МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В.Н. КАРАЗІНА
ФІЗИКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології

Пояснювальна записка

до дипломної роботи

за освітньо-кваліфікаційним рівнем «магістр»

«Взаємодія надпровідних оболонок з магнітними полями малої напруженості»

Виконав: студент 2 курсу, групи НФ-61
Тарасенко А.В.

Спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
Освітня програма : Прикладна фізика енергетичних систем.

Керівник доктор фізико-математичних наук, професор ТкаченкоВ.І.
Рецензент к.ф.-м.н., ст. н. с Братченко М.І.

Харків - 2018 року

Додаток 18

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна

Факультет фізико-енергетичний
Кафедра нетрадиційних енерготехнологій та екології
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Напрям підготовки 6.040204 прикладна фізика
Спеціальність 105.Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В. І. Ткаченко
підпис ініціали, прізвище

"____"_____20___року

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

_____Тарасенко Аліна Володимиріна_____
(прізвище, ім'я, по батькові студента)

1.Тема роботи Взаємодія надпровідних оболонок з магнітними полями малої напруженості

керівник роботи Ткаченко В. І. проф., доктор ф-м наук
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від "___"_____20__року №___

2. Строк подання студентом роботи_____

3. Перелік питань, які потрібно розробити

1.Огляд літературних джерел щодо обраної тематики досліджень;
2.Вибір моделі опису надпровідних об'єктів;
3.Обґрунтування вибору конфігурації надпровідного обєкта;
4.Дослідження взаємодії надпровідного обєкта з постійним однорідним магнітним полем;
5.Дослідження взаємодії надпровідного обєкта з постійним неоднорідним магнітним полем.
6.Виводи.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Літературний огляд
2	Вибір моделі опису надпровідних об’єктів
3	Обґрунтування вибору конфігурації надпровідного об’єкта
4	Дослідження взаємодії надпровідного об’єкта з постійним однорідним магнітним полем
5	Дослідження взаємодії надпровідного об’єкта з постійним неоднорідним магнітним полем.
6	Виводи

5. Дата видачі завдання_____

Студент _____ ____А. В. Тарасенко____
підпис ініціали, прізвище

Керівник роботи _____ ____В.І.Ткаченко__
підпис ініціали, прізвище

Реферат

Тарасенко Аліна Володимирівна. «Взаємодія надпровідних оболонок з магнітними полями малої напруженості»(випускна робота магістра). – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2018. –35 арк.

Робота складається з вступу, трьох розділів, висновку; містить 13 рисунків, 2 діаграми, список використаних джерел з 29 найменувань.

У роботі вивчено взаємодії високотемпературних надпровідників (ВТНП) і надпровідних оболонок зі слабкими магнітними полями, включаючи поля природного походження.[1] Також досліджена взаємодія надпровідних об'єктів, які є ідеальними діамагнетиками. Результати дослідженьвключають в себе експериментальні дані які мають виглядЗD-діагра. Також результати описують розширення діапазону спостереження ефективної взаємодії надпровідних об'єктів у напрямку зниження напруженості магнітних полів[1].

Ключові слова:надпровідники першого і другого типів, ефект Мейсснера, ефект Джозефсона, низькі магнітні поля, критична температура, порожниста сфера, високотемпературні надпровідники.

Реферат

Тарасенко Алина Владимировна. «Взаимодействие сверхпроводящих оболочек с магнитными полями малой напряженности» (выпускная работа магистра). - Харьков: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2018. -35 л.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения; содержит 13 рисунков, 2 диаграммы, список использованных источников из 29 наименований.

В работе изучено взаимодействия высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) и сверхпроводящих оболочек со слабыми магнитными полями, включая поля природного происхождения. [1] Также исследована взаимодействие сверхпроводящих объектов, которые являются идеальными диамагнетиками. Результаты исследований включают в себя экспериментальные данные, которые имеют вид 3D-диаграмм. Также результаты описывают расширение диапазона наблюдения эффективного взаимодействия сверхпроводящих объектов в направлении снижения напряженности магнитных полей [1].

Ключевые слова: сверхпроводники первого и второго типов, эффект Мейсснера, эффект Джозефсона, низкие магнитные поля, критическая температура, полая сфера, высокотемпературные сверхпроводники.

Abstract

Tarasenko Alina Vladimirovna. "Interaction of superconducting shells with magnetic fields of low intensity" (final work of the master). - Kharkiv: KNU named after VN Karazin, 2018. -35s

The work consists of an introduction, three sections, conclusions; contains 13 figures, 2diagrams, a list of used sources of 29 titles.

In this paper, the interaction of high-temperature superconductors (HTSC) and superconducting shells with low magnetic fields, including fields of natureorigin, is studied. [1] The interaction of superconducting objects that are ideal diamagnetic is also investigated. The results of investigations include experimental data in 3D diagrams. The results also describe the spreading regions of effective interaction observation in the direction of reduction of magnetic fields intensity.

***Key words**:* Meissner effect, low magnetic fields, critical temperature, hollow sphere, high-temperature superconductors.

ЗМІСТ

ВСТУП.....8
РОЗДІЛ 1 .....
НАДПРОВІДНІСТЬ.....9
РОЗДІЛ 2 .....
ФІЗИКА НАДПРОВІДНОСТІ.....15
РОЗДІЛ 3 .....
ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ НАДПРОВІДНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗІ СЛАБКИМИ МАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ.....22
ВИСНОВКИ.....32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....33

ВСТУП

Відкриття керамічних високотемпературних надпровідників (ВТНП) та розвиток ВТНП ноу-хау дали широкі можливості для здійснення магнітної левітації та магнітного підвісу об'єктів (магнітів або надпровідників) у магнітних полях. ВТНП взаємодія з малими магнітними полями має велике значення для експериментальної демонстрації левітації фізичного тіла в малих магнітних полях. Як відомо, досить слабкі магніті поля не проникають до товщини ідеального надпровідника (ефект Мейснера). Формально під дією Мейснера магнітна сприйнятливість надпровідника дорівнює$\boldsymbol{\chi = {}^{1}/_{4\pi}}$, як у випадку ідеального діамагнетика. Наприклад, у звичайних діамагнітних речовинах$\boldsymbol{\chi = -(10^{-4} - 10^{-5}}$. Тому надпровідники є діамагнітними зі спонтанними струмами. Ефект Мейснера проявляється в відштовхувальній взаємодії з зовнішнім магнітним полем. Ця взаємодія залежить від параметрів спонтанних струмів та їх розподілу на поверхневому шарі. Феномен левитації надпровідних та магнітних об'єктів у досить сильних зовнішніх магнітних полях (від 100 - 200 Е і вище) добре відомий. Можливість експериментального спостереження та практичного використання левітації надпровідного об'єкта в малих зовнішніх магнітних полях 0,5 - 2 Е (геомагнітні поля) менш очевидна з огляду на технологічні та технічні труднощі. Добре відомо, що один з елементів системи «магніт - надпровідник» може стійко левітувати над поверхнею іншого елемента. Робота вертикальної піднімаючої сили зазвичай пояснює зміщення магнітного поля з об'єму, зайнятого надпровідником (ідеальний діамагнітний), завдяки ефекту Мейснера.

Метою даної роботи є принципове дослідження ВТНП та взаємодії надпровідних оболонок з малими магнітними полями, у тому числі з полем природнього походження. Наведено результати дослідження порожніх сфер та топологічно пов'язаних об'єктів із суперпровідним ВТСП, в тому числі взаємодію з слабким геомагнітним полем.

РОЗДІЛ 1

НАДПРОВІДНІСТЬ

1.1 Відкриття надпровідності

У 1911 році голландський фізик Х. Камерлінг-Оннес виявив явище надпровідності. Електричний опір ртуті він вимірював при низьких температурах. Оннес хотів з'ясувати, наскільки малим може стати опір речовини до електричного струму, якщо знизити "тепловий шум" і очистити речовинувід домішок наскільки це можливо.

