

Відгук кандидатом до роби  
26.04.2022 р. (І.В. Славін)

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Білича Ігоря Вікторовича

на тему «Особливості пружних, магнітопружних та п'єзоелектрических  
властивостей магнітоелектриків  $TbFe_3(BO_3)_4$ ,  $HoFe_3(BO_3)_4$  та  $HoAl_3(BO_3)_4$   
при низьких температурах»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії  
з галузі знань 10 «Природничі науки»  
за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»



**Актуальність теми дисертаційної роботи.**

Дисертаційна робота Білича І.В. присвячена вирішенню наукової задачі – з'ясуванню зв'язку пружних, магнітопружних та п'єзоелектрических ефектів в  $TbFe_3(BO_3)_4$ ,  $HoFe_3(BO_3)_4$  та  $HoAl_3(BO_3)_4$ , що належать до сімейства рідкісноземельних боратів. Загалом це сімейство належить до широкого матеріалів, так званих мультифероїків, в яких співіснують та взаємодіють один з одним сегнетоелектричний, магнітний та/або сегнетоеластичний типи впорядкування. Такі сполуки викликають підвищений інтерес, який стимулюється пошуком нових багатофункціональних матеріалів із заданими властивостями та можливістю впливу електричним полем на магнітне впорядкування та навпаки – магнітним полем на електричну поляризацію. Таким чином тема дисертації є безсумнівно, актуальною як для фундаментальної фізики, так і в прикладному аспекті..

**Обґрунтованість і достовірність наукових результатів**, наведених у дисертації, забезпечується коректністю постановки мети і завдань дослідження, високим рівнем експериментальної техніки та доброю відтворюваністю результатів. Всі висновки роботи випливають із матеріалів, які викладено в дисертації та публікаціях у рецензованих фахових виданнях за темою дисертації. Отримані результати апробовані на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях.

**Наукова новизна отриманих результатів.**

В ході виконання досліджень автором було отримано ряд наукових результатів, які мають необхідні ознаки наукової новизни. Серед них:

Вперше експериментально з високою точністю (похибка  $\sim 1\div 3\%$ ) отримані значення швидкостей звуку в монокристалах фероборатів  $TbFe_3(BO_3)_4$ ,  $HoFe_3(BO_3)_4$  та алюмоборату

$\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ . На основі отриманих експериментальних даних розраховано основні компоненти тензорів модулів пружності та п'єзоелектричних тензорів досліджуваних сполук.

Вперше експериментально виявлено значні аномалії пружних властивостей монокристала  $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$ , спричинені фазовим переходом першого роду, індукованим магнітним полем, спрямованим уздовж легкої осі анізотропії.

Вперше виявлено та досліджено магнітоп'єзоелектричний ефект в антиферомагнітному стані монокристала  $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ . Визначено константи магнітоелектричної та магнітопружної взаємодій. Виявлено, що параметр магнітопружної взаємодії прямує до нуля при  $T \sim 15\text{-}20\text{ K}$ , що є однією з причин виникнення спіральної магнітної структури.

Вперше, на прикладі кристалу  $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ , виявлено суттєве збільшення величини п'єзоелектричного ефекту в парамагнетиках, що є наслідком впливу деформації на траєкторію руху директора нематоподібної парамагнітної фази.

### **Наукова і практична цінність отриманих результатів.**

Автором були отримані результати, що носять фундаментальний характер і сприяють розширенню розуміння природи пружних, магнітопружних та п'єзоелектричних ефектів у кристалах із сильним взаємозв'язком між кількома їх підсистемами – магнітною, електронною та пружною, який призводить до широкого спектру фізичних ефектів. Це важливо для прогнозування деяких фізичних характеристик кристалів не тільки досліджуваного сімейства, але й споріднених сполук. Зокрема, матеріали з магнітоелектричним ефектом можуть стати основою для нового класу електронних пристроїв в галузі спінtronіки, де використовується можливість керування електричним станом за допомогою магнітного поля і навпаки.

Отримані дані стосовно швидкостей звуку, модулів пружності та п'єзоелектричних модулів рідкісноземельних боратів є важливою довідковою інформацією. У досліджуваних сполуках були виявлені високі значення п'єзоелектричних модулів, що відкриває шлях до їх практичного застосування у майбутньому.

### **Повнота викладу у наукових публікаціях, зарахованих за темою дисертації.**

За результатами досліджень опубліковано 14 наукових праць, у тому числі: 4 статті у провідних фахових виданнях, з яких 3 статті у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України та 1 стаття в періодичному науковому виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку. Всі журнали проіндексовані у міжнародних наукометрических базах Scopus та Web of Science Core Collection; 10 тез доповідей опубліковано в збірниках праць міжнародних і вітчизняних конференцій.

## **Структура, оцінка мови, стилю та оформлення дисертації.**

Дисертація складається з анотації, вступу, шести розділів, висновків до кожного з розділів, списку використаних джерел та додатків.

Кожен розділ структурований і завершується висновками.

Анотація дисертації наведена українською та англійською мовами і повністю відображує зміст та основні наукові результати роботи.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами, сформульовано мету та завдання досліджень, охарактеризовано наукову новизну і практичне значення результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, описано структуру та обсяг дисертації.

У **першому** розділі проаналізовано літературні дані щодо структури та ряду фізичних властивостей об'єктів, що вивчалися в роботі. Прояснено поняття «мультифороїк» та магнітоелектричний ефект. Наведено інформацію про кристалічну структуру сполук, що належать до сімейства рідкісноземельних боратів, та представлено дані стосовно особливостей їх магнітних, магнітопружних та магнітоелектричних характеристик.

