

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР  
ім. Б. І. Веркіна

На правах рукопису  
УДК 537.312. 62

**Любимова Ірина Олегівна**

**НЕЛІНІЙНИЙ ВІДГУК ЖОРСТКИХ  
НАДПРОВІДНИКІВ НА АСИМЕТРИЧНЕ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ЗБУДЖЕННЯ**

01.04. 22 - надпровідність

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття вченого ступеня  
кандидата фізико-математичних наук

Харків - 1997 р.

Дисертація є рукопис.

Робота виконана у Харківському державному університеті.

Науковий керівник

Доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
В.О. Ямпольський  
(провід. наук. співр., ІРЕ НАН України)

Офіційні опоненти:

Доктор фіз.-мат. наук, професор  
Оболенський Михайло Олександрович  
(зав. кафедрою, ХДУ)  
Доктор фіз.-мат. наук,  
старший науковий співробітник  
Рожавський Олександр Семенович  
(провід. наук. співр., ФТІНТ НАН України).

Провідна установа:

Інститут Фізики НАН України, Київ

Захист відбудеться "23" *грудня* 1997 р. о 15 годині на засіданні  
Спеціалізованої вченої ради К02. 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 бібліотеці ФТІНТ НАН України, Харків,  
пр. Леніна, 47.

Автореферат розіслано "21" *грудня* 1997 р.

Вчений секретар

Спеціалізованої вченої ради

доктор фізико-математичних наук

Сиркін Є. С.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00751631 (N)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Цю дисертацію присвячено дослідженню нелінійних електродинамічних властивостей жорстких надпровідників у критичному стані. В рамках моделі критичного стану вивчено відгук надпровідної пластини на різні реалізації асиметричного електромагнітного збудження.

Актуальність теми дисертації. Явище надпровідності викликає великий інтерес у дослідників не тільки з точки зору своєї прикладної цінності, але і як особлива область вивчення фундаментальних властивостей твердих тіл. При заданих значеннях зовнішніх параметрів максимальне значення критичного надструму досягається, як відомо, в жорстких надпровідниках, завдяки чому дослідження їхніх електромагнітних властивостей здається найбільш актуальним, особливо якщо врахувати той факт, що більшість високотемпературних надпровідників (ВТНП) є жорсткими.

Однією з найпростіших, але в той же час такою, що добре описує електромагнітні властивості жорстких надпровідників, є модель критичного стану [1]. В рамках цієї моделі розподіл магнітної індукції  $\vec{B}$  знаходиться з рівняння

$$\operatorname{rot} B = \frac{4\pi}{c} j_c \frac{E}{E} \quad (1)$$

Тут  $\vec{E}$  і  $j_c$  являють собою електричне поле і критичну щільність струму, усереднені по фізично малому об'єму, що вкочас велику кількість вихоревих ниток.

Рівняння моделі критичного стану містять унікальний вид нелінійності, що призводить до ряду яскравих і цікавих фізичних ефектів. Нажаль, порівняно мало авторів, що займаються вивченням жорстких надпровідників, присвячують свої роботи дослідженню наслідків простої і зручної моделі критичного стану. Проте, в останній час з'явилося декілька цікавих досліджень, проведених в рамках цієї моделі (див., наприклад, [2,3]). Однак всі ці роботи розглядають тільки випадок двобічного збудження надпровідникового зразка. З експериментальної ж і прикладної точки зору викликає інтерес не тільки двобічне, але й асиметричне збудження надпровідників. Зрозуміло, що великий вплив на відгук надпровідникових зразків на одnobічне електромагнітне збудження створює підкладка. Крім того, у випадку асиметричного збудження надпровідника можливе з'явлення принципово нових ефектів, характерних тільки для даної ситуації. Дослідженню цих нових ефектів і присвячено цю дисертацію.

Зв'язок роботи з науковими програмами досліджень, що проводяться у Харківському державному університеті і в Інституті радіофізики і електроніки НАН України, забезпечувався грантами:

-УКРАЇНСЬКИЙ грант "Теоретичні дослідження електромагнітних, спінових і нелінійних властивостей твердих тіл" ДКНТ України № 0194U012804 (1996 р.);

-УКРАЇНСЬКИЙ грант "Теоретичні дослідження нелінійних електродинамічних властивостей текстурованих високотемпературних надпровідників" в рамках державної програми "Високотемпературна надпровідність" ДКНТ України № 08.01.01./004 До-95 (шифр "Колапс");

-УКРАЇНСЬКО-РОСІЙСЬКО-МЕКСИКАНСЬКИЙ грант "Нелінійна електродинаміка високотемпературних надпровідників в критичному стані: фізичні явища і безконтактні засоби аналізу" Мексиканського комітету з науки і технологій (CONACyT) № 3004 E 9306.

