

ВІДГУК  
офіційного опонента

на дисертаційну роботу **КОЛОДЯЖНОЇ Марини Павлівни**

**«МАГНІТОПРУЖНІ ТА П'ЄЗОМАГНІТОЕЛЕКТРИЧНІ ЕФЕКТИ В МУЛЬТИФЕРОЇКАХ  $Nd_{0,9}Dy_{0,1}Fe_3(BO_3)_4$ ,  $SmFe_3(BO_3)_4$  ТА  $LiCoPO_4$ »**

подану до захисту на здобуття наукового ступеня кандидата

фізико-математичних наук

за спеціальністю 01.04.07 – “фізики твердого тіла”

**Актуальність теми дисертації.** Дисертаційна робота М.П. Колодяжної присвячена експериментальному дослідження магнітопружних, п'єзоелектричних, п'єзомагнітоелектричних властивостей монокристалів, що належать до класу мультифероїків - матеріалів із широким діапазоном фізичних властивостей. Мультифероїки є перспективними матеріалами наноелектроніки, вони можуть бути використані в пристроях магнітного запису та збереження інформації, сенсорах і датчиках магнітного поля, системах захисту баз даних, в інтегральній НВЧ-техніці, пристроях збору енергії, а також для деяких медичних застосувань.

До класу мультифероїків відносяться сімейства рідкісноземельних (РЗ) фероборатів  $RFe_3(BO_3)_4$ , (де R=La, Nd, Sm-Ho, Y) та літієвих ортофосфатів зі структурою олівінів  $LiMPO_4$  (M – Co, Ni, Mn, Fe). Природна задача при дослідженні матеріалів, в яких співіснують декілька типів упорядкування – це з'ясування ролі кожної з підсистем (магнітної, електричної та пружної) та їх взаємодії у формуванні певних фізичних властивостей кристалів. Не менш важливим є виявлення механізмів керування цими властивостями та вивчення впливу зовнішніх факторів (наприклад, температури, магнітного або електричного полів і т.д.) на стан кожної з підсистем. Дисертаційна робота М.П. Колодяжної «Магнітопружні та п'єзомагнітоелектричні ефекти в мультифероїках  $Nd_{0,9}Dy_{0,1}Fe_3(BO_3)_4$ ,  $SmFe_3(BO_3)_4$  та  $LiCoPO_4$ » присвячена саме вирішенню окремих з вищезгаданих задач для ряду конкретних сполук, що належать до сімейств РЗ фероборатів та літієвих ортофосфатів. Ця діяльність є безумовно **актуальною** як з фундаментальної, так і з прикладної точки зору. Результати досліджень, що представлені в дисертаційній роботі, є важливими для створення адекватних уявлень про магнітопружні, п'єзоелектричні та п'єзомагнітоелектричні ефекти, насамперед у мультифероїках, і можуть допомогти прогнозувати особливості деяких фізичних характеристик кристалів подібного складу.

Дослідження, які лягли в основу дисертаційної роботи М.П. Колодяжної, виконані в рамках тематичного плану ФТІНТ імені Б. І. Веркіна НАН України, відповідно до відомчих тем: «Спектроскопічні, транспортні, магнітні та пружні дослі-

дження новітніх низьковимірних структур та надпровідних сполук» (номер держреєстрації 0112U002635, термін виконання 2012 – 2016 рр.) та «Функціональні властивості новітніх надпровідниковых сполук і металомісних спін та зарядово-впорядкованих структур» (номер держреєстрації 0117U002294, термін виконання 2017-2021 рр.), що також підтверджує актуальність роботи.

**Відповідність** досліджень дисертаційної роботи М.П. Колодяжної **спеціальності** 01.04.07 — «фізика твердого тіла» не викликає сумнівів, оскільки вони, в першу чергу, спрямовані на з'ясування механізмів взаємодії пружної, електричної та магнітної підсистем у мультифероїках, а саме РЗ боратах та літієвих ортофосфатах перехідних елементів.

Розв'язання задач дисертаційної роботи виявилося можливим завдяки використанню високочутливого добре апробованого імпульсного **методу** одночасного вимірювання фази та амплітуди електромагнітних хвиль, що поширяються в кристалі. Методика дозволяє з високою точністю вимірювати абсолютні значення швидкостей звуку в кристалах; проводити одночасні вимірювання відносних змін швидкості та поглинання звукових хвиль, що розповсюджуються в кристалі. До переваг експериментальної установки слід віднести її здатність вимірювати зміни діелектричної проникності кристалів та проводити експерименти з акустоелектричної трансформації (АЕТ). Слід відзначити, що вказані характеристики досліджуваних сполук можуть бути зареєстровані в залежності від температури (в діапазоні 1,7-300 К) та від зовнішнього магнітного поля (до 5 Тл) та реєструються в режимі реального часу.

**Структура дисертації** досить традиційна. Дисертація містить анотації українською та англійською мовами та складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Основні результати дисертації викладено в 4 статтях, які опубліковано у провідних фахових виданнях та 13 тезах доповідей у збірниках праць міжнародних і вітчизняних конференцій.

