

Додаток 4

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кафедра фізики низьких температур

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан фізичного факультету

(вказати назву структурного підрозділу)

Вовк Руслан Володимирович

(вказати П.І.Б керівника)

“ ” 2024 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Динаміка і пінінг вихорів у надпровідниках II роду

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти другий (магістерський)

галузь знань 10 природничі науки

(шифр, назва галузі)

спеціальність 104 Фізика та астрономія

(шифр, назва спеціальності)

освітньо-професійна програма «Фізика»

спеціалізація _____
(шифр, назва)

вид дисципліни нормативна

факультет фізичний

2024 / 2025 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

«30» серпня 2024 року, протокол № 9.

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

Шкловський Валерій Олександрович, доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач кафедри фізики низьких температур.

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики низьких температур

Протокол від «26» серпня 2024 року № 14.

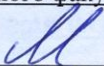
В.о. завідувача кафедри фізики низьких температур

 Валерій ШКЛОВСЬКИЙ
(підпис) (ім'я та прізвище)

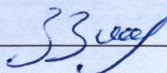
Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол від «28» серпня 2024 року № 1

Голова методичної комісії фізичного факультету

 Микола МАКАРОВСЬКИЙ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Гарант ОПП

 Золтан ЗИМАН
(підпис) (ім'я та прізвище)

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кафедра фізики низьких температур

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан фізичного факультету

(вказати назву структурного підрозділу)

Вовк Руслан Володимирович

(вказати П.І.Б керівника)

“ _____ ” _____ 2024 р.

Робоча програма навчальної дисципліни

Динаміка і пінінг вихорів у надпровідниках II роду

(назва навчальної дисципліни)

рівень вищої освіти другий (магістерський)

галузь знань 10 природничі науки

(шифр, назва галузі)

спеціальність 104 Фізика та астрономія

(шифр, назва спеціальності)

освітньо-професійна програма «Фізика»

спеціалізація _____

(шифр, назва)

вид дисципліни нормативна

факультет фізичний

2024 / 2025 навчальний рік

Програму рекомендовано до затвердження Вченою радою фізичного факультету

«30» серпня 2024 року, протокол № 9.

РОЗРОБНИК ПРОГРАМИ:

Шкловський Валерій Олександрович, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри фізики низьких температур.

Програму схвалено на засіданні кафедри фізики низьких температур

Протокол від «26» серпня 2024 року № 14.

В.о. завідувача кафедри фізики низьких температур

(підпис) Валерій ШКЛОВСЬКИЙ
(ім'я та прізвище)

Програму погоджено методичною комісією фізичного факультету

Протокол від «28» серпня 2024 року № 1

Голова методичної комісії фізичного факультету

(підпис) Микола МАКАРОВСЬКИЙ
(ім'я та прізвище)

Гарант ОПП _____

(підпис) Золтан ЗИМАН
(ім'я та прізвище)

ВСТУП

Програма навчальної дисципліни “ Динаміка і пінінг вихорів у надпровідниках II роду ” складена відповідно до освітньо-професійної програми «Фізика» підготовки фахівців другого рівня вищої освіти (магістрів)
(назва рівня вищої освіти, освітньо-кваліфікаційного рівня)

спеціальності 104 Фізика та астрономія

1. Опис навчальної дисципліни

1.1. Метою викладання навчальної дисципліни є отримання теоретичних знань в галузі експериментального вивчення резистивних властивостей надпровідникових металів при низьких температурах.

1.2.

1.2. Програмні компетентності, що забезпечуються дисципліною ВК4 у відповідності до ОПП «Фізика»:

Інтегральна компетентність:

Здатність розв'язувати складні задачі і проблеми дослідницького та/або інноваційного характеру у фізиці та астрономії.

Загальні компетентності:

ЗК 1. Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу.

ЗК 2. Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях.

ЗК 3. Навички використання інформаційних і комунікаційних технологій.

