

ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР ім. Б.І. ВЕРКІНА
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. директора
ФТІНТ ім. Б.І. Веркіна НАН України



М.І. Глушук

«16» 09 2020 р.

ПРОГРАМА

навчальної дисципліни

Сучасна фізика надпровідності: прикладні аспекти, теорія та експеримент
(назва навчальної дисципліни)

з галузі знань «10 Природничі науки»
за спеціальністю «104 Фізика та астрономія».

<i>Рівень вищої освіти</i>	<u>третій (освітньо-науковий)</u>
<i>Освітня програма</i>	<u>доктор філософії</u>
<i>Форма навчання</i>	<u>денна</u>
<i>Загальний обсяг у кредитах</i>	
<i>Європейської</i>	
<i>кредитної трансферно-накопичувальної системи:</i>	<u>4 кредити ЄКТС</u>

Харків - 2020

РОЗРОБЛЕНО ТА ВНЕСЕНО:

Фізико–технічним інститутом низьких температур ім. Б. І. Веркіна
Національної академії наук України
(повне найменування вищого навчального закладу)

РОЗРОБНИКИ ПРОГРАМИ:

Соловйов Андрій Львович – доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу транспортних властивостей провідних та надпровідних систем Фізико–технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України.

Туруганов Олег Георгійович – кандидат фізико-математичних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник відділу надпровідних і мезоскопічних структур Фізико–технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України.

Юзефович Ольга Ігоревна – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник відділу надпровідних і мезоскопічних структур Фізико–технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України.

Програма затверджена Вченою радою Фізико–технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, «___» _____ 2020 р., протокол № __.

1. Опис навчальної дисципліни

Найменування показників	Галузь знань, напрям підготовки, освітньо-кваліфікаційний рівень	Характеристика навчальної дисципліни
		денна форма навчання
Кількість кредитів – 4	Галузі знань: - «10 Природничі науки»	Обов'язковий
Загальна кількість годин – 120 (36 аудиторних)	Спеціальність: - «104 Фізика та астрономія»	
Тижневих годин для денної форми навчання аудиторних – 2 самостійної роботи здобувача – 8	Освітньо-науковий рівень: доктор філософії	<i>Лекції, годин</i>
		30
		<i>Семінари, годин</i>
		6
		<i>Самостійна робота, годин</i>
		84
		<i>Вид контролю</i>
		іспит

2. Мета та завдання навчальної дисципліни

Мета: ознайомити аспірантів з сучасним станом і актуальними проблемами фізики надпровідності, надати інформацію про основні ефекти і закони як класичної низькотемпературної, так і високотемпературної надпровідності, методи дослідження надпровідників та надпровідних структур і практичного застосування їх у науці, техніці і промисловості, сформулювати уявлення про проблеми пошуку надпровідників з високими критичними параметрами і незвичайними властивостями.

Завдання:

- надати аспірантам інформацію про основні фізичні властивості низькотемпературних надпровідників (НТНП) та високотемпературних надпровідників (ВТНП);
- ознайомити аспірантів з теоретичними уявленнями про процеси у НТНП, ВТНП, функціональних матеріалах і структурах;
- дати інформацію про напрями досліджень і розробок в області сучасної надпровідності;
- надати огляд експериментальних методів дослідження надпровідників і надпровідних структур;
- навчити аспірантів застосовувати базові знання в галузі надпровідності для виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності;
- ознайомити аспірантів з актуальними проблемами та об'єктами сучасної фізики надпровідності, такими як залізовмісні надпровідники типу FeAs-пніктидів, халькогеніди, шаруваті надгратки, напівпровідникові гетероструктури типу $A^{IV}B^{VI}$, надчутливі детектори, надпровідні кубіти тощо.
- розглянути на реальних прикладах, як прості моделі можуть бути використані для вирішення фундаментальних та прикладних задач класичної та сучасної фізики надпровідності.

У результаті вивчення курсу аспірант повинен

знати:

- термінологію в галузі надпровідності;
- фізичні основи і механізми явища надпровідності, особливості його прояви у класичних НТНП і сучасних ВТНП;
- основні найбільш вживані надпровідники та їхні параметри, як-то критичні температури, магнітні поля та струми, довжина когерентності і глибина проникнення магнітного поля тощо;
- основні положення теорій Гінзбурга-Ландау (Г-Л), Бардіна-Купера-Шріфера (БКШ), надпровідних флуктуацій Хікамі-Ларкіна та інші теоретичні уявлення про стаціонарні і нерівноважні властивості надпровідників та їхню взаємодію із зовнішніми полями;
- механізми руйнування надпровідності різними факторами, як-то температурою, електричним струмом, зовнішніми магнітними і електромагнітними полями;
- найбільш вагомні застосування надпровідників у науці, техніці, промисловості та інших областях;
- основні принципи створення багатокомпонентних надпровідників (купратів типу YBCO) та дослідження їх властивостей;
- основні проблеми, які стоять перед сучасною фізикою надпровідності і напрями їх вирішення;
- сучасні методи і основну апаратуру для дослідження надпровідників та структур, що на них базуються;

вміти:

- обґрунтовано вирішувати фізичні задачі в рамках своєї спеціальності, використовуючи різнобічні міждисциплінарні знання і одержані знання з надпровідності;
- орієнтуватися у довідковій та навчальній літературі в галузі фізики надпровідності, знаходити інші необхідні джерела інформації і використовувати їх для вирішення конкретних завдань;
- планувати конкретні експерименти і розрахунки у рамках поставленого завдання у самостійній науковій роботі;
- користуватися основними експериментальними і чисельними методами дослідження;
- використовувати теоретичні знання з надпровідності для тлумачення одержаних експериментальних і розрахункових результатів;
- спираючись на теоретичні знання, вирішувати необхідні рівняння, як-то моделі локальних пар для багатокомпонентних новітніх надпровідників, тобто описувати динамічне поведіння псевдощільни.

Інтегральний результат навчання полягає у тому, що аспірант повинен

- Уявляти основні глобальні задачі в галузі фізики новітніх надпровідників.
- Вміти на високому рівні проводити наукові дослідження.
- Володіти навичками використання новітньої дослідницької апаратури.
- Вміти описувати результати власних наукових досліджень у фахових публікаціях у вітчизняних та закордонних спеціалізованих виданнях.
- Працювати над власним розвитком та вдосконалюванням, виявляти прагнення до підвищення професійної кваліфікації та критично оцінювати власні здобутки, бачити

обмеження та вмiти визначати перспективи подальшого професiйного вдосконалення.

