

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК України  
Фізико-технічний інститут низьких температур  
ім. Б.І. Веркіна

На правах рукопису

**Величко Антон Васильович**

ВИСОКОЧАСТОТНИЙ ВІДГУК НА МІЛІМЕТРОВЕ  
ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА НЕЛІНІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ  
НАДПРОВІДНИКІВ СКЛАДУ  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$

01. 04. 22 — надпровідність

**А в т о р е ф е р а т**  
дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків — 1996 р.

Дисертація є рукопис.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки Національної Академії наук України, м. Харків

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук  
Черпак Микола Тимофійович.

Офіційні опоненти: доктор фіз.- мат. наук, професор  
Дмитрієв Віталій Михайлович,  
кандидат фіз. - мат. наук, доцент  
Фалько Ігор Іванович.

Провідна організація: Харківський державний університет

Захист відбудеться " 15 " жовтня 1996р. о 15 годині на засіданні Спеціалізованої вченої Ради К. 02. 35. 03 при Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України ( 310164, м. Харків, пр. Леніна, 47 ).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці ФТІНТ НАН України, м. Харків, пр. Леніна, 47

Автореферат розіслано " \_\_\_\_ " липень 1996р.

Учений секретар  
Спеціалізованої вченої Ради  
доктор фізико-математичних наук Сиркін Є.С.

*Сиркін*

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00752221 (J)

**Актуальність теми.** Зараз, коли минуло вже 10 років з часу відкриття високотемпературних надпровідників (ВТНП), досягнуто значного прогресу як в розумінні фізичних властивостей нових надпровідників (НП), так і в їх використанні для прикладних цілей. Величезний шквал експериментальних і теоретичних робіт у галузі ВТНП, який зворушив і продовжує вражати науковий світ, був викликаний невідомим інтересом до тих фізичних перспектив, що обіцяє застосування цих матеріалів в різноманітних галузях сильнострумної техніки, а також мікроелектроніки. Це і лінії електропередач без втрат, і найпотужніші НП магніти, що можуть використовуватися для термоядерного синтезу, і пасивні мікрохвильові (МХ) планарні схеми з рекордно низьким рівнем втрат, і надвисокочутливі датчики сталого магнітного поля (СКВІДи), і детектори електромагнітного випромінювання (ЕМВ), і елементи пам'яті для надпровідникових суперкомп'ютерів. Одним словом за ВТНП – майбутнє майже всіх електронних приладів.

Незважаючи на такі райдужні перспективи на сьогодні мається ще цілий ряд невирішених проблем: відсутня точна мікроскопічна теорія ВТНП; остаточно не з'ясовані механізми спарювання ( $d$ - або  $s$ -wave), немає повного розуміння особливостей змішаного стану ВТНП (як взаємодіють між собою вихори, яка природа сили пінінгу, як рухаються вихори при протіканні струму по зразку); не є зрозумілим механізм НП, тобто НП викликана фононами, чи зарядовими або спіновими флуктуаціями (кореляціями з зарядовими збудженнями); вивчення нелінійних властивостей нових НП знаходиться майже в "зачатковому" стані; відсутні точна і взаємозв'язана картина відгуку НП на ЕМВ з частотою нижче частоти енергетичної щільності. Цей ряд можна було б значно продовжити, але головний висновок такий - це необхідність подальшого ретельного вивчення, як експериментального так і теоретичного, недосліджених аспектів ВТНП для формування цілісного розуміння природи НП в цих матеріалах і втілення всіх переваг ВТНП в життя.

Звертаючись до застосування ВТНП в мікроелектроніці, треба зазначити, що вже зараз не викликає сумнівів значна перевага пасивних НП приладів (ліній передач, фільтрів, резонаторів) у порівнянні з аналогічними металевими. Досить сказати, що поверхневий опір  $R_s$  найкращих на сьогодні ВТНП плівок на частотах 10 ГГц більш ніж на 2 порядки менший, ніж  $R_s$  безкислородної міді. Такий