ЗК 4. Здатність використовувати інформаційні та комунікаційні технології.

ЗК 5. Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми.

ЗК 6. Здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями.

ЗК 9. Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел.

ЗК 11. Здатність дотримуватися принципів академічної доброчесності.

Фахові компетентності:

ФК 1. Знання і розуміння теоретичного та експериментального базису сучасної фізики та астрономії.

ФК 2. Здатність формулювати, аналізувати та синтезувати рішення наукових проблем в області фізики та/або астрономії.

ФК 3. Здатність презентувати результати проведених досліджень, а також сучасні концепції у фізиці та/або астрономії фахівцям і нефахівцям.

ФК 4. Здатність комунікувати із колегами усно і письмово державною та англійською мовами щодо наукових досягнень та результатів досліджень в області фізики та/або астрономії.

ФК 5. Здатність сприймати новоздобуті знання в області фізики та астрономії та інтегрувати їх із уже наявними, а також самостійно опановувати знання і навички, необхідні для розв'язання складних задач і проблем у нових для себе деталізованих предметних областях фізики та/або астрономії й дотичних до них міждисциплінарних областях.

ФК 7. Здатність планувати й здійснювати теоретичні та/або експериментальні дослідження фізичних або астрономічних об'єктів, явищ і процесів на основі розуміння і навичок практичного використання спеціалізованих знань фізики, астрономії та астрофізики, відповідно до обраної спеціалізації, а також спеціальних математичних методів та інформаційних технологій.

ФК 8. Здатність встановлювати зв'язок між експериментальними і теоретичними результатами, здійснювати феноменологічний та теоретичний опис досліджуваних

явищ, об'єктів і процесів, пов'язувати результати досліджень із сучасними фізичними та астрономічними теоріями і уявленнями.

ФК 9. Здатність працювати з джерелами навчальної та наукової інформації.

ФК 10. Здатність представляти результати досліджень професійній та непрофесійній аудиторії.

Основними завданнями вивчення дисципліни є сформувати у студентів магістратури фізичного факультету фізичні уявлення щодо основних теоретичних положень, які обумовлюють резистивні властивості надпровідників другого роду при низьких температурах, а також розглянути основні експериментальні факти, які підтвердили теоретичні ідеї у цій галузі фізики надпровідності. Ознайомити студентів з практичним використанням вказаних ефектів у мікро- і наноелектроніці.

1.3. Кількість кредитів – 3

1.4. Загальна кількість годин : 90

1.5. Характеристика навчальної дисципліни	
Нормативна / за вибором	
Денна форма навчання	Заочна (дистанційна) форма навчання
Рік підготовки	
1-й	-й
Семестр	
2-й	-й
Лекції	
24 год.	год.
Семінарські заняття	
год.	год.
Лабораторні заняття	
год.	год.
Самостійна робота	
66 год.	год.
Індивідуальні завдання	
2 контрольні роботи (10 год.)	

1.6. Програмні результати навчання, що забезпечуються дисципліною ВК4 у відповідності до ОПП «Фізика»:

ПРН 1. Знати, розуміти та вміти застосовувати на базовому рівні основні положення загальної та теоретичної фізики, зокрема, класичної, релятивістської та квантової механіки, молекулярної фізики та термодинаміки, електромагнетизму, хвильової та квантової оптики, фізики атома та атомного ядра для встановлення, аналізу, тлумачення, пояснення й класифікації суті та механізмів різноманітних фізичних явищ і процесів для розв'язування складних спеціалізованих задач та практичних проблем з фізики та/або астрономії.

ПРН 2. Знати і розуміти фізичні основи астрономічних явищ: аналізувати, тлумачити, пояснювати і класифікувати будову та еволюцію астрономічних об'єктів Всесвіту (планет, зір, планетних систем, галактик тощо), а також основні фізичні процеси, які відбуваються в них.

ПРН 4. Обирати і використовувати відповідні методи обробки та аналізу даних фізичних

та/або астрономічних досліджень і оцінювання їх достовірності.

