

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Zbigniewa Adamusa
pt.: "Kotwiczenie wirów w heterostrukturach
ferromagnetyk/nadprzewodnik".**

Przedstawiona mi do recenzji praca doktorska mgra Zbigniewa Adamusa pt. "Kotwiczenie wirów w heterostrukturach ferromagnetyk/nadprzewodnik" została wykonana w Instytucie Fizyki PAN w grupie Prof. Marty Cieplak. Praca poświęcona jest badaniom efektu magnetycznego kotwiczenia (MK) wirów w heterostrukturach ferromagnetyk / nadprzewodnik.

Badania efektu MK w heterostrukturach ferromagnetyk/nadprzewodnik jest jednym z kierunków intensywnie prowadzonych prac w dziedzinie fizyki ciała stałego. Dotyczy to prac prowadzonych zarówno na układach metalicznych i tlenkowych. Prace te prowadzone są ze względu na poznanie mechanizmów fizycznych odpowiedzialnych za ten efekt jak również na potencjalne możliwości jego zastosowania.

W tej rozprawie materiały wykazujące uporządkowanie ferromagnetyczne użyto wielowarstwy Co/Pt, które to dla pewnych grubości warstw Pt w strukturze wielowarstwowej charakteryzują się prostopadłą osią anizotropii magnetycznej.

Przedmiotem badań były heterostruktury Nb/Si/CoPt, NbN/Si/Co/Pt i Co/Pt/Si/YBa₂Cu₃O₇. Badane układy składają się z wielowarstw ferromagnetycznych naniesionych na warstwy nadprzewodzące, które są odseparowane wzajemnie poprzez warstwę amorficznego krzemu w celu wyeliminowania efektu bliskości. Zastosowanie warstwy rozdzielającej Si pomiędzy wielowarstwami Co/Pt a nadprzewodnikiem powoduje, że pomiędzy tymi układami zachodzi tylko długozasięgowe elektromagnetyczne oddziaływanie momentów magnetycznych pochodzących od warstw ferromagnetyka a polem magnetycznym wytwarzanym poprzez sieć wirów.

Należy stwierdzić, że zagadnienie fizyczne jak i materiał badań został trafnie dobrany gdyż jak wspomniano wyżej zjawisko występujące w takich nanostrukturach jak i materiał je tworzący są w centrum zainteresowania wielu laboratoriów. Jednakże większość prac koncentruje się nad badaniami takich układów w których ferromagnetyk stosowany jest w formie sieci kropek ferromagnetycznych (bądź dziurek ang. antidot) o określonej symetrii i wymiarach. W tej rozprawie ferromagnetyk pokrywał całkowicie warstwę nadprzewodnika. Można się było zatem przy tym spodziewać trudności w interpretacji danych eksperymentalnych wynikających ze złożonej struktury domenowej wielowarstw Co/Pt.

Doktorant za pomocą pomiarów przy użyciu sond Halla oraz pomiarów namagnesowania przy użyciu magnetometru SQUID-owego jednoznacznie wykazał, że w heterostrukturach Co/Pt/Si/Nb, NbN/Si/Co/Pt i Co/Pt/Si/YBa₂Cu₃O₇ zachodzi magnetyczny mechanizm

kotwiczenia sieci wirów. Pomiary przy użyciu sond Halla prowadzono we współpracy z grupą Ecole Polytechnique z Paryża.

Doktorant wykazał umiejętność rozwiązywania trudnych doświadczalnie problemów eksperymentalnych związanych z techniką pomiarową oraz interpretacji wyników eksperymentalnych.

Rozprawa składa się z pięciu rozdziałów oraz podsumowania.

We wprowadzeniu Autor przedstawił cele pracy oraz układ rozprawy. Dwa pierwsze rozdziały stanowią krótki przegląd literaturowy o zjawisku nadprzewodnictwa z uwzględnieniem efektu MK i dynamiki sieci wirów oraz scharakteryzował główne parametry charakteryzujące magnetyczne wielowarstwy Co/Pt.

Rozdział 3 stanowi opis stosowanych technik pomiarowych. Autor rozprawy scharakteryzował metodę pomiaru rozkładu indukcji magnetycznej w heterostrukturach przy użyciu sond Halla. Ponadto przedstawił również zasadę działania mikroskopu sił magnetycznych użyty do określenia topologii struktury domenowej wielowarstw Co/Pt.

W rozdziale 4 doktorant dokonał charakteryzacji badanych próbek z uwzględnieniem własności magnetycznych wielowarstw Co/Pt. Przedstawione pomiary wskazują jak zależy pole koercji i kształt pętli histerezy od grubości warstw Pt oraz liczby powtórzeń w strukturze wielowarstwowej. Stopień magnetyzacji wielowarstw Co/Pt określony został przy pomocy parametru s . Z drugiej strony parametr ten jest pewną miarą porządku struktury domenowej tzn. określający ilość domen z momentem magnetycznym „do góry” do ilości domen z momentem magnetycznym „do dołu”. W rozdziale tym scharakteryzowana jest również procedura prowadzonych pomiarów.

W rozdziale tym na str. 46 zamieszczone jest stwierdzenie „Dla wielowarstw z małym N_{FM} i małym d uporządkowanie jest większe...”. Nie jest jasne co Autor miał na myśli czy odnosi się to do przestrzennego rozmieszczenia domen na powierzchni czy też innego rodzaju porządku.