Результат цього дослідження виявився несподіваним: при температурі нижче 4,2 К, опір різко зник (Рис.1.1). Незабаром після цього відкриття виявилося, що багато інших елементарних металів мають нульовий опір, коли їх температура падає нижче певної характерної температури матеріалу(критичної температури – T_c) (рис. 1.2)[2]

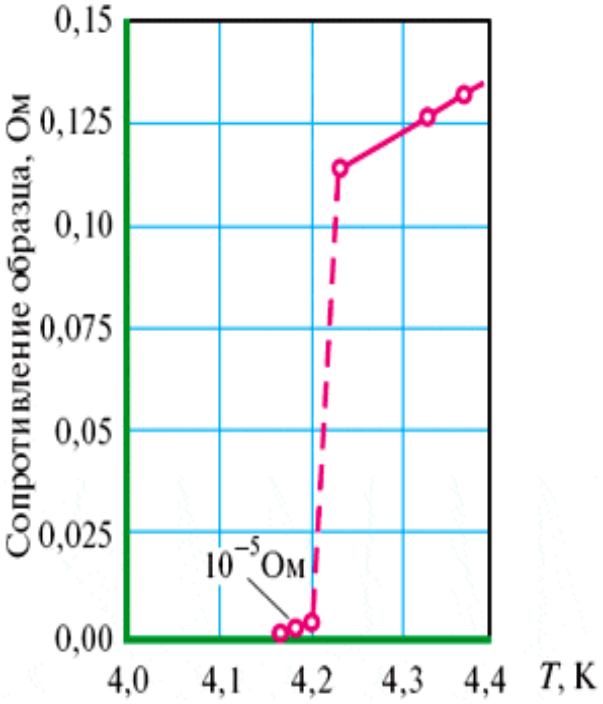


Рис.1.1.Графік поведінки опору як функція температури. [2]

Матеріал	T_0, К	$H_к(0)$, Тл*	Матеріал	T_0, К	$H_к(0)$, Тл
Метали:			***Сплави:***		
Алюміній	1,19	0,0102	Hg – Cd	4,1	0,041
Галій	1,09	0,0055	Pb – In	7,3	0,359
Індій	3,40	0,0285	Pb – Tl	7,3	0,448
Іридій	0,14	0,0021	$Tl_2 – Bi_5$	6,4	0,0702
Лантан	6,10	0,1600	***Сполуки - кераміка:***		
Свинець	7,19	0,0803	LiBi	2,5	–
Ртуть	4,15	0,0411	KBi_2	3,6	0,0234
Реній	1,70	0,0193	Ta_3Sn	8,35	– / 24,5
Рутеній	0,49	0,0066	Nb_3Al	17,1	– / 25,0
Торій	1,37	0,0150	Nb_3Sn	18,1	– / 22,0
Олово	3,72	0,0305	Nb_3Ge	23,2	– / 40,0
Талій	2,37	0,0180	MgB_2	39,0	– / 25,0
Ванадій	5,41	0,043 / 0,082	$YBa_2Cu_3O_7$	92,0	0,1 / 100
Цинк	0,85	0,0055	TiBaCaCuO	120,0	0,1 / 100
Цирконій	0,55	0,0047	* Для надпровідників 2-го роду наведено нижнє та верхнє критичні поля		

Рис.1.2. Критичні температури деяких надпровідників

1.2.Критична температура

Надпровідність відбувається при різкому зниженні температури. Температура T_c, при якій відбувається стрибок, називається критичною. Дослідження показує, що такий перехід спостерігається в певному температурному діапазоні (Рис.1.3). Тертя рухомих електронів зникає незалежно від «чистоти» зразка, але чим чистіший зразок, тим різкіший стрибок опору, його ширина в «найчистіших» зразках менше сотих градуса. У цьому випадку говорять про «хороші» зразки або надпровідники; у «поганих» зразках ширина переходу може досягати десятків градусів. (Це, звичайно, відноситься до так званих високотемпературних надпровідників, в яких T_c досягає сотень кельвінів.)

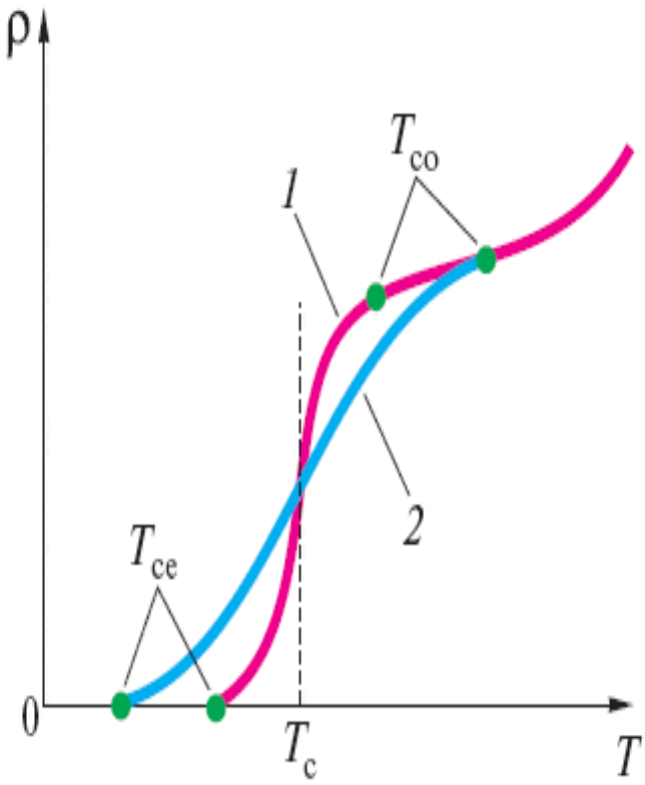


Рис.1.3. Тип "надпровідний перехід". Залежність опору від температури для зразка 1 (більш "чистої") та 2 (більше "брудної"). Критична температура T_cпозначає середину переходу, коли опір зменшується наполовину в порівнянні з нормальним станом. Початок осені - T_{c0}, кінець - T_{ce}[2]

Оннес також не тільки виявив надпровідність ртуті, олова та свинцю, але також знайшов перші надпровідні сплави - ртутні сплави з золотом і оловом. З тих пір ця робота продовжувалася, всі нові сполуки були перевірені на «надпровідність», і поступово клас надпровідників розширився.[2]

1.3 Ефект Мейснера

Німецькі фізики В. Мейснер і Р. Оксенфельд у 1933 р. відкрили це явище. До цих пір ми називали зникнення електричного опору надпровідностю. Проте надпровідність цене просто відсутність опору, це також і певна реакція на

зовнішнє магнітне поле. Ефект Мейснера полягає в тому, що з надпровідного зразка витісняється постійне не надто сильне магнітне поле.

Дуже вражаючий експеримент, який демонструє наявність ефекту Мейснера (Рис. 1.4): постійний магніт ширяє над надпровідною чашою.



Рис. 1.4. Постійний магніт довжиною кілька сантиметрів довго ширяє на відстані трохи більше 1 см над дном надпровідної чашечки, розташованої на трьох мідних ніжках. Ніжки знаходяться в рідкому гелієві, а чашка - у парі гелію для підтримки надпровідного стану[2]

У надпровіднику виникають струми, що виштовхують магнітне поле, їх магнітне поле відштовхує постійний магніт і компенсує його вагу. Суттєві і стіни чашки, які штовхають магніт до центру. Над плоским дном позиція магніту нестабільна, він відійде в бік від випадкових ударів.[2]

На (Рис.1.5) умовно зображено, що відбувається з металевою кулькою при зміні температури та накладанні магнітного поля (силові лінії магнітного поля

позначаються стрілками, що пронизують або течуть навколо зразка). Метал у своєму нормальному стані позначений синім, якщо метал переходить у надпровідний стан, колір змінюється на зелений. Для порівняння намалюнку(Рис.1.5в)показано, як би поводився ідеальний провідник (позначений буквами ІС) - метал без ефекту Мейснера з нульовим опором (якщо б він існував). Цей стан позначений червоним кольором.

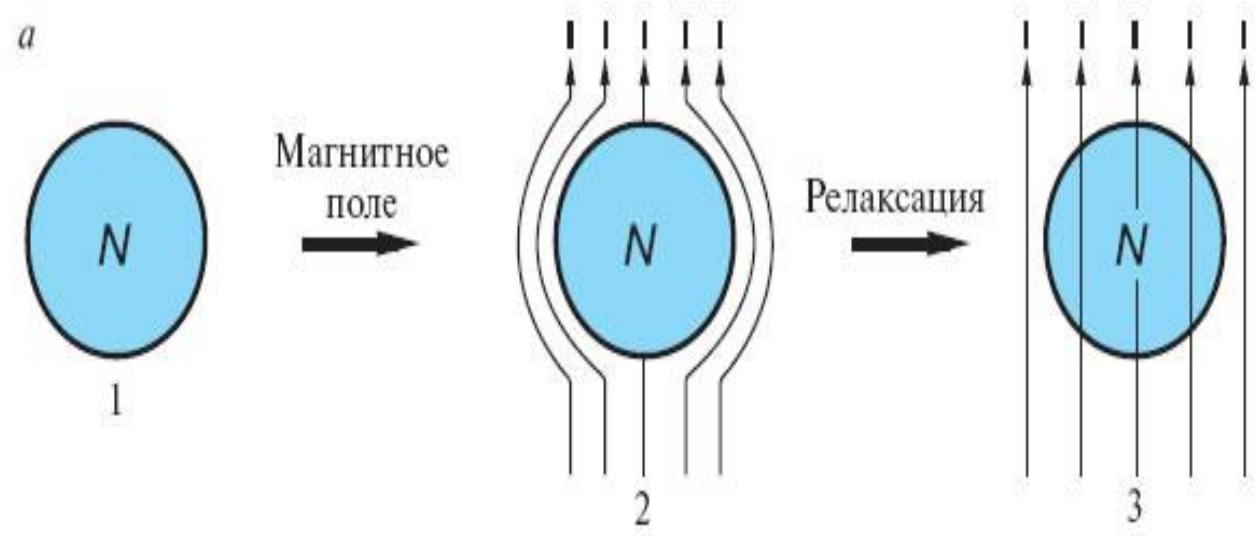


Рис.1.5.а - нормальний провідник з ненульовим опором при будь-якій температурі (1), введений у магнітне поле. Відповідно до закону електромагнітної індукції виникають струми, що протистоять проникненню магнітного поля в метал (2). Однак, якщо опір ненульовий, вони швидко вицвітають. Магнітне поле проникає в зразок звичайного металу і майже однорідне (3)