ПРН 5. Знати основні актуальні проблеми сучасної фізики та астрономії.

ПРН 6. Оцінювати вплив новітніх відкриттів на розвиток сучасної фізики та астрономії.

ПРН 9. Аналізувати та узагальнювати наукові результати з обраного напрямку фізики та/або астрономії, відслідковувати найновіші досягнення в цьому напрямі, взаємодіючи спілкуючись із колегами.

ПРН 10. Відшукувати інформацію і дані, необхідні для розв'язання складних задач фізики та/або астрономії, використовуючи різні джерела, зокрема, наукові видання, наукові бази даних тощо, оцінювати та критично аналізувати отримані інформацію та дані.

ПРН 11. Вміти упорядковувати, тлумачити та узагальнювати одержані наукові та практичні результати, робити висновки.

Студенти повинні досягти таких результатів навчання:

знати : квантові властивості електронів і вихорів у надпровідникових металах та їх роль в формуванні критичних параметрів цих металевих систем, різноманітні приклади прояву пінінгу вихорів у фізичних явищах, що спостерігаються експериментально

вміти : вести та самостійно доповнювати конспекти лекцій, опрацьовувати як навчальну так і спеціальну фахову і періодичну наукову літературу, здійснювати самоконтроль якості засвоєння теоретичних знань.

2. Тематичний план навчальної дисципліни

Розділ 1. Основні уявлення про вихорі у надпровідниках та їх динаміку.

Тема 1. Загальна характеристика предмета курсу.

Зміст. Поява нових аспектів фізики вихорів після відкриття у 1987 році нових високотемпературних надпровідників (ВТНП) та їх специфічних особливостей. Подвійна (та суперечна по результатам) роль значного підвищення критичної температури ВТНП у практичних аспектах їх використання. Нові наноструктурні методи обробки поверхні надпровідників

Тема 2. Основні експериментальні факти у надпровідності.

Зміст. Поведінка електропровідності металів при низьких температурах. Температурна залежність критичного поля надпровідника та ефект Мейснера. Температурна поведінка теплоємності та теплопровідності надпровідників. Величина енергії конденсації та рід фазового переходу до нормального стану.

Тема 3. Двохрідинна модель надпровідника, її відношення до теорії БКШ і довжина когерентності.

Зміст. Розподіл електронів надпровідника на сконденсовані і нормальні. Зв'язок щільності надпровідника із критичною температурою по БКШ. Енергетичний спектр збуджень у БКШ і просте обчислення довжини когерентності та її залежності від концентрації домішок. Критична швидкість надпровідного конденсату.

Тема 4. Рівняння Лондонів і глибина проникнення магнітного поля.

Зміст. Запис свободної енергії надпровідника як функції надпровідного струму та магнітного поля з урахуванням рівнянь Максвелла та її мінімізація. Дві форми рівнянь Лондонів. Виведення формули для глибини проникнення магнітного поля у напівпространство. Термодинаміка надпровідника у магнітному полі. Поверхнева енергія N-S межі. Надпровідники першого та другого роду. Фаза Шубнікова- перше і друге критичні поля.

Тема 5 Вихор та його статичні властивості

Зміст. Структура вихоря. Квант магнітного потоку. Статичні властивості вихорів – енергія і магнітний момент вихоря, магнітне поле вихоря у циліндричних координатах. Взаємодія вихорів між собою, взаємодія вихоря з поверхнею надпровідника без та у присутності зовнішнього магнітного поля. Енергетичний бар'єр Біна-Левінгстона

Тема 6 .Динамічні властивості вихорів.

Зміст. Сила Лоренца і в'язка сила які діють на вихор. Дисипація енергії для рухаючогося вихоря, Зв'язок напруги електричного поля та швидкості вихоря. Питома електропровідність надпровідника у резистивному стані. Формула Бардіна – Стефена . Ефект Холла. Розв'язання рівняння для швидкості вихоря з урахуванням ефекту Холла. Подовжна і холловська напруга – їх парність по відношенню до інверсії магнітного поля. Кут Холла.

