

Doc. dr hab. Krzysztof Rogacki  
Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych,  
Polska Akademia Nauk,  
Wrocław

## RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr. Zbigniewa Adamusa

p.t. *"Kotwiczenie wirów w heterostrukturach ferromagnetyk/nadprzewodnik"*

Praca poświęcona jest badaniom właściwości nici wirowych w heterostrukturach magnetyk/nadprzewodnik, które to struktury wzbudziły w ostatnich latach bardzo duże zainteresowanie z uwagi na możliwość występowania w nich interesujących zjawisk, takich jak oddziaływanie nadprzewodnictwa i magnetyzmu, w szczególności ferromagnetyzmu, zaskakujące efekty rozmiarowe, np. indukowanie uporządkowania magnetycznego poprzez warstwę nadprzewodzącą, czy też spontaniczne powstawanie w nadprzewodniku wzbudzeń magnetycznych typu wir-antywir. Z drugiej strony, nici wirowe w nadprzewodnikach mogą służyć jako modelowe układy do badania bardziej ogólnych zagadnień, takich jak dynamika i przejścia fazowe układów oddziałujących cząstek, np.: zawiesin koloidalnych, tzw. kryształów Wignera, fal gęstości ładunku, czy też różnego rodzaju urządzeń opartych na ruchach Browna. Ponadto, możliwość wpływania na statyczne i dynamiczne właściwości nici wirowych w heterostrukturach ferromagnetyk/nadprzewodnik może mieć podstawowe znaczenie dla szeroko rozumianego wykorzystania nadprzewodników w praktyce. Zatem temat rozprawy jest ważny i bardzo aktualny.

W przedstawionej pracy doktorskiej skoncentrowano się na pomiarze rozkładu pola magnetycznego w heterostrukturach o bardzo dobrze określonych właściwościach magnetycznych i nadprzewodzących. Rozkład pola badano przy pomocy miniaturowych sond Halla oraz magnetometru SQUID'owego. Otrzymane wyniki analizowano wykorzystując wiedzę dostępną w literaturze oraz w oparciu o oryginalny, fenomenologiczny model zaproponowany przez autora rozprawy. Wyciągnięto szereg bardzo ciekawych wniosków dotyczących zachowania się nici wirowych w badanych heterostrukturach, ze szczególnym uwzględnieniem roli, jaką odgrywa tutaj zjawisko kotwiczenia magnetycznego. Praca liczy 106 stron i składa się z pięciu zasadniczych rozdziałów, podsumowania wyników oraz spisu

81 pozycji literaturowych. Lista współautorskich publikacji doktoranta, związanych z realizowaną tematyką, zawiera 3 prace opublikowane w recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, w tym 2 prace to wynik prezentacji konferencyjnych. Zupełnie nie rozumiem, dlaczego pominięto tu pracę opublikowaną w *Acta Physica Polonica*, w której doktorant na liście autorów znajduje się na pierwszym miejscu (Z. Adamus et al., APPA **109**, 451 (2006)). Może trochę wyprzedzę końcową ocenę, ale powiem, że zastanawiałem się, dlaczego tak interesujące i z reguły dobrze udokumentowane wyniki zostały tak, nazwijmy to, skromnie opublikowane. Należy się domyślać, że kolejne prace są w przygotowaniu.

Rozdział 1 jest zwięzłym i dobrym streszczeniem zagadnień z zakresu nadprzewodnictwa, które będą przydatne podczas interpretacji wyników eksperymentalnych. W rozdziale 2 omówiono ogólne właściwości fizyczne wielowarstw ferromagnetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem ich struktury domenowej. W rozdziale 3 przedstawiono metody eksperymentalne. Moim zdaniem autor prezentuje bardzo dobrą znajomość tematyki i orientuje się w literaturze światowej. Wybór omawianych zagadnień jest trafny, a metodyka badań właściwa. W rozdziale 4 opisano strukturę próbek oraz wyznaczono ich podstawowe parametry magnetyczne i nadprzewodzące. Szczególną uwagę zwrócono na właściwości struktury domenowej. Zasadniczą częścią pracy jest rozdział 5, w którym zawarto większość wyników eksperymentalnych, ich szczegółową analizę i interpretację oraz propozycję modelu opisującego zachowanie się nici wirowych wewnątrz domeny magnetycznej.

