka w tekście.

- Niektóre z zaznaczonych kropkowanymi liniami pasm powierzchniowych są zupełnie niewidoczne. Wydaje się, że w pracy powinien znaleźć się przykład tego typu pasma umieszczony na osobnej mapie intensywności lub drugiej pochodnej w mniejszym zakresie energii (być może również i wektora falowego) tak, aby przekonać czytelnika, że te pasma faktycznie tam się znajdują. Np. pasma $S_1^{(2 \times 1)}$ i $S_1^{(2 \times 1)}$ na rys. 6.10.

Wymienione powyżej komentarze i uwagi z pewnością nie umniejszają naukowej wartości rozprawy. W pracy zaprezentowano wiele interesujących wyników wraz z ich skrupulatną analizą. Należy zwrócić uwagę na bardzo skomplikowaną strukturę elektronową badanych powierzchni i fakt, że autorka potrafiła zidentyfikować poszczególne pasma i w wielu przypadkach przypisać tym pasmom ich pochodzenie. Otrzymane wyniki stały się podstawą czterech publikacji naukowych w bardzo dobrych czasopismach m.in. Physical Review B i Surface Science.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi jednolity i całościowy opis struktury elektronowej powierzchni (001) kryształu InAs i jest ważnym wkładem w zrozumienie zjawisk związanych z tą powierzchnią. Stanowi więc oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Tym samym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Natalii Olszowskiej spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym stawiane rozprawom doktorskim i może być dopuszczona do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Lublin, 02.03.2017