низький рівень МХ втрат в нових НП уже зараз дозволяє створювати гібридні мікроелектронні прилади з пасивними елементами із ВТНП і активними із напівпровідників. Стосовно створення активних приладів (підсилювачі, змішувачі, детектори) на основі ВТНП можна сказати, що на сьогодні відношення до цього надто скептичне. Це пов'язано перш за все з тим, що створення активних елементів в основному спирається на круту нелінійність джозефсонівських переходів (ДП), виготовлення яких з ВТНП зтикається зі значними технологічними труднощами, пов'язаними з малою довжиною когерентності  $\xi$ , властивою ВТНП. Проте зовсім недавно зроблено успішні спроби по створенню ВТНП перемикачів, змішувачів та детекторів з характеристиками, які не поступаються, а інколи навіть переважають параметри аналогічних напівпровідникових приладів (див. огляд [1] і літературу, що цитується в ньому).

**Мета роботи.** На жаль, нині, незважаючи на ряд експериментальних [2,3,4] і теоретичних [5,6,7] робіт, відсутня цілісна взаємозв'язана картина нелінійних процесів ВТНП. Метою даної експериментальної роботи є вивчення механізмів радіочастотного (РЧ) відгуку та нелінійних мікрохвильових властивостей НП складу  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  на міліметрове випромінювання. Для цього вирішувалися наступні задачі: 1) досліджувалася температурна залежність РЧ та МХ відгуків  $YBaCuO$  НП на мм випромінювання; 2) вивчалася часова релаксація РЧ та МХ поверхневих опорів керамік та тонких плівок після вмикання та вимикання мм випромінювання (накачки); 3) проводилося вимірювання магнітопольових залежностей РЧ та МХ поверхневих опорів в слабких магнітних полях (до 150 Е); 4) досліджувалася залежність РЧ та МХ відгуків від амплітуди мм випромінювання, а також проводилося порівнювання з відомими на сьогодні теоріями.

**Наукова новизна.** В даній роботі вивчено природу РЧ відгуку на мм випромінювання і фізичні механізми нелінійних властивостей  $YBaCuO$  НП. Виявлено змішаний характер РЧ відгуку, що включає поряд з тепловою помітну неболометричну складову. Показано логарифмічну динаміку у часі як РЧ, так і МХ відгуків після вимикання та вмикання мм випромінювання. Продемонстровано хорошу узгодженість експериментальних магнітопольових залежностей РЧ та МХ  $R_s$  з теоретичними моделями слабкозв'язаних гранул (СЗГ) та руху джозефсонівських (Д) вихорів в міжгранульному се-

редовищі. Нарешті, визначено 3 типа характерної залежності  $MX$ ,  $R_s$  та  $PЧ$  відгуку від амплітуди поля мм випромінювання залежно від якості зразка і зовнішніх умов (температури та магнітного поля).

**Достовірність і обґрунтованість** одержаних в роботі результатів підтверджується збігом теоретичних моделей, що використовувалися, з відповідними експериментальними даними, а також з результатами дослідження інших авторів, які працюють в даній області.

**Практична цінність.** В роботі визначені основні характеристики нетеплових процесів, що стимулюються в ВТНП мм випромінюванням. Одержані дані можуть бути використані при розробці та конструюванні високочутливих і швидкодіючих неبولометричних детекторів у мм діапазоні довжин хвиль, а також для визначення динамічного діапазону пасивних  $MX$  приладів на основі ВТНП.

**Реалізація дослідження.** Деякі результати дисертації покладено в основу заявки на винахід надпровідникового болометра з  $MX$  зміщенням, на яку одержано позитивне рішення №908120/09/010854 з пріоритетом від 5.01. 91.

### Основні положення, що підлягають захисту.

1. Вперше досліджено безконтактним методом  $PЧ$  відгук ВТНП складу  $YBaCuO$  на мм випромінювання. Показано комплексну природу  $PЧ$  відгуку, що включає поряд з тепловою значну неبولометричну компоненту. З'ясовано, що з поліпшенням якості зразка (зменшенням ширини переходу  $\Delta T$ , зниженням  $R_s$ , поліпшенням орієнтованості) максимума на температурній залежності болометричного і неبولометричного відгуків зближуються та загострюються.
2. Виявлено кореляцію в поведінці  $MX$  та  $PЧ$  відгуків в залежності від амплітуди  $H_0$  поля випромінювання. Це підтверджує визначальний вплив випромінювання накачки, а не параметрів зондуючого сигналу, на механізм височастотного ( $BЧ$ ) відгуку ВТНП. Даний висновок має важливе значення для застосування ВТНП у вигляді неبولометричних детекторів мм випромінювання з  $BЧ$  зміщенням.
3. Вивчено часову динаміку  $PЧ$  та  $MX$  відгуків при вмиканні та вимиканні мм випромінювання. Показано, що в обох випадках

