

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ МЕТАЛОФІЗИКИ

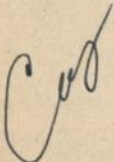
на правах рукопису

УДК: 537.312.62:548.4

СОЛОВІОВ В'ячеслав Федорович

АНІЗОТРОПНІ СТАТИКА І ДИНАМІКА МАГНІТНОГО ПОТОКУ В
МОНОКРИСТАЛІЧНОМУ $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$

Спеціальність 01.04.07 - фізика твердого тіла



АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ-1994

78 32.609



00754946 (Z)

Інституті металофізики НАН України

Дисертація є рукопис

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор

В.М. Пан

Офіційні опоненти:

доктор-фізико математичних наук Устінов А.І.

(Інститут металофізики НАНУ, м. Київ)

доктор-фізико математичних наук Пашицький Е.А.

(Інститут фізики НАНУ, м. Київ)

Провідна організація: Харківський державний університет

(м. Харків)

Захист дисертації відбудеться "12" листопада 1996 р. на засіданні Спеціалізованої ради Д 01.75.02 в Інституті металофізики НАН України за адресою 252142, Київ-142, пр. Вернадського 36, ІМФ.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Інституту металофізики НАН України за адресою: 252142, Київ-142, пр. Вернадського 36, ІМФ.

Відгуки на автореферат у двох примірниках, завірених печаткою установи, прохання надсилати за вищевказаною адресою.

Автореферат розісланий "5" грудня 1995 р.

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

Вчений секретар

Спеціалізованої ради КО16.37.01

доктор фізико-математичних наук

О.П. Федоров

AB-3200

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми:. Відкриття в 1986 році високотемпературної надпровідності (ВТНП) породило багато надій що до впровадження в недалекому майбутньому нових сполук у техніці високих потужностей при температурі рідкого азоту, що становило б великий економічний ефект порівняно із застосуванням традиційних "низькотемпературних" надпровідників (НТНП), які працюють при температурі рідкого гелію. Проте, через деякий час стало зрозуміло, що не достатньо лише високих значень верхнього критичного поля або критичної температури, для того, щоб ВТНП сполуки були конкурентоздатними з НТНП. Так, наприклад, рекордні значення густини критичного струму (J_0) дорівнюють 10^7 A/cm^2 для $V_3\text{Ga}$ в полі 5Т, для комерційного сплаву Nb_3Sn - 10^6 A/cm^2 . В порівнянні, найвищі показники для ВТНП сполук: 10^6 A/cm^2 в полі 1Т та температурі 77К для епітаксialних плівок $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) та 10^5 A/cm^2 для текстурованого YBCO при тих же умовах. Також покращилося розуміння фундаментальних обмежень на транспортні властивості ВТНП, а саме, квазидвовимірність флюксонової ґратки, мала кореляційна довжина, великі термічні флуктуації, тощо. Тому ретельне вивчення механізмів пінингу в ВТНП дозволить знайти відповіді на запитання: чи можливо наближення експериментального значення J_0 до його теоретичної межі?, чи можливо просування лінії незворотності в напрямку більших температур? Отримання відповідей на ці запитання має принести пряму практичну користь.

При вивченні фізичних властивостей вихорової ґратки (ВГ) в матеріалі YBCO особливе місце займають монокристали, бо на сьогоднішній день вони є найбільш довершеними та без-

дефектними зразками сполуки YBCO. В процесі дослідження монокристалів можливо провести ряд важливих експериментів: відділити пінінг на дефектах від ефектів, пов'язаних з кристалічною анізотропією; виявити вплив центрів пінінгу, які не ефективні в більш разупорядкованих об'єктах: епітаксіальних плівках та текстурах.

