

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК України

Інститут радіофізики та електроніки

ім. О.Я.Усикова

На правах рукопису

УДК 537.312.62 + 621.372.834

*В.М.А.*

ІЖИК Едуард Валентинович

ІМПЕДАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАД-

ПРОВІДНИКІВ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  СКІНЧЕННОЇ ТОВИЩИ В

ПОЛЯХ НВЧ ТА ВЧ ДІАПАЗОНІВ

01.04.03 - радіофізика

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття вченого ступеня

кандидата фізико-математичних наук

Харків - 1997



00743020 (G)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова Національної Академії Наук України, м.Харків.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,  
провідний науковий співробітник  
ЧЕРПАК М.Т. (ІРЕ НАН України)

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
головний науковий співробітник  
ГАНАПОЛЬСЬКИЙ Е.М. (ІРЕ НАН України);  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник  
ПРЕНЦЛАУ М.М. (ФТІНТ НАН України)

Провідна організація: Харківський державний університет  
ім. О.М.Горького

Захист відбудеться 26 червня 1997р. о 10 годині на засіданні Спеціалізованої Ради Д 02.29.01 в Інституті радіофізики та електроніки ім. О.Я. Усикова НАН України за адресою: 310 085, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12, ІРЕ НАН України, конференцзал.

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці ІРЕ НАН України, м. Харків, вул. Акад. Проскури, 12.

Автореферат розіслано "26" травня 1997р.

Вчений секретар

Спеціалізованої Ради

доктор фізико-математичних наук

С.М. Харківський

Актуальність теми.

Кілька років тому був виявлений новий клас надпровідних матеріалів-оксидних надпровідників з температурою надпровідного переходу до 135 К. Відкриття високотемпературних надпровідників (ВТНП) зародило сумнів у справедливості традиційних теорій явища надпровідності, привернуло увагу до численних потенційних застосувань, в тому числі в радіофізиці та електроніці. На сьогоднішній день опубліковано чималу кількість експериментальних даних стосовно цих матеріалів. Різноманітні структурні та матеріалознавські дослідження, а також традиційні фізичні вимірювання ВТНП (ізотопічний ефект, теплємність, магнітна сприйнятливність, поглинання електромагнітної енергії та інші.) продемонстрували деякі надто незвичні властивості, що викликало велику кількість теоретичних інтерпретацій. Оскільки природа надпровідного стану в цих матеріалах залишається незрозумілою, метою експериментаторів є вимірювання фізичних характеристик ВТНП і виявлення кореляцій між вимірюваними параметрами. Такі залежності та взаємозв'язки можуть сприяти розумінню явища надпровідності, забезпечити перевірку запропонованих теорій і дати інформацію про можливі застосування.

Взаємодія електромагнітних полів і ВТНП визначається як і у всіх провідних тіл поверхневим імпедансом  $Z_B = R_B + iX_B$ . Його дійсна частина - поверхневий опір  $R_B$ , характеризує потужність, розсіювану на одиниці поверхні, а уявна частина - поверхневий реактанс  $X_B$  описує недисипативний обмін енергією між полем і надпровідником у межах глибини проникання. Таким чином, поверхневий імпеданс провідників дає можливість оцінювати основні характеристики пасивних НВЧ і ВЧ приладів на основі цих матеріалів.

Низьке значення поверхневого опору надпровідника дозволяє досягати рекордно високих значень добротності резонаторів, що важливо для створення високостабільних генераторів та резонансних фільтрів. Незаперечними є переваги використання ВТНП у таких мікрохвильових пристроях як лінії затримки, антени. Особливо це стосується мікрохвильових приладів і елементів планарної кон-

фігурації, просуванню яких в більш високочастотну частину мікрохвильового діапазону перешкоджають смічні втрати в шкiн-шарі провідників. Ще однією перевагою надпровідних ліній передачі у порівнянні з традиційними лініями на основі нормальних металів є можливість передачі сигналів без фазових спотворень, що зумовлено малою дисперсією для частот, значно менших  $2\lambda/h$ , де  $\lambda$  - енергетична щільність надпровідника,  $h$  - стала Плянка. Ця особливість надпровідних ліній дозволяє передавати короткі імпульси без їх спотворення на великі відстані.