Мета і задачі дослідження: отримання інформації про нелінійний відгук зразків жорсткого надпровідника на асиметричне електромагнітне збудження. Для досягнення цієї мети було поставлено і вирішено ряд задач, що описують найважливіші реалізації асиметричного збудження надпровідникової пластини, а саме:

1. Досліджувався відгук надпровідника, що лежить на підкладці, на збудження його вільної поверхні електромагнітною хвилею. Для цього розраховувались поверхневий імпеданс і поглинна спроможність надпровідної пластини в функції амплітуди хвилі, що падає.

2. Вивчалася поведінка часової залежності електричного поля на вільній поверхні надпровідникової пластини, що опромінювалася двома електромагнітними сигналами різної частоти і амплітуди.

3. Досліджувався відгук пластини жорсткого надпровідника на збудження з протилежних її боків електромагнітними хвилями з різними частотами і амплітудами.

При рішенні поставлених задач аналізувався розподіл поля всередині надпровідника, поведінка поверхневого імпеданса в функції амплітуди хвилі, що падає, а також в залежності від діелектричних властивостей матеріалу підкладки.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що в дисертації вперше особисто пошукувачем було:

-показано, що розмірний ефект при однобічному збудженні надпровідної пластини є дуже чутливим до діелектричних властивостей матеріалу підкладки.

-встановлено, що при однобічному збудженні надпровідникової пластини двома різними електромагнітними сигналами виникають стрибки в часовій залежності електричного поля на опромінюваній поверхні зразка, при чому вигляд цих стрибків, їхнє положення і самий факт їхнього існування залежать від діелектричних властивостей підкладки.

-передбачено новий ефект стимульованої прозорості надпровідникової пластини, який полягає ось у чому. Якщо пластина надпровідника опромінюється з двох боків електромагнітними сигналами високої і низької частоти відповідно, то різке зростання низькочастотного поверхневого імпеданса, яке свідчить про просвічування пластини низькочастотною хвилею, може спостерігатися при малих значеннях амплітуди низькочастотної хвилі, коли за відсутністю зустрічної високочастотної

хвилі просвічування немає. Інакше, якщо в зразку є область, в якій обидва сигнали співіснують, то завдяки їхній нелінійній взаємодії низькочастотна хвиля просвічує надпровідникову пластину і виникає розмірний ефект.

Практичне значення отриманих результатів. Результати дисертації можуть бути використані при створенні безконтактних засобів виміру параметрів критичного стану надпровідників, а також в розробках і створенні нових високочутливих приймачів некогерентного електромагнітного випромінювання.

Особистий вклад дисертанта в розробку наукових результатів полягає в проведенні всіх аналітичних і чисельних розрахунків, а також в участі в постановці проблем, що вирішуються, і обговоренні отриманих результатів. Ідеї і розробки по всім роботам за темою дисертації в рівній мірі належать пошукувачу і іншим співавторам робіт.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації доповідалися на: ювілейній науковій конференції, присвяченій 50-річчю кафедри теоретичної фізики ХДУ (Харків 1994); ювілейній науковій конференції, присвяченій 190-річчю Харківського університету (Харків 1995); міжнародній конференції по фізиці низьких температур (Прага 1996); 3-й міжнародній конференції "Фізичні явища в твердих тілах" (Харків 1997); щорічній конференції Американського фізичного товариства (March Meeting) (Канзас Сіті 1997).

Публікації. Основні результати дисертації опубліковано в 4-х статтях, список яких наведений в кінці автореферату.

Методологія. Основні результати дисертації отримані за допомогою теоретичного аналізу нелінійної системи електродинамічних рівнянь, що описують властивості жорстких надпровідників у критичному стані.

Основні положення, що підлягають захисту:

1. Встановлено, що завдяки нелінійності матеріального рівняння розмірний ефект в пластині жорсткого надпровідника при однобічному збудженні виникає в вигляді особливостей поведінки поверхневого імпеданса в функції амплітуди радіохвилі. Ці особливості виникають в умовах, коли електромагнітна хвиля повністю просвічує зразок.

2. Показано, що розмірний ефект в жорстких надпровідниках є чутливим до діелектричних властивостей підкладки. У випадку, коли в ролі підкладки виступає оптично щільне середовище (діелектрик з великим  $\epsilon$  або метал), реальна частина поверхневого імпеданса як функція амплітуди  $H_0$  має максимум при  $H_0 \approx 4H_p / 3$ .

