



UMCS
INSTYTUT FIZYKI

UNIwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie
Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki

Instytut Fizyki

pl. Marii Curie-Skłodowskiej 1, 20-031 Lublin; tel. (081) 537 61 43; fax (081) 537 61 91
e-mail: fizyka@umcs.lublin.pl; www.fizyka.umcs.lublin.pl

Prof. dr hab. Ryszard Zdyb
Katedra Fizyki Powierzchni i Nanostruktur
Instytut Fizyki UMCS
e-mail: ryszard.zdyb@umcs.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Dawida Wutke
pt. Badania efektów wielociałowych w dwuwymiarowych gazach elektronowych (2DEG)
uformowanych na powierzchniach półprzewodników III-V

Charakterystyczną cechą dwuwymiarowego gazu elektronowego (2DEG) jest wysoka wartość ruchliwości tworzących go nośników ładunku. Z tego powodu materiały, w których realizowany jest dwuwymiarowy gaz elektronowy wykorzystywane są do wytwarzania elementów elektronicznych, których szybkość działania odgrywa kluczową rolę. Jednym z możliwych sposobów realizacji tego typu układów, który wciąż jest w fazie badań podstawowych, jest powierzchnia kryształów. Rozprawa doktorska mgr. Dawida Wutke podejmuje temat badań powierzchni kryształów półprzewodników z grupy AIIIBV pod kątem charakteryzacji podstawowych parametrów fizycznych dwuwymiarowego gazu elektronowego.

Rozprawa doktorska przedstawia wyniki badań 2DEG otrzymanego na powierzchni niedomieszkowanego i domieszkowanego siarką arsenku indu. Dwuwymiarowy gaz elektronowy był wytwarzany przez Autora rozprawy poprzez osadzanie siarki, seleniu lub telluru metodą epitaksji z wiązki molekularnej w warunkach ultrawysokiej próżni. Główną metodą badawczą stosowaną w badaniach była kątowno-rozdzielcza spektroskopia fotoelektronów (ARPES). Do charakteryzacji właściwości krystalograficznych podłoża i przygotowanych układów 2DEG Autor używał dyfrakcji niskoenergetycznych elektronów LEED.

Mgr Dawid Wutke ukończył Szkołę Doktorską Nauk Ścisłych i Przyrodniczych Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie, a rozprawę doktorską wykonał w Zakładzie Promieniowania Synchronotronowego Instytutu Fizyki UJ. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. Jacek Kołodziej. Rozprawa składa się z dziewięciu rozdziałów, bibliografii oraz spisu rysunków i tabel. Rozprawa napisana jest w języku polskim i liczy 110 stron.

Pierwszy rozdział rozprawy doktorskiej to wstęp teoretyczny. Na początku rozdziału Autor w skondensowany sposób wprowadza tematykę swoich badań i definiuje główne cele dysertacji. Są nimi badania dwuwymiarowego gazu elektronowego metodami czułymi na powierzchnię oraz wyjaśnienie rozbieżności dotyczących znaczenia i wielkości efektów wielociałowych występujących w układach 2DEG. Kolejne podrozdziały dostarczają opisy podstawowych właściwości ciał stałych: struktury pasmowej, włączając model prawie swobodnych elektronów oraz model $k \cdot p$, poziomu Fermiego, masy efektywnej, a także opis podstawowych właściwości półprzewodników samoistnych, domieszkowanych i zdegenerowanych. Autor przedstawia również najważniejsze informacje dotyczące oddziaływań wielociałowych: oddziaływania elektron-fonon, elektron-elektron i elektron-domieszka.

Rozdział drugi poświęcony jest stosowanym w rozprawie metodom i układom badawczym. Mgr Dawid Wutke podaje najistotniejsze informacje dotyczące kąto-rozdzielczej spektroskopii fotoelektronów ARPES. Przedstawia również trójstopniowy i jedno-stopniowy model zewnętrznego efektu fotoelektrycznego. Opisując kolejną metodę eksperymentalną, czyli dyfrakcję niskoenergetycznych elektronów LEED, wprowadza najważniejsze elementy wiedzy umożliwiające interpretację obrazów dyfrakcyjnych. Na koniec tej części prezentuje układ eksperymentalny wykorzystywany w badaniach.