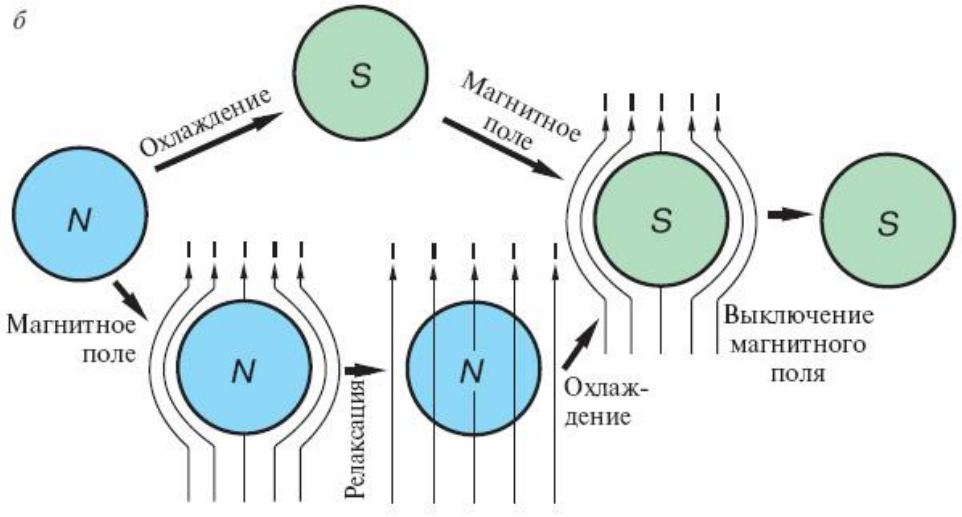


Рис. 1.5 b - з нормальних станів при температурі вище T_cіснує два шляхи: по-перше: коли температура знижується, зразокпереходить у надпровідний стан, після цього можна накласти магнітне поле, яке виштовхується з зразка. По-друге, спочатку накласти магнітне поле, яке проникне в зразок, а потім понизити температуру, тоді поле з'явиться під час переходу. Вимикання магнітного поля дає таку ж картину[2].

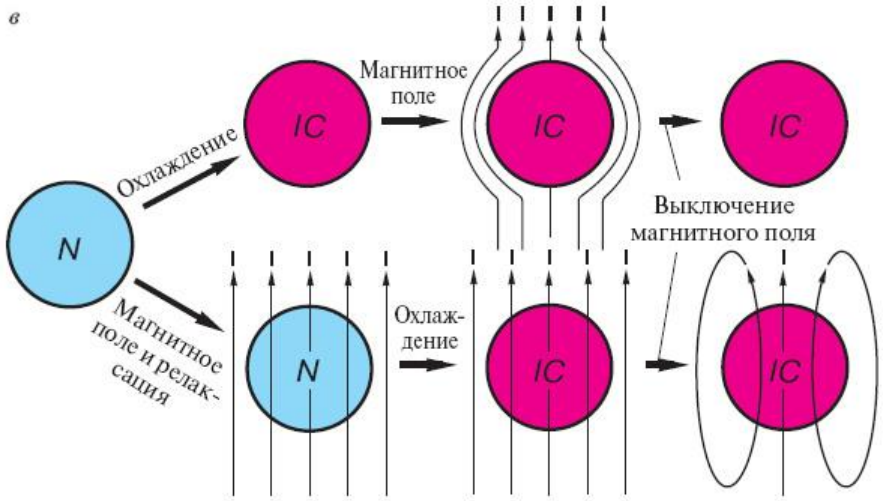


Рис.1.5 в– якщо б не було ефекту Мейснера, провідник без опору поводився б інакше. При переході у стан без опору в магнітному полі, він зберігав би магнітне поле і утримував би його навіть при знятті зовнішнього магнітного поля[2].

РОЗДІЛ 2

ФІЗИКА НАДПРОВІДНОСТІ

2.1Надпровідники типу I і II

Високі магнітні поля знищують надпровідність та відновлюють нормальний провідний стан. Залежно від характеру цього переходу, можна виділити надпровідники типів I і II. Графік(Рис. 2.6), ілюструє внутрішню напругу магнітного поля B_iзі збільшенням прикладеного магнітного поля. Було виявлено, що внутрішнє поле дорівнює нулю (як очікується від ефекту Мейснера)до досягнення критичного магнітного поляB_i, де відбувається раптовий перехід в нормальний стану. Це призводить до проникнення всередину застосовуваного поля. Надпровідники, які зазнають цього різкого переходу в нормальний стан над критичним магнітним полем, відомі як надпровідники типу I. Більшість чистих елементів (Див. Рис.1.2), схильні до I типу надпровідників. З іншого боку, надпровідники II типу реагують по-різному на прикладене магнітне поле (Рис. 2.7). Збільшення нульового поля призводить до двох критичних полів B_{c1} і B_{c2}. При B_{c1} прикладне поле починає частково проникати всередину надпровідника. Проте надпровідність зберігається в цій точці. Надпровідність зникає над другим, набагато вищим критичним полем B_{c2}. Для застосованих полів між B_{c1}та B_{c2}прикладне поле може частково проникнути в надпровідник, тому ефект Мейснера є неповним, що дозволяє надпровідникові витримувати дуже високі магнітні поля.

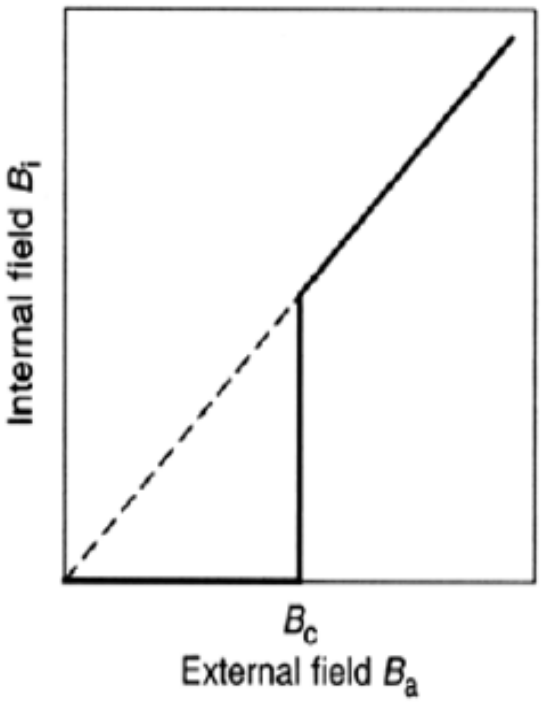


Рис. 2.6.Поведінка I типу надпровідника [3].

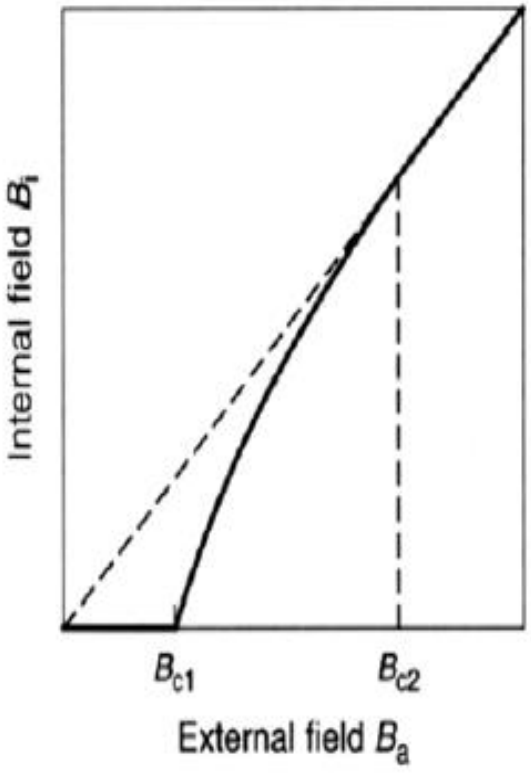


Рис. 2.7.Поведінка II типу надпровідника[3].

