

Akademickie Centrum Materiałów i Nanotechnologii AGH
dr hab. inż. Marcin Sikora

Kraków, 16.02.2017

**Recenzja rozprawy doktorskiej
Mgr Natalii Olszowskiej**

pt. ***Badania struktury elektronowej powierzchni InAs(001)***

Możliwość funkcjonalizacji właściwości transportowych półprzewodników poprzez domieszkowanie była zaczątkiem rewolucji informatycznej rozpoczętej przez skonstruowanie tranzystora a kontynuowanej przez wiele dziesięcioleci dzięki postępowi technologicznemu w miniaturyzacji i konstrukcji złożonych urządzeń półprzewodnikowych umożliwiającemu przyrost wydajności mikroprocesorów w tempie wykładniczym. Jednak tendencja ta ulega spowolnieniu ze względu na ograniczenia fizyczne technologii wykorzystujących domieszkowany krzem. Stąd niezwykle istotne jest poszukiwanie alternatywnych materiałów półprzewodnikowych - szczególnie tych, których właściwości transportowe mogą być modyfikowane w kontrolowany sposób w skali nanometrycznej. W ostatnich latach szczególną uwagę fizyków materii skondensowanej przyciągnęło odkrycie nietrywialnej topologii stanów elektronowych na powierzchni monokrystalicznych tetradymitów, w wyniku której materiał jest objętościowym izolatorem z metaliczną powierzchnią - tzw. Topologicznych izolatorów. Gwałtowny wzrost zainteresowania zjawiskami transportu i możliwością kontrolowanego sterowania strukturą elektronową w tych materiałach spowodował również renesans w studiach nad dwuwymiarowym gazem elektronowym (2DEG) występującym na powierzchni wybranych materiałów półprzewodnikowych.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska Pani Natalii Olszowskiej wpisuje się w ten trend. Poświęcona jest eksperymentalnemu badaniu struktury elektronowej stanów powierzchniowych arsenku indu za pomocą techniki kątowno rozdzielczej fotoemisji (ARPES). Praca opisuje systematyczne studia nad strukturą pasm elektronowych i jej zależnością od terminacji i rekonstrukcji powierzchni oraz pasywacji siarką. W analizie geometrycznej struktury atomowej powierzchni wykorzystywane były techniki dyfrakcji elektronów niskoenergetycznych (LEED) oraz skaningowej mikroskopii tunelowej. Krzywe dyspersji stanów elektronowych powierzchni InAs pasywowanej siarką w różnym stopniu i o różnej rekonstrukcji adatomów zostały użyte do przetestowania nowego modelu teoretycznego 2DEG, pozwalającego na odpowiednie sparametryzowanie funkcji falowych prowadzące do oszacowania grubości powierzchniowej warstwy „metalicznej”.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów i przedmowy. Poprzedzona jest streszczeniami i podziękowaniami, zawiera kompletny spis rysunków i tabel oraz dwa spisy symboli i oznaczeń – pierwszy uwzględniający terminologię dotyczącą metod i pojęć fizycznych, a drugi podsumowujący symbolikę zastosowaną do opisu rodzajów powierzchni badanych w pracy. Rozprawa zakończona jest jednostronicowym podsumowaniem z najważniejszymi wnioskami oraz bibliografią liczącą 128 odniesień do książek i artykułów, z których Pani Natalia Olszowska jest współautorką czterech. Zgodnie z deklaracją autorki rozprawa jest oparta na rezultatach diskutowanych w trzech z wymienionych artykułów – dwóch opublikowanych w *Surface Science* i jednym w *Physical Review B*. Fakt ten świadczy niezbicie o wysokim poziomie naukowym przedstawionych w rozprawie wyników i nie pozostawia wątpliwości co do poprawności merytorycznej przedstawionej analizy.

Na szczególne podkreślenie zasługuje wysiłek autorki włożony w przygotowanie kompletnej rozprawy, zamiast coraz powszechniejszej formy zestawienia opublikowanych prac. Dzięki trudowi włożonemu w przygotowanie rozdziałów wstępnych i bardziej szczegółowy opis uzyskanych wyników przedstawiona rozprawa ma o wiele większe walory dydaktyczne. Jej poszczególne rozdziały poświęcone są opisowi (kolejno):

- modeli struktury pasmowej poziomów elektronowych, zarówno w objętości, jak i na powierzchni półprzewodników,
- teoretycznych podstaw kąto-rozdzielczej spektroskopii fotoelektronów,
- aparatury badawczej wykorzystywanej w pracy oraz metodom preparatyki powierzchni,
- wyników badań struktury krystalicznej na powierzchni InAs(001),
- wyników badań struktury elektronowej czystych powierzchni InAs(001),
- wyników badań powierzchni pasywowanej siarką,
- wyników badań i modelowania dwuwymiarowego gazu elektronowego na pasywowanej siarką powierzchni InAs.