Poniżej przedstawione są uwagi i komentarze do rozdziału drugiego:

1. str. 40: Autor: *Wobec tego wartości energii i składowych wektora falowego są następujące: ...*
Przedstawione są tylko wartości składowych wektora falowego.
2. str. 40: równania na wartości składowych wektora falowego (59-62): warto byłoby zamieścić szkic definiujący kąty θ i ϕ .
3. str. 46: Przy opisie lampy wyładowczej jako źródła promieniowania Autor stwierdza, że: *Zazwyczaj nie umożliwiają polaryzacji padającego światła.* Jest odwrotnie - w prosty sposób umożliwiają uzyskanie liniowej polaryzacji światła.
4. str. 48: niewłaściwe użycie pojęcia substrat.

Trzeci rozdział dotyczy preparatyki próbek. Mgr Dawid Wutke opisuje sposób przygotowania pięciu różnych próbek z użyciem podłoża arsenku indu. Podaje szczegółowe procedury otrzymania powierzchni z warstwą siarki, selenu i telluru na domieszkowanym i niedomieszkowanym InAs. Przedstawia również obrazy LEED świadczące o otrzymanym długozasięgowym porządku krystalograficznym przygotowanych powierzchni.

Kolejny, krótki rozdział poświęcony jest metodyce badań. Autor porusza ważną kwestię pomiarów ARPES w niskich temperaturach, w których na próbkach adsorbowany jest wodór. Obecność na powierzchni wodoru modyfikuje jej strukturę elektronową zaburzając tym samym informacje o badanym dwuwymiarowym gazie elektronowym. Doktorant przedstawia sposób, który umożliwia obejście problemu – wykonywanie krótkich, wielokrotnych pomiarów pomiędzy którymi próbka jest podgrzewana w celu desorpcji wodoru.



W rozdziale piątym przedstawione są pierwsze wyniki eksperymentów ARPES. Jest to niezmiernie ważna część rozprawy; pomimo że znajdują się w niej „wstępne” wyniki doświadczalne należy ten rozdział traktować jako wprowadzenie do kolejnych części raportujących wyniki. Wprowadzenie to ma na celu zapoznanie czytelnika z przykładowymi mapami wysokorozdzielczej spektroskopii ARPES, interpretacją najważniejszych informacji zawartych w mapach ARPES i parametrów charakteryzujących dwuwymiarowy gaz elektronowy. Prezentacja kolejnych parametrów jest związana z klarownie opisaną analizą krzywych rozkładu energii EDC. Autor określa w ten sposób minima i szerokości pasm, składowe przerwy wzbronionej, gięcie pasm, położenie maksimum pasma walencyjnego, masę efektywną elektronów na dnie pasma oraz powierzchniową gęstość elektronów.

Poniżej zawieram komentarze do tego rozdziału:

1. Na rys. 24 widoczne są pasma istotnie wychodzące ponad poziom Fermiego. Ma to związek z temperaturą, w której wykonywany był pomiar i rozkładem Fermiego-Diraca. W jaki sposób określony został poziom Fermiego?
2. str. 65: Autor opisuje ilościowo objętościowe pasmo przewodnictwa zmodyfikowaną funkcją arctan – dobrze byłoby podać formułę, w szczególności gdy jest mowa o zmodyfikowanej funkcji;
3. str. 67: Podając zależności na składowe określające wartość przerwy energetycznej warto byłoby podać komentarz do odpowiednich równań (poza odnośnikiem do literatury);
4. str. 68-69: Autor opisuje sposób określania położenia górnej krawędzi pasma walencyjnego. Położenie wyznacza z punktu przecięcia dwu prostych wpasowanych do zależności intensywności fotoelektronów od energii wiązania. Natomiast intensywność jest wynikiem *scalkowania widma ARPES po kątach*. W jakim zakresie kątów nastąpiło całkowanie? Biorąc pod uwagę fakt, że pasmo ma charakter paraboliczny, całkowanie modyfikuje rozkład natężenia w punkcie Gamma strefy Brillouina, tym samym nachylenie krzywej intensywności i w konsekwencji położenie punktu przecięcia dwu prostych w skali energii wiązania;
5. str. 70: Nie jest jasne w jaki sposób został wyznaczony parametr Δ . Warto byłoby dodać przykładowy rysunek obrazujący metodę określania Δ .