Другий тип надпровідників є найбільш технологічно корисним, тому що друге критичне поле може бути досить високим, що дозволяє створювати високопольові електромагніти з надпровідного проводу. Більшість сполук,(Див. Рис. 1.2), є надпровідниками другого роду. Проводи з niobium-tin(Nb3Sn) маютьB_{c2}рівним 24,5 Тесла - на практиці він нижчий. Це робить їх корисними для програм, що вимагають великих магнітних полів, таких як машини з магнітно-резонансною томографією (МРТ). Перевага використання надпровідних електромагнітів полягає в тому, що струм слід застосовувати лише один раз до проводів, які потім утворюють у замкнутому циклі і дозволяють постійному (і польовому) постійному струмі - поки надпровідник залишається нижче критичної температури, тобто , зовнішнє джерело живлення можна вимкнути. Для порівняння, найсильніші постійні магніти сьогодні можуть створити поле, близьке до 1 Тесли. Проте до 24,5 Тесла можна отримати з ніобієво-оловяного надпровідника . Існує неправильне уявлення, що термін "тип II" відноситься до високотемпературних надпровідників на основі оксиду міді, виявлених наприкінці 1980-х років. Хоча це надпровідники другого роду, як і багато інших надпровідників, виявлених до цього часу.[3]

2.2Теорія БКШ та пари Купера

Відповідно до класичної фізики, частина опору металу обумовлена зіткненнями вільних електронів з коливаннями кристалічної решітки, відомими як фонони. Крім того, частина опору обумовлена розсіюванням електронів з домішок або дефектів провідника. У результаті виникає питання про те, чому це не відбувається в надпровідниках? Мікроскопічна теорія надпровідності була розроблена в 1957 році Джоном Бардіном, Леоном Купером та Дж. Робертом Шріффером, відомим як теорія БКШ. Центральною рисою теорії БКШ є те, що два електрона в надпровіднику здатні утворити зв'язну пару, яка називається парою Купера, якщо вони якось відчувають взаємодію між собою. Спочатку це поняття видається суперечливим, оскільки електрони, як правило, відштовхують

один одного через їх однаковий заряд. Це можна сприймати так, як показано на малюнку (Рис. 2.8.)

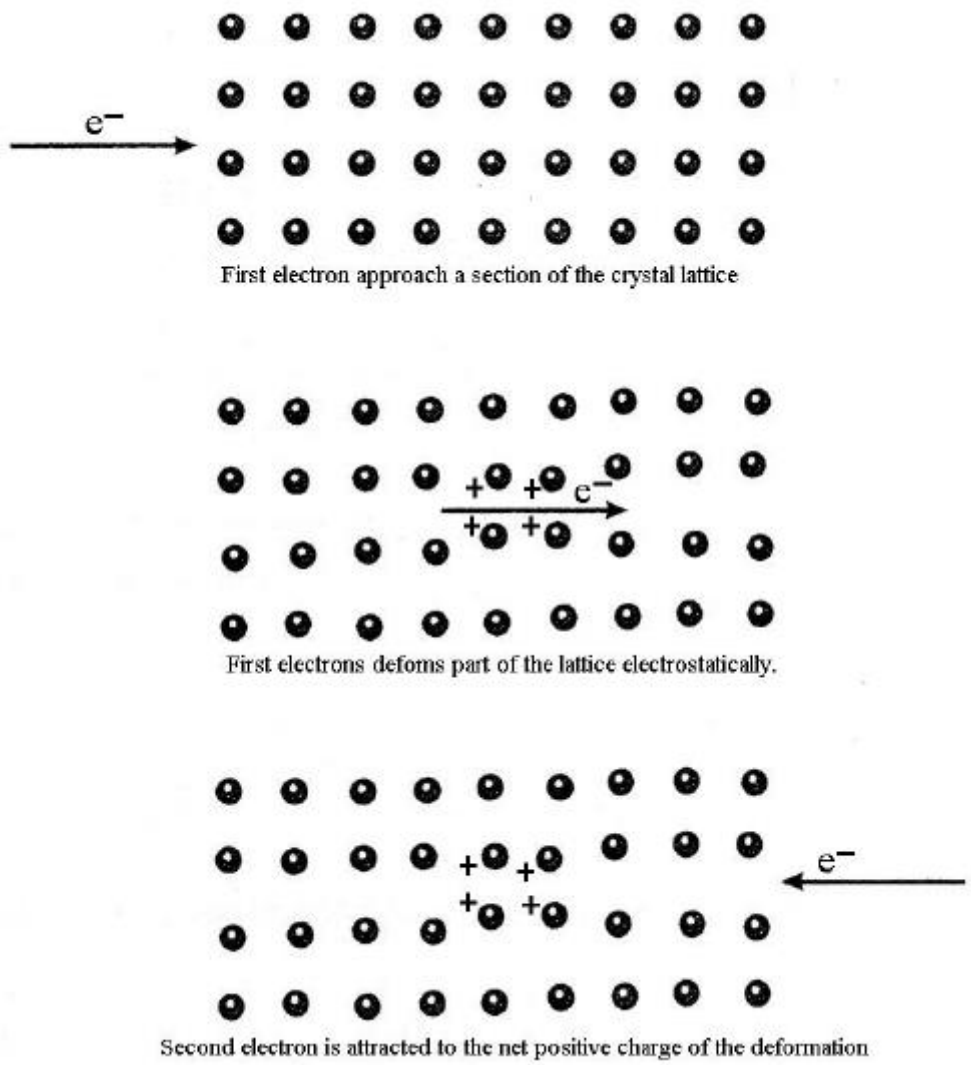


Рис.2.8. Класичний опис зчеплення куперівської пари.[3].

Електрон проходить крізь решітку, і до неї притягуються позитивні іони, що спричиняє викривлення їхніх номінальних позицій. Другий електрон (Cooper's partner) входить і притягує витіснені іони. Зверніть увагу, що цей другий електрон може бути притягнутий лише до викривленоїрешітки, якщо він близький до того, як іони матимуть можливість повернутися до своєї позиції рівноваги. Чистий ефект є слабкою відсталою силою тяжіння між двома електронами.

Це короткочасне скривлення гратки іноді називають віртуальним фононом, оскільки його життя занадто коротке, щоб розповсюджуватись через решітку, як хвиля, як звичайний фонон. З теорії БКШ загальний лінійний імпульс пари Купера має бути нульовим. Це означає, що вони рухаються в протилежних напрямках, як показано на малюнку (Див. Рис.2.8). Крім того, номінальне розділення пари Купера (називається довжина когерентності) коливається від сотень до тисяч іонів, що розділяє їх! Це досить довга дистанція.Якщо б електрони в парі Купера були занадто близько, наприклад, кілька атомних відстаней один від одного; електростатичне (кулонівське) відштовхування буде набагато більшим, ніж притягання від деформації решітки, і тому вони будуть відштовхуватися один від одного. Таким чином, надпровідності не буде. Струм, що протікає в надпровіднику, просто зміщує повний момент з нуля, так що в середньому один електрон у мідній парі має трохи більший імпульс, рівний його парі. Проте вони все ще подорожують у протилежних напрямках. Взаємодія пари Купера є перехідною. Кожен електрон у парі продовжує формувати куперовську пару з іншими електронами, і цей процес триває з новоутвореною парою Купера, так що кожен електрон переходить в пару Купера з іншими електронами. Кінцевим результатом є те, що кожен електрон у твердому тілі залучається до кожного іншого елемента, який утворює велику мережу взаємодій. Внаслідок того, що лише один з цих електронів стикається з атомами в решітці і розсіюється, це означає, що вся мережа електронів повинна зіткнутися в решітку, яка теж є енергоємною. Колективна поведінка всіх електронів у твердій речовині перешкоджає подальшим зіткненням з решіткою.Природа віддає перевагу станам, які тратять мінімум енергії. У цьому випадку мінімальний енергетичнийстан не повинен мати зіткнень з решіткою. Необхідна невелика кількість енергії, щоб знищити надпровідний стан і нормалізувати її. Ця енергія називається енергетичною щілиною.

Незважаючи на те, що тут дано класичний опис пар купера, формальна обробка теорії БКШ є квантово-механічною. Електрони мають хвилеподібну

поведінку і описуються хвильовою функцією, яка поширюється по всьому тілу і збігається з іншими електронними хвильовими функціями. Як наслідок, вся мережа електронів веде себе як лінійна одномодульна функція, так що їх колективний рух когерентний.

На додаток до лінійного імпульсу, кожен електрон поводиться так, ніби він обертається. Ця властивість, на подив, називається спіном. Це не означає, що електрон дійсно обертається. Вимога теорії БКШ полягає в тому, що спіни Куперовської пари знаходяться в протилежних напрямках. Зауважте, що пояснення та мальовниче представлення пари Купера, представлені тут, походять безпосередньо з теорії БКШ[3].