Struktura rozprawy jest przejrzysta, kompozycja poprawna, a szata graficzna bardzo estetyczna. Informacje są wprowadzane w sposób zwięzły i systematyczny. To wszystko powoduje, że pracę czyta się z przyjemnością, mimo że jest ona poświęcona bardzo złożonym problemom naukowym i technicznym. Wśród nielicznych mankamentów rozprawy wymienić należy brak przedstawienia w przedmowie motywacji do podjęcia tego typu badań, powtórzenia podobnie brzmiących sformułowań w sąsiadujących ze sobą akapitach, niespójności w stosowanej symbolice oraz błędy gramatyczne i edycyjne. Lista tych drobnych uchybień jest załączona do recenzji. W mojej opinii słusznym byłoby również dodanie rozdziału poświęconego podstawom teoretycznym techniki LEED i metodyce interpretacji dyfraktogramów elektronowych. Wówczas rozprawa stałaby się bardziej przystępna dla czytelników niebędących specjalistami w dziedzinie fizyki powierzchni ułatwiając im zrozumienie badanych rekonstrukcji strukturalnych. Mimo tych mankamentów strukturę rozprawy, formę prezentacji wyników i ich interpretację oceniam bardzo wysoko.

Do mocnych stron rozprawy należy niewątpliwie zaliczyć systematyczność przedstawionych badań. Zebranie widm ARPES dla wielu

rodzajów orientacji i terminacji oraz dla pasywowanej powierzchni InAs(001) pozwoliło autorce na jednoznaczną interpretację otrzymanych krzywych dyspersji, pozwalającą na przypisanie pochodzenia objętościowego i/lub powierzchniowego większości obserwowanych pasm. Szczególnie interesujące są wyniki przedstawione w ostatnim rozdziale pracy, w którym opisywane jest kwantowanie stanów 2DEG oraz zależność ilości i „głębokości” energetycznej obserwowanych pasm od metody preparatyki powierzchni przed pasywacją siarką. Zebrane są w nim również ilościowe parametry dotyczące ugięcia pasm oraz masy efektywnej elektronów powierzchniowych.

W dwóch miejscach rozprawy pojawiły się informacje, które należałoby moim zdaniem uzupełnić o dodatkowe wyjaśnienia. Proszę aby doktorantka odniosła się do nich w czasie publicznej obrony pracy.

1. Na stronie 54, w opisie dyfraktogramu powierzchni InAs przedstawionego na rysunku 4.7, autorka wspomina „niestabilną strukturę” jako przyczynę dużego sygnału tła. Proszę o dokładniejsze wyjaśnienie, jakiego typu niestabilności mogą być przyczyną podwyższonego tła w dyfraktogramach LEED?
2. Rysunek 5.14 przedstawia schemat analogiczny do rys. 1.6b z dodatkowymi widmami gęstości stanów. Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób z przedstawionych zależności granic pasm (CBM i VBM) oraz położenia pasm rezonansowych od głębokości można określić intensywność oraz położenie i szerokości energetyczne widm gęstości stanów powierzchniowych i rezonansowych?

Podsumowując moją opinię stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr Natalii Olszowskiej przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim było zbadanie struktury elektronowej pasm powierzchniowych arsenku indu i wykazuje wysoką ogólną wiedzę teoretyczną autorki w dziedzinie fizyki. Rozprawa spełnia zatem wszystkie kryteria stawiane przez Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Dlatego wnoszę o dopuszczenie do jej publicznej obrony.



