

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **КОЛОДЯЖНОЇ Марини Павлівни**

**«МАГНІТОПРУЖНІ ТА П'ЄЗОМАГНІТОЕЛЕКТРИЧНІ ЕФЕКТИ В
МУЛЬТИФЕРОЇКАХ $\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4$, $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$ ТА LiCoPO_4 »**

подану до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата

фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.07 – “фізика твердого тіла”

Розвиток електронної техніки вимагає від розробників створення нових матеріалів з широким діапазоном фізичних властивостей. У зв'язку з цим у теперішній час велика увага приділяється пошуку матеріалів, які поєднували б в необхідній комбінації традиційні властивості (магнітні, п'єзоелектричні, діелектричні та ін.), а також мали б принципово нові (гібридні) властивості. До таких матеріалів можна віднести мультифероїки - кристалічні тверді тіла, в яких співіснують хоча б два з трьох параметрів порядку: магнітного, електричного або механічного.

Дослідження взаємодії магнітної, електричної і пружної підсистем в мультифероїках є вельми **актуальним** завданням в сучасній фізиці конденсованого стану. Крім того, розуміння мікроскопічних механізмів, що призводять до мультифероїдної поведінки, відкриває широкі перспективи практичного застосування цих матеріалів. Саме тому, дослідження п'єзоелектричних, п'єзوماгнітоелектричних, магнітопружних та пружних характеристик ряду кристалів, що належать до класу мультифероїків, а саме - рідкісноземельних фероборатів ($\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4$, $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$) та літєвих ортофосфатів (LiCoPO_4), безсумнівно, є **актуальними** та визначають тему дисертаційної роботи М.П. Колодяжної.

Актуальність теми також підтверджується тим, що дисертаційна робота М.П. Колодяжної виконувалася у Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України відповідно до цілей і завдань бюджетних програм науково-дослідницьких робіт з актуальних напрямків

фундаментальних і приладних наукових досліджень НАН України, починаючи з 2012 року і по теперішній час.

Структура дисертації, основні наукові та практичні результати та їх новизна.

Дисертація М.П. Колодяжної складається з анотацій українською та англійською мовами, переліку умовних позначень і скорочень, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та двох додатків.

У **Вступі** викладено актуальність теми дисертації, її зв'язок із науковими програмами, сформульовані мета та завдання досліджень, наукова новизна, практична цінність отриманих результатів, наведено результати про наукові публікації здобувача, наведено дані про особистий внесок дисертанта, вказано структуру та об'єм дисертації.

У першому розділі **«Кристалічна структура, магнітні та магнітоелектричні властивості рідкісноземельних фероборатів та літієвих ортофосфатів (Огляд літератури)»** дається визначення магнітоелектричного ефекту, розглянуто етапи розвитку теоретичних уявлень про його механізми, пояснено поняття «мультифероїки», до яких, зокрема, належать досліджені в дисертаційній роботі сполуки рідкісноземельних фероборатів та літієвих ортофосфатів. Також наведено огляд літературних даних щодо структури та основних фізичних властивостей рідкісноземельних фероборатів $RFe_3(BO_3)_4$ (R – рідкісноземельний елемент) та кристалу $LiCoPO_4$, що належить до літієвих ортофосфатів сімейства $LiMPO_4$ (M – Co, Ni, Mn, Fe). В кінці розділу наведено постановку завдань дисертаційної роботи. Літературний огляд, а також бібліографія свідчать про достатній обсяг знань і ґрунтовний науковий підхід автора до проблеми, що вивчається.

У другому розділі **«Методика експерименту»** розглянуто використовуваний в роботі метод одночасного вимірювання швидкості та поглинання звуку, принцип роботи експериментальної установки. Особливу увагу приділено опису методики нерезонансної акустоелектричної

трансформації, що дозволяє досліджувати поведінку п'єзоелектричних характеристик монокристалічних зразків. Докладно описано конструкцію кріостату та процедуру підготовки зразків для акустичних досліджень.

Основні оригінальні результати автора наведено в третьому, четвертому та п'ятому розділах.

У третьому розділі «**Магнітопружні властивості фероборату $\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$** » досліджено пружні та магнітопружні характеристики фероборату бінарного складу $\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ при низьких температурах. Наведено дані щодо абсолютних значень швидкості звуку, які були виміряні з достатньо високою точністю (похибка не перевищувала 1,5%) та розрахунку модулів пружності та п'єзоелектричного модуля e_{11} у кристалі $\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$. Проаналізовано поведінку акустичних характеристик та намагніченості $\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ поблизу фазових переходів у магнітній підсистемі кристалу. **Виявлено**, що в досліджуваній сполуці нижче температури Нееля реалізується послідовність якнайменше двох спонтанних магнітних фазових перетворень. Переходи відбуваються як спонтанно (при зміні температури), так і під впливом зовнішнього магнітного поля, паралельного напрямку осі симетрії 3-го порядку ($H \parallel C_3$). **Вперше** побудовано фазову $H - T$ діаграму ($H \parallel C_3$) сполуки.

Четвертий розділ «**П'єзомагнітоелектричні та магнітопружні ефекти в мультифероїку $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$** » присвячено дослідженню магнітопружних, магнітоелектричних та п'єзомагнітоелектричних ефектів в самарієвому феробораті. В кристалі **вперше** експериментально виявлено п'єзомагнітоелектричний ефект у «неп'єзоактивній» конфігурації, яка не допускає, з погляду симетрії, появи п'єзоелектричного відгуку в парамагнітному стані. Розглянуто механізми його виникнення та дано їх феноменологічну інтерпретацію. **Вперше** в $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ зареєстровано поверхневий п'єзоелектричний ефект та встановлено його величину, яка

виявилася на порядок меншою, ніж величина об'ємного п'єзоелектричного ефекту.