Тема 7 . Тензор електропровідності у магнітному полі.

Зміст . Мікроскопічне обчислення коефіцієнтів в'язкості та холлівської в'язкості за допомогою тензора електропровідності у моделі Друде. Отримання мікроскопічних формул для холловської і подовжної в'язкості вихоря та їх аналіз для «чистої» і «брудної» межі.

Тема 8 . Реагування надпровідника на змінне електромагнітне поле високої частоти.

Зміст. Комплексна провідність надпровідника у двохрідинній моделі надпровідника. Нормальний скін ефект у надпровіднику. Поверхневий імпеданс металу. Відбиття електромагнітних хвиль від поверхні металу Поверхневий імпеданс надпровідника.

Розділ 2. Пінінг вихорів у надпровідниках

Тема 9. Поняття пінінгу вихорів і критичного струму у надпровідниках другого роду.

Зміст. Фізична природа пінінга при взаємодії вихора із циліндричним треком малого радіусу. Обчислення енергії та сили пінінгу у цьому випадку. Вплив пінінга на ВАХ надпровідника. Графіки повздовжних ВАХ зразків надпровідників без пінінгу та із пінінгом. Нелінійність ВАХ як наслідок пінінгу.

Тема 10. Обчислення вольт-амперової характеристики (ВАХ)

Зміст. Обчислення ВАХ для найпростішої моделі пінінга із пилкоподібним потенціалом пінінгу у надпровіднику при нульовій температурі. Струмові залежності рухомості вихорів та повздовжностних ВАХ. Вплив температури на швидкість вихорів і ВАХ.. Термоактивована течія потоку вихорів у слабкому струмі. Обчислення двох крайніх випадків у кріпі вихорів.

Тема 11. Холл-ефект і спрямований рух вихорів у надпровідниках.

Зміст. Загальні твердження про вплив односпрямованих плоских дефектів на резистивні властивості ВТНП. Обчислення ВАХ двовимірної динаміки вихорів. Аналіз парних та непарних (стосовно інверсії магнітного поля) відгуків і взаємовплив спрямованого руху вихорів та ефекта Холла.

Тема 12. Сильний пінінг на хаотично розташованих дефектах.

Зміст. Вступні міркування про два сценарії реалізації пінінга вихорів на хаотично розташованих дефектах. Аналіз залежності середньої сили пінінга від координати вихоря. Многозначні режими та стрибки координат і енергії вихоря. Обчислення критичного струму з використанням теорії фазових перетворень Ландау.

Тема 13. Колективний пінінг.

Зміст. Основна ідея та оцінка густини критичного струму при нульовій температурі. Кріп окремого вихоря для струму значно менше критичного і скінченної температури. Пружні модулі вихорової ґратки. Обчислення кореляційного об'єму і критичний струм для трьохвимірного випадку (теорія Ларкіна-Овчиннікова). Колективний пінінг для двохвимірного випадку. Порівняння результатів теорії індивідуального та колективного пінінга

Тема 14. Рівноважна анізотропія пінінга вихорів на односпрямованих двійниках у $YBCO$ та її резистивні вимірювання.

Зміст. Експерименти Аргонської групи по пінінгу вихорів на двійниках. Критичний кут при пінінгу вихорів на двійниках. Кутова залежність критичного струму при пінінгу вихорів на двійниках. Крип вихорів при пінінгу вихорів на двійниках.