Załącznik

do recenzji rozprawy doktorskiej mgr Natalii Olszowskiej
pt. *Badania struktury elektronowej powierzchni InAs(001)*
autorstwa Marcina Sikora

Lista drobnych uchybień gramatycznych i edycyjnych, które nie obniżają oceny merytorycznej rozprawy, wraz z sugestiami zmian:

- str. iii, linia 15-16: symbol „InAs” nie powinien być dzielony pomiędzy dwa wiersze,
- str. v: w spisie treści dwukrotnie występują rozdziały o nazwie „podziękowania” oraz „symbole i oznaczenia” – sugeruję zróżnicować te nazwy,
- str. xii, l. 11 i 19: niepotrzebny symbol „)” na końcu linii,
- str. 2, l. 10: powinno być „tzn.”,
- str. 2 i kolejne: brak numeracji większości równań w rozprawie,
- str. 2, ostatnie równanie (po prawej): w liczniku powinien być wektor „a₁”
- str. 6, l. 1: brak przecinka po „Podsumowując”,
- str. 7, l. 16: powinno być „zdefiniowaną”,
- str. 9, l. 10 (od dołu): brak kropki po „przestrzennej”,
- str. 10, l. 1: powinno być „adsorpcyjnymi”,
- str. 10, l. 4-6: zdanie jest niegramatyczne – nie jest jasne, jaki problem jest rozwiązywany,
- str. 11, l. 11: powinno być „po wyliczeniu i podstawieniu”,
- str. 20, l. 3-4 (od dołu): niepoprawne dzielenie wyrazu „pasma”,
- str. 23, l. 1: powinno być „relacji dyspersji”,
- str. 23, l. 4: symbol „fi” jest identyczny jak dla kąta na rys. 2.1 – warto je zróżnicować,
- str. 28, l. 10-11 (od dołu): równanie nie powinno być dzielone między linie,
- str. 28, l. 8 (od dołu): powinno być „przejścia elektronu przez materię”,
- str. 29, l. 5 (od dołu): powinno być „nie mogą pokonać”,
- str. 30, l. 8-9: równanie nie powinno być dzielone między linie,
- str. 30, l. 2-3 (od dołu): symbole „fi” w opisie i równaniu są różne,
- str. 37, l. 1 (od dołu): zamiast „droga” powinno być „trajektoria”,
- str. 38, l. 21: powinno być „energetyczna zdolność rozdzielcza”,
- str. 38, l. 3-4 (od dołu): powinno być „jest sprzęgnięta z monochromatorem typu Gamdata-Scienta VUV5040”, nawias jest niepotrzebny,
- str. 40, rys. 3.3: powinno być „ekran fluorescencyjny”,
- str. 40, l. 3-4: sugeruję nie dzielić wyrażenia „20-200 eV” między linie,
- str. 40, l. 14: powinno być „200-500 eV” (użycie spacji między wartością a jednostką fizyczną powinno być ujednolicone w całej rozprawie,
- str. 41, l. 10 (od dołu): powinno być „były zainstalowane”,

- str. 41, l. 8 (od dołu): niepotrzebny symbol „)”,
- str. 45, l. 12: powinno być „powierzchnię materiału przed dalszą”,
- str. 46, l. 5-6: sugeruję połączyć wartość i jednostkę ciśnienia w jednej linii,
- str. 49, l. 2: sugeruję usunąć „na powierzchni”,
- str. 50, l. 9-10 i dalsze oraz kolejna strona: notacja węzłów jest niespójna (czcionką pochyloną lub prostą, liczby w indeksie dolnym lub nieindeksowane) - wymaga ujednolicenia,
- str. 50, l. 10: brak „As10” na rys. 4.2,
- str. 52, rys. 4.5: niepotrzebne powielenie struktur atomowych z rys. 4.4, sugeruję usunąć a w opisie dodać odniesienie do rys. 4.4,
- str. 58, l. 6 (podpis rys. 5.1): powinno być „wzdłuż kierunku”,
- str. 60, l. 2: nadmiarowa spacja po „periodyczności”,
- str. 60, l. 4 (przypis 1): powinno być „obserwowane”,
- str. 60, l. 5 (przypis 1): powinno być „domen”,
- str. 60, l. 6 (przypis 1): powinno być „związana”,
- str. 60, l. 7 (przypis 2): brakuje „jest”,
- str. 60, l. 8 (przypis 2): zamiast „odwrotnej” powinno być „rzeczywistej”,
- str. 61, l. 12 (i w kilku miejscach dalej): zamiast „poniżej” sugeruję używać „w tym rozdziale” lub „w dalszej części pracy” itp.,
- str. 62, l. 14: powinno być „wykonanych”,
- str. 68, l. 7: powinno być „otoczenie”,
- str. 68, l. 8 (od dołu i w kilku miejscach dalej): zamiast „Rys-ach” powinno być „Rys.”,
- str. 69, l. 5 (od dołu): zamiast „z” powinno być „w”,
- str. 70, l. 17, 18 i 21: notacja struktury inna niż na stronie 51 – należy ujednolicić,
- str. 72, l. 9 (przypis 5): zamiast „prawie równy” powinno być „bliski”,
- str. 74, rys. 5.9: brak odniesienia do tego rysunku w tekście rozprawy,
- str. 74, l. 2: zamiast „na poniższych rysunkach” powinno być „na rys. 5.10a, 5.11a, 5.12”,
- str. 78, l. 1-2 (od dołu): wyrażenie algebraiczne nie powinno być dzielone na dwa wiersze,
- str. 79, l. 20: niepotrzebne „to”,
- str. 79, l. 10 (od dołu): powinno być „rozbieżne”,
- str. 79, l. 7-9 (od dołu): zdanie niejasne – wymaga przeredagowania,
- str. 81, l. 13 (od dołu): zamiast „będziemy mieć” powinno być „uzyskujemy”,
- str. 81, l. 2 (od dołu): zamiast „do” powinno być „co”,
- str. 82, l. 1 (od dołu): powinno być „-0.05 eV”,
- str. 83, l. 15: można usunąć „energii”,
- str. 83, l. 18: powinno być „-0.4 eV”,
- str. 83, tabela 5.1: wartości energii powinny być ujemne (w analogii do tabeli 7.1),