Rozdział szósty zawiera wyniki badań parametrów charakteryzujących dwuwymiarowy gaz elektronowy w badanych próbkach. Autor w systematyczny sposób prezentuje uzyskane wyniki ARPES. Widząc mapy fotoemisyjne muszę zwrócić uwagę na ich bardzo wysoką jakość: niezwykle wąskie pasma elektronowe o szerokości połówkowej od kilkunastu do kilkadziesiąt meV. Świadczy to z jednej strony o bardzo dobrej jakości wytwarzanych próbek, a z drugiej o wysokim kunszcie eksperymentatora wykonującego doświadczenia i potrafiącego uzyskać wyniki w pełni wykorzystując możliwości aparatury. Należy również nadmienić, że mgr Dawid Wutke ze zmierzonych map ARPES otrzymuje szereg ilościowych informacji dotyczących badanych próbek. Są to wartości liczbowe parametrów otrzymane z analizy, której szczegóły zostały przedstawione w poprzednim rozdziale.

Rozdział siódmy poświęcony jest opisowi danych eksperymentalnych dwuwymiarowego gazu elektronowego za pomocą modelu $k \cdot p$ Kane’a. Zawiera krótkie wprowadzenie do modelu $k \cdot p$



oraz modelu Poissona i Schrödingera z przybliżeniem Thomasa-Fermiego. Wykorzystując model $k \cdot p$ Kane'a Autor wyznacza masy efektywne elektronów dla badanych próbek z podłożem niedomieszkowanym i domieszkowanym siarką. W obu przypadkach, niezależnie od warstwy powierzchniowej wytwarzającej dwuwymiarowy gaz elektronowy otrzymane masy efektywne są sobie równe. Należy jednak zaznaczyć, że masy efektywne wyznaczone na podstawie modelu $k \cdot p$ Kane'a różnią się znacznie, są większe o ponad rząd wielkości, od efektywnych mas wyznaczonych na dnie pasma przewodnictwa (poprzedni rozdział). W tym miejscu brakuje komentarza do różnic między wyznaczonymi wartościami mas efektywnych.

Ostatni rozdział prezentuje wyniki badań fotoemisyjnych dwuwymiarowego gazu elektronowego przeprowadzonych pod kątem poszukiwań oddziaływań wielociałowych. W początkowej części Autor przedstawia najważniejsze informacje dotyczące oddziaływania elektron-fonon, elektron-elektron i elektron-donor. W szczególności koncentruje się na wpływie tych oddziaływań na kształt widm fotoemisyjnych i temperaturowych zależności parametrów charakteryzujących pasma elektronowe. Po krótkim teoretycznym wprowadzeniu czytelnik zapoznaje się z wynikami przeprowadzonych eksperymentów ARPES oraz ich analizą. Na uwagę zasługuje szczegółowy sposób analizy danych i uzyskanie wielu parametrów charakteryzujących detale dwuwymiarowego gazu elektronowego włączając w to wartości sprzężenia elektron-fonon i wprowadzane poprzez kolejne efekty wielociałowe przyczynki do szerokości badanych pasm elektronowych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że dominujący wkład odpowiedzialny za poszerzenie pasm rzędu kilkudziesięciu meV pochodzi od oddziaływania elektron-donor. Oddziaływania elektron-fonon są o rząd wielkości mniejsze, a oddziaływania elektron-elektron są pomijalnie małe, rzędu μeV .

Biorąc pod uwagę fakt, że maksymalna energia oddziaływania elektron-fonon powinna być widoczna tuż pod poziomem Fermiego powstaje pytanie dlaczego Autor nie przedstawił analizy minimum pasma nr 3 lub nr 4. W przypadku minimum pasma nr 1, które znajduje się ponad 300 meV poniżej poziomu Fermiego czułość na efekt oddziaływania elektron-fonon jest bardzo mała, co Autor wykazał w Tabeli 14 i 15.

Komentując wyniki zaprezentowane w ósmym rozdziale warto zaznaczyć świadomość Autora rozprawy dotyczącą wpływu adsorpcji wodoru na powierzchni próbki podczas prowadzenia eksperymentów w niskich temperaturach i wynikające stąd poszerzenie badanych pasm elektronowych. Aby uniknąć komplikacji związanych z powyższymi efektami Autor prowadził badania w ograniczonym czasie regularnie podgrzewając próbkę w celu oczyszczenia jej z adsorbatu.

W Podsumowaniu, ostatniej części rozprawy, mgr Dawid Wutke w zwięzły sposób prezentuje najważniejsze osiągnięcia. Pracę doktorską zamykają spis literatury liczący 81 pozycji, spis 46 rysunków oraz 19 tabel.

