

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

**Recenzja pracy doktorskiej
mgr Marcina Wiejaka**

**pt.: "Wykorzystanie ilościowej analizy dyfrakcji niskoenergetycznych elektronów
do badania liniowych struktur metali ziem rzadkich na powierzchni W(110)"**

Praca doktorska mgr Marcina Wiejaka dotyczy jednowymiarowych struktur metali ziem rzadkich wytwarzanych na powierzchni W(110). Badania jednowymiarowych struktur są bardzo aktualnym tematem związanym z jednej strony z poznawaniem nowych zjawisk fizycznych takich jak załamanie przewidywań modelu cieczy Fermiego i występowanie cieczy Luttingera, falami gęstości ładunku, przejściem Peierlsa i innymi, obserwowanymi w takich strukturach. Z drugiej strony z układami o ograniczonej wymiarowości wiąże się duże nadzieje na dalszą miniaturyzację elektroniki, czy też zastosowanie ich w spintronice. Dlatego też podstawowe badania nad tymi strukturami prowadzone przez autora rozprawy wpisują się w aktualną tematykę wielu światowych laboratoriów.

Jednowymiarowe struktury wytwarzane są na wiele sposobów. Autor w swej rozprawie wykorzystał samoorganizację atomów na powierzchni kryształu, która poprzez precyzyjne dozowanie ilości osadzanego pierwiastka umożliwia kontrolę odległości między formującymi się łańcuchami. Autor używa trzech eksperymentalnych technik: spektroskopii elektronów Augera, pomiarów pracy wyjścia i dyfrakcji niskoenergetycznych elektronów, a także obliczeń teoretycznych wykorzystując w tym celu dostępne oprogramowanie.

Rozprawa liczy 107 stron i składa się z pięciu rozdziałów, bibliografii (77 pozycji) i dwu aneksów.

We wstępie autor podkreśla wagę prowadzonych badań, w szczególności wiedzę dotyczącą podstawowych właściwości wytwarzanych nanostruktur. Wśród nich jest znajomość struktury krystalograficznej wraz ze znajomością dokładnego położenia atomów osadzanych na powierzchni kryształu. Wymienia przy tym dostępne techniki doświadczalne służące poznaniu tych właściwości, między innymi skaningową mikroskopię tunelową i metody dyfrakcyjne.

W rozdziale tym autor definiuje również cele rozprawy. I tak pisząc: "... jednym z dwóch podstawowych celów niniejszej pracy jest rozszerzenie warsztatu naukowego, jakim dysponuje Zakład Fizyki Nanostruktur Instytutu Fizyki Doświadczalnej...", definiuje swój

pierwszy cel. Jednak w dalszej części tego rozdziału nie pojawia się wyraźnie sformułowany drugi cel pracy. Czytelnik w sposób pośredni odczytuje, że jest nim określenie położenia atomów ziem rzadkich w powierzchniowej komórce elementarnej struktur łańcuchowych wytwarzanych na powierzchni wolframu (110). Brak precyzyjnie zdefiniowanego drugiego celu uważam za pewne przeoczenie niniejszej rozprawy.

W drugim rozdziale przedstawione są podstawowe informacje dotyczące monokryształu wolframu ze szczególnym uwzględnieniem ściany (110). Autor prezentuje informacje dostępne w literaturze, między innymi dotyczące relaksacji atomów na tej powierzchni. Omawia rozbieżności pomiędzy wynikami otrzymanymi w różnych eksperymentach dyfrakcyjnych i wynikami obliczeń teoretycznych. W tym samym rozdziale przedstawione są również podstawowe informacje dotyczące metali ziem rzadkich oraz łańcuchowych struktur powstających po osadzeniu submonowarstwowych ilości metalu na powierzchni W(110). Łańcuchowe struktury są bardzo interesującymi obiektami ze względu na ich długozasięgowe uporządkowanie na nominalnie płaskich powierzchniach. Dodatkowa możliwość sterowania odległością między nimi poprzez ilość osadzonego pierwiastka jest niewątpliwym atutem tych struktur. Autor podkreśla także fakt, że w literaturze brak jest informacji na temat dokładnej struktury krystalograficznej powstających obiektów. Opisując niepowodzenia eksperymentatorów w uzyskaniu atomowej rozdzielczości struktur łańcuchowych techniką STM autor używa dość niefortunnego sformułowania (str. 17): „... nie udało się osiągnąć zdolności rozdzielczej mikroskopu pozwalającej na rozdzielenie łańcucha na poszczególne atomy.”

Rozdział trzeci składa się z części opisujących techniki eksperymentalne wykorzystywane w rozprawie. Są to spektroskopia elektronów Augera, pomiar zmian pracy wyjścia metodą Andersona i dyfrakcja niskoenergetycznych elektronów LEED. Ponadto rozdział ten opisuje stanowisko pomiarowe oraz oprogramowanie służące rejestracji wyników i ich analizie. Informacje zawarte w tym rozdziale świadczą o tym, że autor posiada niezbędną wiedzę dotyczącą wytwarzania i utrzymywania bardzo niskich ciśnień, rzędu 10^{-10} mbara, oraz obsługi urządzeń pracujących w warunkach bardzo wysokiej próżni. Należy w tym miejscu podkreślić fakt zbudowania przez autora układu doświadczalnego oraz napisania oprogramowania umożliwiającego jego obsługę, rejestrację danych i ich analizę. Informacje dotyczące tych zadań zawarte są w obu aneksach rozprawy.