Графік уявної частини імпеданса в таких умовах має приступкову особливість. В протилежному випадку, коли підкладка є оптично м'яким середовищем (в граничному випадку - вакуум), спостерігається різке зростання реальної частини поверхневого імпеданса, що починається зі значень  $H_0 \geq H_p$  з наступним виходом на асимптотику  $R \approx 4\pi / c$  при  $H_0 \rightarrow \infty$ .

3. Встановлено, що нелінійна взаємодія електромагнітних хвиль з різними амплітудами і частотами, які опромінюють пластину жорсткого надпровідника з одного боку, призводить до незвичайного ефекту - до виникнення стрибків в часовій залежності електричного поля  $E(t)$  на поверхні зразка. Поведінка функції  $E(t)$  істотно залежить від значень амплітуд радіохвиль. Якщо амплітуди є великими настільки, що електромагнітне поле повністю просвічує зразок, то положення стрибків поля  $E(t)$ , величина стрибків і навіть самий факт їхнього існування в значній мірі визначаються діелектричними властивостями підкладки.

4. Передбачено нове нелінійне явище стимульованої прозорості пластини жорсткого надпровідника, що опромінюється радіохвилями різних частот і амплітуд з двох боків. Показано, що завдяки нелінійній взаємодії цих хвиль в середині надпровідника розмірний ефект може спостерігатися навіть в умовах, коли низькочастотна хвиля, що падає на пластину з амплітудою  $H_1$  і частотою  $\omega_1$ , не досягає протилежної грані зразка, якщо назустріч їй в пластину проникає інша хвиля (з амплітудою  $H_2$  і частотою  $\omega_2$ ). Таким чином, хвиля на частоті  $\omega_2$  стимулює просвічування пластини низькочастотним сигналом  $\omega_1$ .

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з списку умовних позначень, вступу, трьох розділів, висновків і списку використаних джерел, що включає 98 найменувань. Вона містить 18 малюнків. Загальний обсяг дисертації - 129 сторінок машинописного тексту.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано стислу інформацію про об'єкт досліджень, обґрунтовано актуальність теми проведених досліджень, вказано мету і задачі досліджень, описано структуру дисертації. Наведені основні положення, що підлягають захисту. Наведено список конференцій, на яких доповідалися результати дисертації.

У першому розділі вивчено розмірний ефект в жорстких надпровідниках при однобічному збудженні. При двобічному збудженні це явище є аналогічним добре відомому з фізики нормальних металів ефекту Фішера-Као [4]. Він виявляється в особливостях поверхневого імпеданса зразка в функції різноманітних параметрів задачі: реальна частина імпеданса має характерний максимум в умовах, коли глибина проникнення хвилі порівнюється з товщиною зразка. Специфіка надпровідника полягає в тому, що завдяки нелінійності середовища максимум Фішера-Као може спостерігатися в функції амплітуди хвилі, що падає. В дисертації показано, що в випадку однобічного збудження розмірний ефект набуває ряд характерних для даної ситуації особливостей, пов'язаних, передусім, з впливом діелектричних властивостей матеріалу підкладки.

В розділі спочатку розраховується залежність поверхневого імпеданса  $Z$  пластини жорсткого надпровідника товщини  $d$  від амплітуди хвилі, що падає, в рамках моделі критичного стану. Поряд з імпедансом у розгляд введено величину  $A$ , що характеризує поглинну спроможність надпровідникового зразка, і визначається як відношення різниці енергій хвилі на опромінюваній поверхні зразка і на його протилежному боці до повної енергії хвилі, що падає. Треба підкреслити, що у випадку однобічного збудження реальна частина поверхневого імпеданса і величина  $A$  характеризують різні фізичні величини. Значення реальної частини поверхневого імпеданса є пов'язаним з енергією хвилі, що увійшла в зразок, тоді як величина  $A$  визначає частину цієї енергії, що поглинається у пластині (в  $A$  не враховується енергія хвилі, що вийшла із зразка через протилежний бік).

Для знаходження поверхневого імпеданса  $Z$  і поглинної спроможності  $A$  вирішується рівняння критичного стану (1) спільно з законом Фарадея і з граничними умовами

$$B(0, t) = H_0 \cos(\omega t), \quad B(d, t) = \varepsilon E(d, t). \quad (2)$$

Тут припускається, що пластинка займає просторову область  $0 < x < d$ .

