

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Буханька Федора Миколайовича

«Фазові перетворення в низьковимірних електронних і спінових системах з конкуруючими параметрами порядку»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізика твердого тіла

Дисертація Ф.М. Буханька є експериментальною роботою, присвяченою формуванню та руйнуванню періодичних квазідвовимірних електронних і спінових структур в з'єднаннях з декількома співіснуючими параметрами порядку (орбітальний, зарядовий і спіновий), а також впливу квазідвовимірності на магнетизм електронних станів, що сильно корельовані. Відомо, що змішаний основний стан електронних і магнітних структур з сильною взаємодією, в якому одночасно існують кілька конкуруючих параметрів порядку, нестійкий до всякого роду зовнішніх впливів. Ця нестійкість призводить до електронних і магнітних фазових перетворень, індукованих як сильними, так і слабкими зовнішніми впливами: змінами складу досліджуваних зразків, температури, зовнішнього тиску та зовнішніх полів. Фазові діаграми матеріалів з такою нестійкістю різноманітні, відрізняються складністю і викликають великий інтерес як серед теоретиків, так і експериментаторів, що працюють в галузі фізики твердого тіла. Можливість встановлення класичного дальнього магнітного порядку в низьковимірних магнетиках значно обмежена через сильні флуктуації електронного і магнітного порядку, тому в таких системах стає можливим спостерігати безліч неklasичних квантових кооперативних ефектів, серед яких варто відзначити надпровідність, хвилі спінової і зарядової щільності, бозе-ейнштейнівську конденсацію, спін-рідинний магнітний стан. Квазіодновимірні системи вивчені до теперішнього часу досить детально як експериментально, так і теоретично, тоді як двовимірні і квазідвовимірні системи вивчені значно гірше. Тож **актуальність** теми та досліджень цієї дисертаційної роботи є безперечною та очевидною.

У дисертації Буханька Ф.М. комплексно досліджено формування та руйнування квазідвовимірних електронних і спінових структур в декількох системах ВТНП купратів, манганітів з решітками типу перовскіту і серій відпалених плівок аморфного германію методами дифракції рентгенівських променів, мікрохвильового імпедансу, електронного парамагнітного резонансу, вимірювань dc опору, вимірювань намагніченості в постійних і імпульсних магнітних полях, магнітної сприйнятливості та діелектричної константи в змінних полях. Була детально вивчена дія зовнішніх впливів у вигляді змін складу зразків, температури, напруженості dc і ac зовнішніх

магнітних полів і режиму вимірювань на структурні, електронні та магнітні фазові перетворення в цих з'єднаннях.

Мета досліджень - встановлення механізмів формування і руйнування низьковимірних просторово-модульованих електронних та магнітних структур в сполуках з кількома співіснуючими параметрами порядку, що призводить до метастабільності фізичних станів матеріалів, досліджених в даній роботі, і отже можливості легко керувати ними за допомогою зовнішніх впливів. У зв'язку з цим представляється перспективним **практичне застосування** деяких виявлених в даній роботі незвичайних властивостей фрустрованих квазідвовимірних електронних і спінових структур в купратах і манганітах при виготовленні різного роду сенсорів і елементів пам'яті в промисловій електроніці. Тема дисертаційної роботи відповідає основним науковим напрямкам досліджень Донецького фізико-технічного інституту імені О.О. Галкіна НАН України (м. Київ). Основу дисертації складають результати, отримані при виконанні автором бюджетних тем інституту за 1992-2018 р.р. Результати роботи були частково підтримані грантом в рамках науково-технічного співробітництва в 2001-2003 р.р. між Індією і Україною за проектом "Квантові фазові переходи і транспорт в високотемпературних надпровідниках", 2001-2003, № держреєстрації 0101U009268.

Новизна досліджень. Ф.М. Буханьку належить розробка безконтактної методики вимірювань електронних і магнітних властивостей $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ кераміки в НВЧ діапазоні електромагнітних хвиль, проведення вимірювань НВЧ електронних і магнітних властивостей при 300 К на трьох серіях зразків, а також інтерпретація отриманих експериментальних результатів. Порогові особливості НВЧ імпедансу поблизу $y_{\text{dm}} = 6.4$ пояснені формуванням в металевих CuO_2 шарах низьковимірних структур зарядів у вигляді динамічних страйпів, що добре узгоджується з моделями ас провідності двохкомпонентного середовища у вигляді 2D металевих сіток з обірваними зв'язками поблизу переходу діелектрик-метал. Знайдено, що стабілізація періодичної орто-II структурної фази поблизу кисневого індексу $y = 6.5$ призводить до пінінгу страйпів (розділ 1).