3. Структура навчальної дисципліни

Назви розділів і тем	Кількість годин											
	денна форма						заочна форма					
	усього	у тому числі					усього	у тому числі				
		л	п	лаб.	інд.	с. р.		л	п	лаб.	інд.	с. р.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Розділ 1. Основні уявлення про вихорі у надпровідниках та їх динаміку.												
Тема 1.	6	2				4						
Тема 2	6	2				4						
Тема 3	7	2				5						
Тема 4	6	2				4						
Тема 5	6	2				4						
Тема 6	6	2				4						
Тема 7	7	2				5						
Тема 8	6	2				4						
Разом за розділом 1	50	16				34						
Розділ 2. Пінінг вихорів у надпровідниках												
Тема 9	7	1				6						
Тема 10	7	1				6						
Тема 11	7	2				5						
Тема 12	7	2				5						
Тема 13	6	1				5						
Тема 14	6	1				5						

Разом за розділом 2	40	8				32						
Усього годин	90	24				66						

4. Теми семінарських (практичних, лабораторних) занять

5. Завдання для самостійної роботи

1	<u>Опанувати тему: Термодинаміка надпровідника у магнітному полі.</u>	4
2	<u>Дослідити поверхневу енергію N-S межи.</u>	4
3	<u>Опанувати тему: Надпровідники першого та другого роду.</u>	4
4	<u>Фаза Шубнікова- перше і друге критичні поля.</u>	4
5	<u>Опанувати вплив постійного струму на характеристики ефективного потенціалу пінінга вихоря та частоту депінінга</u>	4
6	<u>Вивчити засоби відновлення координатної залежності потенціалу пінінга за допомогою залежності частоти депінінгу від величини постійного струму.</u>	4
7	<u>Опанувати тему «Особливості і аналітичний опис ВАХ. Експериментальна обробка ВАХ.</u>	4
8	<u>Підготуватися до контрольної роботи</u>	6
9	<u>Дослідити вплив температури на швидкість вихорів і ВАХ</u>	4
10	<u>Вивчити поняття і характеристики течії потоку вихорів.</u>	4
11	<u>Детально проаналізувати термоактивовану течію потоку вихорів у слабкому струмі.</u>	4
12	<u>Навчитися обчислювати два крайні випадки у кріпі вихорів.</u>	4
13	<u>Навчитися робити обчислення кореляційного об'єму і критичного струму для трьохвимірного випадку (теорія Ларкіна-Овчиннікова).</u>	4
14	<u>Підготуватися до контрольної роботи</u>	4
15	<u>Опанувати поняттям колективного пінінгу для двохвимірного випадку.</u>	4
16	<u>Порівняти результати теорії індивідуального та колективного пінінгу.</u>	4
	Разом	66

6. Індивідуальні завдання

2 контрольні роботи

7. Методи контролю

Поточний контроль – 2 контрольні роботи, опитування;
підсумковий контроль – залік.

8. Схема нарахування балів

для підсумкового семестрового контролю в формі заліку з виконанням залікової роботи

Поточний контроль, самостійна робота, індивідуальні завдання					Залікова робота	Сума
Розділ 1	Розділ 2	Разом за	Контрольні	Разом		

		розділами	роботи, передбачені навчальним планом			
T1-T8	T9-T15		2 x 5 балів			
15	15	30	10	40	60	100

T1, T2 ... – теми розділів.

Критерій оцінювання

90-100: вчасно і згідно з вимогами виконані завдання самостійної роботи; захист курсової роботи оцінено 18-20 бал.; контрольні роботи оцінено 5 бал.; під час опитувань продемонстровано ґрунтовні знання з предмету і вміння самостійно мислити та опрацьовувати інформацію; ґрунтовні відповіді на усі завдання залікової роботи.

70-89: вчасно і згідно з вимогами виконані і завдання самостійної роботи, захист курсової роботи оцінено в межах 15-17 балів; контрольна робота оцінена 4 бал.; під час опитувань продемонстровано ґрунтовні знання в предмету і вміння опрацьовувати інформацію; під час опитування і в заліковій роботі відповіді містять незначні помилки.

50-69: захист курсової роботи оцінено в межах 8 – 14 балів; контрольна робота виконана зі значними помилками, які демонструють задовільний рівень володіння матеріалом курсу (оцінена 3 бал.); обмежені відповіді в завданнях залікової роботи містять суттєві помилки у висвітленні частини або всіх питань.