W Rozdziale 5 doktorant przedstawił oryginalne wyniki własne. Autor rozprawy przeprowadził pomiary pętli histerezy przy użyciu sond Halla na próbkach Co/Pt/Si/Nb dla różnych długości modulacji warstw Co/Pt z różną grubością warstw Co. Pomiary te prowadzone były dla różnego stopnia magnetyzacji wielowarstw Co/Pt. Ponadto przeprowadzone były również pomiary rozkładu indukcji magnetycznej w heterostrukturach. Z przeprowadzonych pomiarów wynika, że rozkład ten jest nieliniowy i ma charakter schodkowy co świadczy o zmianie jego rozkładu wynikającego z pojawienia się w mierzonym obszarze temperatur i pola zewnętrznego dodatkowego mechanizmu kotwiczenia i nie przebiega tak jak wynika to z modelu Beana. Ilościowo efekt kotwiczenia zdefiniowany został jak wzrost szerokości pętli histerezy dla danego stanu magnetyzacji s znormalizowanym do szerokości pętli histerezy w stanie nasycenia. Przeprowadzone pomiary wskazują, że największy efekt wzmocnienia zaobserwowano dla próbki o grubości warstw Co w strukturze wielowarstwowej równej 0,6 nm. Dla tej próbki otrzymano ośmiokrotne wzmocnienie efektu kotwiczenia. Być może dla takiej konfiguracji domen magnetycznych ich rozkład jest zbliżony do kwasi-periodycznego co z kolei sprzyja pojawieniu się efektu dopasowania a to z kolei wywołuje znaczne wzmocnienie.

Przeprowadzony eksperyment wykazał zatem, że w wyniku zastosowania odpowiedniej procedury przemagnesowania można uzyskać optymalny rozkład domen który sprzyja magnetycznemu kotwiczeniu wirów.

Interpretacja wyniku pomiarów wskazuje, że największy efekt wzmocnienia występuje gdy domeny magnetyczne charakteryzują się podobną szerokością.

Analiza rozkładu pola magnetycznego wskazuje na istnienie obszarów w nadprzewodzących warstwach w których indukcja magnetyczna nie zależy od położenia. Według interpretacji Autora jest to wynikiem „tarasowego” wnikania pola magnetycznego do warstw. Takie zachowanie tłumaczy się obecnością domen resztkowych, które wytwarzane są poprzez odpowiednią procedurę przemagnesowania.

W tym miejscu nasuwa się pytanie- czy taki tarasowy profil może zależeć od szerokości domen i jaki wpływ na ten efekt ma ich przestrzenne uporządkowanie.

Analiza pętli histerezy przedstawiona na Rys. 5.15 wprowadza parametr H^* który określa wartość pola przyłożonego po którym wielkość indukcji w warstwie nadprzewodnika maleje.

Według Autora zmiana zależności $H^* \sim f(s)$ może wynikać z efektu dopasowania czyli współmierności sieci wirów ze strukturą domenową. Szkoda, że Doktorant nie wykonał pomiarów magneto-transportowych $R = f(B)$ tak jak to przeprowadzono na heterostrukturach z ferromagnetycznymi kropkami magnetycznymi dla potwierdzenia tej tezy. O ile rozkład domen byłby kwasi-periodyczny być może zachodzi również kotwiczenie kolektywne.

Z drugiej strony trudno jest sobie wyobrazić jak takie labiryntowe domeny zachowują przestrzenną symetrię.

Wiadomo, że ze strukturą domenową związane są ścianki domenowe.

Obecność ścian domenowych może również mieć wpływ na rozkład indukcji w warstwach Nb. Obecność ścian domenowych może powodować to, że energia kondensacji stanu nadprzewodzącego może być większa w obszarach pod ściankami domenowymi niż w obszarach pod domenami, to z kolei zapewne może wpływać przestrzenną zmianę energii kotwiczenia wirów. Budzi to pewien niedosyt, bowiem nie można wykluczyć wpływu ścian domenowych na efekt kotwiczenia sieci wirów.

Manipulacja domenami magnetycznymi może mieć również wpływ na rodzaj i ilość ścianek domenowych a to z kolei może wpływać na temperaturę krytyczną co przedstawiono na Rys. 4.12. Sądzę, że ten fakt wymaga bardziej wnikliwej dyskusji.

W końcowej części tego rozdziału Doktorant przedstawił pomiary pętli histerezy przeprowadzonych na heterostrukturach z NbN i $YBa_2Cu_3O_7$. W tych próbkach zaobserwowano dużo mniejszy efekt wzmocnienia. Stwierdzono, że dla próbek z NbN większe wzmocnienie obserwuje się w większych polach H a mniejszy efekt w małych polach. Również słabszy efekt wzmocnienia MK zaobserwowano w heterostrukturach z $YBa_2Cu_3O_7$. Podobny eksperyment (np. Appl. Phys. Lett. 82, 778(2003) z nieregularnym rozkładem domen magnetycznych z wykorzystaniem metody transportowej wykazał kilkukrotny wzrost prądu krytycznego.

Przedstawioną mi do recenzji rozprawę doktorską oceniam jako dobrą i ważną. Wyżej przedstawione komentarze i uwagi nie mają wpływu na moją dobrą ocenę merytoryczną recenzowanej rozprawy. Praca zawiera interesujące wyniki eksperymentalne, odkrywa nowe efekty i przedstawia ich interpretację, możliwą do przyjęcia na podstawie dostępnej wiedzy dostępnej w literaturze. Rozprawa napisana jest poprawnym językiem z zastosowaniem właściwej terminologii. Usterki terminologiczne są nieliczne np. w podpisie na Rys. 5.42 powinno byćza pomocą magnetometru SQUID-owego.....

Dlatego uważam z przekonaniem, że przedłożona rozprawa doktorska Mgra Zbigniewa Adamusa spełnia wymagania stawiane przez odnośne przepisy i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

P. Przytycki