Ним також вперше розроблена безконтактна методика вимірювання температурних залежностей дійсної та уявної компонент НВЧ імпедансу зразків ВТНП кераміки в динамічному режимі з високою роздільною здатністю по температурі. На кількох зразках $Y\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$ кераміки Буханько Ф.М. провів вимірювання НВЧ імпедансу в широкому діапазоні температур і напруженостей d_c і НВЧ магнітних полів. Це дозволило вперше знайти прояви у мікрохвильовому діапазоні електромагнітних хвиль таких добре відомих в літературі квантових фазових перетворень в ВТНП зразках, як: перехід в стан з орбітальним парамагнетизмом спонтанних вихорів струмів, топологічний фазовий перехід Костерлітца-Таулесса розв'язання 2D вихорів пар, топологічний фазовий перехід Костерлітца-Таулесса-

Березинського розв'язання електрон - діркових пар та джозефсонівський плазмовий резонанс (розділ 2).

Великий інтерес викликають представлені в розділах 3-5 дисертації результати комплексного дослідження структурних, електронних і магнітних фазових перетворень в допованих манганітах з решіткою типу перовскіту. В **третьому розділі** розглянуто еволюцію орбітального, зарядового і магнітного порядку в системі манганітів $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_3$ ($0 \leq x \leq 1$), яка індукована зростанням концентрації x кальцію. Встановлено, що в системі допованих манганітів $\text{La}_{1-x}\text{Ca}_x\text{MnO}_{3+\delta}$ фазовий перехід діелектрик-метал відбувається з ростом x поблизу критичної концентрації кальцію $x_{c1} \cong 0.15$ внаслідок закривання ян-теллерівської щілини в спектрі носіїв заряду. Виявлено перехід першого роду з діелектричного в металевий феромагнітний стан, викликаний зміною механізму феромагнітного обміну між спінами марганцю. Згідно побудованої магнітної $T - x$ фазової діаграми, подальше зростання концентрації Ca призводить до фазового переходу першого роду з металевого ФМ стану в квазідвовимірну діелектричну АФМ фазу CE -типу з просторово-модульованим орбітальним і зарядовим впорядкуванням поблизу критичної позначки $x_{c2} \cong 0.5$. В **четвертому розділі дисертації** встановлено, що в системах самодопованих манганітів $\text{La}_{1-y}\text{R}_y\text{MnO}_{3+\delta}$ ($R = \text{Pr}, \text{Nd}, \text{Sm}; \delta \cong 0.1$) ізовалентне заміщення іонів лантану рідкоземельними іонами з меншим радіусом призводить до формування квазідвовимірних синусоїдально модульованих АФМ структур A -, E - і CE - типу з малою (нульовою) магнітною анізотропією в ab -площинах. Фрустрація квазідвовимірних антиферомагнітних структур спінів Mn при значеннях середнього іонного радіуса іонів заміщення порядку $\langle r_A \rangle \cong 1.13 \text{ \AA}$ призводить до появи квантової спінової рідини з щілиною в спектрі магнітних збуджень, електрон-діркової рідини у вигляді металевих крапель і локальної надпровідності в вигляді 2D сітки надпровідних петель з джозефсонівськими контактами при температурах нижче 60 К. В **п'ятому розділі** встановлено, що магнітна $T - y$ фазова діаграма допованих стронцієм систем $R_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{MnO}_3$ ($R = \text{Nd}, \text{Sm}, \text{Gd}$) з малим структурним безладом асиметрична і містить характерні ознаки "гігантських" флуктуацій електронних і магнітних властивостей параметрів порядку, що виникають поблизу межі існування металеві ФМ фази і діелектричної АФМ фази CE -типу поблизу $\langle r_A \rangle \cong 1.3 \text{ \AA}$. У зразках системи $(\text{Sm}_{1-y}\text{Gd}_y)_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{MnO}_3$ з $y = 0.5, 0.6$ і 0.7 при температурах нижче 50 К виникає змішаний стан двох фаз - впорядкованої АФМ фази CE -типу з зарядовим і орбітальним порядком і невпорядкованої квантової фази Гріффітса. З ростом магнітного поля до критичного значення відбувається незворотний фазовий перехід першого роду з діелектричної АФМ фази CE -типу в металеву феромагнітну фазу. Подальше зростання концентрації гадолінію до значення $y = 1.0$ призводить до фазового переходу системи спінів марганцю в змішаний стан двох фаз без дальнього магнітного порядку - немагнітний стан типу безщільової спінової квантової рідини і фази

спінового скла, що співіснують в нульовому dc зовнішньому магнітному полі при температурах нижче 50 К.

Найбільш важливими з одержаних автором результатів є наступні:

1. Виявлення в системах допованих купратів $R\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$ методом НВЧ імпедансу формування в металевих CuO_2 шарах при $y > y_{dm} = 6.4$ періодичних квазідвовимірних динамічних наноструктур дірок типу зарядових страйпів у вигляді фрагментів низькочастотних хвиль зарядової густини. Встановлено, що стабілізація періодичної орто-II фази поблизу кисневого індексу $y = 6.5$ призводить до захоплення динамічних зарядових страйпів надструктурою орто - II фази в вигляді 1D статичної хвилі зарядової густини. При оптимальному рівню допування поверхня Фермі реконструюється і з'являється сингулярність Ван-Хова густини електронних станів поблизу E_F .

