

Dr hab. Andrzej Golnik, prof. nzw. UW
Uniwersytet Warszawski
Wydział Fizyki
ul. Hoża 69
00-681 Warszawa

Warszawa, listopad 2011

Recenzja

**pracy doktorskiej
magistra Krzysztofa Wernera-Malento
z Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk
" Właściwości transportowe i magnetyczne elektronów silnie skorelowa-
nych w heterostrukturach nadprzewodnik - ferromagnetyk "**

Zgodnie z tytułem recenzowana rozprawa doktorska dotyczy badań heterostruktur nadprzewodnik - ferromagnetyk. Zasadnicza część pracy poświęcona jest badaniom typowych heterostruktur tego typu, czyli trójwarstw ferromagnetyk-nadprzewodnik-ferromagnetyk. Warstwa nadprzewodnika $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ umieszczona była między warstwami półmetalicznego ferromagnetyka $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$. Wyniki badań takich trójwarstw opisane są w recenzowanej rozprawie na 32 stronach w podrozdziale 9.1. W następnych podrozdziałach (łącznie 17 stron) przedstawione są wyniki dotyczące innych struktur dwuwymiarowych, których zaliczenie do heterostruktur nadprzewodnik-ferromagnetyk można by uznać za pewne uogólnienie. Podrozdział 9.2 dotyczy pojedynczych warstw FeSe, związku będącego jednocześnie nadprzewodnikiem i ferromagnetykiem. Zaś w podrozdziale 9.3 opisane zostały próby wytwarzania i wyniki charakterystyki dwuwarstw ferromagnetyk-półprzewodnik oraz nadprzewodnik-półprzewodnik, gdzie w roli półprzewodnika występuje domieszkowany tlenek cynku. Tego typu heterostruktury mogłyby znaleźć zastosowanie w budowie diody spinowej.

Opisane prace badawcze wpisują się w tradycję badań supersieci nadprzewodnik-ferromagnetyk prowadzonych w grupie prof. Piotra Przysługskiego z oddziału ON3.4 Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Punktem wyjścia do rozpoczęcia badań trójwarstw ferromagnetyk-nadprzewodnik-ferromagnetyk stanowiących zasadniczą część recenzowanej pracy były przewidywania teoretyczne [1] i wyniki doświadczalne [2] dla trójwarstw typu odwrotnego, czyli nadprzewodnik-ferromagnetyk- nadprzewodnik, wskazujące na to, że na granicy warstw może zostać zaindukowana niekonwencjonalna faza nadprzewodząca o symetrii tripletowej.

Podjęte w niniejszej pracy badania z użyciem różnych technik doświadczalnych wykazały, że w wytworzonych trójwarstwach występuje efekt nadprzewodzącego zaworu spinowego, a dla wyjaśnienia tego efektu konieczne jest założenie, że dla pola magnetycznego ok. 500 Oe (50 mT) na granicy ferromagnetyk- nadprzewodnik panują optymalne warunki dla powstania niekonwencjonalnej fazy nadprzewodzącej o symetrii tripletowej.

Oryginalność rozwiązania problemu naukowego przez magistra Krzysztofa Wernera-Malento polega przede wszystkim podjęciu badań trójwarstw ferromagnetyk-nadprzewodnik-ferromagnetyk, wytworzeniu tych struktur metodą wysokociśnieniowego rozpylania katodowego, a następnie wykazaniu w szeregu eksperymentów, że klasyczne modele nadprzewodzącego zaworu spinowego zarówno prostego jak i odwróconego, nie wyjaśniają obserwowanych

zjawisk, a zaobserwowane rozbieżności wskazują na powstawanie w pewnych warunkach na granicy manganit-nadprzewodnik niekonwencjonalnej fazy nadprzewodzącej o symetrii typu triplet. Dla osiągnięcia tego celu przeprowadzono szereg oryginalnych eksperymentów transportowych, magnetotransportowych, magnetycznych i badań rezonansów ferromagnetycznego i jądrowego. Większość z tych badań opublikowane zostały w recenzowanych czasopismach z listy filadelfijskiej.