Реалізація таких експериментів нашоується на цілком практичні труднощі: монокристали, що вдається отримати на сьогодні, являють собою дрібні пластини, товщиною ~ 0.1 мкм, до того ж досить складно утворити низькоомний контакт з поверхнею кристала. Цим пояснюється той факт, що неперевірена більшість відомих експериментальних даних, що стосуються вивчення властивостей ВГ в монокристалах, отримано безконтактними методами. Повні транспортні вимірювання J_c монокристалів у широкому діапазоні значень температури та магнітного поля, які разом з дослідженнями анізотропних властивостей ВГ могли б суттєво доповнити існуючу уяву про механізми пінінгу та руху магнітного потоку в ВТНП, поки що зроблені не були.

Слід додати, що на сьогодні відома досить детальна інформація про поведінку сильно разупорядкованої ВГ, яка формується в плівках та текстурах, де має місце сильний пінінг. Тому відсутність паралельних даних для випадку довершеної ВГ, яка утворюється в монокристалах, ускладнює аналіз відомих результатів і призводить інколи до появи недостатньо обґрунтованих теорій та моделей.

Мета роботи полягала в комплексному дослідженні пінінгу та властивостей резистивного стану ВГ в монокристалічному YBCO з використанням транспортної методики вимірювань, розділенні динамічних та статичних ефектів в результатах експе-

риментів, вивченні структури об'єктів дослідження і на підставі цього- отримання інформації про вплив дефектів різних типів на пінинг ВГ в ВТНП YBCO.

Для досягнення поставленої мети було необхідно:

- отримати довершені монокристали YBCO розміром декілька міліметрів.
- розробити та практично реалізувати методика транспортних вимірювань малих зразків при високих значеннях густини електричного струму.
- вивчити дефектну структуру об'єктів дослідження.
- провести вимірювання кутових та польових залежностей критичного струму в зразках з високим змістом дефектів- текстурований YBCO та практично бездефектних- монокристалічний YBCO.
- проаналізувати механізми пінингу нерухокої ВГ у двох вищенаведених випадках.
- ґрунтуючись на апроксимаціях вольт-амперних характеристик дослідити динаміку ВГ
- розділити впливи дефектів різного типу: двійникових площин, дислокацій, кисневих вакансій на кутову та польову залежності густини критичного струму.

Наукова новизна. Впроваджена імпульсна методика вимірювання транспортних вольт-амперних характеристик, що дозволила вперше отримати польові та кутові залежності густини транспортного критичного струму монокристалів YBCO в діапазоні значень температури 77-90К та поля 0-2Т.

На основі отриманих даних, запропоновано модель пік-ефекту, що ґрунтується на припущенні про дисперсію модулю згину ВГ C_{44} при короткохвильових деформаціях в потенціалі

пінингу кисневих вакансій.

З'ясована роль двійникових площин, як дефектів що перешкоджають реалізації тривимірного пінингу при орієнтації поля в межах певного куту захоплення відносно до двійникової площини.

Запропоновано, альтернативну традиційним термоактиваційним теоріям, модель середнього поля. Застосування моделі дозволило установити вплив явищ релаксації на динаміку ВГ.

Розділено вклади в анізотропію J_c крапкових дефектів- кисневих вакансій, двовимірних- двійникових площин та одновимірних- дислокацій.

Доведено, що максимум критичного струму при орієнтації поля вздовж площини (ав) є наслідком дислокаційного пінингу, а не внутрішньою властивістю матеріалу YBCO.

Теоретична і практична цінність. Розроблена методика імпульсного вимірювання вольт-амперних характеристик має науковий і практичний інтерес як інструмент дослідження статистики та динаміки ВГ в монокристалічних зрезках ВТНІ сполук.

Отримані в ході виконання роботи дані свідчать про специфічний механізм пінингу ВГ в довершених монокристалах. Специфіка полягає у важливості урахування явищ інтерференції між різними центрами пінингу.

Виявлені закономірності між типом дефектів та величиною густини критичного струму стануть у нагоді при розробці надпровідних пристроїв підвищеної потужності, а саме, при пошуку оптимальної для ефективного пінингу дефектної структури матеріалу

Положення, що виносяться на захист:

1) Аномальний характер кутових залежностей J_c монокристалів

УВСО є наслідком інтерференції між різними механізмами пінінгу: на двовимірних дефектах (двійникових площинах) та крапкових (кисневих вакансіях).