Praca napisana jest jasno i moim zdaniem nie zawiera błędów merytorycznych, poza drobnymi wyjątkami. Autor precyzyjnie definiuje potrzebne wielkości fizyczne oraz wprowadza szereg oznaczeń, które potem konsekwentnie używa. To bardzo porządkuje pracę i ułatwia czytanie. Pomysłowe rysunki i diagramy w sposób elegancki i przejrzysty ilustrują otrzymane wyniki. Materiał badawczy został starannie wybrany i znakomicie scharakteryzowany. Analiza otrzymanych wyników jest właściwa, choć moim zdaniem istnieją tu pewne wyjątki, które chciałbym teraz omówić. I tak, przy omawianiu skuteczności kotwiczenia magnetycznego autor wielokrotnie podkreśla, że najbardziej efektywne kotwiczenie odbywa się na domenach reszkowych o namagnesowaniu zwróconym zgodnie z kierunkiem wnikażącego pola magnetycznego. Tymczasem wydaje się, że zupełnie podobnie powinny działać domeny „nowopowstałe”, czyli te, których moment magnetyczny został „właśnie odwrócony”. Wrażenie o anizotropii kotwiczenia magnetycznego, z uwagi na domeny reszkowe i nowopowstałe, spowodowane jest być może tym, że zdecydowaną większość

obserwacji dokonano dla przypadku, gdy ilość domen resztkowych przewyższa ilości domen „nowopowstałych”. Jeżeli, w drodze wyjątku, bada się właściwości kotwiczenia magnetycznego dla przypadku, gdy ilość obu rodzajów domen jest porównywalna, to skuteczność kotwiczenia wydaje się być podobna. Zatem zaryzykowałbym stwierdzenie, że to nie jakieś ukryte właściwości domen resztkowych, a raczej możliwość uzyskania stabilnej struktury z odpowiednią ilością domen jest przyczyną skutecznego kotwiczenia nici wirowych.

Drugi przypadek, moim zdaniem dyskusyjnego wniosku, dotyczy analizy kształtu histerezy magnetycznej. Autor stwierdza (str. 85 i 96), że w niektórych przypadkach występowanie asymetrii kształtu histerezy może być skutkiem wpływu nici wirowych na strukturę ferromagnetyczną. Stwierdzenie to wydaje mi się dość wątpliwe, ponieważ wartość pola magnetycznego w rdzeniu izolowanej nici wirowej wynosi w przybliżeniu  $2H_{cl}$ , gdzie  $H_{cl}(T \approx T_c)$  jest rzędu kilku Oe, natomiast  $H_n$  jest zwykle porównywalne lub większe od 200 Oe. Stąd trudno spodziewać się znaczącego wpływu sieci nici wirowych na strukturę domenową warstwy ferromagnetycznej, jeśli oczywiście gęstość nici nie jest duża, czyli jeśli nie występuje w dużym stopniu zjawisko zachodzenia nici na siebie.

Badania będące przedmiotem rozprawy dotyczą głównie warstw Nb naniesionych na ferromagnetyczne wielowarstwy Co/Pt. Materiały te zostały w pracy szczegółowo przebadane. W celu pełniejszego opisu i lepszego zrozumienia obserwowanych zjawisk, badania rozszerzono na heterostrukтуры zawierające nadprzewodniki charakteryzujące się większą głębokością wnikania, NbN oraz nadprzewodnik wysokotemperaturowy YBaCuO. Wyniki otrzymane dla tych materiałów pokazały, że możliwe jest skuteczne kotwiczenie nici wirowych zarówno na domenach skierowanych w górę, jak i na domenach skierowanych w dół. Muszę powiedzieć, że przez całą pracę czekałem na ten wniosek, który moim zdaniem oznacza, że nici wirowe efektywnie kotwiczone są na ściankach domenowych, a nie w objętości domen, jak to sugerowano w ramach zaproponowanego modelu. Założenie, że nici kotwiczone są głównie na ściankach domenowych wydaje się być zgodne z przedstawionymi w pracy wynikami. Takie kotwiczenie ma charakter elektromagnetyczny, a więc zależy od głębokości wnikania,  $\lambda$ , i różni się od kotwiczenia rdzeni nici wirowych na defektach o obniżonej wartości parametru porządku nadprzewodzącego, które to kotwiczenie zależy od długości koherencji,  $\xi$ . Hipotezę tę zdaje się potwierdzać wniosek zawarty w podsumowaniu: „Lekka anizotropia kształtu domen powstałych w procesie demagnetyzacji wpływa na

rozkład i zachowanie wirów.” Rozumowanie jest następujące: jeśli w procesie kotwiczenia magnetycznego ważne są ścianki domenowe, to anizotropia kształtu domen wymusi anizotropowe zachowanie się nici wirowych. W przypadku, gdyby mechanizm kotwiczenia miał charakter objętościowy, związek taki nie byłby oczywisty.