Układ rozprawy jest prawidłowy a rozdziały tworzą logiczną całość. W szczególności przedstawione wprowadzenie teoretyczne efektów wielociałowych i sposób analizy danych umożliwiające otrzymanie parametrów charakteryzujących dwuwymiarowy gaz elektronowy



umożliwiają pełne zrozumienie i zagłębienie się w problematykę rozprawy. Całość napisana jest prostym i jasnym językiem.

Poniżej zamieszczam listę uwag technicznych, na którą składają się między innymi nieprecyzyjne sformułowania, pomyłki itp.:

1. str. 22 rys. 6. Schemat przedstawiający przewodnik: dwa pasma walencyjne i przewodnictwa rozdzielone poziomem Fermiego. Powinno być pasmo przewodnictwa.
2. str. 24. *W tym przypadku donory lub dziury...* Powinno być donory lub akceptory
W tym samym zdaniu: ... *poziomy energetyczne przedstawione schematycznie na rysunku 8.* Powinno być: na rysunku 7.
3. str. 30: jest *absorbatami*, powinno być adsorbatami.
4. W podpisach rys. 11 i rys. 12 występują oznaczenia krawędzi górnej i dolnej odpowiednio pasma walencyjnego E_v i przewodnictwa E_c . W podpisach rysunków oznaczone są jako pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa.
5. str. 43, równanie (66): brak definicji E_0 ;
7. str. 56: ... *która jak zostało wcześniej zbadane ...* - powinna być zacytowana literatura
8. str. 73, Tabela 4 i następne: Przy niepewności pomiarowej równej ± 2 meV podawanie wartości parametrów z dokładnością do setnych części meV nie ma sensu.
9. str. 76: wartość minimum głównego pasma: -312 eV; powinno być w meV
10. W równaniu (94) znajdują się trzy masy elektronu. Czy m_0 jest równoważne m_e ?
11. Na rys. 35 i 36 dopasowanie wynikające z modelu Kane'a (przedstawione w postaci żółtej linii) jest niewidoczne.
12. str. 83 pierwsza linia: powinien być rysunek 35.
13. W literaturze brakuje numerów stron i/lub tomu. Pozycje 1, 7, 8, 10, 12, 13, 23, 26, 27, 29, 48, 54, 65, 80, 81.
14. Ogólna uwaga dotycząca cytowania własnych publikacji: powinny znajdować się w miejscach, w których są przedstawiane rysunki lub ich fragmenty zawarte w publikacjach.

Na zakończenie należy stwierdzić, że w przedstawionej pracy doktorskiej wytworzone zostały struktury zawierające dwuwymiarowy gaz elektronowy w powierzchniowej warstwie arsenku indu. Autor wykonał je poprzez nałożenie niewielkich ilości S, Se i Te metodą epitaksji z wiązki molekularnej w warunkach ultrawysokiej próżni. Za wykonaną pracę stoi zarówno teoretyczna wiedza dotycząca zjawisk powierzchniowych w półprzewodnikach, jak i praktyczne umiejętności Autora obejmujące znajomość technik i technologii próżniowych oraz klasycznych, powierzchniowo czułych metod doświadczalnych. Na podkreślenie zasługuje duża liczba wyznaczonych wartości parametrów charakteryzujących dwuwymiarowy gaz elektronowy. Wyniki związane z rozprawą zostały opublikowane w dwu artykułach: jeden w Applied Surface Science i jeden w Physical Review B. W tym ostatnim mgr Dawid Wutke jest pierwszym autorem.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska zawiera wiele cennych, ilościowych informacji dotyczących dwuwymiarowego gazu elektronowego, a przedstawione komentarze i uwagi, które w znacznej części dotyczą technicznej strony rozprawy, nie umniejszają jej



naukowej wartości. W rozprawie przedstawiono szereg nowych rezultatów, które w istotny sposób pogłębiają naszą wiedzę na temat układów 2DEG.

Podsumowując, przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska jest jednolitym opisem właściwości fizycznych układów zawierających dwuwymiarowy gaz elektronowy zrealizowanych w powierzchniowej warstwie arsenku indu i tym samym stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Dawida Wutke spełnia wymagania określone w ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2020 r. poz. 85 z późn. zm.) i może być dopuszczona do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ryszard Zdyś