Wstępne wyniki dotyczące próbki nr LaY66-1 zostały wysłane do Acta Physica Polonica już w 2007 roku [3]. Wstępne wyniki badań transportowych i magnetometrycznych dla próbki o symbolu LaY173 zostały wysłane do Europhysics Letters w listopadzie 2008 [4].

Zasadnicza część wyników pracy doktorskiej dotycząca przede wszystkim badań na próbce LaY173 została opublikowana w dziewięciostronicowym artykule w Physical Review B wysłanym 30 marca 2009 [5]. O aktualności tych wyników najlepiej świadczy fakt, że nieco przed pracą [5] w Physical Review B ukazał się artykuł Hu i współpracowników [6] wysłany jednak 18 maja 2009. Artykuł ten dotyczył takich samych trójwarstw $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7/\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$, zawierał wyniki badań oporu i magnetooporu zależnego od kąta i potwierdza istnienie fazy tripletowej na granicy ferromagnetyk-nadprzewodnik.

W kolejnym artykule z Acta Physica Polonica [7] (złożone w październiku 2009) przedstawione zostały wyniki badań magneto oporu dla próbki LaY66-1.

Ponadto recenzowana praca doktorska zawiera wyniki pomiarów absorpcji mikrofal dla supersieci $[\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7]_{16}$ oraz $[\text{Pr}_{0.8}\text{Ca}_{0.2}\text{MnO}_3/\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7]_{16}$ opublikowanych w Applied Physics Letters [8] – podrozdział 9.1.7.

Duża część wyników dotyczących wytwarzania i charakterystyki cienkich warstw FeSe opisanych w podrozdziale 9.2 została opublikowana w artykule w Journal of Superconductivity and Novel Magnetism [9].

Jedynie wyniki dotyczące wytwarzania i charakteryzacji cienkich warstw ZnO i heterostruktur ZnO/LSMO i ZnO/YBCO opisane w podrozdziale 9.3 pozostają jak dotąd nieopublikowane. Warto natomiast podkreślić, że opracowanie przez pana Wenera-Malento metody wytwarzania warstw ZnO i dwuwarstw ZnO z nadprzewodnikiem lub magnetykiem metodą wysokoczęstościowego rozpylania katodowego wymagało pokonania wielu przeszkód, a wstępne wyniki charakterystyki transportowej diody ZnAlO-YBCO są bardzo obiecujące.

Ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w danej dyscyplinie naukowej można ocenić na podstawie rozdziałów 2 - 7 pracy doktorskiej (łącznie 35 stron).

W rozdziale 2 autor przedstawia skrótkowo (7 stron) właściwości stanu ferromagnetycznego. Zaczyna od krótkiej charakteryzacji różnych typów oddziaływania wymiany. Wspomina o domenach magnetycznych i typach ścianek domenowych, o efekcie gigantycznego magneto oporu w wielowarstwach ferromagnetyk/metal normalny. Następnie opisuje strukturę i diagram fazowy manganitów.

Rozdział 3 zawiera zestawienie najważniejszych informacji (8 stron) dotyczących nadprzewodnictwa, w tym opis własności nadprzewodnika wysokotemperaturowego $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$, i dyskusję efektów bliskości na granicach nadprzewodnik-metal normalny i nadprzewodnik-ferromagnetyk.

W rozdziałach 4 do 7 (łącznie 20 stron) dyskutowane są najważniejsze fakty doświadczalne i modele teoretyczne ważne dla wyjaśnienia efektów obserwowanych w przeprowadzonych w ramach tej pracy doktorskiej doświadczeniach. Doktorant rozpoczyna dyskusję od zaworu spinowego ferromagnetyk/metal normalny/ferromagnetyk (rozdział 4), przechodząc następnie do struktur nadprzewodzącego zaworu spinowego ferromagnetyk/nadprzewodnik/ferromagnetyk dla przypadków gdzie warstwa nadprzewodząca wykonana jest z nadprzewodnika

konwencjonalnego (rozdział 5). W rozdziale 6 omówione są możliwe symetrie parametru porządku dla nadprzewodników niekonwencjonalnych, a następnie stosunkowo duża część rozdziału (podrozdział 6.1) poświęcona jest omówieniu modeli teoretycznych opisujących wpływ powstawania powierzchniowych stanów związanych, zwanych stanami Andrejewa, na kształt krzywej zależności przewodnictwa różniczkowego od napięcia dla kontaktu metal normalny/nadprzewodnik, gdy nadprzewodnik ma parametr porządku o symetrii p (triplet) oraz d (singlet). W rozdziale 7 przedstawionych jest szereg modeli teoretycznych heterostruktur nadprzewodnik/metal normalny wskazujących na możliwość indukowania się na powierzchni granicznej fazy nadprzewodzącej o symetrii tripletowej, nawet, gdy warstwa nadprzewodząca wykonana jest z nadprzewodnika o symetrii singletowej.