2.3 Ефект Джозефсона

У 1962 році Б. Джозефсон, аспірант Кембріджського університету, роздумуючи про те, що станеться, якщо прилизити два надпровідники на відстані кількох ангстрем. Він припустив, що пари Купера за допомогою "тунельного" ефекта повинні переходити від одного надпровідника до іншого при напрузі рівній нулю.

Він відкрив два ефекти. Перший–надпровідний струм теческрізь тунельний надпровідний контакт(перехід, який має вигляд як два надпровідника, розділених діелектричним шаром). Другий - контакт може стати джерелом ВЧ електромагнітного випромінювання тоді, якщо струм перевищить критичний перехідний струмчерез контакт. Перший та другий ефекти називається стаціонарним і нестаціонарним ефектами Джозефсона. І перший і другий ефекти можна спостерігати експериментально. На першому місці, коли магнітне поле посилено, спостерігалося коливання максимального надпровідного струму через перехід. Якщо струм будевище за критичне значення, то на переходіз'являється напруга, періодично залежить від часу. Частота коливань напруги змінюється тоді, коли струм через контакт вище за критичне значення Дійсно, не можна звести двох надпровідників ближче, ніж кілька ангстремів. У експерименті на підкладці осаджується тонкий шар алюмінію (надпровідний матеріал), потім він

окислюється від поверхні до глибини декількох ангстремів, а другий алюмінієвий шар (оксид алюмінію - ізолятор) обприскують поверх, і все це стає еквівалентним двом надпровідникам, розташованим на відстані кількох ангстремів один від одного.

У надпровідному стані фазовими зв'язками між електронами спричиненийефект Джозефсона.Нідпровідний стан полягає в когерентному русі пар Купера через атомну решітку. Когерентність куперовських пар надпровідника позначається тим, що електрони рухаються у "фазі". Якщо ми приблизимо до двох надпровідників, то Купер пар тунель скрізь розрив між ними. Коли відбувається тунелювання, фаза Купера змінюється. Тунелювання можливе, якщо пара Купера "в нозі" з парами в іншому надпровіднику. Це трапляється в стаціонарному ефекті[4].

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЇ НАДПРОВІДНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗІ СЛАБКИМИ МАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ

3.1 Основні принципи взаємодії надпровідників з магнітним полем

Для аналізу системи діамагнітний об'єкт – магніт окрім вертикальної складової сили підйому Fz, обидва баланс сил у поперечному напрямку та визначення сили поперечного зміщення Fx також мають велике значення. У подібних експериментах магніт прямує за надпровідником (або навпаки)[5-8].Захоплення частини магнітного потоку надпровідником призводить до сильної взаємодії об'єктів (подібно до тертя). У конкретному випадку для інтенсивності He = 1,3 кг сила поперечного зміщення досягає 5,1 pN, і залежність сили поперечного зміщення від сили горизонтального зміщення має гістерезис, тобто, якщо поле з інтенсивністю від 1 Г, то поперечна складова сили буде становити діну. Таким чином, в принципі можливе спостереження взаємодії надпровідників зі слабкими магнітними полями (WMF) з інтенсивністю в декілька ерстедів або часток ерстеду (E). Магнітне поле Землі (геомагнітне поле) вважається слабким і варіює від 0,24 E (Бразилія) до 0,68 E (Антарктида) і 2,7 E (магнітна аномалія), в середньому 0,5 E.

Насправді, практично немає досліджень щодо підвісу ВТНП у слабких магнітних полях. Експериментально було показано, що в області слабких магнітних полів H <10 E спостерігається сильне відхилення залежності намагніченості M (H) від лінійного закону з гістерезисом в цій області[8]. Ефект нелінійної поведінки зменшується із зростанням температури. Чим більша надпровідна фазова об'ємна частка, тим більше параметри нелінійності M (H), що може призвести до наявності максимуму в залежності M (H). Такі нелінійні ефекти можуть впливати на характер левітування об'єкта у слабких магнітних полях. Загалом для ВТНП характерні явище гістерезису та сильні термічно активовані імпульси магнітного потоку[10]. Оскільки ВТНП є надпровідниками другого порядку і мають низьке значення першого критичного поля $H_{C1} \approx$ 100

Е(при 77 К), левітуючі зразки в такому і великих полях знаходяться в змішаних умовах, магнітне поле проникає у зразок як окремі вихори. Це також вказує на більш ефективну левітацію ВТНП у слабкому магнітному полі. Повернемося до оцінок левітації ВТНП. Для характеристики спроможності левітації зразка вимірювали відношення сили взаємодії F з постійним магнітним полем до ваги зразка як функції відстані. Значення $F\ /\ mg$ набагато вище в текстурованих зразках порівняно з керамікою. В роботах [11, 12] були вирішені деякі проблеми левітації надпровідних сфер в магнітному полі 1000 Gs однозаходної надпровідної котушки. Для цього була зроблена проста оцінка тиску в результаті ефекту Мейснера 4 кПа. У полі 1000 Е, добуток радіуса сфери на щільність $r\ \times\ p\ =\ 300$ кг / м3 $=\ 30$ г / см^3. Порожні кульки з алюмінію Al діаметром 1,9 см, масою 2,5 г, мають середня об'ємну щільність 0,69 г /см^3. Такі сфери будуть підтримуватися полем 140 Е і є магнітними екранами внутрішнього об'єму. Використання надпровідників для створення магнітних екранів також ґрунтується на ефекті Мейснера. Залишкове магнітне поле всередині магнітно захищеного об'єму може бути знижено до 10^{-8}Е за допомогою загально відомих методів (перехід у надпровідний стан в полі, малому порівняно з геомагнітним, використання розгортаючих екранів тощо) . Інший спосіб створення левітуючих об'єктів (вага магніту 50 г, втрата ваги 2%), який полягає в тому, щоб реалізувати ідею пристрою на основі обертового надпровідного керамічного кільця, встановленого на магнітному носії (швидкість до 5000 об / хв), ще не було підтверджене після повідомлення про це в роботі [13].

У [14] залежність вимірюваної сили підйому представлена висотою центру магніту над поверхнею надпровідного диска $YBaCu_3O_7$, також показуючи гістерезис під час підйому та опускання. Збільшення товщини ВТСП диска збільшує висоту підвісу. Це узгоджується з наступними результатами. Спосіб регулювання висоти підвіски магніту (вага 103,8 г) над високотемпературним надпровідним диском (товщиною 8,5 мм та діаметром 76 мм) вдосконалюється. Для регулювання висоти в магнітній системі (магніт - ВТНП) вмикають додаткове поле, яке можна регулювати за значенням (5-80 Г), що дозволяє

збільшити в 20 разів висоту магнітної підвіски. Можливість регулювати силу взаємодії може широко використовуватися в магнітній опорі, в магнітних підвісках, а також може бути використана для розробки нового типу космічних апаратів. Ця взаємодія в режимі левітації має свої особливості. Сила взаємодії двох надпровідних котушок дорівнює $F = F_d + F_t + F_i$,де F_d- діамагнітна, F_t- транспортна, F_i- індуктивна складова. Для взаємодії котушок без урахування надпровідності і для випадку масивних надпровідників можна нехтувати транспортною силою. Діамагнітна сила, визначена надпровідним об'ємом, негативна і дорівнює $Fd = \int gradB^2\, dV$. Сила F_iтакож негативна і обумовлена ефектом ідеальної провідності надпровідної котушки. З іншого боку, це треба підкреслити, що у разі взаємодії ВТНП таблеток, отриманих за різних умов, з зовнішнім магнітним полем, максимальний внесок ефекту Мейснера майже на порядок менший за внесок проникнення поля за рахунок інтерферувальних вихрів. Поверхневий бар'єр (Bean-Livingston), створений поверхневими дефектами, запобігає проникненню вихорів до надпровідника.

Першою спробою застосувати левітацію надпровідних мікроскопічних об'єктів в малому магнітному полі (магнітне поле Землі в навколоземному просторі) була пропозиція утилізації радіоактивних відходів в космосі[15-24]. Теоретичні та експериментальні дослідження показують, що в космосі взаємодія надпровідних частинок з магнітним полем Землі та плазмою сонячного вітру є ефективною. Прискорення зарядженої мікрочастинки виявляється приблизно $a_Q = 10^3$ см / сек^2. Спостереження за динамікою (змінами) хмарних утворень, волокон та інших плазмових структур у хвостах комет показує значне прискорення речовини, що неможливо пояснити без взаємодії пилових мікрочастинок з сонячним вітром. Спостережуване прискорення пилових хвостів комет на 2-3 порядки перевищує прискорення, викликане тиском сонячного світла, і пояснюється урахуванням вище наведених розрахунків взаємодії сонячного вітру з зарядженими мікрочастинками. Таким чином, окрім оцінки параметрів руху мікрочастинок, можна оцінити інтенсивність електричних полів у запилених хвостах комет. Порядок швидкості хвостів пилу,

прискорених внаслідок впливу сонячного вітру, коливається в межах $(2 \div 25) \cdot 10^6$см / с. В результаті чисельного аналізу динаміки частинок пилу та їх взаємодії з магнітним полем Землі та плазмою сонячного вітру було показано, що серед розглянутих механізмів взаємодія заряджених мікрочастинок з сонячним вітром є найбільш значною. Значення прискорення, викликане цією взаємодією, може перевищувати величини, обумовлені тиском фотонів, на 2-3 порядки [23, 24].