після затримки в декілька секунд змінювання відгуку у часі для більшості досліджених зразків добре описується логарифмічним законом, що указує на причетність крипа магнітного потоку до механізму високочастотного відгуку ВТНП.

- 4 . Виявлено, що для сильнодефектних зразків амплітудна залежність МХ поверхневого опору добре описується теорією Хальбріттера про рух джозефсонівських (Д) вихорів в слабких зв'язках, тоді як для зразків хорошої якості — моделями Свідхара та Гуревича, які приписують основну причину нелінійності індукованому струмом критичному стану та осциляції абрикосовсько-джозефсонівських (АД) вихорів в контактах з високою густиною критичного струму  $J_c$ .
- 5 . На підставі одержаних температурних, часових та амплітудних залежностей РЧ і МХ відгуків можна зробити висновок про те, що їх механізм пов'язано з зародженням та рухом під дією мм випромінювання Д- або АД-вихорів в міжгранульних або внутрішньогранульних СЗ.

**Апробація роботи.** Результати даної дисертаційної роботи доповідалися на наступних конференціях : Міжнародна конференція з високотемпературної надпровідності та локалізаційних явищ ( Москва, 1991 ); III Всесоюзній нараді по ВТНП ( Харків, 1991); I Всеукраїнському симпозиумі з мм та субмм хвиль (Харків, 1991 ); I міжнародному симпозиумі " Фізика і техніка мм та субмм хвиль " ( Харків, 1994 ); на міжнародній школі-семінарі " Фізика твердого тіла : теорія і застосування" ( Ужгород, 1994 ); міжнародній конференції з прикладної надпровідності ASC'94 ( Бостон, Массачусеттс, 1994 ); міжнародній конференції "Надпровідність : фізичні аспекти" (Харків, 1995 ); на II міжнародній конференції " Матеріалознавство ВТНП " ( Харків, 1995 ); на VIII 3-х сторонньому українсько-російсько-німецькому семінарі з ВТНП (Львів, 1995); 187 конференції Електротехнічного Товариства ( Рено, Хілтон, Невада, 1995).

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковано в 11 наукових роботах, список яких приведено в кінці автореферату.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з вступу, шести глав, висновку і списку цитованої літератури, що включає 163 найменування. Вона містить 74 рисунка і 7 таблиць. Загальний обсяг дисертації — 193 сторінки.

### Зміст роботи.

У вступі стисло обговорюється об'єкт дослідження, обгрунтовується актуальність обраної теми, визначаються мета та завдання проведених досліджень, описується структура дисертації. Формулюються основні положення, що підлягають захисту. Приводиться список наукових конференцій та симпозіумів, на яких доповідалися основні результати даної дисертації.

В першій главі описано механізми відгуку ВТНП на ЕМВ, а також традиційні способи реєстрації відгуку. Показуються переваги ВЧ реєстрації відгуку, вперше застосованої в даній роботі, в порівнянні з вимірюваннями на сталому струмі. Дається визначення основних характеристик детекторів випромінювання ( потужність, еквівалентна шумові ( NEP ) , вольт-ватна чутливість  $s$ , детектуюча спроможність  $A$  та час відгуку  $\tau$  ) і описуються експерименти по вивченню відгуку. Далі приводиться систематизація і класифікація механізмів відгуку, згідно з якою відгук ділиться на болометричний та неболометричний, а кожна з цих двох категорій в свою чергу ділиться на підгрупи згідно з фізичними процесами, що лежать в їх основі. Неболометричні механізми поділяються на внутрішньо властиві (нерівноважне руйнування куперівських пар, розпад пар вихор-антивихор, індукований випромінюванням кріп/течія абрикосовських вихорів, просковзування фази на міжплощинних СЗ) і зовнішні (просковзування фази на дефектах, перколяційний механізм, зворотний ефект Джозефсона, кріп/течія потоку всередині міжгранульних СЗ). Докладно розглядається кожний із механізмів.

