

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації Білича Ігоря Вікторовича на тему «*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*» на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

1. Дисертація І.В. 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*» на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» є цілісною та завершеною науковою працею, яка виконана на високому науковому рівні.

Дисертацію виконано у відділі магнітних і пружних властивостей твердих тіл Фізико-технічного інституту низьких температур імені Б. І. Веркіна НАН України.

Тему дисертаційної роботи І. В. Білича затверджено на засіданні Вченої ради ФТІНТ імені Б. І. Веркіна НАН України (протокол №9 від 13 грудня 2017 року).

Науковим керівником І. В. Білича призначено старшого наукового співробітника відділу магнітних і пружних властивостей твердих тіл ФТІНТ імені Б. І. Веркіна НАН України, к.ф.-м.н., с.н.с. Г. А. Звягіну (наказ директора ФТІНТ імені Б. І. Веркіна НАН України № 90-ОД від 15 вересня 2017 року).

Дослідження, що склали дисертаційну роботу, проводились в рамках тематичного плану інституту відповідно до відомчих тем: «Структурні, транспортні та магнітні дослідження низьковимірних провідників та мезоскопічних композитних структур при низьких температурах» (номер держреєстрації 0107U0009501, термін виконання 2007-2011 рр.), «Спектроскопічні, транспортні, магнітні та пружні дослідження новітніх низьковимірних структур та надпровідних сполук» (номер держреєстрації 0112U002635, термін виконання 2012-2016 рр.), «Функціональні властивості новітніх надпровідних сполук і металовмісних спін та зарядово-впорядкованих структур» (номер держреєстрації 0117U002294, термін виконання 2017-2021 рр.).

2. Актуальність теми дослідження.

Останнім часом увага наукової спільноти приділяється пошуку та синтезу нових функціональних матеріалів із заданими властивостями та всебічному дослідженню їх фізичних характеристик. До таких матеріалів слід віднести кристали із сильним взаємозв'язком між кількома їх підсистемами – магнітною, електронною та пружною, який призводить до широкого спектру фізичних ефектів, в першу чергу магнітоелектричних та магнітопружних. Зокрема, матеріали з магнітоелектричним ефектом можуть стати основою для нового класу електронних пристроїв в галузі спінтроники, де використовується

можливість керування електричним станом за допомогою магнітного поля і навпаки.

Рідкісноземельні (РЗ) борати, до яких належать кристали, що вивчалися у дисертаційній роботі, зараз активно досліджуються, оскільки демонструють різноманітні фізичні ефекти, в тому числі й магнітоелектричні. Вони є зручними модельними об'єктами для дослідження механізмів, які призводять до сильного магнітоелектричного зв'язку, а також пошуку нових ефектів, що викликаються суттєвою взаємодією між магнітною, електричною та пружною підсистемами кристала.

Дослідження пружних, магнітопружних та п'єзоелектричних властивостей кристалів сімейства РЗ боратів, зокрема фероборатів тербію, гольмію та алюмоборату гольмію, мають важливе значення як для фундаментальної фізики, так і для можливого прикладного використання. Розуміння природи знайдених в роботі ефектів допоможе прогнозувати магнітопружні, п'єзоелектричні та магнітоп'єзоелектричні властивості кристалів, що мають в своєму складі магнітні іони підгрупи заліза та рідкісноземельні іони.

3. Мета дисертаційної роботи.

Метою даної роботи є виявлення пружних, магнітопружних та п'єзоелектричних ефектів та з'ясування їх механізмів в монокристалах РЗ боратів $TbFe_3(BO_3)_4$, $HoFe_3(BO_3)_4$ та алюмоборату $HoAl_3(BO_3)_4$ при низьких температурах. В результаті виконання роботи поставлену мету було досягнуто.

4. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.

У дисертаційній роботі вперше отримано наступні результати:

– 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 $HoAl_3(BO_3)_4$. Розраховано основні компоненти тензорів модулів пружності та п'єзоелектричних тензорів досліджуваних сполук.

– Вперше експериментально виявлено значні аномалії пружних властивостей монокристала $TbFe_3(BO_3)_4$, спричинені фазовим переходом першого роду, індукованим магнітним полем, спрямованим уздовж легкої осі анізотропії.

– Вперше виявлено та досліджено магнітоп'єзоелектричний ефект в антиферомагнітному стані монокристала $HoFe_3(BO_3)_4$. Визначено константи магнітоелектричної та магнітопружної взаємодій. Виявлено, що параметр магнітопружної взаємодії прямує до нуля при $T \sim 15-20$ К, що є однією з причин виникнення спіральної магнітної структури.