У випадку достатньо малих амплітуд  $H_0 < H_p = 4\pi j_c d / c$  електромагнітна хвиля не досягає підкладки. В такій ситуації величина  $A$  з точністю до множника  $c / \pi$  збігається з реальною частиною поверхневого імпеданса. В цій області амплітуд

$$Z = \frac{8\mu\omega h_0 d}{3c^2} \left( 1 - \frac{3\pi i}{4} \right), \quad A = (c / \pi) \operatorname{Re} Z. \quad (3)$$

Тут  $\mu$  - ефективна магнітна проникність керамічного зразка (якщо зразок являє собою монокристал або плівку, то  $\mu = 1$ ),  $h_0 = H_0 / H_p$ . Очевидно, що властивості підкладки не впливають на величину імпеданса.

Розмірний ефект виникає при досягненні амплітудою хвилі значення  $H_p$ , коли електромагнітний сигнал повністю просвічує пластину і погасає вже у підкладці. Характер розмірного ефекту виявляється дуже чутливим до значення параметра  $\alpha = \mu\omega\varepsilon^{1/2} d / c$ , що визначає діелектричні властивості підкладки.

У випадку  $\alpha \gg 1$  (оптично щільна діелектрична або металева підкладка) практично вся електромагнітна енергія, що пройшла скрізь пластину, відбивається від інтерфейсу надпровідник-підкладка. При цьому за своїми фазовими характеристиками відбита хвиля повністю відповідає другій хвилі, що опромінює пластину з другого її боку в задачі про двобічне збудження. Тому, саме в такій

ситуації розмірний ефект виявляється таким же чином, як в задачі про двобічне збудження: поверхневий опір і поглинна спроможність зразка мають максимум в функції амплітуди в області  $h_0 = 4/3$ . При  $\alpha \rightarrow \infty$

$$\frac{R(h_0)}{R(1)} = \frac{A(h_0)}{A(1)} = \frac{3}{h_0} - \frac{2}{h_0^2}. \quad (4)$$

Уявна частина імпеданса має приступкову особливість при тому ж значенні  $h_0$ .

Цілком інакше розмірний ефект виявляється в протилежному випадку  $\alpha \ll 1$  (оптично м'яка підкладка). При  $h_0 > 4/3$  із збільшенням амплітуди хвилі реальна частина імпеданса продовжує зростати. Більш того, швидкість цього зростання значно збільшується (в  $\alpha^{-1} \gg 1$  разів), і при  $h_0 \gg 1$  поверхневий опір прагне до імпедансу вакуума  $4\pi / c$ . Істотної зміни зазнає також поведінка поглинної спроможності надпровідника:

$$\frac{A(h_0)}{A(1)} = \frac{1}{\alpha h_0^2} \left[ 6(h_0^2 - 1)^{1/2} - 6 \arccos(h_0^{-1}) + \alpha \right]. \quad (5)$$

Функція  $A(h_0)$ , як і раніше, має максимум, величина якого виявляється порядку  $\alpha^{-1} \gg 1$ .

Для порівняння в даному розділі дисертації проведено аналіз розмірного ефекту в іншій актуальній для жорстких надпровідників моделі - так званої моделі термоактивованої течії магнітного потоку (TAFF). Виявилось, що і в моделі TAFF розмірний ефект є надто чутливим до діелектричних властивостей підкладки.

Другий розділ дисертації присвячено аналізу нелінійної взаємодії радіохвиль з різними амплітудами і частотами, які опромінують пластину жорсткого надпровідника з одного з її боків. Відомо [3], що у випадку двобічного електромагнітного збудження надпровідникової пластини специфічна нелінійність рівняння критичного стану (1) призводить до надто незвичайного ефекту в взаємодії хвиль - до стрибків в часовій залежності електричного поля  $E(t)$  на поверхні зразка. Природа цих стрибків пов'язана з характерними для критичного стану переломами в просторовому розподілі магнітної індукції, які, в свою чергу, зумовлені сингулярністю правої частини рівняння (1) в точках обернення електричного поля в нуль. Зрозуміло, що в умовах однобічного збудження просторовий розподіл магнітної індукції відрізняється від випадку двобічного збудження. Отже, стрибки електричного поля  $E(t)$  також повинні виявитися іншими.