У першому розділі надано визначення мультифероїків та проаналізовано особливості ефектів, що в них спостерігаються. В розділі представлено також стислий огляд відомостей стосовно структури та деяких фізичних, в першу чергу магнітних, магнітоелектричних та п'єзоелектричних властивостей рідкісноземельних фероборатів та літієвих ортофосфатів, що належать до класу мультифероїків. Наприкінці розділу сформульовано завдання до дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячено опису експериментальної установки, яка складається з апаратної та кріогенної частин. Варто підкреслити, що використана в роботі установка є багатофункціональною та унікальною за своїми метрологічними характеристиками. Вона дозволяє вимірювати абсолютні значення швидкості звуку в кристалах, відстежувати зміну пружних характеристик (швидкості та поглинання звукової хвилі) під впливом температури та зовнішнього магнітного поля. Крім того, розглянута методика акустоелектричної трансформації, за допомогою якої вдалося

вперше виявити п'єзомагнітоелектричні ефекти в дослідженіх сполуках, про які йдеться в дисертації.

У третьому розділі представлено результати дослідження магнітопружних властивостей бінарного рідкісноземельного фероборату  $Nd_{0,9}Dy_{0,1}Fe_3(BO_3)_4$  при низьких температурах. Найбільш цікавим результатом є встановлення того факту, що в сполуці перебудова магнітної структури під впливом температури та\або магнітного поля здійснюється шляхом як найменш двох фазових перетворень. Важливим виявилося те, що переходи суто магнітної природи призводять до істотних змін пружних характеристик кристалу. Проаналізовано можливу структуру магнітних фаз, які формуються у сполуці спонтанно або викликаються під дією магнітного поля  $H \parallel C_3$ . Також наведено аргументи на користь того, що в кристалі реалізується спонтаний перехід від колінеарної легкоплощинної до несумірної (спіральної) структури. Вперше побудовано та проаналізовано фазову  $H - T$  діаграму для  $H \parallel C_3$ .

У четвертому розділі представлено результати досліджень, в яких експериментально виявлено існування п'єзовідгуку в «неп'єзоактивній» конфігурації в  $SmFe_3(BO_3)_4$ . П'єзовідгук спостерігався як в парафазі, так і в магнітовпорядкованому стані сполуки. Показано, що зареєстрований у парамагнітному стані в  $SmFe_3(BO_3)_4$  п'єзовідгук пов'язаний з поверхневим п'єзоелектричним ефектом. П'єзовідгук, який спостерігався у магнітовпорядкованому стані, обумовлено вкладами від двох ефектів: п'єзомагнітоелектричного, що полягає в спільній дії магнітоелектричного й магнітопружного механізмів, та поверхневого п'єзоефекту. Побудовано феноменологічну теорію, що описує появу п'єзомагнітоелектричного ефекту в «неп'єзоактивній» конфігурації.

Найбільш вагомий, на мій погляд, результат дисертації представлено в її п'ятому розділі. За допомогою методики акустоелектричної трансформації вперше експериментально доведено існування лінійного п'єзомагнітоелектричного ефекту (ПМЕ) в антиферомагнетиках. Цей ефект був теоретично передбачений ще на початку 60-х років минулого сторіччя (G. T. Rado, Phys. Rev. **128**, 2546, 1962), але жодна спроба його зареєструвати не мала успіху. В проведених у роботі експериментах на монокристалі  $LiCoPO_4$  цей ефект проявляється в вигляді п'єзовідгуку на пружну деформацію, що росте лінійно зі збільшенням магнітного поля. Як і очікувалося, ПМЕ існує тільки в магнітовпорядкованому стані кристала.

Кожний розділ закінчується короткими висновками, які базуються на отриманих у розділі результатах. Основні результати всього дисертаційного дослідження сформульовані у розділі «Висновки». Список літературних джерел досить повно відображає сучасний стан проблеми, якій присвячена робота дисертанта.

**Всі основні висновки, які зроблені в дисертації, отримані здобувачем вперше та в повній мірі відображені в опублікованих роботах. Серед основних висновків особливу наукову значущість набувають наступні результати:**

- ✓ За допомогою акустичних досліджень **виявлено нові** фазові переходи в магнітній підсистемі фероборату з двома типами рідкісноземельних іонів  $Nd_{0,9}Dy_{0,1}Fe_3(BO_3)_4$ . **Встановлено**, що спонтанна та індукована магнітним полем ( $H \parallel c$ ) перебудова магнітної структури проходить шляхом двох ФП. **Вперше** побудовано фазову  $H$ - $T$  діаграму сполуки  $Nd_{0,9}Dy_{0,1}Fe_3(BO_3)_4$ , ( $H \parallel c$ ), складна структура якої характеризує кристал як багатопідгратковий антиферомагнетик.
- ✓ **Вперше** виявлено п'єзомагнітоелектричний ефект в антиферомагнетиках 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  $SmFe_3(BO_3)_4$ . Встановлено величину ефекту, яка виявилася на порядок меншою, ніж величина об'ємного п'єзоелектричного ефекту.
- ✓ **Вперше** експериментально виявлено лінійний п'єзомагнітоелектричний ефект в антиферомагнетиках. Його зареєстровано в монокристалі  $LiCoPO_4$  за допомогою методики акустоелектричної трансформації. Ефект був передбачений теоретично більш, ніж півторіччя 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  $C_2$ .