- str. 85, l. 3-4: „10 eV” powinno być w jednym wierszu,
- str. 86, l. 2 (od dołu): powinno być „związany”,
- str. 87, l. 5-6 i 12-13: wartości i jednostki powinny być w jednej linii,
- str. 90, tabela 5.2: wartości energii powinny być ujemne (w analogii do tabeli 7.1),
- str. 93, l. 9-11: zdanie niegramatyczne – wymaga przeredagowania,
- str. 95, l. 14 (od dołu): powinno być „przy czym”,
- str. 95, l. 8 (od dołu): niepotrzebne „to”,
- str. 95, l. 7 (od dołu): nie jest jasne jaka rekonstrukcja jest tworzona w wyższej temperaturze niż „ $c(2 \times 8)/2 \times 4$ ”,
- str. 99, l. 7: powinno być „utrudnia”,
- str. 99, l. 9: niepotrzebne „np.”,
- str. 103, l. 10-12: wartości energii i ich jednostki powinny być w jednej linii,
- str. 105, l. 6 (od dołu): powinno być „poza punktem”,
- str. 109, l. 15 (od dołu): brakuje symbolu „S” po „do pasma”,
- str. 110, l. 4: powinno być „pasm”,
- str. 111, l. 2 (przypis 1): powinno być „wykonane”,
- str. 112, l. 4 (od dołu i kolejna strona): niepotrzebne „0” w indeksie górnym za „VBM(0)”,
- str. 113, l.1 (od dołu i pierwsza na kolejnej stronie): wyrażenie algebraiczne (w tym wartość i jednostka) nie powinno być dzielone na strony,
- str. 116, l. 1: powinno być „-0.05 eV”,
- str. 116, l. 8: powinno być „tj.”,
- str. 116, l. 1 (od dołu): brak „=” po symbolu masy efektywnej,
- str. 117, l. 1-2 (od dołu): „0.34 eV” powinno być w jednej linii,
- str. 118, l. 4-5 (od dołu): „S/InAs(001)” powinno być w jednej linii,
- str. 125, równanie 7.7: gęstość dziur i elektronów jest w tym przypadku funkcją „z”,
- str. 128, równanie 7.11: brak „-” w wykładniku równania fali odbitej,
- str. 131, l. 10 (od dołu): niepotrzebne słowo „ostatni”,
- str. 134, l. 5-6 (od dołu): zdanie niegramatyczne – wymaga przeredagowania,
- str. 137 i dalsze: aby ujednolicić sposób zapisu bibliografii sugeruję usunąć miesiąc publikacji oraz końcową stronę artykułu, ponadto w [44], [46], [47], [76] i [78] zapis jest niespójny z resztą pozycji nieksiążkowych, a w [20], [41], [54], [63], [99], [119] i [127] brakuje numeru początkowej strony/artykułu.