W części dotyczącej techniki LEED przedstawione są warunki, które muszą być spełnione aby zaobserwować ugięte na kryształach wiązki elektronów. Są one opisane jako warunki Bragga, podczas gdy są to warunki Lauego. Oczywiście opisy Bragga i Lauego są równoważne, jednak patrząc od strony formalnej powinny być opisane we właściwy sposób.

Rozdział czwarty zawiera wyniki pomiarów i obliczeń oraz ich analizę. Podzielony jest na dwie części. W pierwszej, przedstawiony jest eksperyment wykonany z czystą powierzchnią W(110). Ma on na celu sprawdzenie poprawności geometrii doświadczenia oraz wyznaczenie odległości międzypłaszczyznowych przypowierzchniowych warstw wolframu. Otrzymane wyniki zgadzają się z danymi literaturowymi, a współczynniki Pendry'ego mają wartości porównywalne lub mniejsze od cytowanych w literaturze. Świadczy to o dużej

precyzji wykonanego doświadczenia, w szczególności właściwej geometrii eksperymentu, i dowodzi poprawności działania aparatury.

Na stronie 48, omawiając analizę wyników doświadczeń LEED autor używa trudnego do zrozumienia sformułowania: "...subtrakcję tła metodą liniowej interpolacji w rzędzie." W tym miejscu powinien znajdować się odnośnik do Aneksu B, w którym pojawia się opis tej metody. W tej samej części, przy opisie obliczeń teoretycznych, na stronie 55 znajdują się wykresy przesunięć fazowych w zależności od energii elektronów. Jako fizyk, autor powinien pamiętać, że obie osie powinny posiadać opis z podanymi jednostkami.

Druga część rozdziału poświęcona jest układowi Nd/W(110). Autor, na podstawie wyników pomiarów spektroskopii elektronów Augera, pracy wyjścia i dyfrakcji LEED, określa czas utworzenia 1 monowarstwy Nd na powierzchni W(110). Jest to bardzo istotny etap, ponieważ kolejne wnioski bazują na tej informacji. Autor, w zależności od stopnia pokrycia, identyfikuje wiele nadstruktur indukowanych obecnością atomów Nd na powierzchni W(110). Są to rekonstrukcje (12x2), (6x2), (14x2), (4x2), c(5x3) i heksagonalna. Za godny uwagi wynik uważam wykonanie na podstawie przeprowadzonych pomiarów wykresu fazowego $T(\theta)$ (temperatury od pokrycia) układu Nd/W(110). Przeprowadzona analiza danych doświadczalnych pozwala stwierdzić, że autor bardzo dobrze poznał techniki pomiarowe stosowane w eksperymentach i potrafi na podstawie otrzymanych wyników określać różne wielkości fizyczne i ich wzajemne zależności.

Do ilościowej analizy LEED wybrana została struktura (6x2). Godnym podkreślenia jest bardzo staranne przygotowanie eksperymentu przejawiające się wieloma pomiarami testowymi mającymi na celu uniknięcie niekontrolowanego wpływu różnych czynników, jak np. adsorpcja gazów resztkowych. Opierając się na literaturze autor przedstawia siedem wyjściowych modeli badanej rekonstrukcji. Modele te poddaje analizie teoretycznej porównując obliczone na ich podstawie krzywe I-V z krzywymi otrzymanymi w doświadczeniach. Omawiając model TFS zygzak (2) stwierdza, że "... brak jest bowiem jakichkolwiek przesłanek fizycznych świadczących o istnieniu tak silnego oddziaływania pomiędzy nimi, mogącego odpowiadać za skrócenie wiązania w stosunku do wartości charakterystycznej dla monokryształu Nd." (str. 82). Chociaż w tym przypadku wydaje się być uzasadnione, uważam to sformułowanie za zbyt silne ze względu na to, że istnieją prace świadczące o tym, że w układach zawierających niedużą liczbę atomów odległości między najbliższymi atomami mogą być mniejsze od odpowiednich odległości występujących w obiektach o makroskopowych rozmiarach (RSC Adv. 4, 35959 (2014) i cytowana w tej pracy literatura). Niemniej jednak rezultaty otrzymane w wyniku ilościowej analizy LEED zasługują na podkreślenie ze względu na uzyskaną bardzo dobrą zgodność wyników doświadczalnych z obliczeniami oraz stworzenie modelu opisującego położenie atomów Nd w strukturach łańcuchowych na powierzchni W(110).

Układ pracy jest logiczny, jednakże strona edytorska nie jest pozbawiona mankamentów. Wśród uchybień są makaronizmy i żargon, a także pewne niedociągnięcia stylistyczne i gramatyczne. Mimo tych uwag praca przedstawia istotny i oryginalny wynik

badawczy w postaci systematycznych studiów adsorpcji atomów Nd na powierzchni W(110) oraz zaproponowanie nowego modelu struktur łańcuchowych w układzie Nd/W(110). Ponadto ważnym wynikiem rozprawy jest powstanie nowego stanowiska eksperymentalnego i nowej techniki ilościowej analizy LEED w Zakładzie Fizyki Nanostruktur Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Wrocławskiego. Na podkreślenie zasługuje fakt, że zaprezentowane wyniki, a także inne, nie ujęte w niniejszej rozprawie zostały opublikowane w międzynarodowych czasopismach o wysokiej pozycji w dziedzinie fizyki: Surface Science i Applied Surface Science.

Podsumowując należy stwierdzić, że rozwiązanie oryginalnego problemu badawczego świadczy o umiejętności autora do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Tym samym stwierdzam, że przedstawiona przez mgr. Marcina Wiejaka rozprawa doktorska spełnia ustawowe wymagania i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Lublin, 21.01.2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'D. W.' or similar, written in a cursive style.