- 2) Немонотонна поведінка польових залежностей J_0 , власне пік-ефект, пов'язана з пом'якшенням упругого модулю згину C_{44} , що призводить до зменшення кореляційного об'єму. Двійникові площини захоплюють вихори при орієнтації поля відносно осі с кристала в межах певного куту захвату, в наслідок чого підвищується модуль згину C_{44} та пригнічується пік-ефект.
- 3) Взаємодія ВГ із крапковим потенціалом пінінгу має динамічну природу і залежить від швидкості руху потоку. При високій швидкості руху потоку, коли час пінінгу стає меншим за час релаксації ВГ, крапкові дефекти не впливають на динаміку потоку.

Особистий внесок автора. Автором безпосередньо проводилися всі експериментальні вимірювання, їх обробка, формулювання висновків та оформлення наукових праць. Дисертація є узагальненням результатів експериментів, які були виконані автором особисто, або, в окремих випадках, в співпраці із рядом співробітників. В цих випадках співавторам не належать ідеї, що знайшли відображення в дисертації.

Апробація роботи. Основні результати та положення дисертації доповідалися та обговорювалися на конференціях: Third Soviet-German Bilateral Seminar on HTSC (Karlsruhe, 1990), Загальносоюзний семінар "Пінінг и резистивное состояние- ПИРС-91" (Чорноголовка, 1991г.), AIP Conference on Superconductivity and It's Applications (Buffalo, 1991), 6th International Workshop on Critical Currents- IWCC-91

(Cambridge 1991), 7th International Workshop on Critical Currents- IWCC-94 (Alpbach 1994), Applied Superconductivity Conference- ASC'94 (Boston 1994).

Публікації. За матеріалами дисертації надруковано 6 робіт у наукових журналах та збірках. Перелік публікацій наведено у кінці автореферату.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота викладена на 128 сторінках, містить 50 малюнків, складається з вступу, чотирьох розділів з короткими висновками, заключного розділу з висновками роботи, переліку цитованої літератури із 124 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дається загальна характеристика роботи, обґрунтовується актуальність обраної теми, визначається мета дослідження, викриваються практична і теоретична цінність роботи. Формулюються наукові положення, що виносяться на захист.

У першому розділі наведено огляд літературних джерел в галузі фізичних властивостей ВГ в ВТНП УВОО, дається розгорнутий аналіз останніх експериментальних та теоретичних результатів.

Розглянуто найбільш імовірні механізми пінінгу потоку в УВОО, а саме, пінінг на кисневих вакансіях, дислокаціях та дислокаційних петлях, двійникових площинах та "внутрішній" пінінг. Згідно з літературними даними, основним механізмом пінінгу в епітаксіальних плівках є дислокації, що утворюються на малокутових границях між ростовими блоками і ростові винтові дислокації. В текстурованих зразках УВОО виявлено кореляцію між густиною дислокацій, які генеруються

міжфазною межею I23-2II та густиною критичного струму, що означає подібний механізм дислокаційного пінінгу в цих об'єктах. У випадку монокристалів картина виявляється менш зв'язаною, перш за все, ситуація ускладнюється незвичайною поведінкою залежності критичного струму монокристалів від магнітного поля. Існує аномальний участок залежності $J_c(H)$, де критичний струм зростає як функція поля (так званий пік-ефект). Підкреслюється, що ефект значно змінюється при варіаціях кисневого дефіциту.

Динамічні явища в ВГ висвітлюються з позицій активізаційних теорій динаміки вихорового ансамблю, в яких рух ВГ представляється як сума перескоків зв'язок вихорів в наслідок термічної активації. Проаналізовано останні теорії, що описують динаміку ВГ в стані вихорового скла, Бозе-скла, вихорової рідини; модель колективного кріпу та варіації моделі Кіма-Андерсона.