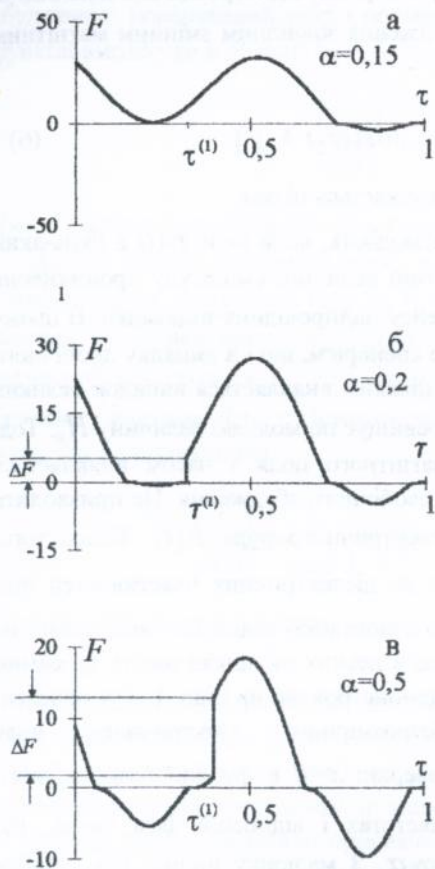
Для аналізу поведінки поля  $E(t)$  на поверхні зразка в дисертації вивчено відгук надпровідникової пластини на однобічне збудження зовнішнім змінним магнітним полем вигляду

$$H(t) = H_1 \cos(\omega_1 t) + H_2 \cos(\omega_2 t + \chi). \quad (6)$$

Відношення частот  $\omega_2 / \omega_1$  для простоти припускається цілим.

У випадку малих амплітуд хвиль, що взаємодіють, коли поле  $H(t)$  в будь-який момент часу не перевищує по своїй абсолютній величині амплітуду проникнення  $H_p$ , електромагнітна хвиля не досягає інтерфейсу надпровідник-підкладка. В цьому випадку взаємодія хвиль проходить за тим же сценарієм, що і в випадку двобічного електромагнітного збудження. Значно більш цікавим виявляється випадок великих амплітуд, коли в деякі моменти поле  $H(t)$  перевищує по модулю величину  $H_p$ . Тоді еволюція просторового розподілу електромагнітного поля з часом виявляється принципово новою у порівнянні з випадком двобічного збудження. Це призводить до якісних змін в умовах появи стрибків електричного поля  $E(t)$ . Більш того, стрибки  $E(t)$  виявляються дуже чутливими до діелектричних властивостей підкладки. Проведене дослідження показало, що властивості підкладки впливають не тільки на положення і амплітуду стрибків, але в деяких випадках навіть на самий факт їхнього існування. Це ствердження продемонстровано на Мал. 1. Тут наведені результати чисельного розрахунку безрозмірного електричного поля  $F = (c / \omega_1 d H_p) E(t)$  на опромінюваній поверхні  $x=0$  в функції безрозмірного часу  $\tau = \omega_1 t$  при однакових амплітудах, частотах і відносній фазі хвиль, що взаємодіють, але різних значеннях параметру  $\alpha$ . З малюнку видно, що стрибок поля  $E(t)$  з'являється тільки у випадку, якщо параметр  $\alpha$  перевищує певне критичне значення  $\alpha_{кр1}$ . Стрибок відбувається від значення  $F=0$  до деякої величини  $\Delta F$ . При перевищенні параметром  $\alpha$  другого критичного значення  $\alpha_{кр2}$  характер стрибка змінюється - стрибок починається з ненульового значення електричного поля.

Експерименти по спостереженню стрибків електричного поля в умовах однобічного електромагнітного збудження до нинішнього часу не ставилися. Однак в роботі [4] спостерігалися стрибки поля  $E(t)$  на поверхні надпровідникових пластин і циліндрів при двобічному збудженні, що в випадку малих амплітуд хвиль є повністю аналогічним стрибкам при однобічному збудженні.



Мал.1. Функція  $F(\tau)$  при  $h_1=4$ ,  $h_2=1,5$ ,  $\omega_2 / \omega_1 = 10$ ,  $\chi = 0$ , обчислена при різних значеннях параметру  $\alpha$ : (а)  $\alpha=0,15$ ; (б)  $\alpha=0,2$ ; (в)  $\alpha=0,5$ .

області їхнього проникнення не перетинаються, так що хвилі не взаємодіють, низькочастотний поверхневий імпеданс по порядку величини дорівнює характерному для провідників значенню  $Z_{\omega_1} \approx (4\pi / c^2)\omega_1 d$ , тобто містить малий параметр  $\alpha$  у порівнянні з імпедансом вакууму. Електромагнітне поглинання в цьому випадку

В третьому розділі дисертації передбачено і проаналізовано нове нелінійне явище в електродинаміці жорстких надпровідників - ефект стимульованої прозорості пластини під впливом другої електромагнітної хвилі, що розповсюджується назустріч основному сигналу. В роботі показано, що розмірний ефект в надпровідниковому зразку може спостерігатися навіть в тому випадку, коли низькочастотна хвиля з амплітудою  $H_1$  і частотою  $\omega_1$ , що падає на поверхню  $x=0$ , не може самостійно просвітити пластину. Справді, якщо назустріч низькочастотному сигналу з боку поверхні  $x=d$  розповсюджується друга хвиля з амплітудою  $H_2$  і частотою  $\omega_2$ , і просторові області проникнення хвиль перетинаються, то хвилі починають взаємодіяти. В результаті взаємодії всюди в зразку з'являються усі комбіновані гармоніки  $n\omega_1 \pm m\omega_2$  хвиль ( $m$  і  $n$  - цілі числа), в тому числі і перша низькочастотна гармоніка  $\omega_1$ . А це означає, що завдяки взаємодії з високочастотною хвилею низькочастотний сигнал просвітив весь зразок, тобто має місце ефект стимульованої прозорості.