Вже перші вимірювання поверхневого опору ВТНП виявили, що при охолодженні нижче критичної температури  $T_0$  опір  $R_B$  спочатку різко зменшується, а після цього практично не змінюється, залишаючись на кілька порядків вище значення  $R_B$ , якого можна було очікувати на основі мікроскопічної теорії Бардіна - Купера - Шріфера (БКШ). Частотна залежність  $R_B$  надпровідників виявилась сильнішою, ніж у нормальних металів. У міліметровому (мм) діапазоні імпедансні властивості найкращих зразків  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$  (YBCO) та міді зрівнюються при температурі 77 К. Виникли питання: чи справедлива теорія БКШ по відношенню до ВТНП; яка роль зовнішніх чинників у поводженні  $R_B$ ? Крім того, саме у мм діапазоні надто актуальною проблемою є зниження  $R_B$  з метою подолання труднощів на шляху утворення НВЧ пристроїв планарної конфігурації. Ці обставини викликали необхідність розробки методу вимірювання поверхневого імпедансу ВТНП зразків, що задовольняє наступним вимогам: 1) високій чутливості; 2) можливості визначення  $R_B$  зразка без його попередньої обробки (без зміни його форми та розмірів); 3) можливості проведення вимірювань у міліметровому діапазоні хвиль; 4) можливості вимірювань імпедансних властивостей ВТНП в кількох частотних діапазонах в одному температурному циклі.

Мета роботи полягає в експериментальному дослідженні імпедансних властивостей ВТНП у міліметровому та високочастотному діапазонах у широкому температурному інтервалі, а також розробці високочутливого безконтактного методу вимірювання  $Z_B$  зразків ВТНП з урахуванням їх товщини.

Наукова новизна проведених досліджень визначається тим, що:

- 1) розвинуто методику вимірювань  $Z_B$  ВТНП зразків, що задовольняє наступним вимогам: а) високої чутливості; б) можливості неруйнівного вимірювання зразка, тобто без зміни його форми та розмірів; в) можливості проведення вимірювань одночасно в радіо- та мм діапазонах в одному температурному циклі;
- 2) у мм діапазоні проведено вимірювання  $R_B$  керамічних і плівкових зразків YBCO різної товщини; виявлено значний залишковий опір у досліджуваних зразках;
- 3) вивчено вплив підкладки з  $SrTiO_3$  з великим значенням діелектричної проникності  $\epsilon$  на  $Z_B$  ВТНП; проведено числове моделювання впливу товщини плівки та підкладки на хід температурної залежності ефективного поверхневого імпедансу;
- 4) виявлено максимум гістерезисних втрат у радіочастотному діапазоні у випадку однобічного збудження електромагнітного поля, обумовлений скінченність товщини зразка. У мм діапазоні за наявності відповідних умов такий пік не спостерігається;
- 5) показано принципову можливість: а) створення електрично перестроюваного смугового фільтра на основі квазіоптичного діелектричного резонатора (КДР) та ВТНП плівки; б) застосування КДР для вимірювання діелектричних властивостей підкладок для ВТНП плівок великої площини.

Достовірність і обґрунтованість одержаних в роботі результатів підтверджуються узгодженість теоретичних моделей, що використовувалися для аналізу, з відповідними експериментальними даними, а також результатами досліджень інших авторів, що працюють у даній галузі.

Основні положення, що підлягають захисту.

1. Обґрунтовано можливість використання квазіоптичного діелектричного резонатора (КДР) із азимутальними коливаннями вищого порядку для високочутливого безконтактного засобу вимірювання  $Z_B$  зразків ВТНП у мм діапазоні хвиль.

2. Виявлено немонотонну температурну залежність ефективного поверхневого імпедансу плівкових зразків ВТНП на підкладках з титаната стронцію в мм діапазоні. Показано, що характер залеж-

ності обумовлений явищем інтерференції хвиль у підкладці.

3. Максимум поглинання на температурній залежності  $Z_B$  у радіочастотному діапазоні в плівкових зразках ВТНП із товщиною, меншою глибини проникання поля у випадку однобічного збудження є наслідком гістерезисних втрат у змішаному стані надпровідника.

4. На основі КДР із ВТНП плівкою в мм діапазоні можна побудувати болометр із НВЧ зміщенням з чутливістю  $\approx 10^7$  В / Вт; перестроюваний електричним полем резонатор із крутизою перестройки 0,04 МГц / (В / см); а також вимірвальні установки для дослідження нелінійних властивостей ВТНП і радіочастотного відгуку на мікрохвильове (МХ) випромінювання.

Практична цінність роботи. Одержані результати дозволили зробити ряд пропозицій з вдосконалення існуючих та створення нових пристроїв.

1. Запропонована методика вимірювання поверхневого імпедансу дозволяє визначати  $R_B$  високоякісних ВТНП плівок.

2. Запропоновано кріогенний болометр із НВЧ зміщенням, який може бути використаний як елемент високочутливої детектуючої системи приймача некогерентного випромінювання.

3. Перестроюваний електричним полем КДР, збудений монокристалічним  $SrTiO_3$ , може знайти застосування в фазозсувачах, фільтрах та коливних системах твердотільних генераторів мм діапазону хвиль.