– Вперше, на прикладі кристала $HoAl_3(BO_3)_4$, виявлено суттєве збільшення величини п'єзоелектричного ефекту в парамагнетиках, що є наслідком впливу деформації на траєкторію руху директора нематоподібної парамагнітної фази.

5. Достовірність результатів та обґрунтованість положень і висновків дисертаційної роботи забезпечується високим рівнем проведених експериментів та підтверджується узгодженням частини отриманих експериментальних результатів з відомими результатами інших авторів та існуючими загальними теоретичними уявленнями.

Наукові положення, що виносяться на захист, логічно випливають із матеріалів, викладених в дисертації та опублікованих у наукових фахових журналах, які включено до міжнародних наукометричних баз.

Всі основні результати дисертації та їх інтерпретація неодноразово обговорювалися на вітчизняних та міжнародних конференціях і наукових семінарах.

6. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача в публікації.

Основні результати дисертації опубліковано у 14 наукових працях:

- 4 статті, з яких 3 статті у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України з присвоєнням категорії «А» та 1 стаття в періодичному науковому виданні держави, яка входить до Організації економічного співробітництва та розвитку. Всі журнали проіндексовані у базах даних Scopus та Web of Science Core Collection.
- 10 тез доповідей у збірниках праць міжнародних і вітчизняних конференцій, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертаційної роботи були отримані особисто дисертантом або за його безпосередньої участі. Наукові статті [1-4], в яких представлені основні результати дисертаційної роботи, були виконані здобувачем у співавторстві. В роботах [1-4] автор брав активну участь у підготовці зразків до вимірювань, плануванні, проведенні експериментів, опрацюванні експериментальних даних. Автор особисто проводив експерименти стосовно відпрацювання методу акустоелектричної трансформації, вперше запропонованого в роботі [2]. Аналіз та обговорення отриманих результатів, формулювання основних наукових висновків, написання статей здійснювалося разом з іншими співавторами та науковим керівником. Основні результати роботи були особисто представлені дисертантом у вигляді доповідей на наукових конференціях, наукових радах та семінарах. Таким чином, особистий внесок дисертанта є визначальним.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. G.A. Zvyagina, K.R. Zhekov, L.N. Bezmaternykh, I.A. Gudim, **I.V. Bilych**, and A.A. Zvyagin, "Magnetoelastic effects in terbium ferroborate", *Low Temp. Phys.*, vol. 34, no. 11, pp. 901-908, Nov. 2008.
2. T.N. Gaydamak, I.A. Gudim, G.A. Zvyagina, **I.V. Bilych**, N.G. Burma, K.R. Zhekov, and V.D. Fil, "Magnetopiezoelectric effect and magnetocapacitance

- in $\text{SmFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ”, *Phys. Rev. B*, vol. 92, no. 21, pp. 214428-1-214428-7, Dec. 2015.
3. L.S. Kolodyazhnaya, G.A. Zvyagina, **I.V. Bilych**, K.R. Zhekov, N.G. Burma, V.D. Fil, and I.A. Gudim, “Magnetocapacitance, magnetoelasticity, and magnetopiezoelectric effect in $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ”, *Low Temp. Phys.*, vol. 44, no. 12, pp. 1341-1347, Dec. 2018.
 4. **I.V. Bilych**, M.P. Kolodyazhnaya, K.R. Zhekov, G.A. Zvyagina, V.D. Fil, and I.A. Gudim, “Elastic, magnetoelastic, magnetopiezoelectric, and magnetodielectric characteristics of $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ”, *Low Temp. Phys.*, vol. 46, no. 9, pp. 923-931, Sept. 2020.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5. К.Р. Жеков, **И.В. Билыч**, Т.Н. Гайдамак, и Л.Н. Безматерных, “Упругие свойства $\text{TbFe}_3(\text{BO}_3)_4$ в окрестности структурного и магнитного фазовых переходов”, тези доповідей на *Всеукраїнську наукову конференцію молодих вчених “Фізика низьких температур (КМВ-ФНТ-2008)”*, 20-23 травня 2008 р., Харків, Україна, с. 140.
6. Г.А. Звягіна, **И.В. Билыч**, К.Р. Жеков, А.А. Звягін, та І.А. Гудим, “Магнітопружні ефекти в фероборатах тербія і празеодиму”, тези доповідей на *Міжнародну наукову конференцію студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика-2010”*, 19-21 травня 2010 р., Львів, Україна, с. А17.
7. В.Д. Филь, Т.Н. Гайдамак, Г.А. Звягіна, І.А. Гудим, **И.В. Билыч**, К.Р. Жеков, и М.П. Колодяжная, “Магнітопъезоелектрический эффект и модули упругости в самариевом ферроборате” в *Матеріали XII Міжн. наук. конф. «Фізичні явища в твердих тілах»*, 1-4 грудня 2015 р, Харків, Україна, с. 69.
8. T.N. Gaydamak, G.A. Zvyagina, **I.V. Bilych**, K.R. Zhekov, and I.A. Gudim “Magnetopiezoelectric effect in Sm and Nd ferroboraes” in *Book of abstracts VIII Int. Conf. for Professionals and Young Scientists “Low Temperature Physics”*, May 29 – June 2, 2017, Kharkiv, Ukraine, p. 84.
9. M.P. Kolodyazhnaya, I.V. Bilych, K.R. Zhekov, G.A. Zvyagina, I.A. Gudim, and V.D. Fil, “Magnetocapacitance and spin depended piezoeffect in $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ” in *Book of abstracts IX Int. Conf. for Professionals and Young Scientists “Low Temperature Physics”*, June 4-8, 2018, Kharkiv, Ukraine, p. 78.
10. M.P. Kolodyazhnaya, I.V. Bilych, K.R. Zhekov, G.A. Zvyagina, I.A. Gudim, and V.D. Fil, “Elastic, piezo and magnetoelectric properties of $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ” in *Book of abstracts Anniversary X Int. Conf. for Professionals and Young Scientists “Low Temperature Physics”*, June 3-7, 2019, Kharkiv, Ukraine, p. 74.
11. M.P. Kolodyazhnaya, **I.V. Bilych**, K.R. Zhekov, G.A. Zvyagina, I.A. Gudim, N.G. Burma, and V.D. Fil, “Magnetoelasticity and magnetopiezoelectric effect in $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ ” in *Book of abstracts International Scientific and Practical Conference «MFPA-2019»*, September 24-27, 2019, Vitebsk, Belarus, p. 5.