Do najważniejszych i najciekawszych wyników przedstawionych w pracy zaliczam:

- 1) Skuteczne zastosowanie techniki badania lokalnego pola magnetycznego za pomocą mikrosond Halla do otrzymania szczegółowego, wiarygodnego rozkładu pola w heterostrukturach ferromagnetyk/nadprzewodnik.
- 2) Pokazanie, że w badanych heterostrukturach odpowiednio ukształtowane domeny magnetyczne mogą pełnić rolę efektywnych centrów kotwiczenia nici wirowych.
- 3) Powiązanie skuteczności kotwiczenia nici wirowych z ilością, rodzajem i rozkładem domen oraz zaproponowanie fenomenologicznego modelu, który pozwolił na analizę zachowania się nici wirowych w domenach.

W recenzowanej pracy pojawiają się niekiedy stwierdzenia, których nie rozumiem lub wydaje mi się, że nie do końca rozumie je autor rozprawy. Stwierdzenia te są na tyle ważne, że chciałbym prosić, aby autor je wyjaśnił:

- 1) Strona 15, opis wzoru (1.12).  
*Cytat:* „Pole  $H_c$  określane bywa również jako pole termodynamiczne.”  
*Komentarz:* Otóż  $H_c$  nie bywa, a jest krytycznym polem termodynamicznym i ma głębszy sens fizyczny. Chciałbym spytać jaki?
- 2) Strona 45, pierwsze pełne zdanie.  
*Cytat:* „Niewielkie zmiany, widoczne na powiększeniu w części (b) rysunku 4.3, spowodowane są przez szum aparaturowy i nie są związane ze zmianami w FM. Oznacza to brak znaczącego efektu relaksacji w obserwowanej skali czasowej (...).”  
*Komentarz:* Nie rozumiem, dlaczego efekt taki miałby wystąpić, skoro  $M \approx 0$  i  $H = 0$ .
- 3) Strona 49, Rys. 4.8.  
Rysunek przedstawia układ domen (uzyskany po demagnetyzacji) w zależności od grubości warstwy Pt. Dlaczego rozmiar domen nie zmienia się wraz z grubością warstwy monotonicznie?
- 4) Strona 71, Rys. 5.17.  
Proszę wytłumaczyć skąd się bierze  $H_{LOC} < 0$  dla  $H > 0$  ?
- 5) Z rysunków 5.15-5.17 i 5.20 wynika, że wyższe prądy krytyczne, a więc i większy pinning, charakteryzują próbkę  $[\text{Co}(6)\text{Pt}(14)]_8$  w porównaniu z próbką  $[\text{Co}(6)\text{Pt}(3)]_8$ . Natomiast rysunki 5.21 i 5.22 pokazują, że jest odwrotnie. Jak to wytłumaczyć?

W pracy wystąpiły drobne błędy merytoryczne, wyrażenia żargonowe, błędy redakcyjne i uchybienia, które co prawda nie osłabiają walorów merytorycznych rozprawy, ale chciałbym przynajmniej niektóre z nich wymienić z obowiązku recenzenta oraz w przekonaniu, że pomoże to doktorantowi w przyszłości w redagowaniu prac naukowych. Jak wiadomo, unikanie takich błędów jest ważne, bowiem pomyłki i niekonsekwencje znacznie utrudniają zrozumienie pracy oraz wywołują konsternację w stylu: to pomyłka, czy też ja czegoś nie rozumiem?

Niektóre drobne błędy merytoryczne lub quasimerytoryczne:

- 1) Strona 17, pod koniec pierwszego akapitu.