Цей ефект виявляється в вигляді особливостей низькочастотного поверхневого імпеданса  $Z_{\omega_1}$  і низькочастотного поглинання  $L$  в функції амплітуди високочастотного сигналу. Якщо амплітуди хвиль, що розповсюджуються назустріч друг другу, є малими настільки, що об-

також визначається цим параметром. Інакше, при малих амплітудах хвиль, що розповсюджуються назустріч друг другу, імпеданс  $Z_{\omega 1}$  і поглинання  $L$  можна вважати рівними нулю з точністю до членів порядку  $\alpha$ .

Із збільшенням амплітуди високочастотної хвилі  $H_2$  при досягненні нею порогового значення  $H_{\text{пор}}$  у зразку з'являється область співіснування хвиль і вони починають взаємодіяти. З цього моменту зразок стає прозорим для низькочастотної хвилі, і, як слідство, виникає розмірний ефект. Це виявляється в бурхливому зростанні низькочастотних поверхневого імпеданса і поглинання - вони швидко збільшуються і зростають в  $\alpha^{-1} \gg 1$  раз.

Наведемо отримані в дисертації асимптотики безрозмірних поверхневого опору  $cR_{\omega 1} / \pi$  і поглинання  $L$  при малих і великих перевищеннях  $(H_2 - H_{\text{пор}}) / H_p$  амплітудою високочастотної хвилі порогового значення. При  $(H_2 - H_{\text{пор}}) / H_p \gg 1$

$$r \approx L \approx (H_p / H_1) \left[ (H_2 - H_{\text{пор}}) / H_2 \right]^{3/2}, \quad (7)$$

а при  $H_2 \gg H_p$

$$r \approx 4 \left( 1 - \frac{2H_p}{\pi H_2} \right), \quad L \approx \frac{4H_p}{\pi H_2}. \quad (8)$$

Порівняння формул (7) і (8) показує, що поглинання  $L$  має максимум порядку одиниці при  $H_2 \approx H_p$ . Проведений чисельний аналіз дозволив встановити, що поверхневий опір з зростанням  $H_p$  монотонно наближається до імпедансу вакууму.

Відзначимо, що ефект стимульованої прозорості спостерігався експериментально [5].

В заключному розділі сформульовано основні висновки дисертації.

## ВИСНОВКИ

Ця дисертація присвячена теоретичному аналізу проблеми електродинамічного опису відгука жорстких надпровідників на однобічне і асиметричне збудження. Незважаючи на те, що велика кількість експериментів ставиться саме в умовах однобічного електромагнітного збудження, теоретичний аналіз властивостей жорстких надпровідників в такий ситуації досі не проводився. В дисертації дослідження проведено в рамках моделі критичного стану. Ця найбільш проста з усіх, що існують, модель з одного боку є істотно нелінійною і забезпечує ряд дуже

цікавих, характерних тільки для жорстких надпровідників явищ, а з іншого боку має досить широку область застосування.

В першому розділі дисертації вперше показано, що відгук пластин жорсткого надпровідника на однобічне електромагнітне збудження істотним образом залежить від діелектричних властивостей підкладки. Зокрема, підкладка виявляє визначальний вплив на залежність поверхневого імпеданса і поглинної спроможності пластини від амплітуди хвилі. Встановлено, що в випадку оптично щільної підкладки поверхневий опір має в функції амплітуди яскраво висловлений максимум в області  $H_0 \approx H_p$  (розмірний ефект). В випадку оптично м'якої підкладки розмірний ефект виявляється цілком інакше. В області  $H_0 > H_p$  відбувається надто бурхливе зростання поверхневого опору. Для порівняння в цьому ж розділі проведено аналіз розмірного ефекту в іншій актуальній для жорстких надпровідників електродинамічній моделі - так званій моделі термоактивованої течії магнітного потоку (TAFF). Ця модель справедлива в області високих температур, близьких до  $T_c$ . Виявилось, що і в моделі TAFF розмірний ефект є дуже чутливим до діелектричних властивостей підкладки.