У п'ятому розділі «П'єзоелектричний та п'єзомагнітоелектричний ефекти в LiCoPO_4 » досліджено п'єзомагнітоелектричні ефекти та п'єзоелектричні характеристики кристалу LiCoPO_4 . Експерименти з акустоелектричної трансформації дозволили вперше експериментально виявити лінійний п'єзомагнітоелектричний ефект, існування якого в антиферромагнетиках, і в LiCoPO_4 в тому числі, було теоретично передбачено більш, ніж півсторіччя тому (G. T. Rado, Phys. Rev. **128**, 2546, 1962).

В парамагнітному стані кристалу виявлено п'єзовідгук на повздовжню пружну деформацію. Показано, що спостережений ефект є класичним об'ємним п'єзоелектричним ефектом. Існування п'єзоелектричного ефекту в парафазі вказує на те, що реальна група симетрії кристалу не містить центру інверсії, тобто не відповідає визначеній на теперішній час просторовій групі $R\bar{3}m$. Таким чином, LiCoPO_4 може бути класифікований як піроелектрик.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

За допомогою акустичних досліджень **виявлено нові** фазові переходи в магнітній підсистемі фероборату з двома типами рідкісноземельних іонів $\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4$. **Встановлено**, що спонтанна та індукована магнітним полем ($H \parallel c$) перебудова магнітної структури проходить шляхом двох ФП. **Вперше** побудовано фазову $H - T$ діаграму сполуки $\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{VO}_3)_4, (H \parallel c)$, складна структура якої характеризує кристал як багатопідгратковий антиферромагнетик.

Вперше виявлено п'єзомагнітоелектричний ефект в антиферромагнетиках в «неп'єзоактивній» конфігурації та дано його феноменологічний опис. Досліджено прояви ефекту в феробораті самарію та визначено константу магнітопружної взаємодії.

Вперше зареєстровано поверхневий п'єзоелектричний ефект в $\text{SmFe}_3(\text{VO}_3)_4$. Встановлено величину ефекту, яка виявилася на порядок меншою, ніж величина об'ємного п'єзоелектричного ефекту.

Вперше експериментально виявлено лінійний п'єзомагнітоелектричний ефект в антиферромагнетиках. Його зареєстровано в монокристалі LiCoPO_4 за допомогою методики акустоелектричної трансформації. Ефект був

передбачений теоретично більш, ніж півсторіччя тому, але всі попередні спроби експериментального підтвердження його існування, зокрема і в LiCoPO_4 , до цього часу були безуспішними.

В парамагнітній фазі монокристала LiCoPO_4 **виявлено** п'єзоелектричний ефект, заборонений операціями симетрії, які визначені на сьогодні для цього кристала. Виходячи з анізотропії виявленої п'єзоелектричної властивості зроблено висновок, що кристал належить до одного з піроелектричних класів - C_{2v} або C_2 .

Завершуючи стислий огляд найбільш важливих результатів, які одержані дисертантом, слід зазначити, що усі вони є **новими, вперше отриманими і достовірними**, узгоджуються між собою та з відповідними літературними експериментальними та теоретичними даними інших авторів.

Достовірність результатів, висновків, положень забезпечується високим рівнем експериментальної техніки і підтверджується гарною відтворюваністю результатів. Усі висновки роботи логічно випливають із матеріалів, які викладено в дисертації та публікаціях у провідних наукових журналах за темою дисертації. Одержані результати та їх інтерпретація неодноразово обговорювалися на міжнародних конференціях та наукових семінарах.

Повнота викладення основних наукових і практичних результатів в опублікованих роботах. Усі основні результати роботи М. П. Колодяжної опубліковано в 4 статтях у провідних фахових виданнях України та за кордоном. Результати досліджень доповідалися й обговорювалися на 13 міжнародних наукових конференціях, опубліковані в збірниках тез цих конференцій і є відомими спеціалістам в галузі фізики твердого тіла.

Разом з тим є деякі зауваження до роботи, зокрема:

1. При викладенні результатів для характеристики п'єзовідгуку в різних досліджуваних об'єктах ($\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ та LiCoPO_4) було використано різні фізичні величини: напруженість електричного поля, поляризація, потенціал, але не наведено коефіцієнти та формули, що дозволяють проводити їх порівняння в системі СІ.

2. В роботі відсутні пояснення, чому в мультифероїку $\text{Nd}_{0,9}\text{Dy}_{0,1}\text{Fe}_3(\text{BO}_3)_4$ не було спроб виявити п'єземагнітоелектричний ефект.

3. На рисунках 1.11, 1.12, 1.14, 1.15, де представлено магнітопольові та температурні залежності швидкості звуку, не вказано, в яких сполуках вони спостерігалися.

Однак, перелічені зауваження не впливають на основні висновки дисертаційної роботи М. П. Колодяжної, їх наукове та практичне значення і на загальну високу оцінку роботи. Без сумніву, вона є завершеною кваліфікаційною науковою працею, що побудована на ретельній і великій за обсягом роботі автора.

Автореферат повно та точно відображує зміст дисертації.

Оцінюючи дисертацію в цілому, необхідно зробити висновок, що за актуальністю тематики, обґрунтованістю і достовірністю висновків і положень, новизною одержаних результатів і за їх науковим та практичним значенням дисертація М.П. Колодяжної цілком задовольняє вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013, а її автор, без сумніву, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 - фізика твердого тіла.

Офіційний опонент
кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
старший науковий співробітник кафедри
фізики металів та напівпровідників
Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут» МОН України

Підпис Шипкової Ірини Геннадіївни засвідчую