В другій главі описується експериментальна установка і обладнання, що використовувалися для вимірювання. Приводиться блок-схема установки, пояснюється призначення її елементів, описується методика охолодження та вимірювання. Підкреслюється, що вимірювання відгуку проводяться одночасно в 2-х частотних діапазонах : в РЧ діапазоні за допомогою накладної котушки індуктивності, включеної в резонансний контур, і в МХ діапазоні - за допомогою квазіоптичного діелектричного резонатора ( КДР) із лейкосапфіра  $Al_2O_3$  або алюміната лантана  $LaAlO_3$ . Описується методика індукційних вимірів РЧ втрат в НП за допомогою вимірника добротності, а також оригінальне схемотехнічне рішення, що дозволило позбавитися від паразитної реактивності з'єднуючих коаксіальних кабелів, і тим самим значно підвищити чутливість вимірів. Показується, що задача дослідження РЧ та МХ відгуків на мм ви-

промінювання зводиться, по суті, до вимірювання РЧ поглинання та МХ поверхневого імпеданса  $Z_s$  на відповідній частоті. Приводяться основи вимірювання  $Z_s$  НП на МХ, даються формули, що зв'язують добротність і частоту збуденого резонатора з дійсною  $R_s$  та уявною  $X_s$  частинами  $Z_s$  зразка. Одержано вираз для мінімально вимірного  $R_s$  залежно від добротності та коефіцієнту збудення  $a$  резонатора. Описуються основні характеристики дискових КДР: збуджувані типи хвиль, розподіл компонент поля для деяких типів коливань, частотний спектр резонатора. Аналізується вклад окремих компонент (добротності зв'язку і радіаційної добротності) в вираз для добротності КДР зі зразком. Показується, що при збуденні КДР металевим (мідним) диском з діаметром, який трохи перевищує діаметр резонатора, радіаційні втрати майже відсутні та не залежать від діаметру зразка. Показано також, що при дуже великому збуденні, коли зразок знаходиться на відстані  $\simeq 0.14-0.2$  мм від КДР, залежність збуденої добротності резонатора від відстані до зразка стає немонотонною, можливо через взаємодію різних типів коливань КДР. Робиться висновок про те, що проведення коректних вимірів  $Z_s$  можливе лише для відстаней зразка від резонатора більших, ніж 0.2 мм.

**В третій главі** приводяться і аналізуються результати температурних вимірів  $R_s$  і відгуку, проведених на 6 зразках (2-х кераміках та 4-х плівках) складу  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . Показується, що максимум температурної залежності РЧ та МХ відгуків для всіх без винятку зразків зміщено в сторону більш низьких температур по відношенню до максимуму похідної  $dR/dT$ , яка описує чисто болометричний відгук. Це є доказом присутності нетеплової компоненти у відгуці, що спостерігається. З'ясовано також, що з поліпшенням якості зразка (зменшенням ширини п'єреходу  $\Delta T$ , зниженням  $R_s$ ) максимумами відгуку та  $dR/dT$  зближуються і загострюються.

Хороше якісне узгодження магнітопольової залежності РЧ  $R_s$  в слабких магнітних полях до 150 Е з моделлю СЗГ [8] і теорією Хальбріттера [7], що описується **в четвертій главі**, свідчить про визначальну роль СЗ в дисипації ВЧ енергії в досліджуваних зразках ВТНП.

**В п'ятій главі** показується, що після вмикання мм накачки відгук з'являється з затримкою в декілька десятків секунд. Виявлено також, що в низькотемпературному інтервалі (на 3-10 К нижче кри-

тичної температури  $T_c$ ) релаксація РЧ та МХ відгуків підлягає логарифмічному закону, що разом зі значною затримкою в появі відгуку є незаперечним доказом причетності кріпа магнітного потоку, створеного мм випромінюванням, до механізму високочастотного (ВЧ) відгуку.