4. Показано можливість використання методики вимірювання поверхневого опору для вивчення нелінійних властивостей ВТНП.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на:

- III Всесоюзному семінарі " Функціональна магнітоелектроніка " (Красноярськ, 1988);
- I Всесоюзній нараді з проблем діагностики матеріалів ВТНП (Чорноголовка, Моск. обл., 1989);
- II Всесоюзній конференції з ВТНП (Київ, 1989);
- III Всесоюзній нараді з ВТНП (Харків, 1991);
- Європейській конференції з прикладної надпровідності

EUCAS'93 (Гетінген, 1993):

- I Міжнародному симпозіумі " Фізика і техніка мм і субмм хвиль " (Харків, 1994).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 16 друкованих робіт і одержано позитивне рішення по заявці на винахід.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з п'яти глав, вступу, змісту, додатку та списку цитованої літератури, що включає 181 найменування. Вона містить 46 малюнків і 2 таблиці. Загальний обсяг дисертаційної роботи - 173 сторінки.

#### Зміст роботи.

У вступі стисло розглядається об'єкт дослідження, обґрунтовується актуальність обраної теми, визначаються мета і завдання проведених досліджень, розкрита структура дисертації. Формулюються основні наукові положення, що підлягають захисту. Приводиться список наукових конференцій та симпозіумів, на яких доповідалися основні результати дисертації.

В першій главі описані установки та методики вимірювань, що використовувалися у роботі. Приводяться ескіз та блок-схема обладнання, пояснюється призначення її елементів, описується методика охолодження. Підкреслюється, що вимірювання  $Z_B$  проводяться одночасно в двох частотних діапазонах: у ВЧ діапазоні за допомогою накладної котушки індуктивності, зв'язаної в резонансний контур, та в НВЧ діапазоні за допомогою КДР із лейкосапфіра або алюміната лантана. Описується методика індукційних вимірювань ВЧ втрат у надпровідниках за допомогою гетеродинного куметра.

Розроблена методика комплексних безконтактних досліджень поверхневого імпедансу ВТНП одночасно в ВЧ ( 1- 10 МГц ) і НВЧ (30 - 80 ГГц) діапазонах. Одна з важливих особливостей створеного вимірювального комплексу полягає в тому, що об'єктом вимірювань є зразки ВТНП без будь-якої механічної чи хімічної обробки, що дозволяє подальше використання цих зразків. Комплекс дає можливість проводити багаторазове термоцикування з високою відтворюваністю результатів вимірювань. При необхідності можуть бути включені і резистивні вимірювання.

Охолодження досліджуваного об'єкту здійснюється в стандарт-

ному криостаті типу ГК-100 за допомогою спірального холодопроводу, виконаного з мідної трубки, крізь яку пропускається рідкий азот чи гелій. Відпрацьований газ виводиться в газгольдер (гелій) або в атмосферу (азот). Така система охолодження дозволяє одержати достатньо повільне зниження температури зі середньою швидкістю менш 1 К /хв. Контроль температури здійснюється напівпровідниковим діодом.

Дослідження поверхневого імпедансу в НВЧ діапазоні виконувались за допомогою КДР, на якому через фторопластову прокладку (товщиною 0.2 - 0.6 мм) розташовувався ВТНП зразок. Зміни добротності та резонансної частоти КДР несуть інформацію про величину втрат електромагнітної енергії та глибини проникання поля в зразок.

На відміну від НВЧ вимірювань у ВЧ діапазоні досліджується залежність добротності та ємності послідовного коливного контура. Вимірником добротності служить куметр типу ВМ-560. Вимірвальна камера винесена з приладу в криостат і розміщена поблизу котушки індуктивності, яка є сенсором поверхневого імпедансу в ВЧ діапазоні. Пластинчастий механічно перестрокований конденсатор замінений на напівпровідниковий варикап типу КВ 104 В. Така компоновка ВЧ схеми дозволяє істотно знизити радіаційні втрати в з'єднувальних провідниках і підвищити добротність контуру з 10 до 30.

В дослідженнях добротності  $Q$  і резонансної частоти  $f_p$  на НВЧ використовувалася опосередкована передача. Залежність амплітуди сигналу на виході резонатора від частоти має вигляд резонансної кривої. На певному рівні по ширині цієї кривої значення добротності може бути обчислено за допомогою відомого співвідношення. Значення  $f_p$  вимірювалося за допомогою квілеметра. Завдяки відсутності складових частин в конструкції КДР та гістерезисних явищ в монокристалічному рубіні (лейкосапфірі) вибраний тип резонатора має високу відтворюваність власної частоти та добротності при багаторазовому термоциклуванні. Абсолютне значення поверхневого опору  $R_B$  зразка ВТНП визначалося шляхом порівняння втрат у КДР, збудженому мідним зразком з відомим значенням  $R_B$ .

Доповнивши описаний вимірвальний комплекс хвилеводним трактом великої потужності та котушками Гельмгольца, розміщеними зовні криостата, можна досліджувати крім температурної, також амплітудну та магнітопольову залежності поверхневого імпедансу ВТНП. Методика особливо сприятлива для випробування плівок великих розмірів, що використовуються для створення НВЧ пристроїв.