Внаслідок вивчення навчальної дисциплiни аспiрант повинен бути здатним продемонструвати такі **програмні результати навчання** (згiдно з освітньо-науковою програмою «ФІЗИКА»):

знання:

- 1) здобуття поглиблених знань і розумiнь в фізиці та спорiднених областях, включаючи методики проведення експериментiв та/або теоретичних наукових дослiджень (ПРН-1.1);
- 2) здатність продемонструвати поглиблені знання у вибраній спеціалізації (ПРН-1.2);
- 3) здатність ясно та ефективно описувати результати наукової роботи (ПРН-1.3);
- 4) здатність вести спеціалізовані наукові семiнари та публікувати наукові статті в вітчизняних та закордонних наукових журналах (ПРН-1.4);
- 5) здатність робити огляд та пошук інформації в спеціалізованій літературі, використовуючи різноманітні ресурси: журнали, бази даних, он-лайн ресурси (ПРН-1.5);
- 6) здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі індивідуальних дослiджень (ПРН-1.6);
- 7) досягнення відповідних знань, розумiнь та здатностей використання методiв аналізу даних та статистики на найбільш сучасному рівні (ПРН-1.7).

умiння:

- 1) здiйснювати пошук, аналізувати і критично оцінювати інформацію з різних джерел (ПРН-2.1);
- 2) самостійно планувати та виконувати експерименти, оцінювати отримані результати (ПРН-2.2);
- 3) обирати методи і моделювати явища та процеси рiзної складності при вирішенні фізичних задач з урахуванням спеціалізації в конкретних галузях фізики конденсованого стану (ПРН-2.3);
- 4) поєднувати теорію і практику, а також приймати рiшення та виробляти стратегію діяльності для вирішення завдань спеціалізації з урахуванням загальнолюдських цінностей, суспільних, державних та виробничих інтересiв (ПРН-2.4);
- 5) застосовувати знання і розумiння для розв'язування задач синтезу та аналізу елементiв та систем, характерних обраній спеціалізації (ПРН-2.5);
- 6) ефективно працювати як індивідуально, так і у складі команди (ПРН-2.6);
- 7) застосовувати системний пiдхiд, iнтегруючи знання з інших дисциплiн та враховуючи нетехнічні аспекти, пiдчас розв'язання науково-дослiдних завдань з обраної спеціалізації та проведення дослiджень (ПРН-2.7);
- 8) аргументувати вибір методiв розв'язування спеціалізованої задачі, критично оцінювати отримані результати та захищати прийняті рiшення (ПРН-2.8);
- 9) підготувати запит на отримання фiнансування, звітну документацію (ПРН-2.9).
- 10) формулювати науково і технічно значиму проблематику, володіти рiзними формами її публічної презентації (он-лайн презентації, публічні лекції, науково-популярні тексти тощо) (ПРН-2.10).

Здобути комунікативні навички та набути навичок працювати автономно і відповідально:

- 1) ефективно спілкуватись на професiйному та соціальному рівнях, включаючи усну та письмову комунікацію іноземною мовою (ПРН-3.1);
- 2) кваліфіковано представляти та обговорювати отримані результати та здiйснювати трансфер набутих знань (ПРН-3.2).
- 3) здатність адаптуватись до нових умов та самостійно приймати рiшення (ПРН-4.1);
- 4) здатність усвідомлювати необхідність навчання впродовж усього життя з метою поглиблення набутих та здобуття нових фахових знань (ПРН-4.2);
- 5) здатність відповідально ставитись до виконуваної роботи та досягати поставленої мети з дотриманням вимог професiйної етики (ПРН-4.3);
- 6) здатність самовдосконалюватись, нести відповідальність за новизну наукових дослiджень та прийняття експертних рiшень (ПРН-4.4);
- 7) здатність демонструвати розумiння засад охорони праці, електробезпеки та їх застосування (ПРН-4.5).

Вивчення навчальної дисципліни передбачає формування та розвиток у аспірантів загальних та фахових **компетентностей**:

ЗК-1 Здатність до абстрактного мислення, аналізу та синтезу;

ЗК-2 Здатність проведення досліджень на відповідному рівні;

ЗК-5 Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації;

ЗК-8 Здатність бути критичним і самокритичним;

ЗК-9 Здатність до практичного застосування знань;

ЗК-10 Вміння виявляти, ставити та вирішувати проблеми;

ЗК-11 Здатність генерувати нові ідеї (креативність).

ЗК-12 Здатність до наукового мислення, зокрема володіння загальнонауковими (філософськими) компетентностями, спрямованими на формування системного наукового світогляду, професійної етики та загального культурного кругозору.

ЗК-13 Здатність дотримуватись морально-етичних правил поведінки, а також академічної доброчесності, характерних для учасників академічного середовища.

ФК-1 Концептуальні та методологічні знання щодо історії розвитку та сучасного стану наукових досліджень з основних напрямів фізики.

ФК-2 Поглиблені спеціалізовані знання з того напрямку сучасної фізики, який був обраний для проведення власного наукового дослідження, та розуміння сучасних фізичних теорій і методів, спроможність до їхнього аналізу та ефективного застосування в практиці наукової та науково-педагогічної діяльності і проведенні досліджень.

ФК-4 Здатність виконувати оригінальні дослідження, досягати наукових результатів, які створюють нові знання у фізиці і дотичних до неї міждисциплінарних напрямках і можуть бути опубліковані у провідних наукових виданнях з фізики та суміжних галузей.

ФК-6 Здатність самовдосконалюватися, презентувати результати досліджень фахівцям і нефаківцям.

ФК-7 Здатність до формулювання наукових задач та планування стратегій їхнього розв'язання з можливістю інтеграції знань з різних наукових сфер та застосуванням системного підходу в практичній діяльності.

ФК-10 Здатність підготувати та успішно захистити дисертаційну роботу на основі узагальнення власних експериментальних або теоретичних досліджень з фізики.

ФК-11 Здатність інтегрувати знання з інших дисциплін, застосовувати системний підхід та враховувати комплексні аспекти при розв'язанні проблемних завдань та проведенні наукових досліджень.

ФК-12 Знати та вміти застосовувати фундаментальні знання з фізики конденсованого стану для аналізу явищ та процесів, які відбуваються в твердих тілах і рідинах, знати основні закономірності утворення структури твердих тіл та взаємозв'язок структури з фізичними властивостями твердих тіл, вміти використовувати основні принципи сучасної фізики конденсованого стану до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

ФК-16 Знати основні ефекти і закони як класичної низькотемпературної, так і високотемпературної надпровідності, методи дослідження надпровідників і надпровідних структур та вміти застосовувати їх практично у науці, техніці і промисловості.

ФК-18 Знати основні напрями досліджень і розробок в області низьких температур, сучасні методи отримання низьких і наднизьких температур, а також методи експериментального дослідження і аналізу властивостей низькотемпературних систем і явищ, термодинамічні основи охолодження та зрідження реальних газів, фізичні властивості криогенних рідин та особливості роботи з ними, властивості речовин при низьких температурах та основні методи їх дослідження, методи та елементи низькотемпературної термометрії. Вміти обґрунтовано вирішувати фізичні задачі в рамках своєї спеціальності, використовуючи різнобічні міждисциплінарні знання з фізики низьких температур.

ФК-19 Знати сучасний стан фізики мезо- та наноскопічних систем і наноструктур, сучасні методи їх отримання і експериментального дослідження, а також проблеми і перспективи розвитку фізики наноструктур і нанотехнологій, вміти обґрунтовано вирішувати фізичні задачі в рамках своєї спеціальності, використовуючи міждисциплінарні знання з нанотехнологій і наноматеріалів

Пререквізити

Вивчення дисципліни передбачає володіння базовими знаннями із загальної фізики, фізики твердого тіла та вищої математики, навиками щодо роботи з науковою літературою і пошуку інформації, що отримані під час здобуття ступеня магістра та попереднє засвоєння кредитів з дисципліни «Іноземна мова для аспірантів»; бажано також мати уявлення та деякі навички щодо роботи з вимірювальною апаратурою.

Постреквізити

Основні положення навчальної дисципліни мають застосовуватися при плануванні і виконанні власних наукових досліджень та подальшій обробці і аналізі результатів цих досліджень.

3 Анотація навчальної дисципліни

Курс з навчальної дисципліни «Сучасна фізика надпровідності: прикладні аспекти, теорія та експеримент» є курсом зі спеціалізації, який знайомить з фізичними основами явища надпровідності, теоретичними моделями і ефектами, властивостями класичних низькотемпературних надпровідників і сучасних надпровідних систем з високими критичними температурами, наноструктурами і приладами, що базуються на надпровідності, фізичними методами створення та дослідження їхніх властивостей

4. Структура навчальної дисципліни

Тема 1. ВІДКРИТТЯ НАДПРОВІДНОСТІ

Нульовий опір надпровідників нижче критичної температури T_c і незгасаючі струми в експериментах Г. Камерлінг-Оннеса. Ефект Мейснера-Оксенфельда. Ідеальний діаманетизм надпровідників. Критичне магнітне поле H_c і критичний струм I_c . Правило Сілсбі. Проміжний стан надпровідників I роду в магнітному полі.

Тема 2. НАДПРОВІДНИКИ II РОДУ (ФАЗА ШУБНІКОВА)

Нижнє $H_{c1}(T)$ і верхнє $H_{c2}(T)$ критичні магнітні поля у надпровідниках II-роду. Змішаний стан. Магнітні властивості і фазові переходи в магнітному полі для надпровідників I і II роду. Ефект близькості. Третє (поверхнєве) критичне поле $H_{c3}(T)$. Нелокальна електродинаміка надпровідників I роду (теорія Піпарда).

Тема 3. ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИЙ ОПИС НАДПРОВІДНИКІВ

Рівняння Лондонів. Квантування магнітного потоку. Теорія Гінзбурга - Ландау. Два характерних масштаби в надпровідниках: довжина когерентності $\xi(T)$, і глибина проникнення магнітного поля $\lambda(T)$. Енергія межі розділу нормальної і надпровідної фази в надпровідниках I і II роду. Ефект близькості. Третє (поверхнєве) критичне поле $H_{c3}(T)$. Нелокальна електродинаміка надпровідників I роду (теорія Піпарда). Тонка плівка в магнітному полі. Струм розпарювання.

Тема 4. ЕЛЕКТРОДИНАМІКА НАДПРОВІДНИКІВ II РОДУ

Вихори Абрикосова. Взаємодія вихорів. Сила Лоренца. Вихорова ґратка і вихоровий (змішаний) стан. Поверхневий бар'єр Біна-Лівінгстона. Основні механізми пінінга вихорів. Критичний струм неідеальних надпровідників II роду в магнітному полі. Модель критичного стану. Одночастинковий і колективний пінінг вихорів. Способи підсумовування елементарних сил пінінга. Модулі пружності вихорової ґратки. Резистивний стан надпровідників II роду. В'язка течія вихорів під дією сили Лоренца. Особливості поведінки вихорової ґратки шаруватих надпровідників. Анізотропія верхніх критичних полів. Кросовер верхніх магнітних полів.

Тема 5. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАДПРОВІДНИКІВ

Енергія основного стану надпровідників нижче T_c . Фазові переходи I і II роду з нормального в надпровідний стан. Теплоємність надпровідника. Стрибок теплоємності в точці $T = T_c$. Термодинамічне критичне поле H_c . Роль флуктуацій в околі T_c . Парамагнітне обмеження верхнього критичного поля H_{c2} .

Тема 6. НОВІ НАДПРОВІДНІ СТРУКТУРИ. ІНТЕРФЕЙСНА НАДПРОВІДНІСТЬ

Нові надпровідні системи, гетероструктури різних типів, гібридні наногетероструктури надпровідник-ферромагнетик, гетероструктури $A^{IV}B^{VI}$ типу. Структурні характеристики гетероструктур $A^{IV}B^{VI}$. Сітки дислокацій невідповідності. Критичні температури та верхні критичні поля. Модель надпровідності в напівпровідникових гетероструктурах, залежність надпровідної щільності від тиску.

Тема 7. ВИХОРОВА ГРАТКА В ШАРУВАТИХ СИСТЕМАХ

Вихорова ґратка в шаруватих системах. Ефекти сумірності періоду вихрової ґратки та параметра шаруватої структури. Теорія Івлева-Копніна-Покровського. Вихорова ґратка в похилих магнітних полях. Локін-ефект. Теорія Булаєвського-Клема.

Тема 8. ОСНОВИ МІКРОСКОПІЧНОЇ ТЕОРІЇ НАДПРОВІДНОСТІ

Феномен Купера. Куперівські пари. Модель БКШ. Роль електрон-фононої і кулонівської взаємодії в ефекті куперівського зпарювання. Енергетична щілина Δ в спектрі квазічастинок. Залежність Δ від температури. Критична температура надпровідника T_c . Ізотопічний ефект. Метод канонічних перетворювань Боголюбова. Рівняння Боголюбова–де Жена в наближенні самоузгодженого поля. Фактори когерентності. Густина станів в надпровіднику. константа електрон-фононої взаємодії і кулонівський псевдопотенціал. Надпровідники з сильним і проміжним зв'язком. Рівняння Еліашберга. Обчислювання критичної температури і проблема високотемпературної надпровідності.

Тема 9. КІНЕТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАДПРОВІДНИКІВ

Характерні часи релаксації квазічастинок і параметра порядку в надпровіднику. Теплопровідність надпровідника. Поглинання ультразвуку і релаксація ядерного спіна в надпровідниках. НВЧ імпеданс надпровідників (теорія Матіса-Бардіна). Нерівноважні ефекти в надпровідниках під дією зовнішніх полів. Флуктуаційна провідність вище T_c .

Тема 10. ТИПИ СЛАБКИХ ЗВ'ЯЗКІВ В НАДПРОВІДНИКАХ, ЕФЕКТИ ДЖОЗЕФСОНА

Тунельний ефект в N-I-S і S-I-S структурах. Ефект Джозефсона (стаціонарний і нестаціонарний) в надпровідних тунельних контактах. Проникнення магнітного поля в надпровідний тунельний контакт. Рівняння Ферела-Прейиджа. Джозефсонівські вихори. Залежність критичного струму Джозефсона від величини магнітного поля. Типи слабких зв'язків. Струм-фазове співвідношення.

Тема 11. АНДРЕЄВСЬКЕ ВІДБИТТЯ, НЕРІВНОВАЖНА НАДПРОВІДНІСТЬ

Андреевське відбиття квазічастинок від межі розділу нормальний метал-надпровідник (NS-межа). Розбаланс заселеності спектру квазічастинок і глибина проникнення в надпровідник поздовжнього електричного поля при протіканні струму через NS-межу. Нерівноважні ефекти при тунельній інжекції квазічастинок в надпровідник. Андреевське квантування спектру квазічастинок і особливості ефекту Джозефсона в S-N-S контактах.

Тема 12. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ АСПЕКТИ КВАНТОВИХ ВИМІРЮВАНЬ

Узагальнений підхід до проблеми критичного струму і резистивних станів у низьковимірних надпровідних (плівках, стрічках). Нелінійна течія абрикосовських вихорів. Центри і лінії проковзування фази, термоактивовані і квантові. Застосування ефекту Джозефсона для реєстрації слабких електромагнітних полів. Надпровідний квантовий інтерферометр (SQUID). Принципи роботи і конструкції одно- і двоконтактних SQUID'ів. Однофотонні детектори оптичного і мікрохвильового діапазонів. Експериментальні аспекти вимірювання квантових систем (декогеренція станів, наднизькі температури, вплив оточення і електроніки, термалізація об'єктів вимірювання, фільтрація, екранування, метод безперервних нечітких вимірювань кубітів). Короткий огляд просторово-розрізнявальних методів для вивчення надпровідників (скануюча тунельна мікроскопія,

скануюча лазерна мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, атомно-силова мікроскопія, магніто-оптичні методи.

Тема 13. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ НАДПРОВІДНИКІВ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЦІ І ЕЛЕКТРОНІЦІ

Струмонесучі елементи електричних ланцюгів. Надпровідні багатожильні композитні проводи і кабелі. Термомагнітні нестійкості і методи кріостабілізації проводів. Втрати в змінному магнітному полі. Надпровідні магніти (соленоїди). Надпровідні накопичувані енергії. Використання надпровідників для левітації (магнітного підвісу). Надпровідні пасивні елементи в радіотехніці. НВЧ резонатори і фільтри.

Тема 14. ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНІ НАДПРОВІДНИКИ (ВТНП) - НАДПРОВІДНИКИ З СИЛЬНИМ ЗВ'ЯЗКОМ.

Історія відкриття ВТНП. Передумови існування високотемпературної надпровідності. Кристалічна структура $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) і $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ (BiSCCO). Основні властивості, що відрізняють ВТНП від НТНП. Фазова діаграма ВТНП. Поняття про псевдощілину (ПЩ). Експериментальне спостереження зниження щільності станів на рівні Фермі (DOS) в ВТНП.

Тема 15. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФЛУКТУАЦІЙНОЇ ПРОВІДНОСТІ В ВТНП

Флуктуаційні теорії Асламазова-Ларкіна, Макі-Томпсона і Хікамі-Ларкіна. Флуктуаційна провідність в класичних надпровідниках. Особливості флуктуаційної провідності в ВТНП. Алгоритм розрахунку флуктуаційної провідності в ВТНП. Флуктуаційна провідність в тонких плівках YBCO. Флуктуаційна провідність в надгратках і двошарових плівках YBCO-PrBCO.

Тема 16. СПЕЦІФІКА СИСТЕМ З МАЛОЮ ЩІЛЬНІСТЮ НОСІВ ЗАРЯДУ

Поняття псевдощілини. Концепція локальних пар (ЛП) в ВТНП. Теорія Імрі-Ківелсона і Рандерья. Бозе-Ейнштейнівська конденсація (БЕК). Сильно зв'язані бозони (СЗБ) в ВТНП. Роль довжини когерентності в трансформації локальних пар від СЗБ до флуктуаційних куперовських пар (ФКП) поблизу T_c . Перехід БЕК-БКШ в ВТНП при зменшенні температури. Ефекти, що підтверджують наявність ЛП в ВТНП. Розрахунок величини і температурної залежності псевдощілини: в плівках $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO-123) і в сполуках з магнітною взаємодією.

Тема 17. НОВІТНІ НАДПРОВІДНИКИ І: ЗАЛІЗОВМІСНІ FeAs ПНІКТИДИ

Історія відкриття. Фундаментальні властивості: три типу надпровідників. Фазова діаграма. Співіснування надпровідності і магнетизму. Флуктуаційна провідність в пніктідах. Псевдощілина в залізовмісних надпровідниках $\text{SmFeAsO}_{0.85}$. Дві енергетичні щілини в Fe-пніктідах. Особливості поверхні Фермі. Теорія Мачіди-Нокури-Матсубари. Співіснування надпровідності і магнетизму у теорії і експерименті. Псевдощілина у магнітних купратах типу $\text{HoBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$.

Тема 18. НОВІТНІ НАДПРОВІДНИКИ ІІ: ХАЛЬКОГЕНІДИ FeSe

Історія відкриття. Структура і структурний перехід в FeSe. Температурна залежність питомого опору в FeSe. Незвичайні фундаментальні властивості: два типи носіїв заряду. Температурна залежність параметра $\Delta^*(T)$ в FeSe. Експериментальне спостереження псевдощілини в FeSe. Залежність густини локальних пар від дефектних ансамблів в FeSe яка впливає з теорії Пітерса-Бауера.

Загальна структура навчальної дисципліни

№	Назва теми	у тому числі			
		Усього	Лекції, годин	Семинар, годин.	Самостійна робота, годин
1.	Відкриття надпровідності	2	2	-	-
2.	Надпровідники II роду (фаза Шубнікова)	2	2	-	-
3.	Феноменологічний опис надпровідників	9	2	-	7
4.	Електродинаміка надпровідників II роду. Вихори Абрикосова	9	2	-	7
5.	Термодинамічні властивості надпровідників	7	-	-	7
6.	Нові надпровідні структури. Інтерфейсна надпровідність.	9	2	-	7
7.	Вихорова ґратка в шаруватих системах	2	-	2	-
8.	Основи мікроскопічної теорії надпровідності	7	2	-	5
9.	Кінетичні властивості надпровідників	7	2	-	5
10.	Типи слабких зв'язків в надпровідниках, ефекти Джозефсона	7	2	-	5
11.	Андрєєвське відбиття, нерівноважна надпровідність	7	2	-	5
12.	Експериментальні аспекти квантових вимірювань	7	2	-	5
13.	Практичне застосування надпровідників в електротехніці і електроніці	5	-	2	3
14.	Високотемпературні надпровідники (ВТНП) - надпровідники з сильним зв'язком	7	2	-	5
15.	Теоретичні основи і експериментальне дослідження флуктуаційної провідності в ВТНП	7	2	-	5
16.	Специфіка систем з малою щільністю носіїв заряду	9	2	2	5
17.	Новітні надпровідники I: залізовмісні FeAs пніктіди	8	2	-	6
18.	Новітні надпровідники II: халькогеніди FeSe	9	2	-	7
	Усього, годин	120	30	6	84

Теми лекційних занять

№	Назва лекції	Кількість годин
1.	Відкриття надпровідності. Низькотемпературні надпровідники. Ефект Мейснера	2
2.	Надпровідники II роду	2
3.	Вихорова ґратка надпровідників II роду. Вихори Абрикосова	2
4.	Інтерфейсна надпровідність. Напівпровідникові структури $A^{IV}B^{VI}$ типу	2
5.	Теорія Гінзбурга-Ландау	2
6.	Основи мікроскопічної теорії надпровідності	2
7.	Кінетичні властивості надпровідників	2
8.	Типи слабких зв'язків в надпровідниках, ефекти Джозефсона	2
9.	Андреєвське відбиття, нерівноважна надпровідність	2
10.	Експериментальні аспекти квантових вимірювань	2
11.	Високотемпературні надпровідники (ВТНП) - надпровідники з сильним зв'язком	2
12.	Теоретичні основи і експериментальне дослідження флуктуаційної провідності в ВТНП	2
13.	Специфіка систем з малою щільністю носіїв заряду	2
14.	Новітні надпровідники I - залізовмісні FeAs пніктіди	2
15.	Новітні надпровідники II - халькогеніди FeSe	2
	Разом	30

Теми семінарських занять

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Вихорова ґратка в шаруватих системах. Ефекти сумірності періоду вихрової ґратки та параметра шаруватої структури. Теорія Івлева-Копніна-Покровського. Вихорова ґратка в похилих магнітних полях. Локін-ефект. Теорія Булаєвського-Клема.	2
2.	Практичне застосування надпровідників в електротехніці і електроніці. Струмонесячі елементи електричних ланцюгів. Надпровідні багатожилінні композитні проводи і кабелі. Втрати в змінному магнітному полі. Надпровідні магніти (соленоїди). Надпровідні накопичувачі енергії. Використання надпровідників для левітації (магнітного підвісу). Надпровідні пасивні елементи в радіотехніці. НВЧ резонатори і фільтри.	2
3.	Поняття псевдо щілини і концепція локальних пар (ЛП) в ВТНП. Теорія Імрі-Ківелсона. Бозе-Ейнштейнівська конденсація (БЕК). Сильно зв'язані бозони (СЗБ) в ВТНП. Роль довжини когерентності в трансформації локальних пар від СЗБ до флуктуаційних куперовських пар (ФКП) поблизу T_c . Перехід БЕК-БКШ в ВТНП при зменшенні температури.	2
	Разом	6

Самостійна робота

№	Назва теми	Кількість годин
1.	Ефект близькості. Третє (поверхневе) критичне поле $H_{c3}(T)$. Нелокальна електродинаміка надпровідників 1 роду (теорія Піпарда).	7
2.	Модель критичного стану. Одночастинковий і колективний пінінг вихорів. Способи підсумовування елементарних сил пінінга. Модулі пружності вихорової ґратки.	7
3.	Термодинамічні властивості надпровідників. Енергія основного стану надпровідників нижче T_c . Фазові переходи I і II роду з нормального в надпровідний стан. Теплоємність надпровідника. Стрибок теплоємності в точці $T = T_c$. Термодинамічне критичне поле H_c . Роль флуктуацій в околі T_c . Парамагнітне обмеження верхнього критичного поля H_{c2} .	7
4.	Нові надпровідні системи, надпровідні наноструктури, гетероструктури різних типів, гібридні наногетероструктури надпровідник-ферромагнетик.	7
5.	Основи мікроскопічної теорії надпровідності. Феномен Купера. Модель БКШ. Роль електрон-фононої і кулонівської взаємодії в ефекті куперівського зпарювання. Енергетична щілина Δ в спектрі квазічастинок. Ізотопічний ефект. Фактори когерентності. Надпровідники з сильним і проміжним зв'язком. Обчислювання критичної температури і проблема високотемпературної надпровідності.	5
6.	Кінетичні властивості надпровідників. Поглинання ультразвуку і релаксація ядерного спіна в надпровідниках. НВЧ імпеданс надпровідників (теорія Матіса-Бардіна). Нерівноважні ефекти в надпровідниках під дією зовнішніх полів. Флуктуаційна провідність вище T_c .	5
7.	Типи слабких зв'язків в надпровідниках, ефекти Джозефсона. Тунельний ефект в N-I-S і S-I-S структурах. Ефект Джозефсона (стаціонарний і нестаціонарний) в надпровідних тунельних контактах. Проникнення магнітного поля в надпровідний тунельний контакт. Рівняння Ферела-Прейджда. Джозефсонівські вихори. Залежність критичного струму Джозефсона від величини магнітного поля.	5
8.	Андреєвське відбиття, нерівноважна надпровідність. Андреєвське відбиття квазічастинок від межі розділу нормальний метал - надпровідник (NS - межа). Розбаланс заселеності спектру квазічастинок і глибина проникнення в надпровідник поздовжнього електричного поля при протіканні струму через NS-межу. Нерівноважні ефекти при тунельній інжекції квазічастинок в надпровідник. Андреєвське квантування спектру квазічастинок і особливості ефекту Джозефсона в S-N-S контактах.	5
9.	Експериментальні аспекти квантових вимірювань. Центри і лінії проковзування фази, термоактивовані і квантові. Застосування ефекту Джозефсона для реєстрації слабких електромагнітних полів. Надпровідний квантовий інтерферометр (SQUID). Принципи роботи і конструкції одно- і двоконтактних SQUID'ів. Експериментальні аспекти вимірювання квантових систем (декогеренція станів, наднизькі температури, вплив оточення і електроніки, термалізація об'єктів вимірювання, фільтрація, екранування, метод безперервних нечітких вимірювань кубітів).	5

10.	Практичне застосування надпровідників в електротехніці і електроніці. Надпровідні багатожильні композитні проводи і кабелі. Термомагнітні нестійкості і методи кріостабілізації проводів. Втрати в змінному магнітному полі. Надпровідні магніти (соленоїди). Надпровідні накопичувані енергії. Використання надпровідників для левітації (магнітного підвісу). Надпровідні пасивні елементи в радіотехніці. НВЧ резонатори і фільтри.	3
11.	Кристалічна структура $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ (YBCO) і $Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$ (BiSCCO). Основні властивості, що відрізняють ВТНП від НТНП. Фазова діаграма ВТНП. Поняття про псевдощілину (ПЩ).	5
12.	Флуктуаційні теорії Асламазова-Ларкіна, Маки-Томпсона і Хікамі-Ларкіна. Особливості флуктуаційної провідності в ВТНП. Алгоритм розрахунку флуктуаційної провідності в ВТНП. Флуктуаційна провідність в тонких плівках YBCO. Флуктуаційна провідність в надгратках і двошарових плівках YBCO-PrBCO.	5
13.	Бозе-Ейнштейнівська конденсація (БЕК) і сильно зв'язані бозони (СЗБ) в ВТНП. Роль довжини когерентності в трансформації локальних пар від СЗБ до флуктуаційних куперовських пар (ФКП) поблизу T_c . Перехід БЕК-БКШ в ВТНП при зменшенні температури. Діаграма Рандерья. Ефекти, що підтверджують наявність ЛП в ВТНП.	5
14.	Фундаментальні властивості FeAs-пніктидів. Фазова діаграма і співіснування надпровідності і магнетизму. Флуктуаційна провідність в пніктидах. Псевдощілина в залізовмісних надпровідниках SmFeAsO _{0.85} . Особливості поверхні Фермі і дві енергетичні щілини в Fe-пніктидах.. Теорія Мачіди-Нокури-Матсубари.	6
15.	Структура і структурний перехід в FeSe. Температурна залежність питомого опору в FeSe. Незвичайні фундаментальні властивості: два типи носіїв заряду. Температурна залежність параметра $\Delta^*(T)$ в FeSe. Експериментальне спостереження псевдощілини в FeSe. Залежність густини локальних пар від дефектних ансамблів в FeSe яка впливає з теорії Пітерса-Бауера.	7
	Разом	84

5. Методи навчання

МН1 – Лекції. Лекційний матеріал охоплює центральні та найбільш складні проблеми сучасної фізики надпровідності. Простіші питання, що добре висвітлені в літературі, виносяться на самостійне вивчення.

МН2 – Семінарські заняття. Семінарські заняття передбачають самостійне вивчення аспірантами за завданням викладача окремих питань і тем лекційного курсу з наочним оформленням матеріалу у вигляді реферату, доповіді, повідомлення тощо. Семінарські заняття дають змогу викладачам ближче познайомитися з аспірантами, донести до них необхідну інформацію, а відтак перевірити, як вони засвоїли її, як користуються нею в навчальній і науковій роботі. Викладач має змогу враховувати теоретичну і практичну підготовку аспіранта, його індивідуальні особливості і здібності, що зумовлює підвищення рівня підготовки кожного аспіранта.

МН4 – Самостійна робота. Робота здобувачів носить в основному самостійний характер. Вони самостійно роблять пошук наукової літератури і опрацьовують її, консультуючись з викладачем. Таким чином вони удосконалюють набуті раніше навички роботи з літературою за фахом. Основна увага приділяється формуванню та засвоєнню базових знань в галузі сучасної надпровідності та вмінню застосовувати їх до виконання конкретних науково-дослідних робіт зі спеціальності.

МН3, МН5 – демонстрація презентацій, використання засобів мультимедіа, дистанційні заняття з використанням комп'ютерних засобів.

6. Методи діагностики знань

ФОРМИ ОЦІНЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ НАВЧАННЯ (ФО)

ФО1 – відвідування лекцій та творчий підхід в процесі наукового пошуку (20 балів);

ФО2 – самостійна робота, опрацювання літератури та електронних джерел за темою дослідження (20 балів);

ФО4 – відповідь на семінарі та використання сучасних інформаційних технологій при підготовці відповіді (20 балів);

ФО5 – робота в команді при виконанні завдань самостійної роботи та на семінарі (5 балів);

ФО6, ФО8, ФО9, ФО10 – підготовка та оформлення реферату та презентації, використання у доповіді прикладів реальних фізичних об'єктів, що пов'язані з дисертаційним дослідженням (20 балів).

Екзамен (15 балів)

Всього: 100 балів.

Шкала оцінювання

Сума балів	Оцінка за національною шкалою	
	для екзамену	для заліку
90 – 100	відмінно	зараховано
80-89	добре	
70-79		
60-69	задовільно	
50-59		
1-49	незадовільно	не зараховано

7. Критерії оцінювання результатів навчання

Кількість балів	Критерії оцінювання
90-100	У відповіді повністю розкрито зміст питання. Матеріал викладено логічно, аргументовано, мова є грамотною, науковий стиль викладення матеріалу, вільне володіння термінологічним апаратом дисципліни. У відповіді продемонстровано високий рівень володіння матеріалом, що входить до навчальної програми, та продемонстровано високі практичні навички.
75-89	Відповідь досить повно розкриває зміст питання або розкриває основні (найважливіші) аспекти у запитанні, слухач володіє термінологічним апаратом дисципліни. У викладеному матеріалі слухач має помилки із аргументацією відповіді, недостатня логічність та послідовність викладення матеріалу. У відповіді продемонстровано високий рівень володіння матеріалом, що було викладено на лекціях, та середній рівень володіння практичним матеріалом.
60-74	Відповідь на контрольне питання є неповною, розкриває тільки деякі аспекти навчального матеріалу. Слухач припускається помилок у використанні термінології навчальної дисципліни. Рівень володіння матеріалом, що було викладено на лекціях, додатковим та практичним матеріалом є середнім.

35-59	У відповіді допущено суттєві помилки, які свідчать про незнання лекційного матеріалу або обов'язкової літератури; слухач слабо володіє термінологією дисципліни.
1-34	Відповідь практично відсутня, слухач демонструє незнання лекційного матеріалу або обов'язкової літератури; не володіє термінологією

8. Навчально-методичне забезпечення

На початку семестру здобувачі отримують:

1. Робочу програму, що містить перелік тем, список рекомендованої літератури та інформаційних ресурсів, критерії та шкалу оцінювання; контрольні запитання до іспиту;
2. Пакет літератури, що містить основні підручники, навчальні та методичні посібники в електронній формі (формати .pdf та .djvu),

9. Питання до заліку/екзамену

1. Відкриття надпровідності. Нульовий опір надпровідників нижче критичної температури T_c і незгасаючі струми в експериментах Г.Камерлінг-Оннеса. Ефект Мейснера-Оксенфельда. Ідеальний діаманетизм надпровідників.
2. Магнітні властивості надпровідників I роду. Критичне магнітне поле H_c і критичний струм I_c . Правило Сілсбі. Проміжний стан надпровідників I роду в магнітному полі.
3. Надпровідники II роду (фаза Шубнікова). Нижнє $H_{c1}(T)$ і верхнє $H_{c2}(T)$ критичні магнітні поля у надпровідниках II-роду. Змішаний стан. Магнітні властивості і фазові переходи в магнітному полі для надпровідників I і II роду.
4. Вихорова ґратка в шаруватих системах. Ефекти сумірності періоду вихрової ґратки та параметра шаруватої структури. Теорія Івлева-Копніна-Покровського. Вихорова ґратка в похилих магнітних полях. Локін ефект. Теорія Булаєвського-Клема.
5. Феноменологічний опис надпровідників. Теорія Гінзбурга-Ландау. Два характерних масштаби в надпровідниках: довжина когерентності $\xi(T)$, і глибина проникнення магнітного поля $\lambda(T)$. Трете (поверхневе) критичне поле $H_{c3}(T)$. Тонка плівка в магнітному полі. Струм розпарювання.
6. Електродинаміка надпровідників II роду. Вихори Абрикосова. Взаємодія вихорів. Сила Лоренца. Вихорова ґратка і вихоровий (змішаний) стан. Поверхневий бар'єр Біна-Лівінгстона. Основні механізми пінінга вихорів. Критичний струм неідеальних надпровідників II роду в магнітному полі.
7. Модель критичного стану. Резистивний стан надпровідників II роду. В'язка течія вихорів під дією сили Лоренца. Термоактивований рух вихорів. Крип магнітного потоку.
8. Термодинамічні властивості надпровідників. Теплоємність надпровідника. Стрибок теплоємності в точці $T = T_c$. Термодинамічне критичне поле H_c . Роль флуктуацій в околі T_c . Парамагнітне обмеження верхнього критичного поля H_{c2} .
9. Інтерфейсна надпровідність. Гетероструктури $A^IV B^VI$ типу і їх структурні характеристики гетероструктур. Сітки дислокацій невідповідності. Модель надпровідності в напівпровідникових гетероструктурах, залежність щільності від тиску.
10. Індукований магнітним полем фазовий перехід надпровідник ізолятор в різних низьковимірних надпровідних системах.
11. Куперівські пари. Модель БКШ. Роль електрон-фононої і кулонівської взаємодії в ефекті куперівського зпарювання. Енергетична щільність Δ в спектрі квазічастинок. Залежність Δ від температури. Критична температура надпровідника T_c . Ізотопічний ефект.

12. Нерівноважні ефекти в надпровідниках під дією зовнішніх полів. Розбаланс квазічастинкових гілок спектру у надпровіднику. Характерні часи релаксації квазічастинок і параметра порядку в надпровіднику. Структура центра та лінії проковзування фази параметра порядку. Дифузія квазічастинок, глибина проникнення електричного поля у надпровідник.
13. Тунельний ефект в N-I-S і S-I-S структурах. Ефект Джозефсона (стаціонарний і нестаціонарний) в надпровідних тунельних контактах. Проникнення магнітного поля в надпровідний тунельний контакт. Залежність критичного струму Джозефсона від величини магнітного поля. Самоіндуковані і наведені електромагнітним полем струмові ступені (ступені Шапіро).
14. Типи слабких зв'язків в надпровідниках. Співвідношення струм-фаза у контактах різного типу. (S-I-S, S-N-S) в залежності від розмірів і температури. Використання контактів Джозефсона у приладах.
15. Андреевське відбиття квазічастинок від межі розділу нормальний метал-надпровідник (SN-межа). Розбаланс заселеності спектру квазічастинок і глибина проникнення в надпровідник поздовжнього електричного поля при протіканні струму через SN-межу. Нерівноважні ефекти при тунельній інжекції квазічастинок в надпровідник.
16. Резистивний стан тонких надпровідних плівок і вузьких каналів. Нелінійна течія абрикосовських вихорів. Центри і лінії проковзування фази, термоактивовані і квантові, їхня просторова і часова структура. Перегрів надпровідника струмом, модель гарячої плями.
17. Застосування ефекту Джозефсона для реєстрації слабких електромагнітних полів. Надпровідний квантовий інтерферометр (SQUID). Принципи роботи і конструкції одно- і двоконтактних SQUID'ів.
18. Методи просторово-розрізняючого дослідження тонких надпровідників та їх поверхні. Тунельний, лазерний, електронний, атомно-силовий скануючі мікроскопи, магнітооптичний метод. Приклади структур, що вивчаються цими методами.
19. Надпровідні кубіти – «штучні атоми» як основа квантових технологій обробки інформації. Суперпозиція станів. Вплив електромагнітного середовища, декоренція, проблема зворотного впливу (back action). Метод безперервного нечіткого вимірювання квантових станів. Експериментальні умови успішних квантових вимірювань надпровідних кубітів.
20. Практичне використання надпровідників для силових виробів у енергетиці, транспорті. Кабелі, накопичувані енергії, соленоїди, магнітні підвіси. Особливості розгортки струму через надпровідний соленоїд. Елементи надпровідної електроніки – НВЧ резонатори, стандарти вольт, надпровідні квантові інтерферометри, НВЧ змішувачі і селективні приймачі на джозефсонівському контакті.
21. Кристалічна структура $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO) і $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ (BiSCCO). Фазова діаграма купратних високотемпературних надпровідників (ВТНП); фізичний сенс і визначення температур T_N , T_c і T^* .
22. Основні властивості, що відрізняють високотемпературні надпровідники (ВТНП) від низькотемпературних (НТНП). Поняття про псевдощільну (ПЩ) в високотемпературних надпровідниках (ВТНП), фізичний сенс і визначення температур T^* , T_{pair} і T_N .
23. Експериментальне спостереження зниження щільності станів на рівні Фермі (DOS) в високотемпературних надпровідниках (ВТНП).
24. Флуктуаційна провідність в високотемпературних надпровідниках (ВТНП). Фізичний сенс і визначення температур T_G , T_0 і T_{01} .
25. Теоретичні основи флуктуаційної провідності: флуктуаційні теорії Асламазова-Ларкіна, Макі-Томпсона і Хікамі-Ларкіна. Вплив довжини когерентності на температурну залежність флуктуаційної провідності.
26. Концепція локальних пар в високотемпературних надпровідниках (ВТНП). Теорія Імрі-

Ківелсона; діаграма Рандерья.

27. Сильно зв'язані бозони та локальні пари в високотемпературних надпровідниках (ВТНП). Перехід БЕК-БКШ в високотемпературних надпровідниках (ВТНП). Роль довжини когерентності в температурній залежності псевдощільни. Ефекти, що підтверджують наявність локальних пар в високотемпературних надпровідниках (ВТНП).
28. ВТНП з активною площиною FeAs (пніктіди): відкриття; структурний і магнітний перехід в пніктідах. Особливості структури і фазової діаграми. Основні властивості, що відрізняють пніктіди від купратів.
29. Структура і структурний перехід в FeSe. Температурна залежність питомого опору в FeSe. Незвичайні фундаментальні властивості: два типи носіїв заряду.
30. Температурна залежність параметра $\Delta^*(T)$ в FeSe. Експериментальне спостереження псевдощільни в FeSe. Залежність густини локальних пар від дефектних ансамблів в FeSe яка впливає з теорії Пітерса-Бауера.

10. Рекомендована література

- 1 В.В.Шмидт, Введение в физику сверхпроводников, М., Наука, Физматгиз, 1982, 240 с.
- 2 М. Тинкхам, Введение в сверхпроводимость, пер. с англ., М., Атомиздат, 1980, 310 с.
- 3 В. Буккель, Сверхпроводимость. Основы и приложения, пер. с нем., М., Мир, 1975, 368 с.
- 4 Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников, под ред. ДМ. Гинсберга, пер. с англ., М.; Мир, 1990, 543 с.
- 5 П. Де Жен, Сверхпроводимость металлов и сплавов М. Мир, 1968.- 280 с.
- 6 Р.П.Хюбенер, Структуры магнитных потоков в сверхпроводниках, М., Машиностроение, 1984. -224 с.
- 7 С.В. Вонсовский, Ю.А. Изюмов, Э.З. Курмаев, Сверхпроводимость переходных металлов, их сплавов и соединений, М., Наука, Физматгиз, 1977, 384с.
- 8 М. Коэн, Г. Глэдстоун, М. Йенсен, Дж. Шриффер, Сверхпроводимость полупроводников и переходных металлов, пер. с англ., М., Мир, 1972, 316 с.
- 9 Дж. Шриффер, Теория сверхпроводимости, М., Наука, Физматгиз, 1970. - 312 с.
- 9 А. Роуз-Инс, Е. Родерик, Введение в физику сверхпроводников, пер. с англ., М., Мир, 1972.
- 10 М. Уилсон, Сверхпроводящие магниты, М., Мир, 1985, 405 с.
- 11 Н.В. Плакида, Высокотемпературные сверхпроводники, М., Наука, Физматгиз, 1993, 288 с.
- 12 К. К. Лихарев, В. К. Семенов, А. Б. Зорин, Новые возможности для сверхпроводящей электроники // Итоги науки и техники, сер. Сверхпроводимость, 1988, Том 1, сс. 1-74.
- 13 А. Кемпбелл, Дж. Иветтс, Критические токи в сверхпроводниках, пер. с англ., М., Мир, 1975. - 332 с.
- 13 В.М.Пан, В.Г.Прохоров, А.С.Шпигель, Металлофизика сверхпроводников, К., Наукова Думка, 1984. - 192 с.
- 15 Р.Г.Минц, А.Л.Рахманов, Неустойчивости в сверхпроводниках, М., Наука, 1984. - 262 с.
- 16 А.Вл.Гуревич, Р.Г.Минц, А.Л.Рахманов, Физика композитных сверхпроводников, М., Наука, Физматгиз, 1987. - 240 с.
- 17 Высокотемпературные сверхпроводники, Под ред. Д. Нелсона,. М.Уиттингхема, Т.М.М. Джорджа, М., Мир, 1988.
- 18 А. Бароне, Дж. Патерно, Эффект Джозефсона, пер. с англ., М., Мир, 1984
- 19 Л. Солимар, Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение, пер. с англ, М., Мир, 1974
- 20 И.О. Кулик, И.К. Янсон. Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах, М., «Наука», 1970. – 272 с.

- 21 А.Н. Омелянчук, Е.В. Ильичев, С.Н. Шевченко, Квантовые когерентные явления в джозефсоновских кубитах, Киев, «Наукова думка», 2013.-168 с.
- 22 24. Shevchenko S. N. Mesoscopic Physics meets Quantum Engineering, Singapore, World Scientific, 2019 — 176 p.
- 22 И.М. Дмитренко, В мире сверхпроводимости, К., Наукова Думка, 1981.
- 23 G. Blatter, M. V. Feigel'man, V. B. Geshkenbein, A. I. Larkin, and V. M. Vinokur, Vortices in high-temperature superconductors, Reviews of Modern Physics, Vol. 66, No. 4, 1994, pp. 1125-1388.
- 24 N. Ya. Fogel, E. I. Buchstab, Yu. V. Bomze, O. I. Yuzepovich, M. Yu. Mikhailov, A. Yu. Sipatov, E. A. Pashitskii, R. I. Shekhter, and M. Jonson, Direct evidence for interfacial superconductivity in two-layer semiconducting heterostructures, Phys. Rev. B 73, 161306(R) (2006)
- 25 B. I. Ivlev, N. B. Kopnin & V. L. Pokrovsky, Shear instabilities of a vortex lattice in layered superconductors, J. Low Temp. Phys. 80, 187 (1990)
- 26 L. Bulaevskii and John R. Clem, Vortex lattice of highly anisotropic layered superconductors in strong, parallel magnetic fields, Phys. Rev. B44, 10234, (1991).
- 27 D. Feinberg and C. Villard, Intrinsic pinning and lock-in transition of flux lines in layered type-II superconductors, Phys. Rev. Lett. 65, 919, (1990).
- 28 V F Gantmakher, Superconductor–insulator transitions and insulators with localized pairs, Usp. Fiz. Nauk 168, 231 (1998) [Phys. Usp. 41, 214, (1998)]
- 29 W.J. Skocpol, M.R. Beasley, M. Tinkham, Phase-slip center and non-equilibrium processes in superconducting tin microbridges, J. Low Temp. Phys., 16(1/2), 145-167 (1974)
- 30 A. P. Zhuravel, A. G. Sivakov, O. G. Turutanov, A. N. Omelyanchouk, S. M. Anlage, A. Lukashenko, A. V. Ustinov, D. Abraimov, Laser scanning microscopy of HTS films and devices, Физика низких температур, 32(6), 775–794 (2006)
- 31 Kunihiro Inomata, Zhirong Lin, Kazuki Koshino, William D. Oliver, Jaw-Shen Tsai, Tsuyoshi Yamamoto & Yasunobu Nakamura, Single microwave-photon detector using an artificial Lambda-type three-level system, Nature Commun. 7, 12303 (2016)
- 32 А.А. Варламов, А.И. Ларкин. Теория флуктуаций в сверхпроводниках. ДОБРОСВЕТ, Москва, 2005.
- 33 А.Л. Соловьёв, В.М. Дмитриев. Флуктуационная проводимость и псевдощель в высокотемпературных сверхпроводниках YBCO (Обзор). ФНТ, **35** (3), 227, 2009.
- 34 Р.В. Вовк, А.Л. Соловьёв. Электротранспорт и псевдощель в ВТСП соединениях системы 1-2-3 в условиях всестороннего сжатия (Обзор), ФНТ, **44** (2), 111, 2018.
- 35 S.S. Hikami and A.I. Larkin. Magnetoresistance of high temperature superconductors. Mod. Phys. Lett. **B2**, 693, 1988.
- 36 V.J. Emery and S.A. Kivelson. Importance of phase fluctuations in superconductors with small superfluid density. Nature (London) **374**, 434, 1995.
- 37 T. Timusk and B. Statt, The pseudogap in high temperature superconductors: an experimental Survey, Rep. Prog. Phys. **62**, 61 (1999).
- 38 Е.Г. Максимов, Проблемы высокотемпературной сверхпроводимости. Современное состояние. УФН **170**, 1033 (2000).
- 39 M. Randeria, Pre-pairing for condensation, Nature Phys. **6**, 561 (2010).

- 40 A.A. Kordyuk, Iron-based superconductors: Magnetism, superconductivity, and electronic structure (Review Article), ФНТ, 38 (9), 888, 2012
- 41 Yu.V. Pustovit and A.A. Kordyuk, Metamorphoses of electronic structure of FeSe-based Superconductors (Review Article), ФНТ, 42 (11), 1268, 2016

Интернет-ресурси

<http://Wikipedia.com>

<http://superconductors.org>