**В главі шостій** приводиться огляд основних теорій нелінійних властивостей ВТНП. Модель ліній передач Портіса [9] приписує основну причину нелінійності екрануючій спроможності гранул, що запирають магнітний потік всередині СЗ. Приводиться вираз для залежності  $Z_s$  від амплітуди  $H_\omega$  МХ поля. Теорія Хальбріттера [7] описує вплив руху Д-вихорів всередині СЗ на поверхневий імпеданс ВТНП. Згідно з цією теорією слідом за мейсснерівським станом з квадратичною залежністю  $R_s$  і глибини проникання  $\lambda$  від  $H_\omega$ , настає лінійна ділянка, що властива для режиму пінінга вихорів і, нарешті, насичення, обумовлене течією потоку в СЗ. Модель СЗГ, узагальнена на нелінійний випадок Нгуїеном та ін. [2], зв'язує основну причину нелінійності з руйнуванням куперівських пар сильним МХ струмом і, як наслідок, квадратичну залежність обох компонент  $Z_s$  від  $H_\omega$ , характерну для мейсснерівського стану СЗ. Модель індукованого струмом критичного стану, що запропонована Свідхаром [5], описує амплітудну залежність  $Z_s$  для НП циліндричної та полоскової геометрії в рамках моделі Біна. Результатом моделі для полоскової геометрії, що найбільш адекватна для опису нелінійних властивостей тонких плівок в паралельному МХ магнітному полі, є залежність  $R_s$  від  $H_\omega$  виду  $R_s = aH_\omega^2 + bH_\omega^4 + O(H_\omega^6)$ . Розвинена недавно нелокальна електродинаміка Д-контактів з високою  $J_c$  [7] передбачає, що потужність втрат  $Q$  при осциляційному русі абрикосовського вихора з джозефсонівської серцевиною (АД-вихора) під дією змінного струму амплітуди  $I_\omega$  описується виразом  $Q = Q_0[K(\beta^2) + E(\beta^2)]$ , де  $Q_0$  - константа,  $\beta = I_\omega/I_c$ ,  $I_c$  — критичний струм. Нарешті, нелінійна електродинаміка НП II-роду в змішаному стані, що була розвинена Коффі [10], дає вираз для вектору магнітної індукції всередині НП в залежності від сталого  $H$  та амплітуди  $H_\omega$  змінного полів з частотою  $f < \Delta/h$ , з якого, використовуючи рівняння Максвелла, можна оцінити амплітудну залежність  $J \cdot E$ -втрат, що узагальнюють поняття поверхневого імпеданса на нелінійний випадок.

Показано, що по амплітудній залежності МХ  $R_s$  та РЧ відгуку всі

зразки можна умовно поділити на 3 групи. Для першої групи (зразки K1, ТП1) характерна наявність початкової ділянки  $\sim H_\omega^2$ , після цього – лінійної по  $H_\omega$  ділянки з завершальним виходом  $R_s(H_\omega)$  на насичення. Така поведінка адекватно описується в рамках теорії руху Д-вихорів в СЗ, розвиненої Хальбріттером. Вона також якісно узгоджується з завбаченням моделі ліній передач Портіса, але кількісний аналіз в даному випадку не проводився, зважаючи на помилку, допущену Портісом [9] в кінцевому виразі для амплітудної залежності  $Z_s$ . Зазначимо, що зразки першої групи мають найгірші надпровідникові властивості серед усіх зразків. До другої групи зразків відносяться зразки ТП3 та K2, для яких залежності  $R_s^{msw}(H_\omega)$  і  $\Delta R_s^{rf}(H_\omega)$  добре описуються моделлю індукованого струмом критичного стану, що розвинена Свідхаром. У той же час рівноцінне наближення можна одержати в рамках нелокальної теорії Д-контактів з високою  $J_c$ , розробленої Гуревичем. Нарешті, для третьої групи зразків (ТП2, ТП4) характерна наявність протяжної початкової ділянки незалежності  $R_s$  від  $H_\omega$  з наступним різким зростанням  $R_s$  при великих амплітудах поля. Залежність подібного вигляду була недавно одержана Оутесом та ін. [11] для одинокого ДП, включеного в мікрополосковий резонатор із  $YBaCuO$  тонкої плівки. Оутесом та ін. також одержано адекватний теоретичний опис виявленої залежності  $R_s(H_\omega)$  в рамках RSJ-моделі [12] шляхом чисельного моделювання. Визначимо, що дана модель дає насичення  $R_s(H_\omega)$  при великих полях, якого ми не спостерігали для нашої III групи зразків, очевидно через недостатню амплітуду МХ поля, що була доступна в наших експериментах. Кількісне порівнювання результатів дисертації з моделлю, запропонованою Оутесом, не проводилося, зважаючи на складності чисельного моделювання.