В другій главі розглядаються КДР із азимутальними коливаннями типу "шепочучої галереї". Обговорюються труднощі, пов'язані з точним розв'язанням задачі про спектр коливань КДР, збуденого провідниковим тілом. Давться формули, що зв'язують добротність і частоту збуденого резонатора з дійсною та уявною частинами  $Z_B$  зразка. Описуються основні характеристики КДР: збуджувані типи хвиль, розподіл компонент поля для деяких типів коливань, частотний спектр резонатора. Показується також, що при збудженні КДР металеним диском з діаметром, що трохи перевищує діаметр резонатора, радіаційні втрати майже відсутні і не залежать від діаметру зразка. Виявлено, що при дуже великому збудженні, коли зразок знаходиться на відстані  $\approx 0.04 - 0.20$  мм від КДР, залежність добротності збуденого резонатора від відстані до зразка стає немонотонною із-за взаємодії різноманітних типів коливань. Одержано вираз для мінімально вимірюваного значення  $R_B$  залежно від добротності та збудження резонатора зразком.

Висока добротність сапфірових КДР ( $10^5$  при 300 К і понад  $10^6$  при криогенних температурах) і залежність  $f_p$  від діелектричної проникності  $\epsilon$  навколишнього простору роблять перспективним їх застосування в вимірних параметрів діелектриків, зокрема діелектричних плівок, що можуть наноситися на торцьову поверхню резонатора. При цьому важливою умовою є вимога низького рівня втрат ( $\text{tg } \delta < 10$ ). Необхідність дослідження діелектриків з більш високими втратами, а також зразків у вигляді плівок змусила розробників шукати можливості вимірювань на шляху використання складених КДР. Основною такою складених КДР могли бути диски з високоякісних діелектриків з малими втратами, на торцьову поверхню яких накладалися диски чи плівки досліджуваного матеріалу з великими втратами.

Точний розв'язок задачі про спектр коливань КДР, збуреного провідним тілом, представляє відомі труднощі, пов'язані з відсутністю жорстких граничних умов. Проте у випадку малого збурення в роботі [1] було одержано співвідношення, що зв'язує частоту та добротність резонансного коливання з параметрами зразка. При цьому припускалось, що вісь анізотропії кристалу (рубіна, лейкосапфіра) співпадає з геометричною віссю резонатора. Більш загальний випадок для довільного кута між осями був розглянутий в роботі [2].

Вивчення впливу відношення діаметру диску, що збурює КДР, до діаметру резонатора на величину радіаційних втрат в КДР дозволило визначити оптимальний розмір досліджуваного зразка. Одним з небажаних явищ при вимірюваннях поверхневого імпедансу є взаємодія різноманітних типів коливань в КДР, що призводить до появи осциляцій на монотонній залежності навантаженої добротності від відстані до вимірюваного тіла. Підбором належного формату КДР, можна керувати спектром резонансних частот, усуваючи зайві коливання. Залежно від величини поверхневого опору вимірюваного об'єкту вимагається також проводити вибір інтервалу відстаней між торцьовою поверхнею в КДР і зразком.

Мінімально вимірювана величина поверхневого опору  $R_B$  для вибраного типу резонатора визначається двома факторами: величиною власної добротності резонатора і чутливістю вимірювальної установки. Проведена оцінка чутливості КДР, виготовленого з технічного рубіна, при використанні його в синтезаторі частоти з спектральною роздільністю  $\approx 10$  кГц свідчить про можливість вимірювання  $R_B$  високоякісних ВТНІ плівок.

У третій главі вивчаються деякі важливі особливості поглинання мікрохвиль та їх проникання в надпровідникові зразки, виготовлені з використанням різноманітних технологій. Приводяться і аналізуються результати температурних вимірювань  $R_B$ , проведених на кераміках та плівках на різноманітних підкладках. Показується, що осциляції  $R_B$  в плівках на підкладках  $SrTiO_3$  були пов'язані з прониканням хвиль в підкладку та їх інтерференцією. Досліджено можливість керування частотами КДР електронним спосо-

бом. Вияснено, що у постійному електричному полі величиною 2,5 кВ /см у структурі "КДР + ВТНП плівка на підкладці  $\text{SrTiO}_3$ " виникав зсув резонансної частоти  $\approx 100$  МГц у 8 мм діапазоні хвиль.