3.2 Вивчення взаємодії порожніх сфер з надпровідним ВТНП покриттям зі слабким магнітним полем

У цьому розділі представлені експериментальні результати. На (Рис. 3.8.) представлена 3D-діаграма в координатах $P/V - H - F/P$для значень з літературних джерел, описаних в попередньому розділі[24]. Результати експериментів показані на (Рис. 3.10 – 3.13).Під час вивчення левітації діамагнетика в магнітних полях найчастіше проводяться експерименти з виштовхування діамагнетика, в нашому випадку надпровідних тіл з постійного магнітного поля. Підвіска буде стійкою, якщо обрати сферичний або циліндричний об’єкт. Найцікавіший варіант підвіски об'єкта (з ВТНП-покриттям) в геомагнітному полі. Такі дані ілюструють можливість створення надпровідних об'єктів, взаємодіючих зі слабкими магнітними полями. Ми підготували порожні сфери з надпровідним покриттям з різною середньою щільністю (до $3 \times 10 - 4$ г / $см^3$). Ці об'єкти левітують в геомагнітному полі, і ми визначаємо як абсолютні значення підйомної сили F (з точністю 5× 10-5 г), так і відносні значення $F/mg = \Delta P/P$ (в умовних одиницях) в залежності від відносної щільності об'єктів. Для вимірювання були використані методу балансу і дисбалансу. Мікрокристалічні порошки було нанесеношляхом осадження на поверхню сфер і інших типологічно монокогерентних об'єктів. Доля надпровідної фази становила 95% і контролюваласяза спостереженням діамагнітного відкликув сильному (до 2 кЕ) магнітному полі. Потім досліджуваний об'єкт поміщали на низькотемпературний стенд для вимірювання

сили витіснення F. Експериментальна температурна крива електричного опору зразка $YBaCu_3O_{7-x}$показана на (Рис. 3.10). Доля надпровідної фази (Рис. 3.9) контролювалася шляхом визначення діамагнітного відгуку в сильному магнітному полі (до 2 кГ) . Зображення надпровідного об'єкта із середньою щільністю 0,08 г / $см^3$показано на (Рис. 3.11)

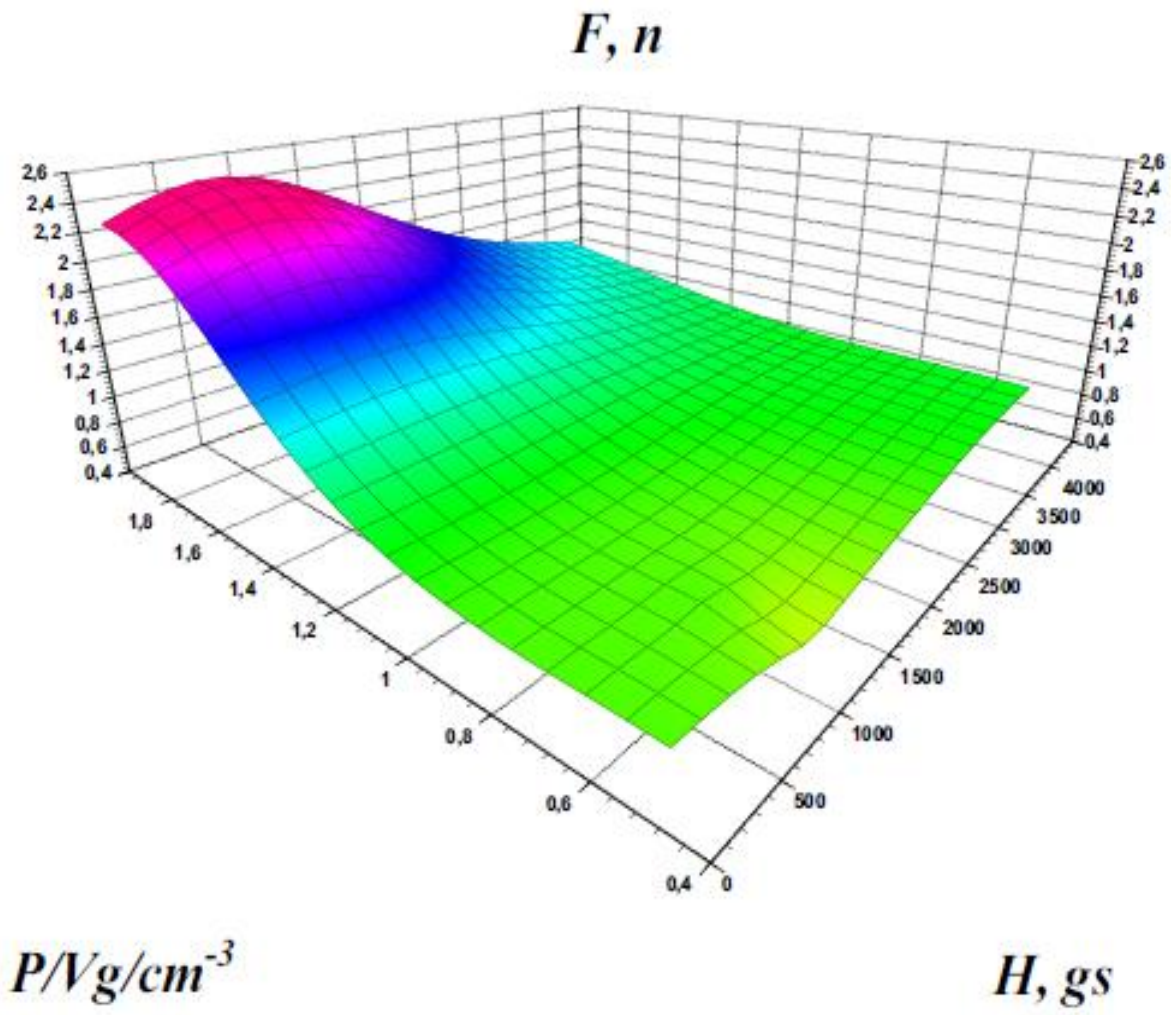


Рис. 3.8. Тривимірна діаграма в координатах P/V- F/P [1].

Element	Content, wgt. %
Fe	0.0014
Si	0.003
Al	0.009
Mg	0.0002
Pb	0.0015
Mn	0.00005
Ni, Cr	<0.0005
Mo, V, Co	<0.0005
Sn	<0.0002

Рис. 3.9. Зміст легування в кераміці $YBaCu_3O_{7-x}$ [1].

Згідно [26], сила, яка виштовхуючи надпровідник у магнітному полі (яка діє на окремий елемент поверхні):

$$F = \sigma_{ik} n_k, \tag{3.1}$$

Тут $\sigma = \frac{1}{4\pi}(H_i H_k - \frac{H^2}{2}\delta_{ik})$- тензор напружень для магнітного поля у вакуумі.

Якщо $\vec{n} H_e = 0$ (H_e- зовнішнє магнітне поле), ми маємо

$$F = -\overrightarrow{n\frac{H_e}{8\pi}} \tag{3.2}$$

Таким чином, тиск на елемент поверхні надпровідного об'єкта дорівнює:

$$F = -\frac{H_e^2}{8\pi} \tag{3.3}$$

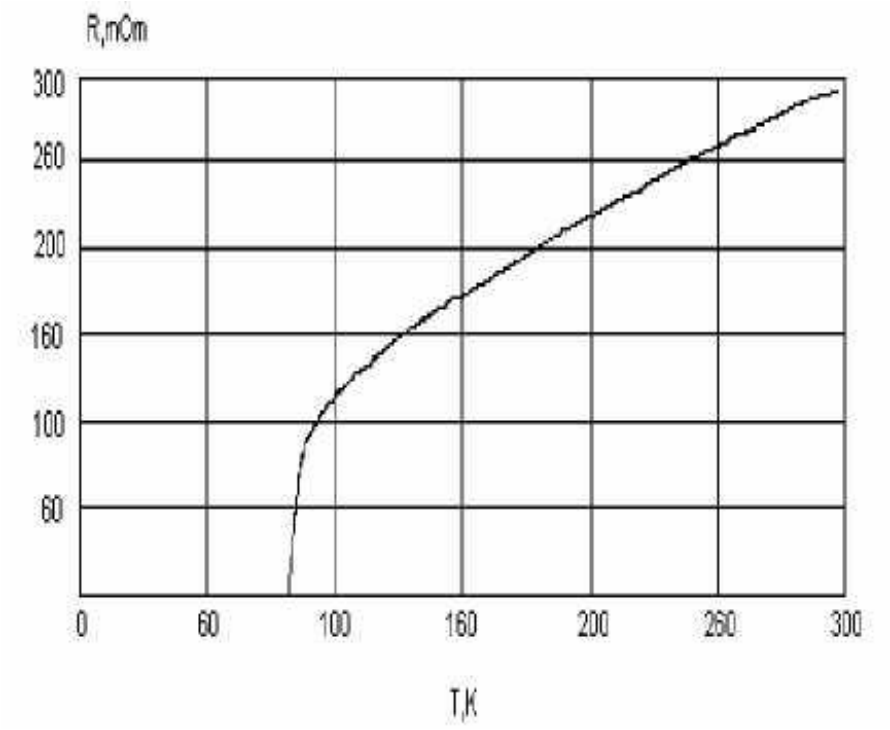


Рис. 3.10. Експериментальна температурна крива електроопору зразка $YBaCu_3O_{7-x}$ [1].