В **Висновках** сформульовані основні результати дисертації.

### **Основні результати і висновки роботи.**

1. Вперше досліджено безконтактним методом РЧ відгук ВТНП складу  $YBaCuO$  на мм випромінювання. Показано комплексну природу РЧ відгуку, що включає поряд з тепловою значну неболометричну компоненту. З'ясовано, що з поліпшенням якості зразка (зменшенням ширини переходу  $\delta T$ , зниженням  $R_s$ , поліпшенням кристалграфічної орієнтованості), максимуми на температурній залежності болометричного і неболометричного відгуків зближуються та загострюються.

2. Виявлено кореляцію в поведінці МХ та РЧ відгуків в залежності від амплітуди  $H_{\omega}$  поля опромінювання. Це підтверджує визначальний вплив випромінювання накачки, а не параметрів зонduючого сигналу, на механізм високочастотного (ВЧ) відгуку ВТНП. Даний висновок має важливе значення для застосування ВТНП у вигляді неболометричних детекторів мм випромінювання з ВЧ зміщенням.
3. Вивчено часову динаміку РЧ та МХ відгуків при вимиканні та вмиканні мм випромінювання. Показано, що в обох випадках після затримки в декілька секунд змінювання відгуку у часі для більшості досліджених зразків добре описується логарифмічним законом, що указує на причетність кріпа магнітного потоку до механізму високочастотного відгуку ВТНП.
4. Показано, що магнітопольова залежність РЧ поверхневого опору в полях до 150 Е для деяких гранульованих зразків добре описується моделлю слабкозв'язаних гранул Хілтона, а для інших зразків — теорією Хальбріттера про рух джозефсонівських (Д) вихорів у міжгранульному середовищі. Це підтверджує визначну роль слабких зв'язків в механізмі ВЧ дисипації в досліджуваних зразках  $YBaCuO$ .
5. З'ясовано, що залежно від якості зразка спостерігається три характерних типа залежності МХ та РЧ відгуків від амплітуди  $H_{\omega}$  мм випромінювання. Виявлено, що для сильнодефектних зразків амплітудна залежність МХ поверхневого опору добре описується теорією Хальбріттера про рух джозефсонівських (Д) вихорів в слабких зв'язках, тоді як для зразків хорошої якості — моделями Свіджара та Гуревича, які приписують основну причину нелінійності індукованому струмом критичному стану та осциляції абрикосовсько-джозефсонівських (АД) вихорів в контактах з високою густиною критичного струму  $J_c$ .
6. На підставі одержаних температурних, часових та амплітудних залежностей РЧ і МХ відгуків можна зробити висновок про те, що їх механізм пов'язано з зародженням та рухом під дією мм випромінювання джозефсонівських або абрикосовських вихорів з джозефсонівською серцевиною (АД-вихорів) в міжгранульних або внутрішньогранульних СЗ. Показано, що залежно від зов-

нішніх умов (температури, сталого магнітного поля) характер дисипативного руху вихорів може змінюватися від крипа до течії потоку.

7. Створено експериментальну установку для дослідження РЧ (1–10 МГц) та МХ (36–37 ГГц) відгуків на електромагнітне випромінювання мм діапазону хвиль (32–35 ГГц) з використанням квазіоптичного діелектричного резонатора.