Поверхневий опір  $R_B$  усіх зразків зменшується при переході з нормального стану в надпровідниковий. ВТНП у порівнянні з НТНП мають значний залишковий опір. Ширина переходу у керамічних зразків значно більша, ніж у плівкових та монокристалічних. Залежність  $R_B$  від температури в нормальному стані має лінійний характер. З теорії БКШ випливає експоненціальний вид температурної залежності  $R_B$  з одним параметром енергетичної щільності в надпровідному стані. Проведений аналіз даних експерименту показав, що чітка експоненціальна залежність не опостерігається. Якщо все ж таки вважати на окремих температурних інтервалах теоретичне співвідношення справедливим, то можна одержати наступні параметри енергетичної щільності:

$\Delta / k T_0 = 2$  в інтервалі  $T_0 / T = 1.5 - 2$  та  $\Delta / k T_0 = 0.6$  в інтервалі  $T_0 / T > 2$ .

Застосування феноменологічної дворідної теорії для аналізу температурної залежності глибини проникання  $\lambda$  продемонструвало задовільну узгодженість з даними експеримента. Одержані значення  $\lambda \approx 365$  нм для керамічних та 140 нм для плівкових зразків корелюють з даними інших дослідників. Відзначимо, що кераміки з "поганим"  $R_B$  мають велике  $\lambda$  ( $\approx$  мкм) у всьому температурному інтервалі. З лінійної залежності  $R_B(T)$  в нормальному стані в наближенні класичного скін - ефекту можна отримати значення питомого опору  $\rho$  на постійному струмі. Одержане таким чином значення  $\rho = 373$  мкОм см для кераміки. Найкращі плівкові та монокристалічні зразки мають  $\approx 50$  мкОм см при  $T = 100$  К.

У перших найбільш якісних плівках, що одержані на підкладках з монокристалічного  $\text{SrTiO}_3$ , були виявлені осциляції  $R_B$  вище температури переходу в надпровідний стан, якщо товщина плівки менше товщини скін-шару (або ж лондонівської глибини проникання  $\lambda$ ).

Застосування теорії ліній передачі для аналізу спостережуваного ефекту дозволило одержати співвідношення для ефективного

поверхневого імпедансу  $Z_B$  структури "плівка + підкладка". Вивчення впливу товщини підкладки при різних товщинах плівки ВТНІ було здійснено шляхом числового експерименту на персональному комп'ютері типу IBM 286 АТ. Як показав експеримент, пік  $R_B$  виникає у випадку, коли на товщині підкладки  $t$  укладається ціле число довжин півхвиль:  $k \epsilon^{0.5}(T) t = \pi n$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots$ , де  $k$  - хвильове число для вільного простору. Безсумнівно, що осциляції  $R_B$  можна пояснити інтерференцією хвиль, відбитих від двох площин діелектричної підкладки. Підтвердження цьому висновку одержано і для іншої орієнтації структури "плівка + підкладка", коли до резонатору була повернута підкладка. Використаний теоретичний підхід дозволив вірно оцінити число інтерференційних резонансів, а також залежність ширини резонансного піка від  $\epsilon$ , номеру резонансу та температури. Відзначимо, що осциляції  $R_B$  були відсутні в плівках на підкладках з  $MgO$  та  $LaAlO_3$ .

Для розрахунку істинного значення  $R_B$  по ефективному значенню  $Z_B^{eff}$  складено програму на мові C ++.

У четвертій главі експериментально досліджується розмірний ефект у ВЧ діапазоні в керамічних та плівкових зразках ВТНІ у випадку однобічного збудження електромагнітного поля. Спостережуваний максимум поглинання проявляється, коли глибина проникання поля в нормальному стані перевищує товщину зразка.

Відомо, що поле проникає в надпровідник у вигляді вихорів. Наявність пінінга вихорової структури в ВТНІ (як і в усіх жорстких надпровідниках II - го роду ) призводить до практично лінійного зменшення магнітного потоку вглиб зразка на відстані від нормальних металів, де поле спадає за експонентою. Коли в умовах експерименту може бути застосована модель Біна, узагальнена на випадок звичайного кріпа потоку, максимуму поглинання відповідає умова [3]:  $H_{rf} = 0.971 \mu_0 j_0(T_{max}) d$ . де  $j_0(T_{max})$  - значення критичного струму при  $T = T_{max}$ .  $H_{rf}$  - амплітуда змінного поля,  $d$  - товщина зразка. В моделі термоактивованої течії потоку (ТАФФ) при температурі розмірного максимуму можна використати рівність:  $\delta(T_{max}) = d / 2$  [ 4 ]. В цьому випадку для визначення глибини проникання  $\delta$  можна застосовувати формули класичної

електродинаміки, в яких провідникові властивості характеризуються величиною  $\rho_{\text{ТАФ}}$  - опором течії потоку.

Перші зразки металосоксидів ВТНП були дуже недосконалими, мали велику кількість ненадпровідних домішок. Тому однозначно встановити природу розмірного ефекту в них виявилось складним. На більш досконалих керамічних зразках і в особливості на плівках ВТНП вдалося показати, що положення піка поглинання в залежності від товщини зразка, амплітуди поля та частоти краще описується моделлю критичного стану, ніж на підставі формул класичної електродинаміки.

