

Анотація навчальної дисципліни
**ВИБРАНІ РОЗДІЛИ СУЧАСНОЇ ФІЗИКИ
НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР ТА НАДПРОВІДНОСТІ**

1. Назва дисципліни – «Вибрані розділи сучасної фізики низьких температур та надпровідності».
2. Лектор – д.ф.-м.н., проф. Шкловський Валерій Олександрович.
- 3 Статус – дисципліна за вибором.
4. Курс, семестр – 2; 4 семестр.
5. Кількість – кредитів – 6; загальна кількість годин – 180 (у тому числі: лекції – 48, самостійна робота – 132).
6. Форма контролю – іспит.
7. Попередні умови для вивчення – знання та навички з курсів загальної та теоретичної фізики.
8. Опис курсу:

Мета: надання студентам, які проходять підготовку за освітньо-науковим рівнем «аспірант», системи теоретичних знань щодо сучасного стану фізики низьких температур та надпровідності, уявлень про квантові властивості конденсованих середовищ, перш за все, класичних надпровідних сполук та високотемпературних надпровідників 2-го роду, уявлень про топологічні дефекти в надпровідниках (вихорі, магнітні потоки), динамічні властивості вихорів, їх взаємодію між собою та з поверхнею надпровідника за різних фізичних умов; уявлень про пінінг вихорів у надпровідниках 2-го роду та їх вплив на ВАХ надпровідників та резистивні особливості високотемпературних надпровідників; понять про пінінг на особливостях структури (дефектах); розуміння технічних (в тому числі, криогенних) можливостей експериментальних досліджень, досягнень і перспектив застосування теоретичних уявлень для створення сучасних мікроприладів, приладів космічної та медичної техніки, засобів зв'язку та накопичення енергії.

Зміст курсу: відомості про основи фізики надпровідності, теоретичний огляд уявлень та теорій щодо фізичних властивостей та структурних (топологічних) особливостей надпровідників та високотемпературних надпровідників, розгляд актуальної проблематики пінінгу вихорів та його застосування в техніці та технологіях.

Структура курсу представлена 2 розділами:

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

Тема 1. Загальна характеристика навчальної дисципліни.

Поява нових аспектів фізики вихорів після відкриття в 1987 році високо температурних 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 щодо надпровідності.

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. 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.

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

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.

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 Холлівська напруга – їх парність по відношенню до інверсії магнітного поля. Кут Холла.

Тема 7. Тензор електропровідності у магнітному полі.

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

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

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.

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-амперної характеристики (ВАХ)

Обчислення ВАХ для найпростішої моделі пінінгу 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.

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.

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

Тема 13. Колективний пінінг.

Основна ідея та оцінка густини критичного струму при нульовій температурі. Крип 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 пінінгу

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

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.

Основна література

1. Локтєв В. М. Лекції з теорії надпровідності. – К. : ІТФ НАН України, 2011. – 276 с.2.
2. В.О. Шкловский, О.В. Добровольський. Пінінг і динаміка вихорів у надпровідниках – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2015. – 120 с.
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.
12. Thermal Hall conductivity in the cuprate Mott insulators Nd₂CuO₄ and Sr₂CuO₂Cl₂, Nature Communications volume 11, Article number: 5325 (2020).
13. Електричні машини / уклад.: В. В. Шевченко, В. П. Шайда, Л. В. Шилкова ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Електрон. текст. дані. – Харків, 2021. – 36 с.
14. Орднорець Л. В., Пазуха І. М. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навч. посібник. – Суми : Сумський державний університет, 2020. – 196 с.

Допоміжна література

1. Я. Довгий. Чарівне явище надпровідність. Київ: "Свросвіт", 2000.
2. Orlando Terry, Delin Kevin. Foundations of Applied Superconductivity. Prentice Hall, 1991.
3. David S. Schmool. Solid State Physics. From the Material Properties of Solids to Nanotechnologies. ISBN: 978-1-942270-77-5
4. А. Варламов, Л. Асламазов. Надпровідність. Вид-во Наш Формат 2021, – 250 с.