2. Виявлення в системах самодопованих магнанітів $\text{La}_{1-y}\text{R}_y\text{MnO}_{3+\delta}$ при ізовалентному заміщенні іонів лантану рідкоземельними іонами з меншим радіусом формування квазідвовимірних синусоїдально модульованих АФМ структур A -, E - і CE - типу з малою (нульовою) магнітною анізотропією в ab -площинах. Фрустрація квазідвовимірних антиферомагнітних структур спінів Mn при значеннях середнього іонного радіуса іонів заміщення порядку $\langle r_A \rangle \cong 1.13 \text{ \AA}$ призводить до появи квантової спінової рідини з щільною в спектрі магнітних збуджень, електрон-діркової рідини у вигляді металевих крапель і локальної надпровідності в вигляді 2D сітки надпровідних петель з джозефсонівськими контактами при температурах нижче 60 К.

3. Виявлення в зразках системи $(\text{Sm}_{1-y}\text{Gd}_y)_{0.55}\text{Sr}_{0.45}\text{MnO}_3$ з $y = 0.5, 0.6$ і 0.7 при температурах нижче 50 К появи змішаного стану двох фаз - впорядкованої АФМ фази CE -типу з зарядовим і орбітальним порядком і невпорядкованої квантової фази Гріффітса. Подальше зростання концентрації гадолінію до значення $y = 1.0$ призводить до фазового переходу системи спінів марганцю в змішаний стан двох фаз без дальнього магнітного порядку - немагнітний стан типу безщільової спінової квантової рідини і фази спінового скла, що співіснують в нульовому dc зовнішньому магнітному полі при температурах нижче 50 К.

Достовірність результатів та висновків дисертації безсумнівна. Вона забезпечена високою кваліфікацією автора та можливостями експериментальних установок. У роботі використовуються результати декількох експериментальних методів дослідження - рентгеноструктурного аналізу, НВЧ поверхневого імпедансу, ЕПР, ас магнітної і діелектричної сприйнятливості, вимірювань намагніченості в постійному і імпульсних магнітних полях. Результати, отримані різними методами, гармонійно доповнюють один другого.

Щодо **недоліків змісту дисертації**, то суттєвих зауважень в мене немає. Але хотілось би бачити в роботі більш детальний теоретичний аналіз отриманих експериментальних результатів, що дозволило б краще зрозуміти

механізми формування квантових рідин в купратах і манганітах та їх незвичайних властивостей. Щодо недоліків оформлення роботи, то можна відмітити, що в дисертаційній роботі містяться окремі недостатньо чіткі формулювання, декілька малюнків недостатньо високої якості (рис. 2.2, 3.1, 3.2, 3.5), описки (с. 52, 53, 107), що не впливає, однак, на загальний зміст роботи.

Загальна оцінка дисертаційної роботи. Дисертація є завершена наукова праця, що містить нові експериментальні результати у фізиці твердого тіла. Наукова новизна дисертації суттєва. Авторіві вдалось успішно розв'язати поставлені задачі та одержати нову інформацію стосовно формування та руйнування низьковимірних електронних і магнітних структур в системах ВТНП купратів, допованих манганітів та плівках аморфного германію. Основні результати достатньо повно і своєчасно опубліковані в авторитетних наукових журналах та пройшли апробацію на багатьох міжнародних конференціях. Автореферат вірно і повно відповідає змісту і основним положенням дисертації. Необхідно відмітити високий науковий рівень роботи, добрий виклад матеріалу та високу кваліфікацію її автора. Матеріали дисертаційної роботи викладені в 100 друкованих роботах, які включають 22 журнальні статті в провідних вітчизняних та іноземних журналах, два препринта, 16 статей в збірниках праць міжнародних конференцій і 60 публікацій тез доповідей в матеріалах міжнародних наукових конференцій.

Я вважаю, що дисертація **Ф.М. Буханько** повною мірою задовольняє всім вимогам, що пред'являються до докторських дисертацій, зокрема, пунктам 9, 11 та 12 "Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника (Постанова КМУ від 24.07.2013 № 567), а її автор заслуговує присудження вченого ступеня доктора фіз.-мат. наук за спеціальністю: 01.04.07– фізика твердого тіла.

Офіційний опонент,
член-кореспондент НАН України,
доктор фізико-математичних наук, професор,
головний науковий співробітник
Інституту радіофізики та електроніки
імені О.Я. Усикова НАН України (м. Харків),

Ямпольський В.О.

Підпис головного наукового співробітника Інституту радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України В.О. Ямпольського засвідчую.

Вчений секретар Інституту радіофізики та електроніки
імені О.Я. Усикова НАН України,
кандидат фізико-математичних наук



Почаніна І.Є.