1-49: низький рівень підготовки і виконання завдань самостійної роботи; курсова робота оцінена 1-7 бали; контрольні роботи не містять правильних та ґрунтовних розв'язків; відсутність зрозумілої відповіді на усі завдання залікової роботи.

Шкала оцінювання

Сума балів за всі види навчальної діяльності протягом семестру	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
70-89	добре	
50-69	задовільно	
1-49	незадовільно	не зараховано

9. Рекомендоване методичне забезпечення

Основна література

[1] Локтєв В. М. Лекції з теорії надпровідності. — К. : ІТФ НАН України, 2011. — 276 с.

[2] В.О.Шкловский, О.В.Добровольський. Пінінг і динаміка вихорів у надпровідниках — Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна. — 2015 — 120с.

[3] Tinkham Michael. Introduction to Superconductivity (2nd ed.). New York: Dover Books, 2004.

- [4] G. Blatter, M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, V. M. Vinokur. Vortices in high-temperature superconductors. Review of Modern Physics, 66(1994), pp. 1125-1388.
- [5] A. I. Larkin, Yu. N. Ovchinnikov. Introduction in Nonequilibrium Superconductivity, edited by D. N. Langenberg and A. I. Larkin (Elsevier, Amsterdam, 1986), p. 493.
- [6] A. I. Larkin, Yu. N. Ovchinnikov. Journal of Low Temperature Physics, 34(1979), p. 409.
- [7] G. Blatter, V. B. Geshkenbein, J. A. G. Koopmann. Weak to Strong Pinning Crossover, Physical Review Letters, 92(2004), p. 67009.
- [8] W. K. Kwok, U. Welp, G. W. Crabtree et al. Direct observation of dissipative flux motion and pinning by twin boundaries in Y Ba₂Cu₃O_{7-δ} single crystals, Physical Review Letters, 64(1990), pp. 996-999.
- [9] G. Blatter, J. Rhyner, V. M. Vinokur. Vortex pinning by twin boundaries in copper oxide superconductors. Physical Review B, 43(1991), pp. 7826-7830.
- [10] M. A. Obolenskij, A. V. Bondarenko, M. G. Revyakina, V. A. Shklovskij. Critical current anisotropy at the vortices pinning on twins in Y Ba₂Cu₃O_{7-δ} single crystals. Superconductivity, Physics, Chemistry and Technology, 7(1994), pp. 43-47.
- [11] V. A. Shklovskij. Nonlinear flux creep resistivity and anisotropy of transport critical current in Y BaCuO single crystals with unidirected twins. Physica C, 235-240(1994), pp. 3051-3052.

Допоміжна література

1. Я. Довгий. Чарівне явище надпровідність. Київ: "Свросвіт", 2000.
- 2.
3. Orlando Terry, Delin Kevin. Foundations of Applied Superconductivity. Prentice Hall, 1991.

Інформаційні ресурси (вихорі у надпровідниках-google)

https://uk.wikipedia.org/wiki/Надпровідники_II_роду [Translate this page](#)

Надпровідники II роду — тип *надпровідників*, в які магнітне поле може частково ... в *надпровідник* локально у вигляді *вихорів* Абрикосова, в серцевині яких ..

sec.bitp.kiev.ua/.../geshkenbein-vortices-in-supercond... [Translate this page](#)

Jun 18, 2012 - «*Вихори у надпровідниках*». Дмитро Гешкенбейн. 11–23 березня. Теорія Гінзбурга-Ландау, *надпровідники I і II типу*. *Вихори Абрикосова* ...

<https://docs.google.com/document/d/...9UVdjecszBdCeYHg/edit?hl=en...>

Фізичний факультет. Київського національного університету імені Тараса Шевченка.
Науково-освітній центр. Інституту теоретичної фізики імені М.М.Боголюбова.