Другий розділ присвячено аналізу досить своєрідного прояву нелінійної взаємодії електромагнітних хвиль з різними частотами в пластині жорсткого надпровідника при однобічному збудженні. Незвичайна нелінійність матеріального рівняння в моделі критичного стану призводить до того, що внаслідок взаємодії хвиль на поверхні зразка виникають стрибки електричного поля в функції часу. В випадку, коли електромагнітне поле не просвічує зразок, стрибки електричного поля в принциповому відношенні протікають за тим же сценарієм, що і при двобічному збудженні. Значно цікавішим виявляється випадок великих амплітуд хвиль, що взаємодіють, коли настає повне просвічування надпровідникової пластини. В цьому випадку положення, амплітуда, форма, і навіть самий факт існування стрибків електричного поля є дуже чутливими до діелектричних властивостей підкладки.

В третьому розділі передбачено нове нелінійне явище во взаємодії радіохвиль з різними частотами, що опромінюють надпровідникову пластину з протилежних її боків. Виявляється, що навіть в випадку малих амплітуд однієї з взаємодіючих хвиль (наприклад, низькочастотної), коли вона не може самостійно просвітити пластину, друга хвиля, що розповсюджується їй назустріч, призводить до виходу першої хвилі із зразка. Цей ефект стимульованої прозорості призводить до того, що низькочастотні поверхневий імпеданс і поглинання зазнають різних змін в функції амплітуди високочастотної хвилі. Імпеданс і поглинання є малими в випадку, коли області проникнення хвиль, що розповсюджуються назустріч друг другу, не перетинаються. Якщо амплітуди хвиль є великими настільки, що в зразку з'являється

область їхнього перекриття, низькочастотний поверхневий імпеданс і поглинання дуже зростають.

Ряд результатів, отриманих в дисертації, має експериментальне підтвердження. Зокрема, в експериментах спостерігалися стрибки у часовій залежності електричного поля на поверхні надпровідника в умовах нелінійної взаємодії хвиль з різними частотами. Крім того, експериментально спостерігався ефект стимульованої прозорості.

#### Список літератури, що цитувалася в авторефераті:

1. Bean C. P. Magnetization of hard superconductors//Phys. Rev. Lett. – 1962. – V. 8, No 6. – P. 250-253.
2. Baltaga I. V. et al. Collapse of a transport current in hard superconductors//ФНТ. – 1995. – V. 21, No 4. – P. 411-420.
3. Perez-Rodriguez F. et al. Interaction of electromagnetic waves in hard superconductors//Physica C. – 1995. – V. 251. – P. 50-60.
4. Fisher H., Kao Y. H. Direct determination of skin depth by a radiofrequency size effect//Solid State Commun. – 1969. – V. 7, No 2. – P. 275-277.
5. Velichko A. V. et al. Microwave and radiowave surface resistance of high-quality YBaCuO ceramics. Nonlinear aspects//Physica C. – 1996. – V. 261. – P. 220-228.

#### СПИСОК СТАТЕЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ.

1. Perez Rodriguez F., Makarov N. M., Yampol'skii V. A., Lyubimova I. O., Lyubimov O. I. Size effect in hard superconductors at unilateral excitation//Appl. Phys. Lett. – 1995. – V. 67, No 3. – P. 419-421.
2. Perez Rodriguez F., Makarov N. M., Yampol'skii V. A., Lyubimova I. O., Lyubimov O. I. Effect of substrate on the ac response of superconductors with strong pinning to an incident plane wave//J. Appl. Phys. – 1996. – V. 80, No 11. – P. 6370-6377.
3. Любимова И. О., Балтага И. В., Кац А. А., Ямпольский В. А., Перес-Родригес Ф. Взаимодействие электромагнитных волн в пластине жесткого сверхпроводника при одностороннем возбуждении//ФНТ. – 1997. – Т. 23, No 4. – С. 389-398.
4. Derev'anko S. A., Lyubimova I. O., Yampol'skii V. A., Perez Rodriguez F. Stimulated transparency of a superconducting plate caused by nonlinear interaction of electromagnetic waves//Appl. Phys. Lett. – 1997. – V. 71, No 7. – P. 953-955.
5. Lyubimov O.I., Lyubimova I.O., Yampol'skii V.A., Perez Rodriguez F. Size effect in high-temperature superconductors // Rev. Mex. Fis. – 1997. – V. 43, No 4. – P. 592-599.

Матеріали дисертації викладені також у 6 тез доповідей на конференціях. В дисертації міститься повний список цих робіт.