Металосоксиди ВТНП мають структуру, що складається з зерен та міжзеренних прошарків. Останні являють собою джоєфсонівські контакти, що зв'язують зерна в єдину струменесучу систему. З температурного ходу кривої поглинання вдається визначити температуру залежності критичного струму, з якої можна одержати тип слабкоз'язаних контактів у міжзеренних прошарках.

Явище високочастотного розмірного ефекту в зразках ВТНП скінченної товщини запропоновано використати для забезпечення температурно - залежного демпфування коливань механічного осцилятора в системі надпровідної магнітної підвіски.

У п'ятій главі розглянуто питання практичного використання результатів, одержаних в роботі. На основі охолодженого болметра, в якому використаний КДР з надпровідною плівкою, можна створити малочувний вимірник потужності випромінювання електромагнітних хвиль термічним засобом в НВЧ та інфрачервоному діапазонах. Проведений аналіз показав, що за допомогою запропонованого болметра з НВЧ зміщенням можна значно підвищити вольватну чутливість приймача. Перевага досягається тим, що у вигляді детектуючого елементу використовується напівпрозора надпровідна плівка, розміщена над КДР, а вимірювана інформація зосереджується в змінах поверхневого імпедансу цієї плівки. Зокрема, використовується температурна залежність поверхневого реактансу (уявної частини імпедансу), при цьому вимірюється зсув фази НВЧ сигналу, обумовлений зміною частоти КДР із плівкою. Зміна імпедансу поблизу  $T_0$  при зниженні температури є різкою, і ця обста-

вина разом з високою добротністю КДР має вирішальне значення. Оцінена вольтватна чутливість дорівнює  $\eta \approx 10^7$  В / Вт.

Використовуючи КДР, можна створювати багатофункціональні твердотільні пристрої, забезпечуючи крім частотної вибірності стабілізацію частоти, керування рівнем та фазою сигналу, а також ефективні системи радіоелектронної апаратури нового покоління в мм діапазоні хвиль. Разом з тим підвищується надійність, зменшується вага, габаритні розміри, вартість та металоемність пристроїв. Як показали дослідження структури " YBCO тонка плівка на підкладці з титаната стронцію + КДР ", виконані в 8 мм діапазоні хвиль, постійне електричне поле величиною 2.5 кВ / см викликає зсув резонансної частоти на 100 МГц. За цих умов навантажена добротність КДР змінюється менш, ніж у 1.5 рази та має значення  $\approx 100$  при температурі 72 К. Відбивний НВЧ фазозсувач, побудований на основі такої структури, мав би незначні втрати в смузі робочих частот та енергоспоживання.

Експериментальна установка, розроблена для вимірювання поверхневого імпедансу, після деякої доробки дозволяє проводити також дослідження нелінійних властивостей ВТНП. До цього часу існує погляд, що нелінійні ефекти в ВТНП в помірних магнітних полях обумовлені слабкими зв'язками SIS - та SNS - типу. Згідно з теорією Хальбріттера, нелінійний відгук слабких зв'язків в залежності від амплітуди поля можна поділити на три режими: 1) мейснерівський стан, при якому нелінійність обумовлена руйнуванням куперівських пар; 2) пінінг джоозефсонівських вихорів усередині слабких зв'язків; 3) течія потоку джоозефсонівських вихорів. У зразку тонкої плівки YBCO на підкладці  $\text{LaAlO}_3$ , як показує проведений аналіз результатів експерименту, вдалося спостерігати зазначені вище режими нелінійного відгуку.

У висновках сформульовано основні результати роботи :

1. Розроблено методику та створено установку для дослідження температурної залежності поверхневого імпедансу ВТНП зразків одночасно в ВЧ і НВЧ діапазонах безконтактним способом. З її допомогою можна визначати абсолютне значення поверхневого опору в НВЧ діапазоні, залежність критичного струму від темпера-

тури в ВЧ діапазоні.

2. Температурна та частотна залежності  $R_B$  ВТНП у НВЧ діапазоні для нормального стану можуть бути описані в наближенні теорії класичного скін - ефекту. Нижче  $T_0$  електродинамічні властивості характеризуються значними  $R_B$  і  $\lambda_L$  в усьому температурному інтервалі, що пов'язано або з структурною недосконалістю досліджуваних зразків, чи з їх анізотропією провідності, або із високою залишковою щільністю носіїв заряду. Не спостерігається чіткої експоненційної температурної залежності з одним параметром енергетичної щільності, характерної для БКШ - теорії.  $R_B$  в надпровідному стані задовільно списується в межах модифікованої дворідинної моделі.