*Cytat:* „Innymi słowy, ponieważ rdzeń wiru jest w stanie normalnym, energetycznie korzystniej jest umiejscowić go w obszarze, który jest już w stanie normalnym (defekt) niż tworzyć nowy obszar normalny we wnętrzu nadprzewodnika.”

*Komentarz:* Zwykle defekty, o jakie nam tutaj chodzi, nie znajdują się w stanie normalnym, bo żeby pełnić rolę skutecznych centrów kotwiczenia nici wirowych, powinny mieć rozmiar porównywalny z długością koherencji i stąd, z uwagi na efekt bliskości, powinny wykazywać właściwości nadprzewodzące o obniżonych parametrach.

- 2) Strona 55, pierwszy akapit.

*Cytat:* „Wartość  $H_{EXP}$  spełnia warunek  $H_n > H_{EXP} > H_c$ .”

*Komentarz:* Wydaje się, że znaki nierówności powinny być odwrócone w drugą stronę.

- 3) Strona 64, środkowy akapit.

*Cytat:* „Fragmenty  $B(x)$  o niskim nachyleniu odpowiadają sytuacji, kiedy konfiguracja wirów jest dobrze dopasowana do układu centrów MK.”

*Komentarz:* To stwierdzenie wydaje się dyskusyjne. Podczas zwiększania zewnętrznego pola magnetycznego, obszary o maksymalnym pinningu (dopasowanie układu nici wirowych do układu centrów MK) oznaczają maksymalny prąd krytyczny, a zatem maksymalny gradient  $B(x)$ .

Niektóre wyrażenia żargonowe i inne drobne uchybienia:

- 1) Strona 17, podpis pod Rys. 1.6.

Brakuje informacji, że chodzi o nadprzewodniki II rodzaju (rys. a) oraz I rodzaju (rys. b).

- 2) Strona 23, koniec rozdziału.

*Cytat:* „Zmiana długości procesu reorientacji domen ...”

*Komentarz:* Potrzebny jest dłuższy opis by zdanie mogło być właściwie zrozumiane.

- 3) Strona 26, podpis pod Rys. 1.14 (również w paru innych miejscach w tekście).

Razi nieco sformułowanie „za pomocą magnetometru SQUID”. Moim zdaniem należałoby raczej używać formy „za pomocą magnetometru SQUID’owego” lub, w wersji spolszczonej, formy „za pomocą magnetometru squidowego”.

- 4) Strona 27, „Podsumowanie”.

*Cytat:* „Następnie opisano zjawisko kotwiczenia wirów strumienia pola magnetycznego.”

*Komentarz:* Zamiast „wirów strumienia” należałoby tu raczej użyć sformułowania „kwantów strumienia”. Ponadto, lepiej chyba zamiast pojęcia „wir” używać określenia „nić wirowa” lub po prostu „wortex”, spolszczoną nazwę anglojęzycznego „vortex”.

Worteks bowiem, to dość szczególny obiekt składający się z rdzenia i okrążającego go prądu, czyli wiru, niosący ze sobą kwant strumienia magnetycznego.

5) Strona 49, pierwszy akapit.


*Cytat:* „Widoczny jest obszar, na którym odbywa się odwracanie momentów magnetycznych o szerokości ok. 1.1 kOe.”

*Komentarz:* Chodziło zapewne o zdanie „Widoczny jest obszar o szerokości ok. 1.1 kOe, na którym odbywa się odwracanie momentów magnetycznych.”

6) Sugestia:

Z uwagi na dużą ilość wprowadzonych oznaczeń, które w pewnych przypadkach używane są rzadko, bardzo pomocny byłby ich spis.

Podsumowując uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa jest bardzo interesująca. Wysoki poziom otrzymanych wyników eksperymentalnych oraz szczegółowa interpretacja świadczą o dużym zaangażowaniu doktoranta. Brak nie zawsze pełnego wyjaśnienia obserwowanych zjawisk jest wyrazem ciągle jeszcze słabego stanu wiedzy teoretycznej na temat zachowania się materii worteksów w heterostrukturach magnetyk/nadprzewodnik. Jestem przekonany, że mgr Zbigniew Adamus wykonał bardzo dobrą pracę, która spełnia wymogi stawiane przez odpowiednią ustawę. Stawiam wniosek o przyjęcie rozprawy oraz o dopuszczenie mgr. Zbigniewa Adamusa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Krzysztof Rogacki

Zurych, 23. 09. 2008