**Достовірність результатів, висновків, положень** забезпечується високим рівнем експериментальної техніки, адекватним вибором теоретичних моделей та підтверджується гарною відтворюваністю результатів. Для забезпечення достовірності зроблених висновків проводилось порівняння даних, отриманих за допомогою інших методик. 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.

**Наукове та практичне значення отриманих результатів.** Основні результати дисертаційної роботи отримані вперше. Отримані в дисертаційній роботі результати носять фундаментальний характер і поширяють уявлення про природу магнітопружних, п'єзоелектричних та п'єзомагнітоелектричних ефектів в мультифероїках з сильним зв'язком між магнітною, електричною та пружною підсистемами. Інформація про значення швидкостей звуку, модулі пружності та п'єзоелектричні модулі фероборату  $Nd_{0,9}Dy_{0,1}Fe_3(BO_3)_4$  може бути використана як довідкова. Встановлені особливості п'єзо- та п'єзомагнітоелектричних характеристик досліджуваних феробратах та  $LiCoPO_4$  вказують на перспективність прикладного використання досліджуваних кристалів.

**Повнота викладення основних наукових і практичних результатів в опублікованих роботах.** Вивчення опублікованих здобувачем наукових робіт дозволяє зробити висновок, що отримані результати та сформульовані в диссертаційній роботі висновки повною мірою опубліковані у 4 статтях наукових журналів, що входять до затвердженого МОН України переліку наукових публікацій, в яких повинні бути опубліковані результати дисертації. Усі статті входять до міжнародних наукометрических баз даних. Результати досліджень доповідалися й обговорювалися на 13 міжнародних наукових конференціях, вони опубліковані в збірниках тез цих конференцій і відомі спеціалістам в галузі фізики твердого тіла.

**Зауваження.** Взагалі дисертаційна робота та автореферат оформлені акуратно, а результати викладено досить чітко. Однак, робота не позбавлена деяких недоліків, зокрема:

1. В другому розділі роботи представлено експериментально визначені абсолютні швидкості звуку монокристалу рідкісноземельного фероборату  $Nd_{0,9}Dy_{0,1}Fe_3(BO_3)_4$  та розраховані пружні константи (п'ять компонент тензору модулів пружності та одна - п'єзоелектричного тензору). Відомо, що повний тензор модулів пружності для кристалів з просторовою групою  $R\bar{3}2$  містить шість ненульових компонент, а п'єзоелектричний тензор - дві. Чому не представлені всі компоненти вказаних тензорів?

2. Аргументи на користь трактовки дисертантою того, що п'єзовідгук, який спостерігався в парафазі самарієвого фероборату в «неп'єзоактивній» конфігурації, пов'язаний із поверхневим п'єзоэффектом достатньо переконливі. Але походження цього ефекту до кінця не з'ясоване, тобто властивий він саме кристалу або викликаний структурною перебудовою поверхневого шару за рахунок термопружної деформації, подібно тому, як це спостерігалося в роботі для кристалу  $LiCoPO_4$ .

3. При викладенні матеріалу за текстом дисертації мають місце назначні описки та стіlistичні помилки.

Зазначені вище зауваження не мають принципового характеру і не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

**Загальний висновок.** Дисертаційна робота М.П. Колодяжної є завершеною науковою працею, яка виконана на високому науковому рівні. Автором отримано нові, науково обґрунтовані результати в області експериментальної фізики твердого тіла, надано їх інтерпретацію та узагальнення. Дисертація написана логічно та зрозумілою науковою мовою і належним чином оформлена. Автореферат повно і точно відображає основний зміст, структуру і висновки дисертації. Тема дисертаційної роботи і суть її наукових результатів повністю відповідають паспорту спеціальності 01.04.07 – фізики твердого тіла.

За актуальністю, новизною, науковим рівнем, об'ємом виконаних досліджень дисертаційна робота М.П. Колодяжної «Магнітопружні та п'єзомагнітоелектричні

ефекти в мультифероїках  $Nd_{0,9}Dy_{0,1}Fe_3(BO_3)_4$ ,  $SmFe_3(BO_3)_4$  та  $LiCoPO_4$ » повністю відповідає всім вимогам, які ставляться МОН України до кандидатських дисертацій, зокрема пунктів 9, 11 та 12 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р., а її автор, Колодяжна Марина Павлівна, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 – фізики твердого тіла.

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,  
завідувач відділу теорії динамічних властивостей складних систем  
Донецького фізико-технічного інституту імені О. О. Галкіна  
Національної академії наук України (м. Київ)

Ю. Г. Пашкевич

Підпис Юрія Георгійовича Пашкевича засвідчує  
Вчений секретар  
Донецького фізико-технічного інституту імені О. О. Галкіна  
Національної академії наук України (м. Київ)  
кандидат технічних наук



В. Ю. Дмитренко