3. Виявлено немонотонну температурну залежність  $Z_S^{eff}$  в YBCO плівках на  $SrTiO_3$  при товщині плівки, меншій глибини проникання поля в нормальному стані. В результаті числового експерименту з'ясовано, що спостережувані при зміні температури осциляції  $R_B$  являють собою інтерференційні резонанси та пояснюються інтерференцією хвиль, відбитих від передньої та задньої стінок підкладки. Змодельовано еволюцію зміни  $Z_S^{eff}$  при різних товщинах плівки ВТНП. На основі моделі складено програму для числового розрахунку істинного значення  $Z_S$  по вимірюваному ефективному значенню.

4. Виявлено пік гістерезисних втрат у ВЧ діапазоні ( $\approx 10$  МГц) в випадку однобічного збудження електромагнітного поля, обумовлений скінченністю товщини зразка.

5. Визначено форму температурної залежності критичного струму з температурного ходу кривої поглинання в кераміках та плівках. Показано, що вона відповідає слабким зв'язкам S-N-S типу в плівках та кераміках.

6. Встановлено, що температурна та польова залежності ВЧ поглинання в YBCO тонких плівках з високою струмонесучою спроможністю можуть бути пояснені в межах моделі термоактивованого кріпа магнітного потоку.

7. Виявлені та досліджені в роботі фізичні ефекти та особливості ВТНП дозволили запропонувати ряд нових НВЧ пристроїв:

болومتر з НВЧ зміщенням; перестроюваний електричним полем КДР, який може знайти застосування в фазозсувачах, фільтрах та коливальних системах твердотільних генераторів мм діапазону хвиль.

Список літератури, що цитується в авторефераті.

1. Филиппов В.Ф. Резонансные колебания в ограниченных твердотельных структурах. - Автореф. докт. дис.- 1992.- ИРЭ АН УССР.-Харьков.- 19 с.
2. Еременко З.Е. Электромагнитные волны и колебания в ограниченных твердотельных структурах при произвольном направлении оси анизотропии или внешнего магнитного поля. - Автореф. канд. дис.- 1996.- ИРЭ НАН Украины.- Харьков.- 19 с.
3. Clem J.R. and Sanchez A. Hysteretic AC losses and susceptibility of thin superconducting discs.-Phys.Rev. B.-1994.- 50.- P.9355.
4. Kev P.H., Aarts J., van der Berg J., van der Beek C.J., Mydosh J.A. Thermally assisted flux flow at small driven currents.- Supercond. Sci. Technol.- 1989.- 1.- P. 242-248.

Основні публікації по темі дисертації приведено нижче :

1. Ижик Э.В., Ревенко В.Ф., Черпак Н.Т., Кириченко А.Я. Радиочастотный размерный эффект вблизи  $T_c$  в высокотемпературных сверхпроводниках // Письма в ЖТФ - Т.15, N 7. - 1989. - С.1 - 5.
2. Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Ревенко В.Ф., Свиштунов В.М., Черпак Н.Т., Яковенко В.М. Сверхпроводящая керамика в ВЧ и СВЧ полях // ДАН УССР, серия А, N 5. - 1989. - С.51 - 54.
3. Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т. Установка и методика для бесконтактного измерения сверхпроводящих свойств ВТСП // Заводская лаборатория. - N 8. -1990. - С.112 - 115.
4. Ижик Э.В., Ревенко В.Ф., Свиштунов В.М., Таренков В.Ю., Харьковский С.Н., Черпак Н.Т., Яковенко В.М., Кириченко А.Я. Особенности возмущения открытых диэлектрических СВЧ резонаторов ВТСП // Сб. "Проблемы ВТСП", препринт Института металлофизики, Киев. -1988.
5. Ижик Э.В., Черпак Н.Т., Кириченко А.Я. Установка и методика

- для комплексного исследования ВТСП в ВЧ и СВЧ полях // Сб. "Функциональная магнитоэлектроника", тез. докл. III Всесоюз. семинара, Красноярск. - 1988.
6. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т., Кондрашин С.К. Исследования СВЧ свойств  $YBaCuO$  и  $BiSrCaCuO$  с помощью КДР // Сб. Трудов "Квазиоптическая техника мм и субмм диапазонов волн", ИРЭ АН УССР, 1989. - С.123 - 128.
7. Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Velichko A.V. Microwave and radiofrequency properties of high- $T_0$  thin films // *Physica C* - 1991. - V.180. - P.280 - 283.
8. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т. Температурная зависимость эффективного микроволнового импеданса пленки ВТСП на подложке с большим значением диэлектрической проницаемости // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. Т.6, N 6. - 1993. - С.1189 - 1198.
9. Velichko A.V., Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya. On a development possibility of tunable microwave passband filter based on dielectric resonator with high- $T_0$  film. - *Int.J. of Infrared and Millimeter Waves*. - 1994. - 15, N 10. - P. 1631-1642.
10. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т. Охлаждаемый болометр // Положительное решение по заявке N 4908120/09/010854 с приоритетом от 5.01.91.
11. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т., Кондрашин С.К. Температурная зависимость импедансных свойств и энергетическая щель в  $YBaCuO$  // Тезисы докладов 2-ой Всесоюзной конференции по ВТСП, Киев, 25-29 сентября, 1989. - С.154 - 155.
12. Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Velichko A.V., Chukanova I.N., Usoskin A.I. Thin high- $T_0$  superconducting film in micro- and radiowave electromagnetic fields // *Abstr. of ICAM'91, E-MRS Spring Meeting, Strasbourg, France, 1991.* - P. A1-VIII/P20.
13. Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Velichko A.V., Chukanova I.N., Usoskin A.I. High- $T_0$  superconductors properties near  $T_0$ : field penetration depth and microwave effect on