#### Список літератури, що цитується в авторефераті

1. Hein M.A. High-temperature superconductors: surface impedance, circuits and systems. – Studies of high-temperature superconductors, Nova Sci. Publishers, New York. – 1996. – V.18. – P.141–216.
2. Nguyen P., Oates D.E., Dresselhaus M., Dresselhaus G. Nonlinear surface impedance for  $YBaCuO$  thin films: measurements and a coupled-grain model // Phys. Rev. B – 1993. – V.48. – P.6400–6412.
3. Nguyen P., Oates D.E., Dresselhaus M., Dresselhaus G., Anderson A.S. Microwave hysteretic losses in  $YBaCuO$  and  $NbN$  thin films // Phys. Rev. B – 1995. – V.51. – P.6886–6695.
4. Golosovsky M.A., Snortland H.J., Beasley M.R. Nonlinear microwave properties of superconducting  $Nb$ -microstrip resonators // Phys. Rev. B – 1995. – V.51. – P.6263–6268.
5. Sridhar S. Nonlinear microwave impedance of superconductor and ac response of the critical state // Appl. Phys. Lett. – 1994. – V.65, №8. – P.1054–1056.
6. Gurevich A. Nonlinear dynamics of vortices in high- $J_c$  Josephson contacts // Physica C -1995.-V.243.-P.191-196.
7. J.Halbritter. RF residual losses, surface impedance and granularity of the superconducting cuprates // J. Appl. Phys. – 1990. – V.68. – P.6315–6326.
8. Hylton T.L., Kapitulnik A., Beasley M.R., Carini J.P., Drabek L., Grüner G. Weakly coupled grain model of high-frequency losses in high- $T_c$  superconducting thin films // Appl. Phys. Lett. – 1988. – V.53. – P.1343–1345.

9. Portis A.M. Microwave power induced flux penetration and loss in high-temperature superconductors // J. Supercond. – 1992. – V.5. – P.319–331.
10. Coffey M.W. Coupled nonlinear electrodynamics of type-II superconductors in the mixed state // Phys. Rev. B – 1992. – V.46. – P.567–570.
11. Oates D.E., Nguyen P.P., Habib Y., Dresselhaus G., Dresselhaus M.S., Koren G., Polturak E. Microwave power dependence of YBaCuO thin-film Josephson edge junctions // Appl. Phys. Lett. – 1995. – (Submitted).
12. Russer P. Influence of microwave irradiation on current-voltage characteristics of superconducting weak link // J. Appl. Phys. – 1972. – V.43, №4 – P.2008–2010.

Основні публікації по темі дисертації приведено нижче (повний перелік публікацій міститься в дисертаційній роботі):

1. Velichko A.V., Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Zagoskin V.T. Microwave and radiowave surface resistance of high-quality YBaCuO ceramic: nonlinear aspects // Physica C. – 1996. – V.261, №3–4. – P.220–228.
2. Velichko A.V., Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Chukanova I.N., Zagoskin V.T. Impedance properties and microwave magnetic field dependence of surface resistance of YBaCuO // Физика низких температур. – 1996. – Т.21, №6. – С.963–966.
3. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т. Сверхпроводящая тонкая пленка YBCO в микроволновом поле квазиоптического диэлектрического резонатора // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. – Т.4, – 1991. – С.2193 – 2198.
4. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т. Радиочастотное поглощение в YBCO тонких пленках // Физика низких температур. – Т.17, №6. – 1991. – С.413–415.
5. Velichko A.V., Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Chukanova I.N. High-frequency response of epitaxial YBCO thin film on microwave irradiation // Proc. of Inter. Symposium "Physics