12. **І.В. Білич**, К.Р. Жеков, М.Г. Бурма, М.П. Колодяжна, Г.А. Звягіна, В.Д. Філь, та І.А. Гудим, “Магнітопружні та магнітоп’єзоелектричні властивості кристалів $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ та $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ” в *Матеріали XIV Міжн. наук. конф. «Фізичні явища в твердих тілах»*, 3-5 грудня 2019 р, Харків, Україна, с. 70.
13. **I.V. Bilych**, M.P. Kolodyazhnaya, K.R. Zhekov, G.A. Zvyagina, V.D. Fil, I.A. Gudim, D.I. Gorbunov, and S.V. Zherlitsyn, “Manifestation of the dynamics of the nematic-like phase of holmium aluminum borate in its acoustic and dielectric characteristic” in *Book of abstracts International Advanced Study Conference on “Condensed Matter & Low Temperature Physics 2020 (CM & LTP 2020)”*, June 8-14, 2020, Kharkiv, Ukraine, p. 60.
14. **I.V. Bilych**, G.A. Zvyagina, M.P. Kolodyazhnaya, K.R. Zhekov, V.D. Fil, I.A. Gudim, “Elastic, magnetoelastic, magnetopiezoelectric and magnetodielectric characteristics of $\text{HoFe}_3(\text{BO}_3)_4$ and $\text{HoAl}_3(\text{BO}_3)_4$ multiferroics” in *Book of abstracts International Conference “Modern Problems of Solid State and Statistical Physics”*, September 14-15, 2020, Kyiv, Ukraine, p. 56.

7. Апробація матеріалів дисертації.

Основні результати дисертації доповідались та обговорювались на міжнародних та вітчизняних конференціях:

1. Всеукраїнська наукова конференція молодих вчених “Фізика Низьких Температур” (КМВ–ФНТ–2008) (20-23 травня 2008, Харків, Україна);
2. Міжнародна наукова конференція студентів і молодих науковців з теоретичної та експериментальної фізики “Еврика-2010” (19-21 травня 2010, Львів, Україна);
3. XII Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах» (1-4 грудня 2015, Харків, Україна);
4. VIII International Conference for Professionals and Young Scientists “Low Temperature Physics” (ICPYS–LTP–2017) (May 29 – June 2, 2017, Kharkiv, Ukraine);
5. IX International Conference for Professionals and Young Scientists “Low Temperature Physics” (ICPYS–LTP–2018) (June 4-8, 2018, Kharkiv, Ukraine);
6. Anniversary X International Conference for Professionals and Young Scientists “Low Temperature Physics” (ICPYS–LTP–2019) (June 3-7, 2019, Kharkiv, Ukraine);
7. International Scientific and Practical Conference «MFPA-2019» (September 24-27, 2019, Vitebsk, Belarus);
8. XIV Міжнародна наукова конференція «Фізичні явища в твердих тілах», (3-5 грудня 2019 р, Харків, Україна);
9. International Advanced Study Conference on Condensed Matter & Low Temperature Physics 2020 (CM & LTP 2020) (June 8-14, 2020, Kharkiv, Ukraine);
10. International Conference “Modern Problems of Solid State and Statistical Physics” (September 14-15, 2020, Kyiv, Ukraine).