Любимова І.О. Нелінійний відгук жорстких надпровідників на асиметричне електромагнітне збудження. Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04. 22 - надпровідність. Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України, Харків, 1997.

Дисертація присвячена дослідженню нелінійних електродинамічних властивостей пластин жорстких надпровідників у критичному стані. Вивчено відгук зразка на різні види асиметричного електромагнітного збудження. Досліджено вплив діелектричних властивостей підкладки на прояв розмірного ефекта при однобічному збудженні. Вивчені стрибки у часовій залежності електричного поля на поверхні зразка при його однобічному опроміненні двома радіохвилями з неоднаковими частотами. Показано, що важлива роль у цьому явищі належить підкладці - від її властивостей залежать не тільки положення та амплітуда стрибків, але навіть самий факт їх існування. Передбачено нове явище у нелінійній електродинаміці жорстких надпровідників - стимульована прозорість зразка при його опромінюванні з двох боків електромагнітними сигналами різних частот та амплітуд. Результати дисертації можуть бути впроваджені при створенні безконтактних методів вимірювання параметрів критичного стану та використані при розробці і створенні нових високочутливих приймачів некогерентного електромагнітного випромінювання.

Ключові слова: жорсткий надпровідник, модель критичного стану, поверхневий імпеданс, розмірний ефект, стимульована прозорість.

Любимова И.О. Нелинейный отклик жестких сверхпроводников на асимметричное электромагнитное возбуждение. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.22 - сверхпроводимость. - Физико-технический институт низких температур НАН Украины, Харьков, 1997.

Диссертация посвящена исследованию нелинейных электродинамических свойств пластин жестких сверхпроводников в критическом состоянии. Изучен отклик образца на различные виды асимметричного электромагнитного возбуждения. Исследовано влияние диэлектрических свойств подложки на проявление размерного эффекта при однобичнем возбуждении. Изучены скачки во временной зависимости электрического поля на поверхности образца при его однобичнем облучении двумя радиоволнами с отличающимися частотами. Показано, что в этом явлении важная роль принадлежит подложке - от ее свойств зависят не только положения и амплитуды скачков, но даже сам факт их существования. Предсказано новое явление в нелинейной электродинамике жестких сверхпроводников - стимулированная прозрачность образца при его облучении с двух сторон электромагнитными сигналами с различными частотами и амплитудами.

Результаты диссертации могут быть внедрены при создании бесконтактных методов измерения параметров критического состояния и использованы в разработке и создании новых высокочувствительных приемников некогерентного электромагнитного излучения.

Ключевые слова: жесткий сверхпроводник, модель критического состояния, поверхностный импеданс, размерный эффект, стимулированная прозрачность.

Lyubimova I. O. Nonlinear response of hard superconductors on asymmetrical electromagnetic excitation. Manuscript.

Ph. D. thesis in physics and mathematics, speciality 01.04. 22 - superconductivity. Institute for Low Temperature Physics and Engineering of NAS, Kharkov, Ukraine, 1997.

The thesis is devoted to an investigation of the nonlinear electromagnetic properties of plates of hard superconductors in the critical state. A sample response on different kinds of the asymmetrical electromagnetic excitation is studied. The role of the dielectric properties of a substrate in the manifestation of the size effect at unilateral excitation is analyzed. Jumps in the temporal dependence of the electric field at the sample surface at its unilateral irradiation by two radio-waves of different amplitudes and frequencies is studied. The important role of the substrate in this phenomenon is demonstrated. Its properties effect not only on the positions and magnitudes of the jumps but even on the fact of their existence. A new phenomenon in the nonlinear electrodynamics of hard superconductors, namely, the effect of stimulated transparency of the sample at its irradiation by different waves from different sides is predicted and analyzed. The results of this work can be used in elaboration of new contactless methods of measurements of the critical state parameters and in creation of new high-sensitive detectors of noncoherent electromagnetic radiation.

Key words: hard superconductor, the critical state model, the surface impedance, the size effect, the stimulated transparency.

434284

Безплатно

Ав 38.884

**ЛЮБИМОВА ІРИНА ОЛЕГІВНА****НЕЛІНІЙНИЙ ВІДГУК ЖОРСТКИХ НАДПРОВІДНИКІВ  
НА АСИМЕТРИЧНЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ЗБУДЖЕННЯ**

Відповідальний за випуск доктор фіз.-мат. наук Безуглий Є.В.

Підписано до друку 19.11. 97.

Фіз. п. л. 2 Уч.-вид. п. л. 1

Тираж 100 екз. Зам. 35/97. Безплатно

---

Ротапрінт ФТІНТ НАН України,  
310164 Харків, пр. Леніна, 47.