Другий розділ присвячено опису методик вирощування кристалів YBCO, приготування зразків та вимірювань. Для вирощування кристалів було обрано метод спонтанної кристалізації із розплаву, що містив ~90% евтектики BaO-CuO та ~10% стехіометричного YBCO. Для проведення довгострокових ростових експериментів було створено установку, що дозволила підтримувати заданий температурний режим в межах 600-1100°C та змінювати температуру із швидкістю 100-0,1°C/год.

Для вимірювання критичних струмів було застосовано імпульсну методику. Використання імпульсів транспортного струму тривалістю 10мкс дозволило підняти амплітуду струму до 10А при амплітуді шумової напруги 0,2мкВ. Магнітне поле утворювалося електромагнетом із залізним ярмом, що мав змогу

обертатися навколо осі кристата. В подальшому, θ означає кут між зовнішнім магнітним полем та кристалографічною осью c зразка.

У третьому розділі викладаються результати експериментів по вимірюванню критичних струмів та властивостей резистивного стану монокристалічного YBCO. Монокристали було отримано описаним вище методом спонтанної кристалізації, типові параметри: $T_c = 88-90\text{K}$, $\Delta T_c = 0,3-0,1\text{K}$. Текстуrowані зразки YBCO було виготовлено методом зонної плавки. Для текстури $T_c = 91,5\text{K}$, $\Delta T_c = 0,3\text{K}$.

Дослідження дефектної структури зразків методом електронної мікроскопії виявило, що:

1) Текстури містили включення нормальної фази Y_2BaCuO_5 (2II). Міжфазна межа 2II-YBCO відіграє роль генератора дислокацій та дислокаційних петель, густина яких становила $10^8-10^9/\text{cm}^2$. В текстурах спостерігалася двійникова структура типу "твід" з періодом 100нм. Зразок мав невелику мозаїчність, роторієнтація між блоками не перевищувала 2° .

2) В монокристалах єдиними помітними дефектами були двійникові площини (ДП) з періодом 0,5-1мкм.

Концентрація кисневих вакансій, які є крапковими дефектами, знаходилася в відомого співвідношення параметра кристалічної ґратки c до індекса кисневого дефіциту δ . Параметр c визначався методом рентгенівської дифракції. Для монокристала типове значення $\delta \approx 0,13$, для текстури: $\delta \approx 0,04$.

Далі розділ поділено на дві частини. В першій частині розглядається статичні властивості, а саме, пінінг нерухомої ВГ. Для текстуrowаного YBCO дані порівнюються з результатами теорії дислокаційного пінінгу. При низьких значеннях кута θ

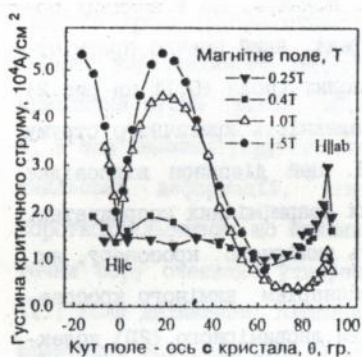


Рис.1. Кутові залежності густини критичного струму монокристалу YBCO, T=77,6К.

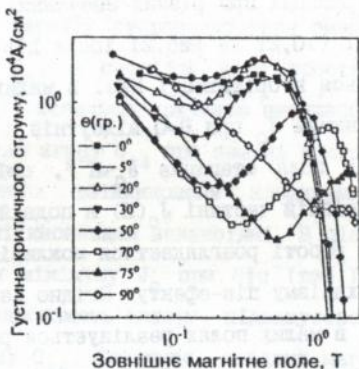


Рис.2. Польові залежності густини критичного струму монокристалу YBCO, T=83,2К.