Stwierdzam, że praca zawiera zestawienie najważniejszych informacji z teorii nadprzewodnictwa, ferromagnetyzmu oraz modeli teoretycznych hetero struktur zawierających nadprzewodniki potrzebnych do zinterpretowania wyników doświadczalnych przedstawionych w rozdziale 9.

W sumie praca zawiera 83 odnośniki literaturowe.

O umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez pana Krzysztofa Wernera-Malento można wnioskować na podstawie rozdziałów 8 i 9 pracy doktorskiej.

W rozdziale 8 doktorant na 6 stronach opisuje część doświadczalną swojej pracy badawczej. Z przedstawionego opisu, można wnioskować, że najważniejszą samodzielnie wykonaną częścią pracy doktorskiej było wytworzenie badanych heterostruktur. Struktury były wytwarzane metodą wysokociśnieniowego rozpylania katodowego (podrozdział 8.1), gdzie związki tlenkowe napyłane były na podłoża monokrystaliczne w atmosferze tlenu o ciśnieniu 3 mbar. Układ zapewniał również możliwość wygrzewania w tlenie o ciśnieniu do 1 bara. W pracy opisano 7 próbek o numerach porządkowych od LaY66 do LaY173, co sugeruje, że wykonanych prób było dużo więcej.

Struktura wytworzonych wielowarstw analizowana była głównie za pomocą dyfrakcji rentgenowskiej, a czasami również przy pomocy transmisyjnego mikroskopu elektronowego (podrozdział 8.2). Na podstawie podziękowań zamieszczonych w pracy można wnioskować, że samodzielny wkład doktoranta w tą analizę polegał na interpretacji otrzymanych danych, wyznaczeniu grubości warstw i wykonaniu na tej podstawie kalibracji prędkości wzrostu poszczególnych warstw.

W podrozdziale 8.3 opisany jest układ do stałoprądowych pomiarów oporu warstw w funkcji temperatury, pozwalający na pomiary z dokładnością 0.5 K. Natomiast zupełnie nie opisane są zasadnicze dla pracy pomiary przewodnictwa dynamicznego (różniczkowego) i magnetooporu, których wyniki dyskutowane są następnie w podrozdziałach 9.1.3 i 9.1.4. Autor ogranicza się jedynie do wzmianki „Prezycyjne pomiary przeprowadzone były w kriostacie helowym, gdzie błąd pomiaru temperatury był mniejszy niż 10 mK.” Na podstawie podziękowań i faktu, że pierwszym autorem prac [4,5] jest doktor Krzysztof Dybko, a mgr Krzysztof Werner-Malento jest tam drugim autorem, recenzent wnioskuję, że wstępne pomiary charakterystyczne przewodnictwa w funkcji temperatury doktorant wykonywał całkiem samodzielnie. Wyniki z podrozdziałów 9.1.3 i 9.1.4 zostały otrzymane przez dr. Dybko a pan Werner-Malento uczestniczył w ich opracowaniu i interpretacji.

W podrozdziale 8.4 opisany jest układ zmienna-prądowego magnetometru typu SQUID. Na podstawie podziękowań można jednak wnioskować, że i tym razem doktorant otrzymał wyniki pomiarów do opracowania i interpretacji.

Praca nie zawiera opisu układu doświadczalnego do badań rezonansu ferromagnetycznego – FMR, którego wyniki dyskutowane są w podrozdziale 9.1.5, jądrowego rezonansu magnetycznego – NMR (wyniki dyskutowane w 9.1.6), natomiast rozszyfrowanie skrótów FMR i

ERROR: ioerror
OFFENDING COMMAND: imagemask

STACK: