

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

Дзюба Михайло Олегович



УДК 538.935, 537.312

ТРАНСПОРТНІ ВЛАСТИВОСТІ ГІБРИДНИХ СИСТЕМ З СИЛЬНОЮ
ЕЛЕКТРОННОЮ КОРЕЛЯЦІЄЮ

01.04.07 – фізика твердого тіла

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, м. Харків

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Цзян Юрій Миколайович,
Фізико-технічний інститут низьких температур
ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України,
провідний науковий співробітник
відділу транспортних властивостей провідних
та надпровідних систем

Офіційні опоненти: член-кореспондент НАН України
доктор фізико-математичних наук, професор,
Ямпольський Валерій Олександрович,
Інститут радіофізики та електроніки
імені О. Я. Усикова Національної академії наук України,
завідувач відділу теоретичної фізики

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
Сологуб Сергій Васильович,
Інститут фізики Національної академії наук України,
завідувач відділу адсорбційних явищ

Захист відбудеться “26” ГРУДНЯ 2017 р. ОБ 11⁰⁰ годині на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03 при Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки 47.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України за адресою: 61103, м. Харків, пр. Науки 47.

Автореферат розісланий “24” ЛИСТОПАДА 2017 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої вченої ради Д 64.175.03



Юзефович О. І.

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми

Великий клас сполук з сильними електронними кореляціями (СЕК) включає в себе матеріали на основі перехідних металів з незаповненими d - або f -атомними орбіталями. Сильна локалізація цих орбіталей в просторі призводить до значної взаємодії між електронами, на відміну від випадку електронів s - або p -орбіталей, і непридатності наближення вільних електронів. Взаємодія спіна, заряду і орбітального моменту d - або f -електронів в таких матеріалах робить їх вкрай чутливими до зовнішніх впливів, таким як температура, магнітне поле, тиск або допування. Це призводить до появи в таких з'єднаннях унікальних електронних і магнітних властивостей. Найбільш відомими і вивченими ефектами в з'єднаннях з СЕК є ефект колосального магнітоопору, що спостерігається в манганітах, і високотемпературна надпровідність купратів. Однак цим інтригуючі явища, які спостерігаються в сільнокорельованих системах, не вичерпуються. Крім вищенаведеного, можна виділити наступні ефекти – перехід метал-ізолятор, зарядове впорядкування, фазове розшарування, сегнетоелектрика та інше. При цьому свою роль в прояві цих ефектів грають фактори полікристалічності та гранулярності зразків, що характерні для композитів типу керамік. Загалом, механізми переносу носіїв заряду в матеріалах з СЕК можна поділити на два типи – внутрішньогранульні механізми кореляції електронів і механізми міжгранульного тунелювання, що зумовлює змішаний, або гібридний, характер провідності. Оскільки більшість багатокomпонентних сполук синтезуються саме у вигляді гранульованих керамік, актуальним завданням з точки зору практичного застосування є з'ясування механізмів міжгранульного тунелювання та впливу на них геометричних і просторових параметрів кристалітів. Така різноманітність явищ в матеріалах з СЕК вже призвела до ряду технологічних рішень, а в перспективності подальшого застосування цих матеріалів в науці та техніці не доводиться сумніватися.

Крім гранулярних систем, що утворюються внаслідок технології виробництва, іншим відомим класом гібридних систем є штучні гетероконтакти з використанням різних матеріалів. Андреевська спектроскопія, в основі якої лежить створення та дослідження транспортних властивостей гетероконтактів “нормальний метал (N) – надпровідник (S)”, дозволяє визначати не тільки надпровідні властивості S берега контакту, але й спінову поляризацію носіїв заряду в N області контакту. Ця обставина робить метод андреевської спектроскопії особливо актуальним в світлі відкриття нового класу сполук з СЕК – залізовмісних надпровідників, електронна і магнітна структура яких є предметом гострих дискусій.

Таким чином, тема дисертаційної роботи є актуальною, як з точки зору фундаментальної сучасної науки, так і прогнозованих перспектив практичних застосувань.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана у відділі транспортних властивостей провідних та надпровідних систем Фізико-технічного інституту низьких температур імені

Б. І. Веркіна Національної академії наук України відповідно до відомчих тематичних програм Національної академії наук України: 1.4.10.5.8 – “Квантові електронні явища у нових провідних системах” (номер державної реєстрації 0107U000945, термін виконання 2007-2011 рр.) та 1.4.10.5.9 – “Електронний транспорт у нових провідних та надпровідних системах” (номер державної реєстрації 0112U002637, термін виконання 2012-2016 рр.).

Мета и завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є експериментальне виявлення та пояснення особливостей транспорту носіїв заряду в гібридних системах, таких як гранульовані кобальтити та гетероконтакти на основі залізовмісних надпровідників. Для досягнення поставлених цілей вирішувалися наступні **завдання**:

1. Виготовлення зразків гібридних систем і визначення їх структурних та геометричних параметрів.
2. Дослідження кінетичних та гальваноманітних властивостей зразків у широкому інтервалі температур і магнітних полів.
3. Формулювання науково обґрунтованих висновків про фізичну природу виявлених особливостей транспорту носіїв заряду та закономірності в їх прояві.

Об'єктом дослідження в роботі є транспорт носіїв заряду в системах з сильною електронною кореляцією, таких як гранульовані дірководоповані кобальтити, залізовмісні надпровідники та гетероконтакти на їх основі.

Предметом дослідження є кінетичні та гальваноманітні властивості гранульованих дірководопованих кобальтитів та гетероконтактів на основі залізовмісних надпровідників.

Методи дослідження

Чотиризондовий метод вимірювання електричного опору.

Метод прецезійного вимірювання надмалих різниць напруги за допомогою надпровідникового нуль-піковольтметра.

Андреєвська спектроскопія.

Методики охолодження та регулювання температури експериментальних зразків (2–300 К).

Методики створення магнітних полів до 4 кЕ та до 100 кЕ (лабораторія сильних магнітних полів та низьких температур, м. Вроцлав, Польща).

Наукова новизна одержаних результатів:

В роботі вперше досліджено транспортні властивості системи $\text{Er}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ в широкому інтервалі концентрацій допантів ($0,25 < x < 0,99$), температур (2–300 К) та помірних магнітних полях (до 4 кЕ). Виявлено аномальне зростання провідності та великий магніторезистивний ефект у вузькому проміжку концентрацій Sr ($0,8 < x < 0,99$). В інтервалі малих струмів виявлені індуковані електричним полем нелінійні особливості перколяційного транспорту; вперше була спостережена така закономірність, як зменшення поля пробою при збільшенні концентрації

двовалентного стронцію. Вперше в об'ємних гранульованих кобальтитах $\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,35}\text{CoO}_3$ та $(\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,35})_{0,95}\text{Ag}_{0,05}\text{CoO}_3$ з розміром гранул близько 1 мкм виявлено перехід від металічної до неметалічної поведінки провідності при зниженні температури.

В мезоскопічних гетероконтактах з залізовмісними надпровідниками $\text{LaO}_{0,85}\text{F}_{0,1}\text{FeAs}$ і FeSe в умовах андреевського відбиття провідність у зовнішньому магнітному полі, починаючи з полів більше 10^3 Е, підвищується, зумовлюючи від'ємний магнітоопір. В той час як в умовах пригніченої надпровідності магнітоопор додатній і парний. Запропоновано пояснення такої поведінки внаслідок спінзалежного характеру транспорту носіїв заряду в таких гетероконтактах.

Практичне значення отриманих результатів

Результати дисертації в першу чергу роблять внесок у розуміння фундаментальних процесів, що мають місце в системах з сильно корельованими електронами. Поряд з цим, виявлені в системі $\text{Er}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ значний магніторезистивний ефект (від -10% до $+40\%$) та яскраво виражений напівпровідниковий характер залежності опору від температури обумовлюють можливість практичного застосування цього з'єднання при створенні датчиків магнітного поля та температури.

Особистий внесок здобувача

Всі наукові статті, в яких представлені основні результати дисертаційної роботи, виконані здобувачем у співавторстві. Всі результати експериментальних досліджень, які виносяться на захист, отримані з особистою активною участю здобувача. Здобувач виконав великий обсяг криогенних експериментів, брав безпосередню участь у всіх етапах обробки, систематизації та аналізу експериментальних даних, а так само в підготовці результатів до опублікування у вигляді наукових статей і доповідей на конференціях високого рівня. Таким чином, особистий внесок здобувача складає не менше 50% і є визначальним.

Апробація результатів дисертації

Результати роботи були представлені на конференціях та семінарах, у тому числі:

- 1) Всеукраїнська наукова конференція молодих вчених “Фізика низьких температур” (КМУ ФНТ 2009) (Харків, Україна, 2009).
- 2) International Conference “Functional Materials” – 2009 (ICFM - 2009) (Partenit, Ukraine, 2009).
- 3) 2-nd International Conference for Young Scientists “LOW TEMPERATURE PHYSICS” (ICYS-LTP-2011) (Kharkiv, Ukraine, 2011).
- 4) International Conference “Functional Materials” - 2011 (ICFM -2011) (Partenit, Ukraine, 2011).
- 5) International Conference for Young Scientists “LOW TEMPERATURE PHYSICS” (ICYS–LTP–2012) (Kharkiv, Ukraine, 2012).
- 6) International Conference for Young Scientists “LOW TEMPERATURE PHYSICS” (ICYS–LTP–2013) (Kharkiv, Ukraine, 2013).

7) “Workshop on Hot Top. in HTSC: Fe-Based Supercond., Rus-Ukr-Germ” (Moscow, Russia, 2013).

8) International Conference for Young Scientists “LOW TEMPERATURE PHYSICS” (ICYS–LTP–2014) (Kharkiv, Ukraine, 2014).

9) International Conference “LT-27” (Buenos Aires, Argentina, 2014).

Публікації

Основний зміст дисертації викладено в 15 наукових працях, список яких наведено в кінці автореферату. Серед них 6 статей у спеціалізованих наукових журналах [1-6] і 9 тез доповідей на конференціях [7-15].

Структура дисертаційної роботи

Дисертація складається зі вступу, чотирьох глав, висновків та списку цитованих джерел, що містить 185 найменувань. Загальний обсяг дисертації 133 сторінки, включаючи 46 рисунків та 1 таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтована актуальність обраної теми, сформульована мета дисертаційної роботи й завдання, які необхідно вирішити для її досягнення, показана наукова новизна отриманих результатів, а також їх наукове й практичне значення, представлена загальна структура дисертаційної роботи.

У **першому розділі** наведено огляд літературних даних щодо з'єднань з сильними електронними кореляціями, транспортні властивості яких досліджувалися в дисертації.

Підрозділ 1.1 присвячений перовскітоподібним з'єднанням. Розглянута кристалічна структура характерна для таких матеріалів. Стисло описано базові фізичні процеси характерні для перовскітів перехідних металів, такі як, розщеплення енергетичних рівнів в кристалічному полі, ефект Яна-Теллера, подвійний обмін, зарядове та орбітальне упорядкування. Розглянуто явище фазового розшарування, його види та причини, а також наведено кілька прикладів експериментального спостереження цього явища. Дано стислий огляд перовскітоподібних кобальтитів родини $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$) і простежено еволюцію фізичних властивостей в залежності від рівня допування. Описана головна відмінність кобальтитів від манганітів – можливість знаходження іонів кобальту в різних спінових станах. Також розглянуто вплив полікристалічності перовскітоподібних з'єднань на їх гальваномагнітні властивості. Наведено приклади радикальної зміни поведінки магнітоопору при переході від монокристалічних зразків до гранульованих.

У **підрозділі 1.2** описано літературні дані, що стосуються залізовмісних надпровідників. Обговорюються їх кристалічні та електронні структури і їх можливий зв'язок з температурою надпровідного переходу. Також описаний метод андреєвської спектроскопії, наведено приклади його використання для визначення не тільки параметрів надпровідної щілини, але й спінової поляризації носіїв заряду нормальної області контакту.

У **другому розділі** представлена інформація про методики і техніку експерименту. Оцінені похибки вимірювань. Детально описано надпровідниковий

нуль-піковольтметр (ННПВ) для вимірювання надмалих постійних напруг величиною до $5 \cdot 10^{-13}$ В, і за допомогою якого проводився ряд вимірювань малих різниць потенціалів. Принцип роботи ННПВ заснований на перетворенні різниці вимірюваної та каліброваної постійних напруг, яка зводиться до нуля, в періодичний змінний сигнал частотою F_z за допомогою надпровідного ключа (модулятора). Надпровідний і резистивний стан ключа комутується двічі за період керуючого електромагнітного сигналу частотою $F_{sw}=(1/2)F_z$, форма якого не містить парних гармонік. В результаті паразитні наведення на частоті корисного сигналу F_z , який підсилюється та детектується, ефективно пригнічуються, що здебільшого і забезпечує можливість досягнення в ННПВ зазначеної вище чутливості по напрузі.

Температура вимірювалася платиновим термометром ТП-018-03, який нижче 13 К додатково калібрували при температурі надпровідного переходу свинцю і температурі кипіння скрапленого гелію. Сумарна похибка вимірювань не перевищувала 1%.

Магнітне поле створювалося магнітом Капіці (0-4 кЕ), або ж мініатюрним надпровідним соленоїдом (0-1,2 кЕ). Дослідження в сильних магнітних полях (до 100 кЕ) були проведені в Міжнародній лабораторії сильних магнітних полів і низьких температур, Вроцлав, Польща.

Загалом можна зробити висновок, що експериментальна техніка і застосовувані методики дозволяють досліджувати транспортні властивості зразків в широкому інтервалі опорів (10^{-10} – 10^5 Ом), температур (2-300 К) і помірних магнітних полях (до 4 кЕ) з похибкою не більше 1%.

Третій розділ містить результати досліджень транспортних властивостей гранульованих кобальтитів. Метою таких досліджень було вивчення особливостей кореляції електронів в найменш вивчених ербієвих кобальтитах і з'ясування впливу фактора полікристалічності зразків на транспортні властивості лантанових кобальтитів.

Підрозділ 3.1 присвячений опису зразків перовскітоподібних кобальтитів, а саме, опису кристалографічних і мікроструктурних характеристик. Дослідження $\text{Er}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ вказували на наявність поліедричних спотворень кубічної ґратки, що призводять до утворення орторомбічно спотвореної структури типу $Pbnm$ (прототип GdFeO_3). Дані рентгенівського фазового та мікроструктурного аналізів зразків $(\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x)_{1-y}\text{Ag}_y\text{CoO}_3$ вказували на утворення перовскітоподібної структури з ромбоєдрично спотвореною елементарною коміркою (просторова група $R\bar{3}c$) із середнім розміром зерен близько мікрметра.

Підрозділ 3.2. Для досягнення першої мети були досліджені залежності питомого опору зразків системи $\text{Er}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$ від температури, які практично в усьому інтервалі концентрацій виявляють напівпровідникову поведінку. З графіка, побудованого в координатах логарифма питомого опору від зворотної температури видно, що поведінка провідності наших зразків не може бути описана однією універсальною функцією, наприклад, тільки функцією активаційного або стрибкового типу для чисто напівпровідникової системи (рис. 1). Це свідчить про гетерофазність системи і явну конкуренцію декількох видів обмінного зв'язку. Один з них, на нашу думку, – непрямий феромагнітний зв'язок через електрони провідності, відомий як подвійний обмін, що, загалом, є характерним для цієї

родини сполук. Крім того, з наступного рисунка видно, що провідність тісно пов'язана з концентрацією стронцію і зменшується відповідно до зменшення його концентрації, виявляючи максимум у вузькому інтервалі концентрацій (рис. 2).

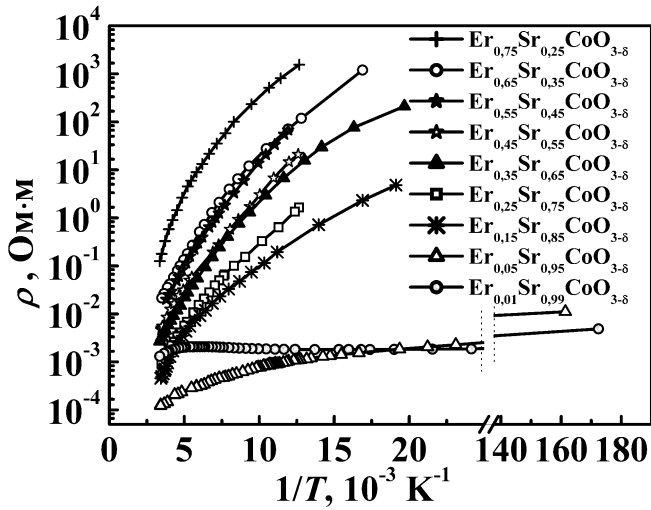


Рис. 1. Залежності питомого опору зразків системи $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ від зворотної температури.

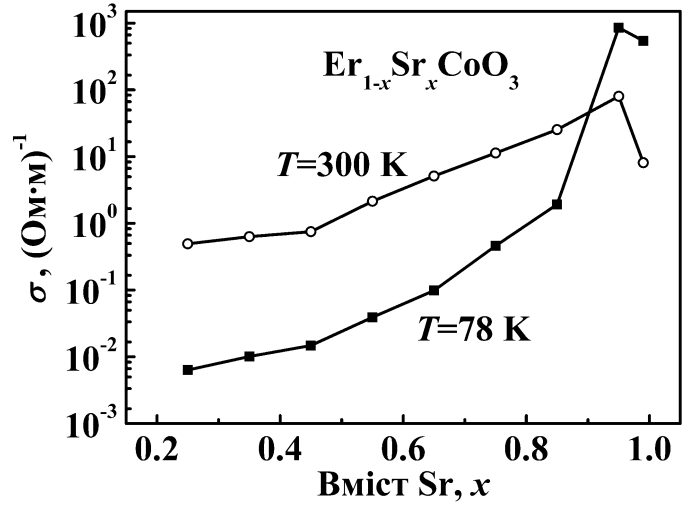


Рис. 2. Залежності питомої провідності системи $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ від концентрації Sr при температурах 300 K (T_r) і 78 K (T_N).

Приймаючи концепцію змішаної провідності, ми скористалися уявленням про двофазну систему. Провідність однієї з фаз σ_{sm} , визначається стрибковим механізмом (наприклад, моттівським), а інший, σ_{DE} , – механізмом подвійного обміну. Тоді повну провідність системи можна записати у вигляді

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{sm} + \sigma_{DE} = \sigma_{DE} \left(1 + \frac{\sigma_{sm}}{\sigma_{DE}} \right) \quad (1)$$

Якщо це так, то змішана провідність σ_{Σ} системи як провідність двофазної структури, представлена у вигляді суми активаційної напівпровідникової провідності та феромагнітної компоненти, що обумовлена подвійним обміном, і може мати вигляд

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_{sm} + \sigma_{DE} = \sigma_{(T_r)} \exp(-\Delta/T) + (\alpha e^2 / ah)(T_C / T), \quad (2)$$

де $\alpha = |Co^{4+}| / |Co^{3+}|$ – частка іонів Co^{4+} , T_C – температура Кюрі, a – параметр ґратки, h – стала Планка.

Цей вираз непогано описує температурну залежність провідності при температурах нижче 50 K для тих концентрацій, де подвійний обмін найбільш суттєвий (рис. 3). Крім того, спостерігався магніторезистивний ефект, хоча й не «колосальний», все ж в окремих випадках здатний досягати десятків відсотків, як видно з даних представлених на рис. 4. З цього рисунка, перш за все видно, що є дві характерні області концентрацій, де магніторезистивний ефект суттєвий. Це область поблизу $x \approx 0,5$ і область $x > 0,8$, де саме і відзначаються найбільш радикальні зміни температурної поведінки провідності зразків у відсутності магнітного поля.

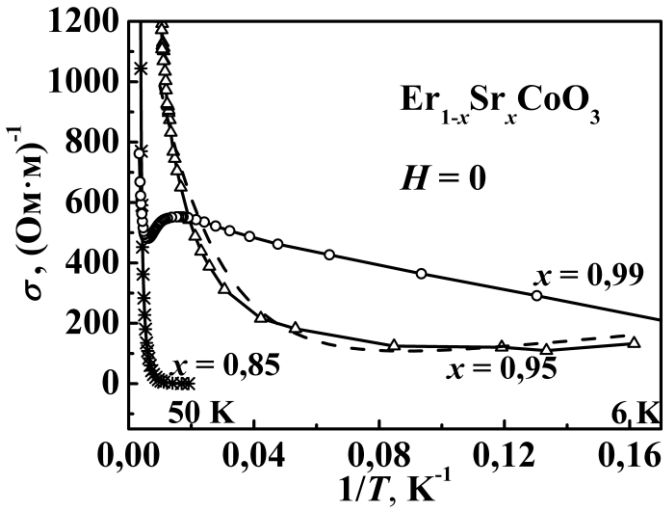


Рис. 3. Температурна поведінка провідності системи $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ в інтервалі концентрацій x від 0,85 до 0,99.

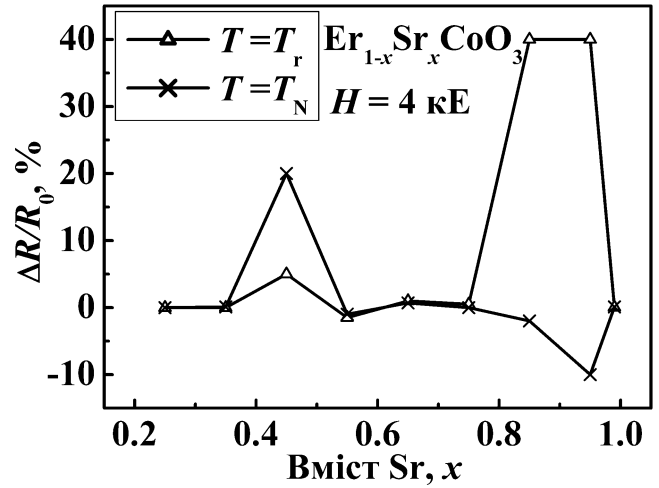


Рис. 4. Залежність магнітоопору від концентрації Sr в магнітному полі 4 кЕ при 300 К (T_r) і 78 К (T_N).

Підрозділ 3.3. присвячено виявленню та вивченню невластивих механізмів кореляції електронів, тобто тих, які обумовлені гранулярною структурою зразків. Так в системі $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ було виявлено індуковані електричним полем стрибки опору в усьому інтервалі концентрацій допантів (рис. 5, 6). Оскільки при чотириконтактних вимірюваннях, характеристики «зонд-зразок» не входять до результатів вимірювання напруги, то можна говорити, що нелінійні стрибки опору є внутрішніми характеристиками вивчених матеріалів і виражаються в прояві режимів неомічної та омичної провідностей. Густинам струму, при яких відбувається такий кросовер, відповідає деяке порогове значення електростатичного поля (в подальшому – поле пробую, E_{br}). Наявність порога напруги свідчить про два аспекти: по-перше – в зразках з кластерною структурою наявний перколяційний характер транспорту; по-друге – омичний режим реалізується при електричних полях вищих за поле пробую, що обумовлене висотою тунельного бар'єру на границях кластерів.

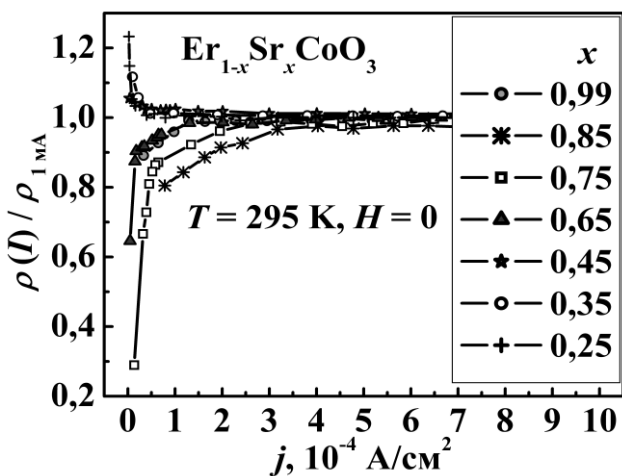


Рис. 5. Індуковані струмом стрибки опору в зразках $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ при кімнатній температурі (T_r).

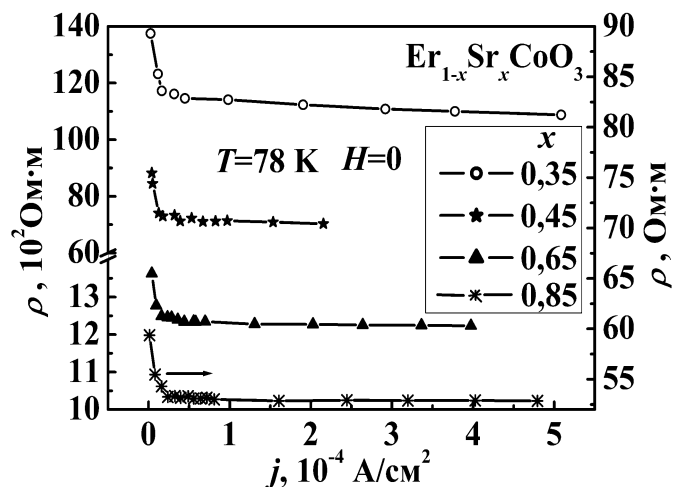


Рис. 6. Індуковані струмом стрибки опору в зразках $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ при температурі кипіння скрапленого азоту (T_N).

Характерною особливістю цього ефекту є впорядкування напрямів стрибків опору при зниженні температури, а саме, на рис. 5 бачимо, що напрямок стрибків опору від зразка до зразка при кімнатній температурі має випадковий характер, в той час як при температурі скрапленого азоту (рис. 6) цей напрямок є універсальним. Така поведінка також може бути пояснена концепцією змішаної провідності. При кімнатній температурі внесок різних механізмів в провідність є порівняним за порядком величини, тому від зразка до зразка з різною концентрацією допантів і різними геометричними параметрами перколяційних шляхів протікання струму, напрямок стрибка опору може бути різним. Інша ситуація має місце при низьких температурах. З огляду на пригнічення стрибкового механізму провідності, визначальним повинен бути механізм подвійного обміну. В цьому випадку стрибок повного опору в область омичної провідності завжди буде мати універсальний знак, подібно до того, як поведуться криві електроопору при T_N (рис. 6).

Також було виявлено, що при послідовній зміні концентраційного параметра x значення поля пробую при T_T змінюються немонотонно, а його величина для одних і тих же зразків на кілька порядків менше, ніж при T_N . В той же час при температурі скрапленого азоту поле пробую плавно залежить від x (рис. 7). Спільною особливістю поведінки обох кривих є зменшення поля пробую при збільшенні концентрації двовалентного стронцію. Ця, виявлена вперше закономірність, імовірно свідчить про кореляцію між збільшенням концентрації Sr та зменшенням енергії, необхідної для реалізації механізмів, що підвищують провідність до омичної.

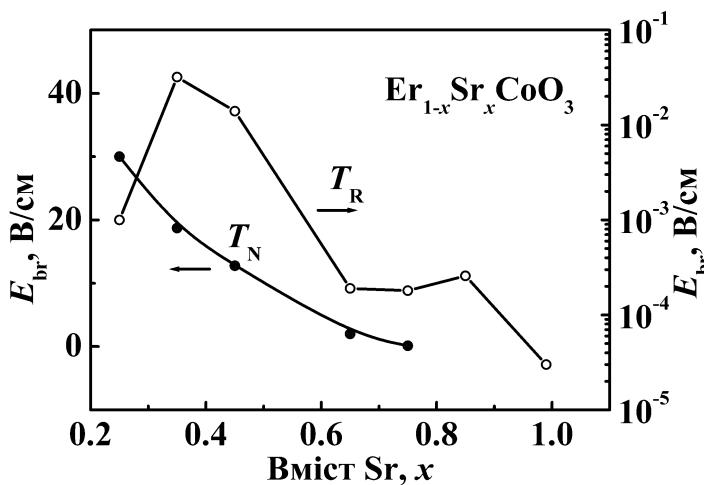


Рис. 7. Напруженість електричного поля пробую на порозі перколяції в залежності від рівня допування системи $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ при кімнатній температурі та температурі кипіння скрапленого азоту.

Також було досліджено зразки лантанової системи $(La_{1-x}Sr_x)_{1-y}Ag_yCoO_3$ ($x=0,35$ і $y=0; 0,05$), розмір гранули яких відмінний від розмірів кристалітів зразків досліджених раніше іншими авторами. Це дозволило виділити та оцінити вплив невластних механізмів кореляції електронів на транспортні властивості гранульованих систем.

Кобальтити зазначеного складу є типовими представниками родини допованих з'єднань на основі оксидів перехідних металів з перовскітною структурою. До власних механізмів провідності можна віднести ефекти кореляції електронів провідності, що керуються допуванням. До інших власних механізмів провідності можна віднести внутрішньогранульні механізми перенесення електронів типу моттовських, що

виникають в умовах неперіодичного силового поля. До невластних ефектів відносять ефекти міжгранульної електростатичної взаємодії, аналога кулонівської блокади, для опису яких зазвичай використовують модель стрибкової провідності як процесу переміщення електронів між парами гранул шляхом тунелювання.

На рис. 8 представлена частина кривих нормалізованого (на опір при 4,2 К) опору зразків з мінімумом – переходом від металічної до неметалічної поведінки провідності. Наявність мінімуму, як і будь-якого екстремуму, на залежностях $R(T)$ означає існування у відповідній області температур конкуруючих механізмів розсіювання або кореляції електронів з порівнянними за величиною внесками в провідність.

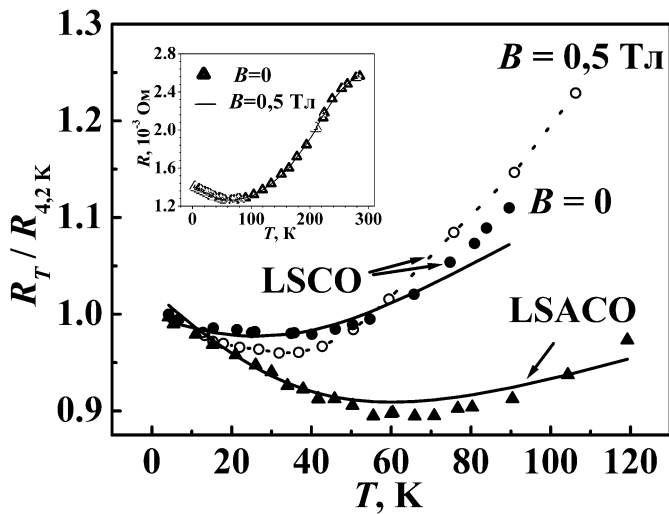


Рис. 8. Мінімум на температурній залежності нормованого опору дірководопованих кобальтитів $La_{0,65}Sr_{0,35}CoO_3$ (LSCO) і $(La_{0,65}Sr_{0,35})_{0,95}Ag_{0,05}CoO_3$ (LSACO) при $B=0$ і $B=0,5$ Тл. Символи – експеримент; суцільні лінії – криві, обчислені за формулою 3. Точкова крива – сполучна лінія. На вставці – залежність від температури опору LSACO при $B=0$ і $B=0,5$ Тл.

Поміж теоретичних концепцій, здатних пояснити таку конкуренцію і, тим самим, походження виявленого мінімуму, ми зупинилися на тих, які під час опису експериментальних результатів приводили б до фізично обґрунтованих значень використовуваних параметрів. Вибираючи концепцію двох внесків: власного (R_g) і міжгранульного (R_{ispt}), – повний опір системи (наприклад, нормалізований на опір зразка при 4,2 К) можна представити у вигляді адитивної суми

$$R(T)/R(4,2K) = [G_g^{-1} + G_{ispt}^{-1}]_T / \langle \rho_{4,2K} \rangle; G_{g; ispt} = \langle \sigma_{g; ispt} \rangle, \quad (3)$$

де кутові дужки означають усереднення відповідних провідностей σ по ансамблю гранул, G –кондактанс, $\rho_{4,2K}$ – питомий опір при 4,2 К. Як відомо, багато перовскітних систем з рідкісноземельними елементами на основі оксидів перехідних металів є двофазними системами. Провідність однієї з фаз – матриці (Re)CO – можна охарактеризувати термоактиваційним механізмом провідності напівпровідникового типу, σ_{sm} (наприклад, моттівським). Другу фазу – провідністю підґратки SCO, σ_{DE} , обумовлену механізмом подвійного феромагнітного обміну між різновалентними іонами кобальту за допомогою електронів провідності, так само як і для системи $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$. У результаті власний внесок гранули в провідність запишеться як $\sigma_g = \sigma_{sm} + \sigma_{DE}$, і кондактанс гранули в цілому буде описуватись виразом (2). При низьких температурах в кобальтитах, переважає механізм подвійного феромагнітного обміну, що обумовлює металічну поведінку провідності при достатньому рівні діркового допування.

Альтернативний внесок в провідність гранульованої магнітної системи може вносити невласний міжгранульний механізм провідності, заснований на принципі спин-поляризованого тунелювання носіїв заряду. Тоді міжгранульний кондактанс з урахуванням усереднення тунелювання по всіх парах гранул у рамках їх антиферомагнітної (АФМ) взаємодії запишеться у вигляді:

$$G_{\text{ispt}} = \langle \sigma_{\text{ispt}}(0 < T < T_c) \rangle = [\rho_{n-n}(U)]^{-1} [1 - P^2 \langle \cos \theta \rangle], \quad (4)$$

де коефіцієнт поляризації $P = (n_{\uparrow} - n_{\downarrow}) / (n_{\uparrow} + n_{\downarrow})$; $n_{\uparrow, \downarrow}$ – щільності станів електронів на рівні Фермі зі спіном вгору та вниз, відповідно; U – висота міжгранульного потенціального бар'єру; $\rho_{n-n}(U) = \rho_0 + \beta T^{3/2}$; $\langle \cos \theta \rangle = \coth(J/T) - (J/T)^{-1}$ – спінова кореляційна функція $\langle \mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 \rangle$; J – обмінна енергія АФМ взаємодії; ρ_0 – залишковий резистивний внесок $n-n$ взаємодії в неактивованому режимі. Повний нормалізований опір зразка, отриманий об'єднанням (2) і (4) відповідно до (3) представлено на рис. 9.

Модель спин-поляризованого тунелювання передбачає пригнічення мінімуму опору вже в слабких магнітних полях, якщо розподіл намагніченості гранул парамагнітний. Дослідження магнітоопору в сильних магнітних полях (до 10 Тл) показали, що положення й величина мінімуму слабо залежать від магнітного поля. Тому ми і зупинилися на випадку АФМ взаємодії між гранулами. Оцінки показують, що енергія обмінної взаємодії у кобальтитів, яка визначає АФМ впорядкування магнітних моментів гранул при тих температурах, де спостерігається мінімум опору, набагато перевищує магнітну енергію в полі 10 Тл, що вказує на стабільність такого упорядкування в вивчених кобальтитах.

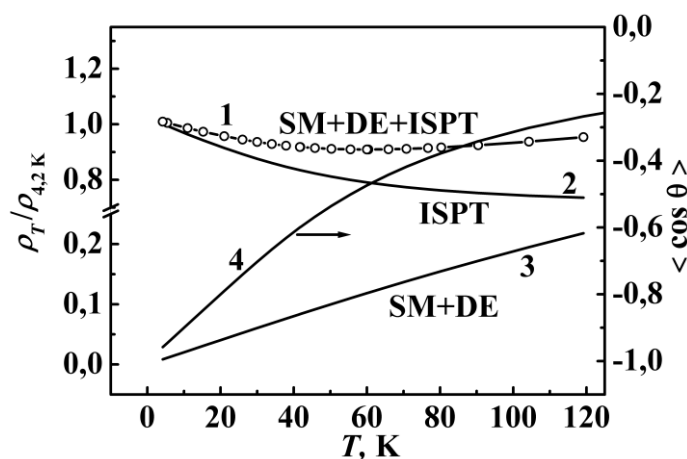


Рис. 9. Нормований опір з мінімумом (точки) та розрахунок за формулою (3) (суцільна лінія 1) для зразка LSACO ($x=0,35$, $y=0,05$). Окремо зображено власний гранульний внесок (крива 3) і міжгранульний внесок (крива 2). Крива 4 – спінова кореляційна функція для АФМ взаємодії гранул.

Четвертий розділ присвячений результатам досліджень гібридних систем з залізовмісними надпровідниками, метою яких було вивчення впливу магнітного елемента в структурі надпровідника на характер перетворення струму в надструм на NS границі та вивчення характеру обмінних взаємодій в нормальному стані залізовмісних надпровідників.

Такі гібридні системи являли собою притискні контакти з міді з одного боку та надпровідника – з іншого. Температури надпровідних переходів визначені з транспортних вимірювань становили для FeSe 6 К, для $\text{LaO}_{0,85}\text{F}_{0,1}\text{FeAs}$ 26 К. Діаметр таких контактів за оцінками був близько 10 мкм, що більше за характерні довжини

вільного пробігу в цих матеріалах. Тобто, по-перше, мова йде про дифузійний режим транспорту носіїв заряду. По-друге, в таких мезоскопічних системах істотним фактором є ефект близькості. Ефект близькості пов'язаний з дисперсією параметра порядку, просторовий масштаб якої особливо дуже великий в інтервалі температур поблизу критичної. В таких умовах власне поле транспортного струму здатне пригнічувати надпровідність, принаймні у масштабі глибини проникнення магнітного поля, який для надпровідників другого роду має порядок величини десятої мікрометра. Таким чином, в залежності від умов експерименту, а саме близькості критичної температури і величини транспортного струму, NS границя може зміщуватися вглиб надпровідника, утворюючи мезоскопічний шар досліджуваної речовини в нормальному стані (рис. 10).

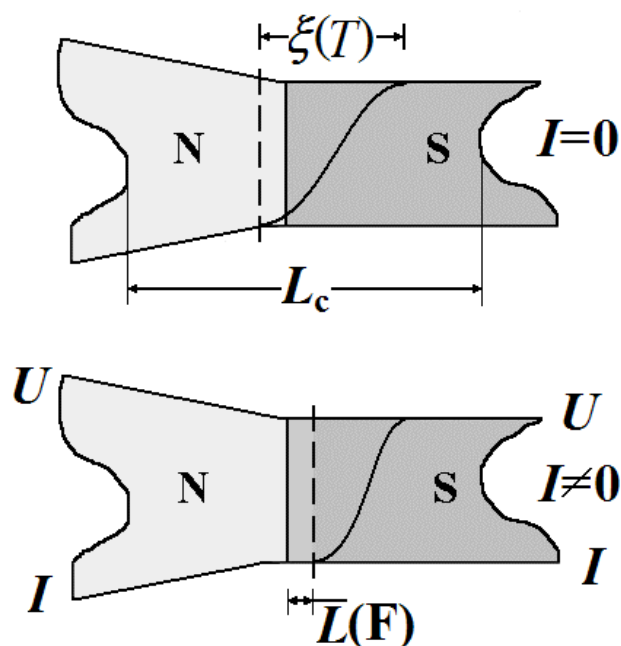


Рис. 10. Схематичне зображення ефекту близькості в NS контакті. L_c - повна довжина контакту, відповідає відстані між вимірювальними зондами ($L_c = 1,5-3$ мм в NN стані). Пунктирна лінія - положення NS границі за відсутності та при наявності транспортного струму. $L(F)$ - частина надпровідника (S), яка перейшла у нормальний стан в результаті зсуву NS границі.

У цьому можна переконатися, порівнявши магнітну енергію власного тангенціального поля струмів, яке було в межах $10^{-2}-2$ Е, з потенціалом спарування електронів. Оцінка за формулами феноменологічної теорії дає наступний результат: при температурах поблизу критичної магнітна енергія значно більша потенціалу електронного спарування. Така концепція знаходить своє підтвердження в експерименті. Вимірювання температурних залежностей опору системи $\text{Cu/LaO}_{0,85}\text{F}_{0,1}\text{FeAs}$ при різних значеннях транспортного струму показали, що у вивченому діапазоні струмів $I=1 \div 100$ мА нормальна частина точково-контактної системи зростає, а частка надпровідної частини, яка відповідає величині зміни опору контакту при надпровідному переході, зменшується при збільшенні вимірюваного струму (рис. 11). Більш того, той факт, що власне магнітне поле струму $I=100$ мА може значно або повністю пригнічувати прояв надпровідного переходу (рис. 12) свідчить про те, що товщина надпровідникової частини контактів близько лондонівської глибини проникнення. Таким чином, можливі два режими транспорту - з NS границею всередині дослідженої речовини або з повністю пригніченою надпровідністю, принаймні в області вимірювання падіння напруги.

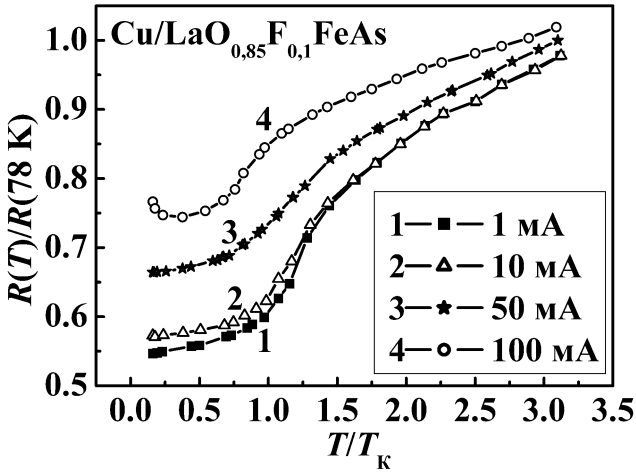


Рис. 11. Температурні залежності нормованого опору точкових контактів $\text{Cu/LaO}_{0,85}\text{F}_{0,1}\text{FeAs}$, які виміряні при різних транспортних струмах.

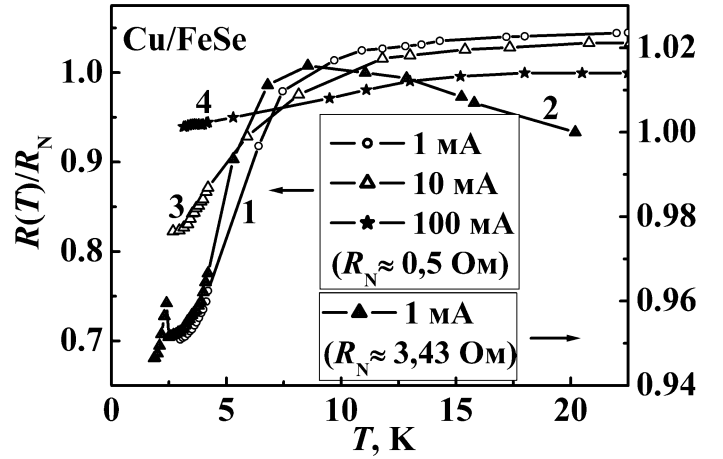


Рис. 12. Нормалізовані температурні залежності опору точкових контактів Cu/FeSe , які виміряні при різних значеннях транспортного струму.

Перший варіант реалізується в системі з $\text{Cu/LaO}_{0,85}\text{F}_{0,1}\text{FeAs}$ при малих транспортних струмах і далеко від критичної температури. При ввімкненні зовнішнього магнітного поля, опір слабо залежить від його величини до полів близько 2 кЕ, починаючи з яких спостерігається значний від'ємний магнітоопір (рис. 13), величина якого на порядок більша можливої слабколокалізаційної поправки. Було показано, що цей ефект стосується тільки опору нормальних областей, що займає надпровідник, тобто в NS режимі – опору $R_{L(F)}(H=0)$ області $L(F)$ контакту (рис. 7). При $T > T_K$ – нормальна область надпровідника розширюється до меж зондів. Вважаючи, що ефект пов'язаний зі спіноюю поляризацією струму при перетворенні дисипативного струму в надструм за допомогою механізму андреєвського відбиття, знайдемо, що спінзалежний внесок, пов'язаний з акумуляцією спіна на NS границі може бути виражений у вигляді

$$\Delta\rho_H / \rho(H=0) = \{r_{\lambda_s}\} \{r_{\xi(H)}\}, \quad (5)$$

де r_{λ_s} – ймовірність збереження дисперсії спінових підзон на довжині спінової релаксації λ_s , а $r_{\xi(H)} = \hbar v_F / \varepsilon_{\xi(H)}^{\xi}$ – ймовірність реалізації андреєвського відбиття в магнітному полі, яке руйнує електрон–діркову когерентність при розходженні e та h траєкторій на відстань, що перевищує довжину хвилі Де Бройля. Розкриваючи цей вираз, в результаті отримаємо:

$$\frac{\Delta\rho_H}{\rho_L} = \frac{\lambda_s}{L} \cdot \frac{P^2}{1-P^2} \left[\frac{\xi_N(H)}{L} - 1 \right]. \quad (6)$$

На рис. 13 крива 4 описує передбачувану поведінку магнітоопору відповідно до цього виразу, яке узгоджується з експериментальною залежністю від'ємного магнітоопіру, що спостерігалась.

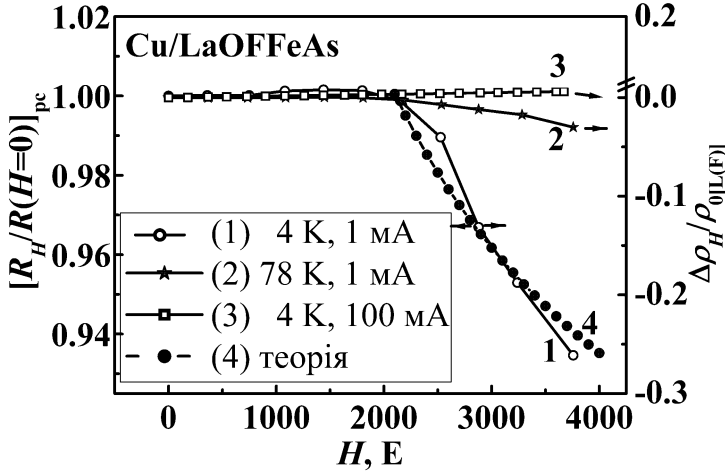


Рис. 13 Від'ємний магнітоопір гетероконтакта $\text{Cu/LaO}_{0,85}\text{F}_{0,1}\text{FeAs}$, нормований на опір нормальних областей надпровідника: 1 – $((T+eV^*) \ll \Delta)$; 2 – $((T+eV^*) > \Delta)$; 3 – $((T+eV^*) \sim \Delta)$; 4 – опис кривої 1 згідно з формулою (6).

Другий варіант, з пригніченою надпровідністю, має місце при великих транспортних струмах або поблизу критичної температури надпровідного переходу. Рис. 14 і рис. 15 показують, що в цьому режимі магнітоопір, не будучи пов'язаним з динамікою носіїв заряду ($\omega\tau \ll 1$), квадратично залежить від магнітного поля, що може бути обумовлено спінзалежним характером їх розсіювання. Врахувавши анізотропію обмінних взаємодій за допомогою спінзалежної частини гейзенбергівського гамільтаніана, спінзалежну частину опору можна записати у вигляді

$$\rho_{spin} = \rho_{J1}\rho_{J2}/(\rho_{J1} + \rho_{J2}). \quad (7)$$

При інших однакових умовах $\rho_{J2} \gg \rho_{J1}$, так як антиферомагнітне розсіювання ($J_2 < 0$) допускає процеси з перевертанням спіна, збільшуючи амплітуду розсіювання, що дозволяє вважати компоненту ρ_{J1} , яка відповідає феромагнітному обміну, переважаючою. Оскільки опір є пропорційним квадрату амплітуди розсіювання, яка, в свою чергу, пропорційна $-(J_m/n_m)(\mathbf{s}_e \mathbf{S})_{S_e S_E}$, то після сумування по кінцевим орієнтаціям спіна та усереднення за початковими орієнтаціями, компонента ρ_{J1} у першому борнівському наближенні буде мати вигляд:

$$\rho_{J1} = \frac{3\pi n}{2e^2 \hbar \varepsilon_F} S(S+1) J_1^2 / n_1 \quad (8)$$

(m та e – маса та заряд електрона, ε_F – енергія Фермі). З цього випливає, що якщо магнітне поле переорієнтує частину спінів в страйпах, зменшуючи, зокрема, n_1 , то це призведе до наступної залежності магнітоопіру від магнітного поля:

$$\frac{\langle \Delta \rho_{spin} \rangle}{\rho_0} \sim J_1(n)^{-1} \sim f_{ev}(H) \sim H^2, \quad (9)$$

де $f_{ev}(H)$ – парна функція від магнітного поля як і в експерименті (рис. 14 и рис. 15).

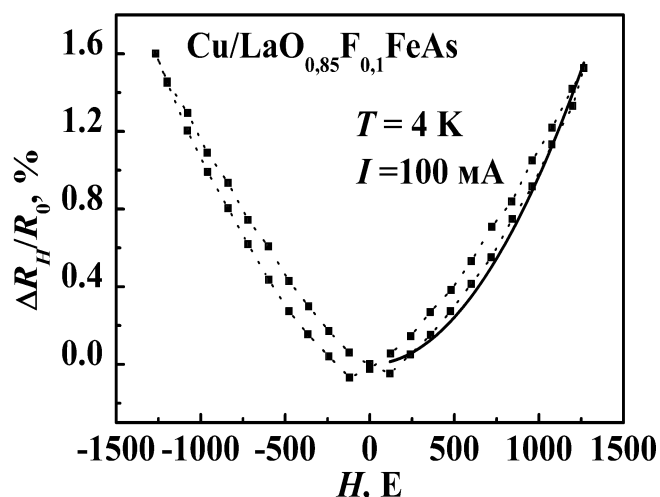


Рис. 14. Магнітоопір з гістерезисом гетероконтакта $\text{Cu/LaO}_{0,85}\text{F}_{0,1}\text{FeAs}$, нормований на повний опір контакта: ■ – експеримент $((T+eV^*) \sim \Delta)$ суцільна крива – спінзалежний магнітоопір відповідно до виразу 9.

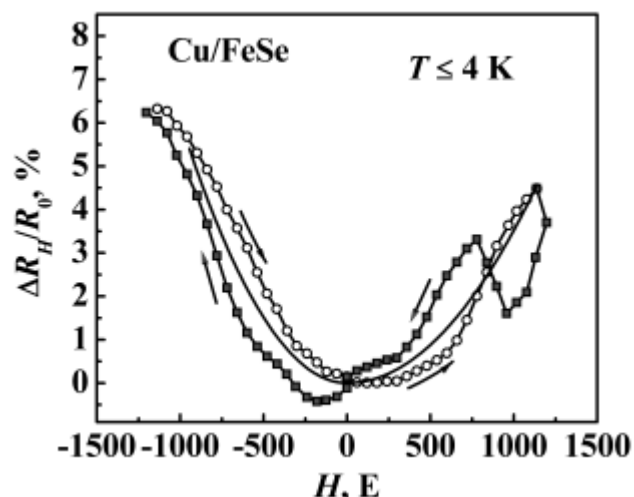


Рис. 15. Магнітоопір з гістерезисом гетероконтакта Cu/FeSe , нормований на повний опір контакта, при $T \sim 4$ К і $I = 1$ мА $((T+eV^*) \sim \Delta)$. Суцільна крива – спінзалежний магнітоопір відповідно до виразу 9.

ВИСНОВКИ

1. Вперше в широкому інтервалі концентрацій досліджено транспортні властивості системи $\text{Er}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$. Виявлено аномальне зростання провідності та великий магніторезистивний ефект у вузькому проміжку концентрацій Sr ($0,8 < x < 0,99$), що пояснено наявністю декількох фаз з різними механізмами провідності.
2. В області малих струмів виявлені індуковані електричним полем нелінійні особливості перколяційного транспорту в системі $\text{Er}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_3$. Вперше спостерігалась така закономірність, як зменшення поля пробою при збільшенні концентрації двовалентного стронцію.
3. Вперше в об'ємних гранульованих кобальтитах $\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,35}\text{CoO}_3$ та $(\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,35})_{0,95}\text{Ag}_{0,05}\text{CoO}_3$ з розміром гранул близько 1 мкм спостережено перехід від металічної до неметалічної поведінки провідності при зниженні температури. Запропоновано пояснення природи явища, засноване на обліку міжгранульного механізму спін-поляризованого тунелювання носіїв заряду між найближчими гранулами в умовах їх антиферромагнітної обмінної взаємодії.
4. Виявлено, що в мезоскопічних гетероконтактах Cu/LaOFFeAs в умовах андрєєвського відбиття провідність у зовнішньому магнітному полі, починаючи з полів більше 10^3 Е, підвищується, зумовлюючи від'ємний магнітоопір. Така поведінка може бути пояснена акумуляцією спіна на границі нормальний метал–надпровідник.
5. В гібридних системах Cu/FeSe і Cu/LaOFFeAs в умовах пригніченої надпровідності виявлені додатність і парність магнітоопору, що може бути наслідком страйпового або нематичного упорядкування в нормальному стані залізовмісних сполук.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Цзян Ю. Н. Электрические свойства эрбиевых кобальтитов / Ю. Н. Цзян, **М. О. Дзюба**, В. Ф. Хирный, О. Г. Шевченко, А. А. Козловский // Физика низких температур. – 2009. – Т. 35, №11. – С. 1123–1132.
2. Chiang Yu. N. Transition metal-nonmetal in conductivity of ceramic hole-doped cobaltites / Yu. N. Chiang, **М. О. Dzyuba**, O. G. Shevchenko, A. A. Kozlovskii, V. Ph. Khirnyi // Journal of Modern Physics. – 2010. – Vol. 1, №5 – pp. 319–323.
3. Цзян Ю. Н. Низкотемпературный минимум сопротивления гранулированных дырочно-допированных кобальтитов / Ю. Н. Цзян, **М. О. Дзюба**, О. Г. Шевченко, В. Ф. Хирный // Физика низких температур. – 2012. – Т. 38, №1. – С. 76–82.
4. Chiang Yu. N. Conductance of non-ballistic point contacts in hybrid systems “normal metal/superconductor” Cu/Mo–C and Cu/LaOFFeAs / Yu. N. Chiang, **М. О. Dzyuba**, O. G. Shevchenko, A. N. Vasiliev // Physica C. Superconductivity and its Applications. – 2012. – Vol. 483. – pp. 149–155.
5. Chiang Yu. N. Study of the itinerant electron magnetism of Fe-based superconductors by the proximity effect / Yu. N. Chiang, D. A. Chareev, **М. О. Dzuba**, O. G. Shevchenko, A. N. Vasiliev // Physica C. Superconductivity and its Applications. – 2013. – Vol. 495. – pp. 153–159.
6. **Dzyuba M. O.** Spin-dependent conductivity of iron-based superconductors in a magnetic field / M. O. Dzyuba, Yu. N. Chiang, D. A. Chareev, A. N. Vasiliev // Physica B: Condensed Matter. – 2015. – Vol. 464, №1 – pp. 68–73.
7. **Дзюба М. О.** Нелинейное электросопротивление четырехкомпонентного кобальтита ErSrCoO в широком интервале концентраций допантов / М. О. Дзюба, Ю. Н. Цзян, О. Г. Шевченко, В. Ф. Хирный // 2-а Всеукраїнська наукова конференція молодих вчених “Фізика низьких температур” (КМВ ФНТ 2009), 1-5 червня, 2009 : тези допов. – Україна, Харків, 2009. – С. 153.
8. **Dzyuba M. O.** Nonlinear electrical resistivity of four-component cobaltite Er_{1-x}Sr_xCoO_{3-δ} over a wide range of dopant concentrations / M. O. Dzyuba, Yu. N. Chiang, O. G Shevchenko, V. Ph. Khirnyi // International Conference “Functional Materials”, 5-10 october, 2009 : conference program. – Ukraine, Partenit, 2009. – P. 30.
9. **Dzyuba M. O.** Nonmonotonic temperature-dependent resistance of granular cobaltites (La_{1-x}Sr_x)_yAg_{1-y}CoO₃ at low temperatures / M. O. Dzyuba, Yu. N. Chiang, O. G Shevchenko // International Conference for Young Scientists “LOW TEMPERATURE PHYSICS”, 6-10 june, 2011 : book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2011. – P. 67.
10. Chiang Yu. N. Low temperature resistance minimum in granular hole-doped cobaltites / Yu. N. Chiang, **М. О. Dzyuba**, O. G Shevchenko, V. Ph. Khirnyi // International Conference “Functional Materials”, 3-8 october, 2011 : conference program. – Ukraine, Partenit, 2011. – P. 49.
11. **Dzyuba M. O.** Conductance of non-ballistic point contacts Cu/LaOFFeAs / M. O. Dzyuba, Yu. N. Chiang, O. G Shevchenko, A. N. Vasiliev // International Conference for Young Scientists “LOW TEMPERATURE PHYSICS”, 14-18 may,

- 2012 : book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2012. – P. 64.
12. Chiang Yu. N. The study of the itinerant electron magnetism of Fe-based superconductors by the proximity effect / Yu. N. Chiang, **M. O. Dziuba**, O. G Shevchenko, A. N. Vasiliev // International Conference for Young Scientists “LOW TEMPERATURE PHYSICS”, 3-7 june, 2013 : book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2013. – P. 26.
 13. **Dziuba M. O.** The negative spin-dependent magnetoresistance in heterocontacts with Fe-based superconductor LaOFFeAs / M. O. Dziuba, Yu. N. Chiang, D. A. Chareev // International Conference for Young Scientists “LOW TEMPERATURE PHYSICS”, 2-6 june, 2014 : book of abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2014. – P. 54.
 14. Chiang Yu. N. The hysteresis of magnetoresistance in heterocontacts with Fe-based superconductors / Yu. N. Chiang, **M. O. Dziuba**, D. A. Chareev // 3th International workshop on point-contact spectroscopy, 8-11 september, 2014 : workshop program & abstracts. – Ukraine, Kharkiv, 2014.
 15. Chiang Yu. N. Spin-dependent transport in iron-based superconductors in a magnetic field / Yu. N. Chiang, **M. O. Dziuba**, D. A. Chareev, A. N. Vasiliev // International Conference “LT-27”, 6-13 august, 2014 : book of abstracts. – Argentina, Buenos Aires, 2014. – P. 70.

АНОТАЦІЯ

Дзюба М. О. Транспортні властивості гібридних систем з сильною електронною кореляцією. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук (доктора філософії) за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла. – Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України, Харків, 2017.

Дисертаційна робота присвячена експериментальному виявленню та поясненню особливостей транспорту носіїв заряду в гібридних системах з сильними електронними кореляціями.

У роботі представлено результати досліджень кінетичних та гальваномагнітних властивостей ербієвих та лантанових кобальтитів і гетероконтактів на основі залізовмісних надпровідників LaOFFeAs та FeSe.

В системі $\text{Er}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CoO}_{3-\delta}$ виявлено аномальне зростання провідності й великий магніторезистивний ефект у вузькому проміжку концентрацій Sr, що пояснено наявністю декількох фаз з різними механізмами провідності. В області малих струмів виявлені індуковані електричним полем нелінійні особливості перколяційного транспорту. Вперше спостерігалась така закономірність, як зменшення поля пробною при збільшенні концентрації стронцію. Вперше в об'ємних гранульованих кобальтитах $\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,35}\text{CoO}_3$ та $(\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,35})_{0,95}\text{Ag}_{0,05}\text{CoO}_3$ з розміром гранул близько 1 мкм спостережено перехід від металічної до неметалічної поведінки провідності при зниженні температури. Запропоновано пояснення природи явища, що ґрунтується на врахуванні міжгранульного механізму спин-поляризованого тунелювання носіїв заряду між найближчими гранулами в умовах їх антиферомагнітної обмінної взаємодії.

Виявлено, що в мезоскопічних гетероконтактах Cu/LaOFFeAs в умовах андреєвського відбиття провідність у зовнішньому магнітному полі, починаючи з полів більше 10^3 Е, підвищується, зумовлюючи від'ємний магнітоопір. Така поведінка може бути пояснена акумуляцією спіна на границі нормальний метал–надпровідник. В гібридних системах Cu/FeSe і Cu/LaOFFeAs в умовах пригніченої надпровідності виявлені додатність і парність магнітоопору, що може бути наслідком страйпового або нематичного упорядкування в нормальному стані залізовмісних сполук.

Ключові слова: гранульовані кобальтити, подвійний обмін, магнітоопір, спин-поляризоване тунелювання, залізовмісні надпровідники, гетероконтакти, андреєвське відбиття, ефект близькості.

АННОТАЦІЯ

Дзюба М. О. Транспортные свойства гибридных систем с сильной электронной корреляцией. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (доктора философии) по специальности 01.04.07 – физика твердого тела. – Физико-технический институт низких температур им. Б. И. Веркина Национальной академии наук Украины, Харьков, 2017.

Диссертационная работа посвящена экспериментальному выявлению и объяснению особенностей транспорта носителей заряда в гибридных системах с сильными электронными корреляциями.

В работе были исследованы кинетические и гальваномагнитные свойства образцов наименее изученных эрбиевых кобальтитов в широком интервале концентраций допантов, температур и магнитных полей. Зависимости удельного сопротивления образцов системы $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ от температуры практически во всем интервале концентраций проявляют полупроводниковое поведение. Анализируя экспериментальные зависимости удельного сопротивления от температуры можно сделать вывод, что поведение проводимости образцов не может быть описано одной универсальной функцией, например, только функцией активационного типа для чисто полупроводниковой системы. Это свидетельствует о гетерофазности системы и явной конкуренции нескольких видов обменной связи. Проводимость тесно связана с концентрацией стронция и уменьшается соответственно уменьшению его концентрации, проявляя максимум в узком промежутке концентраций. Кроме того, был обнаружен значительный магниторезистивный эффект (до 40%) в той области концентраций, где именно и наблюдаются наиболее радикальные изменения температурного поведения проводимости образцов в отсутствие магнитного поля.

Также в системе $Er_{1-x}Sr_xCoO_3$ были исследованы зависимости удельного сопротивления от электрического поля. При малых токах обнаружены нелинейные особенности транспорта во всем интервале концентраций допанта. Токам, при которых происходит переход от неомического режима проводимости к омическому режиму, соответствует пороговое значение электростатического поля – поле пробоя. Наличие порога напряжения свидетельствует о перколяционном характере транспорта в образцах с кластерной структурой. Также было обнаружено, что при

последовательной смене концентрационного параметра значение поля пробоя при комнатной температуре изменяются немонотонно. В то же время при температуре сжиженного азота экспериментальная кривая демонстрирует плавную зависимость. Общей особенностью поведения обеих кривых является уменьшение поля пробоя при увеличении концентрации стронция. Эта, обнаруженная впервые закономерность, вероятно, свидетельствует о корреляции между увеличением концентрации Sr и уменьшением энергии, которая необходима для реализации механизмов, повышающих проводимость до омической.

Были исследованы образцы объемных гранулированных лантановых кобальтитов $\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,35}\text{CoO}_3$ и $(\text{La}_{0,65}\text{Sr}_{0,35})_{0,95}\text{Ag}_{0,05}\text{CoO}_3$ с размером гранул 1 мкм, который отличается от размера гранул образцов ранее изученных другими авторами. Это позволило выделить и оценить влияние межгранульных механизмов туннелирования электронов на транспортные свойства гранулированных систем. Так, впервые обнаружен переход металл-неметалл в проводимости, который проявляется в виде минимума сопротивления на температурной зависимости. Наличие минимума, как и любого экстремума, на зависимостях сопротивления от температуры означает существование в соответствующей области температур конкурирующих механизмов рассеяния или корреляции электронов с сопоставимыми по величине вкладами в проводимость. Такой вклад в проводимость гранулированной магнитной системы может быть обусловлен несобственным межгранульным механизмом проводимости, который основан на принципе спин-поляризованного туннелирования носителей заряда между гранулами в условиях их антиферромагнитного взаимодействия.

Исследование гибридных систем с железосодержащими сверхпроводниками, имели целью изучение влияния магнитного элемента в структуре сверхпроводника на характер преобразования тока в сверхток на NS границе и изучение характера обменных взаимодействий в нормальном состоянии железосодержащих сверхпроводников. Такие гибридные системы представляли собой прижимные контакты из меди, с одной стороны, и сверхпроводника – с другой. Диаметр контактов по оценкам был около 10 мкм, что больше характерных длин свободного пробега в этих материалах. То есть, во-первых, речь идет о диффузионном режиме транспорта носителей заряда. Во-вторых, в таких мезоскопических системах существенным фактором является эффект близости. В таких условиях собственное поле транспортного тока способно подавлять сверхпроводимость, по крайней мере, на масштабе глубины проникновения магнитного поля, который для сверхпроводников второго рода имеет порядок величины 0,1 мкм. Таким образом, в зависимости от условий эксперимента возможны два режима транспорта – с NS границей внутри исследуемого вещества или с полностью подавленной сверхпроводимостью, по крайней мере в области измерения падения напряжения. Первый случай реализуется в системе с $\text{Cu}/\text{LaO}_{0,85}\text{F}_{0,1}\text{FeAs}$ при малых транспортных токах и далеко от критической температуры. При включении внешнего магнитного поля, сопротивление слабо зависит от его величины до полей порядка 2 кЭ, начиная с которых наблюдается значительное отрицательное магнитосопротивление. Мы связываем этот эффект с проявлением спинзависимого характера андреевского отражения (аккумуляции спина) из-за магнетизма слоя железосодержащего

сверхпроводника в нормальном состоянии. Когда же сверхпроводимость полностью подавлена и NS граница отсутствует, в гибридных системах Cu/FeSe и Cu/LaO_{0,85}F_{0,1}FeAs обнаружено положительность и четность магнитосопротивления, что может быть следствием страйпового или нематического упорядочения локальных магнитных моментов железосодержащих сверхпроводников в нормальном состоянии.

Ключевые слова: гранулированные кобальтиты, двойной обмен, магнитосопротивление, спин-поляризованное туннелирование, железосодержащие сверхпроводники, гетероконтакты, андреевское отражение, эффект близости.

ABSTRACT

Dzyuba M. O. Transport properties of hybrid systems with strongly correlated electrons. – Qualification scientific work with the manuscript copyright.

The thesis for a candidate of physical and mathematical sciences degree (PhD) in speciality 01.04.07 – solid state physics. – B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The thesis is dedicated to the experimental manifestation and explanation of the peculiarities of charge transport in hybrid systems with strongly correlated electrons.

This work presents the results of the investigations of the kinetic and galvanomagnetic properties of erbium and lanthanum cobaltites and heterojunctions with iron-based superconductors LaOFeAs and FeSe.

In the Er_{1-x}Sr_xCoO_{3-δ} system, it was found an abnormal increase of conductivity and a large magnetoresistance effect in a narrow range of Sr concentrations, which is explained by the presence of several phases with different conduction mechanisms. For low values of current, it was detected the nonlinear features of percolation transport induced by an electric field. For the first time it was observed a regularity such as a decrease in the breakdown field with increasing concentration of strontium. For the first time the transition from metallic to nonmetallic behavior of the conductivity with a decrease of the temperature was observed in the bulk granular cobaltites La_{0,65}Sr_{0,35}CoO₃ and (La_{0,65}Sr_{0,35})_{0,95}Ag_{0,05}CoO₃ with a granule size of about 1 micrometer. It was proposed an explanation of the nature of the phenomenon, based on the account of the intergranular mechanism of the spin-polarized tunneling of charge carriers between the nearest granules in the conditions of their antiferromagnetic exchange interaction.

It was found that in the mesoscopic heterojunctions Cu/LaOFeAs in the conditions of the Andreev reflection, conductivity in the external magnetic field greater than 10³ Oe, increases, causing a negative magnetoresistance. This behavior can be explained by the spin accumulation on the normal metal–superconductor boundary. In the hybrid systems Cu/FeSe and Cu/LaOFeAs in the conditions of suppressed superconductivity, the porosity and parity of the magnetoresistance have been found, which may be a result of stripe or nematic ordering in the normal state of iron-based superconductors.

Keywords: granular cobaltites, double exchange, magnetoresistance, spin-polarized tunneling, iron-based superconductors, heterojunctions, Andreev reflection, proximity effect.