теорією очікується апроксимація $J_c(\theta) \sim (\cos(\theta))^{1/2}$, що якісно узгоджується з експериментом. При наближенні вектора магнітного поля до площини (ab) J_c починає зростати, завдяки ефективній дії дислокаційних петель. Форма максимуму при $\theta > 70^\circ$, згідно з теорією, описується залежністю $J_c \sim (\cos(\theta))^{-\alpha}$, $\alpha = 1/2$. Дійсно, функція $J_c(\theta)$, побудована в координатах $\log(J_c) - \log(\cos(\theta))$ є пряма, в цьому діапазоні θ значення індексу $\alpha = 0,62$, що близько до теоретичного. Таким чином, в текстурованому YBCO домінуючими центрами пінингу є дислокації та дислокаційні петлі.

Зовсім інша ситуація зустрічається при дослідженні монокристалу YBCO (рис.1), зазначимо на найбільш суттєві відмінні. По-перше, спостерігається різкий мінімум J_c при орієнтації поля H||c. По-друге, значно меншу амплітуду має максимум J_c при H||ab, що свідчить про дислокаційну природу цього максимуму. Аналіз польових залежностей J_c (рис.2),

отриманих при різних значеннях θ , показує, що в великих полях ($>0,2T$ на рис.2) існує пік-ефект, який значно пригнічується в орієнтації $H \parallel c$. В малих полях (поля $<0,1T$ на рис.2) мінімум J_c при $\theta=0$ відсутній і залежність критичного струму від поля степенна $J_c \sim H^q$, $q \approx 1/2$. Цей діапазон відповідає лінійній частині $J_c(H)$ в подвійних логарифмічних координатах. В роботі розглядається можливість вимірного кросоверу, як механізму пік-ефекту. Згідно із сценарієм вимірного кросоверу в малих полях реалізується режим двовимірного (2D) колективного пінінгу. В 2D режимі продільний кореляційний радіус L_c більше товщини зразка d . Згідно з теорією 2D колективного пінінгу $J_c \sim H^{-1/2}$, що узгоджується з експериментом. Проте, кількісний розрахунок показує, що лише 2D пінінг на крапкових дефектах потребує занадто високої разупорядкованості ВГ (малої величини радіусу R_c). Цей факт пов'язується з тим, що критичний струм J_c складається з двох частин: $J_c^{2D} + J_c^{OD}$. J_c^{2D} - частина J_c , пов'язана з пінінгом на двовимірних дефектах - двійникових площинах і тому не залежить від разупорядкованості ВГ. J_c^{OD} - вклад нольмірних дефектів (кисневих вакансій), що розраховується згідно з теорією колективного пінінгу. Елементарна теорія дає $J_c^{2D} \sim H^{-1/2}$, таким чином в 2D режимі J_c^{2D} і J_c^{OD} якісно ідентичні, тому виконання повного значення J_c замість J_c^{OD} знижує R_c . Робиться висновок, що в малих полях в монокристалі пінінг відбувається за рахунок двійникових площин та 2D пінінгу на кисневих вакансіях. Через те, що присутність двовимірних дефектів не впливає на 2D пінінг крапкових центрів, крива $J_c(\theta)$ не має в малих полях мінімуму при $H \parallel c$ (рис.1, $0,25T$).

При підвищенні поля відбувається перехід до більш ефек-

тивного тривимірного пінінгу. Перехід супроводжується зменшенням кореляційного радіусу L_c , в наслідок чого зростає критичний струм (рис.2, $>0,2T$). Фізичною причиною зменшення L_c є пом'якшення пружного модулю згину C_{44} при заміні довгохвильових деформацій, утворених двійниковими площинами, короткохвильовими, що викликані кисневими вакансіями. З цієї точки зору очевидне утворення мінімуму J_c при $H \parallel c$ (рис.1, IT). Коли двійникові площини захоплюють вихори, підвищується ефективне значення модулю згину C_{44} . Фактично, завдяки магнітній взаємодії, захоплені вихори поширюють 2D стан ВГ на весь об'єм кристалу. У цьому стані велике значення C_{44} перешкоджає реалізації ефективного 3D пінінгу на крапкових дефектах, в той самий час, адвиговий модуль C_{66} не змінюється, тому критичний струм падає. Це явище можливо лише якщо кореляційний радіус R_c більше за період двійникових доменів, тому мінімум зникає при високих температурах та полях (при зростанні розупорядкованості), та не спостерігається в зразках з високим змістом сильних центрів пінінгу: півках та текстурях. В роботі також зазначається, що оскільки цей ефект є наслідком інтерференції між крапковими та двовимірними центрами пінінгу, його знак залежить від співвідношення J_c^{OD} до J_c^{2D} . При достатньо високій концентрації вакансій, як у даному випадку, $J_c^{OD} > J_c^{2D}$ (тут J_c^{OD} відповідає 3D режиму пінінгу), при переході в 3D режим з'являється мінімум на залежності $J_c(\theta)$ при $\theta=0$. Але в майже стехіометричних зразках пінінг на вакансіях не здатний перевершити двійниковий, тому при $H \parallel c$ завжди має спостерігатися максимум при всіх значеннях поля.