Рис.3.11. Зображення надпровідного об'єкта із середньою щільністю [1].

Експериментальні дані представлені на (Рис. 3.12)як експериментальні співвідношення між підіймальною силою (lnΔP/P)=ln(F/P) та об’ємною щільністю (P/V) для об'єктів з поверхневими надпровідниковими шарами. На (Рис. 3.13) експериментальні дані представлені у вигляді 3D-діаграми в координатах P/V-H-F/P, які базуються на експериментальних значеннях співвідношення між підіймальною силою ΔP/P) = F/P та об'ємною щільністю P/V об'єктів з поверхневими надпровідниковими шарами. Отримана залежність, незважаючи на варіації в даних, вказує на значне зменшення відштовхуючої сили і свідчить про значне збільшення сили левітації для об'єктів з мінімально можливою об’ємною щільністю. Ці результати підтверджують реєстрацію та можливе практичне використання надпровідних "бульбашок", що виникають у геомагнітному полі.

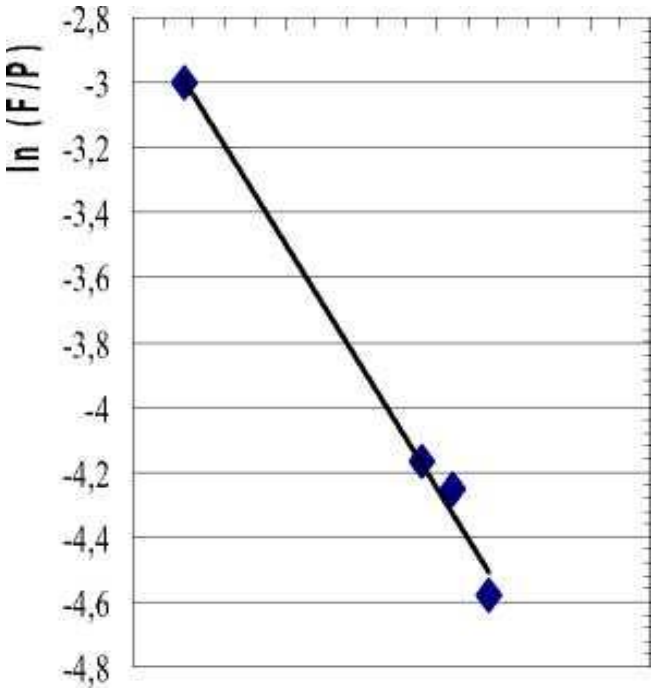


Рис. 3.12 Експериментальневідношенняпідіймальної сили (ln ΔP/P) = ln (F/P) дооб’ємної щільності (P/V) об'єктів з поверхневими надпровідниковимишарами [1]

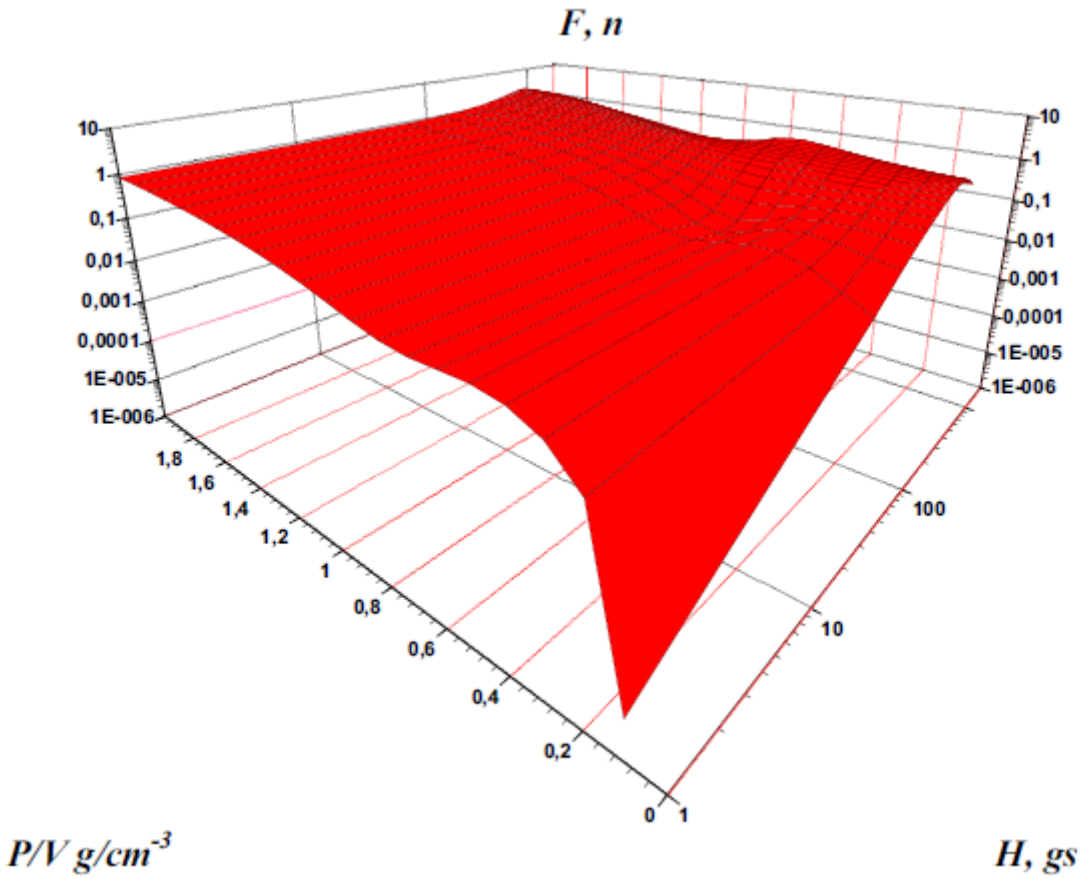


Рис. 3.13 3D-діаграма в координатах F - P / V - H на основі експериментальнихзначень[1]

Порівнюємо експериментальні дані з результатами розрахунків. Як відомо, сила F, що діє в магнітному полі з індукцією B на діамагнітне тіло одиничного об'єму з відносною магнітною проникністю p, визначається наступним чином:

$$F = \frac{1-\mu}{2\mu_0} \cdot \frac{\partial B^2}{\partial z} \qquad (3.4)$$

Де $\frac{\partial B^2}{\partial z}$- квадрат градієнтуіндукції у вертикальному напрямку. Тіло може вільно висіти в полі за умови:

$$F = \rho \cdot g, \text{або } \frac{\partial \mathrm{B}^2}{\partial \mathrm{z}} \geq \frac{2\mathrm{q}\mu_0\rho}{1-\mu} \qquad (3.5)$$

З традиційних діамагнетиків в конденсованому стані найменшезначення ρ (1 - μ) має графіт ($2{,}3\times10^7$ кг / м^3) [27].В разі графітупотрібно умова $\frac{\partial B^2}{\partial z} \geq 5{,}7 \cdot$

10^2Тл^2/мдля того, щоб для надпровідників, зокрема, ВТНП, таких як Y-Ba-Cu-O, величина$\rho(1-\mu)$ мала мінімальне значення. Таким чином, згідно з цими оцінками, можливі ідеальне діамагнітнетримання та левітація (ВТНП) в слабких магнітних полях (порядку Ерстеда), і його експериментальнеспостереження. Ми оцінкидобре узгоджуються з експериментальними даними. Наприклад, для значення магнітного поля, такого як 0,5 – 1Е, отримаємо оціночну величину підіймальної сили 10^{-4} $4 \cdot 10^{-4}$n в порівнянні з середнім експериментальним значенням$2 \times 10^{-4}n$.