radiowave properties // Abstr. of M<sup>2</sup>S-HTSC, Kanazawa, Japan, 1991. - P.3B-44.

14. Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Velichko A.V., Chukanova I.N. Usoskin A.I. Impedance properties of YBCO thin film in mm and radiowave fields // Abstr. of Inter. Workshop on HTSC thin - films, Rome, Italy, 1991. - P.P40.

15. Velichko A.V., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Cherpak N.T. On a creation possibility of tunable microwave passband filter based on dielectric resonator with high-T<sub>c</sub> film // Abstr. of XXIV General Assembly of URSI, Kyoto, Japan, August 25 - September 2, 1993. - P.584.

16. Величко А.В., Ижик Э.В., Кириченко А.Я., Черпак Н.Т., Усошкин А.И., Чуканова И.Н. Импедаансные свойства тонкой пленки YBaCuO в поле квазиоптического диелектрического резонатора. Глубина проникновения. // Тезисы докладов III Всесоюзной олимпиады по ВТСП, Харьков, ФТИИТ, 15-19 апреля, - 1991. - С.134 - 135.

17. Cherpak N.T., Izhyk E.V., Kirichenko A.Ya., Kosmyna M.B., Velichko A.V. Dielectric Constant Characterization of Large - Area Substrates in Millimeter Wave Band. // Int.J. of Infrared and Millimeter Waves.- 1996.- 17, N 5.- P. 819-831.

Ижик Э.В. Импедансные свойства высокотемпературных сверхпроводников  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  конечной толщины в полях СВЧ и ВЧ диапазонов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03. - Радиопизика. - Институт радиопизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины, Харьков, 1997.

В диссертационной работе развиг способ измерения импедансных свойств высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с использованием квазиоптических диалектрических резонаторов (КДР) в миллиметровом диапазоне волн и проведены экспериментальные исследования поверхностного импеданса  $Z_B$  керамических и пленочных образцов ВТСП на подложках из  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{LaAlO}_3$  и  $\text{MgO}$  с учетом их конечной толщины. Немонотонная температурная зависимость  $Z_B$  на подложке из  $\text{SrTiO}_3$  объясняется интерференцией волн в подложке. Обнаружен пик ВЧ потерь (на частоте  $\sim 10$  МГц) и показана его гистерезисная природа.

Izhuk E.V. Microwave and radiowave impedance properties of  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  high-temperature superconductors of finite thickness. - The manuscript.

The dissertation advanced for a scientific degree of a candidate of physics and mathematics in the speciality 01.04.03 - Radiophysics. - A.Usikov Institute of Radiophysics and Electronics, NAS of Ukraine, Kharkov, 1997.

A new experimental approach for the measurements of the impedance properties high-temperature superconductors (HTSC) in mm wave range has been developed. Using quasi-optical dielectric resonator (QDR) excited with the higher type azimuthal oscillations the surface impedance  $Z_B$  of ceramic and thin film samples on the  $\text{SrTiO}_3$ ,  $\text{LaAlO}_3$  and  $\text{MgO}$  substrates was studied. It is pointed out that nonmonotoneous temperature dependences of  $Z_B$  and radiofrequency (RF) absorption of thin films on  $\text{SrTiO}_3$  substrate are due to finite thickness of the samples. The observed maximum of RF absorption is shown to be caused by hysteretic losses in HTSC.

Наукове видання

Іжик Едуард Валентинович

ІМПЕДАНСНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ НАД-  
 ПРОВІДНИКІВ  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  СКІНЧЕНОЇ ТОВЩИНИ В  
 ПОЛЯХ НВЧ ТА ВЧ ДІАПАЗОНІВ

Відповідальний за випуск О.Я.Кириченко

Під. до друк. 22.05.97р. Формат 60\*84/16.

Папір офс. Офс. друк. Умов.-друк. ар. 1.1

Тираж 100 прим. Зак. N 34 . Безкоштовно.

---

Ротапринт ІРЕ НАН України

Харків-85, вул. Акад. Проскури, 12.