В другій частині розділу розглядається динамічний ас-

пект проблеми: аналізується форма вольт-амперних характеристик (ВАХ). За мету ставилось підтвердження припущень, що до механізму пік-ефекту, висунутих у попередній, "статичній", частині розділу.

ВАХ апроксимувалися залежністю: $V \sim \exp(-U/U_0)$ де U - активаційна енергія, V - напруга. Згідно з теоріями колективного кригу, вихорового скла та Бозе-скла $U \sim I/j^H$. У випадку текстурованих зразків апроксимації дають результат, відомий для плівок: спостерігається скейлінг польових та температурних залежостей μ , якщо їх побудувати від середнього значення транспортного струму. Цей факт пояснюється кросовером між розміром домена Ларкіна-Овчиннікова та радіусом вихорової петлі, що термічно активується. У випадку монокристалів індекс μ сильно залежить від поля та температури і досягає великих значень (4-10) у інтервалі полів, де проявляється пік-ефект. Зростання μ супроводжується зменшенням точності апроксимації. Кутові залежності μ монокристалу свідчать про те, що активаційні теорії згоджуються з експериментом лише для орієнтації $H \parallel c$, де $\mu \approx 1$. Захват двійниками призводить до реалізації сценарія Бозе-стекла, де розглядається режим "корельованої" разупорядкованості вихорової системи та дається значення $\mu=1$, що підтвержує роль двійникових площин в цій орієнтації. Для проміжних орієнтацій, $20^\circ < \theta < 70^\circ$, коли ефективно діють крапкові центри пінінгу, активаційні теорії неадекватно відбивають реальну динаміку ВГ в довершених кристалах, принаймні, при рівні дисіпації $> 10 \text{ мкВ/см}$.

Тому в роботі розглядається альтернативна до активаційних теорій, класична модель середнього поля, яка на думку автора більш ефективна при аналізі поведінки ВГ в

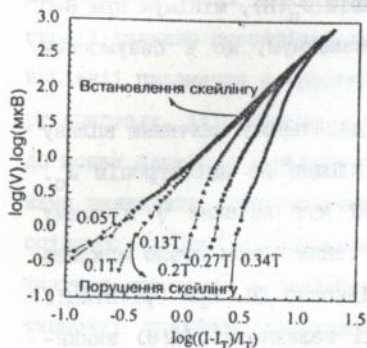


Рис.3. Скейлінг ВАХ монкри-сталу YBCO згідно з теорією середнього поля, $T=83,2\text{K}$.