Таким чином, під часрозгляду взаємодії ВТНПоб'єктів з геомагнітним полем необхідно враховувати та використовувати наступне:

• нелінійні ефекти та гістерезис;

• можливість регулювати та збільшувати силу взаємодії за допомогою додаткового магнітного поля;

• необхідність детального вивчення механізму проникнення зовнішнього магнітного поля в ВТНПрізних структур;

• аналіз взаємодії в системі «діамагнетик-магніт» для різних компонентів підіймальної сили та магнітних полів;

• спостереження взаємодії надпровідників зі слабким магнітним полем Землі (геомагнітним полем) в різних географічних точках, значення яких вважаються слабкими і варіюються від 0,24 Е (Бразилія) до 0,68 Е (Антарктида) і 2,7 Ее (магнітна аномалія).

Таким чином, можна можливе спостереження взаємодію надпровідників зі слабкими магнітними полями (інтенсивність в кілька ерстедів або долі ерстеда). Інша перспективнаможливості розвитку взаємодії ВТНПз малими магнітними полями — це використовування як оболонки нових вуглецевих матеріалів – графена[28], а саме на основі непроникливих атомарних мембран з графену[29].

ВИСНОВКИ

Ми вивчали основні принципи взаємодії надпровідних оболонок та частинок у слабких магнітних полях і визначили фізичний механізм, який відповідає за ці ефекти. Ми отримали надпровідні об'єкти та оболонки, які взаємодіють зі слабкими магнітними полями. Характеристика отриманих об'єктів з надпровідним покриттям на 20-30% вище в порівнянні з матеріалами відповідного складу. Ми отримали композити на основі високотемпературної надпровідної кераміки (з T_c = 90-93 К) у вигляді порожніх структур з надпровідними покриттями, що забезпечать їх термостійкість в повітрі. Ми продемонстрували можливість ефективної взаємодії надпровідних об'єктів малої середньої щільності до 10-4 г/ $см^3$ з малими магнітними полями (0,5 Гс).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Theinvestigationofinteractionofsuperconductingobjectswithlowmagneticfields / V.G. Kirichenko, V.I. Tkachenko, T.A. Kovalenko, P.L. Rudenko, M.S. Vasylenko // Вісник Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна. – 2009. – №859. Сер.: Фізична. «Ядра, частинки, поля». – Вип. 2(42). – С. 21 - 26
2. Научно-популярный проект «Элементы большой науки»:[Эллектронный ресурс]Режим доступа к журналу: https://elementy.ru/bookclub/chapters/430825/430829 - Сверхпроводимость
3. Superconductivity by Joe Khachan and Stephen Bosi
4. [Эллектронный ресурс]Режим доступа к журналу: http://files.school-collection.edu.ru/dlrstore/1d9555a5-55f6-110f-ca8c-6f4b0ca5b5c0/1002326A.htm - Сверхпроводимость
5. Ермолаев Ю.С., Руднев И.А. Метод расчета силы левитации в системе магнит-сверхпроводник //Письма в ЖТФ. - 2005.Т.31.- Вып.24. - С.60-65.
6. Гришин С.В., Завадский В.А., Огородников С.Н., Орлов Р.В. О силовом взаимодействии сверхпроводящих катушек // ЖТФ. - 1987. - Т.57. - С.2235-2238.
7. Широносов В.Г., Суслопаров В.М. Устойчивость стационарного движения магнитного волчка в неоднородном магнитном поле //ЖТФ. - 1987. - Т.57. - Вып.4. - С.785-787.
8. Краснюк Н.Н., Митрофанов В.П. Низкочастотная колебателльная система на основен магнітного подвеса вісокотемпе- ратурного сверхпроводника //ПТЭ. - 1991. - №2. - С.160-162.
9. Ottohoni V., Ricca F.M., Ripamonti G., Zanella S. Magnetization of $YBa_3Cu_3O_{7-X}$ high T_c superconductor //IEEE Trans. Magn.1988. - Vol.24. - P.1153-1155.
10. Karen P., Gillies G., Ritter R. Meissner effect torsion suspension //Rev. Sci. Instrum. - 1990. - Vol.61, №5 - P.1494-1499.
11. Johansen T., Bratsberg H., Yang Z. //Rev. Sci. Instrum. - 1990 - Vol.61, № 12. - P.3827-3829.
12. Weeks D.E. High T_c Superconducting levitation motor with a laser commutator //Rev. Sci. Instrum. - 1990 - №1. - P.195.
13. Matthews R. Antigravity machine weighed down by controversy //New Scientist. - 1996. - 21 September.- №2048. - P.7.
14. Takanori T., Baland J.J., Dove D.B. //Rev. Sci. Instrum. - 1990 - Vol.7. - P.1084.

15. Способ захоронения радиоактивных отходов в космосе: Патент России №2022380 по заявке 5058557 от 13.08.92. /Ткаченко Вл.И., Ткаченко В.И., Кириченко В.Г., Брыжинский Ю.Н. - 8с. (Россия).
16. Кириченко В.Г., Ткаченко В.И., Ткаченко Вл.И. Теоретическое и экспериментальное обоснование нового принципа захоронения радиоактивных отходов в космическом пространстве //XY Менделеевский съезд по общей и прикладной химии. Химические проблемы экологии. - Т.2. - Минск, 1993. - Т.2. - С.45-46.
17. Кириченко В.Г., Ткаченко В.И., Ткаченко Вл.И Захоронение мелкодисперсных радиоактивных отходов высокой удельной активности в космическом пространстве //XY Менделеевский съезд по общ и прикл. химии. Обнинский симпозиум. Радиоэколог. пробл. в ядерн. энергетике и при конверсии производства. - Т.2. - Обнинск, 1993. - С.62.
18. Дудник А.В., Кириченко В.Г. Мониторинг астрозолей в межпланетном пространстве //XY Менделеевский съезд по общ и прикл. химии. Обнинский симпозиум. Радиоэколог. пробл. в ядерн. энергетике и при конверсии производства. - Т.2 Обнинск, 1993.-С.63.
19. Kirichenko V.G., Tkachenko V.I. Plasma Aspects of New Metod of the Radioactiv Waste Disposal in the Cosmic Space //ICOPS 94. IEEE Int. Conf. on Plasma Sci. Santa Fe, New Mehico, USA, 1994. - P.234.
20. Kirichenko V.G., Tkachenko V.I. Interaction Radioactive Astrozole Particles with Solar Wind Plasma //Bull. Amer. Phys. Soc. 1994. - Vol.39, №.7. - P.1768.
21. Kirichenko V.G., Tkachenko V.I. The Dynamics of Astrozole Clouds and Its Interaction with Solar Wind Plasma//IEEE ICOPS-95 Intern. Conf. of Plasma Science. 5-8 June, 1995. Madison, Wisonsin USA.-1995.-P.107.
22. http://www.islandone.org/ISDC/ISDC1999_Houston/ISDC99- disposal of high-level nuclear waste in space/1999 AIAA Annual Technical Symposium Jonathan Coopersmith Texas A&M University1.
23. Кириченко В.Г., Ткаченко В.И., Ткаченко Вл.И. Захоронение компактированных радиоактивных отходов в космосе //НФТЦ МО и НАН Украины. Информационное сообщение №1-95.- Харьков, 1995.-1 с.
24. Кириченко В.Г. Динамика астрозольных частиц в космосе //Вісник Харківського національного університета. Сер. фізична "Ядра, частинки, поля".-1999. - №548. - Вип.2(6).- 1999. - С. 70-72.
25. Бозоян К.Г., Кириченко В.Г., Коваленко ТА. Влияние гамма-облучения на структуру высокотемпературных сверхпроводников Y Ba $_2$Cu$_3$ O 7-x с добавками ^{57}Fe //Вісник Харківського національного університета. Сер. фізична "Ядра, частинки, поля". - 2003. - №585. - Вип.1/21. - С. 89-92.

26. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. - М.: ГИФМЛ, 1959. - 532с.
27. Понизовский В.М. Свободный подвес диамагнитных тел в постоянном магнитном поле //УФН. - 1970. - Т.100. - Вып.3. - С.511-512.
28. Elias D.C., Nair R.R., Mohiuddin T.M.G., Morozov S.V., Blake P., Halsall M.P., Ferrari A.C., Boukhvalov D.W., Katsnel- son M.I., Geim A.K., Novoselov K.S. Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane //Science. - 2009. - Vol.323. - P.610-613.
29. J. Scott Bunch, Scott S. Verbridge, Jonathan S. Alden, Arend M. van der Zande, Jeevak M. Parpia, Harold G. Craighead and Paul L. Mc Euen Impermeable Atomic Membranes from Graphene Sheets //Nano Lett. - 2008. - Vol.8 (8). - P.2458-2462.