8. Виконані в роботі дослідження відповідають напряму наукового дослідження освітньо-наукової програми ФТІНТ імені Б. І. Веркіна НАН України зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія», за якою дисертація подається до захисту. Отримані результати мають важливе наукове значення тому, що містять відсутню на даний час інформацію про властивості пружної підсистеми у важливих на сьогодні представниках магнітоелектриків – кристалів сімейства рідкісноземельних боратів. Результати досліджень, які представлені в дисертаційній роботі, доповнюють і розширюють існуючі уявлення про природу магнітопружних, п'єзоелектричних та магнітоп'єзоелектричних ефектів у РЗ боратах. Встановлено, що досліджувані сполуки характеризуються сильним зв'язком між електронною, магнітною та фононною підсистемами, а магнітопружна та магнітоелектрична взаємодії вносять суттєві внески в енергію досліджених кристалів.

9. Практичне та теоретичне значення дисертації.

В ході виконання дисертаційної роботи були отримані результати, що носять фундаментальний характер і сприяють розширенню існуючих уявлень про природу пружних, магнітопружних, та п'єзоелектричних ефектів у магнітоелектриках. Отримані дані щодо швидкостей звуку, модулів пружності та п'єзоелектричних модулів рідкісноземельних боратів можуть бути використані як довідкові. Виявлені достатньо високі значення п'єзоелектричних модулів у досліджуваних сполуках вказують на те, що кристали боратів є сильними п'єзоелектриками й тому можуть бути рекомендовані для практичного застосування. Результати досліджень магнітних фазових переходів у фероборатах можуть бути використані при постановці нових експериментів для вивчення переорієнтаційних фазових переходів у магнітних сполуках, що містять рідкісноземельні іони.

Результати дисертації можуть бути рекомендовані до використання науковим організаціям, де вивчають пружні, магнітопружні, магнітні та п'єзоелектричні властивості систем із сильним зв'язком між електронною, магнітною та фононною підсистемами, зокрема в Інституті фізики НАН України (м. Київ), в Інституті магнетизму НАН України та МОН України (м. Київ), в ФТІНТ ім. Б. І. Веркіна НАН України (м. Харків), в Національному технічному університеті «Харківський Політехнічний Інститут» МОН України (м. Харків), в Харківському національному університеті імені В. Н. Каразіна МОН України (м. Харків), Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, в Донецькому фізико-технічному інституті імені О. О. Галкіна НАН України (м. Київ).

10. Рекомендація дисертації до захисту.

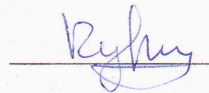
Дисертаційна робота Білича Ігоря Вікторовича «Особливості пружних, магнітопружних та п'єзоелектричних властивостей магнітоелектриків $TbFe_3(BO_3)_4$, $HoFe_3(BO_3)_4$ та $HoAl_3(BO_3)_4$ при низьких температурах», яка подана на здобуття ступеня доктора філософії, є завершеною науковою працею.

За своїм науковим рівнем та практичною цінністю, змістом та оформленням, робота повністю відповідає вимогам пп. 9, 10, 11 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 6 березня 2019 р. № 167 зі змінами від 21 жовтня 2020 р. № 979, та відповідає напряму наукового дослідження освітньо-наукової програми ФТІНТ імені Б. І. Веркіна НАН України зі спеціальності 104 «Фізика та астрономія».

Враховуючи високий рівень виконаних досліджень, а також наукову новизну результатів дисертації та їх наукове і практичне значення, **ми рекомендуємо** дисертаційну роботу Білича Ігоря Вікторовича «Особливості пружних, магнітопружних та п'єзоелектричних властивостей магнітоелектриків $TbFe_3(VO_3)_4$, $HoFe_3(VO_3)_4$ та $HoAl_3(VO_3)_4$ при низьких температурах» до захисту на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 «Природничі науки».

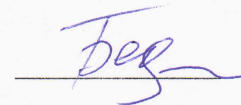
Рецензенти:

завідувач відділу магнетизму
ФТІНТ імені Б. І. Веркіна НАН України,
с.н.с., д.ф.-м.н.



В. С. Курносов

старший науковий співробітник
відділу магнетизму
ФТІНТ імені Б. І. Веркіна НАН України,
ст. досл., к.ф.-м.н.



В. А. Бедарев