монокристалах YBCO в режимі "швидкого" руху потоку. Швидкий рух потоку тут означає рівень дисіпації, що типowo реєструється в транспортних експериментах - $\sim 10^3 - 10^{-1} \text{ мкВ/см}$. Згідно з теорією середнього поля: $V \sim (1 - I/I_T)^\zeta$ де I_T - пороговий струм, ζ - індекс, який у випадку слабкого монотонного

потенціалу дорівнює $3/2$. Виявляється, що має місце скейлінг ВАХ, який передбачається теорією, для

діапазона малих полів (рис.3, $0,05 - 0,1\text{T}$). В полях, де спостерігається зростання J_c ($> 0,13\text{T}$) скейлінг порушується. Це пов'язано з тим, що пік ефект є наслідком взаємодії ВГ з крапковими дефектами - кисневими вакансіями, які мають досить малий розмір: $0,3\text{нм}$. При достатній швидкості ВГ, час пінінгу, тобто час, що вихор проходить над потенційною ямою дефекта: $t_{PIN} = d/v$ (тут d - розмір дефекта, v - швидкість потоку), стає співмірним з часом релаксації ВГ t_{REL} . Тому, коли $t_{PIN} \ll t_{REL}$ ВГ не відчуває впливу крапкових дефектів і скейлінг відновлюється. Це явище відображене на рис.3. З вищеведеного можна зробити ще один висновок: польові та кутові залежності J_c залежать від критерія по напрузі електричного поля E_c . При великій швидкості потоку (великій напрузі), пінінг на кисневих вакансіях "вимикається" і залишається вклад двійникових площин та кристалічної анізотропії. Це дійсно

спостерігалось в експерименті. При зростанні E_C зникає аномальний зростаючий відрізок на кривій $J_C(H)$, мінімум при $\theta=0$ функції $J_C(\theta)$ перетворюється на максимум, що є безумовним свідченням двійникового пінінгу.

Четвертий розділ присвячено детальному вивченню впливу кисневих вакансій та двійникових площин на анізотропію J_C . Для цього було введено додатковий кут качання γ в схему вимірювання кутової залежності J_C . Таким чином стало можливо точно орієнтувати магнітне поле відносно ДП. При орієнтації поля вздовж ДП ($\gamma=45^\circ$) особливості залежності $J_C(\theta)$ зникають, змінюючись майже ізотропним фоном, при $\gamma=-45^\circ$ ($H \perp$ ДП) крива $J_C(\theta)$ практично не змінюється. Цей результат підтверджує роль ДП як дефектів, що пригнічують пінінг на кисневих вакансіях. При аналізі вкладу ізотропних дефектів (кисневих вакансій) показано, що сила пінінгу $F_p = J_C \cdot B$ підчиняється двовимірному скейлінгу. Це означає, що $F_p^1(H, \theta) = F_p(H \cos(\theta))$ (має значення лише компонента поля вздовж осі c кристала). В той же час, це рівняння не справедливе для функції $J_C(H, \theta)$. Цей факт відносить пінінг у сполучі YBCO до сильно анізотропного тривимірного випадку (принаймні у дослідженому інтервалі температур та полів), а також свідчить про ізотропний характер центрів пінінгу, що ефективні у високих полях. Апроксимація польових залежностей F_p законом Крамера $F_p \sim (B/B_{C2}(\theta))^p (1 - B/B_{C2}(\theta))^q$ дозволила визначити індекс $p \approx q \approx 2$, та використовуючи результат анізотропної теорії Гінзбурга-Ландау для кутової залежності B_{C2} , знайти аналітичне відображення вкладу крапкових дефектів в анізотропію J_C .

Монокристалічні об'єкти з підвищеною густиною дислока-

цій було отримано при забрудненні розплаву 1-2% алкмінію. Дослідження таких монокристалів методами електронної мікроскопії виявило специфічну дефектну структуру, що є наслідком варіації параметра с кристалічної ґратки в межах певного шару кристалу. Азимутальна розорієнтація між шарами призводить до появи блоків з середнім розміром 100-200нм. Межі між блоками виявилися генераторами діслокацій, густину яких було оцінено: $10^9/\text{см}^2$. Порівняння транспортних властивостей дефектних кристалів з бездефектними свідчить на користь ефективності подібної дефектної структури як джерела пінінгу потоку.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Вперше проведено комплексні вимірювання кутових та польових залежностей транспортного критичного струму в монокристалічних зразках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.
2. Пінінг магнітного потоку в довершених монокристалах YBCO здійснюється крапковими дефектами: кисневими вакансіями та двовимірними: двійниковими площинами.
3. Аномальний вигляд кутових та польових залежностей густини критичного струму монокристалів є наслідком переходу до більш ефективного тривимірного пінінгу на крапкових дефектах при підвищенні поля, що пов'язано з дисперсією упругого модулю згину C_{44} .
4. В'ясовано, що двійникові площини, захоплюючи вихори, пригнічують утворення тривимірного стану ВГ , що призводить до зниження критичного струму при орієнтації поля в межах певного куту захвату відносно до двійникової площини.
5. Застосовано новий підхід до аналізу динаміки ВГ , завдяки чому виявлено вплив явищ релаксації на механізми руху потоку