- and Engineering of mm and submm waves", Kharkov, Ukraine, 1994. - V.1. - P.173-176.
6. Velichko A.V., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Cherpak N.T. Microwave and radiofrequency responses of YBCO thin film on millimeter wave radiation // Proc. of the 1st Inter. Autumn School-Conference SSPFA'94, Uzhgorod, Ukraine, 1994. - P.R12-R14.
  7. Velichko A.V., Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Stetsenko A.N. Are the nonlocal effects really actual for the HTSC ? // Proc. of XXI Inter. Conf. on Low Temperature Physics, Prague, Czech Republic - 1996. - V.46, №33 - P.1639-1640.
  8. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т., Усоскин А.И., Чуканова И.Н. Радиочастотный отклик на излучение мм диапазона и нелинейные свойства ВТСП // Тезисы докладов I Украинского симпозиума "Физика и Техника мм и субмм радиоволн" Харьков, ИРЭ АН УССР, 1991. - Т.1 - С.107-108.
  9. Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Velichko A.V., Chukanova I.N., Usoskin A.I. Microwave radiation effect on high-frequency properties of YBCO thin films // Abstr. of Inter.Conf. on HTSC and Localization Phenomena. - Moscow, 1991. - P.M47.
  10. Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Velichko A.V., Chukanova I.N., Kosmyna M.B. Radiowave response of YBCO thin films to mm wave band radiation // Abstr. of Applied Superconductivity Conf., Boston, Massachusetts, USA. - 1994 - P.30 (ELD-2).
  11. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т., Чуканова И.Н., Космына М.Б. Индуцированное миллиметровым излучением движение магнитного потока в тонкой пленке YBaCuO // Тезисы докладов 2-ой Международной конференции "Материаловедение ВТСП", Харьков, 1995. - С.179.

109.26 8A

**Velichko A.V. High-frequency response to millimeter wave radiation and nonlinear properties of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  superconducting compounds .** The thesis for obtaining the candidate degree of science in physics and mathematics, speciality of 01.04.22 — superconductivity, Institute for Low Temperature Physics and Engineering of NAS, Kharkov, Ukraine, 1996.

Defended are 11 scientific works, in which the high-frequency (hf) (radiofrequency (rf) and microwave (mw) ) response of  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  superconducting compounds to millimeter wave radiation is studied. The temperature, DC magnetic field and field amplitude dependences of the hf-response of ceramic and thin film samples has been investigated. The response is shown to be of a complex nature (thermal and nonequilibrium), including strong enough nonbolometric component. Time relaxation of the hf-response is subject to the logarithmic law, which together with a marked delay (~several seconds) of the signal appearance implies relevance of the flux creep to the response mechanism. Three characteristic types of behavior of the hf-response with the mm field amplitude has been found depending on the quality of the sample. In all three cases a good consistence was found with diverse theoretical models considering the vortex motion impact on the hf-dissipation in the HTSC.

**Величко А.В. Высокочастотный отклик на миллиметровое излучение и нелинейные свойства сверхпроводников состава  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ .** Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.22 — сверхпроводимость, ФТИНТ НАН Украины, г.Харьков, 1996 г.

Защищается 11 научных работ, в которых изучается высокочастотный (ВЧ) (радиочастотный (РЧ) и микроволновый (МВ) ) отклик сверхпроводников состава  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  на миллиметровое (мм) излучение. Исследованы температурные, магнитопольевые и амплитудные зависимости ВЧ отклика керамических и тонкопленочных образцов. Показано, что отклик имеет смешанную природу (тепловую и неравновесную), включая достаточно заметную неболометрическую составляющую. Временная релаксация ВЧ отклика подчиняется логарифмическому закону, что вместе со значительной задержкой (~нескольких секунд) в появлении сигнала подразумевает причастность крипа потока к механизму неравновесного отклика. Обнаружено, что зависимость ВЧ отклика от амплитуды мм излучения могут быть 3-х характерных типов в зависимости от качества образца. Во всех 3-х случаях выявлено хорошее согласие с различными теоретическими моделями, рассматривающими влияние движения вихрей на ВЧ диссипацию в ВТСП.

**Ключові слова:** високотемпературна надпровідність, радіочастотний та мікрохвильовий відгуки, нелінійні властивості.

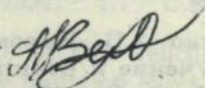
1190420

Безплатно.

№ 35.291  
Ав 35.291

**Величко Антон Васильович**

**Високочастотний відгук на міліметрове  
випромінювання та нелінійні властивості  
надпровідників складу  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ .**



Відповідальний за випуск В.М.Скресанов

Підписано до друку 10.07.96.

Формат папери 60 × 84 × 1/16 Об'єм 1 фіз. д. л.

Замова №51 . Тираж 100 екз. Безплатно.

Ротапринт ІРЕ НАН України.

Харків-85, вул. Акад. Проскури, 12.