**Другий** розділ присвячено опису методу одночасного вимірювання відносних змін швидкості й поглинання звуку, наведено методику вимірювання абсолютнох значень швидкості звуку. Також дано опис методики нерезонансної акустоелектричної трансформації, за допомогою якої вивчалися п'єзоелектричні та діелектричні характеристики досліджуваних монокристалів. Описано конструкцію кріогенного устаткування, термометрії та процедури підготовки експериментальних зразків.

У **третьому** розділі наведені результати точних (1÷3 %) вимірів швидкостей звуку та розрахунку компонент модулів пружності та п'єзоелектричного тензора в монокристалах  $TbFe_3(BO_3)_4$ ,  $HoFe_3(BO_3)_4$  і  $HoAl_3(BO_3)_4$ . Виявлено, що величини п'єзоелектричної взаємодії в цих монокристалах є доволі високими, що дає можливість їх рекомендувати для практичного застосування.

**Четвертий** розділ присвячено дослідженням поведінки пружних та магнітопружних характеристик монокристала фероборату тербію поблизу структурного та магнітних фазових перетворень. Були виявлені істотні аномалії у магнітопольових залежностях швидкостей поперечного звуку та його поглинання, обумовлені фазовим переходом, індукованим зовнішнім магнітним полем. Надано феноменологічну модель, що якісно описує поведінку пружних характеристик під час цієї трансформації. Визначено критичний кут між напрямком магнітного поля та віссю легкого намагнічування кристалу, при якому спін-фlop переходу першого роду трансформується в переход другого роду.

**П'ятий** розділ містить результати низькотемпературних дослідження пружних та п'єзоелектричних ефектів у феробораті голмію. Вперше в сполучі був виявлен

магнітоп'зоелектричний ефект, тобто істотні зміни п'зоелектричного модуля при переході сполуки в антиферомагнітний стан. Досліджено спін-залежні вклади в швидкість звуку, діелектричну проникність та п'зоефект. Виявлено зміну знаку константи магнітопружної взаємодії при  $T \sim 15\text{--}20$  К, що ймовірно приводить до появи спіральної магнітної структури. Для спостережуваних ефектів запропонована феноменологічна інтерпретація.

У **шостому** розділі представлені результати експериментальних досліджень магнітопружних, магнітодіелектричних та магнітоп'зоелектричних ефектів у гольмієвому алюмобораті. Спостерігається гігантське перенормування п'зоелектричного ефекту при низьких температурах, що пов'язується з впливом деформації на траєкторію руху директора нематоподібної парамагнітної фази. Проведені дослідження змін швидкості та вивчено процес пом'якшення  $C_{44}$  моди в субкельвіновій області температур.

Завершується робота **загальними висновками, списком використаних джерел та додатками.**

У додатках наведено список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

Стиль викладення результатів дослідження забезпечує доступність їх сприйняття.

Таким чином, можна констатувати, що дисертаційна робота є завершеною кваліфікаційною роботою, яка виконана здобувачем особисто.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи:**

1. У розділі, присвяченому дослідженням алюмоборату гольмію, автор застосовує термін "анізотропний парамагнетик" визначений як «нематопіdobна» структура, а коефіцієнти в розкладанні вільної енергії по мультиплетах іона гольмія визначені як «прискорення» переміщення рівнів енергії під дією зовнішнього поля. Загалом для виявлення анізотропних властивостей парамагнітної фази простого урахування наявності декількох рівнів з енергією порядку температури експерименту явно недостатньо. На мій погляд потрібно також ураховувати g-фактори цих рівнів.

2. Автором наведені результати вимірювання змін швидкості  $C_{44}$  моди в алюмобораті гольмію, що були отримані на різних зразках, які значно відрізняються за масштабом. Але ці вимірювання виконані для різних температурних інтервалів, і автор намагається їх «зшити» з використанням деякого масштабного множника, що характеризує відмінність дефектного стану цих зразків. Процедура, загально кажучи, є законною, але для більшої переконливості варто було б провести вимірювання і відповідне порівняння вимірюваних параметрів в співпадаючих температурних інтервалах.

В тексті є також невдалі вирази та незначні друкарські описки.

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

Науковий рівень дисертації є високим, отримані результати не викликають сумнівів щодо їх достовірності, а висновки роботи є обґрунтованими.

### **Загальний висновок.**

Дисертаційна робота Ігоря Вікторовича Білича «Особливості пружних, магнітопружних та п'єзоелектричних властивостей магнітоелектриків  $TbFe_3(BO_3)_4$ ,  $HoFe_3(BO_3)_4$  та  $HoAl_3(BO_3)_4$  при низьких температурах» 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 хорошою науковою мовою і оформлена відповідно існуючим вимогам.

Вважаю, що дисертаційна робота Білича І.В. «Особливості пружних, магнітопружних та п'єзоелектричних властивостей магнітоелектриків  $TbFe_3(BO_3)_4$ ,  $HoFe_3(BO_3)_4$  та  $HoAl_3(BO_3)_4$  при низьких температурах» відповідає спеціальності 104 «Фізика та астрономія» та вимогам Наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації», та вимогам «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167, зі змінами від 21 жовтня 2020 р. № 979, а її автор, Білич Ігор Вікторович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

доктор фізико-математичних наук, професор,

завідувач відділу теорії динамічних

властивостей складних систем

Донецького фізико-технічного інституту

імені О.О. Галкіна НАН України, м. Київ

Ю.Г. Пашкевич

Підпис Ю.Г. Пашкевича засвідчує

Вчений секретар

Донецького фізико-технічного інституту

імені О.О. Галкіна НАН України, м. Київ

кандидат технічних наук



В.Ю. Дмитренко