в монокристалічному YBCO.

6. Знайдено кореляцію між величиною густини критичного струму та змістом дислокацій в монокристалах YBCO.

Основні результати дисертації викладено в роботах:

- 1 Пан В.М., Солов'єв В.Ф., Таборов В.Ф., Анизотропія поперечної залежності транспортного критичного току в монокристалах YBCO, СФХТ, 1992, т.5, №3, С.483-485.
- 2 Pan V.M., Svetchnikov V.L., Solovjov V.F., Taborov V.F., Zandbergen H.W., Wen J.G., YBCO single crystals microstructure related to critical current density, Supercond. Sci. Technol., 1992, vol.5, P.707-711.
- 3 Pan V.M., Solovjov V.F., Taborov V.F., Direct measurements of transport critical current and resistive state parameters in YBCO single crystals, Supercond. Sci. Technol., 1992, vol.5, P.192-195.
- 4 Солов'єв В.Ф., Таборов В.Ф., Нові дані про багатоступенчасту температурну залежність опору в монокристалах YBCO, СФХТ, 1991, т.4, №9, С.1725-1727.
- 5 Solovjov V.F., Pan V.M., Freyhardt H.C., Transport critical currents in single-crystalline and melt-textured $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$: a comparative study, Proc. of 7th International Workshop on Critical Currents, Alpbach, January 1994, P.435-438.
- 6 Pan V.M., Kasatkin A.L., Kuznetsov M.A., Flis V.S., Taborov V.F., Solovjov V.F., Svetchnikov V.L., Structure and transport properties of YBCO thin films and single crystals, Proc. of AIP Conference on Superconductivity and Its Applications, Buffalo, June 1991, P.603-614.

Соловьев В.Ф. Анизотропные статика и динамика магнитного потока в монокристаллическом $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07- физика твердого тела, Ин-т металлофизики НАН Украины, Киев, 1994.

Защищается 6 научных работ, содержащих экспериментальное исследование пиннинга магнитного потока и свойств резистивного состояния в монокристаллическом сверхпроводнике $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. Установлено, что аномальный характер полевых и ориентационных зависимостей плотности критического тока монокристаллов $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ суть следствие интерференции между точечными (кислородные вакансии) и двумерными (двойниковые плоскости) центрами пиннинга.

Ключові слова:

надпровідність, пінинг, монокристал $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

ДНБ ім. В. Стефанива
АН України

Solovjov V.F. Anisotropic statics and dynamics of magnetic flux in single-crystalline $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$.

Thesis applied for a degree of Candidate of Science in the specialized field of solid state physics, Institute for Metal Physics Nat. Acad. of Sci. of Ukraine, Kiev, 1994.

Six scientific papers are defended. The publications contain results of an experimental study of magnetic flux pinning and resistive state properties in single-crystalline superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$. It was shown, that anomalous field and angle dependencies of critical current in $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ are the consequence of interference between extended (twin planes) and point (O vacancies) pinning sites.

Підписано до друку 15.12.94р формат 60x84/16

Папір друк. Умов. друк. л. 1,0. Тираж 100 примірник. Заказ МІ875
Надруковано ЦУОП ДНПІ "Плодвінконсерв" м. Київ, Саксаганського, 1

453153

AB 32.609